



**Kymijoen**  
vesi ja ympäristö ry



Elinkeino-, liikenne- ja  
ympäristökeskus



Euroopan maaseudun  
kehittämisen maatalousrahasto:  
Eurooppa investoi maaseutualueisiin

# **ARRAJÄRVEN LLR-KUORMITUSVAIKUTUSMALLINNUS**

**Kymijoen vesi ja ympäristö ry:n tutkimusraportti no 263/2014**

**Niina Kotamäki, Suomen ympäristökeskus, SYKE**



## JOHDANTO

Tämä työ on osa Kymijoen alueen järvikunnostushankkeessa laadittua Arrajärven kunnossuunnitelmaa. Työn tavoitteena on arvioida LLR-mallilla Arrajärven ulkoisen kuormituksen määrää ja sen vähentämistarvetta, sekä arvioida sisäisen kuormituksen merkitystä järven tilaan ja kuormitusvähennyksiin. Mallin tuloksista saadaan tukea kunnossuunnitelman toimenpidesuosituksen mitoittamiseen ja oikein kohdentamiseen.

LLR, eli Lake Load Response, on SYKEssä kehitetty mallinnustyökalu kuormitusvaikutusten arviointiin. LLR auttaa kuormitusvähennystarpeen arvioinnissa ja siten vesistöalueiden hoidon suunnittelussa ja siihen liittyvässä päätöksenteossa. LLR:llä lasketaan, miten ulkoinen kuormitus ja sen muutokset vaikuttavat vesimuodostuman kokonaisravinne- ja a-klorofyllipitoisuuksiin. LLR soveltuu erityisesti huonokuntoisten tai hyvän ja tyydyttävän tilan rajalla olevien järvien ja sisempien rannikkovesialueiden kuormitusvähennystavoitteiden laskemiseen sekä tueksi ekologisen tilan arviointiin.

LLR:n laskelmat perustuvat yksinkertaisiin yhteyksiin ravinnekuormituksen ja vedenlaadun välillä. Tunnettuihin ravinnetaseyhtälöihin perustuvan ravinteiden pidättymismallin avulla voidaan laskea vesimuodostuman kokonaisravinnepitoisuus. LLR:n fosforimalliin on lisätty myös sisäisen kuormituksen aiheuttama vaikutus. Ravinnekuormitusten avulla laskettuja kokonaisravinnepitoisuuksia käytetään vesimuodostuman a-klorofyllipitoisuuden laskentaan. Ravinteiden ja a-klorofyllin pitoisuuksien suhteesta saadaan edelleen johdettua yhteys kuormituksen ja a-klorofyllipitoisuuden välille. LLR:ssä olevien mallien tarkempi kuvaus ja sovelusesimerkkejä löytyy mm. seuraavista lähteistä Kotamäki (2014), Malve (2006) ja Pätynen (2009).

Lisätietoa myös SYKE:n mallien ja työkalujen verkkosivuilla: [http://www.syke.fi/fi-fi/Tutkimus\\_kehittaminen/Itameri\\_vesistot\\_ja\\_vesivarat/Mallit\\_ja\\_tyokalut/Vesienhoidon\\_mallit/Kuormitusvaikutusmalli\\_LLRLR](http://www.syke.fi/fi-fi/Tutkimus_kehittaminen/Itameri_vesistot_ja_vesivarat/Mallit_ja_tyokalut/Vesienhoidon_mallit/Kuormitusvaikutusmalli_LLRLR)

## SYÖTTÖTIEDOT

Laskennan syöttötietoina tarvitaan tarkasteltavan vesimuodostuman keskisyvyys, tilavuus ja pintavesityyppi sekä mahdollisimman pitkät havaitut aikasarjat tulevasta kuormituksesta, lähtövirtaamasta ja edustavimman syvänteen kokonaisravinnepitoisuuksista. Lisäksi tarvitaan arvio sisäisen kuormituksen suuruusluokasta.

Nimi: Arrajärvi 14.122.1.005

Tyyppi: Keskikokoiset humusjärvet (Kh)

Tilavuus: 28,57 milj. m<sup>3</sup>

Keskisyvyys: 2,89 m

Viipymä: ~1 vuotta (83 vrk)

Sisäisen kuormituksen alkuarvo: puolet ulkoisen kuormituksen mediaanista, eli noin 8 kg/d  
Luokittelu: Tyydyttävä (kokonaisluokka), (TotP=Välttävä, TotN=Tyydyttävä, chl-a= Välttävä)

Kuormitusarvoina käytetään viipymäjaksolta arvioitua, järveen tulevaa keskimääräistä päivittäistä kokonaistyyppi- ja kokonaisfosforikuormaa. Kokonaistyyppi- ja kokonaisfosforipitoisuudeksi lasketaan viipymäjaksos keskiarvo, mutta laskennassa huomioidaan vain kasvukauden aikana tehtyjen näytteenottojen tulokset. Arrajärvestä on havaintoja kahdesta eri paikasta, mutta LLR-mallissa käytetään keskeisimmän syvänteen näytteenottotuloksia (tässä *Arrajärvi Sepäns 037*). Kokonaisravinnanäytteitä on otettu syvänteellä sekä pinnasta (1 m) että pohjasta (7 m). Jokaiselle näytteenottovuodelle laskettiin tilavuuspainotettu keskiarvo (Taulukko 1). Tilavuuspainotus on tehty käyttämällä järven hypsografian tilavuustietoja siten, että pohjan läheisen vesikerroksen ajatellaan olevan syvyysvyöhykkeillä 6–8 m ja pintakerroksen syvyyksillä 0–5 m. Pohjan lähellä on mitattu huomattavasti korkeampia pitoisuusarvoja kuin pinnassa, joten tilavuuspainotus kasvattaa keskimääräisiä pitoisuuksia jonkin verran. Vaikutus ei ole kuitenkaan suuri, koska pohjanläheisen vesimassan tilavuus on hyvin pieni verrattuna pintakerrokseen.

Taulukko 1. Havaitut kokonaisfosfori- ja -tyyppipitoisuudet ( $\mu\text{g/l}$ ) pinnasta ja pohjasta, sekä näistä lasketut tilavuuspainotetut pitoisuudet.

Vuosi	pinta totP	pohja totP	pinta totN	pohja totN	Tilavuuspainotetut	
					TotP	TotN
1991	39	100	620	820	39,8	622,7
1992	68	64	700	590	67,9	698,5
1993	49	130	720	860	50,1	721,9
1994	62	75	880	910	62,2	880,4
1995	49	65	720	690	49,2	719,6
1996	48	290	680	1700	51,3	694,0
1997	44	320	620	1400	47,8	630,7
1998	48	52	620	570	48,1	619,3
1999	63	77	930	1100	63,2	932,3
2000	46	75	760	760	46,4	760,0
2001	46	260	690	1600	48,9	702,5
2002	39	370	910	1500	43,5	918,1
2003	46	77	740	1700	46,4	753,2
2004	29	45	720	740	29,2	720,3
2005	51	61	740	710	51,1	739,6
2006	36	49	630	770	36,2	631,9
2007	54	64	770	770	54,1	770,0
2008	48	41	700	680	47,9	699,7
2009	48	51	850	750	48,0	848,6
2010	63	21	1100	940	62,4	1097,8
2011	52	89	870	1100	52,5	873,2
2012	40	58	670	740	40,2	671,0
2013	30	62	630	690	30,4	630,8

Taulukkoon 2 on koottu LLR-mallin syöttötiedot Arrajärvelle. Kuormitukset (LN ja LP) sekä virtaama (Q) ovat Vemala-mallin laskemia vuosikeskiarvoja ja pitoisuudet (TotN ja TotP) ovat mitatut tilavuuspainotetut kasvukauden (touko–syyskuu) keskiarvot.

*Taulukko 2. LLR-mallin syöttötiedot: kokonaistyyppikuormitus (LN, kg/d), kokonaisfosforikuormitus (LP, kg/d), järvestä havaittu kokonaistyyppipitoisuus (TotN, µg/l) ja kokonaisfosforipitoisuus (TotP, µg/l) ja lähtevä virtaama (Q, m<sup>3</sup>/s).*

<b>Vuosi</b>	<b>LN</b>	<b>LP</b>	<b>TotN</b>	<b>TotP</b>	<b>Q</b>
1991	269,7	12,6	622,7	39,8	3,4
1992	382,2	18,2	698,5	67,9	4,5
1993	320,8	16,6	721,9	50,1	3,9
1994	321,8	14,4	880,4	62,2	3,6
1995	345,4	15,5	719,6	49,2	4,4
1996	289,0	18,1	694,0	51,3	3,6
1997	310,3	18,3	630,7	47,8	4,5
1998	387,0	20,0	619,3	48,1	4,6
1999	327,6	13,6	932,3	63,2	3,6
2000	431,5	20,3	760,0	46,4	4,5
2001	375,7	20,8	702,5	48,9	4,6
2002	259,4	11,5	918,1	43,5	3,2
2003	218,0	11,3	753,2	46,4	2,4
2004	449,4	25,1	720,3	29,2	5,9
2005	313,4	14,7	739,6	51,1	3,9
2006	254,3	13,0	631,9	36,2	2,6
2007	396,1	24,1	770,0	54,1	4,6
2008	420,4	21,8	699,7	47,9	5,0
2009	291,3	15,4	848,6	48,0	3,4
2010	214,2	10,9	1097,8	62,4	2,9
2011	246,8	14,5	873,2	52,5	2,9
2012	429,2	29,2	671,0	40,2	5,7
2013	306,4	17,2	630,8	30,4	3,9

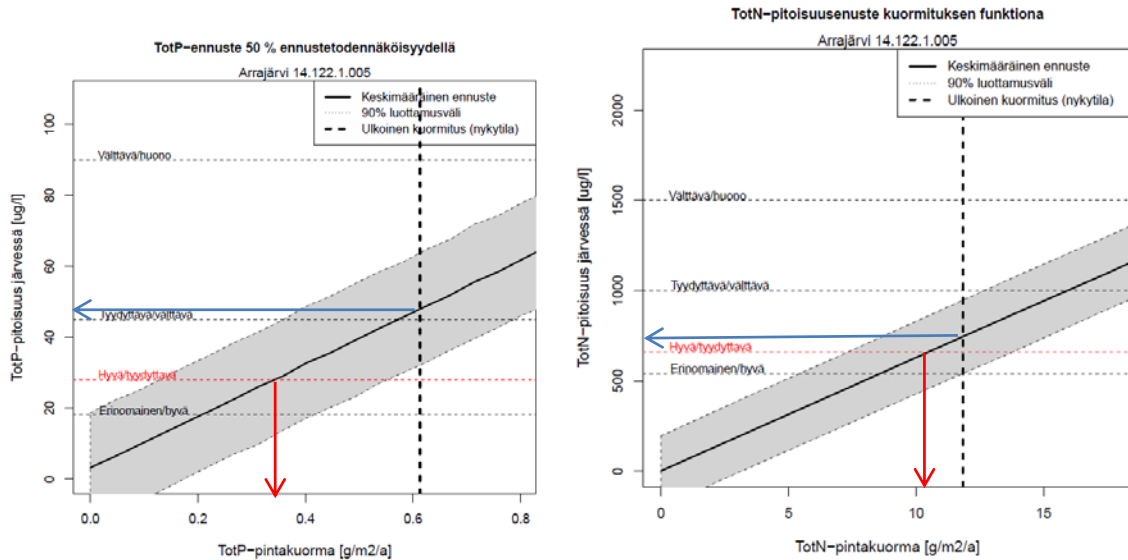
## TULOKSET

Taulukon 3 ja Kuvan 1 perusteella Arrajärven keskimääräinen fosforipitoisuus on 47 µg/l ja järvi on välttävissä fosforin perusteella. Kuormitus, jolla hyvään tilaan (H/T-raja-arvo 28 µg/l) päästään on 9,6 kg/d, eli noin 42 % vähemmän kuin järven keskimääräinen pitkän ajan kuormitus (16,6 kg/d). Nykyisellä typpikuormituksella (321 kg/d) typpipitoisuus on keskimäärin 744 µg/l. Hyvän tilan raja on 660 µg/l, joten typen osalta järvi on keskimäärin tyydyttävässä tilassa. Hyvään typpitasoon tilassa pääsemiseksi kuormitusta olisi vähennettävä 12 %.

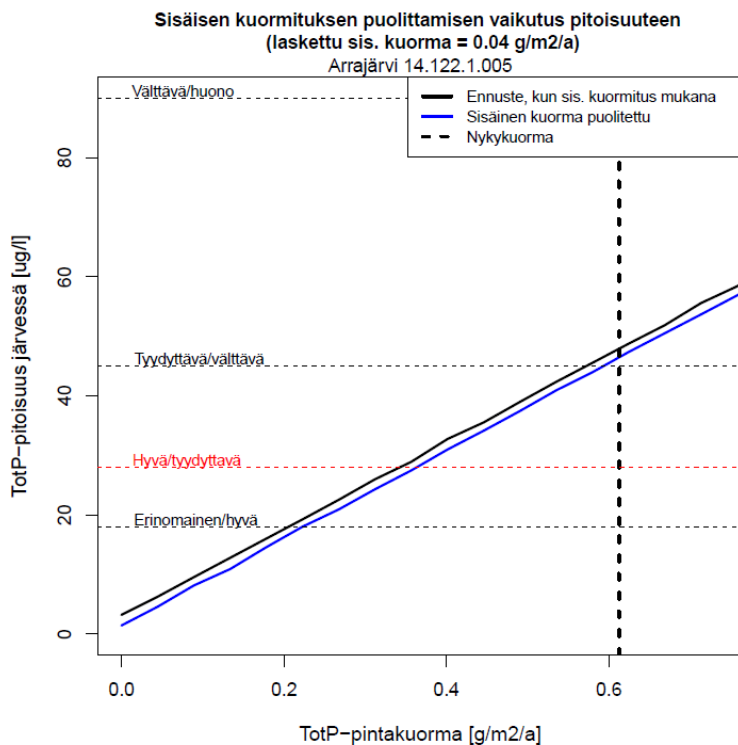
*Taulukko 3. LLR:n ravinnemallin tuottama fosfori- ja typpikuormitusten ja -pitoisuuksien nykytila, tavoitetila ja tavoitteeseen pääsemiseksi tarvittava vähennys. Nykytilan ja tavoitetilan ulkoiset kuormitukset on esitetty päiväkuormana (kg/d) ja kuormana järvipinta-alaa kohden (g/m<sup>2</sup>/a). Pitoisuuden nykytilassa (µg/l) on mallin laskema keskimääräinen pitoisuus annetuilla kuormitustiedoilla. Sisäinen kuormitus on mallin laskema sisäisen kuormituksen arvo sekä päiväkuormana että pintakuormana.*

			<b>Fosfori</b>	<b>Typpi</b>	
Nykytila	Ulkoinen kuormitus	kg d <sup>-1</sup>	16,6	320,8	
		g m <sup>-2</sup> a <sup>-1</sup>	0,61	11,84	
	Pitoisuusennuste		µg l <sup>-1</sup>	47,2	743,7
	Sedimentaationopeus (laskettu)		m d <sup>-1</sup>	0,003	0,009
	Sisäinen kuormitus	kg d <sup>-1</sup>	0,5		
g m <sup>-2</sup> a <sup>-1</sup>		0,02			
Tavoitetila	Ulkoinen kuormitus	kg d <sup>-1</sup>	9,6	283,6	
		g m <sup>-2</sup> a <sup>-1</sup>	0,36	10,47	
	Pitoisuus (H/T-raja)		µg l <sup>-1</sup>	28	660
<b>Vähennystarve</b>	Ulkoinen kuormitus	kg d <sup>-1</sup>	7	37,2	
		g m <sup>-2</sup> a <sup>-1</sup>	0,25	1,37	
		%	42	12	
	Pitoisuusvähennys		µg l <sup>-1</sup>	19,2	83,7

Kuvasta 2 nähdään sisäisen kuormituksen puolittamisen vaikutus järven fosforipitoisuuteen. Malli arvioi lähtötietojen perusteella Arrajärven sisäisen fosforikuormituksen olevan vain muutaman prosentin ulkoisesta kuormituksesta, eli sisäisen kuormituksen vaikutus ei ole erityisen merkittävä järven keskimääräiseen fosforipitoisuuteen.

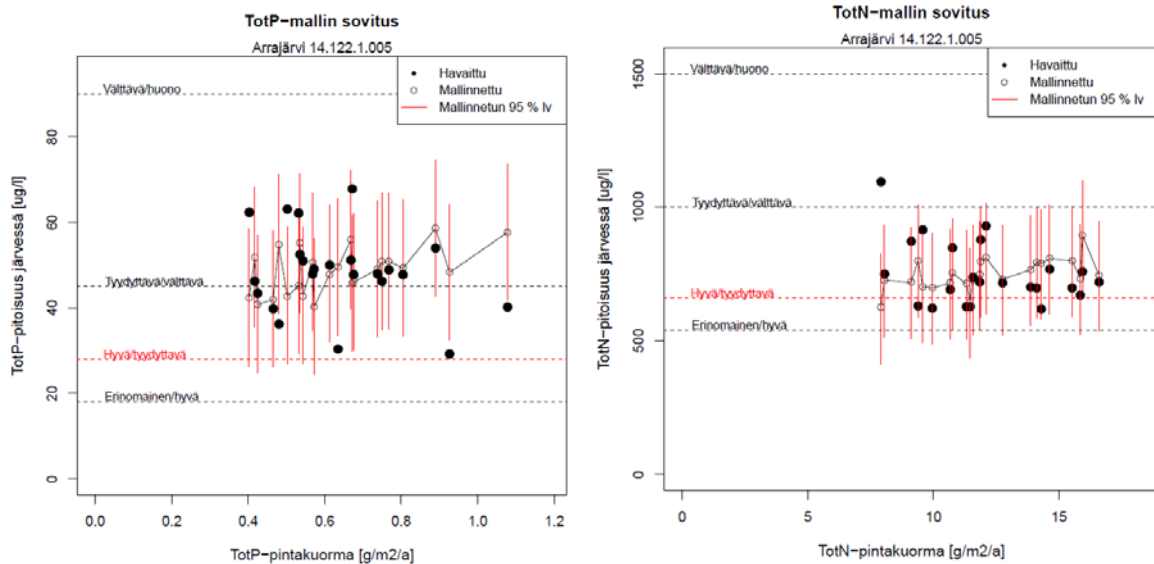


Kuva 1. Kokonaisfosforipitoisuuden (kuva vasemmalla) ja kokonaistyyppipitoisuuden (oikealla) keskimääräinen ennuste ja 90 % luottamusväli ulkoisen kuormituksen funktiona. Punainen nuoli osoittaa kuormaa, jolla tavoitepitoisuuteen päästään ja sininen nuoli kuvaa nykyisellä kuormitustasolla saatavaa pitoisuutta.



Kuva 2. Sisäisen kuorman puolittamisen vaikutus fosforipitoisuuteen ja kuormitusvähennystarpeeseen.

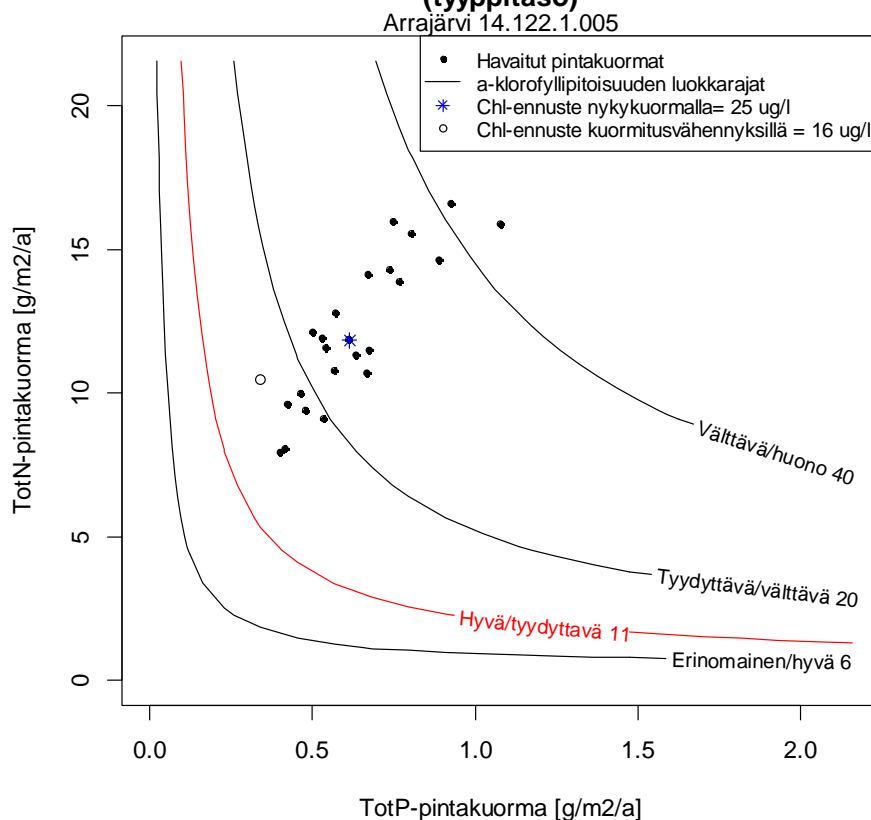
Kuvassa 3 on esitetty LLR-mallin sovitus annettuun lähtöaineistoon. Pitkän ajan keskimääräiset havaitut fosfori- ja typpipitoisuudet vaihtelevat tyydyttävän ja välttävän tilan välillä. Kuvista nähdään, että epävarmuus on suuri (leveät luottamusvälit). Tämä heijastaa sekä luonnollista vaihtelua että mallin ja havaintojen puutteellisuudesta johtuvaa epävarmuutta.



Kuva 3. Mallinnetut ja havaitut fosfori- (vasemmalla) ja typpipitoisuudet (oikealla) eri kuormituksilla. Järvityyppikohtaiset luokkarajat on esitetty vaakasuorina katkoviivoina.

Kuvassa 4 on a-klorofyllipitoisuuden muuttuminen erilaisilla kuormitustasoilla. Keskimääräisillä typen ja fosforin tulokuormilla a-klorofyllipitoisuus on mallin mukaan 25 µg/l, joka ylittää reilusti Kh-tyyppin raja-arvon (11 µg/l). Järvestä mitattujen a-klorofyllipitoisuuksien mediaani on 27 µg/l, joten mallinnettu klorofyllipitoisuus on samaa suuruusluokkaa kuin havaittu pitoisuus. LLR:n klorofyllimallin muodostamisessa on käytetty laajaa valtakunnallista vedenlaadutdataa. Arrajärven tiedot eivät ole kuitenkaan olleet mallin muodostamisessa mukana, eikä sille näin ollen ole järviokohtaisia korjauskertoimia. Näin ollen Arrajärven mallinnuksessa on käytetty hyväksi muiden Kh-tyyppin järvien aineistoa. Mallin hierarkkisen rakenteen vuoksi järviyyppikohtainen tieto voidaan käyttää tehokkaasti hyväksi, jolloin tyypikohtainen ennuste (järviokohtaisen sijaan) on riittävän hyvä kuvaamaan Arrajärven keskimääräistä klorofyllitasoa. Kuvan 4 tasa-arvokäyriä voidaan katsoa, minkälaisilla kuormitusyhdistelmillä päästäisiin tavoitettiin (punainen tasa-arvokäyrä). Jos aikaisemmin esitetyt fosfori- ja typpitavoitteeseen vaaditut vähennykset (fosfori 42 % ja typpi 12 %) tehdään, niin a-klorofyllipitoisuus ei silti saavutetai toivottua tasoa (ennuste 16 µg/l). Tavoite saavutettaisiin tehokaimmin vähentämällä fosforikuormaa entisestään: jos typpikuormitus ei muutu, niin fosforikuormaa pitäisi vähentää aiemman 42 % lisäksi vielä 28 %, eli yhteensä 70 %.

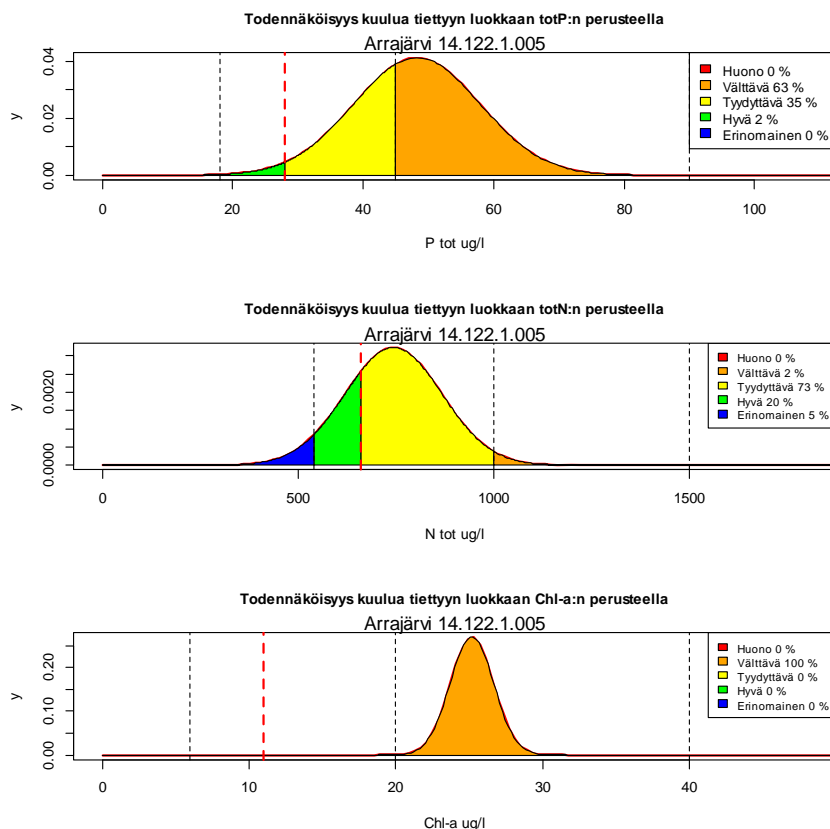
### a-klorofylliennuste tulokuorman funktiona (tyyppitaso)



Kuva 4. A-klorofylliennuste typpi- ja fosforikuormitusten funktiona. Tasa-arvokäyrät ovat a-klorofyllipitoisuuden tyypikohtaiset luokkarajat, punainen käyrä on tavoitetilä alkuperäisillä ulkoisen ja sisäisen kuormituksen arvoilla. Havaitut pintakuormayhdistelmät on merkitty pisteinä, sininen tähti kuvastaa a-klorofyllipitoisuutta annetuilla keskimääräisillä kuormitusarvoilla ja ympyrä tilannetta, jolloin fosfori- ja typpitavoitteisiin vaaditut kuormitusvähennykset olisi tehty.

Kuvassa 5 on esitetty LLR-mallin tuottamat pitoisuusjakaumat ja eri luokkiin kuulumisen todennäköisyydet nykyisellä kuormitustasolla. Fosforipitoisuuksien perusteella järvi on 63 % todennäköisyydellä välttävässä ja 35 % todennäköisyydellä tyydyttävässä tilassa, tavoitteen ei siis mitään todennäköisimmin päästä nykyisillä kuormitustasoilla. Nykytilanteessa hyvän tilan saavuttamisen todennäköisyys on vain 2 %. Typpi on myös todennäköisimmin hyvää huonommassa tilassa (tydyttävä 73 % ja välttävä 2 %), mutta vaihtelu on suurta ja hyvän tilan saavuttamisen todennäköisyyskin on 20 %. Myös a-klorofyllin osalta annetut kuormitukset aiheuttavat liian suuria pitoisuuksia (välttävä 100 %).





Kuva 5. Kokonaisfosforin, -typen ja a-klorofyllin pitoisuuksien todennäköisyysjakaumat annetuilla kuormituksilla. Luokkarajat esitetty pystyviivoin (tavoiteraja, H/T, punainen katkoviiva) ja luokkien todennäköisyydet eri väreillä.

## VIITTEET

Kotamäki, N., Pätynen A., Taskinen, A., Huttula, T. and Malve, O. Statistical Dimensioning of Nutrient Loading Reduction - LLR Assessment Tool for Lake Managers (Lähetetty Environmental Management -lehteen 8/2014)

Malve, O. & Qian, S. 2006. Estimating nutrients and chlorophyll a relationships in Finnish Lakes. Environ. Sci. Technol. 40:7848–7853. DOI: 10.1021/es061359b

Pätynen, A. 2009. Tavoitekuormien määrittäminen vesipuitedirektiivin mukaisessa vesialueiden hoidossa. Pro-gradututkielma. Jyväskylän yliopisto, Bio- ja ympäristötieteiden laitos.