

**ESKO KUUSISTO**

**SÄKYLÄN PYHÄJÄRVEN VESITASE  
JA SÄÄNNÖSTELY**

English Summary

**The Water Balance and Regulation of Lake Pyhäjärvi**

ISBN 951-46-1794-0  
Valtion painatuskeskus 1976

## SISÄLLYS

	Sivu
English abstract	5
1. Johdanto	7
2. Taustatekijät	8
2.1 Pyhäjärven vesistöjärjestelyiden historiaa	8
2.2 Nykytilanne ja tavoitteet	8
2.3 Valuma-alueen yleiskuvaus	10
2.4 Hydrometeorologiset havainnot	12
3. Nettotulovalunnan määrittäminen	12
3.1 Käsitteitä ja määrittelyjä	12
3.2 Sadanta	13
3.21 Määrittäminen ja korjaukset	13
3.22 Tulosten tarkastelua	16
3.3 Tulovalunta	18
3.31 Vertailuvesistön käyttö	18
3.32 Määrittäminen	20
3.33 Tulosten tarkastelua	24
3.4 Haihdunta	25
3.41 Yleisiä näkökohtia	25
3.42 Järvihaihduntaa koskevia tutkimuksia	27
3.43 Määrittämisselityksen kuvaus	31
3.44 Tulosten tarkastelua	37
3.5 Nettotulovalunnan virhearviointi	41
3.6 Nettotulovalunnan tarkastelua	43
3.61 Kuukausiarvojen tunnusluvut	43
3.62 Kuukausiarvojen jakaumat	46
3.63 Vuosiarvot	50
3.64 Havaintojakson edustavuus	50
4. Säännöstelytilavuuden riittävyys	51
4.1 Eräitä määrittelyjä	51
4.2 Deterministiset menetelmät	54
4.21 Menetelmien yleiskuvaus	54
4.22 Sovellutus	55
4.3 Stokastiset menetelmät	59

	Sivu
5. Juoksutussäännön määrittäminen	61
5.1 Siirtymätodennäköisyysmatriisit	61
5.2 Haittafunktion käyttö	63
5.3 Juoksutussääntö	65
5.4 Tulosten arviointia	69
6. Nettotulovalunnan ennustaminen	71
6.1 Sulamiskausi	71
6.2 Kesä- ja syyskausi	73
7. Yhteenveto	75
English summary	78
Käytetyt symbolit	82
List of symbols	83
Kirjallisuutta	84

## ABSTRACT

*In the former part of this study, the monthly water balance of Lake Pyhäjärvi is calculated for the 36 year period 1938-73. This lake is situated in southwestern Finland; the area of the drainage basin is 614 sq.km and the area of the lake 154 sq.km. Because of the lack of direct observations, various comparisons are made in order to estimate the main components of water balance: inflow, precipitation and evaporation. On the basis of observed outflow and water level changes, it was possible to control the estimations in the period 1965-73. No serious errors could be detected. The annual means of inflow, precipitation and evaporation in 1938-73 are 766, 633 and 491 mm, respectively. All these components are calculated in mm per mean area of the lake.*

*In the latter part, the structure of the time series of monthly water balance is discussed. Thereafter, the Thomas-Fiering algorithm and some stochastic methods are used in order to determine the necessary storage volume for different target drafts. There is a rather good correspondence between the largest regulated storage allowed, 580 mm, and the target draft  $2.0 \text{ m}^3/\text{s}$ .*

*Dynamic programming is used to determine optimal release policies. The method is based on unconditional transition probability matrices and a cubic loss function. The policies obtained for the summer and autumn months are better than the existing policies; a further modification is needed for the winter and spring months because of the water stored in the snowpack.*



## 1. JOHDANTO

"Kerran tulee varmaan hyvän viljelyskelpoisen maan arvo Lounais-Suomessa nousemaan niin korkeaksi, että Säskylän Pyhäjärvi kuivataan; kasvatetaan viljaa siinä missä nyt kalaa."

Näin kirjoitti Säskylän Pyhäjärven käyttömahdollisuuksia pohtinut tutkija 1920-luvulla. Sukupolvet vaihtuvat ja arvostukset muuttuvat. Näiden muutosten ennakointi vuosikymmeniä eteenpäin ei onnistunut 20-luvun tutkijalta. Vai onko tuomio ennenaikainen - mikä on tilanne seuraavan 50 vuoden kuluttua?

Joka tapauksessa 1970-luvun tutkija lähtee oman kymmenlukunsa arvostuksista. Säskylän Pyhäjärveä säännöstellään: lupaehtojen mukainen vedenkorkeuden alaraja on  $N_{43} + 44,54$  m ja yläraja  $N_{43} + 45,12$  m. Säännöstelyväli on siis 58 cm. Riittääkö tämä säännöstelyväli takamaan jatkuvan, vähintään  $2,0 \text{ m}^3/\text{s}$  suuruisen juoksutuksen? Millainen pitäisi juoksutussäännön olla, jotta todennäköisyys säännöstelyrajojen rikkomiselle olisi mahdollisimman pieni? Mitä mahdollisuuksia säännöstelijällä on ennustaa altaan nettotulovaluntaa etukäteen? Nettotulovalunnalla tullaan tässä tutkimuksessa tarkoittamaan tulovalunnan ja sadannan summaa vähennettynä haihdunnalla, joka kesäkuukausina on tärkein Säskylän Pyhäjärven vesitaseen komponenteista.

Edellä esitettyjen kysymysten selvittely vaatii lähtökohdaksi mahdollisimman tarkat tiedot Säskylän Pyhäjärven nettotulovalunnasta riittävän pitkältä ajanjaksolta. Tämä selvitys muodostaa tutkimuksen alkuosan. Suoranaisten havaintojen puuttuessa on altaan tulovalunta ja haihdunta määritetty vertailumenetelmiä käyttäen. Sadanta on laskettu järven ympärillä olevien sadeasemien avulla. Tehdyt laskelmat on voitu tarkistaa jakson 1965-73 vedenkorkeus- ja juoksutustietoja käyttäen. Tarkistuslaskelman mukaan ei ole syytä olettaa saatuihin nettotulovalunnan arvoihin sisältyvän ainakaan karkeita virheitä.

Tutkimuksen loppuosassa etsitään vastauksia Säskylän Pyhäjärven säännöstelyyn liittyviin kysymyksiin. Erilaisia tilastomatemaattisia apuneuvoja käyttäen arvioidaan säännöstelytilavuu-den riittävyyttä. Juoksutussääntö määritetään dynaamisella ohjelmoinnilla lähtien eri kuukausien nettotulovaluntojen todennäköisyysjakaumista.

## 2. TAUSTATEKIJÄT

### 2.1 PYHÄJÄRVEN VESISTÖJÄRJESTELYIDEN HISTORIAA

Kauttuan kosken vesivoimaa alettiin jo 1600-luvulla käyttää teollisuuden voimanlähteenä: silloin kosken partaalle rakennettiin Kauttuan ruukki. Marraskuun 30. päivä 1851 hovioikeus määräsi Kauttuan kosken perattavaksi kahden vuoden kuluessa (Koivisto 1962). Perkaustyötä tehtiin 1852-1853 monen kymmenen miehen voimin. Pyhäjärven vedenpinta laski lähes parilla metrillä, mikä oli enemmän kuin alunperin oli aiottu. Vesimassat aiheuttivat ankan tulvan Eurajoen varrella. Niinpä pitäjänkokouksessa 29. toukokuuta 1853 aatelismies A. M. Falck totesi, että Säkylän ja Yläneen asukkaat olivat ajaneet läpi yrityksen, josta oli aiheutunut suurta vahinkoa. Hän vaati edelleen Pyhäjärven ranta-asukkailta korvausta, koska vedenpinnan lasku oli tuottanut näille kohtuutonta hyötyä.

Eurajoen tulvat tuottivat jokivarren asukkaille seuraavina vuosikymmeninä toistuvia haittoja. Kuntakokouksen pöytäkirja Kiukaisista vuodelta 1899 toteaa: "Sangen huolestuttavaan tulokseen on syynä se, että kunnan läpitse juokseva Eurajoen vesi, mikä joka kevät ja usein syksyisinkin tulvailee leveältä viljelysmaille, ja tulva kesti nytkin vähintään yhdeksän viikkoa, niin että Johanneksen aikoihin ja myöhemminkin vielä tehtiin toukokylvöä."

Tämän vuosisadan alussa ryhdyttiin pontevasti suunnittelemaan Kauttuan kosken perkauksen "loppuunsaattamista", mikä käytännössä olisi merkinnyt Pyhäjärven kuivatusta. A. Laitakari (1925) tarkasteli järven kuivatukseen liittyviä näkökohtia varsin seikkaperäisesti. Hän totesi järven mataluuden ja Kauttuan koskien suuren putouskorkeuden perusteella, että kuivatus olisi varsin helppoa. Jäljelle olisi jäänyt vain vajaan kilometrin levyinen ja 7 km pituinen Vähä-Pyhäjärvi nykyisen järven länsiosan syvänteeseen. Koko kuivatetun viljelyskelpoisen maan arvoksi laskettiin 36 milj. mk. Kalastuksen loppumisesta aiheutuvaksi vahingoksi arvioitiin 4-5 milj. mk. Kun lisäksi huomioitiin kuivatuskustannukset (6 milj. mk), Eurajoen perkaus (5 milj. mk) ja Kauttuan tehtaan vahinko (10 milj. mk), jäi hankkeen tuottamaksi hyödyksi 10,5 milj. mk. Kauneusnäkökohdista Laitakari toteaa: "Moni varmaan pitää Pyhäjärveä mahtavan kauniina, mutta länsisuomalaisen maamiehen mielestä on luultavasti silmänkantamiin ulottuva viljelysalve monin verroin kauniimpi kuin autio järvenselkä."

### 2.2 NYKYTILANNE JA TAVOITTEET

Säkylän Pyhäjärveä läheisesti koskettava Lounais-Suomen vedenhankinnan yleissuunnitelma valmistui tie- ja vesirakennushallituksen toimesta lokakuussa 1969. Jatkona tälle suunnitelmalle ja sen lausuntokäsittelylle muodostettiin vuoden 1972 alussa vesihallituksen toimesta Lounais-Suomen vedenhankinnan yhteistyöelin, jossa tärkeimmät vedentarvitsijat olivat edustettuina. Yhteistyön tuloksena julkistettiin "Ehdotus Lounais-Suomen vedenhankintaratkaisuksi" vuoden 1973 lopulla.



Säkylän Pyhäjärven osalta yhteistyöelin korostaa järven monipuolisen käytön huomioonottamista (Seppänen 1974). Tältä pohjalta on katsottu, että järveä tulisi nykyistä paremmin säännöstellä ylittämättä nykyistä ylärajaa  $N_{43} + 45,12$  m ja alittamatta alarajaa  $N_{43} + 44,54$  m.

Yhteistyöelin on myös tarkentanut Pyhäjärven säännöstelylaskelmia mm. uusien haihduntaa ja sadantaa koskevien selvitysten perusteella. Tarkennuksessa on tultu johtopäätökseen, että Pyhäjärvestä voidaan juoksuttaa vedenhankintatarkoituksiin jatkuvasti  $2 \text{ m}^3/\text{s}$  edellä mainittuja säännöstelyrajoja rikkomatta. Tosin laskelmien mukaan juoksetusta olisi erittäin poikkeuksellista kuivakautta 1939-42 vastaavissa olosuhteissa supistettava puolen vuoden ajaksi arvoon  $1 \text{ m}^3/\text{s}$ .

Yhteistyöelin on käsitellyt myös Pyhäjärven vesivarojen lisäämistä. Lisävesi otettaisiin Kokemäenjoesta, puhdistettaisiin ja johdettaisiin Pyhäjärveen. Näin turvattaisiin tavoitejuoksetuksen saavuttaminen ja säännöstelyrajoissa pysyminen myös erittäin poikkeuksellisissa olosuhteissa.

Selvitysten pohjalta on Pyhäjärven osalta valittu se vedenhankintavaihtoehto, jossa vedenhankintaan käytetään  $2,0 \text{ m}^3/\text{s}$ . Tämä vesimäärä on esitelty jaettavaksi siten, että  $0,55 \text{ m}^3/\text{s}$  käytettäisiin Euran ja Säkylän teollisuuslaitosten ja  $0,45 \text{ m}^3/\text{s}$  Rauman seudun asutuksen vedenhankintaan. Loppumäärä  $1,0 \text{ m}^3/\text{s}$  käytettäisiin Turun seudun vedenhankintaan. Tällöin Rauman seudun teollisuuden lisäveden tarvetta varten on johdettava vettä Kokemäenjoesta Köyliönjokeen.

Yhteistyöelimen suosituksen mukaisesti on asian jatkokäsittelyä varten perustettu Lounais-Suomen vedenhankintatoimikunta. Toimikunnan apuna toimii vesihallituksen kokoama valvontatyöryhmä.

Toimitusmiesten lausunnossa 22. 5. 1974 esitetään ehdotus Pyhäjärven säännöstelyn lupaehdoksi. Hakijan edellytetään tekevän tulovirtaaman ennakoarvioita riittäviin lumen vesiarvon määrityksiin ja sadantahavaintoihin perustuen. Järven vedenpinta edellytetään laskettavaksi 16. 3. mennessä kevättulvan varalta vähintään tasoon  $N_{43} + 44,85$  m. Kevättulvan jälkeen se edellytetään laskettavaksi mahdollisten sateiden aiheuttamien tulvien varalta ja rantamaiden entisenveroisen kuivatustilan säilyttämiseksi vähintään tasoon  $N_{43} + 44,97$  m - siis 15cm ylärajasta.

Juoksetus ei lupaehtojen mukaan saa ylittää Eurajoen perkaamattoman yläosan purkauskykyä, joka on noin  $17 \text{ m}^3/\text{s}$ . Kuivakausien aikanakin juoksetuksen tulee olla noin  $2 \text{ m}^3/\text{s}$  eikä se mahdollisuuksien mukaan milloinkaan saisi alittaa havaintokauden 1965-72 alinta menovirtaamaa  $0,8 \text{ m}^3/\text{s}$ . Tilapäisen sähkökatkon sattuessa sallitaan poikkeuksellisesti juoksetus  $6 \text{ m}^3/\text{s}$ , joka vastaa Kauttuan voimalaitoksen turpiinin maksimitehoa.

### 2.3 VALUMA-ALUEEN YLEISKUVAUS

Säkylän Pyhäjärvi on Lounais-Suomen merkittävin järviällä. Sen pinta-ala on keskivedenkorkeudella  $154 \text{ km}^2$  ja tilavuus n.  $0,85 \text{ km}^3$ . Pyhäjärven valuma-alueen pinta-ala järven luusuassa on  $614 \text{ km}^2$ , joten järven ala on melko tarkoin neljännes koko valuma-alueesta.

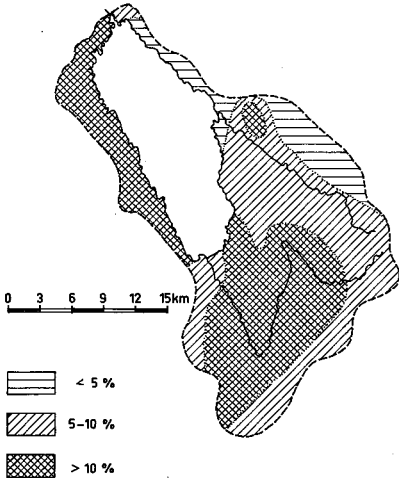
Suurin osa Pyhäjärven valuma-alueesta sijaitsee järven itä- ja kaakkoispuolella Yläneen ja Säkylän kunnissa (kuva 1). Järven pohjoisosassa ja koko länsirannalla vedenjakaja ulottuu vain 1-5 km etäisyyteen rantaviivasta. Suurimmat järveen laskevista joista ovat Yläneenjoki ( $215 \text{ km}^2$  ja Pyhäjoki  $81 \text{ km}^2$ ). Ne käsittävät siten yhteensä lähes puolet Pyhäjärven koko valuma-alueesta; järvi poisluettuna niiden osuus on 64 %.

Pyhäjärvi poikkeaa merkittävästi maallemme luonteenomaisesta järvityypistä. Se on muodoltaan varsin yhtenäinen ja lähes saareton. Avopisteen etäisyys rannasta on 3 330 m (I. Laitakari 1953); suurempia selkiä ovat tässä suhteessa vain Oulujärvi ja Saimaa. Syynä tähän poikkeuksellisuuteen on se, että Pyhäjärven allas sijaitsee hiekkakivialueella. Järven kallioinen länsiranta on rapakiveä; kalliopaljastumien osuus on tällä alueella yli 10 % pinta-alasta (kuva 2), mikä lisää ja nopeuttaa pintavaluntaa. Varsin kalliosta on myös lähes koko Yläneenjoen valuma-alue; varsinkin sen keskijuoksulla on runsaasti graniitti- ja gneissipaljastumia. Nämä ovat yleisimmät kivilajit myös Pyhäjoen alueella, jossa kallioperä on kuitenkin yleensä irtaimien maalajien peittämä. - Koko Pyhäjärven alueella kallioperässä on useita merkittäviä ruhjeita. Yläneenjoki virtaa koko keski- ja alajuoksullaan ruhjevyöhykkeitä noudatellen. Sen alajuoksuun liittyvä ruhje jatkuu koko Pyhäjärven pituudelta järven länsirannan lähellä muodostaen muutoin tasaisesta pohjatopografiasta selvästi erottuvan syvänteen, jossa maksimisyvyys on 20 m. Koko Pyhäjärven keskisyvyys on huomattavasti pienempi, vain 5 m.

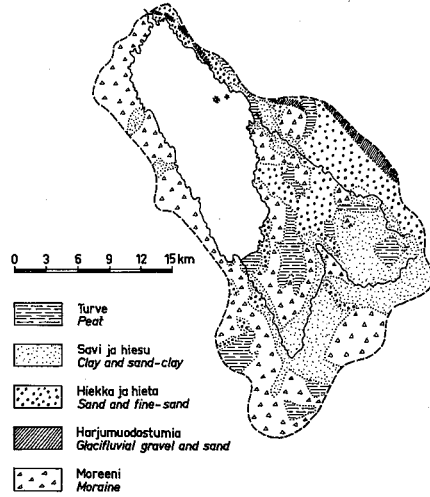
Pyhäjärven valuma-alueen maaperä on esitetty pääpiirteissään kuvassa 3. Yläneenjoen varsilla on runsaasti suhteellisen hienojakoisia maalajeja (savea ja hiesua). Kauempana jokiuomasta maaperä on pääasiassa moreenia ja turvetta. Pyhäjoen valuma-alueesta huomattava osa on hiekkaa ja harjumuodostumia. Joki alkaakin lähteistä, jotka ovat Virttaankankaan lounaisreunassa. Muutoinkin sen valuma-alueella on runsaasti pohjavesimuodostumia.

Pyhäjärven valuma-alueen korkeussuhteet on esitetty kuvassa 4. Absoluuttinen korkeus ylittää 100 m vain Yläneenjoen valuma-alueen keskiosissa ja Säkylänharjulla. Topografia on kuitenkin varsin kumpuilevaa lukuunottamatta suoalueita, joita on varsinkin Yläneenjoen alueella.

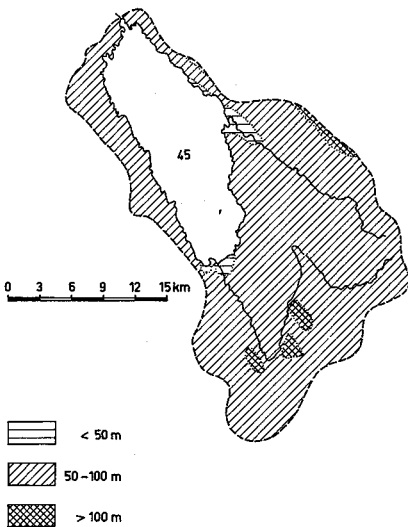
Alueen pelloista on lähes puolet salaojitettu. Säkylän pitäjässä salaojitetun pellon osuus koko peltoalasta oli 1972 n. 55 % ja Yläneellä 36 % (Mussaari 1974).



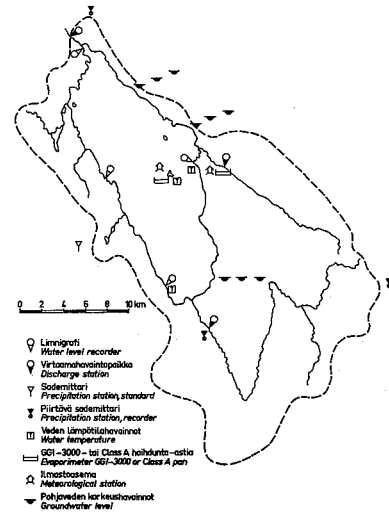
Kuva 2. Kalliopaljastumien osuus (%) pinta-alasta Pyhäjärven valuma-alueella (I. Laitakarin (1953) mukaan).  
 Fig. 2. Percentage of outcrops in the drainage area of Lake Pyhäjärvi (according to I. Laitakari, 1953).



Kuva 3. Pyhäjärven valuma-alueen maalajit. Fig. 3. Soil types in the drainage area of Lake Pyhäjärvi.



Kuva 4. Pyhäjärven valuma-alueen absoluuttinen korkeus (I. Laitakarin (1953) mukaan).  
 Fig. 4. The absolute height in the drainage area of Lake Pyhäjärvi (according to I. Laitakari, 1953).



Kuva 5. Hydrometeorologinen havaintoverkosto Pyhäjärven valuma-alueella. Fig. 5. Hydrometeorological observation network in the drainage area of Lake Pyhäjärvi.

## 2.4 HYDROMETEOROLOGISET HAVAINNOT

Hydrometeorologinen havaintotoiminta Pyhäjärven alueella on ollut varsin puutteellista 1970-luvun alkuun saakka. Sadeasemia on Pyhäjärven valuma-alueella tai sen läheisyydessä kuitenkin toiminut jo 1930-luvun lopulla useita, mutta niiden havainnot ovat puutteellisia ja osa niistä on toiminut vain kesällä. Pyhäjärven vedenkorkeutta on havaittu Kauttualla aina-kin vuodesta 1914 lähtien. Kuitenkin vuoteen 1965 saakka havainnot ovat epävarmoja. Myös luotettavat menovirtaamahavainnot alkavat vasta 1960-luvun puolivälistä.

Hydrologian toimiston käynnistettyä järvihaihduntatutkimukset Pyhäjärvellä keväällä 1971 täydennettiin alueen hydrometeorologista havaintoverkostoa oleellisesti (kuva 5). Pyhäjärven vedenkorkeuden vaihteluita voidaan nyt seurata neljällä limnigrafilla. Yläneenjokeen ja Pyhäjokeen rakennettiin mittapadot ja niiden yhteyteen limnigrafit. Ilmastoasema on toiminut kesäisin sekä Emäkarilla että Pyhäjoella. Piirtäviä sademittareita on alueella kaikkiaan 5 kpl.

Tätä tutkimusta ajatellen suurin puute on havaintosarjojen lyhyys. Tämä pakottaa turvautumaan erilaisiin vertailumenetelmiin sekä haihdunnan määrittämisessä.

Hydrometeorologisia havaintoja tarkastellaan lähemmin seuraavassa luvussa nettotulovalunnan eri komponenttien määrityksen yhteydessä.

## 3. NETTOTULOVALUNNAN MÄÄRITYS

### 3.1 KÄSITTEITÄ JA MÄÄRITELMIÄ

Säkylän Pyhäjärven säännöstelyyn liittyvien kysymysten selvittämiseksi on seuraavassa määritetty järven tulovalunta, sadanta ja haihdunta kuukausittain vuosina 1938-73. Suoranaisia havaintoja tulovalunnasta ja haihdunnasta on vain mainitun jakson viimeisiltä vuosilta, joten näiden suureiden määrityksessä on pitänyt käyttää erilaisia vertailumenetelmiä. Sen sijaan sadanta on voitu määrittää järven ympäristön sadeasemien avulla. Menovirtaamasta on luotettavia havaintoja vuosilta 1966-73. Tätä jaksoa on voitu käyttää saatujen tulovalunta-, sadanta- ja haihdunta-arvojen luotettavuuden tarkistamiseen, koska myös vedenkorkeuden vaihteluita on tällä jaksolla seurattu.

Tulovalunnalla tarkoitetaan seuraavassa järveen maa-alueilta tulevaa valuntaa. Nimitystä tulovirtaama ei ole käytetty, koska suure ilmoitetaan mm:inä järven keskipinta-alaa kohti. Tämä on säännöstelytilavuuden määritystä ajatellen varsin käytännöllinen mittayksikkö; lisäksi sen käyttöä puoltaa sadannan ja haihdunnan luonteva ilmaisutapa samaa yksikköä käyttäen.

Tulovalunnan ja sadannan summaa vähennettynä haihdunnalla kutsutaan seuraavassa nettotulovalunnaksi. Tietylle aikavälille  $i$  on siis voimassa:

$$T_i = I_i + P_i - E_i \quad (1)$$

$T_i$  = nettotulovalunta, mm järven keskipinta-alaa kohti

$I_i$  = tulovalunta, mm järven keskipinta-alaa kohti

$P_i$  = sadanta järven pinnalle, mm

$E_i$  = haihdunta järven pinnasta, mm

Pyhäjärven pinta-ala kasvaa noin 1,1 % vedenkorkeuden noustessa säännöstelyn alarajalta ylärajalle. Tätä pinta-alan muutosta ei ole otettu huomioon laskelmissa, koska se olisi mutkistanut niitä melkoisesti. Useissa jatkotarkasteluissa tästä ei aiheudu virhettä; sen sijaan esim. juoksutussäännön laadinnassa se aiheuttaa virheen, joka kasvaa keskivedenkorkeuden (jaksolla 1937-66 MW =  $N_{43} + 44,76$  m) molemmin puolin.

## 3.2 SADANTA

### 3.21 Määritysmenetelmä ja korjaukset

Pyhäjärven pinnalle tulleen sadannan määrittämiseksi on ollut käytettävissä kaikkiaan 9 sadeasemaa. Yhtenäinen, koko jakson 1938-73 käsittävä havaintosarja on kuitenkin ollut vain Yläneen Vanhakartanon asemalta. Muita suuren osan tarkastelujaksosta toimineita sadeasemia ovat Kauttuan, Säskylän ja Yttilän asemat. Tärkeimmät Pyhäjärven sadannan määrittämisessä käytetyt sadeasemat on merkitty kuvaan 5.

Sadeasemien edustavuudesta ja havaintojen luotettavuudesta on vaikea esittää yksityiskohtaista tarkastelua. Havaintotuloksia vertailemalla voidaan selvästi virheellinen asema hylätä, mutta tätä ei ole tarvinnut minkään aseman suhteen tehdä. Kaksi jäljellejäävää pääongelmaa ovat tuuli- ja kostutusvirheen korjaus sekä varsin tärkeä kysymys: sataako järvellä yhtä paljon kuin sen ympäristössä?

Tuuli- ja kostutusvirheen korjaamiseksi on sovellettu kaikkien asemien havaintoihin Solan tien ja Helimäen (1975) esittämiä korjauskertoimia eri kuukausille. Kertoimissa otetaan kesäaikana huomioon 5 % tuulivirhe ja 1 % kostutusvirhe; korjauskerroin on siten kesäkuukausina 1,06. Muina vuodenaikoina kertoimet ovat suuremmat, talvikuukausina erityisen suuret, koska lumisateen mittaaminen sademittareilla on hyvin epätarkkaa. Laajaan vertailututkimukseen perustuvat sadannan korjauskertoimet ovat Lounais-Suomessa eri kuukausina seuraavat:

Kuukausi	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
Korjauskerroin	1,35	1,37	1,35	1,17	1,08	1,06	1,06	1,06	1,06	1,09	1,18	1,26

Sadannan jakautumista järvelle ja sitä ympäröivälle maa-alueelle ei meidän oloissamme ole riittävästi tutkittu. Talviaikana lämpötilasuhteet ovat yhtenäisen lumi- ja jääpeitteen takia samankaltaiset järven ja maanpinnan yläpuolella, joten järvi ei vaikuta sen yläpuolisiin ilmassoihin samoin kuin kesällä. Orografian vaikutus sen sijaan ilmenee erityisesti talvissa, joten järvellä sataisi siis jonkin verran vähemmän. Lisäksi tuntuu kokemukseräisesti selvältä, että tuuli kuljettaa jonkin verran lunta järveltä rannoille. Näin on erityisesti asianlaita avoimilla järvenselillä, joilla tuulen nopeus on huomattava. Kuljetuksen prosentuaalinen osuus koko järvelle tulleesta sadannasta ei voi kuitenkaan olla kovin suuri. Esimerkiksi Pyhäjärvellä 10 % joulun- ja maaliskuun sadannasta on noin 18 mm, mikä vastaa  $9 \cdot 10^6 \text{ m}^3$  lunta, jonka tiheys on  $0,3 \text{ g/cm}^3$ . Jos tämä lumimäärä levitettäisiin 0,5 km levyiselle rantavyöhykkeelle, se vastaisi lähes 20 cm lisäystä lumipeitteen syvyydessä. Mainittua 10 % kuljetusta voitaneen siten pitää lähinnä ylärajana. Vuotuisessa järven vesitaseessa ei tällä komponentilla ole merkitystä, koska rannoille kulkeutunut lumi palaa lähes kokonaisuudessaan pintatai pintakerrosvaluntana järveen sulamiskauden aikana. Sen sijaan tämä komponentti saattaa vaikuttaa jonkin verran järven kuukausittain laskettuun nettotulovaluntaan talviaikana.

Kesäaikana sadantaan vaikuttavat tekijät ovat suuren järven yläpuolella merkittävästi erilaiset kuin ympäröivällä maa-alueella. Liikkuviin ilmassoihin kohdistuu maanpinnan yläpuolella suurempi kitka kuin veden yläpuolella. Tämän vaikutuksesta ilmassat kohoavat ylöspäin, tapahtuu tiivistymistä ja sateen todennäköisyys kasvaa. Näin ollen voidaan olettaa kuurosateiden esiintymistodennäköisyys ison järven ympäristössä suuremmaksi kuin itse järvellä. Näin on erityisesti asianlaita, jos orografinen efekti tehostuu maaston kohotessa järven ympäristössä.

Elomaan (1974) mukaan satoi Pääjärven Hiidenluodolla vuosina 1969-73 kesä-lokakuussa 5-10 % vähemmän kuin järven ympäristön sadeasemilla. Eron syynä olivat pääasiallisesti heinä-, elo- ja syyskuun kuurosateet; kesä- ja lokakuussa poikkeama oli pienempi.

Unkarilaiset tutkijat ovat selvittäneet sadannan suuruutta Balaton-järvellä (järven pinta-ala  $F_1 = 600 \text{ km}^2$ ) ja sen ympäristössä (Szesztay 1967). Tämän järven pituus on n. 75 km ja keskimääräinen leveys n. 8 km. Järven eteläranta on suhteellisen laakea, mutta pohjoisrannalla kohoaa Bacony-vuoristo noin 500 m järven pinnasta. Vuosisadanta oli jaksolla 1921-58 järvellä 17 % pienempi kuin sitä ympäröivällä maa-alueella. Tämä ero vaihteli jonkin verran eri vuosina ääriarvojen ollessa 13 % ja 21 %. Heinäkuussa vastaava prosenttiluku oli 20 ja joulukuussa 11. Vaihtelu eri kuukausien välillä oli siis varsin selvä.

Pyhäjärvellä on tehty kahtena kesänä (1971-72) sadehavaintoja Emäkarille sijoitetulla mittarilla (kuva 5). Tämä mittari on pienellä aukiolla metsän keskellä. Se on samalla korkeudella maanpinnasta kuin järven rannoilla olevan Kauttuan, Yläneen ja Pyhäjoen sademittarit, joten tulokset ovat vertailukelpoisia. Kuukausisadannat vertailukuukausilta on esitetty taulukossa 1.

Taulukko 1. Eräiden Pyhäjärven alueen sadeasemien korjatut kuukausisadannat kesä-loku-  
kuussa 1971-72.

Table 1. Corrected monthly precipitation of some precipitation stations in the Lake Pyhä-  
järvi area in June-October 1971-72.

Vuosi Year	Kuukausi Month	Kuukausisadanta (mm) Monthly precipitation			
		Emäkarri	Kauttua	Yläne	Pyhäjoki
1971	VI	14	6	17	16
	VII	22	46	28	20
	VIII	55	59	59	57
	IX	35	42	43	40
	X	43	60	56	49
	Σ	169	213	203	182
1972	VI	50	38	58	56
	VII	90	86	87	90
	VIII	155	153	101	162
	IX	30	34	39	28
	X	35	30	47	35
	Σ	360	341	332	371

Avovesikauden 1971 sadanta oli Emäkarilla siis selvästi pienempi kuin muilla sadeasemilla. Vastaavana kautena 1972 ei tällaista eroa sen sijaan voida havaita. Jos vertaillaan vain Emäkarin ja Pyhäjoen sadeasemia (välimatka 3 km) eikä tarkastella n. 15 km päässä Emäkarista sijaitsevia Yläneen ja Kauttuan asemia, voidaan todeta Emäkarissa sataneen molempina tarkastelujaksoina n. 10 mm enemmän. Joka tapauksessa ero on niin pieni ja aineisto niin suppea, ettei sen perusteella voida todeta merkitsevää eroa järven ja sen ympäristön sadannassa. Tässä havaitut erot voivat johtua asemien avoimuudesta ja kesäsateiden usein varsin epätasaisesta alueellisesta jakautumisesta.

Voidaan siis todeta, että Pyhäjärven ympäristön sadeasemia voidaan käyttää järven pinnan sadantaa määrittäessä. Määrittämisessä on käytetty ns. Thiessenin menetelmää. Koska vain Yläneen sadeasema on toiminut koko tarkastelujakson ajan, on pitänyt määrittää yhteensä 12 eri painokerroinkombinaatiota sen mukaan, mitkä asemat ovat kulloinkin olleet toiminnassa. N. 70 % kaikista kuukausisadannoista on määritetty vähintään neljän aseman havaintojen perusteella. Taulukosta 2 ilmenevät eri sadeasemien havaintosarjojen pituudet (katkonaiset sarjat yhdistettyinä ja pituudet lähimpään täyteen vuoteen pyöristettyinä). Taulukosta ilmenevät myös eri asemien keskimääräiset osuudet Pyhäjärven sadannan määrittämisessä. Näin ollen esim. Yläneen sadeaseman painokerroin koko tarkastelujaksolla on ollut keskimäärin 0,23.

Taulukko 2. Pyhäjärven sadeasemien havaintosarjojen pituudet ja keskimääräiset painokertoimet.

*The lengths of observation periods and mean weight coefficients of precipitation stations in the Lake Pyhäjärvi district.*

Sadeasema <i>Precipitation station</i>	Havaintosarjan pituus (v) <i>Length of obser- vation period (y)</i>	Keskimääräinen painokerroin <i>Mean weight coefficient</i>
Yläne, Vanhakartano	36	0,23
Eura, Kauttua	20	0,10
Säkylä, Sydänmaa	10	0,05
Säkylä	11	0,15
Honkilahti kk	14	0,10
Eura, Löyttylä	13	0,12
Köyliö, Yttilä	34	0,21
Pyhäjoki	3	0,02
Emäkari	1	0,02

### 3.22 Tulosten tarkastelua

Taulukossa 3 on esitetty edellä kuvatulla tavalla määritetyt kuukausisadannat Pyhäjärven pinnalle vuosina 1938-73. Siitä ilmenevät myös sadannan vuosisummat. Taulukossa 4 on esitetty kuukausisadantojen keskiarvot, hajonnat, vaihtelukertoimet ja vinoudet sekä peräkkäisten kuukausien sadantojen korrelaatiokertoimet.

Vuosisadannaksi Pyhäjärvellä on saatu tarkastellulla jaksolla 633 mm. Se on lähes yhtä suuri kuin Solantien ja Helimäen (1975) Eurajoen alueelle laskema korjattu vuosikeskisadanta jaksolla 1931-60 (640 mm). Myös sadannan vuotuinen kulku on lähes sama; suurimmat poikkeamat esiintyvät elo-lokakuussa. - On huomattava, että sadannan alueelliset vaihtelut ovat Lounais-Suomessa varsin suuret. Niinpä Aurajoen valuma-alueella vuosisadanta oli jaksolla 1931-60 Solantien ja Helimäen mukaan 701 mm eli 9,5 % suurempi kuin Eurajoen alueella. Tähän suureen eroon ovat syinä rannikon sademaksimin osuminen Aurajoen alueelle sekä Aurajoen alueen maaston kohoaminen vallitsevien tuulten suunnassa. Mainittu poikkeama syntyy lähinnä elo-tammikuussa, jolloin sadantojen ero on 13 %; helmi-heinäkuussa se on vain 5 %.

Syynä tähän on maaston kohoamisen merkityksen korostuminen syys- ja talvikuukausina, jolloin kosteuden tiivistymistaso on suhteellisen lähellä maanpintaa.

Käytettäessä Aurajoen virtaamia Pyhäjärven tulovalunnan määrittämiseen on sadantojen eroon kiinnitettävä syyskuukausina huomiota. Tähän kysymykseen tullaan palaamaan tulovalunnan määrittämisen yhteydessä.



Taulukko 3. Pynhjärven sadanta kuukausittain 1938-73 (mm).  
 Table 3. Monthly precipitation of Lake Pynhjärvi in 1938-73 (mm).

Vuosi Year	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	Σ
1938	75	33	50	52	54	53	134	71	63	126	76	36	823
39	49	35	10	61	4	20	80	17	45	23	85	28	457
40	18	19	29	31	24	9	47	107	66	28	127	30	535
41	2	39	42	12	3	7	17	134	42	19	17	44	378
42	48	12	10	9	20	95	74	46	35	95	37	30	511
43	53	86	44	44	37	38	112	109	95	78	107	32	835
44	89	31	30	48	59	76	70	48	89	71	78	75	764
45	51	38	17	64	25	64	112	100	48	68	15	46	648
46	23	42	31	44	31	90	28	100	111	14	74	27	615
47	15	12	33	59	4	45	40	14	66	29	52	72	441
48	49	10	29	31	57	109	55	109	60	85	41	55	690
49	73	34	40	47	31	42	46	81	34	96	14	76	614
50	22	44	59	88	25	26	67	41	110	75	85	80	722
51	43	22	38	82	16	28	64	31	48	10	76	78	536
52	56	68	13	32	21	63	88	76	50	96	67	73	703
53	34	51	12	18	35	66	149	137	52	39	52	20	665
54	66	10	42	35	21	68	208	120	88	83	90	85	916
55	112	20	31	24	74	17	31	21	90	122	63	77	682
56	55	40	5	42	20	57	35	70	25	40	20	59	468
57	40	72	30	16	44	46	74	105	85	94	45	61	712
58	26	18	29	13	94	40	59	61	4	41	52	46	483
59	84	30	25	40	37	23	6	61	3	32	72	45	458
60	76	29	7	27	24	76	55	129	24	38	92	95	672
61	61	40	47	16	40	121	95	138	41	49	63	71	797
62	71	77	35	49	46	21	61	68	63	56	54	28	629
63	41	18	16	29	29	54	53	122	58	87	60	30	597
64	33	53	4	31	18	26	59	58	76	45	47	104	554
65	70	29	30	25	19	39	81	75	64	50	30	102	614
66	42	35	56	41	28	70	77	80	72	61	92	94	748
67	36	43	59	33	77	44	25	211	70	116	40	36	790
68	54	36	50	54	51	37	48	50	57	96	64	49	632
69	45	36	44	59	49	22	54	51	83	47	136	31	657
70	50	30	64	83	15	28	123	76	54	47	69	64	705
71	64	46	48	21	13	15	26	56	37	49	47	60	482
72	12	41	19	71	20	48	90	150	32	35	63	42	623
73	27	38	29	73	30	75	98	43	68	45	48	61	635

Taulukko 4. Pyhäjärven sadannan kuukausi- ja vuosijakaumien tunnuslukuja jaksolla 1938-73.

Table 4. Some statistical parameters of monthly and annual precipitation of Lake Pyhäjärvi in 1938-73.

Kuukausi Month	Keskiarvo Mean	Keski- hajonta Standard deviation	Vaihtelu- kerroin Coefficient of variation	Vinous Coeffi- cient of skewness	Peräkkäisten kuukausisadantojen korrelaatiokerroin First correlation coefficient of monthly precipitation
	$\bar{P}$ (mm)	$s_P$ (mm)	$c_v$	$c_s$	$r_{i, i+1}$
I	49	24	0,5	0,4	-0,02
II	37	18	0,5	0,8	0,03
III	32	16	0,5	0,1	0,26
IV	41	21	0,5	0,6	-0,25
V	33	21	0,6	1,1	0,12
VI	49	28	0,6	0,7	0,30
VII	71	41	0,6	1,7	0,15
VIII	82	43	0,5	0,8	-0,05
IX	59	26	0,4	-0,1	0,20
X	61	31	0,5	0,3	-0,08
XI	62	28	0,5	0,4	-0,10
XII	57	24	0,4	0,3	0,12
$\Sigma$	633	122	0,19	0,22	

Kuukausisadantojen vaihtelukerroin ( $c_v = s_P/\bar{P}$ ) on suurin kesäkuukausina, jolloin kuuro-  
sateet tekevät sadeolot varsin vaihteleviksi. Niinpä heinäkuun sadanta vaihteli tarkastelu-  
jaksolla välillä 12... 208 mm ja elokuun sadanta välillä 14... 211 mm. Talvella ja keväällä  
vaihtelukerroin on melko vakioinen sadannan kuukausikeskiarvojen eroista huolimatta.

- Sadantajakaumien vinous vaihtelee melkoisesti eri kuukausina; se on kuitenkin yleensä posi-  
tiivinen. Vinous on suurin kesäkuukausina kuten vaihtelukerroinkin; tämä on odotettua, koska  
vinous on positiivinen ja sadantajakaumat alhaalta rajoitettuja.

Peräkkäisten kuukausien sadantojen korrelaatiokertoimet eivät ole merkitseviä ja vaihtelevat  
etumerkiltään. Ainoastaan kesä- ja heinäkuun sadantojen korrelaatiokerroin on merkitsevä  
10 % riskitasolla, muttei enää sekään 5 % riskitasolla. Näin ollen kuukausisadantojen muo-  
dostamaa prosessia voidaan pitää lähes riippumattomana.

### 3.3 TULOVALUNTA

#### 3.31 Vertailuvesistön käyttö

Pyhäjärven valuma-alueen pinta-ala järven luusuassa on 614 km<sup>2</sup>. Yläneenjoki ja Pyhäjoki  
käsittävät yli 60 % valuma-alueen maapinta-alasta; niiden valuma-alueiden alat ovat mitta-  
patojen kohdalla 195 ja 76 km<sup>2</sup> ja jokisuissa 215 ja 81 km<sup>2</sup>. Loppuosa Pyhäjärven valuma-

alueesta jakautuu lukuisten pikkupurojen kesken, joista huomattavin on Vähäjärvenoja ( $F = 14 \text{ km}^2$ ).

Suoranaisia havaintoja Pyhäjärveen laskevien jokien virtaamista on varsin niukalti. Yläneenjoessa on ollut mittapato ja limnigrafi toukokuusta 1970 ja Pyhäjoessa kesäkuusta 1971 alkaen. Näitä aikaisemmat virtaamahavainnot ovat epäluotettavia ja satunnaisia samoin kuin valuma-alueen pikkupuroissa tehdyt havainnot. Yläneenjoen ja Pyhäjoen limnigrafit ovat joi-takin lyhyitä keskeytyksiä lukuunottamatta toimineet kohtalaisesti.

Virtaaman vuotuisessa kulussa on selvä ero Yläneenjoen ja Pyhäjoen välillä. Talvikuukausina Pyhäjoen virtaama on ollut jopa suurempi kuin Yläneenjoen, vaikka jälkimmäisen valuma-alue on 2,6-kertainen. Tulvahuiput ovat Yläneenjoessa huomattavasti terävämpiä: niinpä kevätylivirtaama on ollut Pyhäjokeen verrattuna lähes nelinkertainen. - Nämä erot johtuvat pääasiassa erilaisista pohjavesiolloista. Pyhäjoki alkaa Säkylänharjulta ja sen valuma-alueella on muutenkin suotuisat olosuhteet pohjavedenmuodostumiselle. Näin ollen virtaaman vuotuinen kulku on huomattavasti tasaisempi kuin Yläneenjoessa.

Havaintosarjojen lyhydestä johtuen on Pyhäjärven tulovalunnan määrittämiseksi pitänyt käyttää vertailuvesistöä. Tällaiseksi on valittu Pyhäjärven valuma-alueeseen itäpuolelta rajoittuva Aurajoen Hypöistenkosken valuma-alue. Se on myös lähes järvetön kuten Pyhäjärven valuma-aluekin (järvisyydet 0,0 % ja 0,3 %). Vertailuvesistön pinta-ala on Hypöistenkosken kohdalla  $385 \text{ km}^2$ , joten se on myös kooltaan verrattavissa Pyhäjärven valuma-alueeseen. Pellon osuus on vertailuvesistön alueella 39 % (Palo 1968); tämä on jonkin verran enemmän kuin Pyhäjärven valuma-alueella. Noin puolet peltoalasta on salaojitettu molemmilla alueilla. Savimaiden osuus on Aurajoen alueella selvästi suurempi (lähes 50 %) kuin Pyhäjärven valuma-alueella, jossa on melko runsaasti hiekka- ja hietamaita. Soita on Pyhäjärven alueella enemmän kuin Aurajoen alueella; kuitenkin vain noin 10 % pinta-alasta.

Kuvassa 6 on esitetty Yläneenjoen kuukausivirtaamien riippuvuus Aurajoen Hypöistenkosken kuukausivirtaamista (vertailujaksona toukokuu 1970-joulukuu 1973). Kuvassa 7 on vastaava riippuvuus Pyhäjoen ja Aurajoen virtaamille. Kuviin on myös piirretty saatuun pistejoukkoon sovitettu käyrä (yhtenäinen viiva) sekä riippuvuussuora siinä tapauksessa, että riippuvuus olisi suoraan pinta-alojen suhteen mukainen (katkoviiva). Suurten virtaamavaihteluiden vuoksi on käytetty logaritmisiä asteikkoja.

Yläneenjoen osalta kuukausivirtaamien riippuvuus noudattaa melko tarkkaan pinta-alojen suhteita. Keskisuuret virtaamat ovat Yläneenjoessa 10-30 % pinta-alojen suhteessa määritettyjä suuremmat. Suuret ja pienet virtaamat ovat puolestaan jonkin verran tämän riippuvuuden mukaisia pienemmät.

Pyhäjoen virtaamien hajonta riippuvuusikäyrän suhteen on huomattavasti suurempi kuin Yläneenjoen virtaamien. Nämä hajonnat ovat vastaavasti 35 % ja 22 % kuukausivirtaamien keskiarvosta. Merkittävänä erona Yläneenjokeen verrattuna on, että Pyhäjoen virtaamat noudattavat varsin heikosti pinta-alojen suhteen mukaista riippuvuutta. Alivirtaamat ovat tähän suh-

teeseen verrattuna 2... 3 -kertaisia ja ylivirtaamat 20... 50 % pienempiä.

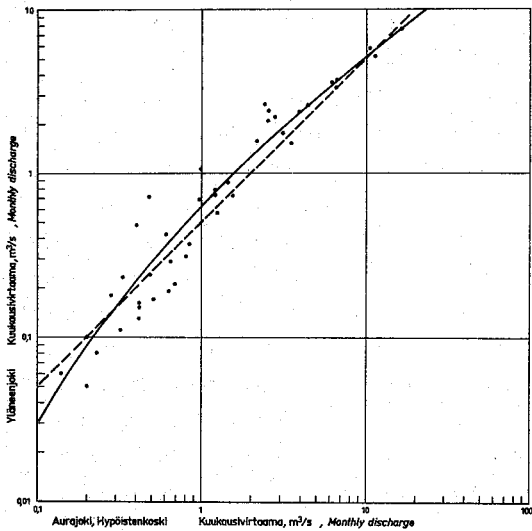
Edellä esitetyn mukaan pinta-alojen suhteen suoranainen käyttö Pyhäjärven tulovalunnan määrittämisessä ei ole riittävän tarkka menetelmä. Tulos on huomattavasti tarkempi, jos Yläneenjoen ja Pyhäjoen kuukausivirtaamat määritetään kuvien 6 ja 7 käyrien perusteella Aurajoen Hypöistenkosken kuukausivirtaamia käyttäen. Näin on tässä tutkimuksessa menettely ja saadut virtaamat on muutettu valunta-arvoiksi. Pyhäjärven valuma-alueen loppuosalla on valunta oletettu yhtä suureksi kuin Yläneenjoen ja Pyhäjoen valumien painotettu keskiarvo. Tätä menettelyä ei voida pitää kovin luotettavana, koska kaltevuus on rannan läheisellä maa-alueella ilmeisesti suurempi kuin Yläneenjoen ja Pyhäjoen valuma-alueilla. Samoin voidaan kuvan 2 perusteella todeta, että kalliopaljastumien osuus varsinkin Pyhäjärven länsirannalla on huomattavan suuri, mikä nopeuttaa ja lisää pintavaluntaa.

Pyhäjärven tulovalunta olisi voitu määrittää myös toisella tavalla. Yläneenjoen ja Pyhäjoen havaintosarjojen perusteella olisi ensin laskettu Pyhäjärven tulovalunta ja sitten määritetty tämän riippuvuus Aurajoen Hypöistenkosken valunnasta vertailujaksolla. Tämä menetelmä olisi ollut yksinkertaisempi ja tarjonnut mahdollisuuden verrata suoraan valunnan arvoja. Mutkikkaampaa menettelyä on kuitenkin käytetty; osaksi korostamaan Pyhäjärven valuma-alueen osien erilaisuutta, osaksi sen tähden, että Yläneenjoen ja Pyhäjoen virtaamasarjat ovat eripituiset.

### 3.32 Määrittäminen menetelmä

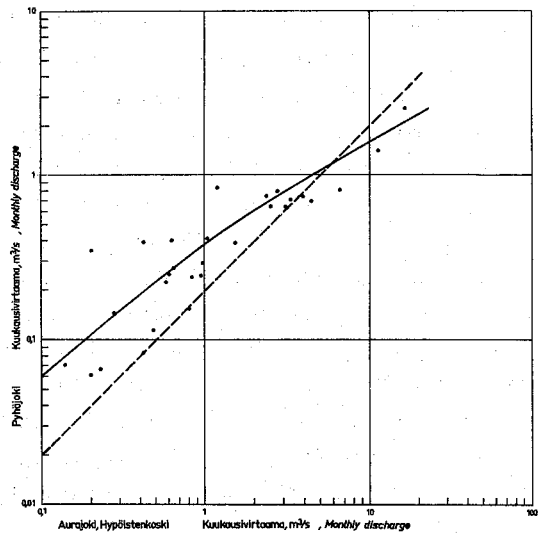
Pyhäjärven tulovalunta kuukausittain vuosille 1949-70 on laskettu edellä esitettyä menettelyä käyttäen. Jakson loppuvuosina 1971-73 on käytetty Yläneenjoen ja Pyhäjoen virtaamahavain-toja. Hypöistenkoskesta on ennen vuotta 1949 käytettävissä vain satunnaisia virtaamatietoja. Kun Pyhäjärven tulovalunnan aikasarjaa on kuitenkin haluttu jatkaa taaksepäin vuoteen 1938 saakka, on vuosien 1938-48 kuukausittaiset tulovalunnat laskettu Aurajoen Halistenkosken virtaamahavaintojen perusteella. Nämä laskelmat on tehty suoraan valuma-alueiden pinta-alojen suhteessa. Kuvien 6 ja 7 mukaisia riippuvuuksia ei Halistenkosken virtaamille ole voitu määrittää, koska Halistenkosken virtaamatietoja vertailuvuosilta 1971-73 ei ole ollut käytettävissä. - On ilmeistä, että nämä vuosille 1938-48 lasketut Pyhäjärven tulovalunnat ovat epäluotettavampia kuin jaksolle 1949-73 määritetyt. Ne on kuitenkin haluttu ottaa mukaan erityisesti vuosien 1939-42 kuivakautta silmälläpitäen.

Edellä kuvatulle tulovalunnan määrittämenetelmälle on vaikea esittää tarkkoja virherajoja. Hypöistenkosken virtaamat ovat suhteellisen tarkkoja myös talvikuukausina; niiden virheeksi voidaan arvioida  $\pm 5\%$ . Määrittämenettelyyn sisältyy monia virhelähteitä, joista keskeisin on kuvien 6 ja 7 käyrien käyttö Yläneenjoen ja Pyhäjoen virtaamien graafiseen arviointiin. Pistejoukon hajonta varsinkin Pyhäjoen osalta ilmaisee, että virhe voi yksittäisinä kuukausina olla jopa yli 100%. Pitemmällä jaksolla keskivirhe kuitenkin on paljon pienempi. Systemaattinen virhe saattaa aiheutua siitä, että jonakin vuodenaikana virtaamien riippuvuus-



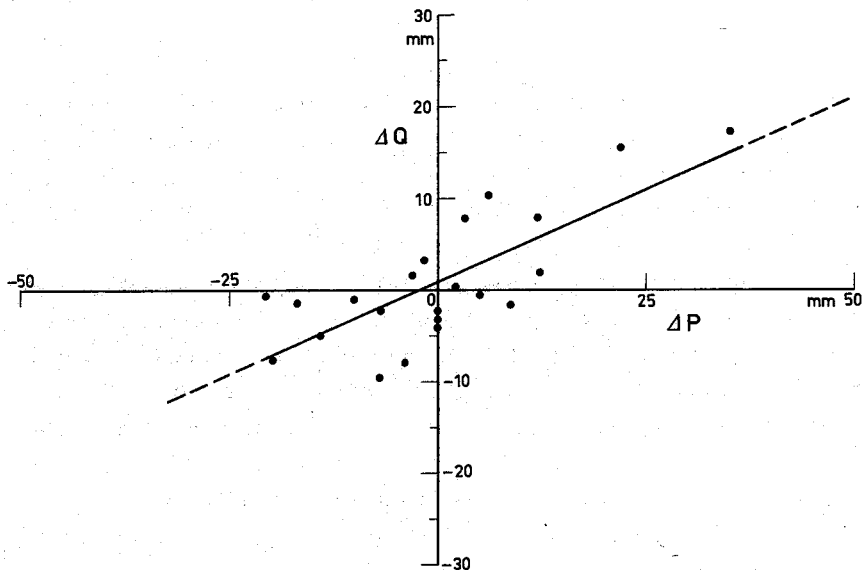
Kuva 6. Yläneenjoen ja Aurajoen kuukausivirtaamien riippuvuus (yhtenäinen viiva; katkoviiva = pinta-alojen suhteen mukainen riippuvuus).

Fig. 6. The relationship between monthly discharges of Yläneenjoki and Aurajoki (solid line; broken line = relationship in proportion to drainage areas).



Kuva 7. Pyhäjoen ja Aurajoen kuukausivirtaamien riippuvuus (yhtenäinen viiva; katkoviiva = pinta-alojen suhteen mukainen riippuvuus).

Fig. 7. The relationship between monthly discharges of Pyhäjoki and Aurajoki (solid line; broken line = relationship in proportion to drainage areas).



Kuva 8. Pyhäjärven lasketun ja todellisen tulovalunnan erotuksen ( $\Delta Q$ ) riippuvuus Aurajoen ja Pyhäjärven aluesadantojen erotuksesta ( $\Delta P$ ).

Fig. 8. The relationship between the difference in calculated and actual net inflow into Lake Pyhäjärvi ( $\Delta Q$ ) and the difference in areal precipitation in the Aurajoki and Pyhäjärvi area ( $\Delta P$ ).

käyrä poikkeaa huomattavasti kuvissa 6 ja 7 esitetystä. Vertailuaineiston vähäisyys ei anna mahdollisuutta tutkia riippuvuuskäyriä eri kuukausina. Hajonta kuvien 6 ja 7 riippuvuus-käyrien ympärillä on suurin kesäkuukausina; syynä tähän saattaa olla kuurosateiden paikallisuus, jonka ansiosta sadanta Aurajoen ja Pyhäjoen valuma-alueilla voi olla hyvin erisuuruinen. On ilmeistä, että juuri kesäkuukausina valunnan määräytyminen on epätarkinta. Toisaalta valunta on tällöin verraten pieni, joten sen määritysvirheen vaikutus kesäkuukausien netto-tulovaluntaan on vähäinen. Paljon merkittävämpi voi olla kevätylivalunnan virhe, koska sulamisvesivalunta muodostaa yli 40 % vuotuisesta tulovalunnasta. Yläneenjoen osalta kevätkuukausien valunnat ovat melko luotettavia, Pyhäjoen sen sijaan huonompia. Lumipeitteen aluevesiarvojen eroja käyttäen voisi arvioida jonkin verran tarkentaa, varsinkin kun vertailukeväiden 1971-73 lumisuhteet eivät olleet keskimääräiset. Hypöistenkosken valuma-alueella oli lumipeitteen vesi-arvo maaliskuun puolivälissä jaksolla 1938-73 keskimäärin 4 mm suurempi kuin Pyhäjärven alueella. Vertailukeväänä 1973 tämä ero oli 16 mm, mikä heijastuu myös kuvien 6 ja 7 pisteparviin. Sen sijaan muina vertailukeväänä ero oli lähempänä normaalina (6 ja 2 mm).

Kevätylivalunnan ajallinen kulku on eri vertailukeväänä ollut suurinpiirtein samanlainen: Aurajoessa kevätylivalunta on alkanut hieman aikaisemmin ja edennyt hieman nopeammin kuin Yläneenjoessa. Aurajoen ja Pyhäjoen välinen ero on ollut samankaltainen, mutta jonkin verran suurempi. Valuntahuippu on kaikkina kolmena vertailukeväänä osunut Aurajoessa ja Yläneenjoessa lähes samalle päivälle (1971 huhtikuun 9. ja 10., 1972 huhtikuun 13. ja 15. ja 1973 huhtikuun 7. ja 7.päivä). Pyhäjoessa valuntahuippu on esiintynyt myös lähes samoina päivinä. Yläneenjoessa ja Pyhäjoessa ylivalunta on jatkunut jonkin verran pitempään kuin Aurajoessa.

Nämä mainitut erot voidaan selittää valuma-alueiden maastotyyppijakaumien perusteella. Aurajoen yläjuoksulla on runsaasti peltoaukeita joen varsilla, joten valunta alkaa verraten aikaisin (pellon osuus valuma-alueen alasta on 29 %). Yläneenjoen ja Pyhäjoen valuma-alueilla pellon osuus on vähäisempi (noin 15 %).

Kohdassa 3.22 mainittu systemaattinen ero kuukausisadannoissa Aurajoen ja Pyhäjärven alueilla aiheuttaa tulovalunnan määrittämisessä virhettä varsinkin elo-marraskuussa. Aurajoen alueella sataa tällöin huomattavasti runsaammin. Talvella sadantojen systemaattinen ero ei vaikuta tulovaluntaan, koska sateet tulevat pääasiassa lumena. Mainittua virhettä voidaan jonkin verran pienentää tutkimalla sadantojen erotuksia ja vastaavia virtaamien poikkeamia riippuvuusuurilta vertailujakson 1970-73 aikana. Kuvassa 8 on esitetty näin saatu pisteparvi ja siihen liittyvä regressiosuora. Tässä kuvassa  $\Delta P$  on Aurajoen ja Pyhäjärven valuma-alueiden aluesadantojen erotus ja  $\Delta Q$  on lasketun ja havaitun Pyhäjärven tulovalunnan erotus. Koska varsinkin aluesadantojen määritys on epätarkkaa sadeasemien vähälukuisuuden takia, on korrelaatio heikko ( $r = 0,36$ ). Elo-marraskuun tulovalunnat on kuitenkin korjattu kuvan 8 regressiosuoran perusteella aluesadantojen erotuksia käyttäen. Korjaus pienentää tulovaluntoja elokuussa keskimäärin 2 mm, syys- ja lokakuussa 4 mm ja marraskuussa 3 mm. Yksittäisinä kuukausina korjaus on varsinkin syys- ja lokakuussa useana vuonna yli 10 mm.

Taulukko 5. Pyhäjärven tulovalunta kuukausittain 1938-73 (mm järven keskipinta-alaa kohti).  
 Table 5. Monthly runoff into Lake Pyhäjärvi in 1938-73 (mm per mean area of the Lake).

Vuosi Year	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	Σ
1938	9	5	308	124	4	1	2	1	11	131	174	38	808
39	7	20	54	237	12	1	1	1	1	1	34	11	380
40	1	1	229	60	1	1	1	1	14	16	243	51	619
41	1	1	1	175	121	1	1	1	2	1	1	1	307
42	1	1	1	321	19	26	20	57	1	44	39	54	584
43	5	88	217	275	14	2	39	87	97	157	292	129	1402
44	86	39	5	350	139	27	39	5	13	205	219	266	1393
45	25	10	59	424	32	27	44	63	60	79	48	6	877
46	6	2	17	406	91	42	2	9	54	15	84	82	810
47	9	2	2	225	35	13	4	3	12	2	2	32	341
48	4	5	8	272	10	40	14	24	31	157	157	78	800
49	136	60	53	219	18	2	2	3	5	36	21	122	677
50	4	2	92	278	24	2	2	7	27	115	131	163	847
51	15	6	5	329	49	2	7	11	17	1	22	123	587
52	103	19	13	246	9	2	2	4	7	113	86	102	706
53	59	16	182	204	13	11	24	104	61	75	78	63	890
54	145	5	35	203	69	3	147	122	178	164	219	197	1487
55	18	47	7	109	287	6	3	2	3	52	92	41	667
56	77	4	6	165	211	7	2	3	6	7	3	56	547
57	8	3	4	200	147	33	22	37	136	186	85	132	993
58	28	9	7	163	202	18	6	6	6	8	15	10	478
59	12	88	159	233	26	8	3	6	3	5	9	9	561
60	6	3	2	231	56	7	14	64	56	44	134	139	756
61	61	74	194	119	51	14	40	164	52	75	156	63	1063
62	136	70	20	336	87	17	9	17	79	81	95	76	1023
63	6	5	4	177	75	7	3	8	35	170	91	19	600
64	15	7	2	186	97	6	2	2	10	32	45	183	587
65	70	21	17	203	32	6	7	30	15	14	58	8	481
66	6	5	8	196	303	10	7	7	7	69	135	85	838
67	24	11	182	273	88	13	4	98	106	229	114	21	1163
68	2	2	176	168	69	9	8	3	23	77	160	43	740
69	14	8	6	284	80	12	4	2	6	42	187	44	689
70	18	11	9	337	191	10	11	29	8	29	140	91	884
71	146	32	11	234	65	9	4	4	4	3	14	29	555
72	16	11	17	302	92	10	28	53	4	26	89	122	770
73	18	15	62	203	71	32	81	15	22	55	60	48	682

## 3.33 Tulosten tarkastelua

Edellämainitun alueadannan eroista aiheutuvan korjauksen lisäksi on tulovaluntaan tehty sadannan yhteydessä käsitelty tuulen aiheuttamasta kuljetuksesta aiheutuva 10 % korjaus, joka vaikuttaa maaliskuun tulovaluntaan. Jos tulovalunta on jo maaliskuussa ylittänyt 100 mm järven keskipinta-alaa kohti, lisäys on tehty maaliskuun tulovaluntaan, muulloin vasta huhtikuun tulovaluntaan. Tämän korjauksen jälkeen on saatu kuukausittaiset tulovalunnat vuosille 1938-73. Jatkotarkasteluja varten ne on ilmoitettu käyttäen yksikköä mm järven keskipinta-alaa kohti. Tulovalunnan kuukausiarvot ja vuosisummat on esitetty taulukossa 5; kuukausikeskiarvot ja erät muut tunnusluvut taulukossa 6.

Tulovalunnan vuosikeskiarvo 766 mm vastaa maa-alueelta tapahtuvaa 256 mm:n vuosivaluntaa (eli  $8,1 \text{ l/s km}^2$ ). Valunnan vuotuinen kulku on lähes järvettömälle alueelle tyypillinen: huhtikuun valunta on lähes 20-kertainen kuivimman kuukauden (kesäkuu) valuntaan verrattuna. Todellisuudessa suhde voi olla suurempikin kastelun keskittyessä alkukesään ja pienentäessä siten kesäkuun valuntaa. Tulovalunnan vaihtelukerroin on suurin keski- ja loppukesällä, jolloin myös kuukausisadannat vaihtelevat voimakkaaimmin. Huhtikuussa vaihtelukerroin on hyvin pieni, koska suurin osa lumen sulamisen aiheuttamasta valunnasta tapahtuu melkein joka vuosi huhtikuussa. Valuntajakaumien vinous on suuri kesäkuukausina, jolloin runsaiden sateiden seurauksena esiintyy joinakin vuosina hyvinkin suuria kuukausivaluntia (lähes  $20 \text{ l/s km}^2$ ).

Taulukko 6. Pyhäjärven tulovalunnan kuukausi- ja vuosijakaumien tunnuslukuja jaksolla 1938-73.

Table 6. Some statistical parameters of monthly and annual runoff into Lake Pyhäjärvi in 1938-73.

Kuukausi Month	Keskiarvo Mean $\bar{I}$ (mm)	Keski- hajonta Standard deviation $s_I$ (mm)	Vaihtelu- kerroin Coefficient of variation $c_v$	Vinous Coeffi- cient of skewness $c_s$	Peräkkäisten kuukausivaluntojen korrelaatiokerroin First correlation coefficient of monthly runoff $r_{i,i+1}$
I	36	46	1,3	1,5	0,35
II	20	26	1,3	0,6	0,36
III	54	73	1,4	1,7	0,16
IV	240	78	0,3	0,6	0,28
V	82	76	0,9	1,5	0,07
VI	12	11	0,9	0,9	0,17
VII	17	28	1,7	3,4	0,61
VIII	29	42	1,4	1,8	0,66
IX	33	43	1,3	1,8	0,63
X	70	68	1,0	0,8	0,57
XI	98	75	0,8	0,6	0,43
XII	76	61	0,8	1,2	0,24
$\Sigma$	766	284	0,37	0,80	



Peräkkäisten kuukausivaluntojen korrelaatiokertoimet ovat melko suuria varsinkin heinä-lokakuussa, jolloin ne ovat 0,1 % riskitasolla merkitseviä. Tämä selvä riippuvuus johtuu osittain käytetystä tulovalunnan määritysmenetelmästä, joka tasoittaa satunnaisvaihteluita. Vertailujaksolla 1971-73 peräkkäisten kuukausien tulovaluntojen korrelaatiokerroin oli 0,17, kun taas vastaavalle jaksolle laskettujen tulovaluntojen korrelaatiokerroin oli 0,23. Tämä 'keinotekoinen' autokorrelaatio voidaan tulovalunnan aikasarjoista poistaa lisäämällä niihin satunnaiskomponentti esim. Thomas-Fieringin mallia käyttäen (Fiering 1967). Muihin tulovalunnan jakaumien parametreihin tämä operaatio ei vaikuttaisi.

Tässä tutkimuksessa ei mainittua 'keinotekoista' autokorrelaatiota ole poistettu. Tämän satunnaistamisen vaikutus olisi vertailujakson korrelaatiokertoimien perusteella melko pieni. Lisäksi on todettava, että eräissä jatkotarkasteluissa pitäisi kuitenkin käyttää alkuperäisiä, satunnaistamattomia tulovaluntoja.

### 3.4 HAIHDUNTA

#### 3.41 Yleisiä näkökohtia

Järven pinnasta tapahtuvan haihdunnan määrittämisellä on tässä tutkimuksessa hyvin keskeinen merkitys ja niin ollen sitä käsitellään seuraavassa melko laajasti. Verrattuna tulovaluntaan ja sadantaan on todettava, että mahdollisuudet haihdunnan määrittämiseen samalla tarkkuudella ovat vähäiset. Suurin virhe järven nettotulovalunnan määrittämisessä tehtäneen siten juuri haihdunnan kohdalla.

Järvihaihduntaan vaikuttavat tekijät tunnetaan varsin hyvin, mutta eri tutkijoiden käsitykset niiden suhteellisesta merkityksestä vaihtelevat melkoisesti. Tämä johtuu osittain siitä, että nämä tekijät liittyvät monimutkaisten vuorovaikutusten välityksellä toisiinsa, joten niiden tutkiminen erillisinä on hyvin vaikeaa. - Seuraavassa esitetään keskeisimmät järvihaihduntaan vaikuttavat tekijät:

1. Auringonsäteily. Veden höyrystymislämpö on n. 2500 J/g. Käytettävissä oleva auringonsäteilyn energia asettaa ylärajan haihdunnalle, joten se on tavallaan tärkein haihtumiseen vaikuttava tekijä. Auringonsäteilyn ja haihdunnan vuotuinen kulku onkin pääpiirteissään varsin samankaltainen erityisesti alemmilla leveysasteilla.
2. Ilman ja veden lämpötila. Nämä tekijät ovat suuresti riippuvaisia edellisestä, joten on selvää, että ne myös korreloivat haihdunnan kanssa. Ilman lämpötilan vuotuinen kulku ei kuitenkaan vastaa niin tarkoin haihdunnan kulkua kuin auringonsäteilyn (Ward 1967). Veden lämpötilalla on keskeinen merkitys haihduntaan sen vaikuttaessa vesimolekyylien liike-energiaan ja siten niiden siirtymiseen nestefaasista ylläolevaan ilmaan.
3. Ilman vesihöyrinpaine. Haihdunta on suoraan verrannollinen vallitsevaa lämpötilaa vastaavan kyllästetyn vesihöyrin paineen ja vallitsevan vesihöyrin paineen erotukseen.

Vaikka tämä erotus olisikin nolla ja siis suhteellinen kosteus 100 %, voi jonkin verran haihduntaa tapahtua (Ward 1967).

4. Tuulen nopeus. Haihdunta on riippuvainen siitä, miten nopeasti vesimolekyylit kulkeutuvat pois pinnan läheisistä ilmakerroksesta. Tuulen nopeuden kasvaessa tämä poiskulkeutuminen tehostuu ja haihdunta kasvaa. Tietyllä tuulen nopeudella saavutetaan kuitenkin raja, jonka jälkeen tuulen nopeuden kasvu ei enää lisää haihduntaa. Tuuli ei siis sinänsä lisää haihtumista; sen aiheuttama vesimolekyylien vaihto ylläpitää tietyn suuruista haihduntaa.
5. Järven muoto ja pinta-ala. Haihdunta järven pinnasta pienenee järven pinta-alan kasvaessa. Samoin haihdunta pienenee järvellä tuulenpuoleista rantaa lähestyttäessä, koska ilman vesihöyryn paine pinnan läheisissä ilmakerroksissa kasvaa. Näin käy siitakin huolimatta, että tuulen nopeus kasvaa samassa suunnassa.  
Jos ilman suhteellinen kosteus on jo suojanpuoleisella rannalla korkea, on haihdunnan jakauma järvellä tasaisempi. Tällöin myös astiahaihdunnan ja järvihaihdunnan suhde on pienempi kuin ilman ollessa kuivaa. On siis merkillepantavaa, että tämä suhde riippuu myös ilman suhteellisesta kosteudesta.
6. Järven syvyys. Tämän tekijän vaikutus haihdunnan suuruuteen ja vuotuiseen kulkuun on varsin selväpiirteinen. Matala järvi lämpenee keväällä nopeasti ja haihdunta on suuri jo touko-kesäkuussa. Syvä allas taas lämpenee hitaasti, mutta jäähtyy syksyllä myös hitaammin, joten syys-lokakuun haihdunnat voivat olla vielä melko suuria.
7. Veden laatu. Veden sameudella ja epäpuhtauksilla on vähäinen suoranaisten vaikutus haihduntaan. Vaikuttamalla veden lämpötaseeseen ne voivat kuitenkin merkittävästikin muuttaa haihduntaolosuhteita. - Veteen liuenneet suolat pienentävät veden höyrypainetta ja siis myös haihduntaa; niiden vaikutus on kuitenkin valtamerissäkin varsin vähäinen.

Edellä esitettyjen näkökohtien mukaan on ilmeistä, että havaintopaikkojen ja -menetelmän valinnalla on suuri merkitys haihdunnan määrityksessä. Säteily-, lämpötila-, kosteus- ja tuulisuhteiden pitäisi havaintopaikoilla olla edustavat, samoin vapaan matkan vallitsevien tuulten suunnassa. On selvää, että nämä vaatimukset voivat tulla vain osittain täytetyiksi; havaintopaikat määräytyvät käytännössä useimmiten vähempiarvoisten tekijöiden perusteella.

Suoranaisia mittauksia avovesikauden haihdunnasta on Pyhäjärvellä tehty vuosina 1971-74. Määritysmenetelmiä on ollut käytössä kolme, mutta lautalla tehdyt GGI-3000-astiahavainnot on pitänyt hylätä niiden suuren epävarmuuden vuoksi. Muut käytetyt menetelmät ovat vesitasemenetelmä sekä aerodynaaminen menetelmä, jossa haihdunta on laskettu kaavasta (2) (Shuljakovski 1969):

$$E = (0,15 + 0,108 v_2) (e_0 - e_2) \quad (2)$$

$E$  = haihdunta järven pinnasta, mm/vrk

$v_2$  = tuulen nopeus 2 m korkeudella, m/s

$e_0$  = kyllästetyn vesihöyryn paine vedenpinnan lämpötilassa, mb

$e_2$  = ilman vesihöyryn paine 2 m korkeudella, mb

Näidenkin menetelmien soveltamisessa on ollut eräitä hankaluuksia ja niillä saaduissa tuloksissa ilmenee huomattavaa hajontaa. Taulukossa 7 on esitetty nämä tulokset kuukausiarvoina vuosilta 1971-72 (Hyvärinen, Järvinen ja Tuominen 1973)

Taulukko 7. Haihdunta Pyhäjärven pinnasta kesä-lokakuussa 1971-73 (1 = vesitasemenetelmä, 2 = aerodynaaminen menetelmä).  
Table 7. Evaporation from Lake Pyhäjärvi in June-October 1971-73 (1 = water balance method, 2 = aerodynamic method).

Vuosi Year	Menetelmä Method	Haihdunta (mm) Evaporation					
		VI	VII	VIII	IX	X	Σ
1971	1	65	113	120	52	30	380
	2	140	155	128	81	49	553
1972	1	46	122	110	60	46	384
	2	79	111	104	50	24	368

Poikkeama avovesikaudelle 1971 määritetyissä haihduntasummissa on niin suuri, että se asettaa saadut tulokset kyseenalaisiksi mainitun vuoden osalta. Sen sijaan avovesikauden 1972 haihduntasummat vastaavat melko hyvin toisiaan; kuukausihaihdunnoissa esiintyy kuitenkin huomattavia poikkeamia. - Avovesikausien 1973 ja 1974 tulokset eivät olleet vielä käytettävissä.

### 3.42 Järvi haihduntaa koskevia tutkimuksia

Tarkastellaan seuraavassa eräitä ulkomaisia tutkimuksia järvi haihdunnasta. Antal, Baranyi ja Tóth (1973) ovat vertailleet kuutta eri menetelmää Balaton-järven haihdunnan määrittämiseksi. Tämän Keski-Euroopan suurimman järven ( $F_1 = 600 \text{ km}^2$ ) haihdunnasta on esitetty useita aiempiakin tutkimuksia (Szesztay 1967). Vertailututkimuksessa osoittautui parhaaksi Daltonin lakiin perustuva kaava (3):

$$E = (0,33 + 0,10 v_7) (e_o - e_d) \cdot n \quad (3)$$

$E$  = haihdunta, mm

$v_7$  = tuulen nopeus 7 m korkeudella, m/s

$e_o$  = kylästetyn vesihöyryn paine vedenpinnan lämpötilassa, mm Hg

$e_d$  = ilman vesihöyryn paine korkeudella  $d$ , mm Hg

$n$  = päivien lukumäärä

Eri menetelmillä saadut vuosihaihdunnan keskiarvot jaksolla 1931-60 vaihtelivat välillä 826-904 mm. Daltonin lakiin perustuvalla menetelmällä saatiin tulos 860 mm. Kuukausi-

arvoissa vaihtelut eri menetelmillä saaduissa tuloksissa olivat suhteellisesti suurempia; esim. heinäkuun haihdunnaksi saatiin eri menetelmillä 140-180 mm.

Keijman ja Koopmans (1973) ovat tutkineet suuren, matalan järven haihduntaa ja todenneet aerodynaamisen menetelmän ja Penmanin kaavan antavan viidestä kokeillusta menetelmästä luotettavimpia tuloksia. Epäluotettavimpana menetelmänä he pitivät haihdunta-astioiden käyttöä.

Richter (1973) ei myöskään suosittelen haihdunta-astioihin perustuvaa järvi haihdunnan määritysmenetelmää. Aerodynaamiseen kaavaan hän on lisännyt haihdunnan selittäjäksi kokonaissäteilyn ja kokeillut myös erisuuruisia tuulen nopeuden eksponentteja. Energiataseseen perustuvassa mallissaan hän on esittänyt riippuvuussuhteet ilman ja vedenpinnan lämpötiloille matalissa järvissä. Vuosihaihdunta Müritzjärvellä oli energiatasemenetelmän mukaan 712 mm jaksolla 1958-67 ja heinäkuun haihdunta 124 mm.

Rohde (1973) on käyttänyt Velen-järven ( $F_1 = 2,8 \text{ km}^2$ ) haihdunnan määrittämiseen energiatasemenetelmää, Class A ja GGI-3000 haihdunta-astioita sekä vesitaselaskelmia. Kesäsyyskuun 1971 haihdunta oli näillä menetelmillä vastaavasti 353, 306, 273 ja 385 mm. Astiakertoimen suuruudeksi Rohde esittää kesäkuukausille 0,7-0,8 ja syys-lokakuulle 1,0. Energia- ja vesitaseeseen perustuvia haihdunta-arvoja hän pitää jonkin verran liian suurina.

Vikulina (1973) kritikoit Penmanin kaavan käyttöä järvi haihdunnan määrittämiseen ja toteaa, että todellisten hydrometeorologisten olosuhteiden huomioiminen on ensiarvoisen tärkeää. Vikulina on verrannut  $20 \text{ m}^2$  suuruisella kelluvalla haihdunta-astialla määritettyjä kuukausihaihduntoja tuloksiin, jotka on saatu kaavalla (4):

$$E = 0,14 (1 + 0,72 v_2) (e_0 - e_2) \cdot n \quad (4)$$

Lausekkeen (4) merkinnät ovat vastaavat kuin lausekkeessa (3); vesihöyrynpaine on kuitenkin ilmaistu millibaareina. Näillä kahdella menetelmällä saatujen haihduntojen poikkeama on useimpina havaintokuukausina ollut alle 10 %. Vikulinan mukaan kaava (4) on riittävän tarkka käytännön tarpeita varten.

Kirillova, Ogneva ja Nesina (1973) ovat käyttäneet haihdunnan määrittämisessä perusmenetelmänä energiatasetta. He ovat myös esittäneet kertoimet avovesikauden eri kuukausille järvi haihdunnan määrittämiseksi astiahavaintojen perusteella. Edelleen he ovat esittäneet kertoimet tuulen nopeuden suhteille eri suuruisien altainen ja maanpinnan yläpuolella.

Szumiec (1973) on käyttänyt harmonista analyysiä vedenpinnasta tapahtuvan haihdunnan vuorokausi- ja kuukausivaihtelujen tutkimiseen. Klo 7-19 haihtui touko-syyskuussa keskimäärin 60 % kokonaishaihdunnasta, joten myös yöajan haihdunta oli huomattavaa. Kuukausihaihduntojen hajonta oli suurin heinäkuussa, jolloin haihdunnat olivat 55-140 % kymmenvuotisjakson heinäkuun keskihaidunnasta.

Neuwirth (1973) on tutkinut matalan Neusiedl-järven ( $F_1 = 320 \text{ km}^2$ ) haihduntaa. Hän on käyttänyt lautalla olevia GGI-3000- ja Class A -haihduntapannuja sekä järven rannalle asennettua GGI-3000 astiaa. Kuukausittaiset astiakertoimet Class A -astialle olivat touko- loka- kuussa 0,70 - 0,75 (vertailukohteena oli energiataseen avulla määritetty järvihaihdunta). Kerrointen vaihtelu eri vuosina oli huomattavaa ja niihin perustuva järvihaihdunta siten epätarkka. Sääolosuhteista riippuen astiahaihdunta voi olla pienempikin kuin järvihaihdunta.

Lautalle sijoitettu GGI-3000 -haihdunta-astia osoittautui varsin hyväksi heikoilla tuulilla. Kun tuulen nopeus ylitti 7 m/s, tuli roiskuntavirhe liian suureksi. Järven rannalle rakennetussa altaassa kelluva GGI-3000 -astia antoi varsin hyviä tuloksia, kun altaan veden lämpötilaa pidettiin samana kuin järvi veden.

Class A-astiasta tapahtuvan haihdunnan muuntaminen ns. Webbin menetelmällä järvi haihdunnaksi on Neuwirthin mukaan käyttökelpoinen keino lyhyidenkin ajanjaksojen aikana. Lähtökohdiana tässä menetelmässä on olettamus, että järvi- ja astiahaihdunnan riippuvuus voidaan esittää muodossa:

$$E_1 = f(v) \frac{e_1 - e_2}{e_p - e_2} E_p \quad (5)$$

$E_1$  = haihdunta järven pinnasta

$E_p$  = astiahaihdunta

$f(v)$  = tietty tuulen nopeuden funktio

$e_1$  = kyllästetyn vesihöyrin paine järven pintaveden lämpötilassa

$e_p$  = kyllästetyn vesihöyrin paine astian veden lämpötilassa

$e_2$  = ilman vesihöyrin paine 2 m korkeudella

Tuulen nopeuden funktiolle  $f(v)$  Neuwirth on määrittänyt lausekkeen

$$f(v) = \frac{0,13 + 0,028 v_3}{0,09 + 0,061 v_3} \quad (6)$$

$v_3$  = tuulen nopeus 3 m korkeudella, km/h

Korrelaatiokerroin Webbin menetelmällä ja energiataseen avulla määritettyjen 5 päivän haihduntojen välillä oli eri vuosina 0,79 - 0,90. Neuwirth pitää Webbin menetelmää tyydyttävänä järvi haihdunnan määrittämisessä.

Edellä esitettyjen tutkimustulosten valossa on aerodynaaminen menetelmä useimpien tutkijoiden käyttämä, joskin käytetyn lausekkeen (7) kertoimet vaihtelevat jossain määrin:

$$E = (a + bv) (e_o - e_h) \quad (7)$$

$E$  = haihdunta aikayksikköä kohti, mm

$v$  = tuulen nopeus

$e_o$  = kyllästetyn vesihöyryn paine vedenpinnan lämpötilassa

$e_h$  = vallitseva vesihöyrynpaine korkeudella  $h$

$a, b$  = empiirisiä kertoimia

Tämä kerrointen vaihtelu on luonnollista, koska erisuuruksilla järvillä ja eri ilmasto-olosuhteissa haihdunnan riippuvuus tuulen nopeudesta ja vesihöyrynpaine-erosta vaihtelee. Seuraavassa on kerättyä eräitä lausekkeen (7) kertoimien arvoja (lähinnä Elomaan (1974) mukaan):

tutkija	a	b	
Andersson	-	0,096	Lake Hefner
Elomaa	-	0,121	Pääjärvi
Ficke	-	0,123	
Harbeck	-	0,114	
Keijman & Koopmans	-	0,131	Lake Flevo
Kondo	-	0,156	Lake Towada
Marciano & Harbeck	-	0,137	
Shuljakovski	0,15	0,108	
Webb	-	0,115	
Virta	-	0,122	Pääjärvi

Harbeckin (1962) mukaan kerroin  $b$  riippuu järven pinta-alasta lausekkeen (8) mukaisesti:

$$b = \frac{0,291}{A^{0,05}} \quad (8)$$

Tässä  $A$  on järven pinta-ala ( $m^2$ ). Yllä olevassa luettelossa annettu Harbeckin saama arvo on kaavasta (8) laskettu järvelle, jonka pinta-ala on  $150 \text{ km}^2$  eli  $150 \cdot 10^6 \text{ m}^2$ .

Jääpeitteen aikaista järvihaihduntaa on tutkittu huomattavasti vähemmän kuin avovesikauden haihduntaa. Tämä johtuu osittain sen pienemmästä käytännöllisestä merkityksestä, osittain ehkä myös suuremmista vaikeuksista tutkimusmenetelmien suhteen. Kullus (1973) on käyttänyt järven lumi- ja jääpeitteestä tapahtuvan haihdunnan määrittämiseen Kuzminin tutkimuk-

siin perustuvaa lauseketta (9):

$$E = (0,0075 + 0,0041 v_{10}) (e_s - e_2) \cdot 24 n \quad (9)$$

$E$  = haihdunta, mm

$n$  = havaintopäivien lukumäärä

$v_{10}$  = tuulen nopeus 10 m korkeudella, m/s

$e_s$  = kyllästetyn vesihöyryn paine lumenpinnan lämpötilassa, mb

$e_2$  = ilman vesihöyryn paine 2 m korkeudella, mb

Tammi-helmikuussa tiivistyntä oli Peipsi-Pihkva-järvellä ( $F_1 = 3300 \text{ km}^2$ ) suurempi kuin haihdunta. Kuukausihaihdunnoiksi jaksolla 1930-69 on Peipsi-Pihkva-järvellä saatu seuraavat (mm):

I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	$\Sigma$
-9	-2	5	20	44	81	109	109	89	67	43	2	558

Avovesikauden haihdunnat perustuvat edellämainittuun Shuljakovskin kaavaan (2), jota on meilläkin käytetty.

Avoimella kentällä lumipeitteestä tapahtuvaa haihduntaa ovat tutkineet Lemmelä ja Kuusisto (1974). Tutkimus kohdistui pääasiassa sulamiskausiin; tällöin oli vuorokausihaihdunta keskimäärin 0,3 mm ja suurimmillaan noin 1,0 mm/vrk. Päiväajan (klo 07-19) haihdunnalle saatiin lauseke (10):

$$E = (0,087 + 0,097 v_2) (e_s - e_2) + 0,04 \quad (10)$$

Tässä  $[E]$  = mm/12 h ja muut suureet ovat kuten edellä. Korrelaatiokerroin käytetyssä 94 vrk:n aineistossa oli 0,80. Kaitera ja Teräsvirta (1972) saivat talvella 1969-70 kokonais-haihdunnaksi Otaniemessä 10,1 mm ja Sodankylässä 14,5 mm. Mittaukset tehtiin aukealla; metsässä haihtui keskimäärin 50...70 % vastaavasta aukean haihdunnasta.

### 3.43 Määrittämissuunnitelman kuvaus

Tässä tutkimuksessa on avovesikausien 1938-73 kuukausihaihdunnat Pyhäjärvellä määritetty aerodynaamista kaavaa käyttäen. Koska suoranaisia mittauksia kaavan kertoimien määrittämiseksi ei ole Pyhäjärvellä tehty, on käytetty edellä esitettyä Shuljakovskin kaavaa,

jota meillä yleisesti käytetään järvihaihdunnan laskemiseen:

$$E = (0,15 + 0,108 v_2) (e_0 - e_2) \cdot n \quad (11)$$

$E$  = haihdunta, mm/kk

$v_2$  = tuulen nopeus 2 m korkeudella, m/s

$e_0$  = kyllästetyn vesihöyryn paine vedenpinnan lämpötilassa, mb

$e_2$  = vallitseva ilman vesihöyryn paine 2 m korkeudella, mb

$n$  = kuukauden päivien lukumäärä

Suureiden  $v_2$ ,  $e_0$  ja  $e_2$  kuukausikeskiarvoja on käytetty lausekkeessa (11), vaikka se alunperin on kehitetty vuorokausiarvoille. On ilmeistä, että tästä aiheutuu jonkin verran systemaattista virhettä tuloksiin: vertailu avovesikauden 1972 havaintojen perusteella osoitti kuukausikeskiarvojen käytön kaavassa (11) antavan 5-10 % suuremman kuukausihaihdunnan kuin päiväarvojen käytön. Tuloksen yleispätevyyttä ei käytetyn pienen vertailuaineiston perusteella voida todentaa.

Suoranaisia havaintoja suureista  $v_2$ ,  $e_0$  ja  $e_2$  ei Pyhäjärvellä ole tehty kuin avovesikausina 1971-73. Näitä havaintoja on verrattu sellaisten asemien vastaaviin havaintoihin, joista on pitkä, luotettavat havaintosarjat. Näin saatuja riippuvuussuhteita käyttäen on suureet  $v_2$ ,  $e_0$  ja  $e_2$  voitu määrittää Pyhäjärvellä koko jakson 1938-73 avovesikausille. Käytetyt vertailumenetelmät ja tehdyt korjaukset ovat seuraavat:

1. Tuulen nopeus. Määritellään suhde  $K$  lausekkeella (12):

$$K = \frac{v_w}{v_c} \quad (12)$$

$v_w$  = tuulen nopeus vedenpinnan yläpuolella

$v_c$  = tuulen nopeus maanpinnan yläpuolella

Suhde  $K$  riippuu lähinnä kolmesta eri tekijästä (Mäkelä 1971):

1. Vedenpinnan ja maanpinnan erilaisista kitkaominaisuuksista
2. Ilmakehän stabiilisuuden muutoksista, joiden aiheuttajana on veden ja ilman välinen lämpötilaero
3. Matkasta, jonka tuuli pääsee vapaasti puhaltamaan vedenpinnan yläpuolella

Jos oletetaan tuulen suunnan jakauman pysyvän suurin piirtein samana eri kuukausina, voidaan kohdat 1 ja 3 jättää huomiotta. Ilman ja veden välinen lämpötilaero riippuu selvästi tarkastelu-kuukaudesta, joten suhde  $K$  ei tämän mukaan pysy muuttumattomana avovesikauden aikana. Taulukossa 8 on annettu Pyhäjärven Emäkarilla ja Jokioisissa havaitut tuulen nopeuden kuukausikeskiarvot kesä-lokakuussa 1971-72. Emäkarissa tuulimittari on ollut korkeudella 2 m ja Jokioisissa korkeudella 30 m. Taulukosta ilmenee myös tuulen keski-



nopeuksien suhde eri kuukausina.

Taulukko 8. Tuulen nopeuden kuukausikeskiarvot Emäkarilla (korkeudella 2 m) ja Jokioisissa (30 m) kesä-lokakuussa 1971-72.

Table 8. Monthly means of wind velocity on Emäkari island (at a height of 2 m) and at Jokioinen (height 30 m) in June-October 1971-72.

Vuosi Year	Kuukausi Month	Tuulen keskinopeus (m/s) Mean wind velocity (m/s)		Suhde Ratio
		Emäkari	Jokioinen	
1971	VI	4,4	3,8	1,2
	VII	3,9	3,5	1,1
	VIII	4,6	3,7	1,2
	IX	3,8	3,5	1,1
	X	5,1	4,1	1,3
1972	VI	3,9	3,7	1,1
	VII	3,7	3,1	1,2
	VIII	4,6	3,9	1,2
	IX	4,1	3,5	1,2
	X	4,1	3,8	1,1

Taulukossa 8 esitettynä 10 kk vertailujaksoneksi oli tuulen nopeus Emäkarilla siis kaikkina kuukausina suurempi kuin Jokioisissa huolimatta tuulimittarien merkittävästä korkeuserosta. Koko vertailujaksolle lasketut tuulen nopeuden keskiarvot ovat 4,42 m/s ja 3,66 m/s ja kuukausiarvojen korrelaatiokerroin 0,86. Suhteen K keskiarvo on koko aineistossa 1,15. Tämä suhde vaihtelee melko satunnaisesti eri kuukausina eikä Mäkelän (1971) Saimaalla havaitsemaa K:n riippuvuutta havaintokuukaudesta ilmene. Syynä tähän lienee se, että vertailuasemalla tuulimittari on 30 m:n korkeudella, jolloin maanpinnan lämpenemisen vaikutus ilmakehän stabiilisuteen on vähäisempi kuin Mäkelän käyttämällä synoptisilla asemilla, joilla tuulihavainnot tehdään n. 10 m:n korkeudella. - Elomaa (1974) on Pääjärvellä saanut varsin heikon riippuvuuden vertaillen järvellä olevan maston ja järven ympäristön asemien tuulihavainnot. K:n arvo on Elomaan tutkimuksessa huomattavasti suurempi (1,6) mikä aiheutuu erilaisista havaintokorkeuksista.

Edellä esitetyn perusteella on tuulen nopeuden kuukausikeskiarvot Pyhäjärvellä touko-marraskuussa 1938-73 laskettu kertomalla Jokioisten vastaavat arvot luvulla 1,15. Vuosien 1938-57 Jokioisten havainnot on ensin korjattu logaritmisella tuulen nopeuden jakaumalain perusteella, koska havaintokorkeus on mainitulla jaksolla ollut 22 m.

Tällä menetelmällä lasketut tuulen nopeuden kuukausikeskiarvot tarkastelujaksoneksi (1938-73) ovat Pyhäjärvellä seuraavat (m/s):

V	VI	VII	VIII	IX	X	XI
4,0	4,3	3,8	3,5	3,9	4,0	4,0

Kuukausikeskiarvojen hajonta on melko pieni kaikkina kuukausina ja haihduntakaavan tuulifunktio  $0,15 + 0,108 v_2$  vaihtelee siten melko vähän. Sen vaihteluvälit eri kuukausina ovat seuraavat:

	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI
max	0,31	0,46	0,37	0,25	0,36	0,31	0,32
min	0,73	0,76	0,74	0,66	0,72	0,76	0,83

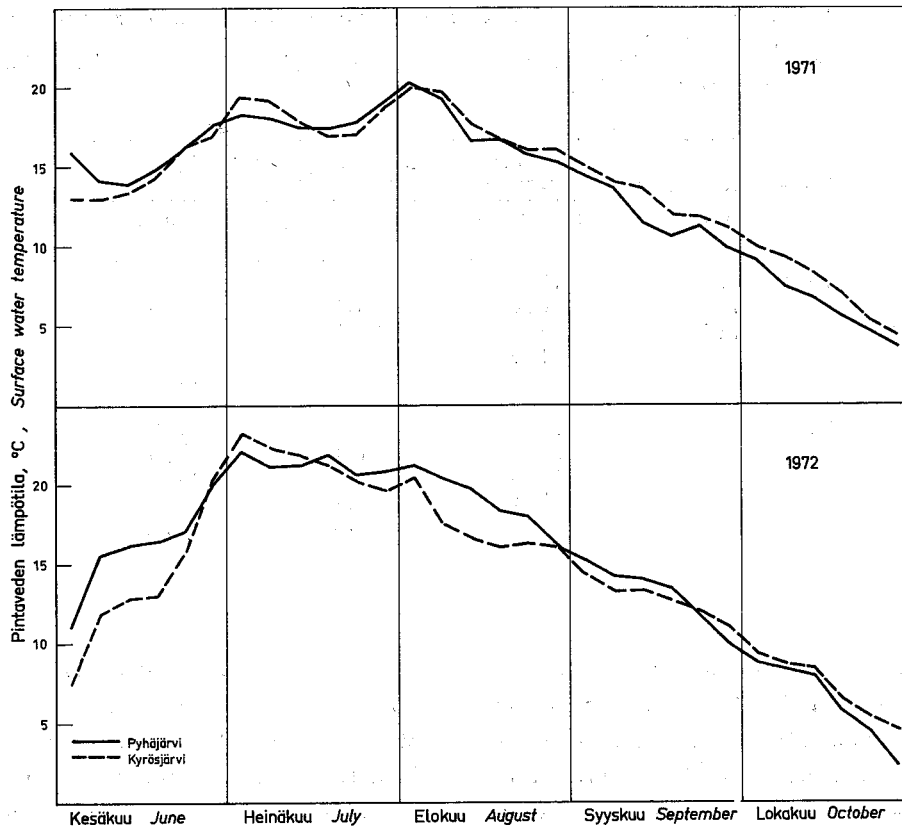
Tuulifunktion suhteellisen vähäinen vaihtelu verrattuna erotuksen ( $e_0 - e_2$ ) vaihteluun aiheuttaa sen, että haihdunnan määrityksen tarkkuus on enemmän riippuvainen vesihöyrynpaine-eron määrityksestä.

2. Vedenpinnan lämpötila. Pyhäjärvellä on mitattu veden lämpötila havaintolautalla avovesikausina 1971-72. Mittaus on tehty aamulla ja illalla ottamalla 3 eri vesinäytettä 20 min. välein. Näiden vesinäytteiden lämpötilojen keskiarvo on laskettu ja vuorokausikeskiarvo on saatu aamu- ja iltahavaintojen keskiarvona.

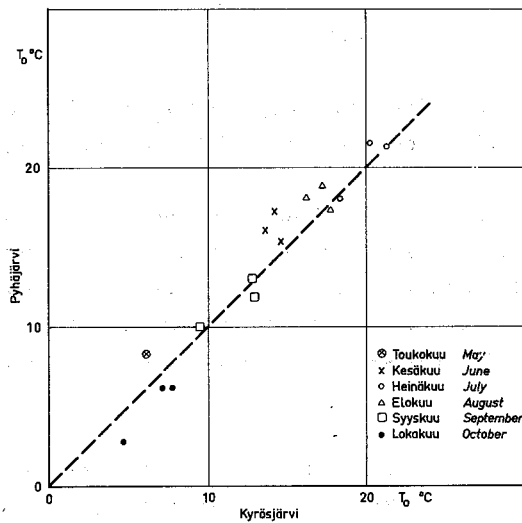
Lähin veden lämpötilojen vertailuun soveltuva järvi, josta on pitkä vedenlämpötilahavaintojen sarja, on Kyrösjärvi. Se on Pyhäjärveä jonkin verran pienempi ( $F_1 = 97 \text{ km}^2$ ) ja huomattavasti rikkonaisempi, mutta sen keskisyvyys on Pyhäjärveen verrattuna noin kaksinkertainen (10 m). Kyrösjärven pohjoisempi sijainti ja suurempi keskisyvyys aiheuttaa sen, että veden lämpötila kohoaa keväällä selvästi hitaammin kuin Pyhäjärvellä. Syksyllä tilanne on päinvastainen: matala Pyhäjärvi jäähtyy suhteellisen nopeasti. Se jäättyi jaksolla 1958-1973 keskimäärin 5 päivää aikaisemmin kuin Kyrösjärvi eteläisemmästä sijainnistaan huolimatta.

Taulukossa 9 on esitetty veden lämpötilan kuukausikeskiarvot Pyhäjärvellä ja Kyrösjärvellä kesä-lokakuussa 1971-72. Kyrösjärven havainnot on tehty kerran vuorokaudessa klo 8, joten niitä ei voi suoraan pitää vertailukelpoisina Pyhäjärven havaintojen kanssa. Samoin näytteenottoisyvyys on Kyrösjärvellä suurempi ja havaintopaikka järven luusuaassa, mutta nämä havaintomenettelyn erilaisuudet tulevat huomioiduiksi korjaustekijää muodostettaessa.

Kuvassa 9 on esitetty pintaveden lämpötilan kulku kesä-lokakuussa 1971-72 Pyhäjärvellä ja Kyrösjärvellä viiden päivän keskiarvoina. Pintavesi on Pyhäjärvessä ollut kesäkuussa huomattavasti lämpimämpää kuin Kyrösjärvessä. Kesäkuun loppupuolella lämpötilakäyrät leikkaavat ja heinä-syyskuussa ne kulkevat melko yhteneväisinä. Tuulen suunnasta riippuen sekoittuminen saattaa välillä olla huomattavasti voimakkaampaa toisessa järvessä ja poikkeuttaa käyriä toisistaan. Hellekausien aiheuttamat huiput ovat lähes yhtä selvät molemmissa käyrissä. Veden jäähtyminen on Pyhäjärvessä syksyllä nopeampaa: lokakuussa lämpötilaero on jo selvä.



Kuva 9. Pintaveden lämpötila Pyhäjärvässä ja Kyrösjärvässä kesä-lokakuussa 1971-72.  
 Fig. 9. Surface water temperature of lakes Pyhäjärvi and Kyrösjärvi in June-October 1971-72.



Kuva 10. Pintaveden lämpötilan kuukausikeskiarvot Pyhäjärvässä ja Kyrösjärvässä touko-lokakuussa 1971-73.  
 Fig. 10. Monthly means of surface water temperatures of lakes Pyhäjärvi and Kyrösjärvi in May-October 1971-73.

Taulukko 9. Pintaveden lämpötilan kuukausikeskiarvot Pyhäjärvellä ja Kyrösjärvellä kesä-lokakuussa 1971-72.  
 Table 9. Monthly means of surface water temperature of Lakes Pyhäjärvi and Kyrösjärvi in June-October 1971-72.

Vuosi <i>Year</i>	Kuukausi <i>Month</i>	Pintaveden keskilämpötila (°C) <i>Mean surface water temperature (°C)</i>		
		Pyhäjärvi	Kyrösjärvi	Erotus <i>Difference</i>
1971	VI	15,4	14,6	+0,8
	VII	18,0	18,3	-0,3
	VIII	17,4	17,7	-0,3
	IX	11,9	13,0	-1,1
	X	6,2	7,7	-1,5
1972	VI	16,1	13,6	+2,5
	VII	21,3	21,3	+0,0
	VIII	18,9	17,2	+1,7
	IX	13,1	12,8	+0,3
	X	6,2	7,1	-0,9

Pintaveden lämpötiloja on vielä verrattu kuvassa 10, jossa on esitetty kuukausikeskiarvot avovesikausilta 1971-73. Toukokuun ja kesäkuun pisteet ovat selvästi yhtäsuuruutta osoittavan katkoviivan yläpuolella: pintavesi Pyhäjärvessä on silloin jonkin verran lämpimämpää. Lokakuussa tilanne on selvästi päinvastainen. Korjaustekijän muodostaminen Pyhäjärven pintalämpötilojen laskemiseksi Kyrösjärven lämpötiloista on edelläesitetyn valossa melko epätarkkaa. Osittain teoreettiseen tarkasteluun ja osittain edellä esitettyihin tuloksiin nojaten on valittu eri kuukausille vakiosuuruinen korjaus:

Kuukausi	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI
Korjaus (°C)	+1,0	+1,0	+0,5	+0,5	0,0	-1,0	-1,5

Näin saatuja Pyhäjärven pintaveden lämpötiloja vastaavat kyllästetyn vesihöyryn paineet on luettu taulukosta (esim. CRC, Handbook of Chemistry and Physics, osa D, s. 148).

3. Ilman vesihöyrynpaine. Pyhäjärvellä vallinnut ilman vesihöyrynpaine voidaan laskea avovesikautena 1971 Emäkarilla ja avovesikautena 1972 Emäkarilla ja tutkimuslautalla tehtyjen havaintojen perusteella. Jälkimmäisen vuoden havaintojen perusteella ilman vesihöyrynpaine on Emäkarilla jonkin verran pienempi kuin tutkimuslautalla. Koska lautaa voidaan katsoa edustavan paremmin järvellä vallitsevia olosuhteita, on seuraavassa vertailussa käytetty vain lautalla saatuja tuloksia.

Vertailuasemaksi on valittu Turun lentosääasema, josta on käytettävissä ilman vesihöyrynpaineen kuukausikeskiarvot vuosina 1938-73. Jokioisista ei ole vastaavia havaintoja käytettävissä koko vertailujakson ajalta. Taulukossa 10 on esitetty ilman vesihöyrynpaineen kuukausikeskiarvot kesä-lokakuussa 1972 Pyhäjärven tutkimuslautalla ja Turun lentosääasemalla sekä näiden arvojen erotus.

Taulukko 10. Ilman vesihöyrynpaineen kuukausikeskiarvot Pyhäjärven havaintolautalla ja Turun lentoasemalla kesä-lokakuussa 1972.

Table 10. Monthly means of air vapour pressure on Lake Pyhäjärvi and at Turku Airport in June-October 1972.

Kuukausi Month	Ilman vesihöyrynpaine (mb) Air vapour pressure (mb)		Suhde Ratio
	Pyhäjärvi	Turku A	
VI	13,9	12,2	1,14
VII	13,1	15,7	1,15
VIII	16,0	14,6	1,10
IX	11,2	10,1	1,11
X	8,3	7,6	1,09

Elomaa (1974) on tehnyt vastaavan vertailun avovesikauden 1970 osalta Pääjärvellä. Kesä-lokakuun vesihöyrynpaineiden suhteet olivat järviaseman ja kahden ympäristöaseman välillä keskimäärin 1,11 ja 1,14, kun se taulukon 10 mukaan on 1,12. Suhteen kuukausiarvo oli Elomaan tutkimuksessa erisuuruinen varsinkin syyskuussa; on selvää, että suhde riippuu vallitsevista säätiloista. Todennäköisesti se saa kuitenkin keskimääräisestikin erilaisia arvoja eri kuukausina. Syksyllä se on pieni, kun suhteellinen kosteus maanpinnankin yläpuolella on korkea. Alkukesällä ilma on yleensä melko kuivaa, joten runsas haihdunta järvellä kasvattaa ilman vesihöyrypitoisuutta.

Edellä esitettyjen tulosten ja tarkastelujen perusteella on päädytty seuraaviin kertoiimiin, joilla Turun lentosääaseman ilman vesihöyrynpaine-arvot korjataan:

Kuukausi	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI
Korjauskertoimen	1,10	1,15	1,15	1,10	1,10	1,05	1,00

Näitä korjauskertoimia käyttäen on laskettu ilman vesihöyrynpaineen kuukausiarvot Pyhäjärvelle. Näin ollen on kaikkien kaavassa (11) esiintyvien suureiden ( $v_2$ ,  $e_0$ ,  $e_2$ ) kuukausiarvot Pyhäjärvellä määritetty. Epätarkin tämä määrittäminen on todennäköisesti viimeksi käsitellyn suureen  $e_2$  kohdalla. Mainittakoon vielä, että käytetyt suureen  $e_2$  arvot on korjattu Ahdin (1972) esittämää korjausmenettelyä soveltaen.

### 3.44 Tulosten tarkastelua

Edellä esitettyjä korjausmenetelmiä soveltaen on avovesikauden kuukausihaidunnat Pyhäjärvelle laskettu aerodynaamisista kaavaa (11) käyttäen. Tulokset on esitetty taulukossa 11 yksittäisinä kuukausiarvoina ja vuosisummina. Yhteenvedo tuloksista on esitetty taulukossa 12, josta ilmenevät haihdunnan kuukausikeskiarvot ja muut tärkeimmät tunnusluvut.

Joulu-huhtikuun haihduntaa ei ole pyritty laskemaan, koska se on varsin pieni eikä vaikuta merkittävästi näiden kuukausien nettotulovaluntaan. Koska jonkin verran haihduntaa talvel-

Taulukko 11. Pyhäjärven haihdunta (mm) kuukausittain 1938-73.  
 Table 11. Monthly evaporation (mm) of Lake Pyhäjärvi in 1938-73.

Vuosi Year	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	Σ
1938	5	5	10	15	38	51	47	85	32	33	7	5	333
39	5	5	10	15	47	87	38	65	77	21	8	5	383
40	5	5	10	15	11	105	84	84	39	21	8	5	392
41	5	5	10	15	26	81	87	113	66	49	31	5	493
42	5	5	10	15	81	94	90	56	73	24	47	5	505
43	5	5	10	15	20	49	111	101	61	6	18	5	406
44	5	5	10	15	9	69	97	124	65	32	27	5	463
45	5	5	10	15	48	79	116	84	55	29	14	5	465
46	5	5	10	15	23	84	113	90	52	49	16	5	467
47	5	5	10	15	33	67	140	133	71	48	16	5	548
48	5	5	10	15	67	86	145	95	62	30	27	5	552
49	5	5	10	15	48	116	117	78	14	26	9	5	448
50	5	5	10	15	39	78	137	109	28	41	23	5	495
51	5	5	10	15	59	70	98	72	47	19	20	5	425
52	5	5	10	15	79	91	119	75	58	28	18	5	508
53	5	5	10	15	70	87	153	80	60	17	29	5	536
54	5	5	10	15	30	89	91	78	58	48	34	5	468
55	5	5	10	15	30	112	225	117	60	61	27	5	672
56	5	5	10	15	31	68	154	76	54	31	26	5	480
57	5	5	10	15	36	93	78	119	75	15	11	5	467
58	5	5	10	15	18	104	135	66	59	33	8	5	463
59	5	5	10	15	81	94	181	142	97	31	15	5	681
60	5	5	10	15	35	103	96	122	73	40	13	5	522
61	5	5	10	15	31	90	82	93	65	16	36	5	453
62	5	5	10	15	36	83	102	98	46	25	25	5	455
63	5	5	10	15	24	161	130	98	70	30	21	5	574
64	5	5	10	15	35	59	114	100	54	17	20	5	439
65	5	5	10	15	78	95	90	64	30	26	43	5	466
66	5	5	10	15	21	106	120	103	71	8	2	5	471
67	5	5	10	15	8	97	101	83	68	17	14	5	428
68	5	5	10	15	43	106	111	92	58	33	10	5	493
69	5	5	10	15	39	139	139	168	71	23	9	5	628
70	5	5	10	15	37	156	74	120	59	29	12	5	527
71	5	5	10	15	25	140	155	128	81	49	25	5	643
72	5	5	10	15	18	79	111	104	50	24	4	5	430
73	5	5	10	15	18	94	142	107	53	23	22	5	499

lakin ilmeisesti tapahtuu, on haihdunnalle valittu vakioarvot eri kuukausille: joului-, tammi- ja helmikuulle 5 mm, maaliskuulle 10 mm ja huhtikuulle 15 mm. Nämäkin arvot saattavat olla liian suuria ainakin kohdassa 3.42 esitettyjen Kullusin (1973) tulosten mukaan.

Taulukko 12. Pyhäjärven kuukausi- ja vuosihaihdunnan jakaumien tunnuslukuja jaksolla 1938-73.

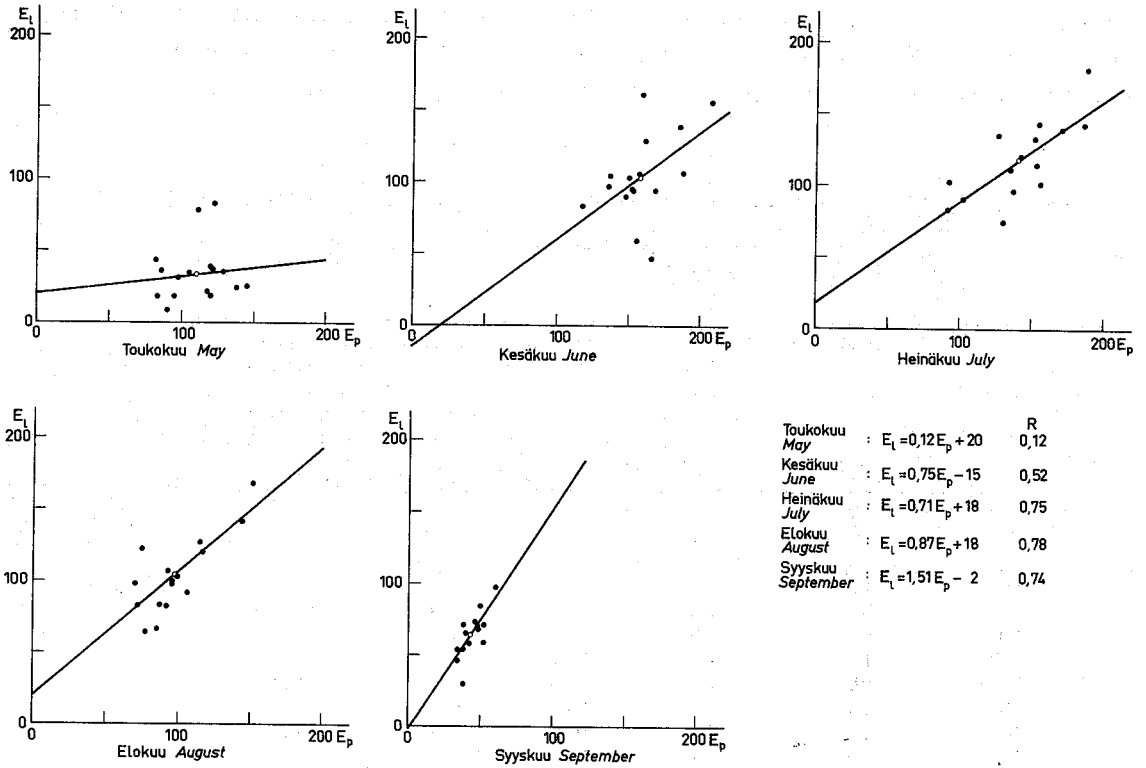
Table 12. Some statistical parameters of monthly and annual evaporation of Lake Pyhäjärvi in 1938-73.

Kuukausi Month	Keskiarvo Mean $\bar{E}$ (mm)	Keski- hajonta Standard deviation $s_E$ (mm)	Vaihtelu- kerroin Coefficient of variation $c_v$	Vinous Coeffi- cient of skewness $c_s$	Peräkkäisten kuukausihaihduntojen korrelaatiokerroin First corr. coeff. of monthly evaporation $r_{i, i+1}$
I	5				
II	5				
III	10				
IV	15				
V	38	21	0,5	0,8	-0,04
VI	93	26	0,3	1,0	0,18
VII	114	36	0,3	0,6	0,36
VIII	98	24	0,2	0,6	0,43
IX	59	16	0,3	0,3	0,02
X	29	12	0,4	0,6	0,13
XI	19	11	0,6	0,8	
XII	5				
$\Sigma$	491	78	0,16	0,79	

Kuukausihaihdunnat ovat suurimmat heinäkuussa (keskiarvo 114 mm), mutta lähes yhtä suuria ne ovat joinakin vuosina kesä- ja elokuussa. Syyskuukausina haihdunta on melko pieni johtuen Pyhäjärven pienestä keskisyvyydestä. Vuosikeskihaihdunta 491 mm on jonkin verran pienempi kuin Solantien (1973) Etelä-Suomen järville esittämät arvot (550 - 600 mm). Solantien laskemat kuukausihaihdunnat ovat suurempia nimenomaan syys-marraskuussa.

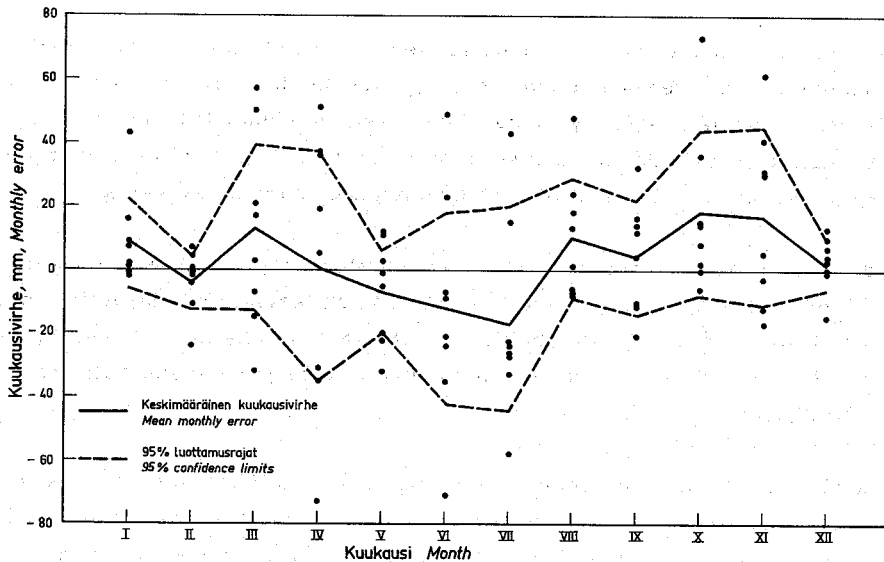
Kuukausihaihduntojen prosessia voidaan pitää riippumattomana, vaikkakin heinä-elokuun ja elo-syyskuun haihduntojen korrelaatiokertoimet ovat merkitseviä. - Pyhäjärvelle laskettuja järvihaihdunnan arvoja on verrattu astiahaihduntamittausten tuloksiin. Kuvassa 11 on vaaka-akselilla Class A-astian kuukausihaihdunta Jokioisissa ja pystyakselilla Pyhäjärven haihdunta. Vertailujaksone on 1958-73.

Toukokuussa astiahaihdunnan ja järvihaihdunnan riippuvuus on lähes olematon. Kesäkuukausina tämä riippuvuus tulee kuitenkin merkitseväksi samalla kun regressiosuoran kulmakerroin kasvaa. Syksyllä riippuvuus taas huononee, koskaastian ja järven lämpötase ovat erilaiset. - Voidaan todeta, että heinä-syyskuussa voidaan näiden tulosten mukaan arvioida järvihaihdunta astiahaihdunnan avulla välttävällä tarkkuudella.



Kuva 11. Pyhäjärven haihdunnan riippuvuus astiahaidunnasta (Jokioinen) touko-syyskuussa 1958-73.

Fig.11. The evaporation of Lake Pyhäjärvi as a function of pan evaporation (at Jokioinen) in May-September 1958-73.



Kuva 12. Pyhäjärven vesitaselaskelmien kuukausivirheet 1966-73.

Fig.12. Monthly errors of water balance calculations of Lake Pyhäjärvi in 1966-73.



Astiakertoimelle saadaan vertailujaksolla 1958-73 seuraavat kuukausikeskiarvot:

Kuukausi	V	VI	VII	VIII	IX
Astiakerroin	0,23	0,67	0,83	1,06	1,62

Astiakerroin kasvaa siis hyvin voimakkaasti syksyä kohti. Eri järville saataisiin varsin erisuuruiset kertoimet riippuen mm. järven keskisyvyydestä ja pinta-alasta. Yleispäteviä astiakertoimia ei voida esittää eri kuukausille.

### 3.5 NETTOTULOVALUNNAN VIRHEARVIOINTI

Yksityiskohtaista virhetarkastelua ei lasketuille tulovalunnan, sadannan ja haihdunnan kuukausiarvoille voida esittää. Mahdollisia virhelähteitä ja menetelmien sekä arviointiperusteiden puutteita on useita. Käytettävissä oleviin puutteellisiin havaintoihin sisältyy virheitä. Käytetyt vertailut perustuvat aivan liian lyhyisiin rinnakkaishavaintoihin, jotta niitä voitaisiin pitää luotettavina. Kuukausihaihdunnat on laskettu kaavalla, joka on kehitetty vuorokausiarvoille ja lisäksi toiselle järvelle, jossa olosuhteet saattavat poiketa huomattavastikin Pyhäjärven olosuhteista. Vesitasetta ajatellen on lisäksi todettava, ettei pohjavesivirtausten vaikutuksia järven vesitaseeseen ole pyrittykään arvioimaan. Kuitenkin ne ovat mahdollisia; esim. Köyliönjärvi on vain 4 km etäisyydellä Pyhäjärvestä ja sen pinta on 4,5 m Pyhäjärven pintaa alempana.

Jakson 1966-73 ajalla on mahdollisuus kontrolloida nettotulovalunta-laskelmien luotettavuutta, koska vedenkorkeuden muutoksia ja menovirtaamaa on havaittu. On kuitenkin todettava, että yhteen kapeassa lahdessa sijaitsevaan asteikkoon perustuvat arviot vedenkorkeuden muutoksista ovat varsin karkeita. Peräkkäisinä kuukausina virheet vaihtelevat etumerkillään, joten vuosiarvoissa vedenkorkeushavaintojen epätarkkuus on jo suhteellisesti paljon pienempi. Menovirtaamahavaintoja voidaan vuodesta 1966 lähtien pitää verrattain luotettavina. Menovirtaaman kuukausikeskiarvot on myös muutettu mm:iksi järven keskipinta-alaa kohti.

Kuvasta 12 ilmenee keskimääräinen vesitaselaskelmien virhe  $\Delta_j$  eri kuukausina:

$$\Delta_j = \frac{1}{8} \sum_i (I_{ij} + P_{ij} - E_{ij} - O_{ij} - \Delta S_{ij}) \quad (j = 1, \dots, 12) \quad (13)$$

I = tulovalunta, mm/kk

P = sadanta, mm/kk

E = haihdunta, mm/kk

O = menovalunta, mm/kk

$\Delta S$  = vedenkorkeuden muutos, mm/kk

Summaindeksi i saa arvot 1966, ... , 1973. Kuvaan 12 on myös merkitty virheen suuruus yksittäisinä kuukausina sekä 95 % luotettavuusrajat virheiden keskiarvolle.

Keskimääräisen kuukausivirheen vuotuista kulkua ei voitane pitää puhtaasti satunnaisena. Touko-heinäkuussa virhe on negatiivinen, elo-marraskuussa selvästi positiivinen. Talvi-aikana virhe on pienempi ja vaihtelee merkittävästi. Keskimääräinen vuosivirhe on +34 mm ja sen hajonta 90 mm. Keskimääräiset kuukausi- ja vuosivirheet hajontoineen on esitetty myös taulukossa 13.

Taulukko 13. Vesitaselaskelman keskimääräiset kuukausi- ja vuosivirheet sekä niiden keskihajonnat kontrollijaksolla 1966-73.  
 Table 13. Mean errors of the monthly and annual water balance calculation and their standard deviation during the control period 1966-73.

	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	Σ
Keskivirhe (mm) <i>Mean error</i>	9	-4	13	1	-7	-12	-17	10	4	18	17	2	34
Virheiden keski- hajonta (mm) <i>Standard deviation of errors</i>	15	10	31	43	16	36	32	19	18	26	28	9	90

Keskimääräisen kuukausivirheen jaksollisuuteen voidaan esittää useita selityksiä. Haihdunta-arvot voivat olla liian suuria touko-heinäkuussa ja vastaavasti liian pieniä elo-marraskuussa. Ympäristöasemiin perustuva järven sadannan määrittäminen voi olla systemaattisesti virheellinen. Tämä voi myös aiheuttaa vuosisadantoihin systemaattisen virheen, joka selittäisi positiivisen vuosikeskivirheen. - Kontrollilaskelma osoittaa kuitenkin tehdyt arviot melko luotettaviksi monista virhelähteistä huolimatta. On lisäksi huomattava, että jos kaksi suurinta vuosivirhettä poistetaan, jäljelle jääneen kuuden vuoden sarjan vuosikeskivirhe on -1 mm. Näin ollen kontrollilaskelma on suuresti riippuvainen yksittäisten havaintovuosien virheistä.

Talvikuukausille käytettyjä vakiohaihduntoja voidaan Suomessa tehtyjen tutkimusten (Kaitera ja Terävirta 1972, Lemmelä ja Kuusisto 1974) mukaan pitää varsin suurina. Vaikka aukealla järvenselällä vallitsevat olosuhteet ovatkin melko erilaiset kuin näissä aukealla maalla tehdyissä tutkimuksissa, talvikuukausien haihdunnat lienevät liian suuret. Talvikuukausien pieni keskivirhe kontrollijaksolla voi johtua sadantojen ylisuuruudesta, joka kompensoi haihdunta-arvioiden virheellisyyden. Vastaavanlaista kompensoitumista voi esiintyä laskelmissa muuallakin; tämä kompensoituminen vaikuttaa pienentävästi tulovalunnan virheeseen.

### 3.6 NETTOTULOVALUNNAN TARKASTELUA

#### 3.61 Kuukausiarvojen tunnusluvut

Pyhäjärven tulovalunnan, sadannan ja haihdunnan kuukausikeskiarvot jaksolla 1938-73 on esitetty kuvassa 13. Niiden perusteella lasketut nettotulovalunnan kuukausiarvot sekä vuosiosumat koko tarkastelujaksolle on esitetty taulukossa 14. Tässä taulukossa esitetyt arvot poikkeavat joulukuuhuhtikuussa vähän sadannan, tulovalunnan ja haihdunnan kuukausiarvojen (taulukot 3, 5 ja 11) perusteella määritetyistä, koska talvikuukausien sadannat on korjattu tuulen aiheuttaman kuljetuksen takia kohdan 3.33 mukaisesti.

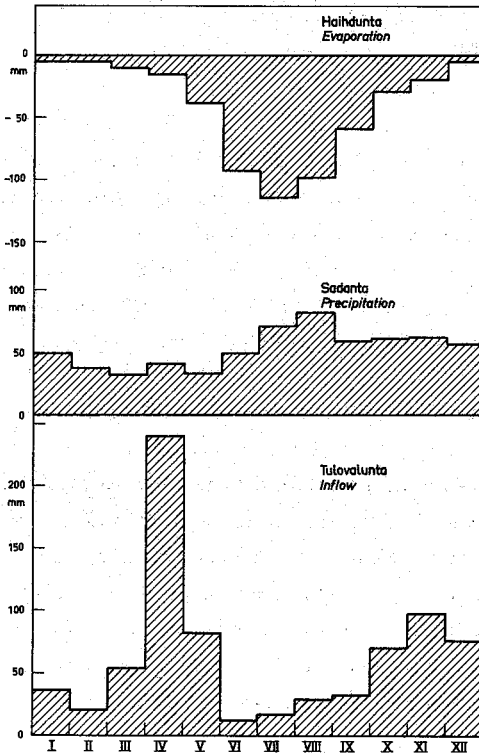
Haihdunta on kesä-heinäkuussa tulovalunnan ja sadannan summaa suurempi, joten nettotulovalunta on näinä kuukausina negatiivinen (taulukko 15). Elokuussa tulovalunta ja sadanta kasvavat niin, että suuresta haihdunnasta huolimatta nettotulovalunta on keskimäärin positiivinen (14 mm). Syyskuukausina se kasvaa edelleen voimakkaasti ja marraskuun keskimääräinen nettotulovalunta 141 mm on huhtikuun vastaavan arvon 266 mm jälkeen vuoden toiseksi suurin. Joulukuussa nettotulovalunta on myös suuri ja vasta tammikuussa talvisten olosuhteiden vakiintuessa se huomattavasti pienenee. Kevään tulo alkaa joinakin vuosina jo maaliskuussa, mutta useimpina vuosina pääasiallinen sulamiskausi osuu huhtikuulle aiheuttaen em. huippuarvon nettotulovalunnan kuukausikeskiarvoihin.

Nettotulovalunnan hajonta on varsin suuri kaikkina kuukausina; eri vuodet ovat siis varsin erilaisia. Vaihtelukerroin on suurempi kuin 0,6 kaikkina kuukausina huhtikuuta lukuunottamatta. Kesäkuukausina sen arvoa ei ole laskettu negatiivisten nettotulovaluntojen takia.

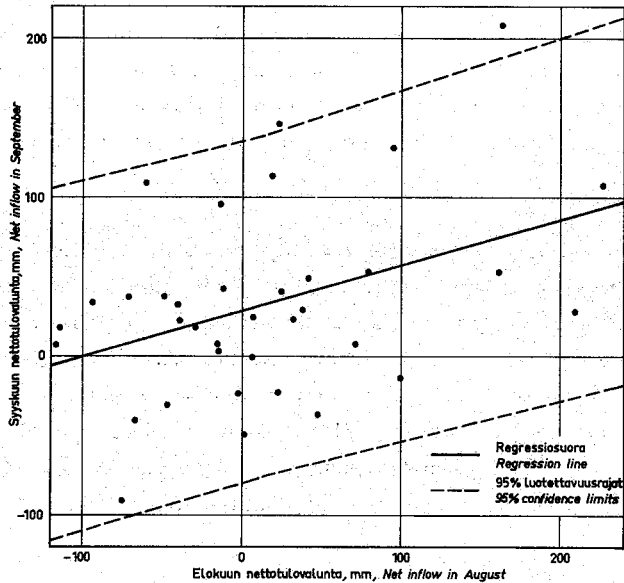
Nettotulovalunnan vinous vaihtelee huomattavasti. Kesäkuussa se on 0,0 vastaten siis tarkoin normaalijakauman vinoutta. Kaikkina muina kuukausina se on positiivinen; suurin vinous on helmi- ja maaliskuun jakaumilla. Tämä on odotettavaa, koska yksittäisinä vuosina suuret nettotulovalunnat talviaikana vinouttavat muutoin pienistä arvoista muodostuvan jakauman.

Mielenkiintoista on tarkastella peräkkäisten kuukausien nettotulovaluntojen riippuvuutta, joka on läheisesti yhteydessä niiden ennustettavuuteen edellisen kuukauden lopussa. Korrelaatiokerroin on suurin kesäkuukausina; parhaiten ovat ennustettavissa lokakuun nettotulovalunnat syyskuun arvojen perusteella ( $r = 0,56$ ). Kaikkiaan korrelaatiokerroin on 5 % riskitasolla merkitsevä 7 kuukausiparin kohdalla. Jos ryhdytään laskemaan ennusteiden luotettavuusrajoja, havaitaan niiden olevan varsin väljät. Kuvassa 14 on esitetty syyskuun nettotulovalunnan ennuste elokuun arvojen perusteella ja 95 % luotettavuusrajat ennusteelle. Luotettavuusrajat on laskettu käyttäen ennusteen keskihajonnalle lauseketta (14):

$$s_e = s \left[ 1 + \frac{1}{n} + \frac{(T_{8i} - \bar{T}_8)^2}{\sum_{i=1}^n (T_{8i} - \bar{T}_8)^2} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (14)$$



Kuva 13. Pyhäjärven nettotulovalunnan komponenttien kuukausikeskiarvot jaksolla 1938-73.  
 Fig. 13. Monthly means of the components of net inflow of Lake Pyhäjärvi in 1938-73.



Kuva 14. Syyskuun nettotulovalunnan riippuvuus elokuun nettotulovalunnasta Pyhäjärvellä 1938-73.  
 Fig. 14. The relationship between net inflows of Lake Pyhäjärvi in August and September in 1938-73.

Taulukko 14. Pyhäjärven nettotulovalunta kuukausittain 1938-73 (mm järven keskipinta-alaa kohti).

Table 14. Monthly net inflow into Lake Pyhäjärvi in 1938-73 (mm per mean area of the lake)

Vuosi Year	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	Σ
1938	71	30	343	161	20	3	89	-13	42	224	243	65	1278
39	46	46	53	283	-31	-66	43	-47	-31	3	243	3	441
40	12	13	17	235	73	-95	-36	24	41	23	362	73	742
41	-2	31	29	172	98	-73	-69	22	-22	-29	-13	36	180
42	39	7	0	315	-42	27	4	47	-37	115	29	76	580
43	48	160	247	304	31	-9	40	95	131	229	381	153	1810
44	161	62	22	383	189	34	12	-71	37	244	270	328	1671
45	66	39	64	473	9	12	40	79	53	118	49	42	1044
46	22	35	35	435	99	48	-83	19	113	-20	142	101	946
47	17	8	22	269	6	-9	-96	-116	7	-17	38	92	221
48	43	8	24	388	0	63	-76	38	29	212	171	122	1023
49	197	86	79	251	1	-72	-69	6	25	106	26	185	821
50	19	37	135	351	10	-50	-68	-61	109	149	193	230	1054
51	49	21	29	396	6	-40	-27	-30	18	-8	78	188	680
52	148	75	15	263	-49	-26	-29	5	-1	181	135	163	880
53	85	57	183	207	-22	-10	20	161	53	97	101	76	1008
54	199	9	63	223	60	-18	264	164	208	199	275	269	1915
55	114	60	25	118	331	-89	-191	-94	33	113	128	105	653
56	121	35	0	192	200	-4	-117	-3	-23	16	-3	104	518
57	39	63	21	201	155	-14	18	23	146	265	119	182	1218
58	46	20	23	161	278	-46	-70	1	-49	16	59	46	485
59	83	110	172	258	-18	-63	-172	-75	-91	6	66	45	321
60	69	24	-2	243	45	-20	-27	71	7	42	213	219	884
61	124	105	226	120	60	45	53	209	28	108	183	122	1383
62	195	134	41	370	97	-45	-32	-13	96	112	124	96	1175
63	38	16	8	191	80	-100	-74	32	23	227	130	41	612
64	40	50	-4	202	80	-27	-53	-40	32	60	72	272	684
65	128	42	34	213	-27	-50	-2	41	49	38	45	95	606
66	39	31	48	222	310	-26	-36	-16	8	122	225	165	1092
67	51	44	225	291	157	-40	-72	226	108	328	140	48	1506
68	46	29	211	193	77	-60	-55	-39	22	140	214	82	860
69	49	35	36	238	90	-105	-81	-115	18	66	314	67	612
70	58	33	57	405	169	-118	60	-15	3	49	197	144	1042
71	199	68	44	240	53	-116	-125	-68	-40	3	36	78	372
72	22	43	24	358	94	-21	7	99	-14	37	148	155	952
73	37	44	78	261	83	13	37	-49	37	77	86	98	802

- $s_e$  = ennusteen keskihajonta, mm  
 $s$  = jäännösvirheiden keskihajonta, mm  
 $n$  = havaintojen lukumäärä  
 $\bar{T}_8$  = elokuun keskimääräinen nettotulovalunta, mm

Syysateet ovat niin satunnaisia, että tämän ennusteen käytännöllinen merkitys on vähäinen. Talvikuukausien pienet korrelaatiokertoimet johtuvat osittain eräiden vuosien poikkeuksellisista sulamiskausista, osittain siitä, että nettotulovalunnan merkittävin komponentti on silloin sadanta, joka on luonteeltaan hyvin satunnainen.

Taulukko 15. Pyhäjärven nettotulovalunnan kuukausi- ja vuosijakaumien tärkeimmät tunnusluvut jaksolla 1938-73.  
 Table 15. Some statistical parameters of monthly and annual net inflow into Lake Pyhäjärvi in 1938-73.

Kuukausi Month	Keskiarvo Mean	Keski- hajonta Standard deviation	Vinous Coeffi- cient of skewness	Peräkkäisten kuukausiarvojen korrelaatiokerroin First correlation coefficient of monthly values
	$\bar{T}$ (mm)	$s_T$ (mm)	$c_s$	$r_{i,i+1}$
I	76	58	1,0	0,43
II	48	35	1,8	0,37
III	73	86	1,6	-0,18
IV	266	89	0,6	-0,27
V	77	96	1,1	0,15
VI	-32	47	0,0	0,18
VII	-27	81	1,0	0,49
VIII	14	83	0,9	0,40
IX	32	60	0,8	0,56
X	101	93	0,6	0,38
XI	141	113	0,4	0,34
XII	122	74	1,0	0,30
$\Sigma$	891	423	0,57	

### 3.62 Kuukausiarvojen jakaumat

Nettotulovalunnan kuukausiarvojen jakaumilla on keskeinen merkitys tämän tutkimuksen loppuosassa. Edellä jo todettiin, että vain kesäkuun arvot noudattavat vinoutensa perusteella normaalijakaumaa. Jakaumien positiivinen vinous on odotettu tulos ja lähinnä seuraus siitä, että ne ovat alhaalta rajoitettuja. Tämä aläraja vaihtelee eri kuukausina: jouluhelmikuussa se on -5 mm, muina kuukausina alempi. Kesäaikana haihdunta saattaa olla lähes 200 mm/kk, joten alaraja voi olla -200 mm:n luokkaa; joka tapauksessa teoreettinen alaraja silloinkin on olemassa, koska järven pinnalle tulevan auringonsäteilyn energia on rajallinen.

Kuukausivirtaamien jakaumia on tutkittu varsin laajasti (Klemes 1974, Fiering & Jackson 1971). Gammajakauma ja log-normaalinen jakauma on useimmissa tutkimuksissa todettu sopivimmaksi. Teorian monimutkaisuus ja estimoitavien parametrien suuri määrä havaintosarjojen pituuteen verrattuna ovat synnyttäneet erilaisia mielipiteitä näiden jakaumien käytöstä.

Tässä tutkimuksessa määritetyn nettotulovalunnan jakaumat ovat luonteeltaan erilaiset kuin varsinaiset virtaamien jakaumat. Haihdunnasta aiheutuvat negatiiviset arvot tekevät log-normaalisen ja gammajakauman käytön 2-parametrisina mahdottomaksi. Toisaalta alarajan arvioiminen varsinkin kesäkuukausien jakaumille on vaikeaa, joten mainittujen jakaumien käyttö 3-parametrisina olisijossain määrin mielivaltaista. Tämän vuoksi on nettotulovalunnan jakaumat piirretty normaalijakauman todennäköisyyspaperille, vaikka nämä jakaumat eivät olekaan normaalisia. Tämän menettelyn yksinkertaisuus ja selvyys puoltaa sen käyttöä monimutkaisiin teoreettisiin menetelmiin verrattuna.

Havaintopisteiden sijoittelussa todennäköisyysasteikolle on noudatettu Weibullin kaavaa

$$p = 100 \cdot \frac{m}{n + 1} \quad (15)$$

$p$  = todennäköisyys, %

$m$  = havainnon järjestysluku suuruusjärjestyksessä

$n$  = havaintojen lukumäärä

Saatuun pisteistöön liittyvä kertymäfunktio on piirretty graafisesti. Jakaumien kaarevuus olisi tehnyt teoreettisempien menetelmien (momenttimenetelmä, pienimmän neliösumman menetelmä) käytön jossain määrin hankalaksi, joten niitä ei ole tässä yhteydessä kokeiltu.

Esimerkkeinä saaduista nettotulovalunnan todennäköisyysjakaumista on kuvissa 15 ja 16 esitetty helmi- ja elokuun jakaumat. Helmikuun jakauma on vinoudeltaan suurin ( $c_s = 1,79$ ), elokuun jakauma lähes keskimääräinen ( $c_s = 0,89$ ).

Näistä jakaumista on luettu tiettyjä todennäköisyyksiä vastaavat %-pisteet; ne on esitetty taulukossa 16. Koska toistumisajan  $T$  ja todennäköisyyden  $p$  välillä on yhteys,  $T = 1/p$ , voidaan tätä taulukkoa käyttää myös toistumisaikojen arviointiin.

Taulukossa 16 esitetyt jakaumien 50 %:n pisteet poikkeavat vinouden takia nettotulovalunnan kuukausikeskiarvoista. Ne ovat keskimäärin 13 mm keskiarvoja pienempiä. Poikkeaman suuruus noudattelee melko selvästi jakauman vinoutta.

Nettovalunta on huhtikuussa vajaan 5 % todennäköisyydellä yli 435 mm eli 3/4 koko säännöstelytilavuudesta, joka on 580 mm. Samalla todennäköisyydellä se ylittää puolet säännöstelytilavuudesta huhtikuun lisäksi vain marraskuussa, sen sijaan 1 % todennäköisyydellä myös maaliskuu-, touko-, loka- ja joulukuussa.

Taulukko 16. Eräitä nettotulovalunnan jakaumien prosenttipisteitä.

Table 16. Some percentage values of the distributions of net inflow.

Kuukausi <i>Month</i>	Nettotulovalunnan enimmäisarvo (mm) todennäköisyydellä (%) <i>Maximum net inflow (mm) with the probability of (per cent)</i>										
	1	2	5	10	20	50	80	90	95	98	99
I	-4	3	13	22	33	63	129	169	180	207	220
II	2	4	8	13	21	39	66	97	124	153	175
III	-8	-6	-2	3	12	39	140	200	254	309	344
IV	106	119	139	160	188	244	345	390	427	463	488
V	-55	-48	-37	-25	-5	56	138	204	263	325	357
VI	-130	-125	-111	-94	-72	-31	9	30	47	63	73
VII	-181	-168	-142	-113	-82	-29	29	59	85	113	132
VIII	-140	-124	-100	-78	-50	6	78	122	168	220	246
IX	-99	-77	-50	-33	-15	23	75	105	152	196	224
X	-45	-35	-20	-6	14	94	190	235	271	312	343
XI	-21	-13	-5	16	44	130	234	303	340	376	394
XII	20	26	35	45	60	103	181	235	277	318	343

Todennäköisyys yli 10 cm:n suuruiselle altaan pinnan alenemiselle (nollajuoksutuksella) on kesäkuussa 8 %, heinäkuussa 14 % ja elokuussa 5 %. Yli 15 cm:n alenema on kesä- ja elokuussa hyvin epätodennäköinen; heinäkuussa sen todennäköisyys sen sijaan on n. 4 %.

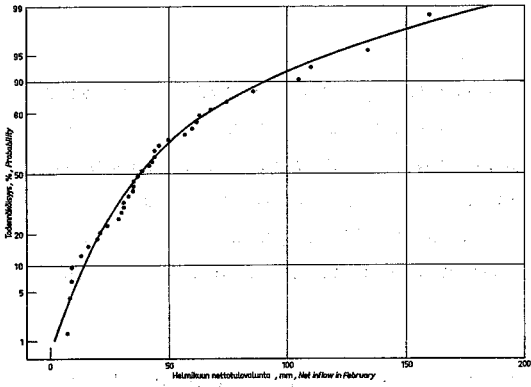
Taulukossa 17 on esitetty yhteenveto eri suuruisia altaan pinnan alenemia vastaavista todennäköisyyksistä touko-lokakuussa. Merkillepantavaa on, että vielä lokakuussakin voi altaan pinta alentua haihtumisen vaikutuksesta. - Pienin arvioitu todennäköisyys on 1 %.

Taulukko 17. Todennäköisyydet Pyhäjärven pinnan eri suuruisille alenemille touko-lokakuussa.

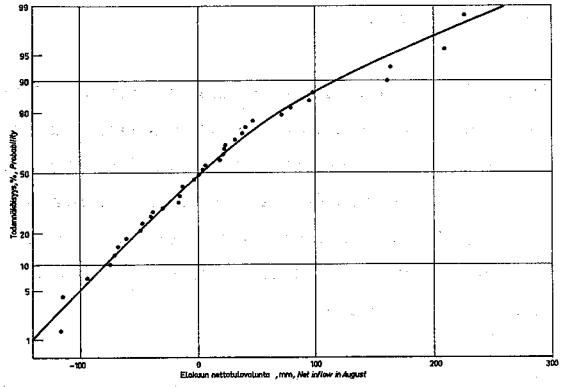
Table 17. Probabilities of the different magnitudes in the decrease in water level of Lake Pyhäjärvi in May-October.

Kuukausi <i>Month</i>	Todennäköisyys (%) alenemalle, joka on vähintään (mm) <i>Probability (%) of decrease of water level (mm)</i>					
	25	50	75	100	125	150
V	10	2				
VI	55	34	18	8	2	
VII	53	38	23	14	8	4
VIII	32	20	11	5	2	
IX	14	5	2			
X	4					

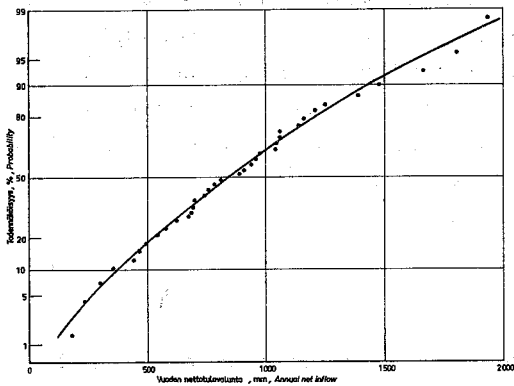




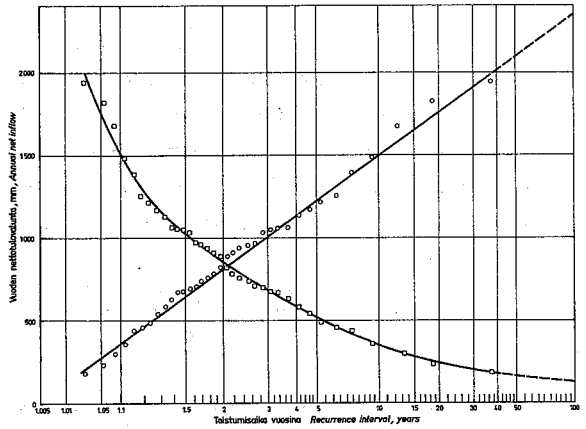
Kuva 15. Pyhäjärven nettotulovalunnan todennäköisyysjakauma helmikuussa.  
 Fig. 15. Probability distribution of net inflow of Lake Pyhäjärvi in February.



Kuva 16. Pyhäjärven nettotulovalunnan todennäköisyysjakauma elokuussa.  
 Fig. 16. Probability distribution of net inflow of Lake Pyhäjärvi in August.



Kuva 17. Pyhäjärven vuotuisen nettotulovalunnan todennäköisyysjakauma.  
 Fig. 17. Probability distribution of annual net inflow of Lake Pyhäjärvi.



Kuva 18. Pyhäjärven vuotuisen nettotulovalunnan toistuvuus.  
 Fig. 18. Recurrence intervals of annual net inflow of Lake Pyhäjärvi.

### 3.63 Vuosi-arvot

Nettotulovalunnan vuosikeskiarvo jaksolla 1938-73 oli 891 mm järven keskipinta-alaa kohti laskettuna, mikä vastaa keskimenovirtaamaa  $4,35 \text{ m}^3/\text{s}$ . Vaihtelu eri vuosina oli melko suuri; suurin arvo oli 1915 mm ja pienin 180 mm. Arvojen hajonta oli 423 mm ja vaihtelukerroin 0,47. Samoin kuin kuukausijakaumilla myös vuosijakaumalla on positiivinen vinous ( $c_s = 0,57$ ). Tästä johtuen kuvassa 17 normaalijakauman todennäköisyyspaperilla esitetty nettotulovalunnan jakauma kaareutuu. Sen 50 %:n piste on 840 mm, mikä on 6 % pienempi kuin jakauman keskiarvo.

Kuvassa 18 on esitetty vuotuisen nettotulovalunnan toistuvuus. Keskimäärin kerran 20 vuodessa nettotulovalunta on suurempi kuin 1750 mm. Vastaavasti se alittaa arvon 230 mm keskimäärin kerran 20 vuodessa. Nämä arvot vastaavat keskimenovirtaamia  $8,5$  ja  $1,1 \text{ m}^3/\text{s}$ . Alle  $2,0 \text{ m}^3/\text{s}$  nettotulovalunta toistuu kuvan 18 mukaan keskimäärin kerran 8 vuodessa.

Näiden toistumisaikojen perusteella ei luonnollisestikaan voida tehdä suoria johtopäätöksiä tavoitejuoksutuksen alituksista. Mielenkiintoista on tässä yhteydessä tarkastella pitempiä kuivakausia, peräkkäisten vuosien riippuvuutta ja jakson 1938-73 edustavuutta.

Edellämainitun tarkastelujakson pienin vuotuinen nettotulovalunta on vuodelta 1941. Pienin kahden peräkkäisten vuoden nettotulovaluntojen keskiarvo on 380 mm eli  $1,8 \text{ m}^3/\text{s}$  (1941-42) ja pienin kolmen vuoden keskiarvo 454 mm eli  $2,2 \text{ m}^3/\text{s}$  (1939-41).

Peräkkäisten vuosien välisen riippuvuuden testaamiseksi on laskettu autokorrelaatiofunktio viiveille 1 ... 17 (kuva 19). Ensimmäinen autokorrelaatiokerroin 0,11 ja toinen -0,25. Näiden perusteella voidaan jo todeta, että tilastollisesti merkitsevää riippuvuutta peräkkäisten vuosien nettotulovaluntojen välillä ei ole. Eräiden kuivien vuosijaksojen esiintymistä tarkastelujaksossa on siis pidettävä satunnaisena. - Kuvassa 19 on myös esitetty autokorrelaatiofunktion 5 % toleranssirajat. Ne on laskettu lausekkeesta (16):

$$t.l.(5\%) = \frac{-1 \pm 1,645\sqrt{N-k-1}}{N-k} \quad (16)$$

Voidaan siis todeta, että kaikki autokorrelaatiokertoimet ovat 5 % toleranssirajojen sisäpuolella.

### 3.64 Havaintojakson edustavuus

Gumbelin toistuvuusanalyysi tarjoaa mahdollisuuden havaintojakson edustavuuden visuaaliseen arviointiin. Jos harvinaisin arvo poikkeaa huomattavasti muiden havaintojen kautta asetetulta käyrältä, on tätä arvoa pidettävä jakson pituuteen nähden epäedustavana. On myös olemassa uudempiä menetelmiä havaintojakson edustavuuden tutkimiseen. Sellaisen ovat mm. kehittä-

neet Millan ja Yevjevich (1971); heidän menetelmässään käytetään lähtöparametreina havaintoarvojen kertymäfunktioita, vinoutta  $c_s$  ja ensimmäistä autokorrelaatiokerrointa  $r_1$ .

Etuna Millanin ja Yevjevichin menetelmässä on se, että siinä huomioidaan myös pitempiaikaiset kuivakaudet tai runsasvetiset ajanjaksot. Menetelmä pohjautuu toisteanalyysiin (run analysis); toisteella tarkoitetaan tässä yhteydessä tietyn ala- tai ylärajan alittavaa tai ylittävää valuntajaksoa. Toisteiden tilastolliset ominaisuudet riippuvat vastaavan aikasarjan ominaisuuksista. Esimerkiksi  $n$  vuoden pituisen kuivakauden toistumisajalle ovat Millan ja Yevjevich laajasta generoidusta aineistosta määrittäneet lausekkeen 17:

$$\ln T = -2,11 + 0,686 n - 2,82 \ln \frac{p}{100} - 0,080 \ln r_1 - 0,0059 \ln c_s \quad (17)$$

$T$  = toistumisaika, v

$n$  = havaitun kuivakauden pituus, v

$p$  = kuivakauden keskiarvon %-piste vuosivalunnan kertymäfunktioilla

$r_1$  = vuosivalunnan ens. autokorrelaatiokerroin

$c_s$  = vuosivalunnan vinous

Pyhäjärven nettotulovaluntojen aikasarjassa  $r_1 = 0,11$  ja  $c_s = 0,57$ . Ankarin 4 vuoden pituinen kuivakausi ( $k = 4$ ) on jakso 1939-42; sen keskimääräinen nettotulovalunta oli 485 mm eli  $2,3 \text{ m}^3/\text{s}$  ja  $p$ :n arvoksi saadaan kuvasta 17  $p = 18 \%$ . Tällöin saadaan yhtälöstä (17)  $T = 280$  vuotta. Tämän perusteella vuosien 1939-42 kuivakausi on selvästi harvinaisempi kuin 36 vuoden havaintosarjaan keskimäärin sisältyvä.

#### 4. SÄÄNNÖSTELYTILAVUUDEN RIITTÄVYYS

##### 4.1 ERÄITÄ MÄÄRITTELYJÄ

Tässä luvussa pyritään selvittämään, riittääkö Pyhäjärven nykyinen säännöstelyväli 58 cm takaamaan jatkuvan  $2,0 \text{ m}^3/\text{s}$  suuruisen juoksutuksen. Aluksi tarkastellaan tämän keskeisen kysymyksen selvittelyssä käytettyjä tilastollisia menetelmiä.

Olkoon  $T_j$  altaan nettotulovirtaamien jono, missä indeksi  $j = 1, 2, \dots, n$  ( $n$  = tarkastelujakson pituus, esim kuukausina). Määritellään

$$S_k = \sum_{j=1}^k T_j \quad k = 1, 2, \dots, n \quad (18a)$$

$$\begin{aligned}
 M_n &= \text{Max}(0, S_1, \dots, S_n) \\
 m_n &= \text{min}(0, S_1, \dots, S_n) \\
 R_n &= M_n - m_n
 \end{aligned}
 \tag{18b}$$

Muuttuja  $M_n$  on muuttujien  $T_j$  maksimiosasumma (surplus) ja  $m_n$  vastaava minimiosasumma (deficit). Muuttuja  $R_n$  on osasummien vaihteluväli (range). Kaikki määritellyt muuttujat ovat stokastisia.

Satunnaismuuttujan  $S_k$  kuvaajaa ajan funktiona kutsutaan usein summakäyräksi tai summa-  
viivaksi (Castrén 1961). Sen käyttöön perustuvat monet varastoaltaiden mitoitukseen liittyvät menetelmät.

Useissa sovellutuksissa on hyödyllistä ottaa käytäntöön jäännösvaihteluväli  $R'_n$  (adjusted range) sekä jäännösosasummat  $S'_k$ ,  $M'_n$  ja  $m'_n$ :

$$\begin{aligned}
 S'_k &= S_k - \frac{k}{n} S_n \\
 M'_n &= \text{Max}(0, S'_1, \dots, S'_n) \\
 m'_n &= \text{min}(0, S'_1, \dots, S'_n) \\
 R'_n &= M'_n - m'_n
 \end{aligned}
 \tag{19}$$

Muuttujat  $M_n$ ,  $M'_n$ ,  $m_n$ ,  $m'_n$ ,  $R_n$  ja  $R'_n$  ovat keskeisellä sijalla varastoaltaiden mitoituksen teoriassa. Niiden tarkkojen jakaumafunktioiden määrittäminen on varsinkin suurilla  $n:n$  arvoilla vaikeaa. Sen vuoksi on kehitetty useita asymptoottisia tai kokeellisia tilastollisia menetelmiä. Niiden käyttöön perehdytään tarkemmin kohdassa 4.3.

Osasumma- ja vaihteluvälimuuttujien määrittelyä on pyritty selventämään kuvissa 20 ja 21.

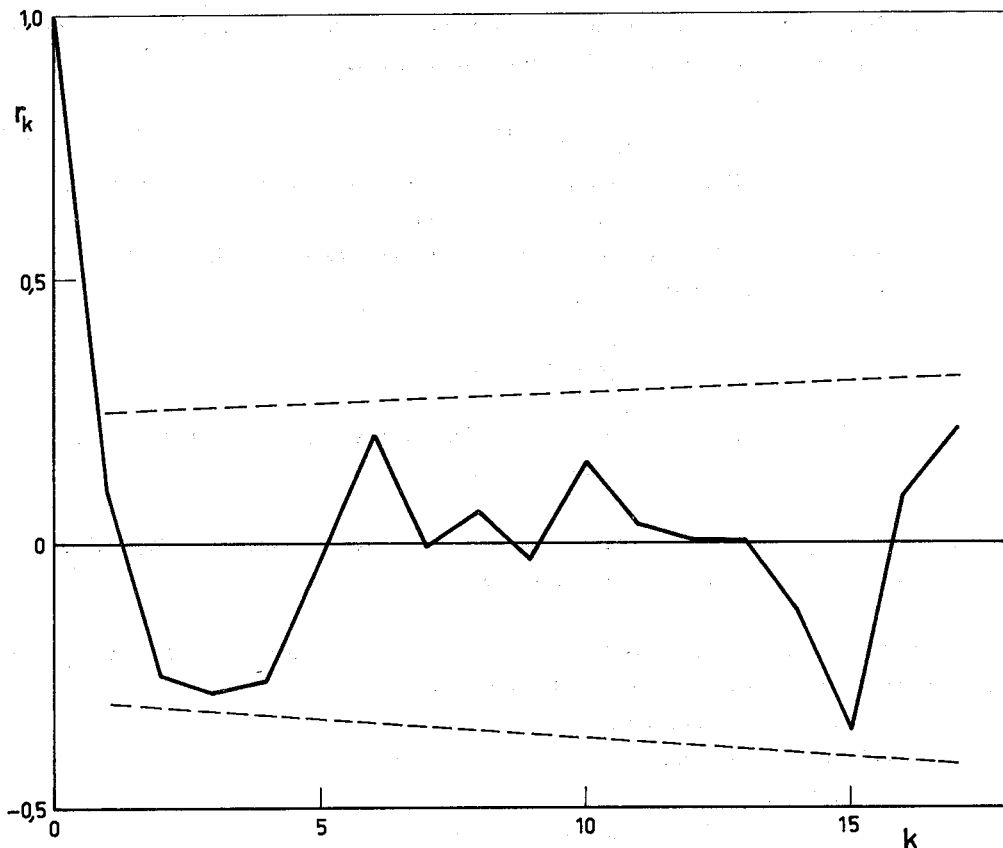
Aiemmin on jo käytetty eräitä varastoteoriaan liittyviä käsitteitä: nettotulovalunta  $T$  ja altaan vesivarasto  $S$ . Otetaan näiden lisäksi käyttöön tavoitejuoksutus  $D$ , altaasta tapahtuva todellinen juoksutus  $X$  sekä luotettavuusindeksi , joka voidaan määritellä kolmella eri tavalla (Klemes 1974):

1. Jos ollaan kiinnostuneita vain niiden vuosien lukumäärästä, jolloin säännösteilylle asetetut tavoitteet on pystytty saavuttamaan, käytetään luotettavuusindeksiä  $Z_0$ :

$$Z_0 = \frac{n - m}{n} \times 100 \%
 \tag{20}$$

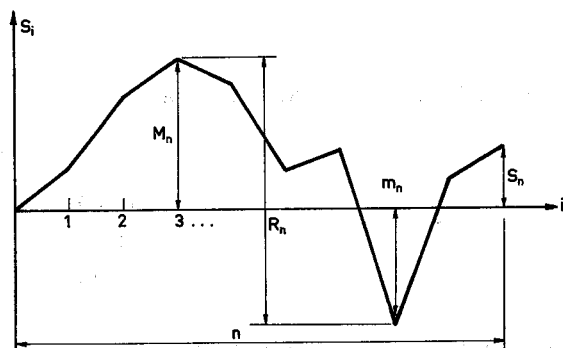
$n$  = tarkastelujakson kokonaispituus,  $v$

$m$  = niiden vuosien lukumäärä, jolloin tavoitteita ei ole saavutettu



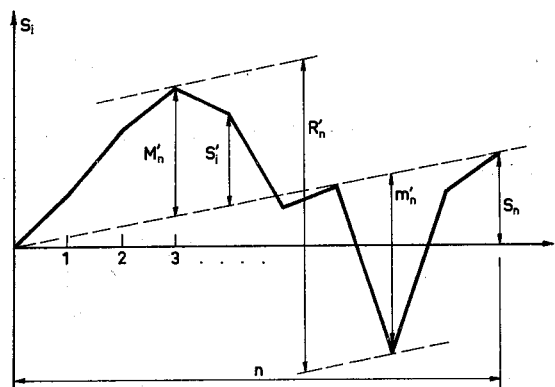
Kuva 19. Pyhäjärven nettotulovalunnan autokorrelaatiofunktio  $r_k$  (viiveillä  $k=1, \dots, 17$ ) sekä autokorrelaatiofunktion 5 % toleranssirajat.

Fig. 19. Autocorrelation function  $r_k$  of net inflow of Lake Pyhäjärvi (with time lags 1, ..., 17) and its 5% tolerance limits.



Kuva 20. Muuttujan  $S_i$  maksimiosasumman ( $M_n$ ), minimiosasumman ( $m_n$ ) ja vaihteluvälin ( $R_n$ ) määrittely.

Fig. 20. The definition of surplus ( $M_n$ ), deficit ( $m_n$ ) and range ( $R_n$ ) of the variable  $S_i$ .



Kuva 21. Muuttujan  $S_i$  jäännösosasummien  $M'_n$  ja  $m'_n$  sekä jäännösvaihteluvälin ( $R'_n$ ) määrittely.

Fig. 21. The definition of adjusted surplus ( $M'_n$ ), adjusted deficit ( $m'_n$ ) and adjusted range ( $R'_n$ ) of the variable  $S_i$ .

2. Jos halutaan tietää, kuinka suuren osan kokonaisajasta säännöstely on voitu hoitaa moitteettomasti, käytetään indeksiä  $Z_t$ :

$$Z_t = \left(1 - \frac{1}{n} \Sigma \Delta t\right) \times 100 \% \quad (21)$$

$\Sigma \Delta t$  = niiden aikavälien yhteispituus  $n$  vuoden aikana, jolloin tavoitteita ei ole saavutettu

3. Jos lisäksi halutaan tietää kuivakausina syntyvän vajauksen suhteellinen suuruus, käytetään indeksiä  $Z_q$ :

$$Z_q = \left(1 - \frac{1}{nD} \Sigma \Delta D\right) \times 100 \% \quad (22)$$

$\Sigma \Delta D$  = tavoitejuoksutuksesta laskettujen vajausten summa  $n$  vuoden aikana

Yleensä  $Z_o < Z_t < Z_q$ ; jos vuodenaikaisvaihtelu on voimakasta, voi päteä  $Z_t > Z_q$ . Jos jokin indekseistä on 100 %, kaikki kolme ovat 100 %.

Yleensä ei ole taloudellista pyrkiä 100 % luotettavuuteen; tyypillisinä indeksin  $Z_o$  optimiarvoissa eri käyttömuodoille Klemes (1974) esittää seuraavat:

- asutuksen vedenhankinta	99 %
- teollisuuden vedenhankinta	95-98 %
- kasteluveden käyttö	
lauhkea ilmasto	70-95 %
kuiva ilmasto	80-95 %

## 4.2 DETERMINISTISET MENETELMÄT

### 4.21 Menetelmien yleiskuvaus

Edellä esitettyjä määrittelyjä käyttäen voidaan ns. varastoyhtälö asettaa kolmella eri tavalla:

$$S = f_s(D, Z) \quad (23a)$$

$$D = f_d(Z, S) \quad (23b)$$

$$Z = f_z(D, S) \quad (23c)$$

Voidaan siis antaa halutun suuruinen tavoitejuoksutus  $D$  ja vaadittu luotettavuustaso  $Z$  ja tutkia, kuinka suuri varastotilavuus  $S$  tarvitaan. Toisaalta voidaan olemassaolevan varastotilavuuden perusteella arvioida, miten suureksi tavoitejuoksutus voidaan asettaa vaaditulla luotettavuustasolla. Kolmas mahdollisuus on tarkastella olemassaolevan varastotilavuuden ja asetetun tavoitteen valossa systeemin luotettavuutta.

Deterministisissä varastoyhtälöiden (23) ratkaisumenetelmissä on lähtökohtana havaittujen nettotulovaluntojen aikasarja tietyltä jaksolta. Näin saatu varastoyhtälöiden ratkaisu on siten voimassa vain tähän ajanjaksoon nähden ja tulosten yleistäminen koskemaan myös tulevaisuutta on epävarmaa. Kuitenkin tämä ratkaisumenetelmä on ollut kaikkein yleisin varastoyhtälöiden mitoituksessa käytetty. Tällöin on erityisesti pyritty määrittämään säännöstelytilavuus niin, että asetettu tavoitejuoksutus olisi tarkastelujaksolla saavutettu 100 % luotettavuudella.

Varastoyhtälöiden deterministinen ratkaisumenetelmä voi olla numeerinen tai graafinen. Numeerista menetelmää voidaan käyttää kahdella tavalla:

- 1) Voidaan ratkaista yhtälö  $S = f_s(D, Z)$ , kun  $Z = 100\%$ .  
Ratkaisu on olemassa, jos  $D \leq \bar{T}$  ( $\bar{T}$  = keskimääräinen nettotulovalunta)
- 2) Voidaan ratkaista yhtälö  $Z = f(S, D)$  kaikilla kolmella luotettavuusindeksillä  $Z_o$ ,  $Z_t$  ja  $Z_q$ .

Jäljellä oleva varastoyhtälö (23b) ja yhtälö (23a), missä  $Z \neq 100\%$ , voidaan ratkaista soveltamalla kohtaa (2) useita kertoja peräkkäin muuttujien  $S$  ja  $D$  arvoja vaihdellen.

Graafisessa varastoyhtälöiden ratkaisussa käytetään summaviivaa tai jäännössummaviivaa, jotka vastaavat lausekkeissa 18 ja 19 määriteltyjen osasummien  $S_k$  ja  $S'_k$  kuvaajia. Summaviivamenetelmällä voidaan ratkaista seuraavat varastoyhtälöt:

1.  $S = f_s(D, Z)$ , kun  $Z = 100\%$
2.  $Z = f_z(S, D)$
3.  $D = f_d(S, Z)$ , kun  $Z = 100\%$

Muut tapaukset voidaan ratkaista peräkkäisillä aproksimaatioilla, kuten numeerisen ratkaisumenetelmän tapauksessa.

#### 4.22 Sovellutus

Varastoyhtälön deterministinen ratkaisu numeerisessa muodossa on laskettu Pyhäjärvelle jakson 1938-73 kuukausittaisten nettotulovaluntojen perusteella. Ratkaisussa on käytetty Thomas-Fieringin algoritmia (Fiering 1967), jonka päävaiheet ovat seuraavat:

1. Lasketaan  $T_i - D_i$ ,  $i = 1, 2, \dots, 12n$ , missä  $T_i$  on kuukauden  $i$  nettotulovalunta,  $D_i$  kuukauden  $i$  veden tarve ja  $n$  tarkasteltavan jakson pituus vuosina ( $n = 36$ ). Tässä esimerkiksi  $D_i = 2,0 \text{ m}^3/\text{s}$  kaikkina kuukausina (vedentarve vakio). Suureet  $T_i$  ja  $D_i$  voidaan ilmoittaa yksikköinä  $\text{m}^3/\text{s}$  tai  $\text{mm}$  (järven keskipinta-alaa kohti). Tässä on käytetty jälkimmäistä yksikköä.

2. Lasketaan summa  $\sum_{i=1}^t (T_i - D_i)$ , kun  $t = 1, 2, \dots, 12n$
3. Etsitään ensimmäinen paikallinen maksimi kohdan 2 summan sarakkeesta. Merkitään sitä symbolilla  $MAX_1$ .
4. Etsitään ensimmäinen paikallinen maksimi, joka on suurempi kuin  $MAX_1$ . Olkoon se vastaavasti  $MAX_2$ .
5. Jatketaan samalla tavalla; uuden maksimin pitää aina olla suurempi kuin kaikki edelliset. Saadaan jono  $MAX_1, \dots, MAX_k$ , missä  $k$  riippuu havaintosarjan rakenteesta.
6. Etsitään ensimmäinen paikallinen minimi väliltä  $MAX_1 \dots MAX_2 (= MIN_1)$  ja lasketaan  $MAX_1 - MIN_1$
7. Etsitään seuraavat paikalliset minimi  $MIN_2, \dots, MIN_k$  ja lasketaan  $MAX_i - MIN_i$ ,  $i = 2, \dots, k$
8. Suurin erotuksista  $MAX_i - MIN_i$  ( $i = 1, \dots, k$ ) on vaadittu säännöstelytilavuus  $R_n$ . Jos olemassaoleva säännöstelytilavuus  $S_a \geq R_n$ , olisi koko jakson  $n$  ajan pystytty juoksumaan vaadittu määrä  $D_i$ .

9. Varasto  $S_i$  jakson  $i$  lopussa voidaan laskea lausekkeesta (24):

$$S_i = \min_i \left\{ R_n, S_{i-1} + T_i - D_i \right\} \quad (24)$$

10. Edelleen voidaan laskea hukkajuoksumäärä  $W_i$ :

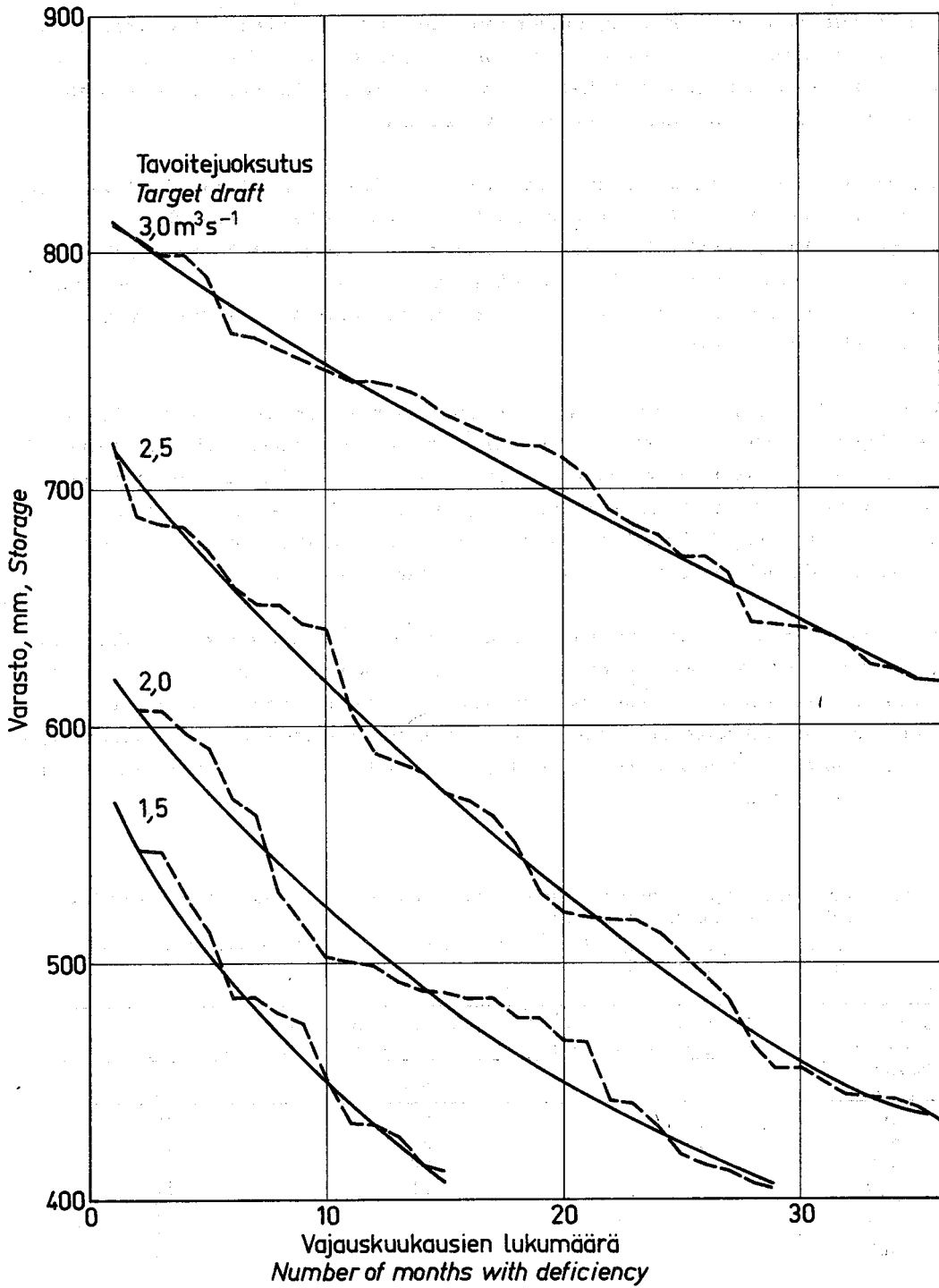
$$W_i = \max_i \left\{ 0, (T_i - D_i - (R_n - S_{i-1})) \right\} \quad (25)$$

Thomas-Fieringin algoritmi antaa seuraavat arvot säännöstelytilavuudelle, joka olisi riittänyt jakson 1938-73 kaikkina kuukausina tavoitejuoksumäärän saavuttamiseen:

tavoitejuoksumäärä $D$ ( $m^3/s$ )	varastotilavuus $R_n$ (mm)
1,5	568
2,0	620
2,5	720
3,0	811
3,5	1138
4,0	1520
4,35	1790

Tavoitejuoksumäärän  $2,0 m^3/s$  saavuttamiseksi kaikkina kuukausina jakson 1938-73 aikana olisi siis tarvittu  $620 mm$ :n säännöstelytilavuus. Jos tavoitevirtaama olisi ollut  $2,5 m^3/s$ , tarvittava säännöstelytilavuus olisi vastaavasti  $720 mm$ . Tavoitejuoksumäärä  $4,35 m^3/s$  vastaa jakson 1938-73 keskimääräistä nettotulovaluntaa.





Kuva 22. Pyhäjärven säännöstelytilavuuden riittävyys eri tavoitejuoksutuksilla vuosina 1938-73.

Fig. 22. The required storage of Lake Pyhäjärvi for different target drafts in 1938-73.

Kuvassa 22 on esitetty Thomas-Fieringin algoritmiin perustuva käyrästä. Pystyakselina on säännöstelytilavuus (mm) ja vaaka-akselina altaan vajuuskuukausien lukumäärä eli 36 vuoden aikana sattuneet kuukaudet, jolloin tietyllä säännöstelytilavuudella oltaisiin jouduttu alarajan alapuolelle, mikäli olisi juoksettu tavoitevirtaamaa.

Kuvan 22 perusteella voidaan todeta, että tavoitejuoksutus  $2,0 \text{ m}^3/\text{s}$  säännöstelytilavuudella 580 mm olisi jaksolla 1938-73 jäänyt saavuttamatta vain neljänä kuukautena. Tämä olisi tapahtunut syksyllä 1959; vuosien 1959-60 kuivakausi osoittautuu tavoitejuoksutuksella  $2,0 \text{ m}^3/\text{s}$  rajoittavammaksi kuin vuosien 1939-42 ankara kuivakausi. Jos tavoitejuoksutus on  $2,5 \text{ m}^3/\text{s}$  tai suurempi, tulee vuosien 1939-42 kuivakausi kuitenkin rajoittavaksi myös Thomas-Fieringin algoritmissa.

Arvioitaessa saatuja tuloksia on huomioitava käytetyn laskenta-algoritmin lähtökohdat ja rajoitukset. Algoritmi edellyttää nettotulovalunnan täydellistä ennustettavuutta. Käytännössä ei voida tietää, milloin ankara kuivakausi on tulossa, jolloin siis voitaisiin kerätä mahdollisimman suuri varasto. Toisaalta ei altaan pintaa pystytä huhti-toukokuussa saamaan tarkoin ylärajalle, koska ylärajan ylityksen riski kasvaisi suureksi. Thomas-Fieringin algoritmi ei myöskään huomioi alapuolisen uoman vetokyvyn asettamaa rajoitusta.

Kuvan 22 perusteella ei voida päätellä, kuinka suuri vajuus tavoitejuoksutukseen nähden olisi syntynyt, jos altaan vedenkorkeutta ei olisi päästetty laskemaan alarajan alapuolelle. Tämä vajuus voidaan laskea, vaikkakin ankarana kuivakautena tilanne on usein sellainen, että vedenpinta haihdunnan vaikutuksesta laskee alle alarajan nollajuoksutuksellakin. Vajuus voitaisiin ilmaista luotettavuusparametrin  $Z_q$  avulla, mutta taulukossa 18 se on kuitenkin ilmaistu käyttäen yksikköä  $\text{milj. m}^3$ .

Taulukko 18. Juoksutusvajeen suuruus ( $10^6 \text{ m}^3$ ) jakson 1938-73 aikana eri varastotilavuuksilla ja tavoitejuoksutuksilla.

Table 18. Total water deficiency ( $10^6 \text{ m}^3$ ) as a function of storage volume and target draft in the period 1938-73.

Varastotilavuus (mm) Storage volume (mm)	Juoksutusvaje ( $10^6 \text{ m}^3$ ), kun tavoitejuoksutus on ... ( $\text{m}^3/\text{s}$ ) Total water deficiency ( $10^6 \text{ m}^3$ ) with the target draft ( $\text{m}^3/\text{s}$ )		
	2,0	2,5	3,0
500	22	54	139
550	11	32	101
600	3	18	74
650	-	11	51
700	-	3	32
750	-	-	17
800	-	-	2

Jos säännöstelytilavuus on 580 mm, on juoksutusvajeen suuruus  $2,0 \text{ m}^3/\text{s}$  tavoitevirtaamalla n. 6 milj.  $\text{m}^3$ . Tämä vastaa virtaaman pienentämistä arvoon  $1,0 \text{ m}^3/\text{s}$  runsaan 2 kk ajaksi.

Jos tavoitteena olisi ollut  $2,5 \text{ m}^3/\text{s}$ , olisi 50 % tavoitevirtaamasta pitänyt juoksuuttaa noin 7 kk ajan ja tavoitevirtaamalla  $3,0 \text{ m}^3/\text{s}$  vastaava aika olisi ollut 22 kk.

Näitäkin tuloksia tarkasteltaessa on syytä huomioida Thomas-Fieringin algoritmin rajoitukset. Jos ennustettavuuden heikkous ja tulvariskit pienentäisivät tehoisaa säännöstelytilavuutta 10 %, pitenisi  $1,0 \text{ m}^3/\text{s}$  juoksuituksen aika jo yli 6 kuukaudeksi. Näinkään suurta tehokkuutta säännöstelyssä ei aina voitane saavuttaa.

#### 4.3 STOKASTISET MENETELMÄT

Stokastinen varastoyhtälöiden ratkaiseminen voi tapahtua viidellä eri menetelmällä:

1. Voidaan käyttää pitkää, synteettistä nettotulovalunnan aikasarjaa, joka tilastollisilta parametreiltaan vastaa havaittua aikasarjaa. Synteettisen sarjan pituuden tulee olla vähintään 500-1000 vuotta. Synteettistä aikasarjaa käyttäen varastoyhtälöt ratkaistaan kohdan 4.21 deterministisillä menetelmillä. Jos synteettinen aikasarja on jaettu osasarjoihin, saadaan niiden lukumäärää vastaava joukko ratkaisuja. Tällöin voidaan yhden havaittuun aikasarjaan perustuvan ratkaisun sijasta tarkastella ratkaisujen jakaumaa, jolloin saadaan selville "tyypillinen" ratkaisu.
2. Analyttisissä ratkaisumenetelmissä on lähtökohtana nettotulovalunnan jakauma ja autokorrelaatiofunktio. Eräille tyypillisimmille jakaumille ja yksinkertaisille autokorrelaatiofunktioille on johdettu ratkaisumenetelmät, joiden avulla saadaan suoraan esim. tarvittavan varastotilavuuden odotusarvo ja sen varianssi. Varastoyhtälöiden analyttisten ratkaisumenetelmien kehittäjinä on mainittava erityisesti Hurst (1951), Moran (1959), Yevjevich (1965) ja Salas-La Cruz (1972). Useimpien analyttisten ratkaisumenetelmien käytännöllinen merkitys on varsin pieni johtuen niihin liittyvistä rajoituksista.
3. Asymptoottisissa ratkaisumenetelmissä tyydytään johtamaan likimääräinen, asymptoottinen lauseke varastotilavuuden odotusarvolle ja varianssille. Ensimmäisenä tällaisen lausekkeen johti Hurst (1951). Hän sai laajan aineiston perusteella tuloksen, jonka mukaan

$$\bar{R}'_n = s_n \cdot n^{0,729} \quad (26)$$

$\bar{R}'_n$  = keskitetyn vaihteluvälin odotusarvo  
 $s_n$  = vuosiarvojen keskihajonta  
 $n$  = havaintovuosien lukumäärä

Hurst loi tutkimuksellaan pohjan vuosikymmeniä jatkuneelle tieteelliselle väittelylle, jonka kohteena on eksponentti 0,729. Yleisin käsitys on nykyään se, ettei luonto noudata "Hurstin ilmiötä", vaan hänen saamansa eksponentin arvo on keskiarvo, joka perustuu erilaisten suu- reiden eripituisiin aikasarjoihin. Hurst käytti tutkimuksissaan virtaamasarjojen ohella myös sadannan, lämpötilan ja vedenkorkeuden aikasarjoja.

Uusimpia asymptoottisen ratkaisumenetelmän kehitysvaiheita edustaa Salaz-La Cruz (1972) tutkimuksessaan jaksollisten satunnaisprosessien vaihteluväleistä. Hän jakaa tarvittavan säännöstelytilavuuden deterministiseen ja stokastiseen osaan. Edellinen riippuu nettotulovalunnan kuukausikeskiarvoista ja -hajonnoista, jälkimmäinen myös prosessin ensimmäisestä autokorrelaatiokertoimesta  $r_1$  sekä tarkastelujakson pituudesta  $n$ . Deterministisen varaston suuruus voidaan määrittää valmiiden käyrästöjen perusteella. Sen arvoksi saadaan Pyhäjärvellä  $n$ . 600 mm. Stokastinen varasto voidaan laskea monimutkaisesta lausekkeesta, jossa mm. pitää laskea  $12n$  - pituisia osasummia. Pyhäjärvellä stokastisen varaston arvoksi saadaan 580 mm, kun  $n = 20$ . Näin ollen deterministisen ja stokastisen varaston summa on 1180 mm, joten tämän suuruinen säännöstelyväli tarjoaisi mahdollisuuden juokсутtaa keskivirtaaman ( $4,35 \text{ m}^3/\text{s}$ ) suuruista virtaamaa koko 20 vuoden jakson ajan. Tällä tuloksella ei luonnollisestikaan ole muuta kuin teoreettinen merkitys. Sitä voidaan verrata kohdassa 4.22 deterministisellä menetelmällä määritettyyn vastaavaan varastoon 1790 mm. Deterministisellä menetelmällä saatu tulos oli siis 52 % suurempi. Toisaalta tarkastelujakson pituus oli tässä laskelmassa 36 v, joka osittain selittää sen, että vaadittu varastotilavuus on suurempi. Lisäksi on muistettava jaksoon 1938-73 sisältyvien kuivakausien harvinaisuus.

4. Numeeriset menetelmät perustuvat nettotulovalunnan todennäköisyysjakaumiin ja niiden perusteella muodostettuihin altaan vedenkorkeuden siirtymätodennäköisyyksiin. Oletetaan, että altaan varastotilavuus jaetaan distreetteihin tiloihin  $S_1, S_2, \dots, S_n$ , joista kunkin vastaa varaston muutos  $\Delta S$ . Olkoon allas aikavälin  $k$  alussa tilassa  $j$ . Tällöin todennäköisyyttä, että allas aikavälin  $k+1$  alussa on tilassa  $i$ , kun aikavälillä  $k$  noudatetaan juokсутusta  $D$ , merkitään symbolilla  $P_{ij}^k(D)$ . Todennäköisyydet  $P_{ij}^k(D)$  voidaan määrittää nettotulovalunnan todennäköisyysjakaumista huomioimalla juokсутus  $D$ . Kun nämä todennäköisyydet on määritetty, voidaan kaikkien altaan tilojen  $S_i$  todennäköisyydet laskea yhtälöryhmästä (27):

$$\begin{aligned} P_1 &= P_1 P_{11} + P_2 P_{21} + \dots + P_n P_{n1} \\ P_2 &= P_2 P_{12} + P_2 P_{22} + \dots + P_n P_{n2} \\ &\cdot \\ &\cdot \\ &\cdot \\ P_n &= P_1 P_{1n} + P_2 P_{2n} + \dots + P_n P_{nn} \end{aligned} \quad (27)$$

$D$  ja  $k$  on jätetty yksinkertaisuuden vuoksi merkitsemättä. Yhtälöryhmän ratkaisun tulee toteuttaa ehto (28):

$$\sum_{i=1}^n P_j = 1 \quad (28)$$

Jos on valittu  $\Delta S_1 = \Delta S_n = 0$ , ilmoittaa  $P_1$  todennäköisyyden sille, että allas on tyhjä ja  $P_n$  todennäköisyyden, että se on ylärajalla.

5. Varastoyhtälöiden ratkaiseminen on mahdollista myös valmiiden käyrästöjen avulla. Selaisia ovat esittäneet mm. Yevjevich (1965) ja Fiering (1967). Ne perustuvat laajoihin, generoituihin aineistoihin, joiden avulla on voitu tutkia aikasarjan eri parametrien vaikutusta



Jos juoksutus on syyskuussa keskimäärin  $2,0 \text{ m}^3/\text{s}$ , havaitaan todennäköisyyden vedenpinnan alenemiselle olevan  $0,58$  ja sen kohoamiselle  $0,42$  (siirtymätodennäköisyyksien summa on kaikissa sarakkeissa luonnollisesti 1). Todennäköisyys, että alenema on suurempi kuin  $50 \text{ mm}$  on  $0,20$  ja todennäköisyys  $100 \text{ mm}$  tai suuremmalle alenemalle  $0,02$ . Vastaavalla tavalla tulkitaan siirtymätodennäköisyysmatriisia muiden juoksutusten osalta. Jos juoksutus on  $10 \text{ m}^3/\text{s}$ , on todennäköisyys vedenpinnan kohoamiselle enää  $0,04$  ja vedenpinnan todennäköisin muutos on  $100\text{-}200 \text{ mm}$ :n suuruinen alenema.

Vastaavat siirtymämatriisit voidaan laskea kaikille kuukausille. Voidaan kuitenkin havaita, että siirtymätodennäköisyyksien esittäminen yksinkertaistuu huomattavasti, jos vedenkorkeuden luokkaväli  $\Delta S$  valitaan yhtä suureksi kuin juoksutusten luokkaväli  $\Delta D$ . Tällöin juoksutuksen kasvaessa yhdellä luokkavälillä siirtymätodennäköisyydet siirtyvät taulukon 19 kaltaisessa matriisissa luokkavälin alaspäin niiden numeroarvojen pysyessä muuttumattomina.

Tähän perustuen on valittu  $\Delta S$ :n suuruudeksi kaikkina kuukausina  $2,0 \text{ m}^3/\text{s}$  keskijuoksutusta vastaava arvo. Näin ollen  $\Delta S$  vaihtelee kuukauden pituuden mukaan välillä  $31,4 - 34,8 \text{ mm}$ . Vedenpinnan korkeuden muutoksille on annettu numerot: muutos  $0 - \Delta S$  vastaa tilaa 1,  $\Delta S - 2 \Delta S$  tilaa 2 jne.

Taulukko 20. Vedenkorkeuden siirtymätodennäköisyydet nolajuoksutuksella eri kuukausina.

Table 20. Transition probabilities of water level of different months with the draft  $0 \text{ m}^3/\text{s}$ .

Tila	Siirtymätodennäköisyydet eri kuukausina Transition probabilities of different months											
	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
15				0,01								
14				0,02								
13				0,03								
12				0,06							0,01	
11			0,01	0,07	0,01						0,02	
10			0,01	0,09	0,02					0,02	0,04	0,02
9			0,01	0,09	0,02					0,03	0,04	0,02
8			0,02	0,15	0,02					0,04	0,07	0,04
7	0,02		0,04	0,17	0,03			0,02		0,07	0,08	0,05
6	0,07	0,01	0,05	0,18	0,04			0,02	0,03	0,09	0,10	0,08
5	0,08	0,02	0,06	0,09	0,06		0,01	0,04	0,04	0,10	0,12	0,11
4	0,09	0,06	0,07	0,03	0,09		0,02	0,05	0,06	0,11	0,13	0,16
3	0,18	0,10	0,08	0,01	0,15	0,02	0,04	0,06	0,08	0,12	0,13	0,24
2	0,34	0,41	0,18		0,16	0,06	0,10	0,14	0,20	0,12	0,11	0,22
1	0,20	0,39	0,41		0,17	0,18	0,17	0,20	0,29	0,17	0,08	0,05
-1	0,02	0,01	0,06		0,17	0,27	0,20	0,20	0,21	0,12	0,07	
-2					0,06	0,26	0,20	0,15	0,06	0,01		
-3						0,15	0,14	0,08	0,02			
-4						0,06	0,07	0,03	0,01			
-5							0,03	0,01				
-6								0,02				

Vedenpinnan korkeuden siirtymätodennäköisyydet voidaan nyt esittää samassa taulukossa kaikille kuukausille (taulukko 20). Tämä taulukko on sellaisenaan voimassa, kun juoksutus on  $0 \text{ m}^3/\text{s}$ . Tällöin esim. todennäköisyys vedenpinnan siirtymiselle tammikuussa yhden luokan alaspäin ( $0 \dots - 34,8 \text{ mm}$ ) on  $0,02$ . Jos tammikuussa juoksutetaan keskimäärin  $4,0 \text{ m}^3/\text{s}$ , siirtyvät tammikuun siirtymätodennäköisyydet kaksi luokkaa alaspäin, joten todennäköisyys yhden luokan suuruiselle vedenpinnan alenemalle on  $0,34$  ja todennäköisyys yhden luokan suuruiselle tai suuremmalle alenemalle on  $0,34 + 0,20 + 0,02 = 0,56$ .

Koska siirtymätodennäköisyydet on esitetty kahden merkitsevän numeron tarkkuudella, voi taulukoissa 19 ja 20 ilmetä pieniä ristiriitaisuuksia syyskuun siirtymätodennäköisyyksissä.

Siirtymätodennäköisyyksiä voidaankäyttää hyväksi juoksutuksen valinnassa eri kuukausina. Kun tunnetaan altaan vedenkorkeus kuukauden alussa, voidaan siirtymätodennäköisyyksien perusteella arvioida todennäköisyys ylärajan ylitykselle tai alarajan alitukselle ko. kuukauden aikana.

## 5.2 HAITTAFUNKTION KÄYTTÖ

Siirtymätodennäköisyyksien käyttöä juoksutuksen valinnassa voidaan kuitenkin vielä tehostaa. Ei ole ilmeisestikään samantekevää, ovatko todennäköisyydet 1 luokkavälin suuruiselle ylärajan ylitykselle  $0,11$  ja 2 luokkavälin suuruiselle  $0,01$  tai ovatko ne vastaavasti  $0,08$  ja  $0,04$ . Ylärajan ylitystodennäköisyys on molemmissa tapauksissa  $0,12$ , mutta mahdollisiin vahinkoihin nähden riski on jälkimmäisessä tapauksessa suurempi.

Riskin suuruuden mittaaminen on juoksutussääntöjen laadinnassa käynyt yhä yleisemmäksi ja tärkeämmäksi. Alan julkaisuissa on lukuisia teoreettisia tai käytännön selvityksiin perustuvia haittafunktioita (Hall ja Dracup 1970, Buras 1972, Su ja Deininger 1974, Mejia, Egli ja Leclerc 1974).

Säkylän Pyhäjärvellä ei haittafunktioita ole ranta-arvioinnein määritetty. Sen vuoksi on mielivaltaisesti valittu kuutiollisesti kasvava haittafunktio sekä alarajan alitukselle että ylärajan ylitykselle. Tällaista funktiota ovat käyttäneet mm. Bogárdi ja Nagy (1973):

$$L^k(0, i) = \begin{cases} 0 & \text{jos } A \leq i \leq B \\ (i-B)^3 & \text{jos } i > B \\ (A-i)^3 & \text{jos } i < A \end{cases} \quad (29)$$

$L^k(0, i)$  = haittafunktio altaan vedenkorkeuden tilalle aikavälillä  $k$

$A$  = säännöstelyn alarajaa vastaava tila

$B$  = " " - ylärajaa - " "

Haittafunktio kasvaa siis kuutiollisesti: jos vedenkorkeus ylittää ylärajan kahdella luokkavälillä, vahingot ovat 8-kertaiset yhden luokkavälin suuruisen ylityksen aiheuttamiin verrattu-

na. Jos oletetaan haittafunktio samaksi kaikkina kuukausina, voidaan merkitä  $L^k(0, i) = L(0, i)$ .

Vaikka esitetty haittafunktio on mielivaltainen, tarjoaa se mahdollisuuden säännöstelyrajojen rikkomisesta aiheutuvan haitan arviointiin altaan vedenkorkeuden ja juoksutuksen vaihdellessa. Olkoon vedenkorkeus kuukauden  $k$  lopussa tilassa  $i$ . Jos tilat on määritelty taulukon 20 mukaisesti, sallittujen tilojen joukko muodostuu tiloista 1, 2, ..., 17. Jos nollassa on säännöstelyn alaraja  $N_{43} + 44,540$  m, vastaa tila 1 vedenkorkeutta  $N_{43} + 44,540$  m ...  $N_{43} + 44,574$  m ylemmän arvon riippuessa jonkin verran kuukauden pituudesta. Tilan 17 yläraja on 30 päivän pituisena kuukautena  $N_{43} + 45,112$  m ja 31 päivän pituisena  $N_{43} + 45,131$  m; keskiarvoksi vuoden kaikille kuukausille saadaan  $N_{43} + 45,120$  m eli tarkoin säännöstelyn yläraja. Olkoon edelleen sallittujen juoksutusten joukko kuukautena  $k$   $\{D_j^k\}$ ; jos käytetään luokkaväliä  $2 \text{ m}^3/\text{s}$  tämä joukko on  $\{D_j^k\} = 2, 4, \dots, 16 \text{ m}^3/\text{s}$ , kun  $j = 1, 2, \dots, 8$ . Yksinkertaisuuden vuoksi oletetaan sallittujen juoksutusten joukko samaksi kaikkina kuukausina, vaikka alapuolisen uoman vetokyky jonkin verran vaihtelee. Voidaan siis merkitä  $D_j^k = D_j$ . Jos nyt vedenkorkeus kuukauden  $k$  lopussa on tilassa  $i$  ja kuukautena  $k$  on noudatettu juoksutusta  $D_j$ , saadaan haitan suuruus lausekkeesta

$$L(1, i) = \sum L(0, j) P_{ij}(D_j) \quad (30)$$

Tällä lausekkeella on säännöstelyrajojen rikkomisesta aiheutuvan haitan suuruus laskettu kuukauden alun vedenkorkeuden ja kuukauden keskimääräisen juoksutuksen funktiona. Tällainen  $8 \times 17$ -matriisi on laskettu kaikille kuukausille; taulukossa 21 on esitetty esimerkkinä syyskuun haittamatriisi. Voidaan havaita, että juoksutuksella  $2,0 \text{ m}^3/\text{s}$  on riski säännöste-

Taulukko 21. Haittafunktion arvot syyskuussa vedenkorkeuden alkutilan ja juoksutuksen funktiona.

Table 21. The values of loss function in September as a function of initial state of water level and as a function of draft.

Tila	Haitan suuruus juoksutuksella ( $\text{m}^3/\text{s}$ ) The value of loss with the draft ( $\text{m}^3/\text{s}$ )							
State	2	4	6	8	10	12	14	16
17	8,77	3,56	1,19	0,28	0,03	0	0	0
16	3,56	1,19	0,28	0,03	0	0	0	0
15	1,19	0,28	0,03	0	0	0	0	0
14	0,28	0,03	0	0	0	0	0	0
13	0,03	0	0	0	0	0	0	0
12	0	0	0	0	0	0	0	0,01
11	0	0	0	0	0	0	0,01	0,10
10	0	0	0	0	0	0,01	0,10	0,49
9	0	0	0	0	0,01	0,10	0,49	1,87
8	0	0	0	0,01	0,10	0,49	1,87	6,12
7	0	0	0,01	0,10	0,49	1,87	6,12	16,69
6	0	0,01	0,10	0,49	1,87	6,12	16,69	38,20
5	0,01	0,10	0,49	1,87	6,12	16,69	38,20	75,85
4	0,10	0,49	1,87	6,12	16,69	38,20	75,85	135,03
3	0,49	1,87	6,12	16,69	38,20	75,85	135,03	222,27
2	1,87	6,12	16,69	38,20	75,85	135,03	222,27	343,40
1	6,12	16,69	38,20	75,85	135,03	222,27	342,40	502,22



lyrajojen rikkomiselle olematon, jos syyskuun alussa vedenkorkeus on tiloissa 5... 13, so. välillä  $N_{43} + 44,67$  m ...  $N_{43} + 44,95$  m. Jos ollaan rajan  $N_{43} + 44,67$  malapuolella, on taulukon 21 mukaan olemassa nolasta eroava riski joutua alarajan alapuolelle. Tilassa 1 haittafunktion arvo on lähes samansuuruinen kuin ylärajan ylityksestä aiheutuva haitta oltaessa tilassa 17 ja juoksutettaessa vain  $2,0 \text{ m}^3/\text{s}$ . Suuremmilla juoksutuksilla ylärajan ylittämisen riskiä voidaan tehokkaasti pienentää ja juoksutuksella  $10 \text{ m}^3/\text{s}$  se on jo lähes olematon.

On ilmeistä, että vaihtelemalla juoksutusta kuukauden kuluessa voidaan taulukon 21 mukaisia haittafunktion arvoja pienentää. Taulukko antaa kuitenkin ohjearvot juoksutuksen valinnalle vain kuukauden alussa.

### 5.3 JUOKSUTUSSÄÄNTÖ

Taulukko 21 antaa varsin suuren liikkumavaran säännöstelyn hoidolle. Jos syyskuun alussa ollaan tiloissa 11... 13, näyttäisi lähes yhdentekevältä, juoksutetaanko  $2 \text{ m}^3/\text{s}$  tai  $16 \text{ m}^3/\text{s}$ ; riski säännöstelyrajojen rikkomiselle olisi kuitenkin lähes olematon. On selvää, että tämänkaltaisen vapauden mielivaltainen käyttö johtaisi seuraavina kuukausina hankaliin tilanteisiin: päädyttäisiin epäsuotuisiin alkuarvoihin ja riski säännöstelyrajojen rikkomiselle olisi suuri.

Taulukon 21 mukaisten haittamatriisien pohjalta ei siis voida suoraan laatia juoksutussääntöä. Sen laadinta edellyttää kaikkien kuukausien tarkastelua ympärivuotisena kokonaisuutena. Ongelmanasettelussa tullaan matemaattisesti hankalalohkelle pohjalle: miten huomioida edellisten kuukausien vaikutus? Missä määrin peräkkäisten kuukausien nettotulovaluntojen riippuvuus vaikuttaa?

Dynaaminen ohjelmointi on matemaattinen menetelmä, joka varsin hyvin soveltuu edelläkuvatun ongelman ratkaisemiseen. Menetelmän kehittäjänä oli lähinnä Bellman (1957); vesitekniikassa sitä ovat soveltaneet mm. Hall ja Dracup (1970) sekä Buras (1972) ja juoksutussäännön laadintaan Bogárdi ja Nagy (1973) sekä Su ja Deininger (1974).

Dynaamisen ohjelmoinnin soveltaminen juoksutussäännön määrittämiseen edellyttää seuraavia lähtötietoja kaikilta kuukausilta:

1. Altaan nettotulovalunnan jakaumat
2. Pienin ja suurin sallittu juoksutus
3. Haittafunktio

Tarkastellaan nyt minimoitavan kohdefunktion muodostamista kohtien (5.1) ja (5.2) tulosten perusteella lähinnä Bogárdin ja Nagyn (1973) mukaan.

Edellä on tarkasteltu sallittujen juoksutusten joukkoa kuukautena  $k$ ; Sitä voidaan kutsua yhden aikavälin juoksutuspolitiikaksi ja merkitä symbolilla  $D_1(k)$ . Jos halutaan ilmaista myös juoksutusluokka  $j$ , merkitään  $D_1(k, j)$ , missä  $j$  saa kaikki sallitut arvot.

Jos tarkasteltava jakso muodostuu aikaväleistä  $k, k-1, \dots, 1$ , on aikavälien lukumäärä  $k$  ja koko jakson juoksupolitiikka voidaan merkitä symbolilla  $D_k(k)$ . Tämä voidaan rekursiivisesti ilmaista muodossa (31):

$$D_k(k) = D_1(k) + D_{k-1}(k-1) \quad (31)$$

Jokaisen jakson juoksupolitiikka voidaan siis esittää jakson viimeisen aikavälin juoksupolitiikan ja kaikkien edellisten aikavälien juoksupolitiikan avulla. Samoin voidaan laskea kokonaishaitta haittafunktion viimeisen aikavälin arvon ja kaikkien edellisten aikavälien yhteenlasketun haitan avulla. Kokonaishaitan odotusarvolle saadaan siten lauseke (32):

$$E \left\{ L [D_k(k)] \right\} = E \left\{ L [D_1(k)] \right\} + E \left\{ L [D_{k-1}(k-1)] \right\} \quad (32)$$

Yhtälön oikean puolen alkuosa ilmaisee haittafunktion odotusarvon aikavälinä  $k$ ; tämä odotusarvo lasketaan yli kaikkien mahdollisten tilojen  $i$  ja  $j$ . Oikean puolen loppuosa ilmaisee haittafunktion odotusarvon summan aikavälinä  $1, \dots, k-1, i$  ja  $j$ . Bellmanin optimaalisuusperiaatteen mukaan saadaan nyt rekursiivinen yhtälö kokonaishaitan minimiarvolle  $L(k, i)$ :

$$L(k, i) = \min_{D(k, i)} \sum_{j=-m}^M [r(k, i, j) + L(k-1, j)] \times P_{ij}^k [D(k, i)] \quad (33)$$

$L(k, i)$  = kokonaishaitan minimiarvo aikavälien  $k, k-1, \dots, 1$  aikana  
 $P_{ij}^k [D(k, i)]$  = siirtymätodennäköisyys aikavälinä  $k$  tilasta  $i$  tilaan  $j$ ,  
 jos noudatetaan juoksupolitiikkaa  $D(k, i)$

$M$  = suurin mahdollinen altaan tila

$-m$  = pienin mahdollinen altaan tila

Haitan suuruuden yhtenä aikavälinä oletetaan riippuvan altaan tilasta tämän aikavälin alussa ja lopussa. Käyttäen kuutiollisen haittafunktion määritelmää (29) saadaan lauseke (34):

$$r(k, i, j) = \max_{r(k, j, i)} \left\{ \max [(A-i)^3, 0], \max [(j-B)^3, 0] \right\} \quad (34)$$

Funktio  $r(k, i, j)$  ilmoittaa siis suurimman mahdollisen haitan kullakin muuttujien  $(k, i, j)$  kombinaatiolla. Muuttujien  $(i, j)$  vaihtelu on ulotettava niin laajalle, että kaikkia sallittuja juoksupolitiikkaa vastaavat siirtymät tulevat huomioiduiksi. Kun  $i$  ja  $j$  vaihtelevat altaan sallittujen tilojen alueella, pätee  $r(k, i, j) = 0$ .

Lausekkeessa (34) esiintyvä funktion  $r(k, i, j)$  ja siirtymätodennäköisyyksien  $P_{ij}^k [D(k, i)]$  tulo on jo laskettu taulukon 21 mukaisina matriiseina. Näin ollen lausekkeen (33) soveltaminen edellyttää vain matriisitulojen  $L(k-1, j) \times P_{ij}^k [D(k, i)]$  laskemista ja sitten matriisien yhteenlaskua. Dynaamisen ohjelmoinnin periaatteen mukaisesti laskut aloitetaan tarkasteltavan jakson viimeisestä vaiheesta. Tässä sovellutuksessa se on aloitettu joulukuusta; ensimmäisessä vaiheessa huomioidaan joulukuun ohella marraskuu, seuraavassa vaiheessa myös

lokakuu jne. Tulomatriisista etsitään kunkin rivin (= kunkin altaan tilan) kohdalta se sarake (= juoksutus), jossa kokonaishaitta on pienin.

Koska matriisitulot on laskettu pöytälaskukoneella, ei algoritmia ole ollut mahdollista jatkaa niin pitkälle jaksolle, että minimihaittojen konvergenssistä voitaisiin olla varmoja. Konvergenssi saavutetaan usein riittävällä tarkkuudella 4-5 vuoden kuukausittaiset minimihaitat laskemalla (Su ja Deininger 1974). Tässä sovellutuksessa on laskettu 2 vuotta; tuloksista voidaan päätellä, että 1 ja 2 vuoden minimihaitat poikkeavat vielä varsin selvästi toisistaan, mutta sen sijaan molempien vuosien osalta päädyttäisiin lähes samanlaiseen juoksutusään- töön.

Peräkkäisten kuukausien vaikutuksen selvittämiseksi on taulukossa 22 esitetty matriisitulo  $L(k-1, j) \times P_{ij}^k [D(k, i)]$  toisen laskentavuoden syyskuulle ( $k = 9$ ). Jos juoksutus on  $2,0 \text{ m}^3/\text{s}$  ja alkutila on 1, on haittafunktion arvo 6,04. Taulukon 21 haittamatriisissa, jossa tarkasteltiin syyskuuta erillisenä, vastaava haittafunktion arvo oli 6,12. Näin ollen tapahtuman "alkutila 1, juoksutus  $2,0 \text{ m}^3/\text{s}$ " haitta on lähes samansuuruinen syyskuussa kuin tämän tapahtuman haittavaikutus seuraavina kuukausina. Jos sen sijaan alkutila on 6... 12, saa taulukon 21 mukaan haittafunktio arvon 0 syyskuulle, kun juoksutus on  $2,0 \text{ m}^3/\text{s}$ . Vastaavat haittafunktion arvot taulukosta 22 ovat 1,05-1,07; ne ilmoittavat siis syyskuun juoksutuspolitiikan aiheuttaman haittavaikutuksen seuraaville kuukausille.

Taulukko 22. Lausekkeen (33) matriisitulo  $L(k-1, j) \times P_{ij}^k [D(k, i)]$  syyskuulle ( $k=9$ ).  
 Table 22. The product of matrices  $L(k-1, j) \times P_{ij}^k [D(k, i)]$  of equation (33) for September ( $k = 9$ ).

Tila	Haitan suuruus juoksutuksella ( $\text{m}^3/\text{s}$ ) The value of loss with the draft ( $\text{m}^3/\text{s}$ )							
State	2	4	6	8	10	12	14	16
17	7,05	4,12	2,34	1,55	1,18	1,07	1,06	1,05
16	4,12	2,34	1,55	1,18	1,07	1,06	1,05	1,05
15	2,34	1,55	1,18	1,07	1,06	1,05	1,05	1,05
14	1,55	1,18	1,07	1,06	1,05	1,05	1,05	1,05
13	1,18	1,07	1,06	1,05	1,05	1,05	1,05	1,06
12	1,07	1,06	1,05	1,05	1,05	1,05	1,06	1,07
11	1,06	1,05	1,05	1,05	1,05	1,06	1,07	1,26
10	1,05	1,05	1,05	1,05	1,06	1,07	1,26	1,60
9	1,05	1,05	1,05	1,06	1,07	1,26	1,60	2,84
8	1,05	1,05	1,06	1,07	1,26	1,60	2,84	6,04
7	1,05	1,06	1,07	1,26	1,60	2,84	6,04	12,91
6	1,06	1,07	1,26	1,60	2,84	6,04	12,91	25,62
5	1,07	1,26	1,60	2,84	6,04	12,91	25,62	46,75
4	1,26	1,60	2,84	6,04	12,91	25,62	46,75	79,30
3	1,60	2,84	6,04	12,91	25,62	46,75	79,30	125,42
2	2,84	6,04	12,91	25,62	46,75	79,30	125,42	197,25
1	6,04	12,91	25,62	46,75	79,30	125,42	197,25	280,14

Palataan nyt lausekkeeseen (33) ja tarkastellaan sitä kokonaisuutena. Ensimmäinen matriisitulo lausekkeen oikealla puolella ilmaisee siis haittafunktion arvon kuukautena  $k$  ja toinen

matriisitulo hättävähäikutuksen seuraaville kuukausille. Paras juokutuspolitiikka kullakin altaan alkutilalla on se, joka minimoi näiden kahden hättähäfunktion summan. Tämä summa saadaan taulukoiden 21 ja 22 kaltaisten hättähämatrisien summana kullekin kuukaudelle.

Taulukossa 23 on esitetty kokonaishättähäfunktion syyskuulle. Jos vedenkorkeus syyskuun alussa on tiloissa 1...7, kokonaishättähän suuruus saavuttaa minimiarvon juoksutuksella  $2 \text{ m}^3/\text{s}$ . Jos ollaan tiloissa 8...10, on kokonaishättähä juoksutukseen  $4 \text{ m}^3/\text{s}$  samansuuruinen kuin juoksutettaessa  $2 \text{ m}^3/\text{s}$ . Vastaava vakiosuuruinen minimihättähä esiintyy tiloissa 11...16 suuremmilla juoksutuksilla. Tällöin on lopullisessa juoksutussääntöissä valittu pienin juoksutus-

Taulukko 23. Lausekkeen (33) mukainen kokonaishättähäfunktion syyskuulle.

Table 23. The total loss function of equation (33) for September.

Tila	Kokonaishättähän suuruus juoksutuksella ( $\text{m}^3/\text{s}$ )							
	The value of total loss with the draft ( $\text{m}^3/\text{s}$ )							
	2	4	6	8	10	12	14	16
17	15,82	7,68	3,53	1,83	1,21	1,07	1,06	1,05
16	7,68	3,53	1,83	1,21	1,07	1,06	1,05	1,05
15	3,53	1,83	1,21	1,07	1,06	1,05	1,05	1,05
14	1,83	1,21	1,07	1,06	1,05	1,05	1,05	1,05
13	1,21	1,07	1,06	1,05	1,05	1,05	1,05	1,06
12	1,07	1,06	1,05	1,05	1,05	1,05	1,06	1,08
11	1,06	1,05	1,05	1,05	1,05	1,06	1,08	1,36
10	1,05	1,05	1,05	1,05	1,06	1,08	1,36	2,09
9	1,05	1,05	1,05	1,06	1,08	1,36	2,09	4,71
8	1,05	1,05	1,06	1,08	1,36	2,09	4,71	12,16
7	1,05	1,06	1,08	1,36	2,09	4,71	12,16	29,60
6	1,06	1,08	1,36	2,09	4,71	12,16	29,60	63,82
5	1,08	1,36	2,09	4,71	12,16	29,60	63,82	122,60
4	1,36	2,09	4,71	12,16	29,60	63,82	122,60	214,33
3	2,09	4,71	12,16	29,60	63,82	122,60	214,33	347,69
2	4,71	12,16	29,60	63,82	122,60	214,33	347,69	540,65
1	12,16	29,60	63,82	122,60	214,33	347,69	540,65	782,36

vaihtoehto. Siten esim. syyskuun juoksutussääntö on seuraava:

- jos vedenkorkeus syyskuun alussa on tiloissa 1...10, juoksutetaan  $2 \text{ m}^3/\text{s}$
- jos vedenkorkeus syyskuun alussa on tilassa 11, juoksutetaan  $4 \text{ m}^3/\text{s}$ .
- jos vedenkorkeuden alkutila on suurempi kuin 11, kasvaa juoksutus aina yhdellä tilalla siten, että alkutilaa 17 vastaava juoksutus on  $16 \text{ m}^3/\text{s}$ .

Useimpina kuukausina ei samansuuruisia minimihättähäjä esiinny eri juoksutuksilla. Kaikkina kuukausina, joina niitä esiintyy, on noudatettu pienimmän juoksutusvaihtoehdon politiikkaa.

#### 5.4 TULOSTEN ARVIOINTIA

Dynaamisella ohjelmoinnilla määritetty Pyhäjärven juoksutussääntö on esitetty kaikille kuukausille kuvassa 23. Vaikka määrittymen menetelmän mukaan juoksutus voidaan päättää vain eri kuukausien alussa, on eri juoksutusvaihtoehtojen väliset rajaviivat piirretty jatkuviksi yhdistämällä samaa juoksutusta vastaavat tilat peräkkäisinä kuukausina. Tämä menettely on tarpeen, koska sen avulla vältetään suurilta siirtymiltä juoksutuksen valinnassa.

Kuvan 23 mukaan minimijuoksutusta  $2 \text{ m}^3/\text{s}$  noudatetaan tammikuun alussa, mikäli vedenkorkeus on alle tason  $N_{43} + 44,88 \text{ m}$ . Helmikuun alussa vastaava taso on  $N_{43} + 44,82 \text{ m}$  ja maaliskuun alussa  $N_{43} + 44,68 \text{ m}$ . Kesäkuukausina minimijuoksutusta vastaavan vedenkorkeuden yläraja laskee lähes tasaisesti kesäkuun alun arvosta  $N_{43} + 45,06 \text{ m}$  lokakuun alun arvoon  $N_{43} + 44,82 \text{ m}$ . Marraskuussa tämä taso jälleen kääntyy nousuun.

Juoksutusta  $16 \text{ m}^3/\text{s}$  ei ole tarpeen noudattaa kesä-elokuussa, vaikka vedenkorkeus oli ylimmässä sallitussa tilassa. Syyskuussa sitä on noudatettava, jos vedenkorkeuden alkutila on 17, loka-marraskuussa myös alkutiloilla 15 ja 16.

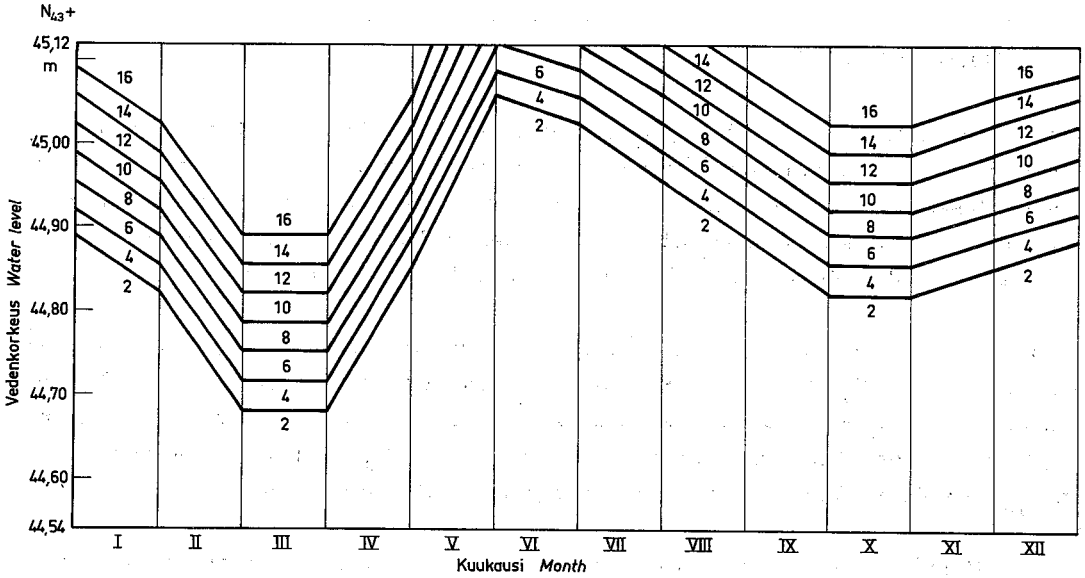
Jos tarkastellaan laaditun juoksutussäännön soveltamista käytäntöön, saadaan vuosilta 1971-74 kuvan 24 mukainen esitys. Yhtenäinen viiva kuvaa havaittua vedenkorkeuden kulkua ja katkoviiva vedenkorkeutta siinä tapauksessa, että juoksutus olisi hoidettu tässä tutkimuksessa laaditun juoksutussäännön avulla. Syksyllä 1971 ja talvella 1972 on oletettu noudatetun molemmissa tapauksissa todellista juoksutusta, vaikka se olikin pienempi kuin  $2 \text{ m}^3/\text{s}$ .

Kuva 24 paljastaa laaditun juoksutussäännön ilmeisen epäkohdan: se ei ota huomioon lumipeitteen vesiarvoa talvikauden juoksutusta valittaessa. Juoksutus määräytyy talvikautenakin yksinomaan altaan vedenkorkeuden tilan mukaan riippumatta siitä, kuinka suuri on lumipeitteen vesiarvo. Tämä puute aiheuttaa sen, ettei laadittua juoksutussääntöä ole lainkaan järkevää noudattaa talvikautena.

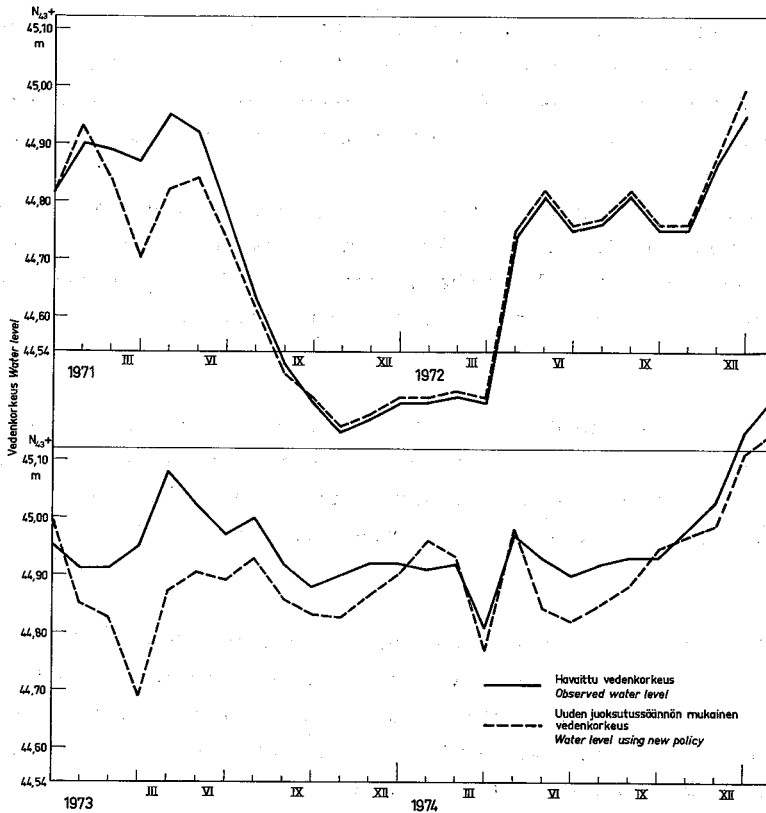
Juoksutussääntöä laadittaessa ei myöskään otettu huomioon peräkkäisten kuukausien nettotulovaluntojen mahdollista riippuvuutta. Kohdassa 3.61 tämä riippuvuus todettiin niin heikoksi, ettei siihen perustuen voi laatia kuukausittaisia nettotulovalunnan ennusteita. Jos riippuvuus olisi voimakkaampi, vähentäisi se laaditun juoksutussäännön käyttökelpoisuutta myös kesä- ja syksy aikana.

Su ja Deininger (1974) ovat määrittäneet juoksutussäännön dynaamista ohjelmointia käyttäen myös siinä tapauksessa, että peräkkäisten kuukausien tulovalunnat noudattavat ensimmäisen kertaluvun autoregressiivistä mallia. Tällöin yksinkertaisten siirtymämatriisien sijasta on eri kuukausille käytettävä mahdollisia siirtymämatriiseja, joissa edellisen kuukauden nettotulovalunta tai vedenkorkeuden muutos on otettu huomioon.

Yhteenvedon voidaan siis todeta, että tässä luvussa määritettyä Säkylän Pyhäjärven juoksutussääntöä voidaan käytännössä soveltaa vain kesä- ja syyskuukausina. Lumipeitteen vesi-



Kuva 23. Dynaamisella ohjelmoinnilla määritetty Pyhäjärven juoksuussääntö.  
 Fig.23. Operation rules for Lake Pyhäjärvi as determined by dynamic programming.



Kuva 24. Havaittu ja uuden juoksuussäännön mukainen vedenkorkeus Pyhäjärvellä 1971-74.  
 Fig.24. Observed water level and water level using new policy in Lake Pyhäjärvi in 1971-74.

arvon huomioonottaminen olisi oleellinen parannus laskentamenettelyssä talvi- ja kevät-kautta ajatellen.

## 6. NETTOTULOVALUNNAN ENNUSTAMINEN

### 6.1 SULAMISKAUSI

Kohdassa 3.6 tarkasteltiin Pyhäjärven nettotulovalunnan tilastollisia ominaisuuksia. Tällöin todettiin, että peräkkäisten kuukausien nettotulovalunnat korreloivat varsin heikosti, joskin eräiden kuukausiparien osalta korrelaatiokerroin poikkeama nolasta oli merkitsevä. Riippuvuus on kuitenkin niin heikko, ettei käytännössä ole mahdollista ennustaa seuraavan kuukauden nettotulovaluntaa autoregressivisellä mallilla. Kuvan 14 regressiosuora ja sen luotettavuusraajat osoittavat tämän selvästi elo-syyskuun osalta, vaikka näiden kuukausien nettotulovaluntojen korrelaatiokerroin poikkeaaakin merkitsevästi nolasta ( $r = 0,40$ ).

Lumipeitteeseen keräytyvä vesivarasto tarjoaa mahdollisuuden nettotulovalunnan arviointiin kevätsulamiskautena. Tulovalunta on tällöin vesitaseen merkittävin komponentti ja sen suuruuteen vaikuttaa merkitsevimmän lumipeitteen vesiarvo (Mustonen 1965).

Havaintojen puuttuessa ei Pyhäjärveen tulevalle sulamisvesivalunnalle voida laskea regressiomallia. Läheiselle Aurajoen vesistöille sellainen on kuitenkin hydrologian toimistossa laskettu aiempien Säskylän Pyhäjärveä koskevien selvitysten yhteydessä (Ehdotus Lounais-Suomen vedenhankintaratkaisuksi, 1973). Tämä malli on seuraava:

$$T_{16.3-31.5} = 0,71 (L_{16.3} + P_{16.3-31.5}) + 7,2 \quad (35)$$

$$T_{16.3-31.5} = \text{valunta } 16.3 - 31.5, \text{ mm}$$

$$P_{16.3-31.5} = \text{sadanta } 16.3 - 31.5, \text{ mm}$$

$$L_{16.3} = \text{lumipeitteen vesiarvo } 16.3, \text{ mm}$$

Mallin (35) kokonaiskorrelaatiokerroin on 0,90. Jos oletetaan sadanta- ja haihduntaolot 16.3. -31.5. Pyhäjärven alueella keskimääräisiksi ( $\bar{P} = 90 \text{ mm}$ ,  $\bar{E} = 58 \text{ mm}$ ), saadaan mallia (35) soveltamalla taulukon 24 mukainen ennuste Pyhäjärven vedenpinnan nousulle mainittuna aikavälinä. Taulukossa 24 on juoksumäärä oletettu nolaksi. Valunta Pyhäjärven valuma-alueelta on arvioitu yhtä suureksi kuin Aurajoen alueelta.

Taulukko 24. Pyhäjärven vedenpinnan nousu 16. 3. -31. 5. lumipeitteen vesiarvon (16. 3.) funktiona. Järven sadanta- ja haihduntaolot on oletettu keskimääräisiksi ja juoksutus nollassi.

Table 24. The increase in water level from March 16 to May 31 as a function of snow water equivalent on March 16. Precipitation into and evaporation from the lake is assumed to be normal and draft equal to zero.

$L_{16.3}$ (mm)	$T_{16.3-31.5}$ (mm)
20	287
40	329
60	371
80	414
100	456
120	498
140	541
160	583
180	626

Jos taulukon 24 luotettavuutta testataan vuosina 1971-73, saadaan seuraava tarkastelu:

Vuosi	$L_{16.3}$ (mm)	$\Delta W$ havaittu (mm)	$\Delta W$ arvioitu (mm)	Virhe (%)
1971	44	315	337	+7
72	65	464	382	-18
73	35	383	319	-17

Jos otetaan huomioon sadannan ja haihdunnan poikkeamat normaalista, pienenevät virheet vastaavasti arvoihin +1%, -8% ja -4%. Malli (35) tarjoaa siten melko käyttökelpoisen mahdollisuuden Pyhäjärven vedenkorkeuden muutoksen arviointiin, elleivät kevään sadanta- ja haihduntaolosuhteet poikkea huomattavasti normaalista. Tarkasteltuina keväänä lumipeitteen vesiarvo on ollut verrattain pieni. Ennusteen tarkkuudesta runsaslumisina keväänä ei voida näin ollen tehdä johtopäätöksiä.

Lyhytaikaisia kevättulvaennusteita varten on tutkittu Aurajoen Hypöistenkosken valunnan riippuvuutta sadannasta ja lämpötilasta. Tulvakaudet keväiltä 1949-70 on jaettu 5 vrk:n jaksoihin alkaen valunnan selvästä lisääntymisestä ja päättyen suurimman vuorokausivalunnan ajankohtaan tai sitä seuraaviin päiviin. Näiden 5 vrk:n jaksojen valuntasummat, sadannat, keskilämpötilat ja positiivisten vuorokausilämpötilojen summat on laskettu. Tuloksena on saatu seuraavat regressiomallit:

$$q = 0,718 q_{ed} + 0,287 P + 2,52 \bar{T} + 7,8 \quad (36)$$

$$q = 0,666 q_{ed} + 0,369 P + 0,717 \Sigma T^+ + 4,6 \quad (37)$$



$q = 5$  vrk:n valunta, mm

$q_{ed} =$  edellisen 5 vrk:n valunta, mm

$P = 5$  vrk:n sadanta, mm

$\bar{T} = 5$  vrk:n keskilämpötila, °C

$\Sigma T^+ = 5$  vrk:n positiivisten vuorokauskeskilämpötilojen summa, °C

Mallin (36) kokonaiskorrelaatiokerroin on 0,68 ja mallin(37) 0,70. Jäännösvirheiden hajonnat ovat vastaavasti 12,1 ja 11,8 mm. Kaikki 3 selittäjää ovat molemmissa malleissa merkitseviä.

Mallin (37) soveltuvuutta Pyhäjärven 5 vrk:n tulovalunnan ennustamiseen on tutkittu keväiden 1972-73 havaintoihin perustuen. Näiltä sulamiskausilta on virtaamahavaintoja sekä Yläneen-joesta että Pyhäjoesta, joten 5 vrk:n tulovalunnat on voitu laskea melko luotettavasti. Molempina keväinä on tarkasteltu 15 vrk:n pituista ylivaluntajaksoa.

Havaitut ja mallin (37) avulla lasketut Pyhäjärven tulovalunnat järven keskipinta-alaa kohti ilmaistuina olivat tässä vertailuaineistossa seuraavat:

Vuosi	jakso	$I_{hav}$ (mm)	$I_{lask}$ (mm)	Virhe (%)
1972	06. 4. -10. 4.	55	52	-5
	11. 4. -15. 4.	94	89	-5
	16. 4. -20. 4.	83	108	+30
1973	25. 3. -29. 3.	36	56	+60
	30. 3. -03. 4.	41	58	+42
	04. 4. -08. 4.	45	73	+62

Keväällä 1972 ennuste olisi siis ollut kohtalainen; koko 15 vrk:n ylivaluntajaksolla ennustusvirhe oli +7 %. Sen sijaan keväällä 1973 vastaava virhe oli +54 %. Mallia (37) ei näin ollen voida pitää kovin luotettavana Pyhäjärven tulovalunnan ennustamisessa.

On lisäksi huomattava, että mallin (37) soveltaminen edellyttää arviota viiden lähivuorokauden sademäärästä ja lämpötilasta. Ilmatieteen laitoksen 5 vrk:n sääennusteiden käyttökelpoisuutta tämän kaltaisissa malleissa olisi kuitenkin syytä tutkia.

## 6.2 KESÄ- JA SYYSKAUSI

Pyhäjärven säännöstelyn hoidon kannalta on tärkeä tietää, miten suuri nettotulovalunta voi olla lyhyenä aikavälinä, erityisesti sulamisaikana sekä kesä- ja syyskuukausina. Tämän selvittämiseksi on tutkittu 5 vuorokauden jaksoja huhti-marraskuilta 1938-73. Joka kuukauden osalta on etsitty se 5 vrk:n jakso, jolloin tulovalunnan ja sadannan summa on suurin. Koska haihdunta tällöin on sateiden takia ilmeisesti vähäisempää, on sen arvoksi otettu 50 % vastaavan kuukauden keskimääräisestä 5 vrk:n haihdunnasta. Näin arvioiduilla 5 vrk:n nettotulovalunnoille on tehty toistuvuusanalyysi, jonka tulokset on esitetty taulukossa 25.

Taulukko 25. Toistumisajat viiden vuorokauden suurimmalle nettotulovalunnalle Pyhäjärvellä huhti-marraskuussa.

Table 25. Recurrence intervals for the maximum net inflow of Lake Pyhäjärvi during five days in April -November.

Kuukausi Month	Suurin nettotulovalunta (mm) 5 vrk:n aikana toistumisajalla (v) Maximum net inflow during five days with a recurrence interval (y).			
	10	20	50	100
IV	170	200	240	270
V	135	190	220	240
VI	45	60	85	105
VII	65	90	135	160
VIII	85	115	150	175
IX	80	105	140	170
X	115	140	165	190
XI	120	145	180	205

Viiden vuorokauden nettotulovalunta on selvästi suurin sulamiskautena, siis huhti- ja touku-kuussa. Tällöin se ylittää keskimäärin kerran 20 vuodessa 200 mm ja on kerran 50 vuodessa lähes 250 mm. Koska maksimijuoksutus  $17 \text{ m}^3/\text{s}$  vastaa noin 50 mm suuruisia vedenpinnan laskua 5 vrk:n aikana, nousisi vedenpinta edellä mainituissa ääritilanteissa siten 150 ... 200 mm, vaikka juoksutus olisi suurin mahdollinen.

Kesäkuussa kerran 20 vuodessa toistuva 5 vrk:n nettotulovalunta on vain 60 mm ja heinäkuussa 90 mm. Elo- ja syyskuussa vastaavat arvot ovat 115 mm ja 105 mm. Loka-marraskuussa maankosteusvarastot ovat huomattavasti suuremmat kuin kesällä; koska silloin myös sataa runsaasti ja haihdunta on melko vähäistä, kasvavat 5 vrk:n nettotulovalunnan ääriarvot huomattavasti. Ne jäävät kuitenkin jonkin verran pienemmiksi kuin sulamiskautena.

Kun otetaan huomioon maksimijuoksutusta vastaava vedenpinnan alenema, voidaan siis todeta, että yli 10 cm suuruinen vedenpinnan nousu 5 vrk:n aikana esiintyy kesä-marraskuussa harvemmin kuin kerran 20 vuodessa. Heinä-syyskuussa sen toistumisaika on yli 50 v., kesäkuussa jopa yli 100 v.

Tarkastellaan seuraavassa vielä lyhyesti haihdunnan ja sadannan erotusta eri kuukausina. Taulukossa 26 on annettu tämän erotuksen keskiarvot sekä keskimäärin kerran 10, 20 ja 50 vuodessa toistuvat maksimit.

Kesä- ja heinäkuussa haihdunta on keskimäärin yli 40 mm sadantaa suurempi. Myös touko- ja elokuun haihdunta on jonkin verran suurempi kuin sadanta. Keskimäärin kerran 20 vuodessa heinäkuun haihdunta ylittää sadannan määrällä 168 mm ja kerran 50 vuodessa määrällä 208 mm. Muina kuukausina vastaavat arvot ovat selvästi pienemmät; kesä- ja elokuussa kuitenkin noin 120 ja 150 mm. Vielä lokakuussakin haihdunta saattaa kerran 50 vuodessa olla 50 mm sadantaa suurempi.

Taulukko 26. Haihdunnan ja sadannan erotus Pyhäjärvellä touko-marraskuussa sekä erotuksen maksimi- ja toistuvuus.

Table 26. The difference between monthly evaporation and precipitation of Lake Pyhäjärvi in May-November and the recurrence of the maximum of this difference.

Kuukausi Month	E - P (mm) E - P (mm)	(E - P):n maksimi (mm) toistumisajalla (v) Maximum of E-P (mm) with a recurrence interval (y)		
		10	20	50
V	5	43	59	79
VI	44	103	127	148
VII	44	132	168	208
VIII	15	90	119	158
IX	-1	47	67	93
X	-32	13	30	51
XI	-43	5	18	35

## 7. YHTEENVETO

1. Säskylän Pyhäjärvi on Lounais-Suomen merkittävin järviallas. Sen pinta-ala on keski-vedenkorkeudella  $154 \text{ km}^2$  ja tilavuus n.  $0,85 \text{ km}^3$ . Pyhäjärven valuma-alueen pinta-ala järven luusuassa on  $614 \text{ km}^2$ , joten järven ala on melko tarkoin neljännes koko valuma-alueesta.
2. Lounais-Suomen vedenhankintaa ajatellen Säskylän Pyhäjärvellä on keskeinen merkitys. Tavoitteeksi on asetettu, että Pyhäjärven vettä voidaan käyttää vedenhankintatarkoitukseen jatkuvasti vähintään  $2,0 \text{ m}^3/\text{s}$ . Tämä tavoite tulisi täyttää rikkomatta säännöstelyn alarajaa  $N_{43} + 44,54 \text{ m}$  tai ylärajaa  $N_{43} + 45,12 \text{ m}$ .
3. Säskylän Pyhäjärven nettotulovalunta on tässä tutkimuksessa määritetty kuukausittain jaksolle 1938-73. Nettotulovalunnalla tarkoitetaan tulovalunnan ja sadannan summaa. vähennettynä haihdunnalla, joka kesäkuukausina on Pyhäjärven vesitaseen kannalta hyvin keskeinen.
4. Pyhäjärven tulovalunnan määrityksessä on käytetty Aurajokea vertailuvesistöinä. Kuukausivirtaamien riippuvuuskäyriä (kuvat 5 ja 7) käyttäen on ensin määritetty Yläneenjoen ja Pyhäjoen kuukausivirtaamat ja niiden avulla edelleen Pyhäjärven tulovalunta pinta-alojen suhteessa. Keskiarvoksi Pyhäjärveä ympäröivältä valuma-alueelta jaksolla 1938-73 on saatu  $8,1 \text{ l/s km}^2$ . Tätä vastaava tulovalunnan vuosikeskiarvo järven keskipinta-alaa kohti on  $766 \text{ mm}$ . Huhtikuun tulovalunnan osuus tästä on  $31 \%$ . Kesä-elokuun yhteenlaskettu tulovalunta on alle  $8 \%$  koko vuoden tulovalunnasta.
5. Pyhäjärven pinnalle tulleen sadannan määrityksessä on käytetty 9 eri sadeasemaa. Havaitut sadannat on korjattu ja aluearvo on laskettu käyttäen Thiessenin monikulmiomenetelmää.

Vuosisadannaksi Pyhäjärven pinnalle on saatu tarkastellulla jaksolla 633 mm. Sadanta on suurin heinä-elokuussa, jolloin esiintyy rajuja kuurosateita. Eräinä vuosina kuukausi-sadanta on tällöin ylittänyt 200 mm.

6. Pyhäjärven pinnasta avovesikaudella tapahtuva haihdunta on määritetty aerodynaamista kaavaa (11) käyttäen:

$$E = (0,15 + 0,108 v_2) (e_0 - e_2) n \quad (11)$$

$E$  = haihdunta, mm/kk

$v_2$  = tuulen nopeus 2 m korkeudella, m/s

$e_0$  = kyllästetyn vesihöyryn paine vedenpinnan lämpötilassa, mb

$e_2$  = ilman vesihöyryn paine 2 m korkeudella, mb

$n$  = kuukauden päivien lukumäärä

Kaavan (11) soveltamisessa tarvittavat suureet on määritetty suoranaisten havaintojen puuttuessa erilaisia vertailumenetelmiä käyttäen.

Touko-marraskuun keskihaidunnaksi Pyhäjärven pinnasta tarkastelujaksolla on saatu 451 mm. Kun joului-huhtikuun haihdunnaksi on arvioitu 40 mm, on vuosihaidunnaksi saatu 491 mm. Erityisesti kesäkuukausina haihdunta on Pyhäjärven vesitaseen keskeinen komponentti. Kesäkuun keskihaidunta on 93 mm, heinäkuun 114 mm ja elokuun 98 mm. Keskimäärin kerran 10 vuodessa näiden kolmen kuukauden haihduntasumma ylittää 400 mm.

7. Pyhäjärven nettotulovalunnan vuosikeskiarvoksi tarkastelujaksolla on saatu 891 mm järven keskipinta-alaa kohti. Tämä vastaa keskimääräistä menovirtaamaa  $4,35 \text{ m}^3/\text{s}$ . Vaihtelu eri vuosina oli varsin suuri: keskimäärin kerran 20 vuodessa nettotulovalunta on suurempi kuin 1750 mm. Vastaavasti kerran 20 vuodessa nettotulovalunta alittaa arvon 230 mm. Alle  $2,0 \text{ m}^3/\text{s}$  nettotulovalunta toistuu keskimäärin kerran 8 vuodessa. Tarkastelujaksoon sisältyvä 4 vuoden pituinen kuivakausi 1939-42 on hyvin harvinainen: sen toistumisajaksi on saatu lähes 300 vuotta.
8. Lupaehtojen mukaisen säännöstelytilavuuden riittävyttä on tutkittu eri menetelmillä. Thomas-Fieringin algoritmilla saatujen tulosten mukaan tavoitejuoksumäärä  $2,0 \text{ m}^3/\text{s}$  olisi voimassaolevalla säännöstelytilavuudella jäänyt saavuttamatta vain neljänä kuukautena jakson 1938-73 aikana. Koska tämä algoritmi ei huomioi suurinta sallittua juoksumäärää  $17 \text{ m}^3/\text{s}$  eikä epävarmuutta seuraavan kuukauden nettotulovalunnan ennustamisessa, vajuuskuukausia olisi ollut käytännössä enemmän. Kuitenkin voidaan todeta, että voimassaolevat säännöstelyrajat ja tavoitejuoksumäärä  $2,0 \text{ m}^3/\text{s}$  ovat keskenään melko hyvin sopu-suhteissa. Säännöstelyrajojen lyhytaikaisilta rikkomisilta ei tavoitejuoksumäärän takaa-miseksi voida kuitenkaan kokonaan välttyä.
9. Juoksumääräsäännön määrittämiseksi on Pyhäjärven säännöstelytilavuus jaettu 17 yhtäsuu-reen luokkaan. Vastaavasti on juoksumäärä jaettu 8 luokkaan ( $2, 4, \dots, 16 \text{ m}^3/\text{s}$ ). Näitä

luokituksia käyttäen on laskettu kaikille kuukausille siirtymämatriisit, joiden perusteella voidaan arvioida todennäköisyys vedenkorkeuden siirtymiselle tilasta toiseen eri juoksu-  
sutuksilla. Juoksutussääntö on laskettu dynaamista ohjelmointia käyttäen. Tällöin on  
huomioitu epäedullisesti juoksutuspolitiikasta aiheutuva haitta tarkasteltavan kuukauden  
ohella myös seuraavina kuukausina. Näin määritetty juoksutussääntö on esitetty kuvassa  
23. Talvi- ja kevätkautena se ei ole käyttökelpoinen, koska laskentamenettelyssä ei ole  
lainkaan huomioitu lumipeitteen vesiarvoa. Sen sijaan kesä- ja syyskautena saatua juok-  
sutussääntöä voidaan pitää käytäntöön soveltavana.

10. Sulamiskaudelle on laskettu ennustemallit sekä koko sulamiskauden että 5 vuorokauden  
tulovalunnalle. Nämä regressiomallit ovat melko karkeita ja testitulokset osoittavat var-  
sinkin jälkimmäisen mallin heikoksi. Kuitenkin nämä mallit tarjoavat mahdollisuuden  
tulovalunnan likimääräiseen arviointiin sulamiskaudella.
11. Säännöstelyn tarkoituksenmukaista hoitoa ajatellen on arvioitu 5 vuorokauden suurimmat  
nettotulovalunnat huhti-marraskuulle. Huhti- ja toukokuussa 5 vuorokauden nettotuloval-  
lunta ylittää noin kerran 20 vuodessa 200 mm. Koska maksimijuoksutuksella  $17 \text{ m}^3/\text{s}$   
Pyhäjärven pinta pystyttäisiin alentamaan 5 vuorokaudessa 50 mm, olisi vedenpinnan  
nousu tällöin 150 mm. Kesä-syyskuussa 5 vuorokauden nettotulovalunta ylittää 150 mm  
harvemmin kuin kerran 50 vuodessa, loka- ja marraskuussa sen sijaan noin kerran 25  
vuodessa. Selvästi rajuinta vedenpinnan nousu on siis sulamiskautena.

## ENGLISH SUMMARY

## THE WATER BALANCE AND REGULATION OF LAKE PYHÄJÄRVI

*"Some day the value of cultivated land is sure to be so high that Lake Pyhäjärvi will be dried up; a crop will be cultivated where fish live at present."*

*This was written in the 1920s. The present generation does not agree; it is debating upon the regulation limits and highest possible target draft of Lake Pyhäjärvi, which is the most important lake in southwestern Finland. The area of the lake is 154 sq.km and its mean depth 5.5 m. The whole basin area is 614 sq.km; the area of the lake is thus about 25 % of the whole area. The map of the drainage area of Lake Pyhäjärvi is shown in Fig.1.*

*Lake Pyhäjärvi is situated in the sandstone area of Satakunta region. On the western shore there are many rapakivi outcrops and the southern part of the drainage area is composed of igneous rocks. Outcrops account for over 10 % in some parts of the drainage area.*

*The main soil types in the drainage area of Lake Pyhäjärvi are shown in Fig.3. Clay and sand-clay prevail in the southern part of the drainage area. In the northeastern part there are fine sand, sand and glaci-fluvial deposits. The absolute height is over 100 m only on some hills, although the general topography is rather varied (Fig.4).*

*The hydrometeorological observation network in the drainage area of Lake Pyhäjärvi is shown in Fig.5. The area is rather well equipped, but most observation series are still too short, only 2...3 years. Some precipitation stations have been in operation since the 1930s; outflow from the lake has been measured carefully since 1965. The water level of the lake is now registered with four limnigraphs during openwater periods.*

*The first main problem in this work has been the calculation of the water balance of Lake Pyhäjärvi. It has been considered that a time series of monthly net inflow should be at least 30 years long so that reliable conclusions could be drawn on the storage volume required for a certain target draft. The latter problem is of great importance in the second part of this study.*

The simple water balance equation of Lake Pyhäjärvi could be written

$$T_i = I_i + P_i - E_i \quad (1)$$

$T_i$  = net inflow, mm/mo

$I_i$  = runoff into the lake, mm/mo

$P_i$  = precipitation into the lake, mm/mo

$E_i$  = evaporation from the lake, mm/mo

Precipitation into the lake was calculated using 9 precipitation stations. Only one of them has been in operation on the whole observation period in this study. Other precipitation stations have observation periods with shorter lengths (table 2). The Thiessen polygonal method was used in the calculation of the precipitation into the lake; the monthly values thus obtained were corrected according to coefficients determined by Solantie and Helimäki (1975). - Monthly precipitation of Lake Pyhäjärvi in 1938-73 is given in table 3; the annual totals are also shown in this table. Some statistical parameters of monthly and annual precipitation are given in table 4.

The two largest rivers flowing into Lake Pyhäjärvi (the Yläneenjoki and Pyhäjoki rivers) have been equipped with measuring weirs and limnigraphs since 1971. Using the monthly inflow values during the period 1971-73, a comparison is made with the adjoining watershed, the Aurajoki river. The drainage area of the Aurajoki river at the Hypöistenkoski measuring site is 385 sq.km, while that of the Yläneenjoki river is 195 sq.km and that of the Pyhäjoki river 76 sq.km. Most physiographic factors of these three watersheds are rather uniform. The lake percentage is almost zero and the land use rather similar. The comparisons of monthly discharges are shown in figs. 6 and 7. The monthly discharges of the Yläneenjoki and Pyhäjoki rivers during 1938-70 are estimated according to these relationships. The total runoff into Lake Pyhäjärvi is calculated thereafter in proportion to the remaining drainage area. A correction is made because of differences in areal precipitation in the Aurajoki and Pyhäjärvi areas (fig.8).

Monthly runoff into Lake Pyhäjärvi (in mm per mean area of the lake) is shown in table 5. Some statistical parameters of monthly and annual runoff are presented in table 6. The snowmelt runoff in April constitutes on average 31 % of the total annual runoff. The first autocorrelation coefficient of monthly runoff is rather small throughout the year, particularly in the winter and spring.

The estimation of lake evaporation was a rather difficult task. Various possible methods and former studies are widely discussed, because evaporation the predominant component of the water balance of Lake Pyhäjärvi in the summer.

Hyvärinen, Järvinen and Tuominen (1973) used three different methods to estimate evaporation from Lake Pyhäjärvi: the water balance method, aerodynamic method and evaporimeters. Of these methods, the aerodynamic method was selected in this study because the lack of observations hinders the use of the other two methods. Thus monthly evaporation is calculated with the formula

$$E = n(0.15 + 0.108 v_2) (e_0 - e_2) \quad (11)$$

$E$  = evaporation from the lake, mm/mo

$n$  = number of days in a month

$v_2$  = wind velocity at a height of 2 m, m/s

$e_0$  = water vapour pressure, mb, computed from the surface water temperature

$e_2$  = water vapour pressure, mb, above the lake surface at a height of 2 m

Because of the lack of direct observations, comparisons have been made in order to estimate values of  $v_2$ ,  $e_0$  and  $e_2$  for each month. These comparisons are presented in tables 8, 9 and 10 and in figs. 9 and 10, and are based on observations made at Lake Pyhäjärvi in 1971-73. Correction factors are formulated according to the results of comparisons.

The monthly evaporation of Lake Pyhäjärvi in 1938-73 is presented in table 11. The mean annual evaporation is 491 mm. Especially in summer, evaporation is the predominant component of the water balance of the lake; thus the mean evaporation in July is 114 mm. Some statistical parameters of monthly and annual evaporation of Lake Pyhäjärvi are given in table 12.

On the basis of observed outflow and water level changes, the errors in the water balance calculations made can be estimated for the period 1965-73. This error analysis is shown in fig. 12 and in table 13. No serious errors can be detected; the mean error of the annual water balance calculation is 34 mm and its standard deviation is 90 mm.

In fig. 13, monthly means of the components of net inflow of Lake Pyhäjärvi are shown. Net inflow here means the sum of runoff and precipitation less evaporation, as expressed in mm per mean area of the lake. Monthly and annual net inflow values in 1938-73 are given in table 14, and some statistical parameters of net inflow in table 15.

Probability distributions of monthly and annual net inflows are studied thereafter. Some examples of these distributions are shown in figs. 15, 16 and 17. Percentage values of the distributions of net inflow are estimated according to these figures; they are presented in table 16.

The annual mean net inflow of Lake Pyhäjärvi in 1938-73 was 891 mm per mean area of the lake. The corresponding outflow was  $4.35 \text{ m}^3/\text{s}$ . The coeffi-



cient of variation of annual net inflow was 0.47 and the coefficient of skewness 0.57. The autocorrelation function of annual net inflow is shown in fig.19; its 5 % tolerance limits are also shown. The recurrence intervals of annual net inflow are presented in Fig.18.

Various opportunities for determining the storage-yield relationship are discussed thereafter. Deterministic, stochastic and semistochastic methods are outlined. Dependability indices are represented according to Klemes (1974). A detailed description of the Thomas-Fiering algorithm is also represented. This algorithm is used thereafter to determine total water deficiency as a function of storage volume and target draft in the period 1938-73 (table 18). The required storage of Lake Pyhäjärvi for different target drafts is shown in fig.22.

According to the results obtained, there is a rather good correspondence between the largest regulated storage allowed, 580 mm, and the target draft  $2.0 \text{ m}^3/\text{s}$ .

Dynamic programming was used in order to determine optimal release policy. The storage volume is first divided into 17 possible states, each corresponding to a water level change of 34 mm. Thereafter transition probabilities of water levels are estimated for 8 possible releases (2, 4, ...,  $16 \text{ m}^3/\text{s}$ ). An example of these transition probability matrixes is shown in table 20. A cubic loss function according to Bogardi and Nagy (1973) is used to estimate losses caused by transition to non-allowed state of storage. A loss matrix is then calculated for each month (table 21). A recursive functional equation of dynamic programming is used 24 times thereafter and optimal releases as a function of water level are obtained (Fig.23). The policies obtained for the summer and autumn months are somewhat better than the existing policies (Fig.24). In the winter and spring months, another state variable, the water equivalent of the snow cover, should be used. Instead, conditional probability matrixes and autoregressive models for the prediction of net inflow may be only negligible use because of poor autocorrelation coefficients of net inflow.

In order to predict inflow into Lake Pyhäjärvi during the snowmelt period, regression models are used for inflows of 5 days and the whole snowmelt period. The multiple correlation coefficients of these models are 0.70 and 0.90, respectively. In table 24, the increase in water level during the snowmelt period as a function of the snow-water equivalent is presented according to the regression model.

In the summer and autumn, heavy rainfall sometimes causes a sudden rise in the water level. This is a problem because of the small regulation interval. Recurrence intervals for the maximum net inflow for 5 days are shown in table 25. When outflow is the largest allowable ( $16 \text{ m}^3/\text{s}$ ), the water level can be lowered by 50 mm for five days. Thus a rise in water level larger than 100 mm in 5 days is rather rare except during snowmelt periods.

## KÄYTETYT SYMBOLIT

Seuraavaan luetteloon on kerätty useimmat tekstissä käytetyt symbolit. Niiden merkitys on pyritty selittämään lyhyesti; eri tekstikohdissa symbolien käytössä voi esiintyä pieniä vivahte-eroja, jotka eivät selityksestä ilmene.

Symboli	Merkitys
$c_s$	vinous
$c_v$	vaihtelukerroin
D	tavoitejuoksutus
E	haihdunta
e	vesihöyrynpaine
F	valuma-alueen ala
$F_1$	järven pinta-ala
$f(v)$	tuulen nopeuden funktio
I	tulovalunta
K	tuulen nopeuksien suhde
$L^k(0, i)$	haittafunktio
n	lukumäärä
O	menovalunta
P	sadanta
$P_{ij}$	siirtymätodennäköisyys
p	todennäköisyys
r	korrelaatiokerroin
S	altaan vesivarasto
s	keskihajonta
T	nettotulovalunta
T	toistumisaika
T	lämpötila
v	tuulen nopeus
Z	luotettavuusindeksi

## LIST OF SYMBOLS

Most of the symbols used in the text and formulas are explained in the following list of symbols. In many formulas, some symbols are indexed; for simplicity, these indices are not shown in the list.

$c_s$	coefficient of skewness
$c_v$	coefficient of variation
D	target draft
E	evaporation
e	vapour pressure
F	area of a drainage basin
$F_l$	area of a lake
$f(v)$	function of wind velocity
I	inflow
K	ratio of wind velocities
$L^k(0,i)$	loss function
n	number of months (years)
O	outflow
P	precipitation
$P_{ij}$	transition probability
p	probability
r	correlation coefficient
S	storage volume
s	standard deviation
T	net inflow
T	recurrence interval
T	temperature
v	wind velocity
Z	dependability

## KIRJALLISUUTTA

- Ahti, K. 1972. Hiushygrometri- ja psykrometrihavaintojen mittausvirheet. Ilmatieteen laitoksen tutkimusseloste 39.
- Antal, E., Baranyi, S. and Tóth, E. 1973. Comparison of calculation methods for evaporation using Lake Balaton as an example. Proceedings of the Helsinki symposium, July 1973. IAHS Publication no. 109.
- Bellman, R. 1957. Dynamic programming. Princeton, New Jersey.
- Bogardi, I. and Nagy, B. 1973. Optimum water level regulation of Lake Balaton. Proceedings of the Helsinki symposium July 1973. IAHS Publication no. 109.
- Buras, N. 1972. Scientific allocation of water resources. American Elsevier. New York.
- Castren, V. 1961. Vesistöjen säännöstelyn tekniikka. TKK, moniste n:o 168. Helsinki.
- Ehdotus Lounais-Suomen vedenhankintaratkaisuksi. 1973. Lounais-Suomen vedenhankintatoimikunta. 1973.
- Elomaa, E. 1974. Paikallisilmastollisia tutkimuksia Pääjärven vesistöalueella vv. 1969 ja 1970. Lisensiaattityö, Helsingin yliopiston maatiieteen laitos. Helsinki.
- Fiering, M. 1967. Streamflow synthesis. Harvard University Press, Cambridge. Massachusetts.
- Fiering, M. and Jackson, B. 1971. Synthetic streamflows. American Geophysical Union, Water Resources nomograph no. 1.
- Hall, W. and Dracup, J. 1970. Water resources systems engineering. McGraw and Hill. New York.
- Harbeck, G. 1962. A practical field technique for measuring reservoir evaporation utilizing mass-transfer theory. US Geol. Survey, Prof. Paper 272 E.
- Hurst, H. 1951. Long-term storage capacities of reservoirs. Am. Soc. Civil Engineers, Trans., vol. 116.
- Hyvärinen, V., Järvinen, J. and Tuominen, T. 1973. Water balance of Lakes Pyhäjärvi and Pääjärvi. Proceedings of the Helsinki symposium, July 1973. IAHS Publication no. 109.
- Kaitera, P. and Teräsvirta, H. 1972. Snow evaporation in South and North Finland, 1969/70 and 1970/71. Aqua Fennica.
- Keijman, J. and Koopmans, R. 1973. A comparison of several methods of estimating the evaporation of Lake Flevo. Proceedings of the Helsinki symposium, July 1973. IAHS Publication no. 109.
- Kirilova, T., Ogneva, T. and Nesina, L. 1973. Determination of evaporation from lake and reservoir surfaces using the heat balance method. Proceedings of the Helsinki symposium, July 1973. IAHS Publication no. 109.
- Klemes, V. 1974. Applications of hydrology to water resources management, WMO, Operational hydrology, Report no. 4.
- Koivisto, O. 1962. Euran, Honkilahten ja Kiukaisten historia, osa II. Vammalan kirjapaino Oy. Vammala.

- Kullus, L.-P. 1973. Water balance of Lake Peipsi-Pihkva. Proceedings of the Helsinki symposium, July 1973. IAHS Publication no. 109.
- Laitakari, A. 1925. Onko Säkylän Pyhäjärven kuivaus mahdollinen? Teknillinen Aikakauslehti.
- Laitakari, I. 1953. Geomorfologisia tutkimuksia Eurajoen sadealueella. Pro gradu-työ, Helsingin yliopiston maantieteen laitos.
- Lemmelä, R. and Kuusisto, E. 1974. Evaporation-condensation and snowmelt measurements in Finland. Nordic Hydrology No. 5.
- Lounais-Suomen vedenhankinnan yleissuunnitelma 1969. Tie- ja vesirakennushallitus, Helsinki.
- Mejia, J., Egli, P. and Leclerc, A. 1974. Evaluating multireservoir operating rules. Water Resources Research, vol 10, no. 6.
- Millan, J. and Yevjevich, V. 1971. Probabilities of observed droughts. Colorado State University, Hydrology papers no. 50.
- Moran, P. 1959. The theory of storage. Methuen. London.
- Mussaari, I. 1974. Maatilatalous vesistöjen kuormittajana Lounais-Suomessa. Diplomityö. TKK. Otaniemi.
- Mustonen, S. 1965. Meteorologisten ja aluetekijöiden vaikutuksesta valuntaan. Maa- ja vesiteknillisiä tutkimuksia 12. Helsinki.
- Mäkelä, M. 1971. Tuulihavainnoista ja ennustuksista Saimaan vesistöalueella vuonna 1967. Ilmatieteen laitos, tutkimuslause N:o 33.
- Neuwirth, F. 1973. Experiences with evaporation pans at a shallow steppe-lake in Austria. Proceedings of the Helsinki symposium, July 1973. IAHS Publication no. 109.
- Palo, V. 1968. Alivirtaamista Lounais-Suomessa. Diplomityö. Teknillinen korkeakoulu. Otaniemi.
- Richter, D. 1973. A comparison of various methods used for the determination of evaporation from free water surfaces. Proceedings of the Helsinki symposium, July 1973. IAHS Publication no. 109.
- Rohde, A. 1973. Evaporation from Lake Velen estimated from the energy budget. Proceedings of the Helsinki symposium, July 1973. IAHS Publication no. 109.
- Salaz-la Cruz, J. 1972. Range analysis for storage problems of periodicstochastic processes. Colorado State University. Hydrology paper no. 57.
- Seppänen, R. 1974. Yhteistyön tulos: ehdotus Lounais-Suomen vedenhankintaratkaisuksi. Vesitalous n:o 6.
- Shuljakovski, L. 1969. Formula for computing evaporation with allowance for the temperature of the free water surface. Soviet Hydrology: Selected Papers Issue no. 6.
- Solantie, R. 1973. Evaporation from the lakes in Finland. Proceedings of the Helsinki symposium, July 1973. IAHS Publication no. 109.
- Solantie, R ja Helimäki, U.I. 1975. Korjatut sadanta- ja haihdunta-arvot Suomessa. Julkaisematon.
- Su, S. and Deininger, R. 1974. Modeling the regulation of Lake Superior under uncertainty of future water supplies. Water Resources Research, vol. 10, no. 1.

- Szesztay, K. 1967. Some problems of lake hydrology. Research institute for water resources development. Publications in foreign languages No. 3. Budapest.
- Szumiek, M. 1973. Evaporation from small water reservoirs. Proceedings of the Helsinki symposium, July 1973. IAHS Publication no. 109.
- Toimitusmiesten lausunto Säkylän Pyhäjärven säännöstelystä. 1974.
- Vikulina, Z. 1973. Evaluation of the Penman method for the computation of evaporation from water bodies using observed data. Proceedings of the Helsinki symposium, July 1973. IAHS Publication no. 109.
- Virta, J. 1971. Water and energy budgets of the Lake Pääjärvi particularly for the determination of evaporation. Finnish IHD Report No. 1.
- Ward, R. 1967. Principles of Hydrology. McGraw-Hill. London.
- Yevjevich, V. 1965. The application of surplus, deficit and range in hydrology. Colorado State University. Hydrology paper no. 10.