

Maija Paasonen-Kivekäs, Rauno Peltomaa, Pertti Vakkilainen, Helena Äijö (toim.)



MAAN VESI- JA RAVINNETALOUS

Ojitus, kastelu ja ympäristö

Maija Paasonen-Kivekäs, Rauno Peltomaa, Pertti Vakkilainen, Helena Äijö (toim.)

Maan vesi- ja ravinnetalous

Ojitus, kastelu ja ympäristö

3.6 Mitoitusvirtaamat

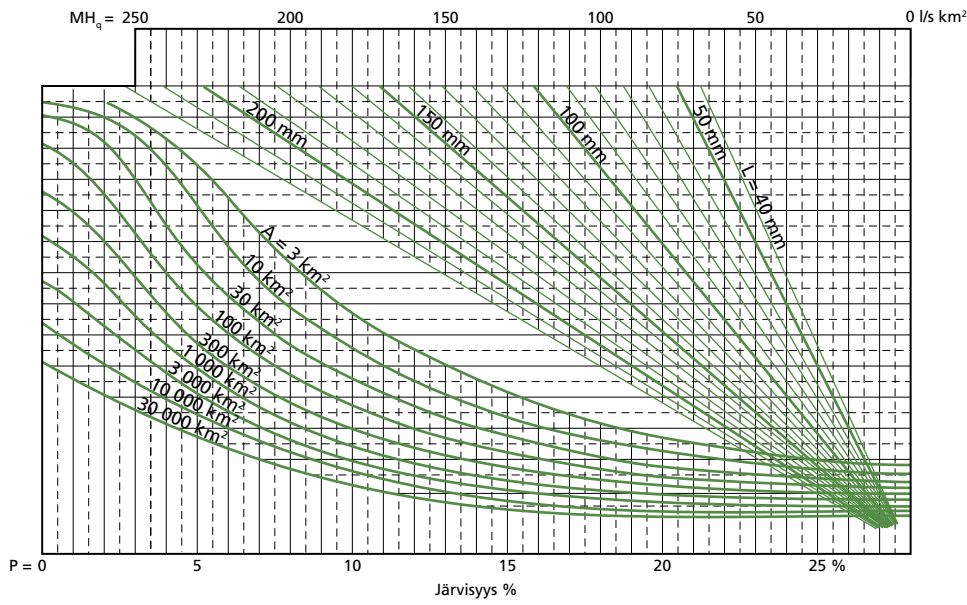
Hanne Laine-Kaulio ja Pertti Vakkilainen

Avouomien mitoitusvirtaamat voidaan määrittää yksinkertaisimmillaan mitoitusyötä varten laadittujen nomogrammien avulla. Mikäli suunnittelukohteesta on käytettävissä pitkäaikaisia virtaamahavaintoja, voidaan suorittaa myös toistuvuusanalyysi. Jos suunnittelukohteesta ei ole saatavilla riittäviä virtaama-aikasarjoja toistuvuusanalyysin pohjaksi, käyttökelpoisen menetelmän voi tarjota myös ns. vertailuvesistön käyttö. Vertailuvesistömenetelmässä kohdealueen ja vertailuvesistön tulisi olla lähelle samankokoisia ja luonnonolosuhteiltaan samankaltaisia, jolloin kohdealueen virtaamat saadaan vertailuvesistön mitoitusvirtaamista valuma-alueiden suhteella kertomalla. Tarkastellaan seuraavassa ensin ylivirtaamien arviointia nomogrammien avulla, ja sitten ylivirtaamien ja alivirtaamien määrittämistä toistuvuusanalyysin avulla. Tietoruudussa 3.9 on yhteenveto pienten valuma-alueiden verkostosta Suomessa.

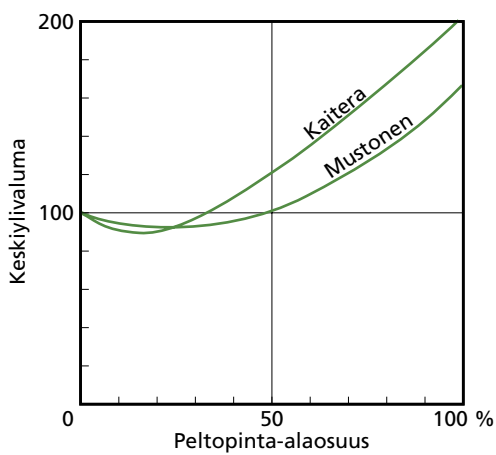
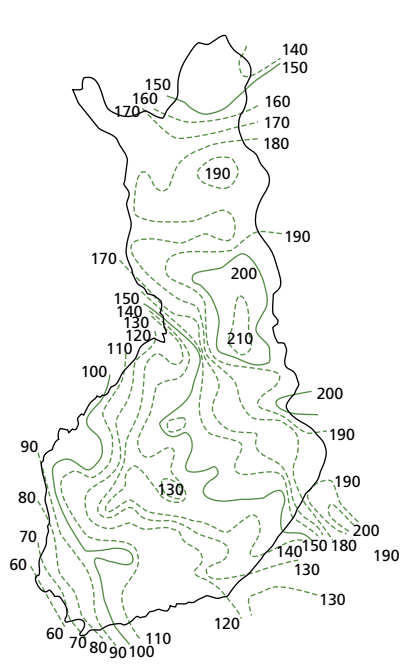
Ylivirtaamien arviointi nomogrammien avulla

Suurimmat virtaamat aiheutuvat Suomessa taajama-alueita lukuun ottamatta lumen kevät-aikaisesta sulamisesta. Kaiteran (1949) laatiman nomogrammin (kuva 3.40) avulla saadaan nopeasti määritetyksi keskiylivaluma lumen keskimääräisen maksimiviesiarvon (kuva 3.41), valuma-alueen pinta-alan ja järviprosentin perusteella. On kuitenkin huomattava, että mikäli valuma-alueella on järviä ja ne sijaitsevat alueen latvaosissa, ovat keskiylivalumat oletettavasti nomogrammin antamia arvoja suurempia; vastaavasti jos alajuoksulla

on suuri järvi, keskiylivaluma pienenee sen prosenttiosuuden verran, jonka järvi muodostaa valuma-alueen pinta-alasta. Mikäli vesistö on voimakkaasti säännöstelty, voivat arvot myös tästä syystä muuttua. Lisäksi jos alueella on runsaasti karkeitä, läpäiseviä maalajeja, ylivalumat pienenevät. Pellon vaikutus valumaan on puolestaan monitahoinen ja riippuu muun muassa peltöjen sijainnista ja määrästä (kuva 3.42).



Kuva 3.40 Kaiteran (1949) nomogrammi keskiylivaluman (MHq) arvioimiseksi valuma-alueen järvisyysprosentin, pinta-alan (A) ja keskimääräisen vuotuisen lumen maksimivesiarvon (L) perusteella.



Kuva 3.41 (vas) Lumen vesi-arvon keskimääräinen vuosimaksimi (mm) vuosina 1892-1941 (Kaitera 1949).

Kuva 3.42 (ylh) Peltopinta-alaosuuden vaikutus keskiylivalumaan pienillä järvettömillä valuma-alueilla (Kaitera 1949 ja Mustonen 1968).

Tietoruutu 3.9

Vertailuvesistöpankit

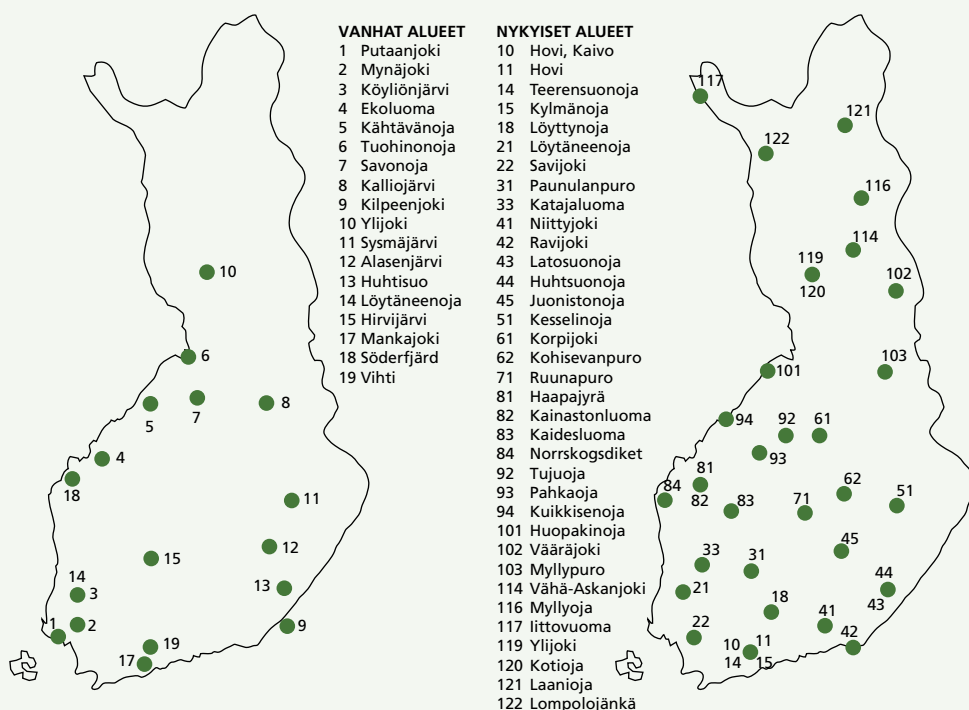
Maataloushallituksen toimesta perustetut pienten valuma-alueiden verkostot tarjoavat havaintotietoja, joita voidaan käyttää hyväksi vesiteknisiä toimenpiteitä suunniteltaessa sellaisille alueille, joilta hydrologisia havaintoja ei ole käytettävissä.

Havaintotoiminta, joka oli aloitettu vuonna 1929, järjestettiin 1930-luvun alkupuolella 17 alueen verkostoksi, joilla oli yhteensä 50 virtaama-asteikkoa. Verkostoon otettiin mukaan valuma-alueita, jotka olivat pienempiä kuin 200 km². Verkoston luonnonolosuhteiden, kuten järvisyyden, maaperän, topografian, kasvipeitteen ja viljelytilan piti vastata mahdollisimman hyvin maassamme esiintyviä olosuhteita.

Luotettaviksi todettuja virtaamasarjoja tallennettiin Teknillisen korkeakoulun vesitalouden laboratorion toimesta sähköiseen muotoon ja toimitettiin Suomen ympäristökeskuksen tietojärjestelmiin.

Havaintoverkosto uusittiin 1950-luvun lopulta alkaen. Ainoastaan neljä vanhan verkoston alueista hyväksyttiin mukaan uuteen verkostoon. Alueet valittiin eri puolilta maata siten, että ne edustivat paikkakunnan hydrologisia oloja mahdollisimman hyvin. Alueet ovat järvettömiä. Verkostoon kuului enimmillään yli 90 virtaama-asemaa, joista nykyään toiminnassa on vajaa puolet.

Pienten valuma-alueiden havainnot ovat saatavissa Suomen ympäristökeskuksesta.

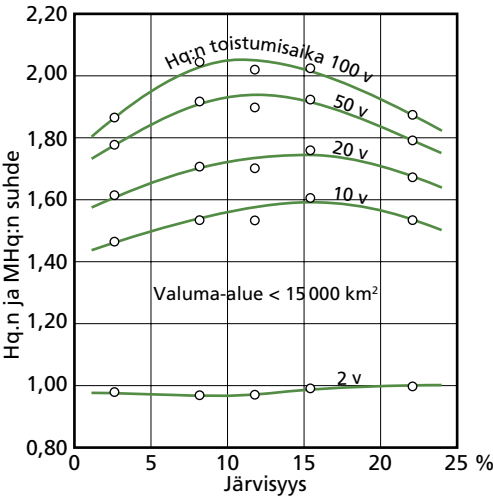


Kuva T3.6 Pienten valuma-alueiden sijainti

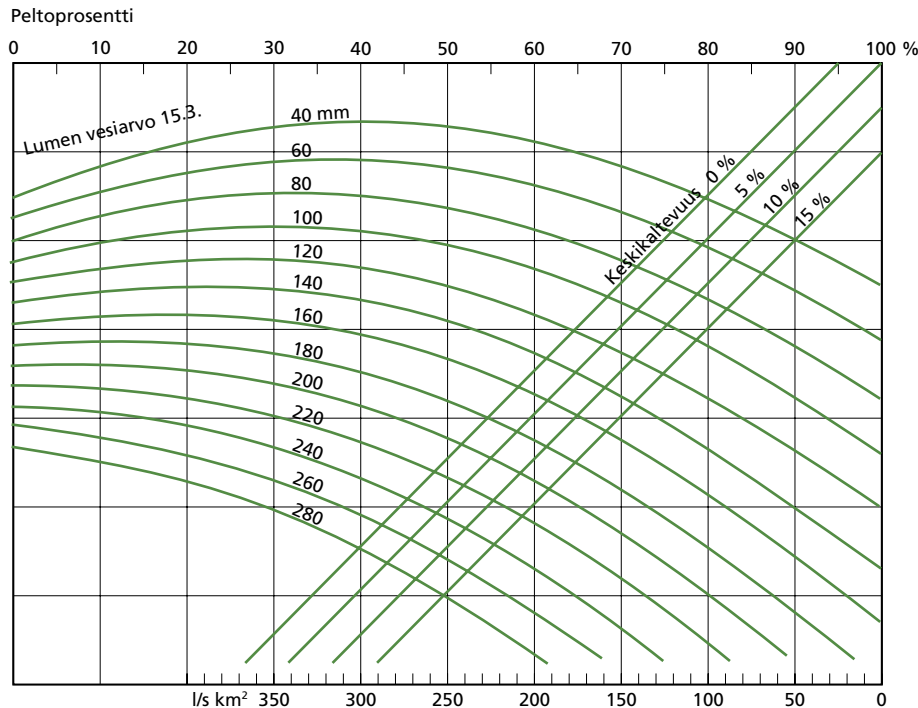
Lähde: vanhat alueet, Stenberg ja Vakkilainen 2009.

Keskiylivalumaa harvemmin tapahtuvat ylivalumat voidaan arvioida kertomalla keskiylivaluma-arvot Niinivaaran (1961) nomogrammista saatavilla kertoimilla (kuva 3.43). Pienten, järvettömien valuma-alueiden ylivalumien määrittämiseen on puolestaan käytettävissä Mustosen (1968) esittämä menetelmä (kuva 3.44), jossa ylivaluma määritetään valuma-alueen keskikaltevuuden ja peltoprosentin sekä maaliskuun 15. päivän mukaisen lumen vesiaron perusteella.

Eräitä muita mitoitusvirtaamien määrittämiseen laadittuja nomogrammeja esitetään luvussa 6.



Kuva 3.43 Ylivaluman (H_q) suhde keskiylivalumaan (MH_q) alle 15 000 km²:n suuruisilla valuma-alueilla (Niinivaara 1961).



Kuva 3.44 Lumen kevätaikaisesta sulamisesta aiheutuvien ylivalumien arviointi pienillä järvettömillä valuma-alueilla maaliskuun 15. päivän mukaisen lumen vesiaron, valuma-alueen keskikaltevuuden ja peltoprosentin avulla (Mustonen 1968).

Ylivirtaamien toistuvuusanalyysi

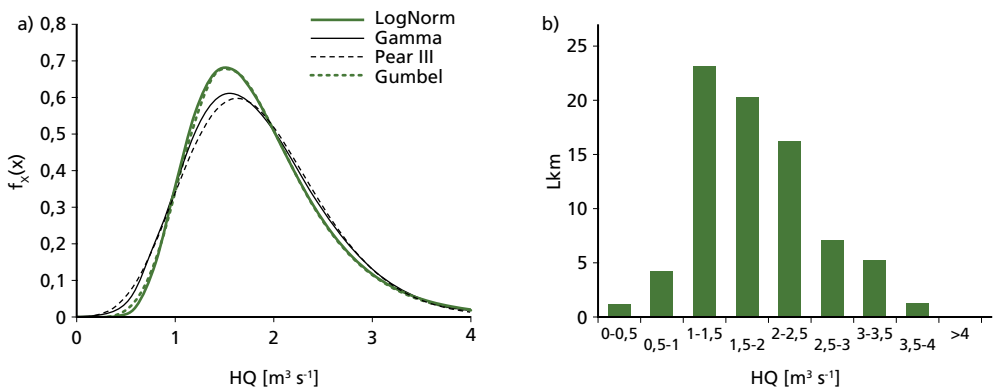
Tulvan suuruutta ja harvinaisuutta kuvataan usein toistumisajan avulla. Ylivirtaaman toistumisaika T tarkoittaa, että kyseinen ylivirtaama saavutetaan tai ylitetään keskimäärin kerran T vuodessa tarkastelun kohteena olevalla alueella. T on riippumaton edellisistä tapahtumista, ja sen käänteisluku p on todennäköisyys, jolla ylivirtaama saavutetaan tai ylitetään minä tahansa vuonna. Esimerkiksi keskimäärin 20 vuodessa tapahtuva tulva saavutetaan minä tahansa vuonna 5 %:n todennäköisyydellä ja kerran 100 vuodessa tapahtuva tulva 1 %:n todennäköisyydellä. Erisuuruisia ylivirtaamia vastaavat toistumisajat – tai toisinpäin, eri toistumisaikoja vastaavat ylivirtaamat – voidaan määrittää todennäköisyysjakaumien avulla.

Kevätaikaisten ylivirtaamahavaintojen oletetaan usein noudattavan Gumbelin jakaumaa, mutta myös Gamma-jakaumat sekä logaritminen normaalijakauma sopivat useimmiten hyvin ylivirtaama-aineistoihin. Yleisesti käytetyt todennäköisyysjakaumat on esitetty Tietoruudussa 3.10. Todennäköisyysjakaumien tiheysfunktioiden kuvaajat on lisäksi esitetty kuvassa 3.45, käyttäen pohja-aineistona Itä-Suomessa sijaitsevan Kesselinpuron valuma-alueen kevätaikaisia ylivirtaamahavaintoja vuosilta 1934–2010. Kesselinpuron verrattain pitkää havaintohistoriaa hyödynnetään yleisesti esimerkkiaineistona tästä eteenpäin toistuvuusanalyysin esittelyssä.

Ylivirtaamahavaintojen ja todennäköisyysjakaumien yhteensopivuutta on perinteisesti arvioitu erityisten jakaumakohtaisten todennäköisyyspapereiden avulla: mitä lähempänä paperille merkityt havainnot ovat lineaarista suoraa, sitä paremmin havaintoaineisto noudattaa kyseisen todennäköisyyspaperin taustalla olevaa todennäköisyysjakaumaa. Todennäköisyyspaperin käyttöä varten havainnot järjestetään ensin suuruusjärjestykseen. Kullekkin havainnolle X_i annetaan järjestysnumero i siten, että suurimman havainnon järjestysnumero on 1 ja pienimmän n :nneksi suurimman havainnon X_i kertymätodennäköisyys U_i saadaan kaavasta:

$$U_i = 1 - F_x(X_i) \quad (3.12)$$

Jos havainnot $\{X_i\}$ noudattavat oletetun todennäköisyysjakauman kertymäfunktia $G(x)$, arvon $X_i = G^{-1}(1 - U_i)$ tulee olla likimain $X_i = G^{-1}(1 - p_i)$, kun todennäköisyyspaperin piste p_i on estimaatti U_i :lle. Toisin sanoen, pisteiden $[G^{-1}(1 - p_i), X_i]$ tulisi sijaita origosta alkavalla suoralla. Kertymätodennäköisyys p_i saadaan puolestaan kaavasta:



Kuva 3.45 Logaritmisen normaalijakauman, Gamma-jakauman, Pearson III –tyypin ja Gumbelin jakauman tiheysfunktioiden $f_x(x)$ kuvaajat (a) sekä ylivirtaamahistogrammi (b) Kesselinpuron valuma-alueen kevätaikaisten ylivirtaamahavaintojen (HQ) perusteella; havaintoaineisto on vuosilta 1934–2010.

Tietoruutu 3.10

Virtaamien toistuvuusanalyysi

Virtaamien toistuvuusanalyysissa käytettyjen todennäköisyysjakaumien tiheysfunktiot $f_X(x)$, kertymäfunktiot $F_X(x)$, tunnusluvut μ_X , σ_X ja γ_X sekä L-momentit λ_1 ja λ_2 (vrt. Stedinger et al. 1992).

Logaritminen normaalijakauma:

$$f_X(x) = \frac{1}{x\sqrt{2\pi\sigma_Y^2}} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{\ln(x) - \mu_Y}{\sigma_Y}\right)^2\right], x > 0, Y = \ln(X) \quad (T3.17)$$

$$F_X(x) = \frac{1}{2} \left[1 + \operatorname{erf}\left(\frac{\ln(x) - \mu_Y}{\sigma_Y\sqrt{2}}\right) \right] \quad (T3.18)$$

$$\mu_Y = \ln(\mu_X) - \frac{1}{2}\sigma_Y^2 \text{ ja } \sigma_Y = \sqrt{\ln\left(1 + \frac{\sigma_X^2}{\mu_X^2}\right)} \quad (T3.19, T3.20)$$

$$\lambda_1 = \exp\left(\mu_Y + \frac{\sigma_Y^2}{2}\right) \text{ ja } \lambda_2 = \exp\left(\mu_Y + \frac{\sigma_Y^2}{2}\right) \operatorname{erf}\left(\frac{\sigma_Y}{2}\right) \quad (T3.21, T3.22)$$

Gamma-jakauma:

$$f_X(x) = \frac{1}{\Gamma(\alpha)\beta^\alpha} x^{\alpha-1} e^{-x/\beta}, x > 0; \alpha, \beta > 0, \text{ jossa} \quad (T3.23)$$

$$\Gamma(\alpha) = \int_0^\infty t^{\alpha-1} e^{-t} dt, \alpha > 0 \quad (T3.24)$$

$$F_X(x) = G\left(\frac{x}{\beta}, \alpha\right) \text{ ja } G(x, \alpha) = \frac{1}{\Gamma(\alpha)} \int_0^x t^{\alpha-1} e^{-t} dt \quad (T3.25, T3.26)$$

$$\mu_X = \alpha\beta \text{ ja } \sigma_X^2 = \alpha\beta^2 \quad (T3.27, T3.28)$$

$$\lambda_1 = \frac{\alpha}{\beta} \text{ ja } \lambda_2 = \frac{\Gamma(\alpha + 0.5)}{\sqrt{\pi}\beta\Gamma(\alpha)} \quad (T3.29, T3.30)$$

Pearsonin III-tyypin jakauma:

$$f_X(x) = |\beta| \left[\beta(x - \xi) \right]^{\alpha-1} \frac{\exp[-\beta(x - \xi)]}{x\Gamma(\alpha)} \quad (T3.31)$$

$$F_X(x) = G\left[\left(x - \mu + \frac{2\sigma}{\gamma}\right) / |0.5\sigma\gamma|, \frac{4}{\gamma^2}\right], \gamma > 0 \quad (T3.32)$$

$$\mu_x = \xi - \alpha / \beta, \quad \sigma_x^2 = \alpha / \beta^2, \quad \gamma_x = 2 / \sqrt{\alpha} \quad (T3.33, T3.34, T3.35)$$

$$\lambda_1 = \xi + \frac{\alpha}{\beta}, \quad \lambda_2 = \frac{\Gamma(\alpha + 0.5)}{\sqrt{\pi} \beta \Gamma(\alpha)} \quad (T3.36, T3.37)$$

Gumbelin jakauma:

$$f_x(x) = \frac{1}{\alpha} \exp \left[-\frac{x-\xi}{\alpha} - \exp \left(-\frac{x-\xi}{\alpha} \right) \right] \quad (T3.38)$$

$$F_x(x) = \exp \left[-\exp \left(-\frac{x-\xi}{\alpha} \right) \right] \quad (T3.39)$$

$$\mu_x = \xi + 0.5772\alpha, \quad \sigma_x^2 = \pi^2 \alpha^2 / 6 \quad (3.40, T3.41)$$

$$\lambda_1 = \xi + 0.5772\alpha, \quad \lambda_2 = \alpha \ln 2 \quad (T3.42, T3.43)$$

Weibullin jakauma:

$$f_x(x) = \left(\frac{k}{\alpha} \right) \left(\frac{x}{\alpha} \right)^{k-1} \exp \left[-\left(\frac{x}{\alpha} \right)^k \right] \quad (T3.44)$$

$$F_x(x) = 1 - \exp \left[-\left(\frac{x}{\alpha} \right)^k \right] \quad (T3.45)$$

$$\mu_x = \alpha \Gamma \left(1 + \frac{1}{k} \right) \quad (T3.46)$$

$$\sigma_x^2 = \alpha^2 \left\{ \Gamma \left(1 + \frac{2}{k} \right) - \left[\Gamma \left(1 + \frac{1}{k} \right) \right]^2 \right\} \quad (T3.47)$$

$$p_i = \frac{i - a}{n + 1 - 2a} \quad (3.13)$$

p_i :n kaavaa kutsutaan eri nimillä käytettäessä eri arvoja kaavan parametrille a . Esimerkiksi kun $a = 0$, kaavaa kutsutaan Weibullin kaavaksi, kun $a = 0.40$, Cunnanan kaavaksi, ja kun $a = 0.44$, Gringortenin kaavaksi. Weibullin kaava on yleisimmin käytetty, kun taas Cunnanan kaavaa pidetään kvanttiliharhattomana vaihtoehtona, ja Gringortenin kaava on Gumbelin jakaumalle optimoitu (Stedinger et al. 1992).

Kuvassa 3.46 on esitetty Kesselinpuron valuma-alueen ylivirtaamat todennäköisyyspaperilla Gumbelin jakauman tapauksessa; todennäköisyyspaperi on kuva suuruusjärjestykseen asetetuista havainnoista X_i verrattuna niiden odotusarvoon $G^{-1}(1 - p_i)$. Parametrin a arvo ei vaikuta merkittävästi tuloksiin.

Havaintojen ja todennäköisyysjakaumien yhteensopivuutta voidaan arvioida numeerisesti vertailemalla havaintoarvojen ja todennäköisyysjakaumista saatavien arvojen välisiä hyvyyslukuja, kuten Nash-Sutcliffen (Nash ja Sutcliffe 1970) hyvyyslukua R_{NS} :

$$R_{NS} = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (\hat{X}_i - X_i)^2}{X_i - \bar{X}} \quad (3.14)$$

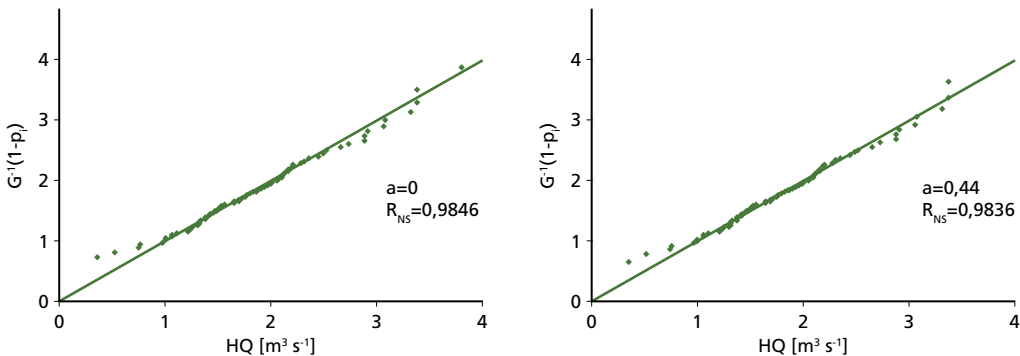
X_i = havainto

$\hat{X}_i$ = jakaumasta saatava arvo

$\bar{X}$ = havaintojen keskiarvo

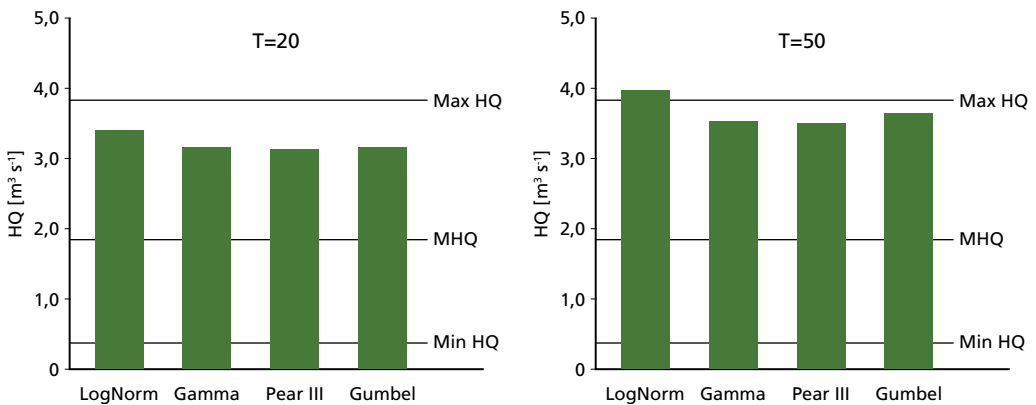
Kesselinpuron valuma-alueella ylivirtaama-aineiston ja eri todennäköisyysjakaumien väliset R_{NS} arvot ovat 0.99 Pearson III -tyypin ja Gamma-jakauman kohdalla, ja 0.98 Gumbelin ja logaritmisen normaalijakauman kohdalla, kun jakaumien mukaisten ylivirtaamien laskennassa käytetään Weibullin kaavalla laskettuja kertymätodennäköisyyksiä. Havaintoaineisto noudattaa siten kaikkia neljää jakaumaa lähes yhtä hyvin. Eri jakaumista saatavat, 20 ja 50 vuoden toistumisaikaa vastaavat ylivirtaamat Kesselinpuron valuma-alueella on esitetty kuvassa 3.47.

Suurimman ylivirtaamaestimaatin tuottaa toistumisajasta riippumatta logaritminen normaalijakauma, toiseksi suurimman Gumbelin jakauma, toiseksi pienimmän Gamma-

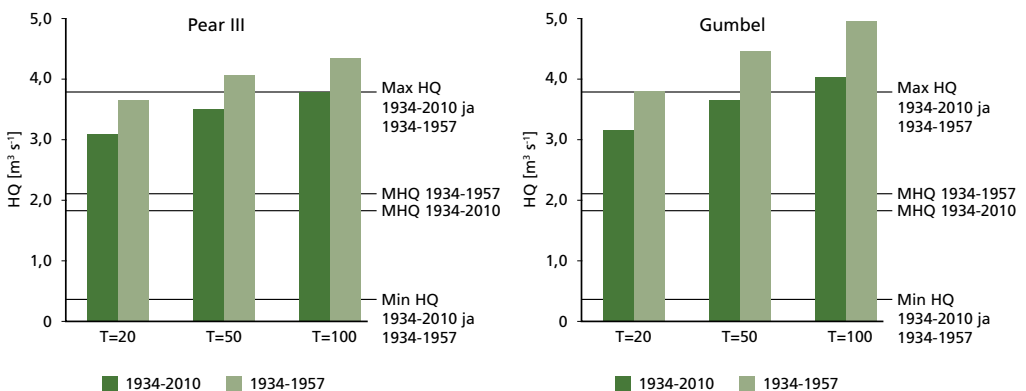


Kuva 3.46 Kesselinpuron valuma-alueella Gumbelin jakaumalla lasketut todennäköisyyspaperin pisteet ja poikkeama oletusjakaumasta, kun $a=0$ ja $a=0.44$; ylivirtaama-arvot (HQ) ovat vuosilta 1934–2010.

jakauma ja pienimmän Pearson III-tyypin jakauma (kuva 3.47). Kesselinpuron havainto-aineiston tapauksessa esimerkiksi ero pienimmän, eli Pearson III –tyypin jakaumasta saadun, ja suurimman, eli logaritmisesta normaalijakaumasta saadun, 50 vuoden toistumisaikaa vastaavan ylivirtaaman välillä on 1.14-kertainen. Suuremmat erot ylivirtaamaestimaatteihin aiheutuvat yleensä käytettävissä olevien havaintojaksojen pituudesta. Kuva 3.48 havainnollistaa eri pituisten havaintojaksojen vaikutusta todennäköisyysjakaumien tunnuslukuihin ja siten jakaumista saataviin ylivirtaamaestimaatteihin. Kuvassa on esitetty tulokset Pearson III –tyypin ja Gumbelin jakauman osalta. Pearson III –tyypin jakauman kohdalla ensimmäisten 24 vuoden (1934-1957) aineistoon pohjautuva, sadan vuoden toistumisaikaa vastaava ylivirtaama on 1.15 kertaa suurempi kuin pitkään, 77 vuoden (1934-2010) aineistoon pohjautuva lukema; Gumbelin jakauman kohdalla ero on 1.23-kertainen.



Kuva 3.47 Eri todennäköisyysjakaumien tuottamat, 20 ja 50 vuoden toistumisaikaa (T) vastaavat ylivirtaamat (HQ) Kesselinpuron valuma-alueella vuosien 1934-2010 havaintoaineiston perusteella; kuvassa on esitetty vertailun vuoksi myös ylivirtaama-aineiston korkein (Max), keskimääräinen (M) ja matalin (Min) HQ-arvo.



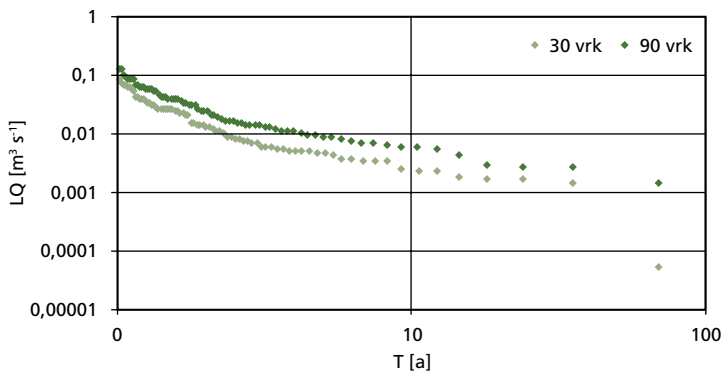
Kuva 3.48 Pearson III –tyypin sekä Gumbelin jakaumasta saatavat 20, 50 ja 100 vuoden toistumisaikaa (T) vastaavat ylivirtaamat (HQ) Kesselinpuron valuma-alueella 24 (1934-1957) ja 77 (1934-2010) vuoden ylivirtaamahavaintojen perusteella; kuvassa on esitetty vertailun vuoksi myös ylivirtaama-aineistojen korkeimmat (Max), keskimääräiset (M) ja matalimmat (Min) HQ-arvot.

Kesselinpuron valuma-alueella sekä suurin että pienin koskaan mitattu ylivirtaama sisältyy ensimmäisten 24 vuoden havaintoaineistoon (kuva 3.48). Vaikka ääriarvot voivatkin sisältyä lyhyisiin aikasarjoihin, on vähäisistä havaintopisteistä koostuva jakauma usein muodoltaan epäedustava ja antaa tarkasteltaville ylivirtaamille joko liian suuria tai pieniä todennäköisyyksiä. Esimerkiksi Kesselinpuron valuma-alueen tapauksessa todennäköisyysjakaumasta saatava, 100 vuoden toistumisaikaa vastaava ylivirtaama on saman suuruinen kuin suurin koskaan havaittu kevätaikainen ylivirtaama Pearsonin III -tyypin jakauman kohdalla, ja vain hieman kyseistä havaittua arvoa suurempi Gumbelin jakauman kohdalla, kun analyysi perustuu pitkään havaintoaineistoon. Lyhyeen havaintoaineistoon pohjautuvat jakaumat tuottavat sen sijaan havaittuja maksimi-arvoja suurempia, sekä 50 että 100 vuoden toistumisaikaa vastaavia ylivirtaamia poikkeuksetta.

Toistuvuusanalyysi tarjoaa käyttökelpoisen tavan ylivirtaaman määrittämiseen avouomien mitoituksessa. On kuitenkin syytä korostaa, ettei ole olemassa hydrologista syytä, miksi jokin käytettävissä olevista todennäköisyysjakaumista sopisi toista paremmin ylivirtaamien kuvaamiseen, tai miksi ylipäättään jokin teoreettisista todennäköisyysjakautumista kuvaisi ylivirtaamien todellista jakautumaa. Yleensä havaintosarjassa on enemmän pieniä kuin suuria tulvia, joten pienet ylivirtaama-arvot tulevat määrääviksi, kun todennäköisyysjakauman parametreja määritetään.

Alivirtaamien toistuvuusanalyysi

Alivirtaamatietoja tarvitaan erityisesti suunniteltaessa pintavesistä tapahtuvaa vedenhankintaa ja jätevesien johtamista vesistöihin. Viime aikoina esille on noussut keskeisesti myös *ympäristövirtaaman* käsite, jolla tarkoitetaan virtaamaa, joka mahdollistaa vesissä olevan elämän. Alivirtaamien toistuvuuden tarkastelussa on käytetty tavallisesti Weibullin todennäköisyysjakaumaa (Tietoruutu 3.10). Kuvassa 3.49 on esitetty esimerkkinä talviaikaisen, 30 ja 90 vuorokauden pituisen alivirtaamakauden keskivirtaamien toistuvuusanalyysi Kesselinpuron valuma-alueella Weibullin todennäköisyysjakauman tapauksessa. Havaittujen ja Weibullin jakauman mukaisten alivirtaama-arvojen välinen hyvyysluku R_{NS} on 0.97, kun tarkastellaan 30 vuorokauden keskimääräisiä alivirtaamia ja 0.93, kun tarkastellaan 90 vuorokauden keskimääräisiä alivirtaamia. Havaittujen ja todennäköisyysjakauman mukaisten alivirtaamien väliset hyvyysluvut ovat yleisesti hieman matalampia kuin ylivirtaamien tapauksessa.



Kuva 3.49 Talviaikainen, 30 ja 90 vuorokauden keskimääräinen alivirtaama (LQ) Weibullin jakauman mukaisen toistumisaajan (T) suhteen Kesselinpuron valuma-alueella; havaintoaineisto on vuosilta 1934–2010.