

# Hydrologia – suon synnyn ja kehityksen ohjaaja

Sakari Sarkkola & Juhani Päivänen

*Sakari Sarkkola, Luonnonvarakeskus, sakari.sarkkola@luke.fi  
Juhani Päivänen, Helsingin yliopisto, metsätieteiden osasto,  
juhani.paivanen@helsinki.fi*

## Suon hydrologia

### Luonnontilaisen suon vesitalous

Suon muodostuminen edellyttää niin suurta kosteutta ja veden viipymää alueella, että suokasvillisuus menestyy ja orgaanisen aineen hajoaminen hidastuu. Riittävä kosteus on taattu, kun sadanta ja ympäröivältä valuma-alueelta tuleva valunta yhdessä ylittävät alueen haihdunnan. Märkyys hidastaa happea vaativaa biologista hajotustoimintaa ja estää kasvien tuottaman orgaanisen aineen täydellisen hajoamisen, jolloin muodostuu turvetta.

Suolle tulevan veden alkuperä, eli onko suon vesitalous pelkästään sadeveden varassa vai saako se vesiä myös ympäröiviltä kivennäismailta, vaikuttaa sen kasvillisuuteen eli suotyyppiin. Tämän lisäksi suoyhdistymätyyppien eli yhtenäisten suo-aluekokonaisuuksien syntyä määräävät ilmasto-olot ja topografia. Pohjoisella havumetsävyöhykkeellä kosteat ja viileät kesät edesauttavat suon synnylle otollisten hydrologisten olosuhteiden muodostumista.

Aapasoille on ominaista lumen sulamisesta aiheutuvan tulvan kulkeutuminen suon läpi. Osa tulvavesistä pidättyy suolle jänteiden salpaamiin rimpisiin ja haihtuu niistä vähitellen kasvukauden kuluessa. Kevättulvat tuovat erityisesti aapasuolle ravinnetäydennystä ja estävät suoveden happamuuden nousua.

Koho- eli keidassuot ovat puolestaan riippuvaisia sadevedestä, koska ne ovat paksaturpeisia ja niiden keskiosa on ympäristöään korkeammalla. Niiden kasvillisuuteen eivät siten pääse vaikuttamaan ympäröivien valuma-alueiden ravinteikkaat vedet. Suonpinnan pienmuodot edistävät veden pidättymistä kuljuihin kohosuon keskiosiin. Kohosoiden kermiä ovat yleensä muodostuneet kohtisuoraan pääkaltevuutta vastaan. Kermiä hidastavat veden liikkeitä ja voivat jopa porrastaa suoalueen vedenpintaa (Sjors 1948, Päivänen 1968).

### Mitä suon vesi on?

Luonnontilaisella suolla pohjavedenpinnan taso (vedenpinta) on lähellä maanpinnan tasoa. Pohjavesi muodostuu sekä vapaasta vedestä, joka liikkuu maaperässä, että maaperän huokos- ja hiukkasrakenteeseen sitoutuneesta vedestä (Ivanov 1981). Pohjavedenpinta muodostaa vedellä kyllästyneen ja vedellä kyllästymättömän kerroksen rajapinnan maassa ja siinä hydrostaattinen paine on nolla. Syvemmälle mentäessä hydrostaattinen paine kasvaa. Pohjavedenpinnan yläpuolella hydrostaattinen paine puolestaan pienenee eli muuttuu negatiiviseksi, ja vesi pidättyy maan rakennehuokosiin.

Suon maavesivarasto ei ole vakio vaan vaihtelee vuodenajoin ja vuosittain vedenpinnan tason vaihdellessa. Maavesikerros kostuu ja kuivuu, jäätyy ja sulaa, ja sitä muokkaavat kasvillisuuden juuristo, maaperäeliöstö sekä ihmistoiminta.

## Turvemaan hydrologiset kerrokset

Hydrologisissa tarkasteluissa on katsottu, että erityisesti luonnontilaisilla kohosoilla voidaan erottaa kaksi ominaisuuksiltaan toisistaan poikkeavaa kerrosta: pintakerros akrotelma ja sen alla oleva katotelma. Näitä voidaan nimittää akrotelma-soiksi (Ivanov 1981, Ingram 1983). Seuraavassa kuvataan akrotelmasoiden keskeisiä piirteitä.

Akrotelman ominaispiirteitä on tehokas vedenvaihto toisaalta ilmakehän ja toisaalta ympäröivien alueiden maaperän kanssa. Akrotelman huokostila täyttyy aika-ajoin osittain ilmalla. Akrotelmalle on ominaista myös suuri vedenjohtavuus ja vedenluovutuskyky. Nämä ominaisuudet pienenevät siirryttäessä syvemmälle tiiviimpiin turvekerroksiin. Akrotelmassa on myös runsaasti happea kuluttavia bakteereita ja muita mikro-organismeja, mikä edistää orgaanisen aineen hajoamista ja muuttumista turpeeksi. Elävä kasvipeite muodostaa akrotelman pintakerroksen, joka on yleensä 10–20 cm paksu.

Katotelmassa turvekerroksen vesipitoisuus on puolestaan vakio tai vaihtelee vain vähän. Veden vaihto on myös hyvin hidasta alapuolisten tai ympäröivien kivennäismaiden kanssa. Akrotelmaan verrattuna katotelman vedenjohtavuus on pieni. Vedellä kyllästetyt olosuhteet ehkäisevät hapen pääsyä turpeen huokostilaan. Hapen puutteen takia happea vaativia mikrobeja ja mikro-organismeja ei esiinny, vaan kaikki hajotus on anaerobista eli hapetonta. Esimerkiksi metaania tuottavat metanotrofit ovat anaerobisissa oloissa viihtyviä organismeja.

Katotelman vesivarasto suurenee vain hitaasti turpeen kertymisen mukana. Kohosoilla katotelman heikko vedenjohtavuus ja akrotelman ohuus ja suhteellisen hyvä vedenjohtavuus edesauttavat osaltaan suoyhdistymän kehittymistä suurmuodoltaan kuperaksi, ja tämä kuperuus esiintyy myös vedenpinnan muodossa. Akrotelman yläosassa vedenjohtavuus voi olla jopa 200-kertainen katotelman yläosaan verrattuna. Syvempiin katotelman kerroksiin siirryttäessä ero voi kasvaa 1 000–10 000-kertaiseksi (Ingram ja Bragg 1984).

Akrotelman ja katotelman rajan katsotaan määräytyvän pitkähkön havaintokauden vedenpinnan alimman tason mukaan (Ingram 1983). Mikäli suosta puuttuu akrotelmakerros, suon sa-

notaan olevan haplotelminen eli yksikerroksinen (Ivanov 1981). Luonnontilainen suo voi muuttua haplotelmiseksi esimerkiksi, jos voimakas metsäpalo tuhoaa akrotelmakerroksen siten, että suonpinta, vedenpinta ja katotelman yläpinta ovat samalla tasolla (Semádeni-Davies 1996). Myös turvetuotannon päätyttyä suoksi ennallistettavan suonpohjan voidaan ajatella olevan vedenpinnan noston jälkeen aluksi haplotelminen, vaikka akrotelman aikaansaaminen onkin ennallistamisen tavoitteena (Price ym. 2003).

Käsitteistö luotiin aikoinaan selittämään hydrologisia olosuhteita erityisesti luonnontilaisilla kohosoilla. Akrotelma- ja katotelma-käsitteitä ei tulisikaan soveltaa ojitettujen soiden vesitalouden kuvaamiseen. Myöskään luonnontilaisille saraisille kasvupaikoille akrotelma–katotelma-jako ei sovi kovin hyvin. Niillä katotelma ei ole täysin hapeton, koska saramaiset kasvit ja järviruoko voivat kuljettaa tuuletussolukonsa avulla happea kerroksiin, jotka ovat pysyvästi vedenpinnan alapuolella.

## Säännöstelevätkö suot tulvia?

Luonnontilaiset suot muodostavat merkittävän vesivaraston valuma-alueelle. Turpeen tiheydestä riippuen soiden tilavuudesta 80–97 % on vettä. Suon vesivarasto on suuri, mutta vain pieni osa siitä on mukana veden vuotuisessa kierrossa (Eggelsmann ym. 1993). Suurin osa vedestä on varastoituneena suon katotelmaan verraten pitkäksi aikaa ja akrotelman ohuuden vuoksi suossa on vain vähän tilavuutta, johon tulvavedet voivat pidättyä (Burt 1995). Vesi liikkuu akrotelmassa kaltevuuden suunnassa pääosin pintakerros-valuntana (Evans ym. 1999). Suolta tapahtuviin ylivalumiin eli vuoden suurimpiin valumiin vaikuttavat siten lähinnä meteorologiset tekijät (lumen vesiarvo, ilman lämpötila, sulanta, sadanta), maan mahdollinen routaantuneisuus, turpeen ominaisuudet (mm. tiheyden ja makrohuokosten säätelemä vedenjohtavuus sekä vedenvirtausreittiverkostot) ja kasvillisuus puusto mukaan lukien (Starr ja Päivänen 1981).

Kun kohosuon vedenpinnantaso alenee turpeessa akrotelman ja katotelman rajalle, vesi joutuu liikkumaan katotelmassa. Vedellä kyllästyneessä katotelmassa vedenjohtavuus on kuitenkin



Kuva 1. Koho- eli keidassuon pinnanvaihtelua Ruoveden Siikanevalla. Kuivemmat vaaleat mätäs- eli kermipinnat erottuvat märemmistä tummemmista painanne- ja kuljupinnoista. Kohosuon on ombrotrofinen eli sen ekosysteemin hydrologia ja perustuotanto on kokonaan sade- ja lumensulamisvesien ja niiden mukana tulevien ravinteiden varassa. Kuva: Lentokuva Vallas Oy.

hyvin pieni ja veden liikkuminen hidastuu oleellisesti: veden virtaus suolta vähenee ja saattaa jopa lakata kokonaan. Valuntakynnyksellä ymmärrettään korkeusasemaa, jonka vedenpinnan on saavutettava, jotta vesi pääsisi poistumaan painovoiman vaikutuksesta suolta. Luonnontilaisella suolla valuntakynnys on korkea, eli lähellä maanpintaa. Kuivien jaksojen aikana valunta, eli pohjavalunta, on suhteellisen vähäistä (Baden ja Eggelsmann 1964, Uhden 1972) ja vettä poistuu tällöin suolta pääasiassa haihtumalla (Heikurainen 1976, 1980a, Boelter ja Verry 1977, Verry ym. 1988).

Aapasoilla virtaaman jatkuminen kuivina jaksoina eli alivalumakausina riippuu lähinnä suon ulkopuolelta tulevasta vesitäydennyksestä. Tärkeä merkitys on myös sillä, miten suuren osan suo muodostaa koko valuma-alueesta ja millä osalla valuma-alueella suo sijaitsee. Mitä pienempi suon pinta-ala on suhteessa yläpuoliseen valuma-alueeseen, sitä enemmän valuma-alueelta tuleva valunta säätelee suon läpi kulkeutuvaa vesimäärää.

Luonnontilaiset suot – erityisesti aapasuo-alueella – saattavat osaksi leikata valumahuippuja suoalueiden tasaisuuden ja ns. painannesäilynnän

vuoksi (Hyvärinen ja Vehviläinen 1981). Kuitenkin myös aapasoilla veden varastoitumistila saattaa lumensulamisen tai voimakkaan sateen vaikutuksesta täytyä nopeasti ja ylivalumat voivat muodostua suuriksi (Burt 1995). Tämän vuoksi suovaltaisillakin valuma-alueilla tulvien syntyyn vaikuttaa merkittävimmin lumen sulamisen nopeus ja ajankohdan sateisuus.

Vaikka soiden ominaisuuksilla voi olla suurikin merkitys valuntahuippujen ajoittumiseen ja ajalliseen kestoon, soiden vedenvarastointikyky ja tulvia vähentävä vaikutus ei kuitenkaan ole niin merkittävä, kuin mitä aiemmin arveltiin. Tässä mielessä ne eroavat esimerkiksi järvaltaista, joissa veden varastoitumistila on suurempi kuin saman muotoisissa ja kokoisissa suoaltaissa.

### Suon vesitase

Veden kiertokulku suossa muodostuu toisaalta suolle tulevasta vesimäärästä (sadanta ja valunta) ja toisaalta siitä poistuvasta vesimäärästä (valunta ja haihdunta) sekä havaintojakson aikana tapahtuneista muutoksista suon vesivarastossa.

Haihtumisprosessi voidaan jakaa kahteen osaan: Veden haihtumista tapahtuu suoraan maan, veden tai lumen ja kasvipeitteen pinnalta (pintahaihdunta) tai vesi kulkeutuu juuri–varsi–lehti -systeemin lävitse (kasvillisuushaihdunta). Kokonaishaihdunta koostuu pinta- ja kasvillisuushaihdunnasta. Potentiaalinen kokonaishaihdunta on suurin mahdollinen kokonaishaihdunta eli haihdunta silloin, kun haihduttavan pinnan kosteus on veden haihtumisen kannalta paras mahdollinen.

Haihdunta luonnontilaiselta suolta on lähes potentiaalisen kokonaishaihdunnan suuruinen, koska vedenpinnan taso on yleensä varsin lähellä suonpintaa. Kun vedenpinta on 0–10 cm syvyydellä, veden saatavuus ei rajoita haihtumista ja haihdunta riippuu ainoastaan säätekijöistä (Laine 1984, Verry 1997). Haihtuminen ja sen vaikutus edelleen vedenpinnan tasoon on voimakkainta kesäaikaan ja haihtuminen vaikuttaa merkittävästi koko kasvukauden keskimääräiseen vedenpinnan tasoon (Laine 1984, Valgma 1998). Ombrotrofisten eli pelkästään sadeveden varassa olevien kasvupaikkojen rakkasammalkasvustot haihduttavat jonkin verran vähemmän kuin minerotrofisten eli myös valuma-alueensa kivennäismailta ravinteita saavien kasvupaikkojen putkilokasvivaltaiset kasvustot (Ingram 1983). Vedenpinnan laskiessa ja suonpinnan kuivahtaessa rakkasammalkasvuston väri vaaleenee, jolloin albedo kasvaa ja haihtumiseen käytettävissä oleva energia vähenee. Kasvillisuus säätelee siten myös epäsuorasti omaa haihdutustaan.

Valunnalla tarkoitetaan valuma-alueelta pois valuvaa vesimäärää pinta-alayksikköä kohti. Valunta voidaan jakaa seuraaviin osiin: Pintavalunta on se osa sadannasta tai sulannasta, joka ei haihdu eikä imeydy maaperään, vaan kulkeutuu painovoiman vaikutuksesta pintavetenä suolle tai suolta pois. Pintakerrosvalunta on se osa vedestä, joka imeytyy maaperään ja kulkeutuu maan pintakerroksissa. Pohjavesivalunta muodostuu vedestä, joka suotautuu syvälle maaperään ja kulkeutuu pohjavesien kautta.

Kohosuot saavat pääosan vedestään sateesta. Talvisaikaan vettä poistuu suolta vain vähän, koska satava vesi kertyy lumipeitteeseen (Bay 1969, Verry ja Boelter 1972, Boelter ja Verry 1977, Verry 1997). Pääosa kohosuon vuotuisesta valunnasta purkautuu keväällä lumen sulamisen

yhteydessä tai lumettomana aikana voimakkaiden sateiden aikana. Kesällä valunta kohosuolta on usein pientä, koska otollisten haihtumisolojen vuoksi suurin osa sateena tulevasta vedestä haihtuu. Usein veden virtaus kohosuovaltaiselta valuma-alueelta tyrehtyykin keskikesällä tai myöhäistalvella pitkäksi aikaa.

Myös aapasuolta ja pohjavesiriippuvaiselta suolta valuu eniten vettä lumen sulamisen aikaan. Muun osan vuotta valunta on kuitenkin suhteellisen tasaista ja suurempaa kuin kohosuolta. Koska aapasuo saa vesitäydennystä ympäröiviltä alueilta, sieltä tuleva valunta on yleensä huomattavasti vakaampaa kuin kohosuolta tuleva valunta (Verry 1997).

### **Miten maaperän vesiolot vaikuttavat puustoon?**

Vesi on puille, kuten muillekin kasveille, välttämätön kasvutekijä. Toisaalta veden puute, toisaalta liiallinen märkyys seurausvaikutuksineen asettavat rajat puiden elintoiminnoille. Korkea vedenpinnantaso rajoittaa yleensä puuston kasvua ja kehitystä luonnontilaisilla soilla (Lukkala 1929, Laine ym. 2002). Seisovassa suovedessä happea on vähän tai vesi on lähes hapetonta. Hapen puute vahingoittaa useimpia puuvartisia kasveja: vaikutus näkyy juurten kasvun hidastumisena ja juurten kuolleisuuden lisääntymisenä, mikä puolestaan johtaa muun muassa puun säde- ja pituuskasvun hidastumiseen (esim. Kozłowski 1984).

Mitä syvemmillä kasvukauden keskimääräinen vedenpinta on, sitä suurempi on puuston määrä. Lisäksi puuston määrään vaikuttavat ravinteiden saatavuus ja veden liikkuvuus. Mikäli vesi on liikkuvaa ja ravinteikasta, puusto voi märälläkin suokasvupaikalla kasvaa verraten kookkaaksi (Laine ym. 2002). Myös ilmastotekijät, kuten lämpösumma vaikuttavat puuston määrään (Verry 1997).

Varsinkin rakkasammalvaltaisilla soilla rakkasammalen korkeuskasvulla ja vedenpinnan korkeudella on yhteys puiden kasvuun: Sammalkerroksen kasvaessa korkeutta ja kuolevan kasvimateriaalin kertyessä turpeeksi suon katotelman yläraja nousee vähitellen juuristokerroksen yläpuolelle. Tällöin puun kasvu hidastuu ja lopulta puu kuolee.



Kuva 2. Aapasuo on minerotrofinen eli suoekosysteemiä säätelevät sadevesien ohella ympäröiviltä kivennäismailta ja pohjamaasta tulevat ravinteikkaat vedet. Aapasuolle ominaista on vaihtelevan kokoiset kuivempien jänteiden rajaamat märät painanne- ja rimpipinnat, jotka salpaavat keväisin lumensulamisesiä. Tunturiaavan pintarakennetta Pyhätunturilla Pelkosenniellä. Kuva: Hannu Nousiainen.

Suopuiden juuret ovat yleisesti hyvin pinnallisia (Heikurainen 1955) ja suurin osa juurista on ojitetuillakin soilla alle 30 cm syvyydellä (Laiho & Finér 1996, Bhuiyan ym. 2017). Luonnontilaisen suon rämemännnyiltä puuttuu yleensä alaspäin kasvava pääjuuri – se on joko kuollut tai kääntynyt pinnanmyötäiseksi jo puuyksilön kehityksen ensi vuosina (Weber 1902).

Männyn pituuskasvu käynnistyy sitä myöhemmin, mitä lähempänä maanpintaa vedenpinnan taso on (Huikari ja Paarlahti 1967), ja kasvukauden jälkipuoliskolla lähellä maanpintaa oleva vedenpinta heikentää männyn kasvua (Pelkonen

1975, Päivänen 1984, Repo ym. 2016). Maanpäällisen biomassan kasvun heikkeneminen näyttäisi seuraavan erityisesti juurten toiminnan ja kasvun heikkenemistä, vedenoton vähenemistä ja juurten kuolemista (Kozłowski 1982, Wolken ym. 2011). Maan kyllästyminen vedellä aiheuttaa lehtien ilmarakojen sulkeutumisen, minkä seurauksena hiilidioksidin otto ja yhteyttäminen heikkenevät. Hapettomien olosuhteiden on havaittu haittaavan metsäpuistamme vähiten hieskoivun kasvua (Huikari 1954). Kaikkein tulvankestävimpiä puulajeja ovat pajut, kun taas kuusi sietää märkyyttä huonosti (Österlund 1979).

## Kuivatuksen vaikutus suon hydrologiaan

### Soiden ojitus Suomessa

Soiden kuivatustoiminta alkoi tarpeesta lisätä viljelysmaan alaa. Metsäojitus on kuitenkin Suomessa ollut pinta-alallisesti merkittävin soiden vesitaloutta muuttanut tekijä. Sekä maattä metsätaloudessa kuivatuksen tavoitteena on ollut saattaa maan vesiolot viljelykasvien tai puiden kasvun kannalta suotuisiksi alentamalla kasvukaudella vedenpinnan tasoa. Maataloudessa viljelysmaan ylimpien kerrosten vesivarastoa on pienennetty ja ilman täyttämää huokostilavuutta lisätty avo- ja salaojituksella. Metsätaloudessa ja turvetaloudessa on käytetty pääasiassa avo- ojitusta. Maataloudessa ja turvetaloudessa on myös pumpattu vettä pois suolta, jos veden poisjohtaminen painovoimaisesti ei ole ollut mahdollista. Metsäojituksissa veden poistaminen kuivatettavalta alueelta pumpaamalla on kuitenkin epätaloudellista. Siksi soita, joita ei ole kohtuullisin kustannuksin voitu ojituksella kuivattaa, on jäänyt maapohjan soveltuvuudesta huolimatta metsätaloudellisen käytön ulkopuolelle.

Maataloudessa viljelysmaan peruskuivatuksella tarkoitetaan maan kuivattamiseksi tarvittavaa luonnonuoman virtausolosuhteiden parantamista ja olemassa olevan valtaoijan perkausta. Peruskuivatuksella mahdollistetaan tarvittava paikallisojitus, ja toimenpiteeseen voi kuulua myös viljelysmaan tulvimisriskin pienentäminen tai poistaminen (Nissinen 2016). Metsätaloudessa ensiojitus, eli ojittamattomien soiden ojitus, on loppunut käytännössä kokonaan. Kuivatustoiminta suuntautuu olemassa olevan ojaverkoston ylläpitoon eli kunnostusojituksiin ja täydennysojituksiin. Tavoitteena on ehkäistä ojaverkoston rappeutumisesta aiheutuvaa kuivatuksen heikkenemistä ja sen seurauksena tapahtuvaa puiden kasvun heikkenemistä.

Suonpinnan taso alenee merkittävästi ensimmäisinä kuivatusta seuraavina vuosina. Aleneminen johtuu vedenpinnan yläpuolisen kerroksen tiivistymisestä ja painumisesta kasaan, kun huokoston aiemmin täyttäneen veden aikaansaama tuki katoaa. Turpeen painuminen voi etenkin märillä soilla, joilla se on suurinta, johtaa

ojien toimintakyvyn vähenemiseen ja turpeen vedenjohtavuuden pienemiseen. Myöhemmin suonpinnan tason alenemista aiheuttaa pintaturverroksen hajoaminen. Turvepelloilla ja turpeenkorjuualueilla maanpinnan tasoa alentavat myös tuulen ja veden aiheuttama eroosio (Berglund 2005). Metsäojitusalueilla pintakasvillisuus estää eroosion. Ojista tapahtuva eroosio voi kuitenkin olla merkittävää sekä turvepelloilla, metsäojitusalueilla että turvetuotantoalueilla. Turpeen korjuu alentaa suoalueen maanpinnan tasoa ja muuttaa oleellisesti alueen hydrologiaa.

Kuivatusnormiin eli tavoiteltuun kuivatussyvyteen vaikuttavat useat tekijät, kuten ilmasto, maanpinnan muodot, kasvualustan ominaisuudet ja puusto ja aluskasvillisuus sekä ojien syvyys ja niiden välinen etäisyys (esim. Meshechok 1969, Braekke 1978, 1983). Suometsissä kasvualustan vesitalouden vaikutus puuston kehitykseen riippuu oleellisesti puuston kehitysvaiheesta eli siitä tarkastellaanko vesioloja itävän siemenen, taimen, varttuneen kasvatusmetsikön vai uudistuskypsyyden saavuttaneen metsikön kannalta. Tutkimuksiin ja käytännön havaintoihin perustuen on katsottu, että metsänkasvatusta varten tulisi kasvukauden aikana saavuttaa keskimäärin 30–40 cm kuivatussyvyys eli vedenpinnan tason tulisi olla juuristokerroksen alapuolella (esim. Heikurainen 1964, Sarkkola ym. 2012).

### Ojasyvyyden merkitys ojitetun suon hydrologialle

Ojasyvyydellä ja sarkaleveydellä on suora vaikutus kuivatussyvyteen eli suonpinnan ja vedenpinnan keskimääräiseen etäisyyteen (Päivänen 1974, Hillman 1992, Laine 1986, Jutras ja Plamondon 2005). Kasvualustan ominaisuuksista erityisesti turpeen maatuneisuus ja jossain määrin myös turvelaji vaikuttavat turpeen vedenjohtavuuden kautta kuivatussyvyteen. Turvemaassa on yleisesti myös vettä johtavia makrohuokosia. Ne voivat olla puiden juurten synnyttämiä onkaloita tai esimerkiksi kuivumis-kostumis- tai sulamis-jäätymisprosessien aiheuttamia maarakenteen repeämiä. Ojiin valuvasta vedestä suuri osa voi kulkeutua tällaista reittiä, mutta tarkan osuuden mittaaminen on hankalaa (esim. Stenberg ym. 2015). Ojitukselta kuluvan ajan myötä myös

ojan kunnan muuttumisella (erosio, liettyminen, umpeenkasvu, metsän karikkeet) on vaikutusta kuivatussyvyuteen. Pienetkin virtaamaesteet nostavat vedenpinnan tasoa ojassa. Ojan kuivavara, eli keskimääräisen maanpinnan tason ja ojan vedenpinnan tason välinen erotus, on kuivatuksen kannalta olennaisempi tekijä kuin pelkkä ojasyvyys (Laine 1986).

Turpeen maatuneisuus kasvaa ojitusalueiden ikääntyessä ja turpeen hajoessa. Maatuminen pienentää turpeen vedenjohtavuutta ja kasvattaa vedenpidätyskykyä. Sadeveden suotautuminen syviin turvekerroksiin ja niiden kautta ojiin voikin pitkälle maatuneessa turpeessa olla vähäistä, ja suurin osa veden liikkeistä tapahtuu pintaturpeessa (Koivusalo ym. 2008). Silloin syvilläkin ojilla ei voida merkittävästi alentaa vedenpinnan tasoa (Nieminen ym. 2018). Esimerkiksi metsänuudistamisaloilla saatettaisiin päästä syvien ojien kaivamisen sijasta parempaan lopputulokseen ojitusmätästysojien tapaisilla, 10–15 m välein sijoitetuilla naveroilla, jotka johdattaisivat pintavedet tehokkaasti vanhaan ojaverkoston pois taimien lähiympäristöstä (Nieminen ym. 2018, ks. myös Päivänen 1974).

Pelloilla avo-ojat olivat aiemmin yleisiä, mutta nykyisin peltojen sarkaojat pyritään korvaamaan salaojilla ja yleensä vain suuret peltolohkoilta vesiä kokoavat valtaojat sekä ulkopuolisten vesien pellolle pääsyä rajoittavat piiriojat ovat avo-ojia. Turvemaapelloilla tavoiteltu kuivatussyvyys riippuu viljelyskasvin ohella vuodenajasta ja viljelytoimista (Berglund 1995). Keväällä vedenpinnan tulisi olla syvällä (> 1 m), jotta maa kantaa koneita. Kylvön jälkeen veden haihtuminen maasta on suurta ja on katsottu, että vedenpinnan tulisi olla saraturpeissa 40–50 cm ja rahkaturpeissa sekä tiivistyneessä saraturpeessa jopa yli 60–70 cm etäisyydellä maanpinnasta, jotta maan tuulettuminen olisi juurten hapensaannille riittävää (Berglund 1995). Sadonkorjuun aikana vedenpinnan tulisi olla vieläkin syvemmällä riittävän kantavuuden saavuttamiseksi. Turvemaapelloilla ojasyvyysuusitus on 1,2 m ja ojaväli 8–14 m (Virtanen ja Vakkilainen 2017) eli ojat hieman syvempiä kuin ”perinteinen” suositeltu ojasyvyys metsäojituksissa (80–90 cm). Nurmenviljelyssä muokkauskerroksen vesipitoisuus pitäisi saada alennettua 60–70 %:iin tilavuudesta ja viljanvil-

jelyssä vieläkin kuivemmaksi (Peltomaa 2016).

Ajan mittaan sekä avo- että valtaojien vedenkuljetuskyky heikkenee niiden kunnan rappeutuessa, jolloin kuivatusverkosto on kunnostettava pellon vettymisen ehkäisemiseksi. Yleisimmät syyt salaojien heikkoon toimivuuteen taas ovat valtaojien mataloituminen ja turpeen painumisen johdosta tapahtuva salaojaputkien ”nousu” liian lähelle maanpintaa, mutta myös putkien tukkeutumis- ja rikkoutumisriskit sekä putkien reikiä tukkivien rautasaostumien esiintyminen lisääntyä ajan myötä (Salaojayhdistys 2015). Turpeen painumisen lisäksi heikko vedenjohtavuus on erityisesti maatuneissa turpeissa heikentänyt salaojien toimivuutta (Niini 1988). Aikanaan paljon käytetyllä kivennäismaalisäykselläkin eli painomaalla ei ole voitu parantaa sara- ja rahkaturpeiden vedenjohtavuutta (Myllys 1998). Salaojitetun pellon kuivatusta voidaan korjata täydennysojituksella, tai mikäli vanha ojaverkosto on toimimaton, joudutaan turvautumaan uusinta- ojitukseen (Salaojayhdistys 2015).

Turpeennostoalueilla vedenpinta pyritään laskemaan niin alas, että kasvipeitteön turvepinta kantaa koneita ja korjattava turve kuivuu ongelmitta. Vettä johdetaan pois turvekentältä käyttäen avosarkaojia, joista vedet johdetaan suurempiin kokooja- ja laskuojiin. Turpeennostoalueet erotetaan ympäröivistä alueista ja niiltä tulevista vesistä piiri- eli eristysojin, jotka voivat olla hyvin syviäkin (Väyrynen ym. 2008).

### Sarkaleveyden merkitys ojitetun suon hydrologialle

Ojan vedenpintaa alentava vaikutus ulottuu vain rajallisen matkan päähän ojasta. Ellei kyse ole vain kapeasta suojuotista, yksi oja ei riitä koko suon riittävään kuivatukseen, vaan tarvitaan useampia oja. Siksi ojitusalueiden ojat on kaivettu ojaverkostoiksi, joissa sarkaojat johtavat vesiä valitun ojakaltevuuden mukaan samansuuntaisesti. Ojien välistä etäisyyttä kutsutaan sarkaleveydeksi tai ojaväliksi, joista jälkimmäistä käytetään etenkin salaojituksesta puhuttaessa.

Ojien vaikutus vedenpinnan tasoon on suurimmillaan aivan ojan lähellä ja vaikutus vähenee saran keskustaa kohti siirryttäessä. Mitä kapeampi sarka, sitä syvemmälle keskimääräinen



Kuva 3. Suovaluma-alueelta tulevaa valuntaa ja vedenlaatua voidaan seurata mittapadoilta, kuten kuvan putkipadolta, jonka päästä voidaan mitata valuntaa esimerkiksi astialla ja kellottamalla sekä ottaa vesinäytteitä, joiden ainepitoisuudet analysoidaan laboratoriossa. Valuntamittauksia voidaan myös automatisoida. Putkipatoa käytetään myös käytännön suometsätaloudessa ns. virtaamansäätörakenteena, jossa yläpuolisen ojaverkoston vesien virtaamaa voidaan hillitä sekä sen tyhjentymistä hidastaa ylivirtaamaaikoina. Kuva: Sakari Sarkkola.

vedenpinnan taso saralla asettuu (Päivänen 1974, Hillman 1992, Jutras ja Plamondon 2005, Haahti ym. 2012). Saran poikkileikkauksessa vedenpinnan tason muoto on siten kupera, mutta kuperuuden voimakkuus voi vaihdella voimakkaasti vuoden eri ajankohtina. Myös sääolot ja puustoisuus vaikuttavat vedenpinnan tasoon (Ahti 1980, Leppä ym. 2020).

Sarkaleveyden vaikutusta puuston kasvuun tutkittiin aikoinaan aktiivisesti ja pyrittiin löytämään puuston tuotoksen kannalta paras sarkale-

veys (Keltikangas 1971, Seppälä 1972). Käytettävään sarkaleveyteen vaikuttavat monet tekijät, kuten suurilmasto, kasvupaikka, puuston määrä ja maanpinnan kaltevuus. Mitä kosteampi (pohjoisempi) ilmasto, karumpi kasvupaikka, vähäisempi puusto ja tasaisempi alue, sitä kapeampaa sarkaa pitää käyttää suurimman kasvuvaiikutuksen saamiseksi. Toisaalta taloudellisista syistä esimerkiksi karuilla ja niukkapuustoisilla soilla sarkaleveyden kasvattaminen on perusteltua. Taloudellisesti optimaalinen sarkaleveys onkin puuston kasvun maksimoivaa sarkaleveyttä suurempi. Taloudellinen optimi saavutetaan karuilla soilla yli 60 m:n sarkaleveydellä ja tasaisilla korpisoilla ja keskivänteisillä rämeillä noin 35 m:n sarkaleveydellä (Keltikangas 1971).

Koska ensiojituksia metsänkasvatusta varten ei enää tehdä ja kunnostusojituksissa keskitytään tarpeellisiksi katsottaviin vanhojen ojien perkauksiin, sarkaleveystarkastelut liittyvät nykyään lähinnä puunkorjuun suunnitteluun ja toteutukseen. Jos sarkaleveys on huomattavan suuri, täydennysojan kaivu saran keskelle voi riittävän kuivatuksen aikaansaamiseksi olla perusteltua. Pääosin Suomen ojitusalueiden sarkaleveydet ovat 30 ja 50 m välillä ja keskimäärin noin 35 m.

Viljelysmailla salaojilla saavutettavaan kuivatussyvyyteen vaikuttavat ojavälin ohella monet muutkin tekijät, kuten putkimateriaali, kaivannon täyttö ja salaojan mahdollinen tukkeutuminen. Käytetty ojaväli on aikojen saatossa pienentynyt, koska turpeen jatkuva maatumisen on vaatinut kuivatuksen tehostamista (Peltomaa 2016). Nykyisin salaojitetuilla turvellidoilla käytetään 8–14 m ojaväliä (Virtanen ja Vakkilainen 2017).

### **Miten puusto ja aluskasvillisuus vaikuttavat kuivatuksen?**

Puusto ja pintakasvillisuus haihduttavat vettä ja vaikuttavat siten vedenpinnan tasoon ojitusalueella (Laine 1984). Haihdunta riippuu puuston ja pintakasvillisuuden sadevettä pidättävästä ja aktiivisesti yhteyttävästä lehtipinta-alasta. Puuston aikaansaama haihdunta on suorassa suhteessa rungon mantopuualaan ja edelleen puuston tilavuuteen ja puuston haihdunnalla (ml. latvuspidäntä) on hallitseva merkitys suometsän vedenkierrossa (Sarkkola ym. 2013, Kozii ym.



2020). Mitä suurempi puuston tilavuus on, sitä syvemmälle vedenpinnan taso asettuu (Hökkä ym. 2008, Sarkkola ym. 2010). Puuston haihduttava vaikutus ulottuu enimmillään 50–60 cm syvyydelle (Sarkkola ym. 2020). Toisaalta myös kesäkauden sademäärällä on huomattava vaikutus vedenpinnan tasoon. Poikkeuksellisen sateisina kesinä vedenpinta on lähellä maanpintaa runsaspuustoisissakin metsiköissä, kun taas kuivina kesinä vedenpinta voi painua yli 40 cm:n syvyyteen vähäpuustoisissakin metsiköissä (esim. Leppä ym. 2020a). Vedenpinnan tason ollessa alle 50–60 cm etäisyydellä maanpinnasta,  $10 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ :n lisäys puuston tilavuudessa laskee vedenpintaa keskimäärin yhden senttimetrin (Sarkkola ym. 2010).

Etelä- ja Länsi-Suomen olosuhteissa yli  $100 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ :n puuston haihdunta voi jopa ylittää sadannan etenkin loppukesällä (Sarkkola ym. 2013). Sen sijaan Pohjois-Suomessa haihdunta on järeissäkin puustoissa pienempää ja vielä  $100 \text{ m}^3$ :n puustossa haihdunta voi jäädä puoleen sadannasta. Puuston häiriöttömän kasvun kannalta vedenpinnan taso voi nousta pohjoisessa liian korkealle etenkin kasvukauden alku- ja loppupuolella (Sarkkola ym. 2013). Suurin vaikutus puuston ja muun kasvillisuuden haihduttavalla vaikutuksella vedenpinnan tasoon on loppukesällä heinä-elokuussa, jolloin myös riittävä kuivatus on tärkeää puuston kasvulle (esim. Pelkonen 1975, Päivänen 1984, Leppä ym. 2020a, b).

Mikäli normaalikuntoista puustoa on Etelä-Suomessa yli  $120 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$  ja Pohjois-Suomessa yli  $150 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ , puuston haihdutuksen on arvioitu riittävän ylläpitämään kuivatustilaa silloinkin, kun ojasto on huonossa kunnossa (Sarkkola ym. 2010). Raja-arvoja sovellettaessa tulee ottaa huomioon, että puuston määrän tulee olla riittävä myös mahdollisten suunnitteilla olevien hakkuiden jälkeenkin. Nämä puustorajat on nykyisin otettu muun muassa kunnostusojitusten sovellusohjeisiin.

Kuivatusta ei aina ole mahdollista jättää pelkästään puuston varaan. Ojien kunto on tärkeää puustosta riippumatta erityisesti, jos ojia pitkin johdetaan yläpuoliselta valuma-alueelta tulevia vesiä tai, jos yläpuoliselta valuma-alueelta purkautuu ojitusalueelle runsaasti vettä pintakerros- tai pohjavesivaluntana.

Aiemmin on arvioitu, että Suomen ilmasto-oloissa puustoiset ojitusalueet eivät koskaan kuivuisi niin kuiviksi, että kuivuus heikentäisi varttuneen puuston kasvua (esim. Päivänen 1973b). Taustalla on oletus siitä, että vedenpinnan taso laskee harvoin niin alas, että turpeen kapillaariyhteydet eivät riittäisi kuljettamaan puille vettä syvemmistä turvekerroksista. Pintaturpeen liiallinen kuivuminen voi kuitenkin vaikeuttaa taimettumista ja taimien varhaiskehitystä varsinkin vanhoilla karujen rämeiden ojitusalueilla, joilla on herkästi kuivuva kangashumuskerros pintaturpeen päällä (Saarinen 2013). Myös väärin toteutettu maanmuokkaus voi aiheuttaa viljelykohdan liiallista kuivumista. Tällaisia ovat esimerkiksi tapaukset, joissa mättäät on tehty liian ”löysiksi” tai ne on tehty humuskerroksen päälle, jolloin mättääseen ei muodostu riittävästi veden kapillaariyhteyksiä syvemmistä kosteista turvekerroksista.

Toisaalta myös varttuneissakin metsiköissä vedenpinta voi laskea liian syvälle (Schwartzel ym. 2006). Huikari ja Paarlahti (1967) havaitsivat, että Vilppulassa karuhkon lannoitetun rämeen puuston sädekasvu oli suurimmillaan, kun vedenpinnan taso oli 30–50 cm syvyydessä ja sen aleneminen 70 cm syvyyteen vähensi puiden kasvua. Myös ojitusalueen männyissä yhteytyksen on havaittu vähentyneen pitkän kuivan kauden aikana (Minkkinen ym. 2018).

### Metsäojituksen vaikutus suon hydrologiaan

Metsäojitus vaikuttaa niin metsikön, ojitusalueen kuin valuma-alueenkin hydrologiaan. Ojitettu suo muodostaa yleensä vain osan valuma-alueen pinta-alasta. Havaittavat hydrologiset vaikutukset riippuvat oleellisesti valuma-alueen koosta, muodosta ja siitä, mitä eri maankäyttömuotoja valuma-alueella on. Lisäksi merkitystä on sillä, missä kohdin valuma-aluetta ojitettu alue sijaitsee suhteessa mittauskohtaan. Suurimmat hydrologiset vaikutukset havaitaan itse ojitusalueella ja pienillä valuma-alueilla.

Ojituksen, olipa kyseessä ensiojitus tai kunnostusojitus, välitön vaikutus liittyy valuntakynnyksen alentamiseen, mikä mahdollistaa valunnan nopeutumisen ja vedenpinnan tason alenemisen. Vedenpinnan tason aleneminen

tarkoittaa turpeeseen varastoituneen vesimäärän vähenemistä ja sen seurauksena pintaturpeen ilmatilan kasvua.

Heti ojituksen jälkeen valunta ojitusalueelta kasvaa pintaturpeen vesivaraston tyhjentymisen ja pintahaidunnan vähenemisen myötä. Myös kasvillisuushaidunta aluksi pienenee suokasvillisuuden tuhoutumisen myötä. On arvioitu, että vuosivalunta valuma-alueelta lisääntyy ensimmäisten 10 vuoden aikana keskimäärin 0,3–0,6 % valuma-alueen ojitusprosenttia kohden (Nieminen ja Ahti 2000).

Ylivalumat ja vuosivalunta palautuvat ojitusta edeltävälle tasolle 10–20 vuoden kuluessa ojituksesta (Seuna 1980). Ojituksella alennettu valuntakynnys aikaansaa alivalumien säilymisen luonnontilaista suota suurempina ojien kunnon vähittäisestä heikkenemisestä huolimatta (Meriö ym. 2019). Kunnostusojitukset voivat alentaa valuntakynnystä entisestään, jos ojat ylettyvät syvemmälle kuin ensiojituksessa. Muutoin kunnostusojituksen vaikutukset valuntaan ovat pieniä (Nieminen ym. 2018). Kunnostusojitus alentaa vedenpinnan tasoa saralla keskimäärin 5–10 cm (Ahti ja Päivänen 1997).

Ojituksen välittömänä seurauksena valantahuiput usein kasvavat, joskin vaihtelua on paljon riippuen ojitusalueen ominaisuuksista ja sääolosuhteista. Turpeen kasvanut vesivarastokapasiteetti lisää sadevesien pidättymiseen käytettävissä olevaa varastoitumistilaa. Toisaalta ojaverkosto mahdollistaa sade- ja lumensulamisesien nopean purkautumisen suoalueelta ja estää painannesäilyntää, jolloin sekä ylivalumat voivat kasvaa (Mustonen ja Seuna 1971, Ahti 1980) että ne voivat muodostua huipukkaammiksi (Seuna 1986, 1988). Jos talvi on vähäluminen ja kevätsadanta pieni, ojitusalueelta purkautuva vesimäärä voi olla pienempi kuin luonnontilaisilta soilta; päinvastaisessa tilanteessa ojitusalueelta taas voi valua enemmän vesiä (Heikurainen 1976, Lundin 1999). Puuston määrän lisääntyessä kevävalunta pienenee, koska puiden latvukset keräävät merkittävän osan lumesta, joka sublimoituu ilmaan suoraan oksilta (Koivusalo ym. 2008). Lisäksi maanpinnalle sataneen lumen keskimääräinen sulamisnopeus hidastuu, jolloin puustoiset ojitusalueet tasaavat kevättulvahuippuja (Nieminen ja Ahti 2000). Puuston haihduttavan vaikutuksen

lisääntyminen puolestaan vähentää kesällä ali-valumia.

Ojitusalueen sijainti valuma-alueella vaikuttaa myös valantahuippuihin: jos ojitusalue sijaitsee valuma-alueen alajuoksulla, ylivalumahuippu on pienempi kuin vastaavalla luonnontilaisella suovaltaisella valuma-alueella. Samalla ylivaluman kesto kuitenkin pitenee. Sen sijaan valuma-alueen yläjuoksulla tehty ojitus sekä suurentaa valumahuippuja että lyhentää niiden kestoa (Mustonen ja Seuna 1971).

### **Metsänkäsittelytoimenpiteiden vaikutus ojitusalueiden hydrologiaan**

Koska varttuneessa ojitusaluemetsässä puuston ja aluskasvillisuuden haihdunta on merkittävin vesitaseeseen vaikuttava tekijä, haihduntakapasiteettiin kohdistuvat muutokset – esimerkiksi hakkuut – vaikuttavat myös vedenpinnan tasoon ja valuntaan. Hakkuiden seurauksena maahan pääsevä osa sadannasta kasvaa latvuspäidännän vähetessä. Varttuneissa suopuustoissa päidännän osuus vapaasta sadannasta voi olla 20–35 % (Päivänen 1966, Heikurainen 1970). Myös lumipeitteen paksuus ja vesi-arvo lisääntyvät sitä enemmän, mitä voimakkaampi hakkuu on (mm. Päivänen 1973a).

Hakkuut nostavat vedenpinnan tasoa suhteessa poistettuun puumäärään. Maan vesivarasto kasvaa, mikä johtuu kasvillisuuspäidännän ja -haihdunnan vähenemisestä (Päivänen 1982, Sarkkola ym. 2013, Leppä ym. 2020a,b). Vaikutus vedenpinnan tasoon on suurin ensimmäisinä hakkuista seuraavina vuosina ennen kuin aluskasvillisuuden ja puuston haihdutuskapasiteetti palautuu (Leppä ym. 2020a, b).

Avohakkuun jälkeen vedenpinnan tason on todettu kasvukaudella nousevan puuston määrästä ja turpeen ominaisuuksista riippuen 15–22 cm (Päivänen 1982, Jutras ja Plamondon 2005, Sarkkola ym. 2013, Leppä ym. 2020a). Mikäli kasvualustan turve on maaton eli turpeen huokostilavuus on pieni, vedenpinta nousee hakkuun jälkeen enemmän kuin heikosti maatonneissa turpeissa.

Hakkuiden aiheuttama valunnan lisäys kohdistuu suurimmaksi osaksi kevätaikaiseen valuntaan, varsinkin jos maa on roudassa. Myös kesä-

aikaiset valunnat saattavat kasvaa. Koko puuston poisto voi yli kaksinkertaistaa vuosivalunnan. Valuma-alueen osittaisen avohakkuun (puolet pinta-alasta) on puolestaan havaittu lisäävän kevävaluntaa kolmasosan ja vuosivaluntaa viidesosan (Seuna 1988). Valunnan lisäys pienenee hakkuun jälkeen vähitellen aluskasvillisuuden ja puuston haihduttavan vaikutuksen kasvaessa.

Metsän lannoitus, kuten tuhkalannoitus, lisää puuston haihdutuskapasiteettia jo muutamassa vuodessa, koska kasvainten pituus ja neulasten koko sekä neulasvuosikertojen määrä kasvavat lannoituksen jälkeen. Pitkällä aikavälillä kasvun kiihtyminen lisää edelleen puuston haihdutuskapasiteettia (Ernfors ym. 2010). Kasvaneen haihdunnan myötä vedenpinnan taso alenee ja valunta vähenee.

*Kommentoineet:* Hannu Marttila; Hannu Hökkä, Sakari Rehell, Pirkko Kortelainen, Tiina M. Nieminen, Juha-Pekka Hotanen, Tuija Mattsson

## Kirjallisuus

- Ahti, E. 1980. Ditch spacing experiments in estimating the effects of peatland drainage on summer runoff. Teoksessa: The influence of man on the hydrological regime with special reference to representative and experimental basins. Proceedings of the Helsinki Symposium, 23–26 June 1980. IAHS-AISH Publication 130: 49–53.
- Ahti, E. & Päivänen, J. 1997. Response of stand growth and water table level to maintenance of ditch networks within forest drainage areas. Teoksessa: Trettin, C., Jurgensen, M., Grigal, D., Gale, M. & Jeglum, J. (toim.) Northern Forested Wetlands: Ecology and Management, CRC Press, Lewis Publishers. s. 449–457.
- Baden, W. & Eggelsmann, R. 1964. Der Wasserkreislauf eines nordwestdeutschen Hochmoores. Schriftenreichen Kuratoriums Kulturbauwesen 12: 1–156.
- Bay, R.R. 1969. Runoff from small peatland watersheds. Journal of Hydrology 9: 90–102. saatavissa: [https://doi.org/10.1016/0022-1694\(69\)90016-X](https://doi.org/10.1016/0022-1694(69)90016-X)
- Berglund, K. 1995. Optimal drainage depth of five cultivated organic soils. Swedish Journal of Agricultural Research 25(4): 185–196.
- Berglund, K. 2005. Torvmarken, en resurs i det svenska jordbruket även i morgon? Teoksessa: Pertti Vakkilainen 60. Salaojituksen Tukisäätiö. WSBookwell Oy, Porvoo. s. 58–65.
- Bhuiyan, R., Minkkinen, K., Helmisaari, H.-S., Ojanen, P., Penttilä, T. & Laiho, R. 2017. Estimating fine-root production by tree species and understorey functional groups in two contrasting peatland forests. Plant and Soil 412: 299–316. Saatavissa: <https://doi.org/10.1007/s11104-016-3070-3>
- Boelter, D. H. & Verry, E. S. 1977. Peatland and water in the northern Lake States. General. St. Paul, MN: U.S. Dept. of Agriculture, Forest Service, North Central Forest Experiment Station. Technical Report NC-31: 1–22.
- Braekke, F.H. 1978. Afforestation on peatland in Norway. Proceedings of the IPS-symposium, International Peat Society, Brumunddal, Norway. s. 73–96.
- Braekke, F.H. 1983. Water table levels at different drainage intensities on deep peat in northern Norway. Forest Ecology and Management 5: 169–192. Saatavissa: [https://doi.org/10.1016/0378-1127\(83\)90070-1](https://doi.org/10.1016/0378-1127(83)90070-1)
- Burt, T.P. 1995. The role of wetlands in runoff generation from headwater catchments. Teoksessa: Hughes, J. & Heathwaite, L. (toim.). Hydrology and hydrochemistry of British wetlands. John Wiley & Sons Ltd. s. 21–38.
- Eggelsmann, R. 1973. Dränanleitung. Verlag Wasser und Boden Axel Lindow & Co. Hamburg. 304 s.
- Ernfors, M., Sixtröm, U., Nilsson, M. & Klemmedtson, L. 2010. Effects of wood ash fertilization on forest floor greenhouse gas emissions and tree growth in nutrient poor drained peatland forests. Science of Total Environment 408(20): 4580–4590. Saatavissa: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2010.06.024>
- Evans, M. G., Burt, T.P., Holden, J. & Adamson, J.K. 1999. Runoff generation and water table fluctuations in blanket peat: Evidence from UK data spanning the dry summer of 1995. Journal of Hydrology 221: 141–160. Saatavissa: [https://doi.org/10.1016/S0022-1694\(99\)00085-2](https://doi.org/10.1016/S0022-1694(99)00085-2)
- Hahti, K., Koivusalo, H., Hökkä, H., Nieminen,

- M., & Sarkkola, S. 2012. Vedenpinnan syvyyden spatiaaliseen vaihteluun vaikuttavat tekijät ojitetussa suometsikössä Pohjois-Suomessa. *Suo* 63: 107–121. Saatavissa: <http://www.suo.fi/article/9883>
- Heikurainen, L. 1955. Rämemännikön juuriston rakenne ja kuivatuksen vaikutus siihen. *Acta Forestalia Fennica* 65(3): 7466. Saatavissa: <https://doi.org/10.14214/aff.7466>
- Heikurainen, L. 1964. Suotyypien metsäojituskelpoisuus metsänkasvatusta silmällä pitäen. Kirjayhtymä, Helsinki. 47 s.
- Heikurainen, L. 1976. Comparison between runoff conditions on a virgin peatland and a forest drainage area. *Proceedings of the 5th International Peat Congress, Poznan, Poland*, 1: 76–86.
- Heikurainen, L. 1980. Effect of forest drainage on high discharge. Teoksessa: *The influence of man on the hydrological regime with special reference to representative and experimental basins. Proceedings of the Helsinki Symposium, 23–26 June 1980. IAHS-AISH Publication* 130: 89–96.
- Heikurainen, L. 1970. The effect of thinning, clear cutting, and fertilization on the hydrology of peatland drained for forestry. *Acta Forestalia Fennica* 104: 7538. 23 s. Saatavissa: <https://doi.org/10.14214/aff.7538>
- Hillman, G.R. 1992. Some hydrological effects of peatland drainage in Alberta's boreal forest. *Canadian Journal of Forest Research* 22: 1588–1596. Saatavissa: <https://doi.org/10.1139/x92-211>
- Holden, J. & Burt, T.P. 2003. Hydrological studies on blanket peat: the significance of the acrotelm-catotelm model. *Journal of Ecology* 91: 86–102. Saatavissa: <https://doi.org/10.1046/j.1365-2745.2003.00748.x>
- Huikari, O. 1954. Experiments on the effect of anaerobic media upon birch, pine and spruce seedlings. *Communicationes Instituti Forestalis Fenniae* 42(5): 1–13. Saatavissa: <http://urn.fi/URN:NBN:fi-metla-201207171074>
- Huikari, O. & Paarlahti, K. 1967. Results of field experiments on the ecology of pine, spruce, and birch. *Communicationes Instituti Forestalis Fenniae* 64(1): 1–135. Saatavissa: <http://urn.fi/URN:NBN:fi-metla-201207171096>
- Hyvärinen, V. & Vehviläinen, B. 1981. The effects of climatic fluctuations and man on discharge in Finnish river basins. *Vesientutkimuslaitoksen julkaisuja* 43: 15–23. Saatavissa: <http://hdl.handle.net/10138/31183>
- Hökkä, H., Koivusalo, H., Ahti, E., Nieminen, M., Laine, J., Saarinen, M., Laurén, A., Alm, J., Nikinmaa, E., Klöve, B. & Marttila, H. 2008. Effects of tree stand transpiration and interception on site water balance in drained peatlands: experimental design and measurements. Teoksessa: Farrell, C. & Feehan, J. (toim.). *After Wise Use – The Future of Peatlands. Proceedings of the 13th International Peat Congress, Tullamore, Ireland 8–13 June 2008. Volume 2, Poster presentations. International Peat Society.* s. 169–171.
- Ingram, H.A.P. 1983. Hydrology. Teoksessa: Gore, A. J. P. (toim.). *Ecosystems of the World 4A, Mires: Swamp, Bog, Fen and Moor, Elsevier, Amsterdam.* s. 67–158.
- Ingram, H.A.P. & Bragg, O.M. 1984. The diplotelmic mire: some hydrological consequences reviewed. *Proceedings of the seventh International Peat Congress, Dublin. International Peat Society, Dublin.* s. 220–234.
- Ivanov, K.E. 1981. *Water movement in mirelands.* Academic Press, London. 276 s.
- Jutras, S. & Plamondon, A.P. 2005. Water-table rise after harvesting in a treed fen previously drained for forestry. *Suo* 56(3): 95–100. Saatavissa: <http://www.suo.fi/pdf/article9840.pdf>
- Keltikangas, M. 1971. Sarkkaleveyden vaikutus ojitusinvestoinnin taloudelliseen tulokseen. *Acta Forestalia Fennica* 123: 1–70. Saatavissa: <http://hdl.handle.net/1975/8444>
- Koivusalo, H., Ahti, E., Laurén, A., Kokkonen, T., Karvonen, T., Nevalainen, R. & Finér, L. 2008. Impacts of ditch cleaning on hydrological processes in a drained peatland forest. *Hydrology and Earth System Sciences*, 12, 1211–1227. doi: 10.5194/hess-12-1211-2008
- Korkiakoski, M., Tuovinen, J.-P., Penttilä, T., Sarkkola, S., Ojanen, P., Minkkinen, K., Rainne, J., Laurila, T. & Lohila, A. 2019. Greenhouse gas and energy fluxes in a boreal peatland forest after clear-cutting. *Biogeosciences* 16: 3703–3723. Saatavissa: <https://doi.org/10.5194/bg-16-3703-2019>
- Kozii, N., Haahti, K., Tor-ngern, P., Chi, J., Hasselquist, E. M., Laudon, H., Launiainen,

- S., Oren, R., Peichl, M., Wallerman, J., Haselquist, N. J. 2020. Partitioning growing season water balance within a forested boreal catchment using sap flux, eddy covariance, and a process-based model. *Hydrology and Earth System Sciences* 24: 2999–3014. Saatavissa: <https://doi.org/10.5194/hess-24-2999-2020>
- Kozłowski, T.T. 1982. Water supply and tree growth. Part II. Flooding. *Forest Abstracts* 43: 145–161.
- Kozłowski, T.T. 1984. Plant responses to soil flooding. *BioScience* 34: 162–167. Saatavissa: <https://doi.org/10.2307/1309751>
- Laiho, R. & Finér, L. 1996. Changes in root biomass after waterlevel drawdown on pine mires in southern Finland. *Scandinavian Journal of Forest Research* 11: 251–260. Saatavissa: <https://doi.org/10.1080/02827589609382934>
- Laine, J. 1984. Estimation of evapotranspiration from peatlands by means of daily water table hydrographs. *Publications from the Department of Peatland Forestry, University of Helsinki* 5: 1–100.
- Laine, J. 1986. Kuivatustekniikan, kuivatussyvyyden ja puuston kasvun välisiä vuorosuhteita 25 vuotta vanhoilla rämeojitusalueilla. Tutkimusopimushankkeen ”Metsäojitettuja soiden ekologia” loppuraportti. Helsinki. 49 s.
- Laine, J., Komulainen, V.-M., Laiho, R., Minkkinen, K., Rasinmäki, A., Sallantausta, T., Sarkkola, S., Silvan, N., Tolonen, K., Tuittila, E.-S., Vasander, H., & Päivänen, J. 2002. Lakkasuo – opas suon ekosysteemiin. Helsingin yliopiston metsäekologian laitoksen julkaisuja 26: 1–120.
- Leppä, K., Korhikoski, M., Nieminen, M., Laiho, R., Hotanen, J.-P., Kieloaho, A.-J., Korpela, L., Laurila, T., Lohila, A. K., Minkkinen, K., Mäkipää, R., Ojanen, P., Pearson, M., Penttilä, T., Tuovinen, J.-P., & Launiainen, S. 2020a. Vegetation controls of water and energy balance of a drained peatland forest: Responses to alternative harvesting practices. *Agricultural and Forest Meteorology* 295: 108198. Saatavissa: <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2020.108198>
- Leppä, K., Hökkä, H., Laiho, R., Launiainen, S., Lehtonen, A., Mäkipää, R., Peltoniemi, M., Saarinen, M., Sarkkola, S. & Nieminen, M. 2020b. Selection cuttings as a tool to control water table level in boreal drained peatland forests. *Frontiers in Earth Science* 8: 576510. Saatavissa: <https://doi.org/10.3389/feart.2020.576510>
- Lukkala, O. J. 1929. Tutkimuksia soiden metsätaloudellisesta ojituskelpoisuudesta erityisesti kuivatuksen tehokkuutta silmällä pitäen. *Metsätieteellisen tutkimuslaitoksen julkaisuja* 15: 1–278. Saatavissa: <http://urn.fi/URN:NBN:fi-metla-201207171048>
- Lundin, L. 1999. Effects on hydrology and surface water chemistry of regeneration cuttings in peatland forests. *International Peat Journal* 9: 118–126.
- Meriö, L.-H., Ala-aho, P., Linjama, J., Hjort, J., Kløve, B., & Marttila, H. 2019. Snow to precipitation ratio controls catchment storage and summer flows in boreal headwater catchments. *Water Resources Research* 55(5): 4096–4109. Saatavissa: <https://doi.org/10.1029/2018WR023031>
- Meshechok, B. 1969. Tørrlegging av myr ved ulik grøfteavstand og grøftedybde. Summary: Drainage of swamps at different ditch distances and ditch depths. *Meddelser fra det Norske Skosforsøksvesen* 98 (27): 227–294.
- Minkkinen, K., Ojanen, P., Penttilä, T., Aurela, M., Laurila, T., Tuovinen, J.-P. & Lohila, A. 2018. Persistent carbon sink at a boreal drained bog forest. *Biogeosciences* 11: 3603–3624. Saatavissa: <https://doi.org/10.5194/bg-15-3603-2018>
- Mustonen, S. & Seuna, P. 1971. Metsäojituksen vaikutuksesta suon hydrologiaan. *Vesientutkimuslaitoksen julkaisuja* 2: 1–63. Saatavissa: <http://hdl.handle.net/10138/26033>
- Myllys, M. 1998. Soiden viljely. Teoksessa: Vasander, H. (toim.). Suomen suot. Suoseura ry. Helsinki. s. 64–71.
- Nieminen, M. & Ahti, E. 2000. Soiden metsätaloustalouden vesistövaikutukset. *Metsätieteen aikakauskirja* 2/2000: 321–325. Saatavissa: <https://doi.org/10.14214/ma.6020>
- Nieminen, M., Piirainen, S., Sikström, U., Löfgren, S., Marttila, H., Sarkkola, S., Laurén, A. & Finér, L. 2018. Ditch network maintenance in peat-dominated boreal forests: Review and analysis of water quality management options. *Ambio* 47: 535–545. Saatavissa: <https://doi.org/10.1007/s10641-018-0641-1>

- org/10.1007/s13280-018-1047-6
- Niini, S. 1988. Turpeen ominaisuuksien vaikutus pellon salaojituksen toimintaan. Teknillinen korkeakoulu. Maanmittaus- ja rakennustekniikan osasto. Diplomityö. 114 s.
- Nissinen, R.K. 2016. Peruskuivatus. Teoksessa: Paasonen-Kivekäs, M, Peltomaa, R., Vakkilainen, P. & Äijö, H. (toim.). Maan vesi- ja ravinnetalous: ojitus, kastelu ja ympäristö. 2. täydennetty painos. Salaojayhdistys ry. s. 241–282.
- Pelkonen, P. 1975. Vuoden eri aikoina korkealla olevan pohjaveden vaikutus männyn kasvuun. *Suo* 26(2): 25–32. Saatavissa: <http://www.suo.fi/article/9437>
- Peltomaa, R. 2016. Salaojitus. Teoksessa: Paasonen-Kivekäs, M, Peltomaa, R. Vakkilainen, P & Äijö, H. (toim.). Maan vesi- ja ravinnetalous: ojitus, kastelu ja ympäristö. 2. täydennetty painos. s. 283–336.
- Price, J. S., Heathwaite, A. L. & Baird, A. J. 2003. Hydrological processes in abandoned and restored peatlands: An overview of management approaches. *Wetlands Ecology and Management* 11(1/2): 65–83. Saatavissa: <https://doi.org/10.1023/A:1022046409485>
- Päivänen, J. 1966. Sateen jakaantuminen erilaisissa metsiköissä. *Silva Fennica* 119(3): 1–37. Saatavissa: <https://doi.org/10.14214/sf.a14290>
- Päivänen, J. 1968. Pohjavesipinta ja turpeen vesipitoisuus rahkamättäisellä lyhytkortisella nevala. *Suo* 19(2): 17–24. Saatavissa: <http://www.suo.fi/article/9351>
- Päivänen, J. 1973a. Harvennuksen vaikutus lumi- ja routasuhteisiin nuorena turvemaan männikössä. *Silva Fennica* 7(2): 114–128. Saatavissa: <https://doi.org/10.14214/sf.a14717>
- Päivänen, J. 1973b. Hydraulic conductivity and water retention in peat soils. *Acta Forestalia Fennica* 129: 1–70. Saatavissa: <https://doi.org/10.14214/aff.7563>
- Päivänen, J. 1974. Sarkaleveyden ja naveroinnin vaikutus pohjavesipinnan syvyyteen ja männyntaimiston kehitykseen lyhytkortisella nevala. *Silva Fennica* 8(4): 215–224. Saatavissa: <https://doi.org/10.14214/sf.a14752>
- Päivänen, J. 1982. Hakkuun ja lannoituksen vaikutus vanhan metsäojitusalueen vesitalouteen. *Folia Forestalia* 516: 1–19. Saatavissa: <http://urn.fi/URN:ISBN:951-40-0568-6>
- Päivänen, J. 1984. The effect of runoff regulation on tree growth on a forest drainage area. *Proceedings of the 7th International Peat Congress, Dublin, Ireland, vol. 3: 476–488.*
- Repo, T., Launiainen, S., Lehto, T., Sutinen, S., Ruhanen, H., Heiskanen, J., Laurén, A., Silvennoinen, R., Vapaavuori, E. & Finér, L. 2016. The responses of Scots pine seedlings to waterlogging during growing season. *Canadian Journal of Forest Research* 46: 1–12. Saatavissa: <https://doi.org/10.1139/cjfr-2015-0447>
- Salaojayhdistys 2015. Peltosalaojitus. Salaojayhdistys ry. Grano Oy, Helsinki 2015. 23 s. Saatavissa: [https://www.salaojayhdistys.fi/wp-content/uploads/2016/06/Peltosalaojitusopas\\_2016.pdf](https://www.salaojayhdistys.fi/wp-content/uploads/2016/06/Peltosalaojitusopas_2016.pdf)
- Saarinen, M. 2013. Männyn kylvö ja luontainen taimettuminen vanhoilla ojitusalueilla – turvemaiden uudistamisen erityispiirteitä. *Dissertationes Forestales* 164: 1–64. Saatavissa: <https://doi.org/10.14214/df.164>
- Sarkkola, S., Hökkä, H., Koivusalo, H., Nieminen, M., Ahti, E., Päivänen, J. & Laine, J. 2010. Role of tree stand evapotranspiration in maintaining satisfactory drainage conditions in drained peatlands. *Canadian Journal of Forest Research* 40: 1485–1496. Saatavissa: <https://doi.org/10.1139/X10-084>
- Sarkkola, S., Hökkä, H., Ahti, E., Koivusalo, H. & Nieminen, M. 2012. Depth of water table prior to ditch network maintenance is a key factor for tree growth response. *Scandinavian Journal of Forest Research* 27: 1–10. Saatavissa: <https://doi.org/10.1080/02827581.2012.689004>
- Sarkkola, S., Nieminen, M., Koivusalo, H., Laurén, A., Ahti, E., Launiainen, S., Nikinmaa, E., Marttila, H., Laine, J. & Hökkä, H. 2013. Domination of growing-season evapotranspiration over runoff makes ditch network maintenance in mature peatland forests questionable. *Mires and Peat* 11(2): 1–11. Saatavissa: [http://mires-and-peat.net/media/map11/map\\_11\\_02.pdf](http://mires-and-peat.net/media/map11/map_11_02.pdf)
- Schwärzel, K., Šimuněk, J., van Genuchten, M.Th. & Wessolek, G. 2006. Measurement and modeling of soil-water dynamics and evapotranspiration of drained peatland soils.

- Journal of Plant Nutrition and Soil Science 169: 762–774. Saatavissa: <https://doi.org/10.1002/jpln.200621992>
- Semádeni-Davies, A. 1996. A literature review of peatland hydrology. Lund University, Sweden. Report 3198: 1–36.
- Seppälä, K. 1972. Ditch spacing as a regulator of post-drainage stand development in spruce and in pine swamps. *Acta Forestalia Fennica* 125: 7559. Saatavissa: <https://doi.org/10.14214/aff.7559>
- Seuna, P. 1980. Long-term influence of forestry drainage on the hydrology of an open bog in Finland. Teoksessa: The influence of man on the hydrological regime with special reference to representative and experimental basins. Proceedings of the Helsinki Symposium, 23–26 June 1980. IAHS\_AISH Publication 130: 141–149.
- Seuna, P. 1986. Ihmisen toiminnan vaikutus hydrologiseen kiertoon. Teoksessa: Mustonen, S.E. (toim.). *Sovellettu hydrologia. Vesiyhdistys ry. Helsinki.* s. 387–420.
- Seuna, P. 1988. Effects of clear cutting and forestry drainage on runoff in the Nurmes-study. *Suomen Akatemian julkaisuja 4/1988*: 122–134.
- Sjörs, H. 1948. Myrvegetation i Bergslagen. *Acta Phytogeographica Suecica* 21: 1–299. Saatavissa: <https://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:565421/FULLTEXT01.pdf>
- Starr, M.R. & Päivänen, J. 1981. The influence of peatland forest drainage on runoff peak flows. *Suo* 32(3): 79–84. Saatavissa: <http://www.suo.fi/pdf/article9527.pdf>
- Stenberg, L., Tuukkanen, T., Finér, L., Marttila, H., Piirainen, S., Kløve, B. & Koivusalo, H. 2015. Ditch erosion processes and sediment transport in a drained peatland forest. *Ecological Engineering* 75: 421–433. ISSN 0925-8574. Saatavissa: <https://10.1016/j.ecoleng.2014.11.046>
- Uhden, O. 1972. Gebirgshochmoore und Wasserwirtschaft am Beispiel des Brockenfeldmoores im Oberharz. *Wasser und Boden, Hamburg.* 175 s.
- Valgma, U. 1998. Impact of precipitation on the water table of different ombrotrophic raised bog complexes, central Estonia. *Suo* 49(1): 13–21. Saatavissa: <http://www.suo.fi/pdf/article9772.pdf>
- Verry, E.S. 1997. Hydrological processes of natural, northern forested wetlands. Teoksessa: Trettin, C.C., Jurgensen, M.F., Grigal, D.F., Gale, M.R. & Jeglum, J. K. (toim.). *Northern forested wetlands. Ecology and management.* CRS Press, Inc., Lewis Publishers, Boca Raton. s. 163–188.
- Verry, E.S. & Boelter, D.H. 1972. The influences of bogs on the distribution of streamflow from small bog-upland watersheds. Proceedings International Symposium, Hydrology of marsh-ridden areas, Minsk, Belorussian SSR. 11s.
- Verry, E.S., Brooks, K.N. & Barten, P.K. 1988. Streamflow response from an ombrotrophic mire. *Suomen Akatemian julkaisuja 4/1988*: 52–59.
- Virtanen, S. & Vakkilainen, P. 2017. Salaojitus-tutkimuksesta Suomessa. Teoksessa: Äijö, H. (toim.) *Salaojayhdistys 100 vuotta. Salaojayhdistys, Nord Print.* s. 125–153.
- Vompersky, S.E. & Sirin, A.A. 1997. Hydrology of drained forested wetlands. Teoksessa: Trettin, C.C., Jurgensen, M.F., Grigal, D.F., Gale, M.R. & Jeglum, J. K. (toim.). *Northern forested wetlands. Ecology and management.* CRS Press, Inc., Lewis Publishers, Boca Raton. s. 198–211.
- Weber, C.A. 1902/2002. Über die Vegetation und Entstehung des Hochmoors von Augstumal in Memeldelta. Berlin. Englanninkielinen käännetty laitos: Couwenberg, J. & Joosten, H. On the vegetation and development of the raised bog of Augstumal in the Memel delta including comparative views on other raised bogs of the world. A biological and geological study. Grift & K, Tula, Russia. 278 s.
- Väyrynen, T., Aaltonen, R., Haavikko, H., Jun-tunen, M., Kalliokoski, K., Niskala, A.-L. & Tukiainen, O. 2008. Turvetuotannon ympäristönsuojeluopas. Pohjois-Pohjanmaan ympäristökeskus, Ympäristönsuojeluosasto. 87 s. Saatavissa: <http://hdl.handle.net/10138/38820>
- Österlund, P. 1979. Vedenkorkeusvaihteluiden vaikutus rantametsien puustoon. *Teknillinen korkeakoulu, Vesitalouden laboratorio.* 112 s.