



TEKNILLINEN TIEDEKUNTA

METSÄTALouden VAIKUTUKSET POHJAVETEEN

Jussi Keränen

YMPÄRISTÖTEKNIIKAN TUTKINTO-OHJELMA

Diplomityö

Maaliskuu 2021



TEKNILLINEN TIEDEKUNTA

METSÄTALouden VAIKUTUKSET POHJAVETEEN

Jussi Keränen

Ohjaajat: Pertti Ala-aho, Anna-Kaisa Ronkanen

YMPÄRISTÖTEKNIKAN TUTKINTO-OHJELMA

Diplomityö

Maaliskuu 2021

TIIVISTELMÄ

Metsätalouden vaikutukset pohjaveteen

Jussi Keränen

Oulun yliopisto, Ympäristötekniikan tutkinto-ohjelma

Diplomityö 2021, 61 s.

Työn ohjaajat yliopistolla: TkT Pertti Ala-aho, TkT Anna-Kaisa Ronkanen

Metsätalous on merkittävä teollisuuden sektori Suomessa ja metsätaloutta harjoitetaan myös pohjavesialueilla. Metsätalouden vaikutuksia pintavesiin on tutkittu laajalti, mutta vaikutuksista pohjaveteen on tehty huomattavasti vähemmän tutkimuksia. Tämän diplomityön tavoitteena oli selvittää mitä olemassa olevaa tutkimustietoa metsätalouden vaikutuksista pohjaveden määrään ja laatuun on tehty ja koota nämä tiedot yhdeksi kokonaisuudeksi. Näin saadaan muodostettua käsitys tutkimustiedon nykytilasta ja havaitaan mahdolliset puutteet tiedoissa. Työ oli osa MEPO-hanketta, jossa selvitettiin metsätalouden pohjavesivaikutuksia. Työ on kirjallisuuskatsaus, jossa etsitään tutkimustietoa julkisista netissä olevista tiedonhaku sivustoista.

Työssä käytävät tutkimustiedot metsätalouden vaikutuksista pohjavesiin jaettiin metsätaloustoimenpiteiden mukaan. Työssä käytyjä toimenpiteitä olivat hakkuut, metsitys, kulutus ja ojitus. Näiden metsätaloustoimenpiteiden mahdollisista vaikutuksista esitettiin hypoteeseja perustuen pohjaveden ja metsätalouden teoriaan sekä tutkimuksista metsätalouden vaikutuksista pintavesiin. Näihin hypoteeseihin etsittiin vahvistusta tehdyistä tutkimuksista metsätalouden vaikutuksista pohjaveteen.

Kirjallisuuskatsauksessa käydyissä tutkimuksissa havaittiin, että hakkuut lisäävät pohjaveden muodostumista ja samalla pohjaveteen voi päätyä nitraattityppeä, klorideja sekä mahdollisesti muita yhdisteitä. Jonkin verran tutkimuksissa on ollut ristiriitaisuutta siitä, vaikuttavatko hakkuut merkittävästi pohjaveden laatuun. Metsitys näyttäisi tutkimusten perusteella vähentävän pohjaveden muodostumista alueilla, johtuen lisääntyneestä interseptiosta ja evapotranspiraatiosta. Kirjallisuuskatsauksessa käytyjen tutkimusten perusteella selvisi, että kulutuksen myötä pohjaveden muodostuminen lisääntyi ja samalla pohjaveteen päätyi ravinteita, metalleja sekä jonkin verran

polysyklisiä aromaattisia hiilivetyjä. Tutkimusten mukaan ojitus voi potentiaalisesti laskea läheisen harjulla olevan akviferin pintaa toimimalla purkautumisreitteinä pohjavedelle. Tätä purkautumista tapahtuu enemmän, kun ojituksen syvyys ylittää turvekerroksen läpi alapuoliseen mineraalimaaperään. Purkautumista havaittiin tutkimuksissa jonkin verran myös turvekerroksen läpi pistemäisenä purkautumisena. Tätä purkautumista tapahtuu, vaikka turvekerros johtaisi huonosti vettä ja on paksu.

Metsätaloustoimenpiteillä näyttäisi olevan tämän kirjallisuuskatsauksen perusteella vaikutuksia sekä pohjaveden määrään että laatuun. Nämä vaikutukset tulisi ottaa huomioon suunniteltaessa metsätaloustoimenpiteitä pohjavesialueilla, mutta erityisesti silloin, kun pohjavettä käytetään talousvetenä tai ekosysteemit ovat riippuvaisia tästä pohjavedestä. Kartoitettujen tutkimusten pohjalta voisi avautua uusia tutkimuskohteita, kun havaitaan puutteellista tietoa metsätaloustoimenpiteiden mahdollisista vaikutuksista pohjaveden määrään ja laatuun.

Asiasanat: Metsätalous, pohjavesi, hydrologia.

ABSTRACT

Effects of forestry operations on groundwater

Jussi Keränen

University of Oulu, Degree Programme of Environmental engineering

Master's thesis 2021, 61 pp.

Supervisors at the university: Pertti Ala-aho D.Sc. (Tech.), Anna-Kaisa Ronkanen D. Sc. (Tech.)

Forestry is important industrial sector in Finland and large part of aquifers are located in areas where forestry operations are practiced. Effects of forestry operations on surface water quality and quantity have been studied broadly compared to effects on groundwater quality and quantity. Aim of this literature review type master's thesis is to examine studies made from the effects of forestry operations on groundwater quality and quantity and gather these studies as one report. This way we can have a view of the current state of our knowledge about effects of forestry operations on groundwater and detect possible lack of knowledge. This thesis was part of MEPO project which aim was to investigate the effects of forestry on groundwater. This work is a literature review in which made studies are searched using open search websites.

Studies were divided by type of forestry operation. Forestry operations discussed in this thesis were clearcutting, afforestation, slash-and-burn and ditching. Hypothesis's were formed about the effects of these forestry operations based on the theory of groundwater and forestry but also to studies made from effects of forestry on surface water. Answers to these hypothesis's were looked in the studies made from the effects of forestry on groundwater.

According to studies made from effects of tree felling on groundwater we can conclude that formation of groundwater increases after logging and at the same time nitrate, chloride and other compounds can end up in the groundwater. There were some contradictions about the effect of logging on the groundwater quality and are these effects considerable. Afforestation seems to decrease formation of groundwater in the afforested areas because of increased interception and evapotranspiration. Burn-clearing increases

groundwater formation in the burned area but also forms compounds that can end up in groundwater. These compounds are nutrients, metals and polycyclic aromatic hydrocarbons. Ditching can potentially lower groundwater surface in aquifer that is on an esker by working as a discharge point for the groundwater. This discharge happens more when depth of the ditch reaches under the peat layer into the underlying mineral layer. Discharge was detected also through the peat layer despite peat having smaller hydraulic conductivity or the peat layer was thick.

It seems that the forestry operations have some effects on the groundwater quality and quantity. These effects should be taken into consideration when planning forestry operations on areas with groundwater but especially these effects should be considered when groundwater on forestry area is used for consumption or local ecosystems depend on groundwater. The studies made can potentially open new research paths as we find our knowledge lacking in some areas of possible effects of forestry on groundwater quality and quantity.

Keywords: Forestry, groundwater, hydrology.

ALKUSANAT

Tämä diplomityö tehtiin Oulun yliopiston alaisena osana MEPO-hanketta. MEPO-hanketta olivat toteuttamassa Suomen ympäristökeskus (SYKE), Luonnonvarakeskus (Luke), Tapio Oy, Oulun yliopisto, WaterHope ja Gain Oy. Kiitos työn rahoittamisesta on Oulun yliopistolla sekä Maa- ja vesitekniikan tuki ry:llä. Diplomityön tarkoituksena oli selvittää olemassa olevat tutkimukset metsätalouden vaikutuksista pohjaveden laatuun ja määrään ja kerätä ne yhdeksi kokonaisuudeksi. Työn toteuttamisen ajanjakso oli 9/2020–3/2021.

Kiitän lämpimästi työn ohjaajia Pertti Ala-ahoa ja Anna-Kaisa Ronkasta Oulun yliopistolta sekä muita MEPO-hankkeen osallistujia ohjaamisesta ja neuvoista diplomityön teossa.

Kiitän myös perhettäni ja ystäviäni heidän tuestaan ja kannustuksesta opinnoissani ja opintojen ulkopuolella.

Oulussa, 03.03.2021

Jussi Keränen

SISÄLLYSLUETTELO

1 Johdanto	8
2 Pohjaveden ja metsätalouden teoria	9
2.1 Pohjavesi	9
2.1.1 Pohjaveden muodostuminen	9
2.1.2 Pohjaveden virtaus	11
2.1.3 Pohjaveden purkautuminen	13
2.1.4 Pohjaveden laatu	17
2.2 Metsätalous	19
2.2.1 Metsätalous Suomessa	19
2.2.2 Hakuut	20
2.2.3 Metsitys	21
2.2.4 Maanmuokkaus ja lannoitus	22
2.2.5 Kulotus	22
2.2.6 Ojitus	23
2.3 Metsätalouden vaikutukset pintavesiin	23
3 Metsätalouden vaikutuksia pohjaveteen	25
3.1 Metsätalouden vaikutukset pohjaveteen	25
3.2 Hakkuiden vaikutukset pohjaveteen	27
3.2.1 Vaikutukset pohjaveden määrään	27
3.2.2 Vaikutukset pohjaveden laatuun	30
3.3 Metsityksen vaikutukset pohjaveteen	39
3.4 Kulotuksen vaikutukset pohjaveteen	43
3.5 Ojituksen vaikutukset pohjaveteen	46
4 Kooste	49
5 Johtopäätökset	52
6 Yhteenveto	54
Lähdeluettelo	56

1 JOHDANTO

Metsätalous on yksi merkittävimmistä teollisuuden sektoreista Suomessa ja suuri osa pohjavesialueista sijaitsee metsätalousalueilla. Metsätalouden vaikutuksia pintavesiin on tutkittu laajasti sekä Suomessa että muualla maailmassa. Metsätaloudella on kuitenkin vaikutuksia myös pohjavesiin, mutta tutkimuksia näistä vaikutuksista on tehty huomattavasti vähemmän kuin vaikutuksista pintavesiin.

Tämän diplomityön tarkoituksena on käydä läpi olemassa olevaa tutkimustietoa metsätalouden vaikutuksista pohjaveden määrään ja laatuun. Näin saadaan kokonaiskuva nykyisestä tietämyksestä ja voidaan havaita mahdollisia puutteita tiedoissa. Samalla kootaan nämä tiedot yhdeksi kokonaisuudeksi, josta tiedot löytyvät helposti. Työ on kirjallisuuskatsaus ja tutkimustietoa etsitään netistä erilaisilta tiedonhaku sivustoilta.

Ensin työssä käydään läpi pohjaveden ja metsätalouden teoriaa sekä lyhyesti tutkimustietoa metsätalouden vaikutuksista pintavesien laatuun ja määrään. Erilaisia metsätaloustoimenpiteitä, joista etsitään tietoa tässä työssä ovat, hakkuut, metsitys, kulotus ja ojitus. Pääpaino työssä ja projektissa oli selvittää uudisojituksen vaikutuksia pohjaveden määrään ja laatuun. Työssä esitetään hypoteeseja mahdollisista metsätalouden vaikutuksista pohjaveteen. Näihin hypoteeseihin etsitään vahvistusta olemassa olevista tutkimuksista. Lopuksi kerätyt tiedot esitetään koosteena ja pohditaan tutkimustiedossa ilmenneitä vaikutuksia pohjaveden määrään ja laatuun.

2 POHJAVEDEN JA METSÄTALouden TEORIA

2.1 Pohjavesi

2.1.1 Pohjaveden muodostuminen

Pohjaveden muodostumisen kannalta merkittävin veden lähde on sateena tuleva vesi. Sateena tuleva vesi voi infiltroitua suoraan maaperän läpi pohjavedeksi tai vesi voi ensin virrata pintavaluntana jokiin ja järviin, joista vesi suotautuu pohjavedeksi. (Bouwer 1978, s. 6–7) Pohjavedeksi päätyvän veden määrään vaikuttavat merkittävästi maaperän vedenvarastointikyky, suotautumiskapasiteetti ja sateen intensiteetti. Maaperän vedenvarastointikykyyn vaikuttavat maaperän maalaji ja kerrostuneisuus, pinnan muodot, maaperän vesipitoisuus, kasvillisuus sekä maankäyttö. Suotautumiskapasiteetin ollessa pieni osa maaperän pinnalle satavasta vedestä ei imeydy, vaan kulkeutuu pintavaluntana vesistöihin. Osa maaperän pinnalle satavasta vedestä voi myös haihtua, varsinkin lämpötilan ollessa korkea tai sateen intensiteetin ollessa pieni. (Mälkki 1999, s. 22–23)

Veden infiltroitumiseen vaikuttaa erityisesti maaperän kyky läpäistä vettä, eli maaperän hydraulinen johtavuus. Veden läpäisevyys maaperässä on suurempaa, kun hydraulinen johtavuus on suuri. (Fitts 2012, s 48–49) Hydraulisen johtavuuden arvo riippuu maaperän maalajista ja sen arvo on esimerkiksi pienempi savella kuin hiekalla (Hendriks 2010, s 64). Maaperän huokosten suuruus ja jakauma vaikuttavat maaperän hydraulisen johtavuuden suuruuteen (Fitts 2012, s 68). Kuivan maaperän hydraulinen johtavuus on pienempi kuin saturoituneen maaperän, koska kuivan maaperän huokokset ovat pakkautuneet tiheämpään ja siten hidastavat veden liikettä (Fitts 2012, s 82). Hydraulinen johtavuus arvo voi vaihdella maaperässä suunnan ja paikan mukaan. Homogeenisessa kerroksessa hydraulisen johtavuuden arvo on sama jokaisessa kohdassa, kun taas heterogeenisessä kerroksessa se vaihtelee kohdittain. Isotrooppisessa kerroksessa hydraulisen johtavuuden arvo on joka suunnassa sama ja anisotrooppisessa kerroksessa sen arvo vaihtelee suunnan mukaan. (Hendriks 2010, s 68)

Infiltroitumiseen vaikuttaa myös kasvillisuuden määrä ja maankäyttö siten, että vapaa maanpinta altistuu sateen suoralle vaikutukselle, jolloin sadevesi tiivistää maakerroksen ja huuhtoo pieniä partikkeleita halkeamiin, hidastaen veden infiltraatiota. Kasvillisuus

estää sateen suoran vaikutuksen maanpintaan, jolloin tapahtuu vähemmän maan tiivistymistä ja partikkeleiden kulkeutumista. Kasvillisuuden juurakot myös edesauttavat veden infiltraatiota, luomalla maaperään ns. sekundaarista huokoisuutta ja oikovirtausreittejä, joissa vesi voi virrata nopeammin kuin maalaji antaisi olettaa. (Davis & DeWiest 1966, s. 33–37)

Pohjavesi kertyy maaperän alla olevan tiiviin pohjakerroksen päällä olevien maapartikkeleiden avoimeen huokostilaan. Huokostilassa pohjavesi voi liikkua vapaasti tai osittain adsorpoitua maapartikkeleiden pinnalle, riippuen maalajin ominaisuuksista. Eri maalajeilla on erilainen huokoisuus ja lajittuneisuus. Hyvin lajittuneet ja huokoiset maalajit vastaanottavat hyvin vettä ja niissä pohjavesi on vapaasti liikkuvaa. Huonosti lajittuneissa ja matala huokoisissa maalajeissa osa pohjavedestä on pidättynyt maapartikkeleiden huokosiin. Esimerkiksi hiekkaiset ja soraiset maalajit ovat hyvin vettä johtavia. (Mälkki 1999, s. 23–25)

Maanalaisia vedellä kyllästyneitä muodostelmia, jotka ovat kykeneviä johtamaan ja varastoimaan vettä, kutsutaan akvifereiksi. Akviferit jaotellaan salpautumattomiin (Kuva 1) ja salpautuneisiin akvifereihin (Kuva 2). Salpautumattomissa akvifereissa vesi voi liikkua vapaasti, eikä sitä rajoita yläpinnalta vettä huonosti johtava kerros. Pohjaveden pinta on salpautumattomassa akviferissa siinä kohdassa, jossa pohjaveden paine ja ilmanpaine ovat tasapainossa. Salpautunut akviferi on kahden vettä huonosti johtavan kerroksen välissä. Pohjavesi salpautuneessa akviferissa ei ole vapaa pintaista, joten pohjaveden paine akviferissa voi olla huomattavasti ilmanpainetta korkeampi. (Bouwer 1978, s. 3–6)



Kuva 1. Salpautumaton akviferi. Sinisellä katkoviivalla on merkitty pohjaveden potentiaalinen taso.



Kuva 2. Salpautunut akviferi. Sinisellä katkoviivalla on merkitty pohjaveden potentiaalinen taso ja harmaalla viivalla on merkitty vettä huonosti johtava kerros.

Pohjaveden pinnankorkeus voidaan määrittää pietsometrin avulla. Pietsometri on maahan porattava ohut putki, jonka alapää on rei'itetty, jotta vesi pääsee vapaasti virtaamaan sisään, mutta maapartikkelit pysyvät ulkopuolella. Pohjavesi täyttää putken, jolloin saadaan pohjaveden hydraulinen korkeus. Asentamalla useita pietsometrejä toisistaan etäälle, voidaan määrittää pohjaveden virtauksen suuruus ja suunta. (Hendriks 2010, s 51–55)

2.1.2 Pohjaveden virtaus

Pohjaveden liikettä voidaan tarkastella johtamalla hydraulinen korkeus yleisesti tunnetusta veden liikettä kuvaavasta Bernoullin energiayhtälöstä. (Hendriks 2010, s 52–53)

$$h = \frac{v^2}{2g} + z + \frac{p}{\rho g} \quad (1)$$

Missä

- h on hydraulinen korkeus [m]
- v on veden virtausnopeus [m/s]
- g on gravitaatiovakio (9,81 m/s²)
- z on pohjaveden pinnan taso referenssitasosta mitattuna [m]
- p on veden paine [N/m²]
- ρ on veden tiheys [kg/m³]

Yhtälössä esiintyvistä termeistä ensimmäinen on nopeuskorkeus, toinen termi on korkeus ja kolmas termi on painekorkeus. Koska pohjaveden virtausnopeus on yleensä pieni, jätetään nopeuskorkeus usein huomioimatta, jolloin hydraulinen korkeus riippuu vain pohjaveden korkeusasemasta ja painekorkeudesta. (Hendriks 2010, s 52–53)

Kun tarkastellaan pohjaveden liikettä huokoisessa väliaineessa, voidaan määrittää hydraulinen gradientti, joka on hydraulisen korkeuden muutoksen ja matkan muutoksen osamäärä. (Hendriks 2010, s 63)

$$i = \frac{\Delta h}{\Delta x} \quad (2)$$

Missä i on hydraulinen gradientti
 x on tarkasteltu matka [m]

Tässä matka määritellään veden virtaus paikan ja lähtöpaikan välisenä etäisyytenä. (Hendriks 2010, 63) Kaikki tähän mennessä esitetyt yhtälöt yhdistyvät Darcyn yhtälössä, jolla voidaan laskea pohjaveden virtaama. (Hendriks 2010, 64)

$$Q = -KiA \quad (3)$$

Missä Q on pohjaveden virtaama [m³/päivä]
 K on hydraulinen johtavuus [m/päivä]
 A on tarkasteltavan virtauksen poikkileikkauksen pinta-ala [m²]

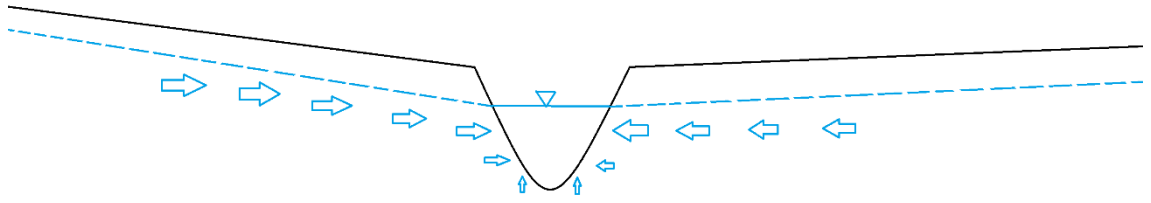
Darcyn laki on sovellettavissa vain laminaariselle virtaukselle ja maalajeissa, joissa partikkelikoko on suurempaa kuin savella, koska saven huokokset ovat pieniä ja aiheuttavat veden pidättymistä savipartikkeleiden väleihin. (Bouwer 1978, s 41–42)

Maaperän eri kerroksien kykyä johtaa vettä kutsutaan transmissiviteetiksi ja sen arvo riippuu maakerroksen hydraulisesta johtavuudesta ja kerroksen paksuudesta. Transmissiviteetti lasketaan kertomalla hydraulinen johtavuus maakerroksen paksuudella. Transmissiviteetin arvoja määritetään usein tekemällä koepumppauksia. (Mälkki 1999, s 42)

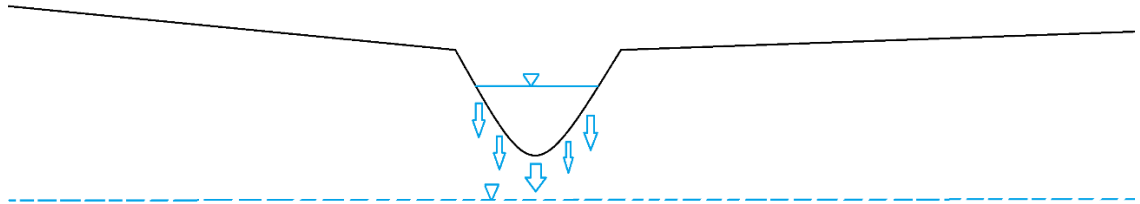
2.1.3 Pohjaveden purkautuminen

Pohjavesi voi purkautua joko luonnollisiin lähteisiin, soihin, jokiin ja järviin tai ihmisen tekemiin ojiin ja kaivoihin. Pohjavettä purkautuu maanpinnalle lähteissä, jotka ovat joko selvästi havaittavia suuria lähteitä tai pienempiä lähteitä, joissa vettä tihkuu maan pinnalle. Suuremmat lähteet muodostavat puroja, jotka laskevat jokiin ja järviin. Lähteitä esiintyy maastoissa, joissa osa akviferista leikkaa maanpinnan kanssa tai joissa on hyvin vettä johtava kerros lähellä maanpintaa. Myös maaperässä olevat huonosti vettä johtavat esteet voivat aiheuttaa lähteen syntymisen, kun pohjavesi nousee maanpinnalle. Lähteitä voi esiintyä myös järvien ja jokien pohjalla, jolloin pohjavettä purkaantuu pintaveden sekaan. (Bouwer 1978, s. 293–294)

Joet ja purot vuorovaikuttavat pohjaveden kanssa joko vastaanottamalla vettä akviferista, luovuttamalla vettä akviferiin tai molemmilla tavoilla. Pohjavettä purkautuu jokiin, jos akviferin pohjaveden pinta on joen ympäristössä korkeammalla kuin joen veden pinta, kuten nähdään kuvasta 3. Jos akviferin pohjaveden pinta on matalammalla kuin joen veden pinta, purkautuu vettä joesta pohjavedeksi, kuten nähdään kuvasta 4. Vettä pohjavedeksi luovuttavat joet voivat olla joko suorassa kosketuksessa akviferin kanssa tai akviferin ja joen välissä on saturoitumaton maakerros, jonka läpi vesi suotautuu pohjavedeksi. Joet, jotka eivät ole suorassa yhteydessä akviferiin ovat riippumattomia pohjaveden pinnan korkeuden vaihteluista. Jotkin joet ovat pysyvästi joko vettä luovuttavia tai vettä vastaanottavia, mutta on myös jokia, joissa luovuttaminen ja vastaanottaminen vaihtelevat huomattavasti paikan ja ajan suhteen. Yleisesti pohja- ja pintavesien vuorovaikutukset muuttuvat ajallisesti jokien tulviessa tai kuivuessa. Jokien tulviessa veden pinta joessa nousee joen reunojen yli normaalisti kuivalle maalle, jolloin vettä varastoituu joenrannalle maaperään. Tulvimisen loputtua ylimääräinen vesi joko palautuu takaisin jokeen tai suotautuu maaperän läpi akviferiin pohjavedeksi. (Winter et al. 1998, s. 9–16)



Kuva 3. Pohjavettä vastaanottava puro. Sinisellä katkoviivalla on merkitty pohjaveden potentiaalinen taso.



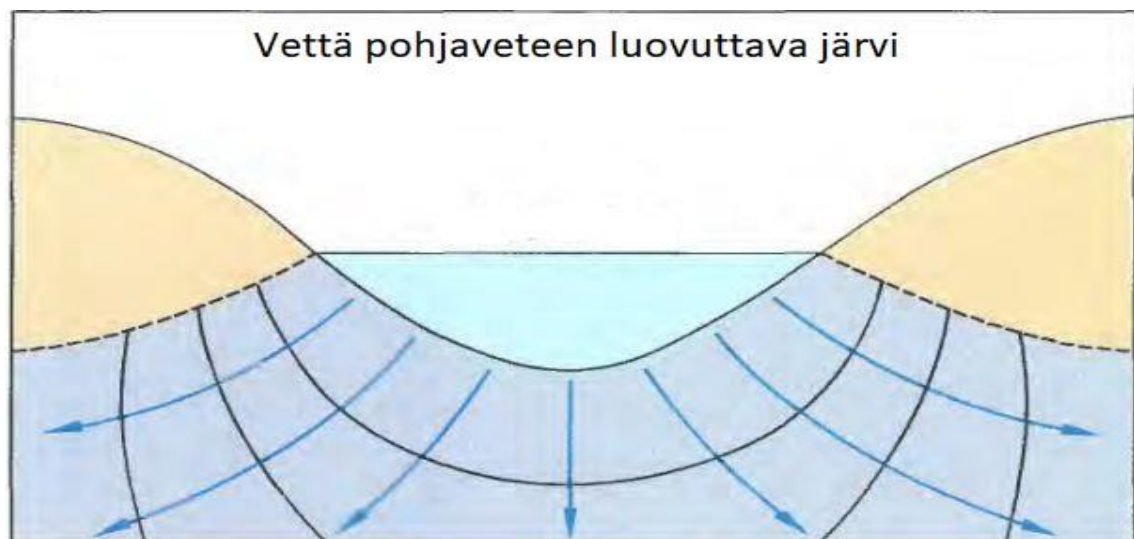
Kuva 4. Pohjaveteen vettä luovuttava puro. Sinisellä katkoviivalla on merkitty pohjaveden potentiaalinen taso.

Myös järvet voivat luovuttaa tai vastaan ottaa vettä akviferista, vastaavalla tavalla kuin joet ja purol. Järvi voi vastaanottaa vettä akviferista (Kuva 5), luovuttaa vettä pohjavedeksi (Kuva 6) tai sekä vastaanottaa että luovuttaa vettä akviferiin (Kuva 7). Toisin kuin jokiympäristöissä, luonnonvaraisissa järvissä veden pinnan korkeuden vaihtelut ovat vähäisempää, jolloin tulvimisen aiheuttamaa veden varastoitumista rantojen maaperään on vähäisempää. Järvien pinta-ala on suurempaa kuin jokien, josta seuraa, että haihtuminen on voimakkaampaa järvissä, jolloin myös pohjaveden ja järven vuorovaikutus muuttuu. Järvien pohjasedimentit ovat usein paksumpia ja sisältävät

enemmän orgaanista ainetta kuin joissa. Tästä seuraa, että pohjaveden purkautuminen tai suotautuminen järvissä on vaihtelevampaa kuin joissa. Järvien reunoilla, jotka ovat alttiita aaltoeroosiolle, tapahtuu enemmän vuorovaikutusta pohjavesien kanssa, koska eroosio poistaa hienojakoisemman materiaalin ja jättää karkeamman materiaalin. Tekojärvissä veden pinnan korkeus vaihtelee huomattavasti niiden säännöstelyn vuoksi. Tällä pinnan korkeuden vaihtelulla on vaikutusta myös siihen, miten järvi on yhteydessä alueelliseen pohjaveteen. Veden pinnan noustessa voi vettä suotautua enemmän akviferiin ja veden pinnan laskiessa voi vettä purkautua järveen akviferista. (Winter et al. 1998, s. 18)



Kuva 5. Pohjavettä vastaanottava järvi (mukaillen Winter et al. 1998, s. 18).



Kuva 6. Vettä pohjaveteen luovuttava järvi (mukaillen Winter et al. 1998, s. 18).



Kuva 7. Sekä vettä pohjaveteen luovuttava että pohjavedestä vettä vastaanottava järvi (mukaiillen Winter et al. 1998, s. 18).

Jokien ja järvien tapaan myös soilla voidaan havaita pohja- ja pintavesien vuorovaikutuksia ja sekoittumista. Soiden luokittelu Suomessa perustuu kasvitieteelliseen luokitukseen. Soiden seitsemän päätyyppiä ovat korpi, neva- ja lettokorpi, räme, neva- ja lettoräme, letto, neva ja luhta. Lisäksi on olemassa suoyhdistymiä, kuten keidassuo ja aapasuo. (Aapala 2013, s. 81–84) Suot saavat vettä joko sateena, pintavaluntana tai pohjavedestä. Suo voi myös luovuttaa vettä maaperään pohjavedeksi (Aapala 2013, s. 42–43). Kuvassa 8. on havainnollistettu vettä pohjaveteen luovuttava suo. Suot eivät välttämättä sijaitse tasaisella maaperällä, vaan ne voivat sijaita myös rinteessä tai vedenjakajien päällä. Rinteissä sijaitsevat suot ovat usein vettä akviferista vastaanottavia suotyyppisiä. Nämä suotyyppit syntyvät kohtiin, joissa akviferin pohjaveden pinta leikkaa maanpinnan kanssa. Vedenjakajilla ja tasaisilla alueilla sijaitsevat suot vastaanottavat suurimman osan vedestään sateena, joten niistä purkautuu vettä akvifereihin. Koska suot koostuvat kasveista, turpeesta ja muusta hajonneesta orgaanisesta aineesta, vuorovaikutus suon ja pohjaveden välillä on hidasta verrattuna jokiin ja järviin. Turpeen hydraulinen johtavuus ja huokoisuus vaikuttavat merkittävästi suon ja pohjaveden vuorovaikutukseen. Suon kasvillisuuden määrä vaikuttaa myös suon ja pohjaveden vuorovaikutukseen. Puisilla soilla on enemmän juurakoita, jotka ottavat vettä turpeesta ja maaperästä, joka puolestaan voi tehostaa pohjaveden nousemista ylöspäin pohjavedestä turvemaalle (Winter et al. 1998, s. 19–21).



Kuva 8. Vettä pohjaveteen luovuttava suo (mukaillen Winter et al. 1998, s. 20).

2.1.4 Pohjaveden laatu

Pohjaveden laatuun vaikuttaa kuinka paljon vettä akviferiin tulee ja mikä on saapuvan veden laatu ja kyky liuottaa yhdisteitä. Sateen mukana sekä kuivalaskeumana tulee maan pinnalle erilaisia yhdisteitä, joista osa kulkeutuu veden mukana pohjaveteen. Akviferin maalaji ja sen koostumus vaikuttavat mahdollisten kontaktipintojen määrään ja sitä kautta pohjaveden laatuun. Akviferin yläpuolisen maaperän kasvillisuuden määrä vaikuttaa pohjaveden laatuun, sillä kasvit ottavat osan maaperän vedestä ja ravinteista omaan käyttöönsä. Maaperän mikrobit osaltaan hajottavat ja tuottavat yhdisteitä, jotka voivat päätyä pohjaveteen. Pohjaveden laatu riippuu myös siitä, kuinka kauan pohjavesi pysyy varastoituneena ja miten nopeasti uusi vesi korvaa vanhaa pohjavettä. Pohjaveden nopea vaihtuvuus poistaa ja levittää pohjavedessä olevia yhdisteitä, jolloin pohjaveden laatu voi muuttua suhteellisen nopeasti. (Mälkki 1999, s. 107–110)

Sadevesi pisarat ja lumihitaleet muodostuvat kiinteän tiivistymisytimenä toimivan partikkelin ympärille. Tyypillisiä ytimenä toimivia partikkeleita ovat meren suolakiteet, pienikokoiset maapartikkelit ja useat muut ilmansaasteet. Näiden partikkeleiden määrä ja liukoisuus vaikuttavat sadeveden laatuun. Sadevisaroiden laatu muuttuu matkalla maahan, kun veteen liukenee ilmakehästä yhdisteitä. Sadevesi sisältää liuenneena useita ioneja, joita ovat natrium-, magnesium-, kalium-, kalsium-, kloridi-, sulfaatti-, nitraatti-, ammonium-, fosfaatti- ja vetykarbonaatti-ionit. Puhtaan sadeveden pH on noin 7 ja kun pH laskee alle 5.7, puhutaan happamasta sateesta. (Dingman 2008, s. 162–163) Sadeveden mukana pohjaveteen tulee happea, hiilidioksidia ja muita sadeveteen liuenneita yhdisteitä. Veden ollessa hiilihappopitoista, rapauttaa se kemiallisesti

maaperästä silikaatteja, jolloin vapautuu muun muassa kalsium-, magnesium- ja rautaioneja. Veteen liuenneet metallit muodostavat usein muun muassa karbonaatteja. Sadeveden sisältämät rikki- ja typpiyhdisteet lisäävät alumiinin, kadmiumin, mangaanin, sinkin ja lyijyn liukenemista veteen ja siten päätymistä pohjaveteen. Yhdisteiden liukenemista maaperästä edistää veden matala pH. (Mälkki 1999, s. 111–112)

Happi vaikuttaa pohjaveden laatuun kahdella tavalla. Pohjaveden hapensaannin mukaan pohjavesivyöhyke voi olla joko hapettava tai pelkistävä. Happipitoisuudet vaihtelevat yleisesti akviferissa siten, että pintakerrokset ovat yleensä happirikkaita ja pohjaosissa vallitsee puute hapestä. Happipitoisuus vaikuttaa ionien hapettumiseen ja pelkistymiseen pohjavedessä. Esimerkiksi rauta-, mangaani-, nitriitti- ja ammoniumionit ovat alttiina hapettumiselle ja pelkistymiselle. Happipitoisuuden ollessa korkea, ei pohjavedessä paljoa rautaa ja mangaania, mutta happipitoisuuden laskiessa, havaitaan myös kohonnuttua rauta- ja mangaanipitoisuutta. Happipitoisuus vaikuttaa myös ammoniumin, nitriitin ja nitraatin esiintymiseen pohjavedessä. Pohjaveden hapensaantiolosuhteiden ollessa heikot, havaitaan kohonneita ammonium- ja nitriittipitoisuuksia. Pohjaveden runsas muodostuminen tuo akviferiin lisää happirikastavettä, joka virtausolosuhteitten mukaan kulkeutuu pohjaveden mukana purkautumispaikoille. Virtausolosuhteista riippuen jotkin alueet akviferista jäävät ilman happirikasta vettä, jolloin syntyy happivajaita alueita. Suuret määrät happea kuluttavia yhdistettä kuluttaa pohjavedestä happea muuttaen pohjaveden olosuhteita pelkistäväksi. (Mälkki 1999, s. 112–115)

Typeä päätyy maaperään sadeveden mukana, kuivalaskeumana, biologisen sidonnan avulla ja lannoitteista. Tämä tyyppi voi kulkeutua veden mukana pohjaveteen. Suurin osa maaperässä esiintyvistä tyypeistä on orgaanista typeä. Nämä orgaaniset typpiyhdisteet ovat osana kasvien ja mikrobien solurakenteita. Orgaaninen tyyppi voi olla vaikeasti hajoavissa tai helposti hajoavissa yhdisteissä. Hyvin vähäinen osa maaperän tyypeistä on epäorgaanista ammoniumia ja nitraattia. Epäorgaaninen tyyppi osallistuu mikrobiologisiin reaktioihin, joissa maaperän mikrobit muuttavat typeä eri muotoihin. Näitä reaktioita ovat nitrifikaatio, denitrifikaatio, mineralisaatio ja immobilisaatio. Näihin reaktioihin osallistuvat mikrobit ovat lajistoltaan vaihtelevia ja vaikuttavat elinolosuhteiden lisäksi reaktioiden tapahtumiseen ja niiden nopeuteen. Näihin reaktioihin vaikuttavat ympäristökijät ovat maan pH, lämpötila, kosteus ja happipitoisuus. Ammoniumionit voivat olla kasvien ja mikrobien käytössä, mutta ammoniumionit voivat myös sitoutua maaperään tai hapettua nitraatiksi nitrifikaatioissa. Ammonium voi myös huuhtoutua

veden mukana pohjaveteen tai pintavesiin, mutta korkeassa pH:ssa se muuttuu ammoniakiksi, joka haihtuu. Nitraatti on myös kasvien ja mikrobien käyttämä yhdiste ja se on typen hapettumistuotteista pysyvin. Nitraatti ei sitoudu juurikaan maa-ainekseen vaan liukenee veteen ja voi huuhtoutua sekä pintavesiin että pohjaveteen. (Paasonen-Kivekäs et al. 2016, s 192–193)

Talousvetenä käytettävälle pohjavedelle on asetettu terveysvaikutuksiin perustuvia enimmäisarvoja. Raskasmetallit ovat eliöille myrkyllisiä ja niitä kertyy ihmisen sisäelimiin aiheuttaen vaurioita. Erityisesti sikiöt ovat alttiita raskasmetallien vaikutuksille. Kadmiumia esiintyy luonnon vesistöissä yleensä alta 1 µg/l ja vesijohto vedessä alle 0,05 µg/l. Kadmiumin enimmäisarvo talousvedessä on 5,0 µg/l. Elohopeaa esiintyy pohjavedessä ja talousvedessä yleensä alle määrittäjärajan 0,2 µg/l. Elohopean enimmäisarvo on talousvedessä 1,0 µg/l. Lyijyä on pintavesissä alle määrittäjärajan 0,5 µg/l ja pohjavesissä alta 0,5–4 µg/l. Lyijyn enimmäisarvoksi on asetettu talousvedessä 10 µg/l. Nitraattia syntyy vesiin typpiyhdisteiden hajoamisesta ja hapettumisesta. Nitraatilla voi olla terveysvaikutuksia imeväisikäisiin lapsiin ja se voi lisätä syöpäriskiä. Tyypillisesti luonnonvesien nitraattipitoisuudet ovat alle 5 mg/l. Enimmäisarvoksi nitraatille on säädetty 50 mg/l. Ammoniumia syntyy vesiin typpiyhdisteiden hajotessa. Sitä esiintyy luonnostaan joissain pohjavesiesiintymissä. Ammonium ei ole erityisen myrkyllistä ihmiselle. Laatutavoite ammoniumille talousvedessä on 0,5 mg/l. Polysykliset aromaattiset hiilivedyt eli PAH-yhdisteet ovat potentiaalisesti syöpää aiheuttavia. Niitä syntyy veteen epätäydellisessä palamisessa ja biologisessa toiminnassa. PAH-yhdisteiden enimmäispitoisuudet yhteensä saavat olla 0,1 µg/l. Alumiinia esiintyy vesistöissä yleensä alle 0,1 mg/l. Alumiinilla on yhteyksiä joihinkin neurologisiin häiriöihin. Talousveden alumiinin laatutavoite on 200 µg/l. (Valvira 2020)

2.2 Metsätalous

2.2.1 Metsätalous Suomessa

Metsätalous on yksi Suomen suurimmista teollisuuden sektoreista. Metsätalous on kehittynyt huomattavasti viimeisen kahden sadan vuoden aikana. 1800-luvulla kehittyi sahateollisuus ja sen ohelle kehittyi paperin ja massan valmistus 1900-luvulla. Metsäteollisuuteen sisältyy sahateollisuus, paperiteollisuus ja massateollisuus. Lisäksi metsätalous tuo muita taloudellisia hyötyjä, esimerkiksi rakennusmateriaaleja, energiaa,

polttopuita, marjastusta, sienestystä, erilaisten esineiden valmistusta ja virkistyskäyttöä. (Maa- ja metsätalousministeriö 2020)

Metsätalouden bruttoarvoinen tuotanto oli yli 23 miljardia euroa vuonna 2018. Tavaraviennissä metsätalouden viennin osuus Suomessa on 20 prosentin luokkaa. Vuosittain metsätalouden arvo lisääntyy noin 9 miljardia euroa. Teollisuuden lisäksi metsätalous on merkittävä tulonlähde ja omaisuus myös metsänomistajille. Metsänhoitoon investoitiin metsänomistajien toimesta yhteensä 300 miljoonaa euroa. Metsätalous mahdollistaa arvioidusti noin 60 miljoonan kilon marjojen ja sienien keräämisen vuodessa, joka vastaa taloudellisesti arvioidusti yli sataa miljoonaa euroa. (Maa- ja metsätalousministeriö 2020)

Metsänhoito on edellytys metsien käyttämiselle. Tavoitteena on pitää metsämaa hyväkuntoisena ja tuottavana sekä säilyttää metsien elinvoimaisuus ja monimuotoisuus. Metsienhoidossa otetaan huomioon taloudelliset tavoitteet sosiaaliset ja ekologiset näkökulmat. Olosuhteet kasvupaikoilla, puulajien vaatimukset kasvupaikalle ja metsikköjen kehitysvaiheet määräävät millaista metsänhoitoa voidaan harjoittaa kullakin alueella. (Rantala 2014, s 54)

2.2.2 Hakkuut

Puiden uudistushakkuissa poistetaan puustoa, joka on saavuttanut uudistamisiän. Tehtaässä puuston avohakkuun, poistetaan siinä kaikki puut pois lukien luonnonhoitokohteiden puustot, vesistöjen suojavyöhykkeet ja säästöpuuryhmät. Metsän luontaisessa uudistuksessa jätetään osa puustosta joko uudistettavalle alueelle tai sen reunalle siementämään uudistusalueita. Luontaisen uudistamisen hakkuutyyppejä ovat siemenpuu-, suojuspuu ja kaistalehakkuut. Metsissä, joissa kasvaa eri ikäisiä puita, voidaan metsänuudistamista edistää poiminta- ja pienaukkohakkuilla. (Rantala 2014, s. 87)

Harvennushakkuita käytetään metsänhoitamiseen kasvatusmetsissä, kun metsän puusto on kasvanut liian tiheäksi. Tällöin osa puustosta poistetaan, jolloin saadaan lisättyä jäljelle jääneiden puiden elintilaa. Harvennuksessa saadaan myös tuloja kaadetuista puista. Harvennettaessa metsää mietitään erityisesti sen ajankohtaa, määrää ja kannattavuutta. Ajankohdalla ja määrällä vaikutetaan paljonko puustoa jää kasvamaan ja paljonko tulee hakkuukertymää. Harvennuksella parannetaan metsänkasvatuksen

kannattavuutta tuloilla ja vaikutetaan samalla myös seuraavien hakkuiden kannattavuuteen. Puuvalinnoilla voidaan vaikuttaa metsäalueen monimuotoisuuteen jättämällä esimerkiksi lahopuita sekä säästöpuita. Myös riistan olosuhteet voidaan ottaa huomioon jättämällä tiheikköjä. (Huuskonen et al. 2014, s. 68–69)

Nykyisin on siirrytty enemmän jatkuvan kasvatuksen eli erirakenteisen metsänkasvatuksen periaatteisiin. Jatkuvalla kasvatuksella tarkoitetaan metsänhoitoa ilman avohakkuita. Jatkuva kasvatus on yleensä pienialaista, mutta se kohdistuu myös suurempiin metsiköihin. Metsää kasvatetaan harvaan, jotta uudistaminen onnistuu paremmin, alikasvustot menestyvät, puiden kunto paranee ja puuntuotanto on kannattavaa. Ominaista jatkuvalla kasvatukselle on joustavuus, jolloin voidaan soveltaa erilaisia toimenpiteitä metsiin ja metsiköihin ottaen huomioon olosuhteet, lähtökohdat ja tavoitteet. Toimenpiteissä voidaan poimia yksittäisiä puita tai tehdä laajempaa ylispuustoista uudistusala. Metsään voidaan tehdä pienaukkoja poiminnan rinnalla, jolloin pystyyn jääviä välimetsiä harvennetaan tai poimintahakataan. Kokonainen metsikkö voidaan muuttaa siemen- tai suojuspuustoiseksi, jotta uusia puusukupolvien voi syntyä, jonka jälkeen taimikosta kehitetään vaihtelevasti eri rakenteisia metsiä. Erirakenteiskasvatuksen tarkoitus talousmetsissä on tuottaa ja kaataa paljon puuta. Jatkuva kasvatus on yleensä taloudellisesti kannattavaa ja sitä suositaan, koska toisin kuin avohakkuut ja maanmuokkaaminen, se ei aiheuta niin suuria muutoksia metsäalueen maaperässä ja maisemassa. (Rantala 2014, s. 179–180)

2.2.3 Metsitys

Metsitys on metsätaloustoimenpide, jossa metsää istutetaan alueelle, jossa ei ole kasvanut metsää ennestään tai metsää ei ole kasvatettu lähiaikoina. Alueita, joita yleisesti metsitetään, ovat yleensä hyödyttömiä maita tai maatalousalueita, joissa tuottavuus on heikentynyt. Keinotekoinen istuttaminen tapahtuu yleensä siementen tai taimien avulla. Siementen kylväminen tapahtuu usein ilmasta käsin, riippuen alueen laajuudesta. Metsien istuttamisessa on ympäri maailmaa ollut mukana myös poliittisia ja sosioekonomisia syitä. Erilaisia syitä metsitykselle ovat olleet esimerkiksi halu pysyä riippumattomana puuntuonnista tai lisätä jo olevassa olevan metsätalouden tuottavuutta. Yleisesti käytetty tapa suojata maatalousmaata eroosiolta ja tuulelta, on metsitys, jossa kuivalla maaperällä olevan maatalousalueen ympärille istutetaan metsiä. Nämä metsät toimivat suojaamisen lisäksi tulon ja polttopuun lähteenä paikallisille maanviljelijöille. (Grebner et al. 2014, s. 260–263)

2.2.4 Maanmuokkaus ja lannoitus

Maanmuokkauksella pyritään parantamaan maaperää, jotta istutetut taimet ja siementen säilyisivät ensimmäisten vuosien aikana elossa ja kasvukykyisinä. Samalla vähennetään tuholaishyönteisten, kuten tukkimiehentäin, aiheuttamia tuhoja istutetuille taimille. (Rantala 2014, s. 91) Maanmuokkauksen seurauksena taimien kasvialueen vesi-, lämpö ja ravinneolosuhteet paranevat. Maanmuokkausta joudutaan tekemään taimien istuttamisen yhteydessä, jos maaperä on köyhtynyttä. Muokkaus kohdistuu maaperän humukseen ja kivennäismaan pintaosiin. Maanmuokkausmenetelmä valitaan maaperän maalajin ja kasvillisuuden paksuuden perusteella. Erilaisia tapoja maanmuokkaukseen ovat laikutus, vaotus, auraus, mätästys, jyrshintä sekä erilaiset kevyet menetelmät. Yhteistä näille menetelmille on maaperän pintakerroksen rikkomisen ja maa-aineksen poistaminen. (Hannelius et al. 1989, s 92–95)

Puut tarvitsevat hyvään kasvuun ja elinvoimaisuuteen riittävästi ja tasaisesti ravinteita. Lannoittamalla metsiä pyritään nopeuttamaan puiden kasvua sekä korjaamaan haitallista metsämaan ravinteiden epätasapainoa. Tyypillisesti kangasmailla typen määrä on eniten puiden kasvua rajoittava tekijä. Fosfori ja kalium ovat puolestaan ojitetuille turvemaille tyypillinen kasvua rajoittava tekijä. Yleisesti käytettyjä kangasmaiden typpilannoitteita ovat suomensalpietari ja NP-lannos. Suositeltavat lannoitus määrä Etelä-Suomessa ovat 150 kg/ha ja Pohjois-Suomessa 120 kg/ha. Levittämisaikakohdaksi lannoitteille on suositeltu kasvukauden alkupuolta. Runsastyyppisiä soita suositellaan lannoitettavaksi PK-lannoksella ja karuja soita NPK-lannoksella. (Rantala 2014, s. 155)

2.2.5 Kulotus

Kulottamisella poltetaan pintakasvillisuutta, hakkuutähteet sekä jonkin verran humuskerroksen pintaosaa. Humuskerroksesta tulisi onnistuneesti suoritettujen kulotusten aikana palaa suurin piiretein noin kolmannes kerroksen paksuudesta. Enempi palaminen voi pitkittää maaperän taimettumista, jopa vuosikymmenten pituiseksi. (Rantala 2014, s. 97) Kulotuksella voidaan myös turvata metsäpaloista riippuvaisten eliöiden elinolosuhteet ja luonnon monimuotisuus. Kulotuksen etuja ovat, että se vähentää kasvillisuuden kilpailua, ehkäisee maan happoimitumista ja edistää hajottavien mikrobien toimintaa. Hajottaja mikrobien lisääntyminen lisää ravinteiden määrää maaperässä. Kulotuksen mahdollisena haittana on mahdollisuus tulen hallitsemattomaan leviämiseen.

(Hanneliuss et al. 1989, s 95–96) Kulotukseen sopii moreenimaiset kuivahkot ja tuoreet kangasmetsät edellyttäen, että maan vesitalous on toimiva (Rantala 2014, s. 97).

2.2.6 Ojitus

Ojituksella pyritään kuivattamaan soistuneiden alueiden maaperää, jotta puiden kasvuolosuhteet paranisivat. Parantuneet kasvuolosuhteet eivät ole pysyviä, koska ojien kunto huononee ajan myötä madaltumisen, eroosion ja kasvillisuuden kasvun vaikutuksista. Ojien mataloituminen johtuu turpeen painumisesta, mutta myös kasvialueella, kaivuutavalla, turpeen maatumisella ja maaperän laadulla on vaikutus. Ojien tukkeutumisesta seuraa pohjavedenpinnan tason nousua turvemaalla, josta seuraa puiden kasvun heikkenemistä. (Huuskonen et al. 2014, s 129)

Soiden uudisojitus on lopetettu 90-luvun puolivälissä. Olemassa olevien ojien kuntoa pidetään yllä kunnostusojituksella. Kunnostusojituksen tavoitteena on pitää yllä ojitetun alueen vesitaloutta, jotta puiden kasvu jatkuisi mahdollisimman tuottavana. Kunnostusojituksen tarvetta arvioitaessa, otetaan huomioon kasvupaikan ravinteisuus, lämpöolot, puiden määrä ja ojituksen vaikutukset kasvuun. Yleisesti kunnostusojitus ajoitetaan muiden metsätaloustoimenpiteiden, kuten hakkuiden, yhteyteen. Uhanalaiset suotyypit jätetään kunnostusojittamatta. (Heinonen & Pelkonen 2004, s 26)

2.3 Metsätalouden vaikutukset pintavesiin

Metsätalouden myötä alueen hydrologia muuttuu ja tämä vaikutus riippuu käytetystä metsätaloustoimenpiteestä. Hakkuiden myötä puuston määrä vähenee, jolloin ei tapahdu puiden interseptiota ja evapotranspiraatiota. Tämä näkyy siinä, että enemmän sadevettä pääsee maanpinnalle ja muodostaa enemmän pintavaluntaa. Pintavalunnan mukana voi huuhtoutua erilaisia yhdisteitä vesistöihin. Ojituksen vaikutuksesta ojitetulle alueelle tulevat sadevedet kulkevat ojia pitkin vesistöihin. Samalla voi huuhtoutua yhdisteitä sekä tapahtua ojan eroosioista, jolloin veteen päätyy kiintoainesta.

Hakkuiden vaikutuksesta hakatun metsän valuma-alueen vuosivaluma kasvoi noin 22 mm/vuosi (Saukkonen & Kenttämies 1995). Hakuut ovat lisänneet valuntaa 5–10 mm valuma-aluehehtaarilta poistettua kymmentä puukuutiometriä kohden (Seuna 1990, Saukkonen & Kenttämies 1995) Purojen virtaama voi kasvaa avohakkuiden jälkeen. Kubinin (2017) tutkimuksessa puron vuotuinen virtaama kasvoi 44 mm eli 15 %, lumen

sulamisaikainen virtaama oli 27 % suurempi ja kesäinen virtaama oli 18 % suurempi. Hakatuilta metsiltä huuhtoutuu ravinteita ja metalleja vesistöihin. Ahtinen (1992) havaitsi purossa kohonneita pitoisuuksia fosforissa, typessä ja raudassa avohakkuun ja maanmuokkauksen jälkeen. Ahtinen & Huttunen (1999) toisessa tutkimuksessa havaitsivat samanlaisen vaikutuksen. Kiintoainekuorma ei muuttunut avohakkuiden jälkeen. Fosfori pitoisuudet nelinkertaistuivat, fosfaattipitoisuudet viisinkertaistuivat ja typpipitoisuudet kaksinkertaistuivat avohakkuiden jälkeen. Pitoisuudet alkoivat laskea luontaiselle tasolle noin neljä vuotta avohakkuiden jälkeen. Palviainen et al. (2014) havaitsivat myös virtaaman kasvua, typpi- ja fosforipitoisuuksien nousua ja kiintoaine kuorman kasvua. Vaikutukset valuma-alueeseen pysyivät pitkään samana koko neljäntoistavuoden tarkkailun ajan. Vaikutuksen suuruus kasvoi, kun avohakkuualueen osuus koko valuma-alueen pinta-alasta oli yli 30 %.

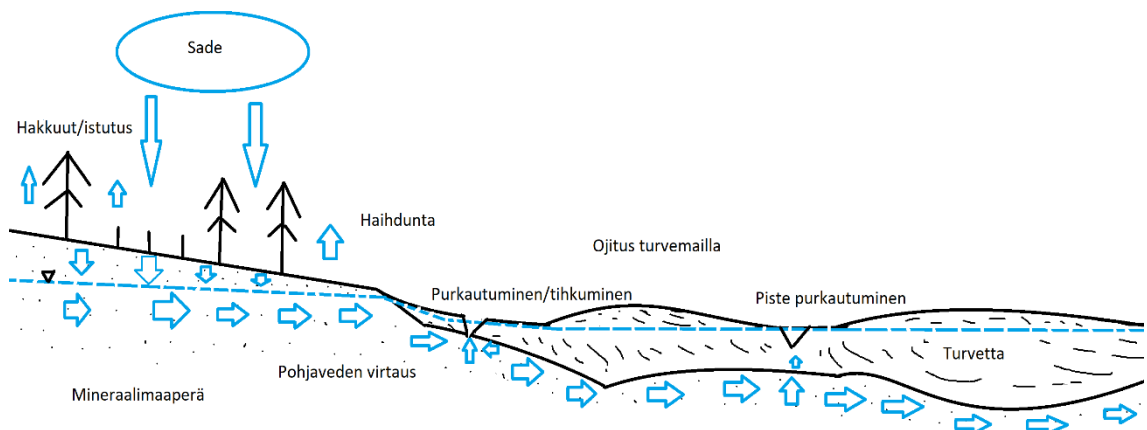
Ojituksen jälkeen puron veden väri muuttuu, ammoniumtypen, fosforin, kaliumin ja raudan pitoisuudet nousevat. (Hynninen & Sepponen 1983) Kiintoaine kuormitus kasvaa ojituksen myötä huomattavasti (Hynninen & Sepponen 1983, Ahtinen & Huttunen 1999).

Ojien kunnostaminen lisää kiintoaine kuormitusta ja vaikutus kasvaa kunnostetun alueen ja ojien syvyyden mukaan. (Joensuu 1999, 2001) Kunnostusojituksen jälkeen epäorgaanisen typen määrä lisääntyy, orgaanisen typen määrä vähenee, pH nousee ja kalsiumin, magnesiumin, kaliumin sekä natriumin pitoisuudet nousevat. Nämä vaikutukset näkyivät kuuden vuoden ajan kunnostusojituksen jälkeen. (Joensuu 2001) Nieminen et al. (2017) havaitsivat, että kokonaistypen ja -fosforin pitoisuudet purkautumisvesissä ojitetulta turvemaalta kasvoivat ajan kanssa. Yli kuusikymmentä vuotta sitten ojitetujen turvemaiden kokonaistypen ja -fosforin konsentraatiot purkautumisvesissä olivat korkeampia kuin uusimmissa ojitetuissa turvemaisissa.

3 METSÄTALOUDEN VAIKUTUKSIA POHJAVETEEN

3.1 Metsätalouden vaikutukset pohjaveteen

Perustuen kappaleessa 2. esitettyihin tietoihin hydrologiasta, vaikutuksista pintaveteen ja metsätaloustoimenpiteistä, voidaan tehdä hypoteeseja metsätalouden vaikutuksista pohjaveteen. Näihin hypoteeseihin etsitään vahvistusta tehdyistä tutkimuksista. Kuvassa 9. havainnollistetaan metsätalouden vaikutuksia pohjaveden määrään.



Kuva 9. Havainnollistava kuva metsätalouden vaikutuksista pohjaveden määrään. Kuvassa on merkitty sinisellä katkoviivalla pohjaveden potentiaalinen taso ja nuolilla kuvataan veden liikettä.

Puupeitteen poistaminen tai harventaminen voi potentiaalisesti lisätä pohjaveden muodostumista ja pohjaveden pinnankorkeutta. Tämä vaikutus johtuu kasvillisuuspeitteen poistumisesta, jolloin evapotranspiraatio ja interseptio vähenee sekä maaperän rikkoontumisesta (Dingman 2008, s 294–301). Kun puut ja kasvit eivät ole pidättämässä ja hyödyntämässä sateena tulevaa vettä, niin suurempi määrä sadevettä pääsee maanpinnalle. Tämä sadevesi muodostaa suurempaa pintavaluntaa, mutta myös enemmän infiltraatiota. Infiltraatio lisääntyy myös maaperän rikkoutumisen takia, koska maaperässä oleviin painaumiin ja kuoppiin kertyy vettä, joka pääsee infiltroitumaan maaperään. Kasvillisuuspeitteen poistaminen lisää maaveden määrää, joka voi edetä syvemmälle ja muodostaa pohjavettä. Koska kaadetut puut ja kasvit sisältävät ravinteita, voivat nämä ravinteet vapautuessaan huuhtoutua sadeveden mukana pintavalunta

vesistöihin. On myös mahdollista, että ravinteita päätyy pohjaveteen sadeveden infiltroitua maaperän läpi. Pitoisuudet voivat laskea matkalla pohjavedeksi, jolloin pohjavedessä nähtävät ravinnepitoisuudet ovat pienempiä kuin pintavalunnan myötä vesistöissä nähtävät pitoisuudet.

Metsityksellä olisi hypoteettisesti käänteinen vaikutus kuin hakkuilla. Puupeatteen ja kasvillisuuden lisääntyminen lisää interseptiota ja kasvien kautta tapahtuvaa haihduntaa, jolloin pintavalunta ja infiltraatio vähenee, mutta evapotranspiraatio lisääntyy. Puut ja kasvit myös ottavat maaperästä vettä ja ravinteita, jolloin vähemmän maavettä voi päätyä pohjavedeksi ja ravinteita huuhtoutua pohjaveteen. Näistä vaikutuksista seuraa, että pohjaveden muodostuminen metsitetyillä alueilla heikkenee ja pohjaveden pinnan korkeus laskee.

Kulutus voisi potentiaalisesti lisätä pohjaveden muodostumista, koska puupeatteen poistuminen vähentää evapotranspiraatiota ja lisää siten infiltroituvan veden määrää. Infiltroituvan veden mukana pohjaveteen voi päätyä yhdisteitä, joita vapautuu ja syntyy palamisreaktioiden tuloksena. Vapautuvia yhdisteitä ovat ravinteet ja syntyviä yhdisteitä ovat esimerkiksi polysykliset aromaattiset hiilivedyt eli PAH-yhdisteet.

Ojitus voi hypoteettisesti vaikuttaa pohjaveden pinnankorkeuteen ja muodostumiseen ojitetun alueen akviferissa. Oja voi toimia luonnollisen puron tai lähteen tavoin pohjaveden purkautumisreitteinä maanpinnalle. Näin tapahtuu puroissa, kun akviferin pinta puron ympäristössä on korkeammalla kuin puro tai osa purosta. Soilla tehty ojitus laskee veden pintaa turvekerroksessa. Turvekerroksen alapuolella on usein mineraalimaaperää, jolla usein on suurempi hydraulinen johtavuus kuin turpeella. Jos ojat ovat tarpeeksi syviä yltääkseen turpeen alla olevaan mineraalimaaperään, voi ojan pohjan läpi purkautua pohjavettä mineraalimaaperästä (Kuva 3). Tämä voi laskea pohjaveden pinnankorkeutta turpeen alapuolisessa akviferissa ja potentiaalisesti heikentää pohjaveden muodostumista alueella.

Hypoteeseja metsätaloustoimenpiteiden vaikutuksista pohjaveden laatuun ja määrään ovat:

- Metsän hakkaaminen lisää infiltraatiota ja vähentää evapotranspiraatiota, jolloin pohjaveden muodostuminen lisääntyy.

- Hakkuiden vaikutuksesta pohjaveteen huuhtoutuu vapautuneita ravinteita.
- Metsityksen vaikutuksesta infiltraatio vähenee ja evapotranspiraatio lisääntyy, jolloin pohjaveden muodostuminen vähenee. Samalla kuitenkin sekundaarinen huokoisuus kasvaa puiden juurien vaikutuksesta ja syntyy veden nopeita virtausreittejä.
- Kulotus lisää pohjaveden muodostumista, koska puupeitteen häviäminen lisää infiltraatiota ja vähentää evapotranspiraatiota.
- Kulotuksen myötä vapautuu ravinteita ja syntyy yhdisteitä, jotka voivat huuhtoutua pohjaveteen.
- Ojituksen vaikutuksesta pohjavettä voi purkautua ojitetulle turvemaalle ja pohjaveden pinta voi alentua turvemaan alapuolisessa akviferissa.

3.2 Hakkuiden vaikutukset pohjaveteen

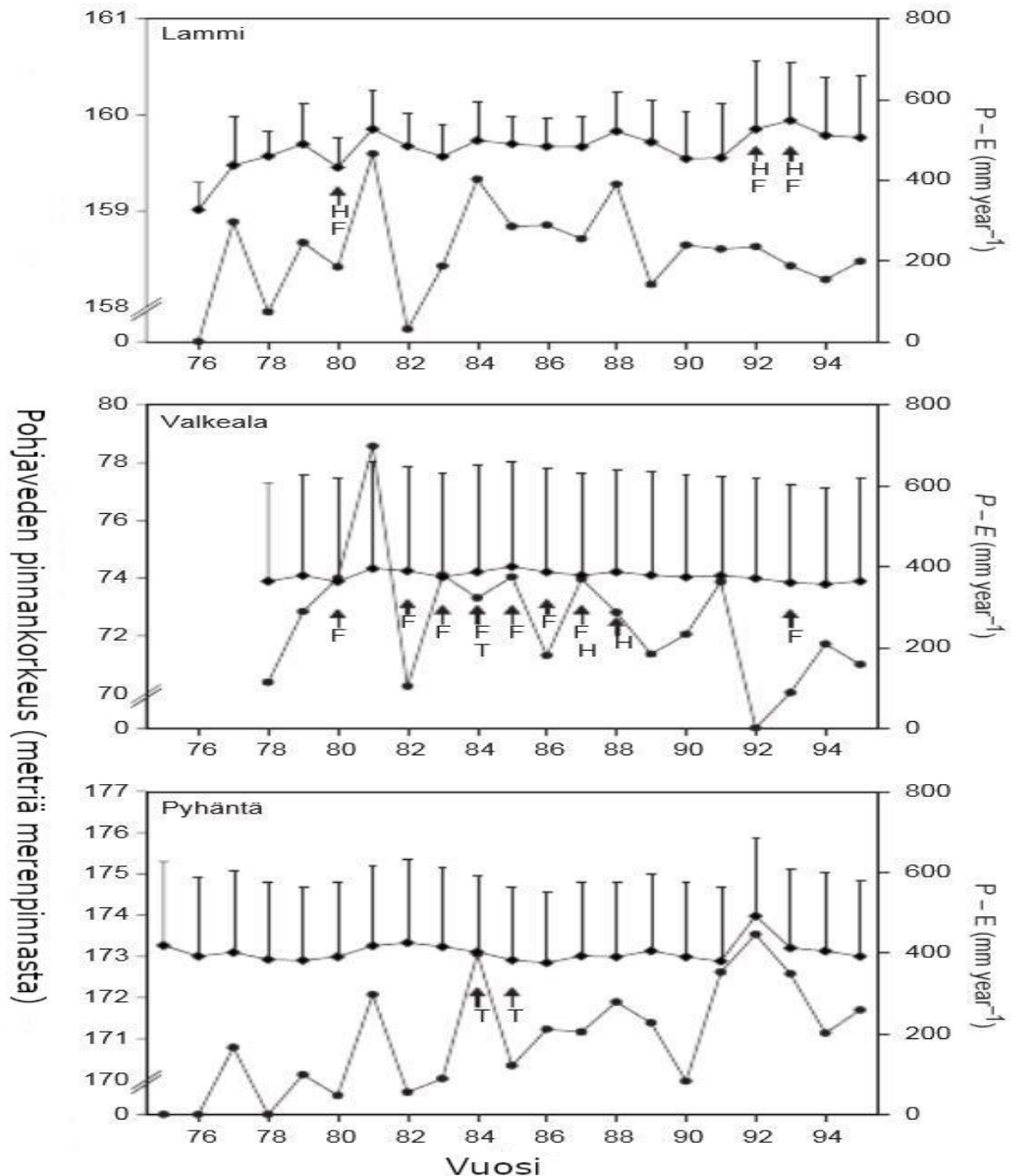
Metsätaloustoimenpiteistä hakkuiden vaikutuksia pohjaveden pinnankorkeuteen, muodostumiseen ja laatuun on tutkittu laajimmin sekä Euroopassa että Pohjois-Amerikassa. Tutkimuksia on tehty hakkuiden vaikutuksista sekä pohjaveden muodostumiseen, määrään että laatuun liittyen.

3.2.1 Vaikutukset pohjaveden määrän

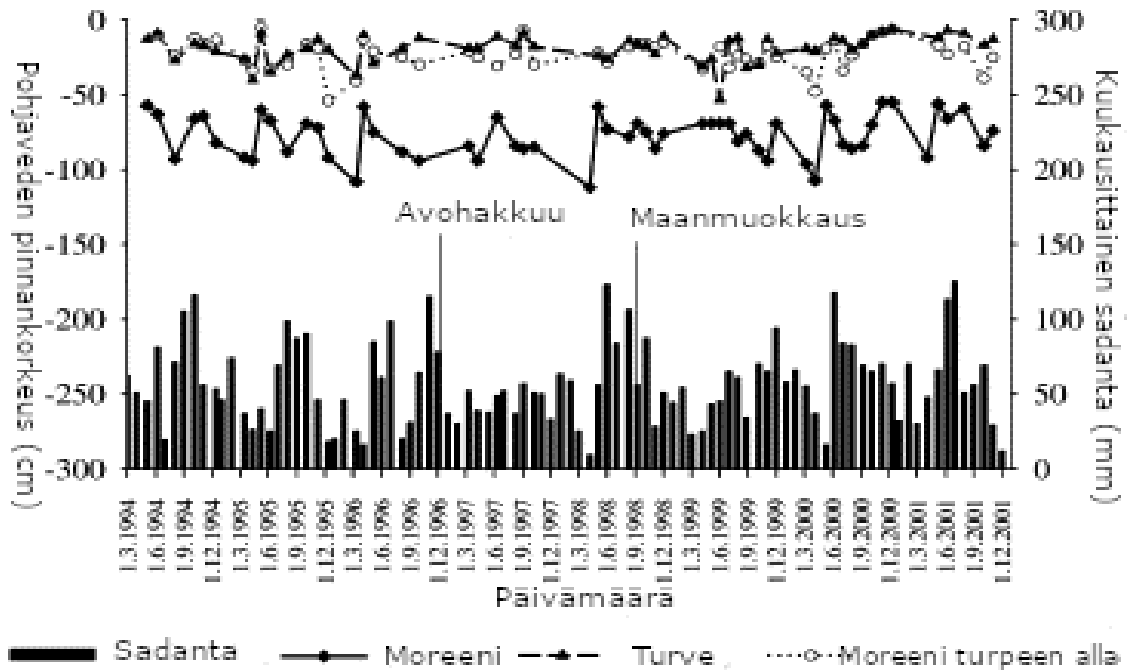
Peck ja Williamson (1987) tutkivat kymmenen vuoden ajan viittä valuma-aluetta, joilla suoritettiin avohakkuita tai harvennushakkuita. Alueet sijaitsivat Collie-joen valuma-alueella 170 km Perthistä etelään Länsi-Australiassa. Alueilla tarkkailtiin potentiometrisia pintoja käyttämällä pietsometrejä mineraalimaaperässä. Tutkimuksessa havaittiin, että avohakkuu nosti potentiometrasta pintaa keskimäärin 2,6 m vuodessa, jonka arvioitiin vastaavaan noin 6–12 % nousua pohjaveden muodostumisessa. Harvennushakkuun havaittiin nostavan pohjaveden pintaa keskimäärin 0,9 m vuodessa, joka on huomattavasti pienempi kuin avohakkuiden pohjaveden pintaa nostava vaikutus.

Rusanen et al. (2004) ja Mannerkoski et al. (2005) tekivät tutkimuksia avohakkuiden vaikutuksista pohjaveden määrään. Kummassakin tutkimuksessa tarkkailtiin pohjaveden

pinnankorkeutta pohjavesikaivoista. Rusasen ja muiden tutkimuksissa tutkittiin kolmella pohjaveden tarkkailuasemalla Lammissa, Valkealassa ja Pyhännällä Suomessa. Pohjaveden tarkkailua tehtiin 22 vuotta Valkealassa ja Pyhännällä sekä 20 vuotta Lammissa. Mannerkoski ja muut tekivät tutkimukset viidellä valuma-alueella kolmen vuoden ajan. Alueiden pinta-alat vaihtelivat 29 ha ja 176 ha välillä. Tutkimusten perusteella päädyttiin tuloksiin, että metsätaloustoimenpiteiden ja pohjaveden pinnankorkeuden välillä ei ollut yhteyttä (Kuva 10, Kuva 11).

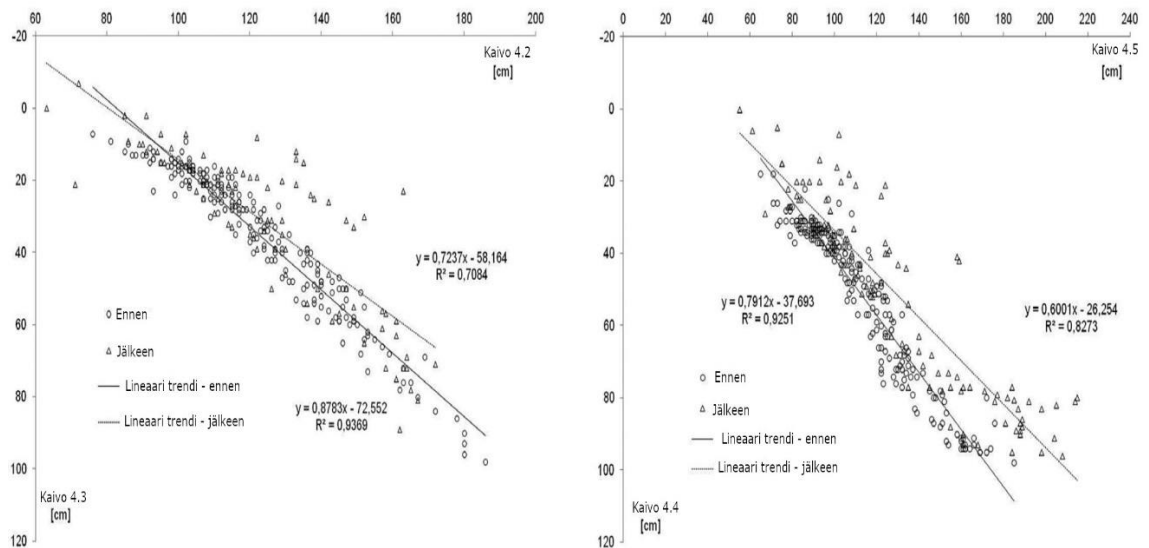


Kuva 10. Pohjaveden pinnankorkeuden vuotuinen vaihtelu (ylempi viiva) sekä sadannan ja evapotranspiraation erotus (alempi viiva). Kuvassa F on avohakkuun ajankohta, H on maanmuokkauksen ajankohta ja T on harvennushakkuun ajankohta (mukaillen Rusanen et al. 2004).



Kuva 11. Pohjaveden pinnankorkeus mittauskaivoissa ja kuukausittainen sadanta Kangasvaaran valuma-alueelta. Viivat kuvaavat pohjaveden pinnankorkeutta ja pylväät kuukausittaista sadantaa (mukailten Mannerkoski et al. 2005).

Stasik ja Korytowski (2015) tekivät analyysin avohakkuun vaikutuksesta pohjaveden pinnankorkeuteen soisella metsäalueella Puolassa. Näytteitä otettiin pohjavesikaivoista, jotka sijaitsivat hakkuualueilla sekä ns. vertailualueilla, joilla ei toteutettu metsätaloustoimenpiteitä. Pohjaveden pinnankorkeutta mitattiin neljän vuoden ajan kerran viikossa hydrologisen vuoden aikana. Mittauksia jatkettiin vielä viiden vuoden ajan kahdesti viikossa. Analyysi pohjaveden pinnankorkeudesta perustui lineaariseen regressioanalyysiin, jossa vertailtiin analyysikaivoja ja kontrollikaivoja. Analyysin perusteella selvisi, että pohjaveden pinnankorkeus nousi kaivoissa avohakkuiden jälkeen (Kuva 12). Tutkimuksessa havaittiin pinnankorkeuden nousun suuruuden riippuvan pohjaveden pinnankorkeudesta ennen avohakkuita. Absoluuttinen ja suhteellinen pinnankorkeuden nousu oli suurempaa, kun pohjaveden pinnankorkeus ennen hakkuita oli syvemmillä. Pinnankorkeuden havaittiin myös nousevan vähemmän turvemaalla olevassa metsässä kuin mineraalimaaperällä olevassa metsässä.



Kuva 12. Pohjaveden pinnankorkeuden korrelaatiot kaivojen 4.3 ja 4.4 kontrollikaivojen 4.2 ja 4.5 kanssa hydrologisissa vuosissa ennen hakkuita ja hakkuiden jälkeen (mukaillen Stasik & Korytowski, 2015).

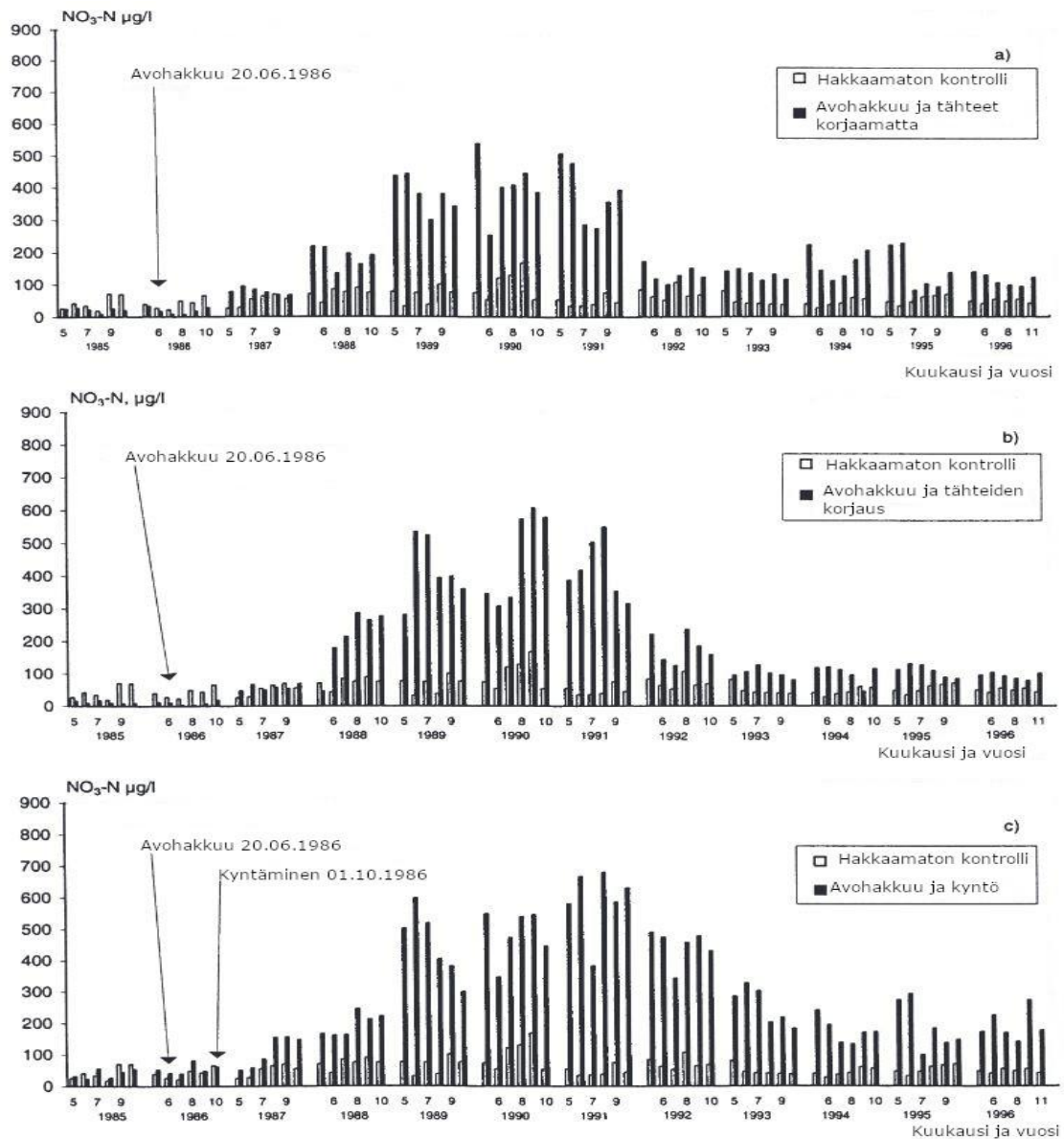
Ala-aho et al. (2015) tekivät mallinnusta pohjaveden muodostumisesta hiekka-akviferissa metsäalueilla. Mallinnuksessa otettiin huomioon tärkeimmät pohjaveden muodostumisen määrään ja ajankohtaan vaikuttavat parametrit. Mäntyyn liittyvää dataa käytettiin mallinnuksessa lehtialaindeksin parametrisoinnissa. Monte Carlo -metodia käytettiin arvioimaan maaperän hydraulisia ominaisuuksia ja evapotranspiraatiota. Lisäksi otettiin huomioon järvien, maaperän ja lumen haihdutaan ja transpiraatioon liittyvät mekanismit. Mallinnuksen perusteella tärkeimmäksi pohjaveden muodostumiseen vaikuttavaksi tekijäksi havaittiin lehtialaindeksi. Mallinuksista voitiin havaita, että hakatuilla metsäalueilla pohjaveden muodostuminen lisääntyi huomattavasti verrattuna koskemattomaan metsään.

Kubin et al. (2017) ovat selvittäneet avohakkuun vaikutuksia pohjaveden määrään Suomen oloissa Kivesvaaralla ja Oijusluomalla. Pohjaveden pinnankorkeutta tarkkailtiin vuoden ajan. Tutkimuksessa havaittiin, että pohjaveden vuotuinen muodostuminen lisääntyi kolmen vuoden aikana 63 mm, eli 24 % verrattuna hakkuita edeltävään tilaan.

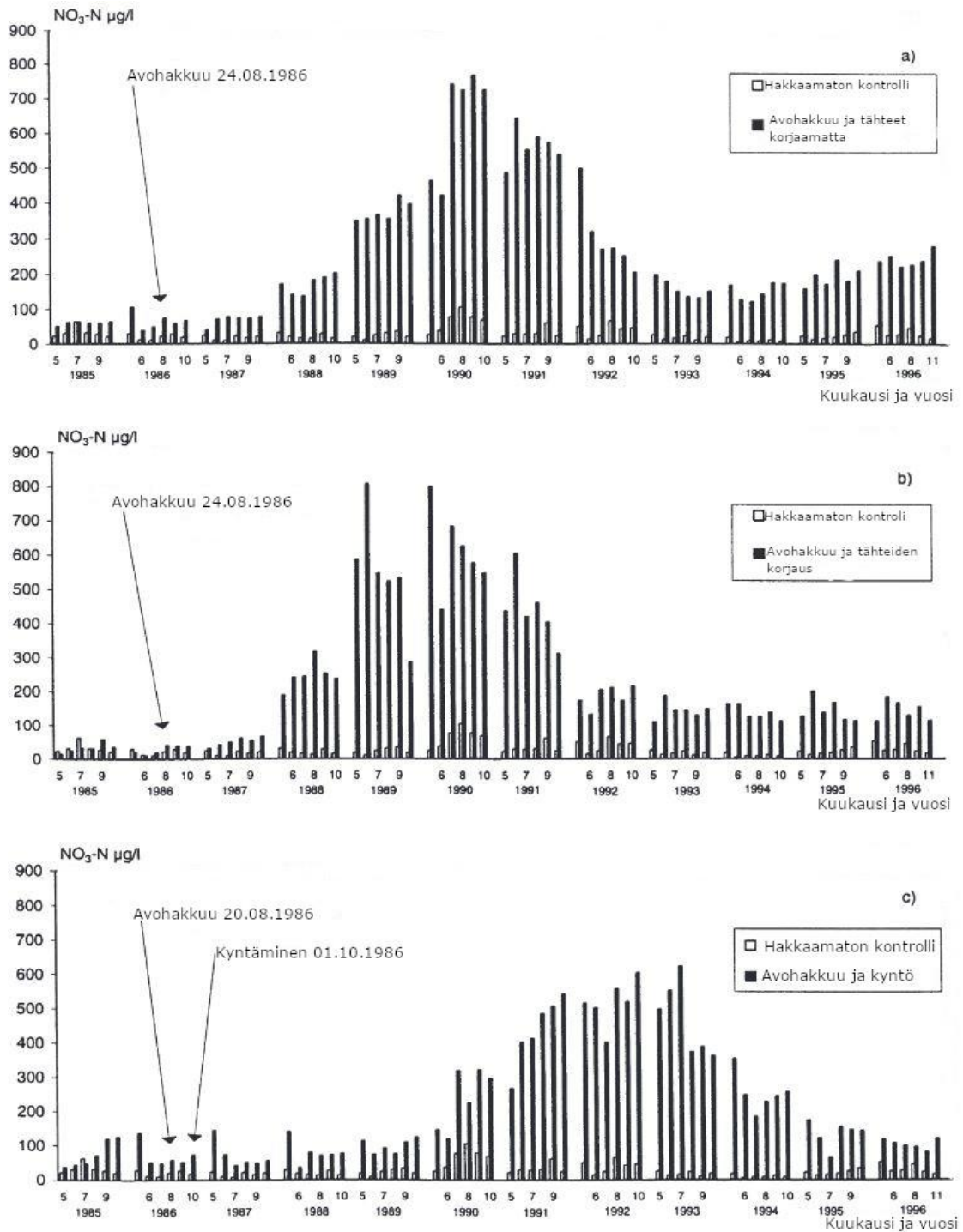
3.2.2 Vaikutukset pohjaveden laatuun

Kubin (1998) tutki avohakkuiden vaikutuksia typen määrään pohjavedessä kahdella koelueella Pahalouhissa ja Hautalassa. Alueilla käytettiin yhteensä neljääkymmentähdeksää pohjavesikaivoa näytteenottamiseen. Ravinteiden mittaaminen

aloitettiin vuosi ennen avohakkuuta ja näytteitä otettiin kuukauden välein toukokuusta lokakuuhun. Tutkimuksessa todettiin, että nitraattitypen määrä pohjavedessä oli noussut hakkuiden jälkeen 5–7 vuoden aikana (Kuva 13, Kuva 14). Korkeimmillaan pitoisuudet olivat 500–700 µg/l, mutta alkoivat laskea hakkuiden jälkeen tasaisesti. Nitraattipitoisuuksien havaittiin olevan koholla vielä kymmenen vuotta avohakkuiden jälkeen.



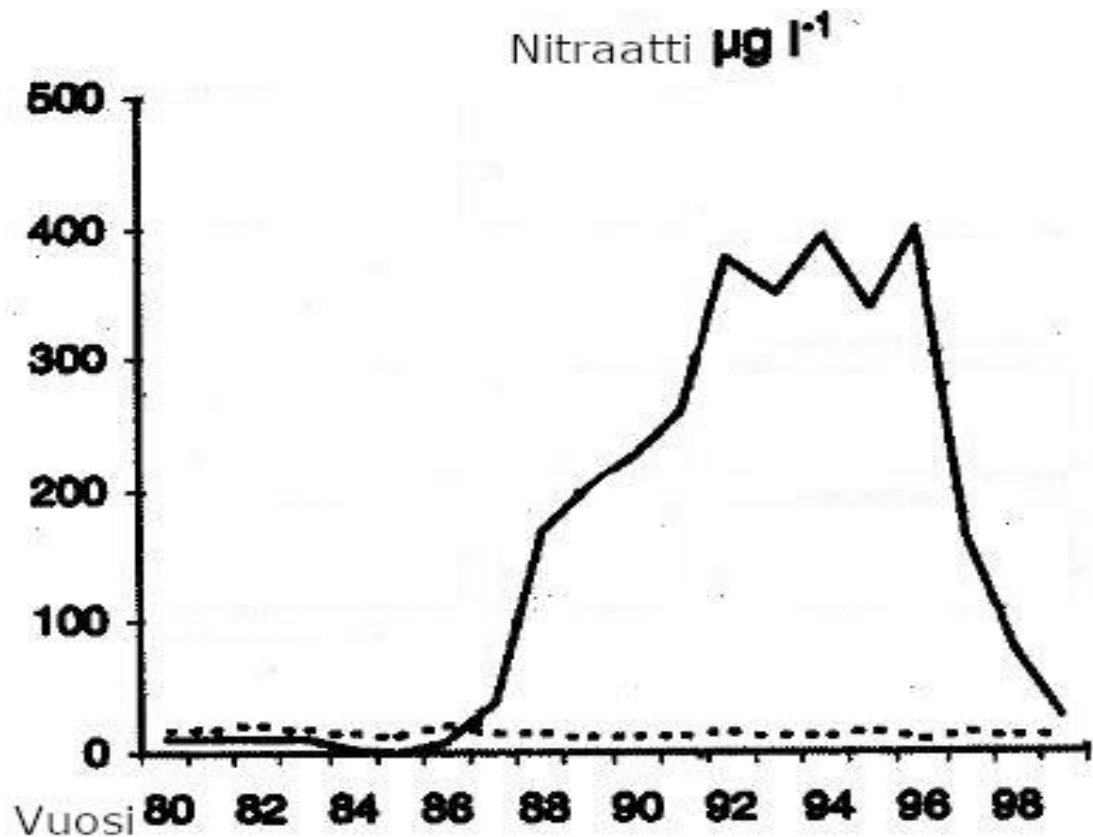
Kuva 13. Nitraattipitoisuudet avohakkuun ja eri maanmuokkausmenetelmien jälkeen Pahalouhissa. Pylväät kuvaavat pitoisuuksien keskiarvoa (mukailten Kubin 1998).



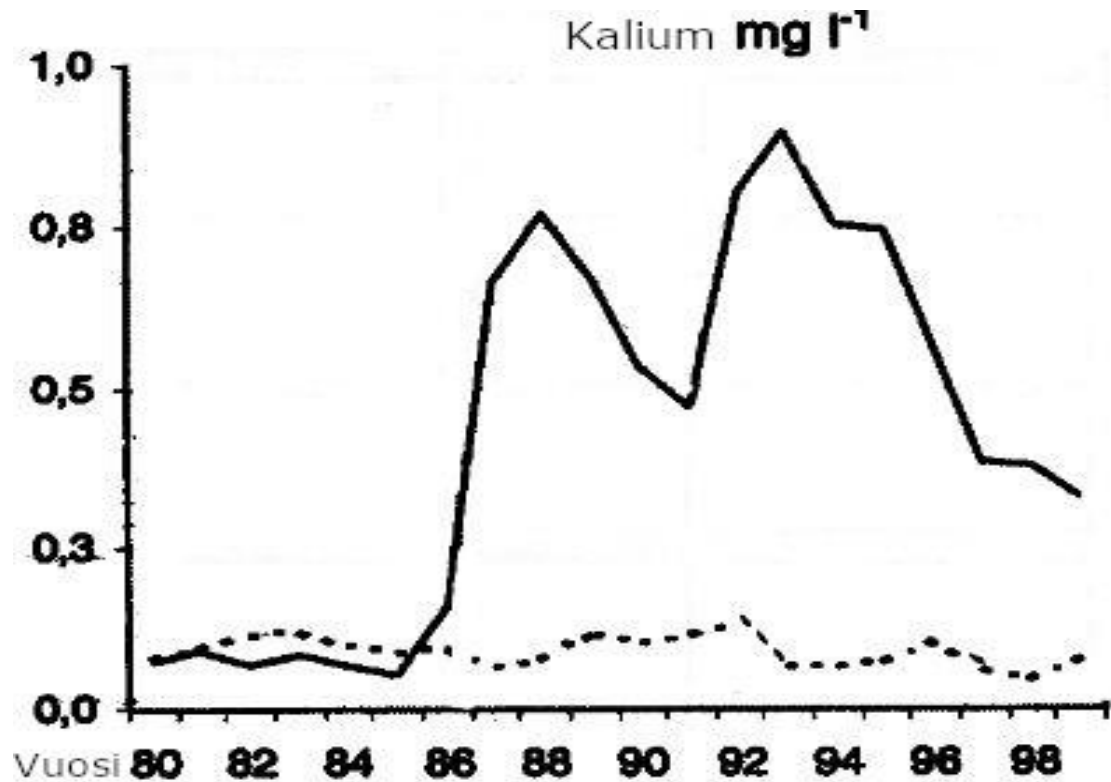
Kuva 14. Nitraattipitoisuudet avohakkuun ja eri maanmuokausmenetelmien jälkeen Hautalassa. Pylväät kuvaavat pitoisuuksien keskiarvoa (mukaillen Kubin 1998).

Henriksen ja Kirkhusmo (2000) teettivät tutkimusta Norjassa, jossa selvitettiin avohakkuun vaikutuksia matalan akviferin pohjaveden laatuun. Pohjavesinäytteitä otettiin lähteen yläpuolelle asennetusta pohjavesikaivosta kuukauden välein. Pohjaveden pinnankorkeutta ja lämpötilaa mitattiin viikoittain. Pohjavedestä analysoitiin pH, sähkönjohtokyky, sameus sekä konsentraatiot kalsiumista, magnesiumista, natriumista, kaliumista, kloorista, sulfaatista, nitraatista, alumiinista, piioksidista ja permanganaatista.

Tutkimuksissa havaittiin pohjaveden saannon lisääntyneen avohakkuiden jälkeen ja palautuneen muutamassa vuodessa alkutilanteeseen. Pohjavedessä havaittiin kohonneita pitoisuuksia kaliumissa, nitraatissa, orgaanisessa hiilessä ja epäorgaanisessa alumiinissa, mutta vähentyneitä pitoisuuksia sulfaatissa. Nitraattipitoisuudet olivat palautuneet alkuperäiselle tasolle kolmetoista vuotta avohakkuiden jälkeen, mutta kaliumpitoisuudet olivat edelleen alkuperäistä korkeammalla (Kuva 15, Kuva 16).

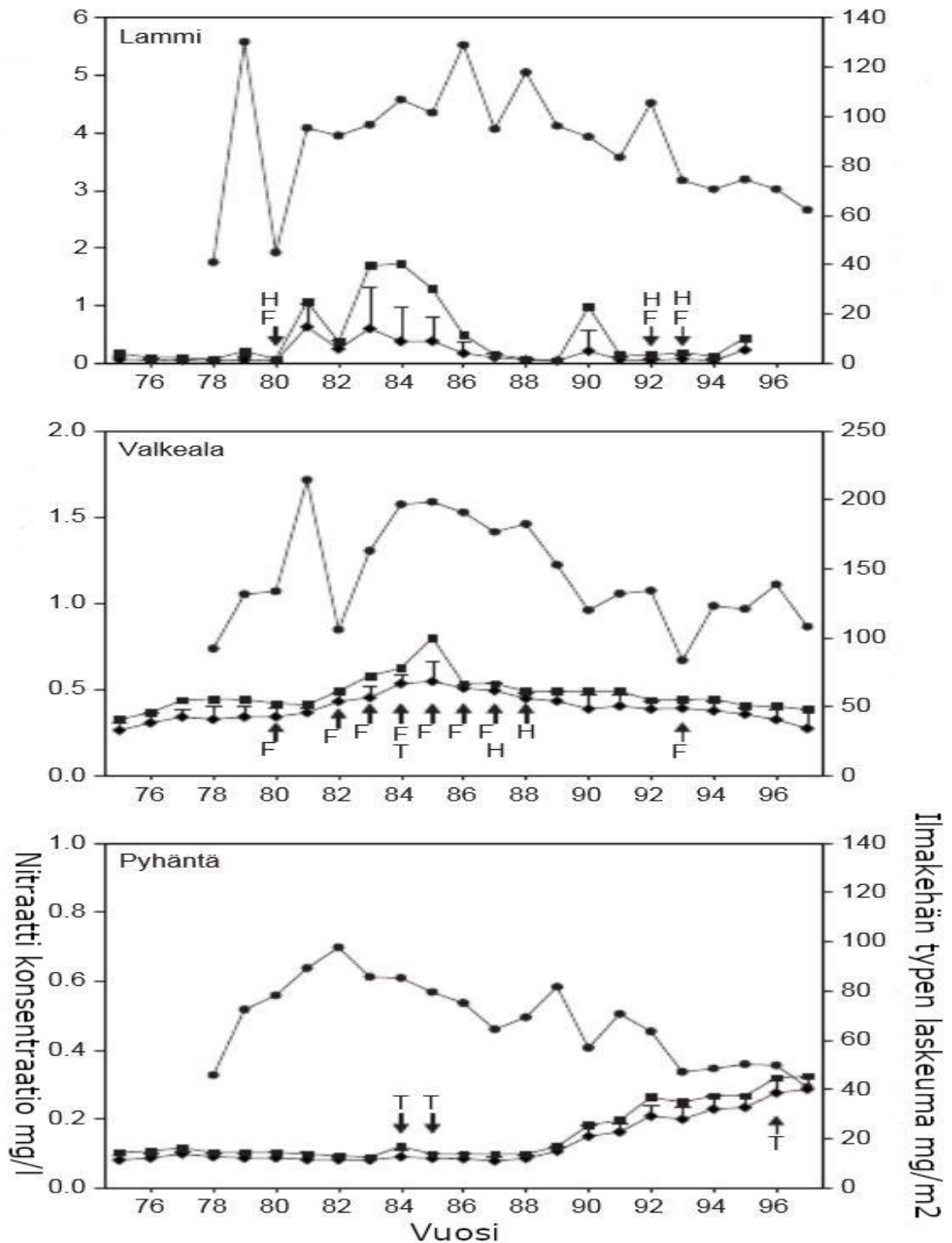


Kuva 15. Mitatut vuotuiset nitraattipitoisuuden keskiarvot Langvasslian akviferissa. Yhtenäinen viiva kuvaa pitoisuutta pohjavedessä ja katkoviiva kuvaa pitoisuutta pintavedessä (mukaihen Henriksen & Kirkhusmo 2000).



Kuva 16. Mitatut vuotuiset kaliumpitoisuuden keskiarvot Langvasslian akviferissa. Yhtenäinen viiva kuvaa pitoisuutta pohjavedessä ja katkoviiva kuvaa pitoisuutta pintavedessä (mukaihen Henriksen & Kirkhusmo 2000).

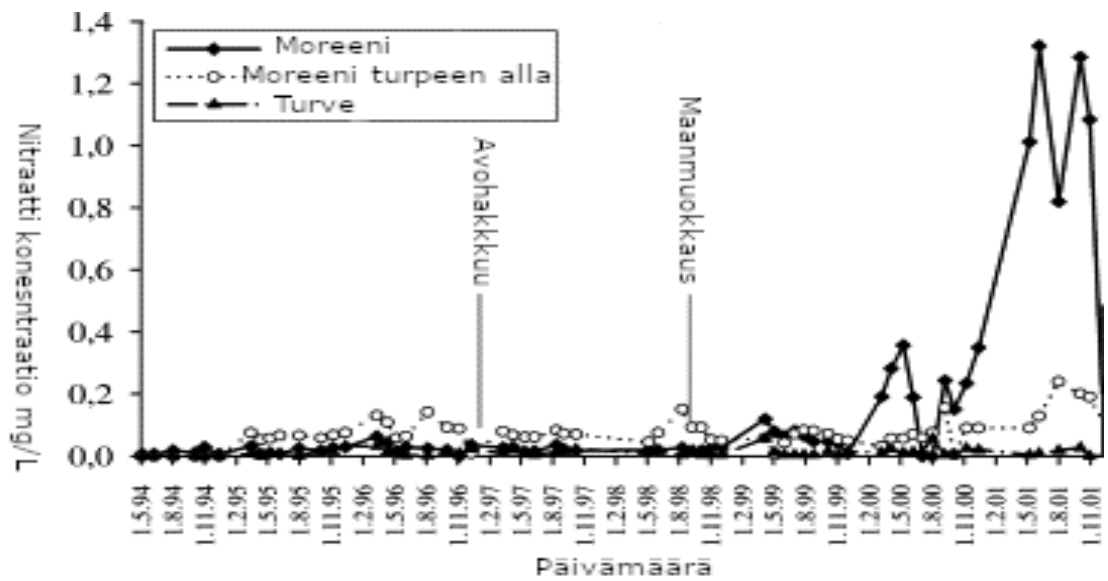
Rusanen et al. (2004) tekivät Suomessa tutkimusta hakkuiden vaikutuksista pohjaveden laatuun. Tutkimuksessa tulkittiin pitkäaikaista tutkimusdataa kolmelta pohjaveden tarkkailuasemalta Lammista, Valkealasta ja Pyhännästä. Valkealassa ja Pyhännällä tutkimustietoa oli 22 vuoden ajalta ja Lammissa 20 vuoden ajalta. Pohjaveden tutkimuksissa selvisi, että nitraattipitoisuudet kasvoivat avohakkuun ja harvennuksen jälkeen useiden vuosien ajan hakkuiden jälkeen. Havaitut nitraattipitoisuudet olivat korkeimmillaan noin 2 mg/L (Kuva 17).



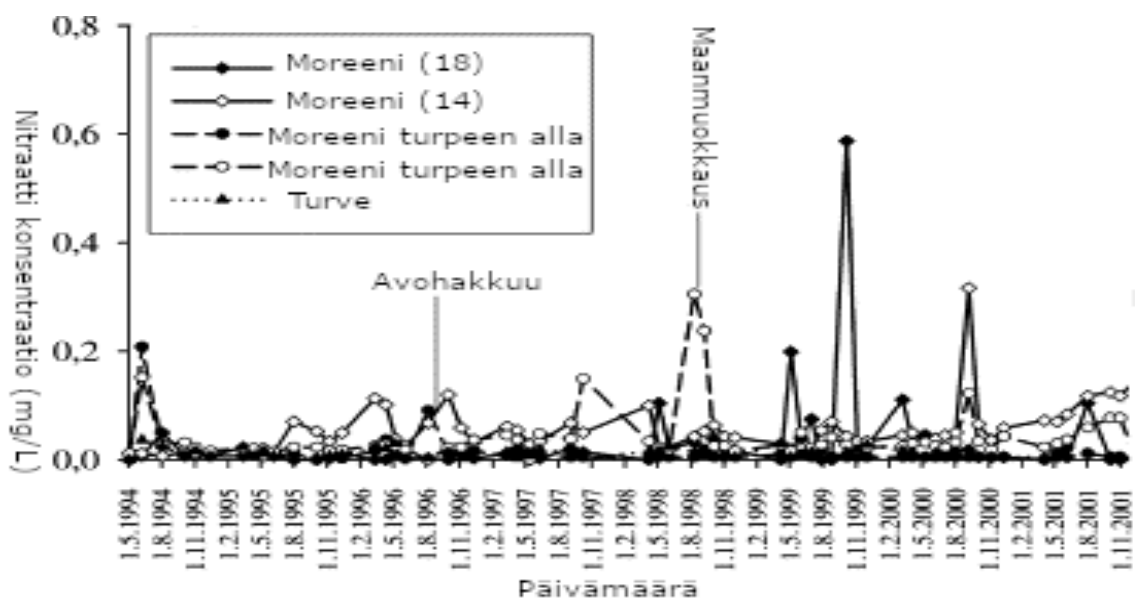
Kuva 17. Vuosittaiset nitraattipitoisuudet pohjavedessä (alemmat viivat) ja ilmakehästä laskeumana tulevan typen määrä (ylin viiva). Kuvassa F on avohakkuun ajankohta, H on maanmuokkauksen ajankohta ja T on harvennushakkuun ajankohta (mukaiillen Rusanen et al. 2004).

Mannerkoski et al. (2005) tekivät tutkimusta avohakkuiden vaikutuksista pohjaveden laatuun. Tutkimusalueet olivat viisi pientä valuma-aluetta Suomessa Kangasvaaralla, Kangaslammella, Iso-Kauheassa, Korsukorvessa ja Porkkavaaralla ja näytteitä otettiin kolmen vuoden ajan. Alueiden pinta-alat vaihtelivat 29 ha ja 176 ha välillä. Pohjaveden

pinnankorkeutta ja laatua tarkkailtiin yhdeksän pohjavesikaivon avulla jokaisella valuma-alueella. Näytteitä otettiin kuukauden välein keväällä ja syksyllä sekä joka toinen kuukausi kesällä. Nitraattipitoisuudet olivat hieman koholla kaivoissa hakkuiden jälkeen (Kuva 18, Kuva 19). Kloridipitoisuudet nousivat hakkuiden jälkeen keskimäärin 50–100 % alkutilanteesta. Lisäksi mitattiin fosforin, sulfaatin, rikin, kalsiumin, magnesiumin, kaliumin, natriumin, mangaanin, sinkin, raudan ja alumiiniin pitoisuuksia, mutta niissä ei havaittu muutosta. Tutkimusten pohjalta tehtiin johtopäätös, että avohakkuilla ei ollut merkittävää vaikutusta pohjaveden laatuun.

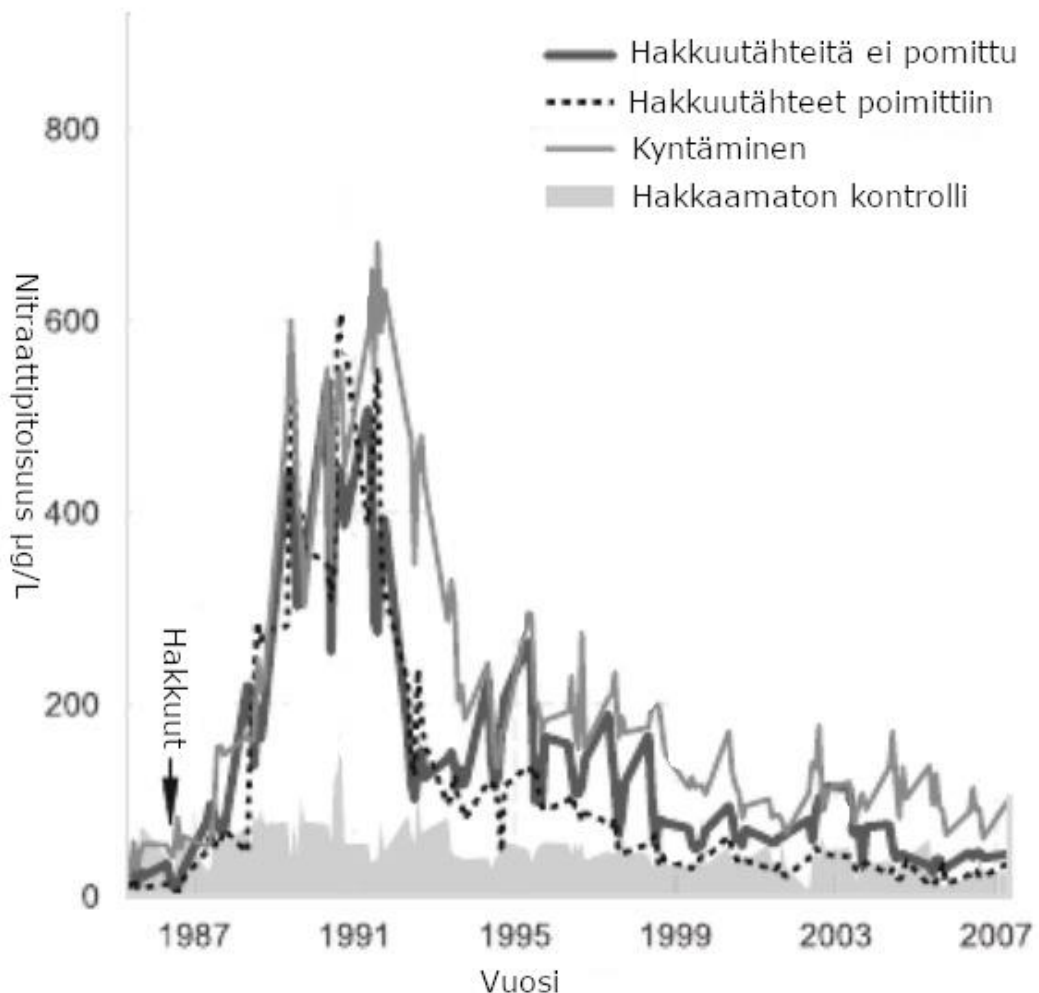


Kuva 18. Nitraattipitoisuudet jokaiselle pohjavesikaivolle Kangasvaaran valuma-alueella (mukailten Mannerkoski et al. 2005).

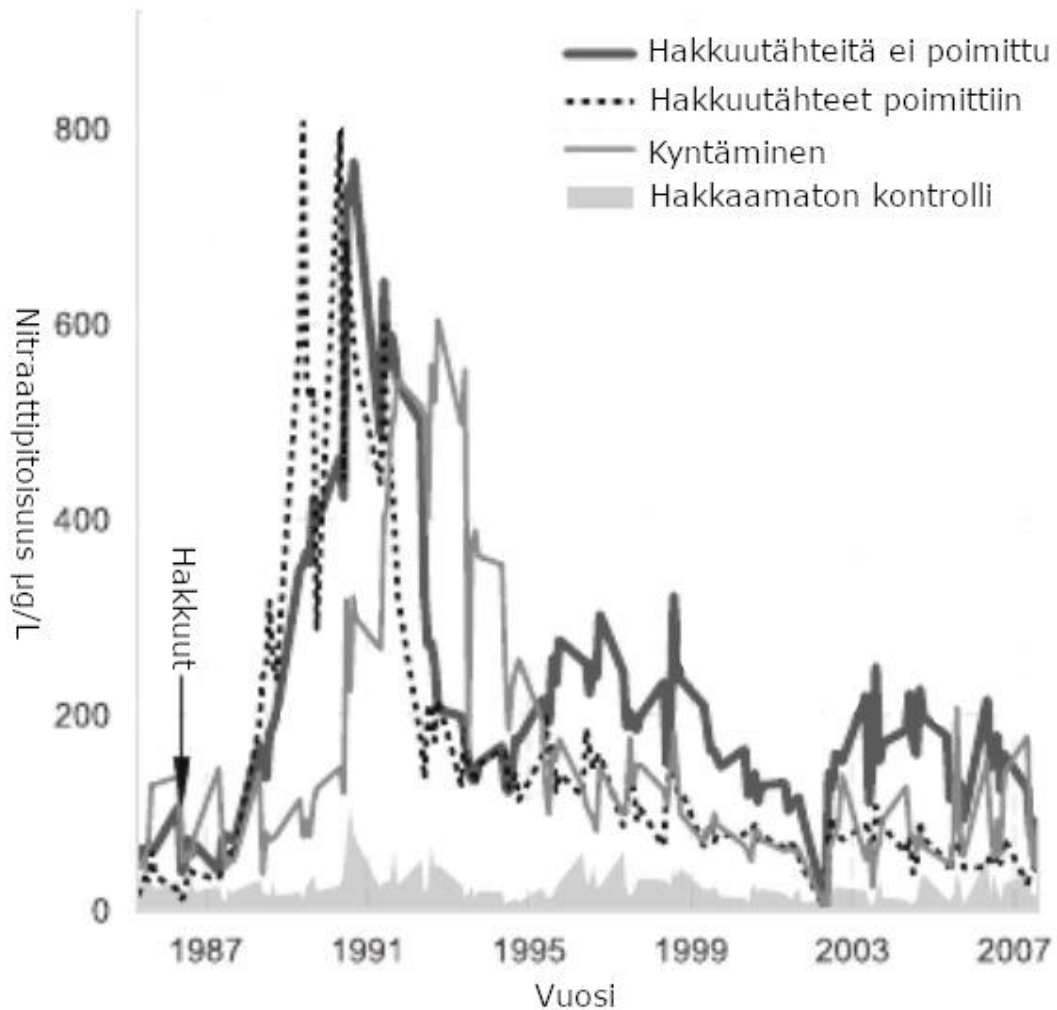


Kuva 19. Nitraattipitoisuudet jokaiselle pohjavesikaivolle Iso-Kauhean valuma-alueella (mukailten Mannerkoski et al. 2005).

Kubin et al. (2017) tarkkailivat toisessa tutkimuksessaan metsätaloustoimenpiteiden vaikutuksia pohjaveden laatuun. Tutkimukset suoritettiin koehakkuualueella Suomessa Kivesvaaralla ja Oijusluomalla. Pohjaveden laatua tarkkailtiin ottamalla näytteitä pohjavesikaivoista kuukauden välein. Osa koalueen metsäpalstoista toimi kontrollipalstoina, joissa ei suoritettu hakkuita. Tutkimuksessa havaittiin kohonneita nitraattipitoisuuksia pohjavedessä (Kuva 20, Kuva 21). Nitraattipitoisuudet olivat koholla vielä kahdenkymmenenviiden vuoden jälkeen avohakkuiden tekemisestä. Nitraattikuormituksen kymmenen vuoden keskiarvon arvioitiin oleva 194–356 kg/ha. Ammoniumpitoisuuksissa ei havaittu muutoksia tutkimuksen aikana. Tutkimusten perusteella pääteltiin, että avohakkuut lisäävät pohjaveden saantoa sekä nostavat typpikuormitusta.

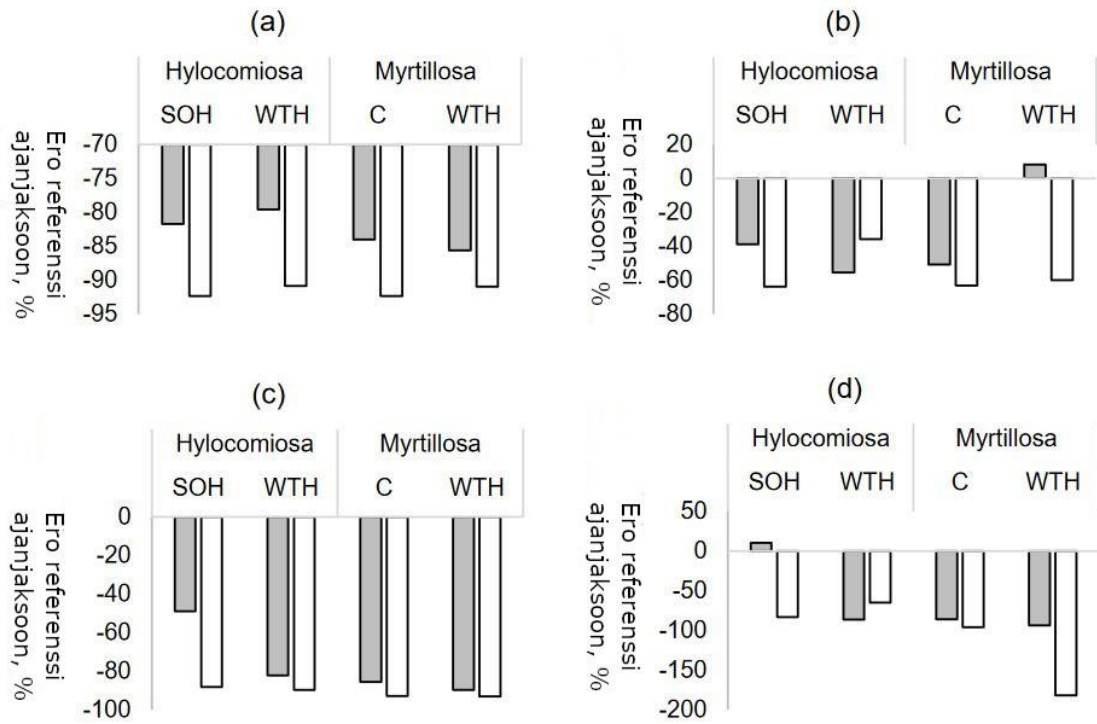


Kuva 20. Nitraatin huuhtoutuminen pohjaveteen hakkuiden jälkeen, käyttäen erilaisia maanmuokkausmenetelmiä Pahalouhissa (mukaiillen Kubin et al. 2017).



Kuva 21. Nitraatin huuhtoutuminen pohjaveteen hakkuiden jälkeen, käyttäen erilaisia maanmuokausmenetelmiä Hautalassa (mukaiillen Kubin et al. 2017).

Libiete et al. (2017) tekivät tutkimusta avohakkuiden vaikutuksista liuenneen typen määrän pohjavedessä. Tutkimusalue oli koemetsä Latviassa. Koealueita oli kolme, joista kaksi, Hylocomiosa ja Myrtillosa, sijaitsivat mineraalimaaperällä ja yksi, Oxalidosa, ojitetulla turvemaalla. Jokaisella alueella oli kolme palstaa, joista yksi oli kokonaisia puita hyödyntävä hakkuualue, toinen puiden rungot hyödyntävä hakkuualue ja kolmas kontrollialue. Näytteitä otettiin pohjavesikaivoista. Osa pohjavesikaivoista pysyi kuivana koko tutkimuksen ajan, joten niistä ei voitu ottaa pohjavesinäytteitä. Tutkimusten perusteella havaittiin typpipitoisuuksien laskevan pohjavedessä hakkuiden jälkeen (Kuva 22). Tutkijat päättelivät, että kuiva mineraalimaaperä ja hyvin matalalla oleva pohjavedenpinta vähentävät riskiä ravinteiden huuhtoutumiselle pohjaveteen.



Kuva 22. Nitraattipitoisuuden (a), ammoniumpitoisuuden (b), liunneen kokonaistypen pitoisuuden (c) ja liunneen orgaanisen typen pitoisuuden ero referenssi ajanjakson pitoisuuteen prosentteina. Kuvassa WTH tarkoittaa koko puiden hyödyntämistä, SOH tarkoittaa vain rungon hyödyntämistä ja C tarkoittaa kontrollia. Harmaa palkki on vuoden 2013 tulokset ja valkoinen vuoden 2014 tulokset (mukaiillen Libiète et al. 2017).

3.3 Metsityksen vaikutukset pohjaveteen

Metsityksen vaikutuksia pohjaveden määrään, muodostumiseen ja laatuun ei ole juurikaan tutkittu Euroopassa, mutta tutkimusta on tehty erityisesti Pohjois- ja Etelä-Amerikassa. Tutkimukset painottuvat metsityksen vaikutukseen pohjaveden muodostumiseen ja määrään.

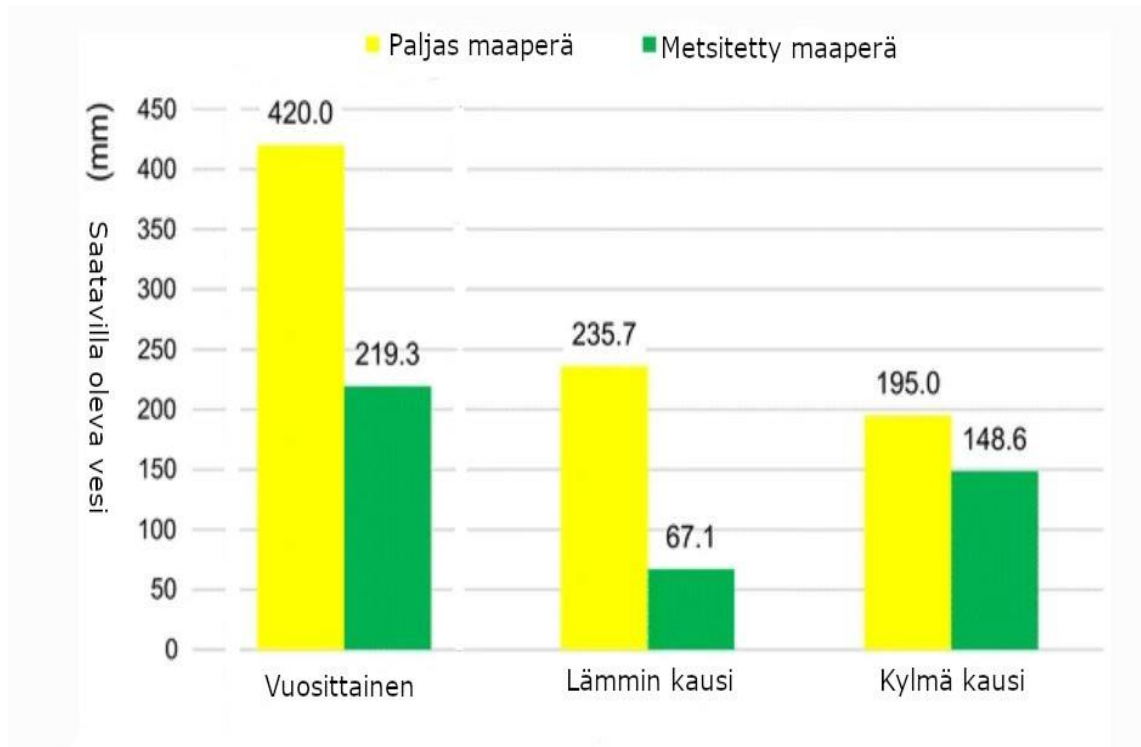
Silveira et al. (2016) tekivät mallinnusta metsityksen vaikutuksista pohjaveden muodostumiseen Uruguayssa. Tutkimuksia varten dataa kerättiin kahdelta valuma-alueelta. Alueilla oli sekä puuplantaaseja että laidunmaata. Pohjaveden muodostumista arvioitiin pohjaveden pinnankorkeuden muutoksista ja pohjaveden purkautumisesta jokiin. Mallinnuksen perusteella havaittiin 17 % vähemmän purkautumista jokiin metsitetyllä alueella. Pohjaveden muodostuminen ja purkautuminen pysyi saman suuntaisena metsitetyllä alueella ja laidunmaalla. Metsitetyllä alueella muodostuminen

oli 315 mm/vuosi ja laidunmaalla 288 mm/vuosi. Tutkijat arvelivat, että alueen olosuhteet vähensivät metsityksen vaikutusta pohjaveden muodostumiseen.

Lu et al. (2017) tekivät laskelmia metsityksen vaikutuksista pohjaveden pinnankorkeuteen puolikuivalla alueella Kiinassa. Laskelmissa käytettiin apuna seitsemää eri mallia. Laskelmien perusteella tutkijat päätyivät johtopäätökseen, että pohjaveden pinnankorkeus laskee metsitetyllä alueella. Tästä aiheutuisi tutkijoiden mukaan merkittävää riskiä pohjaveden muodostumiselle ja siten paikallisille ekosysteemeille ja pohjaveden käytölle.

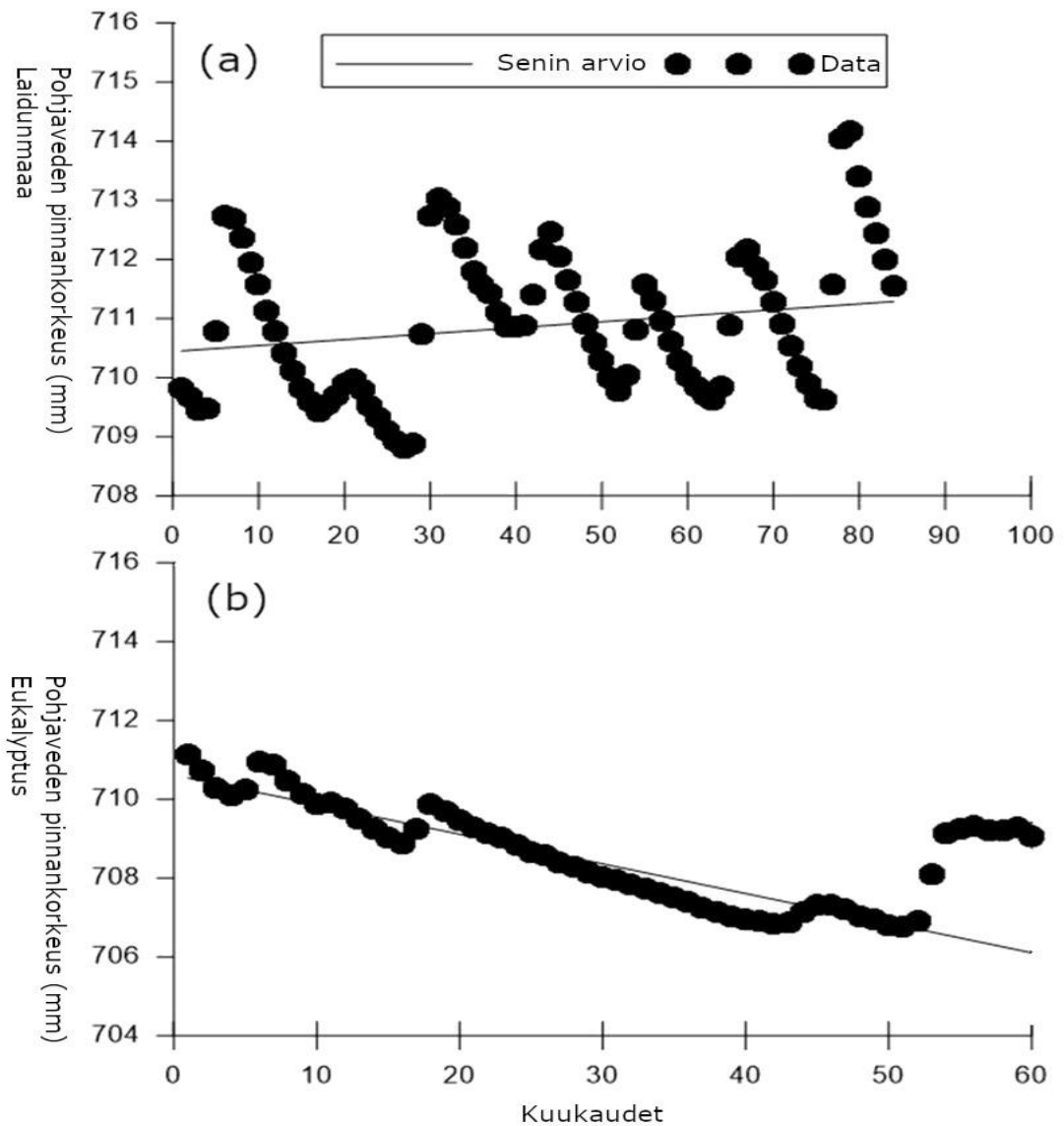
Adane et al. (2018) tutkivat miten ruohotasangon metsittäminen vaikuttaa pohjaveden muodostumiseen. Tutkimusalue sijaitsi Nebraskan Sand Hills alueella olevalla Nebraska National Forest -metsäalueella. Työssä käytettiin HYDRUS 1-D numeerista mallia simuloimaan vesitasetta sekä ruohotasangolla että metsämaalla. Maaperän hydrauliset parametrit kalibroitiin käyttämällä DREAM_{ZS} optimointialgoritmia. Tutkimuksissa selvisi, että metsittyminen muutti alueen hydrologiaa huomattavasti, jolloin kasvillisuus pidatti 7 % sadevedestä, evapotranspiraatio nousi 10 % ja pohjaveden muodostuminen laski 17 %. Pohjaveden muodostumisnopeus oli ruohotasangolla 9.65 cm/vuosi ja 0.07 cm/vuosi mäntymetsässä.

Rodrigues Capítulo et al. (2018) tekivät tutkimusta Argentiinassa metsityksen vaikutuksista pohjaveden muodostumiseen rannikon lähellä olevassa akviferissa. Tutkimuksessa käytettiin hyväksi maankäytön arviointia, pohjaveden käyttäytymisen analyysia ja veden stabiilien isotooppien määrää pohjavedessä. Tutkimuksessa havaittiin, että pohjaveden muodostuminen oli runsaampaa paljaalla maaperällä kuin metsitetyllä maaperällä (Kuva 23). Pohjavettä muodostui 37 mm enemmän paljaalla maaperällä. Pohjaveden pinta oli myös alempana metsitetyillä alueilla kuin paljailla alueilla. Veden raskaita isotooppeja havaittiin enemmän metsitetyllä alueella kuin paljaalla alueella. Tämän uskottiin johtuvan korkeammasta evapotranspiraatiosta, jolloin isotooppeja rikastui pohjaveteen enemmän. Pohjaveden pinnankorkeuden muutoksista ja virtauksesta pääteltiin, että pohjaveden muodostuminen voi olla 33 % suurempi paljaalla maaperällä kuin metsitetyllä alueella.



Kuva 23. Metsitetyllä alueella saatavilla olevan pohjaveden määrä ennen metsitystä ja metsityksen jälkeen vuosittain ja kuuden kuukauden jaksoissa (mukaiillen Rodrigues Capitulo et al. 2018).

Mattos et al. (2019) tekivät tutkimuksen laidunmaan metsittämisen vaikutuksista pohjaveden muodostumiseen. Tutkimusalueella Brasiliassa laidunmaa metsitettiin eukalyptuspuilla. Pohjaveden muodostumista tutkittiin arvioimalla pohjaveden pinnankorkeuden muutoksia. Tutkimuksessa selvisi, että pohjaveden pinnankorkeus laski 100 mm/vuosi (Kuva 24). Arvioitu keskimääräinen pohjaveden muodostuminen oli 407 mm/vuosi ja sen havaittiin laskevan 194 mm/vuosi tasolle. Pohjaveden muodostuminen laski ensimmäisellä tutkimusaikavälillä 19 % ja myöhemmin toisella aikavälillä 58 %. Tutkijat havaitsivat tämän johtuneen kasvaneesta evapotranspiraatiosta, jolloin vähemmän vettä pääsee muodostamaan pohjavettä.



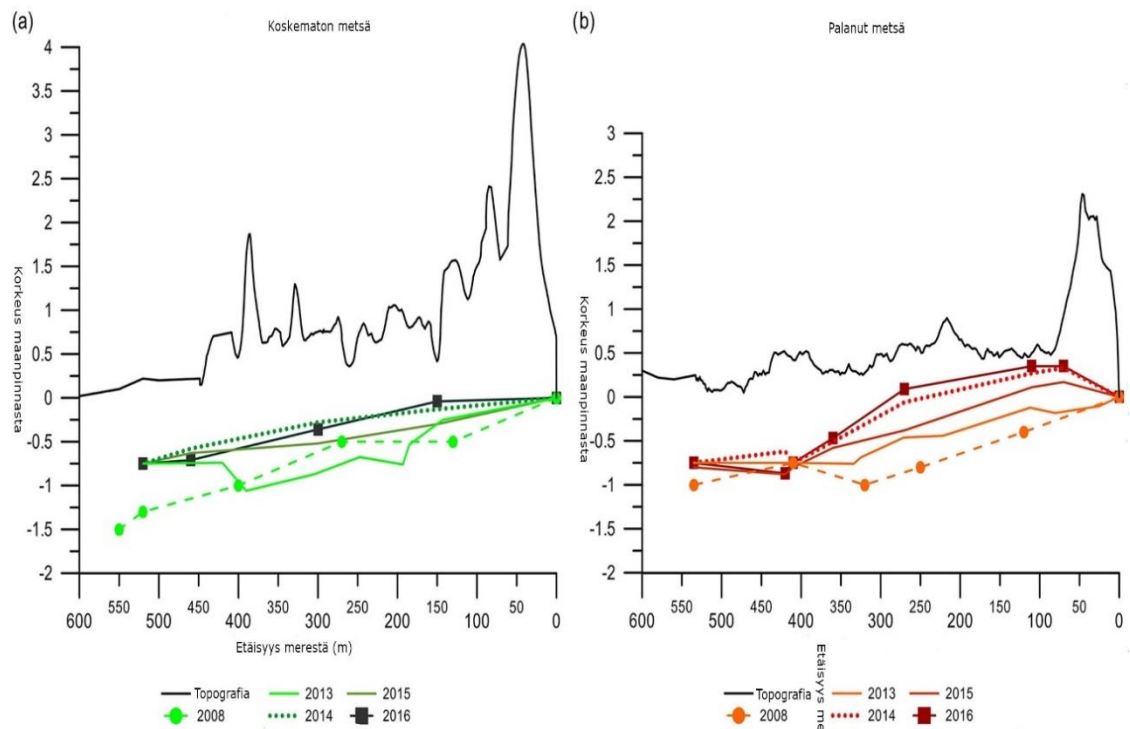
Kuva 24. Kuukausittainen trendianalyysi keskimääräisestä pohjaveden pinnankorkeudesta mittauskaivoista laidunmaalla (a) ja eukalyptusplantaasilla (b). Senin arvio on Sen's Slope -estimaattorin arvio trendistä. (mukailten Mattos et al. 2019).

Milkovic et al. (2019) tekivät mallinnusta metsityksen vaikutuksesta pohjaveden muodostumisen hydrologiaan puolikuivalla alueella Patagoniassa. Mallinnuksessa vertailtiin ruohotasankoa ja puuplantaasia. Tutkimuksessa käytettiin hyväksi hydrologista mallinnusta, satelliitti kuvien analyysia ja maaperän kosteus tietoja. Mallinnuksessa selvisi, että transpiraatio lisääntyi metsityksen jälkeen. Ruohotasangoilla transpiraation osuus vesitaseesta oli 10 % ja metsitetyllä alueella 73 %. Tämän mallinnuksen perusteella pohjaveden muodostuminen olisi ruohotasangolla ollut 182 mm/vuosi, kun se metsitetyllä alueella olisi nolla. Maaperän kosteustutkimusten mukaan maaperä on kuivempaa metsitetyllä alueella kuin ruohotasangolla, joka viittaa pohjaveden muodostumisen heikkenemiseen.

Huang et al. (2020) tutkivat Kiinassa metsityksen vaikutusta pohjaveden muodostumiseen puolikuivassa ilmastossa. Tutkimuksessa käytettiin apuna maankäyttötietoa ja suolan massatasapaino vertailua sadevedessä ja maavedessä. Tutkimus osoitti, että pohjaveden muodostuminen alueella laski 33 % ja yli 90 % välillä. Tutkijat arvioivat, että pohjaveden ollessa lähellä pintaa, pohjaveden muodostuminen voisi laskea lähes nolnaan ja akviferi luovuttaisi vettä puille ja maanpinnalle.

3.4 Kulotuksen vaikutukset pohjaveteen

Giambastiani et al. (2018) tekivät tutkimuksia metsän palamisen aiheuttamista muutoksista pohjaveden muodostumiseen. Tutkimukset suoritettiin kolmessa pisteessä meren läheisellä metsäisellä pohjavesialueella Ravennassa Italiassa. Pohjavedestä seurattiin pohjaveden pinnankorkeutta sekä fysikaalisia ja kemiallisia ominaisuuksia. Tutkimuksissa havaittiin, että pohjaveden muodostuminen lisääntyi palaneilla alueilla (Kuva 25). Osittain palaneilla alueilla muodostuminen oli 219 mm/vuosi, täysin palaneilla alueilla 511 mm/vuosi ja palamattomilla alueilla 73 mm/vuosi. Pohjaveden suolapitoisuuden havaittiin laskeneen metsäpalojen jälkeen. Tämän katsottiin johtuneen kasvillisuuden vähenemisestä, joka vähensi kasvillisuuden pidättämän veden määrää ja evapotranspiraatiota.



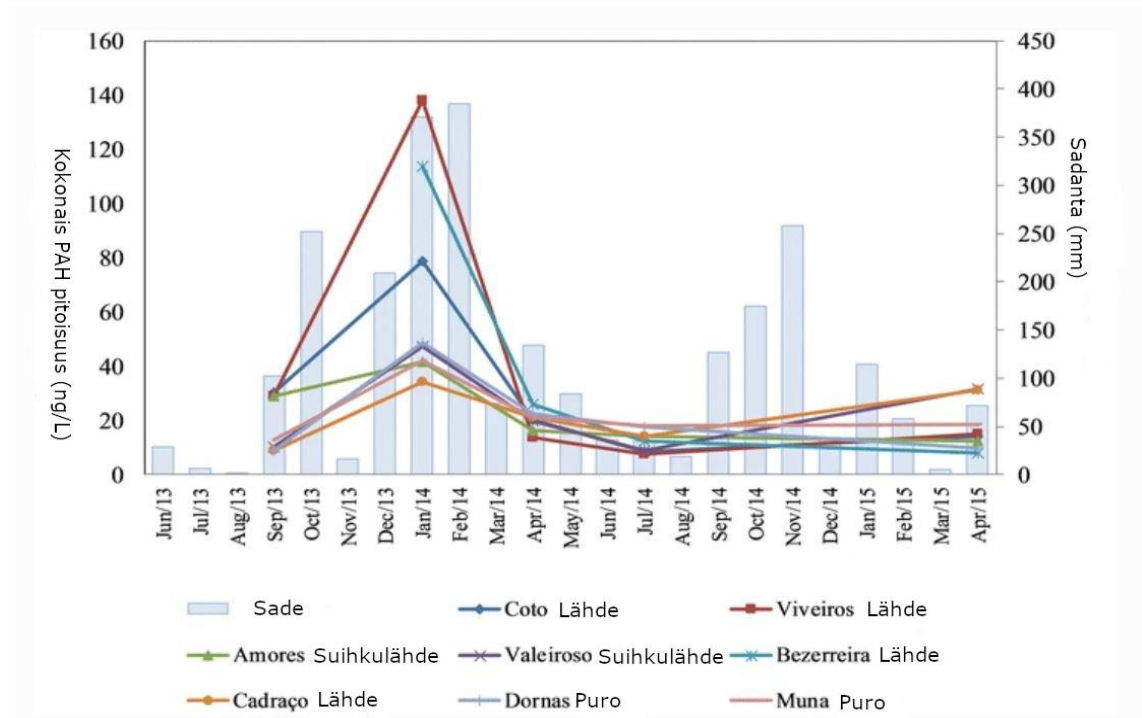
Kuva 25. Pohjaveden pinnankorkeus ennen metsäpaloa (a) ja metsäpalon jälkeen (b) (mukailten Giambastiani et al. 2018).

Maina & Siirila-Woodburn (2020) tekivät tutkimusta metsäpalojen vaikutuksista valuma-alueen hydrologiaan käyttämällä hydrologista mallinnusta. Tutkittava valuma-alue sijaitsi Yhdysvalloissa Pohjois-Kaliforniassa Sacramentosta itään. Mallintamalla havaittiin, että evapotranspiraatio väheni joillain alueilla palon jälkeen, joka johti veden liikkumiseen alaspäin kohti pohjavettä, lisäten pohjaveden muodostumista. Joillain alueilla evapotranspiraation lisääntyminen palon jälkeen, jolloin vähemmän vettä pääsi muodostamaan pohjavettä. Erojen evapotranspiraation muuttumisessa metsäpalojen jälkeen todettiin johtuvan maaperän vedenjohtavuudesta ja kyvystä varastoida vettä. Toinen pohjavettä lisäävä muutos oli lumen määrän lisääntyminen vuoristossa.

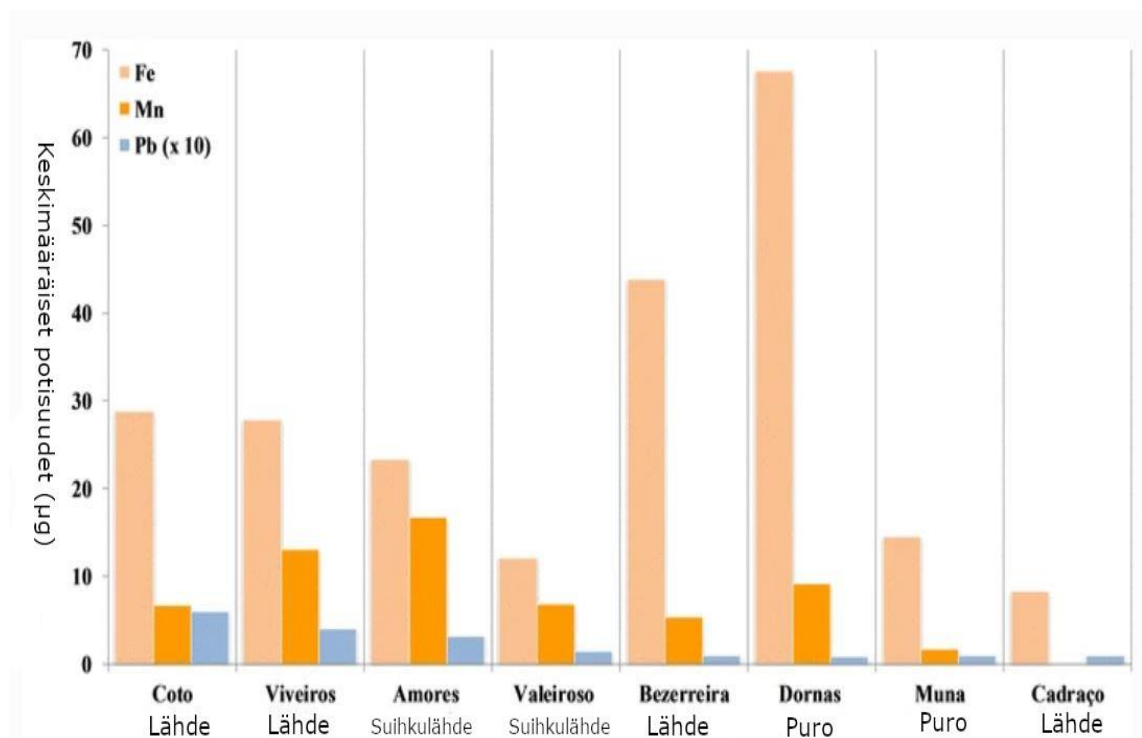
Mansilha et al. (2014) tutkivat polysyklisen aromaattisten hiilivetyjen määrää pohjavedessä metsäpalojen jälkeen. Tutkimuksia tehtiin kahdella vuoristoisella metsäalueella, jotka sijaitsivat suojelualueilla Pohjois- ja Keski-Portugalissa. Näytteitä otettiin pohjavedestä kahdessa vaiheessa. Palaneilta alueilta otetuista näytteistä kuudestatoista näytteestä viidestätoista löytyi polysyklisiä aromaattisia hiilivetyjä. Pitoisuuksien summa palaneilla alueilla vaihteli 23.1 ja 95.1 ng/L välillä ja mediaani pitoisuus oli 62.9 ng/L. Kontrollialueella otetuissa näytteissä pitoisuus oli 16.2 ng/L. Kontrollialueella otetuissa näytteissä esiintyi kevyempiä polysyklisiä aromaattisia hiilivetyjä kuin poltetuilla alueilla.

Mansilha et al. (2019) tekivät tutkimusta metsäpalojen vaikutuksesta pohjaveden laatuun metsäisellä vuoristoalueella, joka sijaitsi Caramulo-vuorella Keski-Portugalissa. Tutkimuksessa otettiin näytteitä pohjavedestä ja pintavedestä kahdeksasta pisteestä palaneilta ja palamattomilta alueilta. Näytteitä otettiin viidessä vaiheessa yhdeksäntoisen kuukauden aikana. Tutkimuksessa havaittiin neljäätoista kuudestatoista tarkkailtavista polysyklisistä aromaattisista hiilivedyistä, joiden pitoisuudet olivat 1.2–4.0 kertaa suuremmat kuin kontrollialueella. Yhteenlaskettu PAH-yhdisteiden pitoisuus oli ylimmillään noin 140 ng/L (Kuva 26). Nitraattipitoisuuksien havaittiin olevan palaneella alueella 27–104 kertaa korkeammalla kuin kontrolli alueilla. Magnesium-, kloridi- ja sulfaatti-ionien pitoisuudet olivat myös koholla ja vaihtelivat 1.0–4.7 kertaa suurempina pitoisuuksina kuin kontrollialueella. Lisäksi rautapitoisuuksien havaittiin olevan 1.3–19.5 kertaa suurempia kuin kontrollialueella ja mangaanipitoisuudet olivat 7.5–67.5 kertaa suuremmat kuin kontrollialueella. Ylimmillään rautapitoisuus oli noin 68 µg/L ja

mangaanipitoisuus oli noin 18 µg/L (Kuva 27). Yhdisteiden pitoisuudet alkoivat laskea tutkimuksen aikana lähelle kontrollialueen pitoisuuksia.

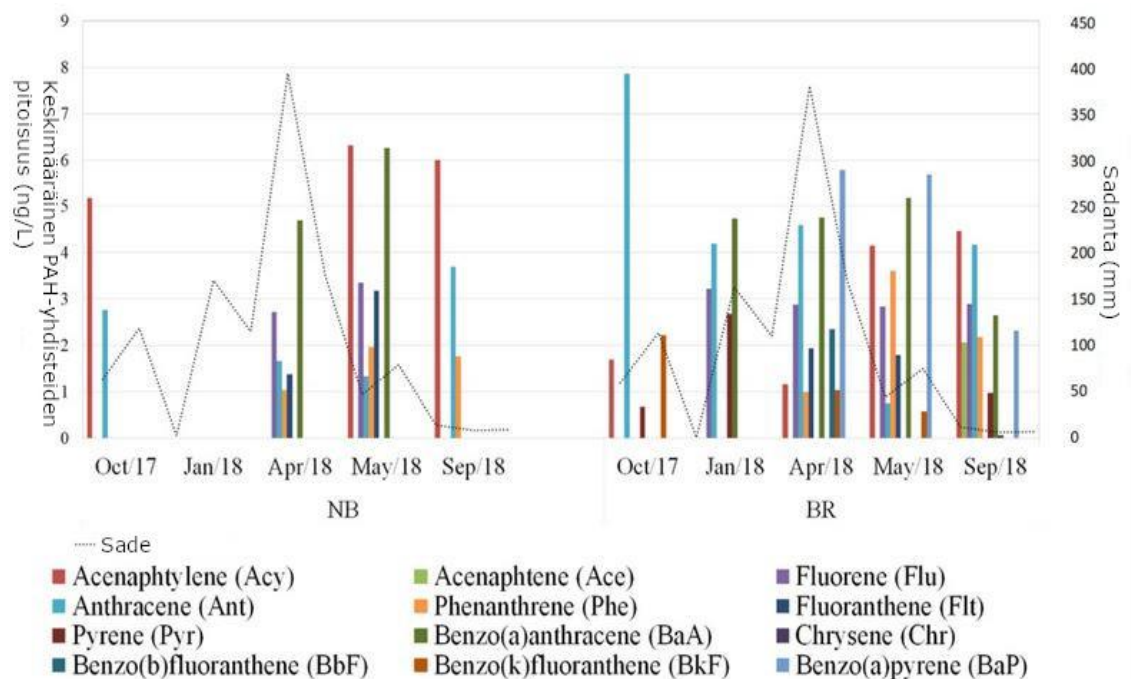


Kuva 26. Pohjavedestä ja pintavedestä mitatut PAH-yhdisteiden pitoisuudet (mukailen Mansilha et al. 2018).



Kuva 27. Keskimääräiset mitatut pitoisuudet raudasta (Fe), mangaanista (Mn) ja lyijystä (Pb) (mukailen Mansilha et al. 2019).

Mansilha et al. (2020) tutkivat metsäpalon vaikutuksia pohjaveden laatuun asutuksen lähellä olevassa metsässä, joka sijaitsi Bragassa Portugalissa. Pohjavesi näytteitä otettiin neljästä lähteestä palaneelta alueelta ja kontrolli näytteitä otettiin palamattomalla alueella sijaitsevista lähteistä. Näytteiden otto aloitettiin viisitoista päivää metsäpalon jälkeen ja näytteitä otettiin yhdentoista kuukauden ajan vuosina 2017–2018. Tutkimuksessa havaittiin pohjavesinäytteiden sisältävän kohonneita pitoisuuksia sulfaatissa, fluoridissa, työssä, raudassa, mangaanissa sekä kromissa. Polysyklisten aromaattisten hiilivetyjen pitoisuudet olivat myös koholla, mutta eivät ylittäneet Euroopan unionin juomavedelle asetettuja pitoisuuden raja-arvoja (Kuva 28).



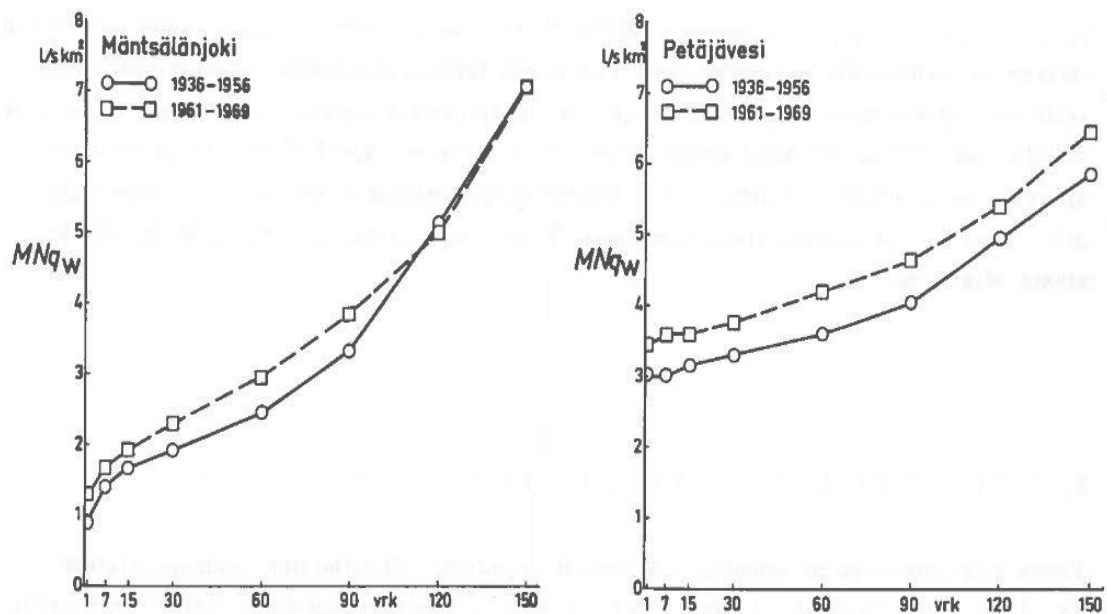
Kuva 28. Keskimääräiset PAH-yhdisteiden konsentraatiot koskemattomilla alueilla (NB) ja palaneilla alueilla (BR) (mukailten Mansilha et al. 2020).

3.5 Ojituksen vaikutukset pohjaveteen

Ojituksen vaikutuksia pohjaveden laatuun ja määrään on tutkittu huomattavasti vähemmän kuin ojituksen vaikutuksia pintavesiin. Jonkin verran tutkimusta on tehty ojituksen vaikutuksista pohjaveden purkautumisesta ojiin ja pohjaveden pinnankorkeuteen. Ojituksen vaikutuksia pohjaveden laatuun ei ole juurikaan tutkittu.

Mustonen & Seuna (1971) tekivät tutkimusta ojituksen vaikutuksista valuntaan ja siihen liittyviin suureisiin. Tutkimuksia tehtiin Ruokolahdella Hutisuonojalla ja Latosuonojalla

vuosina 1936–1969 tehtyjen havaintojen avulla. Tutkimusten perusteella 30 vuorokauden talvialivaluma oli lisääntynyt kummallakin suoalueella noin 280 % (Kuva 29). Huhtisuonoja oli ennen ojitusta kuivunut seitsemänä talvena kolmenkymmenen vuorokauden ajaksi, mutta ojituksen jälkeen tätä kuivumista ei havaittu ollenkaan. Alueiden ojat ylsivät turvekerroksen läpi alapuoliseen mineraalimaaperään asti. Talvialivalumien lisääntyminen viittasi siihen, että ojiin purkautui vettä osittain turvekerroksen alapuolisesta sorakerroksesta. Myös 30 vuorokauden kesäalivalunta oli lisääntynyt kummallakin suoalueella ojituksen jälkeen.



Kuva 29. Talven vuorokauden keskialivalumat (MNq_w) vuosilta 1936–1956 ja 1961–1969 Mäntsälänjoelta ja Petäjävvedeltä (mukaillen Mustonen & Seuna 1971).

Simpson et al. (2011) tekivät mallinnusta akviferin ja ojien vuorovaikutuksesta Thurnen valuma-alueella Norfolkin Englannissa. Ojat ja akviferi vuorovaikuttavat keskenään ojan yltäessä turvekerroksen läpi alapuoliseen vettä hyvin johtavaan mineraalimaaperään. Tutkimuksessa mallinnettiin merenläheisen turvemaan ojien suolapitoisuutta, joka viittaa siihen, että merivettä suotautuu maan läpi turvekerroksen alapuoliseen mineraalimaahan ja sitä kautta ojiin.

Rossi et al. (2012) tutkivat pohjaveden ja pintaveden vuorovaikutusta ojitetun suon ja läheisen harjun akviferin välillä. Tutkimukset suoritettiin Rokuan harjulla ja läheisellä ojitetulla suolla. Tutkimuksessa selvisi, että turvemaalle purkautui vettä alapuolisesta hiekkaisella maaperällä olevasta akviferista. Tätä purkautumista havaittiin, vaikka turve

on huonosti vettä johtavaa ja turvekerros oli paksu. Pohjavettä purkautuu akviferista turvekerroksen läpi pinnalle asti pistemäisenä purkautumisena, mutta osittain myös turvekerroksen ala- ja yläpuolen välillä olevissa putkivirtaussysteemeissä. Ojissa, jotka yltyvät turvekerroksen läpi alapuoliseen hiekkamaaperään, havaittiin tapahtuvan diffuusio purkautumista oja pohjan läpi. Purkautumisen lisääntymisen myötä virtausvastus pienenee akviferin rajalla. Tämä voisi johtaa pohjaveden pinnan alenemiseen läheisessä harju akviferissa.

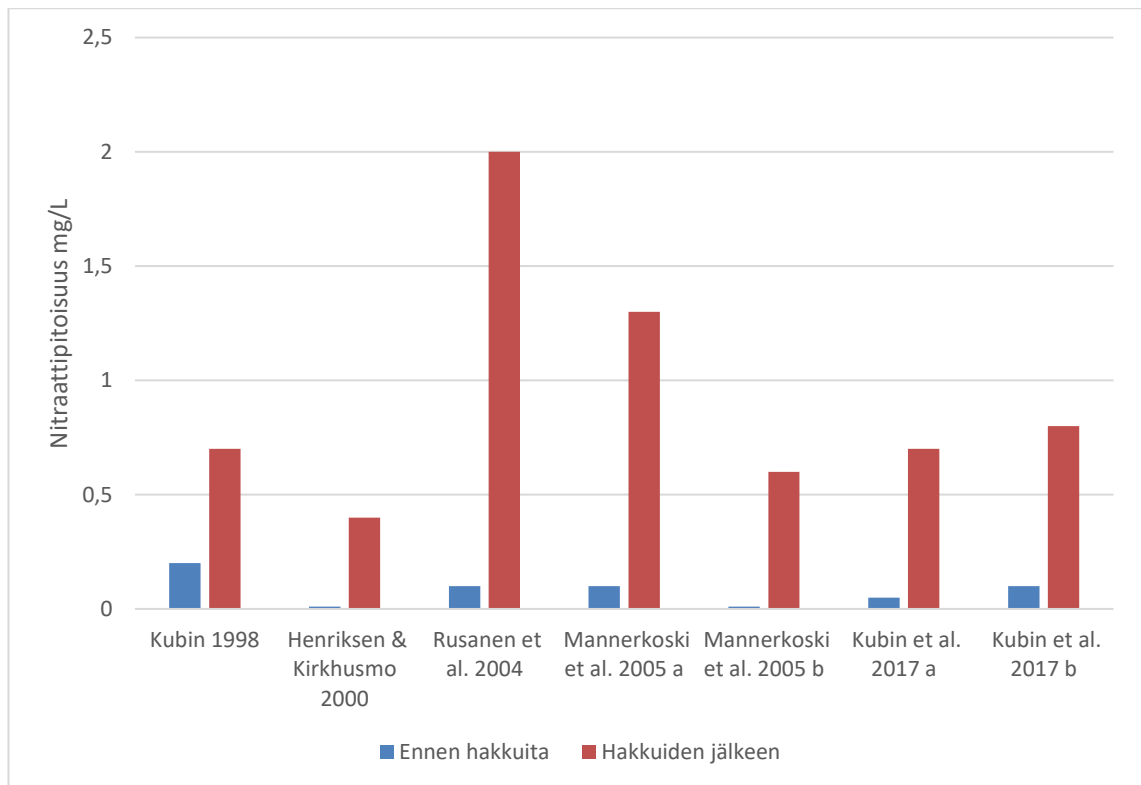
Toisessa tutkimuksessa Rossi et al. (2014) mallinsivat turvemaan ojituksen vaikutuksia pohjaveden määrään läheisellä harjun akviferilla. Mallinnettavana alueena oli Rokuan harju ja läheinen ojitettu suo. Mallinnuksessa käytettiin MODFLOW-mallinnustyökalua. Ojituksen vaikutusten lisäksi mallinnuksessa otettiin huomioon ilmastonmuutoksen vaikutukset ja pohjaveden pumppaaminen talouskäyttöön. Validointiin käytettiin Monte Carlo -menetelmää, jolloin voitiin ottaa huomioon mahdolliset epävarmuudet mallinnuksessa. Mallinnuksen tulosten perusteella voitiin päätellä, että ojitus voi laskea läheisen harjun akviferin pintaa huomattavasti, mutta pohjaveden pinnankorkeus näytti riippuvan enemmän ilmastollisista tekijöistä. Ojien tukkiminen padoilla vaikutti mallinnuksen mukaan edullisesti läheisen akviferin pohjaveden pinnankorkeuteen. Pohjaveden pinnankorkeus muuttui edulliseen suuntaan nopeammin niissä mallinuksissa, joissa ojien pohjien veden johtavuutta pienennettiin, kuin mitä ojien patoamisessa. Näiden vaikutusten ei kuitenkaan voitu olettaa vaikuttavan koko akviferin pohjaveden pinnankorkeuteen. Ojien täyttäminen kokonaan vaikuttaisi mallinuksissa johtavan suotuisimpiin tuloksiin, mutta sen katsotaan olevan ylimitoitettu ja kallis vaihtoehto ennallistamiselle.

Li & Gao (2019) tutkivat luonnollisten ja ihmisen tekemien rotkojen vuorovaikutuksia pohjaveden kanssa turvemailla. Tutkimukset suoritettiin Zoigen turvemailla Kiinassa. Tutkimuksessa tarkasteltiin kahden tyyppisiä rotkoja; matalia turvemaassa olevia rotkoja ja syviä rotkoja, jotka läpäisevät turvemaaperän. Tutkimuksessa päädyttiin tuloksiin, että rotkojen yltyessä turvemaaperän läpi mineraalimaaperään, turvemaan hydrologia muuttuu ja pohjavettä voi purkautua rotkon pohjan läpi. Tällä on potentiaalinen kuivattava vaikutus turvekerroksen lisäksi sen alapuoliseen mineraalimaaperään.

4 KOOSTE

Tehtyjen tutkimusten perusteella voidaan havaita, että metsätaloustoimenpiteillä on lähes aina jonkin lainen vaikutus pohjaveden määrään ja laatuun. Vaikutusten laajuudesta ei ole paljoa tietoa, mutta vaikutukset voivat olla koko akviferin kattavia (Rossi et al. 2012, Rossi et al. 2014). Vaikutusten laajuus näyttäisi riippuvan metsätaloustoimenpiteestä ja alueen laajuudesta, jossa näitä metsätaloustoimenpiteitä harjoitetaan. Jonkin verran on myös ristiriitaista tietoa, jolloin tutkimuksessa ei ole havaittu yhteyttä metsätaloustoimenpiteiden ja pohjaveden määrän sekä laadun välillä (Rusanen et al. 2004, Mannerkoski et al. 2005).

Hakkuiden vaikutuksista tehtyjen tutkimusten perusteella näyttää siltä, että useimmiten pohjaveden muodostuminen hakatuilla alueilla lisääntyy ja sen myötä myös pohjaveden pinnankorkeus nousee. Nämä vaikutukset voivat kuitenkin olla vain paikallisia, koska laajempaa tutkimusta ei ole juurikaan tehty siitä lisäävätkö hakkuut pohjaveden määrää koko akviferissa. Tutkimustietoa on myös hakkuiden vaikutuksista pohjaveden laatuun. Näissä tutkimuksissa on havaittu ainakin nitraattityppipitoisuuksien kohonneen hakkuiden jälkeen. Nämä havaitut koholla olevat pitoisuudet ovat myös pysyneet koholla useamman vuosikymmenen ajan hakkuiden jälkeen. Verrattuna juomaveden laatusuositukseen 50 mg/l (Valvira 2020), nämä pitoisuudet ovat olleet matalia noin 0,5–2 mg/L (Kubin 1998, Rusanen et al. 2004). Muiden yhdisteiden osalta ei tutkimuksissa ollut havaittu juurikaan kohonneita pitoisuuksia hakkuiden jälkeen. Hakkuiden vaikutuksista pohjaveteen näyttäisi siis päätyvän typpiyhdisteitä. Kuvassa 30. on kerätty tutkimuksissa havaitut korkeimmat nitraattipitoisuudet ennen hakkuita ja hakkuiden jälkeen.



Kuva 30. Kuvaaja eri tutkimuksissa havaituista nitraattipitoisuuden korkeimmista arvoista ennen hakkuita ja hakkuiden jälkeen. Suomessa juomaveden laatusuositus nitraatille on 50 mg/l (Valvira 2020).

Metsityksen vaikutuksen pohjaveden määrään ja muodostumiseen ovat tutkimusten perusteella käänteiset verrattuna hakkuiden vaikutuksiin. Näissä tutkimuksissa oli havaittu, että metsitetyillä alueilla pohjaveden muodostuminen oli runsaampaa ja pohjaveden pinnankorkeus oli korkeammalla kuin niityillä tai ruohotasangoilla. Joillakin alueilla metsitys ei muuta pohjaveden muodostumista, koska alueen maaperä ja ilmasto vaikuttavat myös muodostuvan pohjaveden määrään. Metsityksen vaikutuksista pohjaveden laatuun ei löytynyt tutkimuksia. Metsitys ei näyttäisi olevan relevantti asia Suomessa tai muualla Pohjois-Euroopassa. Tutkimuksia on tehty lähinnä subtrooppisissa maissa puolikuivilla tai kuivilla alueilla, joissa pohjaveden muodostuminen on muutenkin vähäisempää. Metsityksen vaikutukset on kuitenkin hyvä ottaa huomioon, sillä hakkuiden lisäksi myös metsien istuttaminen muuttaa alueen hydrologiaa ja vaikuttaa siten myös pohjaveteen.

Kulotuksen vaikutukset pohjaveden muodostumiseen ovat samanlaisia kuin hakkuiden vaikutukset. Pohjaveden muodostuminen näyttäisi tutkimusten perusteella lisääntyvän kulotetuilla alueilla, johtuen kasvillisuuden häviämisestä aiheutuvasta evapotranspiraation poistumisesta. Poltettaessa metsäalueita muodostuu yhdisteitä, joilla voi olla vaikutusta

pohjaveden laatuun ja jotka voivat olla haitallisia eliöille. Tällaisia yhdisteitä ovat esimerkiksi polysykliset aromaattiset hiilivedyt eli PAH-yhdisteet. Lisäksi pohjaveteen voi päätyä useita metalleja, kuten alumiinia sekä jonkin verran ravinteita. PAH-yhdisteiden pitoisuudet ovat olleet tutkimuksissa keskimäärin 62,9 ng/l (Mansilha et al. 2014), kun juomavesisuosituksen mukaan pitoisuus saa enimmillään olla 100 ng/l (Valvira 2020).

Tutkimuksia ojituksen vaikutuksista pohjaveden määrään ja laatuun on tehty huomattavan vähän verrattuna muihin metsätaloustoimenpiteisiin. Tutkimuksissa ei myöskään ole selvinnyt ovatko ojat olleet kunnostettuja vai uudisojia. Pohjaveden ja ojien välinen vuorovaikutus on tullut selville tutkimuksista ja vaikuttaa siltä, että ojitus voisi laskea pohjaveden pinnankorkeutta. Tämä pohjaveden purkautuminen ojiin on ollut selvästi todennettavissa tapauksissa, joissa ojitettu suoalue on harjumuodostelman reuna-alueella. Pohjaveden purkautumista tapahtuu jonkin verran turvekerroksen läpi ojiin, mutta suurempia määriä voi purkautua ojiin, jotka on kaivettu syviksi ja yltävät turvekerroksen alapuolella olevaan mineraalimaaperään. Tutkimustietoa ojituksen vaikutuksista pohjaveden laatuun ei ole ainakaan tässä kirjallisuuskatsauksessa löydetty.

5 JOHTOPÄÄTÖKSET

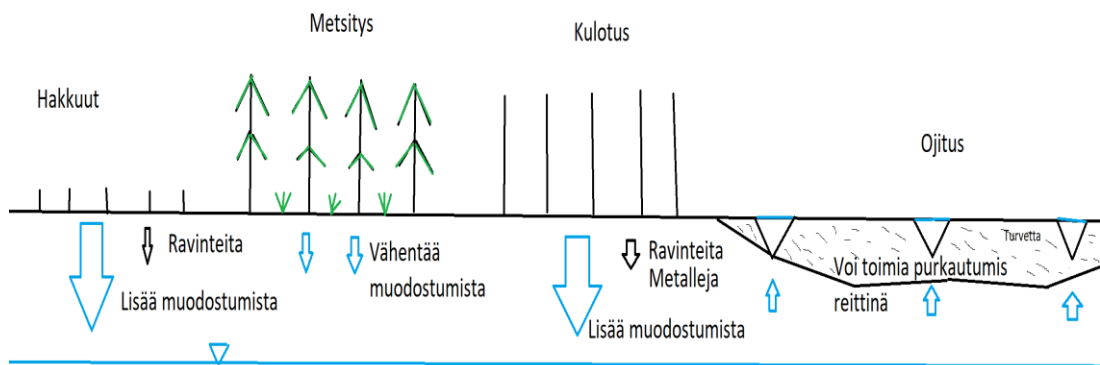
Kappaleen 3. alussa esitettyihin hypoteeseihin saatiin osittain vahvistusta käymällä läpi tehtyjä tutkimuksia eri metsätaloustoimenpiteiden vaikutuksista pohjaveteen. Metsätaloustoimenpiteiden vaikutukset pohjaveden laatuun ja määrään ovat:

- Hakkuut lisäävät pohjaveden muodostumista hakatuilla metsäalueilla ja pohjaveteen voi päätyä erilaisia metalleja sekä typpiyhdisteitä, erityisesti nitraattityppeä.
- Metsitys voi vähentää pohjaveden muodostumista alueilla, joilla ei ole ollut ennen metsää. Vaikutus riippuu alueen maaperästä ja ilmastosta.
- Kulotus lisää pohjaveden muodostumista palaneella metsäalueella ja samalla muodostuu polysyklisiä aromaattisia hiilivetyjä sekä vapautuu metalleja ja typpiyhdisteitä, jotka voivat päätyä pohjaveteen.
- Ojitus voi laskea akviferin pohjaveden pinnankorkeutta toimimalla purkautumisreittinä pohjavedelle.

Metsätaloustoimenpiteillä on siis vaikutusta sekä pohjaveden määrään että laatuun. Tutkimuksissa havaitut yhdistepitoisuudet pohjavedessä ovat olleet pieniä verrattuna talousveden laatusuosituksiin. Metsätalouden vaikutus muodostuvan pohjaveden määrään voisi tutkimusten valossa olla merkittävämpi pohjaveden hyödyntämiseen vaikuttava tekijä. Tutkimustiedossa on myös aukkoja, esimerkiksi siinä onko ojituksella vaikutuksia myös pohjaveden laatuun. Metsätaloustoimenpiteiden vaikutukset pohjaveteen tulisi ottaa huomioon harjoitettaessa metsätaloutta alueilla, joiden pohjavesiesiintymät ovat joko yhteiskunnalle tai luonnolle tärkeässä merkityksessä. Taulukossa 1. nähdään koottuna yhteenvetona metsätalouden vaikutuksia pohjaveden laatuun ja määrään sekä mineraalimaaperällä että turvemaaperällä. Kuvassa 31. havainnollistetaan eri metsätalous toimenpiteiden vaikutuksia pohjaveden määrään ja laatuun.

Taulukko 1. Tiivistelmä metsätalouden vaikutuksista pohjaveden määrään ja laatuun.

Toimenpide	Pv määrä ja muodostuminen	Pv purkautuminen	Pv laatu	Lähteitä
Avohakkuu	Lisäävä	Ei tietoa	Vaikutus laatuun	Kubin 1998 Henriksen & Kirkhusmo 2000 Mannerkoski 2005
Harvennushakkuu	Lisäävä	Ei tietoa	Mahdollinen vaikutus	Rusanen 2004 Peck & Williamson 1987
Metsitys	Vähentävä	Ei tietoa	Ei tietoa	Silveira 2016 Adane 2018 Rodrigues 2018 Mattos 2019
Kulotus	Lisäävä	Ei tietoa	Vaikutus laatuun	Mansilha 2014,2019,2020 Maina 2020 Giambastian 2018
Uudisojitus	Mahdollisesti vähentävä	Lisäävä	Ei tietoa	Mustonen & Seuna 1971 Li & Gao 2019
Kunnostusojitus	Mahdollisesti vähentävä	Lisäävä	Ei tietoa	Rossi 2012 Rossi 2014



Kuva 31. Havainnollistava kuva eri metsätaloustoimenpiteiden vaikutuksista pohjaveden määrään ja laatuun.

6 YHTEENVETO

Tämän diplomityön tavoitteena oli perehtyä olemassa olevaan tutkimustietoon metsätalouden vaikutuksista pohjaveden laatuun ja määrään sekä koota nämä tiedot yhdeksi kokonaisuudeksi. Käymällä läpi olemassa olevaa tutkimustietoa kartoitettiin tutkimuksen nykytilanne, jotta voidaan havaita mahdollisia aukkoja tiedossa. Työ tehtiin kirjallisuuskatsauksena, jossa tutkimustietoa etsittiin julkisista netissä olevista tiedonhakusivustoista.

Työ alkoi pohjaveden ja metsätalouden teorialla sekä lyhyellä katsauksella metsätalouden vaikutuksista pintavesien määrään ja laatuun. Näiden teoria tietojen sekä metsätalouden pintavesi vaikutusten pohjalta voitiin esittää hypoteeseja mahdollisista metsätalouden vaikutuksista pohjaveden määrään ja laatuun. Näihin hypoteeseihin etsittiin vastausta tehdyistä tutkimuksista.

Tehtyjen tutkimusten perusteella hakkuiden on havaittu lisäävän pohjaveden muodostumista ja nostavan pohjaveden pinnankorkeutta, johtuen puuston häviämisestä. Hakkuiden vaikutuksesta pohjaveteen voi päätyä nitraattityppeä, kloridia sekä pieniä määriä muita yhdisteitä. Metsitys voi tutkimusten perusteella vähentää pohjaveden muodostumista, johtuen lisääntyneen puuston ja kasvien aiheuttamasta interseption ja evapotranspiraation lisääntymisestä. Kulotuksen myötä pohjaveden muodostuminen kasvaa ja pohjaveden pinnankorkeus nousee johtuen kasvillisuuden häviämisestä. Ojitus voi laskea pohjaveden pintaa toimien purkautumisreittinä pohjavedelle. Näin on havaittu tapahtuvan harjulla olevassa akviferissa, jossa pohjaveden pinta oli korkeammalla kuin ojitettu suo. Pohjaveden purkautuminen on tutkimusten mukaan voimakkaampaa, kun ojitus ylittää turvekerroksen läpi alla olevaan mineraalimaaperään. Tätä purkautumista havaittiin myös turvekerroksen läpi pistemäisenä purkautumisena. Purkautumista tapahtui, vaikka turvekerros oli paksu ja huonosti vettä johtava.

Metsätalouden vaikutukset pohjaveteen tulisi ottaa huomioon suunniteltaessa metsätaloustoimenpiteitä pohjavesialueilla. Erityisesti vaikutukset on otettava huomioon pohjaveden ollessa tärkeä talousveden lähde tai paikalliset ekosysteemit ovat pohjavesi riippuvaisia. Tutkimustiedoissa olevien aukkojen perusteella aiheesta voi syntyä uusia projekteja ja tutkimuksia. Esimerkiksi ojituksen vaikutuksia pohjaveden laatuun voitaisiin tutkia enemmän. Ojituksen vaikutuksia pohjaveden määrään voitaisiin myös

tutkia erilaisissa suotyypeissä ja ottaa huomioon onko suo pohjavettä keräävää vai purkavaa tyyppiä. Tutkimuksissa jää myös epäselväksi ovatko metsätalouden vaikutukset pohjaveteen vain paikallisia vai voivatko vaikutukset yltää koko pohjavesiesiintymään.

LÄHDELUETTELO

Aapala K., Similä M. & Penttinen J. (toim.), 2013. Ojitettujen soiden ennallistamisopas, Vantaa: Metsähallitus, 301 s, ISBN: 978-952-295-025-3.

Adane Z., Nasta P., Zlotnik V. & Wedin D., 2018. Impact of grassland conversion to forest on groundwater recharge in the Nebraska Sand Hills. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 15, S. 171–183.

Ahtinen M., 1992. The effects of forest clear-cutting and scarification on the water quality of small brooks. *Hydrobiologia*, 234–244 (1), S. 465–473.

Ahtinen M. & Huttunen P., 1999. Long-term effects of forestry managements on water quality and loading in brooks. *Boreal Environment Research*, 4 (2), S. 101–114.

Ala-aho P., Rossi P.M. & Kløve B., 2015. Estimation of temporal and spatial variations in groundwater recharge in unconfined sand aquifers using Scots pine inventories. *Hydrology and Earth System Sciences*, 19 (4), S. 1961–1976.

Bouwer H., 1978. *Groundwater hydrology*, New York: McGraw, 480 s, ISBN 0-07-006715-5.

Davis S. & DeWiest R., 1966. *Hydrogeology*, New York: John Wiley, 463 s, ISBN 0-471-19900-1.

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

Fitts C., 2012. *Groundwater Science, Second Edition*, Cambridge: Academic Press, 692 s, ISBN 978-0-12-384705-8.

Giambastiani B.M.S., Greggio N., Nobili G., Dinelli E. & Antonellini M., 2018. Forest fire effects on groundwater in a coastal aquifer (Ravenna, Italy). *Hydrological Processes*, 31 (15), S. 2377–2389.

Grebner D. L., Bettinger P. & Siry J.P., 2014. Introduction to Forestry and Natural Resources, Athens: Elsevier, 508 s, ISBN 978-0-12-386901-2.

Hannelius S., Leikola M. & Tuimala A., 1989. Metsäkirja – Metsänomistajan käsikirja, Porvoo: WSOY, 383 s, ISBN 951-0-14677-3.

Heinonen P., & Pelkonen K. (toim.), 2004. Metsätalouden ympäristöopas, Vantaa: Metsähallitus, 159 s, ISBN 952-446-426-8.

Hendriks M., 2010. Introduction to physical hydrology, Oxford: Oxford University Press, 352 s, ISBN 9780199296842.

Henriksen A. & Kirkhusmo L.A., 2000. Effects of clear-cutting of forest on the chemistry of a shallow groundwater aquifer in southern Norway. *Hydrology and Earth System Sciences*, 4 (2), S. 323–331.

Huang T., Pang Z., Yang S. & Yin L., 2020. Impact of Afforestation on Atmospheric Recharge to Groundwater in a Semiarid Area. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 125 (9), e2019JD032185.

Huuskonen S., Hynynen J. & Valkonen S. (toim.), 2014. Metsänkasvatus – Menetelmät ja kannattavuus, Porvoo: Metsäntutkimuslaitos, 205 s, ISBN 978-952-6612-39-3.

Hynninen P. & Sepponen P., 1983. Erään suoalueen ojituksen vaikutus purovesien laatuun Kiiminkijoen vesistöalueella, Pohjois-Suomessa. *Silva Fennica*, 17 (1), S. 23–43.

Joensuu S., Ahti E. & Vuollekoski M., 1999. The effects of peatland forest ditch maintenance on suspended solids in runoff. *Boreal Environment Research*, 4 (4), S. 343–355.

Joensuu S., Ahti E. & Vuollekoski M., 2001. Long-term effects of maintaining ditch networks on runoff water quality. *Suo*, 52 (1), S. 17–28.

Kubin E., 1998. Leaching of nitrate nitrogen into the groundwater after clear felling and site preparation. *Boreal Environment Research*, 3 (1), S. 3–8.

Kubin E., Křeček J. & Palán L., 2017. Effects of Forest Practices on Water Resources Recharge in Boreal Climate. *Environmental Processes*, 4 (3), S. 509–522.

Li Z. & Gao P., 2019. Impact of natural gullies on groundwater hydrology in the Zoige peatland, China. *Journal of Hydrology: Regional studies*, 21, S. 25–39.

Libiete Z., Bardule A., Murniece S. & Lupikis A., 2017. Impact of clearfelling on dissolved nitrogen content in soil-, ground-, and surface waters: Initial results from a study in Latvia. *Agronomy Research*, 15 (3), S. 767–787.

Lu C.X., Cao S.X. & Shi X.L., 2017. Stimulation on the impact of afforestation on the groundwater table in arid and semi-arid areas in northern China. *Shengtai Xuebao/ Acta Ecologica Sinica*, 37 (3), S. 715–725.

Maa- ja metsätalousministeriö, 2020. Vastualueet, Metsät, Metsätalous, Metsätalouden kestävyys, Metsien taloudellinen merkitys [verkkodokumentti]. Helsinki: Maa- ja metsätalousministeriö. Saatavissa: <https://mmm.fi/metsat/metsatalous/metsatalouden-kestavyys/metsien-taloudellinen-merkitys>. [Viitattu 2.1.2021].

Maina F.Z. & Siirila-Woodburn E.R., 2020. Watersheds dynamics following wildfires: Nonlinear feedbacks and implications on hydrologic responses. *Hydrological Processes*, 34 (1), S. 33–50.

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.

Mansilha C., Carvalho A. & Guimarães P., Marques, J.E., 2014. Water quality concerns due to forest fires: Polycyclic aromatic hydrocarbons (PAH) contamination of groundwater from mountain areas. *Journal of Toxicology and Environmental Health – Part A: Current Issues*, 77 (14–16), S. 806–815.

Mansilha C., Duarte C.G., Melo A., Ribeiro J., Flores D. & Marques J.E., 2019. Impact of wildfire on water quality in Caramulo Mountain ridge (Central Portugal). *Sustainable Water Resources Management*, 5 (1), S. 319–331.

Mansilha C., Melo A., Martins Z.E., Ferreira I.M.P.L.V.O., Pereira A.M. & Marques J.E., 2020. Wildfire effects on groundwater quality from springs connected to small public supply systems in a peri-urban forest area (Braga region, NW Portugal). *Water (Switzerland)*, 12 (4), 1146.

Mattos T.S., de Oliveira P.T.S. & Lucas M.C., Wendland, E., 2019. Groundwater recharge decrease replacing pasture by Eucalyptus plantation. *Water (Switzerland)*, 11 (6), 1213.

Milkovic M., Paruelo J.M. & Noretto M.D., 2019. Hydrological impacts of afforestation in the semiarid Patagonia: A modelling approach. *Ecohydrology*, 12 (6), e2113.

Mustonen S. & Seuna P. 1971. Metsäojituksen vaikutuksesta suon hydrologiaan. Vesihallitus, Helsinki. Vesientutkimuslaitoksen julkaisuja 2. 63 s.

Mälkki E., 1999. Pohjavesi ja pohjaveden ympäristö. Helsinki: Tammi, 304 s. ISBN 951-26-4515-7.

Nieminen M., Sallantausta T., Ukonmaanaho L., Nieminen T.M. & Sarkkola S., 2017. Nitrogen and phosphorus concentrations in discharge from drained peatland forests are increasing. *Science of the Total Environment*, 609, S. 974-981.

Paasonen-Kivekäs M., Peltomaa R., Vakkilainen P. & Äijö H., 2016. Maan vesi- ja ravinnetalous: ojitus, kastelu ja ympäristö. Helsinki: Salaojayhdistys 2009, 452 s. ISBN 978-952-5345-22.

Palviainen M., Finér L., Laurén A., Launiainen S., Piirainen S., Mattsson 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 (2), S. 218-233.

Peck A.J. & Williamson D.R., 1987. Effects of forest clearing on groundwater. *Journal of Hydrology*, 94 (1-2), S. 47-65.

Rantala S., 2014. Metsäkoulu. Helsinki: Metsäkustannus, 351 s, ISBN 978-952-6612-27-0.

Rodrigues Capítulo L., Carretero S.C. & Kruse E.E. 2018. Impact of afforestation on coastal aquifer recharge. Case study: eastern coast of the Province of Buenos Aires, Argentina. *Environmental Earth Sciences*, 77 (3), 74.

Rossi P.M., Ala-aho P., Ronkanen A. & Kløve B., 2012. Groundwater - surface water interaction between an esker aquifer and a drained fen. *Journal of Hydrology*, 432–433, S. 52–60.

Rossi P.M., Ala-aho P., Doherty J. & Kløve B., 2014. Impact of peatland drainage and restoration on esker groundwater resources: modeling future scenarios for management. *Hydrogeology Journal*, 22, S. 1131–1145.

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 (3), S. 253–261.

Saukkonen S. & Kenttämies K., (toim.) 1995. Metsätalouden vesistövaikutukset ja niiden torjunta: MET-VE-projektin loppuraportti. Suomen ympäristökeskus, Helsinki: Suomen ympäristö 2. 420 s. ISBN 952–11–0007–9.

Seuna P., 1990. Metsätalouden toimenpiteet hydrologisina vaikuttajina. *Vesitalous*, 31 (2) S. 38–41.

Silveira L., Gamazo P., Alonso J. & Martínez L., 2016. Effects of afforestation on groundwater recharge and water budgets in western region of Uruguay. *Hydrological processes*, 30 (20), S. 3596–3608.

Simpson T., Holman I.P. & Rushton K., 2011. Drainage ditch-aquifer interaction with special reference to surface water salinity in the Thurne catchment, Norfolk, UK. *Water and Environment Journal*, 25 (1), S. 116–128.

Stasik R. & Korytowski M., 2015. Analysis of groundwater level changes in clearcutting area of chosen forest habitats. *Journal of Ecological Engineering*, 16 (4), S. 59–64.

Valvira, 2020. Talousvesiasetuksen soveltamisohje, Osa III: Enimmäisarvojen perusteet. [verkkodokumentti]. Helsinki: Valvira. Saatavissa:

https://www.valvira.fi/documents/14444/6739502/Talousvesiasetuksen_soveltamisohje_osa_3.pdf/b9faedd0-cd83-fd94-09e2-452e7e7ee123. [Viitattu 28.12.2020]. 54 s.

Winter T.C., Harvey J.W., Franke O.L. & Alley W.M., 1998. Ground Water and Surface Water: A Single Resource. Denver: U.S. Geological Survey. U.S. Geological survey circular: 1139. 79 s. ISBN 0-607-89330-7.