



HELSINGIN YLIOPISTO
HELSINGFORS UNIVERSITET
UNIVERSITY OF HELSINKI

Tuusulanjärven ulkoinen fosforikuormitus

Kuormituksen laskentamenetelmien vertailu Klenkon ja Räikilänojan osavaluma-alueilla

Helsingin yliopisto

Bio- ja ympäristötieteellinen tiedekunta

Ekosysteemit ja ympäristö-tutkimusohjelma

Akvaattiset tieteet

Pro gradu -tutkielma

Limnologia

Huhtikuu 2018

Sarkkinen Marika



Tiedekunta - Fakultet - Faculty Bio- ja ympäristötieteellinen	Laitos - Institution - Department Ekosysteemit ja ympäristö-tutkimusohjelma	
Tekijä - Författare - Author Marika Sarkkinen		
Työn nimi - Arbetets titel Tuusulanjärven ulkoinen fosforikuormitus - Kuormituksen laskentamenetelmien vertailu Klenkon ja Räikilänojan osavaluma-alueilla		
Title The external phosphorus loading to lake Tuusulanjärvi – Comparison of different load calculation methods in Klenkko and Räikilänoja subregions		
Oppiaine - Läroämne - Subject Limnologia		
Työn laji/ Ohjaaja - Arbetets art/Handledare - Level/Instructor Pro gradu -tutkielma / Pasi Valkama, Jaana Hietala & Jukka Horppila	Aika - Datum - Month and year Huhtikuu 2018	Sivumäärä - Sidoantal - Number of pages 34 s + 4 liitettä

Tiivistelmä - Referat - Abstract

Ravinteiden huuhtoutumisen lisääntymisestä johtuva rehevöityminen uhkaa monia järviä. Pääsyyinä on useimmiten sisävesissä levien kasvua rajoittavan fosforin lisääntynyt pitoisuus vedessä. Fosforia huuhtoutuu järviin sekä liukoisena että kiintoainekseen sitoutuneena, ja ajalliset vaihtelut huuhtoumassa ovat suuria johtuen erityisesti hydrologisista tekijöistä. Fosforikuormituksen vaihtelu on nopeaa ja kausittaista, minkä takia manuaalinäytteisiin perustuva kuormituslaskenta tuottaa yleensä epäluotettavia tuloksia järveen kohdistuvasta kokonaiskuormituksesta. Ongelmaa on yritetty ratkaista automaattisilla vedenpinnan korkeuden ja vedenlaadun mittalaitteilla, jotka mittaavat haluttuja parametreja esimerkiksi tunnin välein. Automaattiantureita hyödyntämällä on saatu aiemmissa tutkimuksissa tarkempia kuormitusarvioita kuin perinteisillä menetelmillä. Mittaukset ovat kuitenkin harvoin aukottomia, sillä esimerkiksi jää tai alhainen vedenkorkeus voi estää mittalaitteiden toiminnan. Tämän työn tarkoituksena on vertailla manuaalinäytteisiin perustuvia kuormituslaskentamalleja ja VEMALA-vesistömallinnusjärjestelmää automaattidataan pohjautuvaan kuormituslaskentaan sekä valita niiden joukosta paras mallinnus automaattianturien mittauskatkosten täydentämiseen.

Työssä vertailtiin viittä eri kuormitusmallia keskenään kahdella eri osavaluma-alueella: a) Sameus (autom.) – fosforipitoisuus (manuaalinäyte) – regressio b) Virtaama – fosforikuormitus (autom.) – regressio, c) Virtaama – fosforipitoisuus (manuaalinäytteet) – regressio, d) Virtaama – fosforikuormitus (manuaalinäytteet) – regressio ja e) VEMALA-kuormitusmallinnusjärjestelmä. Lukuun ottamatta VEMALA-mallinnusta, kaikissa malleissa oli käytössä samat virtaama-arvot. Edellä mainituista malleista malli a on se, johon muita malleja vertailtiin.

Kaikki kuormituksenlaskentamallit vastasivat hyvin tarkinta eli automaattianturiin perustuvaa kuormitusta. VEMALA-malli tuotti etenkin seurantajakson kuormitussummaa tarkasteltaessa selvästi pienempiä kuormituslukuja kuin muut mallit. Klenkon osavaluma-alueella parhaaksi automaattianturin datan aukkojen täydentämiseen soveltuvaksi malliksi arvioitiin malli b ja Räikilänojan osavaluma-alueella malli c. Mallien tarkkuus oli niin hyvä, että tulevaisuudessa voi olla mahdollista vähentää automaattista vedenlaadun mittausta ja laskea kuormitusta ainoastaan virtaamapohjaisten mallinnusten perusteella. Tällä hetkellä kaikkiin malleihin liittyvät epävarmuudet kuitenkin vaativat vielä lisää yhtäaikaista automaattista ja näytteenottopohjaista vedenlaadun seurantaa.

VEMALA-mallinnus soveltui tässä tutkimuksessa paremmin virtaaman kuin kuormituksen mallinnukseen. Mallista saatavia virtaamia voidaan hyvällä luotettavuudella hyödyntää täydentämään Klenkon automaattisen vedenkorkeuden mittauksen aukkoja. Klenkon virtaamia voidaan edelleen hyödyntää Räikilänojan virtaamien laskennassa regressioanalyysin kautta.

Avainsanat - Nyckelord

Hajakuormitus, kuormituksen laskenta, Tuusulanjärvi, fosfori, automaattiset mittalaitteet

Keywords

Nutrient loading, calculation of nutrient loading, Tuusulanjärvi, phosphorus, automatic measuring

Säilytyspaikka - Förvaringsställe - Where deposited

Muita tietoja - Övriga uppgifter - Additional information



Tiedekunta - Fakultet - Faculty Biological and Environmental Sciences	Laitos - Institution - Department Ecosystems and Environment Research Programme	
Tekijä - Författare - Author Marika Sarkkinen		
Työn nimi - Arbetets titel Tuusulanjärven ulkoinen fosforikuormitus - Kuormituksen laskentamenetelmien vertailu Klenkon ja Räikilänojan osavaluma-alueilla		
Title The external phosphorus loading to lake Tuusulanjärvi – Comparison of different load calculation methods in Klenkko and Räikilänoja subregions		
Oppiaine - Läroämne - Subject Limnology		
Työn laji/ Ohjaaja - Arbetets art/Handledare - Level/Instructor Master's Thesis / Pasi Valkama, Jaana Hietala & Jukka Horppila	Aika - Datum - Month and year April 2018	Sivumäärä - Sidoantal - Number of pages 34 pp. + 4 appendices



Tiivistelmä - Referat - Abstract

Eutrophication caused by the increase in nutrient leaching threatens many lakes. The main reason for this is the increased concentration of phosphorus which limits the growth of algae in inland waters. Phosphorus leaches into the lakes both in soluble and particulate form. The fluctuation of phosphorus loads is fast and seasonal, and therefore, load calculation based on individual manual samples generally yield unreliable results of the total loading. To solve this problem, automatic water level and water quality measuring devices have been taken into use. Previous studies have shown that automatic sensors provide more accurate load estimates than conventional methods. However, the measurements are seldom continuous, for example, ice or low water level can prevent the operation of the measuring devices. The purpose of this work is to compare manual sample load calculation models and VEMALA load modeling system to a model based on automatic measurements and to choose the best model for filling the measurement breaks of automatic sensors.

There were five different load models compared to each other in two sub-regions: a) turbidity (autom.) - phosphorus content (manual sample) -regression b) flow - phosphorus loading (autom.) -regression c) flow - phosphorus content (manual samples) -regression d) Flow - phosphorus load (manual samples) - regression and e) VEMALA load modeling system. Except for the VEMALA modeling, all models used the same flow values. Model a is the one to which other models were compared.

All load calculation models represented well the load based on automatic measurements (model a). However, the VEMALA model produced significantly lower loads when compared to other models. In the Klenkko sub-region, the best model for filling gaps in the automated sensor data was model b and in the Räikilänoja sub-region model c. The accuracy of the models was so good that in the future it may be possible to reduce the automatic water quality measurement and calculate the load based on flow. At present, however, more simultaneous automatic and sampling-based water quality monitoring is needed to remove the uncertainties in all models.

In this study, VEMALA modeling was more suitable for modeling flow than load. The flow from the model can be utilized with great reliability to fill automatic water level measurement gaps in Klenkko sub-region. Those flows can be further exploited in the calculation of the flows of Räikilänoja.

Avainsanat - Nyckelord

Keywords

Säilytyspaikka - Förvaringsställe - Where deposited

Muita tietoja - Övriga uppgifter - Additional information

Sisällysluettelo

1.	JOHDANTO	2
1.1.	Ravinteiden huuhtoutuminen	2
1.2.	Fosforikuormitus	3
1.3.	Kuormituksen arviointi	4
1.4.	Tutkimuksen tavoite	6
2.	AINEISTO	6
2.1.	Tuusulanjärven valuma-alue.....	6
2.2.	Jatkuvatoiminen vedenlaadun seuranta	9
2.3.	Vesinäytteet.....	9
2.4.	Virtaamamittaukset.....	10
2.5.	Sadanta ja lämpötila	10
2.6.	VEMALA-kuormitusmallijärjestelmä	11
3.	AINEISTON KÄSITTELY	12
3.1.	Virtaama	12
3.2.	Anturiaineistojen kalibrointi	12
3.3.	Fosforikuormitus	12
3.3.1.	Sameus (autom.) – fosforipitoisuus (manuaalinäyte) –regressio	13
3.3.2.	Virtaama – fosforikuormitus (autom.) –regressio	13
3.3.3.	Virtaama – fosforipitoisuus (manuaalinäytteet) –regressio	14
3.3.4.	Virtaama – fosforikuormitus (manuaalinäytteet) –regressio	14
3.3.5.	VEMALA.....	14
4.	TULOKSET	15
4.1.	Sadanta ja lämpötila	15
4.2.	Virtaama	15
4.3.	Regressioanalyysit.....	17
4.4.	Kokonaisfosforikuormitukset	18
4.4.1.	Vuorokauden keskiarvot.....	18
4.4.2.	Puolen tunnin (Klenkko) ja tunnin välein (Räikilänoja)	23
5.	TULOSTEN TARKASTELU	25
5.1.	Virtaamat	25
5.2.	Regressioanalyysit.....	26
5.3.	Kuormitusmallinnukset.....	28
6.	JOHTOPÄÄTÖKSET	30
	VIITTEET	31
	LIITTEET.....	35

1. Johdanto

1.1. Ravinteiden huuhtoutuminen

Ravinteiden huuhtoutuminen piste- ja hajakuormituslähteistä järveen johtaa yleensä nopeaan biologisen tuotannon kasvuun eli järven rehevöitymiseen (Carpenter ym. 1998, Marttila 2005). Fosforin ja typen pitoisuuksien kasvaminen järvisedessä johtaa sekä levien biomassan kasvuun että levälajien suhteiden muuttumiseen. Yleensä mahdollisesti myrkyllisten syanobakteerien osuudet kasvavat merkittävästi, ja näin ollen lisääntyvät järvessä myös sinileväkukinnat (Downing 2001). Nämä leväkukinnat haittaavat veden käyttöä esimerkiksi kastelu-, talous- ja uimavetenä. Rehevöityminen on merkittävä uhka sisävesistöille (Carpenter ym. 1998), mikä edelleen uhkaa vesistöistä riippuvaista ihmistoimintaa, kuten ammattikalastusta ja vesien virkistyskäyttöä.

Tuusulanjärvi on Uudellamaalla sijaitseva järvi, joka on tärkeä niin alueen asukkaiden virkistyskäytön kuin matkailunkin kannalta. Järven voimakas rehevöityminen on alkanut 1950-luvun puolivälissä ja saavuttanut huippunsa 1970-luvun alussa (Pekkarinen 1990). Fosforikuormitusta saatiin vähennettyä tehokkaasti, kun jätevesien lasku järveen lopetettiin vuonna 1979, mutta tämä ei johtanut sinileväkukintojen häviämiseen (Pekkarinen 1990). Nykyisin järveen ei kohdistu enää pistekuormitusta (Ympäristönsuojelun tietojärjestelmä Vahti) vaan järven rehevöitynyt tila johtuu hajakuormituksesta sekä järven omasta sisäisestä kuormituksesta (Pekkarinen & Hietala 2017). Sisäisellä kuormituksella tarkoitetaan järven pohjasedimentistä vapautuvia ravinteita, joita vapautuu erityisen paljon hapettomissa olosuhteissa (Mortimer 1941, Mortimer 1942). Tuusulanjärven valuma-alueella sekä itse järvellä on toteutettu useita kuormituksen vähentämiseen tähtääviä toimenpiteitä, kuten kosteikkojen rakentamista, alusveden hapetusta, hoitokalastusta ja maatalojen ympäristöneuvontaa (Pekkarinen & Hietala 2017).

Useissa laaja-alaisissa järvitutkimuksissa on todettu fosforin olevan levien kasvua rajoittava tekijä ja näin ollen sen pitoisuuden vähentämisen olevan merkittävin tekijä rehevöitymiskehityksen katkaisemisessa (Schindler 2012). Eurooppalaisessa 800 järven meta-analyysissä todettiin fosforipitoisuuden vähentämisen järvessä olevan erittäin tehokas keino vähentää leväkukintoja ja heikentää syanobakteerien valta-asemaa

(Laurence ym. 2013). Näin ollen fosforin kuormituksen vähentäminen on tärkeä toimenpide järvien virkistyskäytöllisen arvon parantamiseksi.

1.2. Fosforikuormitus

Kokonaisfosforikuormitus muodostuu liukoisesta fosforista ja kiintoainekseen sitoutuneesta eli partikkelifosforista. Liunneen fosforin kuormituksen selvittämisessä maaperän P-luvun eli fosforipitoisuuden (mg/l maata) on todettu selittävän merkittävän osuuden valumaveden liunneen fosforin pitoisuudesta. Esimerkiksi laboratorioskokeissa on selitysasteeksi saatu niinkin korkea kuin 80 % (Uusitalo & Ekholm 2004) ja kenttäkokeissa selitysasteeksi on saatu noin 66 % (Uusitalo & Jansson 2008). Fosforikuormituksen on todettu kuitenkin monesti olevan valtaosin partikkelifosforia. Esimerkiksi savipelloilla partikkelifosforin osuudeksi kokonaiskuormituksesta on saatu 73 - 94 % (Uusitalo & Ekholm 2004). Partikkelifosfori kulkeutuu eroosion vaikutuksesta pelloilta vesistöihin. Etenkin savimailla eroosio on ongelmallista, sillä saves (< 0,002 mm) sekä alumiinin ja raudan (hydr)oksidit huuhtoutuvat heikonkin sateen vaikutuksesta, ja savimaat sisältävät yleensä paljon fosforia pidättäviä oksideja sekä vapaana että savespartikkeleihin pidättyneenä (Aura ym. 2006).

Hydrologiset tekijät, kuten sadanta, valunta ja routa, ovat merkittävässä roolissa eroosion ja kiintoainekseen sitoutuneen fosforin kuormituksen synnyssä (Rekolainen & Posch 1993). Sadanta tai lumen ja roudan sulaminen johtaa luonnollisesti valunnan ja edelleen ojien virtaamien kasvuun. Suomessa virtaamahuiput esiintyvät pääasiallisesti keväällä lumien sulamisen aikaan ja syksyllä syyssateiden aikaan (Rankinen ym. 2015, Gonzales-Inca ym. 2016, Puustinen ym. 2007). Kun virtaamat ojissa kasvavat, samaan aikaan kasvavat myös ojavesien kiintoaine- ja ravinnepitoisuudet (Siimekselä 2011, Koskiaho ym. 2010, Linjama ym. 2009). Maatalousmailla muutamat yksittäiset virtaamahuiput vastaavat jopa yli puolesta tulevasta fosforikuormituksesta (Royer ym. 2006). Royer ym. (2006) osoittivat myös, että keskimääräisten tai sitä suurempien virtaamien aikana kuormituksesta syntyy ≥ 90 %. Tämä tarkoittaa sitä, että talven ja kesän alivirtaama-aikoina syntyy enintään 10 % kokonaisfosforin vuosikuormituksesta. Hydrologisten tekijöiden vaikutuksen kuormitukseen onkin todettu olevan niin suuri, että valuma-alueella tehtävien kuormituksen vähentämiseen tähtäävien toimenpiteiden vaikutukset

jäävät helposti kokonaan huomaamatta hydrologisten suureiden ajallisen vaihtelun vuoksi (Puustinen ym. 2007).

Sadannan ja roudan määrän lisäksi myös maankäytöllä on merkittävä vaikutus valuma-alueelta syntyvään ravinnekuormitukseen. Maankäyttö vaikuttaa suuresti niin alueelta syntyvään valuntaan kuin ravinteiden määrään ja huuhtoutumisherkkyyteen maaperässä. Pelkästään maatalousmaan pinta-alan osuuden valuma-alueesta on osoitettu merkittävästi korreloivan alueen fosforikuormituksen kanssa (Vuorenmaa ym. 2002). Lisäksi on todettu, että maatalousmailla valunnan muutokset ja siihen sisältyvät kuormitusprosessit tapahtuvat nopeasti, koska peltojen kuivatus on tehokasta ojituksen takia (Puustinen ym. 2007). Samanlainen tilanne on myös rakennetussa ympäristössä, jossa viemärit ja ojat kuivattavat nopeasti vettä läpäisemättömät asfalttipinnat. Erässä hulevesitutkimuksessa on todettu, että sadannasta päätyy kaupunkipuroihin kesällä noin 20 %, syksyllä noin 30 – 40 % ja talvella 50 – 90 % (Huhta ym. 2016). Hulevesillä tarkoitetaan maan pinnalta, rakennuksen katolta tai muilta vastaavilta pinnoilta pois johdettavaa sade- tai sulamisvettä (Vesihuoltolaki 119/2001).

1.3. Kuormituksen arviointi

Järviin kohdistuvaa fosforikuormitusta on perinteisesti arvioitu joko ominaiskuormituslukujen tai manuaalinäytteiden ja alueen valunnan avulla. Näistä jälkimmäinen menetelmä on tähän asti ollut käytössä Tuusulanjärven ravinnekuormituksen arvioinnissa (Marttila 2005, Muukkonen 2009). Kuormituksen laskenta koko Suomelle ja säältään keskimääräiselle vuodelle laadittujen ominaiskuormituslukujen tai muutaman kerran vuodessa otettujen näytteiden pohjalta on kuitenkin epävarmaa, minkä takia tarkempia mallinuksia ja mittauksia on pyritty aktiivisesti kehittämään. Tällaisia ovat esimerkiksi jatkuvatoimiset vedenlaadun mittalaitteet sekä Suomen ympäristökeskuksen (SYKE) kuormitusmallijärjestelmä VEMALA.

Jatkuvatoimisessa vedenlaadun ja virtaaman seurannassa käytetään automaattiantureita, jotka mittaavat tietyin väliajoin esimerkiksi joen virtaamaa ja valittuja vedenlaadun parametreja. Antureilla voidaan mitata esimerkiksi vedenkorkeutta, sameutta ja liuennutta orgaanista hiiltä, mutta ei kuitenkaan fosforia. Automaattiantureita pidetään

yleisesti näytteenottopohjaista menetelmää tarkempaa kuormituksen määrittämiskeinona (Koskiaho ym. 2015, Koskiaho ym. 2010, Kirchner ym. 2004)

Automaattianturien käyttö vaatii suurta tarkkuutta niin anturien huollossa kuin datan käsittelyssä. Esimerkiksi säännöllinen huoltaminen paikan päällä on tärkeää, sillä sensorien linssit likaantuvat helposti esimerkiksi levän tai kiintoaineksen vaikutuksesta (Koskiaho ym. 2015). Mitatun datan kalibroinnin kannalta on tärkeää, että manuaalisia näytteitä on otettu niin ali-, keski- kuin ylivirtaama-aikoina. Jos näytteenottoja ei saada osumaan kuormitushuippuihin, kalibroinnin laatu heikkenee merkittävästi (Linjama ym. 2009). Kuitenkin, jos automaattianturien sensorit on oikeaoppisesti kalibroitu ja automaattisesti mitatun sameuden ja laboratoriossa määritetyn sameuden välillä on hyvä korrelaatio, voidaan automaattimittausten tulosten todeta olevan luotettavia (Garfí ym. 2014). Automaattianturien käytön voidaankin riskeistä ja haasteista huolimatta yksiselitteisesti todeta olevan perinteistä näytteenottoa tarkempaa, sillä automaattiseurannassa monitoroitujen jaksojen määrä on suurempi (Koskiaho ym. 2015).

Koska fosforille ei ole olemassa omaa sensoria, on fosforikuormituksen määrittäminen automaattisensoreita hyödyntäen mahdollista ainoastaan paikoissa, joissa on hyvä korrelaatio veden sameuden ja kokonaisfosforipitoisuuden välillä. Tilanne on tällainen yleensä savisameissa joissa ja ojissa (Valkama ym. 2007, Linjama ym. 2009, Koskiaho ym. 2015). Savimaiden osuuden valuma-alueesta vähentyessä korrelaatiokertoimet jäävät pieniksi (Jaakkola 2013), eikä fosforikuormitusta voida enää luotettavasti määrittää sameuden pohjalta.

Tässä työssä on kuormituksenlaskennassa hyödynnetty viittä eri kuormitusmallia:

- a) Sameus (autom.) – fosforipitoisuus (manuaalinäyte) –regressio, jossa automaattianturin mittaamaa ja manuaalinäytteillä kalibroitu sameutta verrataan automaattimittauksen kanssa samaan aikaan otetun manuaalinäytteen kokonaisfosforipitoisuuteen.
- b) Virtaama – fosforikuormitus (autom.) –regressio, jossa vuorokauden keskivirtaamaa verrataan edellä mainitulla tavalla laskettuun vuorokauden keskifosforikuormitukseen,

- c) Virtaama – fosforipitoisuus (manuaalinäytteet) –regressio, jossa vuorokauden keskivirtaamaa verrataan samana päivänä otetun manuaalinäytteen kokonaisfosforipitoisuuteen.
- d) Virtaama – fosforikuormitus (manuaalinäytteet) –regressio, jossa vuorokauden keskivirtaamaa verrataan saman päivänä otetun manuaalinäytteen avulla laskettuun kokonaisfosforikuormitukseen.
- e) VEMALA-kuormitusmallijärjestelmä (vain Klenkko), jossa malli laskee tietylle alueelle tai jokipisteelle arvioidun päiväkohtaisen fosforikuormituksen.

1.4. Tutkimuksen tavoite

Tutkimuksen tarkoitus on vertailla eri kuormituksenlaskentamenetelmillä laskettuja kokonaisfosforikuormituksia kahdella eri Tuusulanjärven osavaluma-alueella. Oletuksena on, että automaattimittarin antamista vedenkorkeus- ja sameusarvoista laskettu kokonaisfosforikuormitus on kaikkein tarkin. Vertailun tuloksena pyritään löytämään molemmille alueille sopivin kuormituksenlaskentamalli, jolla voidaan vuosikuormituksia laskettaessa täydentää puuttuvia automaattimittausajankasjoja.

2. Aineisto

2.1. Tuusulanjärven valuma-alue

Tuusulanjärven valuma-alue on noin 88 km², josta tässä työssä käytetyn rajauksen mukaan 85 % on kaukovaluma-aluetta ja 15 % lähivaluma-aluetta (kuva 1). Tuusulanjärveen laskee yhdeksän puroa, joista tässä työssä on tarkasteltu kahta: Sarsalanojaa (Klenkko) ja Räikilänjojaa. Valuma-aluerajauksen pohjana on käytetty Vantaan ja Helsingin seudun vesiensuojeluyhdistyksen (Lahti ym. 2016) laatimia valuma-aluerajauksia. Tätä työtä varten kyseisten rajausten lisäksi on korkeuskäyrien ja korkeusvyöhykkeiden (Maanmittauslaitos) pohjalta eritelty Sarsalanojan valuma-alueen sisälle rajattu Klenkon valuma-alue.

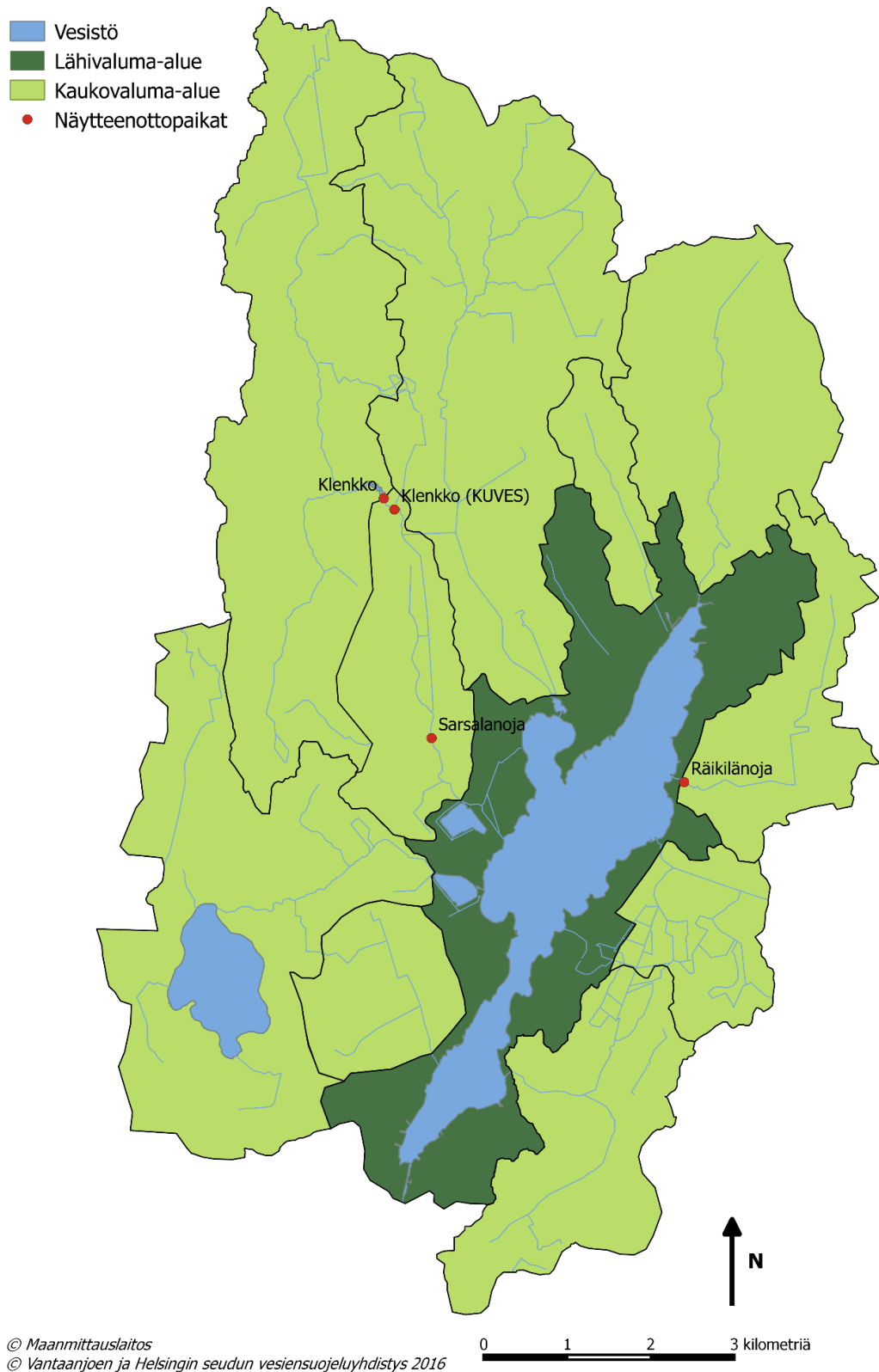
Tuusulanjärven osavaluma-alueiden pinta-alat sekä maankäyttömuodot määritettiin QGIS-paikkatieto-ohjelmalla valuma-aluerajausten ja Corine2012 (20 m) (Suomen ympäristökeskus 2014) aineiston pohjalta (taulukko 1). Räikilänjojan valuma-alue eroaa selvästi Klenkon valuma-alueesta rakennetun alueen osuuden suhteen. Räikilänjojan valuma-alueesta noin puolet on rakennettua aluetta, mikä näkyy erityisesti alhaisena

metsämaan osuutena. Maankäyttömuotojen tarkempi jakautuminen valuma-alueittain on esitetty liitteessä 1.

Koko Tuusulanjärven valuma-alueesta hieman yli puolet on savimaata. Räikilänojan valuma-alueesta savimaata on lähes kaikki, ainoastaan pieniä määriä moreenia löytyy alueelta. Klenkon / Sarsalanojan valuma-alueelta löytyy saven lisäksi moreenia sekä pieni määrä liejua ja turvemaata. Maalajien tarkempi jakautuminen valuma-alueittain on esitetty liitteessä 2.

Taulukko 1. Sarsalanojan, Klenkon ja Räikilänojan osavaluma-alueiden pinta-alat (km²) sekä metsämaan, maatalousmaan ja rakennetun alueen osuudet valuma-alueiden pinta-alasta (%).

Valuma-alue	Pinta-ala (km ²)	Metsämaa (%)	Maatalousmaa (%)	Rakennettu (%)
Sarsalanoja	19,3	50	41	7
Klenkko	15,0	55	38	7
Räikilänoja	4,4	19	34	45



Kuva 1. Tuusulanjärven valuma-alue ja osavaluma-alueiden näytteenottopisteet: Räikilänoja (automaattimittari ja näytteenottopiste), Klenkko (automaattimittari ja näytteenotto), Sarsalanoja (VEMALA) ja Klenkko KUVES (näytteenotto).

2.2. Jatkuva toiminen vedenlaadun seuranta

Tutkimuksessa oli käytössä kaksi automaattista vedenlaadun ja vedenpinnan korkeuden seurantalaitetta (Luode Consulting Oy). Vedenpinnan korkeus mitattiin paineanturilla ja vedenlaadun muuttujat eli nitraattityppi, liuennut orgaaninen hiili (DOC) ja sameus S::can-spektrometrian turilla. Laadunvarmennettu raakadata ladattiin exceliin Luode Consulting Oy:n sivuilta.

Klenkossa automaattisen seurantalaitteen vedenkorkeuden mittaus oli käynnissä 1.11.2016 – 31.12.2017. Vedenlaadun mittaus oli käynnissä 1.11.2016 – 2.1.2017 sekä 28.2.2017 – 30.11.2017 (yhteensä 339 vrk). Anturi mittasi vedenkorkeuden ja vedenlaadun puolen tunnin välein. Klenkon tuloksia kalibroitaessa ja tarkasteltaessa tulee huomioida se, että mittarin sijaintia vaihdettiin parempaan paikkaan 2.1.2017. Lisäksi ajanjaksolla 1.11.2016 – 2.1.2017 oli vedenlaadun mittauksessa käytössä 5 mm kyvetti, ajanjaksolla 28.2. – 20.4.2017 1 mm kyvetti ja ajanjaksolla 20.4. – 31.12.2017 5 mm kyvetti, mutta eri ohjelmisto. Tästä syystä sameuden kalibrointi on suoritettu kolmessa eri jaksossa.

Toinen mittareista sijaitsi Räikilänojassa ja oli käytössä vuosien 2016 ja 2017 aikana neljän eri mittausjakson aikana: 14.3.2016 – 20.5.2016, 15.11.2016 - 9.1.2017, 27.2.2017 - 3.5.2017 ja 14.11.2017 – 31.12.2017 (yhteensä 241 vrk). Anturi mittasi vedenkorkeuden ja vedenlaadun tunnin välein.

2.3. Vesinäytteet

Ravinnekuormituksen määrittämiseksi ja automaattidatan kalibroimiseksi kerättiin Valtion ympäristöhallinnon Hertta-järjestelmästä näytteenottotulokset Räikilänojasta vuosilta 2016 – 2017. Lisäksi käytössä oli Keski-Uudenmaan vesiensuojelun liikelaitoskuntayhtymän (KUVES) omia näytteenottotuloksia Klenkosta ja Räikilänojasta vuosilta 2016 - 2017 sekä Vantaan ja Helsingin seudun vesiensuojeluyhdistyksen (VHVSY) näytteenottotuloksia marraskuulta 2017. Näytteistä on määritetty sameus (FNU), kokonaisfosfori ($\mu\text{g/l}$) ja fosfaattifosfori ($\mu\text{g/l}$). Sameus ja kokonaisfosforipitoisuus on määritetty suodattamattomista näytteistä. Fosfaattifosforin määrittämisessä käytettiin esikäsittelyä 0,4 μm suodatusta.

Klenkosta on otettu vesinäytteitä kahdesta eri paikasta eli automaattimittarin vierestä sekä noin 200 m sen alapuolelta (kuva 1). Automaattianturin alapuolelta otettujen näytteiden todettiin soveltuvan hyvin automaattiaineiston kalibrointiin sekä parantavan regressiosuorien luotettavuutta lisäämällä kokonaisnäytteiden lukumäärää.

Kaiken kaikkiaan vesinäytteitä oli Räikilänojasta otettu mittausajanjaksojen aikana 17 kappaletta ja Klenkosta 22 kappaletta (taulukko 2). Räikilänojan kohdalla 23.3.2016 otettu näyte jätettiin pois, sillä kyseisestä näytteestä määritetty sameus ei vastannut automaattianturin antamaa arvoa toisin kuin muut mittausajanjakson näytteet. Näin ollen Räikilänojan kohdalla käytettiin vain 16 näytettä.

Taulukko 2. Työssä käytettyjen näytteiden ja automaattimittausten määrä osavalmualueittain.

Näytteenottopaikka	Näytteiden lukumäärä (kpl)	Automaattimittausten lukumäärä (kpl)
Klenkko	22	16 139
Räikilänoja	16	5 588

2.4. Virtaamamittaukset

Virtaamaa mitattiin Klenkosta ja Räikilänojasta FlowTrackerillä VHVSY:n toimesta. Tuloksien perusteella määritettiin purkautumiskäyrät molemmille ojille (liite 3). Purkautumiskäyrien avulla automaattianturin vedenpinnan korkeuden mittaukset muutettiin veden virtausnopeudeksi (l/s). Purkautumiskäyrää varten Klenkosta oli käytössä seitsemän virtaamamittausta ja Räikilänojasta kolme.

2.5. Sadanta ja lämpötila

Sadanta ja lämpötilatiedot kerättiin Ilmatieteenlaitoksen avoimen datan palvelusta. Tuusulanjärveä lähin sääasema sijaitsee Helsinki-Vantaan lentokentällä noin 15 kilometrin päässä. Sadanta-arvot (mm) ja lämpötila-arvot (°C) kerättiin vuosille 2016 ja 2017 vuorokausiarvoina. Lisäksi vertailudataksi kerättiin vuosien 2000 – 2017 kuukausittaiset sadesummat sekä keskilämpötilat.

2.6. VEMALA-kuormitusmallijärjestelmä

Tuusulanjärven ulkoinen kuormitus voidaan mallintaa myös SYKEN VEMALA-kuormitusmallijärjestelmän avulla. Ohjelmasta voidaan valita kuormitus koko Tuusulanjärven valuma-alueelta tai osavaluma-alueittain. Vesistömallinnusjärjestelmästä löytyvät osavaluma-alueet ovat Haukkalanoja, Sarsalanoja, Mäyränoja ja Piilioja. Tätä työtä varten kerättiin aineistot Sarsalanojasta sekä koko osavaluma-alueelta tulevana kuormituksena (alue) että jokipisteen kohdalta (piste). Piste-mallissa järjestelmä kalibroi alue-mallin kuormitusarviota vesinäytteistä mitattujen ravinnepitoisuuksien avulla. Malli laskee kuormitushavainnot muodossa kg/vrk ja tätä työtä varten kerättiin kuormitustiedot vuosilta 2016 ja 2017. Aineisto soveltuu vertailuun Klenkon muiden kuormitusmallien kanssa, sillä Klenkon alue sisältyy Sarsalanojan valuma-alueeseen. Pinta-alaltaan Sarsalanojan valuma-alue on noin 4 km² Klenkon valuma-aluetta suurempi.

VEMALasta on käytössä tällä hetkellä fosforikuormituksen laskentaan kaksi eri versiota, joista viimeisin eli VEMALA V3 on tarkempi, mutta vielä keskeneräinen. VEMALA V3 mallissa on yhdistetty useita eri ravinnejakeiden kulkeutumista ja muuntumista simuloivia malleja, kuten ominaiskuormituslukuihin pohjautuva VEMALA V1, biogeokemiallisia muutoksia käsittelevä RIVE-malli ja peltojen kuormitusta käsittelevä ICECREAM-malli (Korppoo ym. 2017). ICECREAM-mallinnuksen sisällyttäminen V3 mallinnukseen tarkentaa maatalousvaltaisilla valuma-alueilla kuormituksen laskentaa V1 malliin verrattuna. ICECREAM-mallinnus arvioi peltojen ravinnekuormitusta valunnan, pellon maalajin, kaltevuuden, viljeltävän kasvin, pellon fosforiluvun ja viljelykäytäntöjen pohjalta (Bärlund ym. 2009). Sen sijaan V1 käyttää pohjanaan ominaiskuormituslukuja. Tässä työssä hyödynnetään VEMALasta saatavia kokonaisfosforikuormitusarvoja versioista V1 ja V3. Aineistot kerättiin 13.2.2018.

Kuormituksen lisäksi Sarsalanojalle on mallinnettu virtaama. Järjestelmästä saadaan vedenvirtausnopeus m³/s vuorokausiarvoina. Tätä työtä varten kerättiin arvot vuosilta 2016 ja 2017. Aineistot kerättiin 7.2.2018.

3. Aineiston käsittely

3.1. Virtaama

Räikilänojan ja Klenkon kohdalla virtaamat laskettiin paineanturin mittaamista vedenpinnan korkeuksista purkautumiskäyrän avulla. Räikilänojalla arvot saatiin tunnin välein mitattuina, joista edelleen laskettiin virtaaman päiväkeskiarvot. Klenkon kohdalla arvot saatiin puolen tunnin välein, joista yhtä lailla laskettiin virtaamalle päiväkeskiarvot. Räikilänojan purkautumiskäyrästä saatu yhtälö muodosti jonkin verran negatiivisia virtaama-arvoja, jotka kuormituslaskemien mielekkyyden takia korvattiin arvolla 0.

VEMALA-mallinnuksesta saadut Sarsalanojan virtaamamittaukset (m^3/s) muunnettiin muotoon l/s . Lisäksi virtaamat sovitettiin Klenkon valuma-alueelle valuma-alueiden pinta-alojen suhteen avulla:

$\text{virtaama (l/s) / Sarsalanojan valuma-alue (km}^2\text{) * Klenkon valuma-alue (km}^2\text{)}$

3.2. Anturiaineistojen kalibrointi

Anturimittausten sameusarvot kalibroitiin vesinäytteistä määritettyjen sameusarvojen avulla. Automaattimittarin datasta valittiin vesinäytteenoton kanssa samaan aikaan mitattu arvo. Jos näytteenottohetki osui automaattimittausten väliin, valittiin sitä lähin arvo. Lähintä arvoa valittaessa tarkistettiin myös, että sameuden tai virtaaman arvoissa ei ollut suurta eroa kahden näytteenoton välillä. Näytteenoton ja automaattimittauksen välinen aikaero on Räikilänojan kohdalla pisimmillään 30 minuuttia ja Klenkon kohdalla pisimmillään 15 minuuttia. Saaduista arvoista tehtiin tilasto-ohjelma R:llä lineaarinen regressioanalyysi. Anturiaineiston kalibroidut arvot laskettiin anturiaineiston ja vesinäytteiden välille muodostuneen regressiosuoran yhtälön avulla. Räikilänojan sameusdataa kalibroitaessa tehtiin yksi regressioanalyysi ja Klenkon dataa kalibroidessa kolme regressioanalyysia (kts. kohta 2.2.).

3.3. Fosforikuormitus

Kokonaisfosforikuormitus määritettiin neljällä eri laskentatavalla. Kaikissa käytettiin samoja virtaama-arvoja eli ainoastaan fosforipitoisuuden tai fosforikuormituksen laskentatapa vaihteli. Virtaamana käytettiin kaikissa purkautumiskäyrien pohjalta laskettuja virtaamia (l/s). Kaikki neljä mallia mallinnettiin erikseen sekä tarkkoina

arvoina (30 min / 1 h) että vuorokausikeskiarvoina. Klenkon osalta siis kuormitus (kg P/vrk) on laskettu eri menetelmillä puolen tunnin välein ja vuorokausikeskiarvoina. Räikilänojalle kuormitus (kg P/vrk) on laskettu eri menetelmillä tunnin välein ja vuorokausikeskiarvoina.

Klenkon kohdalla fosforikuormitus mallinnettiin myös VEMALA-kuormitusmallijärjestelmällä. VEMALAssa käytössä oli neljä eri mallinnusta: V1 (alue), V1 (piste), V3 (alue) ja V3 (piste).

3.3.1. Sameus (autom.) – fosforipitoisuus (manuaalinäyte) –regressio

Kokonaisfosforipitoisuuden ($\mu\text{g/l}$) ja automaattisesti mitatun sameuden (FNU) välistä yhteyttä verrattiin lineaarisella regressioanalyysillä. Analyysissä x-akselille sijoitettiin kalibroidut sameusarvot ja y-akselille manuaalinäytteistä mitatut kokonaisfosforipitoisuudet. Regressiosuoran yhtälön avulla laskettiin kokonaisfosforipitoisuus Räikilänojalle tunnin välein ja Klenkolle puolen tunnin välein siltä osin, kun automaattimittausdataa oli käytössä. Pitoisuuksista laskettiin edelleen a) pitoisuuksien vuorokausikeskiarvot b) fosforikuormitukset tunnin tai puolen tunnin välein ja c) fosforikuormituksen vuorokausikeskiarvot.

3.3.2. Virtaama – fosforikuormitus (autom.) –regressio

Virtaaman (l/s) ja autom. kokonaisfosforikuormituksen (kg/vrk) välistä yhteyttä verrattiin polynomisella regressioanalyysillä. Myös lineaarista regressioanalyysia testattiin, mutta ANOVA-testi osoitti polynomisen regression tuottavan tilastollisesti merkittävästi paremman tuloksen. Analyysissä x-akselille sijoitettiin virtaama ja y-akselille kokonaisfosforikuormitus. Kokonaiskuormitusarvoina käytettiin sameuden pohjalta laskettuja kuormitusarvoja (kts. kohta 3.3.1.). Räikilänojalle regressiosuora laskettiin sekä tunnin välein mitatuista arvoista että vuorokausikeskiarvoista. Klenkon kohdalla voitiin käyttää vain vuorokausikeskiarvoja, sillä fosforin hysteresis-ilmiö (Seuna & Vehviläinen 1986) esti puolen tunnin välein mitattujen arvojen käytön. Klenkon kohdalla suora pakotettiin kulkemaan nollan kautta, jotta virtaaman ollessa nolla myös kuormitus olisi nolla. Räikilänojan kohdalla nollaan pakotusta ei voitu tehdä, sillä kyseisen nollaan pakotetun suoran yhtälön käyttö kuormitusten laskennassa johti suureen määrään

negatiivisia kuormitusarvoja. Saatujen regressiosuorien yhtälöiden avulla pystyttiin laskemaan kokonaisfosforikuormitus (kg/vrk), kun tiedossa oli mittausajanjaksojen virtaamat.

3.3.3. Virtaama – fosforipitoisuus (manuaalinäytteet) –regressio

Virtaaman (l/s) ja kokonaisfosforipitoisuuden ($\mu\text{g/l}$) välistä yhteyttä verrattiin lineaarisella regressioanalyysillä. Analyysissä x-akselille sijoitettiin virtaama ja y-akselille kokonaisfosforipitoisuus. Regressiosuoran yhtälön avulla laskettiin osavalueille kokonaisfosforipitoisuudet virtaaman pohjalta. Näin saadun fosforipitoisuuden ja automaattisesti mitatun virtaaman avulla pystyttiin edelleen laskemaan kokonaisfosforikuormitus (kg/vrk):

(virtaama (l/s) * 60 * 60 * 24) * (kokonaisfosforipitoisuus ($\mu\text{g/l}$) / 1 000 000 000)

3.3.4. Virtaama – fosforikuormitus (manuaalinäytteet) –regressio

Virtaaman (l/s) ja fosforikuormituksen (kg/vrk) välistä yhteyttä verrattiin polynomisella regressioanalyysillä. Myös lineaarista regressioanalyysia testattiin, mutta ANOVA-testi osoitti polynomisen regression tuottavan tilastollisesti merkittävästi paremman tuloksen. Analyysissä x-akselille sijoitettiin virtaama (l/s) ja y-akselille kokonaisfosforikuormitus (kg/vrk). Kokonaisfosforikuormitus laskettiin kertomalla manuaalisen näytteen kokonaisfosforipitoisuus näytteenottoajan virtaamalla (kts. kohta 3.3.3.). Riippuen siitä, mallinnettiinko tarkkoja arvoja (30 min / 1 h) vai vuorokausikeskiarvoja, käytettiin joko näytteenottopäivän keskiarvovirtaamaa tai tarkkaa näytteenottohetken virtaamaa. Polynomisen suora pakotettiin kulkemaan nollan kautta, jotta virtaaman ollessa nolla myös kuormitus olisi nolla. Regressiosuorasta saadun yhtälön avulla pystyttiin edelleen laskemaan kokonaisfosforikuormitus (kg/vrk).

3.3.5. VEMALA

VEMALA-kuormitusmallijärjestelmän kuormitusarvot olivat muodossa kg/vrk. Käytössä oli neljä eri mallinnusta: Sarsalanoja V1 (piste), Sarsalanoja V1 (alue), Sarsalanoja V3 (piste) ja Sarsalanoja V3 (alue). Mallien arvot suhteutettiin Klenkon

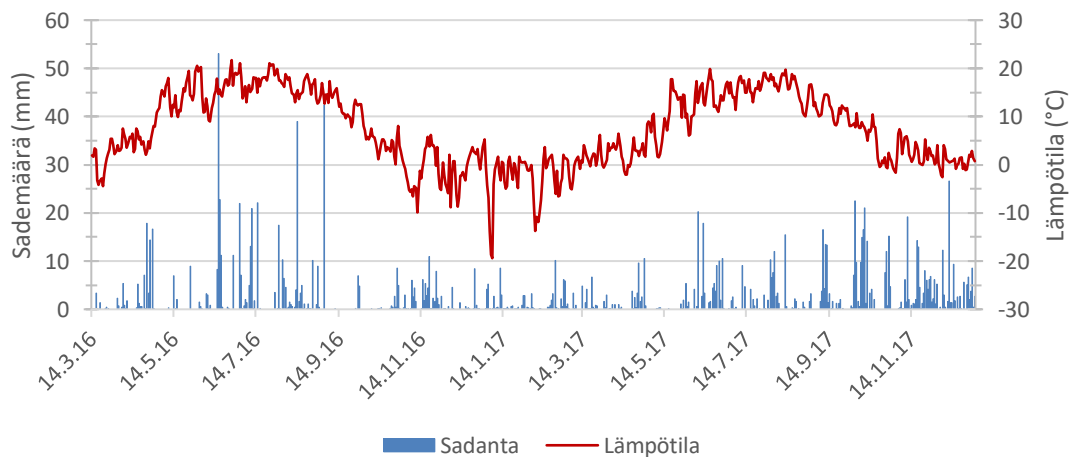
valuma-alueelle valuma-alueiden pinta-alojen suhteen avulla: fosforikuormitus (kg/vrk)
/ Sarsalanojan valuma-alue (km²) * Klenkon valuma-alue (km²)

4. Tulokset

4.1. Sadanta ja lämpötila

Mittausajanjaksojen kohdalle osui epätavallisen leuto ja sateinen syksy / alkutalvi 2017 sekä epätavallisen kuiva syksy / alkutalvi 2016 (kaavio 1). Kokonaisuudessaan vuodet 2016 ja 2017 olivat 2000-lukuun verrattaessa keskilämpötilaltaan tyypillisiä vuosia. Sen sijaan sadanta oli vuosina 2016 ja 2017 selvästi 2000-luvun keskiarvoa suurempaa. Keskisadanta vuosina 2000 – 2017 oli 669 mm, kun vuonna 2016 vuosisadanta oli 743 mm ja vuonna 2017 se oli 801 mm.

Vuonna 2017 vuosisadannasta noin 50 % satoi loka-joulukuun välisenä aikana. Sen sijaan vuonna 2016 vuosisadannasta ainoastaan 15 % satoi loka-joulukuun välisenä aikana. Vuonna 2016 sateet painottuivat enemmän kesään ja alkusyksyyn. Vuonna 2016 noin 45 % vuosisadannasta satoi kesä-elokuun välisenä aikana.



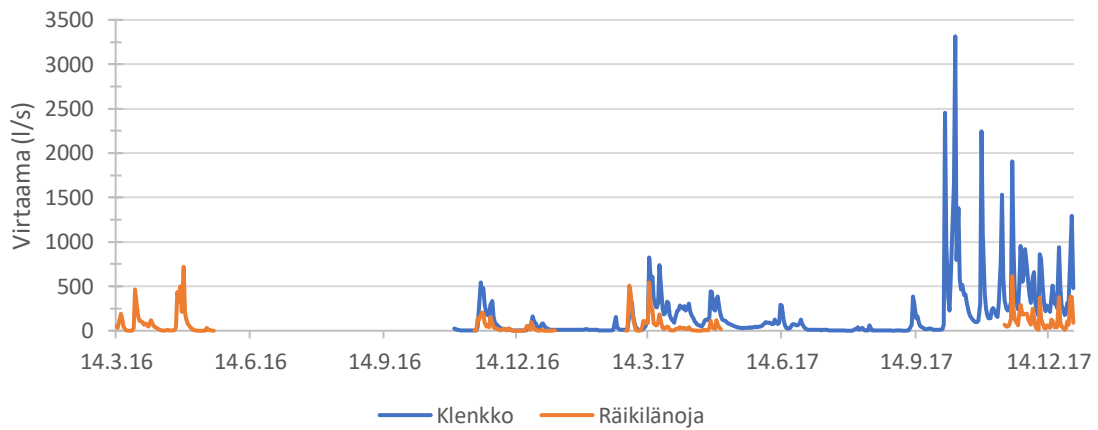
Kaavio 1. Vuorokausisadanta (mm) ja vuorokauden keskilämpötila (°C) Helsinki-Vantaan lentoasemalla 14.3.2016 – 31.12.2017.

4.2. Virtaama

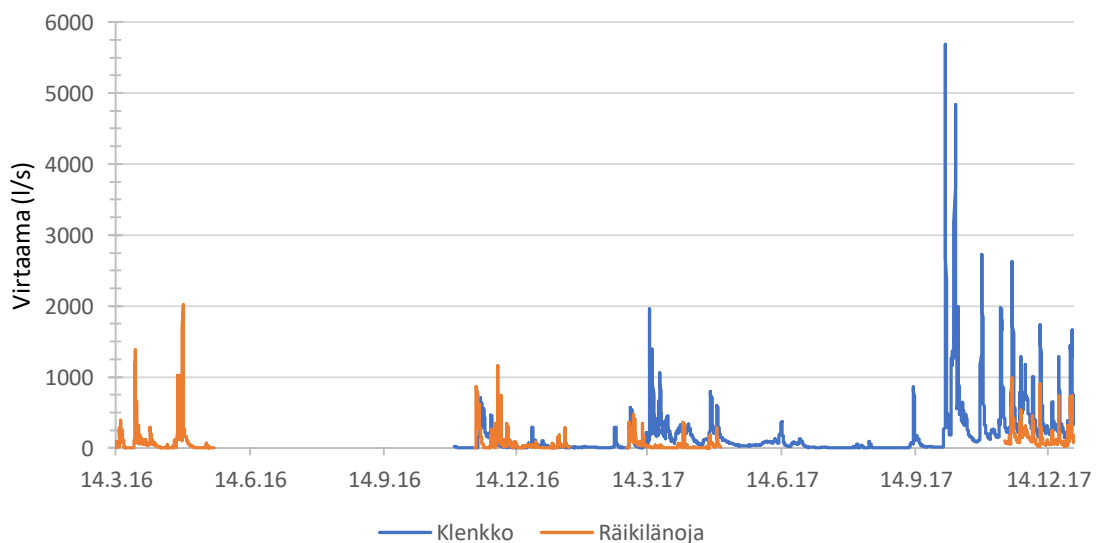
Klenkon virtaamat ovat selvästi suurempia kuin Räikilänojan virtaamat (kaaviot 2 ja 3). Tämä on odotettavissa, sillä Klenkon valuma-alue on noin kolme kertaa suurempi kuin

Räikilänojan valuma-alue. Lisäksi Räikilänojan virtaamahuiput esiintyvät hieman ennen Klenkon virtaamahuippuja (kaavio 3). Esimerkiksi keväällä 2017 lumien sulamisen aikaan, Räikilänojan virtaamahuiput olivat jo ohi, kun Klenkon virtaamahuiput vasta alkoivat. Molemmilla alueilla korkeimmat virtaamat ilmenevät syksyllä sadantajaksojen jälkeen tai keväällä lumen sulamisen jälkeen.

Räikilänojan ja Klenkon virtaamia on mahdollista verrata keskenään myös lineaarisella regressiolla. Jos Räikilänojan virtaamien (1 h) ja Klenkon virtaamien (1 h) välille piirretään suora, voidaan todeta, että parhain korrelaatio näiden kahden välille syntyy, kun Räikilänojan arvoja verrataan neljä tuntia myöhempisiin Klenkon arvoihin ($R^2 = 0,6741$; $p < 0,001$).

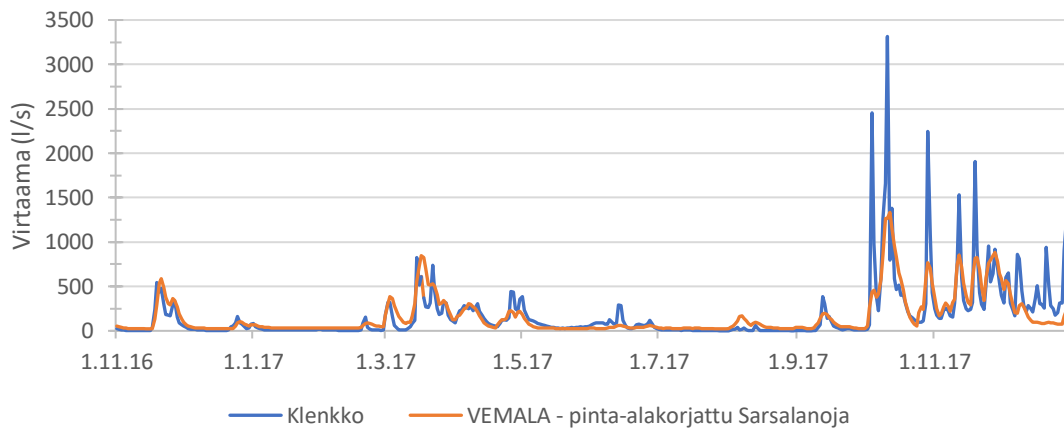


Kaavio 2. Klenkon ja Räikilänojan automaattianturilla mitatut vuorokauden keskiarvovirtaamat (l/s).



Kaavio 3. Virtaamat (l/s) mitattuna Klenkosta puolen tunnin välein ja Räikilänojasta tunnin välein.

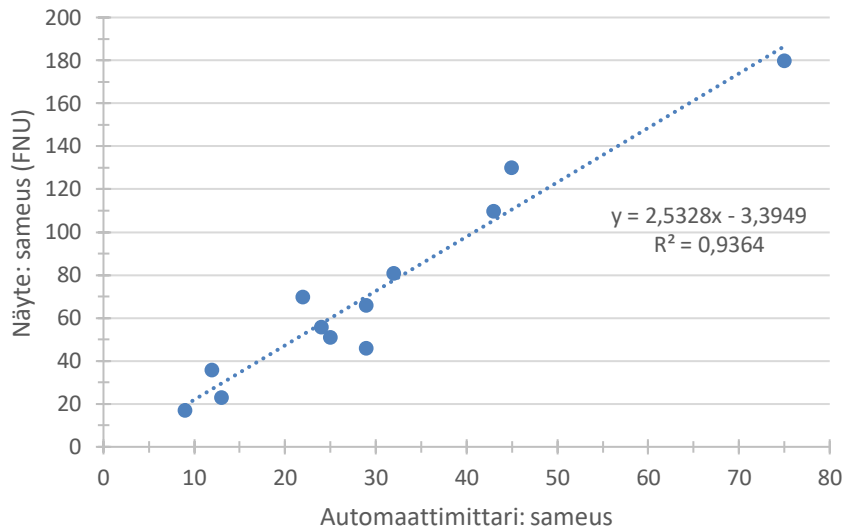
Klenkon virtaamia on mahdollista ennustaa myös VEMALA-kuormitusmallijärjestelmästä saatavien Sarsalanojan vuorokausivirtaamien avulla. VEMALA-mallista saadut valuma-alueen pinta-alaan suhteutetut virtaamat kuvastavat hyvin Klenkon automaattianturilla mitattuja arvoja (kaavio 4). Ainoastaan vuoden 2017 loppusyksyn ja alkutalven arvojen voidaan todeta olevan virtaamahuippujen osalta selvästi automaattimallinnusta pienempiä. Lisäksi kesän 2017 pieni virtaaman kasvu jää puuttumaan VEMALA-mallista.



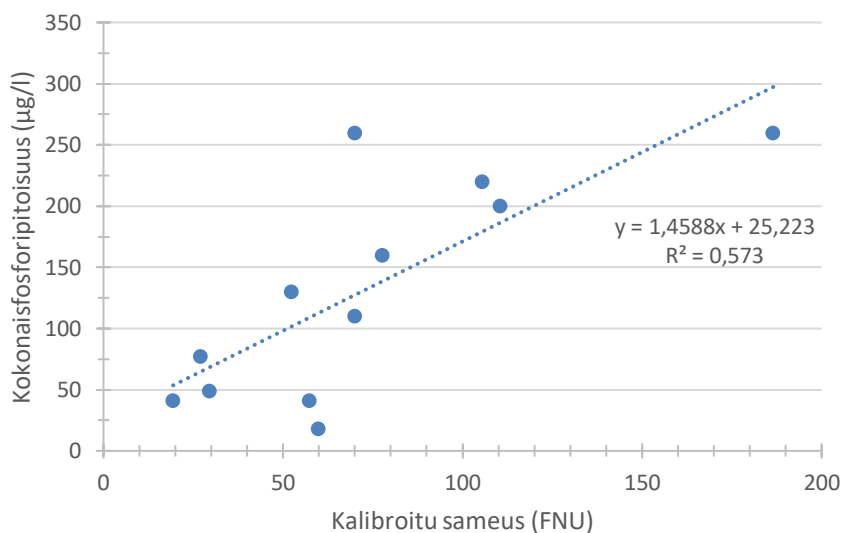
Kaavio 4. Klenkon automaattianturilla mitatut vuorokauden keskiarvovirtaamat (l/s) sekä VEMALA-mallista saadut Sarsalanojan vuorokausivirtaamat (l/s). Sarsalanojan virtaamat on suhteutettu Klenkon valuma-alueelle valuma-alueiden pinta-alojen suhteen avulla.

4.3. Regressioanalyysit

Sameuden kalibrointi onnistui hyvin sekä Räikilänojan että Klenkon kolmen eri kalibrointijakson kohdalla (esimerkkinä kaavio 5). Selitysaste jäi matalimmaksi Klenkon jaksojen 1 ja 2 kohdalla, jossa korrelaatiokerroin oli hieman alle 0,8. Sen sijaan kalibroidun sameuden ja kokonaisfosforipitoisuuden välinen regressio jäi alle tavoitellun 0,7 arvon molemmissa mittauspisteissä (esimerkkinä kaavio 6). Kaikki tulokset olivat kuitenkin tilastollisesti merkitseviä ($p < 0,05$). Korrelaatiokertoimet, suorien yhtälöt ja p-arvot on esitetty tarkemmin liitteessä 4.



Kaavio 5. Automaattisesti mitatun sameuden ja laboratoriossa määritetyn sameuden regressioanalyysi Räikilänojassa.



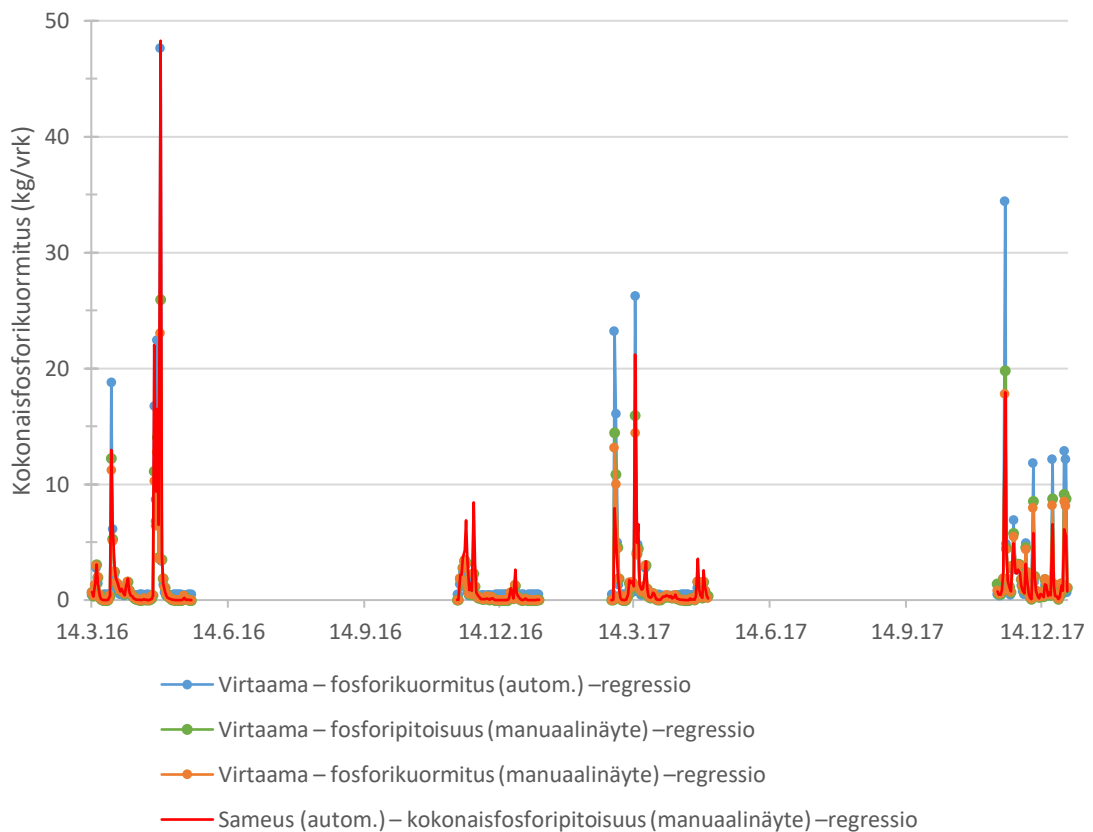
Kaavio 6. Kalibroidun sameuden ja laboratoriossa määritetyn kokonaisfosforipitoisuuden regressioanalyysi Räikilänojassa.

4.4. Kokonaisfosforikuormitukset

4.4.1. Vuorokauden keskiarvot

Räikilänojan kohdalla kaikki kuormituslaskentamallit kuvaavat varsin hyvin tarkinta eli automaattianturin mittaamasta virtaamasta ja sameudesta laskettua kuormitusta (kaavio 7). Kaikissa malleissa on kuitenkin havaittavissa pienempiä tai paikoin hieman isompia poikkeamia. Virtaama – fosforipitoisuus (manuaalinäyte) – regression pohjalta

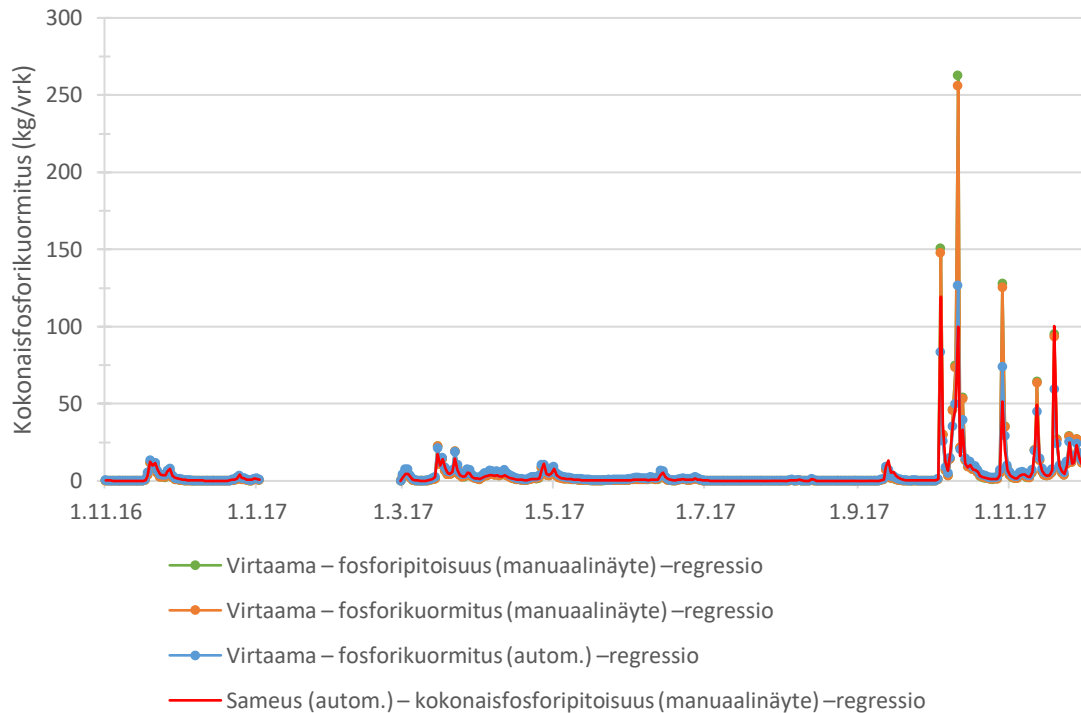
lasketut kuormitusluvut hieman aliarvioivat syksyn 2016 kuormitushuippuja, mutta hieman yliarvioivat syksyn 2017 kuormitushuippuja. Samankaltainen tilanne on myös virtaama – fosforikuormitus (manuaalinäyte) –regression pohjalta lasketun kuormituksen kohdalla. Sen sijaan virtaama – fosforikuormitus (autom.) –regression pohjalta laskettu kuormitus selvästi yliarvioi sekä useita kuormitushuippuja että alivirtaama-aikojen kuormitusta.



Kaavio 7. Räikilänojan kokonaisfosforikuormituksen (kg/vrk) vuorokausikeskiarvot laskettuna neljällä eri menetelmällä.

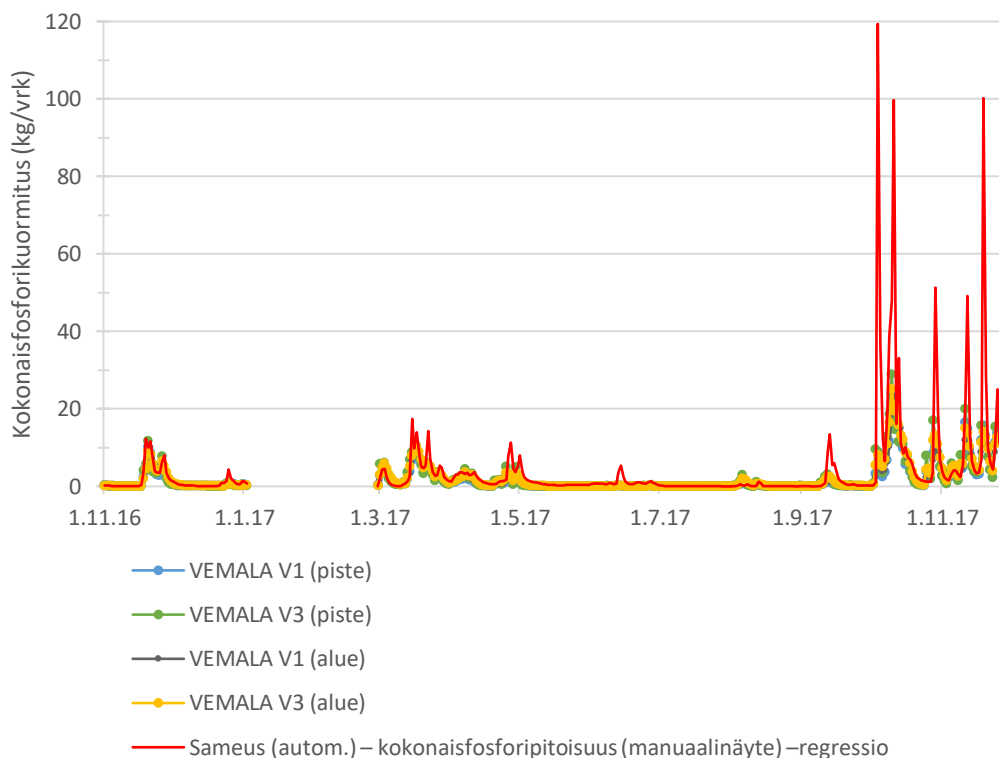
Myös Klenkon kohdalla voidaan todeta kaikkien eri kuormituslaskentamallien kuvaavan varsin hyvin tarkinta eli automaattianturin mittaamasta virtaamasta ja sameudesta laskettua kuormitusta (kaavio 8). Kaikissa malleissa on kuitenkin havaittavissa pienempiä tai paikoin hieman isompia poikkeamia. Virtaama – fosforipitoisuus (manuaalinäyte) ja virtaama fosforikuormitus (manuaalinäyte) –regressioiden pohjalta lasketut kuormitukset tuottavat kuormitushuippujen osalta selvästi tarkimpia arvoja suurempia kuormituslukuja. Virtaama – fosforikuormitus (autom.) –regression tuottaa niin kevään 2017 kuin syksyn 2017 aikana hieman tarkimpia arvoja suurempia

kuormitusarvoja. Ne ovat kuitenkin selvästi manuaalinäytteitä käyttäviä malleja pienempiä eli todenmukaisempia syksyllä 2017.



Kaavio 8. Klenkon kokonaisfosforikuormituksen (kg/vrk) vuorokausikeskiarvot laskettuna neljällä eri menetelmällä.

Verrattaessa tarkinta kuormitusta VEMALA-kuormitusmallijärjestelmän Klenkon korjattuihin kuormitusarvoihin voidaan todeta, että syksyn 2017 kuormitushuiput jäävät VEMALA-mallissa selvästi automaattianturin havaitsemia huippuja pienemmiksi (kaavio 9). Lisäksi automaattianturin havaitsema pieni kesäkuun 2017 kuormituksen nousu jää puuttumaan kaikista VEMALA-malleista. Piste-mallit muodostavat hieman isompia kuormitushuippuja kuin alue-mallit. Korkeimmat kuormitushuiput tuottaa V3 piste-malli, mutta nekin osuvat paikoin ali ja paikoin yli automaattianturin arvoista.



Kaavio 9. Klenkon kokonaisfosforikuormituksen (kg/vrk) vuorokausikeskiarvot laskettuna automaattidatan pohjalta ja VEMALA-mallilla. Sarsalanojan VEMALA-mallinnuksen kuormitusarvot on suhteutettu Klenkolle valuma-alueiden pinta-alojen suhteella.

Monesti kuormitustutkimuksen kiinnostuksen kohteena on tietystä valuma-alueelta tuleva vuosikuormitus. Tästä syystä on relevanttia tarkastella eri mallien antamia tuloksia myös useampien vuorokausien kuormitusten summana. Kummassakaan ojassa mittausajanjakso ei ollut yhtenäinen vuosi, mutta kuormitussumman tarkastelu on silti mahdollista laskemalla eri mittausajanjaksojen kuormitukset yhteen.

Räikilänojan kohdalla virtaama – fosforikuormitus (autom.) – regression pohjalta laskettujen kuormituslukujen summa on jonkin verran tarkinta kuormitusta suurempi (taulukko 2). Sen sijaan manuaalinäytteisiin pohjautuvat mallit tuottavat hieman automaattianturin dataan pohjautuvia kuormitussummia pienempiä arvoja. Myös kuormitusmaksimit jäävät näissä malleissa selvästi automaattianturien aineistojen kuormitusmaksimeja alhaisemmiksi.

Taulukko 2. Räikilänojan kokonaisfosforikuormitus eri kuormituksenlaskentamenetelmillä. Käytetty mallinnustarkkuus on vuorokausi ja taulukossa on esitetty mittauspäivien keskiarvokuormitusten summat sekä mittausajan maksimikuormitus ja minimikuormitus.

Kuormitusmalli (Räikilänoja)	Summa (kg) (238 vrk)	Maksimi (kg/vrk)	Minimi (kg/vrk)
Sameus (autom.) – kokonaisfosforipitoisuus (manuaalinäyte) –regressio	372	48	0,0
Virtaama – fosforikuormitus (autom.) –regressio	448	48	0,4
Virtaama – fosforipitoisuus (manuaalinäyte) –regressio	334	26	0,0
Virtaama – fosforikuormitus (manuaalinäyte) –regressio	320	23	0,0

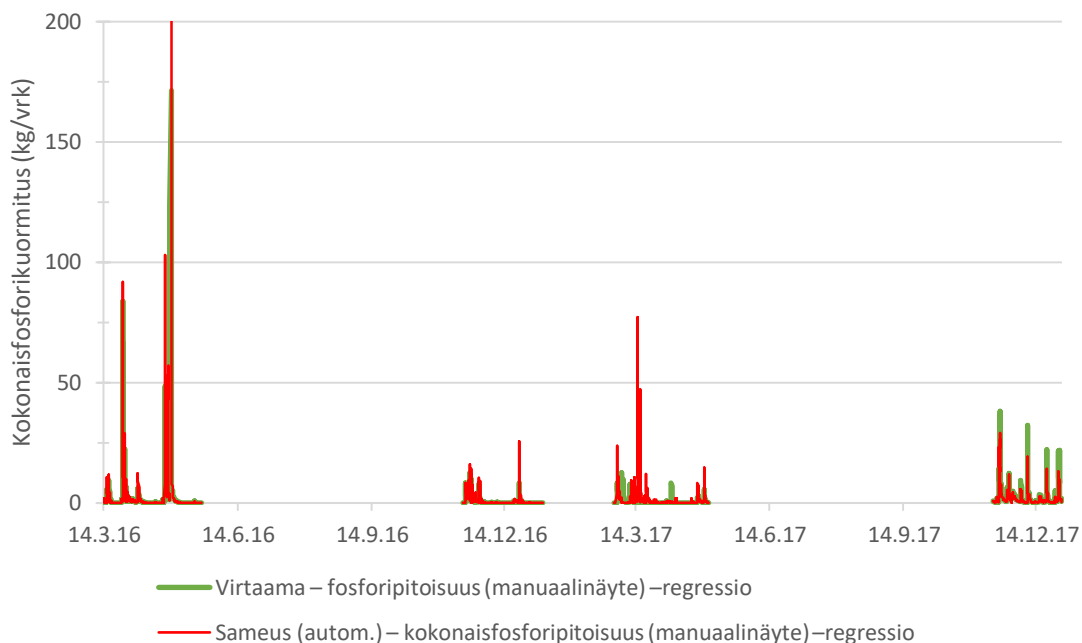
Klenkon kohdalla VEMALA-mallinnus tuottaa selvästi muita laskentamalleja pienempiä kuormitussummia (taulukko 3). Lisäksi kuormitusmaksimit ovat selvästi muita malleja pienempiä. Sen sijaan manuaalinäytteisiin pohjautuvat mallit tuottavat hieman isomman kokonaissumman ja kuormitusmaksimin kuin automaattianturin dataan pohjautuvat mallit.

Taulukko 3. Klenkon kokonaisfosforikuormitus eri kuormituksenlaskentamenetelmillä. Käytetty mallinnustarkkuus on vuorokausi ja taulukossa on esitetty mittauspäivien keskiarvokuormitusten summat sekä mittausajan maksimikuormitus ja minimikuormitus.

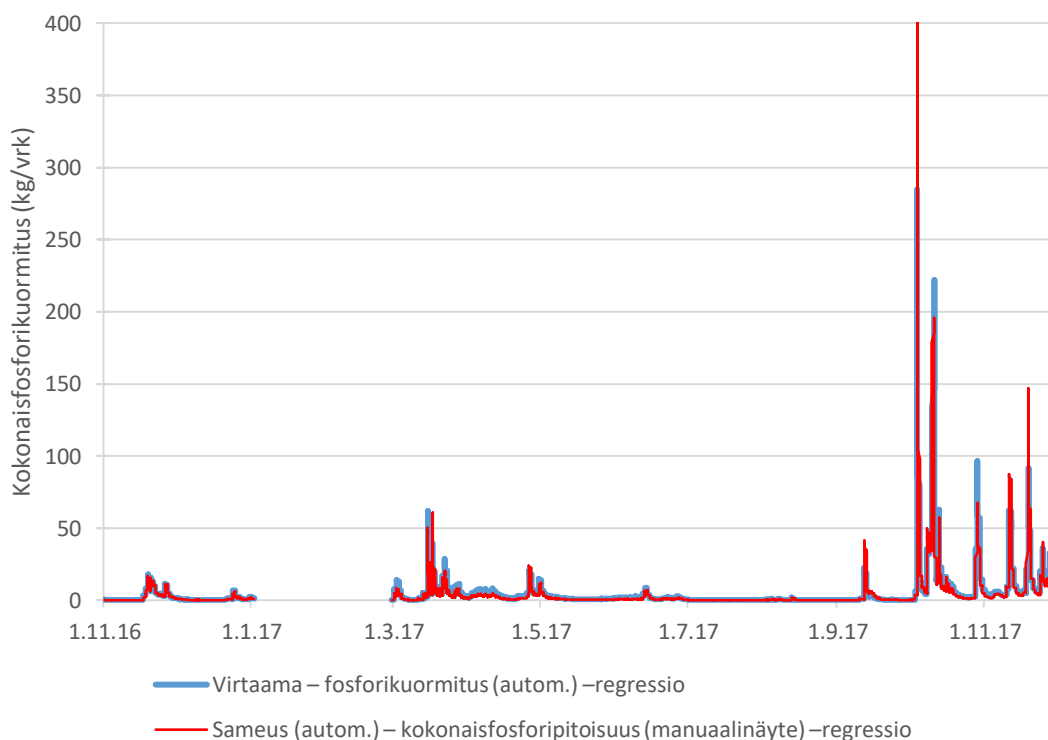
Kuormitusmalli (Klenkko)	Summa (kg) (339 vrk)	Maksimi (kg/vrk)	Minimi (kg/vrk)
Sameus (autom.) – kokonaisfosforipitoisuus (manuaalinäyte) –regressio	1 404	119	0,0
Virtaama – fosforikuormitus (autom.) –regressio	1 583	127	0,0
Virtaama – fosforipitoisuus (manuaalinäyte) –regressio	1 728	263	0,0
Virtaama – fosforikuormitus (manuaalinäyte) –regressio	1 723	220	0,0
VEMALA V1 (piste)	680	24	0,1
VEMALA V1 (alue)	719	23	0,1
VEMALA V3 (piste)	792	29	0,1
VEMALA V3 (alue)	824	25	0,1

4.4.2. Puolen tunnin (Klenkko) ja tunnin välein (Räikilänoja)

Tarkemmalla aikaskaalalla laskettuna kuormituksen vaihtelu on kaikissa malleissa nopeampaa ja kuormitushuiput selvästi suurempia kuin vuorokausikeskiarvoja katsottaessa. Esimerkiksi Räikilänojan kohdalla vuorokausikeskiarvomaksimi on kaikissa neljässä mallissa välillä 23 – 48 kg/vrk, kun tunnin välein laskettujen arvojen maksimit ovat niinkin korkeita kuin 418 kg/vrk (vaihteluväli: 171 – 418 kg/vrk). Tästä huolimatta myös tunnin ja puolen tunnin välein lasketut kuormitusmallit kuvastavat hyvin ojien kokonaisfosforikuormitusta (kaaviot 10 ja 11).



Kaavio 10. Räikilänojan tarkin kuormitus (sameus – kokonaisfosforipitoisuus) ja parhaiten sitä kuvaava kuormitusmalli (virtaama – fosforipitoisuus (manuaalinäyte)). Kuormitusarvot (kg/vrk) on laskettu tunnin välein. Kaavion luettavuuden parantamiseksi pystyakseli on katkaistu arvoon 200 kg/vrk, vaikka suurin yksittäinen piikki ylsi korkeuteen 418 kg/vrk (28.4.2016 klo 23:00 – 29.4.2016 klo 2:00).



Kaavio 11. Klenkon tarkin kuormitus (sameus – kokonaisfosforipitoisuus) ja parhaiten sitä kuvaava kuormitusmalli (virtaama – fosforikuormitus (autom.)). Kuormitusarvot (kg/vrk) on laskettu puolen tunnin välein. Kaavion luettavuuden parantamiseksi pystyakseli on katkaistu arvoon 400 kg/vrk, vaikka suurin yksittäinen piikki ylsi korkeuteen 656 kg/vrk (4.10.2017 klo 12:00 – 16:00).

5. Tulosten tarkastelu

5.1. Virtaamat

Sekä Räikilänojan että Klenkon purkautumiskäyrien avulla laskettujen virtaamien voidaan todeta pääpiirteissään kuvastavan hyvin ojien todellisia virtaamia, sillä ne seurailevat loogisesti säätekijöiden kausivaihteluita. Virtaamahuiput ilmenevät molemmilla alueilla syksyn sadantajaksojen tai lumen sulamisen jälkeen. Kun maa on lumi- tai kasvipeitteinen, virtaamat jäävät pieniksi lumi- tai vesisateista riippumatta (Puustinen ym. 2007). Pakkasjaksoina virtaamat pysyvät pieninä, kun maa on jäässä ja sade tulee lumena. Kesäajan virtaamat ovat yhtä lailla pieniä ja sadanta ei merkittävästi kasvattanut ojien virtaamia. Sula maa imee tehokkaasti vettä, jonka kasvit edelleen käyttävät. Tällöin valuntaa ojiin syntyy vähäisesti.

Räikilänojan ja Klenkon virtaamahuiput ovat kuitenkin purkautumiskäyrän pohjalta laskettuna epärealistisen korkeita. Esimerkiksi Klenkossa esiintyi useampia yli 3 m³/s virtaamia, jotka valuma-alueen ja ojan koko huomioon ottaen ovat liian korkeita. Myös Räikilänojassa esiintyi 1 m³/s ja 2 m³/s virtaamia, mitkä voivat herättää hieman epäilyä, kun huomioidaan, että valuma-alue on ainoastaan 4 km² kokoinen. Virheellisten korkeiden arvojen syynä on molemmissa ojissa se, että kaikkein korkeimpia huippuvirtaamia ei ole päästy paikan päällä mittaamaan. Näin ollen kyseiset arvot puuttuvat purkautumiskäyrästä, jolla virtaamat on laskettu. Klenkon kohdalla virtaamamittauksia ei ole päästy tekemään kovimpina ylivirtaama-aikoina alueen tulvimisen vuoksi. Räikilänojan kohdalla sen sijaan mittauksia on tehty vain marraskuussa 2017, joten esimerkiksi lumen sulamisesta johtuvat huiput ovat jääneet kokonaan mittaamatta. Virtaamahuippujen lisäksi Räikilänojan virtaamissa on virheellisyyttä myös alivirtaamien kohdalla. Myös tämä johtuu siitä, että varsinaisia virtaamamittauksia on tehty vain marraskuussa 2017. Tällöin purkautumiskäyrään ei ole voitu sisällyttää myöskään alivirtaamaa kuvastavaa pistettä. Sekä Klenkon että Räikilänojan kohdalla purkautumiskäyrien tarkentaminen olisi erittäin tärkeää, jotta virtaamat saadaan luotettavasti määritettyä. Tässä työssä samaa virtaamaa on käytetty kaikissa eri kuormitusmalleissa, jotta virtaaman mittauksesta syntyvät virheet sotkisivat mallien vertailua mahdollisimman vähän.

Verrattaessa Klenkon virtaamia Räikilänojan virtaamiin voidaan todeta, että Klenkon virtaamat ovat selvästi Räikilänojan virtaamia suurempia. Tämä on seurausta valuma-alueiden kokoerosta. Lisäksi Räikilänojan virtaamahuiput tulevat keskimäärin hieman aikaisemmin kuin Klenkossa. Syynä tähän on niin valuma-alueiden kokoero kuin niiden eroava maankäyttö; Räikilänojan alueesta noin puolet on rakennettua aluetta ja Klenkosta vain alle 10 %. Rakennettu alue koostuu pääasiallisesti vettä läpäisemättömistä pinnoista, kuten teistä ja taloista. Näiltä alueilta syntyvät hulevedet johdetaan pois yleensä putkia pitkin, missä veden virtaus on nopeaa. Hulevesien johtaminen ojaan nopeuttaa sen virtaamien vaihtelua sekä äärevöittää niitä, mikä johtaa esimerkiksi korkeiden virtaamahuippujen syntymiseen nopeasti rankkasateiden jälkeen (Schueler 2000).

Klenkon virtaamia voidaan käyttää varsin luotettavasti ennustamaan Räikilänojan virtaamia. Näin ollen Räikilänojan puuttuvia virtaamamittauksia on mahdollista täydentää Klenkon virtaamamittausten pohjalta. Yhtäläillä, Klenkon kohdalla puuttuvia virtaamamittauksia on mahdollista täydentää VEMALA-mallinnuksen Sarsalanojan pinta-alasuhteutetuilla virtaamilla. Näin ollen, koska VEMALA-mallinnuksesta on mahdollista saada virtaama-arvot (m^3/s) vuorokausiarvoina vuodesta 1960 lähtien, voidaan molemmilla valuma-alueille määrittää kohtuullisen luotettavat virtaamat mille vuodelle tahansa. Vuosi 2017 edusti sääoloiltaan poikkeuksellista vuotta, joten Sarsalanojan VEMALA-mallinnuksen voidaan todeta kuvastavan hyvin Klenkon virtaamia ainakin poikkeuksellisina vuosina. Todennäköistä on kuitenkin myös se, että niin kutsuttujen tavanomaisten vuosien kohdalla vertailun luotettavuus on vähintään yhtä hyvä.

5.2. Regressioanalyysit

Automaattisesti mitatun sameuden ja laboratoriossa määritetyn sameuden väliset korrelaatiot (Klenkko = 0,80; 0,79; 0,99 ja Räikilänoja = 0,94) olivat hyviä ja yhteneväisiä muiden savisameista joista/ojista tehtyjen tutkimusten kanssa. Aiemmissä tutkimuksissa korrelaatiokertoimiksi on saatu muun muassa 0,99 ($n = 24$) (Valkama ym. 2007), 0,80 ($n = 169$) (Linjama ym. 2009) ja 0,99 ($n = 16$) (Määttä 2016). Lisäksi Tuusulanjärven valuma-alueella sijaitsevalta Rantamo-Seittelin kosteikolla on määritetty korrelaatio tulevasta ($R = 0,89$) sekä lähtevästä ($R = 0,89$) vedestä (Koskiahho & Puustinen 2017), jotka ovat myös linjassa niin muiden tutkimusten kuin tässä työssä saatujen

korrelaatioiden kanssa. Klenkon kalibrointijaksojen 1 ja 2 hieman pienemmät korrelaatiot johtuvat todennäköisesti ainakin osittain siitä, että kalibrointinäytteitä oli käytössä jaksoille ainoastaan kuusi kappaletta.

Sen sijaan sameuden ja kokonaisfosforin väliset korrelaatiot (Klenkko = 0,67 ja Räikilänoja = 0,57) olivat varsin alhaisia muihin savijoissa tehtyihin tutkimuksiin verrattuna. Aiemmissä tutkimuksissa korrelaatiokertoimiksi on saatu muun muassa 0,92 (n= 24) (Valkama ym. 2007), 0,85 (n = 169) (Linjama ym. 2009), 0,70 (n= 16) (Määttä 2016). Myös Rantamo-Seittelin kosteikosta määritetyt korrelaatiot ($R_{\text{tuleva}} = 0,88$ ja $R_{\text{lähtevä}} = 0,90$) (Koskiaho & Puustinen 2017) olivat selvästi tässä työssä saatuja korkeampia. Klenkon ja Räikilänojan korrelaatiokertoimet eivät kuitenkaan ole täysin poikkeuksellisia, sillä esimerkiksi Lohjan Häntäjoessa on sameuden ja fosforipitoisuuden väliseksi korrelaatioksi saatu 0,59 (n = 65) (Koskiaho ym. 2015) ja Lahden Myllyojassa 0,65 (n = 14) (Määttä 2016). Sameuden ja kokonaisfosforin välistä korrelaatiota heikensi osittain ainakin se, että liukoisen fosforin pitoisuus vaihteli suuresti näytteiden välillä. Räikilänojan kohdalla keskimääräinen fosfaattifosforin osuus kokonaisfosforista oli 26 %, mutta yksittäisissä näytteissä prosenttiosuus jäi selvästi keskimääräistä korkeammaksi tai matalammaksi. Korkeimmillaan fosfaattifosforin osuus oli 67 % ja pienimmillään 16 %. Klenkon kohdalla keskimääräinen fosfaattifosforin osuus oli 20 % (vaihteluväli 10 % – 42 %). Sameus korreloi käytännössä ainoastaan kiintoaineeseen sitoutuneen partikkelifosforin kanssa (Aura ym. 2006, Valkama ym. 2007, Jaakkola 2013), joten fosfaattifosforin osuuden vaihtelu aiheuttaa heittelyä myös sameuden ja kokonaisfosforin väliseen regressiosuoraan. Parhaimman regressiosuoran voi olettaa syntyvän, kun fosfaattifosforin osuus pysyy vakiona näytteissä.

Parempien selitysasteiden aikaansaamiseksi tarvittaisiin lisää manuaalisesti otettuja vesinäytteitä. Lisänäytteiden avulla saataisiin luotettavampia regressioita sameuden ja kokonaisfosforipitoisuuden välille. Näytteiden määrän kasvattaminen vähentäisi fosfaattifosforin osuudesta johtuvaa virhettä sekä mahdollistaisi niin kutsuttujen poikkeavien näytteiden luotettavan poistamisen analysoitavasta datasta. Mitä parempi selitysaste ja tilastollinen merkitsevyys regressioanalyysistä saadaan, sitä tarkempia ovat myös niiden pohjalta tehdyt kuormitusarviot. Tämä edelleen helpottaa eri kuormitusmallien vertailua, kun voidaan paremmin luottaa niin kutsuttuun tarkimpaan malliin eli automaattianturien mittaustuloksiin pohjautuvaan malliin.

5.3. Kuormitusmallinnukset

Sekä Klenkon että Räikilänojan kohdalla kaikki eri kuormitusmallit kuvastivat hyvin tarkinta kuormitusta eli automaattianturien mittausaineistoon pohjautuvaa kuormitusta. Suurimmat heitot esiintyivät huippuvirtaamien aikana, mikä kertoo siitä, että mallien tarkkuus ylivirtaamien aikana ei ole yhtä tarkka kuin keski- ja alivirtaamien aikana. Esimerkiksi näytteenottopohjaisten mallien käytössä tähän voi johtaa se, että näytteenottoja ei ole riittävästi toteutettu ylivirtaamakausiina (Linjama ym. 2009). Tällöin virtaaman ja pitoisuuden tai virtaaman ja kuormituksen välisen regressiosuoran yhtälö ei tuota tarkkoja tuloksia. Etenkin polynomista tai eksponentiaalista suoraa käytettäessä on suuri riski, että ylivirtaamakauden arvot ovat todellisuutta suurempia, jos kyseiseltä ajalta ei ole näytteitä tai näytteitä on vain yksi.

Parhaimmaksi malliksi puuttuvien arvojen laskemiseen voidaan Räikilänojan kohdalla todeta virtaama – fosforipitoisuus (manuaalinäyte) –malli. Kyseisen mallin kuormitussumma (238 vrk) oli kaikkein lähinnä automaattiaineistoon pohjautuvaa mallia. Lisäksi vuorokausikuormitukset seurasivat hyvin automaattiaineistoa sekä tunnin välein laskettuina että vuorokausikeskiarvoina. Heittoa esiintyi pääasiallisesti vain huippuvirtaamien aikana. Huonoimman tuloksen antoi sen sijaan virtaama – fosforikuormitus (autom.) malli, joka yliarvioi sekä alivirtaamien kuormituksia että kuormitussummaa (238 vrk). Syy tähän on se, että polynomiselle regressiosuoralle ei voitu tehdä nollaan pakotusta, minkä takia virtaaman ollessa 0 l/s, niin kuormitus on joko 0,48 kg/vrk (1 vrk regressio) tai 0,90 kg/vrk (1 h regressio). Virtaaman hiljalleen kasvaessa kuormitukset yhtälön mukaan ensin pienenisivät ennen kuin alkaisivat taas kasvaa.

Klenkon kohdalla parhaimmaksi malliksi puuttuvien arvojen laskemiseen voidaan todeta virtaama – fosforikuormitus (autom.) malli. Kyseisen mallin kuormitussumma (339 vrk) sekä vuorokausikuormitusmaksimi (kg/vrk) olivat kaikkein lähinnä automaattiaineistoon pohjautuvaa mallia. Lisäksi vuorokausikuormitukset seurasivat hyvin automaattiaineistoa sekä tunnin välein laskettuina että vuorokausikeskiarvoina. Huippuvirtaamiin ajoittuvat heitot olivat myös pienempiä kuin muissa malleissa. Se, että kyseinen malli toimi hyvin Klenkolla, mutta ei Räikilänojan kohdalla, johtuu todennäköisimmin Räikilänojan virtaamiin

liittyvistä epävarmuuksista. Kun Räikilänojan virtaamia saadaan tarkennettua alivirtaamien kohdalta, niin kyseinen malli voisi olla toimiva myös Räikilänojalle. Tällä hetkellä Räikilänojan aineistossa on paljon negatiivisia virtaama-arvoja, jotka tätä työtä varten korvattiin nolilla. Todennäköisesti kyseiset virtaamat eivät kuitenkaan ole nollija, vaan esimerkiksi välillä 0 – 2 l/s. Kun alivirtaamat saadaan korjattua, myös polynomisen suoran pakottaminen nolnaan todennäköisimmin onnistuu ja kuormitusmalli tarkentuu.

Hyödynnettäessä virtaama-kuormitus malleja tulee huomioida myös riski virheellisistä korrelaatioista, sillä virtaama sisältyy sekä selittävään muuttujaan X että selitettävään muuttujaan Y (Shivers & Moglen 2008). Virtaama-kuormituksen käyttöä tietyissä tilanteissa voi kuitenkin puoltaa esimerkiksi se, että virtaamien on todettu korreloivan hyvin kuormituksen kanssa myös sellaisissa tilanteissa, joissa virtaaman ja fosforipitoisuuden välillä ei ole havaittu hyvää korrelaatiota (Gonzales-Inca ym. 2016). Tällaisissa tilanteissa virtaama-pitoisuus regression käyttö ei ole mielekäästä. Lisäksi, jos virtaama-kuormitus mallin tulokset pystytään toteamaan todenmukaisiksi, kuten esimerkiksi tässä työssä vertaamalla niitä automaattianturin mittaamaan dataan, voi mallia hyödyntää pienellä riskillä.

VEMALA-mallinnus aliarvioi selvästi kuormituspiikkejä. Osa eroista voi selittyä Klenkon mitattujen huippuvirtaamien epävarmuuksilla ja purkautumiskäyrän toimintaepävarmuudesta nimenomaan korkeiden virtaamien osalta. Kuitenkin selviä aliarviointeja oli nähtävillä myös pienemmissä virtaamissa. Alivirtaama-aikojen kuormituksen malli sen sijaan ennusti hyvin täsmällisesti, mutta vuosikuormituksen kannalta alivirtaama-aikojen merkitys on vähäinen (Royer ym. 2006). Kuormitussummia vertaillessa voidaankin todeta VEMALA-mallinnuksen antavan jopa puolet pienempiä kuormitussummia kuin muut mallit. Myös kuormitusmaksimit olivat huomattavasti maltillisempia. Voidaan kuitenkin todeta tarkemman V3 mallin (Bärlund ym. 2009, Korppoo ym. 2017) kuvastavan valuma-alueen kuormitusta paremmin kuin yksinkertaisemman V1 mallin. Lisäksi piste-mallit ovat alue-malleja tarkempia, mikä johtuu siitä, että kyseisissä malleissa on huomioitu Sarsalanojan näytteenottopisteen vesinäytteenottotulokset.

6. Johtopäätökset

Tässä työssä on käsitelty kuormitusta pääasiallisesti tasolla kg/vrk. Kuormitustutkimukseen kyseinen tarkkuus on riittävä, sillä pääasiallisesti tähtäimenä on vuosikuormituksen (kg/a) selvittäminen. Tunti- tai minuuttitaso kuormitusarvojen käyttäminen vuosikuormituksen laskennassa olisi selvästi vuorokausikeskiarvoja haastavampaa, sillä esimerkiksi automaattianturien mittausjaksot voivat alkaa kesken päivää ja usein yksittäisiä arvoja joudutaan poistamaan esimerkiksi sensorin linssin likaantumisen vuoksi. Tästä huolimatta itse automaattiseurantaa ei tule vähentää yksi mittaus vuorokaudessa -tasolle, sillä luotettavat vuorokausikeskiarvot juontavat juurensa nimenomaan riittävän tarkkaan päivädataan. Liiallinen tarkkuus on kuitenkin turhaa ja esimerkiksi tunnin mittaustiheys on viidentoista minuutin mittaustiheyttä järkevämpi valinta (Kirchner ym. 2004).

Tämän työn tarkoituksena oli selvittää sopivimmat kuormituslaskentamallit automaattianturin mittausaukkojen kuormitusten selvittämiseksi Klenkon ja Räkilänojan valuma-alueilla. Kaikkien kuormitusmallien voi kuitenkin todeta toimivan niin hyvin, että kuormituksen laskeminen pelkästään virtaaman pohjalta on mahdollista myös pidempien ajanjaksojen kohdalla. Niin kauan kun virtaamat on mitattu riittävällä tarkkuudella ja tiheydellä, voidaan tässä työssä esitetyjä malleja hyödyntää kokonaisfosforikuormituksen laskennassa. Kysymys kuuluukin, tarvitaanko automaattista vedenlaadun mittausta enää ollenkaan vai voidaanko kuormitus selvittää jatkossa pelkästään virtaaman pohjalta? Periaatteessa virtaamapohjaisia malleja voidaan käyttää tässä työssä esitettyjen vertailujen pohjalta erittäin luotettavasti kuormituksen selvittämiseen. Koska mallit on kuitenkin kehitetty ainoastaan vuosien 2016 – 2017 datalla, ei voi mallien kuitenkaan olettaa toimivan täydellisesti myös muina vuosina, jolloin hydrologiset olosuhteet ovat erilaiset. Vertailua tulisi olla tehtynä pidemmältä jaksolta, jotta vedenlaadun parametrit voitaisiin jättää kokonaan mittaamatta. Vertailu ei myöskään ole täysin luotettavaa, koska automaattidatan antamaan kuormitusarvioon ei voida täysin luottaa muun muassa heikohkojen sameus-fosforipitoisuus korrelaatioiden vuoksi. Automaattidatan antaman kuormituksen tarkentamiseen vaaditaan yhtäaikaista manuaalinäytteitä ja automaattisesti mitattuja vedenlaadun parametreja. Tulevaisuudessa voi kuitenkin olla mahdollista esimerkiksi vähentää jatkuvatoimista vedenlaadun seurantaa.

Ilmatieteenlaitos. Havaintojen lataus. <http://ilmatieteenlaitos.fi/havaintojen-lataus>. Aineistot ladattu 15.1.2018.

Jaakkola, S. 2013, Veden laadun mittaaminen jatkuvatoimisilla mittausantureilla Savijoen valuma-alueella, s. 100, pro gradu –tutkielma, Helsingin yliopisto.

Kirchner, J.W., Xiahong, F., Colin, N. & Robson, A.J. 2004, The fine structure of water-quality dynamics: the (high-frequency) wave of the future, *Hydrological Processes*, 18(7), s. 1353-1359. DOI 10.1002/hyp.5537.

Korppoo, M., Huttunen, M., Huttunen, I., Piirainen, V. & Vehviläinen, B. 2017, Simulation of bioavailable phosphorus and nitrogen loading in an agricultural river basin in Finland using VEMALA v.3, *Journal of Hydrology*, 549, s. 363-373. DOI 10.1016/j.jhydrol.2017.03.050.

Koskiaho, J., Lepistö, A., Tattari, S. & Kirkkala, T. 2010, On-line measurements provide more accurate estimates of nutrient loading: a case of the Yläneenjoki river basin, southwest Finland, *Water Science and Technology: A Journal of the International Association on Water Pollution Research*, 62(1), s. 115-122. DOI 10.2166/wst.2010.275.

Koskiaho, J. & Puustinen, M. 2017, Rantamo-Seittelin vedenlaadun seurantatulokset 2010–2013. Teoksessa Hietala, J. (toim.): Tuusulanjärven kunnostus vuosina 1999–2013: Hoitotoimia ja seurantaa (s. 96), s. 32-38, Uudenmaan ELY-keskus, raportteja 56 / 2017.

Koskiaho, J., Tattari, S. & Röman, E. 2015, Suspended solids and total phosphorus loads and their spatial differences in a lake-rich river basin as determined by automatic monitoring network, *Environmental monitoring and assessment*, 187(4), s. 1-12.

Lahti, K., Särkelä, A., Valkama, P., Vahtera, H., Hietala, J., Laakso, S. & Männynsalo, J. 2016, Tuusulanjärven ulkoisen kuormituksen vähentämistoimenpiteitä vuosille 2016-2021, s. 56, Vantaan ja Helsingin seudun vesiensuojeluyhdistys ry, raportti 17/2016.

Laurence, C., Claire, M., Caridad, H., Ute, M., Geoff, P., Borics Gábor, Sandra, P., Birger, S., Solheim, A.L., Jeroen, W., Cardoso, A.C. & Marc, C. 2013, Sustaining recreational quality of European lakes: minimizing the health risks from algal blooms through phosphorus control, *Journal of Applied Ecology*, 50(2), s. 315-323. DOI 10.1111/1365-2664.12059.

Linjama, J., Puustinen, M., Koskiaho, J., Tattari, S., Kotilainen, H. & Granlund, K. 2009, Implementation of automatic sensors for continuous monitoring of runoff quantity and quality in small catchments, *Agricultural and Food Science*, 18(3-4), s. 417-427. ISSN 1795-1895.

Maanmittauslaitos. Avoimien aineistojen tiedostopalvelu: Korkeusvyöhyke 32 m, Korkeusmalli 10 m ja Maastokartta 1:100 000. <https://www.maanmittauslaitos.fi/asioi-verkossa/avoimien-aineistojen-tiedostopalvelu>. Aineistot ladattu 2.12.2017.

Marttila, J. 2005, Maatalouden typpi- ja fosforitaseet - Tuusulanjärven valuma-alueella 1990-2004, s. 30, Uudenmaan Ympäristökeskus, monisteita 170.

Mortimer, C.H. 1942, The Exchange of Dissolved Substances between Mud and Water in Lakes, *Journal of Ecology*, 30(1), s. 147-201. DOI 10.2307/2256691.

Mortimer, C.H. 1941, The Exchange of Dissolved Substances Between Mud and Water in Lakes, *Journal of Ecology*, 29(2), s. 280-329. DOI 10.2307/2256395.

Muukkonen, P. 2009, Tuusulanjärven vesitase ja ravinnetaseet vuosina 1990–2009, s. 15, Keski-Uudenmaan vesiensuojelun liikelaitoskuntayhtymä.

- Määttä, I. 2016, Jatkuvatoimisten vedenlaatumittareiden käyttö kuormituksen arvioinnissa Vesijärvellä, s. 48, pro gradu –tutkielma, Helsingin yliopisto.
- Pekkarinen, M. 1990, Comprehensive survey of the hypertrophic Lake Tuusulanjärvi - nutrient loading; water quality and prospects of restoration, *Aqua Fennica*, 20(1), s. 13-25.
- Pekkarinen, M. & Hietala, J. 2017, Tuusulanjärven hoitotoimet ja tilan kehitys. Teoksessa Hietala, J. (toim.): Tuusulanjärven kunnostus vuosina 1999–2013: Hoitotoimia ja seurantaa (s. 96), s. 7-11, Uudenmaan ELY-keskus, raportteja 56 / 2017.
- Puustinen, M., Tattari, S., Koskiaho, J. & Linjama, J. 2007, Influence of seasonal and annual hydrological variations on erosion and phosphorus transport from arable areas in Finland. *Soil and Tillage Research*, 93(1), s. 44-55. DOI 10.1016/j.still.2006.03.011.
- Rankinen, K., Gao, G., Granlund, K., Grönroos, J. & Vesikko, L. 2015, Comparison of impacts of human activities and climate change on water quantity and quality in Finnish agricultural catchments, *Landscape Ecology*, 30(3), s. 415-428. DOI 10.1007/s10980-014-0149-1.
- Rekolainen, S. & Posch, M. 1993, Adapting the CREAMS model for Finnish conditions, *Hydrology Research*, 24 (5), s. 309-322.
- Royer, T.V., David, M.B. & Gentry, L.E. 2006, Timing of riverine export of nitrate and phosphorus from agricultural watersheds in Illinois: implications for reducing nutrient loading to the Mississippi River, *Environmental Science & Technology*, 40(13), s. 4126-4131. DOI 10.1021/es052573n.
- Schindler, D.W. 2012, The dilemma of controlling cultural eutrophication of lakes, *Proceedings. Biological Sciences*, 279(1746), s. 4322-4333. DOI 10.1098/rspb.2012.1032.
- Schueler, T. 2000, The Importance of Imperviousness, *Watershed Protection Techniques*, 1(3), s. 100-111.
- Seuna, P. & Vehviläinen, B. 1986, Eroosio ja kiintoaineen kulkeutuminen. Teoksessa Mustonen, S. (toim.): Sovellettu hydrologia (s. 503), s. 226-255, Vesiyhdistys ry, Mäntän kirjapaino Oy.
- Shivers, D. & Moglen, G. 2008, Spurious Correlation in the USEPA Rating Curve Method for Estimating Pollutant Loads, *Journal of Environmental Engineering*, 134(8), s. 610-618. DOI 10.1061/(ASCE)0733-9372(2008)134:8(610).
- Siimekselä, T. 2011, Automaattinen vedenlaadun seuranta - Tuloksia pilottikokeesta maa- ja metsätalousvaltaisella valuma-alueella Saarijärven reitin varrella, s. 65, opinnäytetyö, Jyväskylän ammattikorkeakoulu.
- Suomen ympäristökeskus. 2014. Ladattavat paikkatietoaineistot: CORINE maanpeite 2012, 20 m. http://www.syke.fi/fi-FI/Avoim_tieto/Paikkatietoaineistot. Aineisto ladattu 2.12.2017.
- Suomen ympäristökeskus. VEMALA-kuormitusmallijärjestelmä. Aineistot ladattu 7.2.2018 ja 13.2.2018.
- Suomen ympäristökeskus. Ympäristötiedon hallintajärjestelmä Hertta. Suomen ympäristökeskuksen avoimet ympäristötietojärjestelmät. http://www.syke.fi/fi-FI/Avoim_tieto/Ymparistotietojarjestelmat. Aineistot ladattu 2.12.2017.
- Suomen ympäristökeskus. Ympäristönsuojelun tietojärjestelmä Vahti. Suomen ympäristökeskuksen avoimet ympäristötietojärjestelmät. http://www.syke.fi/fi-FI/Avoim_tieto/Ymparistotietojarjestelmat. Viitattu 8.1.2018.

Uusitalo, R. & Ekholm, P. 2004, Käyttökelpoisen fosforin arviointi pintamaasta ja valumavedestä. Teoksessa Turtola, E. & Lemola, R. (toim.): Maatalouden ympäristötuen seuranta MYTVAS 2: Osahankkeiden 2-7 väliraportit 2000-2003 (s. 176), s. 7-32, Maa- ja elintarviketalouden tutkimuskeskus.

Uusitalo, R. & Jansson, H. 2008, Dissolved reactive phosphorus in runoff assessed by soil extraction with an acetate buffer, *Agricultural and Food Science*, 11(4), s. 343-353. ISSN 1795-1895.

Valkama, P., Särkelä, A. & Lahti, K. 2007, Automated water quality monitoring in the river Lepsämänjoki, *Terra*, 119(3-4), s. 195-206.

Valtion säädöstietopankki Finlex. Vesienhuoltolaki 119/2001.
<https://www.finlex.fi/fi/laki/ajantasa/2001/20010119>. Viitattu 23.3.2018.

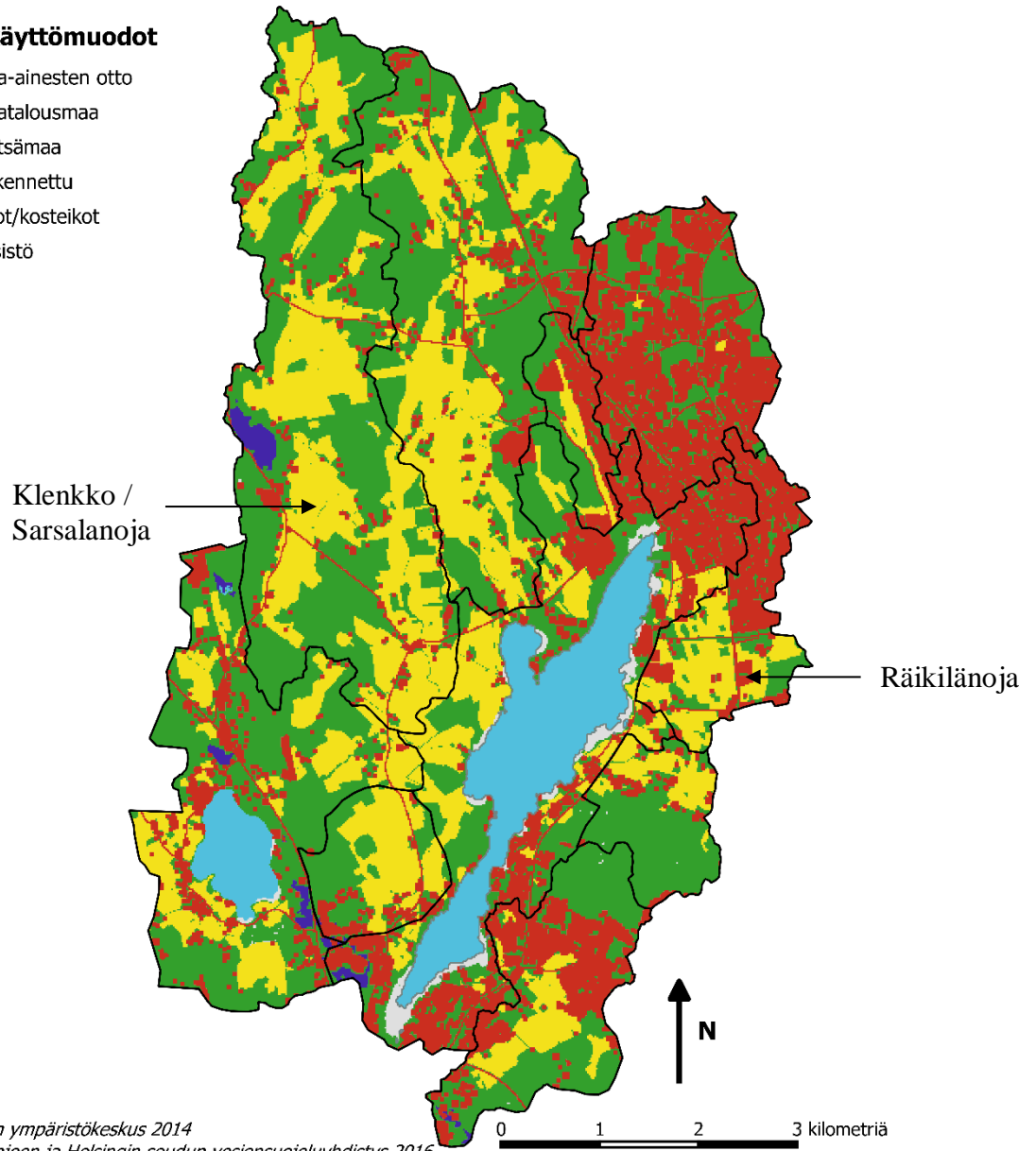
Vuorenmaa, J., Rekolainen, S., Lepistö, A., Kenttämies, K. & Kauppila, P. 2002, Losses of Nitrogen and Phosphorus from Agricultural and Forest Areas in Finland during the 1980s and 1990s, *Environmental Monitoring and Assessment*, 76(2), s. 213-248. DOI 1015584014417.

Liitteet

1. Tuusulanjärven valuma-alueen maankäyttö

Maankäyttömuodot

-  Maa-ainesten otto
-  Maatalousmaa
-  Metsämaa
-  Rakennettu
-  Suot/kosteikot
-  Vesistö

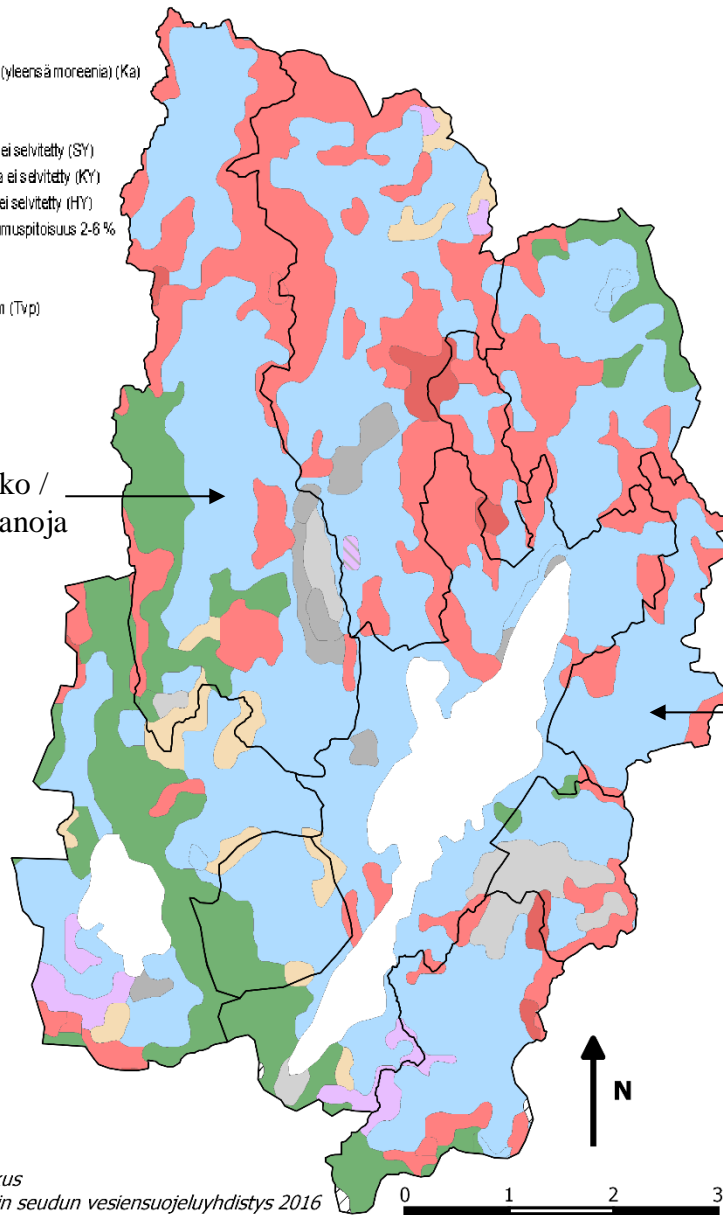


2. Tuusulanjärven valuma-alueen maalajit

Maalajit

- Kalliopajastuma (KaPa)
- Kallioma, maanpöytä enintään 1m (yleensä moreenia) (Ka)
- Rakka (RaKa)
- Kiviä (Ki)
- Sekalajitteinen maalaji, pääajittetta ei selvitetty (SY)
- Karkearakeinen maalaji, pääajittetta ei selvitetty (KY)
- Hienorakeinen maalaji, pääajittetta ei selvitetty (HY)
- Liejuinen hienorakeinen maalaji, humuspitoisuus 2-6 %
- Savi (Sa)
- Lieju, humuspitoisuus yli 6 % (Lj)
- Paksu turvekeros, yleensä yli 0,6m (Tvp)
- Täytemaa (Ta)
- Kartottamaton (O)
- Vesi (Ve)

Klenkko /
Sarsalanoja



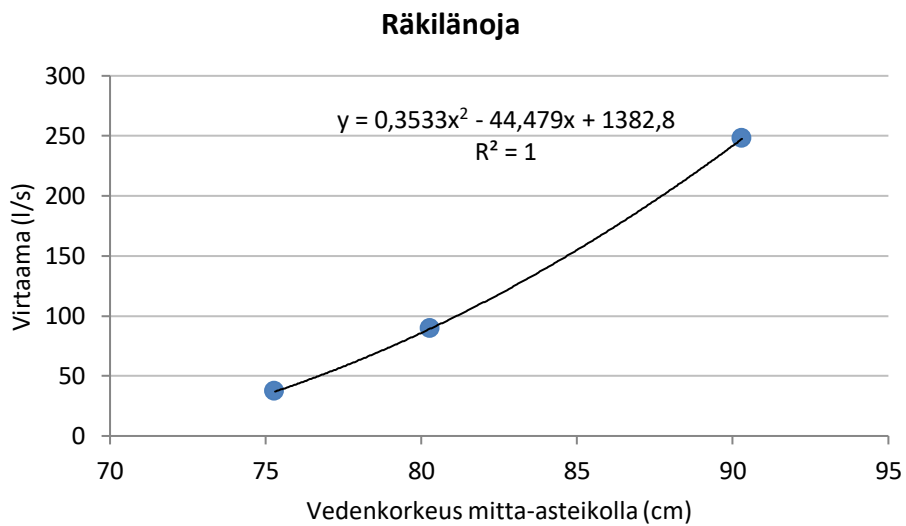
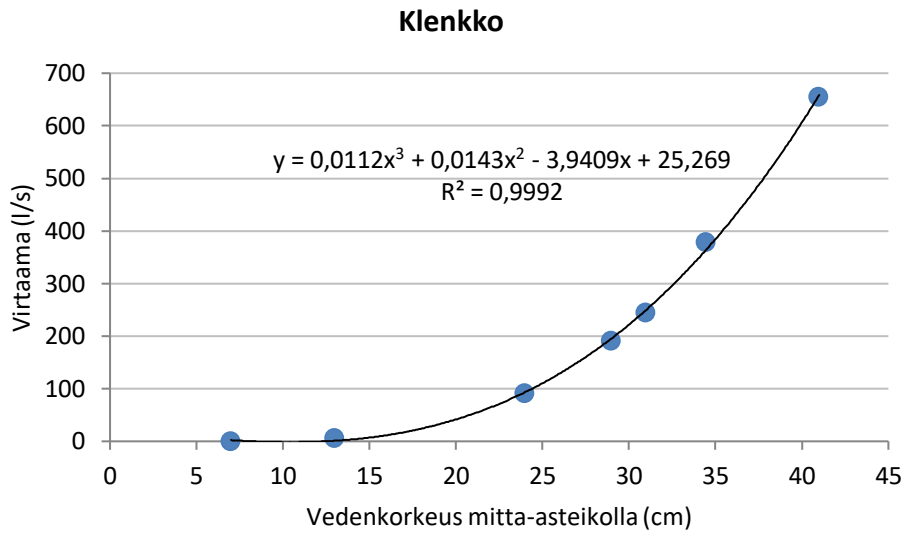
Räkilänoja

© Geologian tutkimuskeskus

© Vantaanjoen ja Helsingin seudun vesiensuojeluyhdistys 2016

0 1 2 3 kilometriä

3. Klenkon ja Räkilänojan purkautumiskäyrät



4. Regressioanalyysien tulokset

Klenkon regressioanalyysien tulokset

	Yhtälö	R ²	p-arvo	n
Sameus (autom.) – Sameus (labra): Jakso 1	$y = 2,2881x + 30,05$	0,7968	0.017	6
Sameus (autom.) – Sameus (labra): Jakso 2	$y = 2,5226x - 8,6545$	0,7894	0.019	6
Sameus (autom.) – Sameus (labra): Jakso 3	$y = 3,0331x - 15,738$	0,9898	< 0,001	10
Sameus (kalib.) – Kok. P (µg/l)	$y = 1,1311x + 84,234$	0,6679	< 0,001	22
Virtaama – Kok.P (µg/l) 30 min (manuaalinäyte)	$y = 0,2083x + 125,56$	0,6282	< 0,001	22
Virtaama – Kok.P (µg/l) 1 vrk (manuaalinäyte)	$y = 0,2402x + 120,794$	0,5184	< 0,001	22
Virtaama – Kok.P (kg/vrk) 30 min (manuaalinäyte)	$y = 2E-05x^2 + 0,0091x$	0,9905	< 0,001	22
Virtaama – Kok.P (kg/vrk) 1 vrk (manuaalinäyte)	$y = 0,00002x^2 + 0,0110x$	0,9403	< 0,001	22
Virtaama – Kok. P (kg/vrk) 1 vrk (autom.)	$y = 0,000005x^2 + 0,0217x$	0,9064	< 0,001	426

Räikilänojan regressioanalyysien tulokset

	Yhtälö	R ²	p-arvo	n
Sameus (autom.) – Sameus (labra)	$y = 2,5328x - 3,3949$	0,9364	< 0,001	12
Sameus (kalib.) – Kok. P (µg/l)	$y = 1,4588x + 25,223$	0,5736	0,004	12
Virtaama – Kok.P (µg/l) 1 h (manuaalinäyte)	$y = 0,4297x + 107,82$	0,5506	0,001	16
Virtaama – Kok.P (µg/l) 1 vrk (manuaalinäyte)	$y = 0,5638x + 98,325$	0,5279	0,001	16
Virtaama – Kok.P (kg/vrk) 1 h (manuaalinäyte)	$y = 0,00004x^2 + 0,0087x$	0,9903	< 0,001	16
Virtaama – Kok.P (kg/vrk) 1 vrk (manuaalinäyte)	$y = 0,00003x^2 + 0,0104x$	0,9526	< 0,001	16
Virtaama – Kok. P (kg/vrk) 1 h (autom.)	$y = 0,00009x^2 - 0,0169x + 0,8993$	0,9079	< 0,001	5 588
Virtaama – Kok. P (kg/vrk) 1 vrk (autom.)	$y = 0,0001x^2 - 0,0066x + 0,4842$	0,7831	< 0,001	238
Klenkon virtaama – Räikilänojan virtaama (4 h siirto)	$y = 0,3385x - 10,525$	0,6741	< 0,001	3 981