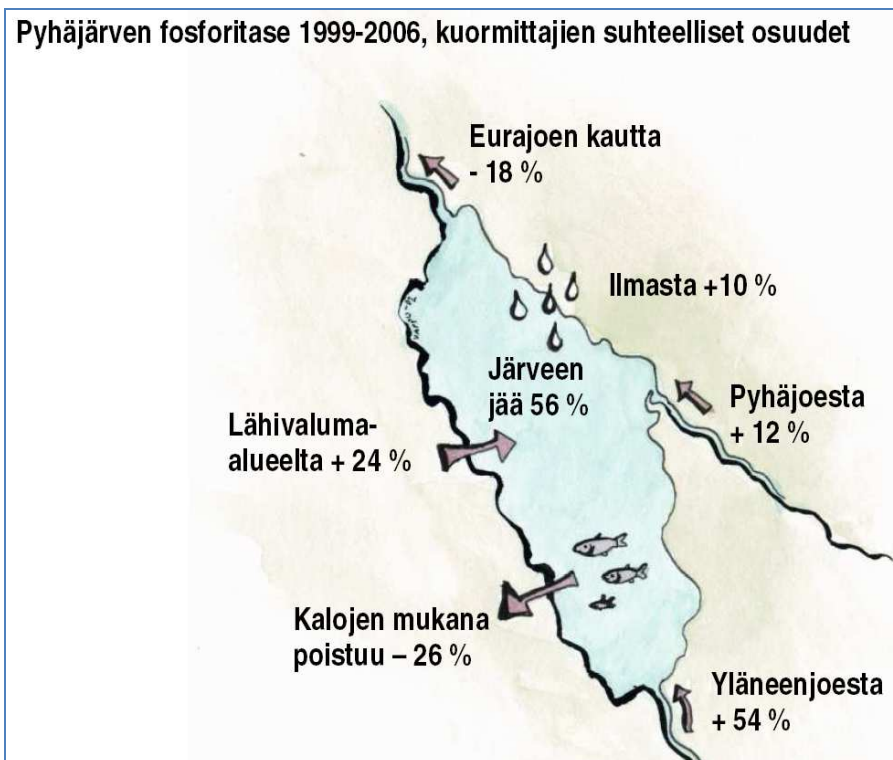


## Sisäkuormitteiset järvemme

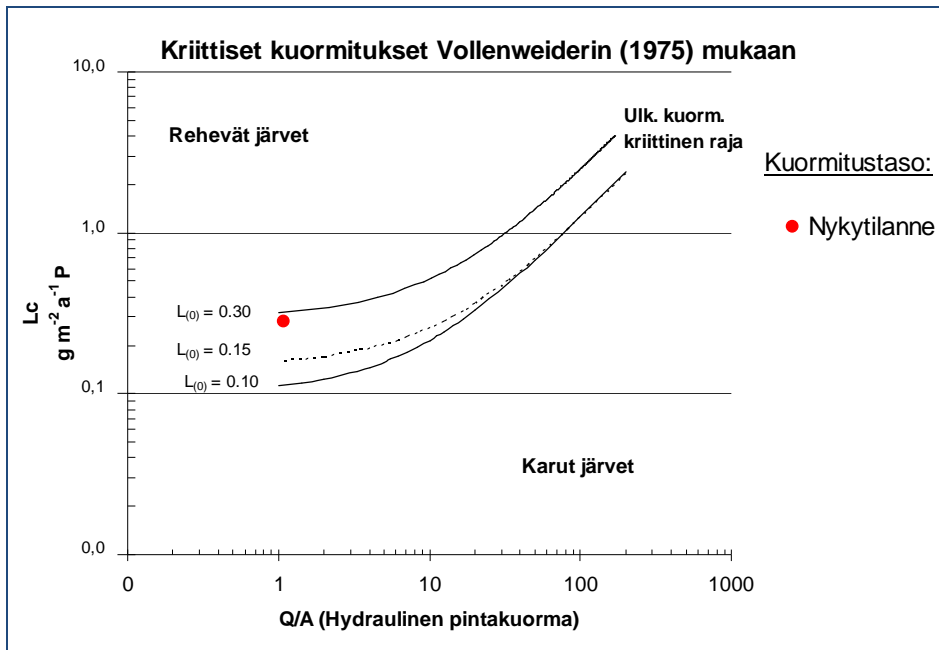
Kun puhutaan vesistökuormituksesta, niin sillä tarkoitetaan yleensä vain ulkoista kuormitusta, ja samalla unohdetaan, että monissa järvissä vallitsee myös merkittävä sisäinen kuormitus, joka vaikuttaa järvien tilaan. Lyhyesti sisäinen kuormitus on ravinteiden kiertoa veden ja sedimentin välillä.

Sisäjärvissä perustuotannon minimitekijä on yleensä fosfori. Siten fosforikuormitus lisää yleensä järven rehevöitymistä. Ulkoisena kuormituksena fosforia järveen tulee sen valuma-alueelta ja ilmasta (kuva 1). Järvi pystyy ottamaan vastaan tietyn määrän fosforia ilman, että järvi rehevöityy. Ylenmääräinen ulkoa tuleva fosforikuormitus kuitenkin lisää järven perustuotantoa eli rehevöittää järveä.



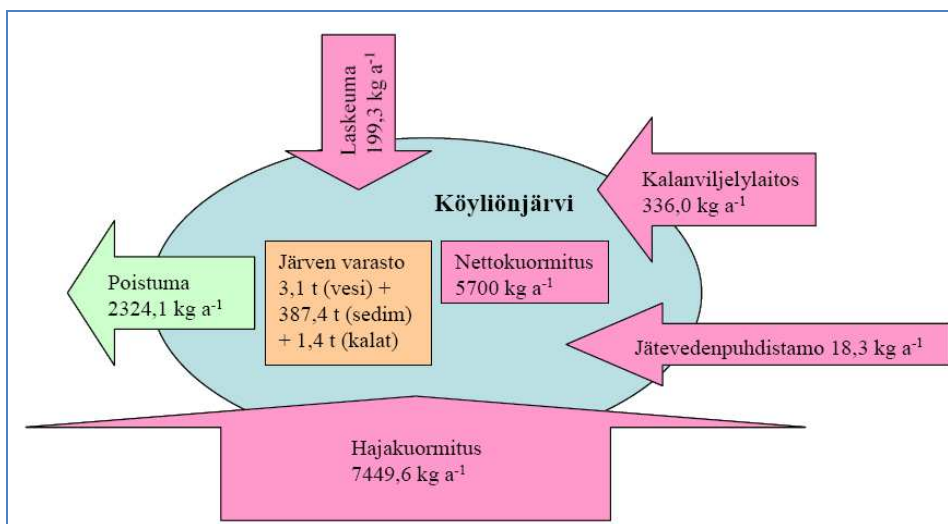
Kuva 1 Säskylän Pyjärveen tuleva ja sieltä poistuva fosforikuormitusosuudet (Pyhäjärven suojeleuohjelma 2007-2013).

Järven sietokykyä eli kriittistä ulkoista kuormitusta on yleensä arvioitu Vollenweiderin (1976) kehittämällä kaavalla (kuva 2). Eri tyyppiset järvet pystyvät ottamaan vastaan suhteellisesti eri suuren ulkoisen kuormituksen ilman, että ulkoisen kuormituksen kriittinen raja ylittyy.



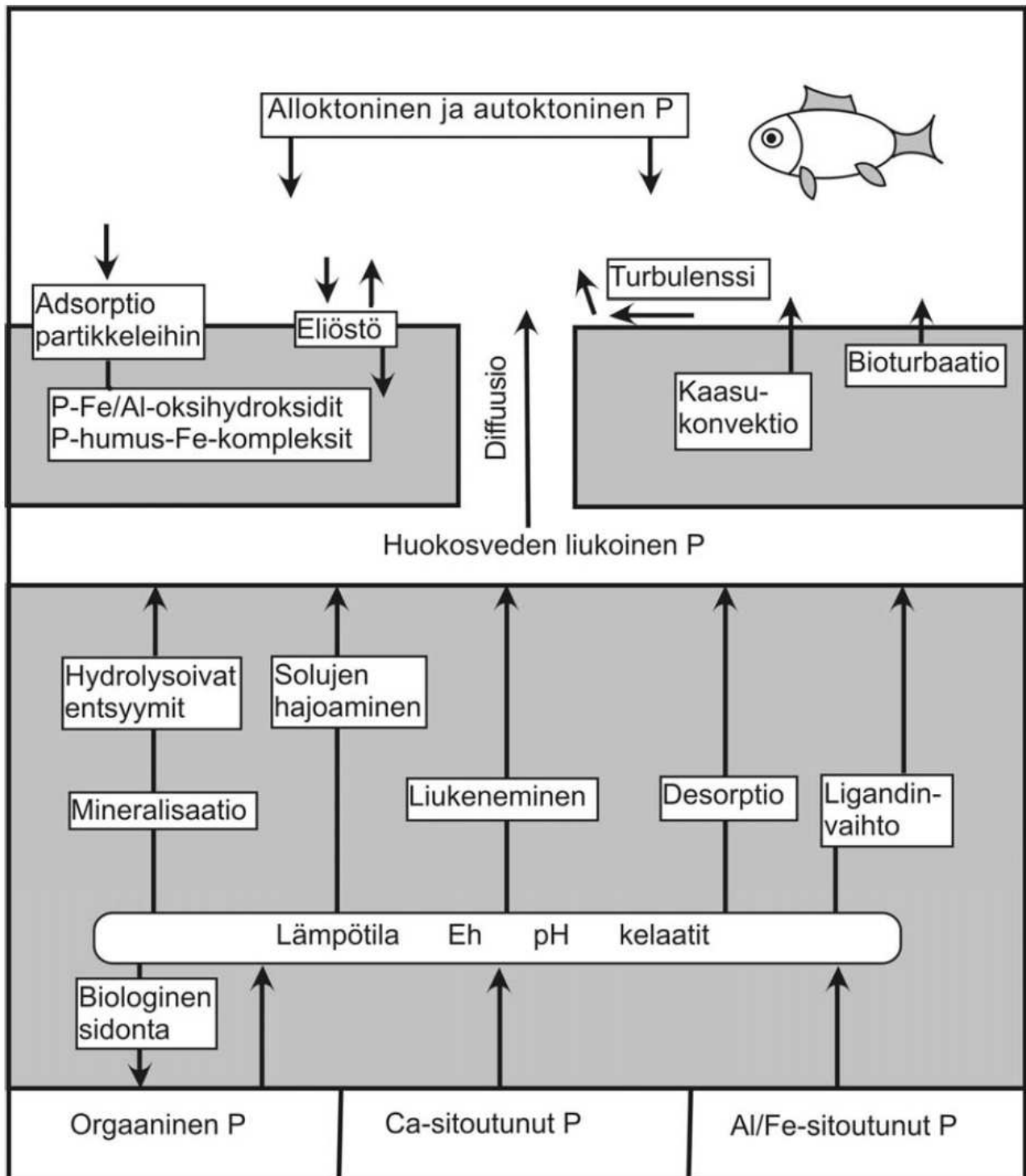
**Kuva 2.** Erään matalan Etelä-Suomen järven fosforikuormituksen sietolaskelma Vollenweiderin (1976) mukaan. Ulkoinen kuormitus on kriittisen ylempään rajan tuntumassa.

Järven sisäisellä fosforikuormituksella tarkoitetaan sitä fosforia, joka vapautuu eri tavoin järven pohjasedimentistä perustuotannon käyttöön. Järven sedimenttiin voi olla varastoinut huomattavat määrät fosforia. Esimerkiksi Köyliönjärvessä sedimentin fosforivarasto on yli satakertainen veden fosforivarastoon verrattuna (kuva 3).



**Kuva 3.** Köyliönjärven fosforitase vuonna 1991 (Piirretty Wright 1993 pohjalta, Paloheimo 2007). Huom. Järven varasto on tonneja ja muut kiloja.

Järven sisäiseen kuormitukseen vaikuttavat järven fysikaaliset, kemialliset ja biologiset ominaisuudet ja tekijät. Järven sisäinen kuormituksen aikana sedimenttiin jo sitoutuneita ravinteita vapautuu uudelleen yläpuoliseen veteen (kuva 4). Sedimentin ja veden välinen ainevirta on kaksisuuntainen.



**Kuva 4.** Fosforin kierto veden ja sedimentin välillä. Muunneltu Forsbergin (1989) ja Lappalainen & Matinvesi (1990) mukaan (Forsell 2005).

Pääosin kevään ja syksyn täyskiertojen aikana sedimenttiin sitoutuu fosforia. Vastaavasti talvi- ja kesäkerrostuneisuuden aikaan rehevän järven sedimenttiin muodostuu pelkistyneet olosuhteet ja fosforia vapautuu yläpuoliseen veteen.

Sedimentoituvaa ainesta muodostuu ulkoisen kuormituksen lisäksi myös järven sisäisistä prosesseista. Kuollut kasvi- ja eläinplankton sekä bakteerit laskeutuvat järven pohjaan muodostaen hienojakoista sedimenttiä.

Suurkasvillisuuden jätteet kerrostuvat suurina määrinä rantavyöhykkeelle, erityisesti matalissa järvissä. Järven pohjalle laskeutuvan autoktonisen eli sisäsyntyisen aineksen määrä riippuu keskeisesti vesistön rehevyysasteesta (Wetzel 2001).

Fosforin vapautumiseen sedimentistä vaikuttaa useita tekijöitä (kuva 4) kuten

- diffuusio (sedimentin ja veden tiheysero)
- tuuli ja virtaukset (matalat alueet)
- bioturbaatio (kalat ja pohjaeläimet)
- kaasut (rikkivety, typpikaasut)
- kasvien/levien mukana (niiden hajotessa)
- kasvien juurten kautta (kasvien hajotessa)

Järven sisäinen fosforikuormitus riippuu järven fysikaallis-kemiallisista ja mikrobiologisista ominaisuuksista (mekanismeista), jotka siirtävät liukoista fosforia sedimentistä veteen. Fosforista sen liukoinen fosfaattifosfori ( $\text{PO}_4\text{-P}$ ) on suoraan perustuotannon, levien, käytettävissä. Sisäinen kuormitus on fosfaatin ( $\text{PO}_4$ ) vapautumista veteen, mutta lähteestä eli sedimentistä, joka normaalisti varastoi fosforia.

Normaalioloissa sedimentin pintakerros on hapettunut, jolloin ferrirauta saostuu fosforin kanssa rauta(III)oksidihydroksidifosfaatiksi. Hapettomissa oloissa, kun happipitoisuus on noin 0,1 mg/l, rauta(III) (ferri) pelkistyy rauta(II):ksi (ferro). Tällöin rautayhdisteiden pidätyskyky heikkenee ratkaisevasti ja sekä fosforia että rautaa liukenee huokosveteen. Fosforin vapautumiseen vaikuttavat myös veden nitraattipitoisuus ja mangaani.

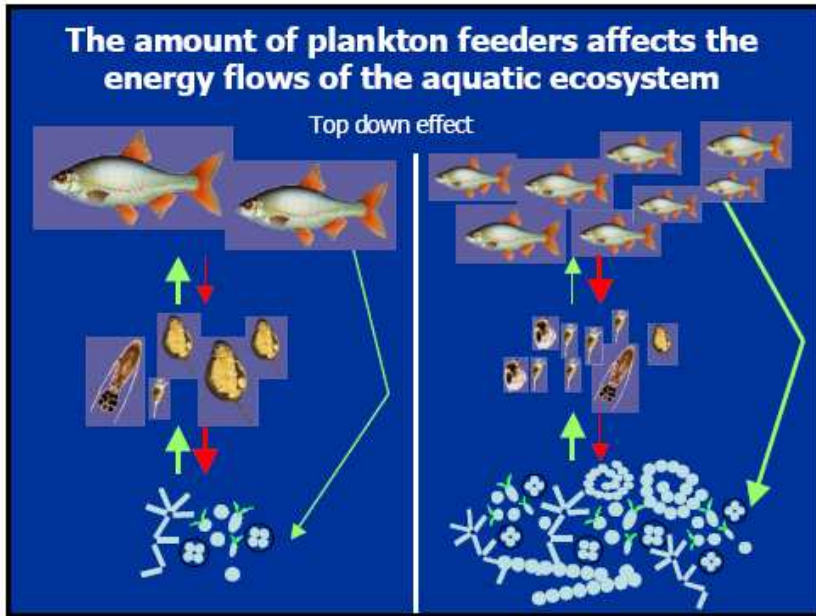
Sedimentin jatkuva fosforinsidontakyky on siis pelkistetysti "terveen" järven merkki ja sisäinen kuormitus rehevyydestä "sairastuneen" järven ongelma. Sisäinen kuormitus voi olla jopa yli 98 % järven veteen tulevasta vuotuisesta fosforikuormasta, kuten esimerkiksi Rokuanjärvellä (Saarijärvi ym. 2002).

On huomattava, että sisäinen kuormitus kuuluu osana järven luonnolliseen ravinteiden kiertoon ja järviökosysteemin dynamiikkaan. Sisäistä kuormitusta on myös luonnontilaisissa järvissä, mutta sen osuus on pienempi tai samaa suuruusluokkaa kuin ulkoisen kuormituksen. Voimakkaasti sisäkuormitteisissa järvissä sisäinen kuormitus voi olla monikymmenkertainen ulkoiseen kuormitukseen verrattuna. Tällaisia voimakkaasti sisäkuormitteisia ovat lähes poikkeuksetta leväongelmaiset järvet. Kasvaneen sisäisen kuormituksen alkuperäinen syy on järven siedon ylittänyt ulkoinen kuormitus. Voimakkaasti sisäkuormitteisessa järvessä pelkästään ulkoisen kuormituksen vähentäminen ei paranna järven tilaa, koska valtaosa fosforikuormasta tulee järven pohjasta (Palomäki 2001).

Särkikalojen (mm. särki, salakka, pasuri ja lahna) määrää ja osuutta järven kalastossa lisää toisaalta rehevöityminen, joka suosii särkikaloja, ja toisaalta valikoiva kalastus, joka kohdistuu lähinnä vain petokaloihin ja suurempiin yksilöihin. Tämä kehitys taas lisää järvessä kaloista johtuvaa sisäistä kuormitusta ja levähaittojen määrää.

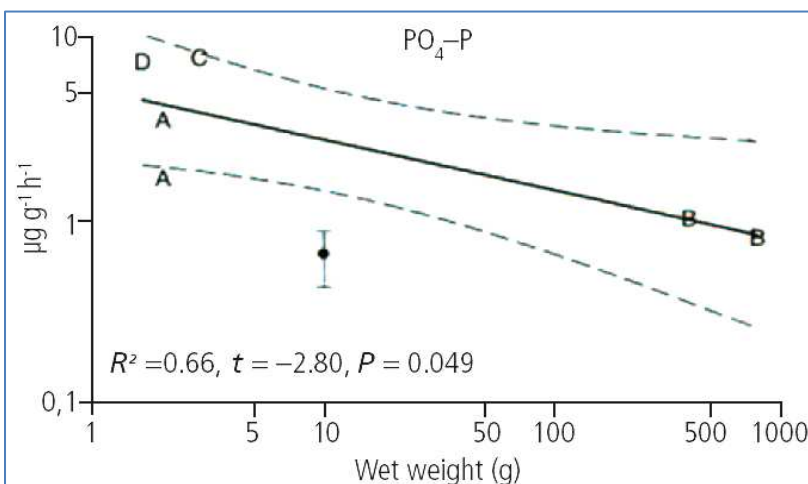
Planktonsyöjien vaikutusta energiavirtoihin vesiekosysteemeissä on havainnollistettu kuvassa 5. Harva isompikokoisten särkikalojen määrä johtaa pienempään kasviplanktonesiintymään kuin tiheä

pienempien särkikallojen määrä. Kalasto vaikuttaa sisäiseen kuormitukseen usealla tavalla. Särkikalat syövät suurikokoisia eläinplanktoneita, jotka taas syövät kasviplanktonia. Kun eläinplanktonin määrä vähenee ja niiden koko pienenee, lisääntyy kasviplanktonien määrä. Ulostaessaan kalat kierrättävät ravinteita. Pohjaeläinsyöjät siirtävät ravinteita pohjasedimentistä vesimassaan sekä pölytyksen että ulosteiden kautta (bioturbaatio).



**Kuva 5.** Havainnekuva harvan (vasen kuva) ja tiheän (oikea kuva) särkikalakannan vaikutuksesta ravintoketjuun (Keto 2008).

Rehevöityneen Köyliönjärven särkien kokonaisfosforin eritepäastöt olivat korkeimmat 0+-vuotiailla särjillä 0,36 – 0,54 mg P g/d. Keskimääräinen päästö 1+-vuotiailla särjillä oli 0,16 mg P g/d ja 2+-vuotiailla 0,07 mg P g/d. Fosfaattifosforin ja kalan painon suhdetta eritepäastöihin on tarkasteltu kuvassa 6. Pienten särkien eritepäastöt olivat suhteellisesti suuremmat kuin isompien särkien.



**Kuva 6.** Kalan yksilöpainon ja liukoisen fosforin päästöjen ( $\mu\text{g PO}_4\text{-P}$  g/h) riippuvuus kalan painosta (Tarvainen 2007).

Järven sisäisen kuormituksen määrittäminen on tehty pääosin jäännöstekijämallilla (Lappalainen & Matinvesi 1990, Saarijärvi & Lappalainen 1999). Mallissa sisäinen kuormitus (SK) määritellään jäännöstekijänä järveen tulevan, järvestä lähtevän ja järvessä kiertävän fosforin (tai typen) perusteella kaavasta:

$UK + SK = LP + KP + BS + dm/dt$  missä,

UK = ulkoinen kuormitus

KP = kaloissa poistuva fosfori

SK = sisäinen kuormitus

BS = bruttosedimentaatio

LP = järven luusuasta poistuva ainevirta (fosfori)

$dm/dt$  = Järven vesimassan ainesisällön (fosforitaseen) muutos

Kaavassa UK, LP, KP ja  $dm/dt$  sekä BS ovat mitattavia tai eri tavoin määritettäviä suureita.

Bruttosedimentaatio tarkoittaa käytännössä kiintoaineeseen sitoutuneen fosforin sadantanopeutta (laskeutuvuutta) sedimenttiin tai kiertonopeutta järvessä. Bruttosedimentaatiota voidaan mitata laskeutuvan aineksen keräimillä (Mäkelä ym. 1992), joskin mitattujen bruttosedimentaatioarvojen sijoittaminen suoraan kaavaan yliarvioi sisäisen kuormituksen. Suomalaisissa tyypillisesti matalissa järvissä huomattava osa bruttosedimentaatiosta laskeutuvasta aineksesta palautuu lähes välittömästi eri vapautumismekanismien (tuuli- ja kaasuresuspensio, lämpötilakonvektio sekä bioturbaatio) takaisin vesirungon kiertoon.

Taselaskelmien kannalta oleellista on, mikä osa bruttosedimentaatiosta sedimentoituu pidemmäksi aikaa. Tätä osaa sedimentaatiosta kutsutaan nettosedimentaatioksi. Nettosedimentaation määrä on riippuvainen järven morfologisista ominaisuuksista ja siksi sen arvioimiseksi ei ole voitu luoda yleistä laskentaohjetta. Håkanson & Peters esittivät (1995) nk. tehollisen bruttosedimentaation (BST) käsitteen, missä mitattu bruttosedimentaatio kerrotaan akkumulaatiopohjan (Håkansson & Jansson 1983) pinta-alan suhteella järven pinta-alaan.

Saarijärvi ja Lappalainen (1999) esittivät nk. bruttosedimentaation biologisesti aktiivisen osan (BSB). Bruttosedimentaatiosta otetaan laskentaan mukaan vain laskeutuvan aineksen helposti mineralisoituva osa, jota voidaan yksinkertaistaen kuvata laskeutuvan aineksen hehkutushäviönä (= orgaanisen aineen osuus).

Vaikka taselaskennassa käytettävään bruttosedimentaation käsitteeseen liittyy vielä käytännön ongelmia, niin yleisesti voidaan sanoa, että kasvanut bruttosedimentaation arvo liittyy kasvaneeseen sisäiseen kuormitukseen. Sisäisen kuormituksen laskennassa kannattanee jatkossa käyttää bruttosedimentaatioarvoina sekä BST:tä ("morfologinen korjaus") että BSB:tä ("perustuotannon mukainen korjaus") ja laskea näin sisäisen kuormitukselle vuosiarvion vaihteluväli (Tanskanen ym. 2000).

Kun järvessä vallitsee sisäisen kuormituksen tila, on kunnostuksen kannalta ensiarvoisen tärkeää tietää sisäisen kuormituksen keskeisin vapautumismekanismi talvi- ja kesäkerrostuneisuuden aikana. Tällöin voidaan järveen kohdistuvia sisäistä kuormitusta hillitseviä kunnostustoimia kohdentaa oikeaan vapautumismekanismiin.

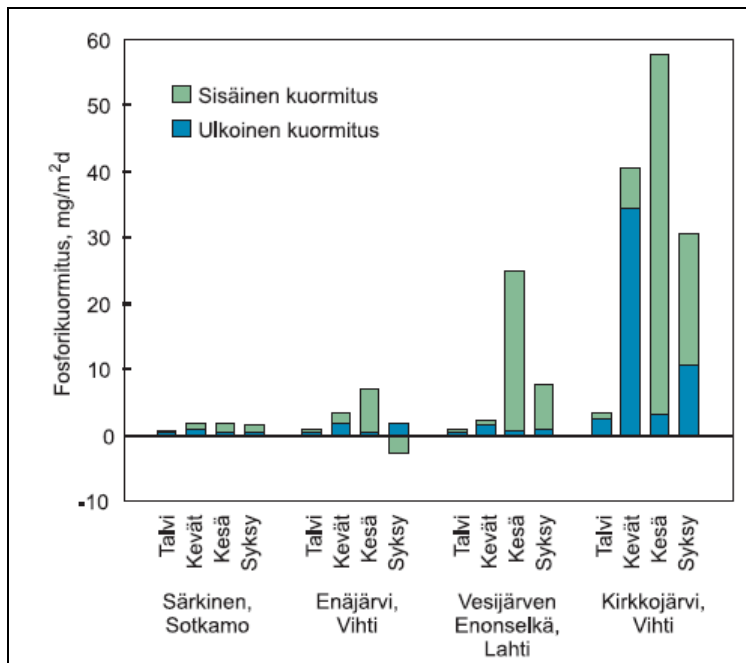
Lämpimänä kesäpäivänä fosfaatin kiertonopeus on luokkaa tunti tai alle (Saarijärvi 2006).

Savihiukkaset leväreagoimattomine kokonaisfosforeineen ovat mukana vain tuulen ansiosta eivätkä 'kuulu joukkoon'. Mutta ei saven läsnäolo merkitse sitä, etteikö "möhnän" mukana ole myös äskettäin syntyneitä leväsoluja yms. sestonia, joka kuuluu joukkoon. Ongelma on vain erotella

biologisesti aktiivinen osa, joka toimii normaalisti bakteerien substraattina ja fosfaattien lähteenä. Tämä aine käyttäytyy normaalisti ja on siten mahdollinen sisäkuormituslähde. Tarvittava aliarvostuskerroin voinee olla esim. hehkutus-häviön osuus kuiva-aineesta tms. ja liikkunee lukuarvoissa 0,05 - 0,5. (Lappalainen 2006)

Sisäinen kuormitus on sitä kun fosfori palaa muodossa tai toisessa pohjalta vesifaasiin. Tilanteesta riippuen se sitten on levien käytössä tai ei. Kun fosforia veteen/järveen tulee, se on fosforikuormitusta. Rehevässä järvestä ko. varasto on jossain vaiheessa mitä todennäköisimmin levien käytössä. Esim. kesänä 2006, kun valuma-alueelta tuleva kuorma oli todella pieni, Vihdin Kirkkojärvellä oli klorofylliä >300 ug/l (Horppila 2006).

Eräiden Suomen järvien sisäisen ja ulkoisen kuormituksen suhteita eri vuodenaikoina on tarkasteltu kuvassa 7. Talvella kuormitukset ovat yleensä pieniä. Yleisesti keväällä suurten valuntojen takia ulkoinen kuormitus on suurempi ja taas kesällä sekä syksyllä on sisäinen kuormitus suurempi. Tästä seuraa se, että juuri kesällä järven kokonaisfosforikuormitus on vuodenaajoista suurin sisäkuormituksen takia, vaikka ulkoinen kuormitus olisikin pieni.



**Kuva 7.** Sisäisen ja ulkoisen kuormituksen määriä eri vuodenaikoina järven pinta-alayksikköä kohti eräillä järvillä (Lappalainen & Matinvesi 1990).

Lappajärven fosforitase ja sisäinen kuormitus vuosina 1988 ja 1997 kesällä ja talvella on esitetty taulukossa 1. Lappajärven sisäinen kuorma on kesällä 5-10-kertainen ulkoiseen kuormaan verrattuna. Tämä on rehevöityneessä järvestä tyypillinen tilanne.

**Taulukko 1.** Lappajärven kokonaisfosforitase vuosina 1988 ja 1997 (kg P/d) (Palojärvi 2001).

	Kesä-elokuu	Kesä-elokuu	Talvi	Talvi
Vuosi	1988	1997	1988	1977
<b>Tulot</b>				
Ulkoisen kuorma	99	59	80	47
Sisäinen kuorma	480	569	70	-15
<i>YHTEENSÄ</i>	<i>579</i>	<i>628</i>	<i>150</i>	<i>32</i>
<b>Menot</b>				
Vesimassa sitoo/luovuttaa *	-93	-23	8,8	-88
Bruttosedimentaatio	630	630	100	100
Luusuasta poistuva	40	17	40	17
Kalansaalit	2	4	2	4
<i>YHTEENSÄ</i>	<i>579</i>	<i>628</i>	<i>150</i>	<i>32</i>
Nettosedimentaatio	151	62	29	114

\*Positiivinen lukuarvo – vesimassan fosforisisältö (pitoisuus) kasvaa, negatiivinen – fosforitase pienenee

Eräiden järvien ulkoisen ja sisäisen fosforikuormituksen laskennallisia määriä ja suhteita on esitetty taulukossa 2.

**Taulukko 2.** Eräiden järvien ulkoisen ja sisäisen fosforikuormituksen arvoja eri lähteistä.

Järvi	Ulkoisen kuormitus	Sisäinen kuormitus	Ulkoisen ja sisäinen kuormitus	S/U	Lähde
	P kg/a	P kg/a	P kg/a		
Immolanjärvi (98,7 ha)	213	1329	1542	6,3	Järvipooli 2006
Humaljärvi (1170 ha)	98	2228	2325	23	K-S ymp.keskus 2002
Kaukjärvi (200 ha)	730	295-540	1025-1270	0,4-0,7	Mäkelä 2007
Kuivajärvi (830 ha)	3583	5900-6300	9483-9883	1,6-1,8	Mäkelä 2007
Pyhäjärvi (2285 ha)	4480	35740-37800	40220-42280	8,0-8,4	Mäkelä 2007

Eri järvien sisäisen ja ulkoisen kuormituksen suhteita (S/U) on esitetty taulukossa 3 (Lappalainen & Matinvesi 1990, Hakkari ym. 1994/Palomäki 2001).

**Taulukko 3.** Sisäisen ja ulkoisen (S/U) kuormituksen suhde kesäaikana eräissä Suomen järvissä.

Järvi	S/U
Pohjois-Päijänne	0,7
Etelä-Päijänne	0,9
Pyhäjärvi (Artjärvi)	3
Haapajärvi	6,2
Tuomiojärvi (Jyväskylä)	10
Kirkkojärvi (Vihti)	14
Pieksäjärvi	20
Enäjärvi (Vihti)	24
Tusulanjärvi	30
Vesijärvi	90

Järven sisäiseen kuormitukseen vaikuttavia tekijöitä ovat sedimentin ja vesimassan ravinnepitoisuus, resuspensio, pohjanläheinen happitilanne, kalasto ja muu eliöstö sekä ulkoinen kuormitus. Rehevöityneissä järvissä sisäisen kuormituksen ja sen merkityksen ravintoketjussa saattaa olla selvästi suurempi kuin ulkoisen kuormituksen vaikutus. Silti ulkoisen kuormituksen tulisi ainakin likimain vastata järven sietokykyä.

Järven sisäistä kuormitusta voidaan rajoittaa lähinnä seuraavin toimenpitein:

- alusveden hapetus (kun hapettomuus on tärkein aiheuttaja)
- ravintoketjukuristus (teho-, hoito- ja säätelykalastus)
- ravinteiden sitominen sedimenttiin kemiallisesti (pienet järvet)
- järven väliaikainen kuivatus ja sedimentin käsittely (harvoin on mahdollista)

Yhteenvedon voidaan todeta, että kun tarkastellaan järven tilaan vaikuttavia tekijöitä, kuten ravinnekuormitusta, sisäistä kuormitusta ei saa unohtaa. Pelkästään ulkoisen kuormituksen vähentämistoimet eivät välttämättä johda järven tilan paranemiseen kun järveen jo aikaisemmin kertyneet ravinteet ovat jääneet sinne kiertämään ja pitämään yllä korkeaa perustuotantoa. Järveen itsessään kohdistuvien hoitotoimien, kuten ravintoketjukuristuksen, pyritään vähentämään järven sisäistä kuormitusta ja parantamaan samalla sen ulkoisen kuormituksen vastaanottokykyä.

## Lähteet

- Forsell, J. 2005. Kolmen eteläsuomalaisen järven rehevöitymiskehitys viimeisen sadan vuoden aikana. Pro gradu-tutkielma. Helsingin yliopisto. Geologian laitos. Geologian ja paleolimnologian osasto. 60 s.
- Forsberg, C. 1989. Importance of sediments in understanding nutrient cyclings in lakes. *Hydrobiologia* 176/177, s. 263-277.
- Hakkari, L., Bibiceanu, S., Granberg, K., Hynynen, J., Kaunismaa, P., Lappalainen, K.M., Meriläinen, J.J., Palomäki, A. ja Salo, H. 1994. Pieksjärven kunnostusmahdollisuudet. Jyväskylän yliopisto. Ympäristöntutkimuskeskus. Moniste 53 s.
- Horppila, J. 2006. Järvien hoito ja hoitokalastus. Keskustelu. Sähköpostipuheenvuoro 30.11.2006 (julkaisematon).
- Håkanson, L. & Jansson, M. 1983. *Principles of Lake Sedimentology*, Springer Verlag. - 316 pp.
- Håkansson, L. & Peters, R.H., 1995. *Predictive limnology – Methods for predictive modelling*. SPB Academic Publishing, Amsterdam. ISBN 90-5103-104-1.
- Järvipooli 2006. Immolanjärven kunnostuksen yleissuunnitelma 2006. Raportti 29 s.
- Keski-Suomen ympäristökeskus 2002. Keski-Suomen ympäristökeskuksen monistesarja 45.
- Keto, J. 2008. Säätio Vesijärven avuksi. Esitys Vihdin Vesistöpäivät 23.2.2008.
- Lappalainen, M. 2006. Järvien hoito ja hoitokalastus. Sähköpostikeskustelu. Puheenvuoro 29.11.2006 (julkaisematon).
- Lappalainen, K.-M. & Matinvesi, J. 1990. Järvien fysikaalis-kemialliset prosessit ja ainetaseet. In: V. Ilmavirta (toim.). *Järvien kunnostuksen ja hoidon perusteet*. Helsinki.
- Mäkelä, A., Antikainen, S., Mäkinen, I., Kivinen, J. & Leppänen, T. 1992. Vesitutkimusten näytteenottomenetelmät. Vesi- ja ympäristöhallinnon julkaisuja - sarja B10. Vesi- ja ympäristöhallitus, Helsinki. 87 s.
- Mäkelä, S. 2007. Tammelan Pyhäjärven, Kuivajärven ja Kaukjärven kunnostus ja virkistyskäytön lisääminen- hanke 2006-2008 Tammelan Pyhäjärven, Kuivajärven ja Kaukjärven kuormitus selvitys. Helsingin yliopisto. Lammin biologinen asema. Raportti 50 s.
- Paloheimo, A. 2007. Köyliönjärven tila ja kunnostus. Järven tila ja erilaisten kunnostusmenetelmien soveltuvuus tilan parantamiseen. Pyhäjärvi-instituutin julkaisuja, s. 47.
- Palomäki, A. 2001. Sisäinen kuormitus Lappajärven fosforitaseessa. Länsi-Suomen ympäristökeskus. Alueelliset ympäristöjulkaisut 213. 27 s.
- Pyhäjärven suojeluohjelma 2007-2013. Pyhäjärvi-instituutti. <http://www.pyhajarvensuojelu.net/page.asp?id=637> Luettu 2.3.2009.
- Saarijärvi, E. 2006. Järvien hoito ja hoitokalastus. Sähköpostikeskustelupuheenvuoro 28.11.2006 (julkaisematon)
- Saarijärvi, E. ja Lappalainen, K.M. 1999. Ainetaselaskelmien käyttö vesien tilan arvioinnissa. Osa 2. Käytännön esimerkki. *Vesitalous* 40 (2): 28-31.
- Saarijärvi, E., Lappalainen, M., Ronkainen, J. ja Hartikainen, J. 2002. Vaalan Rokuanjärven fosforitaseet vuodelle 2002 sekä kunnostuksen pääpiirteet. Vesi-Eko Oy Water-Eco Ltd. Kuopio. 43 s.
- Tanskanen, H., Liikanen, A. & Väisänen, T. 2000. Sisäkuormituksen arviointimenetelmien vertailu. Esimerkkeinä Luupuvesi (Kiuruvesi) ja Kevätön (Siilinjärvi). Työraportti ympäristöministeriölle 31.7.2000. Pohjois-Savon ympäristökeskus. 32 s. Julkaisematon.
- Tarvainen, M. 2007. Water quality effects of fish in shallow lakes. *An. Un. Turkuensis. Ser. AII. Tom. 211.* 101 p.
- Wetzel, R. G. 2001. *Limnology. Lake and Rivers Ecosystems*. Third edition. Academic Press. 1006 p.
- Vollenweider, R. H. 1976. Advances in defining critical loading levels for phosphorus in lake eutrophication. *Mem. Its. Ital. Idrobiol.* 33:53-83.