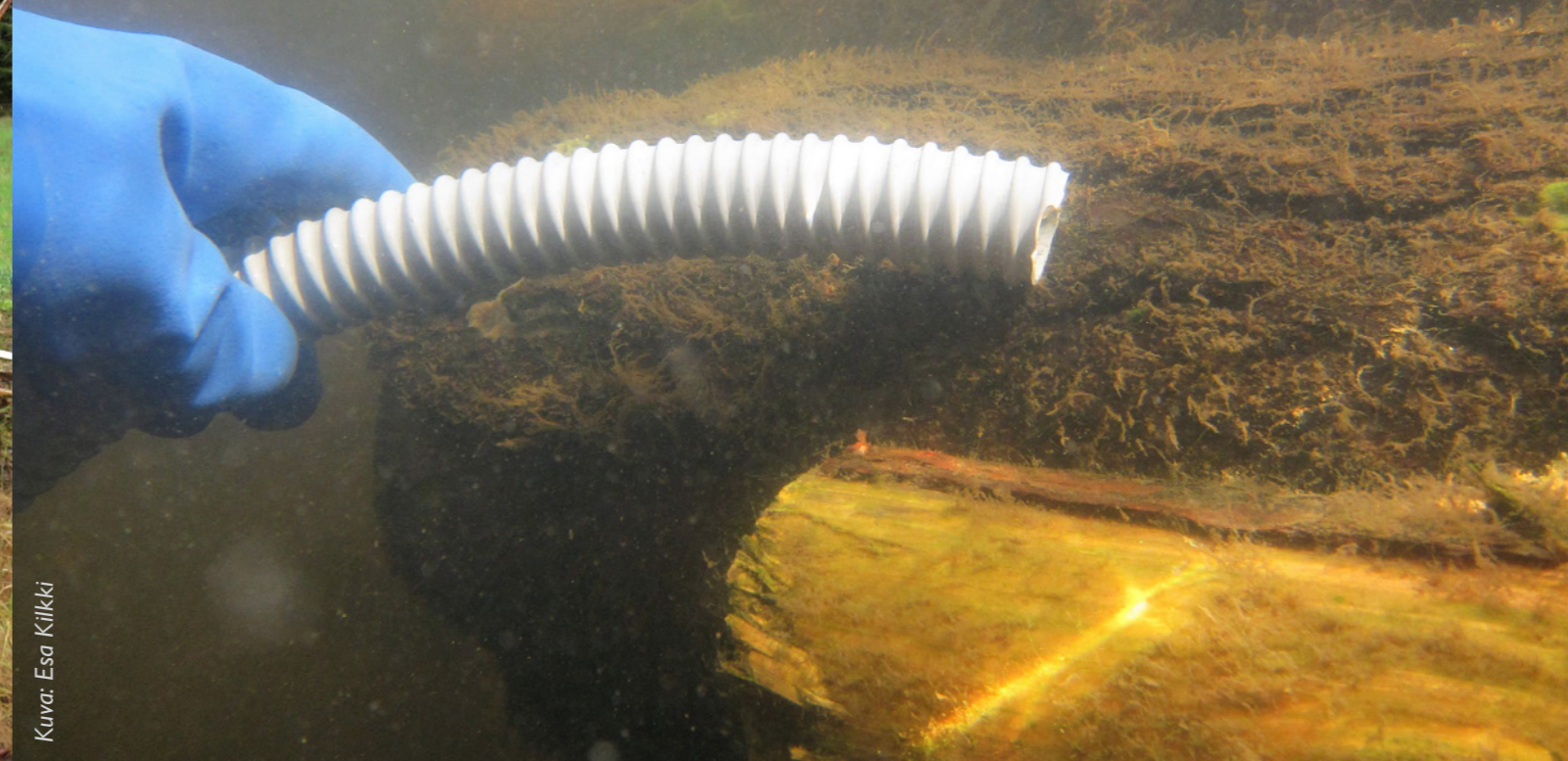




Kuva: Kari-Matti Vuori

Talkooväki rakentamassa puupuhdistamoja kenttäsahan jätepuusta Taipalsaaren Makkaralammen ojalla.



Kuva: Esa Kilkki

Puun päällyskasvustoa uppotukin pinnalla Pien-Saimaalla.

1 Taustaa

Suomen ympäristökeskuksen (SYKE) hankkeessa ”Puupohjaisilla uusilla materiaaleilla tehoa metsätalouden vesiensuojeluun ja vesistökuunnostuksiin (PuuMaVesi)” oli tavoitteena kehittää uusi, puuainesta hyödyntävä vesistönsuojelumenetelmä erityisesti suometsätalouden tarpeisiin. Vuosina 2018–2020 aikana toteutetussa hankkeessa tutkittiin vedenalaisten puurakenteiden toimivuutta kunnostusojitusten valumavesien puhdistuksessa. Menetelmässä hakkuutähteitä ja pienpuuta asetettiin metsäojiin ja laskeutusaltaisiin, tarkoituksena vähentää eroosiota, puhdistaa vettä, lisätä vesiluonnon monimuotoisuutta ja parantaa kalakantojen tilaa (Salmelin ym. 2020, Vuori ym. 2021). Toisaalta puuaineksesta tiedetään liukenevan veteen sen laatua mahdollisesti heikentäviä, happea kuluttavia, happamuutta tai ekotoksisuutta lisääviä yhdisteitä. Näitä ovat esimerkiksi puun polymeeriset ainekset, selluloosa, hemiselluloosa, ligniini sekä uuteaineet, kuten fenoliset aineet, hartsihapot ja terpeenit (Vuori ym. 2021).

Tämän kirjallisuuskatsauksen tarkoituksena on tunnistaa tarkemmin vedenalaisen puuaineksen mahdollisia haittavaikutuksia eliöstölle sekä arvioida niiden luonnetta ja todennäköisyyttä niissä käytännön tilanteissa, joita puupuhdistamorakenteissa on toteutettu. Katsaus jakautuu kahteen osioon: 1) Vedenalainen puuaines - Puuaineksen komponentit ja aineksen hajoaminen vedessä 2) Vedenalainen puuaines – Ekotoksisuus. Pohjustuksena aiheeseen raportissa käsitellään lyhyesti myös puun yleistä rakennetta, puusoluja ja -solukkoja sekä niiden tehtäviä. Katsaus palvelee ”PuuMaVesi”-hankkeen jatkohankkeena vuonna 2021 käynnistyneen ”Puupuhdistamojen valuma-alueen pilotointi maa- ja metsätalouden vesienhallinnassa (PuuValuVesi)” -hankkeen tarpeita (https://www.syke.fi/fi-FI/Tutkimus__kehittaminen/Tutkimus_ja_kehittamishankkeet/Hankkeet/PuuValuVesihanke).

2 Puut – esiintyminen Suomessa

Putkilokasveihin (Tracheophyta) kuuluvat puut (siemenkasvit, Spermaphytae) jaetaan kahteen ryhmään, havupuihin (coniferous woods, gymnosperms) ja lehtipuihin (deciduous trees, angiosperms) (Alén 2000, Nisula 2018). Edellä mainituista ryhmistä käytetään eri yhteyksissä englanninkielisiä nimityksiä ”softwood” (havupuut) ja ”hardwood” (lehtipuut) (Alén 2011a). Yleisnimityksiä ”hardwood” ja ”softwood” ei kuitenkaan voi käyttää yksinomaan kovuuden mittana, koska havu- ja lehtipuiden keskimääräisten ominaispainojen välillä esiintyy huomattavaa päällekkäisyyttä; eräät havupuut ovat melko kovia ja jotkut lehtipuut ovat suhteellisen pehmeitä. Kuitenkin puuaineksen tiheys vaikuttaa merkittävästi puuaineksen ominaisuuksiin (myös rakenteissa). Suomalaisista puulajeista kevyitä (300–450 kg m³) ovat mm. kuusi, mänty, pihdat, haapa, lehmus ja tervaleppä, muiden puulajien kuuluessa keskiraskaiden (450–600 kg m³) (huom. ns. kuiva-tuoretiheys) (Saranpää 1997).

Suomessa esiintyy luontaisesti noin 30 puulajia, joista suurin osa on lehtipuita. Havupuita on neljä lajia: mänty, kuusi, kataja ja Ahvenanmaalla kasvava euroopanmarjakuusi, joista jälkimmäiset jäävät usein pensasmaisiksi. Suomen metsien valtapuulajeja ovat kuusi, mänty, hieskoivu ja Suomen kansallispuu, rauduskoivu. Edellä mainitut lajit kasvavat yleisinä koko massa, lukuun ottamatta pohjoisinta Lappia. Tunturien rinteillä kasvaa hieskoivun alalajia, tunturikoivua. Haapa ja harmaaleppä sekä usein monirunkoisina kasvavat raita, tuomi ja pihlaja ovat koivun lisäksi yleisimmät lehtipuulajit. Tervaleppää, lehmusta ja vaahteraa kasvaa Etelä- ja Keski-Suomessa ja tammea eteläisimmässä Suomessa. Kotimaisten puulajien lisäksi Suomessa kasvatetaan monia puulajeja, jotka eivät luontaisesti kuulu Suomen luontoon (Luke, <https://www.luke.fi/tietoa-luonnonvaroista/metsa/puulajit/>).



Kuva: Kari-Matti Vuori

Latvuspuun keruuta purokunnostusta varten Kirkkonummen Juusjärvellä.

3

Elävä puu – puun perusrakenne

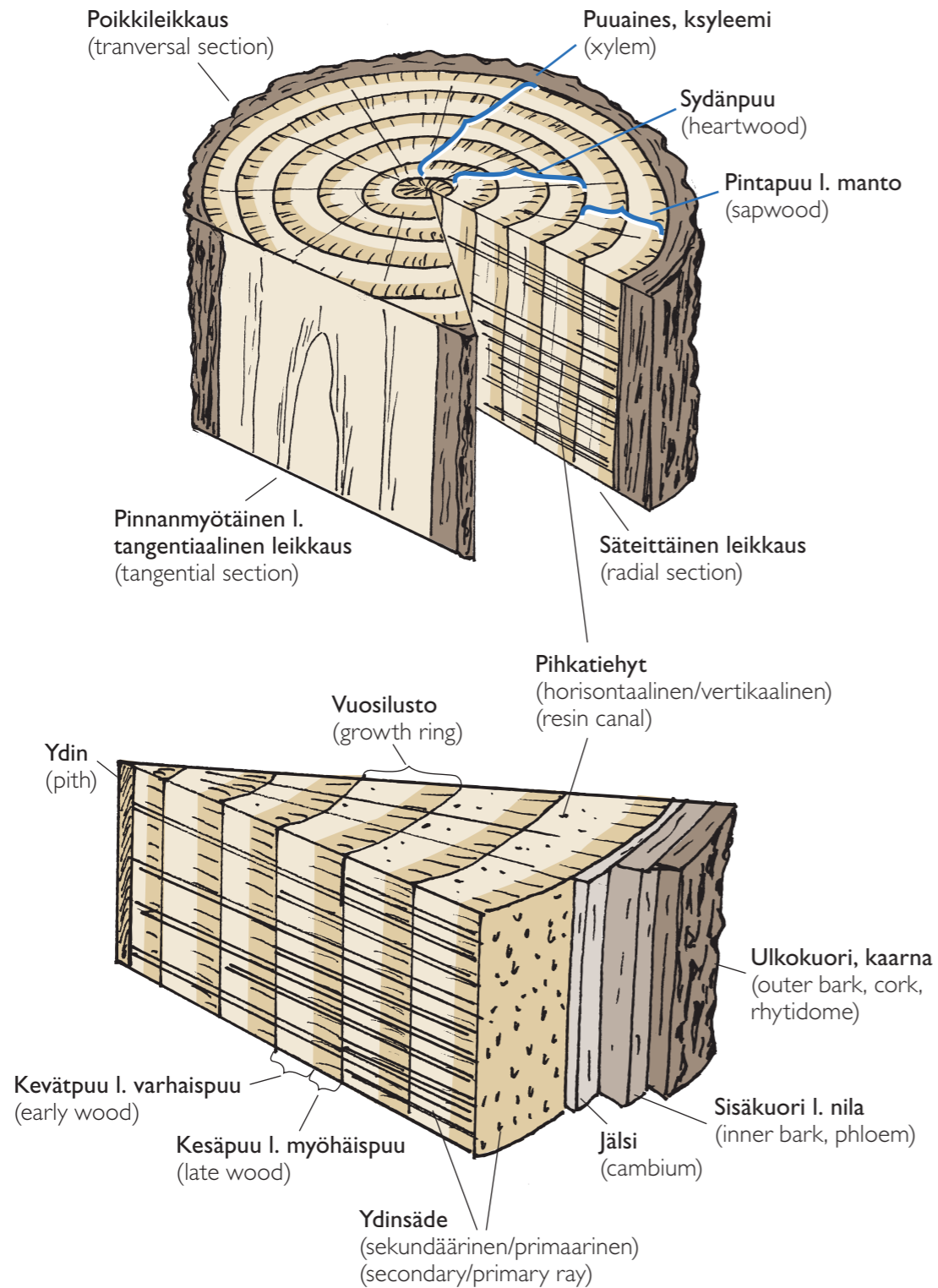
Puiden makroskooppinen, silmällä havaittava rakenne poikkeaa sekä havu- ja lehtipuiden että näihin ryhmiin kuuluvien lajien välillä, mutta puiden välillä on yhteisiä perusrakenteita. Puun ydin (core, pith) on puun ensimmäisen vuoden aikana muodostunut solukko, jonka mekaaninen lujuus on pienempi kuin sitä ympäröivän puuai-

neksen ja sen väri on yleensä tummempi. Puun ensimmäisiä vuosilustoja nimitetään myös nuorpuuksi. Puuaines, ksyleemi (xylem) jaetaan sydänpuuhun (heartwood) ja pintapuuhun, mantoon (sapwood). Pintapuun ulkokerroksessa on ohut solukerros, jälsi (cambium), jossa tapahtuu puusolujen jakaantuminen, paksuuskasvu (sekundäärinen kasvu). Sisemmässä kuoressa on nila (inner bark, phloem), jossa johtosolukon osassa kuljetetaan orgaanisia aineita, erityisesti yhteyttämistuotteita lehdistä muualle puuhun. Lisäksi kuoreen kuuluu ulkokuori (outer bark, cork, rhytidome). Puun primaarikasvu tapahtuu silmuissa ja juurien kärjissä. Puun sisällä on myös sekundäärisiä ja primäärisiä ydinsäteitä (secondary and primary ray). Useissa havupuissa on lisäksi horisontaalisia ja vertikaalisia pihkatiehyitä (resin canal) (Fengel 1970, Kampe ja Magel 2013, Alen 2000, Krahmer ja Côté 1963, Nisula 2018). Puumateriaali on anisotrooppinen eli sen rakenne riippuu suunnasta. Siksi puun rakenne voidaan makroskooppisesti nähdä vain tarkastelemalla rakenteita eri suunnilta, jolloin poikkitaistason lisäksi tarkastellaan myös säteittäistä ja tangentialista tasoa (Kuva 1).

Pintapuu on puun rungon fysiologisesti aktiivinen osa, joka toimii ravinteiden varastopaikkana sekä veden ja mineraalien kuljetuksessa juurista ylöspäin. Suurin osa pintapuun solukosta muodostuu kuolleesta solukosta, mutta osittain myös elävistä parenkyymisoluihin. Sydänpuu on kuollutta solukkoa, jossa mm. tärkkelys ja rasvat on käytetty sydänpuun sisältämien yhdisteiden, esimerkiksi sekundaarimetaboliittien tuottamiseen (Fengel 1970, Kampe ja Magel 2013). Sydänpuun rakennemuutokset aiheuttavat, että veden kulku pääosin estyy. Sekä lignifikaatio (puutuminen) että korkea fenolipitoisuus vähentävät edelleen veden kulkeutumista, lisäten samalla puuaineksen lujuutta havupuilla. Sydänpuun rakenne ja ainesosat suojaavat puuta myös sitä tuhoavilta mikro-organismeilta ja hyönteisiltä (Krahmer ja Côté 1963, Nisula 2018).

Erityisesti havupuissa nähdään selkeät vuosilustot, joissa vaaleampi osa on kasvukauden alussa muodostuva kevätpuu eli varhaispuu (early wood) erottuen ohutseinäisten ja suuriontelosten solujen vuoksi. Tummempaa erottuu kesäpuu eli myöhäispuu (late wood), jossa solut ovat paksuseinäisiä ja läpimitaltaan pienempiä. Lehtipuiden kevätpuun huokoisuus näkyy selvemmin kehäputkiloisissa puissa, joissa se erottuu paljain silmin karkeiden putkilorakenteiden ansiosta (esim. tammen poikkipinnassa). Tammen lisäksi kehäputkiloisia puita ovat jalava ja saarni. Muut lehtipuut ja kaikki havupuut ovat hajaputkiloisia, eli putkilot jakautuvat enemmän tai vähemmän tasaisesti puun poikkileikkauksen kaikkiin osiin (Saranpää 1997, Wiedenhoef 2010).

Puu koostuu erikokoisista ja muotoisista soluista. Solujen pääasiallisina tehtävinä on kuljettaa nesteitä, varastoida ravintoaineita sekä antaa puulle tukea ja mekaanista lujuutta. Nesteitä kuljettavat ja puuta tukevat solut ovat vedellä ja ilmalla täyttyneitä kuolleita soluja. Solujen muodon perusteella puusolut voidaan jakaa prosenkyymisoluihin (suippusolut, trakeidit), jotka ovat muodoltaan pitkiä, suippopäisiä soluja. Vastaavasti parenkyymisolut (tylppysolut) ovat suhteellisen lyhyitä, ”tiilenmuotoisia” soluja. Havupuut sisältävät vähemmän erilaisia soluja kuin lehtipuut. Trakeidit kuljettavat nesteitä vertikaalisesti ja ydinsädesolut kuljettavat nesteitä horisontaalisesti



Kuva 1. Puun rungon rakenne poikkileikkauksesta sekä säteittäisestä ja pinnanmukaisesta I. tangentialisesta leikkauksesta nähtynä. (Huom. kuvat ovat kaavamaisia, jolloin rakenteita ei luonnollisessa puussa havaita välttämättä kaavamaisen kuvauksen mukaisesti ja mm. säännöllisiä pihkatiehyitä esiintyy vain eräissä havupuissa, ml. kuusi ja mänty. Lisäksi sydän- ja pintapuun erottuminen ei ole myöskään aina selvää ja havu- ja lehtipuiden rakenne poikkeaa toisistaan).

ja varastoivat ravintoaineita. Havupuissa epiteeliset parenkyymisolut muodostavat myös horisontaalisia ja vertikaalisia pihkatiehyitä. Lehtipuiden soluista kuidut ja puusyyt toimivat mekaanisena tukena, putkilot nesteenkuljetuksessa ja pitkittäistylppisolut sekä ydinsädetylppisolut varastosoluina. Nesteiden kulun mahdollistamiseksi puiden solut ovat yhteydessä toisiinsa huokosten kautta (Wiedenhoef 2010, Alén 2000, Nisula 2018). Taulukossa I on esitetty havu- ja lehtipuiden solutyypit, niiden orientaatio, pääasiainen tehtävä, tilavuusosuus ksyleemistä sekä solujen pituus ja leveys (Alén 2000).

Taulukko I. Havu- ja lehtipuiden solutyypit, niiden orientaatio, pääasiainen toiminta, til-% -osuus ksyleemistä sekä solujen pituus ja leveys (arvot ovat keskimääräisiä) (Alén 2000).

Solutyyppi	Orientaatio ¹⁾	Pääasiainen tehtävä ²⁾	Tilavuus-% ksyleemistä	Pituus ²⁾ mm	Leveys µm
Havupuut					
Trakeidit (kuidut)	v	mekaaninen tuki, nesteiden kuljetus	90	1,4–6,0	20–50
Ydinsäteen trakeidit	h	nesteiden kuljetus säteen suunnassa	< 5	0,01–0,16	2–50
Ydinsäteen tylppisolut (parenkyymi)	h	ravintoaineiden varastointi, kuljetus	< 10	0,01–0,16	2–50
Epiteeliparenkyymi	v, h	hartsin syntetisointi	< 1	0,01–0,16	2–50
Lehtipuut					
Kuidut ja puusyyt	v	mekaaninen tuki	55	0,4–1,6	10–40
Putkilot	v	nesteiden kuljetus	30	0,2–0,6	10–300
Pitkittäistylppisolut	v	varastointi	< 5	< 0,1	< 30
Ydinsäteen tylppisolut	h	varastointi	15	< 0,1	< 30

¹⁾ v = vertikaalinen, h = horisontaalinen

²⁾ pituusalue, vaihtelee puulajeittain.

4

Puun kemialliset komponentit

Puun kuiva-aine koostuu suuri- ja pienimolekyylisestä aineksesta, jossa pääkomponentteina ovat makromolekyyliset, polymeeriset aineet eli selluloosa (40–45 % kuiva-aineesta), hemiselluloosat (25–35%) ja ligniini (20–30 %). Edellä mainitut makromolekyylit ovat puun keskeiset rakenteelliset komponentit. Koostumukseen vaikuttavat mm. puulaji, puun ikä, kasvuolosuhteet ja puun osa. Muita puussa esiintyviä makromolekyylejä ovat mm. pektiinit, tärkkelys ja eräät proteiinit. Pienimolekyyliseen ainekseen kuuluvat uuteaineet, eräät vesiliukoiset aineet sekä epäorgaaniset aineet (Sjöström 1993, Alén 2011a) (Taulukko 2). Kokonaisuudessaan suuren molekyylimassan aineet muodostavat noin 95 % puun kuiva-aineesta ja pienen molekyylimassan ainekset vastaavasti 5 %. Puun kemiallisten komponenttien yleinen luokitus ja pitoisuus (% kuiva-aineesta) on esitetty kaaviossa 1 (Alén 2011a).

Esimerkkinä ainesosien määrän eroista puulajien välillä on vertailu männyn (*Pinus sylvestris*) ja rauduskoivun (*Betula pendula*) välillä. Keskimääräisesti havupuussa ligniinin osuus on korkeampi (mänty 25–30 % kuiva-aineesta, koivu 20–25 %) ja hemiselluloosan vastaavasti alhaisempi koivuun verrattuna (mänty 25–30 %, koivu 30–35 %) (Alén 2011a). Selluloosan ja muiden puun komponenttien, pääosin uuteaineiden osuus on verraten samansuuruinen. Myös kevät- ja kesäpuun sekä normaali- ja reaktiopuun koostumuksissa voidaan havaita eroavaisuuksia. Kuori sekä lehdet ja neulasen sisältävät lähes samat aineryhmät kuin puuaines, mutta niissä kyseisten ainesosien pitoisuudet ovat erilaisia.

Esimerkkinä alkuaineiden pitoisuudesta puuaineksessa on männyn sahanpurussa, männyn kuorissa sekä hakkuutähteessä olevat C:H:O:N:muut alkuainepitoisuudet (% kuiva-aineesta):

- puuaines: 51,0 : 6,0 : 42,8 : 0,1 : 0,1
- kuori: 52,5 : 5,7 : 39,6 : 0,4 : 1,8
- hakkuutähde: 51,3 : 6,1 : 40,8 : 0,4 : 1,4 (Alakangas 2000).

PuuMaVesi-hankkeen saavikokeissa havaittiin puun uuteaineiden aiheuttavan nopeita vedenlaatumuutoksia.



Kuva: Rauni Kauppinen