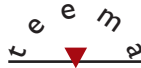


Petteri Alho, Leena Laamanen, Elina Kasvi, Yunsheng Wang ja Claude Flener

# Tulvariskien hallinta uusilla teknologioilla



Luonnonvarariskien hallinta

## Tulvat ja tulvadirektiivi Suomessa

**T**ulvat ovat vahingollisimpia luonnon aiheuttamia tuhoja Euroopassa. Viimeisen kahdenkymmenenviiden vuoden aikana puolentoistasataa tulvaa ovat aiheuttaneet lähes tuhannen ihmishengen menetyksen, puoli miljoonaa ihmistä on joutunut muuttamaan pois kodeistaan, taloudelliset menetykset ovat olleet n. 30 miljardia euroa. Suomessa tulvien aiheuttamat vahingot ovat olleet huomattavasti vähäisempiä, mutta paikalliset vahingot ovat olleet merkittäviä. Kevään 2005 tulvat Ivalossa ja Kittilässä aiheuttivat noin 5 milj. euron vahingot. Rannkasadetulva syksyllä 2007 aiheutti 22 milj. euron vahingot Porissa.

Tulvien aiheuttamat rahalliset vahingot yhdessä ihmishenkien menetyksen kanssa sekä tulvien lisääntyminen ja esiintymisajankohdan muutokset ovat voimistaneet tulviin kohdistuvaa tutkimusta sekä Suomessa että ulkomailla. Lisääntyneet tulvat ja niihin liittyvät vahingot Euroopassa johtivat EU:n tulvadirektiivin laatimiseen, jossa jäsenvaltioita veloitetaan kartoittamaan sekä mahdollisten suurtulvien tulva-alueet että tulvista aiheutuvat riskit ja edelleen laatimaan kokonaisvaltaiset hallintasuunnitelmat tulvariskien hallintaan.

Tulvadirektiivi antaa viitekehyksen tulvatilanteiden ennakkointiin sekä tulvaennustuksiin ja -riskien ennustuksiin Suomessa. Se velvoittaa jäsenvaltion arvioimaan potentiaaliset tulva-alueensa. Suomessa tällaisia alueita on seitsemänkymmentä. Näille alueille on tehty yleispiirteinen tulvavaara- eli tulvan laajuuskartoitus. Tulvavaarakartoituksessa kartoitetaan eri toistuvuusajoilla (esim. tilastollisesti kerran 20 vuodessa tapahtuva tulva) tapahtuvien tulvien

laajuudet ja syvyydet. Tulvavaarakartat laaditaan Suomessa vähintään toistuvuusajoille 1/20, 1/50, 1/100, 1/250 ja 1/1000 vuodessa.

Tulvavaarakarttojen lisäksi tehdään tulvariskien kartoitus. Tulvariskikartoissa esitetään tulvavaarakarttojen toistuvuuksien mukaisesti esiintyviin tulviin mahdollisesti liittyvät vahingolliset seuraukset mukaan lukien seurauksista mahdollisesti kärsivien asukkaiden määrä, alueella harjoitettavan taloudellisen toiminnan tyyppi ja laitokset, jotka voivat aiheuttaa äkillistä veden tai maaperän pilaantumista tulvatilanteessa ja toisaalta seurauksista mahdollisesti kärsivät suojelualueet.

Näiden kartoitusten ja asiantuntija-arvioiden perusteella Maa- ja metsätalousministeriö nimesi 21 aluetta vuonna 2011, joilla vesistöjen tai meren tulvimisesta aiheutuvat riskit ovat merkittäviä. Näistä alueista 17 sijaitsee sisämaassa vesistöjen varrella ja neljä rannikolla. Merkittävälle tulvariskialueille tehdään paraikaa tulvariskien hallinnan suunnitelmia. Tulvariskien hallintasuunnitelmissa on esitettävä tulvariskien hallintavoitteet ja toimenpiteet niiden saavuttamiseksi. Suunnitelmissa käsitellään kaikkia tulvariskien hallinnan näkökohtia. Niissä keskitytään tulvien ehkäisyyn, suojeluun sekä valmiustoimiin ja otetaan huomioon myös vesistöalueen erityispiirteet. Mahdollisen suurtulvan aiheuttamien vahinkojen on alustavasti arvioitu kohoavan Suomessa jopa 550 milj. euron suuruisiksi.

## Tulvien kartoitus ja mallinnus

Jokidynamiikkaa ja tulvien laajuutta tutkittaessa yksi tehokkain menetelmä on hydraulinen mallin-

taminen. Tässä lähestymistavassa uoman topografian, veden korkeustiedon tai virtaaman sekä pohjan karkeuskertoimen avulla mallinnetaan veden virtaus uomassa ja tulvatasangolla. Mallinnuksen kohteena voi olla yksi–tulvatapahtuma tai kokonainen hydrologinen vuosi–vuosikymmenet. Näin saadaan selville tietyn virtaaman aiheuttamat tulvatilanteet, virtaavan veden työ uomassa mukaan lukien jokiuoman eroosio–kuljetus–sedimentaatioprosessit.

Hydrauliseen mallinnukseen tarvitaan neljänlaista lähtöaineistoa: 1) topografinen aineisto, josta valmistetaan mallin geometria, 2) virtaama- tai vedenpinnan korkeustieto, 3) maanpinnan karkeustieto ja 4) validointiaineisto. Perinteisesti korkeusaineisto on kerätty hydrologiseen tutkimukseen aikaa vievillä maastokartoituksilla (esim. takymetrikartoitus) tai epätarkoista topografikarttojen korkeuskäyristä. Nykyisin on siirrytty paikkatietokantojen ja kaukokartoitusaineistojen hyödyntämiseen korkeusmallien valmistamiseksi hydraulisiin mallinnuksiin, mutta näiden aineistojen tarkkuus ja laatu eivät aina sovellu tarkkaan hydrologiseen tutkimukseen. Lisäksi itse hydraulisen mallinnuksen epävarmuuksia on tutkittu kansainvälisten tutkimusryhmien toimesta ja on huomattu, että kehitystyötä tarvitaan eritoten mallien kalibroinnin ja validoinnin saralla. Monia näistä ongelmista voidaan ratkaista kaukokartoituksen avulla, sillä sen avulla pystytään tekemään tarkempia korkeusmalleja, mallintamaan paremmin maanpinnan karkeusparametreja sekä arvioimaan tulvan virtausnopeuksia. Tutkimuksissa on myös selvästi osoitettu laserkeilauksen tarkkuuden ja nopean kartoitustavan tuomia etuja ja siten siihen tulisi kohdistaa yhä enemmän tutkimus- ja kehityshankkeita niin kansallisesti kuin kansainvälisestikin.

Erilaisia hydraulisen mallinnuksen lähestymistapoja on jo pitkään käytetty tulvan laajuuksien arvioinnissa. Viime vuosikymmeninä on kehitetty niin yksi-, kaksi- kuin kolmiulotteista hydraulista mallinnusta. Lisäksi on tutkittu yleisellä tasolla uoman dynamiikkaa yhdistämällä hydraulisia mallinnustuloksia ja joen geomorfologiaa. Tarkemmat tutkimukset uoman sedimenttikulkeutumisesta hydraulista mallinnusta hyödyntäen ja kulkeutumiseen liittyvästä jokidynamiikasta ovat olleet kuitenkin varsin rajoittuneita, eikä ilmastonmuutoksen tai muita ympäristöllisiä muutoksia ole juurikaan huomioitu tulvamallinnuksissa.

## Uusien teknologioiden hyödyntäminen virtavesien tutkimisessa

Jokiympäristön muutostulkinnessa, tulvakartoituksissa ja hydraulisen mallinnuksen lähtöaineistojen hankkimiseksi on hyödynnetty erilaisia laserkeilaussovelluksia sekä erilaisia digitaalikuvia (terrestriset ja UAV-kuvat (*unmanned aerial vehicle*) eli miehittämättömien ilma-alusten kuvat).

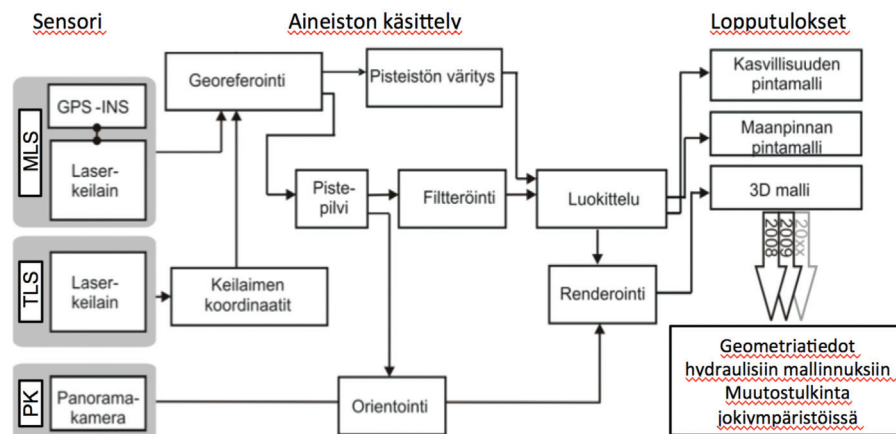
### Laserkeilaus

Laserkeilaimen mittaus perustuu ympäristön kohteiden havainnointiin tarkkojen etäisyys- ja kulmamittausten avulla. Nämä havainnot muunnetaan kolmiulotteisiksi pisteiksi eli pistepilveksi, joka kuvaa yksityiskohtaisesti kohteen geometriaa. Laserkeilauksessa hyödynnetään tyypillisesti kahta eri mittaustekniikkaa etäisyyden määrittämiseksi, nimittäin laserpulssin kulkeman ajan määrittämistä (*time-of-flight*) tai vaihe-eron mittaamista (*phase shift*).

Lentokoneesta tehtävä laserkeilaus soveltuu erittäin hyvin kolmiulotteisen maasto- ja kohdemallin valmistamiseen alueille, joita ei voida kattaa nopeasti perinteisillä fotogrammetrisilla kartoituksilla. Tällaisia ovat rannikko- ja muut vesialueet sekä alueet, joilla ei ole usein riittävästi tukipisteitä, näkyvyys on esteellinen tai alueiden ekosysteemi voi olla herkkä perinteisille mittauksille. Laserkeilauksen etuina perinteisiin fotogrammetrisiin tai kaukokartoitusmittauksiin verrattuna on nopeus ja menetelmän vähäisempi riippuvuus sääolosuhteista, edulliset kustannukset ja peitteisellä alueella parempi mittaustarkkuus. Ilmalaserkeilauksia punaisella aallonpituudella (1062 nm, ei läpäise vesikerrosta) on jo hyödynnetty tulvamallinnuksessa topografisen aineiston keruumenetelmänä.

Uutena mielenkiintoisena laserkeilausmenetelmänä voidaan pitää ilmalaserkeilausta vihreän aallonpituuden laserilla (532 nm). Tämä menetelmä läpäisee suhteellisen hyvin vesipatsaan ja kyseistä menetelmää onkin jo käytetty koeluontoisesti rannikoiden merenpohjan kartoittamiseen. Tutkimustietoa ei ole juurikaan saatavilla vihreän laserkeilauksen soveltuvuudesta virtavesiin.

Kolmantena lupaavana laserkeilausmenetelmänä virtavesitutkimuksessa on maasta suoritettava laserkeilaus, jossa laserkeilain sijoitetaan joko staattises-



**Kuva 1.** Mobiili (MLS) ja terrestrinen (TLS) laserkeilaus sekä panoraamakuvaukseen (PK) virtavesitutkimuksessa. Toistamalla keilaus peräkkäisinä vuosina saadaan kartoitettua jokiympäristön muutoksia.

ti kartoituspisteelle (esim. kolmijalan varaan), josta käsin lähialueen tarkka kolmiulotteinen kartoitus suoritetaan. Toisena vaihtoehtona on sijoittaa laserkeilain autoon, veneeseen tai selkäreppuun, jolloin ns. mobiiliin laserkeilauksen avulla voidaan kartoittaa tarkasti ja nopeasti laajempia alueita kuin ns. staattisella maalaserkeilauksella. Maalaserkeilauksella saadaan erittäin tarkkaa maanpinta- ja kasvillisuustietoa niin jokisärkistä, törmistä kuin tulvatasangoilta, sillä yhdellä keilauksella voidaan mitata miljoonia pisteitä senttimetrin tarkkuudella. Laserkeilauksella valmistettujen maastomallien avulla pystytään kolmiulotteisesti kartoittamaan jokiuoman yläpuolinen topografia ja kaikuluotauksen avulla saadaan syvyystieto vedenpinnan alapuolisesta osasta.

Yhdistämällä topografia- ja syvyystiedot voidaan tulvaprocesseja mallintaa entistä tarkemmin. Tämän vuoksi onkin keskeistä kehittää ja testata erilaisia laserkeilausmalleja sekä niiden yhdistämistä toisenlaisiin topografia-aineistoihin hydrologisessa tutkimuksessa. Yllä mainituista laserkeilausmenetelmistä on tutkimustietoa kansainvälisestikin vain punaisen aallonpituuden laserkeilauksista hydrologian alalta.

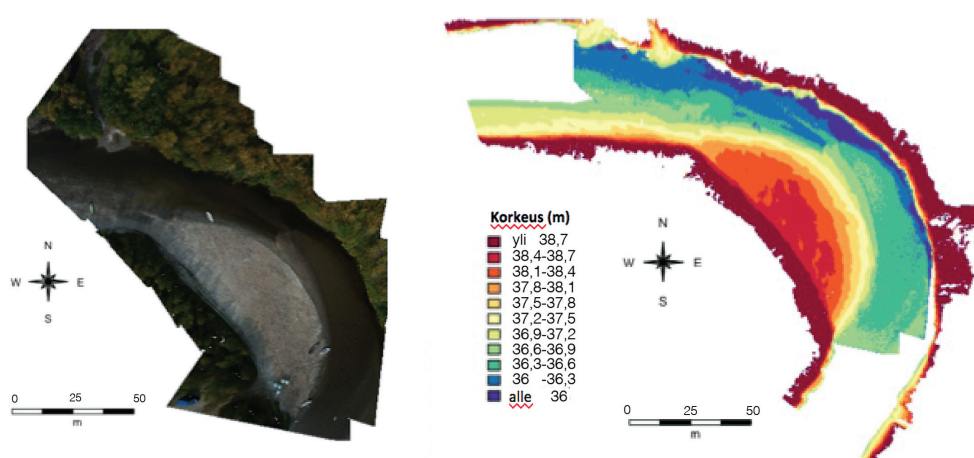
#### Syvyysmallinnus UAV-kuvista

Syvyysmallinnusta voidaan kaikuluotauksen lisäksi suorittaa fotogrammetrisesti ilmakuvilta. Fotogrammetriseen syvyysmallinnukseen on kehitetty mallinnusmenetelmiä, kuten empiirinen malli, jo-

ka perustuu ns. Lyzenga-algoritmiin ja teoreettinen HAB-malli (*hydraulically assisted bathymetric*).

Empiirinen malli perustuu veden syvyyden ja heijastusarvon väliseen suhteeseen. HAB-malleissa sitä vastoin ei tarvita empiiristä syvyyshavaintoa. Ne perustuvat samaan perusajatukseen valaistuksen heikkenemisestä vedessä ja siten heijastusarvon ja veden syvyyden kovarianssiin kuin empiirinenkin lähestymistapa. HAB-mallit tarvitsevat syötteekseen uoman virtaaman, leveyden ja pitkittäisprofiilin. Nämä tiedot on mahdollista saada useimmissa tapauksissa virtaamamittausasemien tietokannoista. Lisäksi hydraulisiin laskentoihin tarvitaan kitkakerroin. HAB1-malli on regressioon perustava, mutta regressiota ei lasketa tunnetun syvyyden suhteen, vaan syvyyden joka perustuu hydrauliseen teoriaan uoman muodosta ja edelleen poikkileikkauksittain laskettuihin maksimi- ja keskiarvotettuihin syvyyksiin. Lyzenga-mallilla kytetään kuitenkin laskemaan tarkempi absoluuttinen syvyys kuin HAB-mallilla.

UAV-ilmakuvaukseen on osoittautunut erittäin tarkaksi ja tehokkaaksi tavaksi kerätä jokiympäristöstä korkearesoluutista ilmakuvaa. Uusimmat UAV-helikopterit pystyvät keräämään ja kuvaamaan kilometrien pituisia jokiosuuksia yhdellä lennolla. UAV-lentoreitti suunnitellaan etukäteen ja ohjelmoidaan GPS-avusteiseen ohjausjärjestelmään. Näin saadaan suunniteltua mutkittelevankin jokiuoman kartoituslinjat ennen lentoa tarkasti ja kustannustehokkaasti.



**Kuva 2.** Esimerkki UAV-kuvaukseen ja mobiilin laserkeilaukseen perustuvasta jokiومان geometriasta Pulmankijoelta (Tenojoen valuma-alue). Uoman vedenalainen geometria perustuu empiriseen syvyysmalliin, jota on täydennetty mobiilin laserkeilauksen pistepilvellä uoman vedenpinnan yläpuolisilta alueilta.

### Tulvien hallinnan tulevaisuus

Uudet mallinnus- ja kartoitusteknologiat tulevat parantamaan tulvalaajuuksien ennustamista ja helpottamaan niiden hallintaa. Uudet kartoitusmenetelmät mahdollistavat jokiympäristön veden yläpuolisen alueen ja jokiومان vedenalaisen geometrian kartoittamisen. Mobiili laserkeilaus on nopea ja tällä hetkellä kustannustehokkain kartoitusmenetelmä, joka ylittää parempaan kuin 5 cm absoluuttiseen tarkkuuteen, ja jolla voidaan kartoittaa monien kilometrien mittaisia jokiosuuksia. Veneeseen sijoitetulla laserkeilaimella pystytään keilaamaan jokea noin 3 km tunnissa profiilivälin ollessa 5–7 cm. Täydentämällä venelaserkeilausta särkän päällä tapahtuvalla keilauksella saadaan kartoitettua jokiympäristö kokonaisuudessaan. Lyzenga-algoritmilla tehtävä jokiومان syvyyskartoitus on tehokas kartoitusmenetelmä varsinkin kirkasvetisissä joissa. Menetelmällä saadaan mallinnettua uoman syvyys vähintään 15 cm tarkkuudella. Tämä tarkkuus on erittäin hyvä verrattuna uoman GPS-mittauksiin. Se kilpailee kattavuuden suhteen myös monikanavaisen viistokaikuluotauksen kanssa. Menetelmä mahdollistaa myös uoman tilan tutkimisen taaksepäin, mikäli joki on taannoin ilmakuvaattu oikeavärifilmille. Yllä mainitut menetelmät mahdollistavat entistä tarkemmat jokiympäristön kartoitukset ja niitä voidaan hyödyntää tulviin varautumisen suunnittelun eri vai-

heissa niin tulvamallinnuksen lähtöaineistoina kuin tilannekuvan hankkimisessa itse tulvatilanteessa.

### Kirjallisuus

- Alho, P., Kukko, A., Hyypä, H., Kaartinen, H., Hyypä, J. & Jaakkola, A. 2009. Application of boat-based laser scanning for river survey. *Earth Surface Processes and Landforms* 34(13): 1831–1838.
- Alho, P., Vaaja, M., Kukko, A., Kasvi, E., Kurkela, M., Hyypä, J., Hyypä, H. & Kaartinen, H. 2011. Mobile laser scanning in fluvial geomorphology: mapping and change detection of point bars. *Zeitschrift Für Geomorphologie* 55 (Suppl. 2): 31–50.
- Flener, C., Lotsari, E., Alho, P. & Käyhkö, J. 2012. Comparison of empirical and theoretical remote sensing based bathymetry models in river environments. *River Research and Applications* 28(1): 118–133.
- Hohenthal, J., Alho P., Hyypä, J. & Hyypä, H. 2011. Laser scanning applications in fluvial studies. *Progress in Physical Geography* 35(6): 782–809.
- Orell, I., Alho, P. & Hyypä, H. 2010. EU:n tulvadirektiivi ja tulvatiedon välittämisen sekä visualisoinnin haasteet. *Terra* 122(2): 75–85.

■ Petteri Alho, Leena Laamanen, Elina Kasvi, Yunsheng Wang & Claude Flener, Turun yliopisto, Maantieteen ja geologian laitos. Sähköposti mipeal@utu.fi