

ACTA UNIVERSITATIS OULUENSIS

SERIES C TECHNICA No. 20

ARTES CONSTRUCTIONUM No. 6

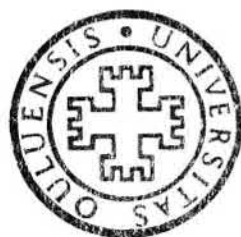
MAA-ALUEELTA TAPAHTUVAN HAIHDUNNAN ARVIOINNISTA

ON THE ESTIMATION OF EVAPOTRANSPIRATION

(Summary, figure and table captions in English)

PERTTI VAKKILAINEN

*Vesirakennustekniikan laitos  
Oulun yliopisto*



OULU 1982 • OULUN YLIOPISTO

**Editor in chief:** Professor SAKARI PIHA, Ph.D.

Address: University of Oulu  
90100 Oulu 10, FINLAND

**Series editors:**

Series A: Scientiae Rerum Naturalium: Professor Sakari Piha

Series B: Humaniora: Professor Juha Manninen

Series C: Technica: Professor Matti Karras

Series D: Medica: Professor Leo Hirvonen

Series E: Scientiae Rerum Socialium: Associate Professor Leena Syrjälä

ACTA UNIVERSITATIS OULUENSIS

SERIES C TECHNICA No. 20

ARTES CONSTRUCTIONUM No. 6

# MAA-ALUEELTA TAPAHTUVAN HAIHDUNNAN ARVIOINNISTA

ON THE ESTIMATION OF EVAPOTRANSPIRATION

(Summary, figure and table captions in English)

PERTTI VAKKILAINEN

*Vesirakennustekniikan laitos  
Oulun yliopisto*

Esitetään Oulun yliopiston teknillisen tiedekunnan suostumuksella julkisesti tarkastettavaksi Oulun yliopiston luentosalissa L 10 Linnanmaalla helmikuun 12. päivänä 1982 klo 12.



OULU 1982 • OULUN YLIOPISTO

## ERRATA

$s_0$  kuvissa 11, 13, 15, 16 ja 18 ei ole standardipoikkeama, vaan kaavan (40) mukainen hyvyyskriteeri.

$s_0$  in Figs. 11, 13, 15, 16, and 18 is not standard deviation. It has been calculated using Eq. (40).

Pintavastuksen  $r_s$  yksikkö  $s.cm^{-1}$  luvuissa 7, 8 ja 9 on virheellinen. Esitetyt lukuarvot ovat yksikössä  $s.m^{-1}$ .

The unit of surface resistance  $r_s$  is incorrect in Chapters 7, 8, 9, and in the English Summary. It has been presented in units  $s.cm^{-1}$ , it should be  $s.m^{-1}$ .

Copyright © 1982

Acta Univ. Oul. C 20. 1981. Artes Constr. 6.

Manuscript received 10 December 1981

Accepted 15 December 1981

Communicated by

Docent ESKO ELOMAA

Doctor S. PRIHA

ISBN 951-42-1207-X

ISSN 0355-3213

OULUN YLIOPISTO

Offset

OULU 1982



ACTA UNIVERSITATIS OULUENSIS

SERIES C TECHNICA No. 20

ARTES CONSTRUCTIONUM No. 6

# MAA-ALUEELTA TAPAHTUVAN HAIHDUNNAN ARVIOINNISTA

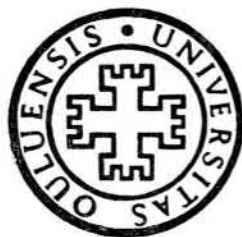
ON THE ESTIMATION OF EVAPOTRANSPIRATION

(Summary, figure and table captions in English)

PERTTI VAKKILAINEN

*Vesirakennustekniikan laitos  
Oulun yliopisto*

Esitetään Oulun yliopiston teknillisen tiedekunnan suostumuksella julkisesti tarkastettavaksi Oulun yliopiston luentosalissa L 10 Linnanmaalla helmikuun 12. päivänä 1982 klo 12.



OULU 1982 • OULUN YLIOPISTO





**VAKKILAINEN, PERTTI, On the estimation of evapotranspiration**

Department of Hydraulic Engineering, University of Oulu, Oulu, Finland

*Acta Univ. Oul. C 20.1981. Artes Constr. 6*

Oulu, Finland

(Received December 10th, 1981)

*Abstract*

The study deals with the possibilities to determine potential and actual evapotranspiration for the conditions prevailing in Southern Finland. The data have been collected at the lysimeter field of the Helsinki University of Technology during the years 1972 through 1980.

It has been shown that the ratio of measured over calculated potential evapotranspiration values depends on time of the day. Potential evapotranspiration can be determined with greater accuracy, if this dependence is taken into account. Of the ten well known methods included in the comparison, the Turc method proved to be the best. Pan evaporations yielded relatively poor estimates for potential evapotranspiration.

The actual evapotranspiration has been analyzed using the simulation model developed by the author that describes water flow in the soil-plant-atmosphere system. In the model the actual evapotranspiration can be calculated using the extended Penman method. The calculation of soil moisture flow is based on the numerical solutions of the Darcy equation and the continuity equation. The parameters describing grass cover have been depth of water uptake, surface resistance and crop height. The model was used to calculate the energy balance of the soil surface and the values of surface resistance for each of the calculation periods.

*Key words:* hydrometeorology, evaporation, soil water, thermal properties, numerical methods



VAKKILAINEN, PERTTI, Maa-alueelta tapahtuvan haihdunnan arvioinnista

Vesirakennustekniikan laitos, Oulun yliopisto, Oulu

*Acta Univ. Oul. C 20.1981. Artes Constr. 6*

Oulu

(Käsikirjoitus vastaanotettu joulukuun 10. pnä 1981)

### *Tiivistelmä*

Tutkimuksessa on tarkasteltu potentiaalisen ja todellisen haihdunnan määrittämismahdollisuuksia Etelä-Suomen olosuhteissa. Tutkimusaineisto on koottu Helsingin teknillisen korkeakoulun lysimetrikentältä vuosina 1972–80.

Mitattujen ja laskettujen potentiaalisten haihduntojen suhteen on todettu riippuvan ajankohdasta. Riippuvuuden huomioonottaminen parantaa haihdunnan määritystarkkuutta. Vertailussa mukana olleista kymmenestä menetelmästä on parhaimmaksi osoittautunut Turcin menetelmä. Astiahaihduntojen avulla potentiaalinen evapotranspiraatio on määritettävissä verraten heikosti.

Todellista haihduntaa on analysoitu kehitetyn maa-kasvi-ilmakehäyhteyttä kuvaavan simulointimallin avulla. Mallissa haihdunta lasketaan Penmanin laajennetulla menetelmällä, maankosteus Darcyn yhtälön ja jatkuvuusyhtälön avulla ja kasvustoa kuvaavina parametreina käytetään kasvuston korkeutta, juurten vedenottosyvyyttä ja pintavastusta. Mallin avulla on määritetty maanpinnan energiatase ja pintavastuksen suuruus laskentajaksoittain.

*Avainsanat:* hydrometeorologia, haihdunta, maavedet, lämpöominaisuudet, numeeriset menetelmät



## ESIPUHE

Käsillä oleva tutkimus on vaatinut valmistuakseen verrattain pitkän ajan, sillä se on aloitettu vuonna 1976. Tutkimuksen edistymisen hitaus selittyy osaltaan muiden tehtävieni vaatimalla ajalla. Pääasiallisin syy viivästy miseen on kuitenkin ollut, että olen joutunut täydentämään havaintoja kesien 1977-80 aikana, ennenkuin olen katsonut aineiston riittävän asetettujen ongelmien ratkaisemiseen.

Useat henkilöt ovat auttaneet ja tukeneet minua tätä tutkielmaa valmistellessani. Toimitusjohtaja Juhani Saavalaisen antaman jatkuvan kannustuksen merkitystä en voi yliarvioida. Käymiemme lukuisten keskustelujen aikana hän on painottanut tämänlaatuisen tutkimuksen tarpeellisuutta ja luonut näin motivaation, joka on ollut tutkimustyön välttämätön edellytys. Tekniikan lisensiaatti Matti Heikkilä on avustanut minua esiintulleiden matemaattisten ongelmien ratkaisemisessa ja esittänyt työn eri vaiheissa rakentavaa kritiikkiä. Diplomi-insinööri Tuomo Karvonen on saattanut maa-kasvi-ilmakehät yhteyden kuvauksen tietokoneohjelman muotoon ja huolehtinut tietokoneajoista.

Professori Henrik Ryti on opastanut minua aineen- ja lämmönsiirtoon liittyvissä kysymyksissä ja diplomi-insinööri Kari Saviharju on antanut maan lämmönvaihtoa koskevia arvokkaita neuvoja. Professori Olavi Nevanlinnan kanssa olen saanut keskustella numeeristen ratkaisumenetelmien tarjoamista mahdollisuuksista. Vaikkakaan professori Pentti Kaitera ei ole suoranaisesti puuttunut tutkimusaiheen käsittelyyn, hänen vaikutustaan tutkimuksessa käytettyyn tarkastelutapaan en voi kieltää. Tutkimustyön aikana olen pyrkinyt pitäytymään hänen antamassaan yleisohjeessa, jonka mukaan vain fyysikaalisesti perusteltu lähestymistapa vie hydrologiassa kestäviin tuloksiin.

Työn viimeistelyn olen voinut suorittaa Alankomaiden valtion apurahan turvin Kulttuuritekniikan ja vesitalouden tutkimuslaitoksessa (ICW) Wageningenissa. Siellä minua ovat monin tavoin auttaneet tohtorit R.A. Feddes, M. Menenti ja P.E. Rijtema sekä diplomi-insinöörit G.V. Bloemen ja E.W. Schierbeek.

TKK:n vesitalouden laboratorion henkilökunta on diplomi-insinööri Alpo Maasillan johdolla huolehtinut kanssani havaintojen ja mittausten suorittamisesta. Diplomi-insinöörit Erkki A. Järvinen ja Pentti Hakkarainen ovat aineistoa esikäsittelemällä merkittävästi vähentäneet työmäärääni. Tekniikan ylioppilaat Markku Järvinen ja Juhani Heino ovat saattaneet automaattisen mittaustalteen avulla kootut havainnot käsiteltävään muotoon.

Konekirjoituksesta on huolehtinut kanslisti Helena Paaso. Diplomi-insinööri Tarja Pyykön apuun olen voinut tukeutua englanninkielisten tekstien laadinnassa. Diplomi-insinööri Raimo Ronkainen on avustanut minua työn oikoluku- ja toimitustyössä.

Maa- ja Vesitekniikan Tuki ry on tukenut tutkimusta taloudellisesti.

Kiitän saamastani avusta.



## MERKINNÄT

|  |  |
|--|--|
| A  | Kerroin  |
| B  | Kerroin  |
| C  | Differentiaalinen vesikapasiteetti ( $\text{m}^{-1}$ )                                       |
| C  | Ilman lämmittämiseen kuluva energia ( $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ )                         |
| C  | Maan lämpökapasiteetti ( $\text{J}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{K}^{-1}$ )                    |
| $E_{\text{And}}$                           | Haihdunta Anderssonin evaporimetristä (mm)   |
| $E_{\text{ClassA}}$                        | Haihdunta Class A-astiasta (mm)  |
| $E_{\text{GGI}}$                           | Haihdunta GGI-3000-astiasta (mm)   |
| $I_{\text{L}}$                             | Haihdunta järvestä (mm)  |
| $E_0$                                      | Haihdunta veden pinnasta (mm)  |
| $E_{\text{P}}$                             | Potentiaalinen evapotranspiraatio (mm)   |
| F  | Suhteellinen kosteus (%)   |
| G  | Maahan menevä energia ( $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ )                                       |
| H  | Hydraulinen korkeus (cm)   |
| K  | Hydraulinen johtavuus ( $\text{cm}\cdot\text{d}^{-1}$ )                                      |
| $K_{\text{M}}, K_{\text{H}}, K_{\text{V}}$ | Liikemäärän, lämmön ja vesihöyryn siirtokertoimet ilmassa ( $\text{m}^2\cdot\text{s}^{-1}$ ) |
| $K_{\text{S}}$                             | Kyllästyneen maan hydraulinen johtavuus ( $\text{cm}\cdot\text{d}^{-1}$ )                    |
| $K_{\text{e}}$                             | Tehokas hydraulinen johtavuus ( $\text{cm}\cdot\text{d}^{-1}$ )                              |
| L  | Monin-Obukhov pituus (m)   |
| L  | Juuriston pituus ( $\text{cm}\cdot\text{cm}^{-1}$ )  |
| L  | Veden höyrystymislämpö ( $\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1}$ )                                    |
| LE   | Haihduntaan kuluva energia ( $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ )                                  |
| M  | Kasvin elintoimintoihin kuluva energia ( $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ )                      |
| $M_{\text{d}}$                             | Raekoostumuksen mediaaniarvo ( $\mu\text{m}$ )   |
| N  | Mahdollisten aurinkotuntien määrä (h)  |
| P  | Kumuloituva raekoostumusprosentti (%)  |
| P  | Sadanta (mm)   |
| PET  | Potentiaalinen evapotraspiraatio (mm)  |
| $R_{\text{A}}$                             | Teoreettinen tulosäteily ( $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ )                                    |
| $R_{\text{n}}$                             | Nettosäteily ( $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ )  |
| $R_{\text{p}}$                             | Virtausvastus kasvissa (d)   |
| $R_{\text{s}}$                             | Tulosäteily ( $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ )   |
| $R_{\text{s}}$                             | Virtausvastus maassa (d)   |
| $S_{\text{i}}$                             | Raekoostumuksen luokkaväli ( $\mu\text{m}$ )   |

## SYMBOLS

|   |
|---|
| <i>Coefficient</i>  |
| <i>Coefficient</i>  |
| <i>Differential water capacity (<math>\text{m}^{-1}</math>)</i>   |
| <i>Sensible heat (<math>\text{W}\cdot\text{m}^{-2}</math>)</i>  |
| <i>Heat capacity of soil (<math>\text{J}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{K}^{-1}</math>)</i>                                |
| <i>Evaporation from Andersson's evaporimeter (mm)</i>   |
| <i>Evaporation from Class A-pan (mm)</i>  |
| <i>Evaporation from GGI-3000 (mm)</i>   |
| <i>Lake evaporation (mm)</i>  |
| <i>Open water evaporation (mm)</i>  |
| <i>Potential evapotranspiration (mm)</i>  |
| <i>Relative humidity (%)</i>  |
| <i>Heat flux into the soil (<math>\text{W}\cdot\text{m}^{-2}</math>)</i>  |
| <i>Hydraulic head (cm)</i>  |
| <i>Hydraulic conductivity (<math>\text{cm}\cdot\text{d}^{-1}</math>)</i>  |
| <i>Transfer coefficients for momentum, heat and water vapour in the air (<math>\text{m}^2\cdot\text{s}^{-1}</math>)</i> |
| <i>Saturated hydraulic conductivity (<math>\text{cm}\cdot\text{d}^{-1}</math>)</i>                                      |
| <i>Effective hydraulic conductivity (<math>\text{cm}\cdot\text{d}^{-1}</math>)</i>                                      |
| <i>Monin-Obukhov length (m)</i>   |
| <i>Length of roots (<math>\text{cm}\cdot\text{cm}^{-3}</math>)</i>  |
| <i>Latent heat of vaporisation of water (<math>\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1}</math>)</i>                                 |
| <i>Latent heat (<math>\text{W}\cdot\text{m}^{-2}</math>)</i>  |
| <i>Energy for plant growth (<math>\text{W}\cdot\text{m}^{-2}</math>)</i>  |
| <i>Median grain size (<math>\mu\text{m}</math>)</i>   |
| <i>Possible sunshine hours (h)</i>  |
| <i>Cumulative grain size percentage (%)</i>   |
| <i>Precipitation (mm)</i>   |
| <i>Potential evapotranspiration (mm)</i>  |
| <i>Theoretical incoming radiation (<math>\text{W}\cdot\text{m}^{-2}</math>)</i>   |
| <i>Net radiation (<math>\text{W}\cdot\text{m}^{-2}</math>)</i>  |
| <i>Plant resistance (d)</i>   |
| <i>Incoming radiation (<math>\text{W}\cdot\text{m}^{-2}</math>)</i>   |
| <i>Soil resistance (d)</i>  |
| <i>Grain size interval limit (<math>\mu\text{m}</math>)</i>   |

|  |   |   |
|--|---|---|
| T  | Lämpötila ( $^{\circ}\text{C}$ tai K)   | Temperature ( $^{\circ}\text{C}$ or K)                                    |
| T  | Transpiraatio (mm)  | Transpiration (mm)  |
| T'   | Lämpötila haihduttavalla pinnalla ( $^{\circ}\text{C}$ )                          | Temperature at the evaporative surface ( $^{\circ}\text{C}$ )             |
| T''  | Lämpötila kasvuston pinnalla ( $^{\circ}\text{C}$ )                               | Surface temperature of vegetation ( $^{\circ}\text{C}$ )                  |
| T <sub>m</sub>                                   | Keskilämpötila ( $^{\circ}\text{C}$ )   | Mean temperature ( $^{\circ}\text{C}$ )                                   |
| T <sub>w</sub>                                   | Kostea lämpötila ( $^{\circ}\text{C}$ )   | Wet-bulb temperature ( $^{\circ}\text{C}$ )                               |
| Y  | Sato ( $\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ )   | Yield ( $\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ )                                  |
| b  | Juurten geometriaa ja aktiiviteettia kuvaava kerroin                              | Root geometry and activity factor   |
| d  | Nollatason siirtymä (m)   | Zero-plane displacement (m)   |
| e <sub>a</sub>                                   | Vesihöyryn paine lämpötilassa T <sub>a</sub> (mbar)                               | Vapour pressure (mbar) in the air temperature T <sub>a</sub>              |
| e <sub>s</sub>                                   | Vesihöyryn kyllästyspaine lämpötilassa T <sub>a</sub> (mbar)                      | Saturated vapour pressure in the air temperature T <sub>a</sub> (mbar)    |
| e' <sub>s</sub>                                  | Vesihöyrynpaine haihduttavalla pinnalla (mbar)                                    | Vapour pressure at the evaporative surface (mbar)                         |
| f  | Kerroin Hauden menetelmässä   | Coefficient in Haude's method   |
| g  | Painovoiman kiihtyvyys ( $\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$ )                           | Acceleration due to gravity ( $\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$ )              |
| g <sub>a</sub> , g <sub>b</sub> , g <sub>c</sub> | Muotokertoimet De Vriesin menetelmässä  | Shape factors in De Vries' method   |
| h <sub>i</sub>                                   | Maan lämpötilamittareiden etäisyys (cm)   | Distance of soil thermometers (cm)  |
| i  | Indeksi   | Index   |
| j  | Indeksi   | Index   |
| k  | v. Karman'in vakio (0,41)   | v. Karman's constant (0,41)   |
| l  | Raekoon jakaumaindeksi Bloemenin menetelmässä                                     | Grain size distribution index in Bloemen's method                         |
| n  | Aurinkotuntien määrä (h)  | Sunshine hours (h)  |
| n, n <sub>s</sub>                                | Huokoskoon jakautumaa luonnehtiva kerroin Bloemenin menetelmässä                  | Pore size factor in Bloemen's method                                      |
| o  | orgaanisen aineen pitoisuus (%)   | Organic matter content (%)  |
| p  | Ilmanpaine (bar)  | Atmospheric pressure (bar)  |
| q  | Veden virtausnopeus ( $\text{cm}\cdot\text{d}^{-1}$ )                             | Flux ( $\text{cm}\cdot\text{d}^{-1}$ )                                    |
| q <sub>r</sub>                                   | Virtaus juureen ( $\text{cm}\cdot\text{d}^{-1}$ )                                 | Flux into the root ( $\text{cm}\cdot\text{d}^{-1}$ )                      |
| r <sub>a</sub>                                   | Aerodynaaminen vastus ( $\text{s}\cdot\text{cm}^{-1}$ )                           | Aerodynamic resistance ( $\text{s}\cdot\text{cm}^{-1}$ )                  |
| r <sub>c</sub>                                   | Peitteisyysvastus ( $\text{s}\cdot\text{cm}^{-1}$ )                               | Soil cover resistance ( $\text{s}\cdot\text{cm}^{-1}$ )                   |
| r <sub>l</sub>                                   | Ilmarakojen vastus ( $\text{s}\cdot\text{cm}^{-1}$ )                              | Stomatal resistance ( $\text{s}\cdot\text{cm}^{-1}$ )                     |
| r <sub>n</sub>                                   | Juuristokerroksen kosteudesta johtuva vastus ( $\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$ )    | Resistance affected by soil moisture ( $\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$ )    |
| r <sub>s</sub>                                   | Pintavastus ( $\text{s}\cdot\text{cm}^{-1}$ )                                     | Surface resistance ( $\text{s}\cdot\text{cm}^{-1}$ )                      |
| s  | Lysimetriin tuleva tai siitä poistuva vesimäärä ( $\text{cm}\cdot\text{d}^{-1}$ ) | Water coming to or going from lysimeter ( $\text{cm}\cdot\text{d}^{-1}$ ) |
| s <sub>0</sub>                                   | Standardipoikkeama  | Standard deviation  |
| t  | Aika (d)  | Time (d)  |
| u  | Tuulen nopeus ( $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ )                                    | Wind velocity ( $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ )                            |
| u*   | Kitkanopeus ( $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ )                                      | Friction velocity ( $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ )                        |
| x <sub>m</sub>                                   | Maan mineraaliaineksen tilavuusosuus ( $\text{m}^3\cdot\text{m}^{-3}$ )           | Volume proportion of mineral soil ( $\text{m}^3\cdot\text{m}^{-3}$ )      |
| x <sub>0</sub>                                   | Maan orgaanisen aineksen tilavuusosuus ( $\text{m}^3\cdot\text{m}^{-3}$ )         | Volume proportion of organic soil ( $\text{m}^3\cdot\text{m}^{-3}$ )      |
| x <sub>w</sub>                                   | Maaveden tilavuusosuus ( $\text{m}^3\cdot\text{m}^{-3}$ )                         | Volume proportion of soil water ( $\text{m}^3\cdot\text{m}^{-3}$ )        |
| z  | Etäisyys maan pinnalta (m)  | Distance from the soil surface (m)  |
| z <sub>0</sub>                                   | Rosoisuuskorkeus (m)  | Roughness length (m)  |



|                          |   |   |
|--------------------------|---|---|
| $z_r$                    | Juuristokerroksen syvyys (cm)   | <i>Depth of root layer (cm)</i>   |
| $\nu$                    | Bowenin suhde   | <i>Bowen's ratio</i>  |
| $\gamma$                 | Psykrometrivakio ( $\text{mbar} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$ )                              | <i>Psychrometric constant (<math>\text{mbar} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}</math>)</i>                        |
| $\Delta$                 | Kyllästetyn vesihöyrynpaineen äyrän kaltevuus ( $\text{mbar} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$ ) | <i>Slope of the saturation vapour pressure curve (<math>\text{mbar} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}</math>)</i> |
| $\Delta_i$               | Syvyysaskel (m)   | <i>Depth step (m)</i>   |
| $\Delta_n$               | Aika-askel (d)  | <i>Time step (d)</i>  |
| $\epsilon$               | Huokoisuus ( $\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$ )   | <i>Porosity (<math>\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-3}</math>)</i>   |
| $\theta$                 | Vesipitoisuus ( $\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$ )                                      | <i>Water content (<math>\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}</math>)</i>                                      |
| $\theta_r$               | Jäännösvesipitoisuus ( $\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$ )                               | <i>Residual water content (<math>\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}</math>)</i>                             |
| $\kappa$                 | Pintajännitys ( $\text{N} \cdot \text{m}^{-1}$ )  | <i>Surface tension (<math>\text{N} \cdot \text{m}^{-1}</math>)</i>  |
| $\lambda$                | Lämmönjohtavuus ( $\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ )                    | <i>Thermal conductivity (<math>\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}</math>)</i>               |
| $\mu$                    | Dynaaminen viskositeetti ( $\text{Ns} \cdot \text{m}^{-2}$ )                              | <i>Dynamic viscosity (<math>\text{Ns} \cdot \text{m}^{-2}</math>)</i>                                     |
| $\nu$                    | Albedo  | <i>Albedo</i>   |
| $\rho$                   | Stabiilisuustekijä (dimensioton Monin-Obukhov korkeus)                                    | <i>Stability factor (dimensionless Monin-Obukhov height)</i>  |
| $\rho$                   | Tiheys ( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ )  | <i>Density (<math>\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}</math>)</i>   |
| $\sigma$                 | Stefan-Boltzmann-vakio  | <i>Stefan-Boltzmann constant</i>  |
| $\tau$                   | Leikkausjännitys ( $\text{N} \cdot \text{m}^{-2}$ )                                       | <i>Shear stress (<math>\text{N} \cdot \text{m}^{-2}</math>)</i>   |
| $\phi$                   | Stabiilisuusfunktio   | <i>Stability function</i>   |
| $\psi$                   | Matrikpotentiaali, painepotentiaali (cm)  | <i>Matric potential, pressure potential (cm)</i>  |
| $\psi_a, \psi_w$         | Ilman sisääntulopiste (cm)  | <i>Air entry value (cm)</i>   |
| $\psi_g$                 | Painovoimapotentiaali (cm)  | <i>Gravitational potential (cm)</i>   |
| $\psi_s, \psi_r, \psi_l$ | Potentiaali maassa, juurissa ja lehissä (cm)  | <i>Potential in soil, roots and leaves (cm)</i>   |



## SISÄLTÖ

|   |    |
|---|----|
| ABSTRACT . . . . .  | 3  |
| TIIVISTELMÄ . . . . .   | 5  |
| ESIPUHE . . . . .   | 7  |
| MERKINNÄT, SYMBOLS . . . . .  | 9  |
| 1. JOHDANTO . . . . .   | 15 |
| 2. TUTKIMUKSEN RAJAUS . . . . .                                       | 17 |
| 3. TUTKIMUSAINEISTO . . . . .   | 18 |
| 3.1 TKK:n lysimetrikentän yleiskuvaus . . . . .                       | 18 |
| 3.2 Käsi- ja piirturihavainnot . . . . .                              | 20 |
| 3.2.1 Ilmastohavainnot . . . . .                                      | 20 |
| 3.2.2 Haihdunta-astiahavainnot . . . . .                              | 23 |
| 3.2.3 Lysimetrihavainnot . . . . .                                    | 24 |
| 3.3 Automaattisen mittausjärjestelmän havainnot . . . . .             | 26 |
| 3.4 Laboratoriomittaukset . . . . .                                   | 28 |
| 3.5 Interseptiomittaukset . . . . .                                   | 30 |
| 3.6 Tutkimuskauden hydrometeorologinen luonne . . . . .               | 30 |
| 4. ASTIAHAIHDUNNAT . . . . .  | 31 |
| 4.1 Käsitteiden tavoitteet . . . . .                                  | 31 |
| 4.2 Kuukausihaidunnat . . . . .                                       | 31 |
| 4.3 Astiahaiduntojen riippuvuus meteorologisista tekijöistä . . . . . | 33 |
| 4.4 Astiahaiduntamallit . . . . .                                     | 36 |
| 5. POTENTIAALINEN EVAPOTRANSPIRAATIO . . . . .                        | 39 |
| 5.1 Käsitteen tulkinta . . . . .                                      | 39 |
| 5.2 Määrittämismahdollisuudet . . . . .                               | 40 |
| 5.2.1 Suorat mittaukset . . . . .                                     | 40 |
| 5.2.2 Laskennalliset menetelmät . . . . .                             | 40 |
| 5.2.2.1 Yleisiä näkökohtia . . . . .                                  | 40 |
| 5.2.2.2 Empiiriset menetelmät . . . . .                               | 41 |
| 5.2.2.3 Penmanin kaava . . . . .                                      | 42 |
| 5.3 Määrittämismenetelmien soveltuvuuden analysointi . . . . .        | 46 |
| 5.3.1 Aiempia selvityksiä . . . . .                                   | 46 |
| 5.3.2 Mittausjaksoille asetetut vaatimukset . . . . .                 | 48 |
| 5.3.3 Mitattujen ja laskettujen arvojen vertailu . . . . .            | 49 |
| 5.3.4 Mitattujen haihduntojen ja astiahaiduntojen vertailu . . . . .  | 54 |
| 6. TODELLISEN HAIHDUNNAN MALLITTAMISEN EDELLYTYKSET . . . . .         | 57 |
| 6.1 Tarkastelun raja . . . . .  | 57 |
| 6.2 Maaveden virtaus . . . . .  | 57 |
| 6.2.1 Matemaattinen malli . . . . .                                   | 57 |
| 6.2.2 Hydraulisen johtavuuden määrittäminen . . . . .                 | 59 |
| 6.2.3 Stationäärisen tilanteen laskenta . . . . .                     | 63 |

|      |   |     |
|------|---|-----|
| 6.3  | Maan lämmönvaihto                             | 64  |
| 6.31 | Määritysmahdollisuudet                        | 64  |
| 6.32 | Ratkaisun periaate                            | 66  |
| 6.33 | Lämmönjohtavuuden riippuvuus maan kosteudesta | 70  |
| 6.4  | Kasvisto vedenkäyttäjänä                      | 71  |
| 6.41 | Kasvi, hydraulinen systeemi                   | 71  |
| 6.42 | Juurten vedenottomallit                       | 73  |
| 6.43 | Maankosteuden ja lämpötilan vaikutus          | 76  |
| 6.5  | Aerodynaamisen vastuksen laskenta             | 79  |
| 6.6  | Penmanin menetelmän laajennus                 | 85  |
| 6.7  | Kyllästysvajauksen määritystarkkuus           | 87  |
| 7.   | MAA-KASVI ILMAKEHÄYHTEYDEN SIMULOINTI         | 89  |
| 7.1  | Katsaus aiempiin tarkasteluihin               | 89  |
| 7.2  | Mallin rakenne                                | 90  |
| 7.3  | Laskennan suoritustapa                        | 92  |
| 7.4  | Maanpinnan energiatase                        | 95  |
| 7.5  | Pintavastuksen suuruus                        | 101 |
| 7.6  | Mallin arviointi                              | 103 |
| 8.   | TULOSTEN TARKASTELU                           | 106 |
| 9.   | YHTEENVETO                                    | 110 |
| 10.  | ENGLISH SUMMARY                               | 113 |
|      | KIRJALLISUUSLUETTELO                          | 116 |
|      | LIITTEET                                      | 124 |

## 1. JOHDANTO

Haihtumisella ymmärretään nestemäisessä tai kiinteässä muodossa olevan veden muuttamista vesihöyryksi. Olomuodon muutoksen keskeisenä ehtona on haihduttavan pinnan ja ilman välillä vallitseva höyrynpaine-ero. Haihdunta sitoo energiaa, joten jatkuvan haihdunnan edellytyksenä on haihduttavaan pintaan kohdistuva energiavirta. Monteith (1965) vertaa haihtumistapahtumaa sattuvasti liiketoimintaan, jossa haihduttava pinta myy vesihöyryä ja saa vastineeksi energiaa. Vastine hyväksytään auringon säteilynä tai lämmän kulkeutumisena ilmakehästä tai maasta. Höyrynpaine-eron säilyttämiseksi vesihöyryn täytyy kulkeutua pois, joten myös tuulella on vaikutuksensa haihtumistapahtumaan.

Hydrologisen kierron komponenteista haihdunta on eittämättä vaikeimmin mitattavissa ja arvioitavissa. Yrityksiä haihduntaan liittyvien ongelmien ratkaisemiseksi on toki tehty runsaasti, sillä Stanhillin (1973) mukaan vuoteen 1973 mennessä oli ilmestynyt noin 18 000 haihduntaa käsittelevää kirjoitusta ja määrä kasvoi nopeammin kuin 3 000 sivua vuodessa. Suurin osa näistä kirjoituksista on kuitenkin sellaisia, jotka ovat vain vähäisessä määrin vieneet aihepiirin tuntemusta eteenpäin. Todella merkityksellisiä tutkimuksia voidaan kirjata vain muutamia. Daltonin 1700-luvun lopulla esittämä yhtälö, Schmidtin (1925) energiatarkastelu, Bowenin (1926) suorittama energianjako, Thornthwaiten ja Holzmannin (1939) kehittämä profiilimenetelmä, Penmanin (1948) johtama kombinaatiokaava ja Swinbankin (1951) turbulenssimenetelmä ovat tutkimuksia, joiden voidaan katsoa merkittävimmin edistäneen haihdunnan arviointia. 1960-luvun puolivälistä lähtien (Cowan 1965) on tutkimustoiminnassa entistä voimakkaammin tiedostettu, että haihdunta on osa ns. maa-kasvi-ilmakehäyhteyttä, jossa jokainen ketjun osista voi vaikuttaa haihdunnan suuruuteen. Tämä on johtanut simulointimalleihin (esim. Nimah & Hanks 1973a,b), joilla on voitu kuvata veden liikkeitä maassa, kasvustossa ja ilmakehässä.

Tiedot haihdunnasta ovat kastelujärjestelmien suunnittelun keskeinen lähtökohta, joten ihmiskunnan ravinnontarpeen lisääntymisen voidaan odottaa lisäävän myös haihduntaan kohdistuvan tutkimustoiminnan määrää. Haihduntatietojen tarve ei suinkaan rajoitu kastelun suunnitteluun, vaan vesitaselaskelmiin kohdistuvien tarkkuusvaatimusten kasvaessa haihdunnan arviointi eri maastotyypeistä on vesistösuunnittelussa yhä tärkeämmäksi käyvä toimenpide.

Suomessa kasteluveden tarvetta on viimeksi kuluneen vuosikymmenen aikana selvitetty kolmessa tutkimuksessa, jotka on tosin laadittu sillä tavoin, että niissä ei todellisen haihdunnan ja sadon välisiä yhteyksiä ole suoranaisesti selvitetty. Hooli (1971) määrittäi tilastollista tarkastelutapaa käyttäen ns. optimisadannan, jota vertaamalla eri toistuvuuksilla sattuviin sadantoihin voidaan tehdä päätelmiä kasteluveden tarpeesta. Karan (1972) tutkimus perustui kastelukokeisiin. Seuna (1977) tarkasteli sadannan vajuusta ottamalla lähtökohdaksi toisaalta Kaiteran (1942) eri kasvien minimivedentarpeelle saamat arvot ja toisaalta USWB:n järvihaihduntakaavalla lasketut arvot.

Aluehaidunnan määrittämiseksi on Niinivaara (1953) kehittänyt menetelmän, joka perustuu ilman kyllästysvajauksen ja sadannan tarkasteluihin. Kaiteran (1963) suorittama selvitystä lukuunottamatta ei menetelmää ole kuitenkaan käytetty. Aluehaidunnan luotettava määrittäminen on kuitenkin välttämätöntä, mikäli halutaan menestyksellisesti käyttää sadanta-valuntamalleja vesistöjen suunnittelussa ja käytössä. Näiden mallien kehittyminen nykyiselle tasolle mahdollistaa nimittäin vesistön käyttäytymisen laskennan suureholla tarkkuudella edellyttäen, että lähtötietoja annettava haihdunta osataan arvioida oikein (Vakkilainen & Karvonen 1980, Karvonen 1980).

Muulla kehitettyjen, maa-alueelta tapahtuvan haihdunnan arviointi- ja mittaussuunnitelmien soveltuvuutta olosuhteisiimme on selvitetty verraten niukalti. Virta (1966) totesi kolmella suolla suorittamiensa mittausten perusteella, että Makkinkin (1957) menetelmällä päästään parempiin tuloksiin kuin pelkästään säteilytietoja tai Penmanin (1948) menetelmää käyttäen. Kulmala (1970) käytti turbulenssin spektriin, energiataseeseen ja profiilitarkasteluihin perustuvia haihdunnan määritysmenetelmiä, joita hän vertasi sekä keskenään että Class A-astialla ja Popovin lysimetrillä saatuihin tuloksiin. Tutkimus tuo selväpiirteisesti esiin eri menetelmiin liittyvät vaikeudet: turbulenssimenetelmä edellyttää erittäin tiheästi suoritettuja havaintoja, energian jako haihduntaan ja ilman lämmittämiseen kuuluviin osuuksiin ei ole helposti suoritettavissa ja astioilla voidaan tarkasti ottaen mitata vain niistä itsestään tapahtuvaa haihduntaa.

Gürer (1977) osoitti, että USWB:n kaava antaa keväisin selvästi liian suuria ja syksyisin liian pieniä arvoja. Saman totesi Järvinen (1978) vertaillessaan USWB:n kaavalla laskettuja haihdunta-arvoja lysimetreillä mitattujen haihduntojen kanssa. Seuna (1977) suoritti likimääräisiä laskelmia maan lämpövaraston vaikutuksesta haihduntaan ja esitti USWB:n kaavalla laskettuihin arvoihin keskimäärin tehtävät korjaukset.

## 2. TUTKIMUKSEN RAJAUS

Käsillä olevan tutkimuksen tavoiteasettelussa on painotettu maa-alueelta touko-lokuussa tapahtuvan haihdunnan arviointimenetelmien soveltuvuuden ja haihtumistapahtuman analysointia. Nämä näkökohdat ovat johtaneet kahteen erityyppiseen lähestymistapaan. Työn alkuosassa selvitetään astiahaihduntojen ja eräillä tunnetuimmilla arviointikaavoilla laskettujen haihdunta-arvojen yhteensopivuutta mitattujen potentiaalisten haihduntojen kanssa. Työn loppuosassa analysoidaan tarkemmin itse haihtumistapahtumaa ja todelliseen haihduntaan vaikuttavia tekijöitä.

Tutkimus pohjautuu Teknillisen korkeakoulun lysimetrikentällä vuosina 1972–80 tapahtuneeseen havaintotoimintaan, joten saadut tulokset ovat käyttökelpoisia Etelä-Suomen ilmasto-olosuhteissa. Kentältä on saatavissa luotettavia meteorologisia havaintoja yleensä vain yhdeltä mittaustasolta, joten ei energiatase- eikä profiilimenetelmää ole voitu käyttää.

Lysimetrikenttää ovat aiemmin esitelleet ja siellä tehtyjä havaintoja analysoineet Kaitera & Maasilta (1970), Teräsvirta (1971) Kaitera & Teräsvirta (1972), Hooli (1972), Hytönen (1976) ja Järvinen (1978).

### 3. TUTKIMUSAINIESTO

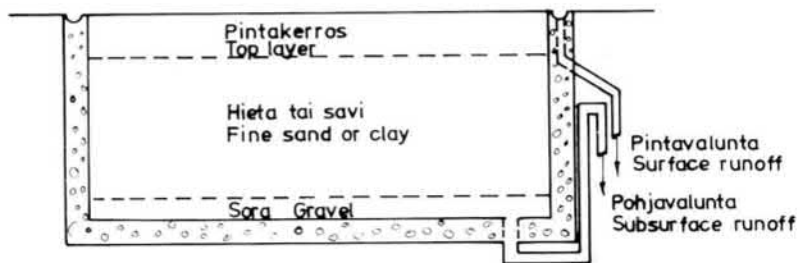
#### 3.1 TKK:n lysimetrikentän yleiskuvaus

Teknillisen korkeakoulun lysimetrikenttä sijaitsee Otaniemessä TKK:n alueen Tapiolan puoleisessa reunassa (60°11'N, 24°48'E). Kentän aidattu alue on noin 0,5 ha ja maanpinnan korkeustaso noin 1,5 m merenpinnasta lukien. Kentän pohjoispuolella on omakotitaloasutusta ja matalahkoa metsikköä. Muilla ilmansuunnilla merkittäviä maastoesteitä ei kentän välittömässä läheisyydessä ole.

Lysimetrikentällä on 12 lysimetriä, jotka ovat poikkileikkaukseltaan neliön muotoisia betonialtaita, alaltaan 10 m<sup>2</sup> ja syvyydeltään 1,5 m (kuva 1). Altaat on sijoitettu kahteen 6 lysimetrin ryhmään kuvassa 2 esitetyn aluepiirroksen mukaisesti. Lysimetrialtaissa on täytteenä pohjalla 10 cm paksu kerros sepeliä ja karkeaa soraa ja niiden päällä tutkittavaa maalajia. Yksi lysimetreistä on täytetty karkealla hiekalla, viidessä maalajina on hietta, kolmessa savi, kahdessa saraturve ja yhdessä rahkaturve. Kahdessa hietalysimetrisissä (n:o 1, 2) hietakerroksen päällä on noin 25 cm paksu, runsaammin humusta sisältävä kerros, yhdessä (n:o 4) pintakerroksen paksuus on noin 15 cm. Näissä lysimetreissa on nurmipinta samoin kuin kahdessa savilysimetrisissä (n:o 9, 11), joissa humuskerroksen paksuus on noin 15 cm. Taulukossa 1 on esitetty lysimetrialtaiden maalajien keskeisiä ominaisuuksia ja kuvassa 3 tutkittavien kivennäismaalajien rakeisuuskäyrät.

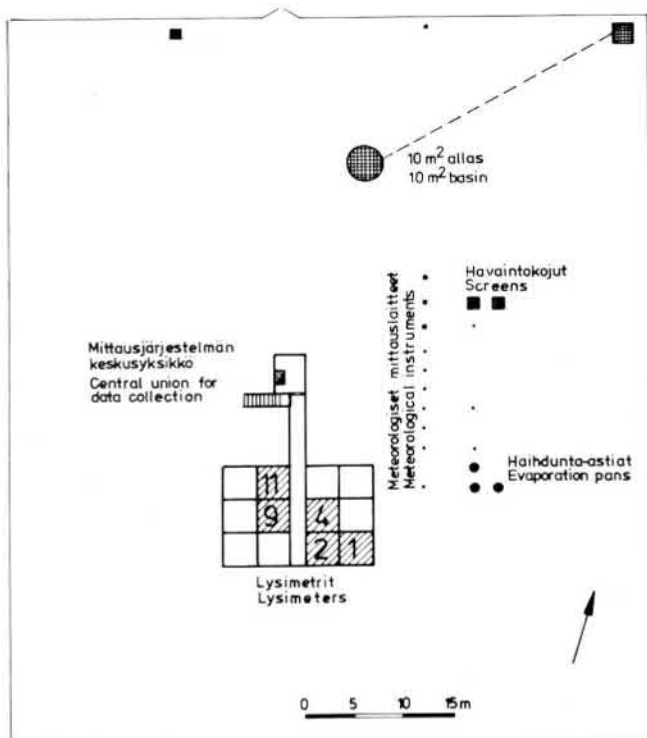
Lysimetrialtaiden välissä on maanalainen mittauskäytävä, jossa havaitaan lysimetrien pohjaveden korkeutta ja lysimetrin läpi menneen veden määrää, ns. pohjavaluntaa, sekä sadannasta imeytymättä jääneen veden määrää, ns. pintavaluntaa. Maankosteuden mittaamista varten lysimetreihin on sijoitettu galvanoidusta teräksestä valmistetut putket, joihin neutronimittarin sondi maankosteutta mitattaessa lasketaan.

Vapaasta vedenpinnasta tapahtuvan haihdunnan mittaamista varten kentällä on neljä erityyppistä haihdunta-astiaa. Näistä suurin, alaltaan 10 m<sup>2</sup> ja syvyydeltään 1,2 m, on



Kuvio 1. Lysimetri.  
Fig. 1. Lysimeter.



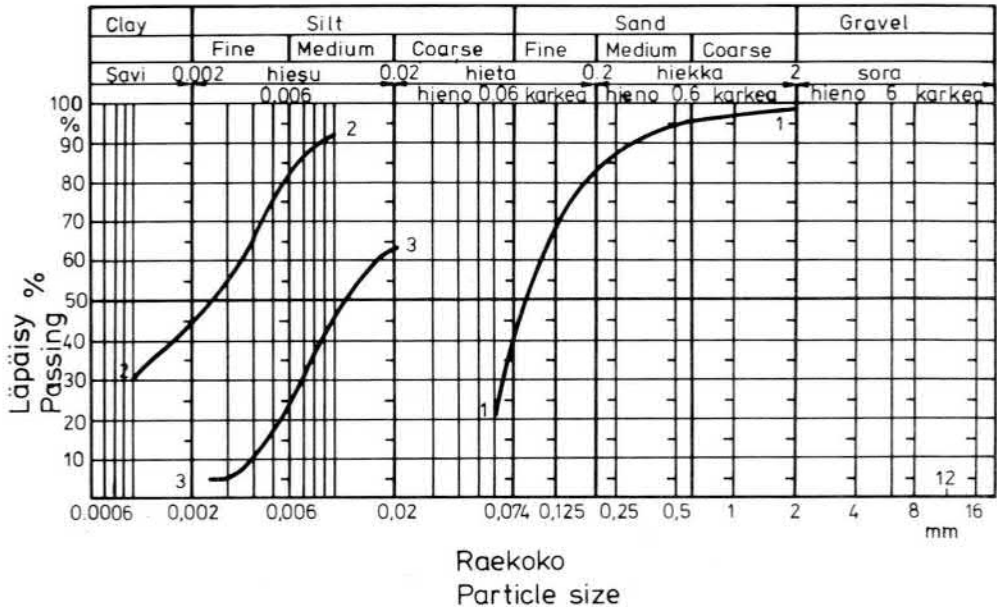


Kuva 2. Lysimetrikenttä.

Fig. 2. Lysimeter field.

Taulukko 1. Lysimetreissä olevien maalajien ominaisuuksia.  
Table 1. Properties of lysimeter soils.

| Lysimetri<br><i>Lysimeter</i> | Maalaji<br><i>Soil type</i>       | Maanpinnan<br>peite<br><i>Soil cover</i> | Tilavuus-<br>paino<br><i>Bulk density</i><br>g · cm <sup>-3</sup> | Kiintoainek-<br>sen tiheys<br><i>Particle density</i><br>g · cm <sup>-3</sup> | Huokoisuus<br><i>Porosity</i><br>cm <sup>3</sup> · cm <sup>-3</sup> |
|-------------------------------|-----------------------------------|--|---|---|---|
| 1, 2, 4                       | hieta<br><i>fine sand</i>         | ruoho<br><i>grass</i>                    | 1,517   | 2,675   | 0,433   |
| 3, 6                          | hieta<br><i>fine sand</i>         | paljas<br><i>bare</i>                    | 1,517   | 2,675   | 0,433   |
| 5                             | sora<br><i>gravel</i>             | paljas<br><i>bare</i>                    | 1531  | 2,675   | 0,428   |
| 7                             | savi<br><i>clay</i>               | paljas<br><i>bare</i>                    | 1,269   | 2,656   | 0,500   |
| 8, 10                         | saraturve<br><i>sedge peat</i>    | paljas<br><i>bare</i>                    | 0,155   | 1,500   | 0,897   |
| 9, 11                         | savi<br><i>clay</i>               | ruoho<br><i>grass</i>                    | 1,269   | 2,675   | 0,428   |
| 12                            | rahkaturve<br><i>spagnum peat</i> | paljas<br><i>bare</i>                    | 0,084   | 1,491   | 0,944   |



Kuva 3. Lysimetrimaiden rakeisuuskäyrät. 1 = hieta, 2 = savi, 3 = pintakerros.

Fig. 3. Grain size distribution curves for soils in lysimeters. 1 = fine sand, 2 = clay, 3 = top layer.

valmistettu teräslevystä. Mittauksessa tarvittava laitteisto on sijoitettu erilliseen mittauskoppiin kentän koillisnurkassa.

WMO on suosittanut haihdunnan mittaamiseen kahta standardia, amerikkalaista Class A-astiaa ja neuvostoliittolaista GGI-3000-astiaa (esim. WMO 1966). Nämä molemmat ovat kentällä käytössä, viimeksi mainittu tosin vasta vuodesta 1974 lähtien. Samasta vuodesta alkaen haihduntaa on mitattu neljännellä kentällä olevalla astialla, Anderssonin evaporiometrillä (Andersson 1969). Tuulen nopeus on mitattu astioiden välittömässä läheisyydessä.

Kenttä on toiminut vuoteen 1979 asti Ilmatieteen laitoksen ilmastoasemana ja se on varustettu verrattain runsaalla ilmastoasemavarustuksella. Sadannan mittaamista varten kentällä on normaalimittarin ohella piirtävä sademittari sekä maanpinnan tasoon sijoitettu sademittari. Lämpötilan ja ilman kosteuden mittaamista varten kentällä on kaksi havaintokojua. Auringonpaisteen määrää mitataan Cambell-Stokes-aurinkoautografilla.

Kentällä on ollut vuosina 1972–75 toiminnassa digitaalinen mittauslaitteisto, jonka avulla on voitu rekisteröidä sekä reikänauhalle että selväkielisenä sähkökirjoittimen nauhalle keskeiset ilmastotiedot ja maan lämpötilat.

## 3.2 Käsi- ja piirturihavainnot

### 3.2.1 Ilmastohavainnot

Havaintojen toimesta on päivittäin tehty Ilmatieteen laitoksen ilmastoasemilla normaalisti tehtävät havainnot. Niinpä lämpötila, ilman suhteellinen kosteus ja tuulen nopeus on luettu kolme kertaa vuorokaudessa (klo 8, 14, 20), sadanta, auringonpaistetuntien määrä ja tuulen kulkema kokonaismatka kerran vuorokaudessa (klo 8).

Lämpötilan mittaamisessa käytettyjen elohopeamittareiden tarkkuus on valmistajan ilmoituksen mukaan  $0,1^{\circ}\text{C}$ . Vuorokausikeskiarvot on laskettu Kolkin (1959) esittämää menetelytapaa käyttäen. Touko-syyskuussa on näin ollen käytetty kaavaa:

$$T_m = 1/4(T_{08} + T_{14} + 2T_{20}) + a(T_{20} - T_{n,08}) + 0,1 \quad (1)$$

jossa

$T_m$  = keskilämpötila ( $^{\circ}\text{C}$ )  
 $T_{08,14,20}$  = lämpötila ( $^{\circ}\text{C}$ ) klo 8, 14 ja 20  
 $T_{n,08}$  = lämpötilan alin arvo ( $^{\circ}\text{C}$ ) klo 20 ja 8 välillä  
 $a$  = kuukausittain muuttuva kerroin.

Lokakuussa vastaava kaava on muodossa:

$$T_m = 1/5(2T_{08} + T_{14} + 2T_{20}) + a \quad (2)$$

Ilman suhteellisen kosteuden mittaaminen on suoritettu kahdella rinnakkaisella hius-hygrometrilla, joiden tarkkuus on Ahdin (1972) mukaan 3...5 prosenttiyksikköä. Vesihöyryn painetta laskettaessa on käytetty kaavaa

$$e_a = e_s F / 100 \quad (3)$$

jossa

$e_a$  = vesihöyryn paine ilmassa (mbar)  
 $e_s$  = vesihöyryn kyllästyspaine (mbar)  
 $F$  = suhteellinen kosteus (%).

Vesihöyryn kyllästyspainetta laskettaessa on käytetty Bongardsin (1926) kaavaa, jossa  $e_s$ :n laatuna on mmHg:

$$\text{Log } e_s = \frac{T}{(T + 273,16)} (8,628 - 0,00394 T) + 0,66099 \quad (4)$$

Kyllästetyn vesihöyryn painetta lastettaessa tehtäväksi virheeksi saadaan normaalia differentointiin perustuvaa menetelytapaa käyttäen keskimäärin noin  $0,1$  mbar. Jos hius-hygrometrin virhe oletetaan 5 prosenttiyksiköksi, saadaan  $e_a$ :n virheeksi keskimäärin  $0,4$  mbar ( $T = 15^{\circ}\text{C}$ ). Kyllästysvajauksen keskimääräinen virhe on näinollen  $0,4$  mbar. Kyllästysvajauksen vuorokausiarvot on laskettu klo 8, 14 ja 20 tehtyjen havaintojen keskiarvona.

Mikäli lämpötila- tai kosteushavainnot ovat puuttuneet, kuten kesällä 1979 viikonloppuisin on ollut asianlaita, on puuttuvat arvot täydennetty termografi- ja hygrografi-havainnoilla.

Laskelmissa on sadanta-arvona yleensä käytetty maanpintamittarin arvoja, joihin on tehty kostutusvirhekorjaus. Virheen suuruudeksi on arvioitu  $0,1$  mm, kun vuorokausi-sadanta on ollut pienempi kuin  $1,0$  mm ja  $0,18$  mm, kun tämä arvo on ylitetty. Maan-pintamittarin havaintojen puuttuessa on käytetty standardisademittarin lukemia, joihin on tehty kostutusvirheen lisäksi myös tuulikorjaus (Solantie & Helimäki 1975).

Tuulen nopeuden vuorokausikeskiarvot on mitattu 0,5 metrin korkeudelle sijoitettua summaavaa kuppianemometriä (Fuess) käyttäen. Keskimääräiseksi virheeksi voidaan arvioida 5 % virheen ollessa suhteellisesti sitä suuremman mitä pienempi tuulen nopeus on.

Tulo- ja nettosäteilyarvoina on käytetty Ilmatieteen laitoksen Helsinki-Vantaan lentokentällä mitattuja arvoja. Lentoaseman ja Otaniemen välinen etäisyys on noin 18 km. Auringonpaistetuntien avulla on tehtävissä seuraava säteilyarvojen virhettä koskeva tarkastelu:

Tulosäteilyä voidaan estimoida mm. seuraavalla kaavalla:

$$R_S = R_A(a + b \cdot n/N) \quad (5)$$

jossa

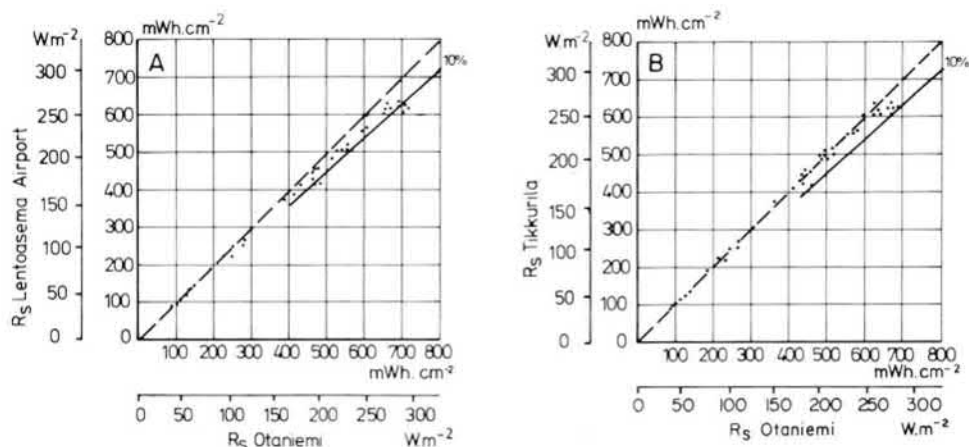
- $R_S$  = keskimääräinen tulosäteily ( $W \cdot m^{-2}$ )  
 $R_A$  = teoreettinen tulosäteily ( $W \cdot m^{-2}$ )  
 $n$  = todellisten aurinkotuntien keskimääräinen määrä (h)  
 $N$  = mahdollisten aurinkotuntien keskimääräinen määrä (h)  
 $a, b$  = vakioita

Kaava (5) on tyypiltään alunperin Ångströmin (1924) käyttämä. Mustonen (1964) on saanut vakioille  $a$  ja  $b$  taulukossa 2 esitetyt arvot. Laskennassa tarvittavat auringonpaistetuntien määrät  $N$  samoin kuin teoreettiset säteilyarvot  $R_A$  on esitetty mm. julkaisussa Smitsonian Meteorological Tables (1951). Kuvassa 4 on vertailtu kaavalla (5) kuukausiarvoja käyttäen laskettuja tulosäteilyarvoja Otaniemen ja lentoaseman sekä Otaniemen ja Tikkurilan välillä. Lentoaseman säteilyarvot ovat kutakuinkin systemaattisesti Otaniemen arvoja suurempia absoluuttisen poikkeaman kasvaessa säteilyarvojen kasvaessa. Toisaalta vertailussa Tikkurilan arvojen kanssa käy ilmi, että Otaniemen säteilyarvot ovat selvästi pienempiä vasta, kun ylitetään säteilyarvo  $250 W \cdot m^{-2}$ . Kun Helsingin lentoaseman ja Tikkurilan välistä eroa on vain noin 5 km ja kun asemat ovat rannikkoon nähden maantieteellisesti samassa asemassa, viittaa tulosten erilaisuus aurinkoautografiin sijoituksessa oleviin eroihin tai merkintäliuskosten erilaisiin lukutottumuksiin. Selvää on, että kuukauden pituisia jaksoja tarkasteltaessa säteilyn mittausvirhe jää kaikissa tapauksissa alle 15 %. Keskimääräinen virhe on suoritettujen tarkastelujen perusteella 5–7 %.

Taulukko 2. Tulosäteilyn laskemisessa (kaava 5) tarvittavien vakioiden arvot (Mustonen 1964).

Table 2. Values of coefficients (Mustonen 1964) needed in the calculation of solar radiation (Eq. 5).

| Kuukausi | Month     | a    | b    |
|----------|-----------|------|------|
| Toukokuu | May       | 0,24 | 0,58 |
| Kesäkuu  | June      | 0,23 | 0,59 |
| Heinäkuu | July      | 0,23 | 0,59 |
| Elokuu   | August    | 0,23 | 0,56 |
| Syyskuu  | September | 0,23 | 0,54 |
| Lokakuu  | October   | 0,23 | 0,52 |



Kuva 4. Auringonpaistetuntien perusteella (kaava 5) laskettujen säteilyarvojen vertailu. A. Otaniemi, lentoasema. B. Otaniemi, Tikkurila.

Fig. 4. Comparison of radiation values calculated on the basis of sunshine hours (Eq. 5). A. Otaniemi, airport. B. Otaniemi, Tikkurila.

Nettosäteilyn osalta vastaava tarkastelu voidaan suorittaa lähtemällä liikkeelle ns. Bruntin kaavasta (esim. Penman 1948):

$$R_n = R_s(1 - v) - \sigma T^4(0,56 - 0,08\sqrt{e_a})(0,10 - 0,90 n/N) \quad (6)$$

jossa

$R_n$  = nettosäteily ( $W \cdot m^{-2}$ )

$v$  = albedo ( $\cong 0,25$  ruohikolle)

$\sigma$  = Stefan-Boltzmann-vakio ( $5,67 \times 10^{-8} W \cdot m^{-2} \cdot K^{-4}$ )

$T$  = lämpötila (K)

$e_a$  = vesihöyryn paine 2 m:n korkeudella (mbar).

Nettosäteilyerot jäävät tulosäteilyeroja pienemmiksi. Otaniemessä touko-elokuussa on nettosäteily keskimäärin noin 5 % pienempi kuin lentoasemalla ja noin 2 % pienempi kuin Tikkurilassa. Vuoden 1973 kesäkuussa erot ovat olleet suurimmat:  $13 W \cdot m^{-2}$  ja  $9 W \cdot m^{-2}$ . Nämä vastaavat haihduntamääriä  $0,5 mm \cdot d^{-1}$  ja  $0,3 mm \cdot d^{-1}$ . Syys- ja lokakuuden aikana auringonpaistetuntien perusteella lasketut erot ovat merkityksettömän pieniä.

### 3.22 Haihdunta-astiahavainnot

Haihdunta-astiahavainnot on suoritettu päivittäin klo 8–9. Class A-astian ja Anderssonin evaporimetrin vedenpinnat mitataan mikrometriruuveilla, joiden luovematarkkuus on 0,1 mm. GGI-3000-astian vedenpinnan muutokset mitataan byretin ja mittalasin avulla ja lukematarkkuudeksi voidaan arvioida 1 mm.

Class A-astiaan tuleva sadanta on mitattu maanpintamittarilla. GGI-3000-mittariin liittyy oma maahan upotettu sademittari, joka on kalibroitu antamaan samoja sadantarvoja kuin maanpintamittari. Anderssonin evaporimetri on kannellinen, joten sadantaa ei sitä käytettäessä tarvitse tuntea.

10 m<sup>2</sup>:n haihdunta-altaan mittausjärjestelmä on toiminut siinä määrin puutteellisesti, että allas on jätetty käsittelyn ulkopuolelle.

### 3.23 Lysimetrihavainnot

Lysimetrimittaukset perustuvat vesitaseen käyttöön. Lysimetriin tuleva ja siitä lähtevä sekä siihen varastoituva vesimäärä mitataan, jolloin haihdunta saadaan jäännösterminä. Vesimäärien suhteen mittausjärjestely on ollut seuraava (kuva 1 sivulla 18):

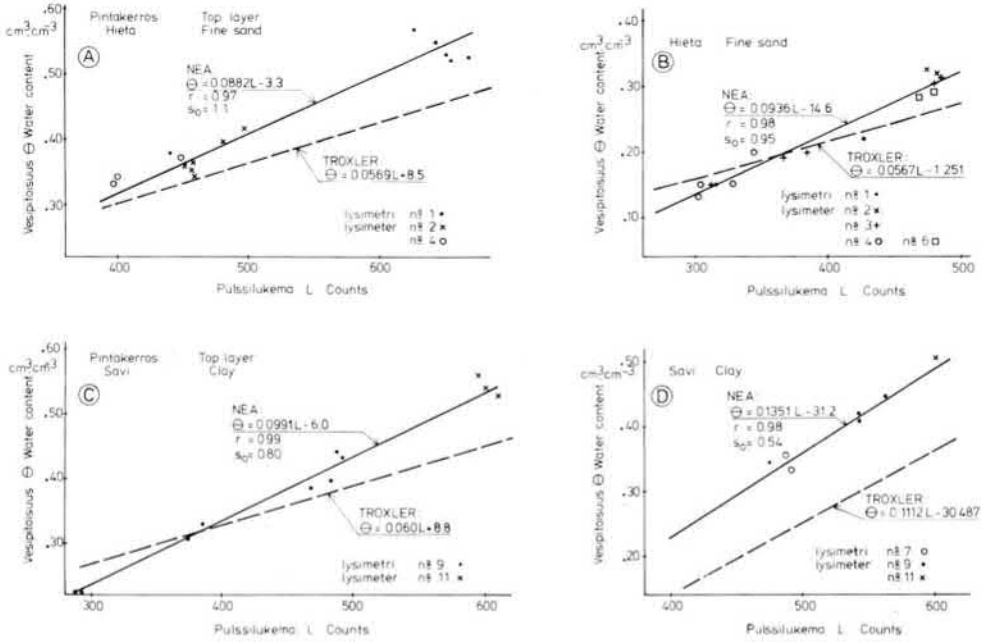
Lysimetriin tulee vettä sateena ja/tai syöttönä, jotka mitataan 0,1 mm tarkkuudella. Lysimetrin läpi mennyt vesimäärä eli pohjavalunta ja lysimetrin pinnalta kouruihin valunut vesimäärä eli pintavalunta johdetaan putkia myöten mittauskäytävään, jossa ne mitataan kaatokeinuastioita käyttäen. Kaatokeinuajen tilavuus on 1 l ja niistä saatavien lukemien tarkkuutta kontrolloidaan mitta-astioiden avulla. Pohjavaluntaputkien ylivuotokorkeus määrää tason, jonka yläpuolelle pohjavesi lysimetrissä ei voi nousta. Samojen putkien avulla mitataan pohjaveden korkeus (lukematarkkuus 1 cm). Pintavaluntaa mittaavien kaatokeinuajen lukemat on korjattu vähentämällä lukemista suoraan pintavaluntakouruihin tullut sadanta. Kaatokeinuajet ja pohjavedenkorkeudet on luettu arkipäivinä klo 8–9.

Maankosteuden mittaaminen on tapahtunut neutronikosteusmittarilla. Vuosina 1972–75 mittari oli tyyppiä Troxler Electronic 2000 B ja tämän käytyä käyttökelvottomaksi tyyppiä Nea Basc Depth Moisture Probe. Kosteusmittaukset on tehty 10 tai 20 cm:n välein. Neutronimittari ei anna kosteutta ko. mittauspisteessä, vaan se lähettää ympärilleen ns. vaikutuspallon, jonka säde vaihtelee välillä 30–100 cm. Säde suurenee, kun kosteus pienenee. Neutronimittauksen luonteesta johtuu, ettei tarkkuus sanottavasti huonone, vaikka 10 cm mittausvälin asemasta käytetään 20 cm väliä (Kristensen 1973).

Vuosina 1972 ja 1973 kosteusmittauksia on tehty yhteensä ainoastaan seitsemän sarjaa. Vuodesta 1974 lähtien ajallista mittausväliä on tuntuvasti tiennetty ja mittauksia on suoritettu vähintään kaksi kertaa kuukaudessa. Vuonna 1977 maankosteus mitattiin vähintään kerran viikossa.

Mittari ei suinkaan suoraan anna tulokseksi maankosteutta, vaan sen rekisteröimä pulssilukema on suorassa suhteessa vetytiheyteen mittauskohdan ympärillä. Pulssilukeman muuttamiseksi vesipitoisuudeksi tarvitaan kalibrointikäyrä, jonka saamiseksi on gravimetrisiä kosteusmäärityksiä verrattava samanaikaisiin neutronimittauksiin. Maan pintakerros rajoittuu ilmaan ja poikkeaa tästä syystä siinä määrin syvemmistä kerroksista, että sille on määritettävä oma kalibrointikäyränsä.

Nurmipintaisille lysimetreille määritetyt kalibrointisuorat on esitetty kuvassa 5. Troxler-mittarin kalibrointisuorat ovat Järvisen (1978) laatimia, Nea-mittarille suorat on määritetty tämän tutkimuksen yhteydessä. Mittausten keskimääräinen poikkeama kalibrointisuorista on pienempi kuin 2 tilavuusprosenttia. Suurimmillaan poikkeamat ovat pintakerroksessa, jossa eräät pisteistä eroavat kalibrointisuorasta noin 4 tilavuusprosenttia. Pintakerroksen kosteutta mitattaessa on syytä erityiseen tarkkuuteen kuten taulukosta 3 voidaan havaita. Syvemmällä sondin sijoituksessa tehtävä virhe peilautuu huomattavasti pienempänä kosteusvirheenä kuin pintakerroksessa.



Kuva 5. Neutronimittarin kalibrointi. A. hietalysimetrien pintakerros, B. hietä, C. savilysimetrien pintakerros, D. savi.

Fig. 5. Calibration of the neutron probe. A. top layer of fine sand lysimeters, B. fine sand, C. top layer of clay lysimeters, D. clay.

Taulukko 3. Neutronimittarin sondin sijoituskorkeuden vaikutus mittaustulokseen. Mittauspäivä 27.6.1979.

Table 3. Effect of probe depth on the results obtained with neutron metre. Date 27.6.1979.

| Lysimetri<br>Lysimeter    | Sondin syvyys<br>Probe depth<br>cm | Lukema<br>Count | Kosteus<br>Moisture<br>$\text{cm}^3/\text{cm}^3$ | Virhe<br>Error<br>$\text{cm}^3/\text{cm}^3$ |
|---------------------------|------------------------------------|-----------------|--|---|
| N:o 1, hietä<br>fine sand | 8                                  | 399             | 0,319  | -0,035                                      |
|                           | 9                                  | 420             | 0,337  | -0,017                                      |
|                           | 10                                 | 439             | 0,354  | 0   |
|                           | 11                                 | 444             | 0,359  | 0,004                                       |
|                           | 12                                 | 457             | 0,370  | 0,016                                       |
|                           | 65                                 | 408             | 0,236  | -0,019                                      |
|                           | 70                                 | 428             | 0,255  | 0   |
|                           | 75                                 | 433             | 0,259  | 0,004                                       |
| N:o 9, savi<br>clay       | 8                                  | 258             | 0,196  | -0,029                                      |
|                           | 9                                  | 268             | 0,206  | -0,019                                      |
|                           | 10                                 | 288             | 0,225  | 0   |
|                           | 11                                 | 309             | 0,246  | 0,026                                       |
|                           | 12                                 | 321             | 0,258  | 0,033                                       |
|                           | 55                                 | 535             | 0,411  | -0,012                                      |
|                           | 60                                 | 544             | 0,423  | 0   |
|                           | 65                                 | 555             | 0,438  | 0,015                                       |

Kristensen (1973) on tullut selvitystensä perusteella johtopäätelmään, että neutronimittarilla mitattaessa kosteusvirhe jää alle 1 tilavuusprosenttia. Nyt suoritettun tarkastelun perusteella virhe näyttäisi olevan jonkin verran suurempi. Jos yhden mittauksen virheeksi oletetaan 2 tilavuusprosenttia ja keskimääräiseksi maan kosteudeksi 30 tilavuusprosenttia, saadaan teoreettiseksi virheeksi noin 8 mm. Näin ollen lysimetreillä ei ole mahdollista saada luotettavia haihdunta-arvoja lyhyillä aikajaksoilla.

Eräs merkittävä virhemahdollisuus liittyy pohjavalunnan mittaukseen sellaisessa tapauksessa, jossa kaatokeinujen alla olevan tarkistusastian tilavuus ei ole riittänyt. Kaatokeinujen toiminta on osoittautunut siinä määrin epävarmaksi, että kuvatun kaltaisessa tilanteessa voi syntyä useiden millimetrin suuruisia virheitä. Kyseiset mittausjaksot on jätetty käsittelyn ulkopuolelle.

### 3.3 Automaattisen mittausjärjestelmän havainnot

Automaattisen mittausjärjestelmän avulla on ollut mahdollista mitata ilman lämpötilaa 12, 2, 0,5 ja 0,1 m:n korkeudelta, kosteaa lämpötilaa 12 ja 2 m:n korkeudelta. Tuulen nopeus on rekisteröity 12, 2 ja 0,5 m:n korkeudelta, ylimmältä tasolta on saatu myös tuulen suunta. Automaattiseen mittausjärjestelmään on edelleen kytketty netto-säteilymittari (tyyppiä Suomi-Franssila) sekä platinavastusanturit, jotka on sijoitettu kussakin lysimetrissä 2, 10, 25, 50, 80 ja 120 cm:n syvyyksille ja joiden avulla on voitu mitata maan lämpötiloja. Eri antureista tulevat mittausjännitteet on koottu järjestelmässä keskusyksikköön, joka rekisteröi saapuneet tiedot. Keskusyksikössä on kellolaite, joka käynnistää mittauksen valittavissa olevin aikavälein. Tavallisesti mittaus on suoritettu kahden tunnin välein. Tulosten rekisteröinti on tapahtunut sekä reikänauhalle että selväkielisenä sähkökirjoittimen nauhalle. Keskusyksikköhuone on läheisen radioaseman takia jouduttu suojaamaan ns. Faradayn häkillä. Mittausjärjestelmä on kalibroitu valmistajan toimesta ja sen antamia tuloksia on aika ajoin verrattu käsin tehtyihin havaintoihin.

Virheellisten havaintojen korjaamisessa ja puuttuvien havaintojen täydentämisessä on noudatettu seuraavia menettelytapoja:

Kahden metrin korkeudella mitattuja ilman lämpötilahavaintoja on verrattu klo 8, 14 ja 20 tehtyjen käsihavaintojen kanssa. Pienimmän neliösumman keinolla on määrätty a:lle ja b:lle arvot yhtälöön (7):

$$T_{\text{käsi}} = a T_{\text{nauha}} + b \quad (7)$$

jossa

$T_{\text{käsi}}$  = lämpötila ( $^{\circ}\text{C}$ ), käsihavainto  
 $T_{\text{nauha}}$  = lämpötila ( $^{\circ}\text{C}$ ), mittausjärjestelmän havainto  
 a, b = havaintojaksoittain määrättävät vakiot.

Kun a ja b on kuvatulla tavoin saatu määrättyksi, on mittausjärjestelmän arvot asianmukaisesti korjattu. Tämän lisäksi lämpötilojen mielekkyys on tarkistettu havainto havainnolta. Taulukossa 4 on esitetty tutkimuksessa käytetyille jaksoille lasketut vakioiden a ja b arvot ja hyvyttä mittaavina kriteereinä korrelaatiokertoimet. Kyllästysvajauksen laskenta on heinäkuuta 1973 lukuunottamatta perustettu kuivan ja kostean lämpötilan käyttöön:



$$e_s - e_a = \gamma \cdot (T - T_w) \quad (8)$$

jossa

$\gamma$  = psykrometrivakio (= 0,667 mbar  $\cdot$   $^{\circ}$ C $^{-1}$ )

$T_w$  = kostea lämpötila ( $^{\circ}$ C).

Jaksolla 26.6.–31.7. mittausjärjestelmän mitaamat kostean lämpötilan arvot ovat osoittautuneet siinä määrin epäluotettaviksi, että kyllästysvajaus on laskettu kuivan lämpötilan ja hygrografista havaitun ilman suhteellisen kosteuden perusteella käyttäen kaavoja (3) ja (4).

Tuulen nopeus on tulkittu virheelliseksi, mikäli se on ylittänyt arvon 20,0 m  $\cdot$  s $^{-1}$ . Virheelliset ja puuttuvat havainnot on täydennetty lineaarisesti interpoloimalla.

Maan lämpötilahavainnot korjattaessa ja täydennettäessä on käytetty ns. spline-funktioita. Ensivaiheessa on 40 $^{\circ}$ C korkeammat lämpötilat tulkittu virheellisiksi ja niiden sekä puuttuvien havaintojen paikalle on sijoitettu arvo 20,0 $^{\circ}$ C. Edelleen on lämpötilahavainto tulkittu virheelliseksi, mikäli se on poikennut edellisestä havainnosta 2 cm:n syvyydellä enemmän kuin 8,0 $^{\circ}$ C, 10 cm:n syvyydellä enemmän kuin 7,0 $^{\circ}$ C, 25 cm:n syvyydellä enemmän kuin 5,0 $^{\circ}$ C ja sitä alempana enemmän kuin 1,0 $^{\circ}$ C. Virheellisiksi tulkittujen arvojen paikalle on sijoitettu lämpötila-arvo 20,0 $^{\circ}$ C. Lämpötilahavaintojen jatkokäsittely on suoritettu käyttämällä UNIVAC 1108:n kirjasto-ohjelmaa ICSSCU. Ohjelma suorittaa lämpötilojen tasoituksen sijoittamalla lämpötilahavaintojen kautta niihin parhaiten sopivan, kolmatta astetta olevan polynomin, ns. spline-funktion. Laskelmat on suoritettu Reinschin (1967) esittämällä tavalla.

Nettosäteilymittarin antamat arvot ovat osoittautuneet siinä määrin virheellisiksi, että ne on jouduttu hylkäämään. Laskelmissa on käytetty Helsinki-Vantaan lentoasemalla mitattuja arvoja (USSR State Committee for Hydrometeorology and Control of Natural Environment 1972–79).

Taulukko 4. Automaattisen mittausjärjestelmän ja käsihavaintojen vertailu. Vakioiden a ja b arvot yhtälöön (7) sekä korrelaatiokertoimet r mittausjaksoittain.

Table 4. Comparison of the automatic measuring system with manual observations. Values of coefficients a and b for Eq. (7) and the correlation coefficients r.

| Havaintojakso<br>Observation period | Lämpötila<br>Temperature |         |       | Kostea lämpötila<br>Wet-bulb temperature |         |       |
|-------------------------------------|--------------------------|---------|-------|--|---------|-------|
|                                     | a                        | b       | r     | a  | b       | r     |
| 20.06.–10.07.1972                   | 0,9972                   | 0,0860  | 0,996 | 1,0074                                   | 0,3406  | 0,982 |
| 16.04.–22.05.1973                   | 0,9974                   | 0,0104  | 0,987 | 1,0005                                   | 0,1032  | 0,987 |
| 06.06.–26.06.1973                   | 0,9963                   | 0,0050  | 0,991 | 0,9957                                   | 0,0720  | 0,990 |
| 26.06.–31.07.1973                   | 0,9177                   | 1,8282  | 0,960 | 0,9143                                   | 1,5463  | 0,900 |
| 13.05.–04.06.1974                   | 0,9557                   | 0,2362  | 0,967 | 0,9490                                   | -0,5155 | 0,978 |
| 12.08.–26.08.1974                   | 1,0223                   | -0,6417 | 0,982 | 1,0254                                   | -0,5385 | 0,981 |
| 01.09.–30.09.1975                   | 0,9253                   | -0,2674 | 0,984 | 0,9492                                   | -0,3882 | 0,980 |
| 01.10.–31.10.1975                   | 0,9189                   | -0,1662 | 0,988 | 0,9434                                   | -0,3570 | 0,974 |

### 3.4 Laboratoriomittaukset

Lysimetrien maalajeista on laboratorioissa määritetty vedenpidätysominaisuudet, hydrauliset johtavuudet ja lämpökapasiteetit.

Maan vedenpidätyskyvyn mittaaminen on sitoutumisalueella 0,2–1,0 m suoritettu käyttämällä ns. riippuvan vesipatsaan ja alueella 1,0–8,0 m alipaineen aikaansaamaa imua. Sitoutumisalueella 8–150 m on käytetty laitteita, joissa vettä irroittava imuvaikutus saadaan aikaan paineilman avulla. Sitoutumisalueella 0,2–10 m mittaukset on voitu suorittaa häiriintymättömistä näytteistä. Suuremmilla imun arvoilla näytteet ovat olleet häiritettyjä. Noudatettu mittaustekniikka on sama kuin mitä mm. Ruotsin maatalousyliopistossa on käytetty (Andersson & Wiklert 1972).

Tutkituista lysimetreistä on otettu vedenpidätyskäyrien mittaamista varten kaksi näytettä. Nurmipeitteisistä lysimetreistä on otettu kaksi näytettä myös pintakerroksesta.

Koska maan vesipitoisuus on pohjavedenpinnan alapuolella jäänyt selvästi huokoisuutta pienemmäksi, ei maanäytteitä ole laboratorioissa saatettu täysin vedellä kyllästetyksi, vaan ennen määritysten aloittamista näytteitä on pidetty veteen upotettuna noin viikon ajan. Tällä tavoin on saatu imun arvoa 0 cm vastaamaan keskimäärin seuraavat vesipitoisuudet: hieta 32 til. %, savi 47 til. % ja humus 57 til. %. Nämä arvot ovat sopusuunnassa neutronimittarilla suoritettujen kosteusmittausten kanssa. Kuvatulla menettelyllä saadut vedenpidätyskäyrät on esitetty kuvassa 6.

Hydrauliset johtavuudet on mitattu häiriintymättömistä näytteistä VTT:n geoteknillisen laboratorion laboratorio-ohjeiden mukaisesti sillä tavoin, että vesi on virrannut näytteiden läpi alhaalta ylös. Hieta- ja pintakerrosnäytteiden johtavuuksia mitattaessa on käytetty vakiona pysyvää painekorkeutta, savinäytteille muuttuvaa painekorkeutta. Määritykset on tehty kullekin maalajille 10 näytteestä. Johtavuuksien keskiarvot ja keskiarvon keskivirheet ovat olleet seuraavat:

|         |                   |                                 |
|---------|-------------------|---------------------------------|
| – hieta | $57,7 \pm 9,1$    | $\text{cm} \cdot \text{d}^{-1}$ |
| – savi  | $0,1 \pm 0,03$    | „                               |
| – pinta | $467,0 \pm 138,2$ | „                               |

Maalajien lämpökapasiteetit on määritetty kalorimetrillä (15 näytettä/maalaji). Keskiarvot ja keskiarvon keskivirheet ovat olleet seuraavat:

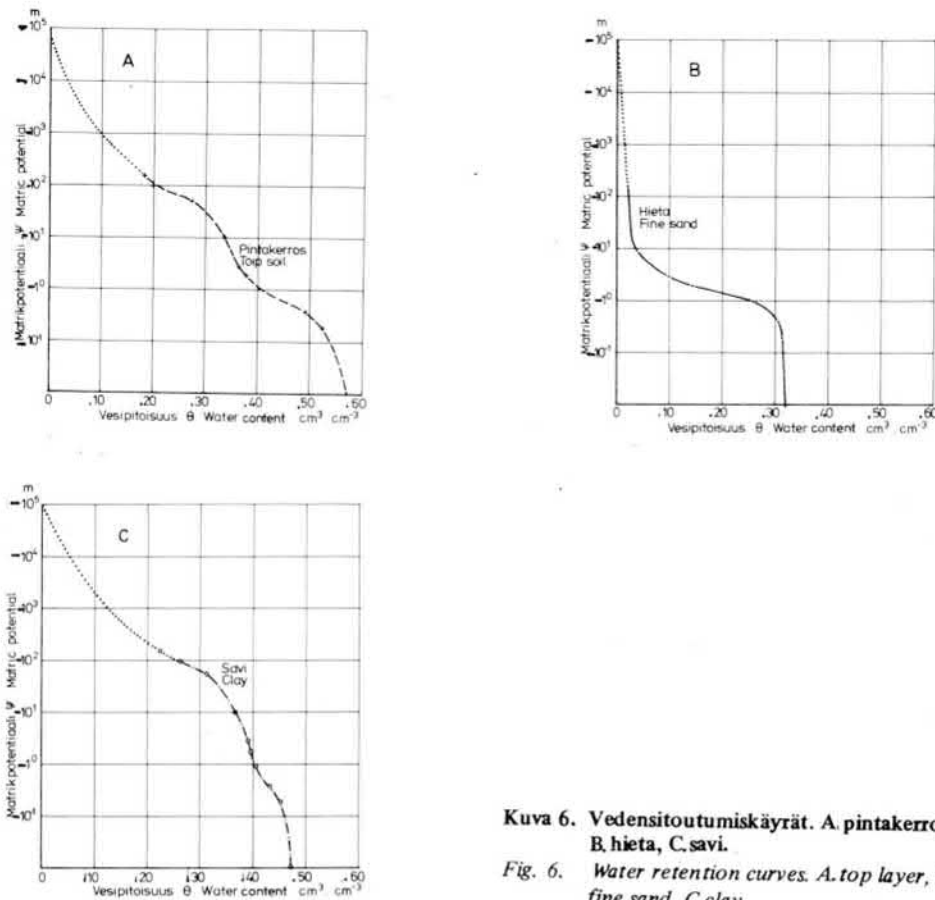
|         |                   |   |
|---------|-------------------|---|
| – hieta | $1,222 \pm 0,069$ | $\text{MJ} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{m}^{-3}$ |
| – savi  | $1,136 \pm 0,127$ | „   |
| – pinta | $1,141 \pm 0,301$ | „   |

Saatujen lämpökapasiteettiarvojen luotettavuutta arvioitaessa voidaan tukeutua De Vriesin (1966) kaavaan:

$$C = 1,92x_m + 2,88x_o + 4,18x_w \quad (9)$$

jossa

|       |   |
|-------|---|
| C     | = maanäytteen lämpökapasiteetti ( $\text{MJ} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{m}^{-3}$ ) |
| $x_m$ | = mineraaliaineksen tilavuusosuus ( $\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$ )                  |
| $x_o$ | = orgaanisen aineksen tilavuusosuus ( $\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$ )                |
| $x_w$ | = veden tilavuusosuus ( $\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$ ).                             |



Kuva 6. Vedensitoutumiskäyrät. A. pintakerros, B. hieta, C. savi.

Fig. 6. Water retention curves. A. top layer, B. fine sand, C. clay.

Orgaanisen aineen määrälle on saatu karkeahko arvio hehketushäviön perusteella. Hiedassa orgaanisen aineksen osuus on noin 0,5 til. %, savessa noin 3,3 til. % ja pintakerroksessa noin 8,1 til. %. Kun kiinteän aineksen määrä on hiedassa noin 56 til. %, savessa noin 47 til. % ja pintakerroksessa noin 43 til. %, saadaan lämpökapasiteetin arvoiksi vesipitoisuuden arvolla  $x_w = 0$ :

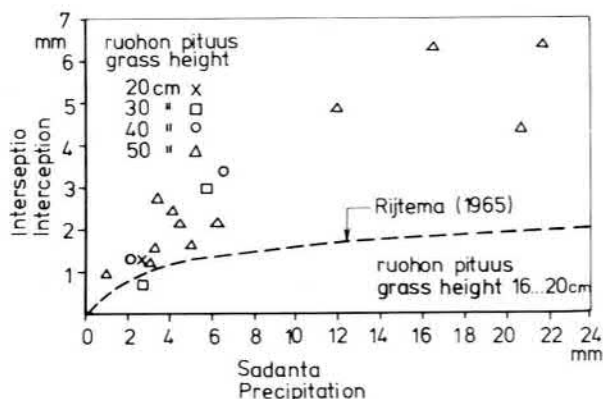
|         |   |
|---------|---|
| – hieta | $1,0877 \text{ MJ} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{m}^{-3}$ |
| – savi  | 0,9849 „  |
| – pinta | 1,0281 „  |

Laskennollista tietä saadut lämpökapasiteetin arvot ovat mitattuja hieman pienempiä: hiedan ja pintakerroksen osalta ero on noin 11 %, saven osalta 13 %. Nämä erot ovat siinä määrin vähäisiä, että laskettujen arvojen voidaan katsoa vahvistavan mittaamalla saatujen lämpökapasiteettiarvojen oikeellisuutta.

### 3.5 Interseptomittaukset

Osa sateesta pidättyy kasvuston pinnalle ja haihtuu siitä suoraan ilmaan. Interseption määrän selvittämiseksi on kesällä 1980 kentälle lysimetrien ulkopuolelle asennettu maanpinnan tasoon kolme ns. maataloussademittaria, joiden keräyspinnan halkaisija on 7 cm. Neljäs mittari on asennettu normaaliin maanpintasademittarin viereen. Mittarit on luettu sadepäivän jälkeisenä aamuna pipettiä käyttäen. Samalla on mitattu ruohon korkeus.

Kuvatulla järjestelyllä saatavien mittauservojen tarkkuus ei luonnollisesti ole kovin hyvä, mutta ne antavat käsityksen interseption suuruusluokasta. Saadut tulokset käyvät ilmi kuvasta 7, johon on merkitty myös Rijteman (1965) esittämä yhteys.



Kuva 7. Interseption riippuvuus vuorokausisadannasta ja ruohon pituudesta.  
Fig. 7. Dependence of interception on daily precipitation and height of grass.

### 3.6 Tutkimuskauden hydrometeorologinen luonne

Liitteeseen I on koottu keskeisten ilmastotekijöiden kuukausikeskiarvot touko-lokuussa 1972–79 sekä lämpötilan ja sadannan kuukausikeskiarvot Helsingissä normaali-kaudella 1931–60. Keskimääräisiltä lämpötiloiltaan tutkimusjakso on lähellä normaalia. Sadannoissa huomio kiinnittyy toukokuun ja kesäkuun normaalia pienempiin sademääriin.

Todellista haihduntaa analysoitaessa on käytetty mm. taulukossa 4 esitettyjä ajanjaksoja, jotka ovat määräytyneet suoritettujen maankosteusmittausten, automaattisen mitausjärjestelmän toiminnan ja ruohon pituuden perusteella. Vuoden 1972 jakso sijoittuu kesä-heinäkuuhun. Nämä kuukaudet ovat olleet normaalia selvästi lämpimämpiä ja sademääriltään lähellä normaalia. Vuonna 1973 jaksot ovat huhti-, touko-, kesä- ja heinäkuussa. Etenkin kesä- ja heinäkuu ovat olleet normaalia selvästi lämpimämpiä ja kuivempia. Vuonna 1974 toinen laskentajaksoista on suurimmalta osin toukokuussa, joka on ollut poikkeuksellisen kylmä ja sademäärältään lähellä normaalia. Toinen jaksoista on elokuussa, joka on ollut noin 1°C pitkäaikaista keskiarvoa kylmempi ja vähäsateinen. Syyskauden jaksot ovat vuodelta 1975. Sekä syys- että lokakuu ovat olleet normaalia lämpimämmät ja lokakuu on ollut lisäksi kuiva.

## 4. ASTIAHAIHDUNNAT

### 4.1 Käsittelyn tavoitteet

Eräs usein käytetty mahdollisuus arvioida maa-alueelta tapahtuvaa haihduntaa on mitata haihdunta haihdunta-astiasta ja muuntaa näin saadut arvot maa-alueelta tapahtuvaksi haihdunnaksi. Astiasta tapahtuva haihdunta edustaa vain itseään, sillä astia eroaa haihduttavana pintana maa- tai kasvipinnasta mm. värin, lämpötilan ja aerodynaamisten ominaisuuksien puolesta. Astian avulla on kuitenkin ajateltu saatavan kuva mikroilmaston "haihduntavaatimuksesta". Haihduttavan pinnan ominaisuuksista riippuu, kuinka astia-haihdunta vastaa todella tapahtuvaa haihduntaa ja millaista muuntomenettelyä voidaan ajatella käytettävän.

Tämän tutkimuksen päätavoitteena on astiahaihdunnan osalta selvittää muuntamis-mahdollisuuksia. Tarkastelu on tältä osin suoritettu kohdassa 5.34. Tässä luvussa tavoitteena on vertailla astiahaihduntoja keskenään, selvittää haihduntaerojen aiheuttajia ja laatia meteorologisiin tekijöihin perustuvia astiahaihduntamalleja.

### 4.2 Kuukausihaihdunnat

Taulukossa 5 on esitetty tutkimuskaudella mitattujen astiahaihduntojen summat kuukausittain. Kuukausihaihduntoja laskettaessa selvästi virheelliset havainnot on poistettu ja havaintosarjat on tältä osin täydennetty muihin astiahavaintoihin vertaamalla. Taulukoissa 6 ja 7 on vertailtu astiahaihduntoja keskenään kuukausittaisten keskimääräisten suhteiden perusteella. GGI-3000 ja Class A-haihduntojen osalta on esitetty myös erällä muilla paikakunnilla saatuja vastaavia tuloksia, joiden havaitaan poikkeavan Otaniemen arvoista. Erojen syynä voivat olla ilmastollisten tekijöiden erilaisuudet, mutta myös astioiden sijoitus ja itse astioiden ominaisuuksien erot (materiaali, väri) voivat aiheuttaa suhteissa eroavaisuuksia.

GGI-3000-astiasta tapahtuva haihdunta on Otaniemessä ollut keskimäärin 70 % siitä, mitä Class A-astiasta haihtuu. Haihduntojen suhteessa on selvä trendi: suhde on pienin keväällä, suurin syksyllä. Suhteen vaihtelujen keskeisin selitys lienee astioiden erilaisessa lämpötiloudessa (taulukko 8).

Anderssonin evaporimetrillä tapahtuva haihdunta noudattaa suhteellisen tarkoin Class A-astiahaihduntaa kuukaudesta riippumatta. Käyttätymisen samankaltaisuus johtuu evaporimetrin onnekaasta sijoituskorkeudesta. Syyskuussa 1979 mitattiin haihduntaa myös 0,5 m ja 0,1 m korkeudelle sijoitetuilla evaporimetreillä, jolloin haihdunnan arvot normaalimitariin verrattuna olivat 77 % ja 42 %. Johansson (1969) on aiemmin selvittänyt haihdunnan riippuvuutta sijoituskorkeudesta samankaltaisin tuloksin.

Taulukko 5. Haihduntasummat (mm) astioista kuukausittain.  
Table 5. Monthly evaporation (mm) from the pans.

| Vuosi<br>Year | Haihdunta-astia<br>Evaporation pan | Toukokuu<br>May   | Kesäkuu<br>June | Heinäkuu<br>July | Elokuu<br>August | Syyskuu<br>September | Lokakuu<br>October |
|---------------|------------------------------------|-------------------|-----------------|------------------|------------------|----------------------|--------------------|
| 1972          | Class A                            | 102               | 143             | 154              | 84               | 48                   | 14 <sup>1)</sup>   |
| 1973          | Class A                            | 103               | 151             | 195              | 107              | 36                   | —                  |
| 1974          | Class A                            | 108               | 137             | 105              | 94               | 51                   | 10 <sup>1)</sup>   |
|               | Andersson                          | —                 | 138             | 107              | 97               | 61                   | 15 <sup>1)</sup>   |
|               | GGI-3000                           | —                 | —               | 67               | 53               | 39                   | —                  |
| 1975          | Class A                            | 122               | 146             | 175              | 110              | 76                   | 25 <sup>1)</sup>   |
|               | Andersson                          | 119               | 145             | 173              | 104              | 75                   | 22 <sup>1)</sup>   |
|               | GGI-3000                           | 74                | 90              | 117              | 75               | 45                   | 19 <sup>1)</sup>   |
| 1976          | Class A                            | 98 <sup>2)</sup>  | 125             | 100              | 99               | 52                   | —                  |
|               | Andersson                          | 104 <sup>2)</sup> | 132             | 110              | 114              | 57                   | —                  |
|               | GGI-3000                           | 65 <sup>2)</sup>  | 85              | 78               | 85               | 45                   | 18                 |
| 1977          | Class A                            | 65 <sup>2)</sup>  | 120             | 95               | 74               | 43                   | —                  |
|               | Andersson                          | 60 <sup>2)</sup>  | 127             | 89               | 70               | 43                   | —                  |
|               | GGI-3000                           | 41 <sup>2)</sup>  | 85              | 75               | 52               | 32                   | —                  |
| 1978          | Class A                            | 108               | 138             | 108              | 75               | 32                   | —                  |
|               | Andersson                          | —                 | 149             | 95               | 69               | 36                   | —                  |
|               | GGI-3000                           | 70                | 91              | 68               | 67               | 38                   | —                  |
| 1979          | Class A                            | 109               | 150             | 89               | 98               | 44                   | 11 <sup>3)</sup>   |
|               | Andersson                          | 97                | 170             | 84               | 104              | 56                   | 13 <sup>3)</sup>   |
|               | GGI-3000                           | —                 | —               | 72               | 73               | 50                   | 8                  |

1) Havainnot ajalta 1.–15.10.

1) Observations from the period 1.–15.10.

2) „ „ 10.–31.5.

2) „ „ 10.–31.5.

3) „ „ 1.–19.10.

3) „ „ 1.–19.10.

Taulukko 6. GGI-3000-astiahaihdunnan keskimääräinen suhde Class A-astiahaihduntaan.  
Table 6. Average ratio of evaporation from the GGI-3000 pan and from the Class A pan.

| Kuukausi<br>Month    | $E_{GGI-3000}/E_{Class\ A}$ |  |                               |                                       |
|----------------------|-----------------------------|--|-------------------------------|---------------------------------------|
|                      | Otaniemi<br>1974 ... 79     | Valdai <sup>1)</sup><br>1949 ... 53, 1958 ... 63 | Dubovka <sup>1)</sup><br>1963 | Kassjöän <sup>2)</sup><br>1974 ... 76 |
| Toukokuu<br>May      | 0,64                        | 0,72   | —                             | —                                     |
| Kesäkuu<br>June      | 0,66                        | 0,73   | 0,85                          | 0,66                                  |
| Heinäkuu<br>July     | 0,71                        | 0,75   | 0,82                          | 0,67                                  |
| Elokuu<br>August     | 0,74                        | 0,84   | 0,82                          | 0,67                                  |
| Syyskuu<br>September | 0,86                        | 0,98   | 0,81                          | 0,74                                  |

1) WMO (1966) 2) Waldenström (1977)

Taulukko 7. Anderssonin evaporimetrihaidunnan keskimääräinen suhde Class-A-astiahaiduntaan Otaniemessä touko-syyskuussa 1974 . . . 79.

Table 7. Average ratio of evaporation from the Andersson evaporimeter and from the Class A-pan in May-September 1974-79.

| Kuukausi | Month     | $E_{\text{And}}/E_{\text{ClassA}}$ |
|----------|-----------|------------------------------------|
| Toukokuu | May       | 0,96                               |
| Kesäkuu  | June      | 1,06                               |
| Heinäkuu | July      | 0,98                               |
| Elokuu   | August    | 1,01                               |
| Syyskuu  | September | 1,08                               |

Taulukko 8. Maksimi- ja minimilämpötilojen kuukausikeskiarvot 2 metrin korkeudella ilmassa, Class A-astiassa ja GGI-3000-astiassa vuonna 1978.

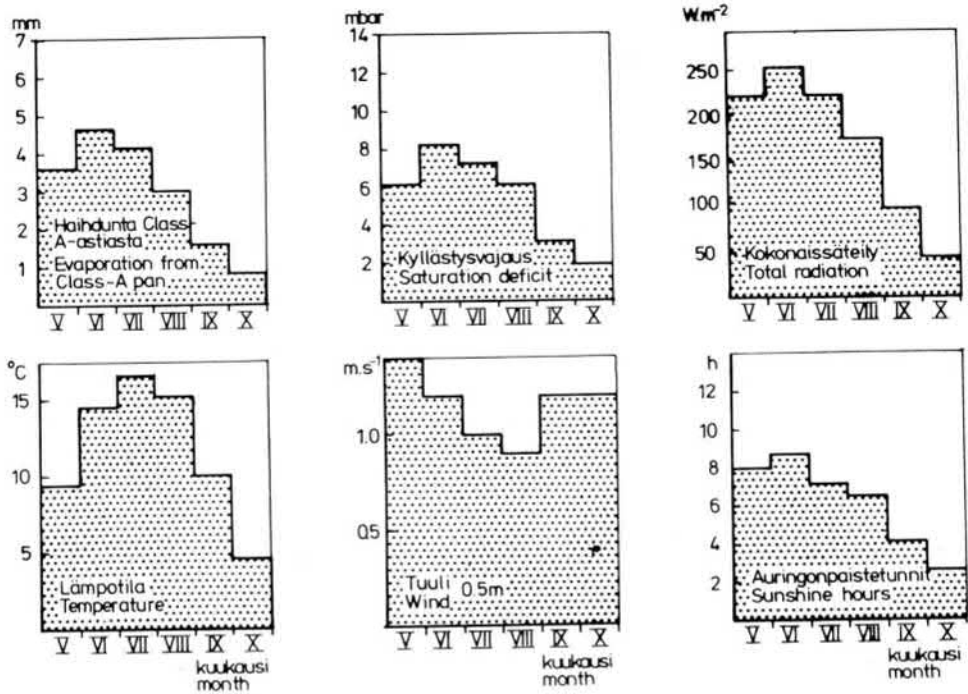
Table 8. Monthly means of maximum and minimum temperatures 2 meters above ground level, in a Class A-pan and in a GGI-3000 pan. In 1978.

|                       | Toukokuu<br>May |     | Kesäkuu<br>June |      | Heinäkuu<br>July |      | Elokuu<br>August |      | Syyskuu<br>September |      |
|-----------------------|-----------------|-----|-----------------|------|------------------|------|------------------|------|----------------------|------|
|                       | max             | min | max             | min  | max              | min  | max              | min  | max                  | min  |
| Ilma, 2 m<br>Air, 2 m | 16,4            | 6,1 | 18,8            | 8,1  | 19,0             | 9,9  | 17,4             | 9,7  | 11,9                 | 5,9  |
| Class A               | 17,8            | 8,1 | 22,1            | 11,2 | 22,4             | 12,5 | 19,3             | 11,5 | 12,5                 | 6,8  |
| GGI-3000              | 13,1            | 9,8 | 18,7            | 14,1 | 19,5             | 16,2 | 17,3             | 14,9 | 12,0                 | 10,9 |

### 4.3 Astiahaiduntojen riippuvuus meteorologisista tekijöistä

Kuvassa 8 esitetty haihdunta-arvojen ja meteorologisten tekijöiden rinnastaminen antaa viitteitä ilmastotekijöiden merkityksestä. Vielä selvemmin riippuvuuksia kuvaavat taulukoissa 9-11 esitetyt, vuorokausiarvoja käyttäen lasketut korrelaatiokertoimet. Selvästi käy ilmi, että haihdunta reagoi voimakkaimmin tulosäteilyn ja kyllästysvajakseen muutoksiin. Tuulen nopeuden ja haihdunnan korrelaatio on taas heikoin. Korrelaatiomat-riiseissa huomion ansaitseva piirre on tulosäteilyn ja kyllästysvajakseen sekä lämpötilan vahva riippuvuus toisistaan.

Eri astioista tapahtuvan haihdunnan erojen riippuvuutta ilmastotekijöistä on selvitetty määrittämällä erotusten ja ilmastotekijöiden väliset korrelaatiokertoimet. Taulukon 12 perusteella on todettavissa, että Class A-astiasta ja Anderssonin evaporimetristä tapahtuvan haihdunnan eroa ei voida selittää kokonaistulosäteilystä tai keskilämpötilasta johtuvaksi. Evaporimetri reagoi herkemmin kyllästysvajakseen kasvuun ja sadannan kasvaessa



Kuva 8. Class A-astiahähdunnan ja eräiden meteorologisten tekijöiden kuukausikeskiarvot vuosina 1972-79.

Fig. 8. Monthly means of evaporation from Class A-pan and meteorological factors in 1972-79.

Taulukko 9. Class A-astiahähdunnan riippuvuutta meteorologisista tekijöistä kuvaavat korrelaatiokertoimet.

Table 9. Correlation coefficients describing the dependence of evaporation from the Class A-pan on meteorological factors.

| Muuttuja<br>Variable                  | Hähdunta<br>Evaporation | Tulosäteily<br>Incoming<br>radiation | Kyllästysvajaus<br>Saturation<br>deficit | Lämpötila<br>Temperature | Tuulen nopeus<br>Wind velocity |
|---------------------------------------|-------------------------|--------------------------------------|--|--------------------------|--------------------------------|
| Hähdunta<br>Evaporation               | 1,00                    | 0,85                                 | 0,83                                     | 0,55                     | 0,15                           |
| Tulosäteily<br>Incoming radiation     |                         | 1,00                                 | 0,80                                     | 0,41                     | -0,07                          |
| Kyllästysvajaus<br>Saturation deficit |                         |                                      | 1,00                                     | 0,56                     | -0,06                          |
| Lämpötila<br>Temperature              |                         |                                      |  | 1,00                     | -0,08                          |
| Tuulen nopeus<br>Wind speed           |                         |                                      |  |                          | 1,00                           |



Taulukko 10. Anderssonin evaporimetrihaihdunnan riippuvuutta meteorologisista tekijöistä kuvaavat korrelaatiokertoimet.

Table 10. Correlation coefficients describing the dependence of evaporation from the Andersson evaporimeter on meteorological factors.

| Muuttuja<br>Variable                  | Haihdunta<br>Evaporation | Tulosäteily<br>Incoming<br>radiation | Kyllästysvajaus<br>Saturation<br>deficit | Lämpötila<br>Temperature | Tuulen nopeus<br>Wind velocity |
|---------------------------------------|--------------------------|--------------------------------------|--|--------------------------|--------------------------------|
| Haihdunta<br>Evaporation              | 1,00                     | 0,80                                 | 0,85                                     | 0,47                     | 0,18                           |
| Tulosäteily<br>Incoming radiation     |                          | 1,00                                 | 0,82                                     | 0,41                     | -0,12                          |
| Kyllästysvajaus<br>Saturation deficit |                          |                                      | 1,00                                     | 0,53                     | -0,08                          |
| Lämpötila<br>Temperature              |                          |                                      |  | 1,00                     | -0,03                          |
| Tuulen nopeus<br>Wind speed           |                          |                                      |  |                          | 1,00                           |

myös haihduntojen erotus kasvaa. Viimeksi mainitulle seikalle erään selityksen tarjoaisi Class A-astiasta tapahtuva roiskunta, jonka voidaan perustellusti odottaa suurenevan sadannan intensiteetin myötä.

Class A-astiasta ja GGI-3000-astiasta tapahtuneen vuorokausihaidunnan erotus näyttää korrelaatiokertoimien perusteella kasvavan kokonaistulosäteilyn ja kyllästysvajauksen kasvaessa ja ilman keskilämpötilan noustessa. Sadannan ja erotuksen välinen negatiivinen korrelaatiokerroin ei ole selitettävissä GGI-3000-sademittarin antamilla pienimmillä arvoilla, sillä nämä arvot ovat olleet suurillakin sateilla sopusoinnussa maanpintamittarista saatujen lukemien kanssa.

Taulukko 11. GGI-3000-astiahaidunnan riippuvuutta meteorologisista tekijöistä kuvaavat korrelaatiokertoimet.

Table 11. Correlation coefficients describing the dependence of evaporation from the GGI-3000 pan on meteorological factors.

| Muuttuja<br>Variable                  | Haihdunta<br>Evaporation | Tulosäteily<br>Incoming<br>radiation | Kyllästysvajaus<br>Saturation<br>deficit | Lämpötila<br>Temperature | Tuulen nopeus<br>Wind velocity |
|---------------------------------------|--------------------------|--------------------------------------|--|--------------------------|--------------------------------|
| Haihdunta<br>Evaporation              | 1,00                     | 0,58                                 | 0,58                                     | 0,32                     | 0,12                           |
| Tulosäteily<br>Incoming radiation     |                          | 1,00                                 | 0,83                                     | 0,48                     | -0,12                          |
| Kyllästysvajaus<br>Saturation deficit |                          |                                      | 1,00                                     | 0,57                     | -0,07                          |
| Lämpötila<br>Temperature              |                          |                                      |  | 1,00                     | -0,03                          |
| Tuulen nopeus<br>Wind speed           |                          |                                      |  |                          | 1,00                           |

Taulukko 12. Astiahaiduntojen erotusten riippuvuutta ilmastotekijöistä kuvaavat korrelaatiokertoimet.

Table 12. Correlation coefficients describing the dependence of the differences of the pan evaporations on meteorological factors.

| Erotus<br>Difference                  | Tulo säteily<br>Incoming<br>radiation | Kyllästysvajaus<br>Saturation<br>deficit | Lämpötila<br>Temperature | Tuulen nopeus<br>Wind velocity | Sadanta<br>Precipitation |
|---------------------------------------|---------------------------------------|--|--------------------------|--------------------------------|--------------------------|
| $E_{\text{Class A}} - E_{\text{And}}$ | -0,05                                 | -0,22                                    | -0,07                    | -0,14                          | 0,37                     |
| $E_{\text{Class A}} - E_{\text{GGI}}$ | 0,55                                  | 0,50                                     | 0,30                     | 0,01                           | -0,29                    |
| $E_{\text{And}} - E_{\text{GGI}}$     | 0,67                                  | 0,72                                     | 0,29                     | 0,37                           | -0,26                    |

Anderssonin evaporimetrihaidunnan ja GGI-3000-astiahaidunnan vertailu osoittaa eron kasvavan kyllästysvajauksen, tulosäteilyn, lämpötilan ja tuulen nopeuden kasvaessa. Sadannan kasvu näyttää sen sijaan pienentävän eroa.

Taulukoissa 9–12 esitettyjä korrelaatiokertoimia laskettaessa on käytetty samoja vuorokausihavaintoja, joten laskennassa on ollut mukana 432 havaintoa ja saadut kertoimet ovat suoraan vertailukelpoisia. Laskettujen korrelaatiokertoimien tilastollisesta merkitsevyydestä saadaan kuva, kun todetaan, että em. havaintojen lukumäärällä t-testin mukaan korrelaatiokerroin  $> 0,15$  on erittäin merkitsevä ja korrelaatiokerroin 0,08 vielä melkein merkitsevä.

#### 4.4 Astiahaiduntamallit

Astiahaiduntojen määrittämiseen meteorologisten tekijöiden avulla on tarvetta pääasiassa kolmesta syystä: 1) puutteellisten havaintosarjojen täydentäminen, 2) haihdunta-arvojen laskenta paikoille, joista astiahavainnot puuttuvat, mutta joista ilmaastohavainnot ovat käytettävissä sekä 3) astiahaidunta-arvojen luotettavuuden analysointi:

Penman (1948) lähtien Daltonin kaavasta ja haihduttavan pinnan energiataseesta päätyi kaavaansa (10) (ks. kohta 5.223):

$$E = \frac{\Delta R_n + \gamma \cdot (e_s - e_a) \cdot f(u)}{\Delta + \gamma} \quad (10)$$

jossa

- $E$  = haihdunta ( $\text{mm} \cdot \text{d}^{-1}$ )
- $\Delta$  = vesihöyrynpaineikäyrän kaltevuus ( $\text{mbar} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$ )
- $\gamma$  = psykrometrivakio ( $\text{mbar} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$ )
- $e_s$  = vesihöyryn kyllästyspaine 2 m:n korkeudella (mbar)
- $e_a$  = vallitseva vesihöyrynpaine 2 m:n korkeudella (mbar)
- $f(u)$  =  $0,27(1 + 0,54 u)$  = ns. tuulifunktio
- $u$  = tuulen nopeus 2 m:n korkeudella ( $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ).

Penmanin kaavan funktionaalista muotoa lähtökohtanaan pitäen Kohler *et al.* (1955) laativat Class A-astiahaidunnalle nomogrammin, jonka Lamoreux (1962) muunsi tietokonelaskentaan sopivaksi. Tämä ns. USWB:n astiahaiduntakaava saa eurooppalisiin yksiköihin muunnettuna muodon (11):

$$E_{\text{Class A}} = 25,4 \frac{A + B - 0,0001}{C} \quad (11)$$

jossa

$$A = e^{(1,8T_m - 180)} [0,1024 - 0,01066 \ln(0,484R_s)]$$

$$B = 0,001127(e_s - e_a)^{0,88} (0,37 + 0,2202 u_{0,6})$$

$$C = \frac{4,7988 \cdot 10^{10} e^{-7,482,6/(1,8T_m + 430,36)}}{(1,8T_m + 430,36)^2} + 0,025$$

$$R_s = \text{tulosäteily (W m}^{-2}\text{)}$$

$$T_m = \text{vuorokauden keskilämpötila (}^\circ\text{C)}.$$

Heldal (1969) perusti lineaariset regressiomallinsa Penmanin kaavan keskeisiin parametreihin, säteilyyn ja kyllästysvajauksen ja tuulifunktion vakiolla kerrottuun tuloon ja sai laskentakaavat Class A-astialle, Aslyngin haihdunta-astialle, Anderssonin evaporimetrielle ja Piche-atmometrille. Johansson (1969) käytti myös monimuuttujaregressiota selvittäessään Anderssonin evaporimetristä tapahtuvan haihdunnan estimointimahdollisuuksia. Samaa käsittelytapaa ovat soveltaneet Iruthayaray & Morachan (1978) tosin täysin erilaisissa ilmasto-olosuhteissa Intiassa.

Tässä tutkimuksessa on tavoitteena ollut määrittää touko-lokakuun aikana astiasta tapahtuvalle haihdunnalle parhaiten sopivat tilastolliset mallit. Estimointimallien haku on tapahtunut pitkälti samojen periaatteiden mukaan, joita Johansson on esittänyt. Lähtökohdana ovat olleet Daltonin ja Penmanin yhtälöt ja tällä tavoin on pyritty fyysikaalisesti perusteltuihin malleihin. Kun kyllästysvajaus, lämpötila ja tuulen nopeus ovat tekijöitä, joista on maassamme pitkät havaintosarjat, on myös näihin tekijöihin perustuvalle mallille haettu kertoimet. Näiden ohella on tarkasteltu USWB:n kaavan soveltuvuutta Class A-astiasta tapahtuvan haihdunnan kuvaamiseen. Haihduntamalleja laskettaessa on selvästi virheelliset havainnot poistettu. Tällöin on käsittelyyn jäänyt havaintoja seuraavasti: Class A 852, Anderssonin evaporimetri 508, GGI-3000 482 kpl. Aineistojen eräät tilastolliset tunnusluvut käyvät ilmi liitteestä 2.

Taulukossa 13 on esitetty saatujen haihduntamallien regressiokertoimet, vakiot, selityssasteet ja estimaatin standardipoikkeamat. Tilastollista tietä on haihdunta likipitään samalla tarkkuudella selitettävissä Class A-astiasta ja Anderssonin evaporimetristä. Class A-astian osalta parhaassa mallissa selityssaste on 0,85 ja estimaatin standardipoikkeama 0,74 mm, joka on noin 21 % käsittelyssä mukana olevien havaintojen keskiarvosta. Anderssonin evaporimetrihaihdunnalle paras selityssaste on 0,84 ja estimaatin standardipoikkeama 0,79 mm (~23 % keskiarvosta). Edellisiä selvästi heikommin onnistuu GGI-3000-astiasta tapahtuvan haihdunnan estimointi, sillä parhaimman mallin selityssaste jää niinkin alhaiseksi kuin 0,42 estimaatin standardipoikkeaman ollessa 1,11 mm eli 48 % havaintojen keskiarvosta.

USWB:n astiahaihduntakaavaa ja mitattuja Class A-astiahaihduntoja vertailtaessa on selityssasteeksi saatu 0,84 ja estimaatin standardipoikkamaksi 1,03 mm. Näinollen Class A-astiasta tapahtuvaa haihduntaa parhaiten kuvaa lineaarinen malli:

$$E_{\text{Class A}} = 1,83 \cdot 10^{-3} \cdot R_s + 0,092 (1 + 1,48 u_{0,5})(e_s - e_a) - 0,02 \quad (12)$$

Anderssonin evaporimetrihaihduntaa ja GGI-3000-astiahaihduntaa parhaiten kuvaavat mallit ovat vastaavaa muotoa.

Taulukko 13. Astiahaiduntaa kuvaavien lineaaristen mallien regressiokertoimet, vakiot, selitysasteet ja estimaatin standardipoikkeamat.

Table 13. Regression coefficients, constants, determination coefficients and standard deviations of the estimate, of the linear models describing pan evaporation.

| Malli n:o<br>Model n:o             | Tulo-<br>säteily<br>In-<br>coming<br>radiation | Kylläs-<br>tysva-<br>jaus<br>Saturation<br>deficit | Keski-<br>lämpö-<br>tila<br>Mean<br>temperature | Tuulen<br>nopeus<br>(0,5 m)<br>Wind<br>speed | Tuulen<br>nopeus<br>x kylläs-<br>tysva-<br>jaus<br>Wind<br>speed x<br>saturat-<br>ion<br>deficit | Vakio<br>Constant | Selitys-<br>aste<br>Index<br>of det-<br>ermin-<br>ation | Estimaatin<br>standardi-<br>poikkeama<br>Standard<br>deviation<br>of the<br>estimate |
|------------------------------------|--|--|---|--|--|-------------------|---|--|
| 1 Class A<br>Andersson<br>GGI-3000 |  | 0,341  |   |  | 0,137  | 0,558             | 0,74  | 0,96   |
|                                    |  | 0,340  |   |  | 0,177  | 0,261             | 0,80  | 0,89   |
|                                    |  | 0,161  |   |  | 0,087  | 0,831             | 0,37  | 1,14   |
| 2 Class A<br>Andersson<br>GGI-3000 | $1,83 \cdot 10^{-3}$                           | 0,092  |   |  | 0,136  | -0,015            | 0,85  | 0,74   |
|                                    | $1,28 \cdot 10^{-3}$                           | 0,161  |   |  | 0,184  | -0,086            | 0,84  | 0,79   |
|                                    | $0,95 \cdot 10^{-3}$                           | 0,024  |   |  | 0,093  | 0,589             | 0,42  | 1,11   |
| 3 Class A<br>Andersson<br>GGI-3000 | $2,15 \cdot 10^{-3}$                           |  |   |  | 0,159  | 0,009             | 0,84  | 0,75   |
|                                    | $1,89 \cdot 10^{-3}$                           |  |   |  | 0,226  | -0,056            | 0,82  | 0,83   |
|                                    | $1,05 \cdot 10^{-3}$                           |  |   |  | 0,100  | 0,593             | 0,41  | 1,11   |
| 4 Class A<br>Andersson<br>GGI-3000 |  | 0,445  | 0,060   | 0,626  |  | -0,661            | 0,74  | 0,97   |
|                                    |  | 0,515  | 0,123   | 0,787  |  | -0,695            | 0,78  | 0,94   |
|                                    |  | 0,255  | -0,005  | 0,359  |  | 0,493             | 0,36  | 1,16   |

Havaintovuorokausien määrä: Class A 852 kpl, Anderssonin evaporimetri 508 kpl, GGI-3000 482 kpl.  
Number of days: Class A 852, Andersson evaporimeter 508, GGI-3000 482.

$$E_{\text{And}} = 1,28 \cdot 10^{-3} \cdot R_s + 0,161 (1 + 1,14 u_{0,5})(e_s - e_a) - 0,09 \quad (13)$$

$$E_{\text{GGI}} = 0,95 \cdot 10^{-3} R_s + 0,024(1 + 3,88 u_{0,5})(e_s - e_a) + 0,59 \quad (14)$$

Anderssonin evaporimetrille on Johansson (1969) suosittanut taulukossa 12 esitetystä mahdollisuuksista tyyppiä 3 olevaa kaavaa

$$E_{\text{And}} = 1,79 \cdot 10^{-3} R_s + 0,21 \cdot u_{1,5}(e_s - e_a) + 0,14 \quad (15a)$$

kun taas vastaavaksi ilmaisuksi nyt on saatu

$$E_{\text{And}} = 1,89 \cdot 10^{-3} R_s + 0,226 u_{0,5}(e_s - e_a) - 0,06 \quad (15b)$$

Kertoimet ja vakiot toki eroavat toisistaan, mutta eroja voidaan pitää verrattain pieninä, kun otetaan huomioon, että Johanssonilla oli käytettävissä 181 havaintovuorokautta ja että kyllästysvajaus oli mitattu 1,5 m korkeudella.

Kaavoja (12)–(14) on käytetty kohdassa 5.34 täydennettäessä puuttellisia astiahavaintosarjoja.

## 5. POTENTIAALINEN EVAPOTRANSPIRAATIO

### 5.1 Käsitteen tulkinta

H.L. Penman määritteli potentiaalisen evapotranspiraation (PET) laajalta alueelta tapahtuvaksi haihdunnaksi, kun maa on vihreän, lyhyen, aktiivisesti kasvavan kasvillisuuden täysin peittämä eikä vedenpuute rajoita haihduntaa ("... evaporation from an extended surface of short green crop, actively growing, completely shading the ground, of uniform height and not short of water" (Penman *et al.* 1956)). Samankaltaisen määritelmän oli aiemmin esittänyt Thornthwaite (1945) kuitenkin rajaamatta haihduttavan kasvuston pituutta. Blaney (1954) käyttää termiä "consumptive use", jonka hän toteaa riippuvan ilmastollisten tekijöiden ohella kasvityypistä ja kasvuvaiheesta. Konstantinov (1966) määrittelee potentiaalisen evapotranspiraation maksimaaliseksi mahdolliseksi haihdunnaksi pinnalta, jonka vesivarastot ovat rajoittamattomat ("the underlying surface whose moisture reserves are unlimited"). Van Wijk ja de Vries (1954) käsittävät ko. suureen maksimihaihdunnaksi kostealta pinnalta, jolla on sama muoto, väri ja dimensiot kuin tarkastelun kohteena olevalla pinnalla ("the maximum evaporation rate from a wet surface of similar shape, colour and dimensions as the crop under consideration"). Van Bavel (1966) asettaa ainoaksi ehdoksi, että haihduttavan pinnan on oltava kostean ("when the surface is wet and imposes no restriction upon the flow of water vapour the potential value is reached"). Tanner (1968) on samoilla linjoilla ("evaporation that would obtain from a surface of any configuration under given meteorological conditions if there were no saturation deficit at the surface – a condition of adequate water supply"). Kohler & Richards (1962) luopuvat kasvipinnan käytöstä vertailukohteena ja määrittelevät potentiaalisen evapotranspiraation vapaasta vedenpinnasta tapahtuvaksi haihdunnaksi. Johansson (1970) tekee samoin ja ottaa lähtökohdaksi Anderssonin evaporimetrista tapahtuvan haihdunnan, jota hän nimittää potentiaaliseksi evaporaatioksi. Suomeen on juurtunut PET:n määritelmä Penmanin esittämässä muodossa (Mustonen 1964, Mustonen & Seuna 1969, Hooli 1971, Seuna 1977) ja siitä on käytetty nimitystä ilmastollinen haihduttamiskyky.

Penmanin ehdottamassa määritelmässä advektion vaikutus on pyritty poistamaan sanalla "extended", kasvuston pituuden vaikutus sanalla "short", haihduttavan pinnan epätasaisuuksien vaikutus sanalla "uniform" ja maan kosteusilanteen vaikutus ilmaisulla "not short of water". Määritelmän avulla on potentiaalinen evapotranspiraatio pyritty saamaan ainoastaan ilmastotekijöistä riippuvaksi. Tällöin joudutaan olettamaan, että haihduttavassa pinnassa vallitsee kyllästyskosteus. Näin on asianlaita sateen jälkeen (interseptiohaihdunta), mutta muulloin tätä ei voida pitää itsestään selvyytensä. "Not short of water" jättää kasvin huomioonottamatta edellyttämällä, että ainoastaan maaperän kosteusolosuhteet vaikuttavat ilmastotekijöiden ohella haihdunnan määrään. Kuitenkin on todettu (mm. Endrödi & Rijtema 1969), että säteilyn ollessa voimakasta ja

ilman kyllästysvajauksen suuren, kasvin läpi ei pääse vettä PET:n edellyttämiä määriä, vaikka maankosteus ei haihdunna rajoitakaan. Samoin on juuristokerroksen lämpötilan todettu vaikuttavan voimakkaasti transpiraation määrään (Ehrler 1963, Tew *et al.* 1963). Ilmaisu "... a short green crop actively growing" rajoittaa määritelmän täyttävän jakson Etelä-Suomessa touko-lokakuuhun, Pohjois-Suomessa kesä-syyskuuhun.

## 5.2 Määrittämismahdollisuudet

### 5.21 Suorat mittaukset

Potentiaalisen evapotranspiraation suora mittaaminen perustuu yleensä vesitaseen käyttöön. Mittausvälineinä käytetään lysimetrejä, joita on eri kokoisia ja eri tavoin mitattavia. Pelton'in (1964) mukaan ensimmäisen lysimetrin rakensi Pariisiin lähellä d'Hire vuonna 1628. Ensimmäinen punnitseva lysimetri rakennettiin Saksassa vuonna 1906 von Seelhorstin toimesta. Hydraulinen järjestelmä otettiin käyttöön Neuvostoliitossa ja USA:ssa 1950-luvulla. Suomessa Renqvist rakennutti 1930-luvun lopulla punnitsevan lysimetrin, jossa maamassan tilavuus oli  $1 \text{ m}^3$  (Tulvakomitea 1939, Porkka 1956).

Idealisessa tilanteessa lysimetrin tulisi sijaita keskellä laajaa, muodoltaan tasaista aluetta. Siinä olevan maan tulisi olla häiriintymätöntä ja sen pintakerroksen tulisi olla potentiaalisen haihdunnan sallivaa. Advektion vaikutusta ei saisi esiintyä, ei myöskään reunavaikutusta ja lysimetrin ja sen ympäristön tulisi olla aerodynaamisilta ominaisuuksiltaan samoja. Mittauslaitteiden tulisi olla sellaisia, että niillä pystytään mittaamaan haihdunnan maamassaan aiheuttamia erittäin pieniä painovaihteluita. Nämä ovat siinä määrin vaikeita vaatimuksia täyttää, ettei voida katsoa rakennetun ideaalista lysimetriä.

Lysimetrimittauksiin liittyvistä epävarmuustekijöistä huolimatta niiden käyttöä puoltaa mm. se seikka, että tulosten tulkinta on suoraviivaista ja helposti ymmärrettävää. Tästä syystä lysimetrejä on käytetty ja käytetään muiden haihdunnan arviointiin kehitettyjen menetelmien oikeellisuuden testaamiseen.

### 5.22 Laskennalliset menetelmät

#### 5.221 Yleisiä näkökohtia

Lysimetreillä mitattuja pitkiä haihdunnan havaintosarjoja ei ole harvoja koeasemia lukuunottamatta saatavissa, joten PET:n määrittäminen joudutaan käytännössä suorittamaan empiirisillä tai puoliempiirisillä kaavoilla. Puhtaasti empiiriset kaavat perustuvat tilastollista tietä todennettavissa olevaan oletukseen, että haihdunnan ja tietyn tai tiettyjen mitattujen ilmastotekijöiden välillä vallitsee riippuvuussuhde. Puoliempiiriset mallit ovat teoreettisesti empiirisistä paremmin perusteltuja, joskin niissäkin joudutaan turvautumaan kokeellisesti määrättyjen parametrien käyttöön. Kehitetyt laskentamenetelmät perustuvat yleensä tietyllä paikkakunnalla tai tietyissä ilmasto-oloissa tehtyihin mittauksiin, joten niiden suora soveltaminen toisentyyppisellä ilmastoalueella on arveluttavaa.

## 5.222 Empiiriset menetelmät

Pelkästään ilman lämpötilaan perustuvista laskentamenetelmistä yleisimmin käytettyjä ovat Thornthwaiten (1948) ja Blaney ja Criddlen (1950) kehittämät menetelmät. Molemmissa lähtökohdana on oletus, että tulosäteily jakaantuu vakiona pysyviin osuuksiin haihdunnan ja ilman lämmittämisen kesken. Thornthwaiten menetelmässä arviointikaava on muotoa (16):

$$E_p = 16c \left( \frac{T_m}{I} \right)^a \quad (16)$$

jossa

- $E_p$  = potentiaalinen haihdunta ( $\text{mm} \cdot \text{kk}^{-1}$ )  
 $c$  = alueen sijainnista riippuva kerroin  
 $T_m$  = kuukauden keskilämpötila ( $^{\circ}\text{C}$ )  
 $I$  = lämpöindeksi, joka lasketaan kaavalla  $I = \sum_1^{12} (T_n/5)^{1,514} \cdot T_n$  on normaali kuukausilämpötila (1931–60)  
 $a = 67,5 \cdot 10^{-8} I^3 - 77,1 \cdot 10^{-6} I^2 + 0,0179 I + 0,492$ .

Blaney ja Criddlen esittämä kaava on muotoa (17):

$$E_p = k \cdot p \cdot (0,457 \cdot T_m + 8,13) \quad (17)$$

jossa

- $E_p$  = potentiaalinen haihdunta ( $\text{mm} \cdot \text{kk}^{-1}$ )  
 $k$  = kasvin tyypistä ja kehitysvaiheesta riippuva kerroin  
 $P$  = kuukauden prosenttiosuus vuoden auringonpaistetunneista

USDA:n (1967) ohjeissa menetelmää on muunneltu siten, että kerroin  $k$  on ilmaistu tulona  $k = k_t \cdot k_c$ , jossa  $k_t$  = kuukauden keskilämpötilasta johtuva ilmastokerroin ja  $k_c$  = kasvin tyypistä ja kehitysvaiheesta riippuva kerroin.

Ilman lämpötilaan ja auringon kokonaissäteilyyn perustuvia arviointimenetelmiä ovat esittäneet Turc (1954, 1955, 1961), Makkink (1957) ja Jensen & Haise (1963). Mikäli maankosteus ei rajoita haihduntaa ja ilman keskilämpötila on korkeampi kuin  $-2^{\circ}\text{C}$ , voidaan 10 vuorokauden haihdunta laskea Turcin esittämän alkuperäisen kaavan (18) perusteella.

$$E_p = \frac{P + 80}{\sqrt{1 + \left( \frac{P + 45}{L} \right)^2}} \quad (18)$$

jossa

- $E_p$  = potentiaalinen haihdunta ( $\text{mm} \cdot 10 \text{ d}^{-1}$ )  
 $P$  = sadanta ( $\text{mm} \cdot 10 \text{ d}^{-1}$ )  
 $L = \frac{(T_m + 2) \sqrt{0,484 R_s}}{16}$

$$R_s = \text{tulosäteily (W} \cdot \text{m}^{-2}\text{)}$$

Myöhemmin Turc (1961) on esittänyt potentiaalisen evapotranspiraation laskemiseksi vastaaville 10 vuorokauden jaksoille kaavan (19):

$$E_P = \frac{0,13 T_m (0,484 \cdot R_s + 50)}{T_m + 15} \quad (19)$$

Makkink (1975) perusti ratkaisunsa Penmanin kehittämään menetelmään, jota hän pyrki yksinkertaistamaan sellaiseksi, että siinä tarvittavat parametrit olisivat helposti saatavissa tai laskettavissa. Haihdunnan kuukausiarvojen laskemiseksi hän esittää kaavaa (20):

$$E_P = \frac{0,484 \cdot 0,61}{59} R_s \frac{\Delta}{\Delta + \gamma} - 0,12 \quad (20)$$

jossa

$$\begin{aligned} E_P &= \text{potentiaalinen haihdunta (mm} \cdot \text{d}^{-1}\text{)} \\ \Delta &= \text{vesihöyrynpainekäyrän kaltevuus (mbar} \cdot \text{°C}^{-1}\text{)} \\ \gamma &= \text{psykrometrivakio (0,66 mbar} \cdot \text{°C}^{-1}\text{)} \end{aligned}$$

Jensen-Haise menetelmässä käytetään kaavaa (21):

$$E_P = (0,025 T_m + 0,08) \cdot 0,484 \cdot \frac{R_s}{59} \quad (21)$$

jossa

$$E_P = \text{potentiaalinen haihdunta (mm} \cdot \text{d}^{-1}\text{)}$$

Ilman lämpötila ja suhteellinen kosteus ovat parametreina Ivanovin kehittämässä kaavassa (21) (Konstantinov 1963):

$$E_P = 0,0018(T_m + 25)^2(100 - F) \quad (22)$$

jossa

$$\begin{aligned} E_P &= \text{potentiaalinen haihdunta (mm} \cdot \text{kk}^{-1}\text{)} \\ F &= \text{suhteellinen kosteus (\%)} \end{aligned}$$

Haude (1954) käytti pelkästään klo 14 mitattua ilman kyllästysvajausta (kaava 23):

$$E_P = f(e_s - e_a)_{14} \quad (23)$$

jossa

$$\begin{aligned} E_P &= \text{potentiaalinen haihdunta (mm} \cdot \text{d}^{-1}\text{)} \\ (e_s - e_a)_{14} &= \text{ilman kyllästysvajausta klo 14 (mbar)} \\ f &= \text{kuukaudesta riippuva kerroin.} \end{aligned}$$



Kohler *et al.* (1955) lähtien Penmanin kaavan funktionaalisesta muodosta kehittivät nomogrammin paitsi Class-A-astiasta myös järvestä tapahtuvalle haihdunnalle. Kohler & Richards (1962) päätyivät käsitykseen, että järvihaihdunta käy sellaisenaan myös PET:n mittana. Lamourex (1962) muunsi järvihaihdunnalle laaditun nomogrammin muotoon:

$$E_L = 25,4 \frac{A + B - 0,0001}{C} \quad (24)$$

jossa

$$\begin{aligned} A &= e^{(1,8 T_m - 180)} [0,1024 - 0,01066 \ln(0,484 R_s)] \\ B &= 0,001127(e_s - e_a)^{0,88} (0,37 + 0,2202 u_{0,6}) \\ C &= \frac{6,8554 \cdot 10^{10} \cdot e^{[-7482,6/(1,8 T_m + 430,36)]}}{(1,8 T_m + 430,36)^2} + 0,015 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} E_L &= \text{järvihaihdunta (= } E_p) \text{ (mm} \cdot \text{d}^{-1}\text{)} \\ u_{0,6} &= \text{tuulen nopeus 0,6 metrin korkeudella (m} \cdot \text{s}^{-1}\text{)} \end{aligned}$$

Edellä esitetyt empiiriset kaavat on kehitetty maa-alueelta tapahtuvan maksimihaidunnan laskemiseksi. Täten tarkasti tulkiten niillä ei saada estimaatteja juuri sille haihdunnalle, joka meillä on määritelty potentiaaliseksi. Empiirisiä kaavoja käytettäessä on syytä huomata, että niitä ei yleensä ole tarkoitettu vuorokausihaiduntojen määrittämiseen, vaan aikajakso on monissa tapauksissa kuukauden pituinen.

### 5.223 Penmanin kaava

Penman (1948) perusti ratkaisunsa Daltonin kaavaan (25)

$$LE = (e'_s - e_a) \cdot f(u) \quad (25)$$

jossa

$$\begin{aligned} LE &= \text{haihduntaan kuluva energia (W} \cdot \text{m}^{-2}\text{)} \\ e'_s &= \text{höyrynpaine haihduttavalla pinnalla (mbar)} \\ e_a &= \text{höyrynpaine ilmassa (mbar) korkeudella z} \\ f(u) &= \text{empiirisesti määrätty tuulifunktio} \end{aligned}$$

ja energiataseeseen (26)

$$R_N = LE + C + G + M \quad (26)$$

jossa

- $R_n$  = nettosäteily ( $W \cdot m^{-2}$ )  
 $C$  = ilman lämmittämiseen kuluva energia ( $W \cdot m^{-2}$ )  
 $G$  = maahan menevä energia ( $W \cdot m^{-2}$ )  
 $M$  = kasvin elintoimintoihin kuluva energia ( $W \cdot m^{-2}$ )

Olettamalla lämmön ja vesihöyryn siirtokertoimet yhtäsuuriksi voidaan suhteelle  $C/LE$  kirjoittaa (27)

$$\frac{C}{LE} = \beta = \gamma \frac{T' - T_a}{e'_s - e_a} \quad (27)$$

jossa

- $\beta$  = Bowenin suhde  
 $\gamma$  = psykrometrivakio ( $mbar \cdot ^\circ C^{-1}$ )  
 $T'$  = lämpötila haihduttavassa pinnassa ( $^\circ C$ )  
 $T_a$  = lämpötila ilmassa ( $^\circ C$ ) korkeudella  $z$ .

Jättämällä  $G$  ja  $M$  kaavassa (26) huomioonottamatta ja yhdistämällä kaavat (26) ja (27) saadaan (28)

$$R_n = LE(1 + \beta) \quad (28)$$

Jotta  $e'_s$  kaavassa (25) voitaisiin määrätä, tulisi haihduttavan pinnan lämpötila tuntea. Välttääkseen tämän mittaamiseen liittyvät vaikeudet Penman korvasi  $e'_s$ :n vesihöyryn kyllästyspaineella  $e_s$  ilman lämpötilassa  $T_a$  ja merkitsi:

$$LE_a = (e_s - e_a) \cdot f(u) \quad (29)$$

Näin ollen

$$\frac{LE_a}{LE} = 1 - \frac{e'_s - e_s}{e'_s - e_a} \quad (30)$$

Yhtälöiden (27) ja (28) perusteella saadaan (31):

$$LE = \frac{R_n}{1 + \gamma \frac{T' - T_a}{e'_s - e_a}} \quad (31)$$

Kun merkitään  $\Delta' = (e'_s - e_s)/(T' - T_a)$  = höyrynpainekäyrän kaltevuus, niin yhtälöiden (30) ja (31) perusteella saadaan haihdunnalle lauseke (32):

$$LE = \frac{\Delta' R_n + \gamma LE_a}{\Delta' + \gamma} \quad (32)$$

Mikäli lämpötilaero ( $T' - T_a$ ) ei ole suuri, voidaan  $\Delta'$ :n arvot ( $\Delta$ ) määrätä lämpötilan  $T_a$  mukaan.

Kun mitatun nettosäteilyn arvot ovat harvoin käytettävissä, ehdotti Penman niiden laskemista kaavalla:

$$R_n = (1 - \nu)R_s^{\text{teor}}(a + b n/N) - \sigma T_a^4(0,56 - 0,080\sqrt{e_a})(0,10 + 0,90 n/N) \quad (33)$$

jossa

$\nu$  = albedo  
 $R_s^{\text{teor}}$  = teoreettinen lyhytaaltainen säteily ( $W \cdot m^{-2}$ )  
 $n$  = todellisten auringonpaistetuntien määrä (h)  
 $N$  = mahdollisten auringonpaistetuntien määrä (h)  
 $a, b$  = kokeellisia kertoimia  
 $\sigma$  = Stefan-Boltzmannin vakio.

Termin  $LE_a$  laskemiseksi Penman tarjoaa alkuperäisessä työssään kokeellisesti Rothamsterissa saatua muotoa (34):

$$LE_a = 0,27(1 + 0,54 u_2)(e_s - e_a) \quad (34)$$

jossa

$u_2$  = tuulen nopeus 2 metrin korkeudella ( $m \cdot s^{-1}$ )

Möhemmin Penman (1956) muunsi  $LE_a$ -termiä niin, että se saatiin sopusointuun Hefnerjärvellä suoritettujen mittausten kanssa:

$$LE_a = 0,27(0,5 + 0,54 u_2)(e_s - e_a) \quad (35)$$

1960-luvun puolivälissä Penman muutti vielä kerran kaavaansa (French & Legg 1979) ja suositti  $LE_a$ :n käyttämistä muodossa (36):

$$LE_a = 0,27(1 + 0,54)(e_s - e_a^{9.00}) \quad (36):$$

jossa

$e_a^{9.00}$  = vesihöyrynpaine klo 9 (mbar)

Alunperin potentiaalisen evapotranspiraation laskenta po. menetelmällä oli tarkoitettu tehtäväksi kahdessa vaiheessa. Kaavalla (32) laskettiin haihdunta ensin hypoteettiselta vedenpinnalta. Toisessa vaiheessa saadut tulokset muunnettiin potentiaaliseksi haihdunnaksi kaavalla (37):

$$E_p = f \cdot E \quad (37)$$

jossa  $f$  = kerroin, jolle Penman sai Lounais-Englannissa arvot: marras-helmikuu 0,6, maaliskuuti-, syys- ja lokakuu 0,7, touko-elokuu 0,8.

Penman ja Schofield (1951) selittivät vapaasta vedenpinnasta ja nurmipeitteestä tapahtuvan haihdunnan väliset erot johtuviksi kasvien ilmarakojen toiminnasta, mutta myöhemmin Rijtema (1965) osoitti, että haihdunta-erot johtuvat pääasiassa veden ja nurmikon erilaisista heijastusominaisuuksista (albedot: vesipinta  $v < 0,10$ , nurmi  $v > 0,20$ ). Kaavaa (32) voidaan siis käyttää suoraan potentiaalisen haihdunnan laskeamiseen, kun säteily otetaan asianmukaisesti huomioon.

Penmanin ensimmäisenä kehittämä kombinaatiokaava on noussut selvästi keskeisimmäksi niistä kaavoista, joilla potentiaalista haihduntaa on pyritty viimeisten vuosikymmenien aikana arvioimaan. Tämä onkin ymmärrettävää, sillä kaava on fysikaalisesti perusteltu. Kaavan alkuperäisessä muotoilussa on syytä kiinnittää huomiota seuraaviin kohtiin:

1. Kaavan käytön edellytyksenä on, että haihduttavassa pinnassa vallitsee kyllästyspaine.
2. Nettosäteily lasketaan empiirisen kaavan (33) perusteella ja maan lämmönvaihto jätetään ottamatta huomioon.
3. Tuulifunktio on empiirisesti määrätty. Sen pohjana ovat Rothamstedissa varsin erikoislaatuksella paikalla tehdyt havainnot.
4. Penmanin tarkoittama potentiaalinen evapotranspiraatio, jonka laskemiseksi kaava on kehitetty, tapahtuu nurmipinnasta, jossa kasvuston korkeus on noin 5 cm (Legg 1979).

Penmanin kaavan muoto on ollut edellä käsiteltyjen Makkinkin ja USWB:n kaavan pohjana. Van Bavel (1966) on ehdottanut tuulifunktion muuttamista muotoon, joka paremmin vastaa tuulen nopeusprofiilin teoreettista muotoa. Omat versionsa ovat esittäneet myös Shiau & Davar (1972) ja Thom & Oliver (1977), joista viimeksi mainittujen työ on teoreettisesti hyvin perusteltu. Hydrologisiin tarkoituksiin kaavaa käytettäessä he ehdottavat muodoksi (38):

$$E_p = \frac{\Delta R_n + 2,5\gamma \cdot E_a}{\Delta + 2,4\gamma} \quad (38)$$

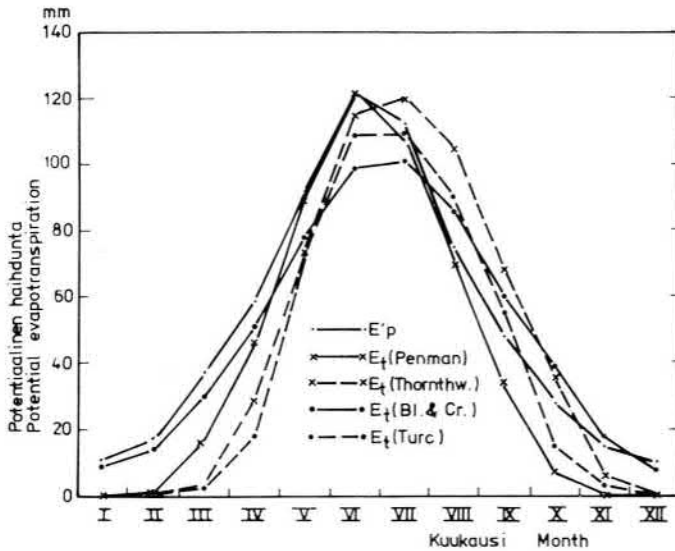
### 5.3 Määrittämenetelmien soveltuvuuden analysointi

#### 5.3.1 Aiempia selvityksiä

Potentiaalisen haihdunnan arviointiin tarkoitettuja menetelmiä ovat aiemmin vertailleet mm. Uhlig (1954) Saksassa, Rijtema (1959) Hollannissa, McGuinness & Bordne (1972) ja Parmele & McGuinness (1974) USA:ssa ja Johansson (1970) Ruotsissa. Uhlig käytti vertailukohtana Popovin lysimetristä tapahtunutta haihduntaa, Rijteman ja amerikkalaisten mittaustulokset perustuvat suuremmilla lysimetreillä tehtyihin havaintoihin. Johanssonilla ei ole ollut käytettävissä haihduntamittauksia, vaan hänen vertailukohtanaan on Anderssonin evaporimetrille estimoitu haihdunta (kuva 9).

Uhlig vertaili Penmanin, Thornthwaiten, Hauden ja Albrechtin menetelmiä ja totesi Penmanin ja Hauden menetelmien antamien tulosten olevan parhaiten sopusoinnussa mittaustulosten kanssa.

Rijteman mukaan Penmanin, Makkinkin ja Turcin kaavoilla päästään samaan tarkkuuteen kuin lysimetreillä tai haihdunta-astioilla. Hauden kaavalla saadut tulokset sensijaan eivät olleet yhtä tarkkoja huolimatta siitä, että tarkkuutta pyrittiin parantamaan käyttämällä paremmin Hollannin olosuhteisiin sopivaa, mahdollisen auringonpaisteajan ja tuulen nopeuden sisältävää korjaustekijää.



Kuva 9. Johanssonin (1974) esittämä eri haihdunnan arviointimenetelmien vertailu.  
 ig. 9. Comparison of different methods developed for estimation of evaporation, presented by Johansson (1974).

McGuinness ja Bordne ovat vertailleet 14 eri menetelmän antamia tuloksia Ohiossa 15 vuoden aikana suoritettujen mittausten kanssa. Pelkästään lämpötilaan perustuvista menetelmistä Blaney-Cridle-menetelmä on osoittautunut parhaimmaksi. Lämpötila- ja säteilyarvoja käyttävistä menetelmistä Jensen-Haise osoittautui paremmaksi kuin samaan ryhmään kuuluvat Turcin ja Makkinkin menetelmät. Kombinaatiomenetelmistä Penmanin, USWB:n astiahaidunta- ja van Bavelin kaavat olivat parhaimmat, USWB:n järvi-haiduntakaavan antamat tulokset olivat vähemmän tyydyttäviä.

Parmele ja McGuinness käyttivät vertailujensa pohjana samoista lysimetreistä Ohiossa mitattuja päiväarvoja. Kombinaatiokaavoista USWB:n astiahaiduntakaava antoi luotettavimmat estimaatit päivittäiselle haihdunnalle. Penmanin menetelmä osoittautui lähes yhtä hyväksi. Van Bavelin esittämä versio näyttäisi soveltuvan lyhyelle nurmelle, mutta pitkää maissia kasvavista lysimetreistä tapahtuneen haihdunnan selittäjänä kaava osoittautui heikohkoksi. USWB:n järvi-haiduntakaava osoittautui kombinaatiokaavoista heikoimmaksi ja tekijöiden mukaan Kohlerin ja Richardsin (1962) ehdotus järvi-haidunnan ja PET:n yhtäläisyydestä ei ole hyväksyttävissä. Empiirisistä menetelmistä ainoastaan Jensen-Haise-menetelmä antoi tyydyttäviä tuloksia.

Astiahaiduntojen ja mitatun potentiaalisen evapotranspiraation vertailuja on tehty varsin vähän. Hargreaves (1968) vertaili eri kasvityypeistä tapahtuvaa haihduntaa Class A-astiahaidunnan kanssa ja sai kertoimet eri kasvuvaiheille. Rijtema & Ryhiner (1968) selvittivät astiahaiduntojen ja eri kasvustotyypeistä tapahtuneen haihdunnan välistä yhteyttä. Tulokset on koottu taulukkoon 14. Tanskassa Kristensen (1979) vertaili alaltaan  $0,315 \text{ m}^2$ :n ja  $12 \text{ m}^2$ :n suuruisista maahan upotetuista astioista ja lyhyeksi leikatusta nurmipinnasta tapahtunutta haihduntaa. Huhtikuussa nurmesta haihtui keskimäärin noin 80 %, toukokuussa noin 90 % astiahaidunnoista. Kesäaikana prosenttimäärä vaihteli välillä 90–100 %. Syys-marraskuussa haihduntojen välinen suhde oli likipitään samaa suuruusluokkaa kuin kevätaikana.

Edellä käsitellyistä selvityksistä vain Johanssonin suorittama on tehty olosuhteissa, jotka vastaavat olosuhteita Suomessa. Muissa saadut tulokset eivät ole meillä suoraan sovellettavissa.

Taulukko 14. Kosteasta kasvipeitteestä ( $E_{nat}$ ) ja maahan upotetusta mustaseinämaisestä astiasta ( $E_O$ ) tapahtuneiden haihduntojen vuorokausiarvojen väliset yhteydet Hollannin ilmasto-oloissa (Rijtema & Ryhiner 1968).

Table 14. Relationships between daily evapotranspiration from moist vegetation ( $E_{nat}$ ) and evaporation from interred black-sided pan ( $E_O$ ) in the conditions prevailing in the Netherlands (Rijtema & Ryhiner 1968).

| Kasvustotyyppi<br>Type of soil cover | Yhteys<br>Relationship      | Havaintopaikka<br>Site |
|--------------------------------------|-----------------------------|------------------------|
| Ruoho (4–7 cm)<br>Grass              | $E_{nat} = 0,9 E_O$         | Wageningen             |
| Ruoho (10–15 cm)<br>Grass            | $E_{nat} = 1,2 E_O$         | Wageningen             |
| Ruoho (20–40 cm)<br>Grass            | $E_{nat} = 1,5 E_O$         | Wageningen             |
| Lehtimetsä<br>Broad-leaved forest    | $E_{nat} = 1,11 E_O + 0,45$ | Castricum              |
| Havumetsä<br>Fir-forest              | $E_{nat} = 0,93 E_O + 0,37$ | Castricum              |

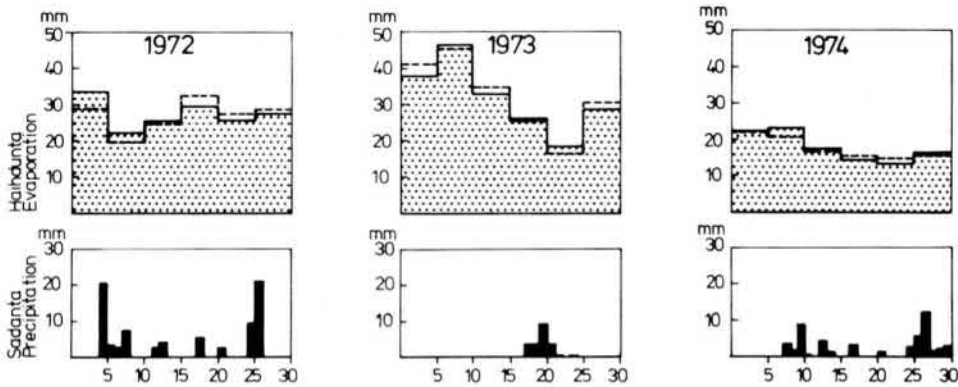
### 5.32 Mittausjaksoille asetetut vaatimukset

Lysimetrikentän koejärjestely vierekkäisine nurmipintaisine ja paljaine lysimetreineen mahdollistaa potentiaalisen haihdunnan mittaamisen ainoastaan siinä tapauksessa, että termillä ymmärretään lyhyeksi leikatusta nurmesta tapahtuvaa haihduntaa.

Penmanin esittämän määritelmän mukaan PET edellyttää nurmipintaa, jonka pituus on noin 5 cm. Tästä vaatimuksesta on tässä yhteydessä kuitenkin joustettu ja mukaan on otettu jaksot, joissa ruohon pituus vaihtelee välillä 2–15 cm. Tällöin ruohon pituuden voitaneen katsoa vastaavan likimäärin alkuperäistä määritelmää.

Potentiaalisen haihdunnan edellytyksenä on, ettei maankosteuden puute rajoita haihduntaa. Tässä yhteydessä maankosteuden on oletettu alkavan rajoittaa haihduntaa juuristokerroksen matrikpotentiaalini laskiessa arvon  $-500$  cm v.p. alapuolelle (ks. luku 7.3) ja mukaan on otettu vain jaksot, joissa maa on pysynyt tätä arvoa kosteampana. Se, että jaksot täyttävät asetetun ehdon, on varmennettu kohdassa 6.23 esitettävää tarkastelua käyttäen. Ruohon aktiivista kasvua ei ole pidetty rajoittavana tekijänä ja mittausjaksot on otettu väliltä 2.5.–31.10. Mittaustulokset on esitetty liitteessä 3.

Haihduttavan pinnan ollessa ympäristöään kosteamman saattaa advektio eräissä tapauksissa merkittävästi lisätä haihdunnan määrää. Vaikutus on samansuuntainen sekä astia- että lysimetrihaihduntojen kyseessä ollessa, joten haihdunta-astiahavaintojen perusteella on mahdollista saada käsitys myös advektion vaikutuksesta lysimetreistä tapahtuvaan haihduntaan. Kuvassa 10 on graafisesti vertailtu heinäkuussa vuosina 1972–74 Class A-astiasta tapahtunutta haihduntaa kaavalla (12) lasketun haihdunnan kanssa. Mikäli advektion vaikutus olisi merkittävää, sen tulisi näkyä erityisen kuivassa heinäkuussa 1973, jossa mitattujen haihduntojen tulisi olla systemaattisesti laskettuja suurempia. Kun näin ei kuitenkaan ole asian laita, voidaan advektion vaikutus myös lysimetrihaihduntoja tarkasteltaessa jättää huomioonottamatta.



Kuva 10. Advektion vaikutuksen arviointi, — mitattu, - - - laskettu (yhtälö 12).  
 Fig. 10. Assessment of the effect of advection. — measured, - - - calculated (Eq. 12.).

### 5.33 Mitattujen ja laskettujen arvojen vertailu

Jaksoille, jotka täyttävät yllä esitetyt vaatimukset, on potentiaaliselle evapotranspiraatiolle laskettu arvot seuraavilla menetelmillä: Thornthwaite, Blaney-Criddle, Turc, Makkink, Jensen-Haise, Ivanov, USWB (järvi), Penman, Thom-Oliver. Lisäksi jaksotain on laskettu Haudin menetelmässä käytettävä verrannollisuuskerroin  $f$ .

Thornthwaiten menetelmässä on indeksiarvoa  $I$  laskettaessa asetettu kuukausi-indeksille arvo  $i = 0$ , kun kuukauden normaali keskilämpötila on ollut  $\leq 0^\circ\text{C}$ . Näin on vuosi-indeksille saatu arvo  $I = 23,7$ , ja eksponentille  $a$  yhtälössä (16) edelleen arvo  $0,833$ . Auringonpaisteajalle on käytetty  $50^\circ$ -leveysasteen arvoja (Thornthwaite 1954). Blaney-Criddle-menetelmässä tarvittavalle empiiriselle kertoimelle on käytetty arvoa  $k = 0,5$  kaikille jaksoille. Vastaavalla tavalla on menetellyt Johansson (1979). Turcin menetelmänä on käytetty tekijän vuonna 1961 esittämää versiota, mutta laskelmissa on käytetty vuorokausiarvoja. Penmanin ja Thom-Oliverin kaavassa tarvittavana nettosäteilynä on empiirisen estimoinnin sijasta päädytty käyttämään Helsinki-Vantaan lentoasemalla mitattuja arvoja. Thom-Oliverin kaavaa on käytetty muodossa, joka vastaa 10 cm:n ruohon pituutta:

$$E_p = \frac{\Delta R_n + 2,1\gamma \cdot E_a}{\Delta + 2,0\gamma} \quad (39)$$

Mitatut ja eri menetelmillä lasketut evapotranspiraation arvot on esitetty taulukossa 15, haihduntojen suhteet käyvät ilmi taulukosta 16. Taulukossa 17 on esitetty Hauden menetelmän tekijän  $f$  arvo kullakin tutkittavalla jaksolla.

Kuvasta 11 käy ilmi havaittujen ja laskettujen haihduntojen vastaavuus. Hyvyysskriteeri  $s_0$  on laskettu kaavalla (40):

$$s_0 = \sqrt{\frac{\sum (E_{\text{mitattu}} - E_{\text{laskettu}})^2}{n - 1}} \quad (40)$$

jossa  $l$  = jakson pituus (d)  
 $n$  = jaksojen lukumäärä.

Taulukko 15. Mitatut (PET) ja eri menetelmillä lasketut potentiaaliset evapotranspiraatit (mm).

Table 15. Measured (PET) and calculated potential evapotranspirations (mm).

| Vuosi<br>Year | Jakso<br>Period | Jakson<br>pituus<br>Length<br>of period | PET | Thornth-<br>waite | Blaney-<br>Criddle | Turc | Mak-<br>kink | Jensen-<br>Haise | Ivanov | USWB | Pen-<br>man | Thom-<br>Oliver |
|---------------|-----------------|---|-----|-------------------|--------------------|------|--------------|------------------|--------|------|-------------|-----------------|
| 1973          | 06.06.–26.06.   | 20                                      | 78  | 77                | 63                 | 86   | 76           | 97               | 105    | 92   | 91          | 102             |
| 1974          | 13.05.–04.06.   | 22                                      | 38  | 49                | 50                 | 54   | 55           | 52               | 72     | 72   | 75          | 79              |
|               | 12.08.–26.08.   | 14                                      | 40  | 41                | 36                 | 38   | 29           | 36               | 34     | 30   | 39          | 40              |
|               | 26.08.–24.09.   | 29                                      | 59  | 73                | 61                 | 51   | 39           | 48               | 63     | 40   | 60          | 66              |
| 1975          | 05.06.–01.07.   | 26                                      | 96  | 89                | 79                 | 100  | 95           | 116              | 123    | 115  | 120         | 130             |
|               | 01.07.–30.07.   | 29                                      | 110 | 126               | 96                 | 130  | 109          | 145              | 138    | 134  | 139         | 155             |
|               | 30.07.–28.08.   | 29                                      | 86  | 103               | 78                 | 80   | 72           | 99               | 109    | 79   | 104         | 123             |
|               | 28.08.–01.10.   | 34                                      | 61  | 85                | 70                 | 54   | 44           | 53               | 74     | 52   | 74          | 86              |
|               | 01.10.–30.10.   | 29                                      | 24  | 30                | 37                 | 16   | 11           | 12               | 39     | 15   | 14          | 21              |
| 1977          | 05.05.–31.05.   | 26                                      | 45  | 59                | 61                 | 51   | 49           | 51               | 70     | 59   | 77          | 78              |
|               | 31.05.–28.06.   | 28                                      | 78  | 96                | 83                 | 94   | 87           | 108              | 114    | 99   | 122         | 124             |
|               | 28.06.–03.09.   | 36                                      | 89  | 129               | 105                | 98   | 81           | 102              | 87     | 80   | 108         | 107             |
|               | 03.08.–16.09.   | 44                                      | 83  | 121               | 102                | 86   | 72           | 87               | 94     | 68   | 93          | 94              |
| 1978          | 30.06.–31.07.   | 31                                      | 99  | 114               | 93                 | 92   | 83           | 106              | 136    | 88   | 116         | 116             |
|               | 31.07.–31.08.   | 31                                      | 86  | 95                | 76                 | 70   | 58           | 72               | 90     | 62   | 86          | 90              |
|               | 04.10.–31.10.   | 29                                      | 22  | 24                | 37                 | 13   | 11           | 10               | 47     | 17   | 18          | 27              |
| 1979          | 02.05.–31.05.   | 29                                      | 55  | 73                | 73                 | 79   | 77           | 80               | 93     | 89   | 109         | 105             |
|               | 31.07.–31.08.   | 31                                      | 83  | 110               | 84                 | 87   | 71           | 94               | 83     | 73   | 96          | 96              |
|               | 31.08.–03.10.   | 31                                      | 50  | 69                | 60                 | 44   | 31           | 37               | 50     | 32   | 51          | 57              |
|               | 03.10.–31.10.   | 30                                      | 24  | 26                | 35                 | 13   | 10           | 9                | 30     | 11   | 12          | 18              |

Taulukko 16. Mitattujen ja eri menetelmillä laskettujen potentiaalisten evapotranspiraatien suhteet.

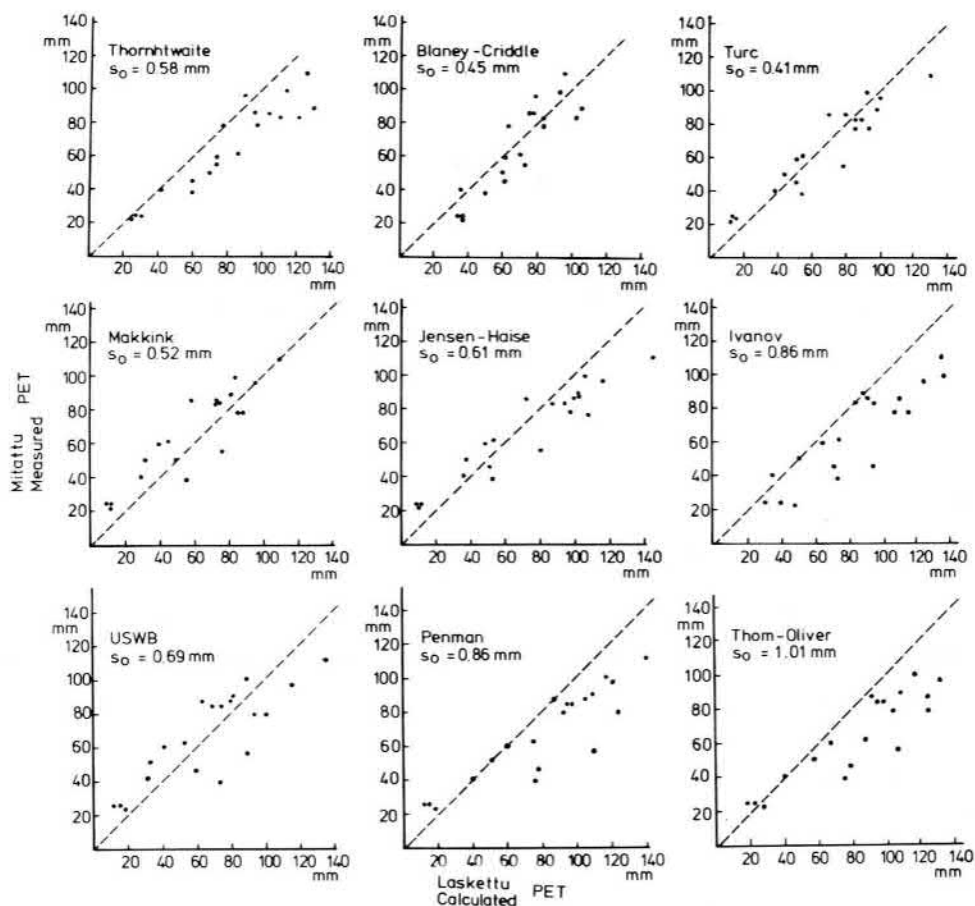
Table 16. Ratios of measured potential evapotranspiration to that calculated using different methods.

| Vuosi<br>Year | Jakso<br>Period | Thornth-<br>waite | Blaney-<br>Criddle | Turc | Mak-<br>kink | Jensen-<br>Haise | Ivanov | USWB | Pen-<br>man | Thom-<br>Oliver |
|---------------|-----------------|-------------------|--------------------|------|--------------|------------------|--------|------|-------------|-----------------|
| 1973          | 06.06.–26.06.   | 1,01              | 1,24               | 0,91 | 1,03         | 0,80             | 0,74   | 0,85 | 0,86        | 0,76            |
| 1974          | 13.05.–04.06.   | 0,78              | 0,76               | 0,70 | 0,69         | 0,73             | 0,53   | 0,53 | 0,51        | 0,48            |
|               | 12.08.–26.08.   | 0,98              | 1,11               | 1,05 | 1,38         | 1,11             | 1,18   | 1,33 | 1,03        | 1,00            |
|               | 26.08.–24.09.   | 0,81              | 0,97               | 1,16 | 1,51         | 1,23             | 0,94   | 1,48 | 0,98        | 0,89            |
| 1975          | 05.06.–01.07.   | 1,08              | 1,22               | 0,96 | 1,01         | 0,83             | 0,78   | 0,83 | 0,80        | 0,74            |
|               | 01.07.–30.07.   | 0,87              | 1,15               | 0,85 | 1,01         | 0,76             | 0,80   | 0,82 | 0,79        | 0,71            |
|               | 30.07.–26.08.   | 0,83              | 1,10               | 1,08 | 1,19         | 0,87             | 0,79   | 1,09 | 0,83        | 0,70            |
|               | 28.08.–01.10.   | 0,72              | 0,87               | 1,13 | 1,39         | 1,15             | 0,82   | 1,17 | 0,82        | 0,71            |
|               | 01.10.–30.10.   | 0,80              | 0,65               | 1,50 | 2,18         | 2,00             | 0,62   | 1,60 | 1,71        | 1,14            |
| 1977          | 05.05.–31.05.   | 0,76              | 0,73               | 0,88 | 0,92         | 0,88             | 0,64   | 0,76 | 0,58        | 0,58            |
|               | 31.05.–28.06.   | 0,81              | 0,94               | 0,83 | 0,90         | 0,72             | 0,68   | 0,79 | 0,64        | 0,63            |
|               | 28.06.–03.09.   | 0,69              | 0,85               | 0,91 | 0,98         | 0,87             | 1,02   | 1,11 | 0,82        | 0,83            |
|               | 03.08.–16.09.   | 0,69              | 0,81               | 0,97 | 1,15         | 0,95             | 0,88   | 1,22 | 0,89        | 0,88            |
| 1978          | 30.06.–31.07.   | 0,87              | 1,06               | 1,08 | 1,19         | 0,93             | 0,73   | 1,13 | 0,85        | 0,85            |
|               | 31.07.–31.08.   | 0,91              | 1,13               | 1,23 | 1,48         | 1,19             | 0,96   | 1,39 | 1,00        | 1,96            |
|               | 04.10.–31.10.   | 0,92              | 0,59               | 1,69 | 2,00         | 2,20             | 0,47   | 1,29 | 1,22        | 0,81            |
| 1979          | 02.05.–31.05.   | 0,75              | 0,75               | 0,70 | 0,71         | 0,69             | 0,59   | 0,62 | 0,50        | 0,52            |
|               | 31.07.–31.08.   | 0,75              | 0,99               | 0,95 | 1,17         | 0,88             | 1,00   | 1,14 | 0,86        | 0,86            |
|               | 31.08.–03.10.   | 0,72              | 0,83               | 1,14 | 1,61         | 1,35             | 1,00   | 1,56 | 0,98        | 0,88            |
|               | 03.10.–31.10.   | 0,92              | 0,69               | 1,85 | 2,40         | 2,67             | 0,80   | 2,18 | 2,00        | 1,33            |



Taulukko 17. Hauden menetelmässä tarvittavan suhteen  $f$  laskenta jaksoittain.Table 17. Coefficient  $f$  of the Haude method for different periods.

| Vuosi<br>Year | Jakso<br>Period | PET<br>mm | $\Sigma(e_s - e_a)_{14}$<br>mbar | $f$   |
|---------------|-----------------|-----------|----------------------------------|-------|
| 1973          | 06.06.–26.06.   | 78        | 232                              | 0,336 |
| 1974          | 13.05.–04.06.   | 38        | 130                              | 0,292 |
|               | 12.08.–26.08.   | 40        | 101                              | 0,397 |
|               | 26.08.–24.09.   | 59        | 182                              | 0,324 |
| 1975          | 05.06.–01.07.   | 96        | 274                              | 0,351 |
|               | 01.07.–30.07.   | 110       | 367                              | 0,334 |
|               | 30.07.–28.08.   | 86        | 370                              | 0,232 |
|               | 28.08.–01.10.   | 61        | 208                              | 0,294 |
|               | 01.10.–30.10.   | 24        | 101                              | 0,238 |
| 1977          | 05.05.–31.05.   | 45        | 165                              | 0,273 |
|               | 31.05.–28.06.   | 79        | 256                              | 0,308 |
|               | 28.06.–03.08.   | 88        | 210                              | 0,418 |
|               | 03.08.–16.09.   | 83        | 277                              | 0,300 |
| 1978          | 30.06.–31.07.   | 99        | 260                              | 0,380 |
|               | 31.07.–31.08.   | 86        | 223                              | 0,385 |
|               | 04.10.–02.11.   | 22        | 124                              | 0,177 |
| 1979          | 02.05.–31.05.   | 55        | 209                              | 0,263 |
|               | 31.07.–31.08.   | 88        | 230                              | 0,383 |
|               | 31.08.–03.10.   | 50        | 152                              | 0,329 |
|               | 03.10.–02.11.   | 24        | 55                               | 0,436 |

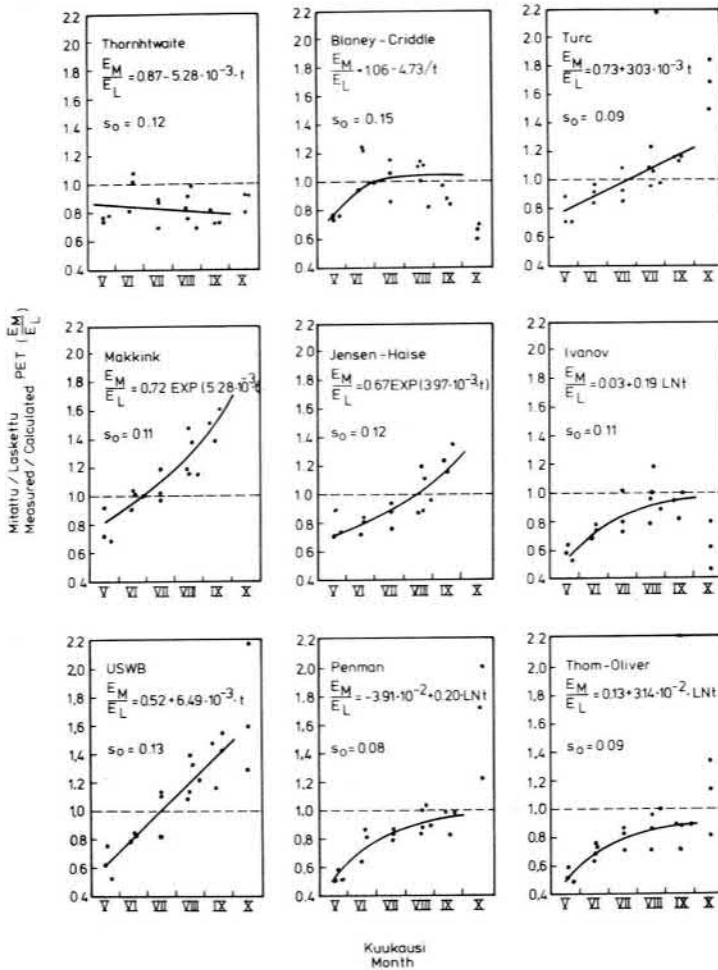


Kuva 11. Mitattujen ja laskettujen potentiaalisten haihduntojen vertailu.

Fig. 11. Comparison of measured and calculated potential evapotranspiration.

Suurassa vertailussa Turcin ja Blaney-Cridden menetelmät ovat parhaimmat, Penmanin ja Thom-Oliverin taas heikoimmat.

Kuva 12 osoittaa syyn saatuun tulokseen. Kuvassa on kuhunkin jaksoon kuuluva mitatun ja lasketun haihdunnan suhde sijoitettu jakson keskipisteeseen. Suhteessa on havaittavissa poikkeuksetta riippuvuutta ajankohdasta. Pistejoukkojen kautta on sovitettu pienemmän neliösumman mielessä seitsemän erityyppistä käyrää, joista paras on valittu estimaatin standardipoikkaman  $s_0$  perusteella. Lokakuun haihdunta-arvojen pienuuden ja suhteiden poikkeavuuden takia ne eivät ole olleet laskennassa mukana, vaan niille on laskettu keskiarvot erikseen. Käyrien laskenta on suoritettu HP-2000-tietokoneen kirjasto-ohjelmaa Curfit käyttäen. Parhaiten sopivien käyrien yhtälöt ja standardipoikkeamat käyvät ilmi kuvasta 12.

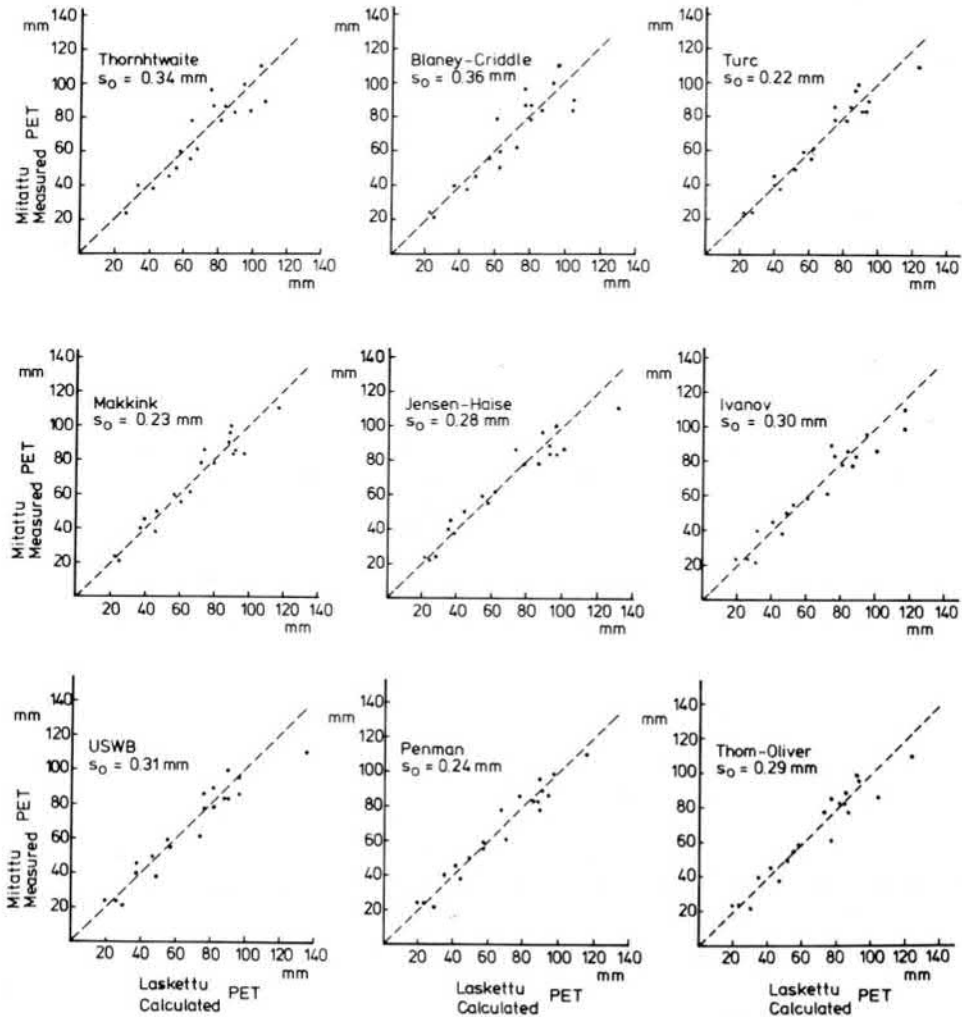


Kuva 12. Mitattujen ja lasketun potentiaalisten haihduntojen suhteen riippuvuus ajankohdasta.  $t$  on aika (vrk) toukokuun 1 päivästä lukien.

Fig. 12. Dependence on the time of day of the ratio of measured potential evapotranspiration to calculated ones.  $t$  is counted from the 1st of May.

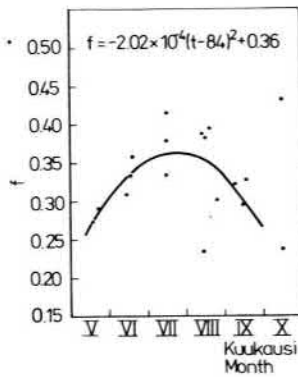
Mikäli arviointimenetelmiä halutaan käyttää potentiaalisen haihdunnan arvioinnissa, on niihin syytä suorittaa kuvasta 12 ilmenevät suhteelliset korjaukset. Kuvassa 13 on vertailtu muunnettuja arvoja mitattujen haihduntojen kanssa hyvyyskriteerin ollessa yhtälön (40) mukainen. Turcin menetelmä on edelleen paras, mutta Makkinkin ja Penmanin menetelmällä saatavat vastaavuudet ovat samaa luokkaa. Tässä vertailussa Blaney-Cridden ja Thornhtwaiten menetelmät osoittautuvat huomoimmiksi.

Kuvassa 14 on esitetty Hauden menetelmässä käytettävän kertoimen  $f$  riippuvuus ajankohdasta. Kuvassa 15 suoritettu vertailu osoittaa, ettei Haudin menetelmällä päästä tyydyttäviin tuloksiin.

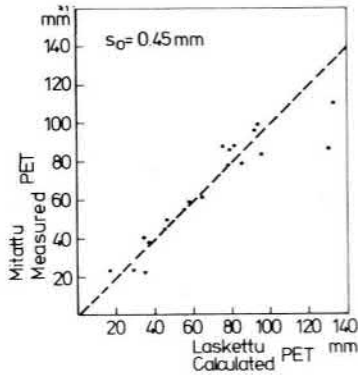


Kuva 13. Mitattujen ja muunnettujen potentiaalisten haihduntojen vertailu.

Fig. 13. Comparison of measured potential evapotranspiration with modified ones.



**Kuva 14.** Hauden kertoime  $f$  riippuvuus ajankohdasta.  
**Fig. 14.** Dependence on the point of time of the Haude coefficient  $f$ .



**Kuva 15.** Mitattujen ja Hauden menetelmällä laskettujen potentiaalisten haihduntojen vertailu.  
**Fig. 15.** Comparison of measured potential evapotranspirations with those calculated on the basis of the Haude method.

### 5.34 Mitattujen haihduntojen ja astiahaihduntojen vertailu

Astiahaihduntojen soveltuvuutta potentiaalisen haihdunnan kuvaamiseen on käsitelty samalla tavoin kuin laskennollisten menetelmien ollessa kyseessä. Taulukosta 18 käyvät ilmi potentiaaliset haihdunnat ja astiahaihdunnat jaksoittain ja taulukosta 19 potentiaalisten haihduntojen ja astiahaihduntojen suhteet. Kuvassa 16 on esitetty haihdunta-arvojen suora vertailu, kuvassa 17 suhteellisten arvojen riippuvuus ajankohdasta ja kuvassa 18 ao. ajankohtaan kuuluvan suhteen avulla kerrottujen astiahaihduntojen ja mitattujen potentiaalisten haihduntojen vastaavuudet.

Class A-astia osoittautuu parhaimmaksi, joskin ero Anderssonin evaporimetriin on pieni. GGI-3000 on astioista selvästi huonoin. Kun verrataan muunnetuilla haihdunta-kaavoilla (kuva 13) ja astioilla (kuva 18) saatujen estimaattien osuvuutta, niin havaitaan, että Thornthwaiten ja Blaney-Criddleen menetelmiä lukuunottamatta potentiaalinen haihdunta on määritettävissä tarkemmin arviointikaavoilla kuin astioilla.

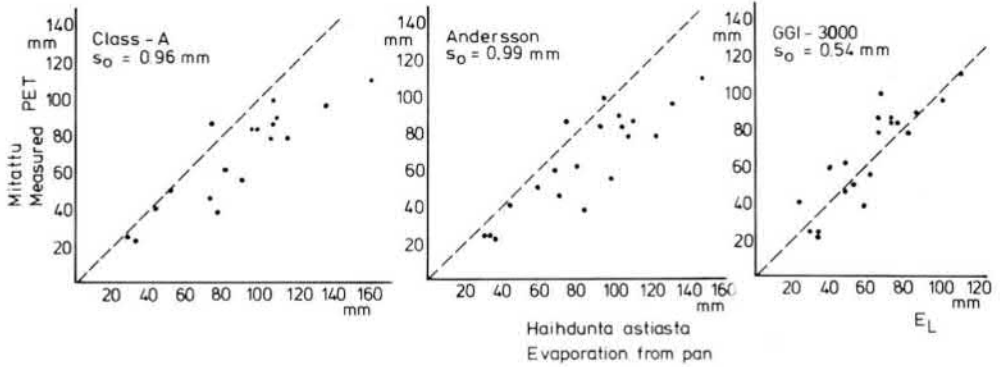
Taulukko 18. Mitatut potentiaaliset haihdunnat (PET) ja astiahaidunnat (mm).  
 Table 18. Measured potential evapotranspiration (PET) and pan evaporation (mm).

| Vuosi<br>Year | Jakso<br>Period | PET | Class A | Andersson | GGI-3000 |
|---------------|-----------------|-----|---------|-----------|----------|
| 1973          | 06.06.–26.06.   | 78  | 106     | 108*      | 66*      |
| 1974          | 13.05.–04.06.   | 38  | 78      | 84*       | 59*      |
|               | 12.08.–26.08.   | 40  | 43      | 43        | 24       |
|               | 26.08.–24.09.   | 59  | 60      | 68        | 40       |
| 1975          | 05.06.–01.07.   | 96  | 137     | 132       | 81       |
|               | 01.07.–30.07.   | 110 | 162     | 149       | 111      |
|               | 30.07.–28.08.   | 86  | 108     | 110       | 73       |
|               | 28.08.–01.10.   | 61  | 82      | 80        | 49       |
|               | 01.10.–30.10.   | 24  | 29      | 31*       | 34       |
| 1977          | 05.05.–31.05.   | 45  | 74      | 70        | 48       |
|               | 31.05.–28.06.   | 78  | 116     | 123       | 82       |
|               | 28.06.–03.08.   | 89  | 109     | 102       | 86       |
|               | 03.08.–16.09.   | 83  | 99      | 93        | 73       |
| 1978          | 30.06.–31.07.   | 99  | 108     | 95        | 68       |
|               | 31.07.–31.08.   | 86  | 77      | 75        | 66       |
|               | 04.10.–02.11.   | 22  | 33      | 35*       | 34*      |
| 1979          | 02.05.–31.05.   | 55  | 91      | 99        | 62*      |
|               | 31.07.–31.08.   | 83  | 98      | 104       | 76       |
|               | 31.08.–03.10.   | 50  | 52      | 59        | 53       |
|               | 03.10.–02.11.   | 24  | 27*     | 32*       | 30*      |

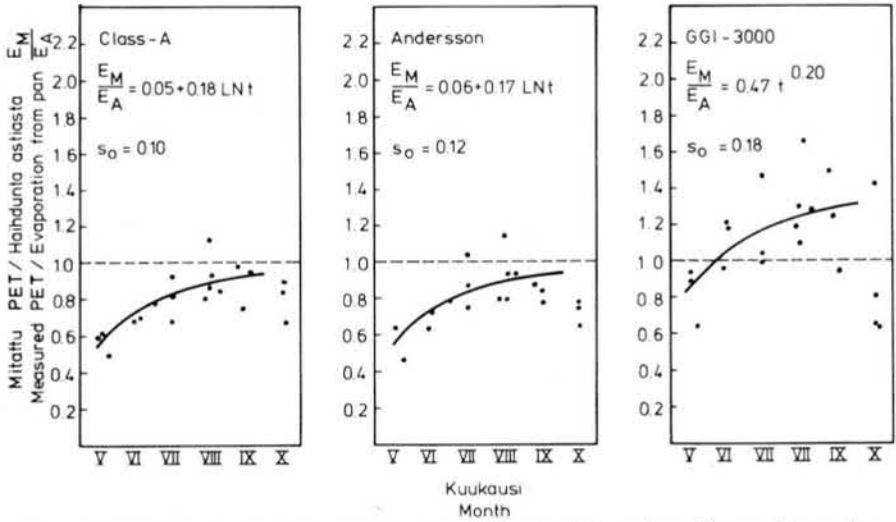
\*estimoitu, estimated

Taulukko 19. Potentiaalisten ja astiahaiduntojen suhteet.  
 Table 19. Ratios of potential evapotranspiration to pan evaporation.

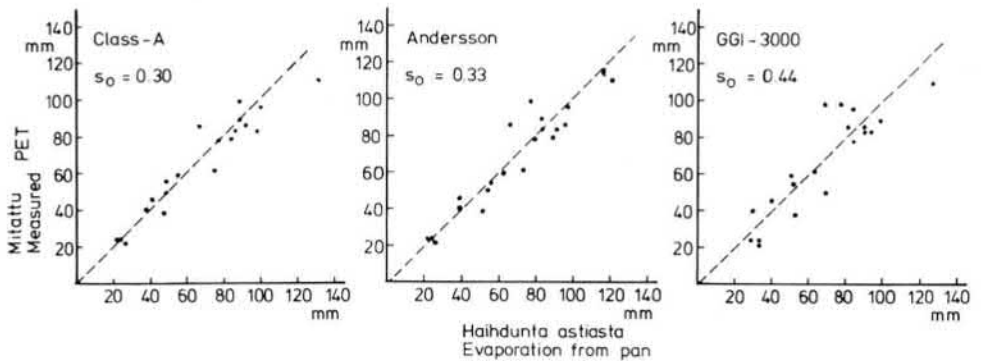
| Vuosi<br>Year | Jakso<br>Period | Class A | Andersson | GGI-3000 |
|---------------|-----------------|---------|-----------|----------|
| 1973          | 06.06.–26.06.   | 0,74    | 0,72      | 1,18     |
| 1974          | 13.05.–04.06.   | 0,49    | 0,45      | 0,64     |
|               | 12.08.–26.08.   | 0,93    | 0,93      | 1,67     |
|               | 26.08.–24.09.   | 0,98    | 0,87      | 1,48     |
| 1975          | 05.06.–01.07.   | 0,70    | 0,73      | 1,19     |
|               | 01.07.–30.07.   | 0,68    | 0,74      | 0,99     |
|               | 30.07.–28.08.   | 0,80    | 0,78      | 1,18     |
|               | 28.08.–01.10.   | 0,74    | 0,76      | 1,24     |
|               | 01.10.–30.10.   | 0,83    | 0,77      | 1,42     |
| 1977          | 05.05.–31.05.   | 0,61    | 0,64      | 0,94     |
|               | 31.05.–28.06.   | 0,67    | 0,63      | 0,95     |
|               | 28.06.–03.08.   | 0,82    | 0,87      | 1,03     |
|               | 03.08.–16.09.   | 0,84    | 0,94      | 1,27     |
| 1978          | 30.06.–31.07.   | 0,92    | 1,04      | 1,46     |
|               | 31.07.–31.08.   | 1,12    | 1,15      | 1,30     |
|               | 04.10.–02.11.   | 0,67    | 0,63      | 0,65     |
| 1979          | 02.05.–31.05.   | 0,60    | 0,56      | 0,89     |
|               | 31.07.–31.08.   | 0,85    | 0,80      | 1,09     |
|               | 31.08.–03.10.   | 0,96    | 0,85      | 0,94     |
|               | 03.10.–02.11.   | 0,89    | 0,75      | 0,80     |



**Kuva 16. Mitattujen potentiaalisten haihduntojen ja astiahaihduntojen vertailu.**  
**Fig. 16. Comparison of measured potential evapotranspiration with pan evaporation.**



**Kuva 17. Mitattujen potentiaalisten haihduntojen ja astiahaihduntojen välisen suhteen riippuvuus ajankohdasta.**  
**Fig. 17. Dependence on the time of day of the ratio of measured potential evapotranspiration to pan evaporation.**



**Kuva 18. Mitattujen potentiaalisten haihduntojen ja muunnettujen astiahaihduntojen vertailu.**  
**Fig. 18. Comparison of measured potential evapotranspiration with modified pan evaporation.**

## 6. TODELLISEN HAIHDUNNAN MALLITTAMISEN EDELLYTYKSET

### 6.1 Tarkastelun rajaus

Luvussa 5. käsiteltiin haihduntaongelmaa pintapuolisesti eikä sanottavasti pyritty vastaamaan kysymykseen, miksi arviointimenetelmistä yksikään ei anna evapotranspiraatiolle tyydyttäviä estimaatteja. Puhtaasti empiiristen kaavojen osalta tilanne ei ole autettavissa. Sen sijaan fysikaalisesti perusteltujen menetelmien voidaan odottaa antavan suoritettua vertailua parempia tuloksia, kun käsittelyä laajennetaan koskemaan kasvustoa, jonka pinnalla vesihöyrynpaine on kyllästettyä pienempi ja kun maan lämmönvaihto otetaan laskelmissa huomioon. Näiden asioiden selvittämiseksi on välttämätöntä tarkastella maa-kasvi-ilmakehäsystemin toimintaa verraten yksityiskohtaisesti.

Veden virtausta niin maassa, kasvissa kuin ilmakehässäkin voidaan kuvata pitoisuustai potentiaalierojen ja vastusten avulla analogisesti Ohmin lain kanssa:

$$\text{Vastus} = \frac{\text{Jännite}}{\text{Virta}} \quad (41)$$

Pohjaveden virtauksen osalta tätä analogiaa on sovellettu yli sadan vuoden ajan (Darcy 1856) ja se on laajalti käytössä kasvifysiologiassa (esim. Meidner & Sheriff 1976). Myös ilmassa tapahtuvaa liikemäärän-, lämmön- ja aineensiirtoa kuvattaessa se on saavuttanut vakiintuneen käytön (esim. Penman & Schofield 1951, Monteith 1963, Thom 1972).

Tässä luvussa luodaan katsaus tähän "vastusten maailmaan" siltä osin, kuin tutkimusaineiston ja itse ongelman asettelun kannalta on tarkoituksenmukaista. Tällöin joudutaan tarkastelemaan veden ja lämmön virtausta maassa, kasvien vedenottoa ja veden siirtymistä kasvustosta ilmakehään. Näihin kohdistuvan tarkastelun loogisena jatkona on Penmanin menetelmän laajennus ja edelleen sen tarkkuuteen olennaisesti vaikuttavana tekijänä ilman kyllästysvajauksen määrittystarkkuuden analysointi. Laajoista aihepiiriä koskevien seikkaperäisten selvitysten laatijoista voidaan mainita maavesien osalta mm. Hillel (1980), kasvifysiologian osalta mm. Kramer (1969) ja ilmakehän osalta mm. Thom (1975).

### 6.2 Maaveden virtaus

#### 6.21 Matemaattinen malli

Maassa oleva vesi liikkuu korkeammalta energiatasolta alemmalle. Maaveden omaama energiatila, vesipotentiaali, muodostuu matrik-, painovoima-, osmoottisen, pneumaattisen ym. potentiaalien summana. Yleensä matrikpotentiaali ja painovoimapotentiaali ovat suuruudeltaan siinä määrin omaa luokkaansa, että muut potentiaaleista voidaan jättää huomioonottamatta, jolloin tarkastelun pohjaksi jää ns. hydraulinen korkeus  $H$ :

$$H = \psi - \psi_g \quad (42)$$

jossa

$H$  = hydraulinen korkeus (cm)

$\psi$  = matrikpotentiaali (cm)

$\psi_g$  = painovoimapotentiaali (cm).

Mikäli koordinaatisto asetetaan siten, että  $z$  kasvaa maanpinnalta alaspäin, saadaan yhtälö (42) muotoon:

$$H = \psi - z \quad (43)$$

Matrikpotentiaalin ja vesipitoisuuden välillä vallitsee maalajista riippuva yhteys. Lysimetrimaiden osalta yhteydet  $\theta = f(\psi)$  on esitetty kuvassa 6. Yhteys ei ole todellisuudessa yksikäsitteinen, vaan maan kuivuessa (desorptio) ja kostuessa (adsorptio) saavat vedenpidätyskäyrät eroavat. Tämän ns. hysteresis-ilmiön huomioonottamaan maaveden virtaus-tapahtumaa kuvattaessa on vaikeasti suoritettavissa.

Richards (1931) osoitti, että myös kyllästymättömässä kerroksessa tapahtuva virtaus noudattaa Darcyn lakia:

$$q = -K \frac{\partial H}{\partial z} = -K \left( \frac{\partial \psi}{\partial z} - 1 \right) \quad (44)$$

jossa

$q$  = veden virtausnopeus ( $\text{cm} \cdot \text{d}^{-1}$ )

$K$  = hydraulisen johtavuuden kerroin ( $\text{cm} \cdot \text{d}^{-1}$ ).

Hydraulisen johtavuuden kerroin riippuu maan vesipitoisuudesta. Se on suurimmillaan maan ollessa vedellä kyllästynyt ja pienenee voimakkaasti vesipitoisuuden alentuessa.

Jotta saataisiin täydellinen matemaattinen kuvaus veden virtaukselle, sovelletaan jatkuvuusyhtälöä:

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = - \frac{\partial q}{\partial z} - s \quad (45)$$

jossa

$\theta$  = vesipitoisuus ( $\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$ )

$t$  = aika (d)

$s$  = tarkasteltavaan systeemiin tuleva tai siitä lähtävä vesimäärä ( $\text{cm} \cdot \text{d}^{-1}$ ).

Merkitään

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{d \theta}{d \psi} \cdot \frac{\partial \psi}{\partial t} = C(\psi) \cdot \frac{\partial \psi}{\partial t} \quad (46)$$

$C(\psi)$  on vedenpidätyskäyrän derivaatta ja sitä on nimitetty vieraskielisessä kirjalli-



suudessa differentiaaliseksi vesikapasiteetiksi tai differentiaaliseksi kosteuskapasiteetiksi.

Sijoittamalla yhtälö (46) jatkuvuusyhtälöön saadaan:

$$\frac{\partial \psi}{\partial t} = - \frac{1}{C(\psi)} \left( \frac{\partial q}{\partial z} + s \right) \quad (47)$$

Jos edelleen sijoitetaan yhtälö (44) yhtälöön (47), päädytään muotoon:

$$\frac{\partial \psi}{\partial t} = \frac{1}{C(\psi)} \frac{\partial}{\partial z} [K(\psi) \left( \frac{\partial \psi}{\partial z} - 1 \right)] - \frac{s(\psi)}{C(\psi)} \quad (48)$$

Edellä suoritettu tarkastelu on pääpiirteissään jo Richardsin 50 vuotta sitten esittämä. Gardner (1964) lienee ensimmäinen, joka otti formuloinnissa huomioon nieltermin s.

### 6.22 Hydraulisen johtavuuden määrittäminen

Hydraulinen johtavuus riippuu voimakkaasti maan vesipitoisuudesta ja näinollen myös vallitsevan matrikpotentiaalin suuruudesta. Hydraulisen johtavuuden määrittäminen on edellä johdettujen yhtälöiden käytön ehdoton edellytys, mutta sen luotettava mittaaminen on hankalasti suoritettavissa. Käytävissä olevista menettelytavoista kattavan yhteenvedon ovat suorittaneet Klute (1972) ja Hillel (1980).

Mittaamisen vaikeus on johtanut sellaisten laskumenetelmien kehittämiseen, joissa laskelmien pohjana voidaan käyttää jotakin helpommin mitattavaa maan ominaisuutta. Tällaisina ovat tulleet kyseeseen maan huokoskoon jakautuma, jota kuvaa vedenpidätyskäyrä, ja maan tekstuuri. Vedenpidätyskäyrään perustuvia laskentamenetelmiä ovat kehittäneet mm. Childs ja Collis-George (1950), Marshall (1958), Millington ja Quirk (1960, 1961, 1964), Brooks ja Corey (1964), Green ja Corey (1971) ja Mualem (1976). Maan tekstuuriin perustuvan laskentamenetelmän on esittänyt Bloemen (1980). Jatkossa on laskelmia suoritettaessa käytetty kolmea viimeksi mainittua menetelmää.

Greenin ja Coreyn menetelmässä vedenpidätyskäyrän  $\theta$ -akseli jaetaan tasavälein  $n$  ään osaan. Merkitään kullakin jakovälillä keskimääräistä matrikpotentiaalia  $\psi_j$ . Hydraulinen johtavuus maan kosteuden funktiona saadaan tällöin yhtälöstä:

$$K(\theta) = \frac{K_{SM}}{K_{SL}} \cdot \frac{30\kappa^2}{g \cdot \rho \cdot \mu} \cdot \frac{\epsilon^2}{n^2} \sum_{j=1}^m [(2j+1 - 2i)\psi_j^{-2}] \quad (49)$$

jossa

$K_{SM}$  = mitattu hydraulinen johtavuus ( $\text{cm} \cdot \text{d}^{-1}$ ), kun maa on kyllästynyt

$K_{SL}$  = vastaava laskettu hydraulinen johtavuus ( $\text{cm} \cdot \text{d}^{-1}$ )

$\kappa$  = veden pintajännitys ( $\text{N} \cdot \text{m}^{-1}$ )

$g$  = painovoiman kiihtyvyyden ( $\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$ )

$\rho$  = veden tiheys ( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ )

$\mu$  = veden dynaaminen viskositeetti ( $\text{Ns} \cdot \text{m}^{-2}$ )

$\epsilon$  = todellinen huokoisuus ( $\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$ )

$n$  = jakovälien määrä

$m$  = viimeinen mittauspiste

$\psi_j$  = jakovälin  $j$  keskimääräinen matrikpotentiaali (cm).

Mualemien menetelmässä mitattua vedenpidätyskäyrää ekstrapoloidaan mahdollisimman hyvin mittauspisteisiin sopivalla eksponenttifunktiolla ja tällä tavoin saadaan estimaatti Brooksia ja Coreyn (1964) käyttöönottamalle jäännösvesipitoisuudelle  $\theta_r$ . Jäännösvesipitoisuus määritellään siksi vesipitoisuudeksi, jossa  $d\theta/d\psi \rightarrow 0$ , jolloin  $K(\theta_r) = 0$ . Käytännössä laskenta tapahtuu seuraavasti:

Vaatus, että ekstrapoloidun käyrän on kuljettava viimeisen mittauspisteen ( $\psi_{\min}$ ,  $\theta_{\min}$ ) kautta tarkoittaa, että

$$\frac{\theta_i - \theta_r}{\theta_{\min} - \theta_r} = \frac{S_i}{S_{i\min}} = \left( \frac{\psi_{\min}}{\psi_i} \right)^\alpha \quad (50)$$

jossa

$\theta_i$  = vesipitoisuus pisteessä  $i$  ( $\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$ )  
 $\theta_r$  = jäännösvesipitoisuus ( $\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$ )  
 $\theta_{\min}$  = pienin mitattu vesipitoisuus ( $\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$ )  
 $\psi_i$  = matrikpotentiaali pisteessä  $i$  (cm)  
 $\psi_{\min}$  = pienin mitattu matrikpotentiaali (cm).

Eksponentilla  $\alpha$  haetaan arvo, jolla mitatut ja analyttistä tietä lasketut pisteet osuvat mahdollisimman hyvin yhteen. Kriteerinä käytetään erotusten pienintä neliösummaa. Suhteelliselle, hydrauliselle johtavuudelle  $K_r$  saadaan mittauspisteittäin arvot yhtälöstä:

$$K_r = \sqrt{S_i} \left[ \frac{S_{\min}}{(1 + \frac{1}{\lambda})\psi_{\min}} + \sum_{j=0}^{i-1} \frac{S_{j+1} - S_j}{\psi_j - \psi_{j+1}} \ln \frac{\psi_j}{\psi_{j+1}}} \right]^2 \quad (51)$$

jossa  $K_r = K_i/K_{SM}$  = suhteellinen hydraulinen johtavuus vesipitoisuudella  $\theta_i$ .

Bloemenin laskentatapa pohjautuu Brooksia ja Coreyn (1964) esittämään menetelmään, jonka mukaan hydraulinen johtavuus ns. ilman sisääntulopistettä  $\psi_a$  pienemmillä matrikarvoilla on yhtäsuuri kuin maan ollessa kyllästyneessä tilassa ja noudattaa tätä suuremmilla matrikarvoilla yhtälöä:

$$K(\psi) = K_S \left( \frac{\psi_a}{\psi} \right)^n \quad \psi < \psi_a \quad (52)$$

jossa  $n$  = huokoskoon jakautumaa luonnehtiva kerroin.

Parametrien  $\psi_a$ ,  $n$  ja  $K_S$  laskemista varten Bloemen johtaa ns. raekoonjakaumaindeksin 1. Tämän määrittämisestä on esimerkki taulukossa 20, jossa raekokoindeksi on laskettu lysimetrimaista hiedalle. Periaatteena on laskea rakeisuuskäyrän keskikaltevuus, jolloin käytetään yhtälöä (53):

Taulukko 20. Raekoon jakaumaindeksin laskenta maalajin ollessa hietaa.  
 Table 20. Calculation of grain size distribution index (case example for fine sand).

| $S_i$ | $P_i$ | $P_{i+1} - P_i$ | $\text{Log} \frac{S_{i+1}}{S_i}$ | $\text{Log} \frac{P_{i+1}}{P_i}$ | $l_i$ |
|-------|-------|-----------------|----------------------------------|----------------------------------|-------|
| 60    | 20    | 63              | 0,523                            | 0,618                            | 74,44 |
| 200   | 83    | 12              | 0,477                            | 0,059                            | 1,48  |
| 600   | 95    | 3               | 0,523                            | 0,014                            | 0,08  |
| 2000  | 98    | 2               | 0,477                            | 0,009                            | 0,04  |
| 6000  | 100   |                 |                                  |                                  |       |

Jakaumaindeksi:  
 Distribution index:  $l = \frac{76,04}{80} = 0,95$

$$l = \frac{\sum_{z=1}^n \left[ (P_{i+1} - P_i) \cdot \frac{\text{Log} (P_{i+1}/P_i)}{\text{Log} (S_{i+1}/S_i)} \right]}{\sum_{z=1}^n (P_{i+1} - P_i)} \quad (53)$$

jossa

$P_i$  = kumuloituva raekoostumusprosentti (%)

$S_i$  = raekoostumuksen luokkaväli ( $\mu\text{m}$ ).

Kun  $l$  on saatu määrättyksi, voidaan tarpeelliset parametrit määrätä yhtälöistä:

$$n = 1,4 + 4,536(e^{0,31l} - 1) - 0,751 l^{1,6} \text{Log } o \quad (54)$$

$$\psi_a = 2,914 M_d^{-0,96} l^{0,79} \quad (55)$$

$$K_S = 0,02 M_d^{1,93} l^{-0,74} \quad (56)$$

joissa

$o$  = orgaanisen aineen pitoisuus (%)

$M_d$  = raekoostumuksen mediaaniarvo ( $\mu\text{m}$ ).

Hysteresis-ilmiön huomioonottamiseksi Bloemen esittää tehtäväksi seuraavat korjaukset.

$$\begin{aligned} \psi_w &= 0,22 \psi_a \text{ (hiekkamaat)} \\ &= 0,34 \psi_a \text{ (savimaat)} \end{aligned} \quad (57)$$

$$K_e = 0,5 K_S \quad (58)$$

$$n_s = \frac{\text{Log} \left[ 2 \left( \frac{\psi_a}{\psi_o} \right)^n \right]}{\text{Log} \frac{\psi_w}{\psi_o}} \quad (59)$$

$$\begin{aligned} \psi_o &\cong 10^3 \text{ karkealle hiekalle} \\ &\cong 16^6 \text{ hiesu- ja savimaalle.} \end{aligned}$$

Korjatuilla arvoilla laskettaessa saa yhtälö (52) muodon:

$$K(\psi) = K_e \left( \frac{\psi_w}{\psi} \right)^{n_s} \quad (60)$$

Raekoostumuksen perusteella laskien saadaan lysimetrimaista hiedalle parametriarvoiksi  $\psi_w = 10 \text{ cm}$ ,  $K_e = 49 \text{ cm} \cdot \text{d}^{-1}$  ja  $n_s = 2,2$ . Savelle saadaan vastaavalla tavoin  $\psi_w = 220 \text{ cm}$ ,  $K_e = 0,1 \text{ cm} \cdot \text{d}^{-1}$  ja  $n_s = 1,58$ . Saven osalta on huomautettava, ettei Bloemeninla analysissaan ollut mukana vastaavaa, yhtä hienojakoista maalajityyppiä.

Kuvissa 19a–19c on esitetty edellä käsitellyillä tavoilla lasketut suhteelliset hydrauliset johtavuudet hiedalle, savelle ja pintakerrokselle. Viimeksi mainitulle ei Bloemenin menetelmää voitu soveltaa raekoostumustietojen puuttuessa. Vedenpidätyskäyrään perustuvat menetelmät antavat keskenään samansuuntaisia tuloksia, mutta raekoostumuksen perusteella tehdyt laskelmat eroavat edellä mainituista etenkin savella ratkaisevassa määrin. Eroon erään selityksen tarjoaa se seikka, että lysimetreissä oleva maa ei ole häiriintymätöntä, vaan täytön yhteydessä luonnollista struktuuria on muutettu. Saven osalta vaikutusta lienee myös ”omalaatuisella” tekstuuurilla, jollaista Hollannissa ei tavata.

### 6.23 Stationäärisen tilanteen laskenta

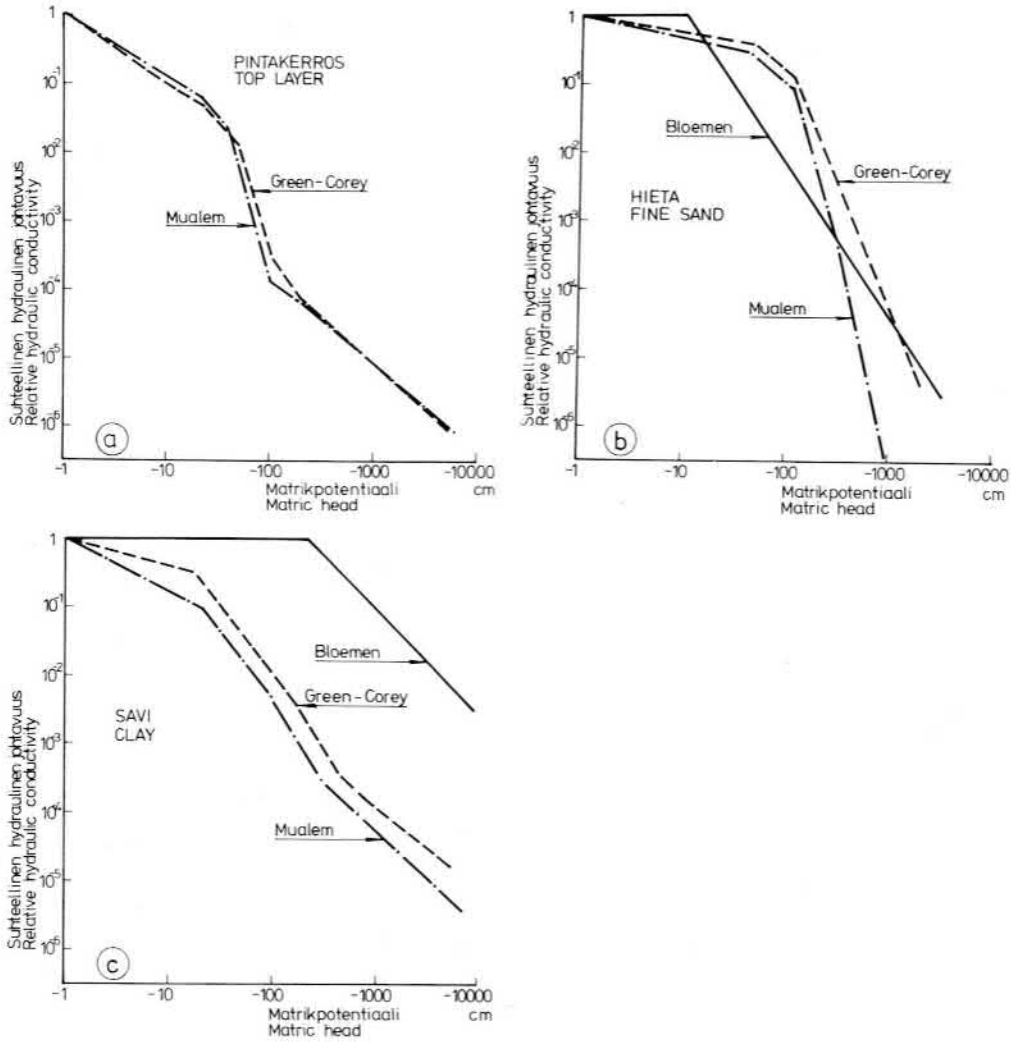
Maaveden virtaustapahtuman laskenta on yksinkertaista suorittaa siinä tapauksessa, että virtaus on stationääristä. Darcyn yhtälö:

$$q = -K \left( \frac{d\psi}{dz} - 1 \right) \quad (44)$$

integroimalla saadaan:

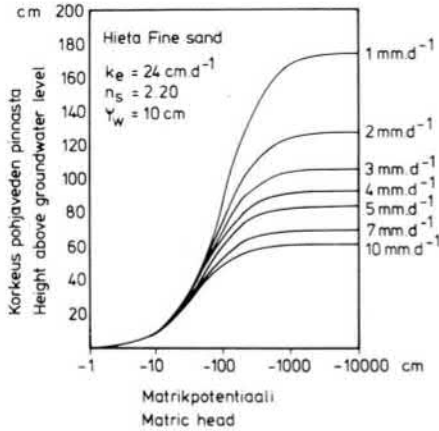
$$\int dz = - \int \frac{K}{q - K} d\psi \quad (61)$$

jossa  $K$  on  $\psi$ :n funktio, joten termi  $K/(q-K)$  on vakio vain ilman sisääntulopistettä  $\psi_a$  suuremmilla matrikarvoilla. Yhtälön ratkaisemiseksi on Childs (1969) esittänyt graafisen menettelytavan, mutta ratkaisun hakeminen numeerista integrointia käyttäen on myös ongelmatonta. Eräissä erityistapauksissa myös analyyttinen ratkaisu käy mahdolliseksi (Gardner 1958).



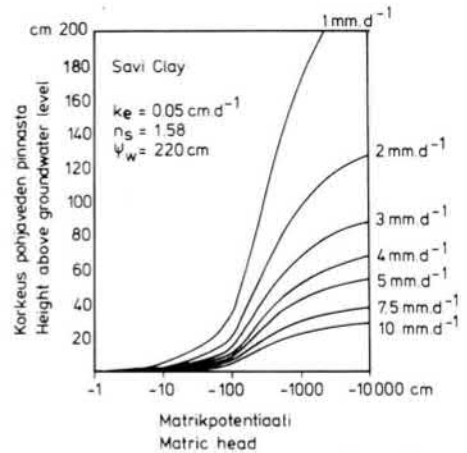
**Kuva 19. Hydraulisen johtavuuden riippuvuus matrikpotentiaalista. a = pintakerros, b = hietta, c = savi.**  
*Fig. 19. Dependence of the hydraulic conductivity on matric potential. a = top layer, b = fine sand, c = clay.*

Kuvissa 20 ja 21 on esitetty lysimetrimaille suoritettujen laskentojen tulokset. Laskentaa on suoritettu Bloemenin menetelmän antamilla arvoilla. Hiedassa potentiaaliero 500 cm pystyy nostamaan vettä  $10 \text{ mm} \cdot \text{d}^{-1}$  60 cm:n korkeuteen, joten kesäaikana potentiaalisen haihdunnan voidaan katsoa tapahtuvan, mikäli pohjaveden etäisyys pintakerroksesta on  $< 60 \text{ cm}$  (ks. luku 6.43). Savessa  $\psi_w$ :n arvolla 220 cm saatava vastaava korkeus on n. 20 cm.



Kuva 20. Veden nousu hiedassa stationäärisessä tilanteessa.

Fig. 20. Rise of water under steady state in fine sand.



Kuva 21. Veden nousu savessa stationäärisessä tilanteessa.

Fig. 21. Rise of water under steady state in clay.

### 6.3 Maan lämmönvaihto

#### 6.3.1 Ratkaisumahdollisuudet

Maahan tapahtuva lämmön varastoituminen on tekijä, jonka voidaan odottaa vaikuttavan oloisamme haihdunnan suuruuteen. Maan lämpötaseen käsittelyssä suomalaisilla on ajallisesti pitkät perinteet, sillä ensimmäiset selvitykset on meillä tehty jo viime vuosisadan puolella (Homén 1897). Myöhemmin ovat maan lämmönvaihtoa käsitelleet Rossi (1933), Franssila (1936), Franssila ja Huovila (1957), Kulmala (1970) ja Seuna (1977).

Maan lämmönvaihto voidaan määrittää joko käyttämällä erityisesti tarkoitusta varten valmistettuja lämpövirran mittausselvyjä tai maan lämpötilahavaintoja. Ensinmainittujen mittausten tarkkuutta heikentävät monesti useat seikat. Levyt estävät veden ja lämmön liikkeen ja mahdollinen huono kontakti maan ja levyn välillä vääristää tuloksia. Vaatimus levyn ja maan yhtäsuuresta lämmönjohtavuudesta ei ole helposti, jos lainkaan, toteutettavissa ja lämmönjohtavuuksien erotessa lämpötilakenttä mittauskohdalla vääristyy. Gilman (1977) on laajahkossa, lämmön maassa tapahtuvaa virtausta käsittelevässä kirjallisuustutkimuksessa esittänyt mm. selvityksen mittausselvyjen soveltuvuudesta lämpövirran mittaamiseen. Suomessa levyjä on käyttänyt Kulmala (1970).

Kun käytettävissä on maan lämpötilamittauksia, voidaan maan lämmönvaihto määrittää joko ns. integraalimenetelmällä tai lämpötilagradienttiin perustuvalla menetelmällä. Integraalimenetelmässä tarvitaan lämpötila- ja lämpökapasiteettitiedot ja maan lämmönvaihto saadaan selville maan sisältämien lämpömäärien erotuksena. Menetelmän käytössä suurimpana hankaluutena on ulottaa lämpötilan mittaus siksi syvälle, että lämpövaraston muutos voidaan luotettavasti laskea. Suomessa Seuna (1977) on käyttänyt integraalimenetelmää esittäessään korjauksia USWB:n kaavalla laskettuihin potentiaalsiin haihduntoihin.

Lämpötilagradienttiin perustuvan menetelmän käyttö edellyttää, että pintakerroksen lämmönjohtavuus tunnetaan. Lämmönjohtavuus riippuu voimakkaasti maan kosteudesta, joten menetelmän käytön ehtona on riippuvuuden tuntemisen ohella maankosteuden jatkuva havainnointi tai laskennallinen arviointi.

Tässä tutkimuksessa integraalimenetelmää ei voida ajatella käytettäväksi lämpötilamittausten ulottuessa vain 120 cm:n syvyydelle, joten ainoana mahdollisuutena on käyttää lämpötilagradienttiin perustuvaa menetelmää. Tämä seikka on ratkaisevalla tavalla vaikuttanut koko tutkimuksen saamaan muotoon, sillä lämmönvaihdon laskemiseksi on pystyttävä jatkuvasti määrittämään maan pintakerroksen kosteus.

Lämmönjohtavuuden  $\lambda(\theta)$  määrittämiseksi käytettävissä olevat menetelmät voitaneen ryhmitellä seuraavasti:

1. Maan koostumukseen perustuvat menetelmät
2. Suorat mittaukset
3. Lämpötilahavaintoihin perustuvat menetelmät.

Maan koostumukseen perustuvan fysikaalisen mallin on esittänyt De Vries (1952, 1966). Mallia on soveltaneet ja sen luotettavuutta ovat testanneet viime vuosina mm. Kimball *et al.* (1976), Hadas (1977) sekä Sepaskhah & Boersma (1979). De Vriesin teorian on yleensä todettu antavan tyydyttäviä tuloksia, joskin Kimballin työryhmä joutui menetelmää eräiltä osin muuntamaan, ennenkuin lasketut ja mitatut tulokset vastasivat toisiaan.

De Vriesin teoriassa maahiukkaset ovat dispergoituneet väliaineeseen, joka täysin kuivassa maassa on ilma ja täysin kyllästetyssä maassa vesi. Menetelmä voidaan laajentaa koskemaan myös kyllästymättömiä maita, jolloin ilma tai vesi on väliaineena ja toinen näistä ajatellaan rakeiseksi. De Vries suosittaa vettä väliaineeksi aina kosteuspitoisuuden 3 % karkearakeisilla ja 5–10 % hienorakeisilla mailla. Teorian pohjana on ajatus, että kaikki väliaineessa olevat hiukkaset ovat ellipsoideja, jotka eivät vaikuta toisiinsa. Todellisuudessa näin ei maassa ole asianlaita, mutta tästä huolimatta menetelmä on osoittanut käyttökelpoisuutensa.

Lämmönjohtavuus lasketaan kaavalla:

$$\lambda = \frac{\sum_{i=0}^N k_i x_i \lambda_i}{\sum_{i=0}^N k_i x_i} \quad (62)$$

$$k_i = \frac{1}{3} \sum_{j=1}^3 \left[ 1 + \left( \frac{\lambda_i}{\lambda_0} - 1 \right) g_j \right]^{-1} \quad (63)$$

joissa

$N$  = raetyyppien lukumäärä

$x_i$  = raetyypin  $i$  tilavuusosuus ( $\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$ )

$\lambda_i$  = raetyypin  $i$  lämmönjohtavuus ( $\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ )

$\lambda_0$  = väliaineen lämmönjohtavuus ( $\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ )

$k_i$  = raetyypin keskimääräisen lämpötilagradientin suhde jatkuvan aineen keskimääräiseen lämpötilagradienttiin

$g_j$  = painokerroin, ellipsoidin kolmen pääakselin suhteelliset pituudet;  $\sum_j g_j = 1$ .

Kun kyllästymättömässä maassa vesi tulkitaan väliaineeksi ja ilma rakeiseksi, esittää De Vries ilman muotokertoimen laskemista kaavalla:

$$g_1 = 0,333 - \frac{x_a}{\epsilon}(0,333 - 0,035) \quad (64)$$

jossa

$x_a$  = ilman tilavuusosuus ( $\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$ )

$\epsilon$  = huokoisuus ( $\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$ ).

Suorina mittauksina tulevat kyseeseen laboratoriomittaukset (mm. Golovanov 1969, Kivelä 1977) ja kentällä suoritettuna lämmitettävää johdelankaa käyttäen suoritettut mittaukset (mm. Feddes 1971).

### 6.32 Ratkaisun periaate

Lysimetrikentällä suoritettu havaintotoiminta on ollut sellaista, että lämmönjohtavuudet voidaan ratkaista vain tukeutumalla lämpötila- ja maankosteushavaintoihin. Tältä pohjalta lähtevää ratkaisua on pidettävä ainoana oikeana, sillä vain tällä tavoin saadaan selville maan lämpötila- ja kosteusmittauksiin todellisuudessa liittyneet lämmönjohtavuuden arvot. Samalla voidaan kontrolloida myös lämpötilamittausten mielekkyyttä.

Lämpötilahavaintoja käytettäessä joudutaan tavalla tai toisella ratkaisemaan lämmön-siirtoa kuvaava differentiaaliyhtälö, joka yhteen dimensioon rajoitettuna saa muodon:

$$C(\theta) \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left[ \lambda(\theta) \frac{\partial T}{\partial z} \right] \quad (65)$$

jossa

$C$  = lämpökapasiteetti ( $\text{kJ} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{K}^{-1}$ )

$T$  = lämpötila (K)

$t$  = aika (s).

Yhtälön (65) ratkaiseminen on helpoimmin toteutettavissa numeerisesti, sillä analyyttisen ratkaisun ehtona on, että tunnetaan lämmönjohtavuuden ja lämpökapasiteetin funktionaalinen yhteys syvyyden kanssa. Saviharju (1973) on maassamme aiemmin selvittellyt numeeristen menetelmien tarjoamia mahdollisuuksia.

Tässä tutkimuksessa on lämmönjohtavuuden arvojen laskentaa varten kehitetty seuraava menetelmä.

Tarkastellaan syvyydellä  $z_1 = 2$  cm,  $z_2 = 10$  cm,  $z_3 = 25$  cm ja  $z_4 = 50$  cm mitattuja lämpötiloja niinä kolmena peräkkäisenä vuorokautena, joista keskimmäisenä maankosteus on mitattu. Lähtöoletuksena on, ettei maankosteudessa po. vuorokausina tapahdu siinä määrin suuria muutoksia, että ne vaikuttaisivat merkittävästi lämpökapasiteettiin ja tätä kautta lämmönjohtavuuteen. Tästä syystä vain sateettomat jaksot on otettu laskentaan mukaan. Syvyydellä 80 cm ja 120 cm mitatut lämpötilat on jätetty tarkastelun ulkopuolelle, koska näillä syvyyksillä todelliset lämpötilamuutokset ovat pieniä ja osin mittaustarkkuuden ulkopuolella.

Kirjoitetaan yhtälö (65) muotoon:

$$C(\theta) \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial \lambda(\theta)}{\partial z} \frac{\partial T}{\partial z} + \lambda \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \quad (66)$$

ja diskretoidaan lämmönjohtavuuden derivaatat mittauspisteissä seuraavasti:



$$\left. \begin{aligned}
 \frac{\partial \lambda_1}{\partial z_1} &\triangleq a_1 \lambda_1 + a_2 \lambda_2 + a_3 \lambda_3 \\
 \frac{\partial \lambda_2}{\partial z_2} &\triangleq b_1 \lambda_1 + b_2 \lambda_2 + b_3 \lambda_3 \\
 \frac{\partial \lambda_3}{\partial z_3} &\triangleq c_2 \lambda_2 + c_3 \lambda_3 + c_4 \lambda_4 \\
 \frac{\partial \lambda_4}{\partial z_4} &\triangleq d_2 \lambda_2 + d_3 \lambda_3 + d_4 \lambda_4
 \end{aligned} \right\} \quad (67)$$

Yhtälö (66) voidaan mittauspisteissä saattaa nyt muotoon:

$$\left. \begin{aligned}
 C_1 \frac{\partial T}{\partial t} &= (a_1 \lambda_1 + a_2 \lambda_2 + a_3 \lambda_3) \frac{\partial T}{\partial z} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \lambda_1 \\
 C_2 \frac{\partial T}{\partial t} &= (b_1 \lambda_1 + b_2 \lambda_2 + b_3 \lambda_3) \frac{\partial T}{\partial z} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \lambda_2 \\
 C_3 \frac{\partial T}{\partial t} &= (c_2 \lambda_2 + c_3 \lambda_3 + c_4 \lambda_4) \frac{\partial T}{\partial z} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \lambda_3 \\
 C_4 \frac{\partial T}{\partial t} &= (d_2 \lambda_2 + d_3 \lambda_3 + d_4 \lambda_4) \frac{\partial T}{\partial z} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \lambda_4
 \end{aligned} \right\} \quad (68)$$

Näin muodostuneiden yhtälöiden oikeat puolet ovat matriisimuodossa:

$$\left[ \begin{array}{cccccc}
 \frac{\partial^2 T_{1,n}}{\partial z_1^2} + a_1 \frac{\partial T_{1,n}}{\partial z_1} & a_2 \frac{\partial T_{1,n}}{\partial z_1} & a_3 \frac{\partial T_{1,n}}{\partial z_1} & 0 & \lambda_1 \\
 b_1 \frac{\partial T_{2,n}}{\partial z_2} & \frac{\partial^2 T_{2,n}}{\partial z_2^2} + b_2 \frac{\partial T_{2,n}}{\partial z_2} & b_3 \frac{\partial T_{2,n}}{\partial z_2} & 0 & \lambda_2 \\
 0 & c_2 \frac{\partial T_{3,n}}{\partial z_3} & \frac{\partial^2 T_{3,n}}{\partial z_3^2} + c_3 \frac{\partial T_{4,n}}{\partial z_3} & c_4 \frac{\partial T_{4,n}}{\partial z_3} & \lambda_3 \\
 0 & d_2 \frac{\partial T_{4,n}}{\partial z_4} & d_3 \frac{\partial T_{4,n}}{\partial z_4} & \frac{\partial^2 T_{4,n}}{\partial z_4^2} + d_4 \frac{\partial T_{4,n}}{\partial z_4} & \lambda_4
 \end{array} \right] \quad (69)$$

Lämpötilan ja lämmönjohtavuuden derivaattoja diskretoitaessa on otettava huomioon, etteivät lämpötilan mittauspisteet sijaitse tasavälein. Merkitään mittauspisteiden välisiä etäisyyksiä  $h_1 = z_2 - z_1$ ,  $h_2 = z_3 - z_2$  ja  $h_3 = z_4 - z_3$ . Derivaattojen diskretointi on suoritettu Taylorin sarjakehitelmää käyttäen seuraavasti.

Lämpötilafunktioille pisteissä  $z_1$  ja  $z_3$  voidaan kirjoittaa:

$$T(z_1) \cong T(z_2) + h_1 \frac{\partial T(z_2)}{\partial z_2} + \frac{1}{2} h_1^2 \frac{\partial^2 T(z_2)}{\partial z_2^2} + \dots \quad (70)$$

$$T(z_3) \cong T(z_2) + h_2 \frac{\partial T(z_2)}{\partial z_2} + \frac{1}{2} h_2^2 \frac{\partial^2 T(z_2)}{\partial z_2^2} + \dots \quad (71)$$

josta  $\frac{\partial T(z_2)}{\partial z_2}$  saadaan ratkaistuksi:

$$\frac{\partial T(z_2)}{\partial z_2} = \frac{-h_2}{h_1(h_1 + h_2)} T(z_1) + \frac{h_2 - h_1}{h_1 h_2} T(z_2) + \frac{h_1}{h_2(h_1 + h_2)} T(z_3) \quad (72)$$

Vastaavalla tavoin saadaan määrätyksi myös muut derivaatat hetkellä  $n$ :

$$\frac{\partial T_{1,n}}{\partial z_1} = \frac{-2h_1 - h_2}{h_1(h_1 + h_2)} T_{1,n} + \frac{h_1 + h_2}{h_1 h_2} T_{2,n} - \frac{h_1}{h_2(h_1 + h_2)} T_{3,n} \quad (73)$$

$$\frac{\partial T_{2,n}}{\partial z_2} = \frac{-h_2}{h_1(h_1 + h_2)} T_{1,n} + \frac{h_2 - h_1}{h_1 h_2} T_{2,n} + \frac{h_1}{h_2(h_1 + h_2)} T_{3,n} \quad (74)$$

$$\frac{\partial T_{3,n}}{\partial z_3} = \frac{-h_3}{h_2(h_2 + h_3)} T_{2,n} + \frac{h_3 - h_2}{h_2 h_3} T_{3,n} + \frac{h_2}{h_3(h_2 + h_3)} T_{4,n} \quad (75)$$

$$\frac{\partial T_{4,n}}{\partial z_4} = \frac{h_3}{h_2(h_2 + h_3)} T_{2,n} - \frac{h_2 + h_3}{h_2 h_3} T_{3,n} + \frac{h_2 + 2h_3}{h_3(h_2 + h_3)} T_{4,n} \quad (76)$$

$$\frac{\partial^2 T_{1,n}}{\partial z_1^2} = \frac{2}{h_1(h_1 + h_2)} T_{1,n} - \frac{2}{h_1 h_2} T_{2,n} + \frac{2}{h_2(h_1 + h_2)} T_{3,n} \quad (77)$$

$$\frac{\partial^2 T_{3,n}}{\partial z_3^2} = \frac{2}{h_2(h_2 + h_3)} T_{2,n} - \frac{2}{h_2 h_3} T_{3,n} + \frac{2}{h_3(h_2 + h_3)} T_{4,n} \quad (78)$$

$$\frac{\partial^2 T_{2,n}}{\partial z_2^2} = \frac{\partial^2 T_{1,n}}{\partial z_1^2}, \quad \frac{\partial^2 T_{3,n}}{\partial z_3^2} = \frac{\partial^2 T_{4,n}}{\partial z_4^2} \quad (79)$$

Yhtälöiden (73)–(79) lämpötilojen  $T_{i,n}$  kertoimet ovat samalla yhtälöiden (67) tuntemattomat  $a_1 - d_4$ , sillä diskretoitujen derivaattojen kertoimet eivät riipu derivoitavasta funktiosta, vaan ainoastaan mittauspisteiden välisistä etäisyyksistä. Siten esimerkiksi  $a_1 = (-2h_1 - h_2)/[h_1(h_1 + h_2)]$ .

Lämmönjohtavuus  $\lambda$  kussakin mittauspisteessä lasketaan pienimmän neliösumman sovituksella seuraavasti:

Merkitään

$$b_n = A_n \Lambda \quad (80)$$

jossa  $A_n \Lambda$  on (69) toisin merkittynä ja

$$b_n = \begin{bmatrix} C_1 \frac{T_{1,n+1} - T_{1,n-1}}{2 \Lambda t} \\ C_2 \frac{T_{2,n+1} - T_{2,n-1}}{2 \Lambda t} \\ C_3 \frac{T_{3,n+1} - T_{3,n-1}}{2 \Lambda t} \\ C_4 \frac{T_{4,n+1} - T_{4,n-1}}{2 \Lambda t} \end{bmatrix} \quad (81)$$

Ilman mittausvirheitä yhtälö (80) pitää tarkoin paikkansa. Mittausvirheistä johtuen oikea ja vasen puoli kuitenkin eroavat ja hetkellä  $n$  mittausvirheen  $e_n$  suuruus on

$$e_n = b_n - A_n \Lambda \quad (82)$$

Lämmönjohtavuudet mittauspisteissä ratkaistaan minimoimalla mittausvirheiden neliöiden summa

$$S = \sum_{n=1}^{N-1} e_n^2 = \sum_{n=1}^{N-1} (b_n - A_n \Lambda)^2 \quad (83)$$

Minimi haetaan derivoimalla neliösumma  $S$   $\Lambda$ :n suhteen ja asettamalla derivaatta nolaksi:

$$\frac{\partial S}{\partial \Lambda} = -2 \sum_{n=1}^{N-1} A_n^T (b_n - A_n \Lambda) = 0 \quad (84)$$

$$\Rightarrow \sum_{n=1}^{N-1} A_n^T b_n = \left( \sum_{n=1}^{N-1} A_n^T A_n \right) \Lambda \quad (85)$$

$$\Rightarrow \Lambda = \left( \sum_{n=1}^{N-1} A_n^T A_n \right)^{-1} \left( \sum_{n=1}^{N-1} A_n^T b_n \right) \quad (86)$$

## 6.33 Lämmönjohtavuuden riippuvuus maan kosteudesta

Kohdassa 6.32 esitettyä laskentatapaa sovellettaessa on ainoastaan hietalysimetrejä voitu käyttää, sillä kummankin nurmipintaisen savilysimetrin lämpötilamittaukset ovat osoittautuneet osin virheellisiksi. Lysimetrissä n:o 9 10 cm:n syvyydellä ja lysimetrissä n:o 11 25 cm:n syvyydellä lämpötilamittaukset ovat olleet systemaattisesti virheellisiä osoittaen näin kalibroinnin epäonnistuneen. Sensijaan hietaruuduissa n:o 1 ja 2 sekä myös n:o 4 sijaitsevien antureiden lämpötilahavainnot ovat antaneet lämmönjohtavuudelle järkeviä tuloksia.

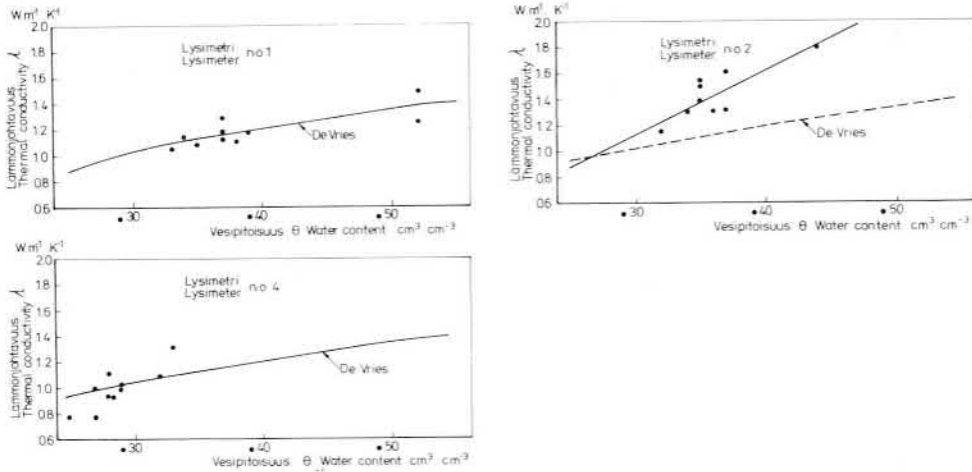
Taulukossa 21 on esitetty laskennassa mukana olleet ajankohdat sekä pintakerroksen kosteudet ja lämmönjohtavuudet, jotka on laskettu lysimetreissä n:o 1 ja 2 kolmen ja lysimetrissä n:o 4 kahden ylimmän pisteen keskiarvoina. Samat tulokset on esitetty kuvassa 22, johon on piirretty myös De Vriesin teorian perusteella lasketut lämmönjohtavuuden arvot. Laskennan lähtökohtana on pidetty seuraavia pintakerroksen ominaisuuksia. Kuivatilavuuspaino  $1\,100\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ , huokoisuus 57 %, kvarstin osuus 30 %, saven osuus 5 % ja humuksen osuus 8 % vastaavien lämmönjohtavuuksien ollessa 8,78, 2,93 ja  $0,25\text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ . Paremman tiedon puuttuessa on raemuotoa kuvaaviksi suhteelliseksi mitoiksi otettu De Vriesin suositamat arvot  $g_a = g_b = 0,125$ ,  $g_c = 0,750$ .

Numeerisesti ja De Vriesin teorian perusteella lasketut arvot ovat kaikissa lysimetreissa samaa suuruusluokkaa ja lysimetrin n:o 1 osalta yhteensopivuus on hämmästyttävän hyvä. Lysimetrille n:o 2 lämpötilahavaintojen perusteella saadut tulokset poikkeavat sen sijaan De Vriesin menetelmällä lasketuista siinä määrin, ettei teoreettisia arvoja voida perustellusti käyttää. Lysimetrin n:o 4 osalta voitaneen päätyä käsitykseen laskettujen arvojen ja teoreettisten arvojen yhteensopivuudesta.

Taulukko 21. Maan pintakerroksen lämmönjohtavuus nurmipintaisissa lysimetreissä n:o 1, 2 ja 4.

Table 21. Thermal conductivity of top soil in the grass-covered lysimeters n:o 1, 2 and 4.

| Ajankohta<br>Point of time | Lysimetri n:o 1<br>Lysimeter n:o 1                                       |   | Lysimetri n:o 2<br>Lysimeter n:o 2                                       |   | Lysimetri n:o 4<br>Lysimeter n:o 4                                       |   |
|----------------------------|--|---|--|---|--|---|
|                            | Maan-<br>kosteus<br>Soil<br>moisture<br>$\text{cm}^3\cdot\text{cm}^{-3}$ | Lämmön-<br>johtavuus<br>Thermal<br>conductivity<br>$\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ | Maan-<br>kosteus<br>Soil<br>moisture<br>$\text{cm}^3\cdot\text{cm}^{-3}$ | Lämmön-<br>johtavuus<br>Thermal<br>conductivity<br>$\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ | Maan-<br>kosteus<br>Soil<br>moisture<br>$\text{cm}^3\cdot\text{cm}^{-3}$ | Lämmön-<br>johtavuus<br>Thermal<br>conductivity<br>$\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ |
| 20.–22.06.1972             | 0,37   | 1,13  | 0,35   | 1,55  | 0,29   | 1,03  |
| 10.–12.07.1972             | 0,33   | 1,05  | –  | –   | 0,29   | 1,00  |
| 05.–07.06.1973             | 0,34   | 1,14  | 0,35   | 1,51  | 0,27   | 0,77  |
| 25.–27.06.1973             | 0,35   | 1,09  | 0,34   | 1,31  | 0,25   | 0,77  |
| 30.7.–1.8.1973             | –  | –   | 0,32   | 1,15  | –  | –   |
| 12.–14.05.1974             | 0,37   | 1,18  | 0,35   | 1,38  | 0,33   | 1,32  |
| 19.–21.05.1974             | –  | –   | 0,37   | 1,61  | –  | –   |
| 03.–05.06.1974             | 0,37   | 1,29  | –  | –   | 0,28   | 0,93  |
| 11.–13.06.1974             | –  | –   | 0,37   | 1,30  | –  | –   |
| 31.7.–2.8.1974             | 0,39   | 1,18  | –  | –   | 0,28   | 0,93  |
| 11.–13.08.1974             | 0,38   | 1,11  | 0,36   | 1,30  | 0,27   | 1,00  |
| 30.9.–1.10.1975            | 0,52   | 1,26  | 0,44   | 1,82  | –  | –   |
| 24.–26.10.1975             | 0,52   | 1,49  | –  | –   | 0,32   | 1,08  |



Kuva 22. Pintakerroksen lämmönjohtavuuden riippuvuus maankosteudesta.  
 Fig. 22. Dependence of thermal conductivity on water content in top layer.

## 6.4 Kasvisto vedenkäyttäjänä

### 6.41 Kasvi, hydraulinen systeemi

Veden merkitys kasvustolle on kiteytettävissä seuraavasti (mm. Kramer 1959): (1) Vesi on protoplasman tärkeä ainesosa; kun vesipitoisuus pienenee, niin fysiologinen toiminta yleensä heikkenee. (2) Fotosynteesissa vesi on yhtä olennainen kuin hiilidioksidi. (3) Vesi on liuotin, joka tuo kasville tarpeelliset ainekset mukanaan. (4) Vesi ylläpitää turgorpainetta.

Tätä taustaa vasten ei ole yllättävää, että kasvun määrän on todettu riippuvan varsin suoraviivaisesti transpiraation määrästä. Niinpä De Wit (1958) ehdottaa sadon kuiva-ainepainon määrittämiseksi kaavaa:

$$Y = AT_{\text{tot}} \quad (87)$$

jossa

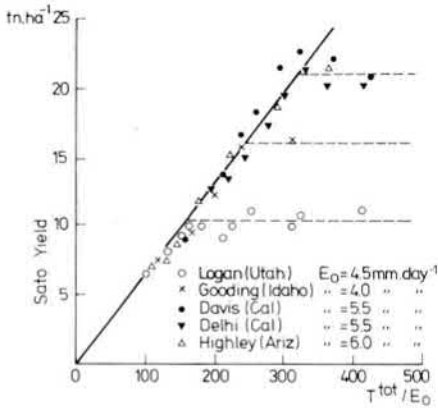
$Y$  = kuiva-ainepaino ( $\text{kg} \cdot \text{ha}^{-1}$ )

$A$  = ilmasto-oloista ja leveysasteesta riippuva kerroin

$T_{\text{tot}}$  = kumuloituva transpiraatio (mm).

Rijtema (1969a) on laatinut De Witin esittämien tietojen perusteella kuvan 23. Kuvasta käy havainnollisesti ilmi  $Y$ :n riippuvuus suhteesta  $T_{\text{tot}}/E_0$ , jossa  $E_0$  on vedenpinnasta tapahtuva haihdunta. Kun vedenpuute on kasvu rajoittava tekijä, on havaittavissa lineaarinen yhteys  $Y$ :n ja suhteen  $T_{\text{tot}}/E$  välillä. Jos jokin muu kasvutekijä tulee rajoittavaksi, jää sato tietylle tasolle, vaikka transpiraatiomäärät lisääntyisivätkin.

Suomessa sadon ja transpiraation välisiä yhteyksiä ei ole selvitetty, vaan kasvituotannon lisääntyminen on sidottu joko kastelukokeisiin (esim. Kara 1972) tai meteorologisiin



Kuva 23. Heinän kuiva-ainetuotoksen riippuvuus suhteesta kokonaistranspiraatio/keskimääräinen vedenpinnasta tapahtunut evaporaatio De Witin mukaan (Rijtema 1969a).

Fig. 23. Hay production of alfalfa as a function of total transpiration over open water evaporation rate  $T_{tot}/E_0$  from data of De Wit as derived by Rijtema (1969a).

tekijöihin (esim. Hooli 1971). Kullakin menetelmällä on etunsa ja puutteensa. Transpiraation ja sadon välisten yhteyksien selvittäminen ja tätä kautta tapahtuva kasteluveden tarpeen arviointi on fysikaalisesti ja biologisesti eittämättä perustelluin menettelytapa, mutta käytännössä transpiraation määrittäminen on monesti vaikeasti suoritettavissa. Kahden muun menettelytavan etuna on mittauksen selväpiirteisyys, mutta kun sadon selittäjänä ovat välillisesti transpiraation kautta vaikuttavat tekijät, on tulosten yleistämisessä tarjolla virhemahdollisuuksia. Sadetuksen keskimääräisestä kannattavuudesta voidaan saada virheellinen käsitys, mikäli päätelmien pohjana käytetään poikkeuksellisia kesinä suoritettujen kastelukokeiden tuloksia. Säätekijöiden avulla satoa selitettäessä voidaan aikasarjojen rakenteesta johtuen taas päätyä päätelmiin, joiden oikeutusta on vaikea perustella.

Tässä tutkimuksessa kasvi on tulkittu juuresta, varresta ja lehdistä muodostuvaksi putkeksi. Putken päiden välinen potentiaaliero ylläpitää veden virtausta ja kasvin eri osissa olevat virtausvastukset säätelevät veden kulkeutumista. Kasvin käsittäminen kuvutulla tavoin ei ole millään tavoin uutta, sillä jo van Honert (1948) esitti transpiraatiolle yhtälön.

$$T = \frac{\psi_{\text{maa}} - \psi_{\text{juuri}}}{R_{\text{maa}}} = \frac{\psi_{\text{juuri}} - \psi_{\text{lehti}}}{R_{\text{kasvi}}} = \frac{\psi_{\text{maa}} - \psi_{\text{lehti}}}{R_{\text{maa}} + R_{\text{kasvi}}} = \frac{\psi_s - \psi_l}{R_s + R_p} \quad (88)$$

jossa  $\psi_{\text{maa}}$  ( $= \psi_s$ ),  $\psi_{\text{juuri}}$  ( $= \psi_r$ ),  $\psi_{\text{lehti}}$  ( $= \psi_l$ ) ovat potentiaalit maassa, juurissa ja lehdistä ja  $R_{\text{maa}}$  ( $= R_s$ ),  $R_{\text{kasvi}}$  ( $= R_p$ ) virtausvastukset maassa ja kasvilla.

Veden virtausmekanismia voidaan sanallisesti kuvata seuraavasti:

Käytännöllisesti katsoen kaikki transpiraatio tapahtuu ilmarakojen kautta. Ilmarakojen avautumista ja sulkeutumista säätelevät mm. valon intensiteetti, lehden lämpötila, ilman kyllästysvajaus ja solujen välisen tilan  $\text{CO}_2$ -konsentraatio tavalla, jota ei tarkasti tunneta. Mikäli transpiraatio on niin suurta, ettei vettä pääse vastuksista johtuen kasviin riittävästi, turgoripaine putoaa ja ilmaerot sulkeutuvat. Kasvin vastuksista suurin on juurissa (taulukko 22).

Taulukko 22. Arvioidut suhteelliset vastukset kasvin eri osissa (Kramer 1969).  
 Table 22. Estimated relative resistances to water movement in the different parts of a plant (Kramer 1969).

|                                      | Auringonkukka<br><i>Sunflower</i> | Tomaatti<br><i>Tomato</i> |
|--------------------------------------|-----------------------------------|---------------------------|
| Kokonaisvastus<br><i>Whole plant</i> | 2,4                               | 1,4                       |
| Lehdet<br><i>Leaves</i>              | 0,9                               | 0,6                       |
| Varsi<br><i>Stem</i>                 | 0,4                               | 0,24                      |
| Juuret<br><i>Roots</i>               | 1,5                               | 1,00                      |

#### 6.42 Juurten vedenottomallit

Juurten vedenoton täydellinen ja tarkka kuvaaminen edellyttäisi sekä juurten kasvu-tapahtuman että maasta juureen tapahtuvan veden virtauksen analyttistä ratkaisua. Tämän hetkiselä tiedon tasolla kumpaakaan ei voida matemaattisin keinoin hallita, joskin ratkaisuyrityksiä on viimeisten 25 vuoden aikana tehty runsaasti. Tavanomaisimmin on lähdetty ajatuksesta, että juurten vedenotto on analoginen Ohmin lain kanssa. Käytetyt matemaattiset kuvaustavat voidaan jakaa ns. mikroskooppisiin ja ns. makroskooppisiin tapoihin.

Mikroskooppisessa tarkastelutavassa juuri korvataan äärettömän pitkällä, ontolla sylinterillä (Philip 1957, Gardner 1960). Mikäli hydraulinen johtavuus oletetaan vakioksi, voidaan sylinterikoordinaatteihin kirjoitettu Darcyn yhtälö ratkaista ja syvyydellä  $z$  olevasta  $\Delta z$  paksuisesta maakerroksesta lähtevälle vesimäärälle saadaan lauseke:

$$\Delta q_r = BLK(\psi_s - \psi_r - z)\Delta z \quad (89)$$

jossa

$\Delta q_r$  = virtaus juuren sisään ( $\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$ )

$B$  = dimensioton kerroin

$L$  = juuriston pituus ( $\text{cm} \cdot \text{cm}^{-3}$ ).

Yksittäiselle kerrokselle saatu ratkaisu voidaan edelleen laajentaa koskemaan koko juurikerrosta. Lähtemällä Gardnerin (1960) esittämästä analyttisestä ratkaisusta Rijtema (1965), Feddes (1971) ja Feddes & Rijtema (1972) esittävät periaateratkaisun muodossa:

$$T = \frac{\psi_s - \psi_r}{b/K} = \frac{\psi_s - \psi_1}{R_p + b/K} = \frac{\psi_s - \psi_1}{R_p + R_s} \quad (90)$$

jossa  $b$  on juurten geometriaa ja aktiviteettia kuvaava kerroin, jonka on todettu olevan likimäärin kääntäen verrannollinen tehokkaan juuristokerroksen syvyyteen kasvityypistä riippumatta (Feddes & Rijtema 1972):

$$b = 13 z_T^{-1} \quad (91)$$

jossa  $z_T$  = tehokkaan juuristokerroksen syvyys (cm).

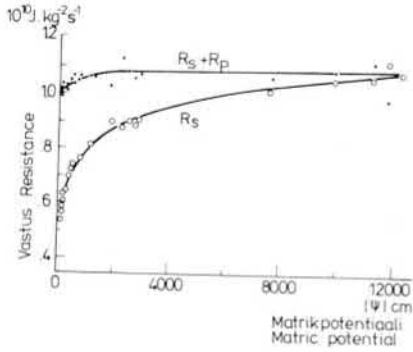
Vastusten  $R_p$  ja  $R_s$  suhteellisesta osuudesta ei olla täysin yksimielisiä. Gardner & Ehlig (1962) ollettavat  $R_p$ :n olevan siksi pienen, että kokonaisvastus muodostuu lähinnä maan vastuksesta  $R_s$ . Laajahkossa juurten vedenottoon kohdistuvassa yleiskatsauksessa Feddes (1981) referoi useita tutkimuksia, joissa on päädytty kutakuinkin päinvastaisiin johtopäätöksiin. Feddesin mukaan  $R_p$  on yleensä suurempi kuin  $R_s$ , jonka hän päättelee dominoivan ainoastaan silloin, kun maa on kuivaa (lähellä lakastumisrajaa). Taulukkoon 23 on koottu tietoja  $b$ :n ja  $R_p$ :n suuruuksista eri kokeissa. Jos käytetään suurinta havaittua  $b$ :n arvoa (= 0,54 cm) ja arvioidaan hydraulisen johtavuuden arvoiksi kyllästyneessä tilassa  $10 \text{ cm} \cdot \text{d}^{-1}$  ja lakastumisrajalla  $10^{-5} \text{ cm} \cdot \text{d}^{-1}$ , saadaan maan vastukselle  $R_s$  arvot 0,05 d ja 54 000 d, joten Feddesin kantaa on pidettävä perusteltuna. Feddes ja Rijtema (1972) päättelevät  $R_p$ :n kasvavan maan kuivuessa ja pienenevän transpiraatiossa kasvaessa. Hansenin (1974) tekemien selvitysten mukaan  $R_p$  näyttäisi sensijaan pienenevän  $R_s$ :n kasvaessa kokonaisvastuksen pysyessä kuitenkin samana (kuva 24).

Taulukko 23. Kasvin vastus  $R_p$  ja juurten geometriaa kuvaava kerroin  $b$  kirjallisuudesta koottujen tietojen perusteella (Feddes 1981).

Table 23. Plant resistance  $R_p$  and root geometry factor  $b$  as extracted from literature (Feddes 1981).

| Lähde<br>Source           | Kasvi<br>Crop                | Koetyyppi<br>Type of experiment | Juuristo-<br>syvyys<br>Rooting depth<br>cm | $b$<br>cm  | $R_p$<br>$10^3 \text{d}$ |
|---------------------------|------------------------------|---------------------------------|--|------------|--------------------------|
| Rijtema (1965)            | ruoho<br>grass               | kenttä<br>field                 | 26   | 0.47       | 10.4                     |
| Rijtema & Ryhönen (1966)  | vehnä<br>summer wheat        | kenttä<br>field                 | 60   | 0.22       | 30                       |
| Enrödi & Rijtema (1969)   | peruna<br>potato             | kenttä<br>field                 | 40   | 0.31       | 10.3                     |
| Feddes (1971)             | punakaali<br>red cabbage     | kenttä<br>field                 | 42–82                                      | 0.54       | 31.4–36.3                |
| Yang & De Jong (1971)     | vehnä<br>wheat               | laboratorio<br>laboratory       | 45   | —          | 9–21                     |
| Yang & De Jong (1972)     | vehnä<br>wheat               | laboratorio<br>laboratory       | 18   | —          | 31–58                    |
| Hansen (1974)             | raiheinä<br>Italian ryegrass | laboratorio<br>laboratory       | 22   | 0.001      | 5–17.5                   |
| Reicoshy & Ritchie (1976) | maissi<br>maize              | kasvihuone<br>greenhouse        | —  | 0.002–0.02 | 13                       |
| Nayamah (1977)            | Douglas kuusi<br>Douglas fir | kenttä<br>field                 | 80   | 0.03       | 25                       |





Kuva 24. Maan virtausvastus  $R_s$  ja maan ja kasvin virtausvastussumma  $R_s + R_p$  maan matrikpotentiaal ( $\psi$ ) funktiona (Hansen 1971).

Fig. 24. Soil resistance  $R_s$  and the sum of soil resistance ( $R_s + R_p$ ), as functions of the soil moisture matric head ( $\psi$ ) (Hansen 1971).

Vaikka vastusten suhteellisesta merkityksestä ja  $R_p$ :n käyttäytymisestä ollaan erimielisiä, niin yleisesti hyväksytty on sensijaan käsitys, että kasvin vastuksesta suurin osa on keskittynyt juuristoon (Jarvis 1975).

Makroskooppisessa lähestymistavassa tarkastelun kohteena on juuristokerros kokonaisuudessaan ja poistuvaa vesimäärää kuvataan nielutermillä  $s$ , joka lisätään jatkuvuusyhtälöön (Gardner 1964):

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = - \frac{\partial q}{\partial z} - s \quad (92)$$

Feddes (1981) pitää lähestymistapojen erottelua liioitteluna. Hän huomauttaa, että mikroskooppinen tarkastelu voidaan laajentaa koskemaan koko juurikerrosta ja korostaa käytettyjen nielutermin perustuvan yleensä yhtälöön (89). Erona on vain termin BL tulkintatapa. Poikkeuksen tästä säännöstä tekevät Molz & Remson (1970), van Keulen (1975) ja Feddes *et al.* (1978), joiden esittämät ratkaisumallit eivät liioin ole analogisia Ohmin lain kanssa. Molzin ja Remsonin käyttämä nielutermin on verrannollinen transpiraatioon ja juuriston painon tai pituuden jakautumiseen syvyyden funktiona. Van Keulenin ratkaisussa juurten ottamalle vesimäärälle on kirjoitettu yhteys:

$$\Delta q_r = T_{\max} \cdot L \cdot \alpha \cdot \beta \quad (93)$$

jossa

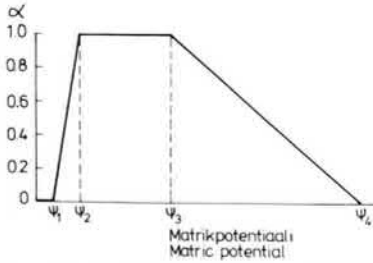
- $T_{\max}$  = maksimitranspiraatio juuren pituutta kohti ( $\text{cm} \cdot \text{d}^{-1} \cdot \text{cm}^{-1}$ )  
 $L$  = juurten kokonaispituus (cm)  
 $\alpha$  = maan lämpötilasta riippuva korjauskerroin  
 $\beta$  = juuristokerroksen vesipitoisuudesta riippuva korjauskerroin.

Feddesin, Kowalikin ja Zaradnyn esittämä nielutermin riippuu potentiaalisen transpiraation määrästä ja juuristokerroksen matrikpotentiaalista, joten se voidaan esittää muodossa:

$$s = \alpha(\psi) \frac{T_{\text{pot}}}{z_r} \quad (94)$$

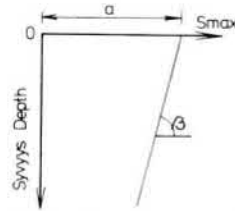
jossa

- $\alpha(\psi)$  = matrikpotentiaalista riippuva kerroin.  
 $T_{\text{pot}}$  = potentiaalinen transpiraatio (mm).



Kuva 25. Periaatekuva nielutermistä (Feddes *et al.* 1978).

Fig. 25. Scheme of the sink term (Feddes *et al.* 1978).



Kuva 26. Periaatekuva juurten maksimaalisen vedenoton jakautumisesta syvyyden funktiona (Hoogland *et al.* 1981).

Fig. 26. Scheme of the distribution of maximal water uptake by roots, as a function of depth (Hoogland *et al.* 1981).

Pienennystermin  $\alpha(\psi)$  muoto on esitetty kuvassa 25. Haihdunta alkaa pienentyä maan ollessa kuivempaa kuin ns. rajapiste ja lakastumisrajalla transpiraatio lakkaa. Pienennystermin voidaan katsoa olevan likimäärin sopusoinnussa sen kanssa, mitä jäljempänä kohdassa 6.43 esitetään.

Hoogland *et al.* (1981) ovat hiljattain esittäneet tätä nielutermiä muunnettavaksi, koska sen avulla ei voida ottaa huomioon useissa kenttä- ja laboratoriokokeissa todettuja seikkoja vedenoton jakautumisesta syvyyden funktiona. Heidän laatimansa kirjallisuuskatsaus osoittaa juurten vedenottokyvyn olevan suurin lähellä pintaa, jossa juuriston määrä on suurin, ja pienenevän syvemmälle mentäessä (kuva 26). Todellisen vedenoton maksimivyöhyke liikkuu kasvukauden aikana alaspäin pintakerrosten kuivussa ja yleensä suhteellisen pieni osa juurista näyttää olevan vastuussa kasvuston vedenotosta. Nämä seikat tulevat paremmin otetuksi huomioon, mikäli yhtälö (94) muutetaan muotoon:

$$s = \alpha(\psi) \cdot (a - bz) \quad z \leq z_r \quad (95)$$

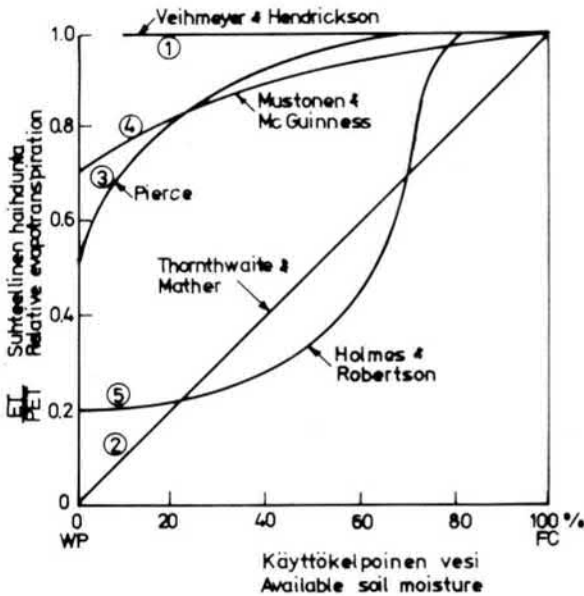
Vakiot  $a$  ja  $b$  ilmenevät kuvasta 26.

Useimmat juurten vedenottoa kuvaavat mallit vaativat yksityiskohtaista tietoa juurten jakautumisesta syvyyden funktiona, juurten tiheydestä, juuristosysteemin johtavuudesta, maan ja kasvin vastuksista. Vaikka niissä juurten vedenottoa on jo karkeasti yksinkertaistettu, tarvittava tietomäärä on yleensä siksi suuri, että ne soveltuvat lähinnä juurten vedenoton analysointiin eikä niitä monestikaan voida ajatella käytettäväksi operaatiotodellisesti. Juurten vedenotto määrää siinä määrin oleellisesti maankosteusprofiilia, että joku luonteenomainen tieto juuristosta tarvitaan ja helpoimmin on mitattavissa tai arvioitavissa juuriston syvyys. Käsitellyistä lähestymistavoista viimeisin (Hoogland *et al.*) on tätä taustaa vasten houkuttelevin. Juuristokerroksen ohella siinä tarvitaan ainoastaan tiedot PET:n suuruudesta ja juuristokerroksen potentiaalista.

### 6.43 Maan kosteuden ja lämpötilan vaikutus

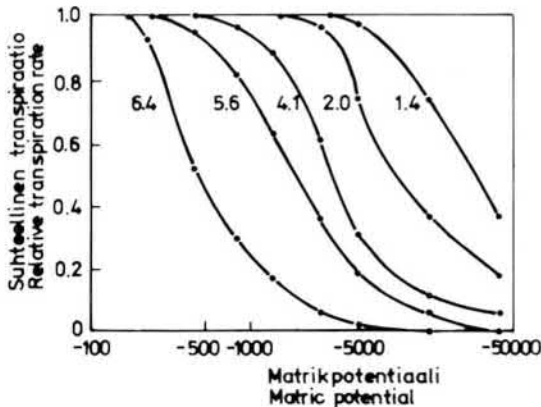
Maankosteuden ja haihdunnan välisestä yhteydestä on esitetty varsin erilaisia käsityksiä, joista yleisimmin siteeratut käyvät ilmi kuvasta 27. Aiemmin tapana on ollut, kuvan 27 mukaisesti, sitoa haihduntamäärät juuristokerroksen vesipitoisuuteen, joten suoranaisia vertailuja erilaisten käsitysten poikkeavuudesta on hankalaa ja jopa mahdollista suorittaa.

Yhtälön (90) perusteella transpiraatio on suoraan verrannollinen potentiaalieroon  $\psi_s - \psi_1$  ja kääntäen verrannollinen kokonaisvastukseen. Ilmaraot alkavat sulkeutua lehden potentiaalin saavuttaessa kriittisen arvon  $\psi_1^{kr}$  ja jos nyt Hansenia seuraten (kuva 24) oletetaan kokonaisvastuksen kasvavan tai pysyvän vakiona, on maksimaalisen transpiraation pienennyttävä maan kuivuessa eli erotuksen  $\psi_s - \psi_1^{kr}$  pienetessä. Ts. tiettyä potentiaalia juuristokerroksessa vastaa tietty maksimaalinen transpiraatiomäärä. Mikäli ilmahan haihduntavaatimus on maksimaalista haihduntamäärää pienempi, ei lehden potentiaalin tarvitse nousta kriittiselle rajalle, jotta todellinen evapotranspiraatio olisi potentiaalisen suuruinen. Kuva 28, joka on lainattu Denmead & Shawn (1962) jo klassiseksi muodostuneesta tutkimuksesta, tukee tätä päättelyä.



Kuva 27. Suhteellisen transpiraation riippuvuus maankosteudesta eri tutkimusten mukaan (Mustonen & McGuinness 1968).

Fig. 27. Dependence of relative transpiration on soil moisture, according to different studies (Mustonen & McGuinness 1968).



Kuva 28. Suhteellisen transpiraation riippuvuus juuristokerroksen keskimääräisestä matrikpotentiaalista eri ilmasto-olosuhteissa. Numerot tarkoittavat potentiaalisen haihdunnan vuorokausiarvoja (Denmead & Shaw 1962).

Fig. 28. Dependence of relative transpiration on the average matric potential of the rooting zone, under different climatic conditions. The numbers indicate daily values of evapotranspiration (Denmead & Shaw 1962).

Kuvan 28 mukaan todellinen transpiraatio alkaa olla potentiaalista pienempää potentiaalilin arvoilla  $-500$ – $-1\ 000$  cm, kun PET on  $3$ – $4$  mm·d<sup>-1</sup>, joka on verraten tavanomaisen arvo Suomessa kesä-heinäkuussa. Feddesin (1969, 1970) ja Russelin (1980) tutkimukset tukevat näitä havaintoja. Sensijaan van Bavel (1967) ei havainnut haihdunnan pienenevän, ennenkuin potentiaali laski alle  $-4\ 000$  cm, vaikka PET oli päivittäin  $8$ – $10$  mm. Szeicz *et al.* (1969) saamat tulokset ovat sopusoinnussa van Bavelin havaintojen kanssa. Kysymystä ns. rajapisteen sijainnista (ks. kuva 25) voidaan näinollen pitää toistaiseksi ratkaisemattomana. Säätökijöiden ohella se riippune myös kasvilajista.

Myös maan liallinen kosteus voi pienentää haihduntaa. Maan sisältämän ilmamäärän indikaattorina on usein käytetty ns. ODR-arvoa, joka määrittää hapen virtana kohti maahan asetettua platinalankaa. Wesselingin (1974) mukaan useat kasvit eivät kasva, mikäli ODR-arvo on pienempi kuin  $20 \times 10^{-8}$  g·cm<sup>2</sup>·min<sup>-1</sup>, joka vastaa likimäärin ilmatilaa  $0,04$ – $0,25$  cm<sup>3</sup>·cm<sup>-3</sup> maalajista riippuen. Mikäli ilmatilaa on liian vähän, vastus juuressa kasvaa ja myrkyllisiä yhdisteitä muodostuu niin maahan kuin kasviinkin. Feddesin *et al.* (1978) mukaan on olemassa tosin joukko kokeellisia todisteita, joiden mukaan juuret toimivat likipitään täysin kyllästyneessä maassa, mikäli yläpuolisissa maakerroksissa on riittävästi hapetta. Anaerobisen pisteen sijainnin määrittämiseksi vedenpidätyskäyrällä vaaditaan siis lisätutkimuksia.

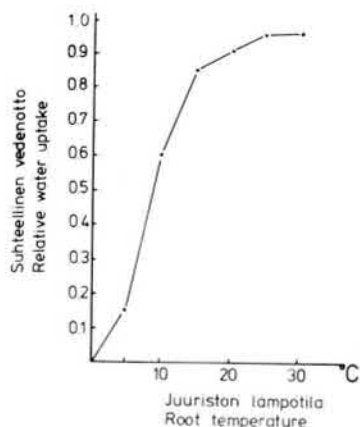
Maan lämpötilan vaikutusta transpiraatioon on selvitetty hämmästyttävän vähän. Alan oppikirjoissa lämpötilan vaikutus joko sivuutetaan tai kuitataan maininnoilla vedenoton hidastumisesta lämpötilan laskiessa. Kramer (1969) mainitsee matalan lämpötilan vaikutuksina seuraavat seikat:

1. Hidastaa juurten kasvua
2. Nostaa veden viskositeettia
3. Hidastaa metabolista aktiiviteettia
4. Kasvattaa juurten soluseinämien vastusta.

Yksityiskohtaisimmin maan lämpötilan vaikutusta lienee toistaiseksi selvittänyt Kuiper (1964). Hänen mukaansa voidaan vaikutuksen syyn perusteella erottaa kaksi lämpötila-aluetta. Ns. kriittisen pisteen yläpuolella ainoastaan viskositeetti näyttäisi vaikuttavan vedenottoon. Kriittisen pisteen alapuolella kasvin metabolisen aktiiviteetin hidastuminen hidastaa vedenottoa ratkaisevalla tavalla enemmän kuin viskositeetti. Kriittinen lämpötila riippuu tutkimuksen mukaan voimakkaasti niistä kasvuolosuhteista, joihin kasvi on tottunut.

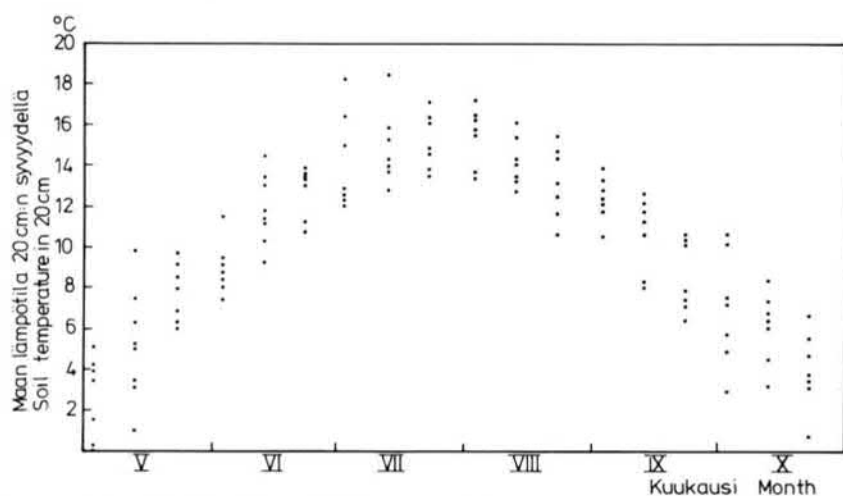
Tew *et al.* (1963) testasivat auringonkukan reagointia maan lämpötilaan. He vertasivat transpiraatiomääriä maan lämpötilan ollessa  $10^{\circ}\text{C}$ ,  $25^{\circ}\text{C}$  ja  $40^{\circ}\text{C}$  ja totesivat seuraavat transpiraatiomäärät  $12,5$ ,  $21,7$  ja  $22,9$  g·8h<sup>-1</sup>. Ilman lämpötila kokeen aikana oli  $22^{\circ}\text{C}$ , suhteellinen kosteus vaihteli välillä  $35$ – $65$  % ja valaistuksen määrä oli  $146$  W·m<sup>-2</sup>. Maan lämpötilan ollessa  $10^{\circ}\text{C}$  haihdunta oli siis noin  $58$  % siitä, mitä haihtui maan lämpötilassa  $25^{\circ}\text{C}$ . Tätä arvoa on mielenkiintoista verrata kuvaan 29, jossa on esitetty ruohon kasvun, veden- ja typenoton yhteys maan lämpötilaan. Vastaava prosenttimäärä on sen mukaan noin  $63$  %, joten nämä tutkimukset ovat tuloksiltaan pitkälti samansuuntaisia.

Kuvassa 30 on esitetty lämpötilan keskimääräinen kulku Jokioisissa  $20$  cm:n syvyydessä vuosina 1972–79. Toukokuun keskiarvo on ollut noin  $5^{\circ}\text{C}$ , joka merkitsisi transpiraation olevan vain noin  $15$  % siitä määrästä, joka kasvin läpi on mahdollista verrata (kuva 29). Jos oletetaan, että maksimimäärä on  $10$  mm·d<sup>-1</sup> (Denmead 1975), voidaan toukokuun potentiaalille transpiraatiolle saada raja-arvoksi noin  $45$  mm. Havaintoaineisto ei tarjoa mahdollisuuksia ongelman seikkaperäiseen selvittämiseen, mutta selvää on, että maan lämpötilan alhaisuus pienentää transpiraatiota oloissamme toukokuussa.



Kuva 29. Transpiraation riippuvuus juuristokerroksen lämpötilasta (CAPO 1981).

Fig. 29. Dependence of transpiration on rooting zone temperature (CAPO 1981).



Kuva 30. Maan lämpötila 20 cm syvyydellä Jokioisissa vuosina 1972–79.

Fig. 30. Soil temperature at the depth of 20 cm in Jokioinen in 1972–79.

## 6.5 Aerodynaamisen vastuksen laskenta

Liikemäärän, lämmön ja vesihöyryn kulkeutumista ilmassa on tavanomaisesti kuvattu diffuusioyhtälöillä:

$$\tau = \rho K_M \frac{\partial u}{\partial z} \quad (96)$$

$$C = -\rho c_p K_H \frac{\partial T}{\partial z} \quad (97)$$

$$LE = -\frac{\rho c_p}{\gamma} K_V \frac{\partial e}{\partial z} \quad (98)$$

jossa

$\tau$  = tuulen aiheuttama leikkausjännitys ( $N \cdot m^{-2}$ )

$\rho$  = ilman tiheys ( $kg \cdot m^{-3}$ )

$\partial u / \partial z$  = tuulen nopeuden gradientti ( $s^{-1}$ )

|                         |  |
|-------------------------|--|
| $C$                     | = havaittava lämpö ( $W \cdot m^{-2}$ )  |
| $c_p$                   | = ilman ominaislämpö ( $g \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$ )                        |
| $\partial T/\partial z$ | = lämpötilagradientti ( $K \cdot m^{-1}$ )                                     |
| $LE$                    | = haihtumislämpö ( $W \cdot m^{-2}$ )  |
| $\partial e/\partial z$ | = vesihöyrynpainegradientti ( $mbar \cdot m^{-1}$ )                            |
| $K_M, K_H, K_V$         | = liikemäärän, lämmön ja vesihöyryn diffuusio kertoimet ( $m^2 \cdot s^{-1}$ ) |
| $\gamma$                | = psykrometrivakio ( $mbar \cdot K^{-1}$ ).                                    |

Gradienttien määrittäminen tietyssä pisteessä on yleensä hankalasti suoritettavissa, joten yhtälöitä joudutaan soveltamaan integroidussa muodossa. Jos tarkastellaan esimerkiksi yhtälöä (96), saadaan tasoilla  $z_1$  ja  $z_2$  suoritettujen mittausten perusteella leikkausjännitykselle lauseke:

$$\tau = \frac{u(z_1) - u(z_2)}{\int_{z_1}^{z_2} dz/(\rho K_M)} \quad (99)$$

Yhtälö (99) on analoginen yhtälön (96) kanssa. Toisin sanoen liikemäärän siirtovastus on  $r_{aM} = \int dz/K_V$ , lämmön  $r_{aH} = \int dz/K_M$  ja vesihöyryn  $r_{aV} = \int dz/K_H$ . Näitä vastuksia on nimitetty aerodynaamisiksi vastuksiksi.

Jos yhtälössä (99) tasoksi  $z_2$  oletetaan taso, jossa  $u = 0$  ja  $K_M$  sekä  $\rho$  oletetaan vakioiksi, päästään yhtälöön:

$$r_{aM} = \rho \cdot \frac{u(z) - u(0)}{\tau} \quad (100)$$

Vastaavalla tavalla voidaan kirjoittaa lämmönsiirron vastukselle:

$$r_{aH} = \rho \cdot c_p \cdot \frac{T(z) - T(0)}{C} \quad (101)$$

ja vesihöyryn siirtovastukselle:

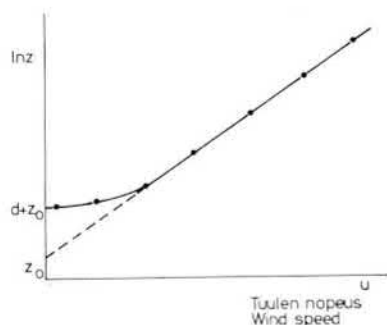
$$r_{aV} = \frac{\rho c_p}{\gamma} \cdot \frac{e(0) - e(z)}{LE} \quad (102)$$

Aerodynaamisen vastuksen määrittäminen on tavanomaisesti suoritettu tuuliprofiilin perusteella. Ilmakehän ollessa adiabaattisessa tilassa voidaan rajakerroksen sisällä aerodynaamiselle vastukselle johtaa lauseke (Monteith 1963):

$$r_{aM} = \frac{[\ln(z-d)/z_{oM}]^2}{k^2 u(z)} \quad (103)$$

jossa

|          |                             |
|----------|-----------------------------|
| $d$      | = nollapisteen siirtymä     |
| $z_{oM}$ | = rosoisuuskorkeus          |
| $k$      | = v. Karmanin vakio (0,41). |



Kuva 31. Periaatekuva nollatason siirtymästä ( $d$ ) ja rosoisuuskorkeudesta ( $z_0$ ).

Fig. 31. Schematic drawing of the zero-plane displacement ( $d$ ) and the roughness length ( $z_0$ ).

Sekä nollapisteen siirtymä että rosoisuuskorkeus voidaan määrätä mitatun tuuliprofiilin perusteella (kuva 31). Monteith'in (1975) mukaan  $d \cong 0,63 \cdot h$  ja  $z_0 \cong 0,13 \cdot h$ , kun  $h$  = kasvuston korkeus. Käytännössä voidaan näitä suureita pitää soveliaina myös lämmölle ( $z_{0H}$ ) ja vesihöyrylle ( $z_{0V}$ ), kun kasvusto on matalaa. Todellisuudessa vesihöyryn ja lämpötilan rosoisuuskorkeuden on todettu olevan  $\cong 0,2 \cdot z_{0M}$  (Thom 1972, Garratt & Hicks 1973).

Ns. Reynoldsin analogian perusteella  $K_M = K_H = K_V$ , jolloin myös aerodynaamiset vastukset ovat yhtäsuuret. Todellisuudessa vesihöyryn- ja lämmönvaihto tapahtuu liikemäärän vaihtoa hitaammin. Thom (1975) esittää  $r_{aV}$ :n ja  $r_{aH}$ :n laskemiseksi  $r_{aM}$ :a lisättäväksi termillä  $4/u_*$ . Vesihöyryn ja lämmönsiirron ei ole todettu sanottavasti eroavan toisistaan, joten täydellä syyllä voidaan merkitä  $r_{aV} = r_{aH}$  (Monteith 1981). Näin merkitsemisen lähtökohta on, että lämpö- ja vesihöyry diffundoituvat tarkalleen samasta paikasta ja samalta tasolta.

Aerodynaamisten vastusten määrittäminen tuuliprofiilin avulla käy kuvatulla tavalla, kun tuuliprofiili on logaritminen eli noudattaa yhtälöä:

$$u(z) = \frac{u_*}{k} \ln \frac{(z-d)}{z_0} \quad (104)$$

jossa  $u_* = \sqrt{\tau/\rho}$  = kitkanopeus ( $m \cdot s^{-1}$ ).

Jotta profiili voisi kehittyä logaritmiseksi, tarvitaan mittaustaikojen ympärillä "riittävästi" aerodynaamisesti homogeenista tilaa. Suhteen mittauskorkeus/häiriötön matka tulisi Tannerin (1968) mukaan olla 1:100. Monteith (1975) olettaa tuulitunnelikokeiden perusteella logaritmissen profiilin ulottuvan tasolle  $0,015x^{0,8}$ , jossa  $x$  = häiriötön matka. Tämä vastaa suhdetta 1:200. Munro & Oke (1975) havaitsivat suhteen riippuvan pinnan aerodynaamisesta rosoisuudesta. Lysimetrikentän nurmen keskipituudelle 10 cm he esittävät suhteeksi 1:60.

Toinen ehto tuuliprofiilin logaritmiselle muodolle on ilmakehän adiabaattisuus. Mikäli ilmakehä on labiilissa tilassa, on konvektio voimakkaampaa ja vastus pienempi. Stabiilissa tilanteessa konvektiivinen vaihto taas pienenee. Toisilla sanoin ilmaistuna kulkeutumisen ei enää voida olettaa olevan suoraan verrannollinen gradienttiin ja yhtälöiden (96)–(98) oikeat puolet joudutaan kertomaan ilmakehän stabilisuutta kuvaavilla  $\phi$ -funktioilla. Tuuli-, lämpötila- ja vesihöyrynpaineprofiili muuttuvat ja näinollen myös aerodynaamiset vastukset muuttuvat. Tuuliprofiilia voidaan nyt kuvata yhtälöllä:

$$u(z) = \frac{u_*}{k} \left[ \ln \frac{(z-d)}{z_{0M}} - \phi_M \right] \quad (105)$$

ja vesihöyryn kulkeutumisvastukselle voidaan kirjoittaa teoreettisesti perusteltu muoto (Thom & Oliver 1977):

$$r_{aV} = \frac{\left[ \ln \frac{(z-d)}{z_{oM}} - \Phi_M \right] \left[ \ln \frac{(z-d)}{z_{oV}} - \Phi_V \right]}{k^2 u(z)} \quad (106)$$

jossa  $\Phi_M$  ja  $\Phi_V$  on saatu integroimalla vastaavat  $\phi$ -funktiot. Epästabiilille tilanteelle voidaan  $\Phi_M$ :lle ja  $\Phi_V$ :lle johtaa lausekkeet (Paulson 1970):

$$\Phi_M = 2 \ln \left[ \frac{(1+x)}{2} \right] + \ln \left[ \frac{(1+x^2)}{2} \right] - 2 \arctan(x) + \pi/2 \quad (107)$$

$$\Phi_V = 2 \ln \left[ \frac{(1+x^2)}{2} \right] \quad (108)$$

joissa

$$x = (1 - 16\xi)^{+1/4}$$

$$\xi = -z/L$$

$$L = \frac{Tu_*^3 c \rho_a}{k C g} = \text{Monin-Obukhov pituus} \quad (109)$$

Stabiilin tilanteen osalta laskelmat voidaan perustaa log-lineaariseen profiiliin, jolloin Webbin (1970) mukaan:

$$\psi_M \cong \psi_V \cong 5,2 \xi \quad (110)$$

Thom & Oliver (1977) esittävät teoreettista tietä perustellen  $r_{aV}$ :n laskemista hydrologisia tarkoituksia varten kaavalla:

$$r_{aH} = 4,72 \frac{\left( \ln \frac{z-d}{z_o} \right)^2}{1 + 0,54 u} \quad (111)$$

Neljännän mahdollisuuden  $r_a$ :n määrittämiseksi on esittänyt Rijtema (1965). Lyhyeksi leikatusta nurmesta tapahtunutta haihduntaa mallittaessaan hän päätyi empiiriseen ilmaisuun:

$$r_{aH} = \frac{\epsilon \rho_a}{p} [g(h) \cdot h(u) \cdot u]^1 \quad (112)$$

jossa

$\epsilon$  = vesihöyryn ja kuivan ilman molekyylipainojen suhde

$g(h)$  = kasvuston korkeusfunktio

$h(u)$  = tuulifunktio

$p$  = ilmanpaine (bar)

Feddes (1970) tukeutuen Rijteman ja Brutsaertin (1965) tutkimuksiin esitti  $r_a$ :lle arvot eri kasvuston korkeudelle ja tuulen nopeudelle (taulukko 24).



Taulukko 24. Aerodynaamisen vastuksen  $r_a$  ( $s.m^{-1}$ ) riippuvuus kasvuston korkeudesta  $h$  ja tuulen nopeudesta  $u$  (Feddes 1971).  
 Table 24. Values of  $r_a$  ( $s.m^{-1}$ ) calculated for various crop heights  $h$  and wind velocities  $u$  (Feddes 1971).

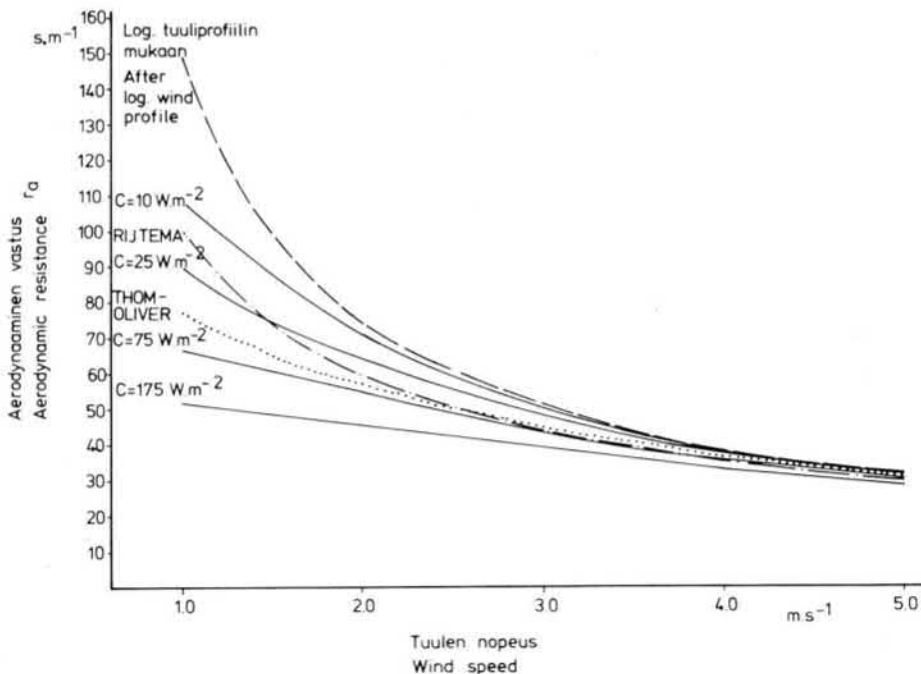
| $h$ (m) | $u$ ( $m.s^{-1}$ ) | 0.3  | 0.5  | 0.7  | 1.0  | 1.5  | 2.0  | 2.5  | 3.0  | 3.5  | 4.0  | 5.0  | 6.0  | 7.0 |
|---------|--------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|-----|
| 0.00    | 1020               | 693  | 539  | 412  | 304  | 245  | 207  | 181  | 161  | 146  | 123  | 108  | 95.8 |     |
| 0.01    | 962                | 656  | 509  | 390  | 288  | 232  | 196  | 171  | 152  | 138  | 117  | 102  | 90.6 |     |
| 0.02    | 793                | 541  | 420  | 322  | 237  | 191  | 162  | 141  | 126  | 114  | 96.2 | 83.9 | 74.7 |     |
| 0.03    | 590                | 402  | 312  | 239  | 176  | 142  | 120  | 105  | 93.4 | 84.5 | 71.5 | 62.4 | 55.6 |     |
| 0.04    | 468                | 319  | 248  | 190  | 140  | 113  | 95.4 | 83.2 | 74.1 | 67.1 | 56.7 | 49.5 | 44.1 |     |
| 0.05    | 389                | 265  | 206  | 158  | 116  | 93.7 | 79.3 | 69.2 | 61.6 | 55.7 | 47.1 | 41.1 | 36.6 |     |
| 0.06    | 338                | 231  | 179  | 137  | 101  | 81.5 | 69.0 | 60.2 | 53.6 | 48.5 | 41.0 | 35.8 | 31.9 |     |
| 0.07    | 305                | 208  | 161  | 123  | 91.1 | 73.4 | 62.1 | 54.2 | 48.2 | 43.6 | 36.9 | 32.2 | 28.7 |     |
| 0.08    | 281                | 192  | 149  | 114  | 84.1 | 67.8 | 57.4 | 50.0 | 44.6 | 40.3 | 34.1 | 29.7 | 26.5 |     |
| 0.09    | 261                | 178  | 138  | 106  | 78.1 | 62.9 | 54.2 | 46.4 | 41.3 | 37.4 | 31.6 | 27.6 | 24.6 |     |
| 0.10    | 247                | 168  | 131  | 100  | 73.8 | 59.5 | 50.3 | 43.9 | 39.1 | 35.4 | 29.9 | 26.1 | 23.2 |     |
| 0.12    | 226                | 154  | 120  | 91.5 | 67.5 | 54.4 | 46.0 | 40.1 | 35.8 | 32.3 | 27.4 | 23.9 | 21.3 |     |
| 0.14    | 210                | 143  | 111  | 85.2 | 62.9 | 50.7 | 42.9 | 37.4 | 33.3 | 30.1 | 25.5 | 22.2 | 19.8 |     |
| 0.16    | 199                | 135  | 105  | 80.5 | 59.4 | 47.9 | 40.5 | 35.3 | 31.5 | 28.5 | 24.1 | 21.0 | 18.7 |     |
| 0.18    | 190                | 130  | 101  | 77.1 | 56.9 | 45.9 | 38.8 | 33.8 | 30.1 | 27.3 | 23.1 | 20.1 | 17.9 |     |
| 0.20    | 183                | 125  | 96.8 | 74.1 | 54.7 | 44.1 | 37.3 | 32.5 | 29.0 | 26.2 | 22.2 | 19.3 | 17.2 |     |
| 0.25    | 171                | 116  | 90.5 | 69.2 | 51.1 | 41.2 | 34.8 | 30.4 | 27.1 | 24.5 | 20.7 | 18.1 | 16.1 |     |
| 0.30    | 163                | 111  | 86.5 | 66.2 | 48.8 | 39.3 | 33.3 | 29.0 | 25.9 | 23.4 | 19.8 | 17.3 | 15.4 |     |
| 0.35    | 156                | 106  | 82.7 | 63.3 | 46.7 | 37.6 | 31.8 | 27.8 | 24.7 | 22.4 | 18.9 | 16.5 | 14.7 |     |
| 0.40    | 150                | 102  | 79.4 | 60.7 | 44.8 | 36.1 | 30.5 | 26.6 | 23.7 | 21.5 | 18.2 | 15.8 | 14.1 |     |
| 0.45    | 144                | 98.1 | 76.2 | 58.3 | 43.0 | 34.7 | 29.3 | 25.6 | 22.8 | 20.6 | 17.4 | 15.2 | 13.6 |     |
| 0.50    | 138                | 94.4 | 73.3 | 56.1 | 41.4 | 33.4 | 28.2 | 24.6 | 21.9 | 19.8 | 16.8 | 14.6 | 13.0 |     |
| 0.55    | 135                | 92.3 | 71.7 | 54.9 | 40.5 | 32.6 | 27.6 | 24.1 | 21.4 | 19.4 | 16.4 | 14.3 | 12.8 |     |
| 0.60    | 133                | 90.9 | 70.6 | 54.1 | 39.9 | 32.1 | 27.2 | 23.7 | 21.1 | 19.1 | 16.2 | 14.1 | 12.6 |     |
| 0.65    | 130                | 89.0 | 69.1 | 52.9 | 39.0 | 31.5 | 26.6 | 23.2 | 20.7 | 18.7 | 15.8 | 13.8 | 12.3 |     |
| 0.70    | 129                | 87.7 | 68.2 | 52.2 | 38.5 | 31.0 | 26.2 | 22.9 | 20.4 | 18.4 | 15.6 | 13.6 | 12.1 |     |
| 0.80    | 124                | 84.8 | 65.9 | 50.4 | 37.2 | 30.0 | 25.4 | 22.1 | 19.7 | 17.8 | 15.1 | 13.1 | 11.7 |     |
| 0.90    | 122                | 83.1 | 64.6 | 49.4 | 36.4 | 29.4 | 24.8 | 21.7 | 19.3 | 17.5 | 14.8 | 12.9 | 11.5 |     |

Jos  $C$ ,  $T$  ja  $u$  tunnetaan, voidaan  $u_*$  sekä  $\Phi_M$  ja  $\Phi_V$  määrätä iteratiivisesti yhtälöiden (105) ja (107) – (109) avulla ja yhtälöä (106) käyttäen saada vesihöyryn siirtovastukselle teoreettisesti perustellut arvot. Haihduntaa käytännössä määrättäessä ei  $C$ :n arvo ole tiedossa eikä  $r_a$ :n laskemista kuvatulla tavoin ole mahdollista suorittaa, vaan joudutaan käyttämään vain tuulen nopeudesta ja kasvuston aerodynaamisesta rosoisuudesta riippuvaa vastusta, joka mahdollisimman hyvin ottaa huomioon alueen ilmaston erityispiirteet.

Kuvassa 32 on esitetty edellä kuvatulla tavalla laskettuja  $r_{aV}$ :n arvoja tuulen nopeuden funktiona. Kasvuston pituudeksi on otettu 10 cm ja  $C$ :n arvoihin 10, 25, 70 ja 175  $W \cdot m^{-2}$  on liitetty lämpötila-arvot 15, 15, 20 ja 25°C. Kuvaan on piirretty myös logaritmisin tuuliprofiiliin (yhtälö 104) ja Thomin ja Oliverin (yhtälö 111) mukaan lasketut sekä Rijteman kokeellisesti saamat arvot.  $C$ :n arvot on valittu seuraavilla perusteilla:

Kesä-elokuussa  $C$  on Kulmalan (1970) mukaan ollut Jokioisissa keskimäärin noin 25  $W \cdot m^{-2}$ . Klo 9 ja 16 välillä, jolloin haihdunta on voimakkainta, on  $C$  saman selvityksen mukaan ollut noin 70  $W \cdot m^{-2}$ .  $C = 10 W \cdot m^{-2}$  vastaa taas likimäärin aamulla ja illalla vallitsevaa tilannetta ja  $C = 175 W \cdot m^{-2}$  huipputuntiarvoa.

Logaritmiseen tuuliprofiiliin perustuvat vastukset, joissa ilmakehän stabiileittia ei oteta huomioon, ovat kauttaaltaan liian suuria. Rijteman kokeellisesti saadut vastukset ovat parhaiten sopusoinnussa  $C$ :n arvolla 25  $W \cdot m^{-2}$  laskettujen teoreettisten arvojen kanssa. Thomin ja Oliverin esittämä laskentakaava ottaa puolestaan realistisimmin huomioon päiväajan konvektion.



Kuva 32. Eri menetelmillä määritettyjen aerodynaamisten vastusten riippuvuus tuulen nopeudesta. Vertailu  $C$ :n arvoilla 10, 25, 70 ja 175  $W \cdot m^{-2}$  laskettujen teoreettisten arvojen kanssa.

Fig. 32. Dependence on wind velocity of aerodynamic resistance determined using different methods. Comparison with theoretical values calculated for  $C$  equal to 10, 25, 70 and 175  $W \cdot m^{-2}$ .

Mikäli ilmakehä on stabiilissa tilassa, kaikki edellä esitetyt vastusten määrittävät antavat liian pieniä arvoja. Tämä tilanne on tavanomainen kesällä yöaikaan ja syksyisin, jolloin haihdunta tosin on suhteellisen vähäistä. Tällaisissa tilanteissa logaritminen tuuli-profiilin perusteella lasketut vastukset ovat teoreettisia arvoja lähimpinä.

Jatkossa suoritetuissa laskelmissa käytettäväksi on valittu Rijteman esittämät arvot. Valintaa tehtäessä on painavimpana kriteerinä pidetty ao. vastusten soveltuvuutta vuorokausiarvoilla tapahtuvan haihdunnan laskennassa. Suurilla C:n arvoilla Thomin ja Oliverin esittämä laskentatapa on lähimpänä teoreettisia arvoja, mutta ero Rijteman arvoihin on merkityksellömän pieni tuulen nopeuden ylittäessä  $2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ . Tuulen voimakkuus on normaalisti suurimmillaan päiväaikaan ja tällöin yleensä suurempi kuin  $2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ , joten lyhyillä havaintoväleillä haihduntaa laskettaessa on päiväaikana samantekevää, kumpaa menettelytapaa käytetään. Illalla ja yöllä tuulen tyyntyessä ja C:n pieneessä Rijteman menettelytapa antaa parempia tuloksia.

## 6.6 Penmanin menetelmän laajennus

Monteith (1965) ja Rijtema (1965) laajensivat Penmanin menetelmän koskemaan myös tilanteita, joissa haihduttavassa pinnassa ilma ei ole vesihöyryn täysin kyllästämää. Lähtemällä energiataseesta, latentin lämmön ja havaittavan lämmön vastuskaavoista (101) ja (102) voidaan aiemmin kohdassa 5.223 esitettyä menettelytapaa käyttäen pintalämpötila eliminoida. Kun lisäksi käsittelyyn tuodaan mukaan pintavastus  $r_s$ , voidaan Penmanin menetelmä esittää yleisessä muodossa:

$$LE = \frac{\Delta'(R_n - G) + \rho_a c_p (e_s - e_a)/r_{aH}}{\Delta' + \gamma(1 + r_s/r_{aH})} \quad (113)$$

jossa  $\Delta'$  on vesihöyrynpainekäyrän kaltevuus lämpötilassa  $(T_a + T_o)/2$ . Käytännössä haihduttavan pinnan lämpötila on tuntematon, mutta kasvipeitteen ja ilman väliset lämpötilaerot ovat yleensä siksi vähäiset, että  $\Delta'$  voidaan korvata vesihöyrynpainekäyrän kaltevuudella ilman lämpötilassa ( $\Delta$ ). Paljaasta maasta ja etenkin lumesta tapahtuvaa haihduntaa selvitetessä näin ei voida kuitenkaan ilman muuta tehdä, joskin  $\Delta$ :n ollessa sekä kaavan osoittajassa että nimittäjässä, on syntyvä virhe yleensä tällöinkin pieni.

Kaavan (113) nimittäjässä psykrometrivakioilla kerrottu sulkulauseke on tarkemmin spesifioituna muotoa:

$$\frac{r_V}{r_H} = \frac{r_{aH} + r_s}{r_{aH}} \quad (114)$$

jossa

$r_H = r_{aH}$  = lämmönsiirtovastus

$r_V = r_s + r_{aV} = r_s + r_{aH}$  = vesihöyryn siirtovastus.

Kokonaisvastuksissa oleva ero aiheutuu lämmön ja vesihöyryn siirron lähtötason eroavaisuudesta. Kasvuston ollessa interseption peittämä tasot kuitenkin yhtyvät ja vain tällöin  $r_V = r_H$ , ts.  $r_s = 0$ .

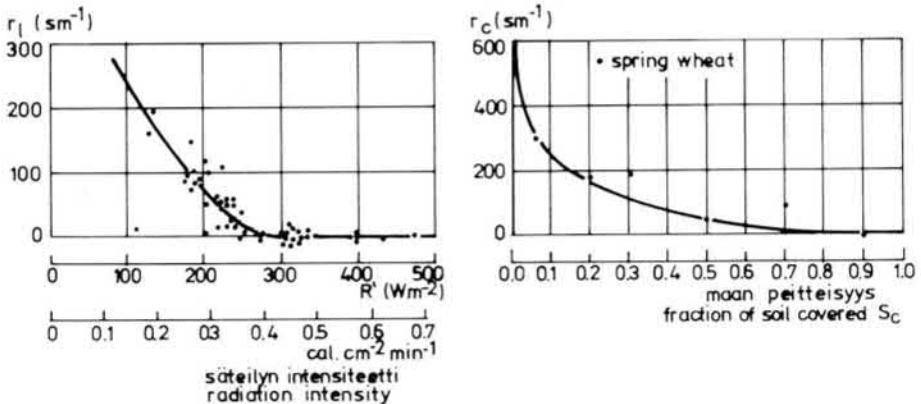
Pintavastuksen Monteith (1965, 1975, 1981) tulkitsee johtuvaksi lähinnä kasvuston fysiologiasta ja riippumattomaksi aerodynaamisesta vastuksesta, mikäli kasvusto peittää täysin maanpinnan. Tämä käsitys ei ole kuitenkaan saavuttanut yksimielistä kannatusta. Thom (1975) esittää yksityiskohtaisen analyysin ilmarakojen vastuksen ja koko kasvuston vastuksen yhtäläisyyksistä ja eroavaisuuksista ja Shuttleworth (1976) osoittaa Monteithin käsityksen virheelliseksi silloin, kun kasvusto on osittain interseption peittävä.

Rijtema (1965) ja Rijtema & Ryhiner (1968) lähtevät siitä, että pintavastuksen arvo määräytyy ilmarakojen vastuksen  $r_l$ , maan peitteisyyden vastuksen  $r_c$  sekä juuristokerroksen kosteuden ja kasvista johtuvan vastuksen  $r_n$  summana:

$$r_s = r_l + r_c + r_n \quad (115)$$

Tässä formuloinnissa  $r_l$  on tulkittu riippuvaksi lähinnä näkyvän valon määrästä (kuva 33a). Peitteisyyden vaikutusta pintavastuksen arvoon esittää kuva 33b. Rijteman mukaan  $r_s = 0$ , kun valoa on riittävästi, maanpinta on täysin kasvillisuuden peittävä eikä maan-kosteus rajoita haihduntaa. Tämä näkemys on ristiriidassa Monteithin teoreettisesti moitteettoman ja kokeellisesti vahvistetun käsityksen kanssa ja sitä on näinollen pidettävä virheellisenä. Peltokasveilla keskimääräisen pintavastuksen potentiaalisen haihdunnan sallivissa olosuhteissa on todettu olevan  $r_s \cong 40-60 \text{ s} \cdot \text{m}^{-1}$  (Monteith 1965, 1981, Szeicz & Long 1969), havupuumetsien  $r_s \cong 100-200 \text{ s} \cdot \text{m}^{-1}$  (Gash & Stewart 1976).

Kun peltoalueilla  $r_a \cong 50 \text{ s} \cdot \text{m}^{-1}$  ja metsäalueilla  $r_a \cong 10 \text{ s} \cdot \text{m}^{-1}$ , voidaan yhtälön (113) perusteella nähdä interseption merkitys haihdunnan lisäajana eri tyyppisillä alueilla. Peltoalueilla interseption vaikutus on oleellisesti vähäisempi kuin metsässä, jossa määrästä latvustosta vesi haihtuu noin 4 kertaa nopeammin kuin kuivasta. On kuitenkin huomattava, ettei käytettävissä ole selvityksiä, jotka olisi tehty suomalaisia olosuhteita vastaavilla ilmastoalueilla.



Kuva 33a Ilmarakojen vastuksen riippuvuus fotosynteesiä ylläpitävän säteilyn määrästä (Rijtema & Ryhiner 1968).

Kuva 33b. Maan peitteisyydestä johtuva vastus (Rijtema & Ryhiner 1968).

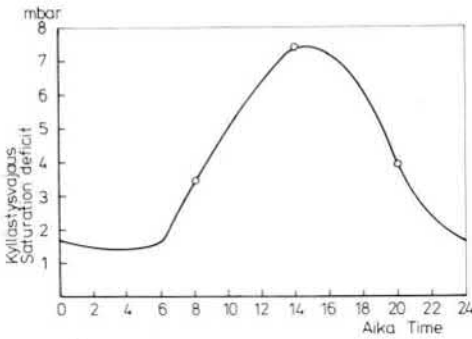
Fig. 33a. Dependence of diffusion resistance on photosynthetic active shortwave radiation (Rijtema & Ryhiner 1968).

Fig. 33b. Dependence of diffusion resistance of fraction of soil cover (Rijtema & Ryhiner 1968).

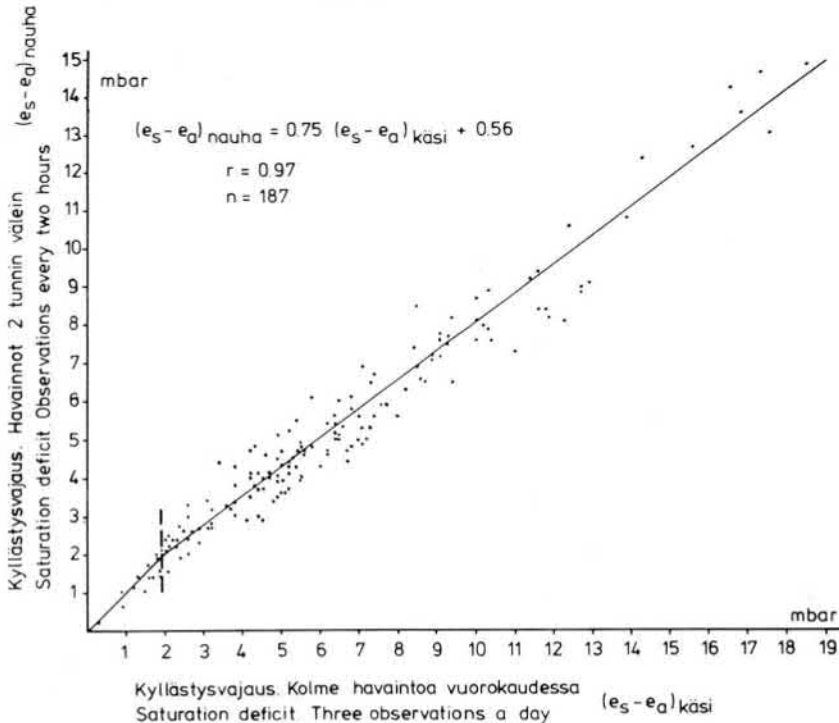
## 6.7 Kyllästysvajauksen määritystarkkuus

Suomessa on tapana laskea kyllästysvajauksen arvot klo 8, 14 ja 20 havaintojen keskiarvoina. Vastaavaanlaista korjausmenettelyä kuin mitä lämpötilamittausten suhteen on sovellettu (Kolkki 1957), ei kyllästysvajaukselle ole kehitetty. Esimerkkinä kyllästysvajauksen vuorokautisesta vaihtelusta on esitetty elokuun 1974 keskimääräinen vuorokausijakautuma (kuva 34), josta jo voidaan päätellä, ettei kolmen havainnon keskiarvona saatava kyllästysvajauksen arvo ole riittävän tarkka vuorokausiarvon estimaatti.

Ongelma on tässä yhteydessä ratkaistu verraten pragmaattisesti lineaarista regressiota käyttämällä (kuva 35). Laskennassa mukana olleet havainnot käyvät ilmi taulukosta 4.



Kuva 34. Kyllästysvajauksen keskimääräinen vuorokausikulku elokuussa 1974.  
Fig. 34. Average saturation deficit in August 1974 in the course of a day.



Kuva 35. Kolmen  $[(e_s - e_a)_{\text{käsi}}]$  ja 12 havainnon  $[(e_s - e_a)_{\text{nauha}}]$  keskiarvoina laskettujen kyllästysvajausten vuorokausiarvojen riippuvuussuhde.

Fig. 35. The relationship between daily values of saturation deficits calculated on the basis of either 3 or 12 observations.

Kahden tunnin välein,  $(e_s - e_a)_{\text{nauha}}$  ja klo 8, 14 ja 20 havaintojen,  $(e_s - e_a)_{\text{käsi}}$  perusteella laskettujen kyllästysvajauksien välille on saatu yhteys, kun  $(e_s - e_a)_{\text{käsi}} > 2$  mbar:

$$(e_s - e_a)_{\text{nauha}} = 0,75(e_s - e_a)_{\text{käsi}} + 0,56 \quad (116)$$

Kyllästysvajauksen arvot on jatkossa korjattu yhtälöä (116) käyttäen.

## 7. MAA-KASVI-ILMAKEHÄYHTEYDEN SIMULOINTI

### 7.1 Katsaus aiempiin ratkaisuihin

Maa-kasvi-ilmakehäsystemiä simuloivien mallien keskeinen käyttöalue on toistaiseksi ollut lähinnä maatalouden vesirakennuksen alueella, ei niinkään yleisessä hydrologiassa. Seuraavassa luodaan katsaus eräisiin keskeisimpiin malleihin ja niiden käyttötarkoituksiin.

Nimah & Hanksin (1973a,b) kehittämä malli on eräs keskeisimmistä numeerisista ratkaisuista. Mallin syöttötiedot ovat seuraavat: Maan kosteutta kuvaavina ominaisuuksina matrikpotentiaalinen ja hydraulinen johtavuuden riippuvuus maan kosteudesta, maankosteusrajat  $\theta_d$  = ilmakehä ja  $\theta_s$  = kyllästynyt, juuriston jakautumafunktio syvyyden ja ajan funktiona, maaveden maksimi- ja minimipotentialit juuren pinnalla, kosteusprofiili ja suolapitoisuusprofiili laskennan alkuhetkellä, pinnan reunaehtoina potentiaalinen transpiraatio, potentiaalinen evaporaatio, sadanta ja kasteluveden määrä sekä kasteluveden osmoottinen potentiaali, pohjan reunaehtoina pohjaveden pinnan korkeus tai potentiaali jollakin syvyydellä. Malli tulostaa todellisen transpiraation, evaporaation ja näiden summan, maankosteus- ja potentiaaliprofiilit, alimman tarkastelutason läpi kulkevan virtauksen ja potentiaalisen juuren pinnalla.

Wind (1972, 1976, 1979) on kehittänyt sekä hydrauliseen että sähköiseen analogiaan perustuvat simulaattorit maan kosteuden laskemiseksi. Päätaavoitteena on ollut selvittää ojasyvyyden ja -tiheyden vaikutusta muokkauskelpoisten päivien lukumäärään ja ajan-kohtiin. Pelto on luokiteltu muokkauskelpoiseksi, mikäli maaveden potentiaali on pienempi kuin -300 cm viiden senttimetrin syvyydessä. Feddes & Van Wijk (1976) pystyivät määrittämään optimaalisen ojasyvyyden käyttämällä Windin hydraulista analogiamallia ja numeerista haihduntamallia. Van Wijk (1980) sovelsi hydraulista analogiamallia tutkiessaan erilaisten maaprofiili-, ojasyvyyden ja ojatiheysratkaisujen vaikutusta jalkapallokenttien nurmikon pelikelpoisuuteen. Uusimpana analogiamallien sovellutuksena on niiden käyttö peltoalueilta tapahtuvan ainekuormituksen laskemisessa (Wind 1981).

Hillel & Berliner (1974) selvittivät muokkaus- ym. toimenpiteillä aikaansaadun mururakenteen merkitystä maan vesitalouteen. Heidän selvityksestään ilmenee, että mururakenteen pääasiallinen merkitys on hydraulisen johtavuuden lisääminen märällä alueella ja pienentäminen kuivalla alueella. Mallin avulla on mahdollista selvittää murujen koon ja muokkauskerroksen paksuuden vaikutusta imeyntään ja haihduntaan.

Childs & Hanks (1975) ovat Nimah & Hanks-mallia käyttäen selvittäneet maan suolapitoisuuden ja juuristokerroksen syvyyden vaikutusta kuiva-aineena ilmaistuun satoon. Sadon ja transpiraation yhteyttä ilmaisemaan on käytetty kaavaa:

$$Y = \frac{T_{\text{tot}}}{T_{\text{pot}}} \cdot Y_m \quad (117)$$

jossa

- $Y$  = todellinen sato ( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-1}$ )  
 $Y_m$  = potentiaalinen sato ( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-1}$ )  
 $T_{\text{tot}}$  = todellinen transpiraatio ( $\text{mm} \cdot \text{d}^{-1}$ )  
 $T_{\text{pot}}$  = potentiaalinen transpiraatio ( $\text{mm} \cdot \text{d}^{-1}$ ).

Tutkimuksen tulokset olivat loogisia. Satotaso nousi sadannan ja sadetuksen lisääntyessä vaikutuksen ollessa suurin, kun juuristokerroksen paksuus oli pienin. Maan suolapitoisuus vaikutti taas suhteellisesti voimakkaimmin juuristokerroksen syvyyden ollessa suurin kolmesta laskennassa mukana olleesta vaihtoehdosta.

Feddes *et al.* (1974) muunsivat Nimah & Hanks-mallia sillä tavoin, että pinnan ilma-kuiva arvo  $\theta_d$  vaihtelee meteorologisista olosuhteista riippuen, ja että potentiaalinen transpiraatio ja evaporaatio estimoidaan meteorologisten olosuhteiden ja kasvipeitteen ominaisuuksien perusteella eikä vedenpinnasta tapahtuvaan haihduntaan perustuen, kuten Nimah ja Hanks tekivät. Tekijät väittävät näiden muutosten parantavan mallilla laskettuja haihdunnan estimaatteja.

Feddes *et al.* (1978) kehittämän SWATR-mallin avulla voidaan simuloida todellista haihduntaa ja maankosteusprofiilia heterogeenisestä, mutta kerroksittain lajittuneesta maasta (2 kerrosta). Mallin merkittävin eroavaisuus Nimah & Hanks-malliin verrattuna on juurten vedenottomekanismin kuvaamisessa, joka on SWATR:ssa tehty yhtälön (94) mukaisesti. Mallin syöttötietoina tarvitaan tiedot matrikpotentiaalista ja hydraulisesta johtavuudesta maankosteuden funktiona kummassakin kerroksessa, juuristokerroksen syvyys, nielutermin kriittiset arvot, maankosteusprofiili laskennan alkuhetkellä sekä reunaehtoina potentiaalinen transpiraatio ja evaporaatio sekä pohjaveden pinnan korkeus. Malli tulostaa todellisen haihdunnan ja maankosteusprofiilin ohella mm. virtaukset eri kerroksissa, juuriston ottaman vesimäärän kerroksittain ja profiilin sisältämän vesimäärän. Mallin laskemaa transpiraatiota on mahdollista käyttää syöttötietona mallissa CROP, jonka avulla voidaan simuloida sadon kuiva-ainemäärää.

Hiljattain mallia SWATR on laajennettu sillä tavoin, että sen nykyisellä versiolla SWATRE on mahdollista käsitellä maaveden liikettä maaprofiilissa, jossa on viisi kerrosta. Mallin käyttökelpoisuus on lisääntynyt erityisesti siksi, että sen avulla voidaan laskea myös virtaus ojiin, jolloin pystytään hallitsemaan pellon koko vesitase (Bellmans *et al.* 1981).

Jansson ja Halldin (1979) ovat kehittäneet SWATR-mallia vastaavan version metsän vesitaseen simuloimiseksi. Tarkastelua on kuitenkin laajennettu siten, että mallin avulla voidaan simuloida myös lumen kertymää ja maan lämpötilakenttää. Mallin "sydän" muodostuu Penmanin laajennetusta yhtälöstä sekä Fourierin ja Richardsonin (Darcyn) yhtälöiden differenssiratkaisuista.

## 7.2 Mallin rakenne

Mallia laadittaessa on aiemmin esitetyt näkökohdat pyritty ottamaan huomioon niin pitkälti, kuin suoritettavat havainnot ja mittaukset huomioonottaen on ollut mahdollista.



Kun juuristosta ja juurten vedenotosta ei ole käytettävissä systemaattisia havaintoja, on myös malli tältä osin jäänyt puutteelliseksi. Mallin käytön keskeisenä tavoitteena on ollut määrittää maanpinnan energiatase. Mallia hyväksikäyttäen on määritetty pintavas-tustermin  $r_s$  suuruus sekä potentiaalisen haihdunnan sallivissa olosuhteissa että myös silloin, kun juuristokerroksen kuivuus rajoittaa haihduntaa.

#### Maaveden virtaus

Ratkaisu suoritetaan diskretoimalla yhtälöt (44) ja (47) (kuva 36):

$$q_{i,n} = -K(\bar{\psi}) \left( \frac{\psi_{i-1,n} - \psi_{i,n}}{\Delta_i} - 1 \right) \quad (118)$$

$$\frac{1}{\Delta_n} (\psi_{i,n} - \psi_{i,n-1}) = \frac{-1}{C(\psi_{i,n}) \Delta_i} (q_{i+1,n} - q_{i,n} - s_{i,n}) \quad (119)$$

jossa

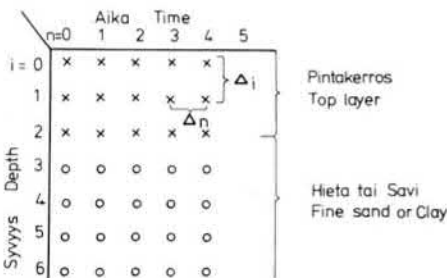
$$K(\bar{\psi}) = K \left( \frac{\psi_{i,n} + \psi_{i-1,n}}{2} \right)$$

$\Delta_i$  = laskenta-askel syvyys suunnassa

$\Delta_n$  = laskennan aika-askel.

Näistä käyvät ilmi laskennassa tarvittavat tiedot:

1. Matrikpotentiaalinen  $\psi$  ja maankosteuden  $\theta$  välinen yhteys eli vedenpidätyskäyrä.
2. Hydraulisen johtavuuden  $K(\psi)$  ja matrikpotentiaalinen välinen yhteys (ks. kohta 7.3).
3. Alkuehtona maankosteustilanne laskennan alussa. Ohjelmassa maankosteus muutetaan matrikpotentiaaliksi ja laskenta aloitetaan sijoittamalla  $\psi_{i,0} = \psi_{i,1}$ .
4. Alareunan ehtona pohjaveden korkeus  $\psi = 0$ .
5. Yläreunan ehtona haihdunta ja tehokas sadanta. Juurten vedenoton on oletettu tapahtuvan 0–30 cm:n syvyydeltä. Tehokkaalla sadannalla tarkoitetaan sadantaa, joka sadannasta jää jäljelle, kun interseptio ja pintavalunta vähennetään.
6. Tapahtunut pohjavalunta. Se poistetaan profiilista välittömästi pohjavedenpinnan yläpuolelta.
7. Aika- ja syvyysaskeleen pituus (ks. kohta 7.3).



Kuva 36. Maankosteusmallin diskretoinnin periaate.

Fig. 36. Discretion principle for soil moisture flow model.

### Haihdunta

Haihdunnan määrittämisessä käytetään Penmanin laajennettua yhtälöä:

$$LE = \frac{\Delta(R_n - G) + \rho_a c_p (e_s - e_a)/r_a}{\Delta + \gamma(1 + r_s/r_a)} \quad (120)$$

Aerodynaaminen vastus  $r_a$  lasketaan Rijteman esittämällä tavalla (ks. kohta 6.5). Maan lämmönvaihtotermi  $G$  saadaan lysimetreissä n:o 1 ja 2 kahden cm:n ja 25 cm:n ja lysimetrissä n:o 4 kahden cm:n ja 10 cm:n syvyydellä tehtyjen lämpötilahavaintojen ja kohdassa 6.33 esitettyjen lämmönjohtavuuksien perusteella käyttämällä yhtälöä:

$$G = \lambda(\theta) \frac{\partial T}{\partial z} \quad (121)$$

Pintavastustermin  $r_s$  muodon määrittämisestä tehdään selkoa kohdassa 7.3. Interseptiohaihdunnan on ajateltu tapahtuvan interseptiovarastosta, jonka suuruus riippuu kasvuston korkeudesta kohdan (3.5) mukaisesti. Ruohon pituuden ollessa 10 cm on maksimi-interseption määrä 1,5 mm. Interseptiohaihdunnan aikana  $r_s = 0$ .

Potentiaalinen haihdunta voidaan antaa myös syöttötietona.

### Tietokoneohjelma

Kehitetty malli on saatettu tietokoneohjelman muotoon. Ohjelman rakenne sekä syöttö- ja tulostustiedot käyvät ilmi liitteenä 4 olevasta lohkokaaviosta.

## 7.3 Laskennan suoritus tapa

### Laskentajaksot

Laskennassa mukana olleet jaksot käyvät ilmi taulukosta 4 ja liitteestä 3 Ensinmainituilla jaksoilla laskenta on voitu perustaa automaattisen mittausjärjestelmän avulla kootuihin havaintoihin, viimeksimainituilla on käytettävissä käsihavaintojen perusteella laskettuja vuorokausiarvoja. Kyllästysvajauksen arvot on korjattu kohdan 6.7 mukaisesti. Jaksojen on täytettävä vaatimus, että ruohon pituus sekä lysimetreissä että kentällä on pienempi kuin 15 cm. Vuorokausiarvoja on käytetty ainoastaan määrättäessä pintavastuksen arvot potentiaalisen haihdunnan tilanteessa.

### Hydraulinen johtavuus

Laskennan suorittamisessa ensimmäisenä tehtävänä on ollut hydraulisen johtavuuden määrittäminen. Tutkimustyön ollessa tässä vaiheessa ei Bloemen ollut vielä julkaissut menetelmäänsä, joten käytettävissä ovat olleet Green-Coreyn ja Mualemin menetelmät. Niiden välinen valinta ja samalla tehokkaan hydraulisen johtavuuden  $k_e$  määrittäminen on suoritettu käyttämällä elokuussa 1977 tehtyjä mittauksia. Elokuu on valittu siitä syystä, että sen aikana termi  $G$  (ks. yhtälö 121) on voitu olettaa nolllaksi ja myös siksi, että tuolloin maankosteusprofiilit on mitattu useita kertoja. Mallilla laskettu ja mitattu kokonaishaihdunta on kalibroitu samaksi pintavastustermin  $r_s$  avulla.

Kalibroinnin suoritus on tapahtunut sillä tavoin, että pintakerroksen tehokkaalle johtavuudelle on määrätty arvo Brooks & Coreyn (1964) esittämän tavan mukaisesti

( $k_e = 0,5 k_s$ ) ja tätä arvoa on jatkossa pidetty vakiona. Hydraulisen johtavuuden ja vesipitoisuuden välisen yhteyden on oletettu pintakerroksessa noudattavan Mualemin menetelmällä laskettuja suhteellisia arvoja. Hiedalle ja savelle tehokkaat hydrauliset johtavuudet on määrätty vastaavalla tavoin. Näin saadut arvot ovat olleet kalibroinnin lähtöarvoja, joita on muutettu molempiin suuntiin optimiarvon löytämiseksi. Koska lysimetrien pohjalla olevan sorakerroksen ominaisuuksista ei ole ollut käytettävissä tietoja, on kerroksen vedenpidätysominaisuuksina ja hydraulisen johtavuuden arvoina käytetty Rijteman (1969) esittämiä karkeaa hiekkaa koskevia arvoja. Kalibroinnin hyvyyden kriteerinä on ollut 10, 50 ja 90 cm:n syvyydellä mitattujen ja laskettujen kosteuksien erotusten neliösumma. Tällä tavoin laskien on parhaiten mittaustuloksiin saatu sopimaan kosteusarvot, joiden pohjana ovat seuraavat tehokkaat hydrauliset johtavuudet:

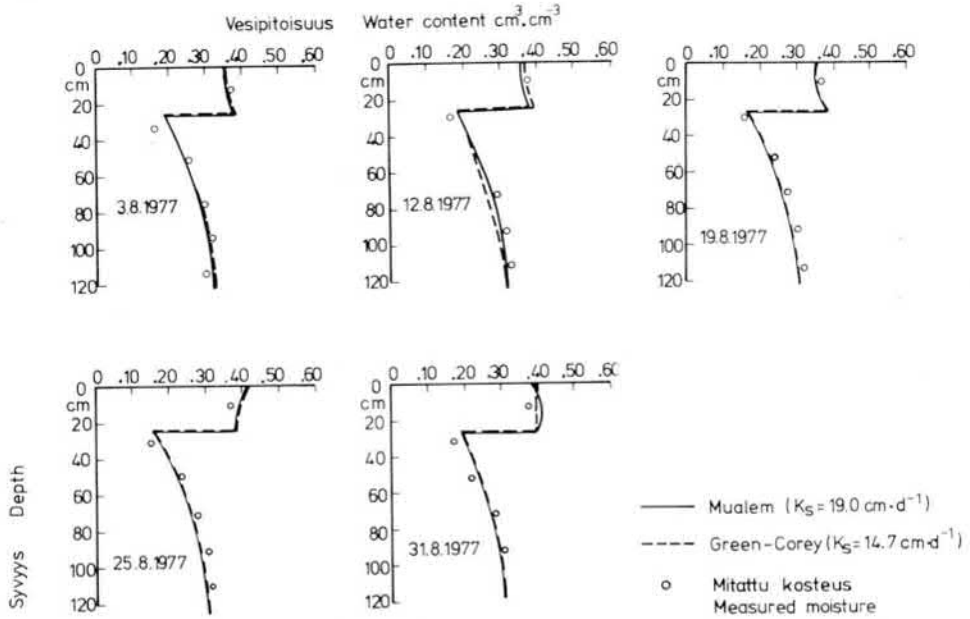
|        |                    |               |                           |
|--------|--------------------|---------------|---------------------------|
| hietta | (lysimetri n:o 2): | Green & Corey | 15 cm . d <sup>-1</sup>   |
|        |                    | Mualem        | 19 „                      |
| savi   | (lysimetri N:o 9): | Green & Corey | 0,37 cm . d <sup>-1</sup> |
|        |                    | Mualem        | 0,26 „                    |

Näitä arvoja käyttäen lasketut ja mitatut maankosteusprofiilit on esitetty kuvissa 37 ja 38. Erotusten neliösummissa ei eri menetelmien osalta juuri eroa ole, joten suoritettujen tarkastelujen perusteella on kutakuinkin samantekevää, kumpi menetelmä valitaan. Jatkossa laskelmat on suoritettu Mualemin kehittämää menetelmää käyttämällä. Maan ollessa keväisin ja syksyisin kylmää viskositeettiarvo on suuri ja hydraulinen johtavuus pienenee. Laskennassa tämä on otettu karkeasti huomioon huhti-toukokuussa ja lokakuussa pienentämällä hydraulisia johtavuuksia 50 %.

Saaduissa tehokkaissa hydraulisisissa johtavuuksissa huomio kiinnittyy ennen muuta siihen, että savelle saatu arvo on suurempi kuin laboratoriomittauksissa saatu  $k_s = 0,1$  cm . d<sup>-1</sup>. Tämän epäluonnollisen tilanteen selitys lienee vedensitoutumiskäyrän alapään mittauksissa. Riippuvuussuhteen tarkka määrittäminen on käytettävissä olleilla laitteistoilla vaikeaa ja jopa mahdotonta. Ilman sisääntulopistettä, joka Bloemenin mukaan laskien on niinkin suuri kuin  $\psi_w = 220$  cm, ei vedensitoutumiskäyrän perusteella saada lainkaan, vaan hydraulinen johtavuus putoaa jo aivan pienillä potentiaaliarvoilla.

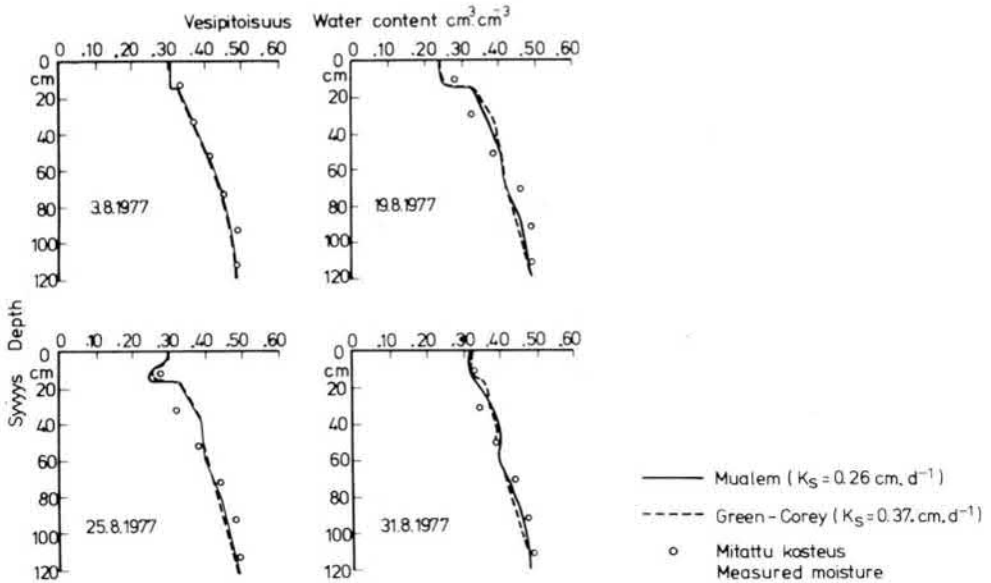
### $r_s - \psi$ -yhteys

Juuristokerroksen potentiaalinen vaikutusta haihduntaan ei voida käytettävissä olevan havaintoaineiston perusteella yksityiskohtaisesti selvittää. Laskennassa käytettävän, keskimääräistä tilannetta kuvaavan riippuvuuden saamiseksi on tarkasteltu kahta vaihtoehtoa (kuva 39). Toinen näistä on otettu Szeiczin ja Longin (1969) selvityksestä, joka perustuu Kööpenhaminassa tehtyihin mittauksiin. Heidän mukaansa  $r_s$  alkaa suurentua juuristokerroksen potentiaalissa ollessa  $\psi < -3\ 500$  cm. Toista vaihtoehtoa laadittaessa lähtökohdaksi on ollut oletus, että maankosteus alkaa pienentää haihduntaa potentiaalissa alittaessa arvon  $\psi = -500$  cm (ks. kohta 6.43). Toinen  $r_s$ -termin kasvun määrittävä piste on saatu lysimetristä n:o 4 jaksolla 26.6.-1.8.1973 tapahtuneen haihdunnan perusteella. Juuristokerroksen keskimääräiseksi potentiaaliksi voidaan mittausten perusteella arvioida po. jaksolla  $\psi \cong -10\ 000$  cm. Jakson aikana lysimetristä tapahtunut haihdunta on ollut 67 mm, joka saadaan Penmanin laajennettua kaavaa käyttämällä, kun pintavastukselle asetetaan arvo  $r_s \cong 500$  s . cm<sup>-1</sup>.



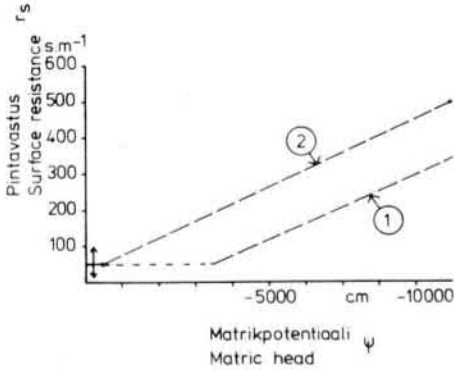
Kuva 37. Hydraulisen johtavuuden kalibrointi hietalysimetrille n:o 2. Mitatut ja parhaiten mittaustuloksiin osuvat lasketut kosteusprofiilit elokuussa 1977.

Fig. 37. Calibration of hydraulic conductivity for the fine sand lysimeter n:o 2. Measured and best fitting moisture profiles in August 1977.



Kuva 38. Hydraulisen johtavuuden kalibrointi savilysimetrille n:o 9. Mitatut ja parhaiten mittaustuloksiin osuvat lasketut kosteusprofiilit elokuussa 1977.

Fig. 38. Calibration of hydraulic conductivity for the clay lysimeter n:o 9. Measured and best fitting moisture profiles in August 1977.



Kuva 39. Pintavastuksen riippuvuus juuristokerroksen matrikpotentiaalista. Laskennassa kokeillut vaihtoehdot.

Fig. 39. Dependence of surface resistance on the matric potential of rooting zone. Tested alternatives.

Szeiczin ja Longin esittämää pienennystermiä käytettäessä on ns. peruspintavastus ( $0 > \psi > -3\ 500$  cm) ollut kaikissa lysimetreissä  $> 200$  s. cm<sup>-1</sup>. Näin suuret pintavastuksen arvot heinäkuussa eivät ole sopusoinnussa muina kesinä saatujen tulosten kanssa (kohta 7.5) ja tästä syystä vaihtoehtoa on pidetty sopimattomana. Sensijaan toista vaihtoehtoa käytettäessä peruspintavastuksen arvo lysimetrissä n:o 1 on ollut 40 s. cm<sup>-1</sup> ja lysimetrissä n:o 2 100 s. cm<sup>-1</sup>. Nämä arvot ovat samansuuruisia kuin potentiaalisen evapotranspiraation tapauksessa myös kirjallisuudessa on esitetty (ks. kohta 6.6). Tästä syystä po. pienennystermi on valittu.

#### Aika-askeleen pituus

Maankosteuden numeerisen ratkaisun stabiilisuus riippuu käytetyn differenssiverkon dimensioista ja hydraulisen johtavuuden suuruudesta. Syvyys suunnassa askeleen pituudeksi on otettu 10 cm, joten ratkaisevaksi tekijäksi on jäänyt aika-askeleen pituus. Aika-askeleen lyhentäminen lisää laskenta-aikaa ja kustannuksia, joten laskennassa tärkeällä sijalla on ollut optimaalisen aika-askeleen määrääminen. Kokeilemalla on todettu, että ratkaisut pysyvät stabiileina ja säilyttävät vesitaseen, kun aika-askeleen pituus on 4 minuuttia. Yhden kuukauden laskenta vie tälläin UNIVAC 1108-tietokoneaikaa noin 2 minuuttia.

### 7.4 Maanpinnan energiatase

Kohdassa 7.2 kuvatulla mallilla on laskettu taulukon 4 mukaisille jaksoille maanpinnan energiataseen komponenteista haihduntaan kuluva latentti energia (LE) sekä maahan ja maasta siirtyvä energia (G). Kun nettosäteily  $R_n$  on mitattu, saadaan lämpö C energiataseyhtälöstä:

$$R_n = LE + G + C (+M) \quad (122)$$

Energiataseen komponenttien vuorokausiarvot on esitetty liitteissä 5a–12a ja jaksojen keskimääräiset taseet taulukossa 25. Taulukosta 25 käy ilmi myös pintakerrokselle laskettu keskimääräinen kosteus ja se peruspintavastuksen arvo, jolla laskettu haihdunta on saatu vastaamaan mitattua.

Taulukko 25. Keskimääräiset pintavastukset  $r_s$  ( $s \cdot cm^{-1}$ ) ja pintakerroksen vesipitoisuudet  $\theta$  ( $cm^3 \cdot cm^{-3}$ ) sekä energiataseen komponentit ( $W \cdot m^{-2}$ ) jaksoittain.  
 Table 25. Average surface resistances  $r_s$  ( $s \cdot m^{-1}$ ), water contents in top soil  $\theta$  ( $cm^3 \cdot cm^{-3}$ ) and components of the energy balance ( $W \cdot m^{-2}$ ) for each calculation period.

| Jakso Period      | $R_n$ | Lysimetri 1<br>Lysimeter 1 |          |      |    |     | Lysimetri 2<br>Lysimeter 2 |          |      |    |     | Lysimetri 4<br>Lysimeter 4 |          |     |    |     |
|-------------------|-------|----------------------------|----------|------|----|-----|----------------------------|----------|------|----|-----|----------------------------|----------|-----|----|-----|
|                   |       | $r_s$                      | $\theta$ | LE   | G  | C   | $r_s$                      | $\theta$ | LE   | G  | C   | $r_s$                      | $\theta$ | LE  | G  | C   |
| 20.06.–11.07.1972 | 133   | 105                        | 0,37     | -107 | -9 | -17 | 105                        | 0,37     | -104 | -6 | -23 | 130                        | 0,33     | -87 | -8 | -38 |
| 16.04.–20.05.1973 | 77    | 210                        | 0,42     | -34  | -7 | -34 |                            |          |      |    |     | 180                        | 0,35     | -34 | -4 | -39 |
| 07.06.–26.06.1973 | 121   | 45                         | 0,37     | -100 | -8 | -13 |                            |          |      |    |     | 95                         | 0,27     | -67 | -7 | -47 |
| 26.06.–01.08.1973 | 102   | 40                         | 0,31     | -72  | -6 | -24 | 100                        | 0,31     | -75  | -7 | -20 | 85                         | 0,25     | -54 | -6 | -42 |
| 14.05.–04.06.1974 | 87    | 185                        | 0,40     | -50  | -5 | -32 |                            |          |      |    |     | 195                        | 0,30     | -36 | -3 | -48 |
| 13.08.–26.08.1974 | 80    | 45                         | 0,50     | -73  | -3 | -4  | 85                         | 0,37     | -72  | -3 | -5  | 90                         | 0,30     | -67 | -2 | -11 |
| 01.09.–30.09.1975 | 35    | 130                        | 0,52     | -47  | 5  | 7   |                            |          |      |    |     | 140                        | 0,36     | -47 | 3  | 9   |
| 01.10.–30.10.1975 | -4    | 200                        | 0,52     | -22  | 11 | 15  |                            | 0,46     | -22  | 17 | 9   |                            |          |     |    |     |

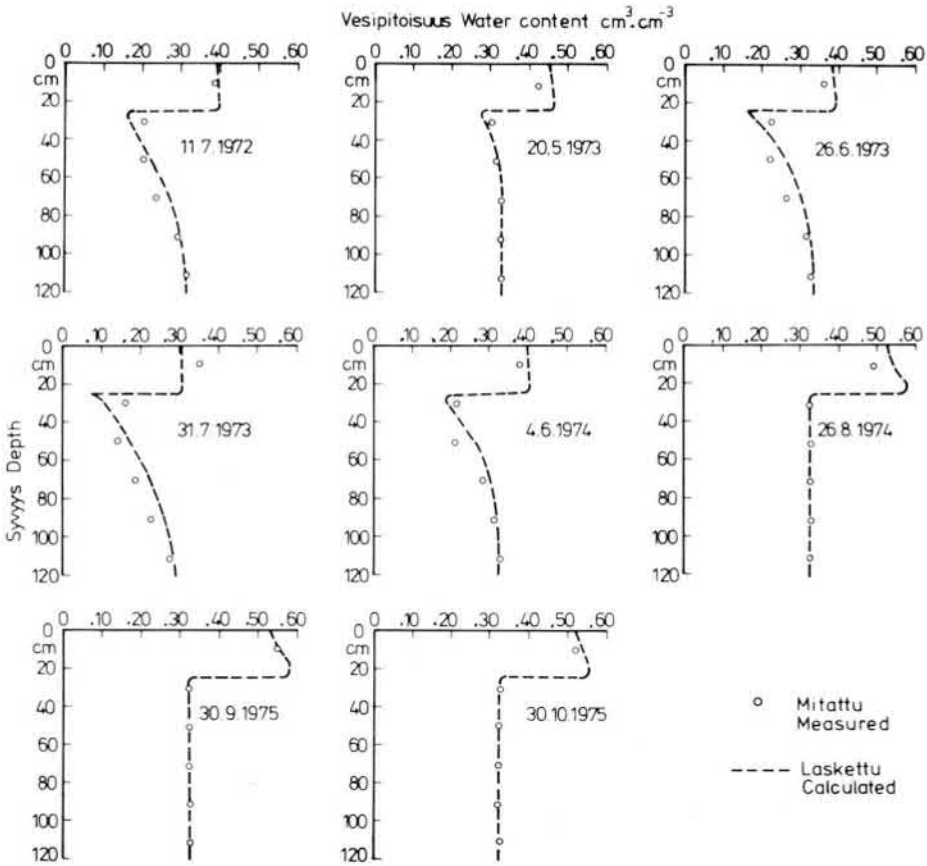
Energian jako näyttää riippuvan maankosteudesta sillä tavoin, että maankosteuden rajoittaessa haihduntaa C kasvaa, mutta vaikutus termin G suuruuteen on vähäinen. Laskelmista käy ilmi myös se tunnettu tosiasia, että keväisin kuiva maa sitoo energiaa kosteaa maata selvästi vähemmän. Nettosäteilystä haihduntaan kuluu toukokuussa noin puolet, kesä-elokuussa yli kaksi kolmannesta ja syyskuussa haihdunta on jo nettosäteilyä suurempaa. Lokakuussa haihdunta ottaa tarvitsemansa energian osin maasta osin ilmasta.

Maan energiavaihdon laskennan tarkkuus riippuu pintakerroksen kosteuden laskenta-tarkkuudesta. Tämän seikan arvostelemiseksi voidaan tarkastella mitattuja ja laskettuja maankosteusprofileja laskentajaksojen lopussa (kuvat 40–42). Lysimetreissä n:o 1 suurin ero pintakerroksessa on ollut 5 tilavuusprosenttia, lysimetreissä n:o 2 ja n:o 4 7 tilavuusprosenttia. Lämmönjohtavuuden ja niinmuodoin myös termin G virheet olisivat lysimetreissä n:o 1 noin 15 %, lysimetreissä n:o 4 noin 20 % ja lysimetreissä n:o 2 noin 30 %. Nämä arvot edustanevat maksimivirhettä (vrt. kohta 7.6) ja on oletettavissa, että keskimääräinen virhe jää mainittuja arvoja selvästi pienemmäksi.

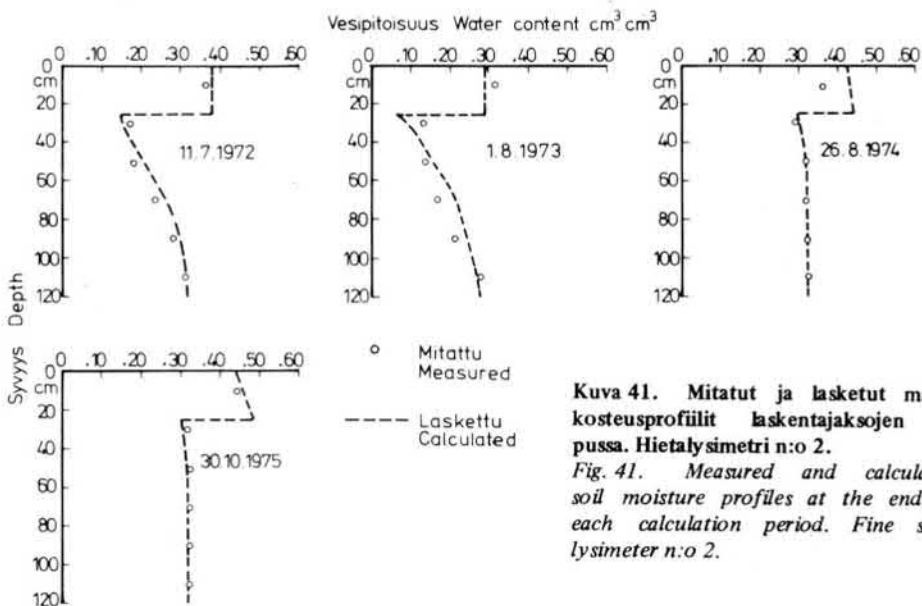
Liitteissä 5b–12b ja kuvassa 43 on esitetty jaksoittain maan energiataseen laskettu keskimääräinen käyttäytyminen. Termien  $R_n$ , LE ja C maksimit osuvat keskipäivään, mutta G:n maksimi on vasta klo 14 ja klo 16 välillä.

Saatuja tuloksia voidaan verrata Kulmalan (1970) Jokioisissa kesällä 1968 suorittamiin mittauksiin (taulukot 26–28), joskaan eri ajankohtina, erilaisissa mikroilmasto-olosuhteissa tehtyjen mittausten perusteella ei ole vedettävissä juuri johtopäätelmiä. Energian jakautumisen voitaneen kuitenkin katsoa tapahtuvan pääpiirteissään samalla tavoin. Huomionarvoista on havaita, että laskentatulosten mukaan syys- ja lokakuussa 1975 tiivistyntää ei keskimäärin näytä yöaikaan tapahtuvan. Selvittämättä jää, pitääkö saatu tulos paikansa myös todellisuudessa, vai onko se mittausvirheistä johtuvaa. Haihdunnan arviointia ajatellen merkittävimmän eroavat maahan johtuvat energiamäärät, jotka Kulmalan mittausten mukaan ovat likimäärin kaksinkertaiset Otaniemen arvoihin verrattuna. Erityisesti kesäkuun arvot poikkeavat toisistaan.

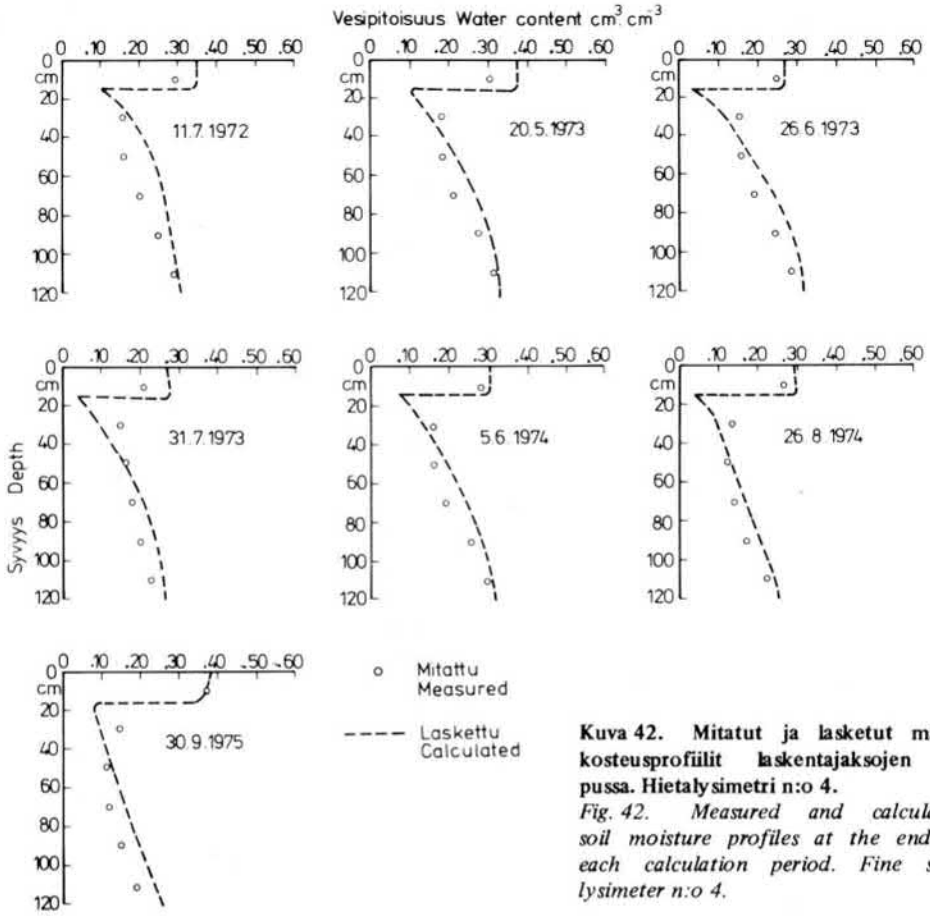
Taulukkoon 29 on koottu ao. tutkimusten ohella tiedot myös Seuna (1977) suorittamista laskelmista. Näiden pohjana ovat Vihdissä suoritettut maan lämpötilamittaukset ja oletetut ominaislämpöarvot. Seunan saamat tulokset vahvistavat nyt saatujen arvojen oikeellisuutta.



**Kuva 40.** Mitatut ja lasketut maankosteusprofiilit laskentajaksojen lopussa. Hietalysimetri n:o 1.  
*Fig. 40.* Measured and calculated soil moisture profiles at the end of each calculation period. Fine sand lysimeter n:o 1.



**Kuva 41.** Mitatut ja lasketut maankosteusprofiilit laskentajaksojen lopussa. Hietalysimetri n:o 2.  
*Fig. 41.* Measured and calculated soil moisture profiles at the end of each calculation period. Fine sand lysimeter n:o 2.

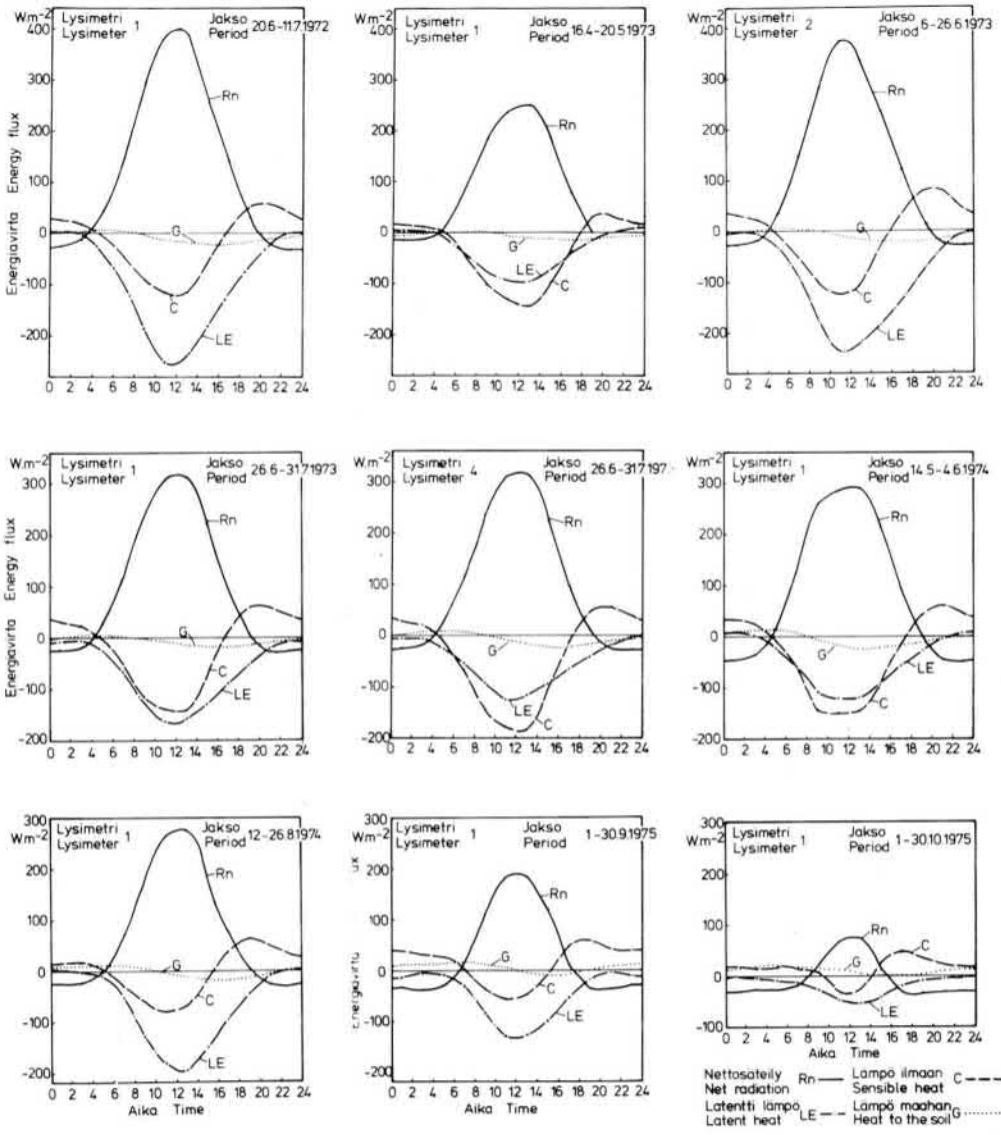


Taulukko 26. Energiataseen komponentit ( $\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$ ) Jokioissa kesäkuussa 1968 (Kulmala 1970) ja jaksolla 6.6.–26.6.1973.  $\theta$  on pintakerroksen keskimääräinen vesipitoisuus.

Table 26. Components of the energy balance ( $\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$ ) in Jokioinen in June 1968 (Kulmala 1970) and during the period 6 June–26 June 1973.  $\theta$  is the average water content in top soil.

| Komponentti<br>Component | Jokioinen<br>1968 | Otaniemi 6.6.–26.6.1973                               |   |
|--------------------------|-------------------|---|---|
|                          |                   | $\theta \cong 0,37 \text{ cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$ | $\theta \cong 0,37 \text{ cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$ |
| $R_p$                    | 117               | 121   | 121   |
| LE                       | -76               | -100  | -87   |
| C                        | -27               | -13   | -47   |
| G                        | -19               | -8  | -7  |





Kuva 43. Maanpinnan energiataseen komponenttien keskimääräinen vuorokausijakauma laskentajaksoilla.

Fig. 43. Average daily distribution of the energy balance of soil surface in each calculation period.

Taulukko 27. Energiataseen komponentit ( $W \cdot m^{-2}$ ) Jokioisissa heinäkuussa 1968 (Kulmala 1970) ja jaksolla 26.6.–31.7.1973.  $\theta$  on pintakerroksen keskimääräinen vesipitoisuus.

Table 27. Components of the energy balance ( $W \cdot m^{-2}$ ) in Jokioinen in July 1968 (Kulmala 1970) and during the period 26 June–31 June 1973.  $\theta$  is the average water content in top soil.

| Komponentti<br>Component | Jokioinen<br>1968 | Otaniemi 26.6.–31.7.1973                              |   |
|--------------------------|-------------------|---|---|
|                          |                   | $\theta \cong 0,31 \text{ cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$ | $\theta \cong 0,25 \text{ cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$ |
| $R_p$                    | 109               | 102   | 102   |
| LE                       | -76               | -72   | -54   |
| C                        | -27               | -24   | -42   |
| G                        | -7                | -6  | -6  |

Taulukko 28. Energiataseen komponentit ( $W \cdot m^{-2}$ ) Jokioisissa elokuussa 1968 (Kulmala 1970) ja jaksolla 12.8.–26.8.1974.  $\theta$  on pintakerroksen keskimääräinen vesipitoisuus.

Table 28. Components of the energy balance ( $W \cdot m^{-2}$ ) in Jokioinen in August 1968 (Kulmala 1970) and during the period 12 August–26 August 1974.  $\theta$  is the average water content in top soil.

| Komponentti<br>Component | Jokioinen<br>1968 | Otaniemi 26.6.–31.7.1973                              |   |
|--------------------------|-------------------|---|---|
|                          |                   | $\theta \cong 0,50 \text{ cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$ | $\theta \cong 0,30 \text{ cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$ |
| $R_p$                    | 68                | 80  | 80  |
| LE                       | -49               | -73   | -67   |
| C                        | -27               | -4  | -11   |
| G                        | -6                | -3  | -2  |

Taulukko 29. Maan energianvaihto ( $W \cdot m^{-2}$ ) Jokioisissa kesällä 1968 (Kulmala 1970), Vihdissä kesinä 1968 ja 1969 (Seuna 1977) ja Otaniemessä kesinä 1972–75.

Table 29. Heat flow into the soil ( $W \cdot m^{-2}$ ) in Jokioinen in the summer 1968 (Kulmala 1970), in Vihti in the summers 1968 and 1969 (Seuna 1977) and in Otaniemi in the summers 1972–75.

|                      | Jokioinen<br>1968 | Vihti<br>1968 | Vihti<br>1969 | 1972 | 1973 | Otaniemi<br>1974 | 1975 |
|----------------------|-------------------|---------------|---------------|------|------|------------------|------|
| Toukokuu<br>May      |                   | -8            | -10           |      | -6   | -5               |      |
| Kesäkuu<br>June      | -19               | -6            | -6            |      | -8   |                  |      |
| Heinäkuu<br>July     | -7                | -2            | -3            | -8   | -6   |                  |      |
| Elokuu<br>August     | -6                | -1            | +2            |      |      | -3               |      |
| Syyskuu<br>September |                   | +7            | +5            |      |      |                  | +5   |
| Lokakuu<br>October   |                   |               |               |      |      |                  | +14  |

## 7.5 Pintavastuksen suuruus

Taulukossa 30 ja kuvassa 44 on esitetty ne pintavastuksen arvot, joilla lasketut ja mitatut haihdunnat on saatu vastaamaan toisiaan, kun haihdunta on ollut potentiaalista. Taulukosta 30 käyvät ilmi myös laskennassa käytetyt ruohon pituudet ja oletettu maan energianvaihto. Maahan menevät (tai maasta tulevat) energiamäärät ovat touko-syyskuussa määrätty prosentteina nettosäteilystä, mutta lokakuussa on käytetty vakioarvoa  $-12 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ .

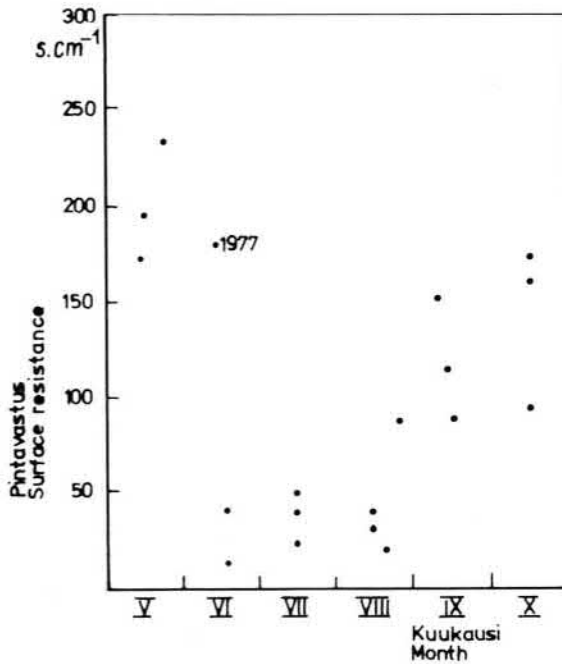
Maan energianvaihto on kohdassa 7.4 esitettyjen laskelmien mukainen ja tästä syystä suuruusluokaltaan perusteltavissa. Siinä tehtävä virhe luonnollisesti heijastuu pintavastuksen arvoihin. Jos esimerkiksi jaksolla 5.5.–31.5.1977 maahan menevä energia olisi kaksinkertainen eli 18 % nettosäteilystä, muuttuisi pintavastus  $r_s$  nyt saadusta arvosta  $170 \text{ s} \cdot \text{cm}^{-1}$  arvoon  $120 \text{ s} \cdot \text{cm}^{-1}$ .

Kesä-elokuussa pintavastuksen arvot ovat pienimmillään ja yleensä  $< 50 \text{ s} \cdot \text{cm}^{-1}$ . Keväällä ja syksyllä pintavastus on tätä selvästi suurempi ollen toukokuussa noin  $200 \text{ s} \cdot \text{cm}^{-1}$  ja syyskuussa  $100\text{--}150 \text{ s} \cdot \text{cm}^{-1}$ . Lokakuun arvot ovat samaa luokkaa kuin syyskuussa, mutta kun lokakuussa jo pienetkin mittausvirheet haihdunnassa muuttavat mel-

Tauhukko 30. Potentiaaliseen haihduntatilanteelle lasketut keskimääräiset pintavastuksen arvot.

Table 30. Average values of surface resistances calculated for potential evapotranspiration.

| Vuosi<br>Year | Jakso<br>Period | PET<br>mm | Ruohon<br>pituus<br>Grass<br>height<br>cm | G                     | Pinta-<br>vastus<br>Surface<br>resistance<br>$\text{s} \cdot \text{cm}^{-1}$ |
|---------------|-----------------|-----------|---|-----------------------|--|
| 1973          | 06.06.–26.06.   | 78        | 10  | 6 %                   | 40   |
| 1974          | 13.05.–04.06.   | 38        | 5   | 6 %                   | 235  |
|               | 12.08.–26.08.   | 40        | 10  | 3 %                   | 20   |
|               | 26.08.–24.09.   | 59        | 10  | -12 %                 | 150  |
| 1975          | 05.06.–01.07.   | 96        | 5   | 6 %                   | 15   |
|               | 01.07.–30.07.   | 110       | 5   | 6 %                   | 25   |
|               | 30.07.–28.08.   | 86        | 5   | 3 %                   | (-10)  |
|               | 28.08.–01.10.   | 61        | 10  | -15 %                 | 115  |
|               | 01.10.–30.10.   | 24        | 10  | -12 $\text{W m}^{-2}$ | 150  |
| 1977          | 05.05.–31.05.   | 45        | 5   | 9 %                   | 170  |
|               | 31.05.–28.06.   | 78        | 10  | 6 %                   | 180  |
|               | 28.06.–03.08.   | 89        | 10  | 6 %                   | 40   |
|               | 03.08.–16.09.   | 83        | 10  | 0 %                   | 90   |
| 1978          | 30.06.–31.07.   | 99        | 10  | 6 %                   | 50   |
|               | 31.07.–31.08.   | 86        | 10  | 3 %                   | 30   |
|               | 03.10.–31.10.   | 22        | 10  | -12 $\text{W m}^{-2}$ | 175  |
| 1979          | 02.05.–31.05.   | 55        | 10  | 9 %                   | 195  |
|               | 31.07.–31.08.   | 83        | 10  | 3 %                   | 15   |
|               | 31.08.–03.10.   | 50        | 10  | -15 %                 | 85   |
|               | 03.10.–31.10.   | 24        | 10  | -12 $\text{W m}^{-2}$ | 90   |



Kuva 44. Pintavastukset potentiaali-  
sessa haihduntatilanteessa.  
Fig. 44. Surface resistances for  
potential evapotranspiration.

koisesti pintavastuksen arvoa, on saatuihin tuloksiin tältä osin suhtauduttava varauksellisesti. Mittausvirheiden vaikutuksesta haihduntaan saadaan käsitys taulukossa 31 esitettyjen tietojen perusteella.

Taulukko 31. Pintavastuksen vaikutus laskettuihin haihdunta-arvoihin eräillä jaksoilla.  
Table 31. The effect of surface resistance on calculated evapotranspiration during certain periods.

| Jakso<br>Period   | PET<br>mm | Pintavastus<br>Surface resistance<br>s.cm <sup>-1</sup> | Laskettu PET<br>Calculated PET<br>mm |
|-------------------|-----------|---|--------------------------------------|
| 05.05.–31.05.1977 | 45        | 100   | 50,6                                 |
|                   |           | 150   | 46,4                                 |
|                   |           | 200   | 43,2                                 |
|                   |           | 250   | 40,5                                 |
| 06.06.–26.06.1973 | 78        | 0   | 91,3                                 |
|                   |           | 30  | 81,3                                 |
|                   |           | 60  | 73,9                                 |
|                   |           | 90  | 68,2                                 |
| 26.06.–03.08.1977 | 89        | 30  | 98,7                                 |
|                   |           | 60  | 92,4                                 |
|                   |           | 90  | 87,3                                 |
|                   |           | 150   | 79,7                                 |
| 31.07.–31.08.1978 | 86        | 0   | 91,4                                 |
|                   |           | 30  | 86,3                                 |
|                   |           | 60  | 82,3                                 |
|                   |           | 90  | 79,1                                 |
| 26.08.–24.09.1974 | 59        | 100   | 61,4                                 |
|                   |           | 150   | 58,6                                 |
|                   |           | 200   | 56,5                                 |
|                   |           | 250   | 54,8                                 |
| 01.10.–30.10.1975 | 24        | 100   | 25,2                                 |
|                   |           | 150   | 23,9                                 |
|                   |           | 200   | 23,0                                 |
|                   |           | 250   | 22,3                                 |

Kesäajan pintavastuksen arvot ovat varsin hyvin sopusoinnussa muualla saatujen tulosten kanssa (esim. Monteith 1981). Toukokuun alkupuolella ruoho on lepotilassa ja transpiraatiota ei tapahdu, vaan haihdunta koostuu maanpinnasta tapahtuvasta haihdunnasta ja interseptiohaihdunnasta. Maan pintakerroksen kuivuminen pienentää hydraulista johtavuutta ja haihdunta voi myös tästä syystä pienentyä. Edelleen maan kylmyys vaikuttaa juurten vedenottoa hidastavasti. Näiden tekijöiden yhteisvaikutus riittää selittämään toukokuulle laskennallisesti saadut korkeat arvot.

Syys-lokakuun kohonneet pintavastukset johtunevat ruohon fysiologiassa tapahtuvista muutoksista. Missä määrin nämä johtuvat kasvuston vanhenemisesta ja missä määrin niihin vaikuttavat yöpakkasten kaltaiset ulkoiset tekijät, jää tässä yhteydessä ratkaisemattomaksi kysymykseksi ja asian selvittäminen vaatii erityistutkimuksia. Mittaustarkkuudesta johtuen lokakuun arvoihin on, kuten edellä jo todettiin, suhtauduttava varauksellisesti.

### 7.6 Mallin arviointi

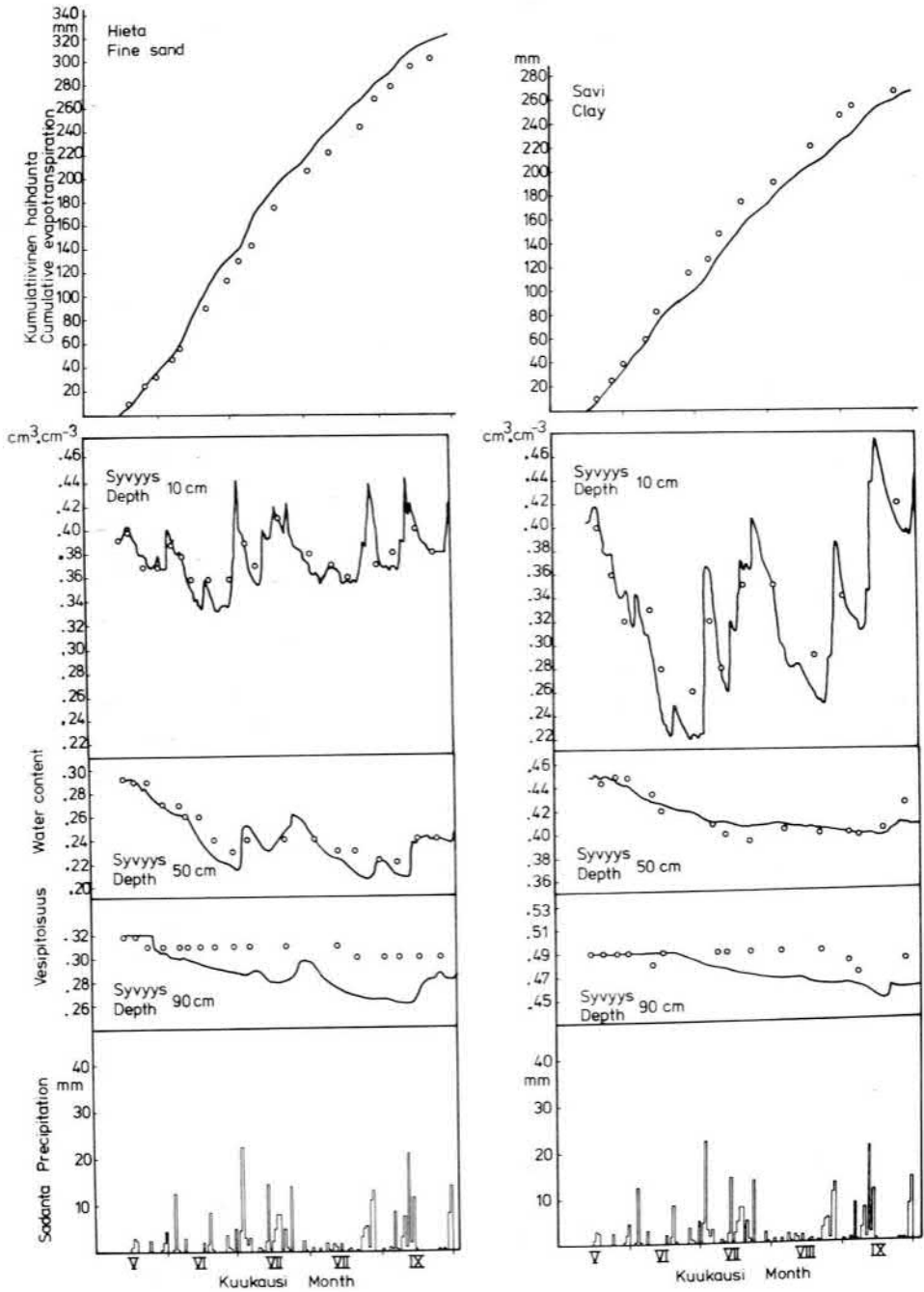
Kehitetyn mallin ja sille saatujen parametriarvojen hyvyttä voidaan arvioida käyttämällä tärkeimpinä kriteereinä todellisen haihdunnan ja maankosteuden laskennan osuutta. Kesän 1977 aikana tehdyt runsaslukuiset maankosteusmittaukset tarjoavat mahdollisuuden arvioinnin suorittamiseen.

Laskennassa käytetyt parametriarvot käyvät ilmi taulukosta 32. Merkittävin ero taulukossa 30 esitettyihin, vuodelle 1977 laskettuihin arvoihin verrattuna on kesäkuun pintavastuksen arvo. Kun laskennollista tietä on jakson  $r_s$ :lle saatu arvo  $180 \text{ s} \cdot \text{cm}^{-1}$ , niin suoritettussa testauksessa on käytetty arvoa  $40 \text{ s} \cdot \text{cm}^{-1}$ , joka on sopusoinnussa muiden kesäajalle saatujen arvojen kanssa. Tämän voidaan olettaa näkyvän saaduissa testatuloksissa. Hydraulinen johtavuus on laskettu Mualemin menetelmän mukaisesti ja kylästyneen maan johtavuuksina on käytetty seuraavia arvoja (kohta 6.22): pintakerros  $235 \text{ cm} \cdot \text{d}^{-1}$ , hieta  $19 \text{ cm} \cdot \text{d}^{-1}$  ja savi  $0,26 \text{ cm} \cdot \text{d}^{-1}$ . Testaustulokset on esitetty kuvassa 45.

Taulukko 32. Mallin testauksessa käytetyt maan energianvaihdon, pintavastuksen ja ruohon pituuden arvot.

Table 32. Amount of heat flowing into the soil (as percent of net radiation), surface resistances and grass heights applied in testing the soil-plant-atmosphere model.

| Kuukausi<br>Month    | G<br>% | Pintavastus<br>Surface resistance<br>$\text{s} \cdot \text{cm}^{-1}$ | Ruohon pituus<br>Grass height<br>cm |
|----------------------|--------|--|-------------------------------------|
| Toukokuu<br>May      | 6      | 200  | 5                                   |
| Kesäkuu<br>June      | 6      | 40   | 10                                  |
| Heinäkuu<br>July     | 6      | 40   | 10                                  |
| Elokuu<br>August     | 3      | 40   | 10                                  |
| Syyskuu<br>September | -15    | 120  | 10                                  |



**Kuva 45.** Mallin hyvyyden arviointi. Mitatut ja lasketut kumuloituvat haihdunnat ja maankosteudet 10, 50 ja 90 cm:n syvyydellä hietalysimetrissä n:o 2 ja savilysimetrissä n:o 9 kesällä 1977.

**Fig. 45.** Assessment of the fitness of the model. Measured and calculated cumulating evapotranspirations and soil moistures at the depth of 10, 50 and 90 cm in the fine sand lysimeter n:o 2 and in the clay lysimeter n:o 9 in the summer 1977.

Kumuloituvan haihdunnan osalta mallin laskemat tulokset ovat vähintään tyydyttäviä, sillä laskettu haihduntasumma poikkeaa molemmissa tapauksissa mitatusta vähemmän kuin viisi prosenttia. Hietalysimetrissä laskettu haihdunta on tosin 1,5 kk kuluttua laskennan alkuhetkestä noin 20 mm mitattua pienempi. Pintavastukselle käytetyn arvon merkitys näkyy näinollen selkeästi. Jatkossa ero pysyy kuitenkin lähes muuttumattomana, joten heinä-syyskuussa haihdunnan arviointi on onnistunut erittäin hyvin. Kesäkuun arvoissa esiintyvät poikkeamat jäävät ilman täsmällistä selitystä, sillä ei haihduntamittauksissa eikä ilmastotekijöissä ole ollut osoitettavissa virheellisyyksiä. Erään mahdollisen selityksen tarjoaa kasvuston pituus. Mikäli nurmikko on kesäkuun aikana leikattu jatkuvasti lyhyeksi ja mikäli sen keskipituus on oletetun 10 cm:n asemesta ollut 5 cm, pienentää tämä haihduntaa noin 10 % (ks. kuva 47, s. 109). Nurmikon pituudesta ei kesäkuussa ole tehty siksi täsmällisiä muistiinpanoja, että haihdunta-arvojen ero voitaisiin varmuudella tällä perusteella selittää.

Savilysimetrissä tilanne haihdunnan osalta on päinvastainen, sillä kesäkuussa laskettu haihdunta jää mitattua pienemmäksi. Heinä-syyskuun osalta simulointi myös tässä tapauksessa onnistuu varsin hyvin. Kesäkuun poikkeamat selittyvät hietalysimetriä helpommin, sillä malli laskee pintakerroksen liian kuivaksi ja tämä aiheuttaa haihdunnan pienenemisen.

Maankosteuden laskenta on onnistunut kohtuullisesti ja hietalysimetrin pintakerroksen osalta tulokset ovat olleet jopa hyviä. Laskenta tuo selvästi esiin hydraulisen johtavuuden keskeisyyden. Kaikilta osin sen määrittäminen ei ole onnistunut, sillä sekä hietä- että savilysimetrissä 90 cm:n syvyydelle lasketut arvot jäävät mitattuja pienemmiksi. Maankosteuden osalta tulosten voidaan odottaa paranevan, mikäli hydrauliset johtavuudet mitataan laskennollisten menetelmien sijasta. Tällaisena mittausten menetelmänä voidaan mainita Aryan (1973) esittämä ns. kuumailmamenetelmä.

## 8. TULOSTEN TARKASTELU

Veden virtaus maan, kasvuston ja ilmakehän muodostamassa kokonaisuudessa on elollisen luonnon kannalta keskeinen tapahtuma. Tähän ketjuun tai sen osiin on viimeisen parin vuosikymmenen aikana kohdistunut mittavaa tutkimustoimintaa, jonka tulosten avulla tapahtumasarjaa voidaan yhä paremmin ymmärtää. Tiedon lisääntymisestä huolimatta jäljellä on kuitenkin vielä monia kysymyksiä, joista vaikeimmin ratkaistavat liittyvät kasvuston toimintaan. Juurten vedenotto, maankosteuden ja -lämpötilan vaikutus siihen sekä ilmarakojen toimintamekanismi ovat esimerkkejä yksittäisistä, mutta kokonaisuuden kannalta tärkeistä osaprosesseista, joita ei tunneta edes tyydyttävästi.

Tutkimusaihe on eräs hydrologian keskeisimmistä ja siinä saatavat tulokset luovat pohjan sekä fysikaalisesti perustelluille sadanta-valuntamalleille että kastelu- ja kuivatus-toimenpiteiden suunnittelulle. Hyvänä esimerkkinä siitä, että aihepiiri tiedostetaan tärkeäksi, on Ruotsin IHP-toimikunnan päätös asettaa maa-kasvi-ilmakehäyhteyden selvittäminen tärkeimmäksi tehtäväksi Ruotsin hydrologisessa tutkimuksessa vuosina 1980–83 (IHP, Sweden 1981).

Teknillisen korkeakoulun lysimetrikentällä suoritetun tutkimuksen tarkoituksena on ollut selvittää, mitkä tekijät säätelevät haihduntaa Suomen ilmasto-oloissa. Kenttää perustettaessa ei yksityiskohtaista tutkimussuunnitelmaa ole laadittu ja tästä syystä havainnointi ei kaikilta osin ole ollut tarkoituksenmukaista eikä kattavaa. Niinpä automaattisen mittausjärjestelmän toiminta on ollut katkonaista ja maankosteusmittausten suorittaminen alkuvuosina satunnaista. Maankosteusmittausten suhteen tilanne on parantunut käsillä olevan tutkimustyön alkaessa. Sensijaan automaattinen mittausjärjestelmä on ollut täysin toimintakelvoton vuodesta 1975 alkaen eikä sitä ole ollut mahdollista korjata.

Hydrologisessa tutkimustoiminnassamme tuloksiin on yleensä pyritty käyttämällä tilastollisia menetelmiä. Tälle tutkimukselle asetetun tavoitteen saavuttaminen on pelkästään näillä keinoilla kuitenkin mahdotonta. Vaatimus haihtumismekanismien selvittämisestä on voitu toteuttaa vain kehittämällä fysikaalisesti perusteltu simulointimalli, jossa potentiaalierot ylläpitävät veden virtausta maassa, maasta kasviin ja kasvista ilmakehään. Tutkimuksen eteneminen ja kokoonpano muistuttavat läheisesti haihduntatutkimuksen historiallista kehitystä. Astioiden, evaporimetrien ja empiiristen kaavojen kautta on edetty Penmanin (1948) ratkaisuun, sen laajennukseen (Monteith 1965, Rijtema 1965) ja vihdoin on tiedostettu, että pysyvien tulosten saamiseksi veden kiertoa on tarkasteltava siinä kokonaisuudessa, jonka maa, kasvusto ja ilmakehä muodostavat (Cowan 1965).

Tutkimuksen aikana on käynyt ilmi, että aihepiiri on maassamme monelta osin karsoittamaton. Tämä koskee erityisesti maavesiä, joiden osalta tutkimustoiminta käytännöllisesti katsoen tyystin puuttuu. Samoin on yllättävää havaita, ettei kasvien vedenoton fysiikkaa ole maassamme sanottavasti selvitetty, joskin tältä osin tutkimus on myös muualla maailmassa lähtenyt liikkeelle vasta 1960-luvulla.



Lysimetrikentän kolmesta haihdunta-astiasta Class A ja Anderssonin evaporimetri ovat osoittautuneet selvästi GGI-3000-astiaa paremmaksi, kun arvostelukriteereinä on käytetty ilmastotekijöihin perustuvien mallien osuutta ja astiahaihdunnan ja potentiaalisen haihdunnan välisen suhteen hajontaa. Class A-astiahaihduntojen ja Anderssonin evaporimetrihaihduntojen avulla voidaan tyydyttävästi estimoida potentiaalista haihduntaa, kun käytetään ajankohtaan liittyviä kertoimia. Makuasia on, kumpaa astioista käytetään. Class A-astian käyttöä puoltaa sen asema WMO:n standardiastiana, Anderssonin evaporimetrin etuna on ennen muuta mittaamisen yksinkertaisuus; mittarin ollessa kannellinen ei sadantaa tarvitse mitata lainkaan.

Haihdunnan arvioimiseksi on muualla maailmassa kehitetty runsaasti ilmastotekijöihin perustuvia kaavoja, joiden käyttökelpoisuutta Suomen ilmasto-oloihin on aiemmin selvitetty niukasti. Nyt suoritetussa tarkastelussa on käynyt ilmi, että menetelmien käytökelpoisuuden edellytyksenä on niiden antamien tulosten kertominen ajankohtaan liittyvällä kertoimella samoin kuin astiahaihduntojenkin kyseessä ollessa. Syinä suhteen ajalliseen vaihteluun ovat luonnollisesti maanpinnan energiataseen erilaisuudet eri ilmasto-työhykkeellä.

Nyt saatujen tulosten perusteella voidaan energiataseesta ja siihen vaikuttavista tekijöistä tuoda ilmi seuraavia näkökohtia. Toukokuun alkupuoliskolla ruoho on lepotilassa eikä transpiraatiota tapahdu ja kun kuukauden loppupuolella juuristokerroksen alhainen lämpötila saattaa hidastaa veden virtausta maasta kasvin kautta ilmakehään, on lopputuloksena tilanne, jossa haihduntaan kuluu vain noin 50–60 % nettosäteilystä. Kun maahan menevän energian määrä on tällöin noin 10 % nettosäteilystä, jää ilman lämmittämiseen toukokuussa 30–40 % nettosäteilyn määrästä.

Kesä-elokuussa mitattujen ja laskettujen haihduntojen suhteessa yleisimmin esiintyvää kasvavaa trendiä voidaan osaltaan selittää sadesuhteiden avulla. Tarkastelussa mukana olevien kesäkuuden aikana sademäärät ovat olleet pienet ja sateisia päiviä on ollut vain muutamia, joten interseptiohaihdunta on ollut suhteellisesti pienempää kuin sateisempien heinä- ja elokuuden aikana. Myös maahan menevän energiamäärän vähentymisellä kesän edetessä on vaikutusta. Potentiaalisessa haihduntatilanteessa haihdunnan ottama osuus kesäaikana on runsaasti yli kaksikolmasosaa nettosäteilystä. Maahan menevä energiamäärä on välillä 0–10 % nettosäteilystä ja ilman lämmittämiseen kuluva osuus on samaa suuruusluokkaa.

Syys- ja lokakuussa interseptiohaihdunnan suhteellinen osuus edelleen kasvaa ja maa alkaa luovuttaa lämpöä haihtumiseen. Jo syyskuussa, mutta erityisesti lokakuussa lämpöä virtaa myös ilmasta haihduttavaan pintaan. Näinollen haihdunta syksyisin kasvaa nettosäteilyä selvästi suuremmaksi.

Potentiaalisen haihdunnan empiirisistä arviointimenetelmistä parhaimmiksi ovat muunneltomienpiteiden jälkeen osoittautuneet Turcin ja Makkinkin esittämät kaavat. Thornhtwaiten ja Blaney'n kaavoja lukuunottamatta jokainen käsitellyistä kaavoista johtaa muunneltuna parempaan tulokseen kuin astiahaihduntojen käyttö. Monteith (1981) pitää astiahaihduntojen mittaamista ajanhukkana, koska ilmastoasemia on nykyään riittävän tiheästi ja ilmastotekijöiden avulla haihdunta voidaan laskea. Suoritetun tarkastelun perusteella mielipiteeseen on helppo yhtyä.

Haihduntakaavoilla laskettaessa on kyllästysvajauksen arvoina käytetty vuorokausiarvoja, jotka on laskevat kolmen päiväaikana tehdyn mittauksen keskiarvona. Vertailu 12 havainnon perusteella laskettuihin vuorokausiarvoihin on osoittanut, että tällä tavoin saadut kyllästysvajaukset jäävät yleensä pienemmiksi. Laskennassa myös maan energianvaihto on jätetty huomiotta. Taulukossa 33 ja kuvassa 46 on vertailtu mitattuja haihdun-

toja Penmanin ja Thom-Oliverin kaavoilla laskettujen haihduntojen kanssa, kun kyllästysvajaukset on korjattu kaavaa (116) käyttäen ja maahan menevät energiamäärät ovat taulukon 32 mukaisia. Vain toukokuun arvot eroavat selvästi toisistaan. Kun po. fysikaalisesti perustelluilla menetelmillä saadut haihdunnat ja mitatut haihdunnat ovat varsin hyvin keskenään sopuinnassa, on tätä pidettävä osaltaan todisteena mittausten luotettavuudesta.

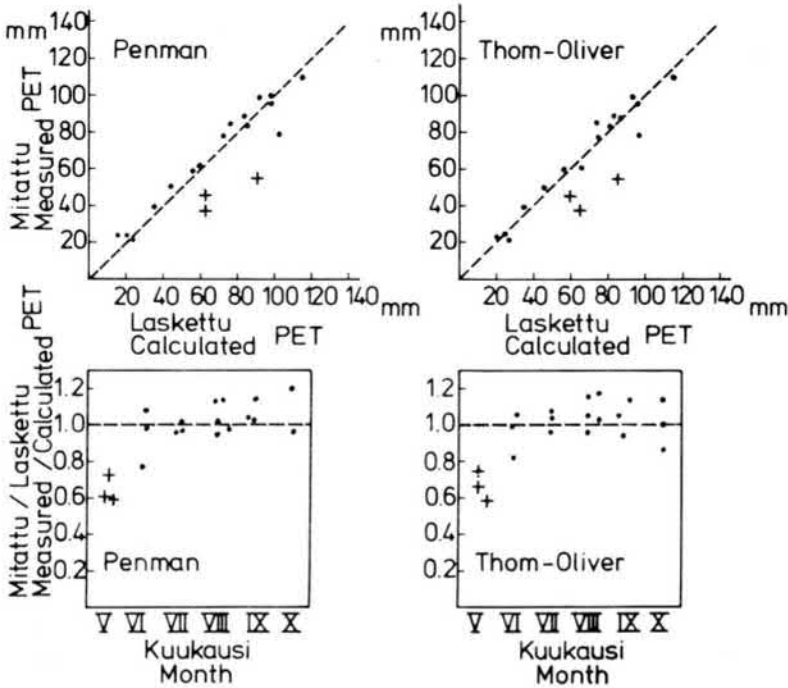
Tutkimuksessa kehitetty simulointimalli on jo sinällään tutkimustulos, sillä se on pitkälti vastaus kysymykseen, kuinka haihtuminen oloissamme tapahtuu. Malli on maassamme ensimmäinen yritys hydrologisen kierron fysikaaliseen kuvaamiseen ja sellaisenaan se antaa viitteitä tämänlaatuisen lähestymistavan mahdollisuuksista. Mallia laadittaessa ovat käyneet selkeästi ilmi tehdyissä havainnoissa olevat puutteellisuudet. Ne keskittyvät lähinnä kasvuston toimintaan ja erityisesti juurten vedenottomekanismiin. Tätä voidaan tosin pitää yleisemminkin maa-kasvi-ilmakehäsystemin huonoimmin tunnettuna osana. Systemiteoreettista terminologiaa käyttäen on kasvi tutkimuksessa nähty mustana laattikkona, jota on kuvattu pelkästään juurten vedenotto-ryvytyydellä, pintavastuksella ja ruohon pituudella. Kasvin toiminnasta ja juurten vedenotosta laadittu selvitys tosin antaa lähtökohtia vastaisia tutkimuksia varten.

Potentiaalilla evapotranspiraatiolla on tutkimuksessa ymmärretty lyhyestä, 2–15 cm:n korkuisesta ruohopinnasta tapahtuvaa haihduntaa, mutta ruohon aktiivista kasvua ei ole pidetty rajoittavana tekijänä. Mikäli haihdunta halutaan laskennallisesti määrätä korkeammalle ruohikolle, voidaan käyttää kuvasta 47 saatavaa likimääräistä kerrointa. Kuva pohjautuu Penmanin laajennetulla kaavalla laskettuihin haihdunta-arvoihin, kun

Taulukko 33. Korjausten vaikutus Penmanin (1948) ja Thom-Oliverin kaavoilla laskettuihin haihduntoihin: 1 = korjaamaton, 2 = kyllästysvajausta korjattu, 3 = kyllästysvajausta ja maan lämmönvaihto korjattu.

Table 33. Effect of corrections on evapotranspiration calculated using the Penman (1948) and Thom-Oliver formulas. 1 = uncorrected, 2 = saturation deficit corrected, 3 = saturation deficit and heat flow into the soil corrected.

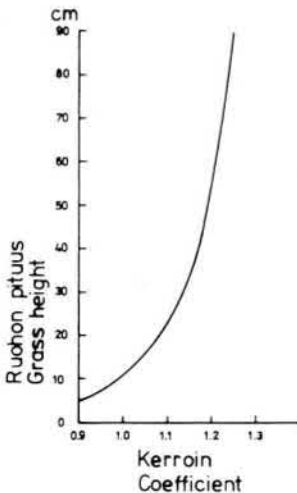
| Vuosi<br>Year | Jakso<br>Period | PET<br>mm | Penman |     |     | Thom-Oliver |     |     |
|---------------|-----------------|-----------|--------|-----|-----|-------------|-----|-----|
|               |                 |           | 1      | 2   | 3   | 1           | 2   | 3   |
| 1973          | 06.06.–26.06.   | 78        | 91     | 75  | 72  | 102         | 76  | 74  |
| 1974          | 13.05.–04.06.   | 38        | 75     | 64  | 62  | 79          | 64  | 62  |
|               | 12.08.–26.08.   | 40        | 39     | 35  | 34  | 40          | 34  | 33  |
|               | 26.08.–24.09.   | 59        | 60     | 53  | 57  | 66          | 53  | 57  |
| 1975          | 05.06.–01.07.   | 96        | 120    | 101 | 97  | 130         | 100 | 97  |
|               | 01.07.–30.07.   | 110       | 139    | 118 | 113 | 155         | 119 | 115 |
|               | 30.07.–28.08.   | 86        | 104    | 86  | 84  | 123         | 91  | 90  |
|               | 28.08.–01.10.   | 61        | 74     | 55  | 59  | 86          | 62  | 65  |
|               | 01.10.–30.10.   | 24        | 14     | 14  | 20  | 21          | 20  | 24  |
| 1977          | 05.05.–31.05.   | 45        | 77     | 67  | 63  | 78          | 63  | 60  |
|               | 31.05.–28.06.   | 78        | 122    | 106 | 102 | 124         | 101 | 97  |
|               | 28.06.–03.08.   | 89        | 108    | 95  | 91  | 107         | 89  | 86  |
|               | 03.08.–16.09.   | 83        | 93     | 85  | 85  | 94          | 81  | 81  |
| 1978          | 30.06.–31.07.   | 99        | 116    | 102 | 98  | 116         | 96  | 93  |
|               | 31.07.–31.08.   | 86        | 86     | 78  | 76  | 90          | 76  | 74  |
|               | 04.10.–31.10.   | 22        | 18     | 18  | 23  | 22          | 22  | 26  |
| 1979          | 02.05.–31.05.   | 55        | 109    | 95  | 91  | 105         | 89  | 85  |
|               | 31.07.–31.08.   | 83        | 96     | 88  | 84  | 96          | 88  | 84  |
|               | 31.08.–03.10.   | 50        | 51     | 41  | 44  | 57          | 41  | 44  |
|               | 03.10.–31.10.   | 24        | 12     | 12  | 18  | 18          | 18  | 22  |



Kuva 46. Mitattujen, Penmanin (1948) menetelmällä ja Thom-Oliverin menetelmällä laskettujen potentiaalisten haihduntojen vertailu.

Fig. 46. Comparison of measured potential evapotranspiration with the values obtained using the Penman method and the Thom-Oliver method.

ilmastotietoina on käytetty seuraavia Otaniemelle tyypillisiä kesäajan arvoja: nettosäteily  $100 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ , ilman lämpötilä  $16,0^\circ\text{C}$ , kyllästysvajaus  $7 \text{ mbar}$ , tuulen nopeus kahden metrin korkeudella  $1,5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ . Pintavastuksena on käytetty  $40 \text{ s} \cdot \text{cm}^{-1}$ . Turcin tai Makkinkin muunnettujen menetelmien ja kuvan 47 käyttö tarjoaa varteenotettavan mahdollisuuden kesäajan haihdunnan arviointiin, kun kokonaissäteily ja lämpötilä sekä ruohon pituus tunnetaan. Kun kuvaa laadittaessa interseption osuus on jätetty huomioonottamatta, saadaan tällä tavoin tosin selville vain haihdunnan "alalikiarvo".



Kuva 47. Ruohon piteuden keskimääräinen vaikutus haihduntaan.

Fig 47. Average effect of grass height on evapotranspiration.

## 9. YHTEENVETO

Tutkimuksessa on tarkasteltu potentiaalisen ja todellisen haihdunnan määrittämismahdollisuuksia Etelä-Suomen olosuhteissa. Tutkimusaineisto on koottu Otaniemessä sijaitsevalta Teknillisen korkeakoulun lysimetrikentältä vuosina 1972–80. Kentällä on 12 lysimetriä, joista kunkin ala on  $10 \text{ m}^2$  ja syvyys 1,5 m. Näistä on käytetty kolmesta nurmipintaisesta hieta- ja kahdesta savilysimetristä suoritetuista mittauksista. Lysimetreistä tapahtunut haihdunta on määritetty vesitaseen jäännösterminä. Maankosteus on mitattu neutronimittaria käyttäen. Lysimetrien ohella kentällä on kolme erityyppistä haihdunta-astiaa ja normaali ilmastoasemavarustus. Vuosina 1972–75 tietoja on voitu koota myös automaattista tiedonkeruujärjestelmää käyttäen. Järjestelmän avulla on rekisteröity kahden tunnin välein mm. ilman kuivaa ja kosteaa lämpötilaa ja tuulen nopeutta kahden metrin korkeudella sekä maan lämpötiloja lysimetreissä kuudelta eri syvyydeltä. Kentältä ei ole ollut käytettävissä säteilytietoja, vaan tutkimuksessa käytetyt säteilyarvot on mitattu Helsinki-Vantaan lentoasemalla. Maalajien vedenpidätysominaisuudet, hydrauliset johtavuudet ja lämpökapasiteetit on määritetty laboratoriossa. Käytetty aineisto, siihen kohdistetut korjaustoimenpiteet ja arvio mittausten tarkkuudesta on esitetty luvussa 3.

Luvussa 4 on käsitelty Class A-astiasta, Anderssonin evaporimetrin ja GGI-3000-astiasta tapahtunutta haihduntaa. Class A-astiasta ja Anderssonin evaporimetrin tapahtuvat haihdunnat ovat kuukausitasolla jokseenkin yhtäsuuret. GGI-3000-astiasta haihtuu keskimäärin 70 % siitä, mitä kahdesta edellä mainitusta. Astiahaihduntojen ja ilmasto-tekijöiden välisten korrelaatiokertoimien perusteella voidaan todeta haihdunnan riippuvan lähinnä kokonaissäteilyn määrästä ja kyllästysvajauksesta. Nämä taas ovat keskenään vahvasti korreloituja. Parhaiten astiahaihduntoja on voitu kuvata malleilla, joissa muuttujina ovat kokonaissäteily, tuulen nopeus ja kyllästysvajaus ja joiden formuloinnin pohjana on ollut Penmanin menetelmän funktionaalinen muoto. Class A-astialle ja Anderssonin evaporimetrille saatujen haihduntamallien osuvuus on ollut keskenään samaa luokkaa ja selvästi parempi kuin mitä GGI-3000-astialle on saatu.

Luvussa 5 on tarkasteltu potentiaalisen evapotranspiraation määrittämisen mahdollisuuksia. Potentiaalisella haihdunnalla on tarkoitettu 2–15 cm korkeasta ruohosta tapahtuvaa haihduntaa, jota maankosteus ei rajoita. Ruohon aktiivista kasvua ei ole pidetty edellytyksenä, koska se ei Suomen ilmasto-olosuhteissa muodosta reaalista lähtökohtaa. Haihdunnan arviointimenetelmiä on käsiteltyssä ollut mukana kaikkiaan 10 ja näiden ohella on selvitetty em. kolmen astian käyttömahdollisuuksia.

Suorassa mitattujen ja laskettujen arvojen vertailussa parhaimmiksi menetelmiksi ovat osoittautuneet Turcin ja Blaney-Cridden menetelmät. Mitattujen ja laskettujen haihduntojen suhteessa on jokaisessa menetelmässä havaittavissa riippuvuutta ajankohdasta ja tämän huomioonottaminen parantaa huomattavasti haihdunnan määrittystarkkuutta. Suhteiden avulla muunnetuista menetelmistä parhaimmaksi on osoittautunut jälleen Turcin menetelmä, mutta Makkinkin ja Penmanin menetelmällä päästään käytännössä samaan tark-

kuuteen. Astiahaiduntojen avulla potentiaalinen evapotranspiraatio on määritettävissä näitä heikommin.

Luvussa 6 on selvitetty todelliseen haihduntaan vaikuttavia tekijöitä maa–kasvi–ilmakehähyyteyden kokonaiskuvausta silmälläpitäen. Maavesien osalta on esitetty virtaus-tapahtumalle matemaattinen malli, jossa tarvittavat hydrauliset johtavuudet on laskettu Mualemin, Green-Coreyn ja Bloemenin esittämiä menettelytapoja käyttäen. Mualemin ja Green-Coreyn menetelmien on todettu antavan keskenään samansuuntaisia tuloksia, mutta Bloemenin menetelmällä lasketut arvot poikkeavat näistä etenkin saven osalta melkoisesti. Potentiaalisen haihduntatilanteen selvittämiseksi on määritetty stationäärisessä tilanteessa pohjavedestä juuristokerrokseen nousevat vesimäärät.

Maan lämmönjohtavuuden määrittäminen on perustettu lymetriin lämpötila- ja kosteushavaintoihin. Ratkaisu on haettu numeerisesti saattamalla Fourierin lämmön-siirtoyhtälö diskretoituun muotoon, määräämällä derivaatoille likiarvot Taylorin sarjakehitelmää käyttäen ja hakemalla lämmönjohtavuudelle arvot minimoimalla mittausvirheiden neliösumma.

Savilysimetrin lämpötilamittaukset ovat osoittautuneet siinä määrin virheellisiksi, ettei niitä ole voitu laskennassa käyttää. Hietalysimetreille saadut lämmönjohtavuuden arvot ovat sensijaan suuruusluokaltaan varsin oikeaan osuneita. Näin on voitu todeta vertaamalla numeerista tietä saatuja arvoja De Vriesin teorian perusteella laskettuihin arvoihin.

Kasvin vedenkäytön ja juurten vedenoton osalta on yksityiskohtaisten havaintojen puuttuessa voitu esittää vain kirjallisuuteen perustuva tarkastelu, jossa juurten vedenotto-mallien ohella painoa on pantu juuristokerroksen lämpötilan ja vedenoton välisiin yhteyk-siin. Juuristokerroksen lämpötilan on osoitettu voivan pienentää transpiraatiota touko-kuussa. Tämän seikan tarkempi selvittäminen edellyttää kuitenkin lisätutkimuksia, jotka kuuluvat kasvifysiologian tutkimuskenttään.

Kesäajan ilmasto-olosuhteisiin soveltuvan aerodynaamisen vastuksen laskentakaavan löytämiseksi on vertailtu logaritmiseen tuuliprofiiliin perustuvalla laskentatavalla, Thom-Oliver-menetelmällä ja Rijteman menetelmällä saatuja arvoja ilmakehän stabiliteetin huomioitavien arvojen kanssa. Tässä vertailussa Rijteman menetelmä on osoittautunut parhaimmaksi.

Luvun 6 lopussa on osoitettu, että kolmeen havaintoon perustuva kyllästysvajauksen vuorokausiarvojen laskumenettely johtaa yleensä huomattavan virheellisiin tuloksiin. Arvojen korjaamista varten on esitetty menettelytapa.

Luvussa 7 on esitetty tutkimuksessa kehitetty maa–kasvi–ilmakehähyyteyttä koko-naisuudessaan kuvaava simulointimalli ja sitä käyttäen saadut tulokset. Mallissa haihdun-ta joko lasketaan käyttämällä Penmanin laajennettua menetelmää tai se voidaan antaa suoraan syöttötietona. Aerodynaamisen vastuksen laskennassa käytetään Rijteman me-netelmää. Maan lämmönvaihto lasketaan lämmönjohtavuuden ja lämpötilagradientin tu-lona. Maankosteuden laskenta perustuu Darcyn (Richardsin) yhtälön ja jatkuvuusyhtä-lön numeerisiin ratkaisuihin. Kasvusto on käsitelty miltei "mustana laatikkona", sillä sitä kuvaavina parametreina on käytetty juurten vedenottosyvyyttä, pintavastusta ja kasvuston korkeutta. Malliin voidaan syöttää joko kahden tunnin välein tehdyt havain-not tai vuorokausiarvot.

Kahden tunnin välein rekisteröityjä havaintoja on ollut käytettävissä kahdeksalta jaksolta, joiden pituus on vaihdellut 14 ja 34 vuorokauden välillä. Näille on määrätty maanpinnan energiatase. Taseessa leimaa-antavana piirteenä ovat energiataseen kompo-nenttien välisissä suhteissa esiintyvät poikkeamat, kun vertaillaan eri ajankohtia. Maan

lämmönvaihto on kauttaaltaan suhteellisen pientä ja maan keväällä ottama energiamäärä on riittämätön selittämään eri kaavoilla laskettujen haihduntojen ja mitattujen haihduntojen välistä eroa. Toukokuussa haihduntaan näyttää kuluvan vähemmän kuin 50 % nettosäteilystä, mutta kesän edetessä osuus kasvaa ja syyskuussa haihduntaan kuluva energia jo ylittää nettosäteilyn.

Pintavastuksen ja juuristoksen potentiaalinvälille on määritetty yhteys. Sen mukaan transpiraatio alkaa pienentyä juuristokerroksen potentiaalinvälillä laskiessa alle rajan  $\psi < -500$  cm sillä tavoin, että potentiaalinvälillä  $\psi = -10\,000$  cm saa pintavastus arvon  $500 \text{ s} \cdot \text{cm}^{-1}$ .

Vuorokausiarvoja käyttäen on määritetty pintavastuksen arvot niille jaksoille, joilla haihdunta on potentiaalista. Tällöin on osoittautunut, että kesä-elokuussa pintavastus on ollut yleensä pienempi kuin  $50 \text{ s} \cdot \text{cm}^{-1}$ . Sensijaan toukokuussa se on ollut noin  $200 \text{ s} \cdot \text{cm}^{-1}$  ja syyskuussa  $100\text{--}150 \text{ s} \cdot \text{cm}^{-1}$ . Lokakuun arvot ovat olleet näiden kanssa samaa suuruusluokkaa. Toukokuun suuret arvot selittyvät nurmikon lepotilan ja juuristokerroksen kylmyyden avulla, syksyllä ruohon transpiraatio taas pienenee kasvifysiologisista syistä.

## ENGLISH SUMMARY

This study deals with the possibilities to determine potential and actual evapotranspiration for the conditions prevailing in Southern Finland.

The data have been collected at a field with 12 lysimeters of the Helsinki University of Technology in Otaniemi (60°11'N, 24°48'E) during the years 1972 through 1980. Each lysimeter has an area of 10 m<sup>2</sup> and a depth of 1.5 m. Three fine sand and two clay lysimeters were used, all covered with grass. Evapotranspiration from the lysimeters has been determined as the rest value of a water balance equation. Soil moisture has been measured with the neutron scattering method. In addition to the lysimeters three evaporation pans of different types were present at the field as well as the normal equipment of the meteorological station.

In the years 1972 through 1975 an automatic data collection system was available. The system recorded at two-hours intervals dry and wet-bulb air temperatures, wind velocity at two meters above the ground surface and soil temperatures at six different depths in the lysimeters. Solar radiation data from the field were not available. Therefore the radiation values used in this study had to be taken from Helsinki-Vantaa airport. Soil moisture retention curves of the different soil types, saturated hydraulic conductivities and thermal capacities have been determined in the laboratory.

After an introduction dealing with the history and the need of the research of evapotranspiration, in Chapter 2 the scope of this study has been presented. One purpose has been to find out how well-known estimation methods are suited to the conditions prevailing in Southern Finland. The other purpose has been to model the soil-plant-atmosphere system. The data used, the corrections made and the estimates of the accuracy of the measurements are presented in Chapter 3.

In Chapter 4 evaporation data from a Class A pan, an Andersson evaporimeter and an GGI-3000 pan are analyzed. On a monthly level evaporation from the Class A pan is practically the same as from the Andersson evaporimeter. Evaporation from GGI-3000 pan amounts to about 70 % of the values measured with the Class A-pan and the evaporimeter. Evaporation of an open water surface mainly depends on incoming radiation and the moisture saturation deficit of the air as can be seen from the high correlation coefficients between pan evaporation and meteorological factors. Pan evaporation therefore is represented best by models in which the variables are global radiation, saturation deficit of the air and wind velocity and a type of model which is rather similar to the Penman method. The fit of the evaporation models proved to be about the same for the Class A pan as for the Andersson evaporimeter, and it was clearly worse for the GGI-3000 pan.

In Chapter 5 the possibilities to estimate potential evapotranspiration have been considered. Potential evapotranspiration here to be understood as the evapotranspiration from a 2 to 15 cm high grass crop when soil moisture is not a limiting factor.

The following calculation methods for estimating potential grass evapotranspiration have been considered: Thornhtwaite, Blaney-Criddle, Turc, Makkink, Jensen-Haise, Ivanov, USWB-lake, Penman, Thom-Oliver and Haude. In addition, the usability of the three pan

types has been investigated. From a direct comparison of measured and calculated potential evapotranspiration values the Turc and Blaney-Criddle methods come out as the best. The ratio of measured over calculated depends on time of the day. When this fact is taken into consideration the accuracy of the calculated evapotranspiration is improved considerably. Again the Turc method, as modified by the ratios, gave the best results, but for practical purposes the Makkink and the Penman methods were nearly as accurate.

Chapter 6 elucidates the factors that affect actual evapotranspiration of the soil-plant-atmosphere system. With regard to soil moisture a mathematical model for flow has been presented. The necessary hydraulic conductivities have been calculated using the methods presented by Mualem, Green & Corey and Bloemen. The Mualem and the Green-Corey methods give similar results, but the Bloemen method yields results that, especially for clay, deviate considerably from those given by the other two methods. The quantities of water that under steady conditions may rise from the ground water table to the root zone has been determined. This gave the possibility to select periods in which potential evapotranspiration occurred.

Determination of the thermal conductivity of the soil has been based on temperature and moisture measurements inside the lysimeters. A numerical solution has been sought by transforming the Fourier heat transfer equation into a discrete form, obtaining approximations for the derivatives using Taylor series and by calculating values of the thermal conductivity by minimizing the sum of the squares of the measuring errors. Measurements of temperatures in the clay lysimeters yielded such erratic results that they could not be used. The fine sand lysimeters, on the other hand, gave results for the thermal conductivity which compared rather well with values calculated on the basis of the De Vries theory.

For the water consumption by plants and uptake of water by roots, literature values were used. Emphasis was put on relationships existing between the temperature of the root zone and the water uptake of the plant. It has been shown that the temperature can affect transpiration considerably, diminishing it in May. A more thorough examination of this feature, however, implies further studies that belong to the field of plant physiology.

In order to find an equation for the aerodynamic resistance of the grass crop, suitable to the climatic conditions prevailing in Southern Finland during the summer, values obtained with the method based on the logarithmic wind profile, the Thom-Oliver method and the Rijtema method were compared with values that take into account atmospheric stability. In this comparison the Rijtema method proved to be superior to the others.

At the end of Chapter 6 it is shown that the method used in Finland to calculate diurnal saturation deficit of the air in general leads to erroneous results. A method is presented to correct the values thus obtained.

Chapter 7 introduces the simulation model developed by the author that describes water flow in the soil-plant-atmosphere system, and gives the results obtained by using it. With the model the actual evapotranspiration can be calculated using the extended Penman method. In other type of calculations it can be part of the input. To calculate the aerodynamic resistance the Rijtema method can be applied. The heat flow into the soil is calculated by multiplying thermal conductivity with the temperature gradient in the soil surface. The calculation of soil moisture flow is based on the numerical solutions of the Darcy (Richards) equation and the continuity equation. Vegetation is taken into consideration as a more or less "black box", since the parameters describing it are depth of water uptake, surface resistance and crop height.

Observations at either two-hour intervals or daily values can be fed into the model. Observations at two-hour intervals are available for eight periods the length of them



varying between 14 and 34 days. For these periods the energy balance of the soil surface has been determined.

In this context the following statements can be made concerning the estimation of potential evapotranspiration. When different periods are compared, a distinctive feature in the energy balance is the change in the ratios of the components of the balance. The heat flow into the soil is relatively unimportant. In the spring it is insufficient in explaining the differences between the evapotranspiration values calculated with the different equations and the measured ones. In May evapotranspiration seems to consume less than 50 % of net radiation, but as the summer advances the percentage increases. While in September the energy taken by evapotranspiration already exceeds net radiation.

A relationship has been found between grass surface resistance and soil water potential in the root layer. Transpiration starts to decrease when soil water potential falls below  $-500$  cm. When soil water potential is  $-10,000$  cm surface resistance is equal to  $500 \text{ s} \cdot \text{cm}^{-1}$ . Using daily values, surface resistance has been calculated for periods of potential evapotranspiration. In June, July and August surface resistance generally was less than  $50 \text{ s} \cdot \text{cm}^{-1}$ , whereas in May it was about  $200 \text{ s} \cdot \text{cm}^{-1}$ , and in September 100 to  $150 \text{ s} \cdot \text{cm}^{-1}$ . The October values were of the same order of magnitude as in September. The high surface resistance values in May can be explained by the dormant state of the grass and the low temperature of the root zone. In autumn transpiration diminishes as the result of the plant reaction to unfavorable climatic conditions.

Chapter 8 deals among other things with the significance for hydrology and agricultural water management of the results obtained and of the simulation model developed. The study can be used as a basis for the development of physically based rainfall-runoff models as well as for the planning of irrigation and drainage installations.

## KIRJALLISUUSLUETTELO

- Ahti, K. (1972) Hiushygrometri ja psykrometrihavaintojen mittausvirheet. Tutkimusluoste. Ilmatieteen laitos. 28 p.
- Andersson, S. (1969) Markfysikaliska undersökningar i odlad jord XVIII. Om en ny och enkel evaporimeter. Grundförbättring 22: 59–66.
- Andersson, S. & P. Wiklert (1972) Markfysikaliska undersökningar i odlad jord XXIII. Om de vattenhållande egenskaperna hos svenska jordarter. Grundförbättring 25: 53–143.
- Arya, L.M. (1973) Water flow in soil in presence of soybean root sinks. Thesis. University of Minnesota. Bull. 60. Minneapolis. 163 p.
- Bavel, C.H.M. van (1966) Potential Evaporation: The combination concept and its experimental verification. Water Res. Res. 2: 455–467.
- Bavel, C.H.M. van (1967) Changes in canopy resistance to water loss from alfalfa, induced by soil water depletion. Agric. Met. 4: 165–176.
- Bellmans, C., J.G. Wesseling & R.A. Feddes (1981) Simulation model of the water balance of a cropped soil providing different types of boundary conditions (SWATRE). ICW. Nota 1257. 61 p. Unpublished.
- Blaney, H.F. (1954) A method of estimating water requirements in irrigated areas from climatological data. U.S. Dept. Agric. SCS-TP-96.
- Blaney, H.F. & W.D. Griddle (1950) Determining water requirements in irrigated areas from climatological and irrigation data. Soil Conserv. Serv. U.S. Dept. Agric. SCS-TP-96. 48 p.
- Bloemen, G.W. (1980) Calculation of hydraulic conductivities of soils from texture and organic matter content. Z. Pflanzenernaehr. Bodenkd. 143: 581–605.
- Bongards, H. (1926) Feuchtigkeitsmessungen. 322 p. Berlin.
- Brooks, R.H. & T. Corey (1964) Hydraulic properties of porous media. Colorado State Univ. Hydrol. Papers 3. 27 p.
- Bowen, I.S. (1926) The ratio of heat losses by conduction and by evaporation from any water surface. Physical Review. Vol. 27: 779–787.
- Brutsaert, W. (1965) A model for evaporation as a molecular diffusion process into a turbulent atmosphere. J. Geoph. Res. 70: 5017–5024.
- Cabo (Centre of Agrobiological Research) (1981) Kirjallinen tiedonanto.
- Childs, E.C. (1969) An introduction to the physical basis of soil water phenomena. London-New York-Sidney-Toronto. 493 p.
- Childs, E.C. & N. Collis-George (1950) The permeability of porous materials. Proc. Roy. Soc. A201: 392–405.
- Childs, S.W. & R.J. Hanks (1975) Model for salinity effects on crop growth. Soil Sci. Soc. Am. Proc. 39: 617–622.

- Cowan, J.R. (1965) Transport of water in the soil-plant-atmosphere system. *J. Appl. Ecol.* 2: 221.
- Darcy, H. (1856) *Les fontaines publiques de la ville de Dijon*. Paris.
- Denmead, O.T. (1975) Temperate cereals. Monteith, J.L. (Ed.). *Vegetation and the atmosphere*. Vol. 2. London-New York-San Francisco. p. 1–31.
- Denmead, O.T. & R.H. Shaw (1962) Availability of soil water to plants as affected by soil moisture content and meteorological conditions. *Agron. J.* 75: 385–390.
- Ehrler, W.L. (1963) Water absorption of alfalfa as affected by low root temperature and other factors of a controlled environment. *Agron. J.* 55: 363–366.
- Endrödi, G. & P.E. Rijtema (1969) Calculation of evapotranspiration from potatoes. *Neth. J. Agric. Sci.* 17, 4: 283–299.
- Feddes, R.A. (1969) Beregeningsprogramma's. *Meded. Dir. Tuinb.* 32, 10/11: 440–453.
- Feddes, R.A. (1971) Water, heat and crop growth. *Meded. Landb. hogesch. Wageningen*. 184 p.
- Feddes, R.A. (1981) Water use models for assessing root zone modification. *ASAE-monograf.* 46 p. In press.
- Feddes, R.A., E. Bresler & S.P. Neuman (1974) Field test of a modified numerical model for water uptake by root systems. *Water Res. Res.* 10: 1199–1206.
- Feddes, R.A., P.J. Kowalik & H. Zaradny (1978) Simulation of field water use and crop yield. *Wageningen*. 189 p.
- Feddes, R.A. & P.E. Rijtema (1972) Water withdrawal by plant roots. *J. Hydrology* 17: 33–59.
- Feddes, R.A. & A.L. Wijk van (1976) An integrated model approach to the effect of water management on crop yield. *Agric. Water Man.* 1: 3–20.
- Franssila, M. (1936) *Mikroklimatische Untersuchungen des Wärmehaushaltes*. *Mitteilungen der Meteorologischen Zentralanstalt* 20. Helsinki. 103 p.
- Franssila, M. & S. Huovila (1957) On the measurement of the heat flux into the soil. *Geophysica* 5: 124–133.
- French, B.K. & B.J. Legg (1979) Rothamsted irrigation 1964–76. *J. Agric. Sci., Camb.* 92: 15–37.
- Gardner, W.R. (1958) Some steady state solutions of the unsaturated moisture flow equation with application to evaporation from a water table. *Soil Sci.* 85: 228–232.
- Gardner, W.R. (1969) Dynamic aspects of water availability to plants. *Soil. Sci.* 89: 63–73.
- Gardner, W.R. (1964) Relation of root distribution to water uptake and availability. *Agron. J.* 56: 41–45.
- Gardner, W.R. & C.F. Ehlig (1962) Some observations on the movement of water to plant roots. *Agron. J.* 54: 453–456.
- Garratt, K. & C. Hicks (1973) Momentum heat and water vapour transfer to and from natural and artificial surfaces. *Quart. J. R. Met. Soc.* 99: 680–687.
- Gash, J.H.C. & J.B. Stewart (1975) The average surface resistance of a pine forest derived from Bowen ratio measurements. *Boundary-Layer Met.* 8: 454–464.
- Gilman, K. (1977) Movement of heat in soils. *Institute of Hydrology. Report No. 44*. Wallingford. 45 p.
- Golovanov, A.I. (1969) Measuring thermal conductivity of soils under laboratory conditions. *Neth. J. Agric. Sci.* 17, 1: 71–79.
- Green, R.E. & J.C. Corey (1971) Calculation of hydraulic conductivity: A further evaluation of some predictive methods. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.* 35: 3–7.

- Gürer, I. (1977) Hydrometeorological and water balance studies in Finland. Helsingin teknillinen korkeakoulu. Tieteellisiä julkaisuja 49. 164 p. Helsinki.
- Hadas, A. (1977) Evaluation of theoretically predicted thermal conductivities of soils under field and laboratory conditions. *Soil Sci. Am. J.* 41: 460–466.
- Hansen, G.K. (1974) Resistance to water transport in soil and young wheat plants. *Acta Agric. Scand.* 34: 37–48.
- Hargreaves, H. (1968) Consumptive use derived from evaporation pan data. *Journal of the Irrigation and Drainage Division, ASCE, Vol. 91, No. JR 1, Proc. Paper 5863, March:* 97–105.
- Haude, W. (1954) Zur praktischen Bestimmung der aktuellen und potentiellen Evaporation and Evapotranspiration. *Mitt. Deut. Wetterd.* 8: 1–21.
- Heldal, B. (1969) Evaporation from different evaporation pans in relation to meteorological conditions. *Sci. Rep. Agr. Coll. Norway, Vol. 48:* 1–42.
- Hillel, D. (1980) *Applications of Soil Physics.* Academic Press. New York. 385 pp.
- Hillel, D. & P. Berliner (1964) Water proofing surface-zone soil aggregates for water conservation. *Soil Sci.* 118: 131–135.
- Homen, T. (1897) Der tägliche Wärmeumsatz im Boden und die Wärmestrahlung zwischen Himmel und Erde. *Acta Societatis scientiarum fennica* 23, 3: 1–147.
- Honert, T.H. van den (1948) Water transport in plants as a catenary process. *Disc. Faraday Soc.* 3: 146–153.
- Hoogland, J.C., C. Bellmans & R.A. Feddes (1981) Root uptake model depending on soil water pressure head and maximum extraction rate. 17 p. Unpublished.
- Hooli, J. (1971) Säätekijöiden vaikutuksesta viljelykasvien satoihin ja vesitalouteen. English summary: Effect of weather on water economy and crop yields. Helsingin teknillinen korkeakoulu. Tieteellisiä julkaisuja 35. 244 p. Otaniemi.
- Hooli, J. (1972) Hydrometeorologisten havaintojen suorittamisesta Helsingin teknillisen korkeakoulun lysimetrikentällä. *Vesitalous* 22, 6: 1–14.
- Hytönen, A. (1976) Hydrometeorologisesta tutkimustoiminnasta Teknillisen korkeakoulun lysimetrikentällä. *Diplomityö Teknillisessä korkeakoulussa.* 126 p. Otaniemi.
- IHP, Sweden (1981) Nordiskt hydrologiskt program 1980–1982. Stockholm.
- Iruthayaraj, M.R. & Y.B. Morachan (1978) Relationship between evaporation from different evaporimeters and meteorological parameters. *Agric. Meteorol.* 19: 93–100.
- Jansson, P.E. & S. Haldin (1979) Model for annual water and energy flow in a layered soil. *Haldin, S. (Ed.) Comparison of forest water and energy exchange models.* Copenhagen. p. 145–163.
- Jarvis, P. (1975) Water transfer in plants. *Vries, D.A. de & N.H. Afgan (Eds.) Heat and mass transfer in the biosphere: I. Transfer processes in plant environment.* Washington D.C. p. 369–394.
- Jensen, M.E. & H.R. Haise (1963) Estimating evapotranspiration from solar radiation. *Journal of the Irrigation and Drainage Division, ASCE, Vol. 89, No. JR4, Proc. Paper 7131, March:* 15–41.
- Johansson, W. (1969) Meteorologiska elements inflytande på avdunstningen från Anderssons evaporimeter. *Grundförbättring* 22: 82–105.
- Johansson, W. (1970) Beräkning av potentiell evaporation med legning av observerade eller skattade värden för insolation, vindhastighet och ångtrycksdeficit. *Grundförbättring* 23: 95–115.
- Johansson, W. (1974) Metod för beräkning av vatteninnehåll och vattenomsättning i odlad jord med ledning av meteorologisk data. *Grundförbättring* 26: 57–153.

- Järvinen, E.A. (1978) Astioista ja lysimetreistä tapahtuva haihdunta. Diplomityö Teknillisessä korkeakoulussa. 147 p. Otaniemi.
- Kaitera, P. (1942) Miten voin torjua kuivuutta. 63 p. Porvoo.
- Kaitera, P. (1963) Niinivaara's method for estimating the evaporation from watershed areas. Publ. No. 62 of I.A.S.H. Committee for evaporation: 213–220.
- Kaitera, P. & A. Maasilta (1970) Lysimeterfältter vid Tekniska högskolan i Helsingfors. Nordisk hydrologisk konferens, Stockholm 1970. Lund. s. 41–47.
- Kaitera, P. & H. Teräsvirta (1972) Snow evaporation in south and north Finland 1969/70 and 1970/71. *Aqua Fennica* 1972: 11–19.
- Kara, O. (1972) Sadetuksesta ja sen kannattavuudesta viljanviljelytiloilla Etelä-Suomessa. English summary: Sprinkler irrigation and its profitability on grain growing farms in southern Finland. 108 p. Helsinki.
- Karvonen, T. (1980) Sadanta-valunta-mallin soveltaminen Kyrönjoen vesistösuunnitteluun. Vesihallituksen monistesarja 1980: 28. 106 p.
- Keulen, H. van (1975) Simulation of water use and herbage growth in arid regions. Wageningen. 1976 p.
- Kimball, B.A., R.D. Jackson, R.J. Reginato, F.S. Nakayama & S.B. Idso (1976) Comparison of field measured and calculated soil-heat fluxes. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 40: 18–25.
- Kivelä, H. (1977) Tutkimus lämmön johtumisesta maaperässä. Pro gradu-tutkielma. Helsingin yliopisto. 50 p.
- Klute, A. (1972) The determination of the hydraulic conductivity and diffusivity of unsaturated soils. *Soil Sci.* 113, 4: 264–276.
- Kohler, M.A., T.J. Nordensen & W.E. Fox (1955) Evaporation from pans and lakes. U.S. Dept. of Com. Weather Bur. Res. Pap. 38. Washington D.C. 21 p.
- Kohler, M.A. & M.M. Richards (1962) Multicapacity basin accounting for predicting runoff from storm precipitation. *J. Geoph. Res.* 67: 5187–5197.
- Kolkkki, O. (1959) Lämpötilakarttoja ja taulukoita Suomesta kaudelta 1921–50. Zusammenfassung: Temperaturkarten und Tabellen von Finnland für den Zeitraum 1921–50. *Suom. Meteor. Vuosik.* 50, 1: 1–26.
- Konstantinov, A.R. (1963) Evaporation in nature. Jerusalem. 523 p.
- Kramer, P.J. (1959) The role of water in the physiology of plants. *Adv. in agron.* 11: 51–57.
- Kramer, P.J. (1969) Plant and soil water relationships: A modern synthesis. New York-Toronto-London. 482 p.
- Kristensen, K.J. (1973) Depth intervals and topsoil moisture measurement with the neutron dept probe. *Nordic Hydrology* 4: 77–85.
- Kristensen, K.J. (1979) A comparison of some methods for estimation of potential evaporation. *Nordic Hydrology* 10: 239–250.
- Kuiper, P.J.C. (1964) Water uptake of higher plants as affected by root temperature. *Med. Landbouwhogeschool* 64–4. 13 p.
- Kulmala, A. (1970) Heat balance of the earth's surface at Jokioinen (60.8°N, 23.5°E) summer 1968. 69 p. Helsinki. Ilmatieteen laitoksen toimituksia.
- Lamourex, W.W. (1962) Modern evaporation formula for computer use. *Month. Weath. Rev.* 90: 26–28.
- Legg, B.J. (1979) Kirjallinen tiedonanto.
- McGuinness, J.L. & E.F. Bordne (1972) A comparison of lysimeter-derived potential evapotranspiration with computed values. U.S. Dept. Agr. Tech. Bul. 1452. 71 p.

- Makkink, G.P. (1957) Testing the Penman formula by means of lysimeters. *J. Inst. Water Eng.* 11: 277–288.
- Marshall, T.J. (1958) A relation between permeability and size distribution of pores. *J. Soil Sci.* 9: 1–8.
- Meidner, H. & D.W. Sheriff (1976) *Water and plants*. Glasgow-London. 139 p.
- Millington, R.J. & J.P. Quirk (1960) Transport in porous media. *Trans. of 7th Int. Congr. Soil Sci. Madison.* p. 97–106.
- Millington, R.J. & J.P. Quirk (1961) Permeability of porous solids. *Trans. Faraday Soc.* 57: 1200–1207.
- Millington, R.J. & J.P. Quirk (1964) Formation factor and permeability equations. *Nature* 202: 143–145.
- Molz, F.J. & I. Remson (1970) Extraction term models of soil moisture use by transpiring plants. *Water Res. Res.* 6: 1346–1356.
- Monteith, J.L. (1963) Gas exchange in plant communities. Evans, E.T. (Ed.) *Environmental control of plant growth*. New York. p. 37–56.
- Monteith, J.L. (1965) Evaporation and environment. *Proc. Symp. Soc. Exp. Biol.* 19: 205–234.
- Monteith, J.L. (1975) *Principles of environmental physics*. London. 241 p.
- Monteith, J.L. (1981) Evaporation and surface temperature. *Quart. J.R. Met. Soc.* 107: 1–27.
- Mualem, Y. (1976) A new model for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media. *Water Res. Res.* 12: 513–522.
- Munro, D. & T. Oke (1975) Aerodynamic Boundary-Layer Adjustments over a crop in neutral stability. *Boundary-Layer Meteorology* (1975): 53–61.
- Mustonen, S.E. (1964) Potentiaalisen evapotranspiraation määrittämisestä. *Acta Agr. Fenn.* 102, 2.
- Mustonen, S.E. & J.L. McGuinness (1968) Estimating evapotranspiration in a humid region. *U.S. Dept. of Agric. Techn. Bull.* 1389. 123 p. Washington, D.C.
- Mustonen, S.E. & P. Seuna (1969) Maataloushallituksen hydrologisille havaintoalueille lasketut meteorologisen haihduntaindeksin vuorokausiarvot kesäaikana vuosina 1958–68. Daily values of meteorological evaporation index for hydrological research basins of the Board of Agriculture in Summertime during the years 1958–67. *Maa- ja Vesitekn. Tutk.* 15. 68 p. Helsinki.
- Niinivaara, K. (1953) Haihtumisesta pienehköillä vesistöalueilla Suomessa. English summary: Evaporation from watersheds in Finland. 132 p. Helsinki. *Maa- ja vesiteknillisiä tutkimuksia* 7.
- Nimah, M.N. & R.J. Hanks (1973a) Model for estimating soil water, plant and atmospheric interrelations. I. Description and sensitivity. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.* 37: 522–527.
- Nimah, M.N. & R.J. Hanks (1973b) Model for estimating soil water, plant and atmospheric interrelations. II. Field test of model. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.* 37: 528–532.
- Parmele, L.H. & J.L. McGuinness (1974) Comparisons of measured and estimated daily potential evapotranspiration in a humid region. *J. Hydrology* 22: 231–251.
- Paulson, C.A. (1970) The mathematical representation of wind speed and temperature profiles in the unstable atmospheric surface layer. *J. Appl. Met.* 9: 857–861.
- Pelton, W.L. (1964) The use of lysimetric methods to measure evapotranspiration. *Proc. Hydrology Symposium No. 2: Evaporation*. Toronto. p. 106–120.
- Penman, H.L. (1948) Natural evaporation from open water, bare soil and grass. *Proc. Roy. Soc. London A* 193: 120–145.

- Penman, H.L. (1956) Evaporation: an introductory survey. *Neth. J. Agr. Sci.* 4: 9–29.
- Penman, H.L. & R.K. Schofield (1951) Some physical aspects of assimilation and transpiration. *Proc. Symp. No. 5 Soc. Exp. Biol.*: 115–129.
- Philip, J.R. (1957) The physical principles of soil water movement during the irrigation cycle. *Trans. 3rd. Congr. Intern. Comm. Irr. Drain., Question 8*: 125–154.
- Porkka, M.T. (1956) Results of measurements with Renqvist's evaporation recorder in South Finland in summer 1950. *Geophysica* 5, 2: 70–77.
- Reinsch, C.H. (1967) Smoothing by spline functions. *Numerische Mathematik* 10: 177–183.
- Richards, L.A. (1931) Capillary conduction of liquids through porous media. *Physics* 1: 318–333.
- Rijtema, P.E. (1959) Calculation methods of potential evapotranspiration. *Inst. for Land and Water Management Research. Techn. Bull.* 7. 10 p.
- Rijtema, P.E. (1965) An analysis of actual evapotranspiration. *Agr. Res. Rep.* 659. Wageningen. 107 p.
- Rijtema, P.E. (1969a) On the relation between transpiration, soil physical properties and crop production as a basis for water supply plans. *Versl. Meded. Cie Hydr. Onderz. TNO, 's-Gravenhage.* p. 28–58.
- Rijtema, P.E. (1969b) Soil moisture forecasting. *Nota* 513. ICW. Wageningen.
- Rijtema, P.E. & A.H. Ryhiner (1968) De lysimeters in Nederland (III). *Versl. Meded. Hydrol. Comm. TNO* 14: 86–149.
- Rossi, V. (1933) Über mikroklimatische Temperatur- und Feuchtigkeitsbeobachtungen mit Thermoelementpsychrometern. *Mitteilungen des Meteorologischen Instituts der Universität Helsingfors* 24. 22 p.
- Russel, G. (1980) Crop evaporation, surface resistance and soil water status. *Agric. Met.* 21: 213–226.
- Saviharju, K. (1973) Eräitä maaperän lämpötilakenttien arvioimismenetelmiä. *Diplomityö Teknillisessä korkeakoulussa.* 142 p. Otaniemi.
- Schmidt, W. (1915) *Der Massenaustausch in freier Luft und verwandte Erscheinungen.* Hamburg.
- Sepaskhah, A.R. & L. Boersma (1979) Thermal conductivity of soils as a function of temperature and water content. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 43: 439–444.
- Seuna, P. (1977) Kasteluun vaikuttavista hydrometeorologisista tekijöistä. English summary: On the Hydrometeorological Factors Affecting Irrigation. 96 p. Helsinki. *Vesientutkimuslaitoksen julkaisu* 24.
- Shiau, S.Y. & K.S. Davar (1972) Modified Penman method for potential evapotranspiration from forest regions. *J. Hydrology* 18: 349–365.
- Shuttleworth, W.J. (1976) Experimental evidence for the failure of the Penman-Monteith equation in partially wet conditions. *Boundary-Layer Meteorology* 10: 91–94.
- Smithsonian Meteorological Tables* (1951) *Smithsonian Misc. Coll. Vo.* 114. Smithsonian Inst. Washington D.C.
- Solantie, R. & U. Helimäki (1975) Korjatut sadanta- ja haihdunta-arvot Suomessa. *Julkaisemat.*
- Stanhill, G. (1973) Evaporation, transpiration and evapotranspiration: a case for Ockham's razor. Hasas, A., D. Swartzendruber, P.E. Rijtema, M. Fuchs & B. Yaron (Ed.) *Physical Aspects of Soil Water and Salts in Ecosystem.* Berlin. p 207–220.
- Swinbank, W.C. (1951) The measurement of vertical transfer of heat and water vapour by eddies in the lower atmosphere. *J. Meteor.* 8: 135–145.

- Szeicz, G., G. Endrödi & S. Tajchman (1969) Aerodynamic and surface factors in evaporation. *Wat. Res. Res.* 5: 380–394.
- Szeicz, G. & I.F. Long (1969) Surface resistance of crop canopies. *Water Res. Res.* 5: 622–633.
- Tanner, C.B. (1968) Evaporation of water from plants and soil. Kozlowski, T.T. (Ed.) *Water deficits and plant growth*, Vol. 1, Chapter 4. New York. p. 73–106.
- Teräsvirta, H. (1971) Lumen pinnasta tapahtuva haihdunta. Diplomityö Teknillisessä korkeakoulussa. 85 p. Otaniemi.
- Tew, R.K., S.A. Taylor & G.L. Ashcroft (1963) Influence of soil temperature on transpiration under various environmental conditions. *Agron. J.* 55: 558–560.
- Thom, A.S. (1972) Momentum, mass, and heat exchange of vegetation. *Quart. J. R. Met. Soc.* 98: 124–134.
- Thom, A.S. (1975) Momentum, mass, and heat exchange of plant communities. Monteith, J.L. (Ed.) *Vegetation and the atmosphere*, Vol. 1. London, p. 57–109.
- Thom, A.S. & H.R. Oliver (1977) On Penman's equation for estimating regional evaporation. *Quart. J. R. Met. Soc.* 103: 345–358.
- Thornthwaite, C.W. (1944) Report of the Committee on Transpiration and Evaporation, 1943–44. *Transactions, Am. Geophysical Union*, Vol. 25: 683–693.
- Thornthwaite, C.W. (1948) An approach toward a rational classification of climate. *Geogr. Rev.* 38: 55–94.
- Thornthwaite, C.W. (1954) A re-examination of the concept and measurement of potential evapotranspiration. *Publs. Clim. John Hopkins Univ.* 7, 1: 200–225.
- Thornthwaite, C.W. & B. Holzman (1939) The determination of evaporation from land and water surfaces. *U.S. Monthly Weather Rev.* Vol. 67. Washington.
- Tulvakomitea (1939) *Komiteanmietintö n:o 14–1939*. Helsinki. s. 97–105.
- Turc, L. (1954, 1955) Le bilan d'eau des sols: Relations entre les précipitations l'évaporation et l'écoulement. *Annl. Agron.* 5: 491–595, et 6: 5–131.
- Turc, L. (1961) Evaluation des besoins en eau d'irrigation, évapotranspiration potentielle. *Ann. Agron.* 12, 1: 13–49.
- Uhlig, S. (1954) Berechnung der Verdunstung aus klimatologischen Daten. *Mitt. Deut. Wetterd.* 6: 1–24.
- USDA (1967) *Irrigation water requirements*. U.S. Dept. Agr. Engin. Div. Tech. Rel. 21. 83 p.
- USSR State Committee for Hydrometeorology and Control of Natural Environment (1972–79) *Solar radiation and radiation balance data*. Leningrad.
- Vakkilainen, P. & T. Karvonen (1980) SSARR, sadanta-valuntamalli vesistöjen optimaaliseen suunnitteluun ja käyttöön. *Vesitalous* 21, 4: 36–44.
- Virta, J. (1966) Measurement of evapotranspiration and computation of water budget in treeless peatlands in the natural state. *Soc. Sci. Fenn.*, Vol. 32, No. 11. 70 p.
- Vries, D.A. de (1952) Het warmtegeleidingsvermogen van grond. *Meded. Landb. hogesch. Wageningen*. 72 p.
- Vries, D.A. de (1966) Thermal properties of soils. Wijk, W.R. van (Ed.) *Physics of plant environment*. 2 ed. Amsterdam. p. 210–235.
- Waldenström, A (1977) Slutrapport över hydrologiska undersökningar i Kassjöans representativa område. *Hydrologiska Byrån Rapport No. 29*. 96 p. Norrköping.
- Webb, E.K. (1970) Profile relationships: The log-linear range, and extension to strong stability. *Quart. J. Royal Meteor. Soc.* 96: 67–90.



- Wesseling, J. (1974) Crop growth and wet soils. Schilftgaarde, J. van (Ed.) Drainage for agriculture. New York. p. 7-37.
- Wijk, A.L.M. van (1980) Soil water conditions and playability of grass sportsfields. Z. Vegetationstechnik 3: 7-22.
- Wijk, W.R. van & D.A. Vries de (1954) Evapotranspiration. Neth. J. Agric. Sci. 2: 105-119.
- Wind, G.P. (1972) A hydraulic model for the simulation of non-hysteric vertical unsaturated flow of moisture in soils. J. Hydrology 15: 227-246.
- Wind, G.P. (1976) Application of analog and numerical models to investigate the influence of drainage on workability in spring. Neth. J. Agric. Sci. 24: 155-172.
- Wind, G.P. (1979) Analog modeling of transient moisture flow in unsaturated soil. Wageningen. 123 p.
- Wind, G.P. (1981) Suullinen tiedonanto.
- Wit, C.T. de (1958) Transpiration and crop yields. Versl. Landb. K. Onderz. 64. 6. Wageningen. 88 p.
- WMO (1966) Measurement and estimation of evaporation and evapotranspiration. Technical Note 83. 124 p. Geneve.
- Ångström, A. (1924) Solar and terrestrial radiation. Quart. J. Roy. Meteor. Soc. 50: 121.

Hydrometeorologisten tekijöiden kuukausikeskiarvot ja sadantasummat.  
Monthly means of the hydrometeorological factors and precipitation sums.

| Vuosi<br>Year                             | Kuukausi<br>Month | Tulosä-<br>teily<br>Incoming<br>radiation<br>W · m <sup>-2</sup> | Auringon-<br>paiste<br>Sun-<br>shine<br>h | Lämpö-<br>tila<br>Temper-<br>ature<br>°C | Kyllästys-<br>vajaus<br>Saturation<br>deficit<br>mbar | Tuulen<br>nopeus<br>(0,5 m)<br>Wind<br>velocity<br>m/s | Sadanta<br>(korjaama-<br>maton)<br>Precipitation<br>(uncorrected)<br>mm |
|---|-------------------|--|---|--|---|--|---|
| 1972                                      | Toukokuu (V)      | 221,7  | 6,8                                       | 8,8                                      | 4,1   | 1,6  | 27,4  |
|   | Kesäkuu (VI)      | 269,1  | 8,8                                       | 15,8                                     | 7,2   | 1,1  | 38,8  |
|   | Heinäkuu (VII)    | 262,2  | 9,6                                       | 19,7                                     | 8,0   | 1,0  | 78,8  |
|   | Elokuu (VIII)     | 168,7  | 6,2                                       | 16,5                                     | 4,0   | 1,0  | 172,7   |
|   | Syyskuu (IX)      | 110,6  | 4,8                                       | 10,4                                     | 2,6   | 1,0  | 20,5  |
|   | Lokakuu (X)       | 39,9   | 1,9                                       | 5,2                                      | 1,6   | 1,4  | 29,6  |
| 1973                                      | Toukokuu (V)      | 214,0  | 6,8                                       | 9,5                                      | 5,1   | 1,7  | 32,7  |
|   | Kesäkuu (VI)      | 274,1  | 8,3                                       | 16,3                                     | 9,1   | 1,2  | 17,9  |
|   | Heinäkuu (VII)    | 264,2  | 9,2                                       | 19,6                                     | 10,9  | 1,3  | 20,4  |
|   | Elokuu (VIII)     | 182,4  | 6,4                                       | 14,9                                     | 6,5   | 1,3  | 33,6  |
|   | Syyskuu (IX)      | 77,9   | 3,8                                       | 7,8                                      | 2,4   | 1,4  | 123,1   |
|   | Lokakuu (X)       | 55,0   | 3,8                                       | 2,8                                      | 1,8   | -  | 75,0  |
| 1974                                      | Toukokuu (V)      | 221,5  | 8,2                                       | 6,9                                      | 5,0   | 1,4  | 31,1  |
|   | Kesäkuu (VI)      | 246,6  | 8,2                                       | 14,0                                     | 7,6   | 0,9  | 49,0  |
|   | Heinäkuu (VII)    | 181,5  | 5,3                                       | 15,6                                     | 5,6   | 1,2  | 54,7  |
|   | Elokuu (VIII)     | 177,2  | 6,7                                       | 14,5                                     | 4,8   | 1,0  | 37,9  |
|   | Syyskuu (IX)      | 91,7   | 3,3                                       | 12,6                                     | 3,3   | 1,3  | 85,4  |
|   | Lokakuu (X)       | 27,0   | 0,9                                       | 6,2                                      | 1,5   | 1,2  | 180,1   |
| 1975                                      | Toukokuu (V)      | 231,6  | 8,2                                       | 11,1                                     | 6,5   | 1,1  | 35,3  |
|   | Kesäkuu (VI)      | 275,0  | 8,7                                       | 13,4                                     | 7,8   | 1,3  | 13,3  |
|   | Heinäkuu (VII)    | 276,1  | 9,1                                       | 17,7                                     | 10,0  | 1,0  | 20,4  |
|   | Elokuu (VIII)     | 175,5  | 6,4                                       | 16,4                                     | 8,8   | 0,8  | 33,9  |
|   | Syyskuu (IX)      | 110,3  | 4,8                                       | 13,1                                     | 3,6   | 1,8  | 53,8  |
|   | Lokakuu (X)       | 48,0   | 2,8                                       | 5,5                                      | 2,2   | 1,1  | 29,1  |
| 1976                                      | Toukokuu (V)      | 245,1  | 10,1                                      | 10,4                                     | 7,6   | -  | 33,2  |
|   | Kesäkuu (VI)      | 229,4  | 7,2                                       | 13,0                                     | 7,3   | 1,4  | 36,8  |
|   | Heinäkuu (VII)    | 214,7  | 6,7                                       | 15,5                                     | 6,3   | 0,9  | 48,5  |
|   | Elokuu (VIII)     | 204,2  | 8,3                                       | 14,8                                     | 7,1   | 0,8  | 49,4  |
|   | Syyskuu (IX)      | 112,2  | 4,7                                       | 8,1                                      | 3,3   | 0,9  | 59,9  |
|   | Lokakuu (X)       | 48,8   | 3,1                                       | 2,4                                      | 1,9   | -  | 31,5  |
| 1977                                      | Toukokuu (V)      | 173,0  | 5,5                                       | 9,1                                      | 4,7   | -  | 21,7  |
|   | Kesäkuu (VI)      | 238,8  | 8,5                                       | 13,9                                     | 7,1   | 1,0  | 34,3  |
|   | Heinäkuu (VII)    | 179,1  | 5,4                                       | 14,6                                     | 4,6   | 1,0  | 91,2  |
|   | Elokuu (VIII)     | 159,3  | 5,6                                       | 14,6                                     | 4,4   | 0,5  | 44,2  |
|   | Syyskuu (IX)      | 103,1  | 4,4                                       | 8,3                                      | 2,6   | 1,1  | 73,2  |
|   | Lokakuu (X)       | 33,2   | 1,4                                       | 5,7                                      | 1,3   | 1,2  | 80,6  |
| 1978                                      | Toukokuu (V)      | 240,0  | 9,0                                       | 9,9                                      | 8,4   | 1,0  | 3,0   |
|   | Kesäkuu (VI)      | 219,7  | 9,1                                       | 14,2                                     | 8,5   | 0,9  | 40,2  |
|   | Heinäkuu (VII)    | 208,9  | 6,3                                       | 15,2                                     | 6,6   | 0,7  | 94,6  |
|   | Elokuu (VIII)     | 151,2  | 5,0                                       | 13,9                                     | 5,0   | 1,0  | 144,1   |
|   | Syyskuu (IX)      | 74,2   | 2,0                                       | 9,1                                      | 2,5   | 1,0  | 3,5   |
|   | Lokakuu (X)       | 53,7   | 4,1                                       | 4,4                                      | 2,6   | -  | 25,0  |
| 1979                                      | Toukokuu (V)      | 224,6  | 9,0                                       | 10,4                                     | 5,2   | 1,8  | 24,4  |
|   | Kesäkuu (VI)      | 273,6  | 10,5                                      | 15,5                                     | 8,6   | 1,4  | 41,6  |
|   | Heinäkuu (VII)    | 192,7  | 5,3                                       | 14,8                                     | 3,3   | 0,9  | 106,3   |
|   | Elokuu (VIII)     | 177,8  | 7,6                                       | 16,3                                     | 5,0   | 1,1  | 72,8  |
|   | Syyskuu (IX)      | 104,5  | 5,2                                       | 10,2                                     | 2,8   | 1,4  | 68,7  |
|   | Lokakuu (X)       | 44,3   | 2,6                                       | 4,6                                      | 1,6   | -  | 19,3  |
| Keski-<br>arvot<br>1972-<br>79            | Toukokuu (V)      | 221,5  | 8,0                                       | 9,5                                      | 5,9   | 1,4  | 26,1  |
|   | Kesäkuu (VI)      | 253,3  | 8,7                                       | 14,5                                     | 7,9   | 1,2  | 34,0  |
|   | Heinäkuu (VII)    | 222,4  | 7,1                                       | 16,6                                     | 6,9   | 1,0  | 64,4  |
|   | Elokuu (VIII)     | 174,5  | 6,5                                       | 15,2                                     | 5,7   | 0,9  | 73,6  |
|   | Syyskuu (IX)      | 98,0   | 4,1                                       | 10,0                                     | 2,9   | 1,2  | 61,0  |
|   | Lokakuu (X)       | 43,8   | 2,6                                       | 4,6                                      | 1,8   | 1,2  | 58,8  |
| Normaaliarvot<br>Kaisaniemessä<br>1931-60 | Toukokuu (V)      |  |   | 9,0                                      |   |  | 37,0  |
|   | Kesäkuu (VI)      |  |   | 14,3                                     |   |  | 47,0  |
|   | Heinäkuu (VII)    |  |   | 17,1                                     |   |  | 62,0  |
|   | Elokuu (VIII)     |  |   | 15,6                                     |   |  | 66,0  |
|   | Syyskuu (IX)      |  |   | 10,4                                     |   |  | 66,0  |
|   | Lokakuu (X)       |  |   | 4,9                                      |   |  | 68,0  |

Astiahaidunta-arvoihin liittyvien muuttujien tilastollisia tunnuslukuja.  $E$  = haihdunta (mm),  $R_s$  = tulosäteily ( $W \cdot m^{-2}$ ),  $e_s - e_a$  = kyllästysvajaus (mbar),  $T$  = lämpötila ( $^{\circ}C$ ) ja  $u$  = tuulen nopeus (0,5 m) ( $m \cdot s^{-1}$ ).

*Statistical indices of variables related to pan evaporation.  $E$  = evaporation (mm),  $R_s$  = incoming radiation ( $W \cdot m^{-2}$ ),  $e_s - e_a$  = saturation deficit of the air (mbar),  $T$  = temperature ( $^{\circ}C$ ) and  $u$  = wind velocity (0,5 m) ( $m \cdot s^{-1}$ ).*

| Astia<br>Pan | Muuttuja<br>Variable | Keskiarvo<br>Mean | Standardi-<br>poikkeama<br>Standard<br>deviation | Vaihteluväli<br>Range | Vinous<br>Skewness |
|--------------|----------------------|-------------------|--|-----------------------|--------------------|
| Class A      | E                    | 3,5               | 2,2  | 0,0 – 15,9            | 1,1                |
|              | $R_s$                | 186,2             | 97,1   | 4,2 – 268,8           | 0,0                |
|              | $e_s - e_a$          | 5,8               | 3,9  | 0,3 – 20,9            | 1,2                |
|              | T                    | 13,0              | 4,6  | - 0,5 – 24,8          | - 0,1              |
|              | u                    | 1,0               | 0,6  | 0,0 – 6,3             | 2,1                |
| Andersson    | E                    | 3,5               | 2,4  | 0,0 – 18,3            | 1,6                |
|              | $R_s$                | 181,0             | 94,4   | 7,9 – 360,0           | 0,0                |
|              | $e_s - e_a$          | 5,8               | 3,7  | 0,5 – 20,9            | 1,1                |
|              | T                    | 13,2              | 3,9  | 1,3 – 24,8            | - 0,4              |
|              | u                    | 0,9               | 0,5  | 0,0 – 6,3             | 1,2                |
| GGI-3000     | E                    | 2,3               | 1,7  | 0,0 – 11,2            | 1,8                |
|              | $R_s$                | 176,6             | 97,8   | 2,9 – 360,0           | 0,0                |
|              | $e_s - e_a$          | 5,6               | 3,8  | 0,4 – 20,9            | 1,1                |
|              | T                    | 12,4              | 4,5  | - 0,5 – 24,8          | - 0,4              |
|              | u                    | 0,9               | 0,5  | 0,0 – 6,3             | 1,2                |

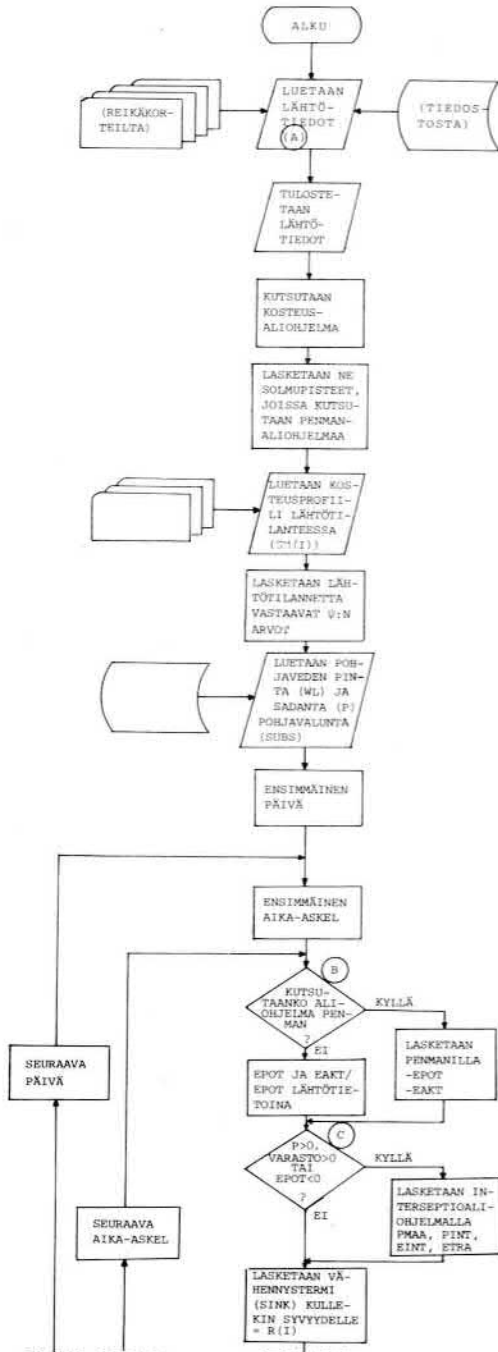
Havaintojen lukumäärä  
Number of observations

Class A 852  
Andersson 508  
GGI-3000 482

Mitatut potentiaaliset haihdunnat (mm).  
Measured potential evapotranspiration (mm).

| Vuosi<br>Year | Jakso<br>Period | Lysimetri n:o<br>Lysimeter n:o |     |    |     | PET |
|---------------|-----------------|--------------------------------|-----|----|-----|-----|
|               |                 | 1                              | 2   | 9  | 11  |     |
| 1973          | 06.06.–26.06.   | 85                             | 71  |    |     | 78  |
| 1974          | 13.05.–04.06.   | 38                             |     |    |     | 38  |
|               | 12.08.–26.08.   | 40                             | 39  |    |     | 40  |
|               | 26.08.–24.09.   | 58                             |     |    | 60  | 59  |
| 1975          | 05.06.–01.07.   |                                | 96  |    |     | 96  |
|               | 01.07.–30.07.   | 120                            | 110 |    | 101 | 110 |
|               | 30.07.–28.08.   |                                | 86  |    |     | 86  |
|               | 28.08.–01.10.   | 61                             |     |    |     | 61  |
|               | 01.10.–30.10.   | 24                             | 24  |    |     | 24  |
| 1977          | 05.05.–31.05.   | 46                             | 44  |    | 44  | 45  |
|               | 31.05.–28.06.   | 77                             |     |    | 79  | 78  |
|               | 28.06.–03.08.   | 81                             | 97  |    | 87  | 89  |
|               | 03.08.–16.09.   | 78                             |     |    | 88  | 83  |
| 1978          | 30.06.–31.07.   | 98                             | 101 |    |     | 99  |
|               | 31.07.–31.08.   | 95                             |     | 86 | 76  | 86  |
|               | 04.10.–31.10.   | 22                             | 27  | 16 |     | 22  |
| 1979          | 02.05.–31.05.   |                                | 51  | 57 | 53  | 55  |
|               | 31.07.–31.08.   | 86                             | 85  |    | 78  | 83  |
|               | 31.08.–03.10.   | 50                             | 52  |    | 49  | 50  |
|               | 03.10.–31.10.   | 26                             | 24  | 24 | 23  | 24  |

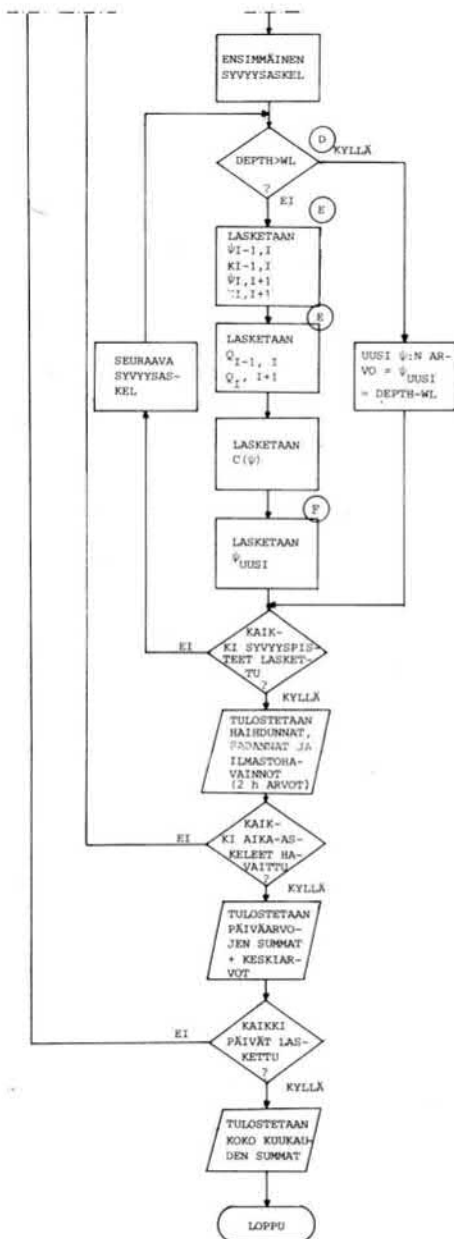
Maa-kasvi-ilmakehäsystemiä kuvaavan simulointimallin ohjelman lohkokkaavio.  
Flow chart of the simulation programme describing the soil-plant-atmosphere system.



(A) Tässä vaiheessa luettavat tiedot + niiden symbolit ohjelmassa

## SYMBOLI

|   |  |
|---|--|
| LOPPU   | - jakson pituus päivissä   |
| DTIME   | - aika-askeleiden lukumäärä/vrk (esim. 192 = 7,5 min)  |
| DE  | - syvyysaskeleen pituus (cm)   |
| IOTTO   | - vedenoton kerrokset (1-3)  |
| AIKA  | - ilmastohavaintojen välinen aika (2 tai 24 h)   |
| DELTAZ  | - lämpötila-anturien etäisyys (cm)   |
| RUOHO   | - ruohon pituus (m)  |
| SEPT  | - interseptiovaraston koko (cm)  |
| RSS   | - RS:n pienin arvo   |
| TES   | - lämpötila maassa (ei tarvita laskennassa)  |
| ISVKS   | - laskentavuosi  |
| VARHGE  | - G:n suuruus prosentteina, jos maan lämpötiloja ei tunneta  |
| IKOST   | - optio, jolla testataan, halutaanko laskea maankosteusmallilla (0 = lasketaan, 1 = ei lasketa)              |
| ISUBS   | - optio, jolla testataan, halutaanko syöttää pohjavaltua mallille päivittäin (0 = syötetään, 1 = ei syötetä) |
| ISUBOT  | - se solmupiste (2-koordinaatti), josta pohjavaltua otetaan pois   |
| THETA 1(I)  | - maan kosteusprosentit (3 kerrosta)   |
| 2(I)  | - ja niitä vastaavat   |
| 3(I)  | -  |
| PHII (I)  | - matrikpotentiaalit   |
| PHK (I)   | - matrikpotentiaalit   |
| K 1(I)  | - ja   |
| K 2(I)  | - niitä vastaavat hydrauliset johtavuudet  |
| K 3(I)  | -  |
| CPSII (I)   | - matrikpotentiaalit   |
| CEE 1(I)  | - niitä vastaavat C:n ja   |
| CEE 2(I)  | - arvot  |
| NURMI (I)   | - nurmen pituudet (m)  |
| TUULI (I)   | - tuulen nopeudet (m/s)  |
| RA (J,I)  | - edellisten yhdistelmiä vastaavat r <sub>a</sub> :t   |
| LAMDA (I)   | - lämmönjohtavuudet ja niitä   |
| THETA 4(I)  | - vastaavat kosteuspitoisuudet   |
| ILAHTO  | - testataan, mitä arvoja käytetään Penmanin kaavassa   |
| jos ILAHTO = 0, luetaan T <sub>a</sub> , T <sub>w</sub> , V <sub>2</sub> , DT, DT <sub>2</sub> , N <sub>S</sub> |  |
| = 1, luetaan T <sub>a</sub> , V <sub>2</sub> , DT, DT <sub>2</sub> , N <sub>S</sub> , R <sub>m</sub>            |  |
| = 2, luetaan T <sub>a</sub> , T <sub>w</sub> , V <sub>2</sub> , N <sub>S</sub>                                  |  |
| = 3, luetaan T <sub>a</sub> , V <sub>2</sub> , N <sub>S</sub> , R <sub>m</sub>                                  |  |
| = 4, luetaan T <sub>a</sub> , V <sub>2</sub> , S <sub>D</sub> , N <sub>S</sub> ,                                |  |
| missä T <sub>a</sub> = kuiva lämpötila  |  |
| T <sub>w</sub> = kostea lämpötila   |  |
| V <sub>2</sub> = tuulen nopeus 2 m:n korkeudella  |  |
| DT <sub>1</sub> = maan lämpötila (anturi 1)   |  |
| DT <sub>2</sub> = " " (anturi 2)  |  |
| N <sub>S</sub> = nettosäteily   |  |
| R <sub>m</sub> = suhteellinen kosteus   |  |



- IRADI - säteilyn indeksi, jos  
 IRADI = 0, säteilyn yksikkö on cal/cm<sup>2</sup>  
 IRADI = 1, säteilyn yksikkö on mWh/cm<sup>2</sup>
- IGEE - jos IGEE = 0, maan lämpötilatietoja käytetään maahan menevän energian laskemiseen  
 jos IGEE = 1, maahan menevä energia lasketaan nettosäteilyn avulla (% nettosäteilystä)
- IEPOT - jos IEPOT = 0, niin potentiaalinen haihdunta luetaan lähtötietona  
 jos IEPOT = 1, potentiaalinen haihdunta lasketaan Penmanin kaavan avulla
- EAEP - aktuaalisen ja potentiaalisen haihdunnan suhde (jos IEPOT = 0)
- IVALIT - haluttaessa voidaan maan kosteusprofiilit tulostaa useamminkin kuin kerran päivässä. (esim., jos IVALIT = 2, niin kosteusprofiili tulostetaan kahdesti päivässä)

SAT1A, SAT2A,  
 SAT3A - eri kerrosten vedenläpäisevyyden kyllästysarvo, jos virtaus tapahtuu alaspäin

SAT1Y, SAT2Y,  
 SAT3Y - vedenläpäisevyyden kyllästysarvot, jos virtaus suunta ylöspäin

(B) Penman-aliohjelman kaavio erikseen

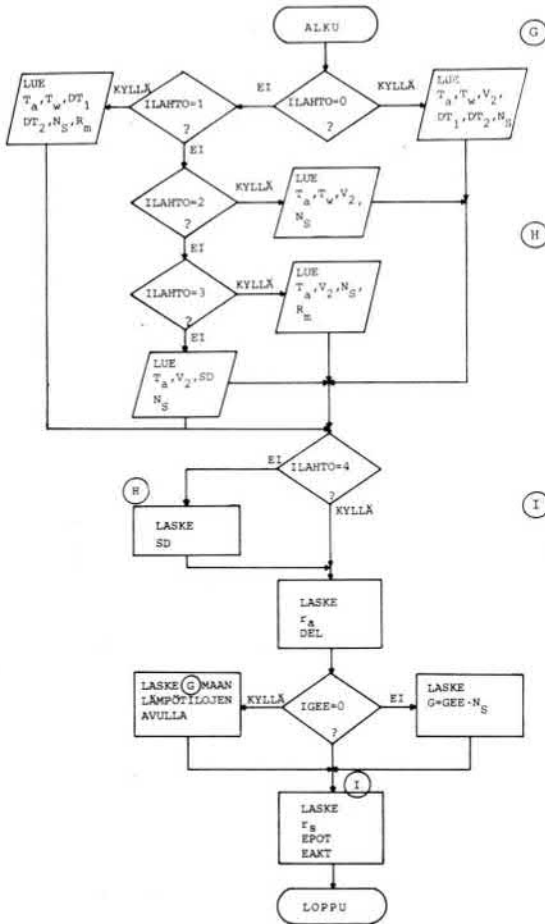
(C) Jos sadanta (P) > 0 tai interseptiovaraston vanha arvo > 0 tai jos potentiaalinen haihdunta < 0 (kastetilanne), kutsutaan interseptio-aliohjelmia, jolla lasketaan:  
 - maahan menevä sadanta (PMAA)  
 - interseptiovarastoon jäävä sadanta (PINT)  
 - haihdunta interseptiovarastosta (EINT)  
 - transpiraatio (ETRA)

(D) Testataan, onko laskennassa edetty jo alle pohjavedenpinnan. Jos DEPTH > WL + ohitetaan kosteuden laskenta ja sijoitetaan  $\psi_{\text{UUSI}} = \text{DEPTH} - \text{WL}$

(E)  $\psi_{I-1, I}$  = pisteiden I-1 ja I keskiarvo  
 $K_{I-1, I}$  = edellistä arvoa vastaava K  
 $\psi_{I, I+1}$  } vastaavasti pisteille I ja I+1  
 $K_{I, I+1}$  }  
 $Q_{I-1, I}$  virtaus pisteestä I-1 pisteeseen I  
 $Q_{I, I+1}$  virtaus pisteestä I pisteeseen I+1  
 K:n arvot kerrotaan vastaavan kerroksen SAT1A (tai SAT2A...) arvolla, jos virtaus (Q) alaspäin ja SAT1Y arvolla, jos virtaus (Q) ylöspäin

(F)  $\psi_{\text{UUSI}} = \psi_{\text{vanha}} + \frac{-100 \cdot \Delta t}{C(\psi_{\text{vanha}}) \cdot 0.02} (Q_{I, I+1} - Q_{I-1, I} - R_I)$

## B ALIOHJELMA PENMAN



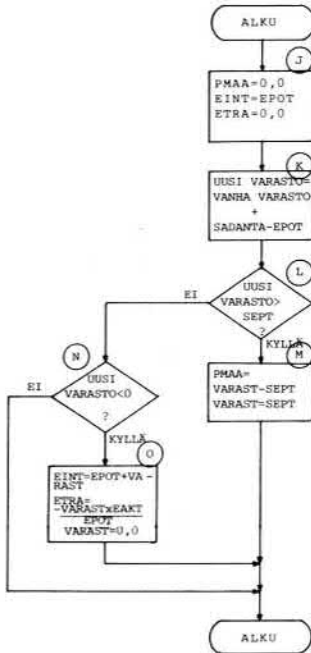
$T_a$  = kuiva lämpötila  
 $T_w$  = kostea "  
 $V_2$  = tuulen nopeus (2 M)  
 $DT_1$  = maan lämpötila 2 cm syv.  
 $DT_2$  = " " 25 cm "  
 $N_S$  = nettosäteily  
 $R_m$  = suhteellinen kosteus  
 $SD$  = kyllästysvajaus

Lasketaan kyllästysvajaus (SD)  $T_a$ :n ja  $T_w$ :n avulla, jos ILAHTO = 0 tai 2 ja  $T_a$ :n ja  $R_m$ :n avulla, jos ILAHTO = 1 tai 3.

$r_a$  = taulukosta  
 $DEL$  = höyrynpainekäyrän kaltevuus  
 $G$  = maahan menevä energia (lämmönjohtavuuden (VLAMP) ja lämpötilaeron (DTEE) funktiona tai prosentteina  $N_S$ :stä)  
 $GEE$  = G:n prosenttiosuus nettosäteilystä

$r_s$  = maan pintavastuksen arvo  
 $EPOT$  = potentiaalinen haihdunta ( $r_s$ :n arvoksi sijoitetaan 0,0)  
 $EAKT$  = todellinen haihdunta

## ALIOHJELMA INTER



- (J) annetaan muuttujille ao. alkuarvot
- (K) lasketaan uusi varasto olettaen, että haihdunta on potentiaalista eli vettä on interseptiovarastossa riittävästi
- (L) testataan, onko uusi varasto suurempi kuin interseptiovaraston koko (SEPT, annetaan lähtötietona)
- (M) jos VARAST > SEPT, niin maahan menevä sadanta on yhtäsuuri kuin VARAST -SEPT (eli se osa sadannasta, joka ei mahdu interseptiovarastoon) VARAST saa uudeksi arvokseen maksimi-arvonsa = SEPT (seuraavaa laskenta-askelta varten)
- (N) uusi varasto pienempi kuin nolla. Vastaa tilannetta, jossa sadanta on pienempi kuin potentiaalinen haihdunta. Osa haihduntakapasiteetista käytetään tällöin interseptiohaihduntaan, osa transpiraatioon
- (O) INTERSEPTIO (EINT) on yhtäsuuri kuin  

$$EINT = EPOT \cdot VARAST_{uusi}$$

$$= EPOT \cdot VARAST_{vanha} + SADANTA - EPOT$$

$$= VARAST_{vanha} \cdot SADANTA$$
vanha varasto + sadanta, silloin kun  $VARAST_{uusi} < 0$   

$$Transpiraatio = \frac{EPOT - EINT}{EPOT} EAKT = \frac{VARAST_{uusi}}{EPO} EAKT$$
Transpiraatio on yhtäsuuri kuin potentiaalisen haihdunnan ja interseption erotus kerrottuna todellisen ja potentiaalisen haihdunnan suhteella. EAKT = todellinen haihdunta, joka riippuu maan kosteuspitoisuudesta (%:stä).



Maanpinnan energiatase jaksolla 20.6.–11.7.1972. Vuorokausiarvot ( $W, m^{-2}$ ).  
*Energy balance of the soil surface during period 20.6.–11.7.1972. Daily values ( $W, m^{-2}$ ).*

| Pvm<br>Date                       | $R_n$ | Lysimetri 1<br>Lysimeter 1 |     |     | Lysimetri 2<br>Lysimeter 2 |     |     | Lysimetri 4<br>Lysimeter 4 |     |      |
|-----------------------------------|-------|----------------------------|-----|-----|----------------------------|-----|-----|----------------------------|-----|------|
|                                   |       | LE                         | G   | C   | LE                         | G   | C   | LE                         | G   | C    |
| 20.6.                             | 166   | -125                       | -10 | -31 | -120                       | -9  | -37 | -104                       | -8  | -54  |
| 21.6.                             | 85    | -99                        | -6  | 20  | -95                        | -5  | 15  | -89                        | -4  | 8    |
| 22.6.                             | 144   | -109                       | -4  | -31 | -105                       | 0   | -39 | -101                       | 1   | -42  |
| 23.6.                             | 58    | -64                        | -4  | 10  | -62                        | -2  | 6   | -60                        | 0   | 2    |
| 24.6.                             | 121   | -91                        | -9  | -21 | -87                        | -6  | -28 | -82                        | 0   | 2    |
| 25.6.                             | 141   | -99                        | -12 | -29 | -97                        | -8  | -36 | -89                        | -16 | -36  |
| 26.6.                             | 168   | -115                       | -18 | -35 | -113                       | -16 | -39 | -103                       | -20 | -45  |
| 27.6.                             | 184   | -149                       | -17 | -18 | -144                       | -15 | -25 | -132                       | -18 | -34  |
| 28.6.                             | 170   | -139                       | -15 | -16 | -136                       | -12 | -22 | -120                       | -15 | -35  |
| 29.6.                             | 146   | -139                       | -10 | 3   | -133                       | -8  | -5  | -108                       | -11 | -27  |
| 30.6.                             | 167   | -139                       | -9  | -19 | -136                       | -5  | -26 | -106                       | -9  | -52  |
| 1.7.                              | 162   | -133                       | -12 | -17 | -128                       | -9  | -25 | -79                        | -12 | -71  |
| 2.7.                              | 167   | -123                       | -14 | -30 | -118                       | -12 | -37 | -67                        | -15 | -85  |
| 3.7.                              | 100   | -75                        | -10 | -15 | -74                        | -8  | -18 | -48                        | -9  | -43  |
| 4.7.                              | 163   | -99                        | -13 | -51 | -97                        | -11 | -55 | -48                        | -9  | -106 |
| 5.7.                              | 71    | -64                        | -6  | -1  | -67                        | -4  | 0   | -60                        | -3  | -8   |
| 7.7.                              | 143   | -131                       | -5  | -7  | -126                       | -4  | -13 | -115                       | -8  | -21  |
| 8.7.                              | 106   | -93                        | -6  | -7  | -93                        | -5  | -8  | -84                        | -9  | -13  |
| 9.7.                              | 131   | -120                       | 0   | -11 | -118                       | 2   | -15 | -108                       | -3  | -20  |
| 10.7.                             | 115   | -91                        | 2   | -22 | -90                        | 4   | -29 | -82                        | 0   | -33  |
| 11.7.                             | 157   | -112                       | -5  | -40 | -108                       | -5  | -44 | -99                        | -7  | -51  |
| <b>Keski-<br/>arvot<br/>Means</b> | 133   | -107                       | -9  | -17 | -104                       | -6  | -23 | -87                        | -8  | -38  |

Maanpinnan energiatase jaksolla 20.6.–11.7.1972. Keskimääräinen vuorokausijakauma ( $W \cdot m^{-2}$ ).

*Energy balance of the soil surface during period 20.6.–11.7.1972. Avarage daily distribution ( $W \cdot m^{-2}$ ).*

| Klo<br>Time | $R_n$ | Lysimetri 1<br>Lysimeter 1 |     |      | Lysimetri 2<br>Lysimeter 2 |     |      | Lysimetri 4<br>Lysimeter 4 |     |      |
|-------------|-------|----------------------------|-----|------|----------------------------|-----|------|----------------------------|-----|------|
|             |       | LE                         | G   | C    | LE                         | G   | C    | LE                         | G   | C    |
| 0– 2        | – 25  | 3                          | – 1 | 23   | 3                          | 1   | 21   | 3                          | 2   | 20   |
| 2– 4        | – 15  | – 3                        | 3   | 15   | – 6                        | 6   | 15   | – 6                        | 6   | 15   |
| 4– 6        | 42    | – 41                       | 6   | – 7  | – 40                       | 9   | – 11 | – 37                       | 10  | – 15 |
| 6– 8        | 143   | – 97                       | 2   | – 48 | – 99                       | 5   | – 49 | – 86                       | 4   | – 61 |
| 8–10        | 287   | –190                       | – 5 | – 92 | –189                       | – 2 | – 96 | –166                       | – 4 | –117 |
| 10–12       | 380   | –252                       | –13 | –115 | –250                       | – 9 | –121 | –217                       | –15 | –148 |
| 12–14       | 377   | –240                       | –19 | –118 | –238                       | –17 | –122 | –203                       | –24 | –150 |
| 14–16       | 249   | –184                       | –22 | – 43 | –182                       | –20 | – 47 | –151                       | –30 | – 68 |
| 16–18       | 136   | –122                       | –21 | 7    | –124                       | –18 | 6    | –100                       | –25 | – 11 |
| 18–20       | 30    | – 65                       | –17 | 52   | – 65                       | –16 | 51   | – 54                       | –19 | 43   |
| 20–22       | – 25  | – 22                       | –12 | 59   | – 21                       | –11 | 57   | – 17                       | – 9 | 51   |
| 22–24       | – 27  | 0                          | – 7 | 34   | – 3                        | – 5 | 35   | – 3                        | – 4 | 34   |

Maanpinnan energiatase jaksolla 16.4.–20.5.1973. Vuorokausiarvot ( $W, m^{-2}$ ).  
*Energy balance of the soil surface during period 16.4.–20.5.1973. Daily values ( $W, m^{-2}$ ).*

| Pvm<br>Date         | $R_n$ | Lysimetri 1<br>Lysimeter 1 |     |     | Lysimetri 4<br>Lysimeter 4 |     |     |
|---------------------|-------|----------------------------|-----|-----|----------------------------|-----|-----|
|                     |       | LE                         | G   | C   | LE                         | G   | C   |
| 16.4.               | 14    | -8                         | -7  | 1   | -8                         | -5  | -1  |
| 17.4.               | 31    | -8                         | -12 | -11 | -8                         | -8  | -15 |
| 18.4.               | 17    | -5                         | -12 | 0   | -5                         | -7  | -5  |
| 19.4.               | 83    | -20                        | -17 | -46 | -24                        | -9  | -50 |
| 20.4.               | 109   | -36                        | -14 | -59 | -37                        | -8  | -64 |
| 21.4.               | 128   | -33                        | -9  | -86 | -32                        | -6  | -90 |
| 22.4.               | 54    | -23                        | -3  | -28 | -24                        | 1   | -31 |
| 23.4.               | 93    | -36                        | -4  | -53 | -34                        | 0   | -59 |
| 24.4.               | 126   | -41                        | -7  | -78 | -40                        | -4  | -82 |
| 25.4.               | 71    | -26                        | -8  | -37 | -26                        | -3  | -42 |
| 26.4.               | 102   | -33                        | -7  | -62 | -34                        | -1  | -67 |
| 27.4.               | 22    | -15                        | 4   | -3  | -13                        | 7   | -16 |
| 28.4.               | 62    | -20                        | -1  | -41 | -21                        | 3   | -44 |
| 29.4.               | 16    | -8                         | -7  | -1  | -8                         | -5  | -3  |
| 30.4.               | 109   | -44                        | -11 | -54 | -42                        | -8  | -59 |
| 1.5.                | 66    | -26                        | -11 | -29 | -26                        | -9  | -35 |
| 2.5.                | 110   | -41                        | -9  | -60 | -40                        | -7  | -63 |
| 3.5.                | 123   | -59                        | -9  | -55 | -58                        | -7  | -58 |
| 4.5.                | 82    | -52                        | -6  | -24 | -53                        | -1  | -28 |
| 5.5.                | 14    | -18                        | -3  | 7   | -21                        | 0   | 7   |
| 6.5.                | 76    | -41                        | -9  | -26 | -40                        | -7  | -29 |
| 7.5.                | 57    | -23                        | -3  | -31 | -24                        | -1  | -32 |
| 8.5.                | 117   | -41                        | -0  | -76 | -40                        | 1   | -78 |
| 9.5.                | 127   | -44                        | -10 | -73 | -42                        | -7  | -78 |
| 10.5.               | 94    | -38                        | -9  | -47 | -37                        | -9  | -48 |
| 11.5.               | 25    | -20                        | -4  | -1  | -21                        | -1  | -3  |
| 12.5.               | 102   | -82                        | -7  | -13 | -85                        | -6  | -11 |
| 13.5.               | 70    | -33                        | -2  | -35 | -32                        | -2  | -36 |
| 14.5.               | 124   | -33                        | -5  | -86 | -32                        | -5  | -87 |
| 15.5.               | 28    | -38                        | 3   | 7   | -40                        | 3   | 9   |
| 16.5.               | 46    | -36                        | 3   | -13 | -40                        | 3   | -9  |
| 17.5.               | 38    | -26                        | 1   | -13 | -26                        | 3   | -15 |
| 18.5.               | 87    | -44                        | -4  | -39 | -45                        | -3  | -39 |
| 19.5.               | 147   | -69                        | -12 | -66 | -71                        | -11 | -65 |
| 20.5.               | 133   | -54                        | -21 | -58 | -56                        | -19 | -58 |
| Keskiarvot<br>Means | 77    | -34                        | -7  | -36 | -34                        | -4  | -39 |

Maanpinnan energiatase jaksolla 16.4.–20.5.1973. Keskimääräinen vuorokausijakauma ( $W \cdot m^{-2}$ ).

*Energy balance of the soil surface during period 16.4.–20.5.1973. Average daily distribution ( $W \cdot m^{-2}$ ).*

| Klo<br>Time | $R_n$ | Lysimetri 2<br>Lysimeter 2 |     |      | Lysimetri 4<br>Lysimeter 4 |     |      |
|-------------|-------|----------------------------|-----|------|----------------------------|-----|------|
|             |       | LE                         | G   | C    | LE                         | G   | C    |
| 0 – 2       | – 14  | 3                          | – 4 | 15   | 0                          | – 2 | 16   |
| 2 – 4       | – 13  | 3                          | – 1 | 11   | 0                          | 1   | 12   |
| 4 – 6       | 11    | –13                        | 1   | 1    | –12                        | 5   | – 4  |
| 6 – 8       | 89    | –42                        | 1   | – 48 | –43                        | 5   | – 51 |
| 8 – 10      | 184   | –81                        | 0   | –103 | –73                        | 1   | –112 |
| 10 – 12     | 235   | –81                        | – 7 | –147 | –76                        | – 3 | –156 |
| 12 – 14     | 246   | –94                        | –11 | –141 | –82                        | –10 | –154 |
| 14 – 16     | 184   | –74                        | –14 | – 96 | –67                        | –12 | – 30 |
| 16 – 18     | 78    | –39                        | –15 | – 24 | –36                        | –12 | – 30 |
| 18 – 20     | – 2   | –16                        | –12 | – 24 | –36                        | – 9 | – 30 |
| 20 – 22     | – 16  | – 6                        | – 9 | 31   | – 6                        | – 6 | 28   |
| 22 – 24     | – 15  | 6                          | – 7 | 16   | 3                          | – 4 | 16   |

Maanpinnan energiatase jaksolla 7.6.–26.6.1973. Vuorokausiarvot ( $W \cdot m^{-2}$ ).  
*Energy balance of the soil surface during period 7.6.–26.6.1973. Daily values ( $W \cdot m^{-2}$ ).*

| Pvm<br>Date                | $R_n$ | Lysimetri 1<br><i>Lysimeter 1</i> |     |     | Lysimetri 4<br><i>Lysimeter 4</i> |     |     |
|----------------------------|-------|-----------------------------------|-----|-----|-----------------------------------|-----|-----|
|                            |       | LE                                | G   | C   | LE                                | G   | C   |
| 7.6.                       | 141   | -112                              | -9  | -20 | -64                               | -8  | -69 |
| 8.6.                       | 148   | -112                              | -12 | -24 | -69                               | -11 | -68 |
| 9.6.                       | 141   | -87                               | -10 | -44 | -53                               | -10 | -78 |
| 10.6.                      | 124   | -122                              | -11 | 9   | -109                              | -9  | -6  |
| 11.6.                      | 75    | -87                               | -5  | 17  | -72                               | -4  | 1   |
| 12.6.                      | 62    | -82                               | 9   | 11  | -69                               | 4   | 3   |
| 13.6.                      | 101   | -82                               | -6  | -13 | -61                               | -4  | -36 |
| 14.6.                      | 109   | -82                               | -5  | -22 | -42                               | -5  | -62 |
| 15.6.                      | 123   | -94                               | -1  | -28 | -53                               | -3  | -67 |
| 16.6.                      | 103   | -77                               | -6  | -20 | -48                               | -6  | -49 |
| 17.6.                      | 148   | -112                              | -8  | -28 | -61                               | -9  | -78 |
| 18.6.                      | 148   | -102                              | -6  | -40 | -59                               | -6  | -83 |
| 19.6.                      | 131   | -92                               | -4  | -35 | -53                               | -6  | -72 |
| 20.6.                      | 124   | -100                              | -7  | -17 | -59                               | -7  | -58 |
| 21.6.                      | 135   | -104                              | -6  | -25 | -61                               | -7  | -67 |
| 22.6.                      | 125   | -110                              | -15 | 0   | -69                               | -6  | -50 |
| 23.6.                      | 96    | -70                               | -12 | -14 | -53                               | -10 | -33 |
| 24.6.                      | 97    | -77                               | -12 | -8  | -72                               | -10 | -15 |
| 25.6.                      | 147   | -167                              | -15 | 35  | -120                              | -13 | -14 |
| 26.6.                      | 150   | -139                              | -12 | 1   | -85                               | -13 | -52 |
| Keskiarvot<br><i>Means</i> | 121   | -100                              | -8  | -13 | -67                               | -7  | -47 |

Maanpinnan energiatase jaksolla 7.6.–26.6.1973. Keskimääräinen vuorokausijakauma ( $W \cdot m^{-2}$ ).

*Energy balance of the soil surface during period 7.6. -26.6.1973. Average daily distribution ( $W \cdot m^{-2}$ ).*

| Klo<br>Time | $R_n$ | Lysimetri 2<br><i>Lysimeter 2</i> |     |      | Lysimetri 4<br><i>Lysimeter 4</i> |     |      |
|-------------|-------|-----------------------------------|-----|------|-----------------------------------|-----|------|
|             |       | LE                                | G   | C    | LE                                | G   | C    |
| 0 – 2       | – 26  | – 3                               | – 1 | 30   | 3                                 | 0   | 23   |
| 2 – 4       | – 19  | – 6                               | 2   | 23   | – 3                               | 5   | 17   |
| 4 – 6       | 34    | – 32                              | 7   | – 9  | – 23                              | 6   | – 17 |
| 6 – 8       | 146   | –178                              | – 1 | –103 | –136                              | 2   | – 76 |
| 8 – 10      | 282   | –178                              | – 1 | –103 | –136                              | 2   | –148 |
| 10 – 12     | 372   | –239                              | – 9 | –124 | –174                              | –11 | –187 |
| 12 – 14     | 336   | –216                              | –16 | –104 | –140                              | –17 | –179 |
| 14 – 16     | 236   | –184                              | –22 | – 30 | –115                              | –23 | – 98 |
| 16 – 18     | 122   | –134                              | –21 | 33   | – 78                              | –20 | – 24 |
| 18 – 20     | 23    | – 80                              | –20 | 77   | – 40                              | –16 | 33   |
| 20 – 22     | – 26  | – 32                              | –16 | 74   | – 14                              | –10 | 50   |
| 22 – 24     | – 28  | – 6                               | – 8 | 42   | 3                                 | – 5 | 30   |

Maanpinnan energiatase jaksolla 27.6.–31.7.1973. Vuorokausiarvot ( $W \cdot m^{-2}$ ).  
*Energy balance of the soil surface during period 27.6.–31.7.1973. Daily values ( $W \cdot m^{-2}$ ).*

| Pvm<br>Date              | $R_n$ | Lysimetri 1<br><i>Lysimeter 1</i> |     |     | Lysimetri 2<br><i>Lysimeter 2</i> |     |     | Lysimetri 4<br><i>Lysimeter 4</i> |     |     |
|--------------------------|-------|-----------------------------------|-----|-----|-----------------------------------|-----|-----|-----------------------------------|-----|-----|
|                          |       | LE                                | G   | C   | LE                                | G   | C   | LE                                | G   | C   |
| 27.6.                    | 115   | -104                              | -11 | 0   | -116                              | -8  | 9   | -65                               | -9  | -41 |
| 28.6.                    | 85    | -62                               | -10 | -13 | -67                               | -15 | -3  | 34                                | -8  | -43 |
| 29.6.                    | 60    | -47                               | -9  | -4  | -48                               | -10 | -2  | 39                                | -2  | -19 |
| 30.6.                    | 108   | -94                               | -9  | -5  | -100                              | -13 | 5   | -52                               | -7  | -49 |
| 1.7.                     | 151   | -120                              | -8  | -23 | -126                              | -14 | -11 | -67                               | -10 | -74 |
| 2.7.                     | 151   | -119                              | -9  | -11 | -105                              | -16 | -18 | -59                               | -7  | -73 |
| 3.7.                     | 138   | -87                               | -9  | -42 | -82                               | -10 | -47 | -49                               | -5  | -84 |
| 4.7.                     | 138   | -100                              | -11 | -27 | -100                              | -11 | -27 | -59                               | -10 | -69 |
| 5.7.                     | 119   | -102                              | -11 | -6  | -102                              | -12 | -5  | -62                               | -9  | -52 |
| 6.7.                     | 123   | -92                               | -11 | -20 | -97                               | -16 | -10 | -59                               | -11 | -53 |
| 7.7.                     | 117   | -80                               | -10 | -27 | -89                               | -12 | -16 | -49                               | -9  | -59 |
| 8.7.                     | 141   | -80                               | -7  | -54 | -89                               | -7  | -45 | -49                               | -8  | -84 |
| 9.7.                     | 135   | -65                               | -6  | -64 | -73                               | -5  | -57 | -41                               | -6  | -88 |
| 10.7.                    | 131   | -60                               | -5  | -66 | -65                               | -3  | -63 | -41                               | -5  | -85 |
| 11.7.                    | 94    | -57                               | -3  | -34 | -59                               | -6  | -29 | -44                               | -2  | -48 |
| 12.7.                    | 112   | -60                               | -5  | -47 | -65                               | -4  | -43 | -44                               | -5  | -63 |
| 13.7.                    | 97    | -55                               | -6  | -36 | -59                               | -6  | -32 | -44                               | -2  | -51 |
| 14.7.                    | 84    | -40                               | -6  | -38 | -43                               | -5  | -36 | -31                               | -6  | -47 |
| 15.7.                    | 120   | -67                               | -6  | -47 | -73                               | -7  | -40 | -57                               | -8  | -55 |
| 16.7.                    | 115   | -65                               | -6  | -44 | -70                               | -6  | -39 | -52                               | -7  | -56 |
| 17.7.                    | 118   | -70                               | -8  | -40 | -75                               | -7  | -36 | -57                               | -10 | -51 |
| 18.7.                    | 105   | -80                               | -9  | -16 | -89                               | -5  | -11 | -83                               | -8  | -14 |
| 19.7.                    | 57    | -92                               | -7  | 42  | -83                               | -4  | 30  | -80                               | -4  | 27  |
| 20.7.                    | 30    | -72                               | -2  | 44  | -81                               | 0   | 51  | -75                               | 0   | 45  |
| 21.7.                    | 87    | -65                               | -5  | -17 | -70                               | -5  | -12 | -65                               | -6  | -16 |
| 22.7.                    | 35    | -37                               | -3  | 5   | -40                               | -3  | 8   | -39                               | -4  | 8   |
| 23.7.                    | 75    | -65                               | -1  | -9  | -70                               | -1  | -4  | -67                               | -2  | -6  |
| 24.7.                    | 85    | -55                               | -3  | -27 | -54                               | -2  | -29 | -49                               | -4  | -32 |
| 25.7.                    | 85    | -57                               | -3  | -25 | -59                               | -2  | -24 | -54                               | -3  | -28 |
| 26.7.                    | 85    | -50                               | -3  | -32 | -51                               | -5  | -29 | -44                               | -7  | -34 |
| 27.7.                    | 103   | -87                               | -4  | -12 | -89                               | -5  | -9  | -80                               | -7  | -16 |
| 28.7.                    | 98    | -57                               | -1  | -40 | -59                               | -1  | -38 | -52                               | -3  | -43 |
| 29.7.                    | 93    | -60                               | 1   | -34 | -62                               | 1   | -32 | -54                               | 0   | -39 |
| 30.7.                    | 99    | -57                               | -6  | -36 | -59                               | -2  | -38 | -52                               | -5  | -42 |
| 31.7.                    | 81    | -47                               | -14 | -20 | -51                               | -6  | -24 | -47                               | -11 | -23 |
| Keski-<br>arvot<br>Means | 102   | -72                               | -6  | -24 | -75                               | -7  | -20 | -54                               | -6  | -42 |

Maanpinnan energiatase jaksolla 27.6.–31.7.1973. Keskimääräinen vuorokausijakauma ( $W \cdot m^{-2}$ ).

*Energy balance of the soil surface during period 27.6.–31.7.1973. Average daily distribution ( $W \cdot m^{-2}$ ).*

| Klo<br>Time | $R_n$ | Lysimetri 1<br>Lysimeter 1 |      |       | Lysimetri 2<br>Lysimeter 2 |      |       | Lysimetri 4<br>Lysimeter 4 |      |       |
|-------------|-------|----------------------------|------|-------|----------------------------|------|-------|----------------------------|------|-------|
|             |       | LE                         | G    | C     | LE                         | G    | C     | LE                         | G    | C     |
| 0 – 2       | - 24  | - 9                        | 1    | 32    | - 7                        | 0    | 27    | - 6                        | 2    | 28    |
| 2 – 4       | - 20  | - 6                        | 3    | 23    | - 7                        | 3    | 24    | - 6                        | 6    | 20    |
| 4 – 6       | 27    | 27                         | - 4  | - 4   | - 29                       | 5    | - 33  | - 25                       | 8    | - 10  |
| 6 – 8       | 116   | - 66                       | 2    | - 52  | - 69                       | 1    | - 48  | - 55                       | 6    | - 67  |
| 8 – 10      | 236   | 116                        | 2    | - 118 | - 124                      | - 1  | - 111 | - 92                       | 0    | - 144 |
| 10 – 12     | 310   | - 164                      | 7    | - 139 | - 174                      | - 6  | - 130 | - 126                      | - 8  | - 176 |
| 12 – 14     | 314   | - 157                      | 13   | - 144 | - 164                      | - 13 | - 137 | - 116                      | - 15 | - 183 |
| 14 – 16     | 222   | - 131                      | - 17 | - 74  | - 138                      | - 15 | - 69  | - 95                       | - 22 | - 105 |
| 16 – 18     | 96    | - 89                       | - 18 | 11    | - 95                       | - 16 | 15    | - 64                       | - 21 | - 11  |
| 18 – 20     | 8     | - 54                       | - 13 | 59    | - 56                       | - 17 | 65    | - 40                       | - 14 | 46    |
| 20 – 22     | - 27  | - 21                       | - 9  | 57    | - 23                       | - 9  | 59    | - 18                       | - 9  | 54    |
| 22 – 24     | - 27  | - 9                        | - 5  | 41    | - 10                       | - 5  | 42    | - 6                        | - 3  | 36    |



Maanpinnan energiatase jaksolla 14.5.–4.6.1974. Vuorokausiarvot ( $W \cdot m^{-2}$ ).  
*Energy balance of the soil surface during period 14.5.–4.6.1974. Daily values ( $W \cdot m^{-2}$ ).*

| Pvm<br>Date         | $R_n$ | Lysimetri 1<br>Lysimeter 1 |     |     | Lysimetri 4<br>Lysimeter 4 |     |      |
|---------------------|-------|----------------------------|-----|-----|----------------------------|-----|------|
|                     |       | LE                         | G   | C   | LE                         | G   | C    |
| 14.5.               | 122   | -62                        | -4  | -56 | -39                        | -1  | -82  |
| 15.5.               | 39    | -32                        | 0   | -7  | -22                        | 1   | -18  |
| 16.5.               | 85    | -35                        | -18 | -32 | -25                        | -11 | -49  |
| 17.5.               | 138   | -92                        | -22 | -24 | -64                        | -13 | -61  |
| 18.5.               | 92    | -55                        | -17 | -20 | -34                        | -10 | -48  |
| 19.5.               | 129   | -50                        | -5  | -74 | -30                        | -4  | -95  |
| 20.5.               | 139   | -55                        | 0   | -84 | -32                        | 0   | -107 |
| 21.5.               | 124   | -50                        | -4  | -70 | -30                        | -1  | -95  |
| 22.5.               | 121   | -50                        | -1  | -70 | -27                        | -1  | -93  |
| 23.5.               | 125   | -47                        | 2   | -80 | -28                        | 0   | -97  |
| 24.5.               | 36    | -30                        | 3   | -9  | -23                        | 2   | -15  |
| 25.5.               | 75    | -42                        | -2  | -31 | -25                        | -2  | -48  |
| 26.5.               | 53    | -37                        | -4  | -12 | -34                        | -2  | -17  |
| 27.5.               | 104   | -70                        | 1   | -35 | -60                        | 2   | -46  |
| 28.5.               | 125   | -57                        | 1   | -69 | -37                        | 2   | -90  |
| 29.5.               | 60    | -47                        | -5  | -8  | -44                        | -2  | -14  |
| 30.5.               | 27    | -32                        | -8  | 13  | -30                        | -6  | 9    |
| 31.5.               | 68    | -62                        | -10 | 4   | -57                        | -8  | -3   |
| 1.6.                | 115   | -67                        | -11 | -37 | -55                        | -9  | -51  |
| 2.6.                | 133   | -60                        | -5  | -68 | -44                        | -5  | -84  |
| 3.6.                | 20    | -16                        | 5   | -9  | -11                        | 5   | -14  |
| 4.6.                | 80    | -42                        | -9  | -29 | -32                        | -6  | -42  |
| Keskiarvot<br>Means | 87    | -50                        | -5  | -32 | -36                        | -3  | -48  |

Maanpinnan energiatase jaksolla 14.5.–4.6.1974. Keskimääräinen vuorokausijakauma ( $W \cdot m^{-2}$ ).

*Energy balance of the soil surface during period 14.5.–4.6.1974. Average daily distribution ( $W \cdot m^{-2}$ ).*

| Klo<br>Time | $R_n$ | Lysimetri 1<br>Lysimeter 1 |     |      | Lysimetri 4<br>Lysimeter 4 |     |      |
|-------------|-------|----------------------------|-----|------|----------------------------|-----|------|
|             |       | LE                         | G   | C    | LE                         | G   | C    |
| 0 – 2       | - 46  | 6                          | 9   | 31   | 9                          | 5   | 32   |
| 2 – 4       | - 39  | 3                          | 12  | 24   | 3                          | 8   | 28   |
| 4 – 6       | 17    | - 21                       | 13  | - 9  | - 19                       | 9   | - 7  |
| 6 – 8       | 124   | - 58                       | 6   | - 60 | - 48                       | 8   | - 84 |
| 8 – 10      | 261   | -109                       | - 6 | -146 | - 80                       | - 1 | -180 |
| 10 – 12     | 285   | -119                       | -18 | -148 | - 83                       | - 7 | 195  |
| 12 – 14     | 289   | -119                       | -24 | -146 | - 80                       | -15 | 194  |
| 14 – 16     | 215   | - 94                       | -21 | -100 | - 64                       | -17 | -134 |
| 16 – 18     | 94    | - 58                       | -18 | - 18 | - 40                       | -15 | - 39 |
| 18 – 20     | 1     | 30                         | -12 | 41   | - 21                       | -12 | 32   |
| 20 – 22     | - 45  | 6                          | 5   | 56   | - 6                        | - 6 | 57   |
| 22 – 24     | - 47  | 6                          | 2   | 43   | 6                          | 0   | 41   |

Maanpinnan energiatase jaksolla 13.8.–26.8.1974. Vuorokausiarvot ( $W \cdot m^{-2}$ ).  
*Energy balance of the soil surface during period 13.8.–26.8.1974. Daily values ( $W \cdot m^{-2}$ ).*

| Pvm<br>Date              | $R_n$ | Lysimetri 1<br><i>Lysimeter 1</i> |    |     | Lysimetri 2<br><i>Lysimeter 2</i> |    |     | Lysimetri 4<br><i>Lysimeter 4</i> |    |     |
|--------------------------|-------|-----------------------------------|----|-----|-----------------------------------|----|-----|-----------------------------------|----|-----|
|                          |       | LE                                | G  | C   | LE                                | G  | C   | LE                                | G  | C   |
| 13.8.                    | 96    | -74                               | 7  | -15 | -74                               | 8  | 14  | -70                               | 6  | 14  |
| 14.8.                    | 59    | -62                               | 2  | 5   | -62                               | 0  | 3   | -59                               | 2  | 2   |
| 15.8.                    | 71    | -82                               | 3  | 14  | -85                               | 2  | 16  | -78                               | 4  | 11  |
| 16.8.                    | 93    | -77                               | 6  | -10 | -74                               | 5  | 14  | -70                               | 5  | 18  |
| 17.8.                    | 69    | -65                               | -5 | 1   | -62                               | -7 | 0   | -59                               | 5  | 5   |
| 18.8.                    | 118   | -91                               | 4  | -23 | -91                               | -1 | -26 | -86                               | 3  | -29 |
| 19.8.                    | 89    | -103                              | 1  | 13  | -103                              | 3  | -11 | -94                               | 0  | 5   |
| 20.8.                    | 95    | -89                               | -2 | -4  | -85                               | -3 | -7  | -83                               | 1  | -13 |
| 21.8.                    | 87    | -77                               | -3 | -7  | -74                               | -3 | -10 | -73                               | 3  | -17 |
| 22.8.                    | 81    | -60                               | -1 | -20 | -60                               | -2 | -19 | -57                               | 2  | -26 |
| 23.8.                    | 18    | -40                               | 1  | 21  | -37                               | 1  | 18  | -32                               | 0  | 14  |
| 24.8.                    | 91    | -80                               | 5  | 6   | -77                               | 5  | 9   | -73                               | -2 | -16 |
| 25.8.                    | 63    | -62                               | 5  | 4   | -60                               | 5  | 2   | -54                               | -5 | -4  |
| 26.8.                    | 93    | -62                               | 5  | 26  | -60                               | 5  | 28  | -54                               | -5 | -34 |
| Keski-<br>arvot<br>Means | 80    | -73                               | -3 | -4  | -72                               | -3 | -5  | -67                               | -2 | -11 |

Maanpinnan energiatase jaksolla 13.8.–26.8.1974. Keskimääräinen vuorokausijakauma ( $W \cdot m^{-2}$ ).

*Energy balance of the soil surface during period 13.8.–26.8.1974. Average daily distribution ( $W \cdot m^{-2}$ ).*

| Klo<br>Time | $R_n$ | Lysimetri 1<br>Lysimeter 1 |     |     | Lysimetri 2<br>Lysimeter 2 |     |     | Lysimetri 4<br>Lysimeter 4 |     |     |
|-------------|-------|----------------------------|-----|-----|----------------------------|-----|-----|----------------------------|-----|-----|
|             |       | LE                         | G   | C   | LE                         | G   | C   | LE                         | G   | C   |
| 0 – 2       | - 24  | 3                          | 7   | 14  | 3                          | 6   | 15  | 3                          | 3   | 18  |
| 2 – 4       | - 23  | - 3                        | 9   | 17  | - 3                        | 10  | 16  | 0                          | 6   | 17  |
| 4 – 6       | - 4   | - 10                       | 11  | 3   | - 14                       | 13  | 5   | - 10                       | 9   | 5   |
| 6 – 8       | 73    | - 52                       | 10  | -31 | - 57                       | 14  | -30 | - 54                       | 9   | -28 |
| 8 – 10      | 181   | -128                       | 3   | -56 | -132                       | 7   | -56 | -122                       | 5   | -64 |
| 10 – 12     | 264   | -180                       | - 4 | -80 | -180                       | - 2 | -82 | -167                       | - 2 | -95 |
| 12 – 14     | 274   | -193                       | -14 | -67 | -190                       | -10 | -74 | -174                       | - 8 | -92 |
| 14 – 16     | 183   | -150                       | -18 | -15 | -146                       | -19 | -18 | -136                       | -12 | -35 |
| 16 – 18     | 78    | - 95                       | -18 | 35  | - 89                       | -20 | 31  | - 81                       | -14 | 17  |
| 18 – 20     | - 4   | - 46                       | -14 | 64  | - 41                       | -17 | 62  | - 40                       | -12 | 56  |
| 20 – 22     | - 27  | - 10                       | - 7 | 44  | - 7                        | -10 | 44  | - 10                       | - 8 | 45  |
| 22 – 24     | - 28  | 3                          | - 2 | 27  | 3                          | - 4 | 29  | 3                          | - 5 | 30  |

Maanpinnan energiatase jaksolla 1.9.–30.9.1975. Vuorokausiarvot ( $W \cdot m^{-2}$ ).  
 Energy balance of the soil surface during period 1.9.–30.9.1975. Daily values ( $W \cdot m^{-2}$ ).

| Pvm<br>Date          | $R_n$ | Lysimetri 1<br>Lysimeter 1 |    |     | Lysimetri 4<br>Lysimeter 4 |    |     |
|----------------------|-------|----------------------------|----|-----|----------------------------|----|-----|
|                      |       | LE                         | G  | C   | LE                         | G  | C   |
| 1.9.                 | 60    | -34                        | -1 | -25 | -28                        | -1 | -31 |
| 2.9.                 | 61    | -55                        | -5 | -1  | -43                        | -5 | -13 |
| 3.9.                 | 82    | -51                        | 6  | -37 | -45                        | 4  | -41 |
| 4.9.                 | 21    | -43                        | 1  | 21  | -43                        | 0  | 22  |
| 5.9.                 | 63    | -57                        | 5  | -11 | -59                        | 3  | -7  |
| 6.9.                 | 35    | -69                        | 3  | 31  | -68                        | 2  | 31  |
| 7.9.                 | 2     | -25                        | 16 | 7   | -22                        | 10 | 10  |
| 8.9.                 | 57    | -71                        | 19 | -5  | -63                        | 8  | -2  |
| 9.9.                 | 55    | -53                        | 7  | -9  | -51                        | 6  | -10 |
| 10.9.                | 59    | -53                        | -3 | -3  | -57                        | -3 | 1   |
| 11.9.                | 28    | -23                        | -4 | -1  | -25                        | -4 | 1   |
| 12.9.                | 54    | -50                        | -2 | -2  | -54                        | -2 | 2   |
| 13.9.                | 19    | -46                        | 2  | 25  | -46                        | 1  | 26  |
| 14.9.                | 32    | -43                        | 3  | 8   | -46                        | 1  | 13  |
| 15.9.                | 29    | -41                        | 5  | 7   | -42                        | 2  | 11  |
| 16.9.                | 28    | -34                        | 3  | 3   | -37                        | 2  | 7   |
| 17.9.                | 41    | -42                        | 1  | 0   | -43                        | 1  | 1   |
| 18.9.                | 50    | -50                        | -4 | 4   | -55                        | -3 | 8   |
| 19.9.                | 35    | -48                        | 1  | 12  | -50                        | 0  | 15  |
| 20.9.                | 25    | -30                        | 11 | -6  | -30                        | 9  | -4  |
| 21.9.                | 28    | -37                        | 10 | -1  | -39                        | 8  | 3   |
| 22.9.                | 22    | -76                        | 9  | 45  | -76                        | 7  | 47  |
| 23.9.                | 0     | -34                        | 9  | 25  | -32                        | 7  | 25  |
| 24.9.                | 34    | -48                        | 1  | 13  | -51                        | 1  | 16  |
| 25.9.                | 3     | -30                        | 8  | 19  | -29                        | 6  | 20  |
| 26.9.                | 10    | -30                        | -3 | 23  | -32                        | -3 | 25  |
| 27.9.                | 14    | -73                        | 5  | 54  | -74                        | 3  | 57  |
| 28.9.                | 16    | -50                        | 7  | 27  | -46                        | 5  | 25  |
| 29.9.                | 44    | -78                        | 13 | 21  | -79                        | 9  | 26  |
| 30.9.                | 39    | -32                        | 12 | -19 | -35                        | 11 | -15 |
| Keskisarvot<br>Means | 35    | -47                        | 5  | 7   | -47                        | 3  | 9   |

Maanpinnan energiatase jaksolla 1.9.–30.9.1975. Keskimääräinen vuorokausijakauma ( $W, m^{-2}$ ).

*Energy balance of the soil surface during period 1.9.–30.9.1975. Average daily distribution ( $W, m^{-2}$ ).*

| Klo<br>Time | $R_n$ | Lysimetri 1<br>Lysimeter 1 |     |     | Lysimetri 4<br>Lysimeter 4 |     |     |
|-------------|-------|----------------------------|-----|-----|----------------------------|-----|-----|
|             |       | LE                         | G   | C   | LE                         | G   | C   |
| 0 – 2       | – 32  | – 15                       | 10  | 37  | – 12                       | 7   | 37  |
| 2 – 4       | – 35  | – 6                        | 12  | 29  | – 3                        | 8   | 30  |
| 4 – 6       | – 30  | – 9                        | 13  | 26  | – 6                        | 10  | 26  |
| 6 – 8       | 17    | – 31                       | 14  | 0   | – 30                       | 9   | 4   |
| 8 – 10      | 110   | – 84                       | 10  | –36 | – 90                       | 8   | –28 |
| 10 – 12     | 182   | –131                       | 4   | –55 | –140                       | 3   | –45 |
| 12 – 14     | 181   | –128                       | – 6 | –47 | –131                       | – 3 | –47 |
| 14 – 16     | 119   | –100                       | – 9 | –10 | –108                       | – 6 | – 5 |
| 16 – 18     | 12    | – 53                       | – 7 | 48  | – 54                       | – 6 | 48  |
| 18 – 20     | – 37  | – 19                       | – 1 | 57  | – 15                       | – 3 | 55  |
| 20 – 22     | – 38  | – 6                        | 5   | 39  | – 3                        | 1   | 40  |
| 22 – 24     | – 31  | – 15                       | 8   | 38  | – 12                       | 5   | 38  |

Maanpinnan energiatase jaksolla 1.10.–31.10.1975. Keskimääräinen vuorokausijakauma ( $W \cdot m^{-2}$ ).

*Energy balance of the soil surface during period 1.10.–31.10.1975. Average daily distribution ( $W \cdot m^{-2}$ ).*

| Klo<br>Time | $R_n$ | Lysimetri 1<br>Lysimeter 1 |    |     | Lysimetri 4<br>Lysimeter 4 |    |     |
|-------------|-------|----------------------------|----|-----|----------------------------|----|-----|
|             |       | LE                         | G  | C   | LE                         | G  | C   |
| 0 – 2       | -29   | - 3                        | 15 | 17  | - 3                        | 23 | 9   |
| 2 – 4       | -25   | - 6                        | 18 | 13  | - 3                        | 25 | 3   |
| 4 – 6       | -26   | -11                        | 18 | 19  | - 9                        | 25 | 10  |
| 6 – 8       | -16   | -14                        | 17 | 13  | -12                        | 25 | 3   |
| 8 – 10      | 23    | -28                        | 13 | - 8 | -36                        | 24 | -11 |
| 10 – 12     | 67    | -46                        | 12 | -33 | -54                        | 17 | -30 |
| 12 – 14     | 73    | -51                        | 3  | -25 | -58                        | 7  | -22 |
| 14 – 16     | 11    | -40                        | 1  | 28  | -39                        | 4  | 24  |
| 16 – 18     | -32   | -20                        | 3  | 49  | -18                        | 7  | 43  |
| 18 – 20     | -31   | - 9                        | 6  | 34  | -12                        | 10 | 33  |
| 20 – 22     | -30   | - 6                        | 12 | 24  | - 6                        | 15 | 21  |
| 22 – 24     | -29   | - 3                        | 14 | 18  | - 3                        | 21 | 11  |

Maanpinnan energiatase jaksolla 1.10.–30.10.1975. Vuorokausiarvot ( $W \cdot m^{-2}$ ).  
*Energy balance of the soil surface during period 1.10.–30.10.1975. Daily values ( $W \cdot m^{-2}$ ).*

| Pvm<br>Date                | $R_n$ | Lysimetri 1<br><i>Lysimeter 1</i> |    |    | Lysimetri 2<br><i>Lysimeter 2</i> |    |     |
|----------------------------|-------|-----------------------------------|----|----|-----------------------------------|----|-----|
|                            |       | LE                                | G  | C  | LE                                | G  | C   |
| 1.10.                      | 17    | -33                               | 4  | 12 | -32                               | 6  | 9   |
| 2.10.                      | 3     | -9                                | -2 | 8  | -11                               | 1  | 7   |
| 3.10.                      | 0     | -9                                | 0  | 9  | -13                               | 6  | 7   |
| 4.10.                      | -9    | -14                               | 18 | 5  | -13                               | 26 | -4  |
| 5.10.                      | 16    | -83                               | 17 | 50 | -75                               | 20 | 39  |
| 6.10.                      | 7     | -47                               | 8  | 32 | -44                               | 9  | 28  |
| 7.10.                      | -3    | -9                                | 13 | -1 | -13                               | 20 | -4  |
| 8.10.                      | 14    | -19                               | 12 | -7 | -30                               | 19 | -3  |
| 9.10.                      | -11   | -40                               | 17 | 34 | -36                               | 31 | 16  |
| 10.10.                     | -7    | -26                               | 27 | 6  | -26                               | 36 | -3  |
| 11.10.                     | 6     | -40                               | 26 | 8  | -19                               | 26 | -13 |
| 12.10.                     | -12   | -14                               | 12 | 14 | -15                               | 17 | 10  |
| 13.10.                     | 5     | -14                               | 10 | -1 | -15                               | 9  | 1   |
| 14.10.                     | 3     | -12                               | 11 | -2 | -13                               | 14 | -4  |
| 15.10.                     | -4    | -19                               | 7  | 16 | -19                               | 11 | 12  |
| 16.10.                     | 2     | -19                               | 4  | 13 | -19                               | 9  | 8   |
| 17.10.                     | -5    | -26                               | 5  | 26 | -26                               | 9  | 22  |
| 18.10.                     | -3    | -21                               | 13 | 11 | -24                               | 20 | 7   |
| 19.10.                     | -16   | -31                               | 21 | 26 | -26                               | 31 | 11  |
| 20.10.                     | -10   | -10                               | 15 | 5  | -17                               | 34 | -7  |
| 21.10.                     | -5    | -7                                | 19 | -7 | -11                               | 32 | -16 |
| 22.10.                     | -6    | -5                                | 17 | -6 | -6                                | 25 | -13 |
| 23.10.                     | 7     | -12                               | 6  | -1 | -13                               | 11 | -5  |
| 24.10.                     | 6     | -14                               | -3 | 1  | -15                               | 0  | 9   |
| 25.10.                     | -10   | -5                                | -1 | 16 | -4                                | 2  | 12  |
| 26.10.                     | -17   | -21                               | -2 | 40 | -19                               | 2  | 0   |
| 27.10.                     | -25   | -12                               | 3  | 34 | -13                               | 9  | 29  |
| 28.10.                     | -20   | -50                               | 14 | 56 | -47                               | 20 | 47  |
| 29.10.                     | -12   | -17                               | 12 | 17 | -18                               | 20 | 10  |
| 30.10.                     | -18   | -45                               | 13 | 50 | -43                               | 20 | 41  |
| Keskiarvot<br><i>Means</i> | -4    | -22                               | 11 | 15 | -22                               | 17 | 9   |





ACTA UNIVERSITATIS OULUENSIS  
SERIES C TECHNICA

1. KOKKO, KAUKO. The general hospital ward. (137 pp. + drawings 8 pp.) 1971
2. LEINONEN, TATU E. On the influence of torque in the bending behaviour of the slightly curved rotating shafts. (19 pp.) 1972
3. HARTIKAINEN, JORMA, On the distribution of pile loads in a friction pile foundation. (36 pp.) 1972
4. SAARELA, ASKO, Talvitiivistyksen vaikutuksesta tien alusrakenteen ja sitomat-  
tomien päällysrakennekerrosten tiiviyksiin. (146 pp.) 1974
5. KARJALAINEN, L. PENTTI, Fatigue hardening and fatigue life of some f.c.c.  
metals and alloys under alternating bending. (90 pp. + figures 8 pp.) 1974
6. RIEPPO, RISTO, Calculated efficiency values for NaI detectors and some appli-  
cations. (25 pp. + 52 pp.) 1974
7. MOISIO, TAPANI, Solidification microstructure and hot cracking in austenitic  
stainless steel weld metal. (67 pp.) 1974
8. OLLILA, A. and URONEN, P., Lumped parameter approximation for the  
transfer function of a heat exchanger. (20 pp.) 1975
9. LANTTO, VILHO, Empirical studies of penetration characteristics of fast elec-  
trons in metals. (13 + 56 pp.) 1975
10. MYLLYLÄ, RISTO, On the measurement technique of positron lifetimes. (72  
pp. + 2 appendices) 1976
11. KIUKAANNIEMI, EINO, A systematic approach to the development task of  
peat fuelled heating plants. (79 pp. + 3 appendices) 1977
12. SALA, ILMARI and LEINONEN, TATU E., On the influence of the visco-  
elasticity upon the loading capacity of a wooden column. (24 pp.) 1978
13. TUPAMÄKI, P. A., The problem of plates of variable thickness. (115 pp.) 1978
14. LARJATIE, VEIKKO, Kyberneettiset mallit taidekasvatuksessa. (18 pp. +  
appendix) 1978
15. KARRAS, M. and MYLLYLÄ, R., On resolution and intensity in positron life-  
time spectroscopy. (13 pp.) 1978
16. TUPAMÄKI, P. A. (Ed.), Wood, ferrocement and plastics in shells and spatial  
structures. Proceedings of the IASS symposium held June 9–14, 1980, at the  
University of Oulu, Oulu, Finland. (590 pp.) 1980
17. JUUSO, ESKO K., Computer analysis of temperature distribution and energy  
consumption in a submerged arc furnace used in production of high carbon ferro-  
chromium. (42 pp.) 1980
18. KJILPELÄINEN, MIKKO, Nonlinear structural analysis of reinforced concrete  
beam grids. (139 pp.) 1981

Distributed by  
OULU UNIVERSITY LIBRARY  
90100 Oulu 10 Finland

ISBN 951-42-1267-X  
ISSN 0355-3213