



TEKNILLINEN TIEDEKUNTA

**PUUSTON HAKKUIDEN TAI PALAMISEN
AIHEUTTAMAT TYPEN JA FOSFORIN
RAVINNEHUUHTOUMAT**

Aapo Mannermaa

TUTKINTO-OHJELMA

Kandidaatin-/Diplomityö

Elokuu 2023

TIIVISTELMÄ

Puuston hakkuiden tai palamisen aiheuttamat typen ja fosforin ravinnehuuhtoumat

Aapo Mannermaa

Oulun yliopisto, ympäristötekniikan tutkinto-ohjelma

Kandidaatintyö 2023, 34 s.

Työn ohjaaja yliopistolla: FM Iida Höyhtyä

Tässä työssä tarkasteltiin avohakkuiden vaikutuksia typen ja fosforin huuhtoumiin. Työssä pyrittiin selvittämään huuhtoumia aiheuttavia mekanismeja ja niitä lieventäviä metsänhoidon käytäntöjä. Lisäksi verrattiin avohakkuiden aiheuttamia huuhtoumia maastopalojen aiheuttamiin huuhtoumiin.

Tutkimusmenetelmänä käytettiin kirjallisuuskatsausta borealisella alueella toteutetuista alan tutkimuksista sekä viranomaisten tuottamista tutkimusraporteista. Ennen tutkimuskysymyksen vastausta työssä käytiin läpi typen ja fosforin kiertokulkua metsäekosysteemissä sekä metsien hydrologiaa. Sen jälkeen kerrottiin avohakkuiden vaikutuksista metsän hydrologiaan ja tarkasteltavien ravinteiden kulkuun.

Yleisesti ravinnehuuhtoumien kasvua selittävä tekijä oli ravinteita sitovan ja vettä haihduttavan puuston poisto, joka lisäsi paikallista valumaa. Pohjaveden pinnan nousun todettiin mahdollisesti aiheuttavan fosforin lisääntyntä huuhtoumaa hapettomien olosuhteiden lisäessä redox-herkkien rauta-fosforiyhdisteiden liukoisuutta. Vesiliukoista nitraattia muodostavan nitrifikaation havaittiin kohonneen maaperässä, mikä saattaa lisätä typen huuhtoumaa.

Ravinteikkailla turvemailla tehtyjen avohakkuiden arveltiin joissain tutkimuksissa aiheuttavan enemmän typpihuuhtoumaa kuin köyhemmillä turvemailla toteutettujen hakkuiden. Fosforihuhtoumien taas on tutkimuksissa havaittu olevan mahdollisesti suurempia köyhistä kuin rikkaista turvemaista johtuen köyhien maiden alhaisista fosforia sitovien alkuaineiden pitoisuuksista.

Jatkuvapeitteisen metsänkasvatuksen hyödystä fosforihuuhtoumien lieventämisessä on hieman tutkimusnäyttöä. Typen suhteen tutkimusnäyttö ei ole selkeää. Avohakkuissa syntyvien hakkuujätteiden korjaamisen vaikutukset ravinnehuuhtoumiin eivät ole selkeitä tarkastellun kirjallisuuden perusteella. Suojavyöhykkeiden havaittiin joissain tutkimuksissa alentavan hakkuiden jälkeisiä ravinnehuuhtoumia tehokkaasti, pintavalutuskenttien käytön tehosta sen sijaan on ristiriitaisia tuloksia. Maastopalojen vaikutuksien ravinnehuuhtoumaan havaittiin tutkimuksissa olevan tarkasteltujen ravinteiden kohdalla avohakkuihin rinnastettavia.

Asiasanat: typpi, fosfori, avohakkuu, maastopalo, ravinnehuuhtouma

ABSTRACT

Leaching of nitrogen and phosphorus caused by clear-cutting or wildfires.

Aapo Mannermaa

University of Oulu, Degree Programme of Environmental Engineering

Bachelor's thesis 2023, 34 p.

Supervisor at the university: M.Sc. Iida Höyhtyä

This thesis examined eutrophication causing leaching of nitrogen and phosphorus caused by clear-cutting. The thesis aimed to find mechanisms which cause leaching and forestry practices to alleviate it, and compared leaching caused by clear-cutting to that caused by wildfires.

The research method utilized was literature review of research done in the boreal region and research reports produced by governmental agencies. Before answering the research question, topics such as the cycle of nitrogen and phosphorus in forests, the hydrology of forests and the effects of clear-cutting on the cycles and hydrology were examined.

Clear-cuts were found in many studies to cause increase in runoff from forested areas in response to the disappearance of processes which cause trees to evaporate water. The nutrient take-up of trees also disappeared, and these two factors explained the cause of universal nutrient leaching. The rise of groundwater table level and subsequent creation of anoxic conditions was discovered to possibly cause increased leaching of phosphorus in studies with anoxic conditions increasing the solubility of redox-sensitive iron-phosphorus compounds. Nitrification, which forms water-soluble nitrate, was found to increase in soil after clear-cutting, possibly increasing the leaching of nitrogen.

Clear-cutting on rich peat soils was thought in some studies to cause more nitrogen leaching than similar logging on poorer peat soils. Phosphate leaching, on the other hand, was found to be greater on poorer than richer peat soils, because of the low amount of strongly phosphorus-binding elements in poor peat soils.

Based on studies there is some evidence of continuous coverage of forests to slightly alleviate phosphorus leaching. The evidence is not clear on the effects on nitrogen leaching. The collection of logging waste after clear-cutting did not have any clear effects on nutrient leaching based on the research studied. Buffer zones were found in some studies to effectively lower nutrient leaching from areas of clear-cutting, whereas the studies on overland-flow fields discovered mixed results. The leaching of nitrogen and phosphorus caused by wildfires was found to be similar as that of clear-cutting.

Keywords: nitrogen, phosphorus, clear-cutting, wildfire, nutrient leaching

SISÄLLYSLUETTELO

1	Johdanto.....	6
2	Ravinteet.....	8
2.1	Typpi.....	8
2.2	Fosfori.....	9
3	Hydrologian muuttumisen vaikutus	11
3.1	Puuston vaikutus veden kiertoon.....	11
3.2	Avohakkuun aiheuttamat muutokset hydrologiassa.....	11
3.3	Avohakkuiden vaikutus ravinteiden kulkuun.....	12
3.4	Avohakkuiden vaikutus fosforin huuhtoutumiseen.....	13
3.5	Avohakkuiden vaikutus typen kiertoon.....	14
3.6	Turvemaiden erikoispiirteitä	16
4	Ravinnehuuhtoumaa pienentäviä keinoja.....	18
4.1	Vaihtoehtoiset hakkuutavat	18
4.2	Hakkuutähteiden korjaaminen.....	18
4.3	Suojavyöhykkeet	20
4.4	Pintavalutuskentät.....	21
5	Maastopalot	22
6	Yhteenveto ja johtopäätökset	24
7	Kirjallisuus	26

1 Johdanto

Rehevöityminen tarkoittaa perustuotannon kasvua ekosysteemissä. Vesien rehevöitymistä pidetään Suomessa ongelmana, sillä se aiheuttaa monien epätoivottujen eliöiden, kuten myrkyllisten sinilevien ja roskakaloina pidettyjen särkien, lisääntymistä. Tavallisimmin rehevöityminen aiheutuu vesiekosysteemiin tulevien ravinnepölyjen kasvusta, ja Suomessa perustuotantoa rajoittaa yleensä typpi tai fosfori. Suomalaiset järvet ovat erityisen herkkiä rehevöitymiselle mataluutensa takia. (Hakala ja Välimäki 2003, s. 46-55)

Mitä rehevämpi järvi on, sitä enemmän järvessä tapahtuu happea kuluttavia hajoamisprosesseja. Kun vesi ei vaihdu vesikerrosten välillä talvi- ja kesäkerrostuneisuuksien aikana, kasvaa alusveden happikadon riski. Hapen loppuminen sekä mahdollistaa laajoja kalakuolemia että muuttaa alusveden olosuhteet pelkistäviksi, jolloin järven pohjasedimenttiin sitoutunutta fosforia voi vapautua perustuotannon käyttöön, ja rehevöityminen vahvistaa itseään (Hakala ja Välimäki 2003, s. 46-55). Rehevöitymisen johtaessa happikatoon tulee siis koko ilmiöstä vaikeampi hallita. Rehevöityminen myös kasvattaa eläimille ja ihmisille haitallisia myrkyjä tuottavien syanobakteerien esiintymiä vesistöissä.

Vuonna 2022 metsäkeskukselle tehtiin metsänkäyttöilmoituksia avohakkuista 139 048 hehtaarin alalta, joka on noin 0.7 % Suomen metsäpinta-alasta (Metsäkeskus 2023, Maa- ja metsätalousministeriö 2023). Metsätalouden osuus metsistä ja soilta tulevasta ravinnepölyistä on typen osalta 16 % ja fosforin osalta 25 % kokonaiskuormituksesta (Finer ym. 2020). Metsätalouden ravinnepölyjen suuruuden vuoksi on aiheellista selvittää, vaikuttavatko avohakkuut typen ja fosforin huuhtoumien kasvuun ja voiko mahdollista kasvua hillitä joillain metsätalouden menetelmillä.

Tässä työssä tutkitaan avohakkuiden aiheuttamia vaikutuksia metsistä lähteviin typen ja fosforin ravinnepölyihin. Työn alussa käydään läpi näiden aineiden metsäekosysteemissä kulkeutumisen perusteet ja metsän hydrologiaa. Tämän jälkeen esitetään hakkuiden vaikutuksia hydrologiaan ja miten se muuttaa ravinteiden kiertoa.

Sen jälkeen käydään läpi muutamia hakkuiden rehevöittäviä vaikutuksia mahdollisesti alentavia toimintakäytäntöjä ja lopuksi verrataan avohakkuiden ja maastopalojen vaikutuksia ravinnehuhtoumaan. Työ on toteutettu kirjallisuuskatsauksena, ja työssä on käytetty metsänhoidon vaikutuksia tarkasteltaessa lähteinä boreaalisella vyöhykkeellä tehtyjä tutkimuksia, jotta tulokset vastaisivat Suomen olosuhteita. Oletuksena työssä on ravinnehuhtoumien kasvaminen hakkuiden ja metsäpalon takia.

2 Ravinteet

2.1 Typpi

Typpi on kriittinen ravinne kaikille organismeille, sillä sitä tarvitaan esimerkiksi proteiinien ja DNA:n muodostamiseksi (Bernhard 2010). Typpi on erittäin yleinen kaasu ilmakehässä typpikaasuna, mutta useimmat organismit eivät pysty hyödyntämään typpiä tässä muodossa. Tietyt prokaryootit pystyvät muuntamaan typpikaasua kasvustolle käytettävämpään muotoon ammoniakiksi (NH_3) prosessissa, jota kutsutaan typensidonnaksi. Typensidontaa voi tapahtua myös abioottisesti salamoiden sekä teollisten prosessien kuten fossiilisten polttoaineiden polton kautta. Ammoniakkia vapautuu ekosysteemiin myös kuolleen orgaanisen aineen maatuessa, ja tätä prosessia kutsutaan mineralisaatioksi (Vitousek ym. 1979).

Ammoniakki muuntuu nitriitiksi ja edelleen nitraatiksi nitrifikaatioprosessissa (Bernhard 2010). Myös nitrifikaatio tapahtuu prokaryoottien toimesta. Ammoniakki hapetetaan nitriitiksi (NO_2^-) joka hapetetaan nitraatiksi (NO_3^-) kummankin reaktion tapahtuessa eri prokaryoottiryhmien kautta. Kumpikin ryhmä on yleinen hapellisissa ympäristöissä. (Vitousek ym. 1979) Nitraatti sitoutuu heikosti maaperään ja liukenee veteen lisäten typpihuuhtoumaa (Kreutzweiser ym. 2008, Walley ym. 1996).

Typpiä poistuu ekosysteemeistä denitrifikaatioprosessin kautta (Bernhard 2010). Myös denitrifikaatio on prokaryoottien aikaansaama prosessi, joka tapahtuu hapettomissa olosuhteissa. Prosessista nitraatti voi vapautua lopputuotteena typpikaasuna tai välivaihemuotona typpioksiduulina.

Typpi, joka ei poistu ekosysteemistä denitrifikaation tai huuhtoutumisen kautta, kiertää systeemissä (Vitousek 1981, s. 631-642). Kasvillisuus, kuten puut, kerää typpiä maaperästä juurten kautta ja sitoo sen rakenteisiinsa. Typpi vapautuu takaisin ekosysteemiin joko puiden lehtien tippuessa tai puun kuollessa, jolloin mikro-organismit hajottavat puun typpiä sisältävät rakenteet vapauttaen osan typestä takaisin maaperään.

2.2 Fosfori

Fosfori on toinen eliöille kriittinen ravinne, jota tarvitaan esimerkiksi solujen ja solukalvojen muodostamista varten (Lizcano-Toledo ym. 2021). Fosforin pitoisuus ja liikkuvuus maavedessä voi kuitenkin olla erittäin pientä (Brady ja Weil 2008, s. 601–614). Fosforia vapautuu rapautumalla kiviaineksesta esimerkiksi mykorritsasienten toiminnan kautta (Hartikainen ja Peltovuori 2002). Suurin osa vapautuneesta fosforista joko sitoutuu maavedestä maahiukkasten pinnoille tai joutuu kasvien sitomaksi. Rapautumisesta vapautuu kuitenkin melko vähän fosforia, joten orgaanisesta aineksesta mineralisaation kautta vapautuvalla fosforilla on suuri merkitys fosforin kierrossa (Bueis ym. 2019). Fosforia vapauttavat mineralisaatioreaktiot ovat voimakkaasti riippuvia muun muassa maaperän kosteudesta, lämpötilasta, happamuudesta ja redox-olosuhteista (Shen ym. 2011).

Suurin osa fosforista kuuluu johonkin viidestä ryhmästä: rauta- tai alumiinisitoutunut fosfori, kalsiumsitoutunut fosfori, saveen sitoutunut fosfori, mikrobeihin sitoutunut fosfori tai orgaaninen fosfori (Brady ja Weil 2008, s. 601-614, Xiong ym. 2022, Pistocchi ym. 2018). Rauta-, alumiini- ja kalsiumsitoutuneista ryhmistä liukenee fosforia maaveteen kasvien käytettäväksi kullekin ryhmällä ominaisissa pH-olosuhteissa. Orgaaninen fosfori käsittää hajoavaan orgaaniseen ainekseen sitoutuneen fosforin.

Happamissa maissa, jotka ovat yleisiä Suomessa (Hartikainen ja Peltovuori 2002), epäorgaaninen fosfori on pääasiassa sitoutunut rauta- ja alumiiniyhdisteisiin (Brady ja Weil 2008, s. 601–614). Fosforin pitoisuutta ja liikkuvuutta maavedessä kontrolloi fosforin sitoutuminen maapartikkeleihin ja syntyneen yhdisteen vesiliukoisuus. Heikommin vesiliukoiset yhdisteet ovat pysyvämpiä, jolloin ne sitovat fosforia tehokkaammin. Fosfaattianionit sitoutuvat elektroninvaihdolla positiivisesti varautuneiden rauta- ja alumiinioksidien pinnoille, josta ne voivat korvautua muilla anioneilla. Yhden teorian mukaan fosfori on tällöin sitoutunut reversiibelisti, ja voi hitaasti vapautua maaveteen. Fosfaatti-ioni voi myös korvata rakenteellisen hydroksyyliiryhmän ja muodostaa kompleksin oksidin kanssa. Tämäkin reaktio on reversiibeli, mutta ei mahdollista fosfaatin korvautumista toisella ionilla, joten vain hyvin pieni osa tästä fosforista on eliöiden käytettävissä. Ajan kanssa toinen fosfaattiryhmän happiatomi voi korvata toisen, vierekkäisen hydroksyyliiryhmän, jolloin fosfaatti on

sitoutunut kahteen hydroksidipinnan rauta- tai alumiiniatomiin. Tällöin fosforin irtoaminen rakenteesta on erittäin epätodennäköistä. Fosfaatin ympärille voi vielä saostua enemmän oksidiryhmiä haudaten fosfaatin, jolloin sen katsotaan olevan kaikkein sidotuimmassa muodossa. (Brady ja Weil 2008, s. 601–614)

Sitoutunut fosfori on tasapainossa maaveden fosforin kanssa. Jos veden määrä kasvaa esimerkiksi tulvan takia, fosforin pitoisuus maavedessä pienenee. Tällöin maaperästä vapautuu heikommin sitoutunutta fosforia ylläpitämään tasapainoa. (Hartikainen ja Peltovuori 2002)

3 Hydrologian muuttumisen vaikutus

3.1 Puuston vaikutus veden kiertoon

Sulan aikaan metsäalueille satava sade joko pysähtyy ja lopulta haihtuu metsän kasvillisuuden pinnalta eli tapahtuu interseptio, tai sade pääsee maan pinnalle kasvuston runkoja pitkin tai lehvästön aukoista, josta se joko imeytyy maahan tai haihtuu. Interseption takia maahan pääsemättömän veden määrä riippuu paikallisesta kasvillisuudesta. Kasvuston toinen vaikutus paikalliseen hydrologiaan on transpiraatio. Tämä prosessi käsittää kasvien juurien avulla keräämän veden kuljetuksen ilmarakoihin ja haihdunnan ilmarakojen kautta (Dingman 2008, s.272–301).

3.2 Avohakkuun aiheuttamat muutokset hydrologiassa

Avohakkuun on todettu lisäävän paikallista lumen kertymistä (Schelker ym. 2013, Pomeroy ja Granger 1997, s. 237-242). Avohakkuu poistaa latvuston lunta keräävän kerroksen ja hakkuista muodostunut aukio vaikuttaa paikallisiin tuulimuodostelmiin (Schelker ym. 2013). Latvustosta lumi poistuu sulannan, tuulen ja sublimation kautta (Storck ym. 2002, Varhola ym. 2010), jolloin metsiin kertyy lunta vähemmän kuin aukioille (Koivusalo ja Kokkonen 2002). Muutokset tuulen käyttäytymisessä taas lisäävät lumen kertymistä aukiolle ohjaamalla sille lumisadetta ja siirtämällä lunta metsäiseltä alueelta aukiolle (Golding ja Swanson 1986). Lumi voi myös sulaa huomattavasti nopeammin avohakatuulta kuin metsän varjostamalta alueelta johtuen säteilyn helpommasta pääsystä lumikinokseen (Pomeroy ja Granger 1997, s. 240).

Iden ym. (2013) tutkimus havainnollistaa avohakkuiden aiheuttamaa hydrologian muutosta metsäisellä alueella. Tutkimuksessa podsolimaaperäiseltä alueelta kaadettiin metsää 56 % valuma-alueen alasta, ja muutoksia valunnassa seurattiin 18 vuotta avohakkuun jälkeen. 32 % valuma-alueen alasta oli turvemaata. Alueelle istutettiin männynntaimia 4 vuotta metsän kaadosta. Vuosivalunnan kasvun arvioitiin vähentyneen 10 vuoden sisällä avohakkuista, mutta kausivalunnassa havaittiin suurta vaihtelua: kevätvalunta pysyi koko seuranta-ajan avohakkuista edeltävää aikaa suurempana, kun taas kesävalunta ensin nousi ja sitten laski hakkuista edeltävää aikaa matalammalle tasolle kahdeksannen vuoden jälkeen. Korkean kevätvalunnan arveltiin johtuvan avohakkuiden

aiheuttamasta suuremmasta lumen kertymisestä ja sulannasta. Kesävalunnan laskun selitettiin johtuvan pohjakerroksen kasvuston palautumisesta sekä kasvavien taimien varttuneita puita korkeammasta vedentarpeesta (Jones ja Post 2004), jolloin alueen transpiraatio kasvoi.

Avohakkuiden on todettu lisäävän valuma-alueen valuntaa (Rosén ym. 1996, Ide ym. 2013, Nieminen 2004, Kaila ym. 2015) metsän aiheuttaman interseption ja transpiraation vähentyessä (Dingman 2008, s.272–301). Vaikutus on riippuvainen varsinkin hakkuiden osuudesta valuma-alueen alasta, mutta myös muista tekijöistä. Myös vaikutusten pituudessa ja voimakkuudessa esiintyy vaihtelua. Rosén ym. (1996) tutkimuksessa esimerkiksi todettiin virtaaman lisääntyneen 85 %, kun metsäisestä valuma-alueesta oli avohakattu 50 % osuus alasta. Niin sanotun Nurmes-tutkimuksen yhteydessä taas 55 % hakkuuala aiheutti 17 % lisäyksen suhteelliseen valumaan (Seuna 1988, s. 122–134).

Mannerkosken ym. (2005) tutkimuksessa ei löydetty yhteyttä avohakkuun ja pohjaveden korkeuden muuttumisen välillä. Tutkimuksessa kaadettiin 30 % ja 10 % osuus alasta kivennäismaaperäiseltä valuma-alueelta. Syiksi avohakkuiden vaikutusten puutteeseen ehdotettiin kaadettujen alueiden viereisiltä alueilta tapahtuvaa evapotranspiraatiota sekä mittausten tekemistä kasvukauden ulkopuolella, vaikka tämän ei tutkijoiden mukaan pitäisi vaikuttaa interseption puutteeseen. Myöskään Rusasen (2004) tutkimuksessa ei havaittu muutosta pohjaveden pinnassa avohakkuiden yhteydessä kivennäismaaperällä. Kaila ym. (2014) raportoi kuitenkin pohjaveden korkeuden noususta turvemaa-alueen metsän avohakkuiden yhteydessä, ja Lundin (1999) tutkimuksessa pohjaveden korkeus nousi 15–27 % ja 25–50 % turvemaisilla maaperillä avohakkuiden jälkeen.

3.3 Avohakkuiden vaikutus ravinteiden kulkuun

Lisääntynyt valunta aiheuttaa suurempaa ravinteiden kokonaisvaluntaa, vaikka ravinteiden pitoisuudet valunnassa eivät muuttuisikaan (Rosén ym. 1996, Palviainen ym. 2014). Avohakkuiden on useissa tutkimuksissa todettu lisäävän metsäiseltä valuma-alueelta kulkeutuvien ravinteiden määrää (Holopainen ja Huttunen 1995, s. 185–197, Ahtiainen ja Huttunen 1999, Nieminen 2004, Palviainen 2014) sekä pitoisuuksia valuma-alueen vesistöissä (Carignan ym. 2000, Steedman 2000).

Palviaisen ym. (2014) tutkimuksessa todettiin ravinnepitoisuuksien huomattavaa kasvua valuma-alueella, josta oli avohakattu 34 %. Alueilla, joilla puustosta oli hakattu 11 % ja 8 %, ei kuitenkaan havaittu ravinteiden pitoisuuksien nousua valumassa tai valuman kasvua. Tutkimuksessa arveltiin, että avohakkuiden tulisi kattaa yli 30 % valuma-alueesta suurten vaikutusten aiheuttamiseksi. Kaikkien avohakkuiden ympärillä oli vähintään 10 metrin suojavyöhyke uomiin.

Yleisesti huomattavimpia syitä avohakkuiden aiheuttamiin korkeampiin ravinnepitoisuuksiin huuhtoumassa on mineralisaation lisääntyminen maanpinnan rikkoutuessa ja sen kosteuden kasvaessa sekä kasvillisuuden vähentynyt ravinteiden talteenotto (Rosén ym. 1996, Ahtiainen ja Huttunen 1999, Vitousek ym. 1979). Toisaalta Lepistö ym. (1995) tutkimuksen mukaan nimenomaan lisääntynyt valunta aiheuttaa lisääntyntä ravinnekuormitusta. Tutkimus ei löytänyt korrelaatiota avohakkuiden ja lisääntyneiden huuhtouman ravinnepitoisuuksien välillä, mutta muissa tutkimuksissa on todettu myös lisääntyntä ravinteiden pitoisuutta huuhtoumassa (Lundin 1999, Lepistö ym. 1995).

Hydrologisten muutosten keston ja valunnassa todettujen ravinteiden pitoisuuksien muutoksien välillä on voimakkaita eroja, mutta monissa tutkimuksissa yhteistä oli vaikutusten voimakkuuksien oleminen suurimmillaan 0–5 vuotta hakkuista ja laskevan ajan kanssa (Holopainen ja Huttunen 1995, s. 185–197, Palviainen ym. 2014, Kaila ym. 2015, Lundin 1999). Vaikutusten eriävyyksiin vaikuttavat varsinkin maaston tyyppi ja ravinnepitoisuus (Ahtiainen ja Huttunen 1999). Palviainen ym. (2014) arvioi valunnan ja ravinteiden pitoisuuksien palaavan avohakkuista edeltäville tasoille puuston kasvaessa takaisin, missä voi kestää yli 20 vuotta, ja että lyhyin pitoisuuksien palautuminen pitkäkestoisista tutkimuksista kertovassa kirjallisuudessa oli tyyppien pitoisuuden normalisoituminen 8 vuodessa Rosén ym. (1996) tutkimuksessa Ruotsissa. Palviainen (2014) esitti myös muutoksista palautumisen kestävän kauemmin kylmissä pohjoisissa oloissa hitaamman ravinteiden mineralisaation ja kasvien uudelleenkasvun vuoksi.

3.4 Avohakkuiden vaikutus fosforin huuhtoutumiseen

Kailan ym. (2014) tekemän tutkimuksen mukaan pohjaveden korkeuden muutos avohakkuiden takia oli suurin fosforihuuhtoumia kasvattava tekijä ravinneköyhissä

turvemetsissä, joissa valtalajina oli mänty (*Pinus sylvestris*). Tutkimuksessa toteutettiin avohakkuu kahdeksalle mäntyvaltaiselle, ravinneköyhälle valuma-alueelle, joista neljältä kerättiin kaadettujen puiden rungot, kahdelta sekä rungot että hakkuutähteet ja kahdelta rungot, hakkuujätteet ja kannot. Tutkimuksessa todettiin fosforihuuhtouman olevan sitä suurempi, mitä korkeampi pohjaveden taso oli, ja tuloksista tehdyn analyysin mukaan pohjaveden korkeus selitti 52 % hakkuiden aiheuttamista fosforikuormista sekä 49 % hakkuiden jälkeisistä fosforipitoisuuksista. Fosforia vapautui runsaasti pohjaveden tason ollessa alle 20 cm maan pinnasta, kun yli 30 cm tason korkeus ei ollut yhteydessä fosforin vapautumiseen.

Kailan ym. (2014) tutkimuksen tuloksista esitettiin kaksi selitystä. Pohjaveden korkeuden nousu voi laskea turpeen kykyä sitoa fosforia esimerkiksi levittämällä fosforia sitovaa rautaa turpeessa. Tutkittujen turvemaiden kyky sitoa fosforia oli kuitenkin valmiiksi heikko, joten tätä selitystä pidettiin epätodennäköisenä. Todennäköisimpänä selityksenä pidettiin nousseen pohjaveden tason luomia hapettomia olosuhteita turpeessa, jolloin rauta pelkistyy Fe^{3+} hapetusasteelta Fe^{2+} muotoon. Tällöin rauta-fosforikompleksin liukoisuus veteen kasvaa ja fosforia vapautuu maaveteen helpommin.

Koska fosfori sitoutuu herkästi maaperän yhdisteisiin, avohakkuuprosessin aiheuttama eroosio maaperässä lisää partikkeleihin sitoutuneen fosforin huuhtoumaa. Tämä hakkuiden vaikutus on huomattava varsinkin fosforirikkaissa savivaltaisissa maissa, mutta vähäisempi happamissa maissa. (Kreutzweiser ym. 2008)

3.5 Avohakkuiden vaikutus typen kiertoon

Nitraatin lisääntyneitä pitoisuuksia on havaittu maavedessä monissa tutkimuksissa avohakkuiden yhteydessä (Lundin 1999, Nieminen 2014, Walley 2008, Smolander ym. 1998). Vitousek (1981, s. 631-642) arvioi ammoniumionien saatavuuden olevan tärkein nitrifikaatiota hallitseva tekijä pitkällä aikajänteellä. Avohakkuu lisää maaperän lämpötilaa ja kosteutta lisäten typen mineralisoitumista, jolloin ammoniakkin ja ammoniumionien saatavuus kasvaa. Nitrifikaation kasvun on myös todettu olevan voimakkaampaa rikkaammissa kuin köyhemmissä maissa (Wiklander 1981, s. 642-647). Typen saatavuutta nostavat myös hakkuujätteen jätö maahan sekä muutokset

kasvustossa (Kreutzweiser ym. 2008). Nitrifikaation kasvu on todennäköisempää metsänpohjalla kuin maaperässä.

Rosén ja Lundmark-Thelin (1987) tutkimuksessa löydettiin pieniä määriä nitraattia maavedestä alueilta ilman hakkuutähdekasoja, mutta kasojen alisen maaveden nitraattipitoisuus oli kohonnut. Kasojen alisten tilojen lisääntyneen kosteuden, pH:n ja kohonneen ammoniakkipitoisuuden todettiin lisänneen nitrifikaatiota. Niemisen (2004) tutkimuksessa avohakkuu ja hakkuutähteiden jätö tutkimusalueelle aiheutti huomattavasti suurentuneita nitraatti- ja ammoniumionipitoisuuksia alueelta lähteneessä huuhtoumassa.

Smolander ym. (1998) tutkivat typen kiertoa avohakkuun jälkeen kaatamalla useita podsolimaannoksia metsäalueita, joista useita oli lannoitettu ja yhtä ei. Hakkuiden jälkeen hakkuujätteitä levitettiin tasaisesti ympäri tutkimusalueita. Avohakkuu nosti alueiden pH-arvoja ja suurensi nitrifikaatiota kaikilla paitsi yhdellä lannoitetulla alueella, jolla tapahtui huomattavaa nitrifikaatiota jo ennen avohakkuuta. Typen mineralisaatio kasvoi samaten kaikilla paitsi yhdellä alueella, ja mineralisaation ja nitrifikaation välillä todettiin positiivinen korrelaatio. Myös maaperän pH-arvon ja nitrifikaation välillä oli positiivinen korrelaatio, kun tarkasteltiin alle 4.9 pH:n maaperiä. Jatkotutkimuksessa arvioitiin kasvaneen pH:n ja mineralisaation kasvattaneen myös paikallisia nitrifikaattorien populaatioita (Paavolainen ja Smolander 1998).

Avohakkuiden on huomattu nostavan nitraatin pitoisuuksia huuhtouman kautta pohjavesissä (Rusanen 2004, Kubin 1995, s. 65–71, Mannerkoski 2005). Kubinin (1995, 65–71) tutkimuksessa useiden ravinteiden pitoisuuksia mitattiin pohjavedessä tutkimusalueilla tehtyjen avohakkuiden ja maanmuokkauksen jälkeen. Tulosten mukaan nitraatti muodostaa suurimman huuhtouman pohjaveteen, muiden ravinteiden kuten typen eri muotojen ja fosforin huuhtoutuessa siihen verrattuna vähän tai ei lainkaan. Nitraattipitoisuus ei kuitenkaan ylittänyt rikkaammilla metsäalueilla mitattuja pohjaveden nitraattipitoisuuksia. Pohjoisten ja karujen olosuhteiden katsottiin pitävän pitoisuuksia alhaisilla tasoilla. Myös Rusasen (2004) tutkimuksessa mitattiin avohakkuiden jälkeen pohjavedestä useita muuttujia kuten alkalisuus ja ammoniumpitoisuudet, mutta avohakkuiden todettiin johtaneen vain nitraattipitoisuuksien kohoamiseen tutkimusalueilla. Vaikutusten kesto pystyttiin

toteamaan yhdellä tutkimusalueella 6–7 vuodeksi ennen tutkimusajan päättymistä, mutta nitraatin pitoisuus pysyi pienenä verrattuna suomalaisen pohjaveden keskiarvoon.

3.6 Turvemaiden erikoispiirteitä

Kivennäismaihin verrattuna turvemaat sisältävät enemmän typpeä, joten typen huuhtoutuminen voi avohakkuun jälkeen olla voimakkaampaa turve- kuin kivennäismaalta hakkuun poistaessa typpeä sitovan kasvillisuuden (Nieminen 2004). Turvemaiden väliset erot ravinteisuudessa voivat aiheuttaa eroja avohakkuiden aiheuttamien ravinnevirtausten kasvujen välillä. Köyhien turvemaiden typpivirrat voivat olla rikkaampia turvemaita pienempiä alhaisempien ravinnepitoisuuksien, pienemmän hakkuujätteen määrän sekä hitaamman mineralisaation takia (Nieminen 2003, Kaunisto ja Paavilainen 1988 S. 9). Typpihuuhtoumia rikkaammilta soilta taas voi kasvattaa typpeä sisältävän orgaanisen aineksen kasvanut huuhtoutuminen hapettomista maakerroksista rautarikkaassa turpeessa (Nieminen ym. 2017), ja orgaaninen typpi muodostaa yleensä suurimman osuuden typpihuuhtoumasta metsämailla (Nieminen 2004, Nieminen 1998). Orgaaninen typpi on kasviaineksen epätäydellinen hajoamistuote, jonka huuhtouma kasvaa turvemaaperissä pohjaveden pinnan nousun muodostaessa hapettomia olosuhteita maakerrokseen (Ahti ym. 2005).

Niemisen (2003) tutkimuksessa avohakkuut eivät aiheuttaneet ammonium- tai nitraatti-ionien suurentunutta huuhtoutumista köyhältä, ojitetulta ja mäntyvaltaiselta turvemaalta. Samanlaisia tuloksia on saatu muissakin tutkimuksissa (Ahti ym. 2005). Rikkaalta, ojitetulta ja kuusivaltaiselta turvemaalta avohakkuut taas aiheuttivat orgaanisen typen, nitraatin ja ammoniakki-ionien pitoisuuden kasvun valunnassa useissa tutkimuksissa (Nieminen 1998, Ahti ym. 2005). Niemisen (1998) tutkimuksessa orgaanisen typen pitoisuus ei kasvanut 0–20 cm pinnasta muodostavan turvekerroksen läpi suodattuneessa vedessä, joten lisääntyneen typpivalunnan arvellaan lähteneen syvemmistä turvekerroksista.

Fosforihuuhtoumien on todettu joissakin tutkimuksissa olevan korkeampia köyhemmistä turvemaista heikon fosforin pidätyskyvyn takia, mikä johtuu alhaisesta alumiini- ja rautapitoisuudesta (Cuttle 1983, Ahti ym. 2005, Nieminen 2003). Tähän viittaa se, että fosforilannoitteen käyttö turvemailla lisää fosforin huuhtoutumista alueelta (Ahti 1983,

Renou-Wilson ja Farrell 2007), ellei lannoituksessa käytetä esimerkiksi puuntuhkaa, jonka sisältämät alumiini ja rauta saattavat estää huuhtoutumisen kasvun (Nieminen ym. 2007). Fosforin huuhtouman huomattavasti alhaisempi kasvu rauta- tai alumiinirikkailla turvemaiilla tehtyjen avohakkuiden jälkeen verrattuna köyhiin turvemaihin on todettu tutkimuksissa, joissa fosforin lisääntyneen pitoisuuden huuhtoumassa arveltiin johtuneen hakkuiden aiheuttaman eroosion myötä lisääntyneen partikkelivirtaaman sisältämästä fosforista (Nieminen 2004, Kaila ym. 2015, Palviainen ym. 2014). Avohakkuiden myötä köyhien turvemaiden fosforihuuhtouma voi nousta rikkaita maita korkeammaksi, koska köyhissä maissa fosforia sitovien aineiden pitoisuudet ovat matalia (Nieminen 2004, Nieminen 2003).

4 Ravinnehuuhtoumaa pienentäviä keinoja

4.1 Vaihtoehtoiset hakkuutavat

Lundin (1999) tutki suojuspuu- ja avohakkuun vaikutuksia ympäristöön. Suojuspuuhakkuu tarkoittaa tiettyjen puumäärien jättämistä hakkuualueelle hallan ja veden tason kohoamisen estämiseksi sekä uusien kasvien suojaamiseksi auringonvalolta. Tutkimuksessa ei havaittu merkittäviä eroja hakkuutapojen vaikutuksista pohjaveden korkeuteen tai ravinteiden huuhtoutumiseen. Suojuspuuhakatun alueen virtaama nousi 8 % vähemmän, ja nitraatin pitoisuudet virtaamassa pienenevät nopeammin. Selitykseksi pieniin eroihin metsänkäsittelytapojen välillä ehdotettiin lyhyttä tutkimusaikaa, jolloin suojuspuuhakatun alueen jäljelle jätetyt puut eivät ehtineet reagoida olosuhteiden muutoksiin kasvattamalla transpiraatiota.

Jatkuvapeitteinen metsänkasvatus on metsänhoitoa, jossa metsää ei koskaan hakata täysin paljaaksi. Termin kattamat menetelmät ovat voimakkaan kehittämisen vaiheessa Suomessa, eivätkä niiden nimet ole vakiintuneet. Tutkituimpia kasvatusmenetelmiä ovat esimerkiksi eri-ikäisen ja monijaksoisen metsän kasvatus, ja myös hakkuumenetelmiä tutkitaan useampia, esimerkkinä poimintahakkuu-, kaistale- ja pienaukkohakkuu. (Routa ja Huuskonen 2022)

Turvemailla tehtyjen tutkimusten mukaan jatkuvapeitteinen kasvatus antaa mahdollisuuden turvemaiden pohjavedenpinnan säätelyyn varsinkin poimintahakkuilla niin, että pohjaveden pinnan nousun aiheuttamia huuhtoumia ei synny yhtä paljon kuin avohakkuilla. Kaistale- ja pienaukkohakkuilla vedenpinnan säätely on vaikeampaa. Kaistalehakkuukokeissa mitatut fosforikuormat olivat joitain avohakkuukokeiden kuormia pienempiä, mutta eivät selkeästi kaikkia kokeita pienempiä. Typpihuuhtoumien pienentämisestä jatkuvapeitteisillä kasvatusmenetelmillä ei saatu selviä tuloksia. (Routa ja Huuskonen 2022)

4.2 Hakkuutähteiden korjaaminen

Nykyiset hakkuutekniikat jättävät hakkuutähteet kasoiksi hakkuupaikoille (Nieminen ym. 2017). Nämä kasat todennäköisesti ylläpitävät kosteutta ja alentavat lämpötilojen

vaihtelua verrattuna paljaaseen maakerrokseen, mikä edistää mikrobitoimintaa ja sitä kautta mineralisaatiota (Rosén ja Lundmark-Thelin 1987). Sen lisäksi kasvien kasvu kasojen alla on rajoitettua, mikä vähentää ravinteiden sitoutumista (Nieminen ym. 2017).

Hakkuutähteestä mineralisoituu typpeä ja fosforia (Hyvönen ym. 2000). Typpeä vapautuu enemmän, mutta sitoutuneesta fosforista vapautuu suurempi osa (Hyvönen ym. 2000). Oksat ja varvut sisältävät paljon ravinteita, joten neulaset muodostavat suurimman ravinteiden lähteen hakkuujätteistä näiden alkaessa maata. Hyvönen ym. (2000) arvioi puisen hakkuujätteen vapauttavan neulasia enemmän ravinteita 15–20 vuotta hakkuun jälkeen. Fosfori vapautuu hakkuujätteestä huomattavasti nopeammin kuin typpi (Kaila ym. 2012, Hyvönen ym. 2000, Palviainen ym. 2004). Kailan ym. (2012) tutkimuksessa hakkuujätteen tyyppästä vapautui kolmen vuoden aikana vain 5 %, Palviaisen ym. (2004) tutkimuksessa taas typpeä ei vapautunut ensimmäisten kolmen vuoden aikana.

Toisaalta Rosén ja Lundmark-Thelin (1987) tutkimuksessa hakkuutähdekasojen alisessa suodattuneessa vedessä on podsolimaaperässä todettu huomattavasti suurempia pitoisuuksia typpeä kuin alueilta ilman hakkuujätteitä, kun taas kasojen välisen maaperän tyypipitoisuudet olivat vain hieman tavallista korkeammat. Varsinkin ammoniumionien pitoisuus todettiin tavallista korkeammaksi. Mäkiranta ym. (2012) esittivät tämän johtuvan siitä, että vaikka hakkuujätteestä ei vapaudu typpeä, hakkuujäte kasvattaa humuskerroksen mineralisaatiota nostaen huuhtoutuvan typen pitoisuuksia.

Niemisen (1998) tutkimuksessa taas ei havaittu muutoksia orgaanisen typen tai nitraatin pitoisuuksissa hakkuutähteen alisessa tai hakkuujätteettömiltä alueilta suodattuneessa vedessä rikkaalla turvemaalla. Ammoniumionien pitoisuus kuitenkin kasvoi molemmilla aluetyypeillä, ja alueen ravinnehuuhtoumat nousivat. Kaila ym. (2015) tutkimuksessa taas ei havaittu eroja, kun tutkittiin kokopuu- ja rankapuukerättyjen valuma-alueiden eroja typpi- ja fosforivalunnassa avohakkuiden jälkeen rikkaalla turvemaalla.

Kaila ym. (2014) tutkimuksessa neljältä rankapuukerätyltä alueelta todettiin suurempia fosforikuormia kuin neljältä kokopuukerätyksen alueelta, joilta kahdelta kerättiin myös puiden kantoja. Fosforikuormitukset olivat kuitenkin korkeampia alueilta, joilta kerättiin kantoja. Todennäköisimpänä selityksenä tälle pidettiin vettä johtavien kanavien tuhoutumista maaperässä juuria poistettaessa, mikä johtaa mahdollisesti vähentyneeseen

vedenjohtavuuteen turpeessa ja mahdollistaa hapettomien olosuhteiden syntymisen pohjaveden tason yläpuolelle. Hakkuutähteiden poistoa ei pidetty ratkaisevana tekijänä fosforikuormien pienentämisessä, koska pohjaveden pinnan nousu katsottiin selvästi merkittävämmäksi fosforikuormia määrittäväksi tekijäksi.

4.3 Suojavyöhykkeet

Suojavyöhykkeen on joissain tutkimuksissa huomattu vähentävän avohakkuiden aiheuttamia haittoja tehokkaasti. (Holopainen ja Huttunen 1995, s. 185–197, Ahtiainen ja Huttunen 1999). Holopainen ja Huttunen (1995, s. 185–197) totesivat suojavyöhykkeen vähentävän avohakkuiden ja maanmuokkausten kautta lisääntyneen ravinnehuuhtouman vaikutuksia paikalliseen vesibiologiaan, ja Ahtiaisen ja Huttusen (1999) jatkotutkimuksessa samalta tutkimusalueelta suojavyöhykkeisen puron irtoaines-, fosfaatti- tai typpiyhdistepitoisuus eivät nousseet avohakkuun ja maanmuokkauksen yhteydessä. Kokonaiskuormitus kuitenkin kasvoi lisääntyneen valunnan takia, mutta huomattavasti vähemmän kuin suojavyöhykkeettömiltä tutkimusalueilta.

Vikman ym. (2010) tutkimuksessa suojavyöhykkeiden kykyä pidättää typpeä tutkittiin lisäämällä metsähoidettuun turvemaahan ammoniumnitraattiliuosta. Valuma-alueesta yli yhden prosentin kattavat suojavyöhykkeet pidättivät 93–100 % nitraatista ja 99.1–99.9 % ammoniumioneista. Pienemmät suojavyöhykkeet pidättivät aineita vähemmän tehokkaasti, ja kaikista pienin pidätti 10.2–15.3 % nitraatista ja ammoniumioneista 16.0 % ensimmäisenä ja 7.5 % toisena tutkimusvuotena. Selitykseksi pienimmän suojavyöhykkeen tehottomuudelle annettiin sen muita vyöhykkeitä huomattavasti lyhyempi pituus, jolloin vyöhykkeelle muodostui todennäköisemmin jatkuvan virtaaman kanavia lyhentäen veden viipymäaika.

Väänänen (2008) tutki fosforin pidätystä kuudella metsähoidetulla turvemaapohjaisella suojavyöhykkeellä. Pidätystä tutkittiin lisäämällä alueille fosfaattia, josta viisi kuudesta alueesta pidätti yli 90 %. Kuudes alue pidätti vain 24 % lisätystä fosfaatista, minkä arveltiin johtuneen tämän alueen suuremmasta hydrologisesta kuormituksesta fosfaatin lisäyksen aikana. Tämän seurauksena vyöhykkeelle muodostui jatkuvien virtaamien kanavia, joiden aiheuttama veden viipymääjän lyheneminen vähensi vyöhykkeen pidätyskykyä.

Laajempien suojavyöhykkeiden tehokkuutta selittää potentiaalisten ravinnelujen suurempi laajuus suojavyöhykkeillä, jolloin ne saturoituvat hitaammin (Väänänen 2008). Myös pienempien suojavyöhykkeiden huomattiin kuitenkin laskevan hakkuualueilta lähteviä ravinnevirtoja jonkin verran (Vikman ym. 2010, Väänänen 2008).

4.4 Pintavalutuskentät

Pintavalutuskentällä tarkoitetaan metsänhoitoalueen ja vesistön väliin jäävää aluetta, jolle metsänhoitoalueen valumavedet ohjataan (Joensuu ym. 2019). Pintavalutuskentillä pyritään pidättämään valumavesien kiintoaineita ja ravinteita veden suodatuessa maaperän ja kasvillisuuden läpi, joihin ravinteet voivat sitoutua. Tulokset pintavalutuskenttien toiminnasta ovat vaihtelevia: ne voivat pidättää, olla pidättämättä tai vapauttaa ravinteita valumaan. Fosfori sitoutuu vaihtelevin määrin (16–100 %) lähinnä maaperään ja turpeeseen, mutta pintavalutuskentän perustamisen aiheuttama pohjaveden pinnan nousu voi myös vapauttaa fosforia enemmän kuin kenttä pystyy sitä sitomaan. Typpi voi sitoutua kentän kasvillisuuteen, mikroeläimistöön tai turpeeseen. Riittävän suuren ja mahdollisimman tasaisen alueen käyttäminen pintavalutuskenttänä on avainasemassa kentän tehon varmistamiseksi: veden viipymän tulee olla riittävä ravinteiden pidättymiseksi. Kuten suojavyöhykkeillä, pienille kentille syntyvät jatkuvan virtaaman kanavat heikentävät huomattavasti kenttien toimintaa. (Hynninen ym. 2010)

5 Maastopalot

Maastopalokausien ennustetaan aikaistuvan tulevaisuudessa ilmaston lämmetessä johtaen potentiaalisesti lisääntyneeseen määrään suurempia paloja (Betts ja Jones Jr. 2009). Palojen vaikutukset metsien ekologiaan, maaperään, hydrologisiin reitteihin ja huuhtoumaan voivat olla huomattavia, ja muutosten merkitys voi lisääntyä tulevaisuudessa. Kuten hakkuut myös palot lisäävät valuntaa poistamalla transpiraation, mutta palot aiheuttavat usein myös orgaanisen maaperän mineralisaatiota. Nämä muutokset vaikuttavat kasvillisuuden uudelleenkasvuun, joka on huuhtoumaa säätelevä mekanismi. (Lamontagne ym. 2000) Toisin kuin hakkuut, palot saattavat aiheuttaa pienentyntä kevätvaluntaa (Burke ym. 2005).

Betts ja Jones Jr. (2009) tutkivat maastopalon vaikutuksia metsäpuroihin mustakuusivaltaisilla (*Picea mariana*) valuma-alueilla Kanadassa kaksi vuotta ennen tutkimusalueella vuonna 2004 tapahtunutta paloa ja neljä vuotta sen jälkeen. Kontrollipuroja oli kolme, joista yhden valuma-alueella oli aiheutettu tulipalo tutkimusta varten vuonna 1999, jolloin purosta todettiin kohonnutta nitraatin pitoisuutta myrskyn jälkeen (Petronne ym. 2006). Ilmiö ei kuitenkaan toistunut seuraavan myrskyn aikana. Tutkimusalueen valuma-alueet ovat osittain ikiroutaisia: routa peitti 4–26 % alueista ja 18 % poltetusta valuma-alueesta (Betts ja Jones Jr. 2009), joten tutkimusten tulokset eivät ole täysin rinnastettavissa Suomen oloihin. Ikiroudan vaikutus paikalliseen hydrologiaan on huomattava, sillä routa estää hydrologisten reittien syntymisen syvemmälle maaperään rajoittaen ne ylempään maakerrokseen (Petronne ym. 2006). Tuli poltti keskisuurella tai suurella intensiteetillä 65 % yhden puron valuma-alueesta koskematta purovarren alueeseen huomattavasti. Maastopalo vaikutti huomattavasti palopuron nitraattipitoisuuteen. Pitoisuus ei muuttunut huomattavasti palon jälkeen vuonna 2004, mutta seuraavina tutkimusvuosina nitraatin pitoisuus nousi keskimäärin kaksinkertaiseksi verrattuna paloa edeltäviin vuosiin. Orgaanisen typen pitoisuus palopurossa sen sijaan laski verrattuna kontrollipuroon, ja fosforin pitoisuudessa ei havaittu muutoksia. Eroja nitraattipitoisuuksien muutoksissa alueella aiemmin tehtyyn tutkimukseen selitettiin uudemman tutkimuksen palon suuremmalla osuudella valuma-alueen alaan (65 % , aiemmassa tutkimuksessa 28 %) ja läheisyydellä purovarteen. (Betts ja Jones Jr. 2009) Burd ym. (2018) taas havaitsivat palon aiheuttamaa fosforihuuhtouman nousua

laikuittaisen ikiroudan valuma-alueilla, jotka olivat 60 % sekalaisen turvemaan peitossa, ja joista toisesta oli palanut yli 90 % kolme vuotta ennen tutkimusta.

Lamontagne ym. (2000) seurasivat ravinteiden huuhtoumaa yhdeksältä hakatulta, yhdeksältä poltetulta ja 16 kontrollivaluma-alueelta Kanadassa kolme vuotta tutkittujen tapahtumien jälkeen. Poltetuilta valuma-alueilta poltettiin 50–100 % pinta-alasta (keskiarvo 90 %) ja kasvillisuus paloi rantoihin asti. Hakatuilta alueilta hakattiin 8,5–73 % (keskiarvo 47 %) ja vesistöihin jätettiin 20 metrin suojavyöhyke. Alueen metsät koostuivat mustakuusesta (*Picea mariana*) ja paperikoivusta (*Betula papyrifera* Marsh). avohakkuun ja palojen todettiin yleisesti lisänneen ravinteiden huuhtoumaa verrattuna kontrollialueisiin. Fosforin ja typen kokonaišhhuuhtoumat lisääntyivät poltetuilla ja hakatuilla alueilla suunnilleen yhtäläisesti, fosforin kaksinkertaistuessa ja typen kaksinkolminkertaistuessa. Hhuuhtoumat olivat suurimmillaan vuoden jälkeen tapahtumista ja laskivat 2–3 vuoden jälkeen, pysyen kontrollialueita korkeampina. Nitraattihhuuhtouma kasvoi kuitenkin poltetulla alueella enemmän, 17-kertaiseksi kontrolliin verrattuna, ja huipentui kaksi vuotta tapahtumien jälkeen alueen virtaaman noustessa tutkimusajan korkeimmaksi. Tapahtumien erot nähtiin lähinnä hakkuiden aiheuttamina korkeampina hiilihhuuhtoumina. (Lamontagne ym. 2000)

Samanlaisia tuloksia ravinnepitoisuuksien nousuista maastopalojen jälkeen on saatu muista tutkimuksista (McEachern ym. 2000, Burke ym. 2005, Granath ym. 2021). Nitraatin ja ammonium-ionien kasvaneen hhuuhtouman selitettiin johtuvan kasvillisuuden puutteesta ja mikrobien heikentyneestä kyvystä sitoa hiiltä, ja nitraatin kohonnut hhuuhtouma jatkui useissa tutkimuksissa muita typpiryhmiä kauemmin (Betts ja Jones Jr. 2009, Granath ym. 2021, Certini 2005). Hakkuihin verrattuna palojen aiheuttamat suurentuneet hhuuhtoumat voivat kestää joissain tutkimuksissa lyhyempiä aikoja: esimerkiksi Granathin ym. (2021) tutkimuksessa 1–2 vuotta. Fosfori hhuuhtoutuu pääosin palojen aiheuttaman eroosion myötä partikkeleihin sitoutuneena (Brady ja Weil 2008 s. 601-614).

6 Yhteenveto ja johtopäätökset

Työssä tarkasteltiin avohakkuiden aiheuttamia muutoksia metsistä lähteviin typen ja fosforin ravinnehuuhtoumiin, sillä niiden mahdollistama perustuotannon kasvu vesiekosysteemeissä aiheuttaa rehevöitymistä. Työssä selvitettiin avohakkuiden tai maastopalon vaikutusta alueen ravinnehuuhtoumiin ja huuhtoumia hillitseviä keinoja. Avohakkuut aiheuttavat merkittäviä muutoksia metsien hydrologiaan, mikä näkyy varsinkin kausivalunnan muutoksina. Valunta kasvaa puuston transpiraation poistuessa, ja kevätvalunta nousee kesävalunnan mahdollisesti laskiessa. Valunnan kasvu nostaa yleisesti ravinnehuuhtoumia. Sen lisäksi pohjaveden pinnan nousu voi aiheuttaa lisääntyntä fosforin huuhtoumaa, ja hakkuiden synnyttämät kosteat ja kohonneen pH:n olosuhteet lisäävät nitrifikaatiota ja nitraatin huuhtoutumista.

Turvemaiden erityispiirteet aiheuttavat eroja ravinnehuuhtoumissa ravinnerikkaiden ja köyhien turvemaiden välillä hakkuiden yhteydessä. Typen huuhtouma voi lisääntyä rikkaissa turvemaissa, kun taas köyhissä turvemaissa muutosta ei välttämättä tapahdu. Fosforihuuhtouma taas voi kasvaa huomattavasti rauta- ja alumiiniköyhillä turvemailla, ja muutokset näiden aineiden suhteen rikkaissa turvemaissa voivat jäädä pienemmiksi.

Avohakkuiden aiheuttamaa fosforihuuhtoumien kasvua voidaan jonkin verran rajoittaa jatkuvapeitteisellä metsänkasvatuksella. Typpihuuhtoumien hallinnasta ei sen sijaan saatu selkeitä tuloksia. Tehokkaiden rajoitusten aikaansaaminen on vaikeaa. Hakkuupaikoille jätettyjen hakkuujätteiden vaikutukset ravinnehuuhtoumiin mineralisaation kautta eivät ole selkeitä. On jonkin verran näyttöä typpipitoisuuksien noususta maavedessä hakkuutähdekasojen alla, minkä arvioitiin johtuneen lisääntyneestä mineralisaatiosta kasojen alla. Suojavyöhykkeet voivat vähentää ravinnevirtojen kasvua tehokkaasti riippuen vyöhykkeen koosta suhteessa hakkuualueeseen. Pintavalutuskenttien tehosta on vaihtelevaa näyttöä. Maastopalojen vaikutukset paikalliseen hydrologiaan ovat hyvin samanlaisia kuin avohakkuilla, ja tapahtumat aiheuttavat suunnilleen yhtäläisiä typen ja fosforin ravinnehuuhtoumia.

Työssä ei otettu kantaa ravinnehuuhtoumien kasvuihin lukumäärin, sillä läpikäytyjen tutkimusten tutkimusalueiden paikallisten tekijöiden katsottiin vaikuttavan huuhtoumiin vahvasti. Ravinnehuuhtoumat voivat kasvaa avohakkuiden tai maastopalon jälkeen

puuston ravinteiden sitomisen poistuessa, valunnan kasvaessa ja pohjaveden pinnan noustessa. Hakkuujätteiden vaikutukset ravinnehuhtoumiin ovat vielä epäselviä, sillä läpikäytyjen tutkimusten tarkoitus oli luultavasti havainnollistaa hakkuujätteiden sisältämien ravinteiden mineralisoitumista metsämaahan, eikä huuhtoutumista pois alueilta.

7 Kirjallisuus

Ahti E., 1983. Fertilizer-induced leaching of phosphorus and potassium from peatlands drained for forestry. Helsinki: Metsäntutkimuslaitos, 20 s. ISBN 951-40-0610-0

Ahti E., Kaunisto S., Moilanen M. & Murtovaara I., 2005. Suosta metsäksi. Suometsien ekologisesti ja taloudellisesti kestävä käyttö. Tutkimusohjelman loppuraportti. Metsäntutkimuslaitos, Vantaan toimintayksikkö. Metsäntutkimuslaitoksen tiedonantoja 947. Saatavissa: <https://jukuri.luke.fi/handle/10024/521581> [viitattu 26.6.2023]. 380 s.

Ahtiainen M. & Huttunen P., 1999. Long-term effects of forestry managements on water quality and loading in brooks. *Boreal Environment Research*, 4, S. 101–114.

Betts E.F. & Jones Jr J.B., 2009. Impact of Wildfire on Stream Nutrient Chemistry and Ecosystem Metabolism in Boreal Forest Catchments of Interior Alaska. *Arctic, Antarctic, and Alpine Research*, 41 (4), S. 407-417.

Bernhard A., 2010. The Nitrogen Cycle: Processes, Players, and human Impact. *Nature Education Knowledge*, 3(10), S. 25.

Brady N.C., & Weil R.R., 2008. The nature and properties of soils. 14:sta painos. New Jersey: Pearson/Prentice Hall, cop. 2008. 965 s. ISBN: 0-13-513387-4

Bueis T., Bravo F., Pando V., Kissi Y.-A. & Turrión M.-B., 2019. Phosphorus availability in relation to soil properties and forest productivity in *Pinus sylvestris* L. plantations. *Annals of Forest Science*, 76, S. 97-110.

Burd K., Tank S.E., Dion N., Quinton W.L., Spence C., Tanentzap A.J., Olefeldt D. & 2018. Seasonal shifts in export of DOC and nutrients from burned and unburned peatland-rich catchments, Northwest Territories, Canada. *Hydrology and Earth System Sciences*, 22 (8), S. 4455-4472.

Burke J.M., Prepas E.E. & Pinder S., 2005. Runoff and phosphorus export patterns in large forested watersheds on the western Canadian Boreal Plain before and for 4 years after wildfire. *Journal of Environmental Engineering and Science*, 4 (5), S. 319-325.

Carignan R., D'Arcy P. & Lamontagne S., 2000. Comparative impacts of fire and forest harvesting on water quality in Boreal Shield lakes. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 57, S. 105-117.

Certini G., 2005. Effects of fire on properties of forest soils: a review. *Oecologia*, 143, S. 1-10.

Cuttle S.P., 1983. Chemical properties of upland peats influencing the retention of phosphate and potassium ions. *European Journal of Soil Science*, 34 (1), S. 75-82.

Dingman S.L., 2008. *Physical Hydrology*. Long Grove, Illinois: Waveland Press Inc, 646 s. ISBN: 1577665619, 9781577665618

Finér L., Lepistö A., Karlsson K., Räike A., Tattari S., Huttunen M., Härkönen L., Joensuu S., Kortelainen P., Mattson T., Piirainen S., Sarkkola S., Sallantausta T. & Ukonmaanaho L., 2020. Metsistä ja soilta tuleva vesistökuormitus 2020. Valtioneuvoston selvitys- ja tutkimustoiminnan julkaisusarja. Helsinki: Valtioneuvoston kanslia. 77 s. ISBN 978-952-287-826-7

Golding D.L. & Robert S.H., 1986. Snow distribution patterns in clearings and adjacent forest. *Water Resources Research*, 22 (13), S. 1931-1940.

Granath G., Evans C.D., Strengbom J., Fölster J., Grelle A., Strömqvist J. & Köhler S.J., 2021. The impact of wildfire on biogeochemical fluxes and water quality in boreal catchments. *Biogeosciences* 18 (10), S. 3243-3261.

Hakala H. & Välimäki J, 2003. *Ympäristön tila ja suojelu Suomessa*. Toinen painos. Helsinki: Suomen ympäristökeskus, 446 s. ISBN 951-662-875-3

Hartikainen H. & Peltovuori T., 2002. Fosforin reaktiot ja liikkuminen maaperässä. Teoksessa: *Maataloustieteen päivät 2002*. Suomen maataloustieteellisen seuran tiedote numero 18, Suomen maataloustieteellinen seura. S. 1-5

Holopainen A.-L. & Huttunen P., 1995. Avohakkuun, maanmuokkauksen ja ojituksen hydrobiologiset vaikutukset ja niiden kesto Nurmes-tutkimusalueella. Teoksessa:

Saukkonen S., Kenttämies K. (toim.) Metsätalouden vesistövaikutukset ja niiden torjunta. METVE-projektin loppuraportti. Saatavissa: Metsätalouden vesistövaikutukset ja niiden torjunta (helsinki.fi). Helsinki: Suomen ympäristökeskus, S. 185–197. ISBN 952-11-0007-9

Hynninen A., Saari P., Nieminen M. & Alm J., 2010. Pintavalutus metsätaloustoimien valumavesien puhdistamisessa – kirjallisuustarkastelu. *Suo*, 61 (3–4), S. 77–85.

Hyvönen R., Olsson B.A., Lundkvist H. & Staaf H., 2000. Decomposition and nutrient release from *Picea abies* (L.) karst. and *Pinus sylvestris* L. logging residues. *Forest Ecology and Management*, 126 (2), S. 97-112.

Ide J., Finér L., Laurén A., Piirainen S. & Launiainen S., 2013. Effects of clear-cutting on annual and seasonal runoff from a boreal forest catchment in eastern Finland. *Forest Ecology and Management*, 304, S. 482–491.

Joensuu S., Kauppila M., Lindén M. & Tenhola T., 2019. Metsänhoidon suositukset vesiensuojeluun, työopas [verkkodokumentti]. Tapion julkaisuja. Saatavissa: <https://tapio.fi/wp-content/uploads/2020/09/Metsanhoidon-suositukset-vesiensuojeluun-TAPIO-2019.pdf> [viitattu 26.6.2023]. 66 s.

Jones J.A., Post D.A., 2004. Seasonal and successional streamflow response to forest cutting and regrowth in the northwest and eastern United States. *Water Resources Research*, 40 (5).

Kaila A., Asam Z.-U.-Z., Sarkkola S., Xiao L., Laurén A., Vasander H. & Nieminen M., 2012. Decomposition of harvested residue needles on peatlands drained for forestry – Implications for nutrient and heavy metal dynamics. *Forest Ecology and Management*, 277 (1), S. 141-149.

Kaila A., Laurén A., Sarkkola S., Koivusalo H., Ukonmaanaho., O’Driscoll C., Xiao L., Asam Z. & Nieminen M., 2015. Effect of clear-felling and harvest residue removal on nitrogen and phosphorus export from drained Norway spruce mires in southern Finland. *Boreal Environment Research*, 20, 693-706.

Kaila A., Sarkkola S., Laurén A., Ukonmaanaho L., Koivusalo H., Xiao L., O'Driscoll C., Asam Z.-U.-Z., Tervahauta A. & Nieminen M., 2014. Phosphorus export from drained Scots pine mires after clear-felling and bioenergy harvesting. *Forest Ecology and Management*, 325, S. 99-107.

Kaunisto S., & Paavilainen E., 1988. Nutrient stores in old drainage areas and growth of stands. Helsinki: Metsäntutkimuslaitos, 39 s. ISBN 951-40-1004-3.

Koivusalo H. & Kokkonen T., 2002. Snow processes in a forest clearing and in coniferous forest. *Journal of hydrology*, 262 (1-4), S. 145-164

Kreutzweiser D.P., Hazlett P.W. & Gunn J.M., 2008. Logging impacts on the biogeochemistry of boreal forest soils and nutrient export to aquatic systems. A review. *Environmental Reviews*, 16, S. 157-179.

Kubin E., 1995. Avohakkuun, hakkuutähteiden talteenoton ja maanmuokkauksen vaikutus ravinteiden huuhtoutumiseen. Teoksessa: Saukkonen S., Kenttämies K. (toim.) *Metsätalouden vesistövaikutukset ja niiden torjunta. METVE-projektin loppuraportti.* Helsinki: Suomen ympäristökeskus, S. 65-71. ISBN 952-11-0007-9

Lamontagne S., Carignan R., D'Arcy P., Prairie Y.T. & Paré D., 2000. Element export in runoff from eastern Canadian Boreal Shield drainage basins following forest harvesting and wildfires. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 57 (2), S. 118-128.

Lepistö A., Andersson L., Arheimer B. & Sundblad K., 1995. Influence of catchment characteristics, forestry activities and deposition on nitrogen export from small forested catchments. *Water, Air, and Soil Pollution*, 84, S. 81-102.

Lizcano-toledo R., Reyes-Martin M.P., Celi L. & Fernández-Ondoño E., 2021. Phosphorus dynamics in the soil-plant-environment relationship in cropping systems: A Review. *Applied Sciences*, 11 (23), S. 113-133.

Lundin L., 1999. Effects on hydrology and surface water chemistry of regeneration cuttings in peatland forests. *International Peat Journal*, 9, S. 118-126.

Maa- ja metsätalousministeriö, 2023. Suomen metsävarat. [verkkodokumentti]. Helsinki, Maa- ja metsätalousministeriö. Saatavissa: <https://mmm.fi/metsat/suomen-metsavarat> [viitattu: 26.6.2023].

Mannerkoski H., Finér L., Piirainen S. & Starr M., 2005. Effect of clear-cutting and site preparation on the level and quality of groundwater in some headwater catchments in eastern Finland. *Forest Ecology and Management*, 220 (1-3), S. 107-117.

McEachern P.M., Prepas E.E., Gibson J.J. & Dinsmore W.W., 2000. Forest fire induced impacts on phosphorus, nitrogen, and chlorophyll a concentrations in boreal subarctic lakes of northern Alberta. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 57, S. 73-81.

Metsäkeskus, 2023. Hakkuuajomukset, hakkuuajomukset hakkuutavoittain. [verkkodokumentti]. Helsinki, Metsäkeskus. Saatavissa: <https://www.metsakeskus.fi/fi/avoin-metsa-ja-luontotieto/tietoa-metsien-kaytosta/hakkuuajomukset> [viitattu: 26.6.2023].

Mäkiranta P., Laiho R., Penttilä T. & Minkkinen K., 2012. The impact of logging residue on soil GHG fluxes in a drained peatland forest. *Soil Biology and Biochemistry*, 48, S. 1-9.

Nieminen M., 1998. Changes in nitrogen cycling following the clearcutting of drained peatland forests in southern Finland. *Boreal Environment Research*, 3, S. 9-21.

Nieminen M., 2003. Effects of clear-cutting and site preparation on water quality from a drained Scots pine mire in southern Finland. *Boreal Environment Research*, 8 (1), S. 53-59.

Nieminen M., 2004. Export of dissolved organic carbon, nitrogen and phosphorus following clear-cutting of three norway spruce forests growing on drained peatlands in southern Finland. *Silva Fennica*, 38 (2), S. 123-132.

Nieminen M., Moilanen M. & Piirainen S., 2007. Phosphorus allocation in surface soil of two drained peatland forests following wood and peat ash application. *Silva Fennica*, 41 (3), S. 295–407.

Nieminen M., Sarkkola S. & Laurén A., 2017. Impacts of forest harvesting on nutrient, sediment and dissolved organic carbon exports from drained peatlands: A literature review, synthesis and suggestions for the future. *Forest Ecology and Management*, 392, S. 13-20.

Paavolainen L. & Smolander A., 1998. Nitrification and denitrification in soil from a clear-cut norway spruce (*Picea abies*) stand. *Soil Biology and Biochemistry*, 30 (6), S. 775–781.

Palviainen M., Finér L., Kurka A.M., Mannerkoski H., Piirainen S. & Starr M., 2004. Decomposition and nutrient release from logging residues after clear-cutting of mixed boreal forest. *Plant and Soil*, 263, S. 57–67.

Palviainen M., Finér L., Laurén A., Launiainen S., Piirainen S., Mattson T. & Starr M., 2014. Nitrogen, phosphorus, carbon, and suspended solids loads from forest clear-cutting and site preparation: long-term paired catchment studies from eastern Finland. *Ambio*, 43, S. 218–233.

Petrone K.C., Hinzman L.D., Shibata H., Jones J.B. & Boone R.D., 2006. The influence of fire and permafrost on sub-arctic stream chemistry during storms. *Hydrological Processes*, 21 (4), S. 423-434.

Pistocchi C., Mészáros É., Tamburini F., Frossard E. & Bünemann E.K., 2018. Biological processes dominate phosphorus dynamics under low phosphorus availability in organic horizons of temperate forest soils. *Soil Biology and Biochemistry*, 126, S. 64–75.

Pomeroy J.W. & Granger R.J., 1997. Sustainability of the western Canadian boreal forest under changing hydrological conditions. I. Snow accumulation and ablation. *Teoksessa: Rosbjerg D., Boutayeb N.-E., Gustard A., Kundzewicz Z.W., Rasmussen P.F. (toim.) Sustainability of Water Resources under Increasing Uncertainty. International*

Association of Hydrological Sciences/ Association internationale des sciences hydrologiques (IAHS/AIHS), S. 237-242. ISBN 9781901502053, 1901502058

Renou-Wilson F. & Farrel E.P., 2007. Phosphorus in surface runoff and soil water following fertilization of afforested cutaway peatlands. *Boreal Environment Research*, 12, S. 693-709.

Routa J., Huuskonen S., 2022. Jatkuvapeitteinen metsänkasvatus: Synteesiraportti [verkkodokumentti]. Helsinki: Luonnonvarakeskus. Saatavissa: <https://jukuri.luke.fi/handle/10024/551772> [viitattu 26.6.2023]. 132 s.

Rosén K., Aronson J-A. & Eriksson H.M., 1996. Effects of clear-cutting on streamwater quality in forest catchments in central Sweden. *Forest Ecology and Management*, 83 (3), S. 237-244.

Rosén K. & Lundmark-thelin A., 1987. Increased nitrogen leaching under piles of slash—a consequence of modern forest harvesting techniques. *Scandinavian Journal of Forest Research*, 2, S. 21-29.

Rusanen K., Finér L., Antikainen M., Korkka-Niemi K., Backman B. & Britschgi R., 2004. The effect of forest cutting on the quality of groundwater in large aquifers in Finland. *Boreal Environment Research*, 9, S. 253–261.

Schelker J., Kuglerová L., Eklöf K., Bishop K. & Laudon H., 2013. Hydrological effects of clear-cutting in a boreal forest – Snowpack dynamics, snowmelt and streamflow responses. *Journal of Hydrology*, 484, S. 105-114

Seuna P., 1988. Effects of clear-cutting and drainage in runoff in the Nurmes-study. Teoksessa: *Proceedings of the International Symposium on the Hydrology of Wetlands in Temperate and Cold Regions*, Vol. 1. Joensuu: Suomen akatemia, S. 122–134. ISBN 951-715-215-9

Shen J., Yuan L., Zhang J., Li H., Bai Z., Chen X., Zhang W. & Zhang F., 2011. Phosphorus dynamics. From soil to plant. *Plant physiology*, 156 (3), S. 997-1005.

Smolander A., Priha O., Paavolainen L., Steer J. & Mälkönen E., 1998. Nitrogen and carbon transformations before and after clear-cutting in repeatedly N-fertilized and limed forest soil. *Soil Biology and Biochemistry*, 30 (4), S. 477-490.

Steedman R., 2000. Effects of experimental clearcut logging on water quality in three small boreal forest lake trout (*Salvelinus namaycush*) lakes. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 57, S. 92-96.

Storck P., Lettenmaier D.P. & Bolton S.M., 2002. Measurement of snow interception and canopy effects on snow accumulation and melt in a mountainous maritime climate, Oregon, United States. *Water Resources Research*, 38 (11), S. 5-1-5-16

Xiong J., Liu Z., Yan Y., Xu J., Liu D., Tan W. & Feng X., 2022. Role of clay minerals in controlling phosphorus availability in a subtropical Alfisol. *Geoderma*, 409 (3), S. 115592.

Varhola A., Coops N.C., Weiler M. & Moore D.R., 2010. Forest canopy effects on snow accumulation and ablation: an integrative review of empirical results. *Journal of Hydrology*, 392 (3-4), S. 219-233.

Vikman A., Sarkkola S., Koivusalo H., Sallantausta T., Laine J., Silvan N., Nousiainen H. & Nieminen M., 2010. Nitrogen retention by peatland buffer areas at six forested catchments in southern and central Finland. *Hydrobiologia*, 641, S. 171-183.

Vitousek P.M., 1981. Clear-cutting and the nitrogen cycle. Teoksessa: Clark F.E., Rosswall T. (toim.) *Ecological Bulletins no. 33: Terrestrial Nitrogen Cycles: Processes, Ecosystem Strategies and Management Impacts*. Tukholma: Swedish Natural Science Research Council S. 631-642. ISBN: 9789154602902

Vitousek P.M., Gosz J.R., Grier C.C., Melillo J.M., Reiners W.A. & Todd R.L., 1979. Nitrate Losses from Disturbed Ecosystems. *Science*, 204, S. 469-474.

Väänänen R., 2008. Phosphorus retention in forest soils and the functioning of buffer zones used in forestry. Helsinki: Helsingin yliopisto, 41 s. ISBN 978-951-651-208-5

Walley F.L., Kessel C.V. & Pennock D.J., 1996. Landscape-scale variability of N mineralization in forest soils. *Soil Biology and Biochemistry*, 28 (3), S. 383-391.

Wiklander G., 1981. Rapporteur's comments: Clear-cutting and the Nitrogen Cycle. Heterogeneous Nitrogen Leaching after Clear-cutting. Teoksessa: Clark F.E., Rosswall T. (toim.) *Ecological Bulletins no. 33: Terrestrial Nitrogen Cycles: Processes, Ecosystem Strategies and Management Impacts*. Tukholma: Swedish Natural Science Research Council S. 642-647. ISBN: 9789154602902