

Vakkilainen P. (1981) Vesitasemallien kehittäminen vesien käytön suunnittelua varten.

Loppuraportti Suomen Akatemialle, 13 s.

Pertti Vakkilainen

20.1.1981

VESITASEMALLIEN KEHITTÄMINEN VESIEN KÄYTÖN SUUNNITTELUA
VARTEN / LOPPURAPORTTI

TUTKIMUKSEN TAVOITE

Tutkimuksella on selvitetty eräiden hydrologian mallien soveltuvuutta ja käyttökelpoisuutta suomalaisissa olosuhteissa.

TUTKIMUKSEN SUORITTAJAT, SUORITUSPAIKKA- JA AIKA

Tutkimuksen koordinoinnista on vastannut vs. apul.prof. Pertti Vakkilainen. Tutkimustyön aikana on voitu tukeutua dipl.ins. Heikki Teräsvirran asiantuntemukseen. Tutkimusapulaisina ovat toimineet tekniikan ylioppilaat Erkki A. Järvinen, Markku Järvinen, Marja Hiitiö ja Tuomo Karvonen.

Tutkimuksen suorituspaikkoina ovat olleet Teknillisen korkeakoulun vesitalouden laboratorio ja Oulun yliopiston vesirakennustekniikan laitos. Tutkimus on alkanut 1.4.1978 ja se on päättynyt 31.12.1980. Eräät julkaisuista ovat vielä keskeneräisiä.

TUTKIMUSAINEISTO

Tutkimus on pääosin perustunut maataloushallituksen vesiteknilisissä tutkimuksissa kertyneeseen havaintoaineistoon. Tutkimusalueilta on ollut käytettävissä päivittäiset sadantahavainnot

ja vedenkorkeushavainnot, jotka tarkistettujen purkautumiskäyrien avulla on voitu muuntaa virtaamiksi. Lumeen liittyvät laskelmat on perustettu lumilinjoilla tehtyihin mittauksiin, joita on suoritettu vuosittain 10. maaliskuuta alkaen viiden vuorokauden välein lumen häviämiseen asti. Roudan syvyyttä on po. linjoilla havaittu routarautaa käyttämällä 15. maaliskuuta alkaen 15 vuorokauden välein roudan häviämiseen asti. Lumen sulantaa koskevassa osassa tarvitut meteorologiset havainnot on saatu Ilmatieteen laitoksen arkistosta. Maataloushallituksen aineiston ohella on tutkimuksessa käytetty Siuntionjoen ja Kyrönjoen vesistöalueilta koottuja havaintoja.

TUTKIMUKSEN TOTEUTUSTAPA JA TULOKSET

Tutkimus on toteutettu kolmessa osassa:

1. Tutkimus lineaarisista sadanta-valuntamalleista ja niiden soveltuvuudesta Suomen olosuhteisiin
2. Tutkimus lumen sulannasta ja sen aiheuttaman valunnan arvioinnista
3. Tutkimus SSARR-mallin soveltuvuudesta vesistöjen suunnitteluun ja käyttöön Suomessa

Osatutkimusten tulokset ja soveltamismahdollisuudet käyvät ilmi seuraavista yhteenvedoista:

Tutkimus lineaarisista sadanta-valuntamalleista ja niiden soveltuvuudesta Suomen olosuhteisiin

Sadanta-valuntaprosessin kuvaamisessa yksikkövaluntakäyräperiaatteen soveltaminen on ollut keskeisellä sijalla hydrologiassa aina 1930-luvulta lähtien. Tätä muualla maailmassa suosittua lähestymistapaa ei Suomessa kuitenkaan ole käytetty eräitä orientoivia selvityksiä lukuunottamatta. Nyt suoritetun tutkimuksen tarkoituksena on ollut selvittää lineaaristen mallien soveltuvuutta meikäläisissä olosuhteissa, kun sadanta-valunta-aineisto on suunnittelutehtäviä ajatellen sillä tavoin tyypillistä, että käytettävissä on ainoastaan vuorokausiarvoja.

Lineaarisista yksikkövaluntakäyräteoriaan perustuvista malleista on testattu Nashin mallia, ns. Matrix Inversion-mallia ja Picomo-mallijoukkoa, joka sisältää 17 eri mallia. Picomo-malleista suunnittelija voi valita parhaimman pitämällä hyvyyskriteereinä ns. muototekijää (model shape factor) sekä havaittujen ja laskettujen arvojen erotusta.

Tutkimusalueita ovat olleet seuraavat:

	Pinta-ala (km ²)	Järvisyys (%)
Putaanjoki Koski	94	1
Putaanjoki, Vihtjärvenoja	29	3
Mynäjoki, Raasinhaara	37	1
Kähtävänoja, Kähtävä	60	2
Kalliojärvi	48	6
Valkeajoki	16	10
Hirvosenjärvi	7	22

Havainnot ovat vuosilta 1931...1942.

Tutkimuksen aikana ovat selvästi käyneet ilmi yksikkövalunta-käyräperiaatteen soveltamisen keskeiset vaikeudet: tehoisan (= pintavaluntaa aiheuttavan) sadannan määrittäminen ja pohja-valunnan erottaminen. Tehoisan sadannan erottaminen osoittautui kaikkein hankalimmaksi. Suomessa kesäsateiden rankkuus on siksi pieni, että ne aiheuttavat merkittäviä valuntakumpuja vain harvoin, sillä sadannan häviöt ovat suhteellisen suuria. Ongelmaa kasvattaa edelleen se seikka, että aluesadannan riittävän tarkka määritys edellyttää runsaasti enemmän sadehavaintoasemia, kuin normaalisti on käytettävissä. Pohjavalunnan erottaminen suoritettiin piirtämällä virtaamakäyrä logaritmipaperille, jolloin pintavalunnan loppuminen näkyi yleensä selvänä taitepisteenä.

Eri alueilla on suoritettu yksikkövaluntakäyrän määrääminen po. malleilla. Joiltakin osin saatujen tulosten analysointi on kesken, mutta eräitä johtopäätöksiä on jo vedettävissä. Eri sadetapahtumista määritetyt yksikkövaluntakäyrät eroavat monissa tapauksissa melkoisesti toisistaan. Nashin mallilla tämä hajonta on yleensä pienempi kuin Matrix-Inversion-mallilla. Järvien alan (%) kasvaessa yksikkövaluntakäyrän määrittäminen vaikeutuu eikä Hirvosenjärven alueella po. määritystä voitu tehdä lainkaan selvien sateesta aiheutuneiden valuntakumpujen puuttuessa. Picomolla voitiin todeta, että kaksiparametriset mallit antoivat yleensä yksiparametrisia malleja parempia tuloksia.

Tutkimus sulannasta ja sulannan aiheuttamasta valunnasta

Suomessa ollaan parhaillaan hydrologisissa suunnittelu- ja tutkimustehtävissä siirtymässä erilaisten tietokonemallien käyttöön myös lumen sulannan aiheuttaman valunnan laskemiseksi. Tästä syystä on tullut ajankohtaiseksi selvittää erilaisia lumen sulannan arviointimenetelmiä, joita tähän asti Suomessa on tutkittu varsin vähän. Tämän työn alkuosassa on keskitytty lumipeitteen eräiden yleisten ominaisuuksien, kuten maksimisyvyyden ja -vesiarvon sekä sulamisnopeuden lisäksi varsin yleisen sulantaindeksin, ns. astepäivätekijän laskentaan. Koska nyt käyttöön otettavat mallit ovat jo varsin pitkälle kehittyneitä eikä yksinkertaisempia malleja ole kokeiltu juuri lainkaan, työn loppuosassa on pääpiirteittäin pyritty selvittämään aikaisemmin muualla varsin käytetyn menetelmän, ns. yksikkövaluntakäyrän, soveltuvuutta Suomen olosuhteisiin. Samalla on käytännössä pystytty testaamaan saatuja astepäivätekijöitä.

Tutkimusalueiksi on valittu Maataloushallituksen vesiteknillisten tutkimusten havaintoalueista Huhtisuon alue Ruokolahdelta, Alasenjärven alue Rantasalmelta ja Ylijoen alue Ranualta. Tutkimuksen loppuosassa on kultakin havaintoalueelta valittu yksi valuma-alue, joiden pinta-alat vaihtelevat 4.5-8.0 km² välillä ja järviprosentit 0-22 % välillä. Mukaan on tällöin otettu myös Kosken valuma-alue Putaanjoelta, joka on järvetön ja pinta-alaltaan 93.5 km². Kosken valuma-alueella peltoja on noin 40 % pinta-alasta. Muilla alueilla peltoprosentti vaihtelee 0-15 % välillä. Lumimittauksia on suoritettu

vuosina 1934-58, ja ne ovatkin varsin edustavia. Virtaamien simulointiin on kultakin valuma-alueelta valittu havaintojen epätäydellisyyden vuoksi vain 3-10 kevättä.

Lumipeitteen ominaisuuksia tutkittaessa on lumen syvyyden keskimääräisiksi kevätmaksimeiksi saatu eteläisimmillä alueilla aukealle 52-53 cm, harvahkolle metsälle 55-57 cm ja tiheähkölle metsälle 49-53 cm. Ylijoen alueella on aukealle saatu arvo 79 cm ja harvahkolle metsälle 89 cm. Lumen vesiarvon keskimääräiseksi kevätmaksimiksi on eteläisillä alueilla saatu aukealle 120-140 mm, harvahkolle metsälle 127-140 mm sekä tiheähkölle metsälle 104-129 mm. Ylijoen alueen vastaavat arvot ovat 203 mm ja 216 mm. Sekä lumen syvyyden että vesiarvon suurimmat maksimit ovat olleet harvahkossa metsässä, missä tuulen vaikutus on pieni eikä lunta vielä pidähtäydy oksistoon kovinkaan paljon. Lumen syvyyden maksimit ovat osuneet kaikissa tyyppiryhmissä suunnilleen samaan ajankohtaan; eteläisillä alueilla maaliskuun 19. päivään ja Ylijoella maaliskuun vaihteeseen. Vesiarvon maksimit ovat sattuneet hieman myöhemmin kuin syvyyden maksimit; etelässä maaliskuun 25.-31. päivän välille ja Ylijoella huhtikuun 12.-14. päivän välille.

Lumen sulamisnopeutta on tutkittu ns. lumipeitteen vedentuotolla eli sulannan ja sadannan summalla eri pitkinä aikoina. Suhteelliset vedentuotot, jotka on laskettu prosentteina kevään maksimivesiarvosta, eivät poikkea eri tyyppiryhmissä toisistaan, vaikka absoluuttisten arvojen välillä eroa onkin. Alueittain tarkasteltaessa suhteellisetkin arvot eroavat jonkin verran toisistaan, mikä johtuu erilaisista sademääristä.

5 vuorokauden keskimääräiseksi suhteelliseksi maksimivedentuotoksi on saatu noin 40-50 % kevään maksimivesiarvosta, 30 vuorokauden vastaava arvo on etelässä noin 120 % ja Ylijoella 100 %.

Lumen sulannan arviointimenetelmistä on otettu tarkasteltavaksi ns. astepäivätekijä. Se määritellään sulannaksi, joka syntyy yhtä tietyn rajalämpötilan ylittävää lämpötilastetta kohden. Tässä työssä rajalämpötilaksi on valittu 0°C ja käytetyt lämpötilat ovat vuorokauden keskilämpötiloja. Aktiivisen sulamiskauden alusta laskettuna keskimääräiseksi astepäivätekijäksi on saatu aukealle $3.09 \text{ mm}/^{\circ}\text{C d}$, harvahkolle metsälle $2.80 \text{ mm}/^{\circ}\text{C d}$ ja tiheähkölle metsälle $2.24 \text{ mm}/^{\circ}\text{C d}$. Astepäivätekijä on suurin aukealla, mutta aukean ja harvahkon metsän arvot eivät poikkea paljoakaan toisistaan sulamiskauden loppupuolella. Sateettomille jaksoille lasketut arvot ovat edellisiä hieman pienempiä, mutta havaintojen määrä on liian pieni sateen vaikutuksen selvittämiseksi. Selvää astepäivätekijän kasvua sulamiskauden edetessä ei ole saatu esille, sillä yöpakkasilla ja lumisateilla on tasoitettava vaikutus keskiarvoja laskettaessa. Astepäivän hyvyttä sulantaindeksinä on tarkasteltu lineaarisen korrelaation avulla. Korrelaatiokertoimet vaihtelevat välillä 0.623-0.819, mitkä havaintojen määrään nähden ovat varsin merkittäviä.

Työn loppuosa muodostuu yksikkövaluntakäyrän soveltamisesta neljälle valuma-alueelle. Käyrän kalibrointi on suoritettu kullekin alueelle erikseen ja hyvyyskriteereinä on käytetty normeerattua hyvyyskriteeriä ja laskettujen ja havaittujen

virtaamahuippujen lineaarista korrelaatiota. Havaintokevään vähäisen määrän takia testausta ei ole suoritettu. Saatut tulokset eivät anna vakuuttavaa kuvaa yksikkövaluntakäyrän soveltuvuudesta Suomen olosuhteisiin. Normeeratun hyvyyskriteerin arvot vaihtelevat välillä -73.392-0.923 ja huippujen lineaarisen korrelaation arvot välillä 0.781-0.998. Laskettujen ja havaittujen virtaamahuippujen väliset poikkeamat ovat keskimäärin 2-6 vrk. Suurin poikkeama on 23 vrk. Saatuun tulokseen ovat vaikuttaneet lähinnä lähtöarvojen luotettavuus ja alueen järvisyys. Sulanta on laskettu edellä saatujen astepäivätekijöiden avulla, ja näin saatu sulannan ajallinen jakauma poikkeaa eräinä vuosina merkittävästi todellisesta. Vedentuottoa laskettaessa ei ole myöskään otettu huomioon haihduntaa, mikä etenkin järvisillä alueilla aiheuttaa suurta virhettä. Myös virtaamahavaintojen epäluotettavuus on vaikuttanut tulokseen.

Kalibrointi on onnistunut parhaiten järvettömillä alueilla, jolloin häviöiden osuus on pienin. Myös alueen laajuudella on merkitystä kalibroinnin onnistumiseen, sillä suurilla alueilla vuorokautiset virtaamavaihtelut ja sulannan laskennassa syntyvät aikajakaumavirheet tasoittuvat viipymän kasvaessa. Jos laskentajaksoksi olisi valittu vuorokautta pitempi aikajakso, kalibrointi olisi voinut onnistua kaikilla alueilla paremmin. Roudan syvyydellä ei ole todettu olevan suoranaista vaikutusta kevätaikaiseen virtaamaan.

Yksikkövaluntakäyrä näyttää soveltuvan vain järvettömille alueille ja sen soveltaminen vaatii suurehkon työmäärän. Sentähden ei sillä tämän työn perusteella ole nähtävissä käytännön merkitystä Suomen olosuhteissa.

Tutkimus SSARR-mallin soveltuvuudesta vesistöjen suunnitteluun ja käyttöön Suomessa

Sadanta-valuntamallilla simuloidaan veden kiertokulkua luonnossa. Useimmat ulkomailla laaditut mallit eivät sovellu sellaisenaan Suomen vesistöihin, sillä maamme on tunnetusti hydrologisessa mielessä poikkeuksellista aluetta ilmastoltaan, maaperältään ja vesistöominaisuuksiltaan. Tässä tutkimuksessa selvitettiin USA:ssa Columbiajoen alueella kehitetyn SSARR-mallin soveltuvuutta vesistöjen suunnitteluun ja käyttöön Suomen olosuhteissa.

SSARR-mallia kalibroitaessa ja testattaessa tarvitaan lähtötietoina päivittäiset sadanta-, lämpötila- ja virtaamarvot. Mallissa on 13 kalibroitavaa parametria. Sadanta jaetaan kolmeen valuntakomponenttiin, joiden ajoitusta säädellään hypoteettisten altaiden lukumäärän ja viipymän avulla. Sadannan olomuoto testataan lämpötilan avulla. Syöttötietona annettavan rajalämpötilan yläpuolella sadanta tulkitaan vedeksi, alapuolella lumeksi. Haihduntaindeksi voidaan antaa mallille joko kuukausikeskiarvona tai päivittäisinä arvoina (esim. Class A-astiahaihdunta). Sulannan laskemisessa käytetään astepäivätekijää. Järvialtaiden käsittelymahdollisuudet ovat erittäin monipuoliset. Altaiden

laskenta perustuu mallissa jatkuvuusyhtälön ratkaisemiseen. Mallin soveltuvuutta selvitettiin ensi vaiheessa Siuntionjoen vesistöalueelta koottua havaintoaineistoa käyttäen. Tästä selvityksestä saatujen myönteisten kokemusten perusteella päätettiin käyttää mallia todellisessa suunnittelutilanteessa.

Kohdealueena käytettiin Kyrönjoen vesistöä, jonka valuma-alue on $4\,920\text{ km}^2$ ja järvisyys 0.9 %. Kyrönjoen alueella on Kyrkösjärven altaan valmistumisen jälkeen säännösteltävää varastotilavuutta yhteensä 76 milj.m^3 . Vesistöalueen luontainen varastotilavuus on alle 10 milj.m^3 . Useimmat luonnontilaiset järvet sijaitsevat vesistön latvaosilla, joten niillä on tulvahuipun suuruuteen hyvin vähän vaikutusta. Vesistöalueen kolme suurinta säännöstelyallasta ovat Kalajärvi, Kyrkösjärvi ja Pitkämö.

Malli kalibroitiin vuosien 1961...1967 arvoja käyttäen. Mallin soveltuvuus selvitettiin neljältä sadeasemalta kerättyjä tietoja käyttäen. Sulannan laskemisessa tarvittavat lämpötilahavainnot saatiin Ylistaron koeasemalta, samoin kuin potentiaalisen haihdunnan indeksinä käytetyt Class A-astiahavainnot. Astiasta tapahtuvan haihdunnan ja potentiaalisen evapotranspiraation välistä suhdetta määrittäessä pyrittiin ottamaan huomioon mm. maan lämpövaraston muutokset. Eri kuukausina käytetyt ko. suhteen arvot olivat: toukokuussa 0.50, kesäkuussa 0.70, heinäkuussa 0.85, elokuussa 0.95 ja syyskuussa 1.00.

Sulantaa laskettaessa sulantaparametrin arvoksi saatiin aktiivisena sulanta-aikana keskimäärin $2.1 \text{ mm/}^{\circ}\text{C d}$ (vaihteluväli oli $1.5 \dots 3.0 \text{ mm/}^{\circ}\text{C d}$). Keskitalvella parametrin arvo oli $1.2 \text{ mm/}^{\circ}\text{C d}$. Rajalämpötilan optimiarvoksi saatiin 0.0°C , eli sulantaa tapahtuu, jos keskilämpötila on positiivinen. Sateen olomuodon ratkaisevaksi kriittiseksi lämpötilaksi saatiin 0.8°C . Ko. lämpötilan yläpuolella sadanta tulkitaan vedeksi, alapuolella lumeksi.

Kalibroinnin onnistumisen mittana käytetyn normeeratun hyvyysluvun arvo oli 0.96. Huippujen osalta mallin kalibroinnin voi katsoa onnistuneen hyvin. Sen sijaan alivesikausien simuloinnin tulokset olivat korkeintaan tyydyttäviä. Alivirtaamien laskennan vaikeus johtui siitä, että maankosteuden vaihtelua ei saatu toimimaan luotettavasti. Neljällä sadeasemalla ei kesäajan aluesadantaa pystytty määrittämään läheskään riittävällä tarkkuudella. Astiahaihdunnan ja potentiaalisen evapotranspiraation suhde oli elokuussa (0.95) ja syyskuussa (1.9) liian suuri. Tämä johtuu siitä, että interseptiohaihdunta pienenee viljankorjuun myötä. Samoin transpiraatio pienenee. Elo- ja syyskuun liian suuri haihdunta mallissa aiheutti systemaattisen virheen koko syksyajan laskettuihin virtaamiin.

Malli testattiin käyttäen vuosien 1971...1977 havaintoja. Normeeratun hyvyysluvun arvo oli testijaksolla 0.94. Ylivirtaamien simulointi ei onnistunut niin hyvin kuin kalibrointijaksolla. Systemaattinen virhe oli havaittavissa, sillä merkkitestin mukaan riskitaso oli noin 1 %.

Työssä kokeiltiin sadanta-valuntamallin soveltuvuutta tulovirtaamien ennustamiseen. Kun on kyse tulovirtaamasumman ennustamisesta useita kuukausia eteenpäin, ei valuntamalleilla voitane saavuttaa oleellisesti parempia tuloksia regressiomalleihin verrattuna. Ennustekauden pituuden ollessa alle kaksi kuukautta voidaan valuntamallin käyttöä suositella.

Näin etenkin silloin, kun ylivaluman sattumisaika on yli kaksi viikkoa myöhemmin kuin lumen sulamisen ajankohta. Tällöin ennusteet voidaan tehdä todelliset, mitatut, lämpötilat tuntien.

SSARR-mallilla laadittiin Kyrönjoen vesistöalueelle kevään 1980 tulovirtaaman pitkän ja lyhyen ajan ennusteet. Pitkän ajan ennusteet tehtiin vuosien 1960-1979 meteorologisten havaintojen perusteella. Näin saatu tulovirtaamasumman ennuste oli liian pieni koko ennustekauden (1.5 kuukautta) ajan.

Munakan vedenkorkeusasteikon ylivedenkorkeuden pitkän ajan ennusteet laadittiin vastaavalla tavalla. Ennustettu HW-lukema oli 530-550 (ennustehetkellä lukema oli 150). Keväällä 1980 havaittu suurin lukema oli 556 eli muutama cm yli ennustetun. SSARR-mallia käytettiin myös lyhytaikaiseen ennustamiseen. Ennusteet tehtiin kaksi kertaa viikossa käyttäen ilmatieteen laitoksen viiden ja kymmenen vuorokauden sääennusteita. Malli pidettiin jatkuvasti "reaaliajassa" syöttämällä mallille päivittäin todelliset lämpötilat ja sadannat. Lyhytaikaisiin sääennusteisiin perustuvalla menetelmällä pystyttiin ennustamaan tulvahuipun ajoitus noin viikko ennen huipun ajankohtaa.

Työssä kokeiltiin myös SSARR-mallin soveltuvuutta suunnittelukäyttöön. Kyrönjoen yläosan vesistösuunnitelma sisältää joen perkauksen ja pengerryksen nk. Munakan tulva-alueella. Mallilla laskettiin virtaamat ja vedenkorkeudet suunnitelman toteuttamisen jälkeisessä tilanteessa. Laskelmat tehtiin vuoden 1966 tulovirtaamia käyttäen. Ko. vuosi edustaa toistuvuudeltaan kerran 50 vuodessa sattuvaa tulvaa. Suunnitelma puolestaan on mitoitettu tulvalle, jonka toistumisaika on 20 vuotta.

Mallilla laskettiin noin 40 erilaista säännöstelyvaihtoehtoa. Näiden avulla määrättiin lullekin altaalle paras mahdollinen täytön aloitusajankohta (tulva yksihiippuinen). Vaihtoehtojen hyvyyden kriteerinä käytettiin katastrofialtaaseen (Rintalanalustan pengeralue) purkautuvan veden määrää. Huonoin vaihtoehto (altaiden säännöstely epäonnistuu täysin) johtaisi tilanteeseen, jossa katastrofialtaan vedenpinta olisi 20 cm suurinta sallittua arvoa korkeammalla. Penkereiden rakentamisen jälkeinen maksimivirtaama olisi tällöin lähes sama kuin suurin luonnontilainen virtaama.