

Peltojen kipsikäsittely fosforikuormituksen hallinnassa

– Pilottina Savijoen valuma-alue

Petri Ekholm, Markku Ollikainen, Venla Ala-Harja, Khaleda Begum,
Markus Huttunen, Kirsi Järvenranta, Mikko Kiirikki, Harri Kuosa,
Sanna Lötjönen, Juha Riihimäki, Antti Taskinen, Tommi Tikkanen,
Markku Yli-Halla



Peltojen kipsikäsittely fosforikuormituksen hallinnassa

– Pilottina Savijoen valuma-alue

**Petri Ekholm, Markku Ollikainen, Venla Ala-Harja, Khaleda Begum,
Markus Huttunen, Kirsi Järvenranta, Mikko Kiirikki, Harri Kuosa,
Sanna Lötjönen, Juha Riihimäki, Antti Taskinen, Tommi Tikkanen,
Markku Yli-Halla**



Suomen ympäristökeskuksen raportteja 32 | 2022

Suomen ympäristökeskus

Vesikeskus

Kirjoittajat: Petri Ekholm ¹⁾, Markku Ollikainen ²⁾, Venla Ala-Harja ²⁾, Khaleda Begum ¹⁾,
Markus Huttunen ¹⁾, Kirsi Järvenranta ³⁾, Mikko Kiirikki ⁴⁾, Harri Kuosa ¹⁾,
Sanna Lötjönen ²⁾, Juha Riihimäki ¹⁾, Antti Taskinen ¹⁾, Tommi Tikkanen ²⁾, Markku Yli-Halla ⁵⁾

¹⁾ Suomen ympäristökeskus

²⁾ Helsingin yliopisto/Taloustieteen osasto

³⁾ Luonnonvarakeskus

⁴⁾ Luode Consulting

⁵⁾ Helsingin yliopisto/Maataloustieteiden osasto

Vastaava erikoistoimittaja: Ahti Lepistö

Rahoittaja: Ympäristöministeriö, Suomen kulttuurirahasto,
Maa- ja vesiteknikan tuki ry, Suomen ympäristökeskus, Helsingin yliopisto

Julkaisija ja kustantaja: Suomen ympäristökeskus (SYKE)

Latokartanonkaari 11, 00790 Helsinki, puh. 0295 251 000, syke.fi

Taitto: Petri Ekholm ja Pirkko Väänänen

Kannen kuva: Janne Artell

Kuvat sisäsivuilla: Petri Ekholm, Suomen ympäristökeskus (kuva 3), Janne Artell (kuva 4)
ja Jenni Laakso, Luonnonvarakeskus (kuvat 26, 27 ja 28).

Julkaisu on saatavana veloitusetta internetistä: www.syke.fi/julkaisut | helda.helsinki.fi/syke

ISBN 978-952-11-5506-2 (PDF)

ISSN 1796-1726 (verkkoj.)

Julkaisuvuosi: 2022

Tiivistelmä

Peltojen kipsikäsitteily fosforikuormituksen hallinnassa – pilottina Savijoen valuma-alue

Maataloudesta Itämereen päätyvän fosforikuormituksen vähentäminen edellyttää juurisyihin, kuten peltomaan liian korkeisiin fosforipitoisuuksiin puuttumista. Tämän rinnalle tarvitaan myös nopeavaikuttavia keinoja. Peltojen kipsikäsitteilyä testattiin Varsinais-Suomen Savijoella, jossa kipsiä levitettiin 1494 peltohehtaarille ja vaikutuksia seurattiin vajaat viisi vuotta.

Kipsikäsitteilyn jälkeen fosforin ja orgaanisen hiilen huuhtoumat käsitteilyalueella pienenevät suhteessa vertailualueeseen. Jos muutos huuhtoumissa tapahtui yksinomaan kipsin ansiosta, ylemmällä seuranta-alueella huuhtoutui 72 % vähemmän hiukkasmaista fosforia kipsillä käsitellyiltä kuin käsittelemättömiltä pelloilta vajaan viiden vuoden keskiarvona. Alemmalla alueella vähennys oli 19 % ja koko käsitteilyalueella 34 %. Liuenneen fosforin huuhtoutuminen oli ylemmän alueen kipsillä käsitellyiltä pelloilta 24 % pienempää, mutta alemmalla alueella 13 % suurempaa, jolloin koko alueella nousua oli 3 %. Liuenneen orgaanisen hiilen osalta vähennykset olivat 88 % (ylempi alue), 54 % (alempi alue) ja 64 % (koko alue). Koska noin puolet kipsistä oli vielä maaperässä vajaan viiden vuoden päästä levityksestä, kipsi saattaa edelleen leikata kuormitusta, tosin ajan myötä yhä vähemmän. Liuenneeseen fosforiin kipsillä näyttäisi olevan lyhytaikaisempi ja epävarmempi vaikutus kuin hiukkasmaiseen fosforiin.

Kipsikäsitteily nosti voimakkaasti peltojen pintamaan johtolukua ja rikki-pitoisuutta, mutta vain noin vuoden ajaksi. Kasvuston rikki-pitoisuus kaksinkertaistui noin kahden vuoden ajaksi. Kipsin ei havaittu kulkeutuvan kaivovesiin. Mikäli kaivoa käytetään juomavetenä, kaivon ympärille tulee kuitenkin jättää suojavao-ohyke, erityisesti karkeammilla maalajeilla. Lumilevityskoe osoitti, että kipsiä ei tule levittää talviolosuhteissa. Routaisessa maassa fosforia epäpuhtautena sisältävä kipsi voi lisätä rehevöittävän fosforin huuhtoutumista.

Malliarvioiden mukaan kipsillä voitaisiin vähentää erityisesti Saaristomereen, mutta myös muille merialueille päätyvää fosforikuormitusta. Tämä vähentäisi sisäsaariston levämääriä, mutta nopeaa parannusta Saaristomeren yleisessä tilassa ei ole odotettavissa. Parhaan vaikutuksen saaminen edellyttää myös typpikuormituksen vähentämistä.

Kipsin ja rakennekalkin käytön kustannusvaikuttavuuden tarkastelu tuotti kipsikäsitteilyn vuotuiseksi kustannusvaikuttavuusluvuksi 58 € poistettua fosforikiloa kohti, kun vain fosforihuuhtouma huomioidaan. Kierrätysmateriaalista valmistelulle rakennekalkille vastaava luku on 75 € kg⁻¹ P ja sivuvirtapohjaiselle rakennekalkille 96 € kg⁻¹ P. Kun myös ilmastovaikutus huomioidaan, kustannusvaikuttavuus on kipsille 59 € kg⁻¹, kierrätysmateriaalista valmistetulle rakennekalkille 90 € kg⁻¹ ja sivuvirtapohjaiselle rakennekalkille 145 € kg⁻¹.

Yhteiskunnallinen nettohyöty ottaa huomioon maataloustuotannosta saatavan yksityisen voiton sekä ravinne- ja ilmastohaittojen yhteiskunnallisen arvon. Kipsikäsitteilyn nettohyödyn nykyarvo pelkkä ravinnehuuhtoumahaitta huomioiden on 977 € kg⁻¹, ja kierrätysmateriaalista valmistetun rakennekalkin 929 € kg⁻¹ ja sivuvirtapohjaisen rakennekalkin 874 € kg⁻¹. Rakennekalkin käyttö vesiensuojelun tarpeisiin ei välttämättä ole viljelijälle ensisijainen peruste käyttää rakennekalkkia. Hyvän sadontuottokyvyn takia voi olla tarve vaikuttaa maan pH-arvoon kalkituksella ja käyttää joko maatalouskalkkia tai rakennekalkkia. Vesiensuojelun edistämiseksi yksi vaihtoehto olisi, että yhteiskunta tukisi rakennekalkkia sen tuottaman vesiensuojeluhyödyn mukaisesti edellyttäen, että saatavilla on laatuja, joiden ilmastovaikutus on alhainen.

Savijoen seurantaa jatketaan KIPSI-hankkeessa, mikä tarkoittaa arviota kipsin vaikutuksen kestosta. Kipsikäsitteilyn kustannustehokas kohdentaminen edellyttäisi, että kipsin vaikutusmekanismi ja optimaalinen käyttö eri maalajeilla ja muokkausmenetelmillä tunnettaisiin paremmin.

Asiasanat: kipsi, maatalous, fosfori, orgaaninen hiili, joet, Saaristomeri, rehevöityminen, vesiensuojelu, kasvihuonekaasut, juomavesi, kustannukset, vaikuttavuus

Sammandrag

Gipsbehandling av jordbruksmarker – Pilotprojekt i avrinningsområdet för Savijoki å

För att minska belastningen på Östersjön av fosfor (P) från jordbruket krävs att användningen av P minskar i gödsel och konstgödsel. Den resulterande minskningen i nivån för P i jorden är en långsam process, så det krävs också snabbt fungerande interimsåtgärder, t.ex. användningen av gipsbehandling. För detta ändamål genomfördes ett pilotprojekt i sydvästra Finland där 1494 hektar jordbruksmark behandlades med gips ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) på hösten 2016. Ån Savijoki, som är avrinningsområde för pilotområdet, undersöktes före och nästan fem år efter behandlingen med gips. Undersökningen fokuserade på kontrollområdet i de övre delarna och två platser påverkade av gips i de mellersta delarna (benämnda övre och lägre behandlingsområden).

Gipsbehandlingen resulterade i lägre förluster av P och löst organiskt kol (DOC) jämfört med kontrollområdet. Om den observerade förändringen helt och hållet orsakades av gipsbehandlingen, var förlusten av P i partikelform 72 % lägre på fält där gipsbehandling gjordes än från icke behandlade fält i det övre behandlingsområdet. Förvånande nog var minskningen endast 19 % i det lägre behandlingsområdet, vilket gav en total minskning på 34 % i genomsnitt för 4,7 år. Motsvarande minskning i förlusten av löst reaktivt P var 24 % i det övre området, medan förlusterna i det lägre området ökade med 13 %, och med 3 % i hela området. DOC minskade med 88 % (övre området), 54 % (lägre området) och 64 % (hela området), men uppskattningen är osäker som en följd av problem i källfördelningen. Eftersom endast hälften av sulfatet från gipset hade sköljts bort efter 4,7 år, är det troligt att gips skär ned förlusten av partikelformat P och DOC under de kommande åren. Effektiviteten kommer dock sannolikt att minska med tiden.

Gipsbehandling ökade den elektriska ledningsförmågan och svavelkoncentrationen i matjord under ett till två år efter behandlingen. Dessutom ökade svavelkoncentrationen i odlade växter under två år, men andra effekter i mark- och växtkemin var små. Undersökningar av sju privata brunnar visade att gips inte läckte ut till grundvattnet. Om en brunn används som dricksvattenkälla bör en obehandlad buffertzon lämnas runt brunnen som en försiktighetsåtgärd, särskilt med grova jordar. En snösimuleringsstudie visade att gips inte bör spridas på snö eller frusen jord, eftersom P, en förorening i det fosforgips som används, kan ge upphov till förhöjda förluster av löst P. En dylik risk är eliminerad, om P-fritt gips används, men ändå kan den önskade effekten vara låg, om gipset inte har kontakt med ytjord på vintern.

Att behandla alla potentiellt berättigade åkerområden med gips skulle enligt en näringsbelastningsmodell leda till en betydande minskning av P-belastningen, särskilt för det eutrofa Skärgårdshavet. Eftersom Skärgårdshavet är i nära kontakt med egentliga Östersjön är en snabb förbättring av dess tillstånd inte möjlig. Däremot visade scenarier i en kvalitetsmodell för vatten att gipsbehandling skulle minska algbiomassan i den inre skärgården.

Kostnadseffektivitet och sociala nettofordelar av gips och strukturkalk bedömdes genom att ta hänsyn till P-belastningar och utsläpp av växthusgaser. Värdet för kostnadseffektiviteten är förhållandet mellan behandlingskostnaderna och den uppnådda minskningen av P-belastningen. Om endast belastningen av P beaktas är värdet för kostnadseffektiviteten 58 € per kg reducerat P för gips, 75 € kg^{-1} för strukturkalk från återvunnet material och 96 € kg^{-1} för strukturkalk från sidoströmmen. Då även klimatskador beaktas ökar något kostnaderna för gips och strukturkalk från återvunnet material och mer så för strukturkalk från sidoströmmen.

Sociala netto nyttan omfattar privata vinster från odling och social värdering av övergödning och klimatskador. När endast belastningen av P beaktas är netto nyttan 966 € kg^{-1} utan jordbehandling för

gips och 929 € kg⁻¹ för strukturalk från återvunnet material. Nettonyttan av strukturalk från sidoströmmen är 874 € kg⁻¹. Användning av gips ökar den sociala välfärden över baslinjens odling. Då växthusgasutsläpp beaktas minskar alla nettovinster men ändrar inte ovanstående slutsatser.

En känslighetsanalys visar att mer omfattande erosion, högre P-värden i jorden och en större skada av eutrofiering ökar nettonyttan och önskvärheten av markbehandling. Däremot gör en låg minskning eller en initialt låg nivå i belastningen att användningen av jordförbättringar inte är önskvärd. Resultaten visar på fördelen av att rikta in behandlingsåtgärder på fält med antingen hög erosion eller höga fosforreserver i jorden. De ger också skäl för att använda gips och återvunnen strukturalk som kompletterande och lätteffektiva markbehandlingsåtgärder för vattenskydd. För att vara effektiva i vattenskyddet bör jordbrukare som använder strukturalk sprida ut den på fälten snabbt och harva ordentligt. Därför bör samhället ge jordbrukarna information och instruktioner om användningen av strukturalk.

Framtida forskning bör inrikta sig på hur gips presterar med olika jordtyper och markbearbetningsmetoder för att ytterligare förbättra metodens kostnadseffektivitet. Mekanismen, t.ex. rollen som kalcium har i att upprätthålla mikroaggregation i jorden, bör utvärderas, och mekanismen bör införlivas i fältskalemodeller.

Nyckelord: gips, jordbruk, fosfor, organiskt kol, Skärgårdshavet, eutrofiering, vattenskydd, utsläpp av växthusgaser, dricksvatten, kostnadseffektivitet, social nytta

Abstract

Gypsum amendment of agricultural fields – Pilot in the Savijoki catchment

Reducing the agricultural phosphorus (P) load into the Baltic Sea calls for decreasing the use of manure and fertilizers in problem areas. However, as soil P reserves decline slowly, there is also a need for interim measures, such as the use of soil amendments. To this end, a pilot study was conducted in southwestern Finland where 1494 hectares of agricultural fields were amended with gypsum ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) in autumn 2016. The Savijoki River, draining the pilot area, was monitored before and for almost five years after the gypsum amendment. Monitoring focused on the control area in the upper reaches and two gypsum affected sites in the middle reaches (upper and lower treatment areas).

In comparison to the control area, the gypsum amendment resulted in lower losses of P and dissolved organic carbon (DOC). A source apportionment on riverine P loads suggested that the losses of particulate P were 72% lower from the gypsum amended fields than from the nonamended fields in the upper treatment area as a 4.7-year average. Surprisingly, the reduction was only 19% in the lower treatment area, providing an overall reduction of 34% when both areas were considered. The corresponding reduction in the losses of dissolved reactive P was 24% in the upper area, whereas the losses increased by 13% in the lower area and by 3% in the total area. DOC was reduced by 88% (upper area), 54% (lower area) and 64% (total area), but the estimate was uncertain due to problems in source apportionment. Because only approximately half of the gypsum had flushed away after 4.7 years, gypsum may continue to reduce the losses of particulate P and DOC. However, the efficiency is likely to decrease over time.

Gypsum amendment increased the electrical conductivity and sulfur concentration in topsoil for one to two years after the amendment. In addition, the sulfur concentration of the cultivated plants increased for two years, but other effects on the soil and plant chemistry were minor. The monitoring of seven private wells showed that gypsum had not leached into the ground water during the five years. If a well is used as a drinking water source, then an untreated buffer zone should be left around the well as a precautionary measure, especially on coarse soils. A snow simulation study showed that gypsum should not be spread on snow or frozen soil because P, an impurity in the phosphogypsum used, may result in elevated losses of dissolved P. Such a risk is eliminated if P-free gypsum species are used, but the desired effect may still be low if gypsum does not have contact with surface soil in winter.

According to a nutrient load model, amending all the potentially eligible field parcels with gypsum would result in a substantial reduction in the P load, especially to the eutrophic Archipelago Sea. Because the sea area is in close contact with the Baltic Proper, a rapid improvement in its state is not possible, although gypsum amendment would decrease the algal biomasses in the inner archipelago.

The cost effectiveness and social net benefits of gypsum and structure lime were assessed by considering P loads and greenhouse gas emissions. The cost effectiveness figure is the ratio of treatment costs to the achieved reduction in P load. If only the P load is taken into account, then the cost effectiveness figure is 58 € per kg of reduced P for gypsum, 75 € kg^{-1} P for structure lime from recycled materials and 96 € kg^{-1} P for structure lime manufactured using lime kiln dust, which is a byproduct of the lime manufacturing process (structure lime from byproduct, in what follows). Additionally, accounting for climate damage slightly increases the costs of gypsum and structure lime from recycled materials and more so for structure lime from byproduct.

Social net benefits (net present value, NPV) comprise private profits from cultivation and social valuation of eutrophication and climate damages. When only P loading is taken into account, NPV without soil amendments is 966 € kg^{-1} , 977 € kg^{-1} for gypsum and 929 € kg^{-1} for structure lime from

recycled materials. The use of gypsum increases social welfare above the baseline cultivation. Structure lime from byproduct provides benefits of 874 € kg⁻¹. Accounting for greenhouse gas emissions decreases all net benefits but does not change above conclusions.

Sensitivity analysis shows that higher erosion, higher soil P values and higher eutrophication damage increase the net benefits and desirability of soil amendments. In contrast, a low reduction in P loads or initially low loading makes the use of soil amendments undesirable. The results suggest targeting soil amendments on fields that have either high erosion rates or high soil P reserves. The results also provide grounds for using gypsum and recycled structure lime as complementary and readily effective soil amendments for water protection. To be effective in terms of water protection, structure lime should be cultivated thoroughly into the soil quickly after spreading. Therefore, society should provide farmers with information and instructions on the use of lime.

Future research should target the performance of gypsum in different soil types and tillage practices to further improve the cost efficiency of the method. The mechanism, e.g., the role of calcium in maintaining soil microaggregation, should be evaluated, and the mechanism should be incorporated in field-scale models.

Keywords: gypsum, agriculture, phosphorus, organic carbon, Archipelago Sea, eutrophication, water protection, greenhouse gas emissions, drinking water, cost-effectiveness, social benefits

Esipuhe

SAVE-hanke (*Saaristomeren vedenlaadun parantaminen peltojen kipsikäsittelyllä, 2016–2018*) toteutti laajan peltojen kipsikäsittelyn Savijoella Varsinais-Suomessa, ja vaikutuksia vedenlaatuun, vesieliöstöön sekä maahan ja kasvustoon seurattiin ennen ja jälkeen kipsin levityksen. Ensimmäisten kahden vuoden tulokset kipsikäsittelyn toteutuksesta, vaikutuksista ja sosiaalisesta hyväksyttävyydestä puolsivat kipsin käyttöä laajamittaisena maatalouden vesiensuojelutoimena.

SAVE2-hanke (2019–2021) jatkoi tutkimuksia tavoitteenaan:

- arvioida kipsin vaikutuksen kestoa seuraamalla Savijoen vedenlaatua
- selvittää kipsin levitykseen ja vaikutuksiin liittyviä kysymyksiä, mm. kipsin talvilevitystä sekä kipsin vaikutusta maan kationikoostumukseen ja biologiaan
- arvioida laajan kipsinlevityksen vaikutusta rannikkovesien rehevyyteen
- edistää kipsikäsittelyn tutkimusta ja tunnettavuutta Itämeren rantavaltioissa
- selvittää kipsikäsittelyn kustannusvaikuttavuutta.

SAVE2-hankkeen toteuttivat Suomen ympäristökeskus (SYKE, vastuuorganisaatio) ja Helsingin yliopisto/Taloustieteen osasto (HY). Projektikoordinaattorina toimi aluksi Eliisa Punttila (HY) ja hänen tehtäviään jatkoi Venla Ala-Harja (HY). Petri Ekholm (SYKE) vastasi luonnontieteellisestä tutkimuksesta, Markku Ollikainen (HY) kustannusvaikuttavuuden tutkimuksesta, ja Samuli Puroila toimi projektityöntekijänä. SAVE2-hankkeen budjetti oli 412 134 €, josta 80 % rahoitti ympäristöministeriö ja 20 % SYKE ja HY.

Tässä raportissa käsitellään Savijoen kipsipilotin tuloksia vuoteen 2021 asti, kipsin talvilevitystä, laajan kipsikäsittelyn vaikutuksia Saaristomeren tilaan, ja kipsin ja rakennekalkin kustannusvaikuttavuutta. Osaan aiheista on saatu rahoitusta myös Suomen Kulttuurirahastolta (Samassa Vedessä -hanke, kipsin ja rakennekalkin kustannusvaikuttavuus) ja Maa- ja vesitekniiikan tuki ry:ltä Gypsyn-hankkeen kautta (kipsin vaikuttavuuden kirjallisuuskatsaus). Kokeelliset tulokset kipsin vaikutuksesta maan kationikoostumukseen ja biologiaan ja kipsin vaikutuksesta eräiden muiden Itämeren rantavaltioiden maissa julkaistaan myöhemmin.

Savijoen vedenlaadun jatkuvatoimisen seurannan toteutti Luode Consulting, ja aineiston laadunvarmistuksesta vastasi Mikko Kiirikki. Vuosina 2016–2018 suurimman osan Savijoen vesinäytteistä otti ja analysoi Ramboll/Eurofins. Lounais-Suomen vesiensuojeluyhdistys ry (Matti Jantunen) otti täydentäviä näytteitä osallistuen näin myös hankkeen kustannuksiin. Vuosina 2019–2020 kaikki vesinäytteet otti Lounais-Suomen vesiensuojeluyhdistys ry (Matti Jantunen ja Pasi Salmi), ja ne analysoi Lounais-Suomen vesi- ja ympäristötutkimus Oy. Vuonna 2021 näytteenoton ja analysoinnin hoiti Metropolilab. Savijoen vertailualueen virtaamamittauksista vastasivat Jarmo Linjama ja Antti Taskinen (SYKE), ja ylemmän ja alemman käsittelyalueen virtaamanmittauksista ja virtaama-vedenkorkeuskäyristä Jarkko Koskela ja Sami Soosalu (SYKE) sekä Mikko Kiirikki. Virtaamia mittasivat myös Pekka Salminen ja Ilkka Myllyoja (Varsinais-Suomen ELY-keskus).

Maija Taka (Aalto Yliopisto), Tapani Sallantaus (SYKE) ja Sirpa Piirainen (Luke) antoivat hankkeen käyttöön aineistoa ja tietoa, jota käytettiin Savijoen kuormituksen alkuperän selvittämisessä. Antti Taskinen auttoi tilastollisissa analyyseissä. Juha Riihimäki (SYKE) selvitti valuma-alueen ominaisuudet ja laati kartat. GIS-analyyseissä avustivat Minna Kaartinen ja Elina Röman (SYKE). Khaleda Begum (SYKE) auttoi vedenlaatuaineistojen käsittelyssä ja laati aiheesta kirjallisuuskatsausta Maa- ja vesitekniiikan tuki ry:n rahoituksella. Kirjallisuutta käytiin läpi myös John Nurmisen säätiön Gypsum Initiative -hankkeen rahoituksella.

Venla Ala-Harja avusti maa- ja kasvitulosten vertailussa. Markku Yli-Halla ja Helena Soinne (Luke) auttoivat ymmärtämään maa-analyyseiden tuloksia ja Jouni Lehtoranta (SYKE) sulfaatin vaikutuksia rehevöitymiseen.

Kaivovesinäytteet otti Ari Laukkanen (Luode Consulting) ja ne analysoitiin SYKE:n Oulun laboratoriossa. ProAgria otti maa- ja kasvustonäytteet, jotka analysoitiin Eurofins Viljavuuspalvelussa. Arja Tervahauta (Luke) vastasi maanäytteiden vesiuuttoisen fosforin määrittämisestä. Vemalämmästä vastasivat Markus Huttunen ja Marie Korppoo (SYKE) ja FICOS-mallinnuksista Janne Ropponen ja mallitulosten tulkinnasta Harri Kuosa (SYKE).

Talvilevityskokeesta vastasi Kirsi Järvenranta, ja sen toteuttivat Jenni Laakso, Johanna Kanninen ja Arto Pehkonen (Luke). Kipsiä ja rakennekalkkia koskevan taloudellisen analyysin toteuttivat Markku Ollikainen, Sanna Lötjönen, Venla Ala-Harja ja Tommi Tikkanen (HY).

Kiitämme hankkeen ohjausryhmää aktiivisista keskusteluista. Ohjausryhmään kuuluivat Laura Saijonmaa (YM, puheenjohtaja), Petri Liljaniemi (YM), Tarja Haaranen (YM), Arja Nykänen (YM), Sini Wallenius (MMM), Riikka Knaapi (MMM), Airi Kulmala (MTK), Jari Hänninen (Turun yliopisto, Saaristomeren tutkimuslaitos), Pekka Salminen (Varsinais-Suomen ELY-keskus), Mikko Jaakkola (Varsinais-Suomen ELY-keskus) ja Johanna Helkimo (YM). Kiitos myös Maria Kämärille, Pasi Valkamalle, Paula Luodeslammelle, Anna Saarentaukselle ja Ahti Lepistölle käsikirjoituksen kommentoinnista, Antti Iholle ideoinnista, Simo Riikoselle avusta kirjallisuusluettelon laadinnasta ja Mattias Lindrothille ruotsin kielestä.

Lopuksi kiitokset Savijoen viljelijöille, jotka ovat alusta lähtien tukeneet aktiivisesti pilottia, auttaneet sen kenttätöiden käytännön toteuttamisessa sekä seuranneet kiinnostuksella sen tuloksia.

Sisällys

Tiivistelmä	3
Sammandrag	5
Abstract	7
Esipuhe.....	9
1 Johdanto	13
2 Kohdealue.....	16
2.1 Savijoen tutkimusalue.....	16
2.2 Kipsin levitys	18
3 Savijoen seuranta.....	20
3.1 Valuma.....	20
3.2 Savijoen vedenlaatu	22
Sulfaattipitoisuuden arviointi	23
Hiukkasmaisen fosforin pitoisuuksien arviointi.....	26
Orgaanisen hiilen arviointi	26
4 Kipsin vaikutuksen arviointi	28
4.1 Savijoen ainevirtaamat.....	28
4.2 Huuhtoumien jakaminen lähteisiin	28
4.3 Kipsin huuhtoutuminen.....	31
4.4 Hiukkasmaisen fosfori ja kiintoaine	33
Muutos Savijoen PP- ja TSS-virtaamissa.....	33
Osa-alueiden PP- ja TSS-huuhtoumien muutos	35
Peltojen PP-huuhtoumien muutos	36
4.5 Liuennut reaktiivinen fosfori	38
Savijoen DRP-virtaamien muutos.....	38
Osa-alueiden DRP-huuhtoumien muutos.....	39
Kipsipeltojen DRP-huuhtoumien muutos	40
4.6 Liuennut orgaaninen hiili.....	42
Savijoen DOC-virtaamien muutos	42
Osa-alueiden DOC-huuhtoumien muutos	43
Kipsipeltojen DOC-huuhtoumien muutos.....	44
5 Kipsinlevityksen vaikutus pohjavesiin	45
6 Kipsin vaikutukset peltomaahan ja viljelykasveihin.....	47
6.1 Maanäytteet.....	47
Pintamaa	48
Kipsin kulkeutuminen syvemmälle.....	53
6.2 Kasvinäytteet	56
7 Kipsin talvilevitys	59

8 Kipsikäsitteilyn vaikutus rannikkovesien tilaan	64
8.1 Kipsikäsitteilyn potentiaali vähentää fosforikuormitusta Suomessa	64
8.2 Kipsikäsitteilyn vaikutus rannikkovesien tilaan	66
9 Kipsin ja rakennekalkin taloudellinen analyysi: kustannusvaikuttavuus- ja yhteiskunnalliset nettohyödyt	69
9.1 Lähtötiedot	69
9.2 Kustannusvaikuttavuus- ja nettohyötyanalyysi	70
9.3 Johtopäätökset.....	73
10 Tulosten tarkastelu	74
10.1 Valuma-aluekokeiden haasteita	74
10.2 Kipsin teho	75
10.3 Miksi kipsin vaikutus oli erilainen ylemmällä ja alemmalla käsittelyalueella?	77
10.4 Kipsin vaikutus maahan ja kasveihin.....	78
10.5 Onko kipsin sulfaatista haittaa?	79
10.6 Kipsin kohdennus	80
10.7 Tutkimustarpeet	81
11 Yhteenveto	82
Lyhenteet	84
Liitteet.....	85
Lähteet	99

1 Johdanto

Maataloudesta Itämereen päätyvän fosforikuormituksen alentaminen edellyttää fosforilannoituksen rajoittamisen ohella nopeasti vaikuttavia, laajoille peltoaloille soveltuvia toimia. Peltojen kipsikäsittely saattaisi olla tällainen toimi järvettömillä ja savivaltaisilla valuma-alueilla. Kipsikäsittelyn on arvioitu vähentävän sekä hiukkasmaista että liuennutta fosforia valumavesissä, vaikuttavan neljästä viiteen vuoteen ja soveltuvan useille tiloille. Kipsikäsittelyn ei ole havaittu vaikuttavan kielteisesti satoon eikä se vähennä käytössä olevaa peltoalaa. Tässä raportissa kuvataan miten kipsikäsittely toimi Varsinais-Suomessa toteutetussa laajassa valuma-aluepilotissa.

Saaristomereen päätyy sen valuma-alueelta 480 tonnia fosforia vuodessa, ja tästä 87 % on peräisin maataloudesta (Laamanen ym. 2021). Maatalouden kuormitus on vähentynyt muilla rannikkoalueillamme, mutta ei Saaristomerellä (Rankinen ym. 2016, Rankinen ym. 2020). Saaristomeren valuma-alueen maatalous muodostaakin Suomen ainoan HELCOMin Itämeren suurten kuormittajien hot spot -kohteen.

Itämeren toimintaohjelman mukaan Suomen tulisi vähentää Saaristomereen päätyvää kuormitusta noin 100 tonnilla vuodessa. Saaristomeren valuma-alue on lähes järvetön, ja peltojen maalaji on pääosin savea. Siten valuma-alue voisi sopia hyvin kipsikäsittelyyn. Ympäristöministeriön vesiensuojelun tehostamisohjelma onkin valinnut peltojen kipsikäsittelyn keskeiseksi maatalouden fosforikuormitusta vähentäväksi toimeksi. Ohjelmasta rahoitetun KIPSI-hankkeen tavoitteena on levittää Saaristomeren valuma-alueella kipsiä 50 000–85 000 peltohehtaarille vuosien 2020–2022 aikana. EU:n elvytyspaketista saadun rahoituksen turvin kipsikäsittelyä laajennetaan tänä vuonna muillekin rannikkoalueille (KIPSI2.0-hanke).

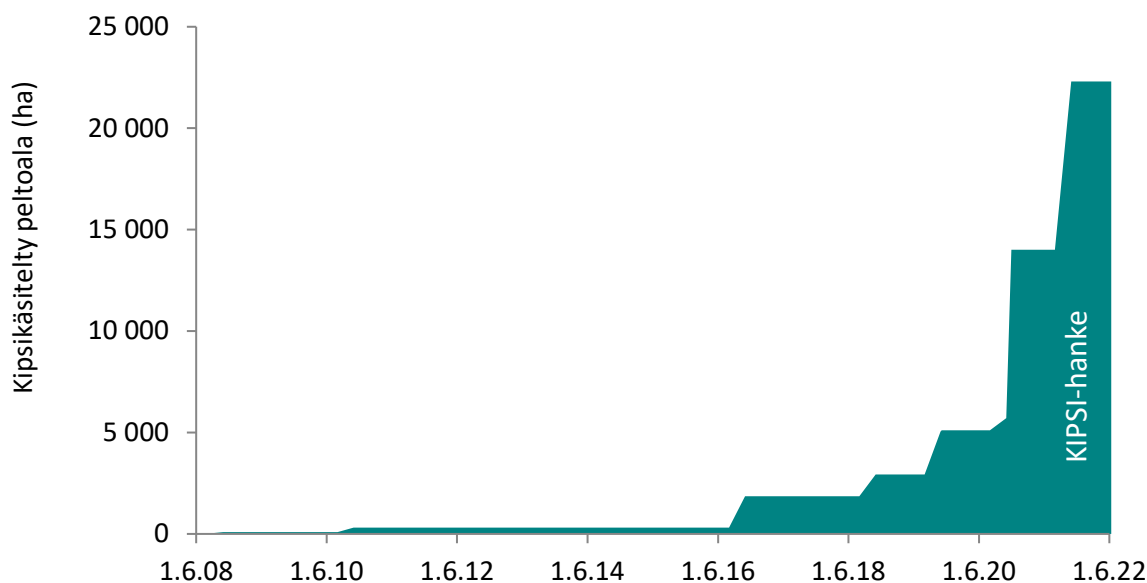
Kipsiä on käytetty pitkään lannoitteena ja maanparannusaineena (Shainberg ym. 1989). Suomessa kiinnostus kipsin vesiensuojelukäyttöä kohtaan alkoi professori Erkki Auran savimaiden eroosiota koskevasta laboratoriokokeesta, jonka tulokset julkaistiin silloisen maatalouden tutkimuskeskuksen suomenkielisenä selvityksenä (Aura ym. 2006). Kipsin tuottaja, Kemira GrowHow (nykyisin osa Yaraa) jatkoi laboratoriotutkimuksia (Pietola 2008), ja Tekes-yhteishankkeessa TraP (2007–2010) toteutettiin Suomen ensimmäinen valuma-aluepilotti Nurmijärven Nummenpäässä, Vantaanjoen latvoilla (Ekholm ym. 2012). Lisäksi TraP-hankkeessa selvitettiin kipsin vaikutusta kokeessa, jossa lähes kolmen vuoden ajan otettiin kipsikäsittelyiltä ja -käsittelemättömiltä pelloilta häiriintymättömiä maanäytteitä, joita sadetettiin laboratoriossa (Uusitalo ym. 2012). TraP selvitti myös kipsikäsittelyn soveltuvuutta ympäristötaloustieteellisestä näkökulmasta, osana fosforikuormituksen rajoittamisen toimenpidekokonaisuutta (Iho ja Laukkanen 2012), ja TARVEKE-hanke tutki kipsiä tarjouskilpailun kohteena (Iho ym. 2014).

Rohkaisevat tulokset kipsistä fosforikuormituksen vähentäjänä johtivat ympäristöministeriön rahoittaman SAVE-hankkeen vuonna 2016 järjestämään, tuolloin ennätyksellisen laajaan Savijoen pilottiin ja muutamaa vuotta myöhemmin yli kaksi kertaa laajempaan Vantaanjoen kipsihankkeeseen (Vantaanjoen kipsihanke 2020). KIPSI- ja KIPSI2.0-hankkeiden myötä kipsikäsittely on siirtynyt tutkimusvaiheesta aktiivisesti käytössä olevaksi vesiensuojelumenetelmäksi (**kuva 1**).

Kuormitusvaikutusten ohella kipsin vaikutusta myös peltomaahan ja kasveihin on selvitetty monessa hankkeessa (Alestalo 2011, Yli-Renko ja Rasa 2011, Ekholm ym. 2012, Suojala-Ahlfors ja Laamanen 2014, Mattila ym. 2019). Myös potentiaalisia sivuvaikutuksia virtavesieliöille on tutkittu (Rantamo ym. 2022), samoin menetelmän kustannustehokkuutta ja hyväksyttävyyttä (Kosenius ja Ollikainen 2019, Ollikainen ym. 2020). Ulkomailta kipsiä on tutkittu erityisesti USAssa (Zhu ja Alva 1994, Kost ym. 2018a), jossa on myös laadittu ohjeet kipsin käytölle (USDA-NRS 2015). Kipsiä ei aina ole levitetty suomalaiseseen tapaan pellon pintaan, vaan sitä on myös käytetty muun muassa pellon reunalla olevissa kaivannoissa (Bryant ym. 2012). Huomionarvoista USAssa tehdyissä tutkimuksissa on, että tavoitteena on ollut vähentää erityisesti liuennutta fosforia (Stout ym. 2000, Bryant ym. 2012).

Kipsi liukenee märässä maassa melko nopeasti Ca^{2+} - ja SO_4^{2-} -ioneiksi liukoisuusarvioiden vaihdellessa runsaasta kahdesta runsaaseen kolmeen grammaan litrassa (Appelo ja Postma 2005, Lebedev ja Kosorukov 2017). Kahdenarvoisina ioneina kalsium ja sulfaatti nostavat voimakkaasti maaveden ionivahvuutta. Ionivahvuuden noustessa maahiukkasia ympäröivä sähköinen kaksoiskerros kutistuu, mikä mahdollistaa hiukkasten pääsemisen lähemmäksi toisiaan ja ”mikromurustumisen”. Tämän sähköstaattisen vaikutuksen lisäksi kalsium muodostaa siltoja maahiukkasten välille vahvistaen muruja. Kalsium voi myös toimia siltana savihiukkasen ja humusaineksen välillä, mikä voi stabiloida muruja (Muneer ja Oades 1989). Kipsin vaikutuksesta muodostuneet mikromurut eivät kulkeudu yhtä helposti sade- ja lumensulamiseden mukana kuin yksittäiset maahiukkaset, joten hiukkasten ja niihin sitoutuneen fosforin huuhtouma pelloilta vesiin pienenee.

Ionivahvuuden kasvu myös voimistaa fosforin sitoutumista maahiukkasten pinnalle, mikä puolestaan vähentää liuenneen fosforin huuhtoutumista (Muneer ja Oades 1989, Uusitalo ym. 2012). Liuenneen fosforin huuhtoutuminen pienenee myös, jos kalsium saostaa fosfaattia (Zhu ja Alva 1994), varsinkin jos maan pH-arvo ei ole erityisen matala ja kalsiumia on runsaasti fosfaattiin nähden (Zhang ym. 2016). Sitoutuminen tai saostuminen ei kuitenkaan ole niin pysyvää, että fosforin käyttökelpoisuus kasveille alenisi (Kost ym. 2018a). Kipsi voi vähentää fosforihuuhtoumia myös, jos maan rakenteen paranemisen myötä pintavalunta vähenee (Truman ym. 2010). Fosforin ohella kipsi vähentää myös liuenneen orgaanisen hiilen (DOC) huuhtoutumista (Varcoe ym. 2010). Lisäksi sitoutuminen kalsiumiin voi hidastaa orgaanisen hiilen hajoamista (Inagaki ym. 2017). Alkaalisissa maissa kipsiä on testattu myös hiilidioksidin sitojana (Han ja Tokunaga 2014, Zhang ym. 2016).



Kuva 1. Kipsillä käsitellyn peltoalan kehitys Suomessa.

Kipsikäsitelyä on tutkittu lähinnä laboratorio- tai peltolohkotasolla (Coale ym. 1994, Zhu ja Alva 1994, Bryant ym. 2012). Valuma-aluekokeita ei liene tehty Suomen ohella muualla kuin Australiassa (Cox ym. 2005, Varcoe ym. 2010). Etelä-Australiassa tutkittiin suuren kipsiannoksen (15 t ha^{-1}) vaikutusta 4,2 hehtaarin laidunvaluma-alueeseen. Valumavettä seurattiin kaksi vuotta ennen ja jälkeen kipsikäsitelyä. Lisäksi tuloksia verrattiin viereiseen käsittelemättömään valuma-alueeseen. Kipsikäsitely paransi maan rakennetta ja vähensi fosforihuuhtoumia pintavalunnassa 35 %, mutta

pintakerrosvalunnassa vain 11 % (Cox ym. 2005). Valumavesien DOC-pitoisuus väheni kuitenkin noin puolella (Varcoe ym. 2010).

Tämä raportti esittelee Savijoen kipsipilotin SAVE- ja SAVE2-hankkeissa saatuja tuloksia. Pääpaino on kipsin vaikutuksessa kuormitukseen, mutta lisäksi käsitellään vaikutuksia peltomaahan ja viljelyskasveihin sekä pohjavesiin ja kuvataan lumilevityskokeen tuloksia. Malleilla arvioidaan kipsin potentiaalia vähentää fosforikuormitusta ja rannikkovesien rehevöitymistä. Raportissa vertaillaan myös kipsin ja rakennekalkin kustannusvaikuttavuutta, kun kasvihuonekaasupäästöt otetaan huomioon vesistövaikutusten ohella.

2 Kohdealue

2.1 Savijoen tutkimusalue

Savijoki on ekologiselta tilaltaan välttävä, ja tyypiltään se on keskisuuri savimaiden joki (SYKE 2022b). Varsinais-Suomelle ominaisesti sen valuma-alueella on peltovaltaisia savikkolaaksoja ja moreeni- ja kallioalueiden metsiä. Soita on vähän, järviä ei lainkaan. Savijoki laskee Aurajoen kautta Saaristomereen.

Kipsin vaikutusta tutkittiin Savijoen ylä- ja keskiosassa, joka muodosti 81,3 km² koko Savijoen valuma-alueen pinta-alasta (130 km², kuva 2). Joen yläjuoksu jätettiin **vertailualueeksi** (15,0 km²), kun taas kipsiä levitettiin joen keskijuoksun pelloille. Keskijuoksu jaettiin vedenlaadun havaintoasemien mukaan **ylempään käsittelyalueeseen** (17,7 km²) ja 2,8 kertaa laajempaan **alempaan käsittelyalueeseen** (48,6 km²). Ylemmällä käsittelyalueella oli peltoja 8,85 km², joista 46 % (4,1 km²) käsiteltiin kipsillä. Alemmalla käsittelyalueella peltoja oli 20,2 km², joista 54 % (10,8 km²) käsiteltiin kipsillä. Yhteensä koko tutkimusalueen pelloista 14,9 km² eli 43 % käsiteltiin kipsillä.

Ennen kipsin levitystä alueen kokonaisfosforin (TP) huuhtouma vaihteli osa-alueittain välillä 169–215 kg km⁻² a⁻¹, josta liuenneen reaktiivisen fosforin (DRP) osuus oli 11–16 % (liite 1). Kiintoaineesta (TSS), hiukkasmaisesta fosforista (PP) ja DRP:stä arviolta yli 90 % huuhtoutui pelloilta, mutta DOC:sta vain noin viidennes. Muu kuormitus oli peräisin lähinnä metsistä. Alueella ei ole pistekuormitusta, ja haja-asutuksen fosforikuormitus on 5–16 kg km⁻² a⁻¹ (taulukko 1), todennäköisesti vähemmän, sillä arvio perustuu haja-asukkaiden (koko alueella 1046 asukasta) tuottamaan fosforimäärään; kiinteistökohtaisten puhdistamojen vaikutusta ei voitu ottaa huomioon, sillä niistä ei ollut tietoa. Rannikkoalueille tyypillisiä happamia sulfaattimaita ei GTK:n kartoituspisteiden (GTK 2022) mukaan ole, alemman käsittelyalueen alaosa ehkä lukuun ottamatta.

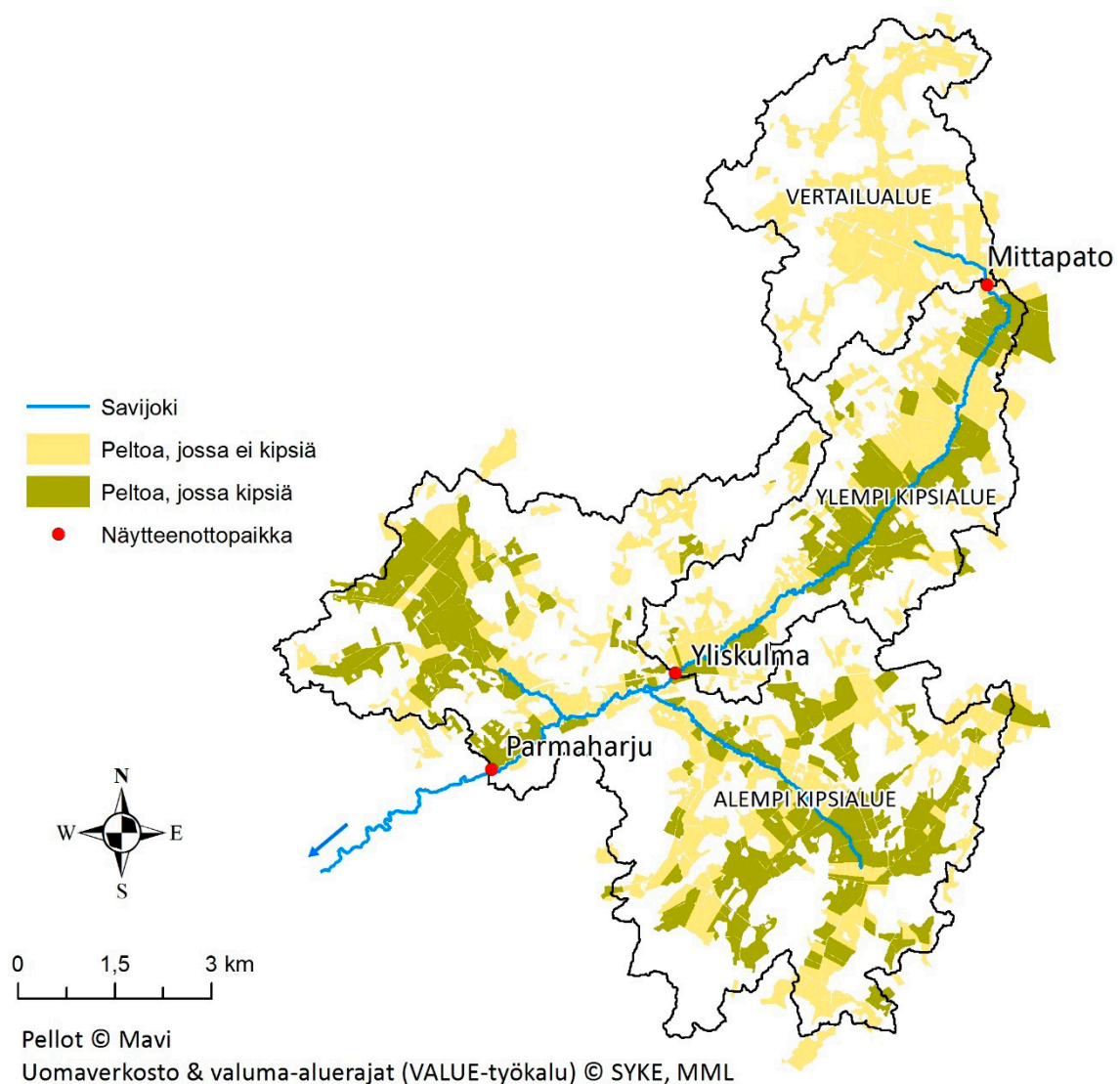
Tulosten tulkintaa vaikeuttaa se, että vertailualue ja käsittelyalueet poikkesivat jonkin verran maankäytöltään ja muilta ominaisuuksiltaan. Käsittelyalueella peltojen osuus oli suurempi (ylempi alue 49,9 %, alempi alue 42,0 %) kuin vertailualueella (38,7 %, **taulukko 1**). Käsittelyalueen pellot olivat myös kaltevampia (ylemmällä käsittelyalueella keskikaltevuus 2,4 %, alemmalla 1,6 %) kuin vertailualueella (0,8 %, **taulukko 2**).

Taulukko 1. Kohdealueen ominaisuuksia

Osa-alue	Pinta-ala km ²	Kipsikäsitelty ala km ²	Peltoa %	Metsää kivennäis maalla %	Rakennettua %	Läpäisemättömän %	Suo %	Muu %	Haja-asukkaiden lukumäärä ja P-kuormitus	
									Henkeä km ⁻²	kg km ⁻² a ⁻¹
Vertailualue	15,0	0	38,7	56,2	3,9	0,8	1,1	0,1	6,3	5,0
Ylempi käsittelyalue	17,7	4,1	50,0	42,2	7,6	2,3	0,2	0,0	19,7	15,8
Alempi käsittelyalue	48,6	10,8	41,5	52,1	4,7	1,3	1,5	0,1	12,3	9,9
Yhteensä	81,3	14,9	42,8	50,7	5,2	1,5	1,2	0,1	12,8	10,1

Valuma-alueen pinta-alat arvioitu SYKEN VALUE-työkalulla ja maankäyttö/maanpeite CORINE 2012 -tietokannan perusteella. Maanpinnan läpäisemättömyys (*Imperviousness*, esim. asfaltoidut alueet) vuodelta 2012 perustuu EEA:n (2022) kriteereihin. Haja-asukkaiden lukumäärä (rakennukset, joissa ei viemäriliittymää tai tieto puuttuu vuodelta 2016) perustuu RHR (2016). Yhden haja-asukkaan on oletettu tuottavan fosforia 2,2 g d⁻¹ (VNA 157/2017).

Tulosten tulkintaa vaikeuttaa myös se, että käsittelyalueellakin vain noin puolet pelloista käsiteltiin kipsillä (ylemmällä käsittelyalueella 46,5 % ja alemmalla käsittelyalueella 53,7 %, koko alueella 51,5 %), ja että kipsillä käsitellyt pellot poikkesivat ominaisuuksiltaan kipsillä käsittelemättömistä. Ylemmällä käsittelyalueella nurmien osuus oli kipsillä käsitellyistä pelloista 6,8 %, kun taas käsittelemättömissä pelloissa osuus oli 27,7 % (**taulukko 2**). Alemmalla käsittelyalueella vastaavat osuudet olivat 6,1 % ja 30,4 %. Nurmilla kipsiä suositeltiin käytettävän vain perustamisvuonna, mikä selittää kipsikäsitelyn painottumisen viljapeltoihin. Vastaava ero oli myös maalajeissa, sillä nurmet sijaitsivat viljapeltoja enemmän karkeammilla kivennäismailla. Eroja maalajeissa oli myös käsittelyalueiden välillä: ylemmän käsittelyalueen käsitellyistä pelloista 84,9 % oli savimailla mutta alemman käsittelyalueen vain 75,2 % (**taulukko 2**). Ylemmällä käsittelyalueella savimaita oli käsitellyistä pelloista 84,9 %, mutta käsittelemättömistä vain 66 %. Alemmalla käsittelyalueella tällaista eroa ei ollut.



Kuva 2. Savijoen tutkimusalue, jossa yläjuoksun vertailualue sekä keskijuoksun ylempi ja alempi käsittelyalue sekä havaintopaikat: Mittapato, Yliskulma (Savijoki 10-tie) ja Parmaharju (Bränikkälä).

Käsittelyalueella oli 107 ja vertailualueella 16 maatilaa. Suurin osa oli viljatiloja; karjatiloja oli käsittelyalueella yhdeksän ja vertailualueella kolme. Laskennallisesti fosforia muodostui lannassa $200 \text{ kg km}^{-2} \text{ a}^{-1}$ vertailualueella, $30 \text{ kg km}^{-2} \text{ a}^{-1}$ ylemmällä ja $1000 \text{ kg km}^{-2} \text{ a}^{-1}$ alemmalla käsittelyalueella (Luostarinen ym. 2017). Peltojen keskimääräinen fosforiluku ($9,3 \text{ mg l}^{-1}$, Eurofins Agro/Ruokavirasto) oli melko matala verrattuna moneen Saaristomeren valuma-alueen kuntaan, mikä luultavasti johtui karjan ja perinteisesti runsaasti lannoitettujen erikoiskasvien vähäisyydestä.

Taulukko 2. Kohdealueen peltojen savimaan osuus, keskikaltevuus ja viljelykasvit

Alue	Kipsiä	Savimaa %	Keski-kaltevuus %	Kevätvilja %	Syysvilja %	Nurmi %	Muu %
Vertailualue	Ei	84,5	0,8	59,0	26,9	14,1	0,1
Ylempi käsittelyalue	Ei	66,0	2,4	54,5	17,0	27,7	0,8
	Kyllä	84,9	2,3	53,9	39,3	6,8	0,0
	Yhteensä	74,8	2,4	54,2	27,4	18,0	0,4
Alempi käsittelyalue	Ei	72,7	1,8	60,2	7,8	30,4	1,7
	Kyllä	75,2	1,3	80,0	13,1	6,1	0,7
	Yhteensä	74,0	1,6	70,8	10,7	17,3	1,2

Savimaaksi oletettu Maannostietokannan (Lilja ym. 2009) maannos Vertic Cambisol. Tieto lohkojen viljelykasveista vuodelta 2015 Ruokaviraston peltolohkoaineistosta.

2.2 Kipsin levitys

Savijoella käsiteltiin kipsillä $14,94 \text{ km}^2$ peltoa elo-lokakuussa 2016, Liedon ja Paimion kunnissa (**kuva 3**). Yhteensä kipsiä levitettiin $15,5 \text{ km}^2$:n alalle, osin siis valuma-alueen ulkopuolelle. Kipsi ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) oli peräisin Yaran Siilinjärven tehtaalta, jossa sitä muodostuu fosforihapon valmistuksen sivutuotteena (ns. fosfokipsi). Siilinjärven kipsi ei sisällä raskasmetalleja tai radioaktiivisia aineita. Kipsiä levitettiin 4 t ha^{-1} , jossa oli noin $0,8 \text{ t ha}^{-1}$ kalsiumia ja $0,64 \text{ t ha}^{-1}$ rikkiä. Kideveden lisäksi kipsissä on kosteutta noin 15 %. Syntytapansa vuoksi levitettävässä kipsissä on jonkin verran fosforia (noin 8 kg ha^{-1}) ja fluoridia (Yara 2020). Kipsiä levitettiin halukkaiden viljelijöiden pelloille, mutta ei suorakylvetyille lohkoille, luomutiloille eikä pohjavesialueille (Ollikainen ym. 2020). Kipsin levitysaika sattui olemaan hyvin kuiva (**taulukko 3**). Yksi lohko jäi kuitenkin märkyiden vuoksi käsittelemättä.



Kuva 3. Yläriivi: Yaran Siilinjärven apatiittikaivos ja läheisen kipsikasan huippu. Alarivi: Kipsin levitystä Savijoella.

3 Savijoen seuranta

3.1 Valuma

Savijoen vertailualueella on Varsinais-Suomen ELY-keskuksen ylläpitämä seuranta-asema (Savijoki 022, **kuva 4**), jossa valumaa määritetään tunnin välein mittapadon vedenpinnankorkeuden ja sille määritetyn purkautumiskäyrän avulla. Paineanturin mittaama vedenpinnan korkeus tarkistetaan kuukausittain paikan päällä, mikä mahdollistaa muun muassa jääkorjauksen. Korjauksessa käytetään Suomen ympäristökeskuksen HYD-valikon valunnan korjaus- ja laskentaohjelmaa (SYKE 2022a). Tutkimusvuosina (2016–2021) keskivaluma vertailualueella oli hieman pienempi ($9,4 \text{ l s}^{-1} \text{ km}^{-2}$, **taulukko 3**) kuin vuosina 1971–2020 ($10,4 \text{ l s}^{-1} \text{ km}^{-2}$). Tutkimusvuodet jaettiin karkeasti keväisiin, kesiiin ja syksyihin, niin että lopulta yksittäisiä jaksoja oli 16. Jaksojen keskivaluma vaihteli välillä $0,15\text{--}25,4 \text{ l s}^{-1} \text{ km}^{-2}$ (**taulukko 3**). Jakso 1 (kevät 2016) kuvasi tilannetta ennen kipsin levitystä, jakso 2 (elo-lokakuu 2016) tilannetta kipsin levityksen aikana ja loput jaksot kipsin levityksen jälkeistä tilannetta.

Ylemmällä ja alemmalla käsittelyalueella mitattiin vedenpinnankorkeutta STS-paineanturilla tunnin välein (paitsi kesällä 2019), mutta alueilla ei ollut aiemmin määritettyä purkautumiskäyrää. Tämän vuoksi alueilla mitattiin hetkellistä virtaamaa ns. suolamenetelmällä ja ADCP-virtaamamittarilla. Joen virtaamahuiput olivat kuitenkin niin lyhytkestoisia, ettei suurten virtaamien aikana päästy paikalle. Lisäksi kylminä talvina jää aiheutti padotusta, jolloin mittausten perusteella laadittu alustava purkautumiskäyrä yliarvioi valumaa.

Ylemmän ja alemman käsittelyalueen valuma arvioitiin kahdella tavalla. Ensimmäisessä käytettiin vertailualueen valumaa myös ylemmälle ja alemmalle käsittelyalueelle. Koska mittapadolta alemman käsittelyalueen Parmaharjulle on vain noin 12 uomakilometriä, sadannassa tai lumen sulamisessa ei luultavasti ole suuria havaintopaikkojen välisiä eroja. Valuntahuippujen ajoittuminen voi kuitenkin poiketa vertailualueesta erityisesti alemmalla käsittelyalueella, sillä joen alajuoksulla suurempi osa vedestä tulee muualta kuin lähivaluma-alueelta. Alemmalla käsittelyalueella valuntahuippujen voisi siten olettaa olevan hieman matalampia, mutta pitkäkestoisempia kuin vertailualueella. GIS-analyysin mukaan veden keskimääräinen kulkeutumismatka oli 3,9 km vertailualueella, 9,8 km ylemmällä käsittelyalueella ja 10 km alemmalla käsittelyalueella. Kulkeutumismatka arvioitiin digitaalisesta korkeusmallista (DEM10m) luodun valuma-alueen virtaussuuntarasterin perusteella lasketusta virtaussuunnan mukaisesta keskimääräisestä etäisyydestä purkupisteeseen.



Kuva 4. Vastalevitettyä kipsiä pellolla

Toisessa valunnan arviointitavassa käytettiin ylempälle ja alemmalla käsittelyalueella vedenpinnankorkeuden perusteella arvioitua valumaa. Arviointia ei voinut suoraan perustaa vedenkorkeus-virtaama-yhteyteen, sillä se tuotti epärealistisia eroja asemien keskivalunnassa. Valumaa korjattiin niin, että jaksottaiset keskivalumat pyrittiin asettamaan lähes samoiksi kaikilla kolmella havaintopaikoilla. Ensin säädettiin purkautumiskäyrää siten, että jäättömän huhti-lokakuun välinen aika ylempällä ja alemmalla käsittelyalueella täsmäsi mittapadon valumaan. Lopulta jäättömälle ajalle saatiin paras arvio muodostamalla purkautumiskäyrä kummankin aseman vedenkorkeuden ja vertailualueen valunnan välille. Tämän jälkeen tehtiin jääkorjaukset tammi-maaliskuulle siten, että jakson keskivaluma täsmäsi mittapadon valumaan. Jääaika arviotiin veden lämpötilasta, lähimmän sääaseman lämpötilasta ja riistakameran kuvista.

Jälkimmäinen arviointitapa otti paremmin huomioon valunnan ajallisen vaihtelun, sillä se perustui ylempällä ja alemmalla käsittelyalueella mitattuun vedenpinnankorkeuteen. Epävarmuutta arviointuihin valuntoihin aiheutti kuitenkin virtaamamittausten vähäisyys tulvakausina ja jääkorjauksen realismisuus. Jään lisäksi padotusta (liian suuria valuma-arvioita) voi aiheuttaa uoman kasvillisuus.

Edellä kuvatulla kahdella menetelmällä saadut tulokset kipsin vaikutuksesta eivät lopulta poikenneet suuresti toisistaan, mistä syystä päädyttiin käyttämään vertailualueen valumaa kaikilla asemilla.

Taulukko 3. Jaksottaiset keskivalunnat Savijoella

Jakso	No.	Vuodenaika	Päivämäärä	Pituus d	Valuma $l\ s^{-1}\ km^{-2}$
Ennen kipsiä Kipsin levitys Kipsin jälkeeseen	1	Kevät	19.2.–15.5.2016	87	13,8
	2	Alkusyky	1.8.–31.10. 2016	92	0,15
	3	Loppusyky	1.11.–31.12. 2016	61	2,3
	4	Kevät	1.1.–15.5. 2017	135	5,6
	5	Kesä	16.5.–20.9. 2017	128	1,8
	6	Syky	21.9.–31.12. 2017	102	21,5
	7	Kevät	1.1.–15.5. 2018	135	12,2
	8	Kesä	16.5.–20.9. 2018	128	0,16
	9	Syky	21.9.–31.12. 2018	102	3,5
	10	Kevät	1.1.–15.5. 2019	135	16,4
	11	Kesä	16.5.–19.9. 2019	127	2,2
	12	Syky	20.9.–31.12. 2019	103	25,4
	13	Kevät	1.1.–19.5. 2020	140	18,9
	14	Kesä	20.5.–28.9. 2020	132	0,6
	15	Syky	29.9.–31.12. 2020	94	13,7
	16	Kevät	2.1.–29.4.2021	118	11,7
Kaikki 1971–2020	1–16		19.2.–29.4.2021	1 819	9,4 10,4

3.2 Savijoen vedenlaatu

Savijoesta otettiin 112 vesinäytettä kultakin kolmelta havaintopaikalta joulukuun 2015 ja huhtikuun 2021 välillä. Vuoden 2018 loppuun asti vesinäytteistä määritettiin lämpötila, TP, liuennut kokonaisfosfori (DTP), DRP, kokonaistyyppi, nitraatti- ja nitriittitypen summa, ammoniumtyppi, TSS, sameus, DOC, kokonaisorgaaninen hiili (TOC), S, SO₄, Cl, alkaliniteetti, Ca, Mg, Na, Fe, Mn, pH ja sähkönjohtavuus. Vuodesta 2019 alkaen muuttujista karsittiin kustannussyistä muut ionit kuin sulfaatti (ja alkaliniteetti), typpi ja sen jakeet, S, TOC, Fe ja Mn. Vuosina 2016–2018 suurimman osan näytteistä otti ja määrittä Ramboll/Eurofins. Lisäksi Lounais-Suomen vesiensuojeluyhdistys otti ja määrittä täydentäviä näytteitä suppeammalla muuttujavalikoimalla. Vuosina 2019–2020 kaikki näytteet otti ja

analysoi Lounais-Suomen vesiensuojeluyhdistys, ja vuodesta 2021 lähtien MetropoliLab. Näytteitä otettiin 17–23 kertaa vuodessa pyrkien ajoittamaan näytteenotto korkeisiin valumiin; tosin vähävetisinäkin kausina näytteitä otettiin noin kerran kuukaudessa. Näytteenottohetkien keskivaluma oli huomattavasti koko vuoden keskivalumaa korkeampi (**taulukko 4**), mikä osoittaa, että näytteenotossa osuttiin runsasvetisiin kausiin.

Taulukko 4. Valuma Savijoen vertailualueella ja vesinäytteiden lukumäärä vuosina 2016–2020

Vuosi	Vuoden keskivaluma l s ⁻¹ km ⁻²	Päivittäinen minimi- ja maksimivaluma l s ⁻¹ km ⁻²	Näytteenotto- hetkien keski- valuma l s ⁻¹ km ⁻²	Näytteenotto- hetkien minimi- ja maksimivaluma l s ⁻¹ km ⁻²	Vesinäytteiden lukumäärä lkm
2016	6,0	0–165	13,4	0,0–121	22
2017	8,7	0–113	12,3	0,2–49,9	23
2018	5,5	0–70,7	13,4	0,0–63,9	21
2019	14,0	0–180	44,8	0,0–133	17
2020	11,0	0–152	39,9	0,0–182	19

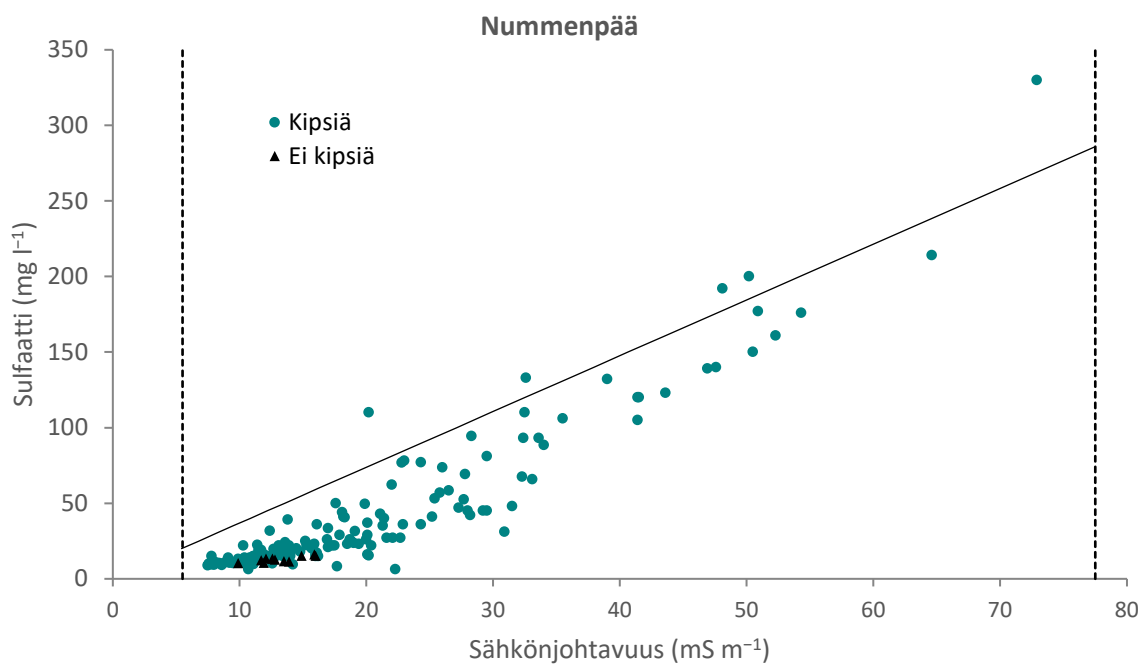
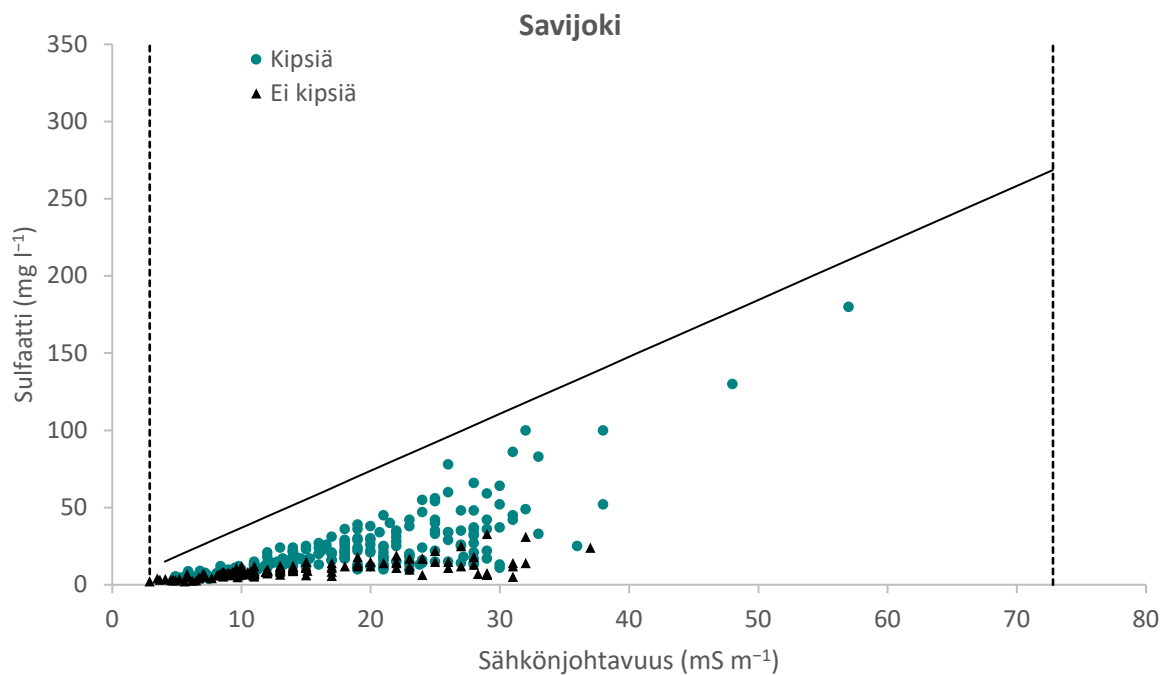
Vesinäytteiden tuloksia käytettiin validoimaan (ja DOC:n osalta kalibroimaan) jatkuvatoimisten antureiden dataa. Lisäksi niillä tuotettiin tietoa niistä muuttujista, joita ei voida mitata anturien avulla (esim. DRP).

Jatkuvatoiminen vedenlaadun mittaus alkoi 19.2.2016. Anturit (YSI EXO2) rekisteröivät tunnin välein veden lämpötilaa, sameutta, sähkönjohtavuutta ja humuksen fluoresenssia. Antureissa oli harjapuhdistin, joka puhdisti sensorit automaattisesti aina ennen mittausta. Mittausten laadun varmistamiseksi sähkönjohtavuus-, sameus- ja fluoresenssianturit kalibroitiin laboratorioissa puolen vuoden välein. Luode Consulting huolehti aineiston laadunvalvonnasta. Kustannusten karsimiseksi mittaukset keskeytettiin toukokuun puolivälistä syyskuun puoliväliin vuosina 2019 ja 2020. Savijoen virta kesällä tyypillisesti hyvin vähän vettä (**taulukko 3**), ja lisäksi pitoisuudet ovat pieniä.

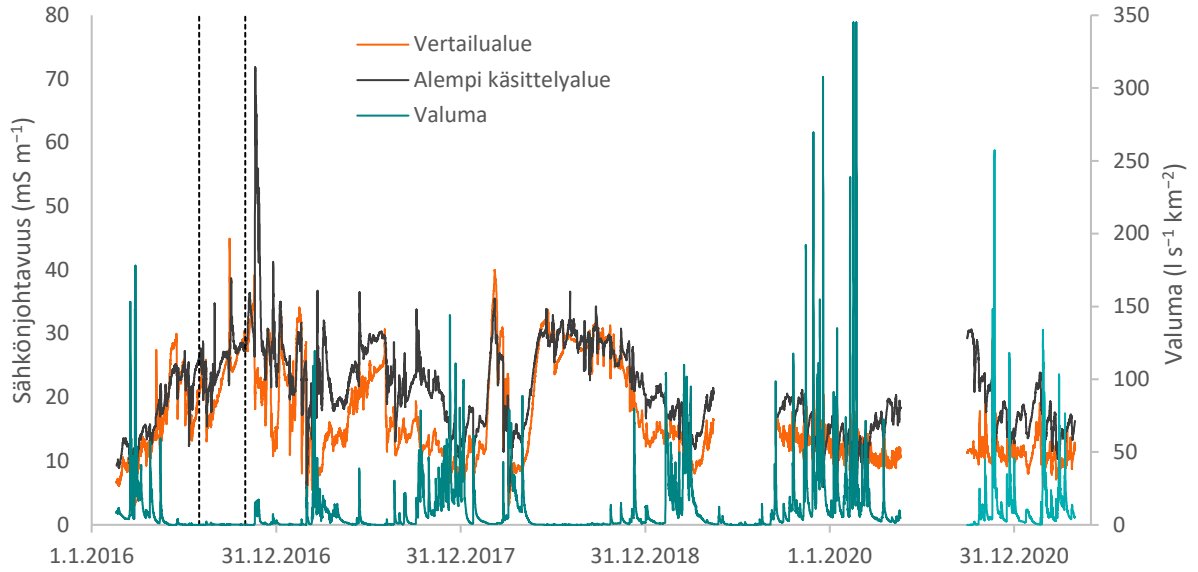
Sulfaattipitoisuuden arviointi

Savijoen veden sulfaattipitoisuus kuvaa kipsin huuhtoutumista pelloilta, joten sen avulla voidaan arvioida kipsivaikutuksen kestoa. Lisäksi sulfaattipitoisuuden perusteella voidaan arvioida kipsikäsittelyn vaikutuksia sulfaatille herkälle jokielöstölle (Rantamo ym. 2022). Vesinäytteistä määritetyn sulfaatin valuntapainotteinen keskipitoisuus nousi voimakkaasti heti ensimmäisellä jaksolla (marras-joulukuu 2016) kipsin levityksen jälkeen. Tämän jälkeen pitoisuus laski, mutta pysyi vertailualueella korkeammalla tasolla kevääseen 2021 asti. Sulfaattipitoisuudet olivat keväisin matalimmat, mikä johtui ehkä lumen sulamisvesien vähäisemmästä kontaktista maahan. Kokonaisrikin pitoisuus sulfaatiksi muutettuna vastasi sulfaattipitoisuuksia, ts. Savijoen vedessä oleva rikki oli lähes täysin sulfaattia.

Anturien mittaamaa sähkönjohtavuutta käytettiin sulfaattipitoisuuden muutosten tarkempaan ajalliseen arviointiin (**kuva 5**). Korkein sähkönjohtavuusarvo oli 72,8 mS m⁻¹, joka havaittiin ensimmäisen – sinänsä vähäisen – kipsinjälkeisen valuntatapahtuman aikana (**kuva 6**). Piikki oli lyhytaikainen: arvo 40 mS m⁻¹ ylittyi vain 10 päivän aikana. Korkeimmilta anturien mittaamilta sähkönjohtavuusarvoilta (53,4–72,8 mS m⁻¹) ei ollut vesinäytteitä sulfaattipitoisuuksien varmentamiseksi (**kuva 5**).



Kuva 5. Vesinäytteiden sulfaattipitoisuuden ja jatkuvatoimisten antureiden mittaaman sähkönjohtavuuden suhde ennen ja jälkeen kipsinlevityksen Savijoella ja Nummenpäässä. Katkoviivat osoittavat matalimman ja korkeimman anturien havaitseman sähkönjohtavuuden. Suora kuvaa teoreettista yhteyttä tilanteessa, jossa sähkönjohtavuuteen vaikuttaisi vain kipsin kalsium ja sulfaatti, ja kumpaakin huuhtoutuisi samassa moolisuhteessa.



Kuva 6. Sähkönjohtavuus vertailualueella ja alemmalla käsittelyalueella sekä valuma vertailualueen mittapadolla. Katkoviivat osoittavat kipsinlevityksen ajankohdan.

Sulfaattipitoisuus arvioitiin sähkönjohtavuudesta sekamallinnuksella käyttämällä tunnin aika-askelta. Sekamallinnuksessa tarkastellaan kiinteitä ja satunnaisvaikutuksia, joista kiinteät vaikutukset koskevat koko aineistoa ja satunnaisvaikutukset havaintoasemaa ja vuotta:

$$SO_{4ij} = a_{ij} + Cond_{ij}^{bij} + \varepsilon_{ij} \quad (1)$$

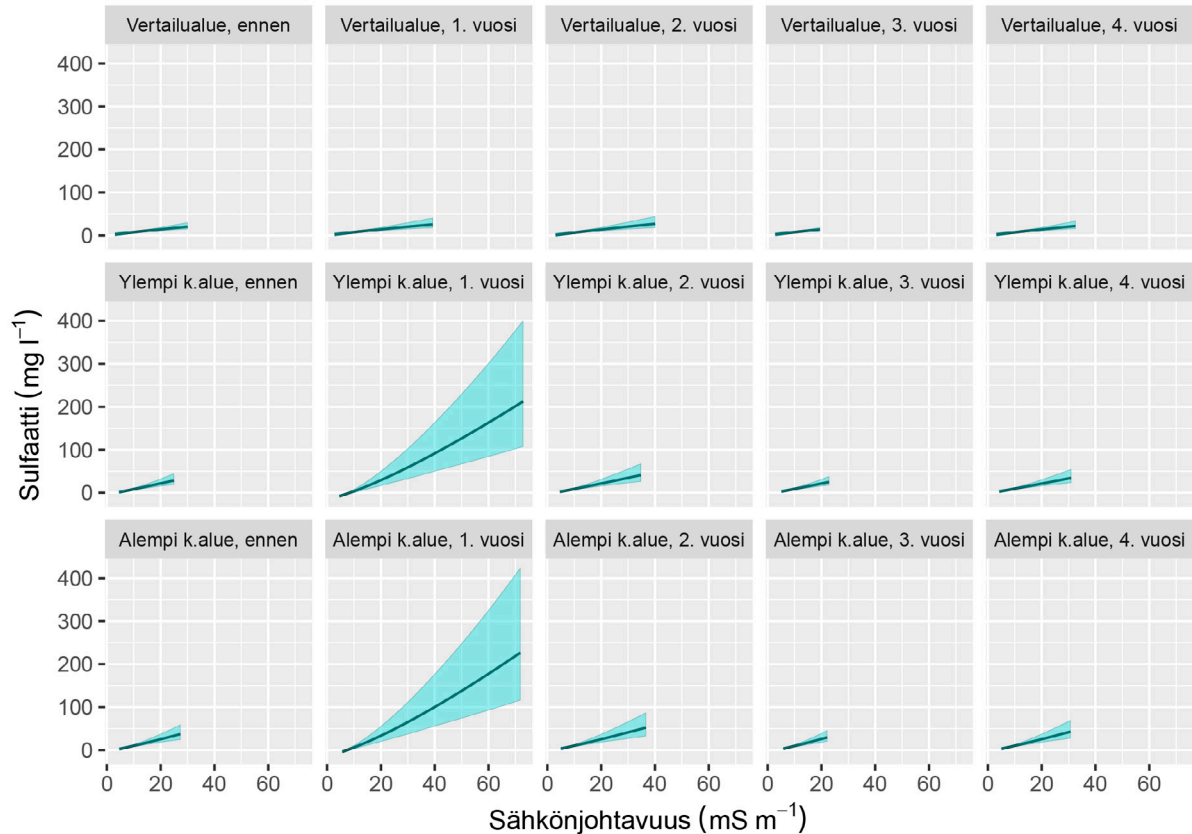
missä SO_{4ij} = sulfaattipitoisuus ($mg\ l^{-1}$), $Cond_{ij}$ = sähkönjohtavuus ($mS\ m^{-1}$), a_{ij} = vakiotermi, b_{ij} = potenssi, ε_{ij} = virhe, i = havaintoasema ja j = vuosi. Parametrit a_{ij} ja b_{ij} koostuvat kiinteistä vaikutuksista ja satunnaisvaikutuksista:

$$a_{ij} = c + c_i + c_{ij} \quad (2)$$

$$b_{ij} = d + d_i + d_{ij} \quad (3)$$

missä c , d = kiinteiden vaikutusten vakio ja potenssi, c_i , d_i = havaintoasemien satunnaisvaikutusten vakio ja potenssi ja c_{ij} , d_{ij} = havaintokausien satunnaisvaikutusten vakio ja potenssi. Kalsiumpitoisuus arvioitiin samalla periaatteella. Muita pääioneja kuin sulfaatti ei määritetty vuoden 2018 jälkeen.

Sulfaatin korkein yhtälöllä 1 arvioitu pitoisuus oli noin $200\ mg\ l^{-1}$, tosin ennusteen epävarmuus, ts. 95 %:n luotettavuusväli oli laaja ($120\text{--}400\ mg\ l^{-1}$, kuva 7).



Kuva 7. Antureilla mitatun sähkönjohtavuuden perusteella arvioidut sulfaatin pitoisuudet ja niiden 95 % luottamusvälit vedenlaatuasemilla eri vuosina.

Hiukkasmaisen fosforin pitoisuuksien arviointi

Hiukkasmaisen fosforin (PP) pitoisuus laskettiin vähentämällä vesinäytteiden TP-pitoisuudesta DTP-pitoisuus. PP siis kuvaa sitä fosforia, joka suodatuksessa jäi suodatinkalvolle eikä päätenyt suodokseen. TP:stä keskimäärin 82 % muodostui PP:stä. Loppuosa fosforista oli DRP:a (14 %) ja liuennutta ei-reaktiivista fosforia (DUP) (4 %). Vesinäytteiden sameus ($r = 0,91, p > 0,001$) ja TSS-pitoisuus ($r = 0,97, p > 0,001$) korreloivat voimakkaasti PP:n kanssa.

PP:n tuntipitoisuudet arviointiin kovarianssimallilla vesinäytteiden PP-pitoisuuksien ja anturien antaman sameuden perusteella:

$$PP_i = a_i + 1,28 \text{ Sameus} \quad (4)$$

missä i havaintoasema. Vakio a sai arvon 32,8 vertailualueella, 24,5 ylemmällä ja 21,6 alemmalla käsittelyalueella. Suhteellisen korkea vakion arvo viittaa siihen, että yhteys ei ole ollut lineaarinen. Nummenpään aineistossa sekä vakio että kulmakerroin olivat hieman matalampia ($a = 6,5, b = 1,17, n = 172$).

Orgaanisen hiilen arviointi

Vesinäytteistä määritettiin vuosina 2015–2018 sekä TOC:n että DOC:n pitoisuus. TOC:sta keskimäärin 91 % (64–105 %, $n = 126$) muodostui DOC:sta. Savijoen vesinäytteiden TSS-, DTP- ja DRP-määrityksissä suodatukset tehtiin huokoskooltaan $0,4 \mu\text{m}$:n Whatman/Nuclepore polykarbonaattikalvolla. DOC-määrityksessä käytettiin Sartorius PES (polyeetterisulfoni) -suodatinta,

jonka huokoskoko on 0,45 µm. Suodattimien vertailemiseksi kaikilta kolmelta asemalta määritettiin seitsemällä näytteenotokerralla ($n = 21$) DOC myös Nucleporen huokoskooltaan 0,4 µm:n ja 0,2 µm:n kalvoilla. Sartoriuksen kalvolla saatiin tuloksiin verrattuna Nucleporen 0,4 µm:n suodatin antoi keskimäärin 1 % pienempiä DOC-tuloksia ja Nucleporen 0,2 µm:n suodatin keskimäärin 5 % pienempiä DOC-tuloksia. Jako liuenneeseen ja hiukkasmaiseen jakeeseen on orgaanisen hiilen osalta jossain määrin keinotekoinen, sillä mitä tiukempaa suodatusta käytetään, sitä pienempiä DOC-pitoisuuksia saadaan (Xu ja Guo 2017).

Hiukkasmaisen orgaanisen hiilen (POC) osuus TOC:sta oli 9 % ($-5 - +36$ %, $n = 126$). POC- ja TSS-pitoisuuksien välillä oli yllättäen vain vähäinen korrelaatio. Jakamalla POC-pitoisuus TSS-pitoisuudella saadaan hiukkasmaisen orgaanisen hiilen osuus kiintoaineesta. Se oli Savijoessa keskimäärin vain 1 %, kun lähtömaassa orgaanista hiiltä oli keskimääri 3,9 % (olettaen, että pintamaan orgaanisen hiilen pitoisuus = hehikutushäviö /1,7245, ks. **taulukko 8**).

Jatkuvatoimisissa vedenlaatuantureissa käytettiin fluorometrisensoreita, jotka arvioivat fluoresoivan liuenneen orgaanisen aineksen ($fDOM$, *fluorescent dissolved organic matter*) pitoisuutta. Fluorometrilukemaan vaikuttaa liuenneen orgaanisen aineksen lisäksi voimakkaasti sameus ja jossain määrin lämpötila. Fluorometrilukemat muunnettiin DOC-pitoisuuksiksi kahden empiirisen yhtälön avulla. Ensin tehtiin sameuskorjaus, joka saatiin kalibroimalla vesinäytteiden ($n = 91$, $r^2 = 0,71$) sameutta vasten:

$$fDOM_{Corr} = \frac{fDOM}{(1-(1,0975 \text{Sameus})/(166+\text{Sameus}))} \quad (5)$$

Kaikille asemille ja jaksoille käytettiin samoja kalibroituja kertoimia. Tämän jälkeen DOC-pitoisuus saatiin kertomalla fluoresenssilukema kertoimella 0,1035. Lämpötilakorjausta ei tehty, sillä sen vaikutus arvioitiin tuloksen yleiseen tarkkuustasoon nähden vähäiseksi.

4 Kipsin vaikutuksen arviointi

Kipsin vaikutusta kuormitukseen arvioitiin kolmella eri tarkkuustasolla. Karkeimmassa arviointitavassa tarkasteltiin Savijoen kolmen havaintopaikan **pinta-alaan suhteutetuissa ainevirtaamissa** tapahtuneita muutoksia ennen ja jälkeen kipsin levityksen. Tämä arviointitapa perustuu varsinkin hiukkasmainen fosforin osalta pitkälti mittauksiin ja on tässä suhteessa luotettava, mutta sen perusteella ei voida arvioida peltojen huuhtoumissa tapahtuneita muutoksia, eikä tuloksia siten voi verrata muihin kipsitutkimuksiin.

Toinen, hieman tarkempi arvio käsittelee kunkin **itsenäisen osavaluma-alueen huuhtoumia**, ts. ensimmäisessä tarkastelutavassa saaduista ylemmän ja alemman käsittelyalueen ainevirtaamista vähennettiin yläpuolisilta alueilta tulevat ainemäärät.

Kolmannessa arviointitavassa **huuhtoumat jaettiin lähteisiinsä** eli arvioitiin, mikä osuus kuormituksesta tuli pelloilta, metsistä, rakennetulta alalta ja muulta alalta. Lisäksi oletettiin, että pelloilta tulevan kuormituksen muutos tapahtui pelkästään kipsin vaikutuksesta ja vain pelloilla (ei uomassa), ja näin saatiin arvio siitä, minkä verran kipsillä käsiteltyjen peltojen huuhtouma poikkesi käsittelemättömien peltojen huuhtoumista. Käsittelemättömiä peltoja koskeva arvio perustui vertailualueen pelloille arvioituihin huuhtoumiin. Tämä arviointitapa tuotti tietoa, jonka perusteella kipsin tuottamia huuhtoumavähennyksiä voitiin verrata muihin tutkimuksiin ja jonka perusteella voitiin tehdä kustannusvaikuttavuuslaskelmia, mutta toisaalta tulokset ovat kaikkein ”prosessoiduimpia”, ja niiden oikeellisuus riippuu eri oletusten paikkansapitävyydestä, esimerkiksi siitä, kuinka hyvin muilta maankäyttömuodoilta tuleva kuormitus on arvioitu.

4.1 Savijoen ainevirtaamat

Ainevirtaamat niiden muuttujien osalta, joiden pitoisuus johdettiin jatkuvatoimisten anturien tuottamista sameus- (PP, TSS), fluoresenssi- (DOC) tai sähköjohtavuusarvoista (SO_4 , Ca), arvioitiin laskemalla kullekin alueelle pinta-alaan suhteutetut tuntiainevirtaamat L_{hi} ($\text{g km}^{-2} \text{h}^{-1}$):

$$L_{hi} = c_i \times q_i \times k \quad (6)$$

jossa c_i ja q_i ovat tunnin i pitoisuus ($\mu\text{g l}^{-1}$ tai mg l^{-1}) ja valuma ($\text{l s}^{-1} \text{km}^{-2}$) ja k on yksiköiden muunnostermi. Jos pitoisuus- tai valuma-arvo puuttui, se interpoloitiin lineaarisesti. Koska jaksot olivat eripituisia, tuntiainevirtaamista laskettiin jaksojen keskimääräiset päiväainevirtaamat (L_d , $\text{g km}^{-2} \text{d}^{-1}$). Kesinä 2019 ja 2020 Savijoella ei ollut jatkuvatoimisia mittareita. Näiden jaksojen ainevirtaamat arvioitiin kesien 2016–2018 avulla.

DRP-pitoisuutta ei voitu arvioida jatkuvatoimisten anturien avulla, joten sen ainevirtaama arvioitiin laskemalla vesinäytteiden valuntapainotteinen keskipitoisuus jaksoittain ja kertomalla tämä jakson keskivalunnalla.

Yliskulman havaintoihin perustuvassa, ylemmälle käsittelyalueelle arvioidussa ainevirtaamassa on mukana myös mittapadon havaintoihin perustuva vertailualueen ainevirtaama, ja Parmaharjun havaintoihin perustuvassa alemman käsittelyalueen ainevirtaamassa sekä vertailualueen että ylemmän käsittelyalueen ainevirtaamat. Kuten yllä todettiin, ainevirtaamia tarkasteltiin myös niin, että niistä vähennettiin ylempien alueiden ainevirtaamat, jolloin huuhtoumat koskevat vain kutakin ”itsenäistä” aluetta.

4.2 Huuhtoumien jakaminen lähteisiin

Jotta kipsin vaikutus käsiteltyä peltoalaa kohden voitaisiin arvioida, huuhtoumat jaettiin viiteen lähteeseen: (1) kipsillä käsittelemättömät pellot, (2) kipsillä käsitellyt pellot, (3) kivennäismailla olevat

metsät, (4) rakennetut alueet ja (5) muut alueet. Suhteellisen vähäistä haja-asutuksen kuormitusta ei otettu huomioon, eikä alueella tietojemme mukaan ole pistekuormittajia.

Metsistä, rakennetuilta alueilta ja muilta alueilta tulevat huuhtoumat arvioitiin näiden maankäyttömuotojen pinta-alojen ja ominaiskuormitusten avulla. Kivennäismaiden metsien ominaiskuormitus perustui tätä maankäyttömuotoa edustaville valuma-alueille laskettuihin arvoihin ja rakennettujen alueiden ominaiskuormitus kirjallisuuteen (**liite 1**). Ominaiskuormitukset asetettiin jakson keskivalunnasta riippuvaiseksi (**liite 1**). Pelloilta tuleva huuhtouma saatiin vähentämällä huuhtouma-arvioista metsien, rakennettujen alueiden ja muiden alueiden osuus. Koska peltojen ja muiden maankäyttömuotojen ominaiskuormituksissa on suuri ero, jäännösterminä saatua peltojen huuhtoumaa voidaan pitää suhteellisen luotettavana lukuun ottamatta DOC:a (**taulukko 6**), jonka ominaiskuormitus kivennäismaiden metsistä ja pelloista on samaa tasoa (Manninen ym. 2018). **Liitteessä 1** vertaillaan tässä tutkimuksessa käytettyjä ominaiskuormituslukuja kirjallisuuteen.

Kunkin havaintopaikan ja jakson keskimääräisen päivahuuhtouman oletettiin siis muodostuvan eri maankäyttömuotojen huuhtoumien pinta-alapainotettuna summana:

$$L_d = A^P L_d^P + A^M L_d^M + A^R L_d^R + A^O L_d^O \quad (7)$$

A^P = pellon, A^M = kivennäismaiden metsän, A^R = rakennetun ja A^O = muun alan pinta-alaosuus ja L_d^P , L_d^M , L_d^R ja L_d^O näiden maankäyttömuotojen ominaiskuormitus ($\text{g km}^{-2} \text{d}^{-1}$). Esimerkiksi vertailualueella peltojen osuus valuma-alueen pinta-alasta on 0,387, metsien 0,562, rakennetun alan 0,039 ja muun alan 0,012 (**taulukko 5**). Metsille arvioitu PP-huuhtouma ennen kipsin levitystä jaksolla 1 oli $8,9 \text{ g km}^{-2} \text{d}^{-1}$, rakennetulle alalle $25,5 \text{ g km}^{-2} \text{d}^{-1}$ ja muulle alalle $2,7 \text{ g km}^{-2} \text{d}^{-1}$. Koska huuhtouma vertailualueelta oli jaksolla ennen kipsikäsitelyä $159 \text{ g km}^{-2} \text{d}^{-1}$, vertailualueen peltojen PP-huuhtouma saatiin yhtälöstä 7 seuraavasti:

$$L_d^P = (L_d - A^M L_d^M - A^R L_d^R - A^O L_d^O) / A^P \quad (8)$$

$$\begin{aligned} L_d^P &= \frac{159 - 0,562 \times 8,9 - 0,039 \times 25,5 - 0,012 \times 2,7}{0,387} \\ &= 396 \text{ g km}^{-2} \text{d}^{-1} \end{aligned} \quad (9)$$

Kuten yllä todetaan, pelloille jäännösterminä arvioitu PP-huuhtouma on todennäköisesti oikeansuuntainen, sillä valuma-alueen pinta-alaltaan laajimman maankäyttömuodon, metsien, tuottama huuhtouma on huomattavasti peltojen tuottamaa huuhtoumaa pienempi (Tattari ym. 2017). Kipsin levityksen myötä peltoala jakaantui kuitenkin kahteen ryhmään: kipsillä käsiteltyihin ja käsittelemättömiin peltoihin. Yksi tämän tutkimuksen kriittisimmän tuloksiin vaikuttavista vaiheista oli näiltä kahdelta peltoyypiltä tulevan kuormituksen erottaminen toisistaan. Tämä tehtiin niin, että käsittelyalueiden kipsillä käsittelemättömien peltojen huuhtouman oletettiin pysyvän prosentuaalisesti saman verran vertailualueen peltojen huuhtoumaa suurempana kuin ennen kipsin levitystä. Kun kipsillä käsittelemättömien peltojen huuhtouma saatiin näin arvioitua, kipsillä käsiteltyjen peltojen huuhtouma saatiin yhtälöllä 10.

Taulukko 5. Maankäyttömuotojen osuudet kohdealueella

Alue	Käsittelemätön pelto %	Kipsillä käsitelty pelto %	Metsä kivennäismaalla %	Rakennettu %	Muu %
Vertailualue	38,7	0	56,2	3,9	1,2
Ylempi käsittelyalue	26,8	23,2	42,2	7,6	0,2
Alempi käsittelyalue	19,2	22,3	52,1	4,7	1,6
Koko alue	24,4	18,4	50,7	5,2	1,2

$$L_d^G = (L_d - A^{NG}L_d^{NG} - A^M L_d^M - A^R L_d^R - A^O L_d^O) / A^G \quad (10)$$

jossa L_d^{NG} on huuhtouma käsittelemättömiltä pelloilta, A^{NG} käsittelemättömien peltojen pinta-alaosuus ja A^G kipsillä käsiteltyjen peltojen pinta-alaosuus. Esimerkiksi melko kuivalla jaksolla 3 (marras-joulukuu 2016) vertailualueen peltojen PP-huuhtouma oli $95 \text{ g km}^{-2} \text{ d}^{-1}$. PP-huuhtouma ylemmän käsittelyalueen pelloilta oli **1,31-kertaa** vertailualueen PP-huuhtouma ja alemman käsittelyalueen pelloilta **1,20-kertainen**. Kipsillä käsittelemättömien peltojen PP-huuhtouman oletettiin olevan ylemmällä käsittelyalueella $1,31 \times 95 \text{ g km}^{-2} \text{ d}^{-1} = 125 \text{ g km}^{-2} \text{ d}^{-1}$ ja alemmalla käsittelyalueella $1,20 \times 95 \text{ g km}^{-2} \text{ d}^{-1} = 113 \text{ g km}^{-2} \text{ d}^{-1}$. Tämän jälkeen ratkaistiin kipsipeltojen ominaiskuormitus (L_d^G) ottamalla huomioon metsien, rakennetun ja muun alan lisäksi myös käsittelemättömien peltojen huuhtouma seuraavasti.

Ylemmällä käsittelyalueella kipsillä käsiteltyjen peltojen osuus oli 0,232, käsittelemättömien peltojen 0,268, metsien 0,422, rakennetun alan 0,076 ja muun alan 0,002 (**taulukko 5**). Metsille arvioitu PP-huuhtouma jaksolla 3 oli $1,5 \text{ g km}^{-2} \text{ d}^{-1}$, rakennetulle alalle $7,1 \text{ g km}^{-2} \text{ d}^{-1}$ ja muulle alalle $0,4 \text{ g km}^{-2} \text{ d}^{-1}$. Siten PP-huuhtouma ylemmän alueen kipsipelloilta oli tällä jaksolla:

$$L_d^G = \frac{26,9 - 0,268 \times 125 - 0,422 \times 1,5 - 0,076 \times 7,1 - 0,002 \times 0,4}{0,232} = -33 \text{ g km}^{-2} \text{ d}^{-1} \quad (11)$$

Kun tulos suhteutetaan käsittelemättömien peltojen fosforihuuhtoumaan $125 \text{ g km}^{-2} \text{ d}^{-1}$ (ks. yllä), saadaan kipsin tuottamaksi PP-kuormituksen vähennykseksi $(125 - -33) \cdot 100 \% / 125 = 126 \%$ jaksolla 3 (yli 100 %:n vähennyksiä tarkastellaan myöhemmin). Koko tutkimusjakson vähennysprosentti saatiin kunkin jakson pituudella painotettuna keskiarvona.

Taulukko 6. Arvio kuormituksen jakautumisesta eri kuormituslähteisiin kipsinlevityksen jälkeen

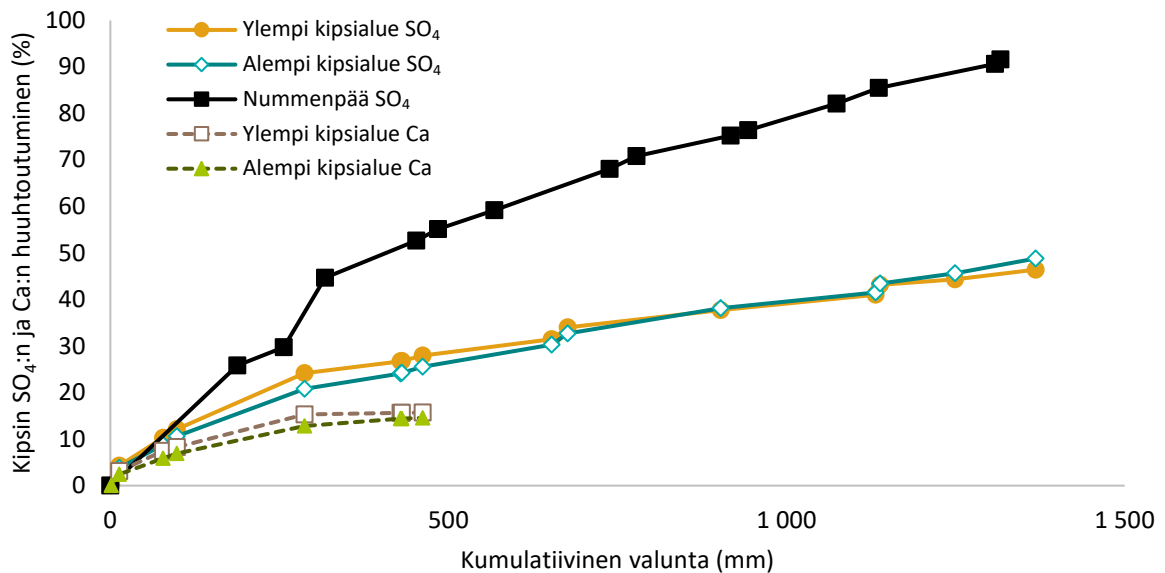
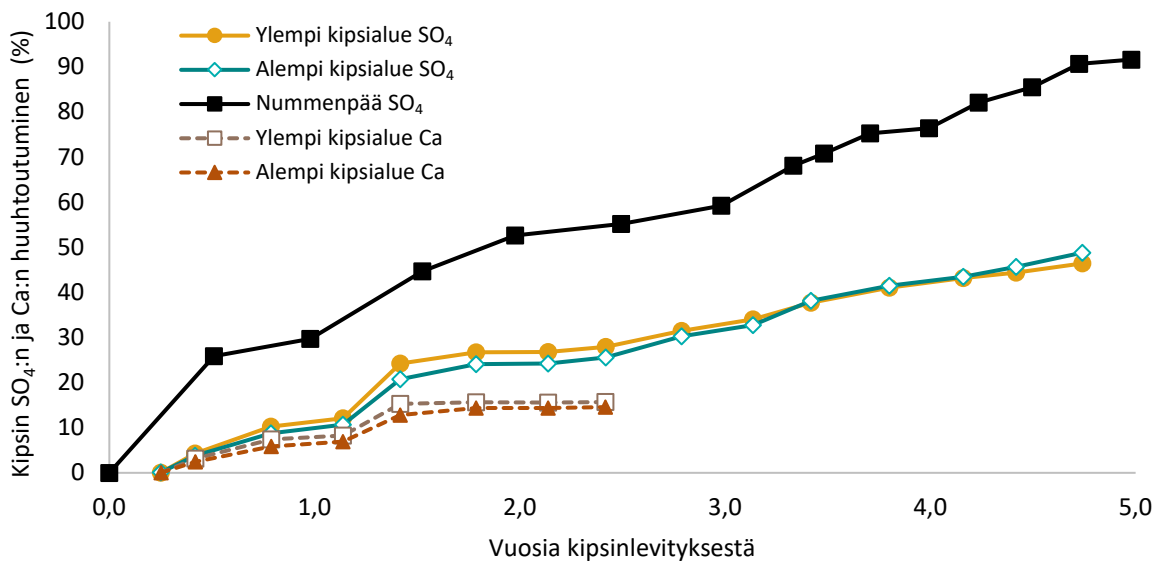
Muuttuja	Alue	Käsittelemättömät pellot %	Kipsillä käsitellyt pellot %	Metsät %	Rakennettu ala %	Muu %
PP	Vertailualue	98,3	0,0	1,4	0,3	0,0
	Ylempi käsittelyalue	60,5	37,8	0,9	0,8	0,0
	Alempi käsittelyalue	42,8	55,6	1,1	0,5	0,0
DRP	Vertailualue	95,8	0,0	3,5	0,7	0,1
	Ylempi käsittelyalue	54,7	41,4	2,1	1,8	0,0
	Alempi käsittelyalue	57,0	37,7	3,8	1,5	0,1
TSS	Vertailualue	96,2	0,0	3,4	0,4	0,0
	Ylempi käsittelyalue	97,6	-0,8	2,1	1,1	0,0
	Alempi käsittelyalue	58,8	37,9	2,6	0,7	0,0
DOC	Vertailualue	34,7	0,0	62,6	0,5	2,2
	Ylempi käsittelyalue	35,6	-9,1	71	1,9	0,6
	Alempi käsittelyalue	20,7	4,4	70,2	0,9	3,7
SO ₄	Vertailualue	65,2	0,0	28,8	5,5	0,6
	Ylempi käsittelyalue	18,2	68,4	8,9	4,4	0,0
	Alempi käsittelyalue	12,5	73,4	11,0	2,8	0,3

4.3 Kipsin huuhtoutuminen

Ennen kipsin levitystä, keväällä 2016, sulfaattia huuhtoutui vertailualueelta $7,7 \text{ kg km}^{-2} \text{ d}^{-1}$, ylemmältä käsittelyalueelta $11,4 \text{ kg km}^{-2} \text{ d}^{-1}$ ja alemmalta $11,1 \text{ kg km}^{-2} \text{ d}^{-1}$ (itsenäisiä alueita koskeva arvio). Käsittelyalueiden suuremmat huuhtoumat voivat kuvata meren läheisyyttä tai eroja peltojen rikkilannoituksessa. Ennen kipsin levitystä Savijoen kuljettamasta sulfaatista oli pelloilta peräisin vertailualueella 64 %, ylemmällä käsittelyalueella 77 % ja alemmalla 75 %. Kipsin sulfaatin huuhtoutumista arvioitaessa ei ennen kipsin levitystä vallinneita alueiden välisiä eroja otettu huomioon, sillä syksyltä, jolloin sulfaattipitoisuudet ovat yleensä suurimmillaan (Mattsson ym. 2017), ei ollut mittauksia ajalta ennen kipsin levitystä.

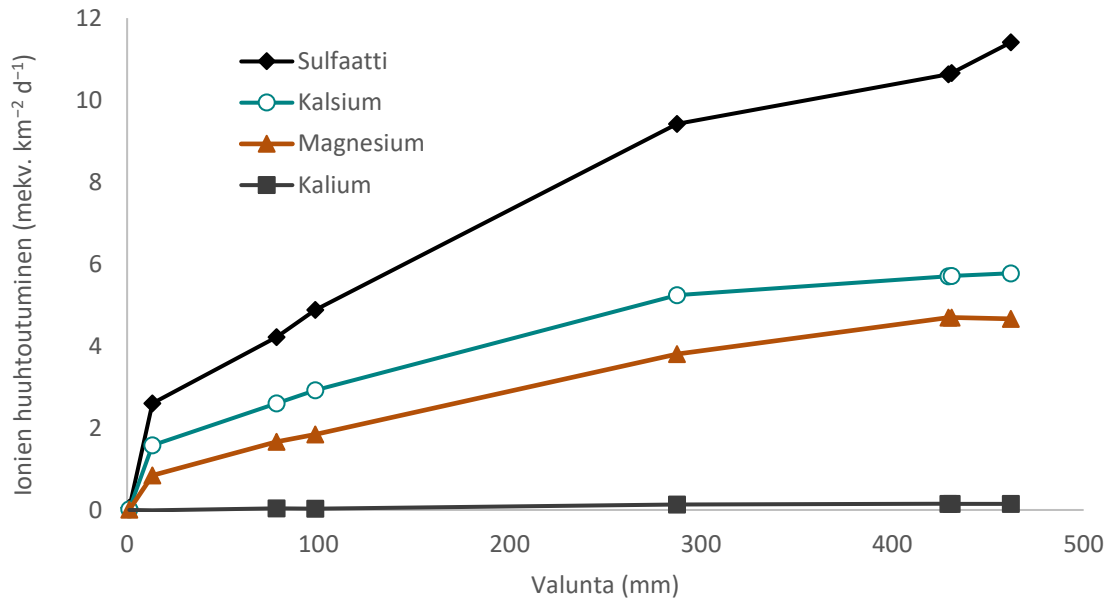
Tutkimusalueelle levitettiin syksyllä 2016 yhteensä 2,9 miljoonaa kiloa sulfaattia kipsissä. Huhtikuun 2021 loppuun mennessä, eli 4,7 vuoden päästä kipsin levityksestä, kipsin sulfaatista 1,4 miljoonaa kiloa eli 48 % oli huuhtoutunut Savijokeen (**kuva 8**). Toisin kuin monen muun aineen osalta erot sulfaatin huuhtoutumisessa käsittelyalueiden välillä olivat vähäisiä: ylemmällä käsittelyalueella huuhtoutunut osuus oli 46 % ja alemmalla 49 %. Sulfaatin huuhtoutuminen oli aluksi nopeaa ja hidastui sen jälkeen. Sama huuhtoutumisen hidastuminen havaittiin Nummenpäässä, jossa vastaavana aikana huuhtoutuneen sulfaatin määrä oli kuitenkin lähes kaksinkertainen Savijokeen verrattuna (**kuva 8**).

TraP-hankkeessa tehdyssä kenttä- ja laboratoriosadetusten yhdistelmässä sadetettiin maamonoliittejä 7, 19 ja 31 kuukauden päästä kipsikäsittelystä ja maanäytteiden läpi valuneen veden rikkipitoisuus mitattiin. Kipsiannokset olivat 3 ja 6 t ha^{-1} (Uusitalo ym. 2012). Interpoloimalla tuloksista levitysmäärää 4 t ha^{-1} vastaava pitoisuus, olettamalla vuotuiseksi valunnaksi 300 mm ja muuntamalla rikki sulfaatiksi, saadaan 31 kuukauden kumulatiivisen valunnan ja sulfaatin välille yhteys $y = 12006 x^{-0,816}$, jossa y on sulfaattipitoisuus (mg l^{-1}) ja x kumulatiivinen valunta. Yhtälö kuvasi yllättävän hyvin Savijoella havaittuja pitoisuuksia, vaikka kumulatiivinen valunta oli 1,7-kertainen (1 290 mm) verrattuna sadetuskokeen arvioituun valuntaan 775 mm.



Kuva 8. Jatkuvatomaisesti mitatun sähkönjohtavuuden perusteella arvioitu kipsin sulfaatin ja kalsiumin huuhtoutuminen ajan ja kumulatiivisen valunnan suhteen Savijoella ja Nummenpäässä. Nummenpäässä sulfaattipitoisuudet arvioitiin empiirisellä, eksponentiaalisella yhtälöllä; Nummenpäästä kalsiumhuuhtoutumaa ei mitattu.

Savijoella ei vuosina 2019–2021 seurattu kalsiumin eikä muiden kationien pitoisuuksia, joten näiden huuhtoutumista tarkastellaan vain vuosien 2016–2018, ts. ensimmäisen 2,4 vuoden havaintojen perusteella. Tänä aikana kipsin sulfaattista huuhtoutui 26–28 %, mutta kalsiumista vain 15–16 %. Kipsin kalsium vaikuttaa siis olevan vaikutukseltaan pitkäikäisempää kuin sulfaatti. Kipsi lisäsi voimakkaasti magnesiumin, mutta ei kaliumin huuhtoutumista (kuva 9). Syynä lienee kalsiumin aiheuttamat kationinvaihtoreaktiot (ks. luku 5). Savijoen ionikoostumusta käsitellään tarkemmin liitteessä 2.



Kuva 9. Sulfaatin, kalsiumin, magnesiumin ja kaliumin huuhtoutuminen kipsillä käsitellyiltä pelloilta (huuhtoutumista vähennetty käsittelemättömien peltojen huuhtouma). Ionien huuhtoutumismäärät on ilmaistu ekvivalentteina: Ca 20 g ekv⁻¹, Mg 12 g ekv⁻¹, K 39 g ekv⁻¹, SO₄²⁻ 48 g ekv⁻¹.

4.4 Hiukkasmainen fosfori ja kiintoaine

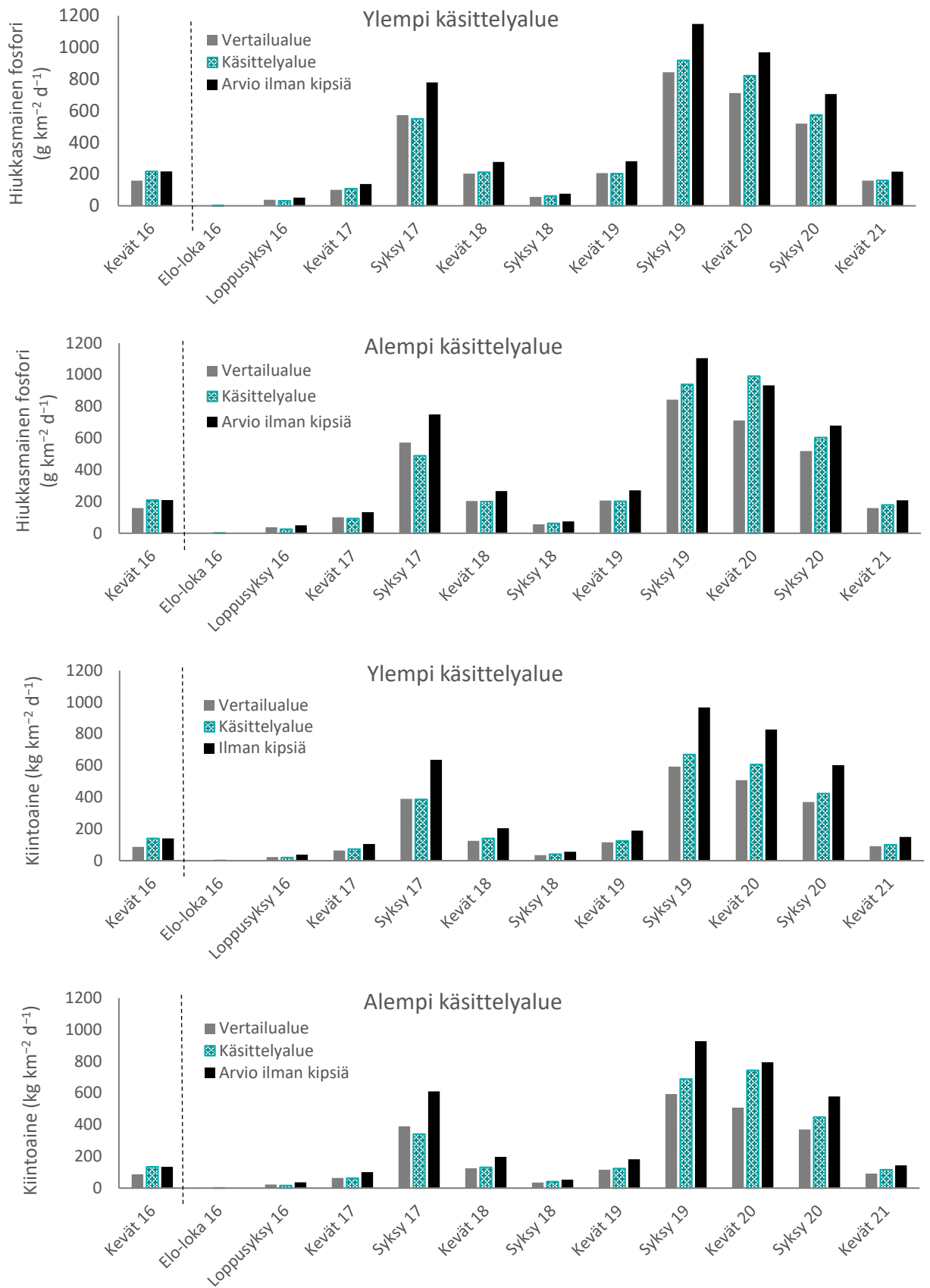
Muutos Savijoen PP- ja TSS-virtaamissa

Kuva 10 esittää syksy- ja kevätjaksojen PP-virtaamat vertailualueella sekä ylemmällä ja alemmalla käsittelyalueella niin, että käsittelyalueiden ainevirtaamista ei vielä ole vähennetty yläpuolisilta alueilta tulevaa kuormitusta. Ne siis kuvaavat Savijoen kolmella havaintopaikalla kulkeutuvaa kokonaisainemäärää; ylemmän käsittelyalueella kulkeutuvassa ainemäärässä on mukana vertailualueelta tuleva kuormitus ja alemman käsittelyalueen ainemäärässä sekä ylemmältä käsittelyalueelta että vertailualueelta tuleva kuormitus.

Ennen kipsinlevitystä, keväällä 2016, pinta-alayksikköä kohti laskettu PP-virtaama oli ylemmällä käsittelyalueella 36 % suurempi kuin vertailualueella. **Kuvassa 10** esitetään myös arvio siitä, mitä PP-virtaamat olisivat olleet ilman kipsiä. Tämä arvio saatiin olettamalla, että ylemmällä käsittelyalueella PP-virtaamat kipsin levityksen jälkeen olisivat olleet saman verran suurempia vertailualueeseen nähden kuin ne olivat ennen kipsin levitystä eli 1,36-kertaisia. Kipsin levityksen jälkeen ylemmän käsittelyalueen PP-virtaaman suhde vertailualueen PP-virtaamaan oli jokaisena jaksone pienempi kuin 1,36, mikä viittaa siis siihen, että kipsi vähensi PP-virtaamia kaikkina jaksoina.

Alemmalla käsittelyalueella PP-virtaama oli ennen kipsinlevitystä 31 % suurempi kuin vertailualueella. Kipsi vaikutti vähentäneen PP-virtaamia jokaisena jaksone myös alemmalla käsittelyalueella, paitsi keväällä 2020, jolloin PP-virtaama oli 39 % suurempi kuin vertailualueella, eli tällä jaksone PP-virtaama ylitti ennen kipsin levitystä vallinneen suhteen (1,31 vs. 1,39).

Ennen kipsinlevitystä TSS-virtaamat olivat ylemmällä käsittelyalueella 63 % ja alemmalla käsittelyalueella 56 % suurempia kuin vertailualueella. Kipsin jälkeen TSS-virtaamat olivat kummallakin käsittelyalueella pienempiä kuin vertailualueella ottaen huomioon ero tilanteeseen ennen kipsin levitystä. Toisin kuin PP-virtaamissa, kipsi vaikutti vähentävän TSS-virtaamia myös keväällä 2020.



Kuva 10. Hiukkasmaisen fosforin ja kiintoaineen ainevirtaamat vertailualueella sekä ylempällä ja alemmalla käsittelyalueella kevät- ja syysjaksoina (kesällä ainevirtaamat vähäisiä). Lisäksi kuvassa arvio ainevirtaamasta ilman kipsikäsittelyä. Katkoviiva osoittaa kipsin levityksen ajankohdan.

Osa-alueiden PP- ja TSS-huuhtoumien muutos

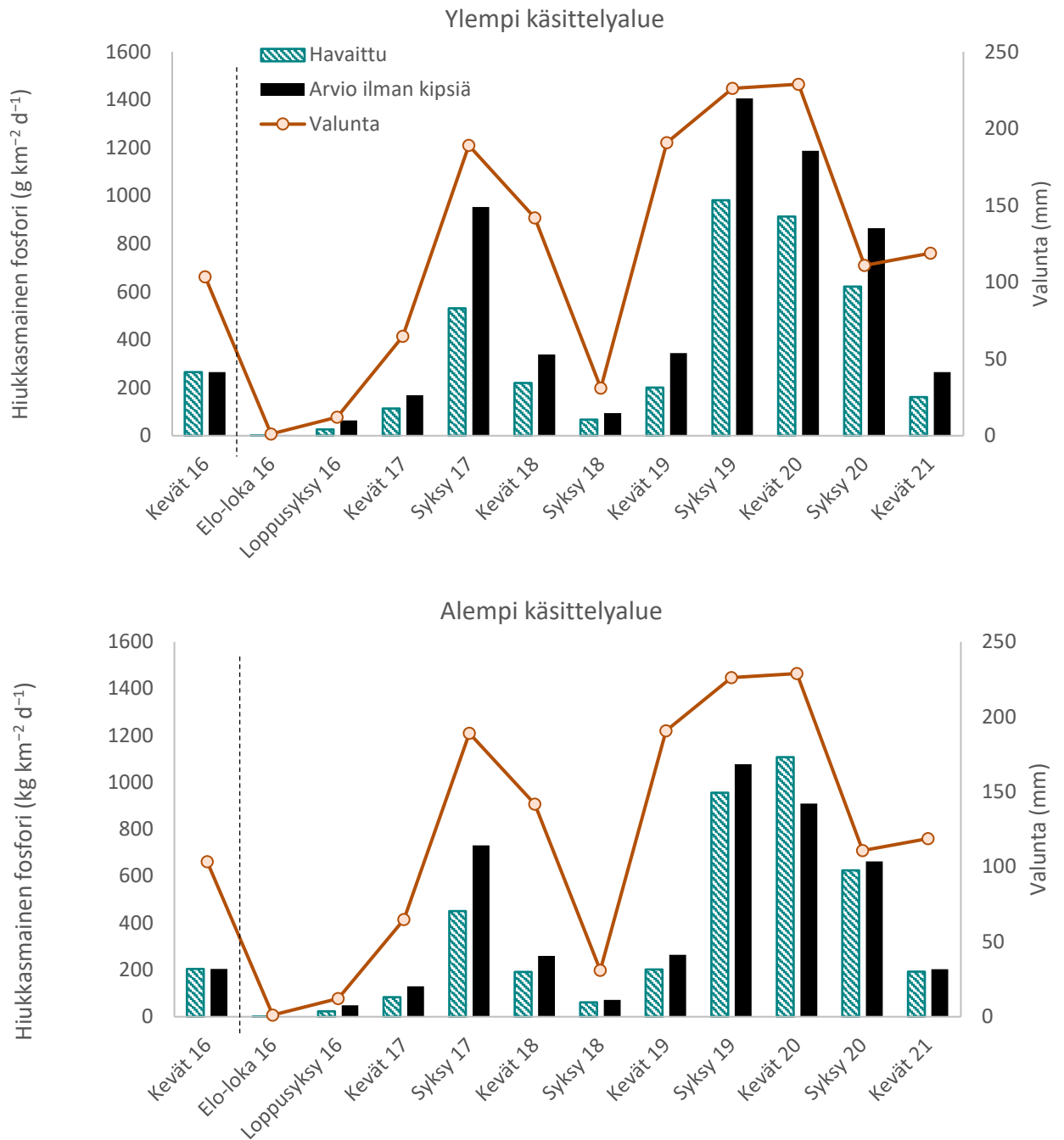
Seuraavaksi arvioidaan, miten suuri vähennys on tapahtunut ylemmän ja alemman käsittelyalueen huuhtoumissa, kun alueita tarkastellaan erillisinä, ts. ilman yläpuolisten alueiden vaikutusta. Itsenäisille alueille lasketut arvot toivat paremmin esille alueiden väliset erot huuhtoumissa. Keväällä 2016 PP-huuhtouma oli vertailualueella $159 \text{ g km}^{-2} \text{ d}^{-1}$, ylemmällä käsittelyalueella $266 \text{ g km}^{-2} \text{ d}^{-1}$ (67 % suurempi) ja alemmalla käsittelyalueella $204 \text{ g km}^{-2} \text{ d}^{-1}$ (28 % suurempi). TSS-huuhtoumien erot olivat vieläkin suuremmat: ylemmällä käsittelyalueella huuhtouma oli 116 % ja alemmalla 52 % suurempi kuin vertailualueella. Käsittelyalueen vertailualueetta suuremmat PP- ja TSS-huuhtoumat selittyvät osin suuremmalla peltojen osuudella: ylemmällä käsittelyalueella oli 29 % ja alemmalla käsittelyalueella 9 % enemmän peltoa kuin vertailualueella. Eroihin vaikuttavat myös peltojen ominaisuuksien erot: peltojen keskikaltevuus oli vertailualueella 0,8 %, ylemmällä käsittelyalueella 2,4 % ja alemmalla käsittelyalueella 1,6 % (**taulukko 2**). Peltojen kaltevuus lisää eroosiota ja PP-huuhtoumaa (Puustinen ym. 2010). Viljelyskasveissa ei ollut merkittäviä eroja alueiden välillä, lukuun ottamatta alemman käsittelyalueen suurempaa kevätiljojen ja pienempää syysviljojen osuutta.

Kuva 11 esittää huuhtoumat vertailualueella sekä ylemmällä ja alemmalla käsittelyalueella jaksoittain. Kipsin levityksen jälkeen PP-huuhtouma vaihteli jaksosta toiseen pitkälti valunnan mukaan. Valunta selitti jaksojen välisestä huuhtoumavaihtelusta vertailualueella 76 %, ylemmällä käsittelyalueella 72 % ja alemmalla käsittelyalueella 69 %.

Kuvassa 11 on myös arviot huuhtoumista ilman kipsikäsittelyä, jotka saatiin samalla periaatteella kuin **kuvassa 10**, siis olettamalla, että vertailualueen ja käsittelyalueiden väliset huuhtoumaerot olisivat pysyneet suhteellisesti samansuuruisina kuin jaksolla ennen kipsin levitystä, eli ylemmällä käsittelyalueella huuhtoumat olisivat olleet 1,67 kertaa ja alemmalla 1,28 kertaa suurempia kuin vertailualueella. Kipsikäsittelyn jälkeen PP-huuhtouma oli kummallakin käsittelyalueella kaikkina jaksoina pienempi kuin ilman kipsiä -arvio, lukuun ottamatta jälleen kevättä 2020, jolloin PP-huuhtouma alemmalla käsittelyalueella oli 18 % suurempi kuin ilman kipsiä. Keskimääräinen PP-huuhtouman vähennys koko kipsin levitystä seuranneena aikana (jaksot 2–16) oli ylemmällä käsittelyalueella 33 % ja alemmalla käsittelyalueella 10 %.

Kipsin vaikutusta kuormitukseen voi havainnollistaa seuraavasti. Vertailualueella kumulatiivinen PP-huuhtouma jaksoilla 2–16 oli 398 kg km^{-2} eli vertailualueen 15 km^2 :n pinta-alalta 5955 kg. Ylemmällä käsittelyalueella huuhtoutui vastaavasti 447 kg km^{-2} , mikä tarkoittaa $17,7 \text{ km}^2$ alalta 7915 kg. Jos ylemmälle käsittelyalueen pelloille ei olisi levitetty kipsiä, kuormitus olisi ollut $1,67 \times 398 \text{ kg km}^{-2} = 665 \text{ kg km}^{-2}$ eli 11 770 kg. Kipsi on siis vähentänyt PP-kuormitusta ylemmällä käsittelyalueella $(11\,770 - 7915) \text{ kg} \times 100 \% / 11\,770 \text{ kg} = 33 \%$ eli 3900 kg 4,7 vuoden aikana. Alemmalla käsittelyalueella vastaava vähennys on $(24\,792 - 22\,300) \text{ kg} \times 100 \% / 24\,792 \text{ kg} = 10 \%$ eli 2500 kg. Laskelma osoittaa, että vaikka alemmalla käsittelyalueella oli 2,6-kertaa enemmän kipsikäsiteltyjä pelloja kuin ylemmällä käsittelyalueella, absoluuttinen PP-huuhtoumien vähennys oli kuitenkin pienempi kuin ylemmällä käsittelyalueella.

Yhteensä 1494 hehtaarin kipsikäsittely vähensi kuormitusta 6400 kg eli $1,3 \text{ t y}^{-1}$. Vähentymä on vaatimaton koko Saaristomeren kuormitukseen verrattuna (480 t y^{-1}), mikä osoittaa, että vesien suojeleminen on sovellettava hyvin laajalla peltoalalla, jotta toivotut päästövähennykset saavutettaisiin.



Kuva 11. Hiukkasmaisen fosforin huuhtouma ylempällä ja alemmalla käsittelyalueella sekä arvio huuhtoumasta ilman kipsikäsitelyä. Katkoviiva kertoo kipsinlevityksen ajankohdan ja harmaa viiva jaksojen keskivaluman.

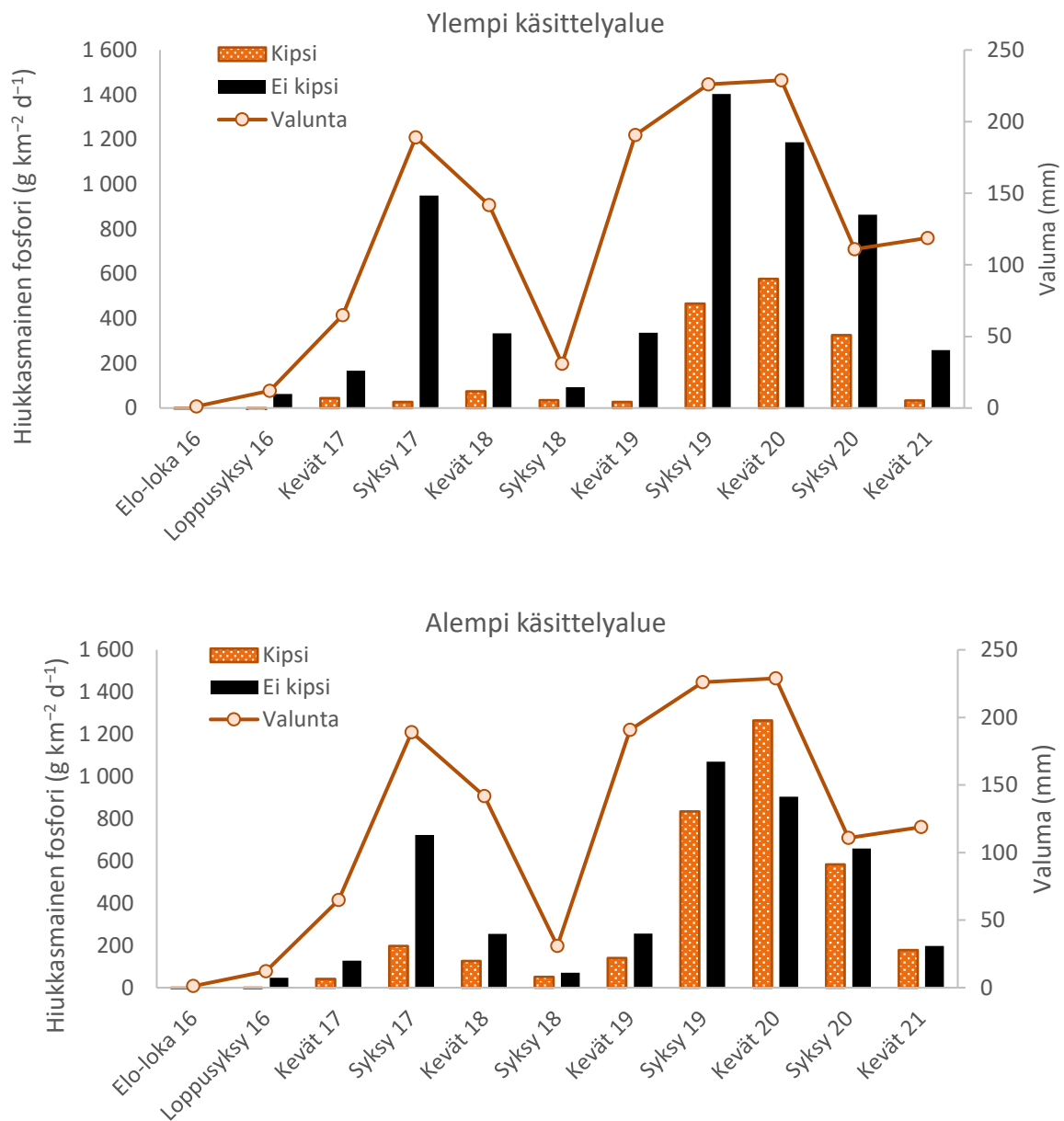
Peltojen PP-huuhtoumien muutos

Kuvassa 12 PP-huuhtoumaa tarkastellaan kipsillä käsiteltyjen ja käsittelemättömien pelloilta osalta. Kuten yllä on kuvattu, ylempään käsittelyalueen käsittelemättömien peltojen kuormitukset saatiin kertomalla vertailualueen peltojen kuormitukset 1,31:llä ja alemman käsittelyalueen 1,20:llä, mikä vastasi tilannetta keväällä 2016 ennen kipsin levitystä.

Kipsin arvioitu vaikutus pelloilta tulevaan PP-huuhtoumaan vaihteli jaksosta toiseen saman suuntaisesti ylempällä ja alemmalla käsittelyalueella, mutta ylempällä käsittelyalueella vaikutus oli voimakkaampi. Kun

ylemmän käsittelyalueen kipsipelloilta arvioitiin PP-huuhtouman olevan keskimäärin 72 % (4,7 vuotta, jaksottainen vaihteluväli 51–182 %) pienempi kuin käsittelemättömiltä pelloilta, alemmalla käsittelyalueella huuhtoutui keskimäärin vain 19 % vähemmän (jaksottainen vaihteluväli –40–186 %). Yli 100 prosentin reduktioita havaittiin kuivina kausina (kesät, alkusyksy 2016), ja ne voivat olla laskennasta johtuvia; kun huuhtoumat ovat vähäisiä, pienet absoluuttiset muutokset voivat tuottaa suuria prosentuaalisia muutoksia. Suurimman kipsin tuottaman vähennyksen (ylemmällä alueella 182 %, alemmalla 186 %) arvioitiin tapahtuneen kesällä 2020, jolloin valunnat ja huuhtoumat olivat vähäisiä. Koko alueella (ylempi + alempi käsittelyalue) kipsipelloilta huuhtoutui PP:a keskimäärin 34 % vähemmän kuin käsittelemättömiltä pelloilta.

Märkänä keväänä 2020 PP-huuhtoumat olivat seitsenkertaiset kuivaan kevääseen 2017 verrattuna (kuva 12). Keväällä 2020 ylempien käsittelyalueen kipsillä käsitellyiltä pelloilta arvioitiin huuhtoutuneen PP:a 51 % vähemmän kuin alueen käsittelemättömiltä pelloilta. Alemmalla käsittelyalueella kipsillä käsitellyiltä pelloilta huuhtoutui PP:a kuitenkin 40 % enemmän kuin alueen käsittelemättömiltä pelloilta.



Kuva 12. Kipsillä käsitellyille ja käsittelemättömille pelloille arvioitu hiukkasmaisen fosforin huuhtouma ja jaksojen keskivalunta.

Kun kesien epävarmat arviot jätettiin tarkastelusta, kipsin tuottama PP-huuhtouman vähentyminen pieniä tilastollisesti merkitsevästi kipsin levityksestä kuluneen ajan myötä. Ylemmällä käsittelyalueella kipsin levityksestä kulunut aika selitti 38 % PP:n vähennysprosentista, alemmalla käsittelyalueella 75 % ja koko alueella 71 % (**taulukko 7**). Regressioyhtälön mukaan kipsin vaikutus katoaisi ylemmällä alueella 9,1 vuodessa kipsin levityksestä, alemmalla 4,2 vuodessa ja koko alueella 5,0 vuodessa. Vähennysprosenttia selitti myös valunta: mitä suurempi valunta, sitä pienempi vähennys (**taulukko 7**). Vähennysprosentti oli myös käänteisessä suhteessa sulfaatin huuhtoutumiseen, mutta sulfaatin huuhtoutuminen kuvaa käytännössä samaa asiaa kuin aika kipsin levityksestä. Kun selittäjiksi otettiin sekä kipsin levityksestä kulunut aika että valunta, selitysasteet nousivat hieman ja kipsin vaikutusaika piteni hiukan.

Vuosikuormitukseksi muunnettuna peltojen PP-huuhtouma oli ennen kipsikäsitteilyä vertailualueella 145 kg km⁻² a⁻¹, ylemmällä käsittelyalueella 189 kg km⁻² a⁻¹ ja alemmalla käsittelyalueella 174 kg km⁻² a⁻¹. DRP-kuormitukset olivat ennen kipsikäsitteilyä vertailualueella 27 kg km⁻² a⁻¹, ylemmällä käsittelyalueella 29 kg km⁻² a⁻¹ ja alemmalla käsittelyalueella 21 kg km⁻² a⁻¹ ja TP-huuhtoumat vastaavasti 172, 218 ja 195 kg km⁻² a⁻¹ (DUP jätetty huomioimatta). Luvut ovat korkeita verrattuna yleisesti käytettyyn maatalouden ominaiskuormitusarvioon 110 g km⁻² a⁻¹ TP (Tattari ym. 2017).

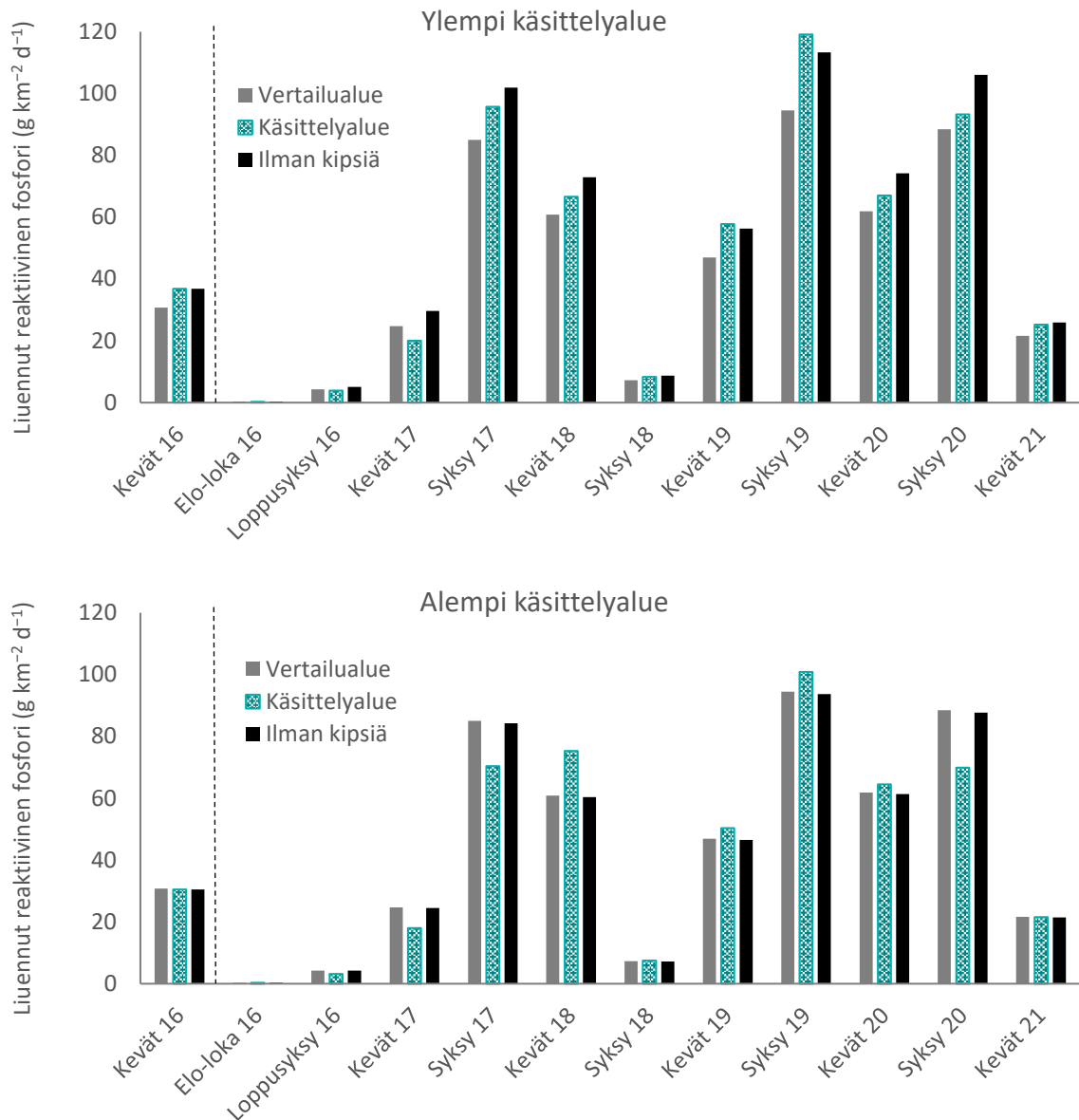
Taulukko 7. Kipsin tuottamien jaksottaisten vähennysten selittäminen regressiomalleilla jaksoiden valunnan ja ajan perusteella (n = 11, kesäjaksot poistettu). Vain tilastollisesti merkitsevät yhteydet on esitetty. * p < 0,05, ** p < 0,01, *** p < 0,001

Muuttuja	Alue	Vakio	Kulmakerroin			Selitysaste %
			Valunta	Vuosia kipsin-levityksestä	Sulfaatin huuhtoutuminen	
PP	Ylempi käsittelyalue	117***		-12,9*		38
		122***	-0,10	-10,0		36
		125***			-0,14***	51
	Alempi käsittelyalue	80,8***	-0,32*			31
		100***		-23,8***		75
		104***	-0,09	-21,1**		75
		106***			-2,58***	77
	Koko käsittelyalue	89,1***	-0,29*			32
		105***		-20,8***		71
		109***	-0,09	-18,0**		71
		111***			-2,29***	76
DRP	Ylempi käsittelyalue	82,3***	-0,36*			42
		83,2***		-18,4*		39
		95,0***	-0,24	-11,3*		50
		94,6***			-2,06**	52

4.5 Liuennut reaktiivinen fosfori

Savijoen DRP-virtaamien muutos

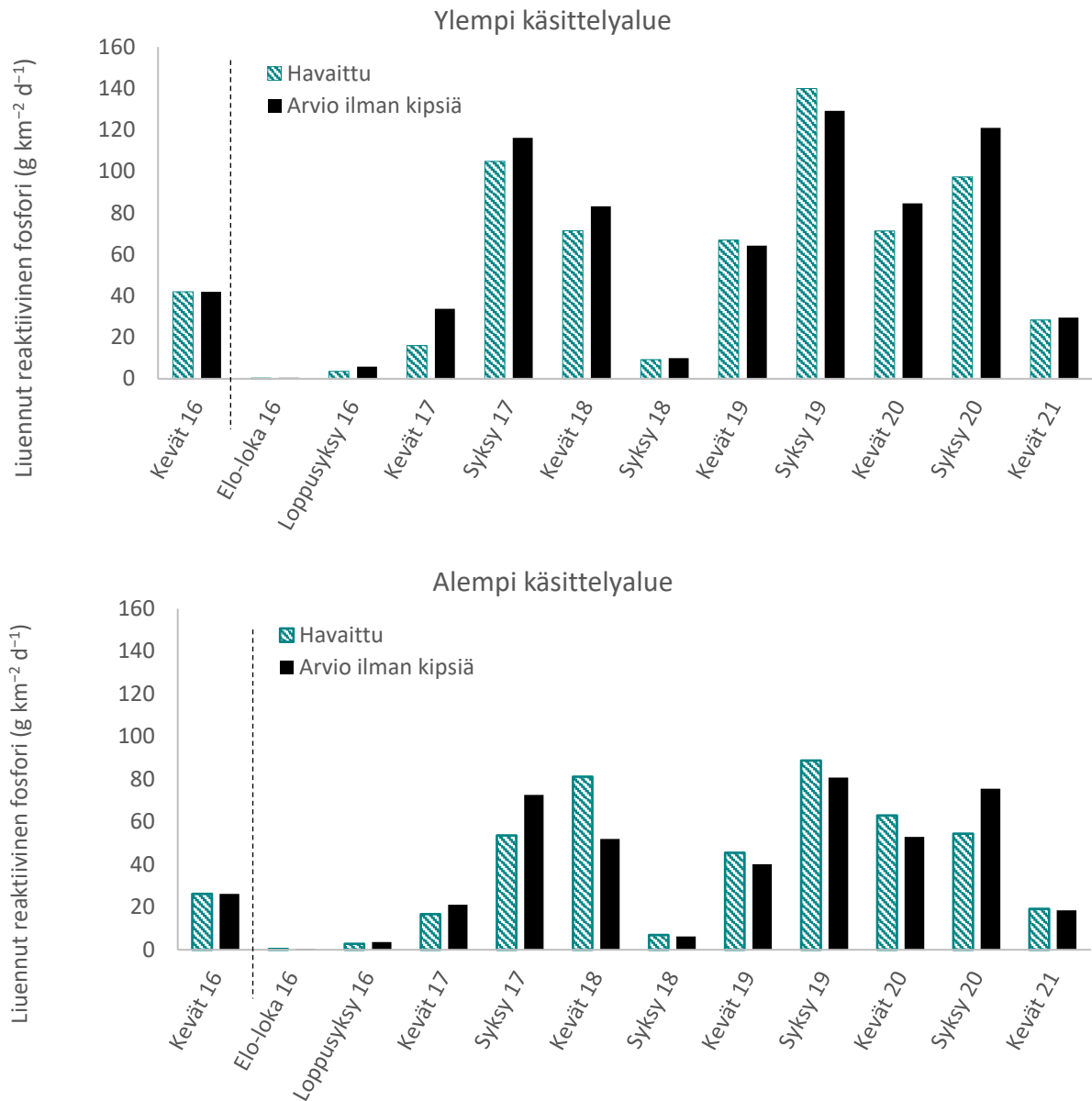
Ennen kipsinlevitystä, keväällä 2016, DRP-virtaama oli ylemmällä käsittelyalueella 20 % suurempi kuin vertailualueella. Kipsin levityksen jälkeen ylemmän käsittelyalueen DRP-virtaaman suhde vertailualueen DRP-virtaamaan oli pienempi kuin 1,20 muina jaksoina kuin keväällä ja syksyllä 2019, mikä viittaa siihen, että kipsi vähensi DRP-virtaamaa ylemmällä kipsialueella (**kuva 13**). Alemmalla käsittelyalueella DRP-virtaama oli ennen kipsinlevitystä yhden prosentin pienempi kuin vertailualueella. Kipsi vaikutti vähentäneen DRP-virtaamia alemmalla käsittelyalueella syksyyn 2017 asti, jonka jälkeen virtaamat olivat suurempia kuin vertailualueella syksyä 2020 lukuun ottamatta.



Kuva 13. Liuenneen reaktiivisen fosforin ainevirtaamat vertailualueella sekä ylempällä ja alemmalla käsittelyalueella kevät- ja syysjaksoina. Lisäksi kuvassa arvioainevirtaamista ilman kipsikäsittelyä. Katkoviiva osoittaa kipsin levityksen ajankohdan.

Osa-alueiden DRP-huhtoumien muutos

DRP-huhtouma oli ennen kipsin levitystä ylempällä käsittelyalueella suurempi ($42,0 \text{ g km}^{-2} \text{ d}^{-1}$) kuin vertailualueella ($30,7 \text{ g km}^{-2} \text{ d}^{-1}$), mutta alemmalla käsittelyalueella se oli vertailualueita pienempi ($26,3 \text{ g km}^{-2} \text{ d}^{-1}$). Kipsin levityksen jälkeen jakson keskivalunta selitti 79–81 % jaksottaisesta DRP-huhtoumasta (kuva 14). Kipsikäsittelyn jälkeen DRP:a huuhtoutui ylempällä käsittelyalueella keskimäärin 12 % vähemmän, mutta alemmalla 6 % enemmän.



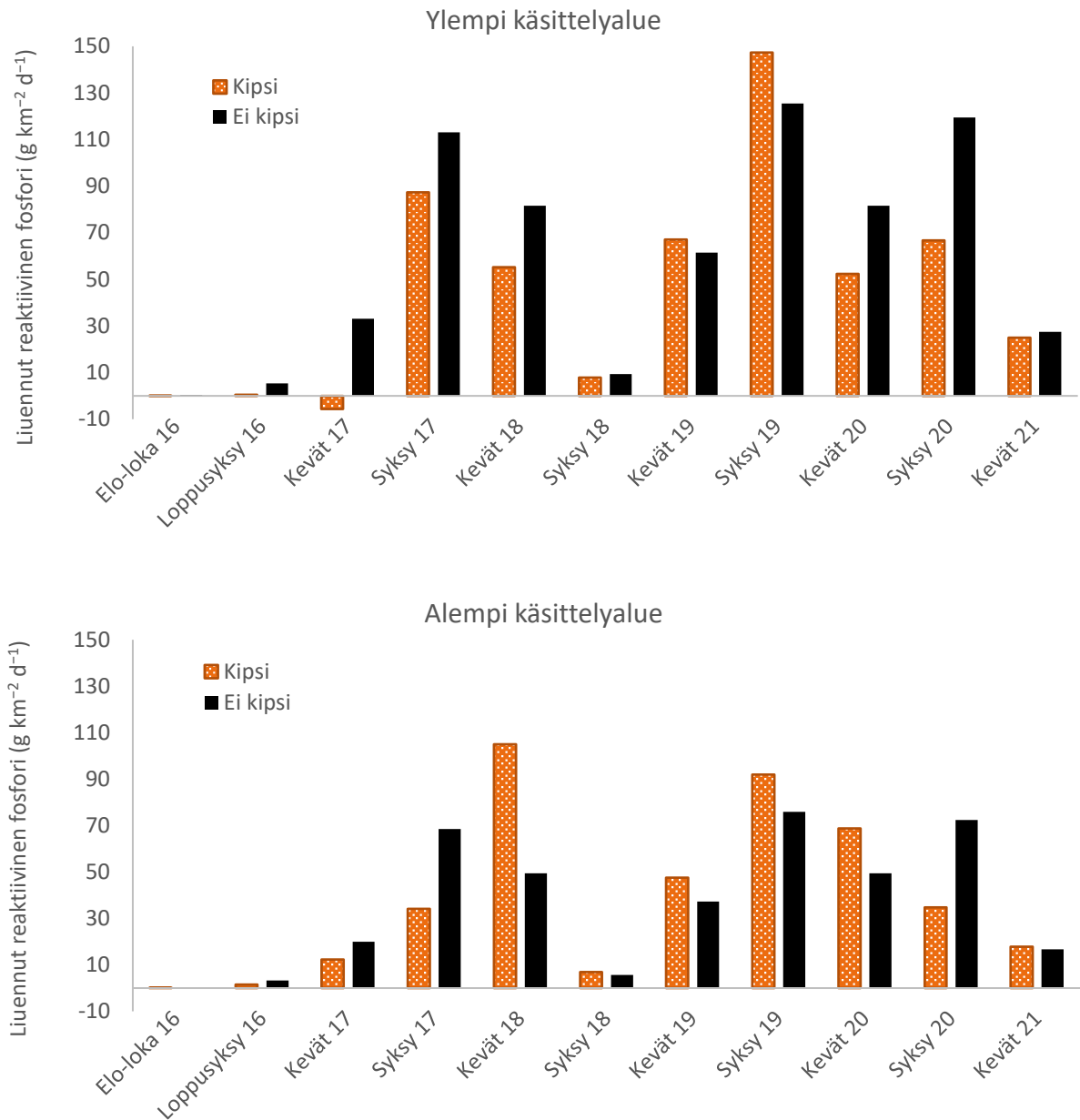
Kuva 14. Liuenneen reaktiivisen fosforin huuhtouma ylempällä ja alemmalla käsittelyalueella sekä arvio huuhtoumista ilman kipsikäsitelyä. Katkoviiva kertoo kipsinlevityksen ajankohdan.

Kipsipeltojen DRP-huuhtoumien muutos

Ennen kipsin levitystä DRP-huuhtouma oli vertailualueen pelloilla $13,5 \text{ g km}^{-2} \text{ d}^{-1}$, ylempään käsittelyalueen pelloilla $16,3 \text{ g km}^{-2} \text{ d}^{-1}$ ja alemman käsittelyalueen pelloilla $17,2 \text{ g km}^{-2} \text{ d}^{-1}$. Alueiden peltojen viljavuusanalysissä määritetyt keskimääräiset P-luvut eivät juuri poikenneet toisistaan. Karjanlannan mukana lisätyn fosforin määrä oli suurin alemmalla käsittelyalueella, mikä saattaa osaltaan vaikuttaa alueen runsaaseen huuhtoumaan.

DRP:n laskennalliset ilman kipsiä -peltokuuhtoumat alitettiin ylempällä käsittelyalueella kaikkina jaksoina paitsi keväällä ja syksyllä 2019 (kuva 15). Alemmalla käsittelyalueella DRP-huuhtoumat olivat vertailualueita pienempiä vuosina 2016 ja 2017 ja tämän jälkeen isompia lukuun ottamatta syksyä 2020. Koko jakson keskiarvona ylempällä käsittelyalueella DRP-huuhtouma kipsipelloilta oli 24 % pienempi kuin käsittelemättömiltä pelloilta, mutta alemmalla käsittelyalueella huuhtouma kipsipelloilla oli 13 % suurempi, ja koko alueella 3 % suurempi.

Ylemmällä käsittelyalueella kipsin levityksestä kulunut aika ja valunta selittivät reduktiota, mutta alemmalla käsittelyalueella ei havaittu tilastollisesti merkitseviä yhteyksiä (**taulukko 7**). Ylemmällä käsittelyalueella kipsin vaikutus DRP-huuhtoumaan hiipuisi regressioyhtälön mukaan 4,5 vuodessa. Savijoella, kuten muissakin valuma-alue tutkimuksissa, DRP-huuhtouman arviointi perustui vesinäytteisiin ja on siten epävarmempaa kuin PP-huuhtouman, jonka arvioinneissa käytettiin vesinäytteiden lisäksi myös jatkuvatoimisten vedenlaatumittarien aineistoa.

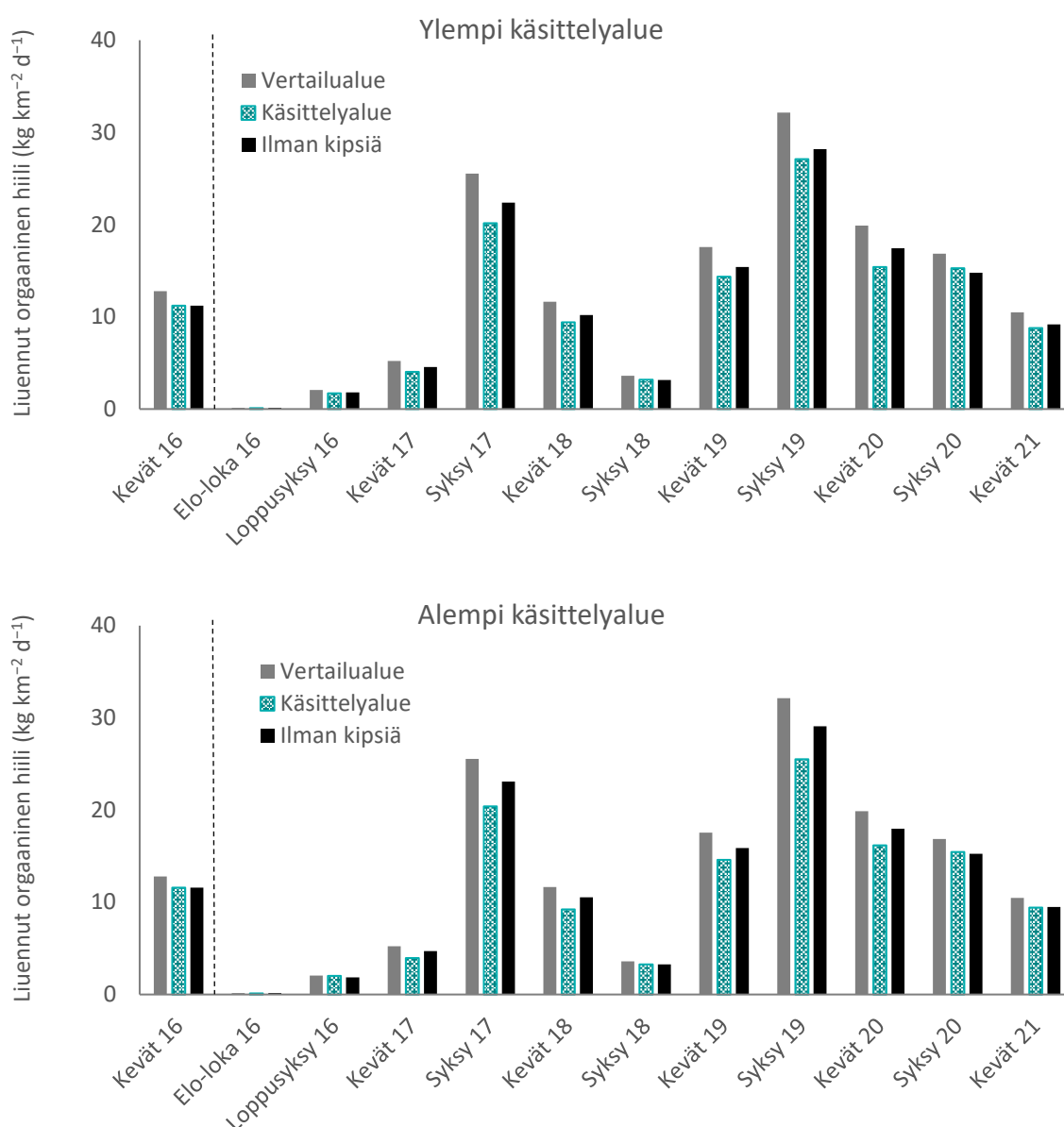


Kuva 15. Kipsillä käsitellyille ja käsittelemättömille pelloille arvioitu liuenneen reaktiivisen fosforin huuhtouma.

4.6 Liuennut orgaaninen hiili

Savijoen DOC-virtaamien muutos

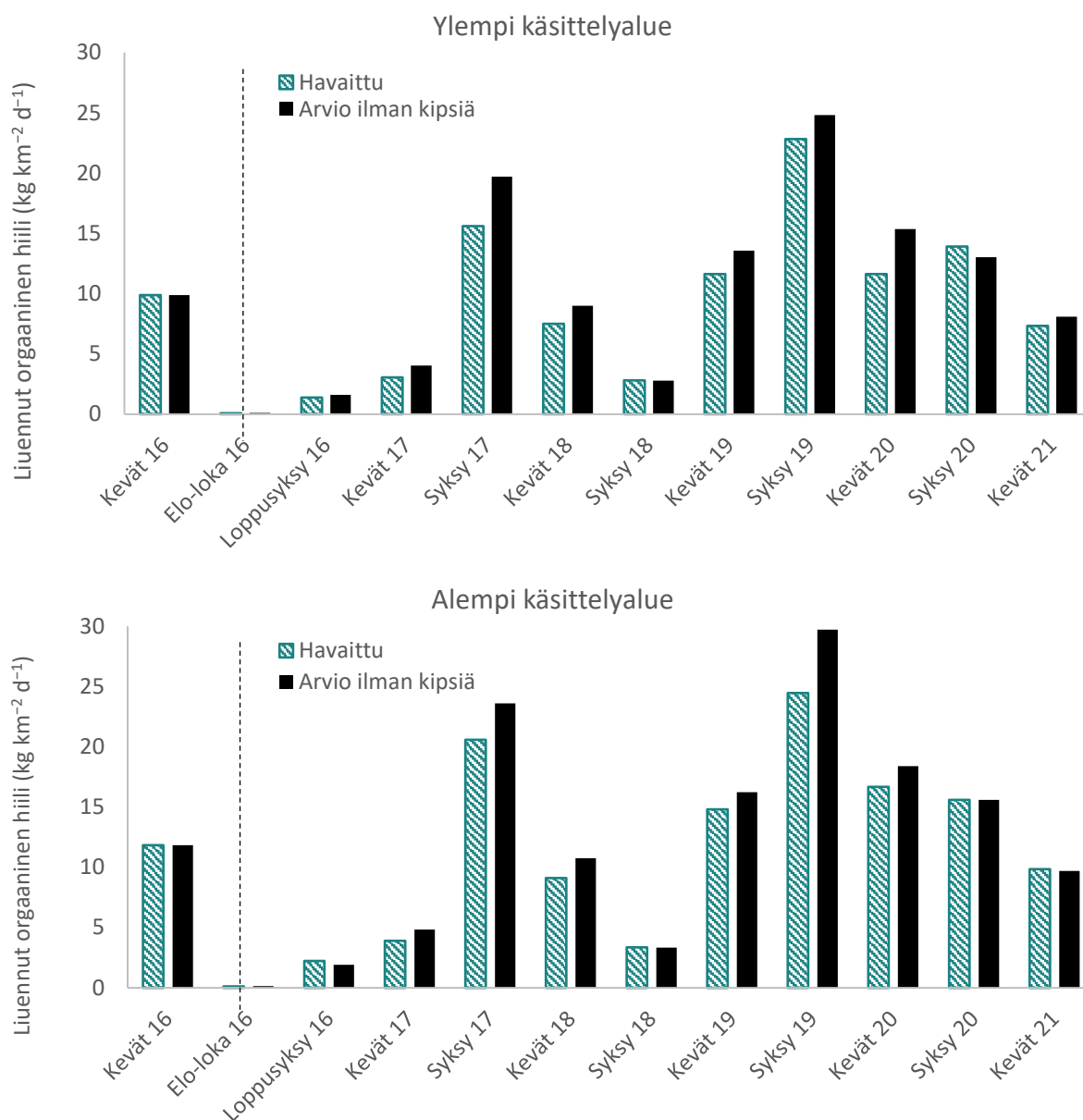
Ennen kipsinlevitystä, keväällä 2016, DOC-virtaama oli ylemmällä käsittelyalueella 12 % pienempi kuin vertailualueella. Kipsin levityksen jälkeen ylemmän käsittelyalueen DOC-virtaaman suhde vertailualueen DOC-virtaamaan oli useimpina jaksoina pienempi kuin 0,88, mikä viittaa siihen, että kipsi vähensi myös DOC-virtaamaa (**kuva 16**). Poikkeuksen muodostivat syksyt 2018 ja 2020, jolloin DOC-virtaamat olivat hieman isompia suhteessa vertailualueeseen kuin ennen kipsinlevitystä. Alemmalla käsittelyalueella DOC-virtaama oli ennen kipsinlevitystä 9 % pienempi kuin vertailualueella, ja syksyjä 2016, 2018 ja 2020 lukuun ottamatta kipsin levityksen jälkeen pienempiä kuin vertailualueen perusteella arvioitu ilman kipsiä -tilanne.



Kuva 16. Liuennut orgaanisen hiilen ainevirtaamat vertailualueella sekä ylemmällä ja alemmalla käsittelyalueella kevät- ja syksyjaksoina. Lisäksi kuvassa arvio ainevirtaamista ilman kipsiä. Katkoviiva osoittaa kipsin levityksen ajankohdan.

Osa-alueiden DOC-huuhtoumien muutos

Ennen kipsin levitystä DOC-huuhtouma oli sitä suurempi, mitä metsäisempi osa-alue oli: $12,8 \text{ kg km}^{-2} \text{ d}^{-1}$ vertailualueella (metsää kivennäismailla 56 %), $9,9 \text{ kg km}^{-2} \text{ d}^{-1}$ ylemmällä (metsää kivennäismailla 42 %) ja $11,8 \text{ kg km}^{-2} \text{ d}^{-1}$ alemmalla käsittelyalueella (metsää kivennäismailla 52 %). Kipsin levityksen jälkeen valunta selitti 82–89 % jaksojen välisestä DOC-huuhtouman vaihtelusta. Kipsin arvioitiin vähentävän DOC-huuhtoumaa koko tutkimusjakson aikana 41 % ylemmällä käsittelyalueella ja 10 % alemmalla käsittelyalueella. Lukuun ottamatta syksyjä 2018 ja 2020 sekä kesää 2019 DOC-huuhtoumat olivatkin ylemmällä käsittelyalueella pienempiä kuin laskennallinen ilman kipsiä -arvio (**kuva 17**). Alemmalla käsittelyalueella huuhtoumat olivat laskennallista pienempiä muulloin paitsi loppusyksyllä 2016, syksyllä 2018, kesinä 2019 ja 2020 sekä keväällä 2021. Keväällä 2020, jolloin kipsipelloilta arvioitiin huuhtoutuneen enemmän PP:a kuin käsittelemättömiltä pelloilta, DOC-huuhtouma oli kuitenkin alueen kipsipelloilta pienempää kuin käsittelemättömiltä pelloilta.

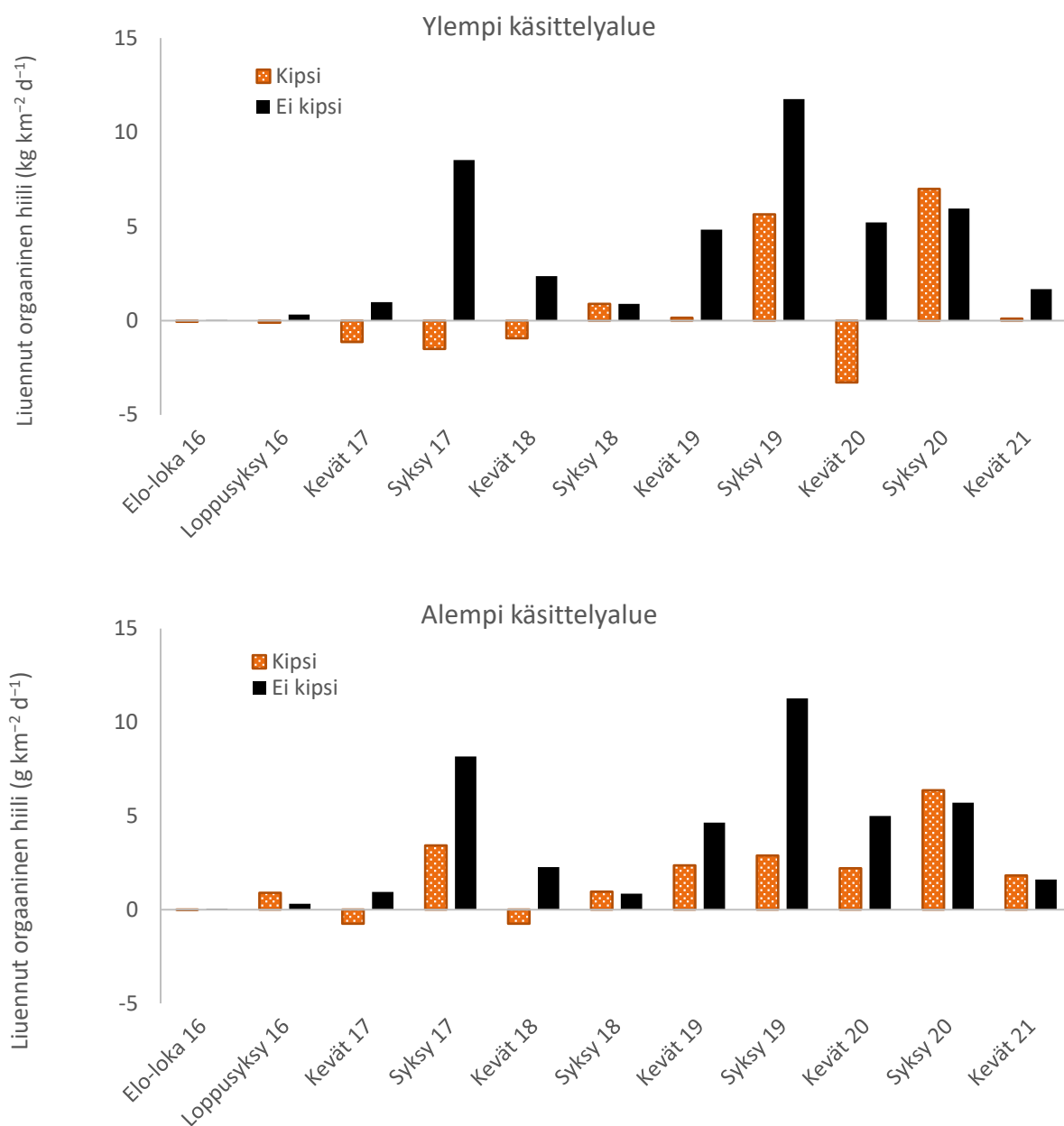


Kuva 17. Liuenneen orgaanisen hiilen huuhtouma ylemmällä ja alemmalla käsittelyalueella sekä arvio huuhtoumasta ilman kipsikäsitelyä. Katkoviiva kertoo kipsinlevityksen ajankohdan.

Kipsipeltojen DOC-huuhtoumien muutos

Pelloille allokoituna vähennysprosentit olivat ylempällä käsittelyalueella 88 %, alemmalla käsittelyalueella 54 % ja koko alueella 64 %. Arvio on kuitenkin hyvin epävarma johtuen ongelmista kuormituksen jakamisesta lähteisiin. Tähän viittaa myös se, että usealle jaksolle määritetyt huuhtoumat olivat negatiivisia. (**kuva 18**). Toki on mahdollista, että kipsi on saostanut käsittelemättömiltä pelloilta tulevaa DOC:a uomissa samoin kuin on mahdollisesti tapahtunut PP:n osalta. Kipsin tuottama DOC-huuhtouman vähennysprosentti ei korreloinut ajan, valunnan eikä sulfaatin huuhtoutumisen kanssa.

Savijoella DOC:n ja orgaanisen typen pitoisuudet korreloivat keskenään ($r^2 = 0,26$). Siten on oletettavaa, että kipsi vähensi myös orgaanisen typen huuhtoutumista vesiin, kuten Uusitalo ym. (2012) havaitsivat sadetuskokeissaan.



Kuva 18. Kipsillä käsitellyille ja käsittelemättömille pelloille arvioitu liuenneen orgaanisen hiilen huuhtouma.

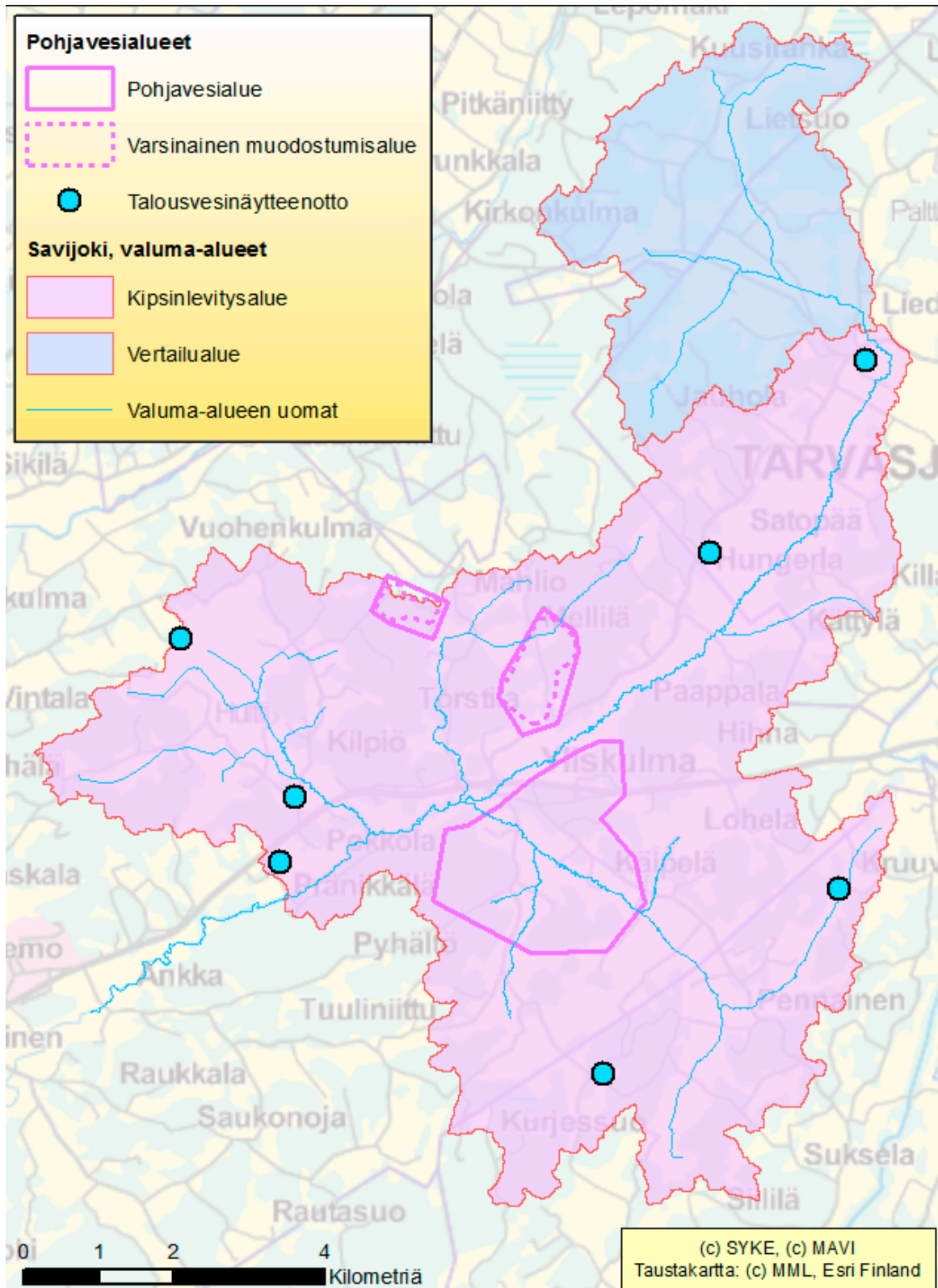
5 Kipsinlevityksen vaikutus pohjavesiin

Koska sulfaatti ei juuri pidäy maahiukkasten pinnalle, se on erityisen huuhtoutumisaltis. Kaikki pintamaassa liukenevan kipsin ainesosat eivät välttämättä poistu pintavaluntana tai päädy salaojavesiin vaan saattavat kulkeutua syvempiin maakerroksiin ja karkeilla mailla ehkä pohjaveteen. Kesän kuivana kautena pohjaveden pinta laskee paljon salaojatasoa syvemmälle, ja syyssateiden vesi täyttää tämän huokostilan ja tuo mukanaan pintamaassa olleita kipsin ainesosia. Tosin savimailla pohjamaan vedenjohtavuus on usein niin pieni, ettei tämä kulkeutumisreitti luultavasti ole määrällisesti kovin merkittävä.

Seitsemästä alueen rengaskaivosta otettiin vesinäytteitä vuosina 2016–2019 (**kuva 19**). Näytteet otti Luode Consultingin sertifioitu näytteenottaja ja ne lähetettiin analysoitaviksi SYKE:n Oulun laboratorioon, jonne näytteet saapuivat yleensä näytteenottoa seuraavana päivänä. Ajankohtaa ”ennen kipsiä” edustivat 3.8.2016 otetut näytteet, jolloin vain muutama lohko oli käsitelty kipsillä. Seuraava näyte otettiin 26.10.2016, jolloin lähes kaikki kipsi oli jo levitetty. Sen jälkeen näytteitä otettiin kolme kertaa keväällä lumien sulettua (3.5.2017, 15.5.2018, 17.6.2019) ja kolme kertaa syyssateiden aikaan (14.11.2017, 21.11.2018, 4.12.2019). Näytteistä määritettiin pH, sähkönjohtavuus ja sameus sekä sulfaatin, kokonaisrikin, kalsiumin, fluoridin, raudan, mangaanin, nitraatin, fosforin, hapen, DOC:n ja TOC:n pitoisuudet.

Vain yhdessä seitsemästä tutkitusta kaivosta havaittiin kipsin vaikutusta. Tässä kaivossa sulfaatin ja kalsiumin pitoisuudet olivat selvästi kohonneet kevästä 2017 alkaen. Korkeimmillaan pitoisuudet olivat marraskuussa 2017 ($103 \text{ mg l}^{-1} \text{ SO}_4$, $58 \text{ mg l}^{-1} \text{ Ca}$). Tällöinkään sulfaattipitoisuus ei noussut lähelle huonon kaivoveden raja-arvoa (150 mg l^{-1}). Syksy 2017 oli hyvin sateinen, ja on todennäköistä, että kaivoon on päätyntä pintavesiä. Tähän viittaa se, että myös nitraattipitoisuus oli noussut – jopa niin korkeaksi, että vettä ei saisi käyttää juomavetenä.

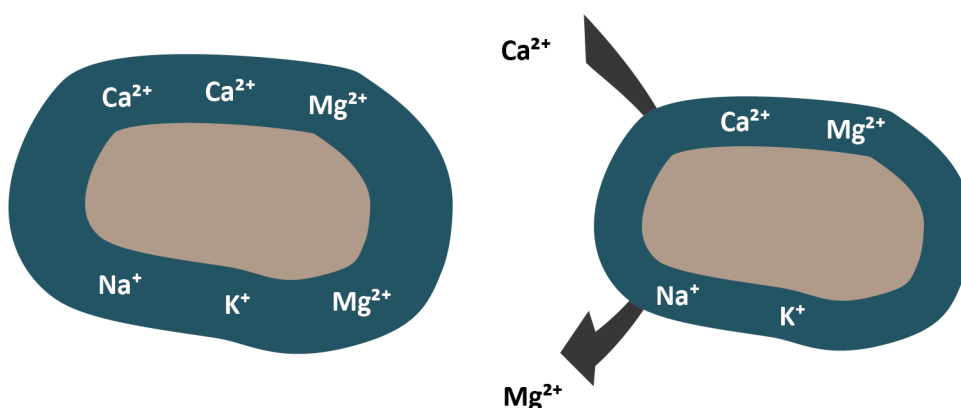
Vaikka yksikään kaivoista ei sijainnut Savijoen valuma-alueen kolmella pohjavesialueella, tulokset voitaneen yleistää myös näitä alueita koskeviksi. Kipsin kulkeutuminen pohjavesiin savikkoalueilla vaikuttaa epätodennäköiseltä. Tulosten perusteella ei kuitenkaan voida ottaa kantaa karkeammilla maalajeilla toteutettavan kipsinlevityksen mahdollisiin pohjavesivaikutuksiin. Mikäli kipsiä levitetään pellolle, jolla sijaitsevaa kaivoa käytetään juomavetenä, tulee kaivon ympärille jättää käsittelemätön suojavyöhyke. Kaivovesituloksia on tarkemmin kuvattu SAVE-hankkeen nettisivuilla (Ekholm 2020).



Kuva 19. Seurannassa olleiden seitsemän kaivon ja alueen kolmen pohjavesialueiden sijainnit.

6 Kipsin vaikutukset peltomaahan ja viljelykasveihin

Kipsiä käytetään rikki- ja kalsiumlannoitteena, mutta lannoitekäytössä levitysmäärät ovat jonkin verran pienempiä kuin vesiensuojelukäytössä (Sipilä ym. 2013). Kipsi on myös maanparannusaine, sillä kipsin kalsium voi parantaa hienojakoisen maan rakennetta muodostamalla maahiukkasten välille kalsiumsiltoja ja sitä kautta mikromuruja. Kipsiä on käytetty maan rakenteen parantajana erityisesti kuivilla ilmastoalueilla esiintyvillä suolamailla, kun maassa on liikaa maan mururakennetta heikentäviä kationeja, kuten magnesiumia tai varsinkin natriumia. Tällaisessa tapauksessa kipsin teho perustuu kationinvaihtoon, jossa kalsium syrjäyttää maahiukkasten pinnoilta muita kationeja maanesteeseen (kuva 20). Kipsin käyttö lisää muiden kationien huuhtoutumista ja voi periaatteessa aiheuttaa magnesiumin ja kaliumin puutosta, mikäli näitä on maassa vähän (Mattila ym. 2019). Riski on mahdollinen karkeilla kivennäismailla, jotka eivät tosin ole ensisijainen kohde kipsin vesiensuojelukäytössä.



Kuva 20. Kalsium syrjäyttää maahiukkasen kationinvaihtopaikoilta muun muassa magnesiumia. Maanesteen ionivahvuuden kasvu puristaa ns. sähköistä kaksoiskerrosta.

Kipsin mukana maahan tulevan kalsiumin vaikutusta muiden kationien huuhtoutumiseen voidaan tarkastella eri kationien sitoutumistaipumuksen pohjalta. Magnesium on kalsiumin jälkeen maassa yleisimmin esiintyvä vaihtuva kationi, ja magnesiumia pidetään melko helposti liikkuvana. Magnesium sitoutuu samoille kationinvaihtopaikoille kuin kalsium, mutta löyhemmin (Gransee ja Führs 2013). Tästä syystä maahan lisätty kalsium pystyy syrjäyttämään magnesiumia pidätyspaikoilta, ja magnesium altistuu huuhtoutumiselle. Kaliumin osuus suomalaisten kivennäismaiden vaihtuvista kationeista on sen sijaan vain 2–3 % (Räty ym. 2021). Lisäksi kasveille käyttökelpoisesta kaliumista suurin osa on kivennäismailla sitoutunut mineraalien kerrosväleihin vaikeasti vaihtuvaan muotoon (Kaila 1967, Kaila ja Ryti 1968), eikä kalsium kykene syrjäyttämään kaliumia tällaisilta paikoilta. Kenttäkokein on osoitettu, että tällaisen ”reservikaliumin” määrä kuvaa kasvien kaliumin saantia ja kaliumlannoitustarvetta paljon paremmin kuin viljavuustutkimuksessa määritettävä vaihtuva kalium (Virkejärvi ym. 2012). Reservikaliumin määrä maassa kasvaa savespitoisuuden kasvaessa (Kaila ja Ryti 1968). Vaikka kipsin kalsium pystyy syrjäyttämään kationinvaihtopaikoilla olevia harvalukuisia kaliumioneja, sillä ei siis ole sanottavaa vaikutusta kasveille käyttökelpoisen kaliumin varastoon ainakaan savi- tai hiuemailla.

6.1 Maanäytteet

Savijoelta otettiin pintamaanäytteitä (0–20 cm) ennen kipsin levitystä (elokuu 2016) sekä ensimmäisenä (toukokuu 2017), toisena (toukokuu 2018) ja neljäntenä keväänä (huhtikuu 2020) kipsin levityksen jälkeen. Näytteet otettiin 28 GPS-määritetyiltä havaintopaikalta kahtena rinnakkaisena niin, että ne

edustivat kipsillä käsiteltyjä (11) ja vertailulohkoja (17) savimailla ja karkeilla kivennäismailla (**kuva 21**). Kolmelta kipsi- ja kahdelta vertailulohkolta näytteitä otettiin myös kerroksista 20–40 cm ja 40–60 cm, jotta voitiin arvioida kipsin kulkeutumista syvemmälle maassa. Näytteet otti ProAgria ja analysoi Eurofins (viljavuusanalyysi + hehkutushäviö). Viljavuusanalyysissä helppoliukoisten ravinteiden pitoisuudet määritetään happamalla ammoniumasetaattiuutolla. Viljavuusanalyysiin kuului myös maalajin ja multavuuden määrittäminen aistinvaraisesti, pH(H₂O) ja maan helppoliukoisten suolojen pitoisuutta kuvaavan johtoluvun määrittäminen. Lisäksi Luke määrittänyt näytteistä vesiuuttoisen fosforin pitoisuuden (uuttosuhde 60:1), joka kuvaa viljavuusanalyysin fosforianalyysistä herkemmin liuenneen fosforin huuhtoutumisriskiä (Yli-Halla ym. 1995, Yli-Halla ja Hartikainen 1996). Tilastollisessa mallinnuksessa maaperää kuvaavien muuttujien (logaritimuunnos pH:ta lukuun ottamatta) selittäjinä olivat kipsikäsitely (kyllä/ei) ja vuosi (2016, 2017, 2018, 2020) sekä näiden yhteisvaikutus.

Muokkauskerroksen näytteistä 20 (69 %) edusti savimaita ja 9 (31 %) karkeita kivennäismaita. Valtaosa (17) savimaista oli hiuesavia (HeS), ja useimmat (8) karkeista kivennäismaista olivat hietamoreenia (HtMr). Maalajijakauma on alueelle tyypillinen. Liedon ja Tarvasjoen vuosien 2016–2020 viljavuusnäytteistä on 77 % ollut savimaita, joista nimenomaan hiuesavet (60 % kaikista näytteistä) ovat olleet yleisimpiä. Alueen peltojen muokkauskerroksessa ei esiinny aitosavia käytännössä lainkaan, ei myöskään hiesuja eikä eloperäisiä maita; näitä ei ollut Savijoen pilottialueen näytteissäkään.

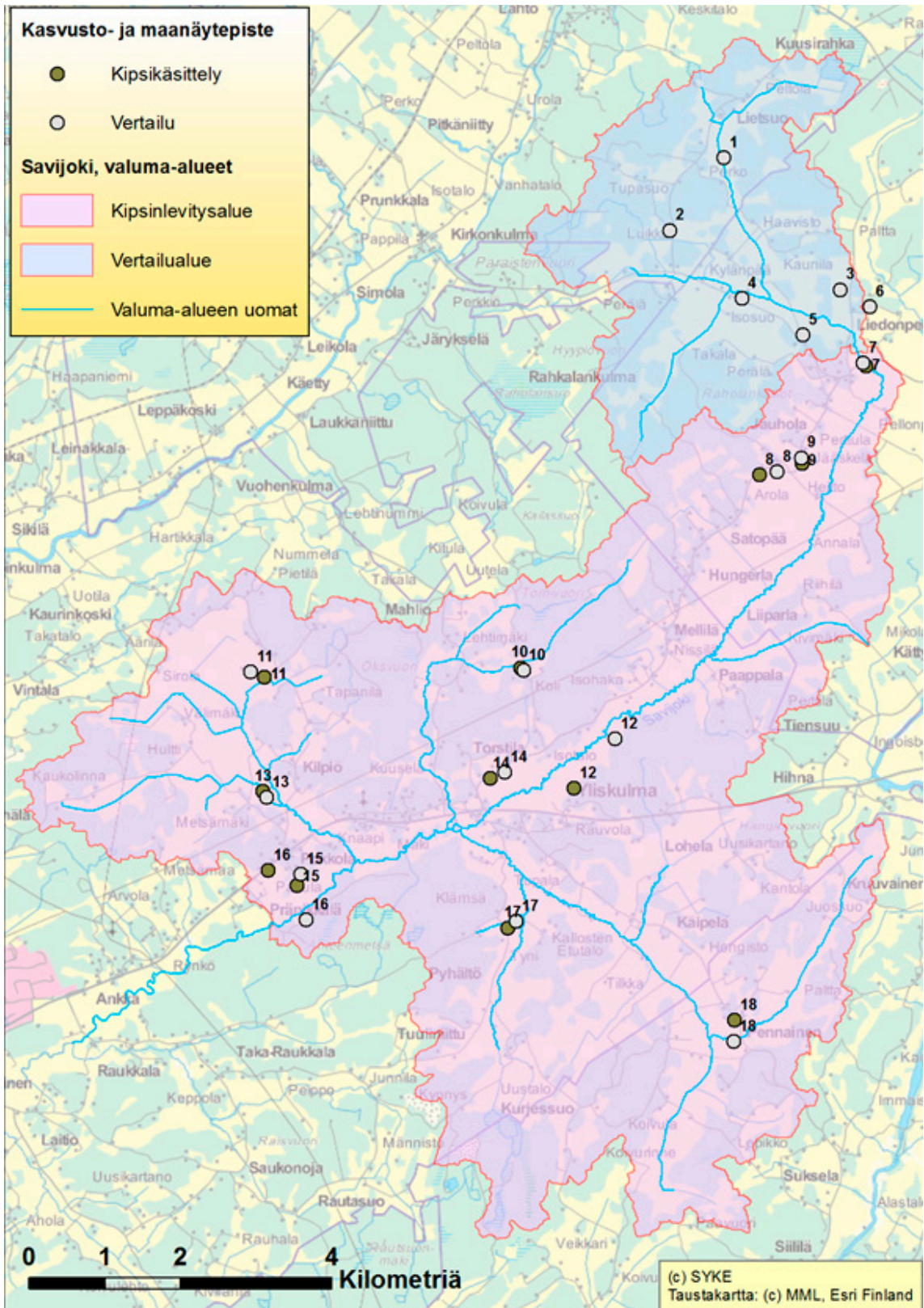
Näytteistä valtaosa (71 %) kuului multavuusluokkaan ”runsasmultainen”, jossa orgaanisen aineksen pitoisuus on 6,0–11,9 %. Tämä vastaa Liedon ja Tarvasjoen pelloista vuosina 2016–2020 tehtyjen viljavuustutkimusten tuloksia, joiden mukaan tähän multavuusluokkaan kuului 82 % tutkituista näytteistä. Tilastotietojen mukaan 16 % alueen pelloista kuului multavuusluokkaan ”multava” (orgaanisen aineksen pitoisuus 3–5,9 %) ja 2 % luokkaan ”erittäin runsasmultainen” (12–19,9 %). Tämän tutkimuksen näytteet olivat siis multavuudenkin osalta edustava otos alueen pelloista.

Pintamaa

Kipsi liukenee maassa nopeammin kuin maatalouskalkki (kalsiumkarbonaatti). Kipsin liukoisuus veteen on 3,15 g l⁻¹ ja kalsiumkarbonaatin vain 0,013 g l⁻¹ (Appelo ja Postma 2005). Kipsin liukeneminen kahdenarvoiseksi kalsium- ja sulfaatti-ioneiksi nostaa voimakkaasti maan ionivahvuutta (suolapitoisuutta). Liukeneminen on tosin hitaampaa, jos kipsi on päässyt varastoinnin aikana kuorettumaan, jolloin maassa on havaittu kipsikokkareita vielä vuoden päästä levityksestä (Alestalo 2011, Yli-Renko ja Rasa 2011).

Kipsin liukeneminen nostaa viljavuusanalyysin johtolukua (Alestalo 2011, Yli-Renko ja Rasa 2011, Ekholm ym. 2012, Mattila ym. 2019). Savijoen kipsilohkoilla pintamaan johtoluku oli ennen kipsin levitystä keskimäärin 0,9 (vaihteluväli 0,5–1,6) ja vertailulohkoilla 0,8 (0,3–2,2, **taulukko 8**). Ensimmäisenä kipsin levityksen jälkeisenä keväänä kipsilohkojen johtoluku oli tilastollisesti merkitsevästi korkeampi ($p < 0,001$), keskimäärin 3,4. Lohkojen ja rinnakkaisnäytteiden välinen vaihtelu oli kuitenkin suurta (1,0–7,0), mikä voi viitata kipsin epätasaiseen levitykseen. Toisena keväänä keskiarvo oli 1,4, eikä se enää merkitsevästi poikennut tilanteesta ennen kipsin levitystä.

Maan huokosveteen liuenneet suolat huuhtoutuvat talvikaudella maassa alaspäin, jolloin pintamaan johtoluku laskee. Johtoluvun lasku ensimmäisen ja toisen kipsin levitystä seuraavan kevään välillä viittaa siihen, että kipsi on pääosin kulkeutunut syvempiin maakerroksiin, sillä kipsin huuhtoutuminen Savijokeen ei selitä muutosta (ks. luku **Kipsin kulkeutumien syvemmälle**). TraP-hankkeen Nurmijärven Nummenpään valuma-aluekoetta lukuun ottamatta maan ominaisuuksia on seurattu kipsitutkimuksissa vain yhden tai kahden vuoden ajan. Nummenpäässä johtoluku oli koholla kahdesta kolmeen vuotta: ennen kipsiä johtoluvun keskiarvo oli 1,7 ja kahden ja puolen vuoden jälkeen kipsinlevityksestä 2,9. Nummenpäässä seuranta painottui voimakkaasti lannoitettuihin kaalilohkoihin, mikä saattoi selittää korkeaa johtoluvun lähtötasoa, eikä havainto välttämättä edusta koko kipsinlevitysaluetta Nummenpäässä. Yaran keväällä tehdyssä suorakylvökokeessa johtoluku nousi kevään 0,88:sta syksyllä arvoon 3,12, kun kipsiä käytettiin 2 t ha⁻¹, ja arvoon 5,1 annoksella 4 t ha⁻¹ (Alestalo 2011).



Kuva 21. Maa- ja kasvinäytteiden havaintopisteet. Kultakin pisteeltä otettiin kaksi rinnakkaisnäytettä.

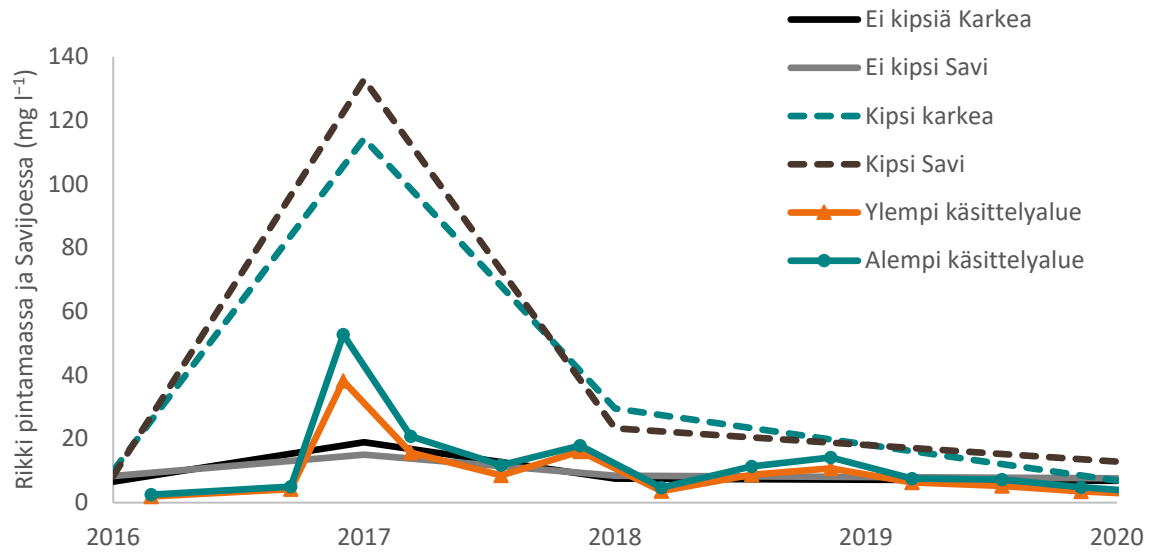
Taulukko 8. Maanäytteiden viljavuusanalyysi ennen kipsin levitystä (elokuu 2016) ja sen jälkeen.
Tilastolliset merkitsevyydet logaritimuunnetussa aineistossa: * $p < 0,05$, ** $p < 0,01$, *** $p < 0,001$.
Kipsilohkoja (K) 11, vertailulohkoja (E) 18. Kultakin lohkolta kaksi rinnakkaisnäytettä

Muuttuja	Kipsiä	Elokuu 2016		Toukokuu 2017		Toukokuu 2018		Huhtikuu 2020	
		Ka.	Min–Max	Ka.	Min–Max	Ka.	Min–Max	Ka.	Min–Max
Johtoluku 10 mS cm ⁻¹	E	0,8	0,3–2,2	1,3	0,4–4,7	1,0	0,4–3,3	1,1	0,3–3,6
	K	0,9	0,5–1,6	3,4***	1,0–7,0	1,4	0,8–2,6	1,4	0,8–2,8
Rikki mg l ⁻¹	E	7,7	4,3–18,3	16,6	4,5–70,8	8,1	4,0–14,0	7,3	3,7–18,0
	K	8,7	5,7–16,7	129***	8,3–371	24,7***	5,3–74	11,5	3,3–87
Kalsium mg l ⁻¹	E	2650	730–5300	3100	730–9400	2540	610–7400	2790	810–13000
	K	2840	1700–5200	3140	2100–4500	2670	1800–4300	3230	1800–13000
Kalium mg l ⁻¹	E	212	120–50)	220	120–480	191	100–470	206	98–420
	K	210	110–320	250	130–640	221*	110–510	219	120–380
Magnesium mg l ⁻¹	E	394	93–1200	437	110–1200	366	80–1000	394	100–1100
	K	307	78–530	319	85–610	271	60–430	290	74–560
Fosfori mg l ⁻¹	E	15,0	3,2–45	14,2	3,1–41	14,3	3,6–44,0	13,3	2,9–42
	K	17,2	4,9–39	16,7	5–35	16,6	4,9–34	15,3	5–40
Fosfori, vesiuutto mg kg ⁻¹	E	9,4	1,3–34,7	10,1	2,5–32,3	12,4	3,7–37,5	15,2	4,4–41,1
	K	10,3	3,1–21,5	8,7***	2,3–20,2	13,6	4,3–27,3	17,7	7,1–36,2
pH	E	6,4	5,5–7,2	6,3	5,2–7,3	6,4	5,5–7,3	6,3	5,4–7,3
	K	6,6	5,8–7,2	6,3***	5,6–6,9	6,5*	5,7–7,1	6,5	5,5–7,5
Hehkutushäviö %	E	6,9	4,4–11,1	6,7	3,5–11,1	7,0	4,0–11	6,8	3,7–11,5
	K	6,3	4,3–8,2	6,2	4,4–8,3	6,6	4,5–8,5	6,5	4,2–8,4

Kipsilohkojen pintamaassa viljavuusanalyysissä määritettävää helppoliukoista rikkiä oli ennen kipsin levitystä keskimäärin 8,7 mg l⁻¹ (**taulukko 8**). Arvo vastaa viljavuusluokkaa välttävä (lohkojen välinen vaihtelu 5,7–16,7 mg l⁻¹, huononlainen–hyvä) ja on lähellä Liedon kunnan keskimääräistä rikkipitoisuutta (**taulukko 9**). Ensimmäisen talven jälkeen rikin pitoisuus oli suurempi kuin ennen kipsin levitystä ($p < 0,001$), mutta laskennallista arviota pienempi. Kipsikäsitteilyn olisi pitänyt nostaa rikkipitoisuutta 290 mg l⁻¹, kun otetaan huomioon ensimmäisen talven aikana tapahtunut huuhtoutuminen Savijokeen, mutta keskimäärin nousu oli vain 121 mg l⁻¹. Lisäksi rikkituloksissa oli niin lohkojen kuin rinnakkaisnäytteidenkin välillä jopa suurempaa suhteellista vaihtelua (8,3–371 mg l⁻¹) kuin johtolokutuloksissa. Lohkojen viljavuusluokka vaihteli rikin osalta ensimmäisen talven jälkeen välttävästä arveluttavan korkeaan ja oli keskimäärin kolme luokkaa korkeampi kuin ennen kipsin levitystä. Kahden talven jälkeen keskipitoisuus (24,7 mg l⁻¹) oli yhä korkeampi kuin ennen kipsin levitystä ($p < 0,001$), mutta ei enää neljän talven jälkeen (keskipitoisuus 11,5 mg l⁻¹); tosin lohkojen välinen vaihtelu säilyi vielä tuolloinkin suurena (3,3–87 mg l⁻¹). Kahden talven jälkeen lohkojen viljavuusluokka vaihteli huononlaisesta korkeaan, eli oli keskimäärin 1,4 viljavuusluokkaa korkeampi kuin ennen kipsin levitystä. Neljän talven jälkeen viljavuusluokka oli lähes palautunut ennen kipsikäsitteilyä vallinneeseen tilaan, joillakin lohkoilla jopa alempaan luokkaan, mutta eräillä lohkoilla viljavuusluokka oli korkea. Rikin pitoisuus vaihteli jonkin verran myös käsittelemättömillä lohkoilla.

Sekä maan rikkipitoisuuden nousu että lohkojen välinen suuri vaihtelu on havaittu aiemmissa tutkimuksissa (Alestalo 2011, Yli-Renko ja Rasa 2011, Ekholm ym. 2012, Suojala-Ahlfors ja Laamanen 2014, Mattila ym. 2019). Nummenpäässä maan pintakerroksen rikkipitoisuus oli koholla kaksi vuotta, mutta pitoisuudet olivat pienempiä kuin Savijoella.

Kuva 22 esittää keskimääräiset rikkipitoisuudet pintamaassa ja Savijoessa. Kummassakin näkyy voimakas pitoisuuspiikki kipsin levityksen jälkeen, mutta pitoisuuksien kehitystä maassa ja joessa on vaikea verrata, sillä maasta määrittämiä on tehty vain vuoden tai kahden välein.



Kuva 22. Keskimääräinen rikkipitoisuus Savijoessa ja pintamaassa (savimaat, karkeat kivennäismaat, kipsikäsitteily, ei käsittelyä). Maasta rikki määritetty ennen kipsin levitystä (2016) ja kipsin levityksen jälkeen (2017, 2018, 2020). Vertailun vuoksi Liedon kunnan peltojen keskimääräinen rikkipitoisuus on jaksoilla 2016-2020 ollut karkeilla kivennäismailla 8,8 mg l⁻¹ ja savimailla 12,4 mg l⁻¹.

Kalsiumin pitoisuuden olisi pitänyt nousta kipsin levityksen seurauksena noin 370 milligrammalla maalitrassa. Jos kuitenkin otetaan huomioon vaihtuvan kalsiumin vajavainen uuttuvuus viljavuusanalysissä, keskimäärin 71 % savimaissa ja 81 % karkeissa maissa (Niskanen ja Jaakkola 1986), pitoisuuden nousu olisi 280 mg l⁻¹ savimaissa ja 320 mg l⁻¹ karkeissa kivennäismaissa. Kalsiumin keskipitoisuus kipsikäsiteltävien lohkojen pintakerroksessa oli ennen kipsinlevitystä 2840 mg l⁻¹ (taulukko 8). Savilohkojen keskipitoisuus (3060 mg l⁻¹) osoitti hyvää viljavuusluokkaa (lohkojen välinen vaihtelu tyydyttävästä korkeaan) ja karkeiden kivennäismaiden (2060 mg l⁻¹) tyydyttävää luokkaa (vaihtelu samoin tyydyttävästä korkeaan). Ensimmäisenä keväänä pitoisuus oli noussut tasolle 3140 mg l⁻¹, mutta muutos ei ollut tilastollisesti merkitsevä. Suurin muutos havaittiin yllättäen käsittelemättömillä savilohkoilla (taulukko 9), joilla osalla kalsiumtila oli noussut arveluttavan korkeaksi. Neljän talven jälkeen keskipitoisuus oli 3230 mg l⁻¹, tosin jälleen lohkojen välinen vaihtelu oli suurta (1800–13 000 mg l⁻¹). Ainoa tilastollisesti merkitsevä ($p < 0,05$) kalsiumpitoisuuksien ero oli vuoden 2017 muita vuosia korkeampi pitoisuustaso sekä kipsi- että vertailulohkoilla.

Aiemmissa kipsikokeissa on havaittu viljavuusanalysissä määritettävän kalsiumpitoisuuden nousevan vähän (Alestalo 2011, Suojala-Ahlfors ja Laamanen 2014) tai ei lainkaan (Yli-Renko ja Rasa 2011, Ekholm ym. 2012, Mattila ym. 2019). Huomattakoon, että kipsiä levitettäessä maahan lisättävä kalsiummäärä on suhteellisesti paljon pienempi kuin lisättävä rikkimäärä, kun lisäyksiä verrataan maassa ennestään oleviin kalsium- ja rikkivaroihin. Lisättävä kalsiummäärä oli 10–15 % maassa ennestään olleisiin varoihin verrattuna, kun taas lisätty rikkimäärä kohotti muokkauskerroksen rikkipitoisuuden lyhytaikaisesti moninkertaiseksi.

Kaliumpitoisuus oli vuonna 2018 yleisesti pienempi kuin muina vuosina ($p < 0,01$), mutta kipsilohkoilla kaliumpitoisuus oli toisen talven jälkeen korkeampi kuin ennen kipsikäsitteilyä ($p < 0,05$). Lohkojen kaliumpitoisuudet olivat Liedolle tyypillisellä tasolla ja vaihtelivat viljavuusluokaltaan välttävää hyvään. Magnesiumipitoisuudet olivat yleisesti korkeimpia vuosina 2017 ($p < 0,001$) ja 2018 ($p < 0,01$), mutta kipsillä käsiteltyjen ja käsittelemättömien lohkojen välillä ei ollut merkitsevää eroa. Myös magnesiumin pitoisuudet vastasivat Liedon tyypillistä tasoa ja edustivat viljavuusluokkia huononlaisesta korkeaan. Magnesiumin osuus laskennallisesta kationinvaihtokapasiteetista pysyi muuttumattomana. Maan kaliumissa ei aiemmissa kipsin levitystä koskevissa tutkimuksissa ole havaittu

muutoksia, ei myöskään magnesiumissa lukuun ottamatta OSMO-hanketta, jossa magnesiumipitoisuus toivotusti laski lohkoilla, joilla magnesiumipitoisuuden arvioitiin olevan liian korkea (Mattila ym. 2019). OSMO-hankkeen mukaan kipsi voi heikentää kasvien magnesiumin saantia, jos magnesiumin osuus kationinvaihtokapasiteetista on alle 10 %. Tällaisia lohkoja tutkittujen kipsilohkojen joukossa oli vain kaksi: toisessa maalaji oli hietamoreeni ja toisessa hiue. Savimailla tai hietamailla, joissa muokkauskerroksen alla on savimaata, muokkauskerroksen magnesiumipitoisuus saattaa olla melko pieni, mutta näille maille on tyypillistä, että magnesiumipitoisuus kasvaa huomattavasti syvemmälle mentäessä (Yli-Halla ym. 2000). Juuret voivat siis saada magnesiumia syvemmältä maasta, vaikka sitä olisi muokkauskerroksessa tarjolla niukasti.

Taulukko 9. Maanäytteiden viljavuusanalyysi. Keskiarvo savimailla (s) ja karkeilla kivennäismailla (k). Kipsilohkoja (K) savimailla 9 ja karkeilla kivennäismailla 3. Vertailulohkoja (E) savimailla 11 ja karkeilla kivennäismailla 7

Muuttuja	Kipsiä	Maalaji	Elokuu 2016	Toukokuu 2017	Toukokuu 2018	Huhtikuu 2020	Lieto keskiarvo ¹
Johtoluku 10 mS cm ⁻¹	E	s	0,87	1,5	1,1	1,4	–
	K	s	0,98	3,5	1,4	1,5	–
	E	k	0,58	1,0	0,71	0,76	–
	K	k	0,78	2,9	1,4	0,96	–
S mg l ⁻¹	E	s	8,4	15,1	8,5	7,6	12,4
	K	s	8,4	133	23,3	12,9	–
	E	k	6,6	19,0	7,5	6,8	8,8
	K	k	9,9	114	29,6	6,9	–
Ca mg l ⁻¹	E	s	3 130	3 710	3 070	3 350	2 710
	K	s	3 060	3 310	2 850	3 530	–
	E	k	1 890	2 120	1 710	1 910	1 840
	K	k	2 060	2 560	2 060	2 220	–
K mg l ⁻¹	E	s	220	238	209	221	224
	K	s	215	260	236	229	–
	E	k	199	191	164	181	184
	K	k	192	218	168	184	–
Mg mg l ⁻¹	E	s	249	277	231	263	255
	K	s	154	166	129	146	–
	E	k	487	540	452	477	501
	K	k	352	365	312	334	–
P mg l ⁻¹	E	s	12,1	10,9	10,8	9,5	10,5
	K	s	12,7	14,4	13,6	12,6	–
	E	k	16,9	16,3	16,6	15,7	16,8
	K	k	18,6	17,4	17,4	16,1	–
pH	E	s	6,5	6,5	6,5	6,5	6,3
	K	s	6,3	6,1	6,3	6,4	–
	E	k	6,1	6,0	6,1	6,1	6,2
	K	k	6,7	6,3	6,5	6,6	–

¹ Eurofins Viljavuuspalvelu Oy. Tulosaari. Viljavuustilastot 2016–2020.

Viljavuusanalyysissä määritettävän heppoliukoisen fosforin keskipitoisuudet vastasivat Liedon kunnan peltojen yleistä tasoa vaihdellen viljavuusluokaltaan välttävästä arveluttavan korkeaan (**taulukko 9**). Pitoisuuksissa ei havaittu merkitseviä muutoksia, kuten ei ole havaittu aiemmissakaan tutkimuksissa (Alestalo 2011, Yli-Renko ja Rasa 2011). Vesiuttoisen fosforin pitoisuus oli vuonna 2017 kipsilohkoilla vertailulohkoja pienempi ($p < 0,001$), mikä olisi teoreettisesti perusteltavissa. Kipsin tulisi nimittäin voimistaa fosforin sitoutumista maahiukkasiin niin, että vesiuttoisen fosforin pitoisuus laskee

suhteessa viljavuusanalyysissä määritettävään asetaattiuuttoiseen fosforiin. Vuonna 2018 eroja näiden kahden määrittämenetelmän välillä ei enää havaittu. Vesiuuttoisen fosforin pitoisuus kuitenkin kasvoi niin kipsi- kuin vertailulohkoillakin vuodesta 2016 vuoteen 2020 ($p < 0,001$). Määrittäslaboratorio vaihtui vuonna 2018, ja vaikka määrittäksen periaate pysyi samana, on mahdollista, että tulostaso on muuttunut laboratoriotyössä mahdollisesti olleiden erojen vuoksi, eikä vuodesta 2018 eteenpäin voida tehdä johtopäätelmiä kipsin vaikutuksesta tämän määrittäksen osalta. TEHO-hankkeessa havaittiin vesiuuttoisen fosforin pitoisuudessa alenemista tutkimuksen keston, kahden vuoden ajan (Yli-Renko ja Rasa 2011). Hehikutushäviö, joka kuvastaa orgaanisen aineksen (ja saven kideveden) pitoisuutta, oli tilastollisesti merkitsevästi ($p < 0,05$) pienempi vuonna 2017, mutta kipsillä käsiteltyjen ja käsittelemättömien lohkojen välillä ei havaittu eroja.

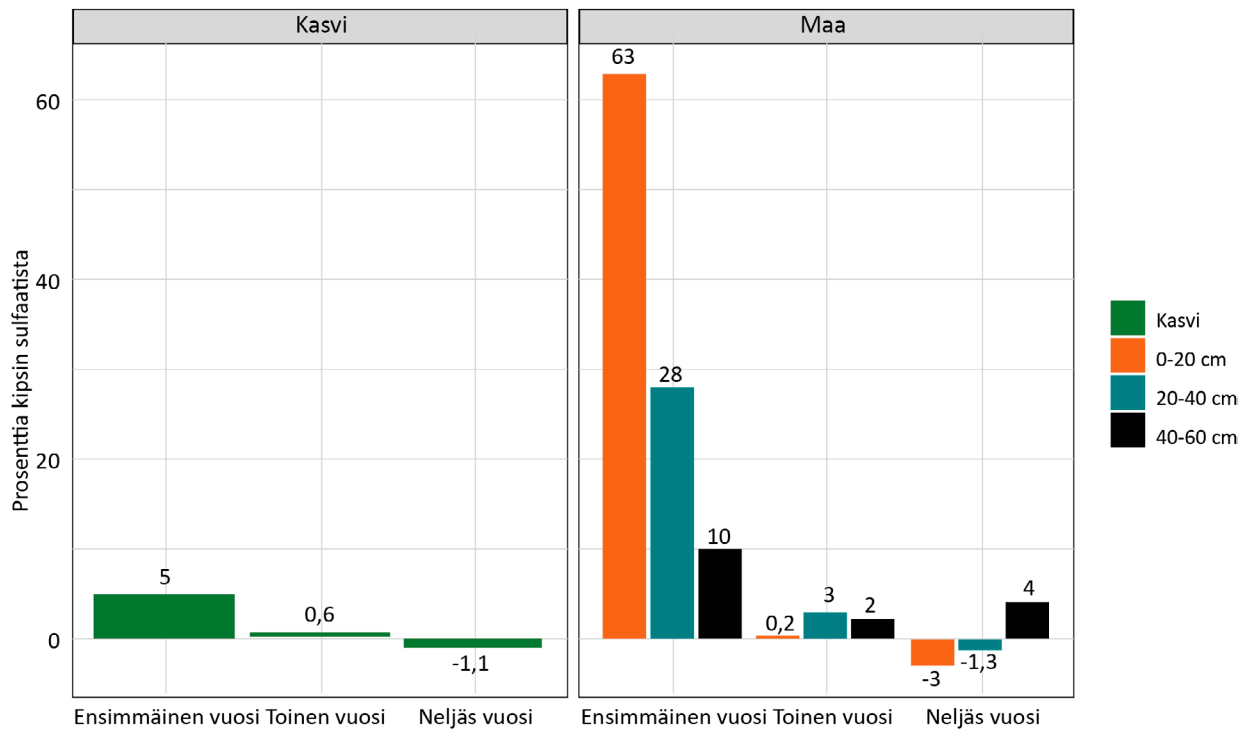
Pintamaan pH laski kipsilohkoilla ensimmäisenä ($p < 0,001$) ja toisena vuotena ($p < 0,05$) kipsin levityksen jälkeen. Kun ennen kipsikäsitelyä pH oli keskimäärin 6,6, ensimmäisen talven jälkeen se oli 6,3 ja toisen 6,5. TEHO-hankkeen ja Yaran kokeissa kipsin ei havaittu vaikuttavan maan pH-arvoon. OSMO-hankkeen kokeissa pH laski käsittelemättömiin lohkoihin verrattuna 0,2 yksikköä. Johtoluvun kasvu johtaa yleensä pieneen pH-luvun laskuun.

Magnesium voi heikentää maan rakennetta, jos sitä on yli 20 % kationinvaihtokapasiteetista (Mattila ym. 2019). Tällaisia peltoja seurannassa oli lähinnä vain vertailulohkoissa. Lisäksi kriteeri ylittyi yhden kipsikäsitellyn lohkon toisessa rinnakkaisnäytteessä vuonna 2020. Maan rakennetta ei Savijoella tutkittu, lukuun ottamatta viljelijöiden kokemaa muutosta. Reilu vuosi kipsinlevityksestä tehdyn kyselyn mukaan noin kolmasosa viljelijöistä koki peltomaan rakenteen parantuneen kyntö- ja kevytmuokatuilla pelloilla, yksittäiset viljelijät myös suorakylvöpelloilla (Ala-Harja 2020). Kyselyn mukaan pääosa heistä koki parannusta peltomaassa seuraavanakin vuonna. Viljelijöillä ei ollut havaintoja, jotka viittaisivat kipsin heikentäneen satoa tai maaperää.

Kipsin kulkeutuminen syvemmälle

Maanäytteitä otettiin kolmelta kipsikäsitellyltä ja kahdelta käsittelemättömältä lohkolta pintakerroksen (0–20 cm) lisäksi 20–40 cm:n syvyydeltä, ja kipsinlevityksen jälkeisinä vuosina (2017–2020) myös 40–60 cm:n syvyydeltä. Näytteiden perusteella arvioitiin, mikä osuus kipsin sulfaatista ja kalsiumista oli löydettävissä eri maakerroksista ja kasveista. Arviossa sulfaatiksi muunnetun rikkipitoisuuden perusteella laskettiin kunkin maakerroksen sulfaattimäärä (kg ha^{-1}) ja kipsiperäiseksi sulfaatiksi oletettiin muutos sulfaattimäärässä ennen kipsiä -tilanteeseen nähden. Maan tilavuuspainoksi oletettiin $1,3 \text{ kg l}^{-1}$ perustuen maan orgaanisen hiilen pitoisuuteen (Heikkinen ym. 2013). Orgaanisen hiilen pitoisuus saatiin jakamalla hehikutushäviö kertoimella 1,724. Viljelykasvien satoon sitoma sulfaatti arvioitiin kertomalla kasvianalyysien tulos (ks. luku Kasvinäytteet) Varsinais-Suomen kunkin vuoden keskisadolla (Luke 2022). Vastaava analyysi tehtiin myös kalsiumille. Lisäksi tulosten perusteella arvioitiin kaliumin, magnesiumin, johtoluvun ja pH:n syvyysuuntaista jakautumista kipsillä käsitellyillä ja käsittelemättömillä lohkoilla (**liite 4**).

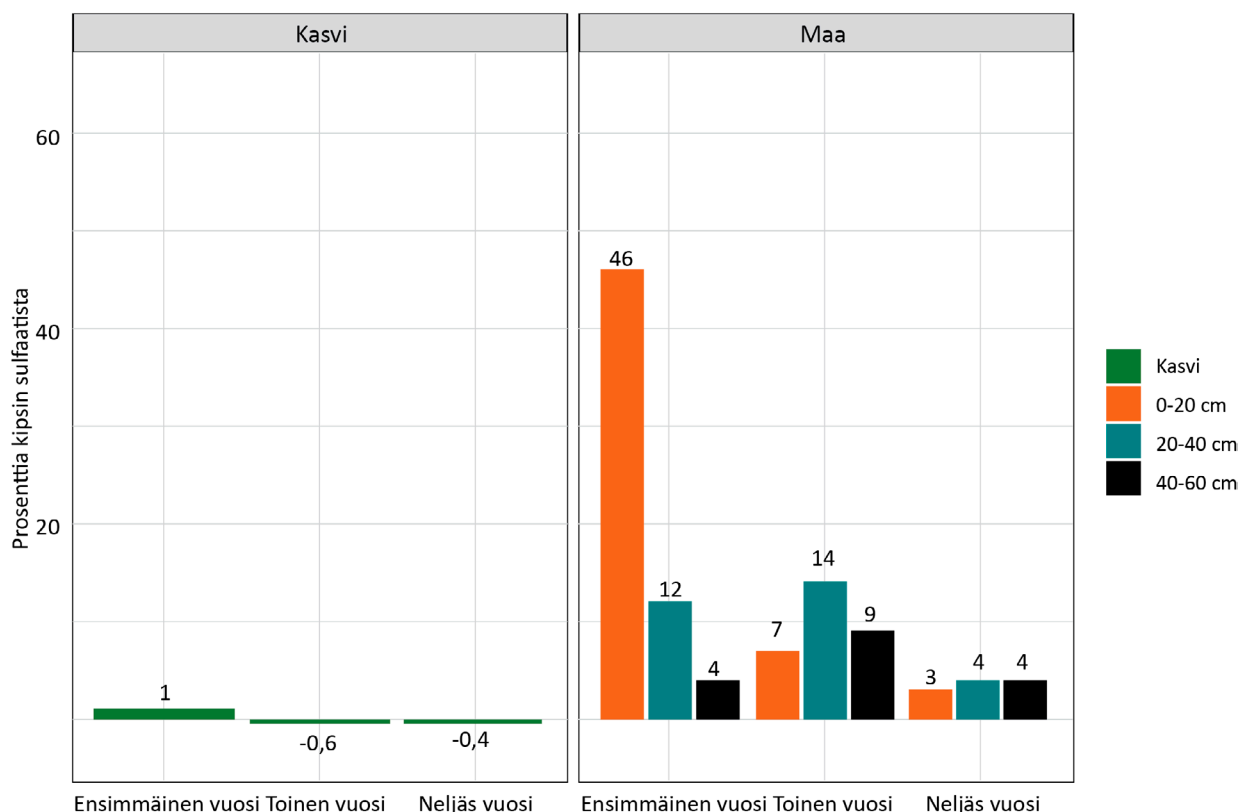
Lohko 8



Kuva 23. Kipsissä levitetyn sulfaatin osuus kasveissa ja eri maakerroksissa ensimmäisenä, toisena ja neljäntenä kipsin levityksen jälkeisenä vuotena. Hietamoreenilohko 8.

Hietamoreenilohkolla 8 oli kipsinlevityksen jälkeisenä keväänä kipsin sulfaatista 0–20 cm -kerroksessa jäljellä 63 %. Lisäksi sitä oli jo ensimmäisen talven aikana kulkeutunut 20–40 cm -kerrokseen 28 % ja 40–60 cm -kerrokseen noin 10 % (kuva 23). Maakerrosta 40–60 cm koskeva arvio on epävarma, sillä ennen kipsiä -tilanne arvioitiin käsittelemättömien lohkojen vuosien 2017–2020 keskiarvon perusteella. Toisena kipsinlevityksen jälkeisenä keväänä 0–20 cm -kerroksessa ei käytännössä enää ollut kipsin sulfaattia, 20–40 cm:ssä sitä oli 3 % ja 40–60 cm:ssä 2 %. Kolmantena vuotena näytteitä ei otettu, ja neljäntenä kipsin sulfaattia näytti olevan enää vain 40–60 cm:ssä (4 %). Ensimmäisenä kipsinlevityksen jälkeisenä kasvukautena lohkolla viljelty ohrasato otti kipsin sulfaatista 5 %, muina vuosina (viljelyskasvina rapsi ja kevätvehnä) ei juuri yhtään (kuva 23). Kun otetaan huomioon Savijokeen kulkeutunut sulfaatti, kipsin sulfaattia ”löytyi” 11 % enemmän kuin kipsissä sitä lisättiin. Sulfaattitaseen yliarvio voi johtua epätarkkuuksista maa- ja kasvianalyysissä tai satoarviossa. On myös mahdollista, että lohkoa on kipsistä huolimatta lannoitettu rikkipitoisilla lannoitteilla. Valtaosa Suomen markkinoilla olevista, viljoille, öljykasveille ja nurmille käytettävistä väkilannoitteista sisältää 2–4 % rikkiä, jolloin tätä ravinnetta tulee tavanomaisessa kertalevityksessä 10–20 kg ha⁻¹. Perunalle, kaalille ja porkkanalle käytettävissä väkilannoitteissa maahan voi tulla rikkiä hyvinkin 50 kg ha⁻¹.

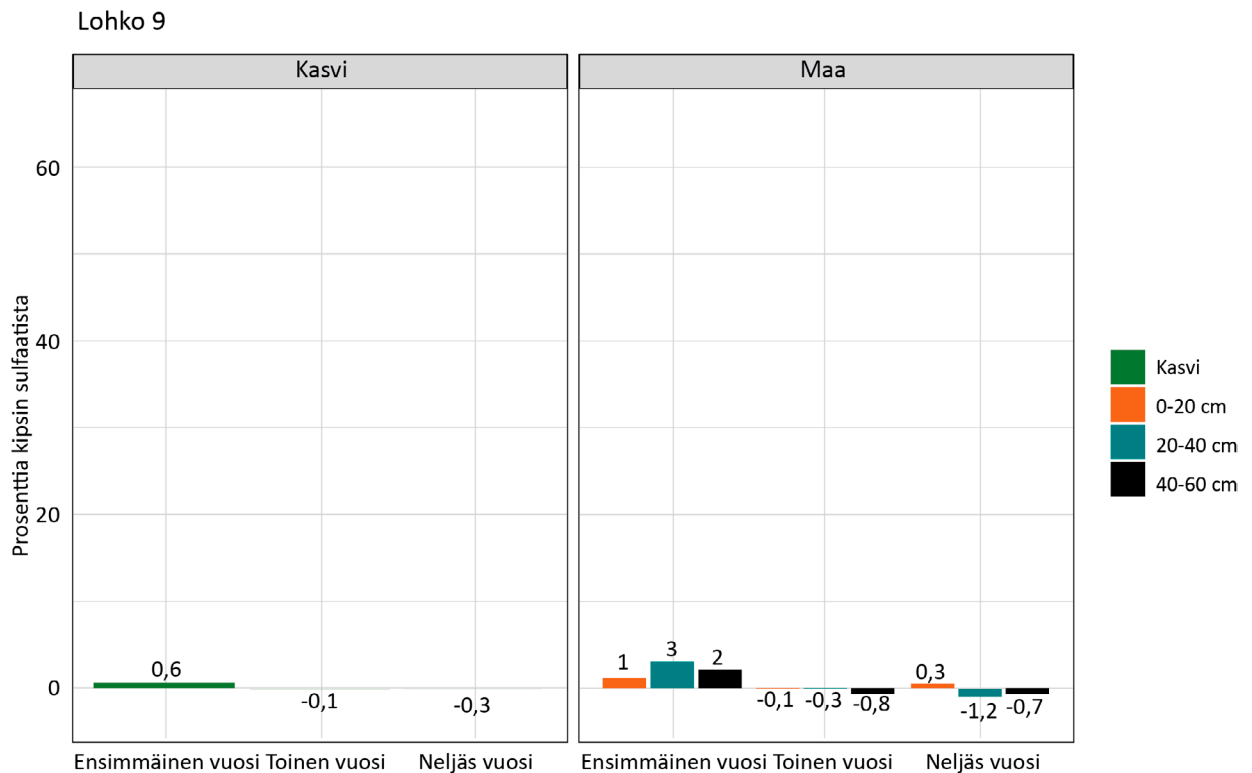
Lohko 13



Kuva 24. Kipsissä levitetyn sulfaatin osuus kasveissa ja eri maakerroksissa ensimmäisenä, toisena ja neljäntenä kipsinlevityksen jälkeisenä vuotena. Hiue-/hiesusavilohko 13.

Hiue-/hiesusavilohkolla 13 sulfaatti käyttäytyi samansuuntaisesti kuin hietamoreenilohkolla 8, mutta pitoisuudet olivat alempia ensimmäisenä kipsin jälkeisenä keväänä ja hieman korkeampia toisena ja neljäntenä keväänä (**kuva 24**). Tämä viittaisi siihen, että savimaassa sulfaatin huuhtoutuminen maaprofiilissa on hitaampaa kuin karkeammalla maalajilla. Satoon (vehnä) oli siirtynyt vähemmän sulfaattia kuin lohkolla 8. Ensimmäisen talven jälkeen kipsin sulfaatista löytyi maasta (0-60 cm), kasveista ja Savijokeen huuhtoutuneena 71 %.

Toisella hiesavilohkolla (9) lisätystä kipsistä oli kadoksissa peräti 85 %, eikä maan tai sadon (syysvehnä) sulfaattimäärissä havaittu juuri mitään muutosta (**kuva 25**). Myöskään maan johtoluvun ei havaittu nousseen tällä lohkolla (**liite 4**). Lohkon viljelijä vahvisti, että lohkolle oli kuitenkin levitetty kipsiä. Nummenpäässä viljavuusanalyysi tehtiin kerroksesta 20–40 cm vasta, kun kipsin levityksestä oli kulunut kaksi vuotta. Myös tämä aineisto osoitti rikin kulkeutuvan maaperässä alaspäin, mutta toisin kuin Savijoella rikin pitoisuus pysyi kohonneena 5,5 vuoden ajan.



Kuva 25. Kipsissä levitetyn sulfaatin osuus kasveissa ja eri maakerroksissa ensimmäisenä, toisena ja neljäntenä kipsin levityksen jälkeisenä vuotena. Hiuesavilohko 9.

Kaikilla kolmella kipsilohkolla kalsiumin määrä oli ensimmäisenä kipsin levitystä seuraavana keväänä noussut reilusti yli sen mitä laskennallisesti olisi pitänyt (370 mg l^{-1}). Sama ilmiö havaittiin kuitenkin myös toisella käsittelemättömistä lohkoista (5, liite 4). Syvemmissä kerroksissa kalsiummäärä laski; tosin laskua esiintyi myös käsittelemättömillä lohkoilla. Kalsium ei vaikuttanut kulkeutuneen syvemmälle maassa eikä merkittävästi siirtyvän kasveihin. Kalsiumtulosten käyttökelpoisuutta kipsin vaikutusarvioihin laskee se, että pitoisuudet eivät korreloineet johtoluvun kanssa, eivätkä sulfaatin ja kalsiumin moolisuhteet vastanneet sitä, mitä ne ovat kipsissä.

Myös kaliumpitoisuus oli ensimmäisenä kipsin levitystä seuraavana keväänä hieman noussut pintakerroksessa. Kaliumia ei vaikuttanut kulkeutuneen syvemmälle (liite 4). Kipsilohkolla 9 magnesiumia saattoi olla kulkeutunut ainakin 20–40 cm kerrokseen, jossa pitoisuus oli ennen kipsin levitystä vallinnutta tilannetta korkeampi vielä neljäntenäkin vuonna (liite 4). Hiue-/hiesusavilohkolla 13 pH oli 20–40 ja 40–60 cm kerroksissa laskenut jopa yhden yksikön (liite 4). Kahdella muulla lohkoilla ei havaittu vertailulohkoista selviä maan pH:n muutoksia.

6.2 Kasvinäytteet

Näytteet lohkoilla viljellyistä kasveista otettiin kesä-heinäkuussa lippulehtivaiheessa samoilta paikoilta kuin maanäytteet. Valtaosa lohkoista oli viljalla, mutta mukana oli myös muutama nurmilohko. Joinakin vuosina kasvina oli hennettä ja rapsia. Koska muutamalla lohkoilla ei ollut näytteenottohetkellä kasvustoa tai se oli jo korjattu pois (nurmi), kasvustonäytteitä saatiin vuosittain vain 25 lohkolta, joista 10 oli kipsikäsiteltyjä. Kasvinäytteistä määritettiin boori, fosfori, typpi, kalium, kalsium, magnesium, kupari, mangaani, rauta, rikki, seleeni ja sinkki. Koska näytteet viljakasvustoista otettiin lippulehtivaiheessa – siis ennen tähkän kehittymistä – vertailuaineistona ei käytetty tuleentunutta viljaa vaan juhannuksen tienoilla otettuja timoteinäytteitä, heinäkuussa korjattua timoteihinä tai tähkälle tulovaiheessa olevista kevätvehnäkavustosta saatuja tuloksia.

Kasvien rikkipitoisuus nousi kipsilohkoilla noin kaksinkertaiseksi levitystä seuraavana ja sitä seuraavana kesänä ($p < 0,001$), mutta neljän vuoden päästä eroa ei enää ollut ennen kipsin levitystä vallinneeseen tilanteeseen verrattuna (**taulukko 10**). Kasvien rikkipitoisuus vaihteli myös vertailulohkoilla, ja esimerkiksi vuonna 2018 rikin pitoisuudet olivat muita vuosia korkeampia niin kipsi- kuin vertailulohkoillakin ($p < 0,05$). Kasvien rikkipitoisuuden pysyminen korkeana kahden vuoden ajan kipsin levityksestä tukee maa-analyysien tulosta, jonka mukaan kipsin rikki on kulkeutunut maassa syvemmälle pysyen kuitenkin juurien ulottuvilla. Huomattakoon, että keväällä 2017 pintamaan rikkipitoisuus kipsiä saaneilla lohkoilla oli keskimäärin kahdeksankertainen vertailulohkoihin verrattuna, mutta kasvien rikkipitoisuus nousi vain kaksinkertaiseksi, mikä kuvastaa kasvien valikoivaa ravinteiden ottoa. Kasvien kalsiumpitoisuuksissa ei havaittu merkitseviä eroja. Tämä puolestaan heijastelee sitä, että kipsin mukana tulleen kalsiumin määrä oli pieni maassa ennestään olleeseen kalsiummäärään verrattuna, jolloin kasveille tarjolla olleen kalsiumin määrän muutos oli suhteellisen pieni.

Muista makroravinteista kasvien kaliumpitoisuus oli jo ennen kipsin levitystä korkeampi kipsilohkoilla kuin vertailulohkoilla ($p < 0,05$). Lisäksi kaikkien lohkojen keskipitoisuudet olivat vuonna 2017 korkeammat ($p < 0,05$) kuin muina vuosina. Kipsillä käsiteltyjen ja käsittelemättömien lohkojen välillä oli merkitsevä (mutta vähäinen) ero neljäntenä kesänä käsittelyn jälkeen. Kasvien magnesiumpitoisuudessa ei havaittu muutosta. Kasvien fosforipitoisuus oli kaikilla lohkoilla pienin vuonna 2020 ($p < 0,05$), kipsilohkoilla vielä pienempi kuin vertailulohkoilla ($p < 0,01$). Kasvien fosforipitoisuuden aleneminen voi liittyä alentuneeseen (joskaan ei tilastollisesti merkitsevästi) maan fosforitilaan. Typpipitoisuudet olivat korkeimmillaan vuonna 2017 ($p < 0,01$), mutta kipsillä ei näytä siihen olleen vaikutusta. Vertailuarvoja korkeammat typpipitoisuudet kertovat todennäköisesti siitä, että tässä seurannassa kerätyt kasvinäytteet edustivat nuorempaa kehitysastetta kuin vertailuaineistojen näytteet.

Hivenravinteista boorin ja mangaanin pitoisuudet olivat vuonna 2018 korkeimmillaan ($p < 0,01$). Kuparipitoisuuksissa ei havaittu muutoksia. Rautapitoisuudet olivat toisaalta vuonna 2017 yleisesti korkeampia ($p < 0,01$), mutta toisaalta kipsilohkoilla pienempiä vuosina 2017 ja 2020. Sinkkipitoisuudet olivat vuosina 2017 ($p < 0,05$) ja 2020 ($p < 0,01$) keskimääräistä pienempiä. Seleenipitoisuuksissa ei havaittu merkitseviä muutoksia, mutta alueella kannattaa yleisesti kiinnittää huomiota seleeniin, sillä useassa näytteessä pitoisuus oli alle määrityksen alarajan. Kun seleenipitoisten peltolannoitteiden myynti Suomessa alkoi vuonna 1984, tavoitteeksi asetettiin se, että viljanjyvissä päästäisiin seleenipitoisuuden tasolle $0,1 \text{ mg kg}^{-1}$ (Ekholm ym. 2005). Vaikka tässä tutkimuksessa ei analysoitukaan viljanjyviä, voidaan todeta, että monien kasvinäytteiden seleenipitoisuus oli huomattavan paljon pienempi kuin aikanaan asetettu tavoitetaso, ja suuri osa seleenipitoisuuksista vastasi ennen seleenilannoitusta vallinnutta tasoa, joka oli timoteinäytteissä keskimäärin vain $0,007 \text{ mg kg}^{-1}$ (Sippola 1979). Kasvustosta määritetyt ravinnepitoisuudet olivat samalla tasolla kuin kirjallisuudessa viljoille esitetyt vertailuarvot (**taulukko 10**).

Taulukko 10. Kasvien alkuainepitoisuudet kuiva-ainesta kohden. Tilastolliset merkitsevyydet kuten taulukossa 8. Kipsilohkoja (K) 10 kappaletta, vertailulohkoja (E) 15. Kultakin lohkolta analysoitiin kaksi rinnakkaisnäytettä. Vertailuarvoja sisältäviin sarakkeisiin on koottu eri tutkimuksissa saatuja kasviaineksen alkuainepitoisuuksia

Muuttuja	Kipsiä	Kesäkuu 2016		Kesäkuu 2017		Heinäkuu 2018		Kesäkuu 2020		Vertailu- arvo I	Vertailu- arvo II
		Ka	Min-Max	Ka	Min-Max	Ka	Min-Max	Ka	Min-Max		
S	E	2,2	1,0–3,5	2,7	1,3–3,9	3,0	0,9–10,0	1,7	0,8–2,5	–	1,0–1,6 ⁴
g kg ⁻¹	K	2,6	1,0–4,5	5,5***	2,7–10,5	4,9**	2,3–13,0	2,0	1,5–2,7		
Ca	E	3,8	1,4–7,2	4,5	2,3–10	3,6	1,9–6,6	3,1	2,2–4,9	2,6 ²	2,0–4,0 ⁵
g kg ⁻¹	K	4,3	2,5–7,4	4,7	2,4–6,9	5,6	1,5–18	3,1	1,6–5,6		
K	E	26,2	10–41,5	31,9	17,5–46,5	24,0	14–43,5	22,8	14,5–33,5	23,6 ²	16–20 ⁵
g kg ⁻¹	K	32,5	13,5–53,5	34,7	16–48	26,2	10–37	23,7*	15–34		
Mg	E	1,7	0,8–3,1	1,7	0,9–3,5	1,7	0,9–2,3	1,5	0,9–2,3	1,3 ²	0,6–1,8 ⁵
g kg ⁻¹	K	1,6	1,0–2,3	1,5	1,0–2,1	1,6	1,1–2,1	1,4	1,0–2,3		
P	E	3,4	1,5–4,9	3,1	2,1–5,0	3,1	1,9–4,7	2,8	1,9–4,3	2,9 ²	1,8–2,5 ⁵
g kg ⁻¹	K	4,1	1,7–5,5	3,6	2,1–4,7	3,4	1,4–4,5	2,7**	1,6–3,7		
N	E	26,1	9,2–40,0	31,1	11,3–51,7	26,8	14,1–53,3	23,6	10,4–41,5	–	12–18 ⁵
g kg ⁻¹	K	30,8	7,3–50,9	33,3	10,7–43,1	28,8	15,0–41,6	24,3	10,7–31,8		
B ¹	E	4,5	1,1–18	4,8	1,7–15,5	6,3	2,3–12,5	6,1	3,0–11,5	5,6 ³	5,5–8,0 ⁶
mg kg ⁻¹	K	3,2	1,1–5,3	3,2	1,6–6,1	7,6	2,3–29,5	5,3	2,3–9,5		
Cu	E	5,6	2,7–9,6	5,0	2,7–10,4	5,1	2,6–8,7	5,7	2,6–9,8	6,0 ³	2,8–6,2 ⁶
mg kg ⁻¹	K	6,1	2,6–10,0	5,9	2,7–9,4	5,2	2,6–9,1	6,2	2,6–18,5		
Mn	E	41,1	11,0–120	52,0	11,0–130	61,5	12,5–200	42,0	10,1–85,5	76 ³	40–100 ⁶
mg kg ⁻¹	K	27,9	13,0–81,5	38,7	13,5–95,0	52,1	23–235	27,7	14,5–66,0		
Fe	E	60,7	22,0–111	95,6	25–320	54,8	35,5–122	70,7	36,5–250	64 ³	48–82 ⁶
mg kg ⁻¹	K	79,7	21,5–150	76,3*	31,5–102	63,6	48–92	55,1*	30,0–81,0		
Zn	E	29,5	17,3–38,0	24,8	10,7–70,0	27,9	10,5–48,0	22,2	10,5–41,0	24 ³	18–38 ⁶
mg kg ⁻¹	K	30,0	10,5–46,5	27,5	10,8–49,0	33,2	18,4–50	19,5	10,5–41,0		
Se ¹	E	0,14	0,01–0,89	0,17	0,01–1,23	0,18	0,01–1,03	0,06	0,01–0,36	–	–
mg kg ⁻¹	K	0,02	0,01–0,09	0,07	0,01–0,23	0,17	0,01–0,66	0,09	0,01–0,43		

¹ Alle määrittäysrajan olevien tulosten oletettu olevan 0,5 kertaa määrittäysraja.

² Timotei tähkälle tulovaiheessa (Kähäri ja Nissinen 1978)

³ Kevätvehnä tähkälle tulovaiheessa (Sillanpää 1982)

⁴ Timoteihinä (Sillanpää ja Jansson 1991)

⁵ Timoteihinä (Jansson ym. 1985)

⁶ Timoteihinä (Yläranta ja Sillanpää 1984)

7 Kipsin talvilevitys

Jos kipsiä voisi levittää talvella lumelle tai routaiseen maahan, viljelijöiden aikataulupaineet helpottuisivat vaikeiden syyssäiden oloissa. Kipsin talvilevitystä tutkittiin olosuhteiltaan säädettävällä pintavaluntasimulaattori SIMUlla Luken Kuopion (Maaninka) toimipaikassa. Kokeessa verrattiin erilaisten talviolosuhteiden ja maan kaltevuuskulman vaikutusta maahiukkasten ja ravinteiden huuhtoutumiseen kipsillä käsitelystä ja käsittelemättömästä pintamaasta. Menetelmä yhdisti todellisia pelto-olosuhteita ja säädeltyjä laboratorio-olosuhteita ja se nimensä mukaisesti simuloi pintavalunnan muodostumista erilaisissa sääolosuhteissa.

Savimaan (JII) laatat nostettiin Jokioisilla lokakuussa 2019. Maa oli tuolloin märkä, ja pellon pinta liettynyt noin viiden sentin syvyyteen asti, ei kuitenkaan syvemmälle, joten laatan pohjalle saatiin kiinteämpää maa-ainesta.

Laattojen nostossa 30 cm leveä, 90 cm pitkä ja noin 6 cm syvä kaistale (0,34 m²) höylättiin irti traktorivetoisella leikkurilla (**kuva 26**). Leikkuriin oli kiinnitetty vahva pleksi, joka liukui leikkurin takana maalaatan alle. Kun pleksi oli kokonaan maalaatan alla, laatta leikattiin sopivaan mittaan ja nostettiin pleksin avulla muovitetun vaneripohjan päälle. Märältä, puidulta viljapelloilta laatat täytyi nostaa varovasti, sillä laatan koostumus oli pehmeä, eikä laatoilla ollut viljansängen lisäksi maata koossapitävää kasvillisuutta. Yksittäiset maalaatat pakattiin n. 15 cm korkeaan muottiin, joka puristettiin tiiviisti laatan ympärille. Maalaatan toisen päädyn seinä oli matala, jotta pintavalunta pääsi vapaasti virtaamaan laatan päältä. Lisäksi laatan pohjavaneriin tehtiin reikiä (maa säilyi häiriintymättömänä), joiden kautta läpisuotautuva vesi kerättiin. Laatat kuljetettiin Maaningalle pakettiautolla ja peräkärryllä. Perillä laatat varastoitiin -2 asteeseen pakastekonttiin odottamaan kokeen alkua (**kuva 27**).



Kuva 26. Savimaalaattojen nosto märältä, puidulta pelloilta Jokioisissa lokakuussa 2019.



Kuva 27. Pakatut savimaalaatat kuljetettiin Maaningalle, jossa ne varastoitiin pakastekonttiin -2 asteeseen odottamaan koejakson alkua.

Kokeessa sänkipeitteisille maalaatoille tehtiin kuusi erilaista käsittelyä, jotka kaikki toistettiin neljästi (**taulukko 11**). SIMU-kammioon mahtuu kerrallaan kuusi maalaattaa. Sadetuksia ja lumen sulatuksia toistoinen oli siten yhteensä 24 eli neljä viikon jaksoa. Kokeessa jäisille maalaatoille levitettiin runsas 130 grammaa kipsiä, joka vastasi 4000 kg ha^{-1} , tarkoituksena simuloida kipsin levittämistä jäisen sänkipeillon pintaan. Laattojen kallistuskulma asetettiin joko yhteen tai kuuteen prosenttiin. Verrokkina käytettiin kipsittömiä, yhden prosentin kallistuksella olleita maalaattoja.

Leutoa sadetalvea simuloivilla koejaksoilla laattojen ympärille asetettiin pleksikehys, jonka varaan sadetuslaitteisto nostettiin sadetuksen ajaksi. Kunkin maalaatan yllä oli säteilylämmitin, jonka vaikutus kohdistui suoraan maalaattaan, ja kun lämmittimet olivat päällä, koko kammion lämpötila nousi simuloiden auringon vaikutusta. Kammion lämpötilan vuorokausivaihtelu tuotettiin säteilylämmittimien lisäksi kylmäkoneistolla. Yölämpötilaksi säädettiin $-3 \text{ }^\circ\text{C}$ astetta ja päivisin lämpötila nostettiin $+15$ asteeseen, mikä mukaili loppukevään tilannetta. Säteilylämmittimet olivat päällä maanantaista perjantaihin klo 8–12, ja 20 mm:n sadetus toteutettiin lämmitysjakson jälkeen kolmessa, tunnin välein tehdyssä erässä, jotta vesi ehti välillä valua ja laatta hieman kuivua. Käsittelyä jatkettiin viisi vuorokautta, eli laattoja sadetettiin yhteensä 100 mm. Tämän jälkeen kammioon säädettiin tasainen $+10 \text{ }^\circ\text{C}$:n lämpötila kaiken jään sulattamiseksi viikonlopun aikana. Sadetuksia ei enää viikonloppuna tehty. Kokonaisuudessaan yksi käsittelyjakso kesti viikon, maanantaista sunnuntaihin, minkä jälkeen maalaatat poistettiin kammioista ja uudet laatat laitettiin sisään.

Taulukko 11. Routaisille maalaatoille tehty käsittelyt pintavaluntasimulaattorissa

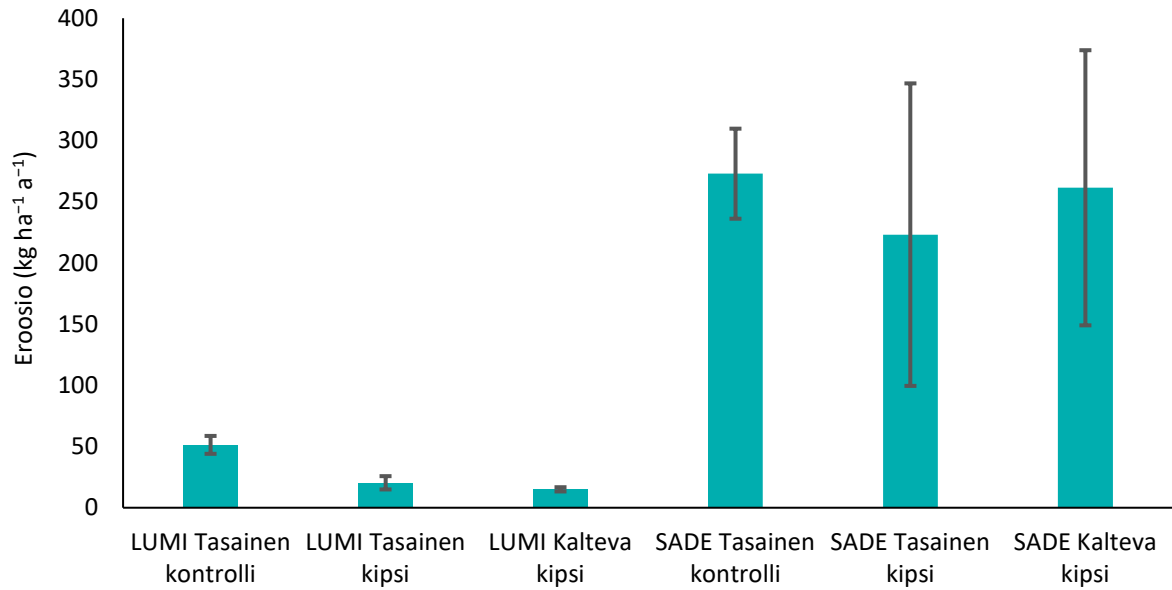
Käsittely	Toteutus
LUMI Tasainen	Ei kipsiä, kallistus 1 %
LUMI Tasainen kipsi	Kipsiä sängelle, lumi kipsin päälle, kallistus 1 %
LUMI Kalteva kipsi	Kipsiä sängelle, lumi kipsin päälle, kallistus 6 %
SADE Tasainen	Ei kipsiä, kallistus 1 %
SADE Tasainen kipsi	Kipsiä sängelle, sadetus 20 mm, 5 vrk peräkkäin, kallistus 1 %
SADE Kalteva kipsi	Kipsiä sängelle, sadetus 20 mm, 5 vrk peräkkäin, kallistus 6 %

Lumitalvea simuloivien koejaksojen toteuttamiseen käytettiin luonnon lunta. Poikkeuksellisen leudon talven vuoksi lunta ei ollut saatavilla ennen helmikuuta, jolloin lumikoe alkoi ja eteni samalla tavalla kuin sadetuskoekin, sillä erotuksella, että laattojen ympärille asetettu pleksikehikko palveli nyt lumen pitämisessä laatan päällä (**kuva 28**). Lunta punnittiin kullekin laatalle 100 mm:n vesiarvoa vastaava määrä, ja säteilylämmittimet sulattivat lumen 7 vuorokauden sulatusjakson aikana. Sade- ja lumikäsitteilyistä syntynyt valumavesi kerättiin ja siitä analysoitiin ravinteet, kiintoaines ja sameus, sähköjohtavuus, pH ja pääionit. Myös kunkin laatan maa analysoitiin.



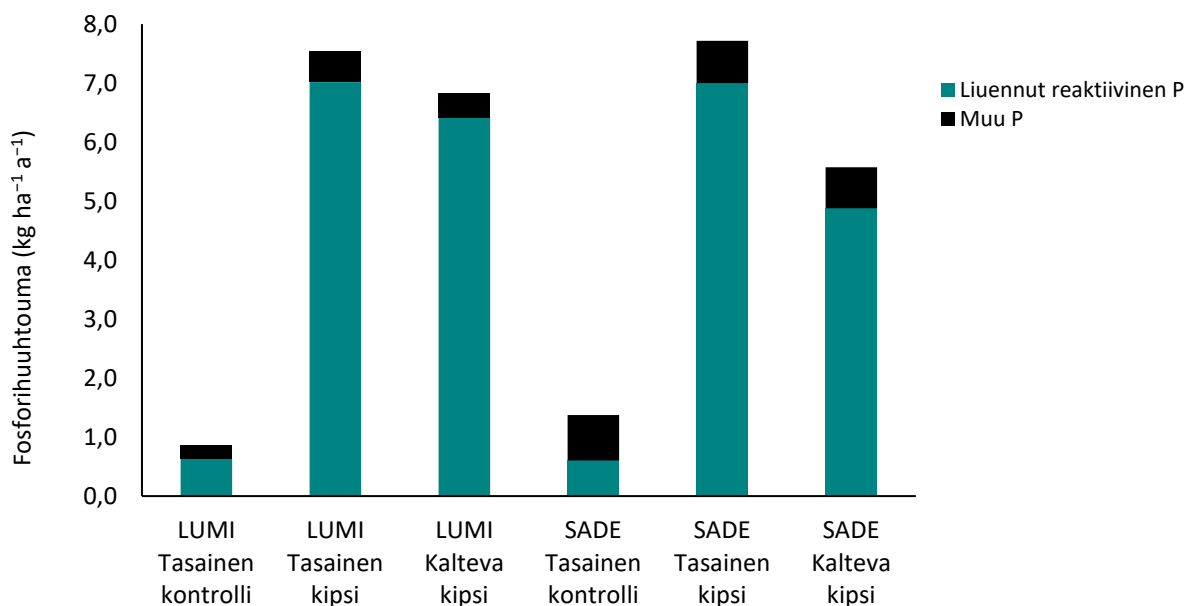
Kuva 28. Lumipeitteen sulatusta SIMUssa.

Kokeessa käytetty maa oli peräisin monokulttuuriviljalla olleelta hiuesavipelloilta, jonka satoindeksi ja rakenne olivat huonot. Lähes kaikki lumen tai sadetuksen mukana tullut vesi huuhtoutui pintavaluntana pois. Kun vuosivalunnaksi oletettiin 300 mm, saatiin maalaatoilta valuneen veden määrän ja kiintoainepitoisuuden perusteella laskennallisesti arvioitua koeolosuhteita vastaava vuosittainen eroosio. Sadepisaroiden iskut ja noin neljäasteisen veden routaa sulattava vaikutus saivat aikaan huomattavasti suuremman eroosion kuin lumen sulaminen. Suuruusluokaltaan eroosio vastasi Jokioisten savimaiden huuhtoumakentiltä viljansängeltä saatuja arvoja. Lumiyksiköissä kipsi vähensi – sinänsä melko vähäisen – eroosion alle puoleen, mutta sadetetuissa yksiköissä ei havaittu tilastollisesti merkitsevää eroa kipsikäsiteltyjen ja vertailuyksiköiden välillä (**kuva 29**).



Kuva 29. Arvio vuosittaisesta eroosiosta eri käsittelyissä (keskiarvo ja keskihajonta). Oletuksena 300 mm:n vuosivalunta.

Kipsikäsitellyiltä laatoilta huuhtoutui enemmän fosforia kuin kipsittömiltä laatoilta. Kun kipsittömiltä laatoilta fosforia huuhtoutui laskennallisesti noin $100 \text{ kg km}^{-2} \text{ a}^{-1}$, joka vastaa muissa tutkimuksissa saatua savipeltojen ominaiskuormitusta (Tattari ym. 2017), kipsikäsitellyiltä laatoilta huuhtoutui jopa lähes $800 \text{ kg km}^{-2} \text{ a}^{-1}$ (kuva 30). Valtaosa fosforista oli DRP:a, joka on leville täysin käyttökelpoista. Kokeessa käytetty Yaran kipsi sisälsi 0,28 % fosforia, ja tästä määrästä huuhtoutui kokeessa 7–31 % (taulukko 12). Kipsin sulfaatista huuhtoutui vieläkin suurempi osa (enimmillään 40 %), mikä kertoo, että osa kipsin fosforista kuitenkin sitoutui maa-ainekseen. Kipsin kalsiumista huuhtoutui enimmillään 17 %. Osa kalsiumista pidättyi maan kationinvaihtopaikoille, mikä näkyi magnesiumin ja kaliumin huuhtoutumisen kasvuna.



Kuva 30. Arvio vuosittaisesta fosforin huuhtoutumisesta.

Tulokset osoittavat, että kipsiä ei tule levittää routaiseen maahan. Routaiseen maahan levitetty kipsi, joka sisältää epäpuhtautena fosforia, voi lisätä rehevöittävän fosforin huuhtoutumista merkittävästi. Fosforittomia kipsilaatuja käytettäessä riskiä lisääntyneestä fosforihuuhtoutumista ei ole, mutta suotuista vaikutus voi jäädä vähäiseksi, jos kipsi ei pääse kontaktiin pintamaan kanssa. Lumi itsessään suojaa maata eroosiolta paljaaseen maahan kohdistuvaan sateeseen verrattuna. Myös kipsikäsittely toimi eroosion vähentämisessä lumen alla paremmin kuin lumettomassa maassa. Kaltevuus ei lisännyt eroosiota tai fosforin huuhtoutumista. Koska suurin osa huuhtoutuneesta fosforista oli liuenneessa muodossa eikä sitoutuneena eroosioainekseen, on ymmärrettävää, että kaltevuus ei vaikuttanut huuhtoutuvan fosforin määrään. Kipsin sisältämä rikki huuhtoutuu hyvin herkästi, joten kipsiä ei tule käyttää eroosion vähentämiseen järvien valuma-alueilla.

Taulukko 12. Kipsin kokonaisfosforin, sulfaatin ja kalsiumin huuhtoutuminen maalaatoilta (%).
Keskiarvo ja vaihteluväli

Käsittely	Kokonaisfosfori		Sulfaatti		Kalsium	
	Keskiarvo	Min–Max	Keskiarvo	Min–Max	Keskiarvo	Min–Max
LUMI Tasainen	19	7–31	16	11–20	12	8–16
LUMI Kalteva	18	10–29	16	9–20	13	5–17
SADE Tasainen	19	15–24	21	10–38	8	5–11
SADE Kalteva	13	8–20	28	20–40	8	5–11

8 Kipsikäsitteilyn vaikutus rannikkovesien tilaan

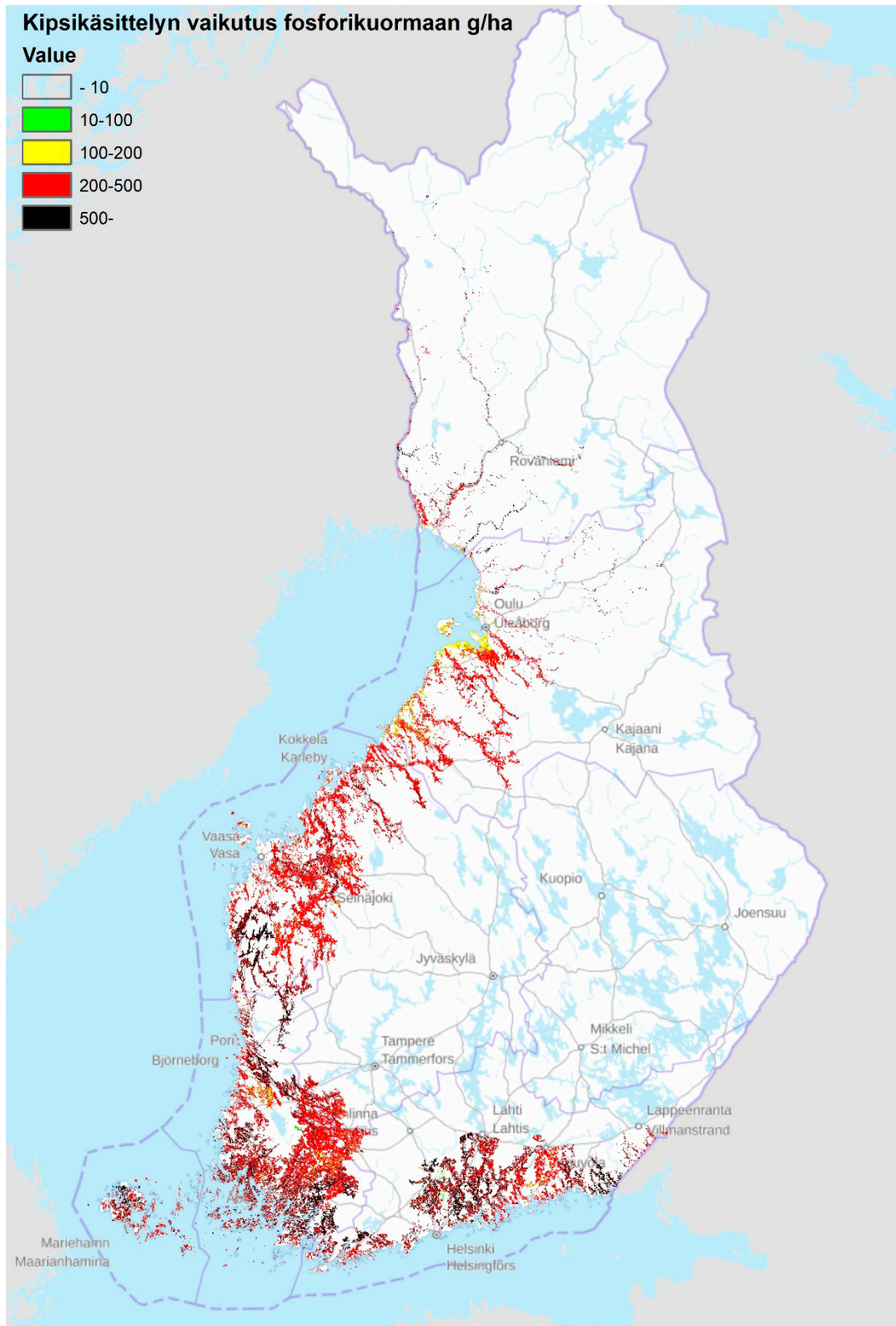
8.1 Kipsikäsitteilyn potentiaali vähentää fosforikuormitusta Suomessa

Kuinka paljon Itämereen päätyvää fosforikuormitusta voitaisiin enimmillään pienentää, jos kaikki Suomen kipsinlevitykseen soveltuvat pellot käsiteltäisiin? Kysymykseen haettiin vastausta Vemala-mallilla (Huttunen ym. 2016) olettamalla kipsin levitykseen soveltuviksi kaikki kivennäismailla olevat pellot, jotka eivät sijaitse järvien yläpuolella. Tällaisia pelloja on 10 547 km² eli 45 % kaikista pelloistamme ja 52 % Itämeren valuma-alueella olevista pelloista. Kipsinlevitykseen soveltuvia pelloja oli Saaristomeren ja Merenkurkun valuma-alueilla 82 % kokonaispeltoalasta, mutta Selkämeren valuma-alueella vain 43 % (**taulukko 13**). SAVE-hanke tiedotti potentiaalisesti kipsikelpoisia pelloja olevan puolet vähemmän (5400 km²), mutta silloisen arvion kriteerit olivat tiukempia: happamat sulfaattimaat, pohjavesialueet, Natura 2000-alueet ja Venäjälle laskevat joet oli rajattu pois (Riihimäki 2018). Arvioon ei myöskään sisältyneet Perämeren valuma-alue eivätkä saaret, joihin ei ollut kiinteää tieyhteyttä.

Peltojen fosforikuormitus arvioitiin Vemalaan sisällytetyllä peltolohkokohtaisella Icecream-mallilla. Koska Icecream-malli ei kuvaa niitä maaperäprosesseja (ks. Jaakkola ym. 2012), joihin kipsin vaikutus perustuu, kipsin oletettiin vähentävän pelloilta kulkeutuvaa fosforikuormitusta vakio-osuudella: hiukkasmaisen epäorgaanisen fosforin ja orgaanisen fosforin kuormitus pienenesi puoleen ja liuenneen epäorgaanisen fosforin neljänneksen. Tämä oletus perustui TraP-hankkeen Nummenpään pilotin tuloksiin, sillä Vemala-mallinnusta aloitettaessa Savijoen tuloksia ei vielä ollut valmiina. Fosforikuormitus arvioitiin vuosille 2021–2030 olettaen, että ilmasto muuttuu 19 ilmastomallin keskiarvoon perustuvan A1B-päästöskenaariion mukaisesti. Ilmastonmuutoksen keskimääräinen vaikutus yhden vuosikymmenen aikana on kuitenkin vähäinen. Kuormituksen kannalta suuremman epävarmuuden aiheuttaa sään normaali vaihtelu, eli millaisia vuosia sääolojen suhteen osuu tarkasteltavalle jaksolle. Kipsiskenaariossa oletettiin, että viljelykäytännöt pysyisivät kipsikäsitteilyä lukuun ottamatta nykyisen kaltaisina.

Jos kaikki potentiaalisesti kipsikelpoiset pellot käsiteltäisiin, Suomesta Itämereen päätyvä kokonaisfosforin vuosikuormitus pienenesi 433 t a⁻¹ eli 14 % vuosille 2021–2030 arvioidusta keskimääräisestä kuormasta 3109 t a⁻¹. Suhteellisesti eniten kuormitus vähenisi Saaristomerellä: sen kuormitus (442 t a⁻¹) pienenesi noin neljänneksellä (122 t a⁻¹, **kuva 31, taulukko 13**). Selkämerellä ja Suomenlahdella kuormitus vähenisi 17 %.

Käytännössä näin suuriin vähennyksiin ei kuitenkaan päästä, sillä kipsin käytössä on useita paikallisia rajoitteita, kuten luomutilat, pohjavesialueet, Natura-alueet ja pellot, joilla on liian vähän magnesiumia. Näitä paikallisia rajoitteita Vemala-mallinnuksessa ei voitu ottaa huomioon. Arvio osoittaa kuitenkin sen, että kipsillä voidaan merkittävästi vähentää pelloilta Itämereen päätyvää kuormitusta kaikilla merialueillamme, erityisesti Saaristomerellä. Jos keinovalikoimaa laajennetaan esimerkiksi rakennekalkkiin ja maanparannuskuituihin, päästöt edelleen vähenevät. Rakennekalkilla ja maanparannuskuiduilla kuormitusta voidaan vähentää myös järvien valuma-alueilla. Vaikka järvet pidättävätkin osan kuormituksesta, käsittelyalueen laajentuessa myös Itämereen päätyvä kuormitus pienenee. Tarkempi arvio kipsin vaikutuksesta edellyttäisi, ei vain paikallisten rajoitteiden ottamista huomioon, vaan myös keskeisten maaperäprosessien liittämistä malleihin ja kokeellista tutkimusta kipsin vaikutuksesta erilaisissa ympäristöoloissa.



Kuva 31. Eri merialueille Suomesta päätyvän kuormituksen vähentyminen vuosina 2021–2030, jos kaikki muut kuin järvien valuma-alueilla ja eloperäisillä mailla olevat pellot käsiteltäisiin kipsillä.

Taulukko 13. Potentiaalinen kipsin levitykseen soveltuva peltoala ja maksimaalinen fosforin kuormitusvähennys eri merialueille

Merialue	Peltoa valuma-alueella km ²	Kipsin levitykseen soveltuva peltoala		Kuormitus t a ⁻¹	Vähennys	
		km ²	%		t a ⁻¹	%
Suomenlahti	5 126	1 960	38	602	103	17
Saaristomeri	2 738	2 248	82	442	122	28
Selkämeri	5 549	2 382	43	565	98	17
Merenkurkku	1 782	1 457	82	174	28	16
Perämeri	5 088	2 500	49	1 327	82	6
Yhteensä	20 283	10 547	52	3 109	433	14

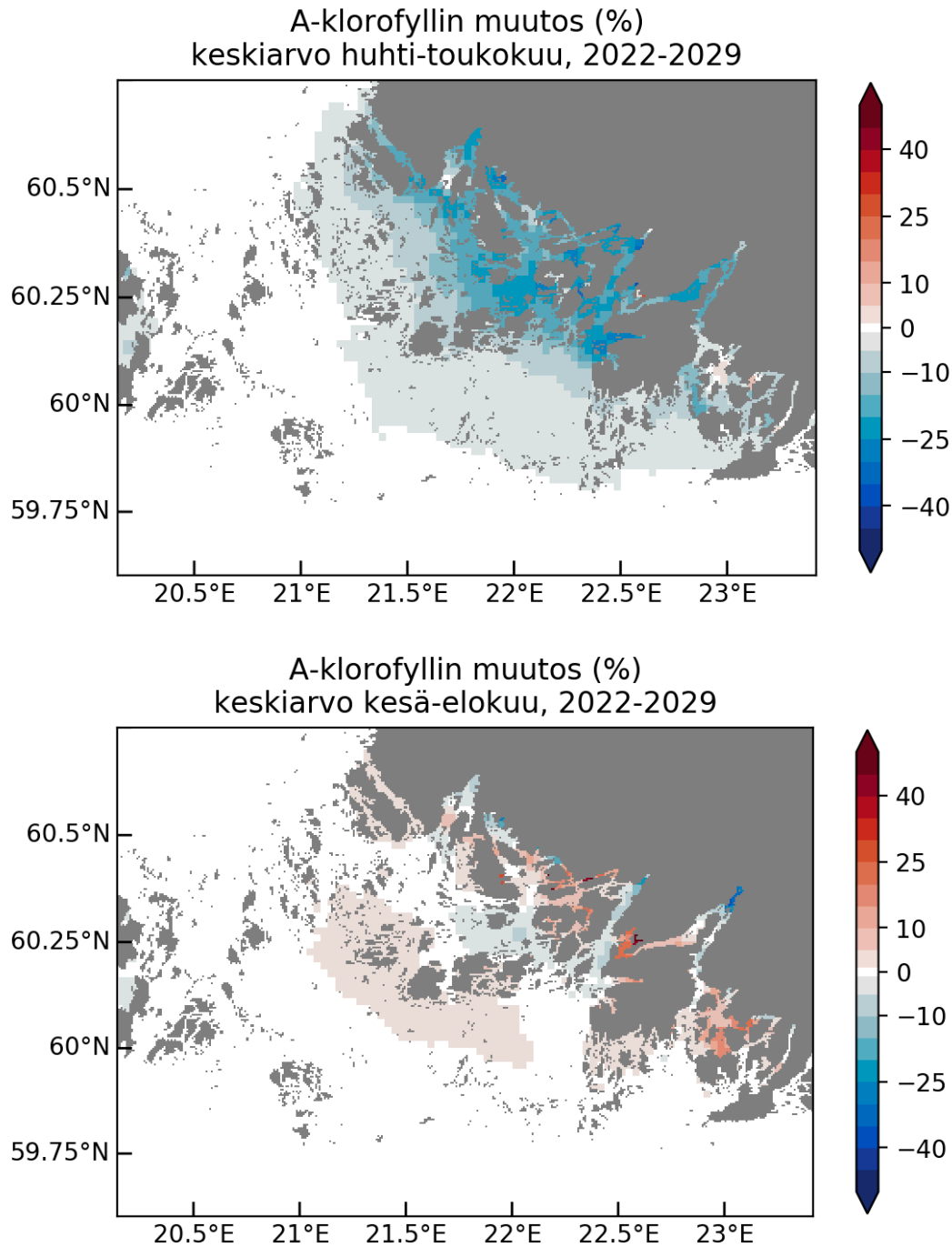
8.2 Kipsikäsittelyn vaikutus rannikkovesien tilaan

Kipsin levityksen vaikutuksia Saaristomerellä ja Selkämerellä selvitettiin viranomais- ja tutkimuskäytössä olevalla rannikon kokonaiskuormitusmallilla. FICOS-järjestelmässä (*Finnish Coastal Nutrient Load Model*) on mukana Vemala-mallin tuottaman kuormituksen lisäksi pistekuormitus, pohjasedimentistä vapautuvat ravinteet, ilmalaskeuma ja ulapan vedenvaihdon aiheuttama taustakuormitus. Ravinteet kulkeutuvat mallinnettujen kolmiulotteisten virtauskenttien kuljettamina. Virtausmallinnus on tehty yhteistyössä Ilmatieteen laitoksen kanssa. Malli kuvaa ravinteiden kokonaispitoisuuden kehitystä. Niiden levien kasvulle käyttökelpoisen osuuden avulla arvioidaan leväbiomassan muutosta (tyypeä sitovat sinilevät ja muut levät). FICOS-malli tuottaa päivittäisen ravinteiden ja leväbiomassan määrän sekä kulkeutumisen merialueilla. FICOS käyttää syöttötietoinaan säätietoa vuosilta 2006–2013. Yksittäisten ajanjaksojen tulokset ovat jo vuosien vaihtelun seurauksena hyvin erilaisia jopa ilman kuormitusmuutoksia. Siksi toimenpiteiden vaikutuksia tutkittaessa on järkevää tarkastella usean vuoden keskiarvoja. Arviot tehtiin yhden merimailin resoluutiolla, minkä avulla arvioitiin vesimuodostumatason muutokset. Yleisesti ottaen vesimuodostumatason malliajot antoivat pienempiä vaikutuksia karkeamman resoluution takia. Arviot tehtiin erikseen kullekin kuukaudelle ja koko kasvukaudelle.

Mallinnuksen avulla haettiin kipsin levityksen suurinta saatavilla olevaa hyötyä. 'Kipsiskenaario' perustuu siten yllä esitettyyn Vemala-mallin antamaan arvioon kaikkien sopivien peltojen kipsikäsittelystä niin, että käsittely uusitaan aina tarvittaessa. 'Kipsiskenaarion' vaikutus on arvioitu laskemalla alueittain kipsiskenaarion ja ns. perustilan erotus. Perustilassa kuormitussyötteinä käytetään realistisia kuormituksia ilman kipsikäsittelyä. Kipsikäsittelyn vaikutus vedenlaatuun on arvioitu leväbiomassan prosenttimääräisenä muutoksena. Levämäärä on rannikollamme tärkein pintaveden tilan ilmentäjä, jota seurataan tarkasti. Yksittäiset mallitulokset ovat saatavissa SAVE2-hankkeelta. Alla käsitellään tuloksia Saaristomeren rannikkovesien tilan yhden laatutekijään, a-klorofylliin eli lehtivihreällisten planktonlevien määrään.

Kuvassa 32 on esitetty tiivistettynä kevään ja keskikesän levämäärän muutokset Saaristomerellä historiallisten säätietojen mukaan arvioituna. Kipsikäsittelyn myötä vähenevän fosforikuormituksen vaikutus näkyy parhaiten sisäsaaristossa jokien vaikutusalueella. Sen sijaan väli- ja ulkosaaristossa toivotut vedenlaatuvaikutukset ovat melko vähäiset. Hajakuormituksen ollessa kyseessä vuodenaika vaikuttaa lopputulokseen. Keväällä vaikutus on laajempi ja voimakkaampi kuin kesällä rajoittuen merialueeseen, jossa fosfori on levien kasvua säätelevä ravinne. Kesällä suotuisat vaikutukset ovat nähtävissä vain jokisuiden lähistöllä, ja ulompana havaitaan jopa muutosta huonompaan suuntaan. Se johtuu Itämeren ainutlaatuisesta ravinnerajoitteisuudesta, jossa kesän aikana molemmat levien käyttämät pääravinteet, typpi ja fosfori, kulutetaan loppuun. Kun vesiensuojelumenetelmällä poistetaan enimmäkseen fosforia suhteessa levien käyttötärpeeseen, niin jokisuiden levätuotanto vähenee ja typpi kulkeutuu kauemmas. Typpi kulutetaan vesimassan kohdatessa käyttökelpoista fosforia, jonka lähteitä Saaristomerellä ovat erityisesti pohjasta tulevan sisäisen kuormituksen alueet.

FICOS-mallia kehitetään parhaillaan yhä tarkemmaksi. Tämänhetkisestä versiosta tiedetään, että se yliarvioi pohjalta vapautuvaa fosforia, mikä tarkoittaa, että tila-arvio on liian pessimistinen. Epävarmuutta mallituloksiin aiheutuu myös siitä, että Vemala-malli tarkastelee fosforia sellaisissa muodoissa, jotka eivät suoraan vastaa vesistä määritettyjä fosforijakeita (PP, DRP, DUP). Lisäksi FICOS-malli katsoo Vemala-mallin fosforijakeista vain liunneen epäorgaanisen fosforin käyttökelpoiseksi.



Kuva 32. Levämäärän (a-klorofyllin pitoisuuden) muutoksen arvio (prosentteina nykytilasta) pitkän ajan keskiarvona keväällä ja keskikesällä. Mallinnuksessa on käytetty vuosien 2006–2013 säähavaintoja, joita on käytetty vuosien 2022–2029 kipsikäsittelyn kuormitusmuutosten vaikutusten arviointiin. Keväällä havaittavat vähäiset alueet, joilla levämäärä näyttäisi kasvavan ovat laskentateknisiä, ts. eivät kuvaa todellista tilannetta. Kesällä levämäärän kasvaminen on seurausta vesiensuojelumenetelmästä, joka vähentää vain fosforia, ei typpeä.

Mallinnustulosten perusteella peltojen kipsikäsittelyllä on saavutettavissa nopeita myönteisiä vaikutuksia Saaristomeren sisäsaaristossa (**kuva 32**). Kauempana mahdolliset suotuisat vaikutukset toteutuvat vasta pidemmän ajan kuluessa, sillä siellä vaikuttavat enemmän avomereltä tuleva ravinnevarasto ja vuosikymmenien saatossa kertynyt sisäinen kuormitus. FICOS-malli ei toistaiseksi ota huomioon kumulatiivista, jopa vuosikymmenien aikana tapahtuvaa Saaristomeren pohja-aineksen fosforivaraston ja sen vapautumisalttiuden muutosta, joten pitkäaikainen vaikutus Saaristomeren vedenlaatuun voi ulottua paljon kauemmaksikin rannikosta. Siihen vaikuttaa myös pohjaan laskeutuvan ja happea kuluttavan sisäistä fosforikuormitusta aiheuttavan aineksen väheneminen. Suurin osa levistä laskeutuu pohjalle juuri keväällä, jolloin kipsikäsittelyn vaikutus on tehokkain. Parhaan vaikutuksen saavuttaminen edellyttää kuitenkin, että fosforikuormituksen lisäksi vähennetään myös typen kuormitusta. Kipsi voi hieman vähentää liuenneen orgaanisen typen huuhtoutumista, mutta kipsikäsittelyä ei voida pitää tehokkaana typpikuormituksen leikkaajana.

9 Kipsin ja rakennekalkin taloudellinen analyysi: kustannusvaikuttavuus- ja yhteiskunnalliset nettohyödyt

Kipsin ja rakennekalkin vesiensuojelukäytön kustannusvaikuttavuutta ja yhteiskunnallisia nettohyötyjä arvioitiin ottamalla huomioon niiden fosforihuuhtoumaa vähentävä vaikutus sekä valmistuksesta ja käytöstä syntyvät kasvihuonekaasupäästöt. Kustannusvaikuttavuusluku kertoo kuinka monta euroa yhden fosforihuuhtoumayksikön vähentäminen näillä toimin maksaa. Se saadaan jakamalla maanparannusaineiden käytön kustannus saavutetulla fosforihuuhtouman vähennyksellä annettua pinta-alayksikkö kohden. Tätä lukua voidaan verrata toisilla sektoreilla tehtävien vesiensuojelutoimien vaikuttavuuslukuihin. Yhteiskunnallinen nettohyöty puolestaan ottaa huomioon viljelijän saaman yksityisen voiton viljelystä ja vähentää siitä ravinne- ja ilmastohaittojen yhteiskunnallisen arvon.

9.1 Lähtötiedot

Taloudellinen laskenta tehtiin kolmelle kiertotaloustuotteelle: fosforihappotuotannon sivutuotteena syntyvälle kipsille, kalkinpolton suodinpölystä valmistetulle rakennekalkille sekä metsäteollisuuden kierrätysmateriaalista valmistetulle rakennekalkille. Fosforihuuhtouman vähennyslukujen osalta analyysissä tehtiin seuraavat valinnat. Aiempiin tutkimuksiin nojaten kipsin katsottiin perustapauksessa vähentävän hiukkasmaista fosforia 50 % ja liuennta fosforia 25 %. Tässä raportissa esitetyt tulokset osoittavat kuitenkin huuhtoumavaikutukselle tätä laajempaa vaihteluväliä, sillä vähennysprosentit poikkesivat Savijoki-pilotissa seuranta-alueittain. Hiukkasmaisen fosforin vähennys vaihteli noin välillä 20–70 %. Liuenneen fosforin osalta tulokset vaihtelivat 24 prosentin vähennyksestä 13 prosentin lisäykseen. Tämän epävarmuuden vuoksi herkkyysanalyysillä tarkasteltiin, kuinka mitatut alarajat vaikuttavat kipsin kustannusvaikuttavuuteen ja yhteiskunnallisiin nettohyötyihin. Rakennekalkille valittiin vastaaviksi luvuiksi ruotsalaisten ja suomalaisten tutkimusten nojalla 40 % vähennys hiukkasmaiselle fosforille ja 0 % liuenneelle fosforille. Herkkyysanalyysinä tarkasteltiin sekä 30 % että 50 % vähennystä.

Tehtyjä valintoja sovellettiin Saaristomeren valuma-alueeseen. Laskennassa oletettiin, että peltomaan viljavuusfosforiluku on Saaristomeren valuma-alueen keskimääräinen 15,9 mg l⁻¹. Oletuskasvina oli Suomessa laajasti viljely ohra, jota viljellään ympäristötukiehtojen mukaisesti. Käyttämällä fosforin huuhtoumafunktioita ja tavanomaisia oletuksia eroosion määrästä, tuottaa viljavuusluku fosforin kokonaishuuhtoumaksi 1,81 kg ha⁻¹, josta liuennta fosforia 0,50 kg ha⁻¹ ja hiukkasmaista fosforia 1,31 kg ha⁻¹ (Saarela 1995, Uusitalo ja Jansson 2002). Kipsiä oletettiin levitettävän 4 t ha⁻¹. Kummankin rakennekalkilaadun osalta oletettiin, että reaktiivista kalkkia (CaO) levitetään 1,2 t ha⁻¹, jotta vaikutus fosforikuormitukseen on identtinen. Tällöin sivuvirtapohjaista rakennekalkkia levitetään 5 t ha⁻¹ ja kierrätysmateriaaleista valmistettua rakennekalkkia 3,6 t ha⁻¹. **Taulukkoon 14** on raportoitu maanparannusainekäsittelyn jälkeen pellolta huuhtoutuva fosforikuorma perusoletuksilla.

Taulukko 14. Fosforihuuhtouma maanparannusaineita käytettäessä, kg ha⁻¹

	Nykytila, keskiarvo	Kipsi teollisuuden sivutuote	Sivuvirtapohjainen rakennekalkki	Rakennekalkki kierrätysmateriaaleista
DRP	0,50	0,37	0,50	0,50
PP	1,31	0,66	0,79	0,79
TP	1,81	1,03	1,28	1,28

Perustapauksessa maanparannusaineiden erot huuhtoumavaikutuksissa ovat suhteellisen pienet, mutta kipsi lähes puolittaa huuhtouman. Merkittävin ero aineiden välillä koskee liuenneen fosforin huuhtoumaa, jota kipsi vähentää, mutta rakennekalkkilaadut eivät. Liuennut fosfori on välittömästi käyttökelpoinen levien kasvuille. Maanparannusaineiden ei ole havaittu merkittävästi vähentävän typpikuormaa.

Taulukossa 15 raportoidaan maanparannusaineiden kasvihuonekaasupäästöt. Niiden tuotannon päästöjen määrittäminen perustuu elinkaarianalyysiin¹. Kuljetuksen päästöt riippuvat kuljetusetäisyydestä kohteeseen, tässä tapauksessa Saaristomerellä. Kipsin osalta päästöt raportoidaan Savijoen pilottihankkeesta toteutuneen keskimääräisen kuljetusetäisyyden, 450 km mukaan. Rakennekalkkia on saatavilla Etelä-Suomesta, joten sen kuljetusmatka on merkittävästi lyhyempi kuin kipsillä, 65 km². Maanparannusaineiden levityksen ja rakennekalkin tapauksessa peltomaan muokkauksen aiheuttamat fossiilisten polttoaineiden käytön päästöt määriteltiin VTT:n kertoimien mukaan.

Kierrätysmateriaalista valmistettu rakennekalkki ja kipsi tuottavat pienimmät kokonaispäästöt. Kipsin päästöjä kasvattaa pitkä kuljetusmatka ja rakennekalkin taas sen käytössä vaadittava peltomaan kaksoismuokkaus. Sivuvirtapohjaisen ja kierrätysmateriaalipohjaisen rakennekalkin erot luvuissa perustuvat arvioihin niiden valmistuksen synnyttämistä kasvihuonekaasu- (KHK) päästöistä.

Taulukko 15. Kasvihuonekaasupäästöt, materiaali- kuljetus- ja levityskustannukset

	Kipsi, teollinen sivutuote		Sivuvirtapohjainen rakennekalkki		Rakennekalkki kierrätysmateriaaleista	
	Päästöt kg CO ₂ e ha ⁻¹	Kustannus € ha ⁻¹	Päästöt kg CO ₂ e ha ⁻¹	Kustannus € ha ⁻¹	Päästöt kg CO ₂ e ha ⁻¹	Kustannus € ha ⁻¹
Tuote	42,8	72,6	1 996	132	13,1	83,7
Kuljetus	54,2	129	9,79	23,2	7,05	16,7
Levitys	19,6	26,0	19,6	26,0	19,6	26,0
Muokkaus	0	0,00	39,2	70,6	39,2	70,6
Yhteensä	117	227	2 065	252	79,0	197

Taulukkoon 15 on raportoitu myös arvio kustannuksista. Tuotteiden yksikköhinnat ovat 18,15 € t⁻¹ kipsille ja kummallekin rakennekalkille 34,50 € t⁻¹. Rakennekalkin oletetaan korvaavan viljelyohjelmassa maatalouskalkin käyttöä pH:n ylläpitäjänä, minkä vuoksi rakennekalkin kustannuksena huomioitiin ainoastaan kustannusero maatalouskalkin 4,5 t ha⁻¹ levitykseen hinnalla 9 € t⁻¹. Kuljetuksen, levityksen ja muokkauksen osalta kaikille maanparannusaineille sovelletaan samoja yksikkökustannuksia. Peltomaan muokkauksista koskevissa luvuissa on oletuksena, että rakennekalkki muokataan maahan suositusten mukaisesti kahdesti, jotta vesiensuojelun kannalta tarvittavat maaperäkemialliset reaktiot toteutuvat. Lisäksi oletetaan, että tarvittava levitys- ja muokkaukskalusto on heti käytössä, jotta rakennekalkki saadaan levitettyä ja muokattua maahan 48 tunnin kuluessa ja reaktiivinen kalkki säilyy tehovoimaisena. Jos nopea levitys ja muokkaus ei onnistu, vesiensuojeluhyötty pienenee.

¹ Kierrätysmateriaalipohjaisen rakennekalkin osalta luvut ovat valmistajan ilmoittaman elinkaari-laskelman tuloksia. Kierrätysmateriaali tulee metsäteollisuuden useaan kertaan kierrätetyistä kalkkimateriaaleista, jonka saatavuus on rajallinen (SoilFood, henkilökohtainen tiedonanto) Sivuvirtapohjaisen rakennekalkin ja kipsin päästölaskelmassa on käytetty taloudellista allokointia ja arviot on tehty kirjallisuus- ja tilastolähteisiin pohjautuen. Laskelmat eivät siten välttämättä kuvaa valmistajien laskelmia. Kierrätysmateriaaleista valmistelun rakennekalkin kasvihuonekaasulaskelmia hanke ei ole voinut tarkistaa.

² Kuljetusetäisyyden roolia kasvihuonekaasupäästöihin voi arvioida huomioiden, että päästöt laskevat 1,51 kg CO₂e jokaista 50 km kohden ajoetäisyyden lyhentyessä. Esimerkiksi Selkämerelle ja Suomenlahdelle kipsin kuljetusetäisyys on jonkin verran lyhyempi kuin Saaristomerelle.

9.2 Kustannusvaikuttavuus- ja nettohyötyanalyysi

Taloudellista analyysia varten tehtiin oletuksia huuhtoumavähennyksen kestosta sekä vaikutuksesta satoihin. Suomalaiset tutkimukset osoittavat, että sekä kipsi että rakennekalkki vähentävät fosforihuuhtoumaa viisi vuotta (kipsin osalta Savijoen pilotti, rakennekalkin osalta (Soinne, kirjallinen tiedonanto 29.6.2022)). Suomessa ei ole tarkkoja mittauksia rakennekalkin vaikutuksesta satoon. Ruotsalaisissa tutkimuksissa tulokset vaihtelevat negatiivisista lievästi positiivisiin satovaikutuksiin. Koska rakennekalkin katsottiin vesiensuojelukeinona korvaavan maatalouskalkkia pH:n hallinnassa, laskennassa käytettiin lähtöarvona nollavaikutusta, eli sama satovaikutus kuin maatalouskalkilla. Herkkyysanalyysissa tarkasteltiin myös tapausta, jossa rakennekalkki toisi lisäksi 2 % satovaikutuksen olettaen, että vaikutus säilyy koko viiden vuoden ajan.

Kustannusvaikuttavuusanalyysi tehtiin käyttäen kahta kustannuskäsitettä: maanparannusaineiden välittömät käsittelykustannukset (**taulukossa 16 I**) ja yhteiskunnalliset kokonaiskustannukset, joissa käsittelykustannuksiin lisätään kasvihuonekaasupäästöjen aiheuttaman ilmastohaitan rahallinen arvo (**taulukossa 16 I + KHK**). Kummassakin tapauksessa kustannus jaetaan vähennetyllä fosforikuormalla. Vertailun avulla voidaan tunnistaa, millä keinolla huuhtoumavähennys saadaan pienimmän kustannuksin.

Taulukko 16. Kipsin ja rakennekalkin kustannusvaikuttavuus laskettuna käsittelykustannuksen avulla (I) sekä kokonaiskustannuksena kasvihuonekaasupäästöt huomioiden (I+KHK) hehtaaria kohden

	Fosforikuorman vähennys, kg ha ⁻¹ a ⁻¹	Kustannusvaikuttavuusluku (€ kg ⁻¹ P)	
		I	I + KHK
Kipsi	0,78	58,2	59,3
Sivuvirtapohjainen rakennekalkki	0,53	95,9	145
Rakennekalkki kierrätysmateriaaleista	0,53	75,1	89,9

Kustannusvaikuttavuusluvut osoittavat, että kipsi on merkittävästi kustannusvaikuttavampi keino vähentää fosforikuormaa kuin sivuvirtapohjainen rakennekalkki. Myös ero kipsin ja kierrätysrakennekalkin välillä kääntyy kipsin eduksi sen vähentäessä enemmän fosforihuuhtoumaa. Rakennekalkkilaatujen kustannusvaikuttavuusluvut poikkeavat kierrätysmateriaalista valmistetun laadun hyväksi. Ero syntyy tarvittavista määristä, mutta myös rakennekalkkilaatujen arvioiduista tuotantopäästöistä. Jos rakennekalkin oletetaan lisäävän satoa 2 %, säilyy kipsi edelleen kustannusvaikuttavimpana keinona.

Yhteiskunnallisten nettohyötyjen määrittäminen auttaa varmistamaan, kannattaako maanparannusaineita ottaa käyttöön lainkaan suhteessa nykytilaan. Jotta näin olisi, tulee maanparannusaineiden yhteiskunnallisen nettohyödyn olla suurempi kuin nettohyöty, joka saadaan viljelystä ilman maanparannusaineita. Vesistöhaitan yhteiskunnallisena arvona käytetään 9 € kg⁻¹ tyyppiä, josta Redfield-suhdeluvun avulla saadaan haitta fosforille³. Ilmastohaitan arvona on käytetty 35 € t⁻¹ CO_{2e}. Kummankin haitta-arvon valinta perustuu tyypillisiin arvoihin kirjallisuudessa, mutta korkeampiakin haitta-arvoja on käytetty, eli arvojen valinta ei ole yksikäsitteinen. Tulokset esitetään **taulukossa 17**.

³ Redfield-suhdeluku kertoo, missä suhteessa levät käyttävät ravinteita kasvuunsa. Suhde N:P vastaa suhdetta 7.2:1, eli yhtä fosforyyksikköä kohden levät käyttävät 7.2 typpiyksikköä. Typpi- ja fosforiekvivalentit ovat usein käytettyjä käsitteitä ravinnehuuhtoumapolitiikan analyysissa, sillä kumpikin ravinne aiheuttaa vesistöjen rehevöitymistä.

Taulukko 17. Yksityiset voitot ja yhteiskunnalliset nettohyödyt ilman maanparannusaineita (perustapaus) ja niiden kanssa nykyarvoisena yli 5 vuoden tarkastelujakson (€ ha⁻¹), kun diskonttokorko on 3 % (perustapauksen ylittävät arvot tummennettu)

	Yksityinen voitto (nykyarvo)	Yhteiskunnallinen nettohyöty (nykyarvo)		
		P	KHK	P + KHK
Viljelyn perustilanteen analyysi				
Viljely ilman maanparannusaineita	1 518	966	950	397
Kipsikäsitteily	1 291	977	718	404
Sivuvirtapohjainen rakennekalkki	1 267	874	568	176
Rakennekalkki kierrätysmateriaaleista	1 321	929	714	321
Herkkyysanalyysi: vaikutus fosforihuuhtoumaan				
Kipsikäsitteily (PP 34 %, DRP 0 %)	1 291	875	718	302
Kipsikäsitteily (PP 72 %, DRP 25 %)	1 291	1 065	718	492
Sivuvirtapohjainen rakennekalkki: 30 % PP	1 267	834	568	136
Sivuvirtapohjainen rakennekalkki: 50 % PP	1 267	914	568	216
Rakennekalkki kierrätysmateriaaleista : 30 % PP	1 321	889	714	281
Rakennekalkki kierrätysmateriaaleista: 50 % PP	1 321	969	714	361
Herkkyysanalyysi: satovaikutus				
Sivuvirtapohjainen rakennekalkki: 2 % lisäys	1 339	947	641	248
Rakennekalkki kierrätysmateriaaleista: 2 % lisäys	1 394	1 001	786	394

Taulukko 17 osoittaa hyvin, että yksityisen viljelijän ei kannata käyttää maanparannusaineita vesiensuojelutarkoituksiin, koska yksityinen voitto jää niiden hankinnan ja levityksen kustannusten vuoksi alhaisemmaksi kuin viljelyssä ilman maanparannusaineita (perustapaus, ensimmäinen sarake). Jos tarkastellaan pelkästään huuhtoumaa ja sivuutetaan maanparannusaineiden KHK-päästöt, niin yhteiskunnan näkökulmasta ainoastaan kipsin käyttäminen vesiensuojelukeinona on perusteltua, koska sen käyttö tuottaa suuremmat nettohyödyt kuin viljely ilman sitä. Kierrätysrakennekalkki tulisi 2 % sadonlisällä perustapausta kannattavammaksi, mutta sivuvirtapohjaiselle rakennekalkille 2 % sadonlisä ei vielä riittäisi tekemään käytöstä perustapausta kannattavampaa.

Kasvihuonekaasupäästöt aiheuttavat ilmastohaittaa ja siten negatiivisen ulkoisvaikutuksen, mikä ilmenee maanparannusaineiden alhaisena nettohyötynä, jos vain KHK-päästöt otetaan huomioon (kolmas sarake). Niiden huomioiminen osana vesiensuojelutoimia laskee kummankin maanparannusaineen nettohyötyjä, mutta kipsi tuottaa edelleen suuremman nettohyödyn kuin perustapaus, eli kipsikäsitteily kannattaa ottaa käyttöön.

Taulukosta ilmenevä yhteiskunnallisen hyödyn ja yksityisen voiton ero, joka syntyy rehevöitymisen aiheuttamasta ulkoisvaikutuksesta, perustele aktiivisia politiikkatoimia vesiensuojelun voimistamiseksi myös silloin, kun maanparannusaineiden KHK-päästöt otetaan huomioon.

Herkkyysanalyysin avulla tarkasteltiin, kuinka keskeiset epävarmuustekijät, erityisesti maanparannusaineiden kyky vähentää fosforihuuhtoumaa, vaikuttavat tuloksiin. Sekä kipsin että rakennekalkin osalta tarkasteltiin alhaisempaa ja korkeampaa huuhtoumavähennysvaikutusta, edellisen laskiessa ja jälkimmäisen nostaessa kummankin nettohyötyä. Taulukkoon raportoitujen tietojen ohella tarkasteltiin peltojen maaperän kunnon roolia kasvattamalla maan eroosioalttiutta ja fosforitilaa. Herkkyysanalyysi osoittaa, että maanparannusaineet tuottavat suurimman hyödyn pelloilla, joilla on joko korkea viljavuusfosforiluku tai suuri eroosioalttiutus. Kumpikin lisäävät maanparannusaineiden käytöstä saatavia yhteiskunnallisia nettohyötyjä. Huomaa, että tässä on oletettu kummankin maanparannusaineen reduktioprosentin olevan riippumaton pellon kuormittavuudesta.

Yhteiskunnan arvostusta puhtaaseen luontoon kuvaavat ravinnehuuhtouma- ja ilmastohaitat. Huuhtoumahaitan rahallisen arvon nousu kasvattaa maanparannusaineiden kannattavuutta, kun taas ilmastohaitan arvon kasvu laskee kummankin nettohyötyä jo suhteellisen nopeasti lisäten no significant

harm –periaatteen mukaista varovaisuutta erityisesti sivuvirtapohjaisen rakennekalkin käytön suhteen. Siirtyminen biopolttoaineisiin kuljetuksessa ja peltotyössä laskisi kummankin maanparannusaineen ilmastohaittaa.

Koko maan tasolla tarvittavia maanparannusaineiden levitysmääriä, fosforihuuhtouman laskua ja kasvihuonekaasupäästöjä tarkasteltiin seuraavasti. Syke on arvioinut, että Suomessa kipsiä voitaisiin levittää noin 1,0547 Mha alalle (Ekholm et al. 2022). Savijoen pilotissa viljelijöiden osallistumisaste oli 51,5% (Ollikainen ym. 2021). **Taulukossa 18** sovelletaan tätä osallistumisprosenttia ja oletetaan, että joko kipsiä tai sivuvirtapohjaista rakennekalkkia levitetäisiin 540 000 hehtaarin alueelle. Kierrätysmateriaalipohjaisen rakennekalkin saatavuus on nykytiedoin niin alhainen, että se ei toimisi valtakunnallisena ratkaisuna. Laskennassa oletetaan, että fosforihuuhtouma ennen käsittelyä on 977 tonnia.

Taulukko 18. Fosforihuuhtouman lasku (t/a) ja KHK-päästöt (Mt), kun kipsiä ja sivuvirtapohjaista rakennekalkkia levitetään 540 000 hehtaarin alalle

	Kipsi	Sivuvirtapohjainen rakennekalkki
Levitetty määrä, Mt	2,2	2,7
DRP, t	67	0
PP, t	354	284
TP, t	421	284
KHK-päästöt, Mt CO ₂ e	0,063	1,11

Käytettävät maanparannusaineiden määrät ovat mittavia. Pienet erot hehtaarikohtaisessa fosforihuuhtoumassa kasvavat suhteellisen suuriksi ja kipsin eduksi koko maan tasolla. Myös kipsin kasvihuonekaasupäästöt jäävät varsin pieneksi verrattuna sivuvirtapohjaiseen rakennekalkkiin. Täten olisi järkevää käyttää kipsiä ja rakennekalkkia yhdessä niin, että rakennekalkkia, erityisesti kierrätysmateriaaleista valmistettua rakennekalkkia, käytetään juuri alueille, joihin kipsi ei sovellu.

9.3 Johtopäätökset

Johtopäätöksenä tarkastelusta voi todeta, että kipsi on useimmissa tapauksissa yhteiskunnallisesti perusteltu ja hyvinvointia kasvattava vesiensuojelutoimi. Jotta kierrätysmateriaalista valmistettu rakennekalkki olisi kannattavaa ottaa käyttöön, tulisi sen huuhtoumavähennysvaikutuksen olla 50 % tai satoa kasvattavan vaikutuksen selvästi suurempi kuin mitä saavutetaan maatalouskalkilla. Kipsi ja rakennekalkki täydentävät luontevasti toisiaan ja mahdollistavat nopeavaikutteisten vesiensuojelutoimien käyttöönoton kaikilla vesiensuojelun kannalta herkillä alueilla, mikä antaa aikaa peltojen korkeiden viljavuusfosforitasojen alentamiseen. Tarkastelu antaa tukea SAVE-hankkeen aiemmille suosituksille, joiden mukaan kipsiä tulisi suosia kaikilla alueilla, joihin kipsi soveltuu (pääkriteerinä se, että vedet laskevat mereen), ja kierrätysrakennekalkkia alueille, joihin kipsikäsitteily ei sovellu (vedet laskevat sisävesiin). Tarkastelu korostaa myös maanparannusainekäsittelyn kohdentamista: suurin vesiensuojeluhuöty ja yhteiskunnallinen nettohyöty saadaan, kun maanparannusaineita käytetään pelloilla, joilla on joko korkea viljavuusfosforin taso tai suuri eroosioalttius. On myös mahdollista, että tällaisilla pelloilla kummankin maanparannusaineen tuottama prosentuaalinen fosforikuormituksen vähennys on suurin, mikä yhä korostaisi kohdennuksen merkitystä.

Kipsi ja rakennekalkki poikkeavat toisistaan siinä, että onnistuakseen vesiensuojeluratkaisuna rakennekalkki tulee levittää nopeasti ja muokata maaperään erittäin huolellisesti, jotta se sekoittuisi hyvin maahan ja mahdollistaisi halutut kemialliset reaktiot. Ilman tätä vesiensuojeluhuöty voidaan menettää. Rakennekalkin menestyksellisen käytön edistämiseksi on tarpeen viljelijöille tarjottu informaatio-ohjaus.

10 Tulosten tarkastelu

10.1 Valuma-aluekokeiden haasteita

Maatalouden vesiensuojelumenetelmien tulisi perustua yhtäältä vaikutusmekanismien teoreettiseen ymmärrykseen ja toisaalta menetelmien käytännössä koeteltuun tehoon, soveltuvuuteen ja hyväksyttävyyteen. Menetelmiä on siis tutkittava ja koeteltava eri mittakaavoissa. Mekanismeja voidaan parhaiten selvittää systemaattisilla laboratorioskokeilla, joista voidaan siirtyä luonnonoloja paremmin kuvaaviin lohkotason kokeisiin ja lopulta valuma-aluepilotteihin. Uusien kysymysten noustessa esille voidaan joutua palaamaan laboratorioon.

Valuma-alueella testataan menetelmän todellista kykyä vähentää ravinnekuormitusta laajalla alueella. Samalla on mahdollista saada tietoa käytännön toteutettavuudesta ja hyväksyttävyydestä sekä sivuvaikutuksista. Siinä, missä peltolohkokokeet ovat sidottuja yksittäisen pellon ominaisuuksiin ja ovat yleensä jonkin tutkimusorganisaation tarkoin toteuttamia, valuma-alueella on maaperältään, kaltevuudeltaan ja viljelytavoiltaan erilaisia peltoja. Lisäksi toimenpiteiden toteuttajina ovat viljelijät, urakoitsijat ja neuvojat osana todellista työtä. Valuma-alue voi myös paljastaa jokikulkeutumisen aikaisia prosesseja, jotka eivät tule esille peltolohkokokeissa.

Valuma-alue tutkimusten ongelmana on se, että alueella on yleensä muitakin maankäyttömuotoja kuin peltoja, ja pelloistakin usein vain osalla sovelletaan tutkittavaa menetelmää. Käsitellyn alan pitääkin kattaa tarpeeksi suuri osa valuma-alueesta, jotta toimenpiteen vaikutus erottuu sääolojen ja mittausepävarmuuden tuottamasta vaihtelusta. Samalla on vain toivottava, että ”todellisuus” ei muutu liikaa siitä, mitä se oli tutkimusta suunniteltaessa. Esimerkiksi viljelykäytäntöjä ei voida kontrolloida, sillä viljelijät päättävät niistä vuosittain, jolloin tutkimuskysymykseen kuulumattomat tekijät alkavat vaikuttaa tuloksiin. Ihannetapauksessa valuma-alueen peltojen osuus, ja erityisesti käsittelyala, olisivat mahdollisimman korkeat, vertailualue mahdollisimman samankaltainen toimenpidealueen kanssa ja seurantajakso ennen toimenpidettä kattaisi mahdollisimman hyvin erilaisia hydrologisia oloja. Lisäksi ulkopuolisten tekijöiden vaikutus jäisi vähäiseksi.

Savijoella peltojen osuus vaihteli vertailualueen 39 %:sta ylemmän käsittelyalueen 50 %:iin. Ennen kipsin levitystä pellot vastasivat noin 97 %:sta käsittelyalueen PP-huuhtoumasta, 92 %:sta DRP-huuhtoumasta, mutta vain 20 %:sta DOC-huuhtoumasta. Vaikka SAVE-hankkeessa tehty kipsikäsittely oli toteuttamisajankohtana ennätyskellisen laaja, koko tutkimusalueen pelloista vain 43 % käsiteltiin kipsillä. Kipsillä käsiteltävien peltojen osuus PP-huuhtoumasta (ennen kipsikäsittelyä) oli ylemmällä käsittelyalueella 45 % ja alemmalla käsittelyalueella 52 %. DRP:n osalta osuudet olivat 44 % ja 49 %, mutta DOC:sta vain 11 % ja 10 %. Jos kipsikäsittely puolittaisi huuhtoumat, pienenesi Savijoen kuljettaman PP:n määrä ylemmällä käsittelyalueella 23 % ja alemmalla käsittelyalueella 26 %. Tällainen muutos voitaneen todeta jatkuvatoimisten anturien avulla. DOC:n vähenemä olisi kuitenkin vain noin 5 %. Siten arviot DOC-huuhtouman vähenemisestä ovat huomattavasti epävarmempia kuin arviot PP-huuhtouman vähenemisestä. DRP-huuhtoumaa koskevat arviot taas ovat epävarmoja, koska ne perustuivat vain vesinäytteisiin. **Liitteessä 3** havainnollistetaan PP-huuhtoumien osalta eroa, joka syntyy, kun kipsin teho arvioidaan sensoriaaineiston sijasta vesinäytteiden perusteella.

Savijoella ehkä suurimmaksi haasteeksi muodostui huuhtoumien osittaminen kipsillä käsiteltyjen ja käsittelemättömien peltojen välillä, sillä käsittelyalueen pellot vaikuttivat olevan eroosioherkempiä kuin vertailualueen pellot. Tässä työssä oletimme, että vertailualueen peltojen ja käsittelyalueiden kipsillä käsittelemättömien peltojen suhteellinen kuormitusero pysyi kipsin levityksen jälkeen samansuuruisena kuin vain noin puoli vuotta kestäneellä jaksolla ennen kipsin levitystä. Toisin sanoin oletimme, että käsittelyalueen pellot olisivat ilman käsittelyä olleet kaikilla jaksoilla suhteessa saman verran kuormittavampia kuin vertailualueen pellot kuin mikä tilanne vallitsi ennen kipsikäsittelyä. Jos näin ei ollut, kipsin tuottamaa vähennystä on liioiteltu (jos ero on todellisuudessa pienempi) tai vähätelty (jos

ero on todellisuudessa suurempi). Eron suuruuteen voi vaikuttaa esimerkiksi sateisuus ja lämpötila. Savijoella vertailujakso – kevät 2016 – oli tosin melko tyyppillinen keskivalunnan ollessa $13,8 \text{ l s}^{-1} \text{ km}^{-2}$ ja valunnan muodostuessa sekä lumensulamamisesta että kevätsateista.

Toinen Savijoen ongelma muodostui siitä, että vertailualue sijaitsi valuma-alueen latvoilla, jossa uomaprosessit voivat poiketa joen keskijuoksulla sijaitsevasta käsittelyalueesta (ks. luku **10.3**). Lisäksi luotettavaa valumatietoa oli saatavilla vain vertailualueelta. Entä muuttuiko ”todellisuus” Savijoen tutkimusalueella? Tähän voidaan vastata vain peltojen kasvipeitteisyyden osalta. Vaikka nurmien, aidon kasvipeitteisyyden ja kevytmuokkauksen osuudet vaihtelivat vuodesta toiseen ja alueelta toiselle, kaikilla alueilla havaittiin yleinen kasvipeitteisyyden kasvu ja talviaikaisen paljaan alan lasku (**liite 5**). Mikäli vertailualueella ja käsittelyalueilla kehitys olisi ollut vastakkainen, kipsin vaikutuksen arviointi olisi tullut yhä vaikeammaksi.

Myös TraP-hankkeen Nummenpäässä toteuttamassa pilotissa vertailujaksona oli vain kipsikäsittelyä edeltävä kevät (2008), mutta kipsikäsittelyn jälkeisiä (syksy 2008 – kevät 2013) tuloksia verrattiin myös käsittelemättömään naapurialueeseen, Lepsämänjoen yläosaan (23 km², peltoa 35 %). Nummenpään valuma-alueen (2,45 km²) yläosa oli metsää, jolta tuleva kuormitus todettiin vesinäyttein vähäiseksi. Alaosa muodostui savivaltaisista pelloista, joista peräti 91 % käsiteltiin kipsillä syyskesällä 2008. Vantaanjoen kipsihankkeessa ennen kipsiä -jakso käsitti vuodet 2014–2018, ja kipsillä käsiteltiin noin 40 % Lepsämänjoen yläosan valuma-alueen pelloista (330 ha) vuosina 2018 ja 2019.

10.2 Kipsin teho

Käsittelyalueiden PP-virtaamien suhde vertailualueen PP-virtaamiin oli kipsin levityksen jälkeen pienempi kuin ennen levitystä. Poikkeuksen muodosti vain kevät 2020 alemmalla käsittelyalueella. Jos PP-virtaamien vähenemän oletetaan johtuvan yksinomaan kipsistä, voidaan laskea, että vajaan viiden vuoden keskiarvona Savijoen ylemmän käsittelyalueen kipsikäsitellyiltä pelloilta huuhtoutui 72 % vähemmän PP:a kuin käsittelemättömiltä pelloilta. Alemmalla käsittelyalueella vähennys oli kuitenkin vain 19 % ja koko alueella 34 %. Viimeiselläkin jaksolla, keväällä 2021 kipsikäsitellyllä tuntui vielä olevan tehoa, joten kipsin vaikutusaika lienee yli viisi vuotta. Tähän voisi viitata myös se, että kipsin sulfaatista oli huuhtoutunut vajaan viiden vuoden aikana vasta noin 48 % ja kalsiumista luultavasti vieläkin vähemmän. Kipsin teho näyttää kuitenkin heikentyvän ajan myötä. TSS-huuhtoumien vähentyminen oli voimakkaampaa kuin PP-huuhtoumien, mikä on outoa, sillä TSS- ja PP-pitoisuudet korreloivat hyvin keskenään.

Taulukko 19 vertailee Savijoen tuloksia muihin suomalaisiin kipsitutkimuksiin. TraP-hankkeen Nummenpään pilotissa PP-huuhtouman vähennys oli 64 % 2,5 vuoden keskiarvona (Ekholm ym. 2012) ja julkaisemattomien tulosten mukaan miltei sama myös 4,5 vuoden keskiarvona (Ekholm ym. 2013). Nummenpäässä kipsin teho vaikutti hiipuvan neljännen vuoden syksyllä, mutta viidennen, viimeisen tutkimusvuoden keväänä havaittiin ehkä taas vaikutusta. Koska Nummenpäässä kipsivaikutuksen kesto jäi epäselväksi, toisaalta neljännen vuoden notkahduksen, toisaalta tutkimuksen päättymisen vuoksi, aluetta seurattiin kymmenen vuotta kipsinlevityksen jälkeen vuoden ajan SAVE-hankkeessa. Uusissa tuloksissa oli kuitenkin liikaa hajontaa, jotta niistä olisi voinut päätellä, oliko kipsillä vielä vaikutusta. Suuri osa paikallisista viljelijöistä kuitenkin koki, että maanmuokkaus olisi pysynyt helpompana vielä kymmenen vuoden päästä.

Nummenpään vertailualueena toiminut Lepsämänjoen yläosa pääsi kipsikäsitellyn piiriin, kun Vantaanjoen kipsihanke levitti vuosina 2018–2019 kipsiä noin 40 %:lle alueen pelloista. Vaikutusta seurattiin vuosittain lokakuusta huhtikuuhun. PP-huuhtouma väheni ensimmäisenä ja toisena kipsin levityksen jälkeisenä vuotena 41 % ja 17 %. Jos muutos tapahtui vain kipsipeltojen kuormituksessa, PP-huuhtouma olisi kipsikäsitellyiltä pelloilta vähentynyt 130 % vuonna 2019 ja 53 % vuonna 2020 (Vantaanjoen kipsihanke 2020). Leudon ja sateisen kevättalven 2020 aikana kipsiä huuhtoutui pois pelloilta ja siksi sen vaikutus luultavasti hiipui. Lepsämänjoen yläosan kipsikäsitellyistä pelloista 73 %

oli suorakylvettyjä, eikä niillä muokattu maata kipsin levityksen jälkeen. Suorakylvöalan korkea osuus on luultavasti syy muita kohteita alhaisempaan fosforihuuhtoumaan (**taulukko 19**). Veden sähkönjohtavuus nousi korkeimmillaan tasolle 40 mS m⁻¹, kun Savijoella korkein arvo oli 72,8 mS m⁻¹. Toisaalta Lepsämänjoen sähkönjohtavuus saavutti tason, joka vallitsi ennen kipsiä jo runsaan vuoden päästä kipsinlevityksestä, mikä viittaisi siihen, että kipsin vaikutusaika suorakylvöpelloilta on lyhyempi. Suorakylvöpelloilta kipsin voisi olettaa huuhtoutuvan nopeammin vesistöön kuin muokatuilta pelloilta. Sulfaattipitoisuuksien perusteella kipsistä oli kuitenkin huuhtoutunut vain 26–33 %, eli samaa luokkaa kuin vastaavana aikana Savijoella. Lepsämänjoen seuranta jatketaan ja tuloksista raportoidaan myöhemmin.

Taulukko 19. Kipsikäsittelyn vaikutus kokonaisfosforin (TP), hiukkasmaisen fosforin (PP), kiintoaineen (TSS), liuenneen reaktiivisen fosforin (DRP) ja liuenneen orgaanisen hiilen (DOC) huuhtoumaan eri tutkimusten mukaan. Luvut kuvaavat kuinka monta prosenttia kipsikäsitellyiltä pelloilta on huuhtoutunut vähemmän kuin käsittelemättömiltä pelloilta (negatiivinen luku kertoo huuhtouman kasvusta)

Muuttuja	Peltolohko + laboratorio-sadetus ¹	Valuma-alue	Valuma-alue	Valuma-alue	Valuma-alue	Valuma-alue
		Nurmenpää ²	Lepsämänjoki ³	Savijoki ylempi käsittelyalue	Savijoki alempi käsittelyalue	Savijoki koko alue
TP	–	50	–	67	16	30
PP	70	60	53	72	19	34
TSS				100	42	58
DRP	50	30	Vähentyi	24	–13	–3
DOC	35	Vähentyi	Vähentyi	88	54	64
Tutkimuksen kesto, vuotta	2,6	5 ⁴	1,5	4,7	4,7	4,7
Käsittelyala (ha)	–	91	330	411	1 083	1 494
Viljavuusfosfori (mg l ⁻¹)	8,3–15,1	20	10	9,3	9,3	9,3
TP-huuhtouma ⁵ (kg km ⁻² a ⁻¹)	–	170	45	169	215	189

¹ Uusitalo ym. (2012), kipsiä 3 ja 6 t ha⁻¹

² Ekholm ym. (2012)

³ Vantaanjoen kipsihanke (2020)

⁴ Vaikutus viidentenä vuotena epävarma

⁵ Ennen kipsiä

Jokioisten savipelloilta otettujen häiriintymättömien maanäytteiden sadetuksessa havaittiin läpivaluvan veden PP:n vähentyneen keskimäärin 70 % vajaan kolmen vuoden keskiarvona kipsin levityksestä (Uusitalo ym. 2012). Kipsin vaikutus väheni ajan myötä ja 2,6 vuotta kipsin levityksen jälkeen kipsi- ja vertailunäytteiden välillä ei enää ollut tilastollisesti merkitsevää eroa.

Kun jälleen oletetaan, että Savijoen DRP-virtaamissa tapahtunut muutos johtui yksinomaan kipsistä, DRP-huuhtouma ylempään käsittelyalueen pelloilta oli 24 % pienempi kuin käsittelemättömiltä pelloilta, mutta alemmalla käsittelyalueella 13 %, ja koko alueellakin 3 %, suurempi. Nurmenpäässä keskimääräinen DRP-huuhtouman vähennys oli noin 30 % (Ekholm ym. 2012) ja Jokioisten maanäytteiden sadetuksessa 50 % (Uusitalo ym. 2012). Vantaanjoella havaittiin vähentymää toisena, mutta ei ensimmäisenä vuotena kipsin levityksen jälkeen (Vantaanjoen kipsihanke 2020). Suoraan leville käyttökelpoisen DRP:n väheneminen olisi vesiensuojeluvaikutusten vuoksi erityisen toivottavaa. Eräät maataloudessa laajalti käytetyt vesiensuojelumenetelmät voivat lisätä DRP-huuhtoumia, vaikka leikkaavatkin eroosiota ja PP:a (Puustinen ym. 2005, Uusitalo ym. 2018).

Savijoen ylempällä käsittelyalueella kipsillä käsitellyiltä pelloilta huuhtoutui DOC:a 88 % vähemmän kuin käsittelemättömiltä pelloilta. Alemmalla käsittelyalueella vähentyminen oli 54 % ja

koko alueella 64 %. Kuten yllä todetaan, arvio kipsin vaikutuksesta DOC-huuhtoumaan on huomattavasti epävarmempi kuin arvio vaikutuksesta PP-huuhtoumaan. Lepsämänjoella DOC-pitoisuus laskee ensimmäisenä talvena, mutta palasi ennen kipsin levitystä vallinneelle tasolle toisena talvena (Vantaanjoen kipsihanke 2020).

Orgaanisen hiilen määrä vähenee suomalaisilla kivennäismaiden pelloilla keskimäärin $220 \text{ kg ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$ (Heikkinen ym. 2013). Hiilen huuhtouma vesiin on noin $25\text{--}52 \text{ kg ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$ (Manninen ym. 2018) eli noin 10–20 % hiilen hävikistä. Savijoen ylemmällä käsittelyalueella huuhtoutui kipsillä käsittelemättömiltä pelloilta DOC:a $20 \text{ kg ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$ ja POC:a arviolta $9,6 \text{ kg ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$. Jos valtaosa huuhtoutumasta jäisi kipsin ansiosta tapahtumatta, sillä ei ehkä ole maan rakenteen kannalta merkitystä, koska hiiltä on kivennäismaapelojen muokkauskerroksessa $41\,000\text{--}67\,000 \text{ kg ha}^{-1}$ (Heikkinen ym. 2013).

Kasvihuonekaasupäästöjen kannalta merkittävää on, hajoaako hiili vesiympäristössä eri nopeudella kuin maaperässä ja syntyykö lopputuotteena hiilidioksidia vai metaania. Manninen ym. (2018) inkuboivat peltojen valumavesinäytteitä kahden kuukauden ajan, jona aikana 6–17% DOC:sta hajosi. Vesiympäristössä käyttökelpoisen hiilen voi ajatella lisäävän perustuotantoa, eli sen vaikutuksen voi rinnastaa ravinteisiin. Osa muodostuvasta biomassasta vajoaa vesistön pohjalle. Tällöin on olemassa riski voimakkaan kasvihuonekaasun metaanin tuotantoon. Tosin merissä metaanipäästöt ovat yleensä pienempiä kuin järvissä, sillä merivedessä runsaana esiintyvä sulfaatti estää metaanintuotantoa, ja se voi myös hapettaa jo muodostunutta metaania (Myllykangas 2020).

10.3 Miksi kipsin vaikutus oli erilainen ylemmällä ja alemmalla käsittelyalueella?

Ylempi ja alempi käsittelyalue ovat vierekkäisiä alueita ja muistuttavat suuresti toisiaan. Miksi kipsi vaikutti toimivan ylemmällä käsittelyalueella odotuksia paremmin, mutta alemmalla käsittelyalueella vaikutus oli huomattavasti heikompi ja keväällä 2020 alueen kipsipelloilta arvioitiin huuhtoutuneen jopa enemmän PP:a kuin käsittelemättömiltä pelloilta?

Yksi syy alueiden väliseen kipsin tehokkuuden eroon voi olla se, että alemman käsittelyalueen kipsillä käsitellyt pellot ovat tasaisempia (keskikaltevuus 1,3 %) kuin ylemmän käsittelyalueen käsitellyt pellot (keskikaltevuus 2,3 %). Lisäksi alemmalla käsittelyalueella kipsillä käsitellyt pellot olivat karkeammilla mailla: ylemmän käsittelyalueen käsitellyistä pelloista 85 % oli savimailla (Vertic Cambisols), alemman käsittelyalueen 75 %. Ehkä kipsi toimii parhaiten, ei vain savimailla, vaan myös kaltevilla pelloilla, siis oloissa, joissa eroosio on suurta. Peltomaan rakenteesta tai esimerkiksi saves-hiili-suhteesta ei ollut tietoa.

Toinen mahdollinen selitys liittyy kipsin vaikutusmekanismiin. Kipsi ei välttämättä vähennä vain peltojen pintamaan eroosiota vaan voi myös saostaa jo liikkeelle lähteneitä maahiukkasia jokiuomassa, mahdollistaen yli 100 % vähennykset valuma-alueilla, joilla on sekä käsiteltyä että käsittelemättömiä pelloja. Olisiko mahdollista, että alemman käsittelyalueen uomien pohjalle on vajonnut enemmän ainesta, joka olisi esimerkiksi kevään 2020 voimakkailla virtauksilla lähtenyt liikkeelle? Mahdollista pohja-aineksen liikkeellelähtöä on voinut edistää myös jokiveden ionivahvuuden palautuminen kohti alkuperäistä tasoa (ks. luku 4.3). Se että jaksojen keskivaluma selitti joissain tapauksissa jakson keskimääräistä reduktiota, viittaisi myös siihen, että kipsin teho märkinä ajankohtina on heikompi.

Kolmas selitys liittyy vedenlaadun havaintopaikkojen eroihin. Ylemmällä käsittelyalueella havaintopaikka (Yliskulma) sijaitsee rauhallisessa virtaavassa uomassa, kun taas alemmalla käsittelyalueella havaintopaikka (Parmaharju) sijaitsee koskenniskassa. Mikäli joessa kulkeutuu merkittävästi kiintoainetta uoman pohjalla (*bed load*), tämä aines tulee todennäköisemmin anturien mitattavaksi kosken pyörteisissä virtauksissa kuin suvannossa. Näin alemman kipsialueen tulokset kuvaisivat paremmin Savijoessa tapahtuvaa kokonaiskulkeutumista.

Yllä esitetyt hypoteesit alueiden erilaisesta vasteesta kipsikäsitteilyyn eivät kuitenkaan selitä, miksi kipsin teho myös DRP- ja DOC-huuhtoumien vähentäjänä vaikutti suuremmalta ylemmällä kuin alemmalla käsitelyalueella. Kumpaankin muuttujaan liittyy tosin myös epävarmuutta: DRP:n arviointi perustui vain suhteellisen harvaan vesinäytteenottoon ja DOC-huuhtoumasta vain pienehkö osuus oli peräisin kipsikäsitellyiltä pelloilta.

Alueiden välillä oli myös ero, joka liittyi nurmialaan. Ennen kipsin levitystä nurmen osuus peltoalasta oli suurin piirtein sama vertailualueella (14 %) sekä ylemmällä (18 %) että alemmalla kipsialueella (17 %, muu kuin nurmiala oli lähinnä viljalla, **taulukko 2**). Kipsiä levitettiin kuitenkin suhteellisesti harvemmin nurmilohkoille kuin viljalohkoille, jolloin ylemmällä käsitelyalueella nurmien osuus oli 28 % käsittelemättömistä lohkoista, mutta vain 7 % käsitteilyistä lohkoista. Alemmalla käsitelyalueella ero muodostui vieläkin suuremmaksi, kun nurmia oli 30 % käsittelemättömistä lohkoista ja 6 % käsitellyistä.

Kipsin epäsuhtainen jakautuminen nurmi- ja viljapellojen välillä heikentää vertailualueen edustavuutta. Kuten yllä on todettu, ennen kipsin levitystä ylemmän kipsialueen PP-huuhtouma oli 1,31-kertainen suhteessa vertailualueeseen. Alemmalla kipsialueella ero vertailualueeseen oli 1,2-kertainen. Miten suhde muuttuisi, jos otetaan huomioon muutos nurmien osuudessa?

Ennen kipsin levitystä vertailualueen PP-huuhtouma oli $396 \text{ g km}^{-2} \text{ d}^{-1}$. Oletetaan, että nurmien PP-huuhtouma on puolet viljapellojen PP-huuhtoumasta (Puustinen ym. 2005). Tällöin vertailualueen viljalohkoilta tuleva PP-huuhtouma (L_d^V) ennen kipsin levitystä on

$$L_d^V = \frac{396}{A_N 0,5 + A_V} = 425 \text{ g km}^{-2} \text{ d}^{-1} \quad (12)$$

jossa A_N on nurmien osuus (0,14) ja A_V viljojen osuus (0,86) peltoalasta. Vastaavasti nurmien PP-huuhtouma on tästä puolet eli $213 \text{ g km}^{-2} \text{ d}^{-1}$. Samalla periaatteella laskien ylemmällä käsitelyalueella PP-huuhtoumat ovat $569 \text{ g km}^{-2} \text{ d}^{-1}$ (viljat) ja $284 \text{ g km}^{-2} \text{ d}^{-1}$ (nurmet) ja alemmalla käsitelyalueella $520 \text{ g km}^{-2} \text{ d}^{-1}$ (viljat) ja $260 \text{ g km}^{-2} \text{ d}^{-1}$ (nurmet). Kun nurmelle ja viljalle on näin saatu ominaiskuormitukset, voidaan laskea, että vertailualueen ja ylemmän käsitelyalueen kipsillä käsiteltyjen pellojen välinen ero PP-huuhtoumassa tulisi olla 1,39-kertainen (aiempi arvo 1,31), kun muutos nurmien suhteellisessa alassa otetaan huomioon. Alemmalla käsitelyalueella ero muuttuisi arvosta 1,2 arvoon 1,27. Käyttäen näitä kertoimia arvioitaessa kipsin vaikutusta PP-huuhtoumiin, ylemmän käsitelyalueen vähennysprosentti kasvaa 72 %:sta 74 %:iin ja alemmalla käsitelyalueella 19 %:sta 24 %:iin.

Nurmilta voi huuhtoutua enemmän DRP:a kuin viljapelloilta (Puustinen ym. 2005). Olettaen, että ero olisi jälleen kaksinkertainen, vastaava laskenta pienentäisi kipsin tuottamaa DRP-huuhtouman vähennystä ylemmällä käsitelyalueella 25 %:sta 21 %:iin ja alemmalla käsitelyalueella $-12 \text{ %:sta } -18 \text{ %:iin}$. Laskelma osoittaa, että ero nurmien osuudessa on voinut hieman myötävaikuttaa käsitelyalueiden eroihin.

10.4 Kipsin vaikutus maahan ja kasveihin

Kipsin vaikutus pintamaahan oli viljavuusanalyysin mukaan melko vähäinen ja lyhytaikainen: pintamaan johtoluku ja rikkipitoisuus nousivat yhden-kahden vuoden ajaksi kipsin levityksestä. Osa kipsin sulfaatista kulkeutui jo ensimmäisenä talvena 0–20 cm:n kerroksen alapuolelle. Kalsiumpitoisuuden muutoksia ei havaittu, mutta pH laski hieman.

Kuormituksen kannalta keskeisen pintamaan kemia palautui viljavuustutkimuksen valossa siis kahdessa vuodessa miltei ennalleen. Kolmantena vuotena kipsin levityksen jälkeen maanäytteitä ei otettu. Nopea palautuminen voisi viitata kipsin vaikutuksen ennakoitua nopeampaan hiipumiseen. DRP-huuhtoumaa lukuun ottamatta Savijoen seuranta kuitenkin viittasi siihen, että kipsillä oli PP-, TSS- ja

DOC-huuhoutumia pienentävä vaikutus vielä vajaan viiden vuoden päästä kipsin levityksestä. Kalsiumin huuhoutuminen oli hitaampaa kuin sulfaatin, joten sen rooli voi olla sulfaattia merkittävämpi: kipsi on voinut muuttaa maan mikromururakennetta kalsiumsiltojen avulla, ei pelkästään sähköstaattisesti. Sulfaatti ei suomalaisissa happamissa maissa juuri pidäty maahiukkasiin (Yli-Halla 1987). Sulfaattia tasapainottavina kationina maassa on kulkeutunut mm. magnesiumia, joka kiinnittyy maahiukkasiin kalsiumia heikommin (Curtin ym. 1998).

Jotta kipsi vaikuttaisi toivotusti, sen tulisi levitä riittävän tasaisesti peltolohkolle. TraP-hankkeen levityskokeissa tämä onnistui, kun kalustona käytettiin kostean kalkin levityslaitetta tai kuivalannan tarkkuuslevitintä (Palva ja Alasuutari 2009). Savijoella näin ei kuitenkaan aina ole käynyt, päätellen siitä, että johtoluku ja rikkipitoisuus vaihtelivat lohkolta toiseen. Eräällä lohkolle ei maa-analyyseissä ollut mitään merkkejä kipsikäsitteystä edes käsittelyä seuraavana keväänä.

Savijoen tulokset vastaavat aiempia tuloksia kipsikäsitteilyn vaikutuksesta pintamaahan. TEHO-hanke tutki kipsin vaikutusta maahan ja satoon levittämällä kipsiä 4 tai 16 t ha⁻¹ kuudelle lohkolle Varsinais-Suomessa (Yli-Renko ja Rasa 2011). Lohkoilla oli kipsi- ja vertailukaista ja ne edustivat multavia tai runsasmultaisia hieta- ja hiuesavia. Maanäytteitä otettiin ennen kipsikäsitteilyä ja kaksi vuotta sen jälkeen. Kasvustonäytteet otettiin vuoden päästä kipsin levityksestä. Yaran suorakylvökokeessa selvitettiin kipsin kevätlevitystä aitosavella olevalla suorakylvöpellolla (Alestalo 2011). TraP-hankkeen Nummenpään valuma-aluepilotissa ei seurattu kasvustoa, mutta maanäytteitä otettiin 17 lohkolta viiden vuoden ajan kipsinlevityksestä (julkaisematonta aineistoa). OSMO-hankkeessa levitettiin Yaran kipsiä (4 t ha⁻¹) tai luonnonkipsiä (6 t ha⁻¹) seitsemälle lohkolle, joilla kipsin arveltiin huuhtovan liiallista magnesiumia, lohkoilla oli kohtalainen pH ja toisaalta huono rakenne (Mattila ym. 2019).

Savijoen kasvustoseurannassa havaittiin lähinnä vain kasvien rikkipitoisuuden kasvu. Kipsin ei ole aikaisemmissa tutkimuksissa havaittu vaikuttavan sadon määrään tai laatuun (Yli-Renko ja Rasa 2011, Suojala-Ahlfors ja Laamanen 2014, Kost ym. 2018a, Mattila ym. 2019).

10.5 Onko kipsin sulfaatista haittaa?

Sulfaatin korkein pitoisuus Savijoessa oli noin 200 mg l⁻¹, tosin sähkönjohtavuuteen perustuvan ennusteen 95 %:n luotettavuusväli oli laaja (120–400 mg l⁻¹, kuva 7). Simpukkaseurannan, lyhytaikaisten altistuskokeiden ja pidempiaikaisten taimenen mädillä tehtyjen kokeiden perusteella kipsin sulfaatista ei näytä olevan merkittävää haittaa virtavesien eliöstölle (Rantamo 2018, Hyrsky 2020, Rantamo ym. 2022). Kipsikäsitteilyn jälkeinen jokiveden sulfaattipitoisuus riippuu käsiteltävän valuma-alueen peltoisuudesta ja kerralla käsiteltävästä peltoalasta. KIPSI-hankkeen kokemusten mukaan tilanne, jossa hyvin suuri osuus valuma-alueen pelloista käsiteltäisiin kerralla, on epätodennäköinen ja siksi riski sulfaatin jokiluonnolle aiheuttamille haitoille pieni.

Järvissä sulfaatti voi lisätä rehevöitymistä. Ilmiö tunnetaan termillä *sulfate-mediated eutrophication* (Smolders ym. 2006). Suuri osa pohja-aineksen fosforista on sitoutunut raudan (hydr)oksidiin. Hapettomissa oloissa sulfaatti pelkistyy mikrobiologisesti sulfidiksi. Sulfidi saostaa monet raudan muodot rautasulfideina, jolloin pohjasedimenttien rautaan aiemmin sitoutunut fosfori vapautuu ensin sedimentin huokosveteen ja edelleen järviveteen. Sulfaatti siis lisää fosforin vapautumista pohjasedimenteistä ja heikentää järven tilaa ilman, että ulkoinen kuormitus kasvaa. Koska sulfaatin pelkistys on mikrobiologinen reaktio, sen edellytyksenä on, että sedimentissä on riittävästi mikrobeille käyttökelpoista eloperäistä ainesta, eli järvi on jo alun perin jossain määrin rehevä. Muita suosivia tekijöitä ovat veden korkea lämpötila ja alusveden hapettomuus.

Toistaiseksi ei ole tietoa siitä, kuinka paljon sulfaattipitoisuuden erityyppisissä järvissä tulisi nousta, jotta rehevöitymisriski kasvaisi (Holmer ja Storkholm 2001, Kaseva ym. 2020). Siilinjärven Kolmisoppijärvellä sulfaatti näytti kiihdyttäneen rehevöitymistä, kun sen pitoisuus nousi tasolta 10 mg l⁻¹ tasolle 50–60 mg l⁻¹ (Saarijärvi ym. 2013). Koska sulfaattipitoisuudelle ei voida asettaa raja-arvoa,

suositus on, että peltojen kipsikäsittelyjä toteutetaan vain valuma-alueilla, joilta vedet virtaavat jokien kautta suoraan mereen tai joilla esiintyy vain hyvin lyhytviipymäisiä järviä. Erittäin kuormittavien peltolohkojen kipsikäsittelyä voidaan harkita myös järvien valuma-alueilla, mikäli käsiteltävä alue on niin pieni suhteessa järven koko valuma-alueeseen, ettei järven sulfaattipitoisuuden odoteta nousevan. Tämä on myös hyvä varmistaa vesinäyttein, ja mikäli sulfaattipitoisuus odotusten vastaisesti nousee, kipsikäsittely keskeytetään.

Järvirajaus voidaan toteuttaa paikkatiedon avulla. Aineistona käytetään SYKE:n Ranta10 – rantaviiva-aineistoa (rantaviiva 1 : 10 000 ja uomaverkosto), jonka Järvi10-taso sisältää järvitunnuksen kaikille yli yhden hehtaarin järville. Järvitunnuksen perusteella on mahdollista yhdistää Vemala-mallia varten laskettu viipymä paikkatietoaineistoon. Raja-arvona hyvin lyhytviipymäiselle järvelle on VPD:n tyypittelyohjeessa määritelty enintään luokkaa 10 päivän viipymä (Aroviita ym. 2019). Alle yhden hehtaarin järvistä ei ole Vemala-mallissa saatavissa viipymätietoa. Jos viipymää ei voida määrittää, se voidaan arvioida järven ja sen valuma-alueen pinta-alojen suhteen avulla. Mikäli suhde on luokkaa tuhannesosa tai pienempi, järvi voidaan sijoittaa hyvin lyhytviipymäisten järvien tyyppiin.

Sulfaatin rehevöittävää roolia ei ole tuotu esille ulkomaisissa kipsitutkimuksissa. Esimerkiksi Yhdysvalloissa kipsin käyttöä on tutkittu Erie-järven (Kost ym. 2018b) ja Okeechobee-järven (Zhu ja Alva 1994) valuma-alueilla.

Koska sulfaatti ei juuri pidäyty maahiukkasten pinnalle, sitä voi huuhtoutua maaprofiilissa alaspäin, teoriassa aina pohjavesiin asti. STM:n asetuksen mukaan kaivoveden sulfaatin enimmäispitoisuus on 250 mg l⁻¹ (SYKE 2009). Kaivovesi on laadultaan hyvää, jos sulfaatin pitoisuus on alle 20 mg l⁻¹, kohtalainen pitoisuuden ollessa alle 150 mg l⁻¹ ja huono tätä korkeammilla pitoisuuksilla (SYKE 2009). Sulfaatista ei näillä pitoisuuksilla ole haittaa terveydelle, vaan mahdolliset ongelmat liittyvät korroosioon. Savijoella kaivojen sulfaattipitoisuus oli keskimäärin 18 mg l⁻¹. Tämä vastaa hyvin valtakunnallista mediaania (16 mg l⁻¹). Yhdessä kaivossa havaittiin kohonneita sulfaattipitoisuuksia (maksimi-arvo 103 mg l⁻¹), luultavasti sen vuoksi, että kaivoon oli päätenyt pintavesiä kipsikäsitellyltä pellolta.

10.6 Kipsin kohdennus

Kipsin teho voi riippua lohkon kaltevuudesta, fosforitilasta, vaikeammin arvioitavasta maan rakenteesta (“fysikaalisesta kasvukunnosta”) ja muokkausmenetelmästä. Kipsin voisi ajatella voimakkaimmin leikkaavan huuhtoumia heikkorakenteisessa maassa, jossa on korkea saves-hiilisuhde (Soinne ym. 2016). Tällaisten maiden on todettu olevan herkkiä eroosiolle ja rakenteen heikentymiselle tulvatilanteessa (Soinne ym. 2016).

Kipsin muokkaus maahan tehostanee sen vaikutusta. Tämänhetkisen käsityksen mukaan paras vaikutus kipsistä saadaan kevytmuokkauksella. Kynnettäessä kipsi voi jäädä kyntövilun alle eikä se silloin pääse riittävään kontaktiin maa-aineksen kanssa. Tosin TraP-hankkeen lohkotason kokeissa ei havaittu merkittävää eroa kipsin vaikutuksessa kynnetyllä ja kultivoidulla lohkolla (Uusitalo ym. 2012). Suorakylvössä eroosio ja maa-ainekseen sitoutuneen fosforin kuormitus ovat alhaisempia muokattuihin peltoihin verrattuna, ja kipsin teho saattaa siten jäädä vähäiseksi ja vaikutusaika vain 2–3 vuoden pituiseksi, varsinkin jos levityksen jälkeen tulee voimakkaita sateita tai leuto talvi (Luodeslampi, julkaisematon).

Valintatilanteessa kipsiä on luultavasti parempi levittää korkean kuin matalan fosforitilan lohkolle, sillä fosforitila kuvaa uusimpien tutkimustulosten mukaan, ei vain DRP:n huuhtoutumisherkkyyttä, vaan myös PP:n käyttökelpoisuutta (Samassa Vedessä -hanke, julkaisematon). Kohdentamisessa on kuitenkin hyvä ottaa huomioon, että vesien kannalta merkittävien kuormitusvähennysten aikaan saaminen edellyttää laajojen peltoalojen käsittelyä.

Kipsin potentiaaliset haittavaikutukset on pitkälti selvitetty, ja esteitä käytölle näyttää olevan melko vähän, merkittävimpänä rajoitteena pellot järvien valuma-alueilla. Tätäkään ei pidä kategorisesti kieltää,

sillä se saattaa tulla kyseeseen rajatulla, hyvin kuormittavalla alueella, jolla kipsin käyttö ei lisää järven sulfaattipitoisuutta. Muita rajoitteita ovat pohjavesialueet, pelloilla sijaitsevat Natura-kohteet sekä logistisesti haastavat alueet. Peltolohkoilla, joilla on alhainen kalium- ja erityisesti magnesiumtaso, on tarpeen tarkentaa näiden ravinteiden lisäystä lannoituksessa. Kipsi alentaa sadon seleenipitoisuutta, mutta Savijoen aineiston perusteella seleeniin saatavuuteen tulisi kiinnittää huomiota niin kipsi- kuin muillakin lohkoilla. Luomupelloilla voidaan luomusääntöjen vuoksi käyttää vain luonnonkipsiä. Kipsiä ei tule levittää routaiseen maahan, sillä se voi lisätä rehevöittävän fosforin huuhtoutumista, kun kipsi fosforeineen huuhtoutuu suoraan pois. Fosforitonta kipsiä käytettäessä riskiä lisääntyneestä fosforihuuhtoutumista ei ole, mutta suotuisa vaikutus jää vähäiseksi, jos kipsi ei pääse kontaktiin pintamaan kanssa.

10.7 Tutkimustarpeet

Kipsin oletetaan vähentävän kuormitusta voimakkaimmin savimailla, joilla toisaalta myös tarve eroosion torjuntaan on suurin. Jotta kipsikäsitteily voitaisiin kohdentaa mahdollisimman tehokkaasti, kipsin vaikutusta olisi tutkittava myös muilla maalajeilla ja esimerkiksi fosforitilaltaan erilaisilla lohkoilla. Valuma-aluepiloteissa kipsiä on levitetty myös karkeille kivennäismaille ja esimerkiksi suorakylvöalalle, ja tulokset kipsin kuormitusta leikkaavasta vaikutuksesta ovat pinta-alapainotteisia keskiarvoja kaikkien muokkaustapojen ja maalajien ”yli”, savimaiden ollessa kuitenkin vallitsevia niin Savijoella, Vantaanjoella kuin Nummenpäässäkin.

Etelä- ja Länsi-Suomessa melko yleiset happamat sulfaattimaat katsottiin aiemmin soveltumattomiksi kipsikäsitteilylle. Nykyisen käsityksen mukaan happamiksi sulfaattimaiksi luokitellut pellot eivät niiden saaman kalkituksen takia välttämättä ole muokkauskerroksen osalta happamia, jolloin kipsin käyttö niillä on mahdollista. Happamilta sulfaattimailta tosin huuhtoutuu melko vähän fosforia (Tattari ym. 2017), ja siten käsittelyn kustannusvaikuttavuus lienee niillä matalampi.

Lisäksi olisi selvitettävä miten erilaiset muokkaus- ja levitysmenetelmät sekä -ajankohdat vaikuttavat kipsin tehoon ja onko vakiintunut levitysmäärä neljä tonnia hehtaarille aina paras annos. Sokerijuurikkaan tutkimuslaitoksen mukaan kipsin kevätlevitys ei haitannut kauran tai sokerijuurikkaan kasvua (Malmilehto ym. 2021). Tosin kevätlevitys saattaa viivästyttää kasvien kylvöä, sillä kipsinlevitystä ei suositella ajankohtana, jolloin pelto ei kannata levityskalustoa.

Kipsin huuhtoutumista voisi hidastaa, jos kipsistä kehitettäisiin vaikeammin liukenevia muotoja, esimerkiksi rakeistamalla. Entä mitä vaikutuksia useammalla kipsikäsitteilyllä on maahan, satoon ja kuormitukseen? Tätä tulisi tutkia levittämällä kipsiä ja seuraamalla vaikutuksia peltolohkolla tai pienehköllä valuma-alueella, jossa edellisen käsittelyn vaikutus on hiipunut. Yksi keskeinen epävarmuus liittyy kipsin vaikutusmekanismiin: missä määrin kipsi vähentää maa-aineksen liikkeellelähtöä ja missä määrin kipsi ”saostaa” maa-ainesta vasta uomassa? Uoman pohjalle laskeutunut maa-aines voi voimakkailla virtauksilla lähteä uudelleen liikkeelle, erityisesti veden ionivahvuuden laskettua. Tällöin kipsin todellinen kuormitusta leikkaava vaikutus on vähäisempi kuin se, mitä havaitaan tutkimusjaksolla, johon ei kuulu myös hyvin märkiä vuosia.

Kipsin potentiaalia fosforikuormituksen vähentäjänä arvioitiin Vemala-mallilla. Siinä lähtöoletuksena olivat TraP-hankkeessa havaitut fosforin reduktiot. Savijoen tulokset eivät malliajoja tehtäessä vielä olleet käytettävissä. Tarkempi arvio edellyttäisi keskeisten maaperäprosessien liittämistä malleihin ja kokeellista tutkimusta kipsin vaikutuksesta erilaisissa ympäristöoloissa. Vaikutusmalleissa olisi pyrittävä simuloimaan PP:n merkitystä rannikkovesien rehevöitymisessä, tosin PP:n muuntuminen leville käyttökelpoiseen muotoon – erityisesti pohjasedimentissä – tunnetaan yhä heikosti.

11 Yhteenveto

Savijoella käsiteltiin kipsillä 1494 hehtaaria peltoa syksyllä 2016. Tarkoituksena oli selvittää käsittelyn vaikutuksia vesistökuormitukseen, maahan ja kasvustoon sekä pohjavesiin. Aineiston perusteella arvioitiin myös kipsin maksimaalista potentiaalia vähentää fosforikuormitusta ja parantaa rannikkovesien tilaa. Lisäksi verrattiin kipsi- ja rakennekalkkikäsittelyn kustannusvaikuttavuutta ja arvioitiin kokeellisesti kipsin levitystä talvella.

Kipsikäsitteilyn jälkeen Savijoen PP-huuhtoumat kipsin vaikutuspiirissä olevalla kahdella havaintoasemalla olivat pienempiä suhteessa vertailualueen huuhtoumiin kuin ennen kipsin levitystä. Poikkeuksen muodosti kevät 2020, jolloin PP-huuhtouma oli toisella asemalla suurempi kuin arvioitu huuhtouma tilanteessa, jossa kipsiä ei olisi levitetty. Jos muutoksen PP-huuhtoumissa oletetaan johtuvan vain kipsikäsitteystä ja kohdistuneen pelkästään pelloilta tapahtuneisiin prosesseihin, kipsillä käsitellyiltä pelloilta huuhtoutui PP:a vajaan viiden vuoden keskiarvona ylemmällä käsittelyalueella 72 % vähemmän kuin käsittelemättömiltä pelloilta ja alemmalla alueella 19 % vähemmän koko alueella vähenemän ollessa 34 %. DRP-huuhtouma oli ylemmän alueen kipsipelloilta 24 % pienempää kuin käsittelemättömiltä pelloilta, mutta alemmalla alueella 13 % suurempaa, jolloin koko alueella nousua oli 3 %. DOC-huuhtouman vähennykset olivat 88 % (ylempi alue), 54 % (alempi alue) ja 64 % (koko alue). Koska noin puolet kipsin sulfaateista, ja suurempi osa kalsiumista, oli vielä maassa vajaan viiden vuoden kuluttua kipsin levityksestä, kipsi saattaa edelleen leikata kuormitusta, tosin ajan myötä yhä vähemmän. DRP-huuhtoumaan kipsillä näyttäisi olevan lyhytaikaisempi ja epäselvempi vaikutus kuin PP-huuhtoumaan. Savijoen seuranta jatkuu KIPSI-hankkeessa.

Kaivovesiseurannan perusteella kipsin kulkeutuminen savipelloilla pohjavesiin vaikuttaa epätodennäköiseltä. Mikäli kipsillä käsiteltävällä pellolla sijaitsevaa kaivoa käytetään juomavetenä, kaivon ympärille tulee jättää käsittelemätön suojavyöhyke, erityisesti karkeammilla maalajeilla.

Saaristomeri on yhteydessä Itämeren ravinnerikkaaseen pääaltaaseen ja siksi nopeaa parannusta sen tilassa ei ole odotettavissa. Kipsikäsitteilyllä voidaan vähentää sisäsaariston levämääriä, jos käsittely peltoala on riittävän laaja. Mahdolliset suotuisat vaikutukset kauempana rannikosta toteutuvat vasta pidemmällä aikaskaalalla, sillä siellä ratkaisevassa roolissa ovat avomeren ja sedimenttien ravinnevarastot. Paras vaikutus saadaan, jos fosforin lisäksi vähennetään myös typen kuormitusta.

Kipsin ja rakennekalkin käytön kustannusvaikuttavuutta ja yhteiskunnallisia nettohyötyjä arvioitiin ottamalla huomioon sekä fosforihuuhtouma että kasvihuonekaasupäästöt. Jos vain fosforihuuhtouma otetaan huomioon, kipsikäsitteilyn vuotuinen kustannusvaikuttavuusluku on 58 €, kierrätysmateriaaleista valmistetun rakennekalkin 75 € ja sivuvirtapohjaisen rakennekalkin 96 € per kilo poistettua fosforia. Ilmastovaikutuksen myötä ne ovat kipsille 59 € kg⁻¹, kierrätysmateriaaleista valmistetulle rakennekalkille 90 € kg⁻¹ ja sivuvirtapohjaiselle rakennekalkille 145 € kg⁻¹. Yhteiskunnallinen nettohyöty ottaa huomioon maataloustuotannosta saatavan yksityisen voiton sekä ravinne- ja ilmastohaittojen yhteiskunnallisen arvon. Kipsin nettohyödyn nykyarvo pelkkä ravinehaitta huomioiden on 977 € ha⁻¹ ja rakennekalkin 874-929 ha⁻¹ riippuen valmistusmateriaalista. Rakennekalkin käyttö tehokkaana vesiensuojelumenetelmänä vaatii tarkkuutta levityksen ja muokkauksen ajoituksessa. Vaikka käsittely epäonnistuisi vesiensuojelutavoitteiden kannalta, aine tuo silti agronomisia hyötyjä viljelijälle maatalouskalkin tapaan. Tämä yksityisen kannustimen puute vesiensuojelunäkökulmasta tulisikin ottaa huomioon tehokkaana tiedotuksena oikeasta käsittelytavasta sekä käsittelyn valvontana, jos yhteiskunta päättäisi tukea taloudellisesti rakennekalkin käyttöä vesiensuojelutoimena.

Kipsikäsitteilyyn liittyy yhä avoimia kysymyksiä, joihin vastaaminen edistäisi käsittelyn kustannustehokasta kohdentamista. Esimerkiksi kipsin vaikutusmekanismi tulisi ymmärtää paremmin, jotta vaikutuksen voimakkuutta ja kestoja eri olosuhteissa voitaisiin paremmin arvioida. Kipsin oletetaan murustavan pienimpiä maahiukkasia nostamalla maaveden ionivahvuutta ja muodostamalla maahiukkasten välisiä kalsiumsilloja. Sulfaatti huuhtoutuu kuitenkin kuormituksen muodostumisen

kannalta merkittävimmästä pintamaakerroksesta paljon nopeammin kuin kipsivaikutus vaikuttaa hiipuvan. Tämä viittaa siihen, että kalsiumsillat voivat olla vaikutuksen ylläpidossa keskeisessä roolissa. Alun perin sähköstaattisesti syntynyt mikromuru ehkä myös stabiloituu kuivuessaan tai mikrobiliimojen vaikutuksesta.

Perinteiset maatalouden vesiensuojelumenetelmät eivät välttämättä ole kohdentuneet tehokkaimmalla mahdollisella tavalla. Oikeinkin kohdennettujen menetelmien vesiensuojeluhuöty jää kuitenkin vähäiseksi, jos toimenpidealat eivät ole riittäviä. Kipsillä on potentiaalia laajoilla peltoaloilla käytettäväksi menetelmäksi, jolla voidaan välittömästi vähentää fosforikuormitusta. Tämä potentiaali on nyt kansainvälisesti poikkeuksellisen laajassa testissä rannikkovaluma-alueillamme KIPSI- ja KIPSI2.0-hankkeissa. Kipsi ei korjaa maatalouden ravinnekuormituksen juurisyitä, mutta se antaa aikaa hitaammin vaikuttaville toimille. Maatalouden ravinnekuormituksen pysyvä alentaminen edellyttää maan rakenteen ja pellon vesitalouden parantamista sekä lannoitteissa ja lannassa annettavan fosforin ja typen vähentämistä ongelma-alueilla.

Lyhenteet

DOC liennut orgaaninen hiili

DOM liennut orgaaninen aines

DRP liennut reaktiivinen fosfori

DTP liennut kokonaisfosfori

DUP liennut ei-reaktiivinen fosfori

fDOM fluoresoiva liennut orgaaninen hiili

KHK kasvihuonekaasu

POC hiukkasmainen orgaaninen hiili

PP hiukkasmainen fosfori

TOC orgaanisen kokonaishiili

TP kokonaisfosfori

TSS kokonaiskiintoaine

Liitteet

Liite 1. Savijoen huuhtoumien jakaminen lähteisiin

Savijoen tutkimusalue jakaantui kolmeen osaan: yläjuoksun vertailualueeseen sekä välittömästi vertailualueen alapuolella sijaitsevaan ylemmään ja tämän alapuolella sijaitsevaan alemmaan käsittelyalueeseen (**kuva 2**). Osa-alueiden pinta-alat ja maankäyttö poikkesivat toisistaan, alemman käsittelyalueen ollessa laajin ja siellä myös kipsikäsiteltyjen peltojen osuus oli korkein. Seuraavassa kuvataan yksityiskohtaisesti, miten muiden maankäyttömuotojen kuin peltojen vaikutus ainevirtaamiin arvioitiin.

Metsät kivennäismailla

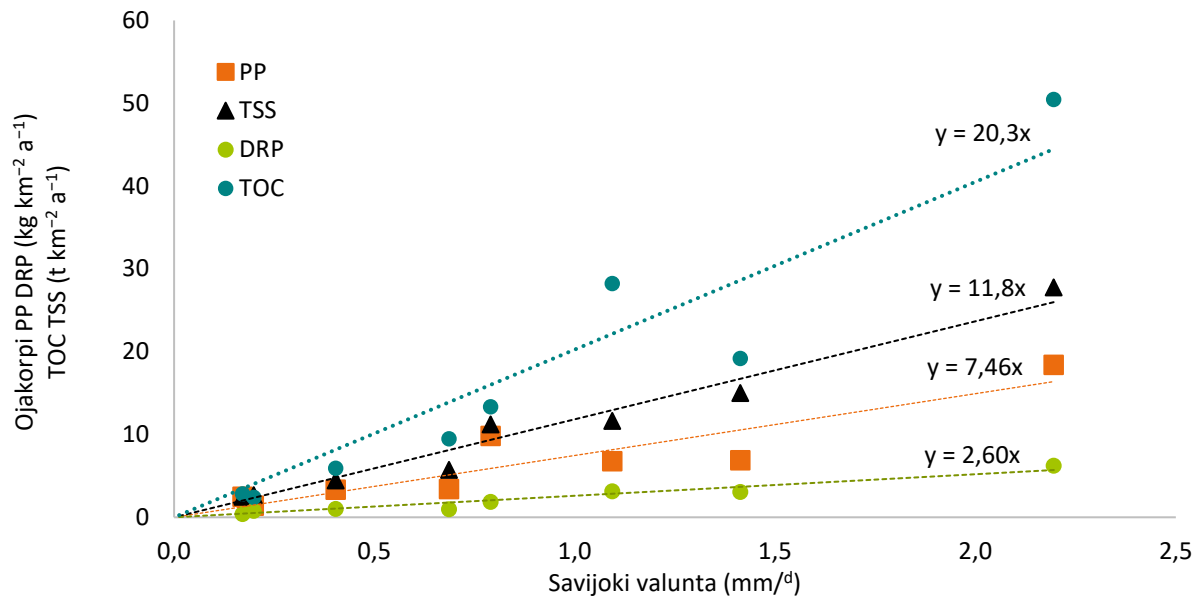
Kivennäismaiden metsät kattavat 56 % vertailualueesta, 42 % ylemmästä käsittelyalueesta ja 52 % alemmasta käsittelyalueesta. Arvio metsistä tulevasta huuhtoumasta vaikuttaa ratkaisevasti jäännösterminä saatavaan arvioon pelloilta tulevasta huuhtoumasta. Tämä koskee erityisesti DOC:a, jonka ominaiskuorma on lähes sama kivennäismaiden pelloilta ja metsistä (Manninen ym. 2018).

Savijoen vertailualueella on kaksi Luken metsätalouden vesistökuormituksen seurantaverkkoon kuuluvaa pientä valuma-aluetta, Ojakorpi ja Rantainrahka. Ojakorvella turvemaita on GTK:n selvityksen mukaan 5,1 % ja Rantainrahkalla 10,4 %, kummassakin enemmän kuin Savijoen tutkimusalueella, jossa turvemaita oli metsäalasta 0,5–2,5 %. DOC-huuhtouma kasvaa valuma-alueen turvealan kasvaessa (Mattsson ym. 2005). Kivennäismaiden metsien huuhtouma arvioitiin Ojakorven valuma-alueen perusteella, sillä sellaista seuranta-aluetta, jossa turvemaiden osuus vastaisi paremmin Savijoen valuma-alueen turvemaiden osuutta ei löydetty.

Ojakorvella valuma mitataan päivittäin (Luken tietojärjestelmä, [Metsäinfo \(luke.fi\)](http://Metsäinfo.luke.fi)) ja vesinäytteitä otetaan 11–21 vuodessa (SYKE 2022b). Näiden tietojen perusteella laskettiin kahdeksalle (1, 3–9, 10) kuudesta jaksosta valumapainotteiset pitoisuuskeskiarvot ja näistä jaksojen keskivalunnalla kertomalla jaksojen huuhtoumat. Jaksottaisten huuhtoumien ja Savijoen samaisten jaksojen valunnan välille muodostettiin lineaarinen yhteys ($r^2 = 0,82–0,97$), jota käytettiin arvioitaessa käsittelyalueen kivennäismailla olevien metsien huuhtoumia eri jaksoilla (**kuva L1**). Ojakorvelta oli määritetty vain TOC-pitoisuus. Tästä oletettiin 97 % olevan DOC:a (Kortelainen 1993). Menetelmä tuotti kuitenkin DOC:n osalta kirjallisuusarvioihin verrattuna liian pieniä huuhtoumia metsälle ja liian suuria pellolle. Tämän vuoksi metsäalueiden DOC-huuhtoutumia säädettiin kertoimella, jonka arvo (1,4) saatiin minimoimalla metsien ja peltojen huuhtoumien ero kirjallisuusarvioihin nähden (**taulukko L1**).

Rakennetut ja muut alueet

Rakennettujen alueiden osuus vaihteli vertailualueen 3,9 %:sta ylemmän käsittelyalueen 7,6 %:iin. Rakennetusta alasta läpäisemättömä oli 21–30 %. Rakennettujen alueiden huuhtoumat arvioitiin läpäisemättömän maan osuuden ja valunnan funktiona arvioista, joita Valtanen (2015) on esittänyt kolmelle Lahdessa sijaitsevalle valuma-alueelle, joilla läpäisemättömän maan osuus on 19, 62 ja 89 %. TP-huuhtoumien ja läpäisemättömän maan osuudelle muodostettiin yhteys $y = 0,309x^{1,4048}$, jossa y on TP-huuhtouma ($\text{g km}^{-2} \text{d}^{-1}$) ja x läpäisemättömän alan osuus rakennetusta alasta. PP:n osuudeksi arvioitiin 75 % TP-huuhtoumasta ja DRP:n 25 %. Vastaavalla periaatteella arvioitiin DOC-huuhtoumat (olettamalla jälleen, että $\text{DOC} = 0,97 \text{ TOC}$). Muun maankäytön, josta suuri osa oli suota, kuormitus saatiin toisen Savijoen latvoilla olevan pienen valuma-alueen, Rantainrahkan seuranta-aineiston perusteella. Kaikki arviot suhteutettiin lineaarisesti valumaa niin, että valunnan ollessa 0, myös huuhtouma oli myös 0, ja edellä kuvattu kirjallisuusarvo vastasi huuhtoumaa keskivalunnalla.



Kuva L1. Metsäisen Ojakorven hiukkasmaisen fosforin (PP), liuenneen reaktiivisen fosforin (DRP), kiintoaineen (TSS) ja kokonaisorgaanisen hiilen (TOC) suhde Savijoen valuntaan kahdeksana jaksona.

Verifiointi

Taulukkoon L2 on koottu vertailualueelle koko tutkimusjaksolle arvioidut eri maankäyttömuotojen huuhtouma-arviot ja vastaavat kirjallisuusarvot, siltä osin kuin saatavissa. PP-huuhtouma vertailualueella (samoin kuin käsittelyalueella ennen kipsinlevitystä) oli yli kaksinkertainen kirjallisuusarvoihin nähden. Koska vertailualueen PP-huuhtouma perustuu anturien tunnin välein arvioimaan sameuteen, joka korreloi voimakkaasti käsinäytteistä määritetyn PP-pitoisuuden kanssa, arvio on luultavasti todenmukainen. Vemala-malli antaa Savijoelle kokonaisfosforihuuhtoumaksi $170 \text{ kg km}^{-2} \text{ a}^{-1}$, joka myös on huomattavan korkea, vaikka jääkin tässä työssä esitetystä arviosta. Metsien osalta vertailualueen PP-huuhtouma vastasi hyvin kirjallisuusarvoa, ja osoitti, että metsät ovat vähäinen PP:n lähde.

Myös DRP-huuhtouma oli noin kaksinkertainen kirjallisuusarvoon nähden, mutta DRP:n osuus TP:stä (13 %) oli lähellä kirjallisuusarvoa pieniltä maatalousvaltaisilta valuma-alueilta (16 %, Tattari ym. 2017). Metsille arvioitu DRP-huuhtouma oli kirjallisuusarvoa pienempi. TP:n osalta rakennettujen alueiden huuhtouma vastasi melko hyvin kirjallisuusarvoa. Rakennetuille alueille ei ollut vertailuarvoa fosforin jakeille.

DOC-huuhtoumat pelloilta ja metsistä vastasivat melko hyvin kirjallisuusarvoja, mutta tämä johtui pitkälti kalibroinnista. Sulfaattihuuhtoumat pelloilta olivat jonkin verran kirjallisuusarvoja matalampia.

Taulukko L1. Vertailujaksolle (kevät 2016) lasketut peltojen ominaiskuormitusluvut ($\text{kg km}^{-2} \text{ a}^{-1}$). Valuntana käytetty vertailualueen valuntaa kaikille asemille. DRP-huuhtoumalle esitetty prosentiosuus kokonaisfosforihuuhtoumasta

Muuttuja	Vertailualue	Ylempi käsittelyalue	Alempi käsittelyalue
PP	145	189	171
DRP	24 (16 %)	26 (14 %)	18 (11 %)
TP	169	215	189
TSS	73 400	130 000	106 000
DOC	6 910	4 270	5 730
SO4	4 610	6 470	7 260
Ca	4 950	5 960	6 200
Mg	3 520	3 860	4 210
K	1 610	1 380	1 740

Taulukko L2. Vertailualueelle lasketut ominaiskuormitusarvot (kg km⁻² a⁻¹) koko tutkimusjaksolle

Muuttuja	Pelto ilman kipsiä		Metsä		Rakennetut alueet		Muut alueet Savijoki
	Savijoki	Kirjallisuus	Savijoki	Kirjallisuus	Savijoki	Kirjallisuus	
PP	209	92 ¹	2,2	2 ¹	6,3	–	0,6
DRP	30	18 ¹	0,8	2 ¹	2,1	–	0,4
TP	240	110 ¹	3,0	4 ¹	8,5	9,4 ²	1,1
TSS	138 000	–	3 500	–	5 700	6 300 ²	450
DOC	2 900	2500–2800 ³	4 300	6 590 ⁴	500	550 ²	7 200
SO ⁴	4 100	5960 ⁵ , 7530 ⁶	1 000	1 037 ⁷ , 1 080 ⁶	2 800	2970	1 000

¹ Tattari ym. (2017). PP laskettu TP:n ja DRP:n erotuksena.

² Valtanen (2015). Vastaten Savijoen rakennetun alan läpäisevyyttä.

³ Manninen ym. (2018)

⁴ Finér ym. (2021)

⁵ Uusitalo ym. (2012)

⁶ Ekholm ym. (2020)

⁷ Finér ym. (2004)

Liite 2. Savijoen ionikoostumus

Vuosina 2016–2018 otettujen vesinäytteiden perusteella arvioitiin eri ionien pitoisuuksia ja suhteita ennen kipsinlevitystä ja 2,5 vuoden aikana sen jälkeen. Ennen kipsin levitystä bikarbonaatti oli valta-anioni sekä vertailu- että käsittelyalueilla. Bikarbonaatti vastasi runsaasta viidenneksestä ionien ekvivalenttisuimmasta, sulfaatin ja kloridin osuuksien ollessa noin 10 % kummallakin (**taulukko L3**). Kationeista sekä magnesiumin että kalsiumin osuus oli noin 20 % ionien ekvivalenttisuimmasta. Kipsin jälkeisillä jaksoilla (vuoden 2018 loppuun) myös vertailualueella huuhtoutui enemmän ioneja, mikä vaikeutti kipsin aiheuttamien muutosten havaitsemista. Kalsiumin ja magnesiumin pitoisuudet nousivat kuitenkin selvästi kipsikäsitelyn seurauksena, mutta niiden osuus ekvivalenttisuimmasta pysyi noin 20 %:n tasolla. Käsittelyalueen kalsium- ja magnesiumpitoisuudet olivat koholla loppusyksystä 2016 vuoden 2017 loppuun. Kaliumin pitoisuuksissa ei juuri havaittu muutosta, tosin vuonna 2017 ja keväällä 2018 pitoisuudet olivat käsittelyalueella vertailualueetta selvästi korkeammat. Sama ilmiö havaittiin natriumissa, mutta vähäisempänä. Kaikista ioneista voimakkain muutos tapahtui sulfaatissa, jonka pitoisuudet olivat kaikkina kipsin jälkeisinä jaksoina korkeampia kuin ennen kipsiä. Bikarbonaatissa, kloridissa tai nitraatissa ei tapahtunut selvää muutosta, mutta fluoridin pitoisuus nousi hieman.

Taulukko L3. Anionien ja kationien valumapainotteiset keskipitoisuudet vesinäytteissä sekä prosenttiosuus ionien ekvivalenttisuimmasta. Protoneissa ja hydroksidi-ioneissa ei havaittu muutosta ja niiden osuudet olivat hyvin pieniä. Pitoisuushavaintoja ennen kipsiä 13 per havaintopaikka, kipsin jälkeen 39–54 per havaintopaikka. Vuodet 2016–2018

Ioni	Vertailualue				Ylempi käsittelyalue				Alempi käsittelyalue			
	Ennen kipsiä		Kipsin jälkeen		Ennen kipsiä		Kipsin jälkeen		Ennen kipsiä		Kipsin jälkeen	
	mg l ⁻¹	%	mg l ⁻¹	%	mg l ⁻¹	%	mg l ⁻¹	%	mg l ⁻¹	%	mg l ⁻¹	%
Anionit		46		45		45		47		46		47
¹ HCO ₃ ⁻	19,2	21	32,5	24	22,7	24	36,1	19	23,4	23	36,0	17
SO ₄ ²⁻	5,6	9,8	7,5	7,5	5,9	8,6	30,6	17,5	7,6	9,8	36,7	21
Cl ⁻	3,7	9,0	5,8	7,1	3,7	7,2	6,4	5,3	4,6	8,1	7,4	5,4
NO ₃ ⁻	1,2	5,3	1,9	6,3	0,91	4,5	1,9	4,0	0,9	4,1	1,9	3,5
F ⁻	0,22	1,1	0,25	0,7	0,26	1,2	0,29	0,6	0,25	1,0	0,31	0,5
Kationit		54		55		55		53		54		53
Ca ²⁺	5,3	19	9,1	20	6,0	21	16,9	23	6,5	20	19,4	23
Mg ²⁺	3,5	21	5,8	22	3,7	20	8,3	20	4,2	20	9,4	19
Na ⁺	2,8	9,3	4,6	8,7	2,9	8,5	5,2	6,8	3,6	9,2	6,1	7,1
K ⁺	2,0	4,5	3,0	4,3	2,3	4,7	3,6	3,6	2,5	4,5	3,6	3,1

¹ Alkaliniteetti

Liite 3. Tulosten arviointi – vesinäytteiden vai mittariaineiston perusteella?

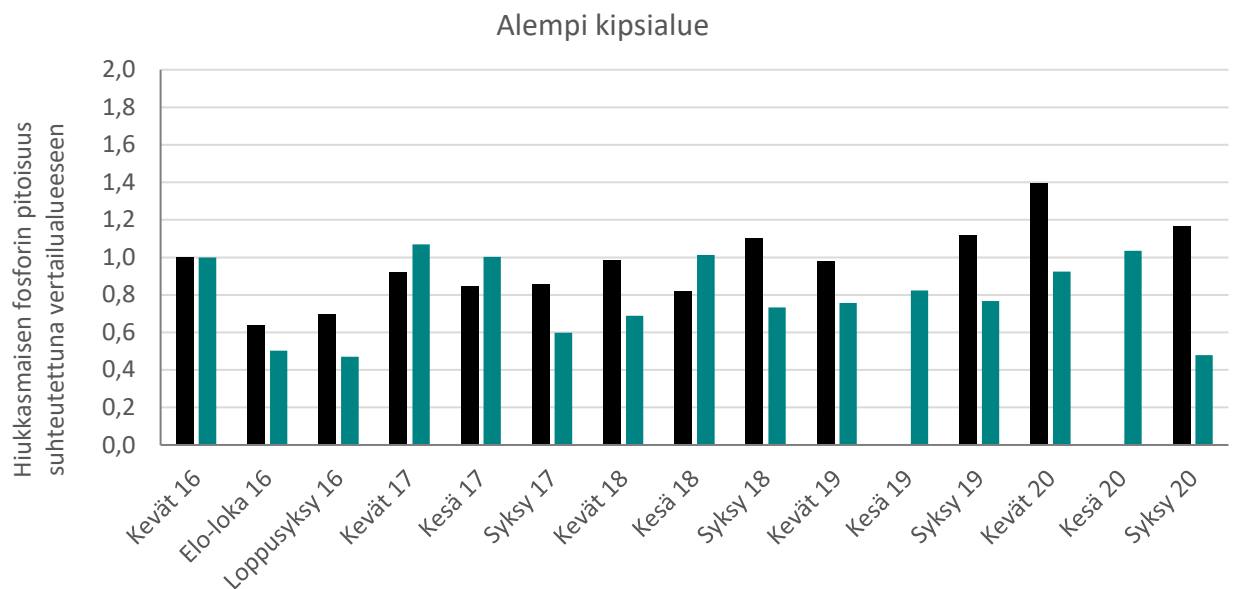
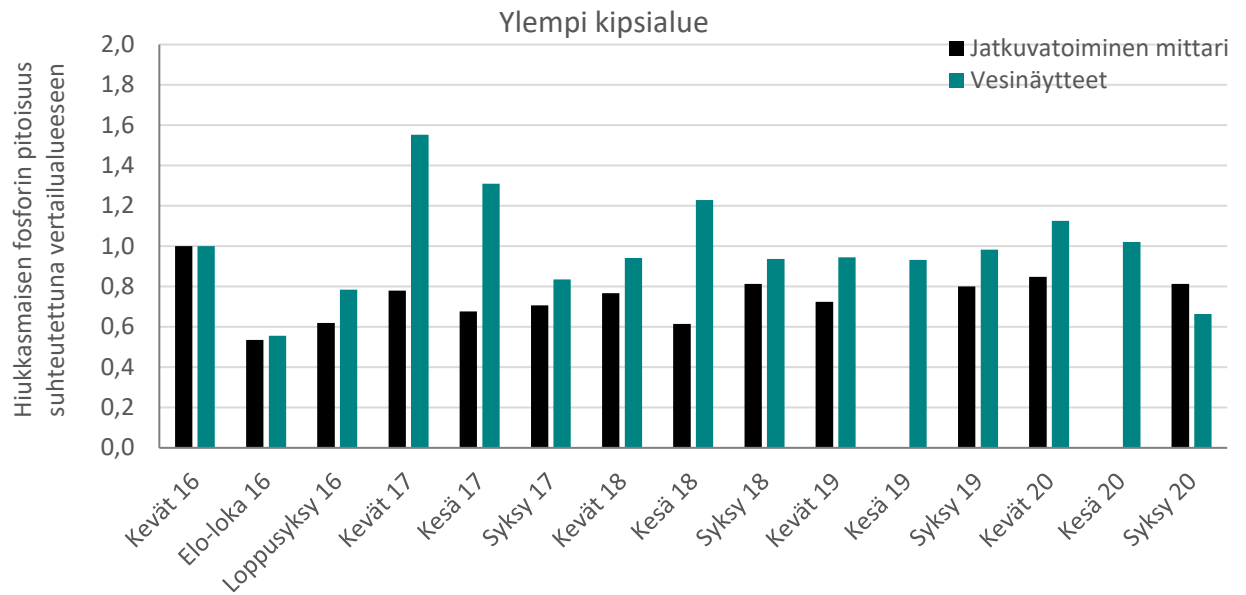
Savijoesta otettiin vesinäytteitä tavanomaista jokiseurantaa tiheämmin ja tarkemmin kuormittaviin kausiin ajoitettuna. Vesinäytteenotto ei kuitenkaan kattanut kaikkia kuormituspiikkejä, mutta valumapainotteisten keskipitoisuuksien käyttö kompensoi tätä puutetta. Kun vesinäytteitä otettiin vähän yli 20 vuodessa, jatkuvatoimisilla mittareilla saatiin lähes yhdeksän tuhatta havaintoa vuodessa. Mittariaineisto piti kuitenkin muuntaa tarkastelun kohteena olevaksi muuttujaksi, mikä osaltaan tuotti epävarmuutta mittariaineistoon. Seuraavassa havainnollistetaan eroa, mikä syntyy, kun kipsin vaikutusta arvioidaan vesinäytteiden perusteella tai jatkuvatoimisten mittarien tuottamasta tiedosta. Esimerkki korostaa, miten ratkaiseva rooli on riittävän edustavalla ennen toimenpidettä -seurantajaksolla.

Ennen kipsiä -jaksolla valumalla painotettu PP:n keskipitoisuus oli vertailualueen vesinäytteissä $132 \mu\text{g l}^{-1}$, ylemmällä käsittelyalueella 1,22-kertainen ($161 \mu\text{g l}^{-1}$) ja alemmalla 1,54-kertainen ($203 \mu\text{g l}^{-1}$). Jatkuvatoimisten mittarien perusteella valumalla painotettu PP:n keskipitoisuus oli vertailualueella $134 \mu\text{g l}^{-1}$ eli lähes sama kuin vesinäytteistä saatu arvo. Mittarien perusteella ylemmän käsittelyalueen pitoisuus oli kuitenkin 1,36-kertaa ($182 \mu\text{g l}^{-1}$) vertailualueen pitoisuus, mutta alemmalla alueella vain 1,31-kertaa ($176 \mu\text{g l}^{-1}$) vertailualueen pitoisuus. (Pitoisuuksien suhde poikkeaa luvussa 3 esitetyistä huuhtoumien suhteesta, sillä huuhtoumat oli laskettu kullekin itsenäiselle alueelle, kun taas pitoisuuksissa luonnollisesti näkyy myös yläpuolisten alueiden vaikutus.)

Jos kipsi vaikuttaa PP-huuhtoumaan, kipsikäsiteltyjen alueiden keskipitoisuuksien tulisi alentua suhteessa vertailualueeseen. **Kuvassa L2** esitetään käsittelyalueiden PP:n keskipitoisuuden suhde vertailualueen PP:n keskipitoisuuteen skaalattuna siten, että lukuarvo yksi kuvaa tilannetta ennen kipsin levitystä. Ykköstä pienemmät luvut kertovat kipsin PP-pitoisuutta vähentävästä vaikutuksesta ja ykköstä suuremmat sitä, että kipsikäsitellyiltä alueilta on huuhtoutunut enemmän PP:a kuin vertailualueelta. Esimerkiksi loppusyksyllä 2016 (jakso 3) PP:n keskipitoisuus oli vesinäytteiden perusteella ylemmällä käsittelyalueella $127 \mu\text{g l}^{-1}$ ja vertailualueella $132 \mu\text{g l}^{-1}$. Näiden keskipitoisuuksien suhde on 0,96, joka on vähemmän kuin arvo 1,22 jaksolla ennen kipsin levitystä. Kipsi on tämän tarkastelun perusteella vähentänyt huuhtoumia. **Kuvassa L2** loppusyksyn 2016 suhdeluku 0,96 on jaettu suhdeluvulla 1,22:lla, jolloin jaksoa 3 kuvaava tolppa saa arvon 0,78. Kipsin voidaan siis ajatella vähentäneen loppusyksyllä 2016 PP-pitoisuutta $(1 - 0,78) * 100 \% = 22 \%$.

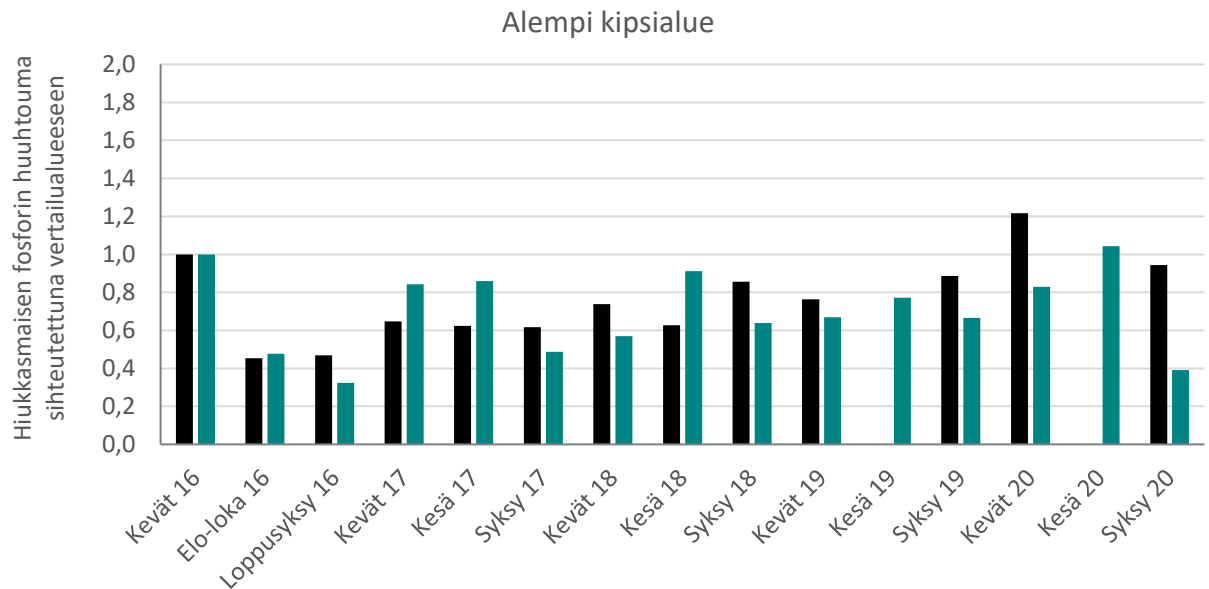
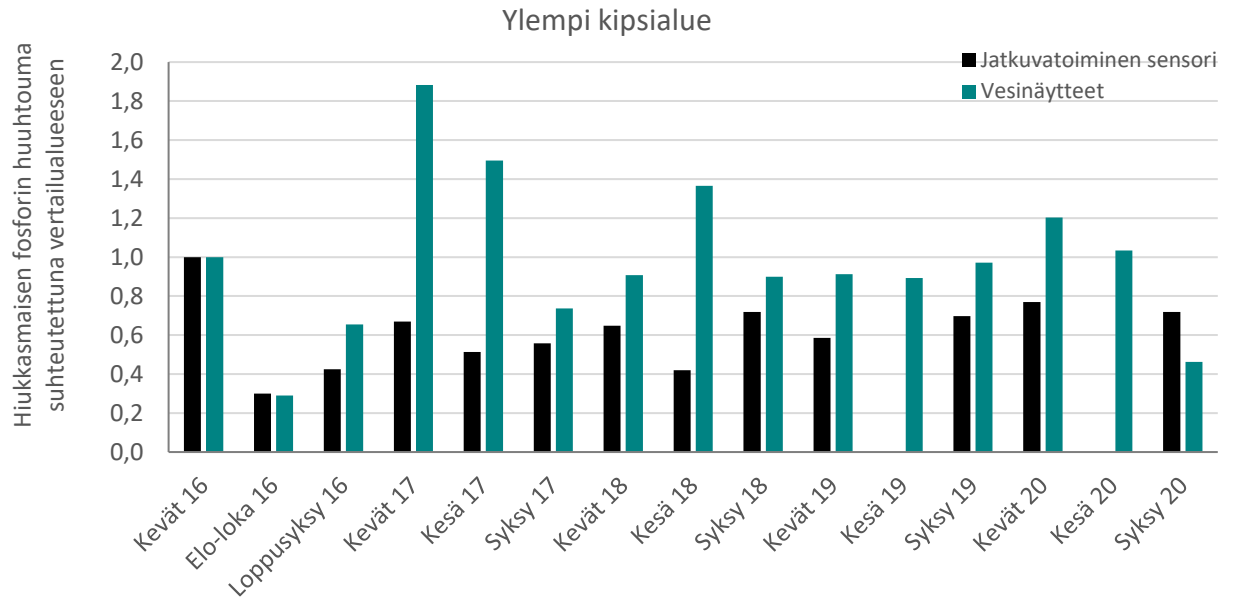
Ylemmällä käsittelyalueen vesinäytteiden osalta suhdeluku oli alle yhden kaikkina muina jaksoina paitsi keväinä 2017 ja 2020 sekä kesinä 2017, 2018 ja 2020. Keskimäärin suhdeluku oli 0,96. Mittariaineistoon perustuva suhdeluku oli alle yhden kaikkina jaksoina (keskimäärin 0,77), tosin kesiltä 2019 ja 2020 ei ollut aineistoa. Se, että kipsin vaikutus näytti olevan voimakkaampi mittariaineiston mukaan, johtuu käsinäytteitä suuremmasta vertailu- ja käsittelyalueiden pitoisuuksien erosta ennen kipsiä -jaksolla (1,22 vs. 1,36).

Alemman käsittelyalueen vesinäytteistä laskettu suhdeluku oli alle yhden muulloin kuin keväällä 2017 sekä kesinä 2018 ja 2020. Keskimäärin suhdeluku oli 0,73. Mittariaineistosta laskettu suhdeluku ylitti yhden syksyinä 2018, 2019 ja 2020 sekä keväällä 2020, ja keskimäärinkin suhdeluku oli 1,07. Mittariaineisto osoitti siis keskimäärin suurempaa PP-pitoisuutta kipsikäsiteltyyn vuoksi. Ero vesinäytteiden ja mittariaineiston antamassa tuloksessa selittyy jälleen havaintoaineistolla, joka kerättiin ennen kipsin levitystä. Mittariaineisto osoitti vähäisempää eroa vertailualueen ja alemman käsittelyalueen pitoisuuksissa (suhde 1,54 käsinäytteissä, 1,31 mittariaineistossa).



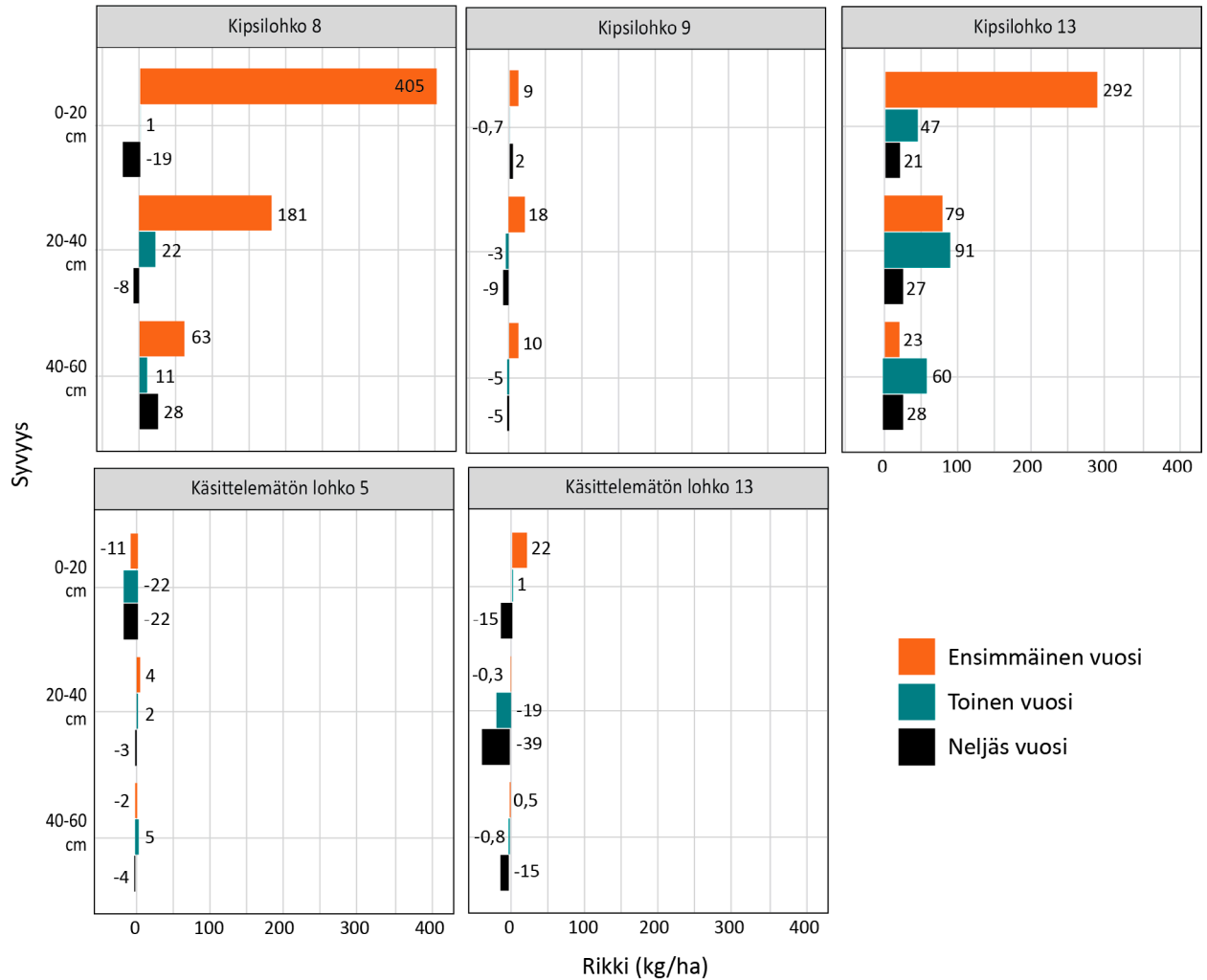
Kuva L2. Ylemmän ja alemman käsittelyalueen hiukkasmaisen fosforin valuntapainotteisen keskipitoisuuden suhde vertailualueen pitoisuuteen vesinäytteiden ja mittariaineiston perusteella. Suhdeluvun arvo 1 tarkoittaa, että ero alueiden pitoisuuksien välillä samansuuruinen kuin ennen kipsiä -jaksolla. Mittariaineistoa ei ole kesiltä 2019 ja 2020.

Yllä kuvattu pitoisuustarkastelu ei kuitenkaan anna oikeaa kuvaa kipsin vaikutuksesta, sillä jaksojen keskiarvot vaihtelivat huomattavasti. **Kuvassa L3** esitetään PP-huuhtoumat kipsiasemilla. Kuten pitoisuuksissakin vesinäytteistä määritettynä PP-huuhtoumat ylempällä käsittelyalueelta vähenivät käsittelyä edeltäneeseen tilanteeseen verrattuna lähes kaikkina jaksoina. Poikkeuksellisia olivat samat vuodenaajat kuin pitoisuuksissa (**kuva L2**). Keskimääräinen huuhtoumien suhdeluku laski kummallakin käsittelyalueella: ylempällä alueella se oli vesinäytteiden perusteella 0,94 ja mittariaineiston perusteella 0,66. Alemmalla käsittelyalueella keskimääräinen suhdeluku oli vesinäytteiden perusteella 0,63 ja mittariaineiston perusteella 0,84. Keväällä 2020 mittariaineisto osoitti, että huuhtoumat olivat alemmalla käsittelyalueella suurempia kuin vertailualueella. Vesinäytteisiin pohjautuen vastaava, mutta vähäisempi ylitys oli kesällä 2020.

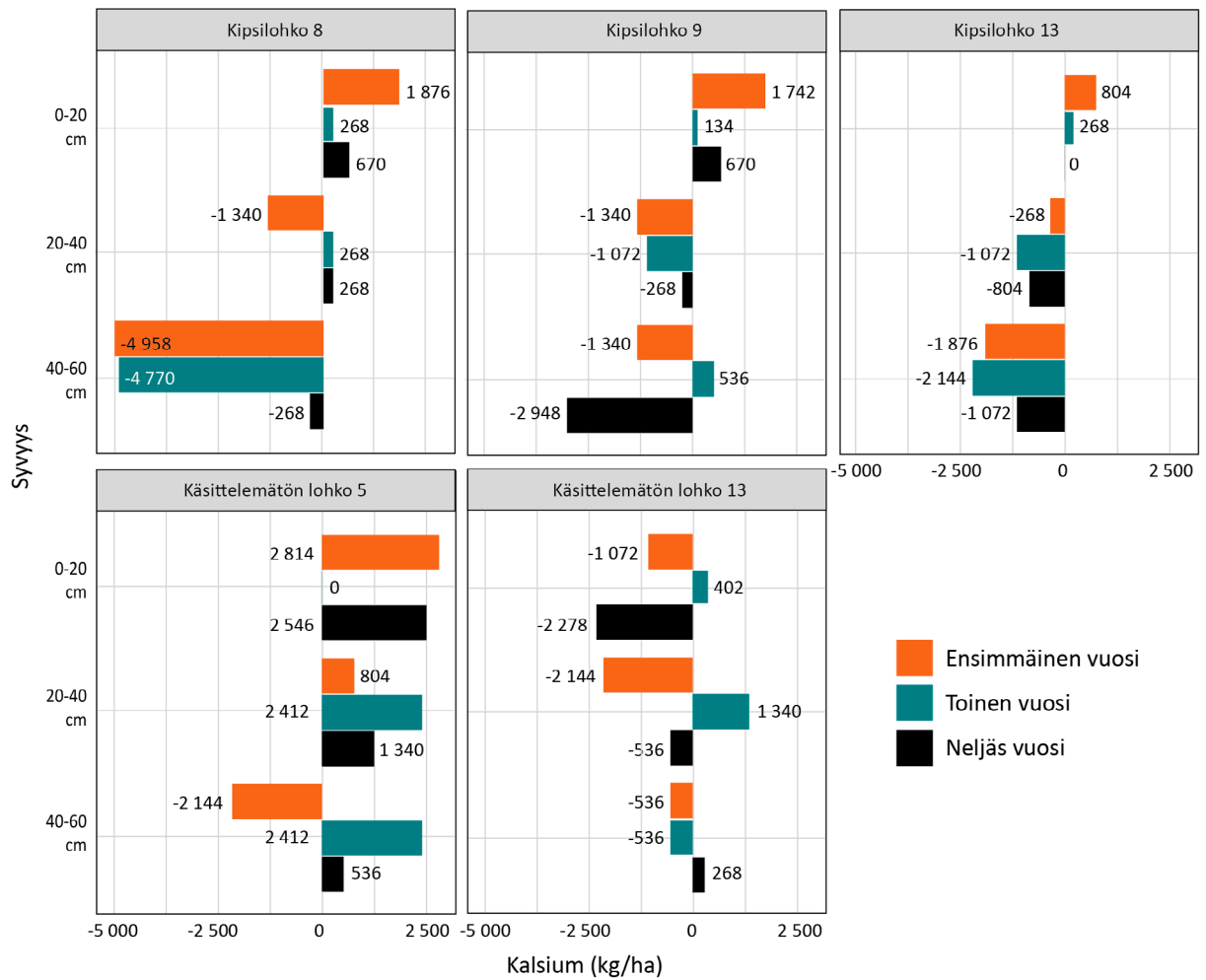


Kuva L3. Ylemmän ja alemman käsittelyalueen hiukkasmaisen fosforin huuhtouman suhde vertailualueen huuhtoumaan vesinäytteiden ja mittariaineiston perusteella. Suhdeluvun arvo 1 tarkoittaa, että ero alueiden huuhtoumien välillä samansuuruinen kuin ennen kipsiä -jaksolla. Mittariaineistoa ei ole kesiltä 2019 ja 2020.

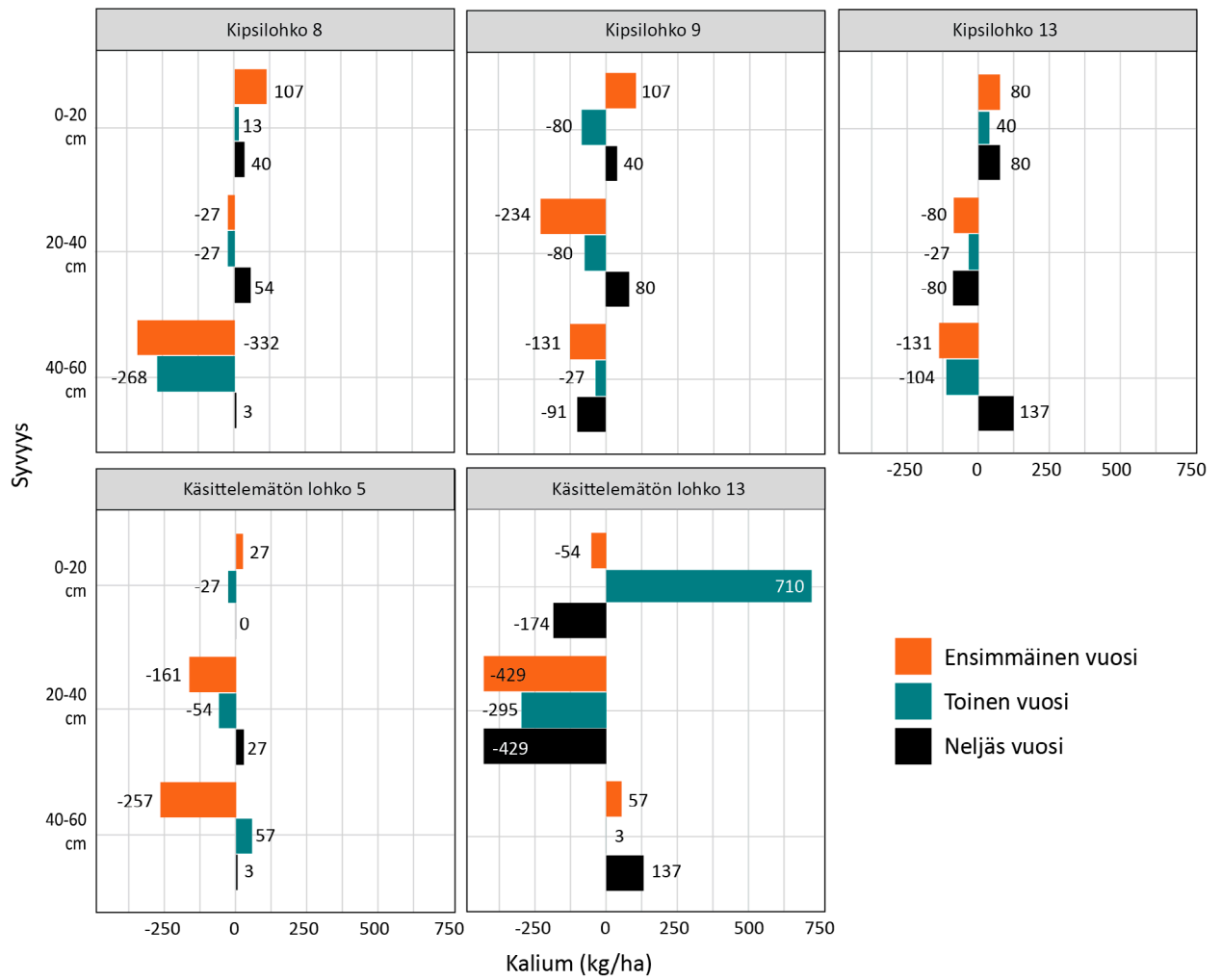
Liite 4. Kipsin levityksen jälkeinen muutos maakerrosten ravinnemäärissä ja muissa viljavuusanalyysin mukaisissa muuttujissa



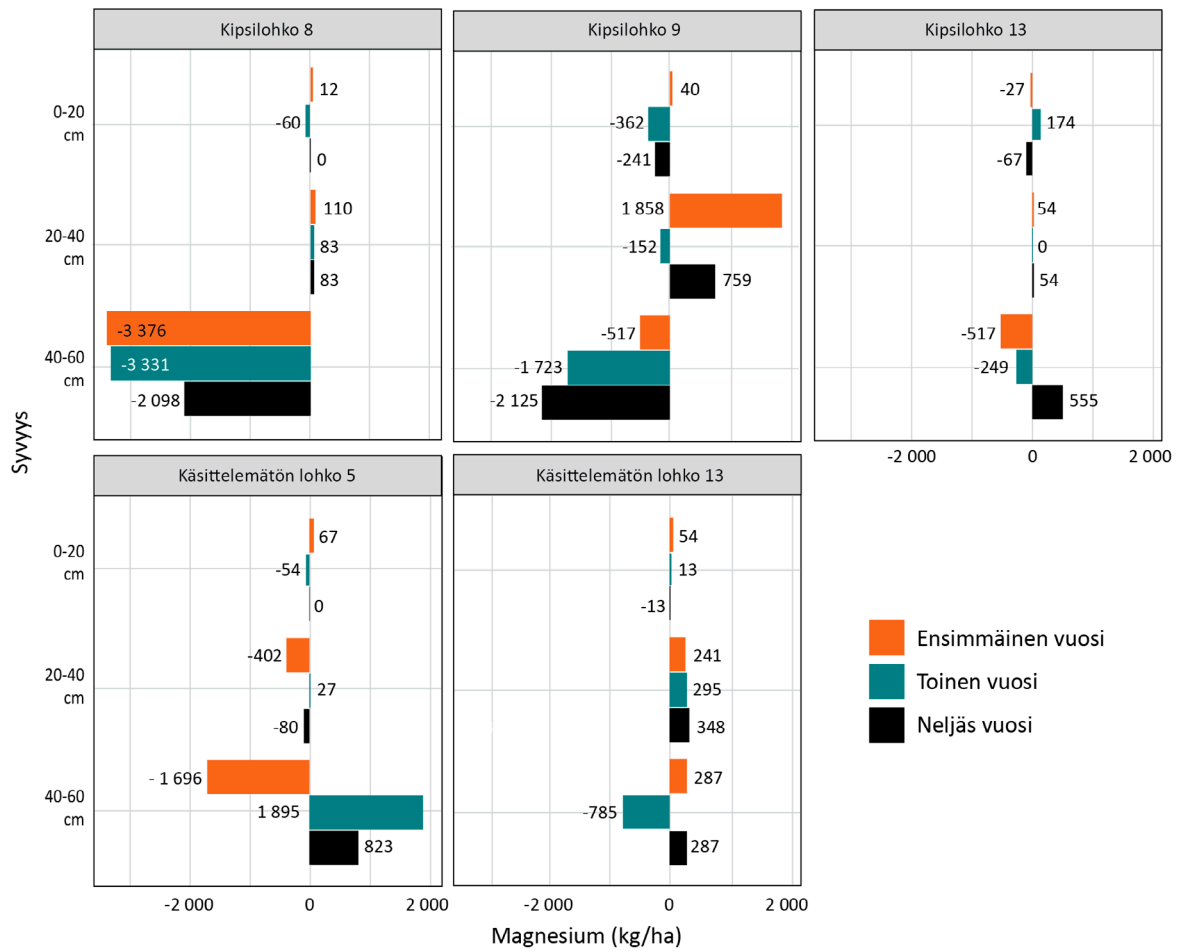
Kuva L4. Muutos eri maakerrosten rikin määrässä ensimmäisenä, toisena ja neljantenä kipsin levityksen jälkeisenä vuotena suhteessa ennen kipsin levitystä vallinneeseen tilanteeseen. Kolme kipsilohkoa ja kaksi käsittelemätöntä lohkoa.



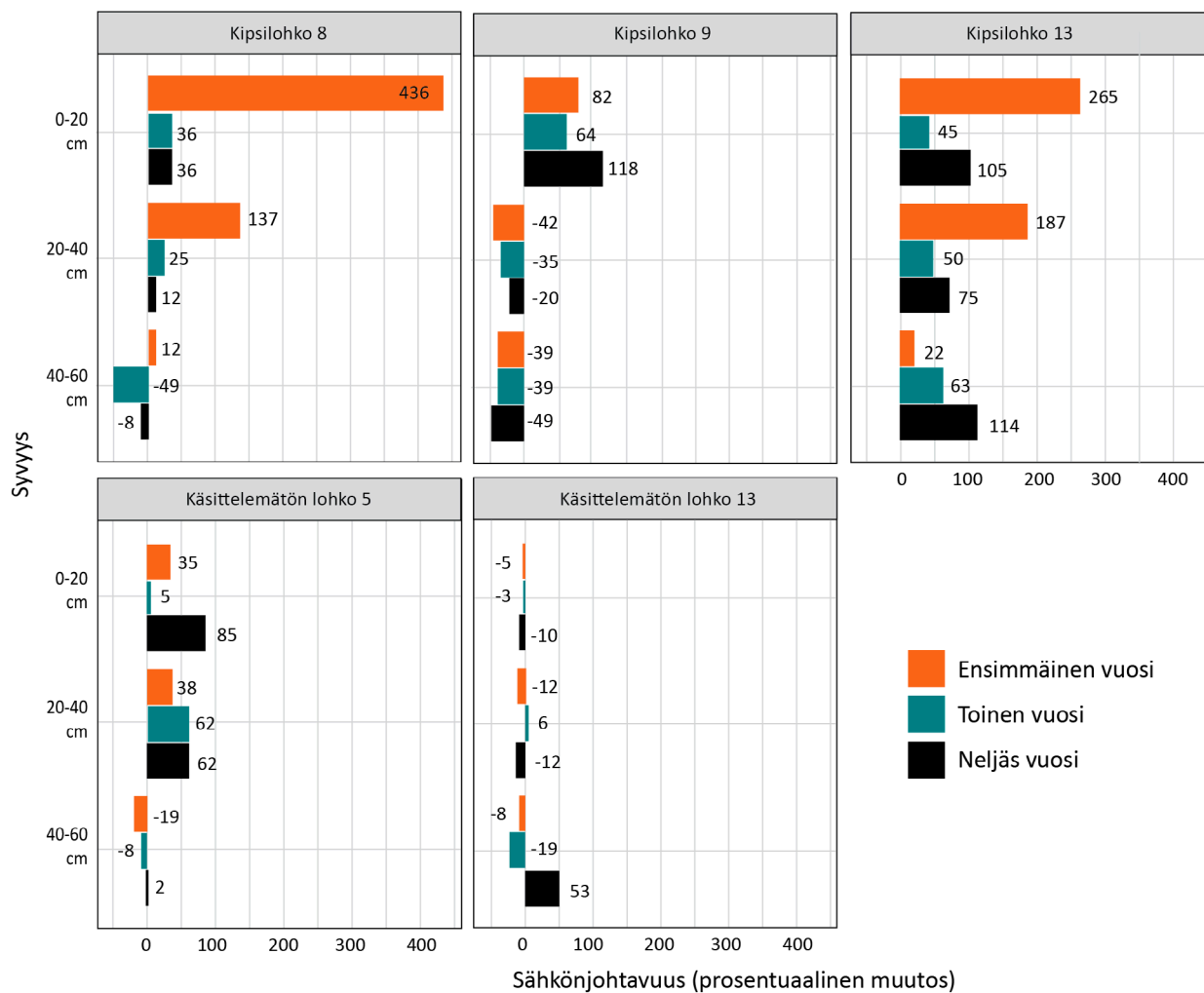
Kuva L5. Muutos eri maakerrosten kalsiumin määrässä ensimmäisenä, toisena ja neljäntenä kipsin levityksen jälkeisenä vuotena suhteessa ennen kipsin levitystä vallinneeseen tilanteeseen.



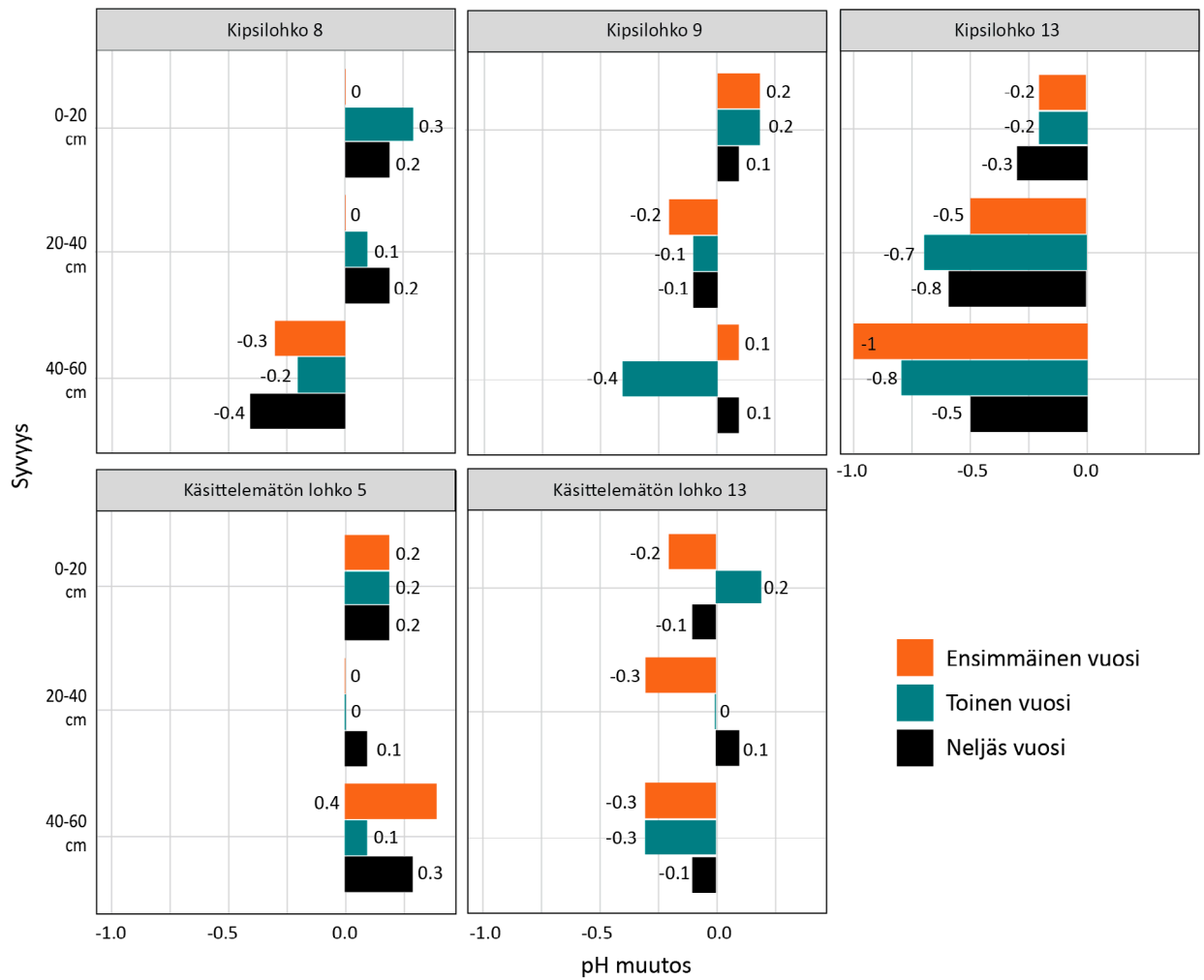
Kuva L6. Muutos eri maakerrosten kaliumin määrässä ensimmäisenä, toisena ja neljäntenä kipsin levityksen jälkeisenä vuotena suhteessa ennen kipsin levitystä vallinneeseen tilanteeseen.



Kuva L7. Muutos eri maakerrosten magnesiumin määrässä ensimmäisenä, toisena ja neljäntenä kipsin levityksen jälkeisenä vuotena suhteessa ennen kipsin levitystä vallinneeseen tilanteeseen



Kuva L8. Muutos eri maakerrosten johtoluvussa ensimmäisenä, toisena ja neljantenä kipsin levityksen jälkeisenä vuotena suhteessa ennen kipsin levitystä vallinneeseen tilanteeseen.



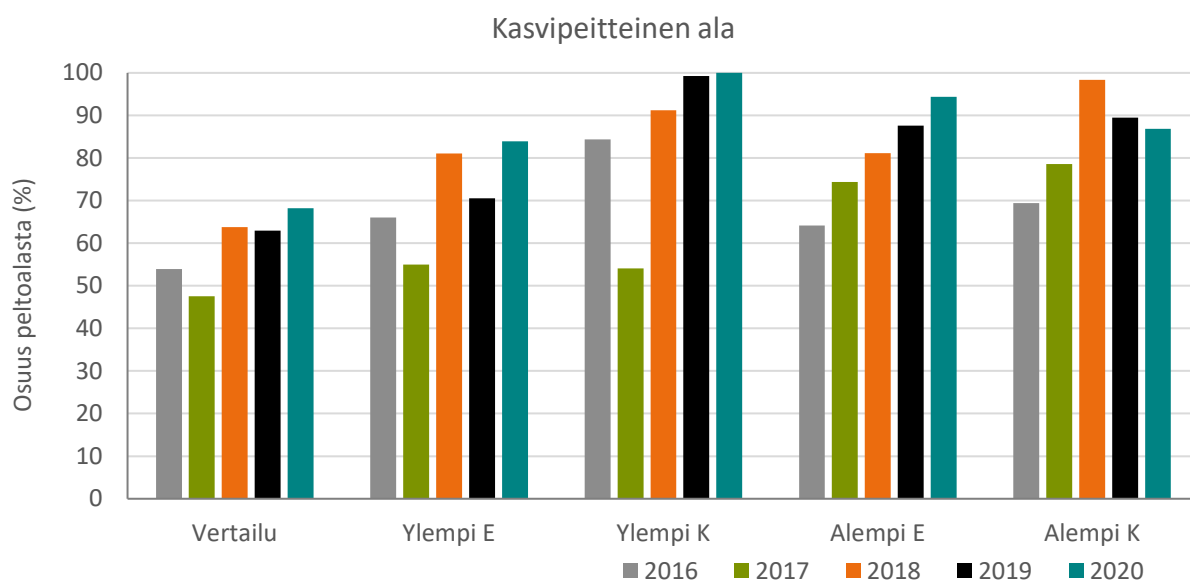
Kuva L9. Muutos eri maakerrosten pH:ssa ensimmäisenä, toisena ja neljäntenä kipsin levityksen jälkeisenä vuotena suhteessa ennen kipsin levitystä vallinneeseen tilanteeseen.

Liite 5. Peltöjen kasvipeitteisyys

Kasvipeitteisyys voi vaikuttaa pelloilta huuhtoutuvan fosforin määrään ja laatuun. Savijoen tutkimusalueen peltöjen kasvipeitteisyyttä selvitettiin Ruokaviraston peltolohkokisterin ja SYKEN valuma-alueaineistojen avulla. Kasvipeitteisyyttä kuvaavat luvut tuotettiin vuosille 2016–2020 SYKEssä lasketun peltolohkot vallitsevan kasvin mukaan -aineiston avulla paikkatietoanalyysillä. Peltolohkokisteri sisältää viljelijöiden syysilmoitukseen perustuvan tiedon kasvipeitteisyystoimenpiteestä, joka erottaa aidon kasvipeitteisyyden kevytmuokkatusta alasta. Lisäksi käytettävissä oli SYKEssä laadittu vallitsevaan kasviin perustuva luokittelu nurmialasta. Nurmialaksi laskettiin muun muassa monivuotiset kuivaheinä-, säilörehu- ja tuorerehunurmet, suojavyöhykkeet, luonnonhoitopellot ja viherkesannot. Peltoala jaettiin kasvipeitteisyyden perusteella neljään ryhmään: aito kasvipeitteisyys muilla kuin nurmilla, nurmet, kevytmuokkaus ja ei kasvipeitettä.

Tukikelpoinen peltoala väheni tutkimusalueella vuodesta 2016 vuoteen 2020 yhteensä 8,1 %. On epäselvää, onko peltoala todellisuudessa vähentänyt vai onko kyseessä esimerkiksi peruslohkojen yhdistymisestä johtuva epätarkkuus.

Valtaosalla peltoa oli jonkinlainen kasvipeite (aito kasvipeite, nurmi tai kevennetty muokkaus) ja tällaisen alan osuus kasvoi 67 %:sta 87 %:iin peltoalasta vuodesta 2016 vuoteen 2020. Kasvua tapahtui kaikilla osa-alueilla, tosin vuonna 2017 vertailualueella ja ylempällä kipsialueella kasvipeitteisyyttä oli muita vuosia vähemmän. Nurmiala vaihteli jonkin verran vuodesta toiseen. Vertailualueella se kasvoi vuosina 2016–2020 10 %:sta 22 %:iin. Aito kasvipeitteisyys nousi koko alueella 39 %:sta 63 %:iin. Kevytmuokattu ala laski lievästi, eniten vertailualueella, ja kasvipeitteetön ala laski 33 %:sta 13 %:iin. Muutokset olivat pääpiirteissään samansuuntaisia kaikilla osa-alueilla, joten ne eivät luultavasti kovin paljon vaikuta arvioon kipsin tehosta (**kuva L10**).



Kuva L10. Kasvipeitteisen alan (aito kasvipeite, nurmi, kevytmuokkaus) osuus peltoalasta vertailualueella sekä ylempään ja alemmään käsittelyalueen kipsillä käsittelemättömillä (E) ja käsitellyillä lohkoilla (K) vuosina 2016–2020.

Lähteet

- Ala-Harja, V. 2020. Drivers for farmers' contribution in an innovation process for a new water protection measure – Building social acceptance through a gypsum pilot project. Pro gradu -tutkielma. Helsingin yliopisto, Maatalous-metsätieteellinen tiedekunta, Taloustieteen osasto. <http://urn.fi/URN:NBN:fi:hulib-202012104979>
- Alestalo, L. 2011. Keväällä levitetyn kipsin vaikutukset suorakylvöpellolle. Hyvinkää, Laurea-ammattikorkeakoulu. <https://urn.fi/URN:NBN:fi:amk-201105035730>
- Appelo, C. A. J. & Postma, D. 2005. Geochemistry, Groundwater and Pollution. 2nd Edition. CRC Press.
- Aroviita, J., Mitikka, S. & Vienonen, S. toim. 2019. Pintavesien tilan luokittelu ja arviointiperusteet vesienhoidon kolmannella kaudella. Suomen ympäristökeskuksen raportteja 37. <http://hdl.handle.net/10138/306745>
- Aura, E., Saarela, K. & Rätty, M. 2006. Savimaiden eroosio. Maa- ja elintarviketalouden tutkimuskeskus. MTT:n selvityksiä 118. <http://urn.fi/URN:ISBN:952-487-039-8>
- Blomquist, J., Simonsson, M., A., E. & Berglund, K. 2018. Structure liming enhances aggregate stability and gives varying crop responses on clayey soils. Acta Agriculturae Scandinavica, Section B — Soil & Plant Science 68(4): 311-322.
- Bryant, R. B., Buda, A. R., Kleinman, P. J. A., Church, C. D., Saporito, L. S., Folmar, G. J., Bose, S. & Allen, A. A. 2012. Using Flue Gas Desulfurization Gypsum to Remove Dissolved Phosphorus from Agricultural Drainage Waters. Journal of Environmental Quality 41: 664–671.
- Coale, F. J., Porter, P. S. & Davis, W. 1994. Soil Amendments for Reducing Phosphorus Concentration of Drainage Water from Histosols. Soil Science Society of America Journal 58: 1470-1475.
- Cox, J. W., Varcoe, J. C. R., Chittleborough, D. J. & van Leeuwen, J. 2005. Using gypsum to reduce phosphorus in runoff from subcatchments in South Australia. Journal of Environmental Quality 34: 2118-2128.
- Curtin, D., Selles, F. & Steppuhn, H. 1998. Estimating calcium-magnesium selectivity in smectitic soils from organic matter and texture. Soil Science Society of America Journal 62: 1280-1285.
- EEA. 2022. Maanpinnan läpäisemättömyys (Imperviousness) 2012, 2015 & 2018. <https://ckan.ymparisto.fi/dataset/maanpinnan-lapaisemattomyys-imperviousness-2012-2015-2018>
- Ekholm, P. 2020. Kipsileivityksen vaikutus pohjavesiin – SAVE- ja SAVE2-hankkeen kaivovesiseurannan tulokset. <https://blogs.helsinki.fi/save-kipsihanke/files/2020/06/Kipsileivityksen-vaikutus-pohjavesiin-%E2%80%93-SAVE-ja-SAVE2-hankkeen-kaivovesiseurannan-tulokset.pdf>
- Ekholm, P., Euroola, M. & Venäläinen, E.-R. 2005. Selenium content of foods and diets in Finland. Julk.: Euroola, M. (toim.). Twenty years of selenium fertilization, September 8-9, 2005, Helsinki, Finland : Proceedings. Maa- ja elintarviketalouden tutkimuskeskus. Agrifood Research Reports 69. S. 39–45. <http://www.mtt.fi/met/pdf/met69.pdf>
- Ekholm, P., Kirjalainen, S., Valkama, P., Lahti, K. & Kiiirikki, M. 2013. TraP Follow-up project – Final Report. 18 December 2013.
- Ekholm, P., Lehtoranta, J., Taka, M., Sallantausta, T. & Riihimäki, J. 2020. Diffuse sources dominate the sulfate load into Finnish surface waters. Science of the Total Environment 748: 141297.
- Ekholm, P., Valkama, P., Jaakkola, E., Kiiirikki, M., Lahti, K. & Pietola, L. 2012. Gypsum amendment of soils reduces phosphorus losses in an agricultural catchment. Agricultural and Food Science 21: 279–291.
- Finér, L., Kortelainen, P., Mattsson, T., Ahtiainen, M., Kubin, E. & Sallantausta, T. 2004. Sulphate and base cation concentrations and export in streams from unmanaged forested catchments in Finland. Forest Ecology and Management 195: 115–128.
- Finér, L., Lepistö, A., Karlsson, K., Räike, A., Härkönen, L., Huttunen, M., Joensuu, S., Kortelainen, P., Mattsson, T., Piirainen, S., Sallantausta, T., Sarkkola, S., Tattari, S. & Ukonmaanaho, L. 2021. Drainage for forestry increases N, P and TOC export to boreal surface waters. Science of the Total Environment 762: 144098.
- Gransee, A. & Führs, H. 2013. Magnesium mobility in soils as a challenge for soil and plant analysis, magnesium fertilization and root uptake under adverse growth conditions. Plant and Soil 368: 5-21.
- GTK. 2022. Happamat sulfaattimaat. <https://gtkdata.gtk.fi/hasu/index.html>
- Han, Y. S. & Tokunaga, T. K. 2014. Calculating carbon mass balance from unsaturated soil columns treated with CaSO₄-minerals: test of soil carbon sequestration. Chemosphere 117: 87–93.

- Heikkinen, J., Ketoja, E., Nuutinen, V. & Regina, K. 2013. Declining trend of carbon in Finnish cropland soils in 1974–2009. *Global Change Biology* 19: 1456–1469.
- Holmer, M. & Storkholm, P. 2001. Sulphate reduction and sulphur cycling in lake sediments: a review. *Freshwater Biology* 46: 431–451.
- Huttunen, I., Huttunen, M., Piirainen, V., Korppoo, M., Lepistö, A., Räike, A., Tattari, S. & Vehviläinen, B. 2016. A national scale nutrient loading model for Finnish watersheds - VEMALA Environmental Modeling and Assessment 21: 83–109.
- Hyrsky, M. 2020. Vantaanjoen kipsihankkeen vaikutukset kalastoon. Vantaanjoen ja Helsingin seudun vesiensuojeluyhdistys ry. Julkaisu 81/2020. http://www.vhvsy.fi/files/upload_pdf/9049/Julkaistu%2081-2020%20Vantaanjoen%20kipsihankkeen%20vaikutukset%20kalastoon.pdf
- Iho, A., Lankoski, J., Ollikainen, M., Puustinen, M. & Lehtimäki, J. 2014. Agri-environmental auctions for phosphorus load reduction: experiences from a Finnish pilot. *The Australian Journal of Agricultural and Resource Economics* 58: 205–222.
- Iho, A. & Laukkanen, M. 2012. Gypsum amendment as a means to reduce agricultural phosphorus loading: an economic appraisal. *Agricultural and Food Science* 21: 307–324.
- Inagaki, T. M., de Moraes Sá, J. C., Caires, E. D. & Potma Gonçalves, D. R. 2017. Why does carbon increase in highly weathered soil under no-till upon lime and gypsum use? *Science of the Total Environment* 599–600: 523–532.
- Jaakkola, E., Tattari, S., Ekholm, P., Pietola, L., Posch, M. & Bärlund, I. 2012. Simulated effects of gypsum amendment on phosphorus losses from agricultural soils. *Agricultural and Food Science* 21: 292–306.
- Jansson, H., Ylärinta, T. & Sillanpää, M. 1985. Macronutrient contents of different plant species grown side by side. *Annales Agriculturae Fenniae* 24: 139–148.
- Kaila, A. 1967. Release of nonexchangeable potassium from Finnish mineral soils. *Journal of the Scientific Agricultural Society of Finland* 39: 107–118.
- Kaila, A. & Rytty, R. 1968. Calcium, magnesium and potassium in clay, silt and fine sand fractions of some Finnish soils. *Journal of the Scientific Agricultural Society of Finland* 40: 1–13.
- Kaseva, A., Suvanto, E., Hänninen, H., Lehtoranta, J. & Ekholm, P. 2020. Sulfaatin ja hiilen vaikutus Turun Maarian altaan pohjasedimentin ainekiertoihin. *Vesitalous* 1/2020: 41–44.
- Kortelainen, P. 1993. Contribution of organic acids to the acidity of Finnish lakes. National Board of Waters and the Environment, Finland. Publications of the Water and Environment Research Institute 13. <http://hdl.handle.net/10138/26032>
- Kosenius, A.-K. & Ollikainen, M. 2019. Drivers of Participation in Gypsum Treatment of Fields as an Innovation for Water Protection. *Ecological Economics* 157: 382–393.
- Kost, D., Ladwig, K. J., Chen, L., DeSutter, T. M., Espinoza, L., Norton, L. D., Smeal, D., Torbert, H. A., Watts, D. B., Wolkowski, R. P. & Dick, W. A. 2018a. Meta-Analysis of Gypsum Effects on Crop Yields and Chemistry of Soils, Plant Tissues, and Vadose Water at Various Research Sites in the USA. *Journal of Environmental Quality* 47: 1284–1292.
- Kost, D., Nester, J. & Dick, W. A. 2018b. Gypsum as a soil amendment to enhance water quality by reducing soluble phosphorus concentrations. *Journal of Soil and Water Conservation* 73: 22A–24A.
- Kähäri, J. & Nissinen, H. 1978. The mineral element contents of timothy (*Phleum pratense* L.) in Finland. I. The elements calcium, magnesium, phosphorus, potassium, chromium, cobalt, copper, iron, manganese, sodium and zinc. *Acta Agriculturae Scandinavica Supplementum* 20: 26–39.
- Laamanen, M., Suomela, J., Ekebohm, J., Korpinen, S., Paavilainen, P., Lahtinen, T., Nieminen, S. & Hernberg, A. (toim.). 2021. Suomen merenhoitosuunnitelman toimenpideohjelma vuosille 2022–2027. Ympäristöministeriön julkaisuja 2021:30. <https://julkaisut.valtioneuvosto.fi/handle/10024/163704>
- Lebedev, A. L. & Kosorukov, V. L. 2017. Gypsum Solubility in Water at 25°C. *Geochemistry International* 55(2): 205–210.
- Lilja, H., Uusitalo, R., Yli-Halla, M., Nevalainen, R., Väänänen, T. & Tamminen, P. 2009. Suomen maannostietokanta. Käyttöopas versio 1.0. Maa- ja elintarviketalouden tutkimuskeskus. MTT Tiede 6. <http://urn.fi/URN:ISBN:978-952-487-252-2>
- Luke. 2022. Tilastotietokanta <https://statdb.luke.fi/PXWeb/pxweb/fi/LUKE/>
- Luostarinen, S., Grönroos, J., Hellstedt, M., Nousiainen, J. & Munther, J. 2017. SUOMEN NORMILANTA - laskentajärjestelmän kuvaus ja ensimmäiset tulokset. Luonnonvarakeskus. Luonnonvara- ja biotalouden tutkimus 47/2017. <http://urn.fi/URN:ISBN:978-952-326-441-0>

- Malmilehto, S., Kaipainen, R. & Muurinen, S. 2021. Kipsin kevätlevityksen vaikutus juurikkaan ja viljan kasvuun. Sokerijuurikkaan Tutkimuskeskus, SJT. <https://www.ymparisto.fi/download/noname/%7B8E0CE0FA-CFDB-40BF-BBF2-B1FA90454095%7D/165747>
- Manninen, N., Soinne, H., Lemola, R., Hoikkala, L. & Turtola, E. 2018. Effects of agricultural land use on dissolved organic carbon and nitrogen in surface runoff and subsurface drainage Science of the Total Environment 618: 1519–1528.
- Mattila, T., Manka, V. & Rajala, J. 2019. Kipsi maanparannusaineena – hyödyt ja haitat maan kasvukunnolle. Helsingin yliopisto, Ruralia-Instituutti, Raportteja 192 <http://hdl.handle.net/10138/299973>
- Mattsson, T., Kortelainen, P. & Räike, A. 2005. Export of DOM from boreal catchments: impacts of land use cover and climate. Biogeochemistry 76: 373–394.
- Mattsson, T., Lehtoranta, J., Ekholm, P., Palviainen, M. & Kortelainen, P. 2017. Runoff changes have a land cover specific effect on the seasonal fluxes of terminal electron acceptors in the boreal catchments. Science of the Total Environment 601-602: 946-958.
- Muneeer, M. & Oades, J. M. 1989. The role of Ca-organic interactions in soil aggregate stability. III. Mechanisms and models. Australian Journal of Soil Research 27: 411-423.
- Myllykangas, J.-P. 2020. Methane processes in the coastal sediments and water column of the Baltic Sea. Doctoral dissertation, University of Helsinki, Faculty of Biological and Environmental Sciences. <http://urn.fi/URN:ISBN:978-951-51-6187-1>
- Niskanen, R. & Jaakkola, A. 1986. Estimation of cation-exchange capacity in routine soil testing. Agricultural and Food Science 58(1): 1-7.
- Ollikainen, M., Kosenius, A.-K., Punttila, E., Ala-Harja, V., Puroila, S., Iho, A. & Ekholm, P. 2020. Gypsum amendment of arable fields as a water protection measure– farmers’ experience, phosphorus reduction potential and associated costs drawn from a large scale pilot. Agricultural and Food Science 29 (5): 383–394.
- Palva, R. & Alasutari, S. 2009. Levityskoneet kipsin peltolevitykseen. TTS tutkimuksen tiedote. Luonnonvara-ala: maatalous 6/2009. (615) <https://portal.mtt.fi/portal/page/portal/mtt/hankkeet/tarveke/kipsinlevitys/8D639DB8FC6E0EA4E040A8C0023C0171>
- Pietola, L. 2008. Gypsum-based management practices to prevent phosphorus transportation. Julk.: Rubæk, G. H. (toim.). Phosphorus management in Nordic-Baltic agriculture – reconciling productivity and environmental protection. NJF Report Vol. 4, No. 4. S. 79–83.
- Puustinen, M., Koskiaho, J. & Peltonen, K. 2005. Influence of cultivation methods on suspended solids and phosphorus concentrations in surface runoff on clayey sloped fields in boreal climate. Agriculture, Ecosystems & Environment 105(4): 565-579.
- Puustinen, M., Turtola, E., Kukkonen, M., Koskiaho, J., Linjama, J., Niinioja, R. & Tattari, S. 2010. VIHMA - A tool for allocation of measures to control erosion and nutrient loading from Finnish agricultural catchments. Agriculture, Ecosystems and Environment 138: 306-317.
- Rankinen, K., Cano Bernal, J. E., Lemola, R. & Turtola, E. 2020. Vesistökuormitukseen vaikuttavat tekijät valuma-alueilla. (Liite 3 julkaisuun "Maatalouden ympäristötoimenpiteiden ympäristö- ja kustannustehokkuus (MYTTEHO) : Loppuraportti"). <https://jukuri.luke.fi/handle/10024/545599>
- Rankinen, K., Keinänen, H. & Cano Bernal, J. E. 2016. Influence of climate and land use changes on nutrient fluxes from Finnish rivers to the Baltic Sea. Agriculture, Ecosystems & Environment 216: 100-115.
- Rantamo, K. 2018. Peltojen kipsikäsittelyn aiheuttama riski virtavesieliöille – Vasteena isonäkingsammalen (*Fontinalis antipyretica*) kasvu ja vuollejokisimpukan (*Unio crassus*) käyttäytyminen. Pro Gradu - tutkielma, Jyväskylän yliopisto, bio- ja ympäristötieteiden laitos, akvaattiset tieteet. <http://urn.fi/URN:NBN:fi:jyu-201803221812>
- Rantamo, K., Arola, H., Aroviita, J., Hämäläinen, H., Hannula, M., Laaksonen, R., Laamanen, T., Leppänen, M., Salmelin, J., Syrjänen, J., Taskinen, A., Turunen, J. & Ekholm, P. 2022. Risk assessment of gypsum amendment on agricultural fields: Effects of sulfate on riverine biota. Environmental Chemistry and Toxicology 41: 108–121.
- RHR. 2016. Rakennus- ja huoneistorekisteri. Digi ja väestötietovirasto (DVV/VTJ).
- Riihimäki, J. 2018. Suomenlahden, Saaristomeren ja Selkämeren valuma-alueiden kipsinlevitykseen sopivien peltolohkojen valinta. <https://blogs.helsinki.fi/save-kipsihanke/2018/03/13/suomenlahden-saaristomeren-ja-selkameren-valuma-alueiden-kipsinlevitykseen-sopivien-peltolohkojen-valinta/>
- Räty, M., Keskinen, R., Yli-Halla, M., Hyvönen, J. & Soinne, H. 2021. Estimating cation exchange capacity and clay content from agricultural soil testing data. Agricultural and Food Science 30(4): 131-145.
- Saarijärvi, E., Kauppinen, M., Heitto, L., Lehtoranta, J. & Ekholm, P. 2013. Onko sulfaatti rehevöittänyt Siilinjärven Kolmisopen? Vesitalous 54 (2): 43–45.

- Shainberg, I., Sumner, M. E., Miller, W. P., Farina, M. P. W., Pavan, M. A. & Fey, M. V. 1989. Use of gypsum on soils: A Review. Julk.: Stewart, B. A. (toim.). *Advances in Soil Science*, Vol. 9. Springer. S. 1–111.
- Sillanpää, M. 1982. Micronutrients and the nutrient status of soils: a global study. *FAO Soils Bulletin* 48.
- Sillanpää, M. & Jansson, H. 1991. Cadmium and sulphur contents of different plant species grown side by side. *Annales Agriculturae Fenniae* 30: 407-413.
- Sipilä, A., Kemppainen, M., Markus, A. & Virtanen, E. 2013. Perunan uudet lannoitteet ja lannoitusmenetelmät. Maa- ja elintarviketalouden tutkimuskeskus. MTT Raportti 115. <http://urn.fi/URN:ISBN:978-952-487-487-8>
- Sippola, J. 1979. Selenium content of soils and timothy (*Phleum pratense* L.) in Finland. *Annales Agriculturae Fenniae* 18: 182-187.
- Smolders, A. J. P., Lamers, L. P. M., Lucassen, E. C. H. E. T., Vedle van der, G. & Roelofs, J. G. M. 2006. Internal eutrophication: How it works and what to do about it – a review. *Chemistry and Ecology* 22(2): 93-111.
- Soinne, H., Hyväluoma, J., Ketoja, E. & Turtola, E. 2016. Relative importance of organic carbon, land use and moisture conditions for the aggregate stability of post-glacial clay soils. *Soil and Tillage Research* 158: 1–9.
- Stout, W. L., Sharpley, A. N. & Landa, J. 2000. Effectiveness of coal combustion by-products in controlling phosphorus exports from soils. *Journal of Environmental Quality* 29: 1239-1244.
- Suojala-Ahlfors, T. & Laamanen, T.-L. 2014. Effect of Calcium Amendment on the Calcium Content and Storage Quality of Carrot (*Daucus carota* L.). *European Journal of Horticultural Science* 79: 278–282.
- SYKE. 2009. Kaivoveden analyysitulkki. Apuvälinen kaivoveden laadun arvioimiseen. www.ymparisto.fi/kaivot/analyysitulkki.
- SYKE. 2022a. HYD-valikko, Raportti ja laskenta ohjelmisto. <https://ckan.ymparisto.fi/dataset/hyd-valikko>
- SYKE. 2022b. Ympäristötiedon hallintajärjestelmä Hertta, Vesienhoito, pintavedet, 3. suunnittelukausi. <https://www.syke.fi/avoointieto>
- Tattari, S., Koskiahio, J., Kosunen, M., Lepistö, A., Linjama, J. & Puustinen, M. 2017. Nutrient loads from agricultural and forested areas in Finland from 1981 up to 2010 - can the efficiency of undertaken water protection measures seen? *Environmental Monitoring and Assessment* 289: 95.
- Truman, C. C., Nuti, R. C., Truman, L. R. & Dean, J. D. 2010. Feasibility of using FGD gypsum to conserve water and reduce erosion from an agricultural soil in Georgia. *Catena* 81: 234-239.
- USDA-NRS. 2015. Amending soil properties with gypsum products. Conservation Practice Standard. Code 333. United States Department of Agriculture, Natural Resources Conservation Service. https://www.nrcs.usda.gov/wps/PA_NRCSCConsumption/download?cid=nrcseprd370440&ext=pdf
- Uusitalo, R., Lemola, R. & Turtola, E. 2018. Surface and Subsurface Phosphorus Discharge from a Clay Soil in a Nine-Year Study Comparing No-Till and Plowing. *Journal of Environmental Quality* 47: 1478-1486.
- Uusitalo, R., Ylivainio, K., Rasa, K., Kaseva, J., Pietola, L. & Turtola, E. 2012. Gypsum effects on the movement of phosphorus and other nutrients through undisturbed clay soil monoliths. *Agricultural and Food Science* 21: 260-278.
- Valtanen, M. 2015. Effects of urbanization on seasonal runoff generation and pollutant transport under cold climate. Academic Dissertation. University of Helsinki, Faculty of Biological and Environmental Sciences. <http://hdl.handle.net/10138/153832>
- Vantaanjoen kipsihanke. 2020. Loppuraportti 30.11.2020. Ympäristöministeriö. https://johnnurmisenfaatia.fi/wp-content/uploads/2020/12/vantaanjoen-kipsihanke-loppuraportti_15.12.20.pdf
- Varcoe, J., van Leeuwen, J. A., Chittleborough, D. J., Cox, J. W., Smernik, R. J. & Heitz, A. 2010. Changes in water quality following gypsum application to catchment soils of the Mount Lofty Ranges, South Australia. *Organic Geochemistry* 41: 116–123.
- Virkajärvi, P., Isoaho, M., Hyrkäs, M., Sihto, U., Rätty, M. & Kauppila, R. 2012. Maan reservikalium ja nurmen kaliumlannoitus. *Maataloustieteen Päivät 2012*. Suomen Maataloustieteellisen Seuran Tiedote 28. <https://journal.fi/sms/article/view/75665/37064>
- VNA 157/2017. Valtioneuvoston asetus talousjätevesien käsittelystä viemäriverkostojen ulkopuolisilla alueilla. <https://www.finlex.fi/fi/laki/alkup/2017/20170157>
- Xu, H. & Guo, L. 2017. Molecular size-dependent abundance and composition of dissolved organic matter in river, lake and sea waters. *Water Research* 117(15): 115-126.
- Yara. 2020. Yara Soil improvement gypsum. Product specification. 26 March 2020. (Pyynnöstä saatavissa Yarasta.).

- Yli-Halla, M. 1987. Sulphate sorption by Finnish mineral soils. *Journal of Agricultural Science in Finland* 59: 41-46.
- Yli-Halla, M. & Hartikainen, H. 1996. Release of soil phosphorus during runoff as affected by ionic strength and temperature. *Agricultural and Food Science in Finland* 5(2): 193-202.
- Yli-Halla, M., Hartikainen, H., Ekholm, P., Turtola, E., Puustinen, M. & Kallio, K. 1995. Assessment of soluble phosphorus load in surface runoff by soil analyses. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 56(1): 53-62.
- Yli-Halla, M., Mokma, D., Peltovuori, T. & Sippola, J. 2000. Suomalaisia maaprofiileja. Maatalouden tutkimuskeskuksen julkaisuja A78. <http://urn.fi/URN:ISBN:951-729-575-8>
- Yli-Renko, M. & Rasa, K. 2011. Kipsikokeilu TEHO-hankkeessa. Julk.: Kulmala, A. (toim.). TEHO-hankkeen raportteja, osa 1. TEHO-hankkeen julkaisuja 1/2011. S. 34–54. <https://www.doria.fi/handle/10024/94230>
- Ylärinta, T. & Sillanpää, M. 1984. Micronutrient contents of different plant species grown side by side. *Annales Agriculturae Fenniae* 23: 158-170.
- Zhang, H., Liu, R. & Lal, R. 2016. Optimal sequestration of carbon dioxide and phosphorus in soils by gypsum amendment. *Environmental Chemistry Letters* 14: 443–448.
- Zhu, B. & Alva, A. K. 1994. The effect of gypsum amendment on transport of phosphorus in a sandy soil. *Water Air and Soil Pollution* 78: 375-382.



ISBN 978-952-11-5506-2 (PDF)

ISSN 1796-1726 (verkkokoj.)