

PERTTI SEUNA

**KASTELUUN VAIKUTTAVISTA
HYDROMETEOROLOGISISTA TEKIJÖISTÄ**

Summary

On the Hydrometeorological Factors Affecting Irrigation.

ISBN 951-46-3289-3
ISSN 0355-0982
Helsinki 1978. Valtion painatuskeskus

SISÄLLYS

1.	Johdanto	5
2.	Sadanta	6
2.1	Kokonaissadanta	6
2.2	Tehoisa sadanta	6
2.3	Kuivakaudet	8
3.	Haihdunta	11
3.1	Potentiaalinen evapotranspiraatio	11
3.1.1	Potentiaalisen evapotranspiraation ja sadannan vuorosuhde	14
3.2	Todellinen haihdunta	15
3.2.1	Maan kosteuden vaikutus todelliseen haihduntaan	15
3.2.2	Kasvipeitteen vaikutus todelliseen haihduntaan	18
3.2.3	Maan lämpövaraston muutosten vaikutus todelliseen haihduntaan	21
4.	Kastelutarve	23
4.1	Minimivedentarpeen vajuus	23
4.2	Optimisadannan vajuus	24
4.3	Sadannan vajuus potentiaalisen evapotranspiraation perusteella	25
4.4	Kastelutarve maan kosteuden ja veden sitoutuneisuuden perusteella	29
5.	Valunta	32
5.1	Kesäaikaisen valunnan toistuvuus	32
5.2	Kesäkuun valunta	33
6.	Sadetustutkimukset Vihdissä	36
6.1	Koejärjestelyt	36
6.2	Koalueen maaperä	37
6.2.1	Maan rakenne	37
6.2.2	Maan vedensitomiskyky	38
6.2.3	Aktiivisen maakerroksen paksuus	38
6.2.4	Maaperän ravinnetila	39
6.2.5	Lannoitus	40
6.3	Havaintotulokset	40
6.3.1	Ilman lämpötila, sadanta ja sadetus	40
6.3.2	Astiahaihdunta ja PET	41
6.3.3	Maan kosteus	41
6.3.4	Pohjaveden syvyys	42
6.3.5	Roudan syvyys	42
6.3.6	Maan lämpötila	43
6.3.7	Sadetusveden lämpötila	45
6.4	Sadetushäviöt	45
6.4.1	Aikaisemmat tutkimukset	45
6.4.2	Vihdin tutkimukset	47
6.5	Maankosteusmallit	49
6.5.1	Lineaariset mallit	49
6.5.2	Epälineaariset mallit	51
6.6	Sadetuksen vaikutus sadon määrään	53

6.61	Vehnä	53
6.62	Heinä	57
6.7	Sadetuksen vaikutus sadon laatuun	58
6.71	Vehnä	58
6.711	Kosteus ja tuleentuminen	58
6.712	Puhtaus	58
6.713	Itävyys	59
6.714	Hehtolitraino	59
6.715	Jyväkoko	60
6.72	Heinä	60
7.	Tulosten edustavuus	61
7.1	Sadannan vajauksen PET-P edustavuus	61
7.2	Vihdin sadetuskokeiden 1967-1973 edustavuus	63
8.	Lopputiivistelmä	64
	Päätösmaininnat	67
	Summary	68
	Käytetyt merkinnät	71
	Kirjallisuutta	73
	Liitteet:	
1.-2.	Kuivakausien pituus Suomessa	
3.	Eräitä yleisimpiä potentiaalisen haihdunnan laskentayhtälöitä	
4.	Vihdin sadetuskokeiden havainnot 1967-1973	
5.	Havaitun ja lasketun maankosteuden erotusten neliösummat Vihdissä 1967-1973	

KASTELUUN VAIKUTTAVISTA HYDROMETEOROLOGISISTA TEKIJÖISTÄ

Pertti Seuna

SEUNA, P. 1977. On the hydrometeorological factors affecting irrigation. Publications of the Water Research Institute, National Board of Waters, No.24.

Although irrigation in Finland has a supplementary nature, crops suffer almost every summer from rainfall deficit. The deficit is greatest in June in the southern and western parts of the country. The demand for irrigation water is estimated from the difference between potential evapotranspiration and precipitation. Runoff available for irrigation can be calculated from precipitation, forest percentage of the basin, and air temperature. The losses in connection with irrigation are considerable; the interception of wheat was on average 27 % and that of hay 28 % of the applied amount. Irrigation increased the yield of spring wheat by 1 030 kg/ha and that of hay by 1 750 kg/ha.

Index words: Irrigation, summer precipitation, evapotranspiration, rainfall deficit, runoff, dry spell, soil moisture, soil heat storage, increase in yield.

1. JOHDANTO

Suurella osalla maapalloa kastelu on välttämättömän toimenpide, jotta viljelykasveista ylimalkaan saadaan kohtuullisia satoja. Kastelumenetelmät vaihtelevat ja yleisesti käytettyjä ovat sadetuksen lisäksi valutus- ja padotusmenetelmät, joista vakovalutus on yleisin koko maapallolla. Suomessa kastelu suoritetaan käytännöllisesti katsoen pelkästään sadettamalla.

Sadetus on 1960-luvun puoliväliin saakka ollut sängen vähän käytetty menetelmä viljelykasvien sadon parantamiseksi Suomessa. Sitä on käytetty vain kaikkein voimaperäisimmässä viljelyssä, kuten esim. puutarhaviljelyssä. Vasta 1960-luvun lopulla ovat sadetuslaitteet voimakkaasti lisääntyneet (Hooli 1971, Kara 1972). Tähän on useita-

kin syitä. Eräänä pontimena lienevät olleet muuttamat 1960-luvun lopun kuivat kesät viljanviljelyalueillamme. Samoihin aikoihin alkoivat koetuokset sadetuksen edullisuudesta tulla yleisesti tunnetuiksi. Myös viljelyn voimaperäisyys alkoi saavuttaa sellaisen tason, että kastelu tuli edullisimmaksi keinoksi pyrittäessä edelleen nostamaan satotasoa. Sadetuslaitteiden runsaus verrattain suppeilla alueilla viittaa siihen, että myös naapuriesimerkillä on ollut vaikutusta.

Tämän hetken kehitys näyttää siltä, että sadetuksen yleistyminen jatkuu voimakkaana. Vuonna 1972 on arvioitu sadetuslaitteiden kattaman peltoalan, siis teoreettisen kastelualan, olleen noin 50 000 ha (Kara 1973) ja vuonna 1974 noin

70 000 ha (Kara 1975). Sadetusalan lisäys on ollut viime vuosina noin 10 000 ha/a. Kehitys viittaa siihen, että sadetuslaitteiden kattama ala tulee ylittämään 100 000 hehtaarin rajan 1970-luvun loppuun mennessä. Todellinen sadetettu ala on tilastojen mukaan ollut 50-60 % teoreettisesta. Ero todellisen ja teoreettisen sadetusalan välillä johtuu sadetuslaitteiden melko alhaisesta käyttöasteesta. Tähän taas ovat syinä toisaalta hydro-meteorologisista tekijöistä määräytyvä todellinen kastelutarve, toisaalta tilakohtaiset työvoimayms. tekijät.

Oletettaessa 1 ha:n kasteluun vuodessa tarvittavan noin 700 m³ ja sadetuksen tapahtuvan 1 kk:n aikana, on kastelun vedentarve 100 000 ha:lle noin 27 m³/s tämän sadetuskauksen aikana. Koska kastelu ilmeisesti tulevaisuudessakin tulee keskittymään tärkeimmille viljanviljelysalueille, Etelä-, Lounais- ja Länsi-Suomeen, joiden vesivarat vedentarpeeseen verrattuna ovat pienimmät maassamme, muodostuu kasteluveden saanti näillä alueilla paikoitellen vaikeaksi ongelmaksi.

Tämän tutkimuksen tarkoituksena on selvittää eräitä kasteluveden tarpeeseen ja riittävyteen liittyviä taustatekijöitä, joilla on merkitystä kastelua alueellisesti suunniteltaessa. Lisäksi esitetään tuloksia sadetuksen vaikutuksesta vehnän ja heinäin satoiin Viidissä 1967-1973 suoritettujen sadetuskokeiden perusteella.

2. SADANTA

2.1 Kokonaissadanta

Kuvissa 1-4 on esitetty keskimääräinen korjaamaton kuukausisadanta touko-elokuussa Suomessa. Mitatut sadannat ovat noin 5 % todellista sadantaa pienempiä. Tämä johtuu eräistä sateenmittauksen yhteydessä syntyvistä virheistä, kuten sademittarin kostumisesta ja tuulen vaikutuksesta. Tässä yhteydessä käsitellään pelkästään korjaamattomia sadantoja, mikä on yleinen käytäntö Suomessa.

Kuvista 1-4 voidaan todeta, että sadanta erityisesti alkukesällä Suomessa on pieni. Lisäksi se on alueellisesti melko epätasaisesti jakautunut. Touko-heinäkuussa sataa lounais- ja länsiosissa maata selvästi vähemmän kuin maan keski- ja itäosissa. Yksittäisinä kesinä saattaa sadanta poiketa

keskimääräisestä huomattavastikin. Esimerkiksi Lounais-Suomessa Kiskon seudulla jää sadanta 40 vuoden havaintojen perusteella keskimäärin keran 20 vuodessa toukokuussa noin 23 %:iin, kesäkuussa 27 %:iin, heinäkuussa 28 %:iin ja elokuussa 27 %:iin keskimääräisestä kuukausisadannasta (Seuna 1973).

Myös paikalliset erot samana kesänä saattavat olla suuria. Kuukausisadannoissa on todettu useiden kymmenien millimetrien eroja parinkymmenen kilometrin etäisyydellä sijaitsevien paikkakuntien välillä tasaisillakin alueilla. Lyhytaikaisten kuten vuorokausisateiden osalta voivat erot olla suhteellisesti ottaen huomattavasti suurempiakin.

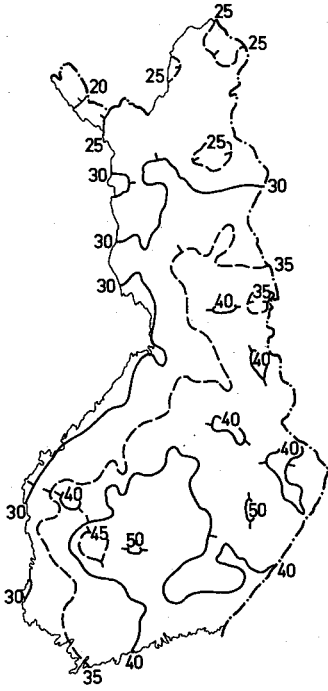
2.2 Tehoisa sadanta

Arvioitaessa sadannan vaikutusta viljelykasveihin pidetään usein vain tiettyä alarajaa suurempia sadantoja tehoisina. Neuvostoliitossa on esitetty raja-arvoksi 5 mm/d (Tsipris 1969). Tämä raja saattaa Suomen olosuhteissa ainakin alkukesällä olla liian korkea, sillä varsinkin kevätilvojen itämisvaiheessa melko pienilläkin sateilla on vaikutusta. Kasvun myöhemmissäkin vaiheissa on pienillä sateilla jäähdytysvaikutusta, millä saattaa korkeiden lämpötilojen vallitessa olla huomattavakin merkitys. Korhonen (1918) on esittänyt tehoisan sadannan rajaksi 2 mm siten, että alle 2 mm:n vuorokausisateet jätettäisiin kokonaan huomioon ottamatta ja kaikista vuorokausisadannoista vähennettäisiin 2 mm.

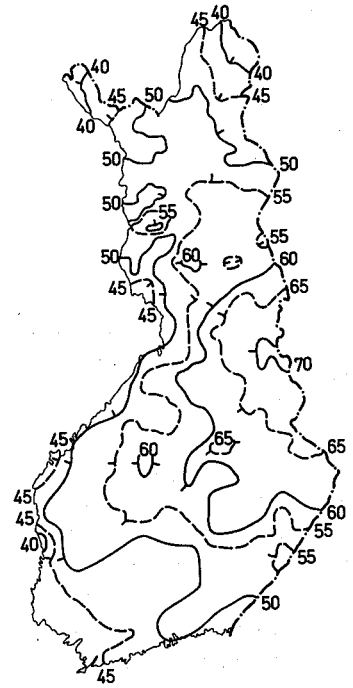
Toisaalta runsaiden sateiden aikana syntyy pintavaluntaa ja pohjavedeksi imeytymistä, jolloin myös tämä osa sadannasta on maan kosteuden ja kasvien kannalta tehotonta. Pintavalunnan alkaminen riippuu suuresti mm. maalajista, maaperän kosteussuhteista, sateen rankkuudesta ja maaston kaltevuudesta.

Taulukossa 1 on esitetty yli 5 mm/d suuruisen vuorokausisateiden kuukausisummat ja osuudet kokonaissadannasta Viidissä ja Ylistarossa keskimäärin touko-elokuussa 1953-1972. Tehotoman sadannan muodostaa siten niiden vuorokausien sadanta, joina sadanta jää alle 5 mm/d.

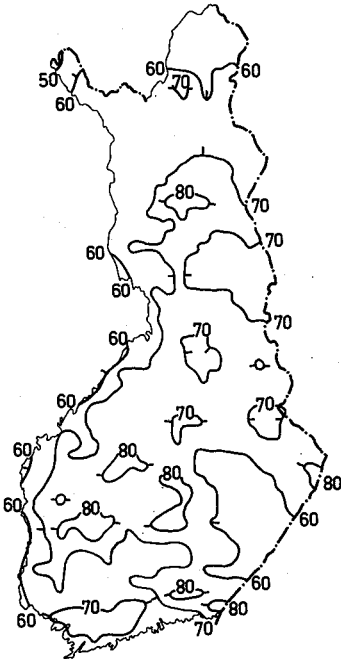
Etelä- ja Länsi-Suomessa sattuu touko-kesäkuussa keskimäärin 2-3 sellaista päivää, että vuorokautinen sadanta ylittää 5 mm. Näiden kuu-



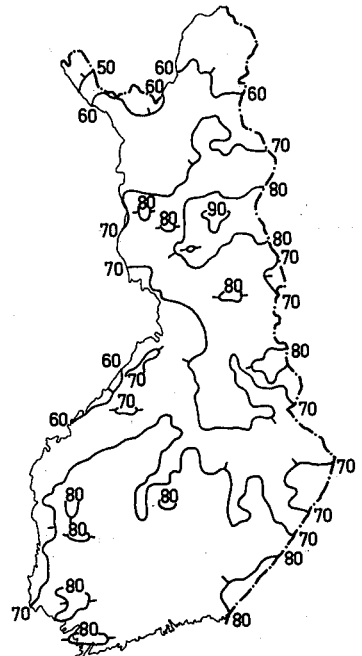
Kuva 1
Fig. 1



Kuva 2
Fig. 2



Kuva 3
Fig. 3



Kuva 4
Fig. 4

Kuvat 1-4. Keskimääräinen korjaamaton kuukausisadanta (mm) Suomessa 1931-1960 toukokuussa (kuva 1), kesäkuussa (kuva 2), heinäkuussa (kuva 3) ja elokuussa (kuva 4). Isohyetit on laadittu Helimäen (1967) piste-arkkitojen perusteella.

Figs. 1-4. Mean monthly precipitation (mm) for May (Fig. 1), June (Fig. 2), July (Fig. 3) and August (Fig. 4) in Finland in 1931-1960 (uncorrected values). Modified from the maps after Helimäki (1967).

Taulukko 1. Tehoisa (yli 5 mm/d) sadanta (mm/kk) ja sen osuus (%) koko sadannasta Vihdin Maasojalla ja Ylistaron koeasemalla keskimäärin touko-elokuussa 1953-1972.
 Table 1. Mean efficient (>5 mm/d) precipitation (mm/month) and percentage of the total precipitation at Vihti and Ylistaro station in 1953-1972.

	Tehoisa sadanta Efficient precipitation							
	Toukokuu		Kesäkuu		Heinäkuu		Elokuu	
	May	June	July	August	May	June	July	August
	mm/kk	%	mm/kk	%	mm/kk	%	mm/kk	%
Vihti	22	61	25	63	57	78	75	81
Ylistaro	27	66	28	69	53	78	67	81

kausien kuukausisadannasta on noin kolmannes tehotonta (< 5 mm/d), ja näin lasketun tehotoman sadannan osuus on sitä suurempi, mitä pienempi on kokonaissadanta. Toisaalta kuitenkin sadannan lisääntyessä myös valunnan osuus kasvaa ja runsailla sateilla tehoisan sadannan osuus tämän vuoksi uudelleen pienenee.

2.3 Kuivakaudet

Suomessa sattuu keskimäärin joka kesä maan etelä- ja länsiosissa runsaan kuukauden (30-37 d) ja

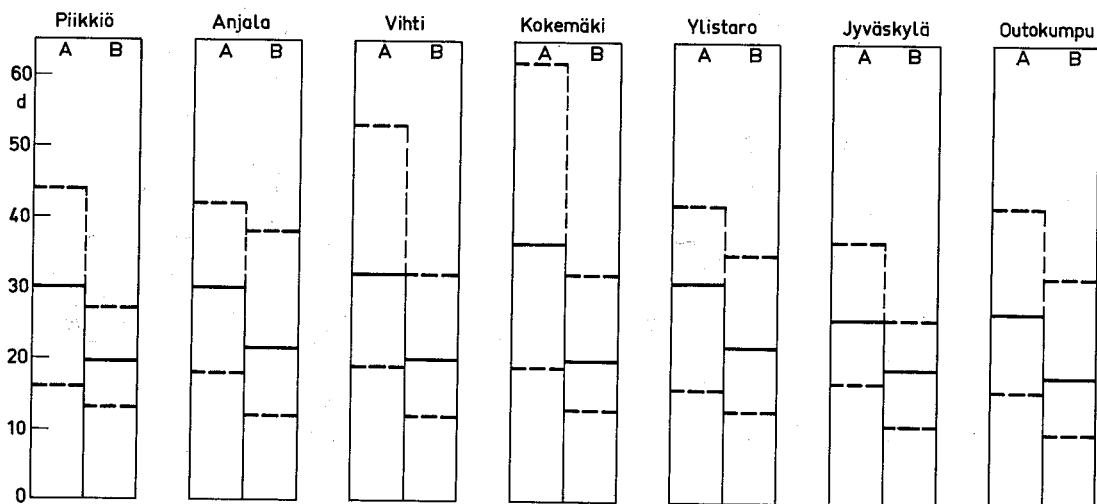
keskiosassa vajaan kuukauden (26-27 d) yhtäjaksoinen kausi, jolloin vuorokautinen sadanta ei ylitä 5 mm (kuva 5). Keskimäärin kerran 10 vuodessa muodostuu tämän kuivakauden pituudeksi 45-60 vuorokautta ja 9 kesänä kymmenestä tämä kuivakausi kestää vähintään 16-19 d.

Vastaavasti sattuu keskimäärin joka kesä Etelä- ja Länsi-Suomessa 19-22 vuorokauden ja Keski-Suomessa 18-19 d:n kuivakausi, jolloin vuorokautinen sadanta jää alle 2 mm. Yhtenä kesänä kymmenestä tämä kausi kestää 26-38 vuorokautta ja yhdeksänä kesänä kymmenestä yli 10-13 d.

Koko vuosijakson 1941-1970 pisimmät kesäaikaiset alle 5 mm/d kuivakaudet ovat kahden kuukauden luokkaa ja alle 2 mm/d 40-60 vuorokauden luokkaa (taulukko 2).

Suomessa sattuvia kuivakausia on tutkittu myös liukuvien sadantasummien perusteella. Seitsemältä paikkakunnalta Suomen eteläpuoliskossa on laskettu 3 vuorokauden (liite 1) ja 7 vuorokauden (liite 2) liukuvat sadantasummat vuosijaksolta 1951-1970.

Kuvissa 6 ja 7 on esitetty kesän pisimpien kuivakausien keskimääräinen pituus ja sattumisaika edellä mainituilla seitsemällä paikkakunnalla Etelä- ja Keski-Suomessa kauden 1951-1970 perusteella.



Kuva 5. Kesän pisimpien kuivakausien (A: $P < 5$ mm/d, B: $P < 2$ mm/d) keskimääräinen (yhtenäinen viiva) ja kerran 10 vuodessa sattuva (katkoviiva) pituus (d) eräillä paikkakunnilla Suomessa.

Fig. 5. Mean length and length (d) with 10-year probable recurrence interval of summer-time dry spells (A: $P < 5$ mm/d, B: $P < 2$ mm/d) in Finland in 1941-1970.

Taulukko 2. Pisimmän (max.), keskimääräisen (M) ja lyhimmän (min.) sellaisen kuivakauden pituus (d), joka ainakin osittain sattuu kesäkuulle, erällä paikkakunnilla Suomen eteläpuoliskolla vuosijaksolla 1941-1970.

Table 2. The longest (max.), mean (M) and the shortest (min.), dry spell (d) from June to August in the southern part of Finland in 1941-1970.

Paikkakunta Community	Kuivakauden pituus (d) Length of dry spell in days					
	<5mm/d			<2 mm/d		
	max.	M	min.	max.	M	min.
Piikkiö	61	29	11	35	18	8
Vihti	62	31	13	39	17	6
Anjala	61	28	9	55	18	6
Kokemäki	65	35	9	34	17	7
Ylistaro	65	30	13	42	19	6
Jyväskylä	64	24	8	64	16	5
Outokumpu	49	25	6	36	15	4

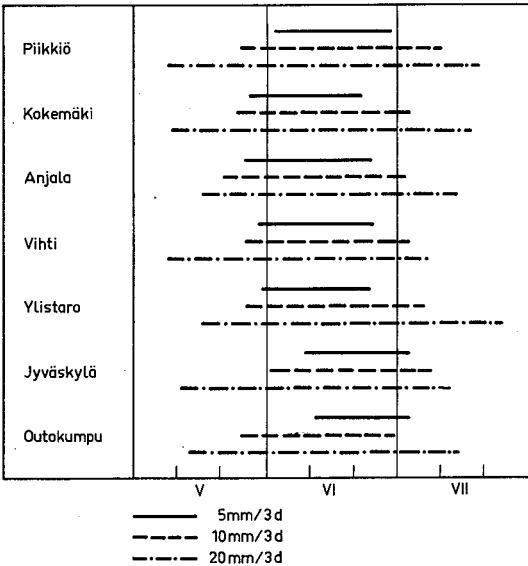
Kuvassa 8 on esitetty toistuvuusanalyysi kolmen vuorokauden sadantasumman perusteella

määritetyille kuivakausille 7 paikkakunnalla touko-heinäkuussa Suomessa.

Yhteenvetona sadeasemakohtaisista kuivakausista voidaan todeta mm. seuraavaa.

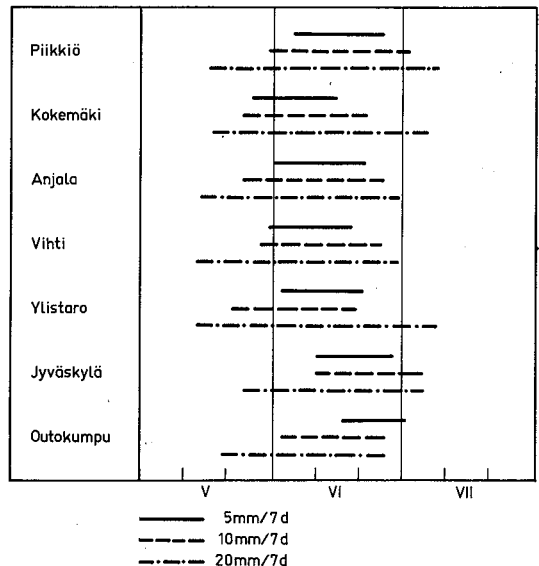
1) Kesäajan pisin kuivakausi sattuu Etelä-Suomessa useimmiten alkukesällä touko-kesäkuussa painottuen kesäkuulle.

2) Touko-elokuun pisin yhtäjaksoinen kuivakausi ($P < 5 \text{ mm}/3 \text{ d}$) alkaa Etelä- ja Länsi-Suomessa keskimäärin touko-kesäkuun vaihteessa ja kestää 25-30 vuorokautta (kuva 6). Vastaavasti pisin kausi, jolloin $P < 10 \text{ mm}/3 \text{ d}$, alkaa Etelä- ja Länsi-Suomessa keskimäärin 25.5. ja kestää noin 40 vuorokautta. Etelä- ja Länsi-Suomen pisin alle $20 \text{ mm}/3 \text{ d}$ alkaa keskimäärin 10.-15.5. ja kestää 60-70 vuorokautta. Keski-Suomessa ankarin vähäsateisuus ($P < 5 \text{ mm}/3 \text{ d}$) alkaa noin 10 vuorokautta myöhemmin ja kestää 4-5 vuorokautta lyhyemmän ajan kuin keskimäärin eteläisellä ja läntisellä rannikkoseudulla. Sen sijaan kaudet, jolloin sadanta on alle $10 \text{ mm}/3 \text{ d}$ ja alle $20 \text{ mm}/3 \text{ d}$, alkavat sisämaassa samoihin aikoihin kestäen



Kuva 6. Kesän pisimpien kuivakausien (sadanta < $5 \text{ mm}/3 \text{ d}$, < $10 \text{ mm}/3 \text{ d}$ ja < $20 \text{ mm}/3 \text{ d}$) pituus (d) ja sattumisaika keskimäärin erällä paikkakunnilla Etelä- ja Keski-Suomessa vuosijakson 1951-1970 perusteella.

Fig. 6. Mean length (d) and occurrence of summertime dry spells ($P < 6 \text{ mm}/3 \text{ d}$, $P < 10 \text{ mm}/3 \text{ d}$ and $P < 20 \text{ mm}/3 \text{ d}$) in Finland in 1951-1970.



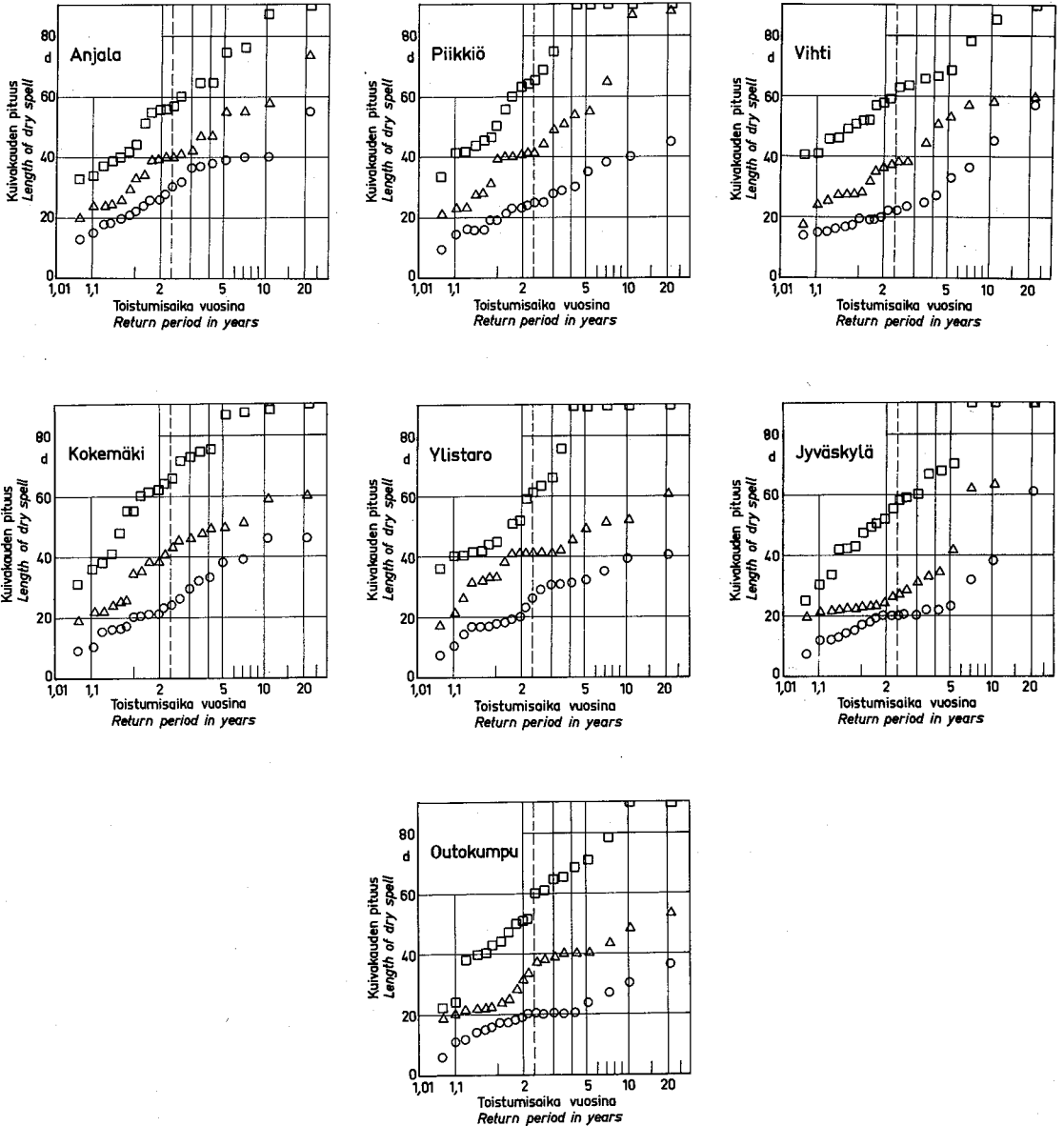
Kuva 7. Kesän pisimpien kuivakausien (sadanta < $5 \text{ mm}/7 \text{ d}$, < $10 \text{ mm}/7 \text{ d}$ ja < $20 \text{ mm}/7 \text{ d}$) pituus (d) ja sattumisaika keskimäärin erällä paikkakunnilla Etelä- ja Keski-Suomessa vuosijakson 1951-1970 perusteella.

Fig. 7. Mean length (d) and occurrence of summertime dry spells ($P < 5 \text{ mm}/7 \text{ d}$, $P < 10 \text{ mm}/7 \text{ d}$ and $P < 20 \text{ mm}/7 \text{ d}$) in Finland in 1951-1970.

kuitenkin noin 5 vuorokautta lyhyemmän ajan kuin rannikkoalueella.

3) Pisin yhtäjaksoinen kuivakausi $P < 5 \text{ mm/7 d}$ alkaa Etelä- ja Länsi-Suomessa keskimäärin touko-kesäkuun vaihteessa, kuten $P < 5 \text{ mm/3 d}$, mut-

ta kestää noin 20 d (kuva 7). Sisä-Suomessa tämä kausi kestää 15-18 d. Myös pisimmät alle 10 mm/7 d ja alle 20 mm/7 d kaudet alkavat keskimäärin samoihin aikoihin kuin 3 d:n perusteella määritetyt kuivakaudetkin, mutta ovat näitä noin 10 d



Kuva 8. Touko-heinäkuun kuivakausten ($P < 5 \text{ mm/3 d}$, neliöt; $P < 10 \text{ mm/3 d}$, kolmiot; ja $P < 20 \text{ mm/3 d}$, ympyrät) toistuvuusanalyysi eräillä paikkakunnilla Etelä- ja Keski-Suomessa.

Fig. 8. Frequency analysis of dry spells of May-July ($P < 5 \text{ mm/3 d}$, squares; $P < 10 \text{ mm/3 d}$, triangles; and $P < 20 \text{ mm/3 d}$, circles) in Finland.

lyhyempiä.

4) Keskimäärin kerran 20 vuodessa sattuvien kuivakausien ($P < 5 \text{ mm}/3 \text{ d} \dots < 20 \text{ mm}/3 \text{ d}$) pituus on puolitoista-kaksinkertainen keskimääräiseen kuivakauden pituuteen verrattuna (kuva 8).

5) Koko touko-heinäkuun yhtäjaksoisesti kestävä kausi, jolloin $P < 20 \text{ mm}/3 \text{ d}$, sattuu lounais- ja länsirannikolla keskimäärin joka viides vuosi ja muuallakin Etelä- ja Keski-Suomessa noin kerran 10 vuodessa.

6) Sen ajan osuus, jolloin sadanta on $< 10 \text{ mm}/3 \text{ d}$, on Etelä- ja Keski-Suomessa toukokuussa 85-90 %, kesäkuussa 80-88 %, heinäkuussa 65-75 % ja elokuussa 65-73 % suurempien arvojen koskies-
sa etenkin alkukesällä etelä-, lounais- ja länsirannikkoa.

Edellä esitetty sadannan analysointi perustuu sadeasema-kohtaisiin arvoihin. Jos tarkastellaan tilannetta yksittäisen viljelijän sadetuksen kannalta, pistesadantaa voidaan pitää oikeana lähtökoh-
tana. Jos sen sijaan tarkastellaan kysymystä alueellisesti, esim. sadetusveden hankinnan kannalta, olisi myös sadantaa käsiteltävä aluesadantana.

Taulukko 3. Keskimäärin kerran 20 vuodessa sattuva (pieni) aluesadanta (mm) ja vastaava alueella olevien kolmen sadeaseman pistesadanta (mm) Vantaan ($A=1680 \text{ km}^2$) ja Aurajoen ($A=730 \text{ km}^2$) vesistöalueilla touko-heinäkuussa 1946-1975.

Table 3. Areal and point precipitation (mm) with probable recurrence interval of 20 years in Vantaa and Aurajoki river basins in 1946-1975 in South-Finland

	Kerran 20 vuodessa sattuva kuukausisadanta (mm) Monthly precipitation (mm) with return period of 20 years		
	Toukokuu May	Kesäkuu June	Heinäkuu July
VANTAA			
Aluesadanta			
Areal precipitation	11,5	13	21
Tikkurila	10	11	17,5
Tuusula	6,5	11	19,5
Hyvinkää	8,5	12,5	15
AURAJOKI			
Aluesadanta			
Areal precipitation	8	12,5	16,5
Turku	7	9,5	12
Piikkiö	6	9,5	13,5
Oripää	8	8	12,5

On selvää, että aluesadannan todennäköisyysjakautuma on pitkällä havaintojaksolla tasaisempi kuin alueella olevien pistesadantojen jakautumat. Toistuvuudeltaan harvinaisten suurten sadantojen osalta pistesadannan ja aluesadannan ero on huomattava ja se on sitä suurempi, mitä suuremman alueen aluesadantaa verrataan pistesadantaa (Naakka 1968). Myös harvoin toistuvien pienten sadantojen osalta aluesadannan ja pistesadannan ero on selvä, joskaan ei kovin suuri (taulukko 3).

3. HAIHDUNTA

3.1 Potentiaalinen evapotranspiraatio

Potentiaalinen evapotranspiraatio, josta voidaan käyttää myös nimitystä ilmastollinen haihduttamiskyky, on määritelty tiheän, matalahkon, vihreän kasvillisuuden peittämän suurehkon alueen haihduntana optimaalisissa kosteusoloissa. Potentiaalisen evapotranspiraation määrittämiseksi on kehitetty lukuisia laskentamenetelmiä. Seuraavassa asetelmassa on esitetty eräissä haihdunkaavoissa tarvittavat lähtösuureet ja liitteeseen 3 on koottu yleisimpiä laskentayhtälöitä.

Kaava Equation	Lähtösuure Variable
Dalton	Kyllästysvajaus Saturation deficit
Lowry & Johnson	Ilman lämpötila kasvukautena Air temperature in growing season
Thornthwaite	Ilman lämpötila, päivän pituus Air temperature, day length
Blaney & Criddle	Ilman lämpötila, auringonpaiste-aika, kasvillisuuskerroin Air temperature, % sunshine, crop coefficient
Jensen & Haise Makkink Stephens-Stewart	Ilman lämpötila, tulosäteily Air temperature, solar radiation
Turc	Ilman lämpötila, tulosäteily, sadanta Air temperature, solar radiation, precipitation
Grassi	Ilman lämpötila, tulosäteily, kasvillisuuskerroin Air temperature, solar radiation, crop coefficient

Blaney & Morin Hargreaves	Ilman lämpötila, auringonpaiste aika, suhteellinen kosteus, kasvillisuuskerroin <i>Air temperature, % sunshine, relative humidity, crop coefficient</i>
Hamon	Ilman lämpötila, auringonpaiste aika, ilman absoluuttinen kosteus <i>Air temperature, % sunshine, absolute humidity</i>
Johansson	Tulosäteily, tuulen nopeus, ilman kyllästysvajaus <i>Solar radiation, wind velocity, saturation deficit</i>
Christiansen	Ilman lämpötila, teoreettinen tulosäteily, auringonpaiste aika, tuulen nopeus, suhteellinen kosteus, korkeusasema, kasvillisuuskerroin <i>Air temperature, theoretical radiation reaching the earth's outer atmosphere, % sunshine, wind velocity, relative humidity, elevation, crop coefficient</i>
USWB	Tulosäteily, tuulen nopeus, ilman lämpötila, kastepiste-lämpötila <i>Solar radiation, wind velocity, air temperature, dew point temperature</i>
Budyko	Nettosäteily, sadanta <i>Net radiation, precipitation</i>
Mc Ilroy	Nettosäteily, ilman kosteus, kasvillisuuskerroin <i>Net radiation, humidity, crop coefficient</i>
Penman	Ilman lämpötila, nettosäteily, tuulen nopeus, ilman kosteus <i>Air temperature, net radiation wind velocity, humidity</i>

Nettosäteilyyn perustuvia ovat mm. Penmanin (1948), Fergusonin (1952), Budykon (1956) ja McIlroyn (1961) kaavat.

Tulevaan kokonaissäteilyyn perustuvia kaavoja ovat kehittäneet mm. Makkink (1957), Jensen & Haise (1963), Bryson & Kuhn. Myös Johanssonilla (1970) on perustana tuleva kokonaissäteily, mutta mukana ovat myös tuulen nopeus ja ilman kyllästysvajaus. Hänen kaavansa on kehitetty Anderssonin evaporimetriahaidunnan perusteella.

Keskilämpötila on ollut perustana mm. Lowryn & Johnsonin (1942), Blaney & Morinin

(1942), Thornthwaiten (1948), Blaney & Criddlen (1950 ja 1966) ja Hargreavesin (1956) menetelmissä.

Potentiaalista evapotranspiraatiota voidaan arvioida myös haihtumisastioiden ja atmometrien tai evaporimetrien avulla. Vaikka niiden heikkoutena on tulosten suuri riippuvuus mittarin välittömästä sijainnista, niitä voidaan pitää käyttökelpoisimpiin menetelmiin kuuluvina (Tanner 1967).

Haidunnan laskentamenetelmiä on vertailtu useissa yhteyksissä (mm. Tanner 1967, Johansson 1970, Forsman 1969, Christiansen 1966, Blaney & Criddle 1966, Schulz 1973, Penman 1963, Christiansen & Mehta 1965, WMO 1965).

Näistä vertailuista osa on kuitenkin tehty olosuhteissa, jotka poikkeavat Suomen ja Pohjoismaiden olosuhteista huomattavasti. Vertailukohteena on usein ollut haihdunta Class A-astiasta.

Haidunnan laskentamenetelmistä teoreettisesti parhaina pidetään nettosäteilyyn perustuvia menetelmiä. Laskentateknisesti ne (mm. Penman) ovat kuitenkin verrattain hankalia ja erityisen ongelman muodostaa usein nettosäteilyn arvojen saaminen. Pääasiassa näistä syistä johtuen on kehitetty joukko tulevaan kokonaissäteilyyn perustuvia kaavoja. Vielä helpommin saataviin lähtöarvoihin perustuvat ne laskentakaavat, joissa säteilyn eli siis haihtumisen vaatiman energian indikaattorina on lämpötila tai auringonpaiste aika. Lämpötilaan perustuvat menetelmät soveltuvat parhaiten suhteellisen pitkien, yli 1 kk pituisten jaksojen potentiaalisen haihdunnan laskemiseen. Tannerin (1967) mukaan ne antavat kuitenkin tällöinkin liian pieniä PET:n arvoja keväällä ja liian suuria arvoja syksyllä johtuen ilman lämpötilan muutosten viivästyisestä säteilyyn verrattuna. Sen sijaan todelliseen haihduntaan verrattuna sekä säteilyyn että ilman lämpötilaan perustuvat haihduntakaavat antavat alkukesällä liian suuria ja loppukesällä liian pieniä arvoja maan lämpenemiseen sitoutuvan ja syksyllä maan lämpövarastosta vapautuvan energian vuoksi, ellei haihduntakaavassa ole tätä erikseen otettu huomioon. Maan lämpötilan muutoksia käsitellään laajemmin jäljempänä.

Brutsaert (1965) on huomauttanut, että lämpötilaan perustuvat kaavat eivät sovellu trooppisiin olosuhteisiin, jossa haihdunta riippuu enemmän säteilystä, ilman kosteudesta, tuulen nopeudesta ja auringonpaisteen määrästä kuin lämpötilasta.

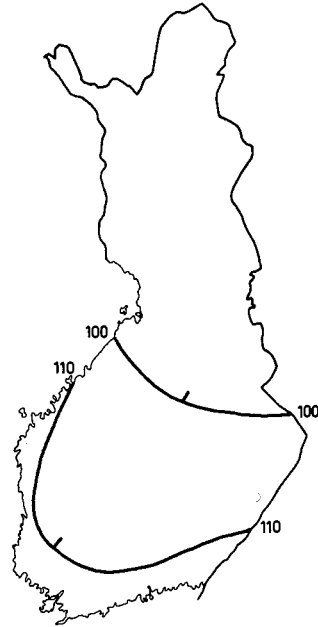
Sama johtopäätös voidaan vetää myös Chindasngran (Christiansen 1966) suorittamasta vertailusta Thaimaassa.

Johansson (1970) on vertaillut Ruotsissa Penmanin, Thornthwaiten, Blaney & Criddlen, Turcin ja Johanssonin kaavoilla laskettuja potentiaalisen evapotranspiraation kuukausikeskiarvoja kaudelta 1963-1969. Tässä vertailussa on Johanssonin kaava antanut suurimmat haihdunnan arvot keväällä ja alkukesällä. Lähes yhtä suuria arvoja on kuitenkin touko-kesäkuussa antanut Penmanin kaava. Keväällä, huhti-toukokuussa, on selvästi pienimmät arvot saatu Turcin ja Thornthwaiten kaavoilla. Heinä-syyskuussa on Thornthwaiten kaava antanut suurimmat arvot ja elo-syyskuussa Penmanin ja Johanssonin kaavoilla on saatu pienimmät arvot. Haihdunnan huippu on sattunut Johanssonin ja Penmanin kaavoilla selvästi kesäkuulle, Thornthwaiten ja Blaney & Criddlen kaavoilla taas heinäkuulle. Tämäkin osoittaa, että ilman lämpötilan perusteella lasketulla haihdunnalla on viive säteilyn perusteella laskettuun haihduntaan nähden. Talvikuukausina ovat Johanssonin ja Blaney & Criddlen kaavat antaneet selvästi suurimpia ja todennäköisesti myös liian suuria potentiaalisen haihdunnan arvoja. Blaney & Criddlen kaava poikkeaa muista Johanssonin vertailemista kaavoista sikäli, että siihen sisältyy kasvuihkerroin, joka vaikuttaa merkittävästi kaavan antamiin tuloksiin. Johansson on käyttänyt Blaney & Criddlen kaavan kertoimena k-arvoa 0,5, mikä Patilin & Christiansenin Yhdysvalloissa suorittamien tutkimusten mukaan saattaa olla hieman liian pieni. Toisaalta Blaney-Criddlen kaava on kehitetty lähinnä aridisiin olosuhteisiin, ja saattaa tästäkin syystä antaa Pohjoismaiden olosuhteissa virheellisiä tuloksia.

Ruotsin IHD-komitean asettaman työryhmän (Forsman et al. 1969) mukaan Penmanin, Mc Ilroyn ja Konstantinovin menetelmät soveltuvat kuukausihaihdunnan laskemiseen meso- ja mikrokaalassa (1 km -1 m), Budykon kaava vuosihaihdunnalle makro- ja mesokaalassa (100 km-1 km) ja Daltonin yhtälö vuorokausihaihdunnalle mikrokaalassa.

Suomessa on laskettu Penmanin teoriaan perustuvalla United States Weather Bureauun haihduntakaavalla n. 20 paikkakunnalle haihduntaindeksi (Mustonen 1963, Mustonen & Seuna 1969), joka likimain vastaa potentiaalisen haihdunnan arvoja (Linsley, Kohler & Paulhus 1958).

Tällä kaavalla lasketut keskiarvot 1958-1970 kesäaikana Suomessa on esitetty kuvissa 9-10. Kun USWB:n kaavassa ei ole otettu huomioon maan lämpövaraston muutoksia, antaa kaava Suomen oloissa liian suuria arvoja keväällä ja liian pieniä syksyllä.



Kuva 9. Potentiaalinen evapotranspiraatio (PET) laskettuna USWB:n kaavalla Suomessa keskimäärin 1958-1970 kesäkuussa (mm).

Fig. 9. Mean potential evapotranspiration (mm) computed by the USWB formula in June in Finland in 1958-1970.

McGuinness ja Parmele (1972, p. 210) ovat samalla menetelmällä laskien saaneet 15 vuoden jaksolla Ohiossa, Yhdysvalloissa eri pituisten jaksosten (1, 3, 7, 15 ja 30 d) keskimääräisiksi maksimihaihdunnoiksi (PET) taulukossa 4 esitetyt arvot.

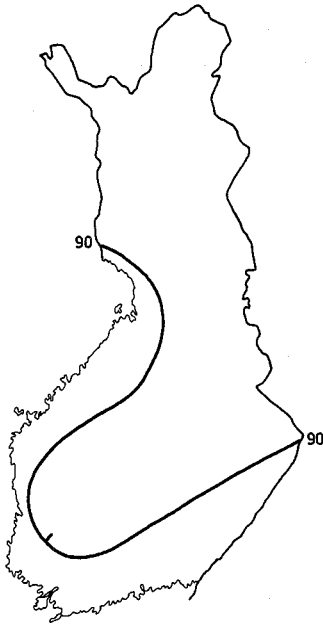
McGuinness ja Parmele ovat taulukon 4 arvojen perusteella kehittäneet regressioyhtälön (1)

$$PET = 1,235 N - 0,0858 N^2 + 0,179 D - 0,00820 ND - 3,834, R = 0,963 \quad (1)$$

jossa

N = kuukauden järjestysluku (huhtikuu = 4, toukokuu 5 jne.)

D = jakson pituus vuorokausissa



Kuva 10. Potentiaalinen evapotranspiraatio (PET) laskettuna USWB:n kaavalla Suomessa keskimäärin 1958-1970 heinäkuussa (mm).

Fig. 10. Mean potential evapotranspiration (mm) computed by the USWB formula in July in Finland in 1958-1970.

Yhtälön avulla voidaan laskea mielivaltaisen pituisen jakson keskimääräinen maksimihaidunta (PET) eri kuukausina, mutta kaava on paikallisiin olosuhteisiin sidottu. Sen antamat arvot vastaavat keskikesällä lyhyillä 1-7 vuorokauden jaksoilla likimain Suomessa mitattuja arvoja, mutta ovat keväällä ja syksyllä sekä keskikesälläkin pidemmällä jaksolla selvästi Suomessa mitattuja arvoja suurempia.

Vertaillessaan näin laskettua potentiaalista haihduntaa lysimetrihaihduntaan, McGuinness ja Parmele totesivat lysimetrihaihdunnan lähes poikkeuksetta laskettua potentiaalista evapotranspiraatiota suuremmaksi. He ovat huomauttaneet mm. Mustosen ja McGuinnessin (1968) sekä Dreibelbisin (1962) tutkimusten perusteella, että lysimetriarvot saattavat olla todellista haihduntaa jonkin verran suurempia.

Lysimetrihaihdunta saattaa voimakkaasta advektioista johtuen ylittää myös nettosäteilyn energiaekvivalentin (Fritschen & van Bavel 1964, Penman 1967, Rosenberg 1972). Ylitys saattaa

Taulukko 4. Eri pituisten jaksojen suurin potentiaalinen evapotranspiratio (mm) keskimäärin huhti-marraskuussa Yhdysvalloissa Ohiossa (McGuinness & Parmele, 1972).
Table 4. Average maximum potential evapotranspiration (PET) in mm for specified durations at Coshocton, Ohio, USA (McGuinness & Parmele, 1972).

Kuukausi Month	Potentiaalinen evapotranspiraatio (mm) jakson pituuden (d) ollessa Potential evapotranspiration (mm) during the period (days) of				
	1	3	7	15	30
Huhtikuu April	5,1	13,2	25,1	45,7	76,4
Toukokuu May	5,6	15,5	32,8	61,2	114,0
Kesäkuu June	6,1	17,5	37,3	72,6	134,1
Heinäkuu July	6,1	17,3	26,1	71,9	137,2
Elokuu August	5,3	14,7	32,5	62,2	117,3
Syyskuu September	4,3	12,4	25,9	48,0	84,6
Lokakuu October	3,0	7,9	15,5	29,0	74,2
Marraskuu November	2,0	5,1	9,6	16,8	26,9

yhden vuorokauden aikana olla sangen huomattava. Esimerkiksi Arizonassa pilvettömänä kesäpäivänä on punnitsevalla lysimetrillä mitattu haihdunnaksi 10,2 mm nettosäteilyn energian vastatessa samana aikana 6,4 mm. Tarvittava lisäenergia on ollut peräisin pääasiassa ilmasta (3,7 mm) ja pieneltä osin maasta (0,5 mm) (Fritschen & van Bavel 1964). Myös useamman vuorokauden aikana on todettu lysimetrihaihdunnan ylittäneen nettosäteilyn energiaekvivalentin, mutta vuorokausiarvoja lievemmin. Esim. Englannissa on Penman (1967) todennut loppukesällä 4 vuorokauden jaksolla haihdunnaksi 3,90 mm/d nettosäteilyn energian vastatessa 3,56 mm/d. Tarvittavasta lisäenergiasta 0,21 mm/d on ollut peräisin ilmasta ja 0,12 mm/d maasta.

3.11 Potentiaalisen evapotranspiraation ja sadannan vuorosuhde

Potentiaalisen evapotranspiraation ja sadannan

vuorosuhdetta on tutkittu laskemalla 4 paikkakunnalla lineaariset regressioyhtälöt PET:n ja sadannan P kuukausiarvojen välille vuosijakson 1958-1970 perusteella. Regressioyhtälöt ja korrelaatiokertoimet muodostuivat seuraaviksi (2)-(13).

Vihti:

$$\text{Toukokuu} \quad \text{PET} = -0,49P + 100, \quad r = -0,84 \quad (2)$$

$$\text{Kesäkuu} \quad \text{PET} = -0,19P + 118, \quad r = -0,28 \quad (3)$$

$$\text{Heinäkuu} \quad \text{PET} = -0,33P + 121, \quad r = -0,61 \quad (4)$$

Kokemäki:

$$\text{Toukokuu} \quad \text{PET} = -0,49P + 89, \quad r = -0,77 \quad (5)$$

$$\text{Kesäkuu} \quad \text{PET} = -0,13P + 110, \quad r = -0,32 \quad (6)$$

$$\text{Heinäkuu} \quad \text{PET} = -0,44P + 110, \quad r = -0,69 \quad (7)$$

Utti:

$$\text{Toukokuu} \quad \text{PET} = -0,52P + 97, \quad r = -0,63 \quad (8)$$

$$\text{Kesäkuu} \quad \text{PET} = -0,40P + 127, \quad r = -0,43 \quad (9)$$

$$\text{Heinäkuu} \quad \text{PET} = -0,20P + 111, \quad r = -0,39 \quad (10)$$

Ylistaro:

$$\text{Toukokuu} \quad \text{PET} = -0,38P + 88, \quad r = -0,59 \quad (11)$$

$$\text{Kesäkuu} \quad \text{PET} = -0,40P + 122, \quad r = -0,43 \quad (12)$$

$$\text{Heinäkuu} \quad \text{PET} = -0,32P + 111, \quad r = -0,64 \quad (13)$$

Kuten regressioyhtälöistä (2)-(13) voidaan todeta, potentiaalinen evapotranspiraatio on ollut sitä suurempi, mitä vähemmän kuukauden aikana on satanut. Korrelaatiokertoimet ovat kuitenkin pieniä erityisesti kesäkuussa. Tämä johtuu lähinnä siitä, että keskikesän sateiden ollessa usein kuuroluonteisia pienenee ilmastollinen haihduttamiskyky tällaisen sateen sattuessa vain lyhyeksi ajaksi nousten sateen päätyttyä nopeasti uudelleen.

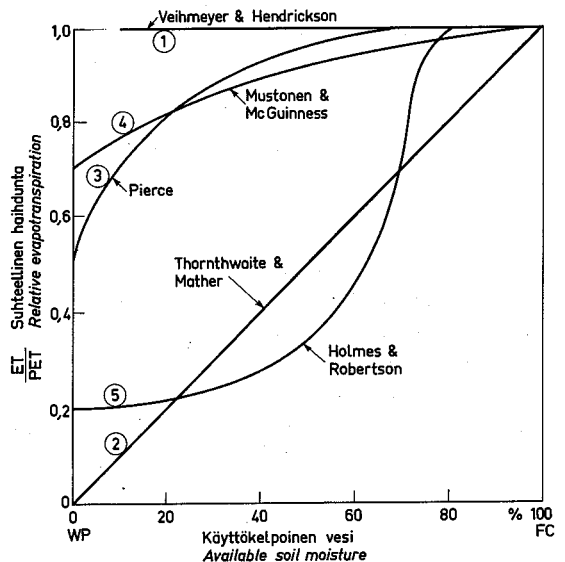
3.2 Todellinen haihdunta

3.2.1 Maan kosteuden vaikutus todelliseen haihduntaan

Maa-alueelta tapahtuva todellinen haihdunta riippuu paitsi ilmastollisesta haihduttamiskyvystä, myös haihdunnalle alttiin veden määrästä ja haihduttavan pinnan laadusta. Lisäksi säteilyenergian jakautuminen haihdunnan sekä ilman ja maan lämpövarastojen muutosten kesken vaihtelee mm. eri vuodenaikoina ja tämä heijastuu suoraan todellisen haihdunnan suuruuteen.

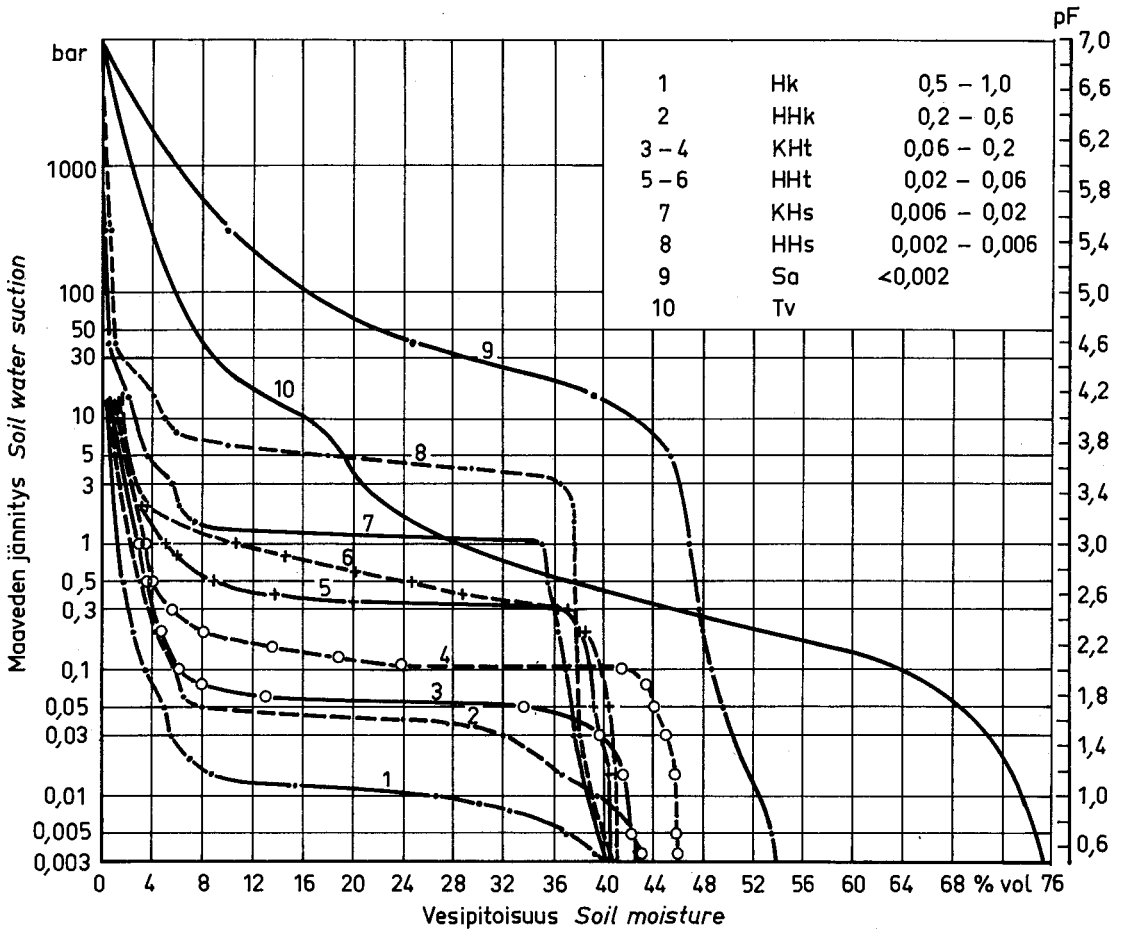
Erittäin voimakkaasti todelliseen haihduntaan vaikuttaa maan kosteustila. Mikäli maan kosteus on lähellä kenttäkapasiteetin edellyttämää kosteutta, haihdunta on suuri. Maanpinnasta tapahtuva haihdunta pienenee nopeasti, 1-2 vuorokauden kuluttua maanpinnan kuivuttua ja miltei lakkaa siinä vaiheessa kun kapillaarinen nousu ei enää riitä tuomaan kosteutta maanpintaan saakka haihtumiselle alttiiksi. Tällöin evaporaatio jatkuu vain vesihöyryn diffuusion välityksellä pieninä ja lähes vakiosuuruisena. Kasvien transpiraatio heikkenee vasta useita päiviä myöhemmin (Gates & Hanks 1967).

Todellisen ja potentiaalisen evapotranspiraation suhdetta on tutkittu runsaasti. Kuvassa 11 on esitetty todellisen ja potentiaalisen haihdunnan suhteen riippuvuus maan kosteudesta eri tutkimusten mukaan. Käyrät poikkeavat toisistaan huomattavasti. Tämän ovat Denmead ja Shaw (1962) selittäneet johtuvan osittain erilaisesta ilmastollisesta haihduttamiskyvystä. Niinpä käyrä 1 (Veihsmeier & Hendrickson) vastaa pientä ilmastollista haihduttamiskykyä, käyrä 2 (Thornthwaite & Mather) suurta ja käyrät 3 (Pierce) ja 4



Kuva 11. Todellisen haihdunnan ja potentiaalisen haihdunnan suhde maankosteuden funktiona eräiden tutkimusten mukaan (Mustonen & McGuinness 1968).

Fig. 11. Correlation between actual and potential evapotranspiration as a function of soil moisture (Mustonen & McGuinness 1968).



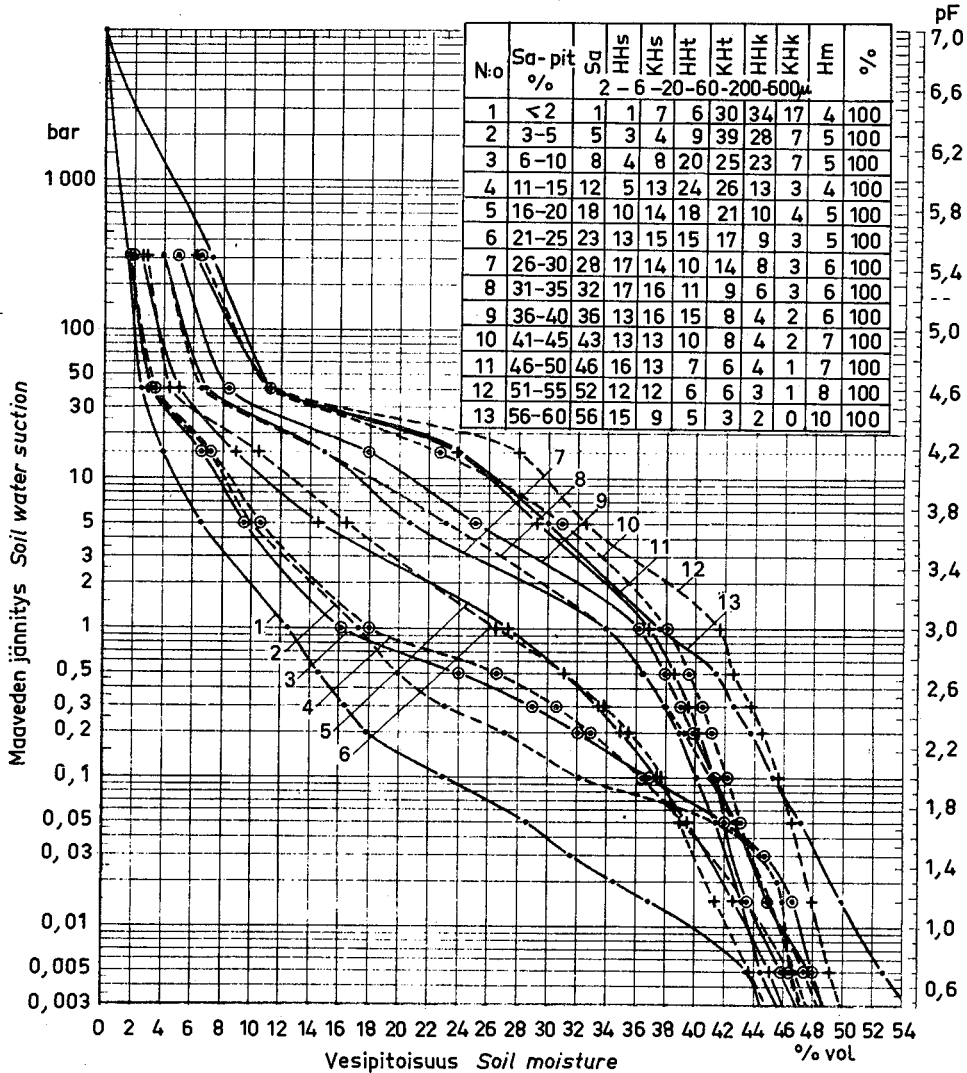
Kuva 12. Eri maalajien pF-käyriä (Andersson 1973).
Fig. 12. pF-curves of different soil types (Andersson 1973).

(Mustonen & McGuinness 1968) keskinkertaista tai vaihtelevaa ilmastollista haihduttamiskykyä ja lienevät esimerkiksi Suomessa parhaiten soveltuvia. Käyrä 5 (Holmes ja Robertson 1963) perustuu pienoislysimetrillä (syvyys 60 cm ja halkaisija 15 cm) suoritetuihin mittauksiin Kanadassa paljaalla savimaalla. Holmes ja Robertson (1963) ovat suorittaneet vastaavanlaisia mittauksia myös kasvipeitteisellä alustalla sekä siltti- ja hiekkamaalla. Myös näissä mittauksissa on käyrä ollut muodoltaan ja lähellä lakastumisrajaa myös numeroarvoiltaan käyrän 5 kaltainen.

Maan hyödyllisen vesikapasiteetin eli hyötykapasiteetin ylärajana pidetään yleisesti kenttäkapasiteettia eli suurinta vesipitoisuutta, joka maahan jää sen oltua gravitaation vaikutuksen alaisena.

Sitä pidetään maalajikohtaisena vakiona, vaikka se vaihtelee maan rakenteesta, kuivatutussyvyydestä ja pohjaveden etäisyydestä johtuen samallakin maalajilla (Andersson 1973).

Hyötykapasiteetin alaraja, laskastumisraja ($pF=4,2$), määritellään yleensä kasvien maksimaalista imukykyä vastaavana veden sitoutuneisuutena. Eräät tutkijat ovat sitä mieltä, että lakastuminen ei tapahdu kasvien imuenergian loppumisen vuoksi vaan siitä syystä, ettei vesi pysty kulkeutumaan juuristokerrosta ympäröivän kerroksen läpi riittävän nopeasti (Clark 1967, p.11). Vedenkulun riittämätön nopeus selittää hyvin ns. ensimmäisen lakastumisrajan. Tällöin kasvit lakastuvat päivällä, kun veden liike maassa on liian hidasta tyydyttämään transpiraatiovaatimuksia,



Kuva 13. Ruokamullan pF-käyriä savipitoisuuden funktiona (Andersson 1973).

Fig. 13. pF-curves of the humus layer as a function of percentage clay (Andersson 1973).

mutta toipuvat yöllä. Kasvien vedensaannin vaikeutuminen merkitsee kasvun heikkenemistä jo ennen varsinaista lakastumista. Niinpä vyöhykkeestä, jolloin pF on noin 3-4, käytetäänkin niimitystä vähenevän lisäkasvun alue.

Andersson on tutkinut Ruotsissa laajasti maan vesipitoisuutta ja veden sitoutuneisuutta maahan (kuvat 12 ja 13). Hän on todennut lakastumisrajan riippuvan voimakkaasti hienimpien maalajitteiden määrästä, mikä näkyy myös kuvista 12 ja 13, ja on esittänyt lakastumisrajan laskemiseksi

kaavan (14).

$$WP = 0,32 Sa + 0,10 HHs + 0,02 \quad (14)$$

jossa

WP = lakastumisraja % til.

Sa = savipitoisuus % $\varnothing < 0,002$ mm

HHs = hienon hiesun pitoisuus % $\varnothing = 0,002 - 0,006$ mm

Kivnäismaista on suurin hyötykapasiteetti

hiesulla, hyötykapasiteetin pienentyessä sekä karkeampien että hienompien maalajien suuntaan (taulukko 5, kuvat 12 ja 13). Huomattavan suuri hyötykapasiteetti on turvemaila ja turvemaat ovatkin tunnetusti hyvin poudankestäviä. Mitä pienempi maan hyötykapasiteetti on, sitä helpommin kuivuus aiheuttaa satovahinkoja.

Taulukko 5. Eräiden maalajien kenttäkapasiteetti, lakastumisraja ja hyötykapasiteetti vesipitoisuuden tilavuusprosentteina (Heinonen 1954, Puustjärvi 1973). Kivennäismaalajien arvot on mitattu viljelysmaan multakerroksesta.

Table 5. Field capacity, wilting point and available water holding capacity of soil (% vol.) Heinonen 1954, Puustjärvi 1973).

Maalaji Soil type	Kenttäka- pasiteetti Field capacity	Lakastu- misraja Wilting point	Hyötyka- pasiteetti Available water hold- ing capacity
	%vol.	%vol.	%vol.
Hieno hiekka, karkea hietä Fine sand, $\phi=0,06-0,6$ mm	26	11	15
Hieno hietä Coarse silt, $\phi=0,02-0,06$ mm	35	15	20
Hiesu Silt, $\phi=0,002-0,02$ mm	40	18	22
Laiha savi, hietasavi, hiesusavi Silty clay	38	20	18
Lihava savi, aito savi Heavy clay	41	25	16
Humusmaa Organic clay	44	21	23
Musta turve Mouldered peat	77	21	56
Vaalea rahkaturve Ummouldered peat	48	7	41

Hyötykapasiteetin hyväksikäyttö edellyttää tietoja tai arvioita maan kosteustilasta. Maan kosteuden suora mittaaminen ei koeolosuhteita lukuunottamatta ole juuri mahdollista, sen sijaan kosteustilan tai sen muutosten arvioiminen helposti saatavilla olevien meteorologisten tekijöiden avulla on mahdollista. Maan kosteustilan määrittämisestä käsitellään lähemmin kohdassa 6.

Taulukossa 6 on esitetty esimerkki hyötykapasiteetin käytöstä pyrittäessä arvioimaan sadetuvälejä (Robins et al. 1967).

Taulukko 6. Sadetusten välinen aika (d) perunalla (Robins et al. 1967) maan hyötykapasiteetin ja evapotranspiraation perusteella.

Table 6. Irrigation frequencies (days) for potatoes as a function of available soil water storage and evapotranspiration (Robins et al. 1967).

Maan hyötykapasiteetti 0-90 cm kerroksessa Available soil water storage, 0-90 cm	Sadetusten välinen aika (d) evapotranspiraation ollessa (mm/d) Irrigation frequencies (days) for evapotranspiration (mm/d)			
	3	5	7	9
mm				
60-90	10-15	6-8	4-6	3-4
90-130	15-19	8-10	6-8	4-5
130-170	19-23	10-13	8-10	5-6

3.2.2 Kasvipeitteen vaikutus todelliseen haihduntaan

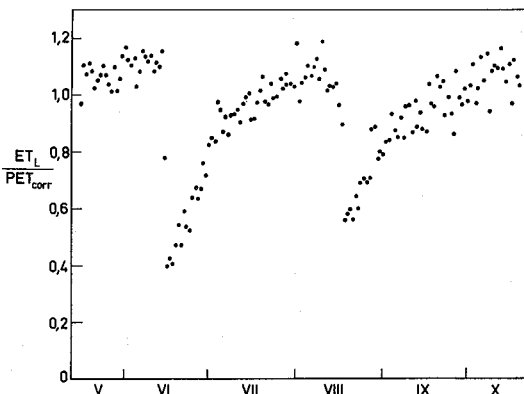
Myös kasvipeite vaikuttaa todelliseen haihduntaan. On todettu, että kasvikohtaiset haihduntaerot ovat merkittäviä siinä vaiheessa, jolloin kasvillisuus vain osittain, alle 50 %, peittää maanpinnan (mm. Gates & Hanks 1967, Clark 1967). Tällöin on myös useimpien viljelykasvien evapotranspiraatio selvästi pienempi kuin täydellisemmän peittävyuden vallitessa. Tämä johtuu siitä, että osittaisen peittävyuden vallitessa on kokonaishaihdunnasta suurempi osa evaporaatiota, joka pienenee nopeammin ja vähäisemmäksi kuin transpiraatio. Vain maan ollessa veden kyllästämää saattaa paljaan maan evaporaatio ylittää peitteisen maan evapotranspiraation albedoeroista johtuen (Mustonen & McGuinness 1968). Kun useimpien tiheiden viljelykasvien heijastavuus on 20-30 % ja paljaan maan 11-23 % kokonaissäteilystä (Gates & Hanks 1967), merkitsee kasvipeitteen osuuden lisääntyminen samalla säteilyn heijastumisen lisääntymistä ja siltä osin haihdunnan pienenemistä. Kasvipeitteen lisääntyessä kuitenkin transpiraatio lisääntyy niin paljon, että kokonaishaihdunta kasvaa (Gates & Hanks 1967).

Peittävyuden ollessa yli 50 % ovat eri viljelykasveista johtuvat haihduntaerot vähäiset. Kasvipeitteen saavuttaessa täyden peittävyuden, lähestyy haihdunta kasvilajista riippumatta potentiaalista evapotranspiraatiota, mikäli maassa on riittävästi haihtumiselle altista vettä. Tällöin haihdunnan suuruus riippuu useiden tutkijoiden

mukaan miltei yksinomaan ilmastollisista tekijöistä (Penman 1963, Clark 1969, McMillan & Burgy 1960, McIlroy & Angus 1964, McCulloch 1977. Vasta kun kasvillisuus on niin korkeaa, että pinnan aerodynaaminen karkeus selvästi poikkeaa matalan, täysin peittävän kasvipeitteen karkeudesta, tulevat kasvikohtaiset erot jälleen merkittäväksi (McCulloch 1977).

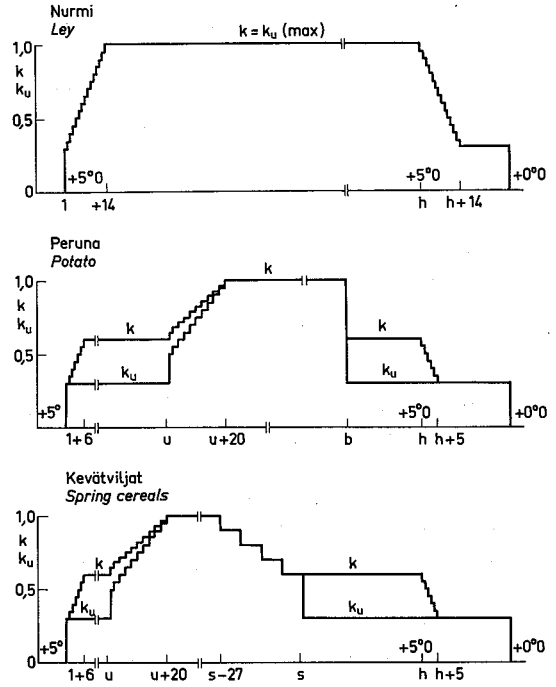
Kypsymisvaiheen jälkeen useimpien viljelykasvien evapotranspiraatio pienenee voimakkaasti. Kypsymisvaiheen tienoilla evapotranspiraatio vastaa edullisissa maankosteusoloissa 70-80 % tulevasta kokonaissäteilystä (Gates & Hanks 1967). Puustjärvi (1970) on tutkinut haihduntaa kasvihuoneoloissa, ja esittänyt, että kasvien vedenkulutus vastaa 50-90 % kokonaissäteilyn energiasta. Keskimääräistä kokonaissäteilyä vastaava kasvien vedentarve 60 %:n hyväksikäyttöasteella on Helsingissä toukokuussa 4,3 mm/d, kesäkuussa 5,1 mm/d, heinäkuussa 4,6 mm/d ja elokuussa 3,4 mm/d. Nämä arvot ovat verrattain suuria ja ylittävät USWB:n kaavalla lasketun PET:n arvot selvästi.

Viljan korjuu tai heinäniitto pienentävät haihduntaa jyrkästi, kuten voidaan todeta kuvasta 14 (Mustonen ja McGuinness 1968). Välittömästi niiton jälkeen evapotranspiraatio on pudonnut noin puoleen, josta se vähitellen on uudel-



Kuva 14. Heinäniiton vaikutus lysimetrimillä mitatun haihdunnan ET_L ja lasketun haihdunnan PET_{corr} suhteeseen (Mustonen & McGuinness 1968).

Fig. 14. The influence of the hay cut on the relationship between evapotranspiration from a lysimeter (ET_L) and computed evapotranspiration (PET_{corr}) (Mustonen & McGuinness 1968).



Kuva 15. Todellisen maksimihaihdunnan suhde Johanssonin kaavalla laskettuun potentiaaliseen haihduntaan (Johansson 1974). $k = E_{max}/PET_J$; $k_u = E_{u,max}/PET_J$; $PET_J =$ Johanssonin kaavalla laskettu potentiaalinen haihdunta; E_{max} =todellinen haihdunta optimaalisissa kosteusoloissa; $E_{u,max}$ =todellinen haihdunta päävarastosta optimaalisissa kosteusoloissa; u =oraalletulo; b =varsien lakastuminen; s =korjuu

Fig. 15. The relationship between actual maximum evapotranspiration and potential evapotranspiration by using the Johansson formula (Johansson 1974). $k = E_{max}/PET_J$; $k_u = E_{u,max}/PET_J$; PET_J =potential evapotranspiration from the Johansson formula; E_{max} =actual evapotranspiration for optimum soil moisture; $E_{u,max}$ =actual evapotranspiration from main storage for optimum soil moisture; u =emergence; b =haulm destruction; s =harvest

leen noussut suunnilleen alkuperäiselle tasolle. Haihdunnan jyrkkä pieneminen johtuu lähinnä siitä, että kasvit menettävät niiton yhteydessä suurimman osan ilma-aukoistaan, joiden kautta transpiraatio tapahtuu.

Johansson (1974, p. 89) on esittänyt, että kevätiljelijöiden maksimaalinen todellinen evapotranspiraatio on oraalletulovaiheessa noin 60 % Johanssonin kaavalla lasketusta potentiaalisesta evapotranspiraatiosta ja nousee noin 3 viikossa potenti-

Taulukko 7. Kasvuvaihekertoimen k vaihtelu erällä viljelykasveilla (Hargreaves 1968).
 Table 7. The variation of growth stage coefficient k of crops (Hargreaves 1968).

Viljelykasvi Crop	Kasvuvaihekerroin (k) kasvukauden vaiheen (%) ollessa Growth stage coefficient (k) in the stage of vegetation period (%)										
	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
Kevätvilja Grain spring	0,15	0,20	0,25	0,30	0,40	0,55	0,75	0,85	0,90	0,90	0,30
Syysvilja Grain winter	0,15	0,25	0,35	0,40	0,50	0,60	0,70	0,80	0,90	0,90	0,30
Sinimailanen Alfalfa	0,55	0,60	0,70	0,80	0,90	0,95	0,95	0,95	0,90	0,80	0,65

aalisen evapotranspiraation tasolle (kuva 15). Sama pätee myös perunaan nähden.

Hargreaves (1968, p.98) on esittänyt kasvuvaihekertoimen k vaihtelevan kasvukauden aikaisen evapotranspiraation määrittämiseksi kehittämässään kaavassa $E = kE_p$ taulukon 7 mukaisesti.

E_p tarkoittaa haihduntaa Class A haihdunta-astiasta ja kertoimet edustavat Hargreavesin mukaan maksimaalisen kasvun ja korkeiden satojen edellyttämiä kosteusoloja.

Verrattaessa Johanssonin ja Hargreavesin kertoimia toisiinsa, voidaan todeta, että Hargreavesin esittämät kertoimen k arvot kasvavat kasvukauden alussa selvästi hitaammin kuin Johanssonin esittämät kertoimet. Näin on siitä huolimatta, että Hargreavesin käyttämässä vertailuhaihdunnassa, astiahaihdunnassa on jo pieni viive Johanssonin käyttämään meteorologiseen haihduntaindeksiin verrattuna. Kun potentiaalisen haihdunnan suuruutena yleensä pidetään 70-80 % Class A-astian haihdunnasta, ovat Hargreavesin kertoimet sinimailaselle huomattavan suuria.

Kasteltujen viljelykasvien evapotranspiraation ovat Stewart & Hagan (1969) todenneet olevan voimakkaassa riippuvuussuhteessa sekä heinäettä vehnäsadon määrän kanssa. Sadot ovat sitä suurempia mitä suurempia evapotranspiraatiot ovat. Saman on todennut myös Johansson (1974) Ruotsissa heinäällä ja ohralla. Myös useissa muissa tutkimuksissa on todettu selvä positiivinen korrelaatio sadon ja evapotranspiraation välillä (mm. Damagnez 1967, p. 343, Mustonen & McGuinness 1968, p.28). Tämä kasvun ja evapotranspiraation keskinäinen korrelaatio johtuu siitä, että samat tekijät, säteilyenergia ja vesi vaikuttavat samansuuntaisesti sekä haihduntaan että kasvuun.

Kokonaishaihdunnan on todettu jakautuvan kasvukauden aikana eräissä lysimetrikokeissa taulukon 8 mukaisesti (Harrold et al. 1959).

Taulukko 8. Kokonaishaihdunta ET (mm), transpiraatio T (mm) ja haihdunta maan pinnasta E_s (mm) maissilla lysimetrihavaintojen perusteella Coshoctonissa, Ohiossa 1957 (Harrold et al. 1959). Interseptio sisältyy transpiraatioon.

Table 8. Evapotranspiration ET (mm), transpiration T (mm), and evaporation from the soil E_s (mm) from a lysimeter study of corn in Coshocton, Ohio, in 1957 (Harrold et al. 1959). Interception is included in transpiration.

Ajanjakso Period	ET mm	T mm	E_s mm	T/ E_s
1.5. - 5.6.	93,7	0	93,7	0
6.6. - 30.6.	107,7	45,0	62,7	0,72
1.7. - 31.7.	169,5	105,2	64,3	1,62
1.8. - 31.8.	101,4	61,0	40,4	1,51
1.9. - 9.9.	13,7	4,1	9,6	0,43
Yhteensä Totals	486,0	215,3	270,7	0,80

Koko kasvukauden aikaisesta haihdunnasta on transpiraation osuus ollut 44 % haihdunnan maanpinnasta ollessa 56 %. Kasvukauden alussa ja lopussa on haihdunta maanpinnasta hallitseva kun taas kasvukauden keskellä voimakkaan kasvun aikana muodostaa transpiraatio suuremman osan kokonaishaihdunnasta.

3.23 Maan lämpövaraston muutosten vaikutus todelliseen haihduntaan

Todellinen haihdunta riippuu myös energiataseen komponenttien keskinäisestä suhteesta ja erityisesti ilman ja maan lämpövarastojen muutoksista. Energiataseen yhtälö voidaan esittää hieman yksinkertaistettuna yhtälön (15) muodossa.

$$R = S + LE + Q \quad (15)$$

jossa

R = nettosäteily

S = energia maan lämpenemiseen

LE = energia haihtumiseen

Q = energia ilman lämpenemiseen

L = veden höyrystymislämpö = 590 cal/g;

$$1 \text{ mm} \hat{=} 59 \text{ cal/cm}^2 \hat{=} 247 \text{ J/cm}^2$$

E = haihdunta

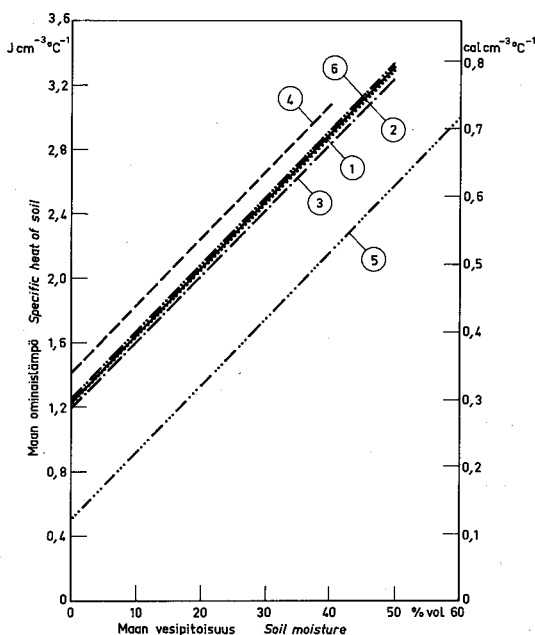
Keväällä ja alkukesällä energiaa sitoutuu maan lämpenemiseen, jolloin vastaavasti todellinen haihdunta jää pienemmäksi kuin ilmastollinen haihduttamiskyky ja maan kosteus muuten edellyttäisivät. Loppukesällä tilanne on päinvastainen; maa luovuttaa lämpövarastoaan ja todellinen haihdunta on yleensä suurempi kuin ilmastollinen haihduttamiskyky edellyttäisi.

Vihdissä sadetuskokeiden yhteydessä suoritettujen maan lämpötilahavaintojen perusteella on laskettu maahan tai maasta siirtynyt energia kesällä 1968 ja 1969. Maan lämpövaraston muutos on laskettu seuraavasti. Suoritettujen maa-analyysien sekä taulukossa 9 esitettyjen maaperän komponenttien tiheys- ja ominaislämpöarvojen (Monteith 1973) perusteella on laskettu maan ominaislämpö kosteuden funktiona (kuva 16).

Taulukko 9. Maaperän komponenttien tiheys ja ominaislämpö (Monteith 1973).

Table 9. Density and specific heat of soil components (Monteith 1973).

Maakomponentti Soil component	Tiheys Density	Ominaislämpö Specific heat	
		$\text{J g}^{-1} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$	$\text{J cm}^{-3} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$
	t m^{-3}		
Kvartsi, Quartz	2,66	0,80	2,13
Savi, Clay minerals	2,65	0,90	2,38
Orgaaninen aine, Organic matter	1,30	1,92	2,50
Vesi, Water	1,00	4,18	4,18
Ilma, Air	$1,20 \times 10^{-3}$	1,01	0,001



Kuva 16. Maan ominaislämpö. 1=Vihti, syv.5cm; 2=Vihti, syv.15 cm; 3=savi, huokostila 50 %; 4=savi, huokostila 40 %; 5=turve, huokostila 80 %; 6= turve, huokostila 50 %.

Fig. 16. Specific heat of soil. 1=Vihti, depth 5 cm; 2=Vihti, depth 15 cm; 3=Clay, pore space 50 %; 4=Clay, pore space 40 %; 5=Peat, pore space 80 %; 6=Peat, pore space 50 %.

Maan lämpövaraston muutos S on laskettu kaavalla (16).

$$S = h \cdot C \cdot \Delta T \quad (16)$$

jossa

h = maakerroksen paksuus (cm)

C = ominaislämpö ($\text{J cm}^{-3} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$)

ΔT = maan lämpötilan muutos laskentavälin aikana ($^\circ\text{C}$)

Laskenta on suoritettu 1 vuorokauden välein käyttäen C:n määrittämisessä maan kosteutena mitattua tai interpoloitua arvoa. Laskennassa käytetyt maakerrokset ovat olleet 0-5 cm, 5-20 cm, 20-60 cm ja 60-140 cm.

Roudan sulamiseen kulunut energia on määritetty routakerroksen paksuuden, maankosteuden, jään tiheyden ja sulamislämmön tulona. Näin saadusta luvusta on vähennetty likimäärin laskettu

Taulukko 10. Maan lämpövaraston muutos Vihdissä kesällä 1968 ja 1969 0-140 cm:n kerroksessa, lisäys=+ vähennys=-.
 Table 10. Change in soil heat storage at Vibti, South Finland in 1968 and 1969 in a 0-140 cm layer.

Jakso Period	Maan lämpövaraston muutos Change in soil heat storage					Muutos (%) säteilystä Jokioisissa Change in % of solar radiation at Jokioinen	
	J cm ⁻²		cal cm ⁻²		mmH ₂ O	Kokonaissäteily Total radiation %	Nettosäteily Net radiation %
Huhtikuu April	19-30 16-30	1968 1969	532 ¹⁾ 367 ¹⁾	127 ¹⁾ 88 ¹⁾	2 1	3,5 1,7	6,2 4,0
Huhtikuu April	19-30 16-30	1968 1969	4 791 ²⁾ 3 419 ²⁾	1 145 ²⁾ 817 ²⁾	19 14	31,8 15,9	55,9 37,1
Toukokuu May		1968 1969	2 032 2 700	486 645	8 11	4,8 4,7	9,5 10,9
Kesäkuu June		1968 1969	1 520 1 585	363 379	6 6	2,5 2,2	5,0 5,1
Heinäkuu July		1968 1969	509 682	122 163	2 3	1,0 1,1	1,8 2,4
Elokuu August		1968 1969	336 - 458	80 - 109	1 2	0,8	1,8
Syyskuu September		1968 1969	-1 801 -1 338	- 430 - 320	7 5		
Lokakuu, October	1-15 1-15	1968 1969	- 858 - 538	- 205 - 129	3 2		

1) vain maan lämpötilan muutos, *only the warming of soil*

2) mukana myös roudan sulamisen tarvittava energia vähennettynä sadannan tuomalla energialla, *also frost melting included*

sadannan tuoma lämpöenergia, jotta on voitu laskea maahan sitoutuneen energian osuus nettosäteilystä. Sadannan tuomaa energiaa ei ole otettu huomioon muiden ajanjaksojen kuin roudan sulamiskauden lämpövarastolaskelmissa, koska sen merkitys pitemmällä jaksolla on pieni.

Maan lämpövaraston muutokset on esitetty taulukossa 10.

Maan lämpenemiseen kulunut energia on ollut suurimmillaan toukokuussa, jolloin maan lämpenemiseen on käytetty 500-600 cal cm⁻² eli 10-11 % nettosäteilystä. Tämä vastaa haihduntaa noin 10 mm. Jos kuitenkin otetaan roudan sulamiseen tarvittava energia mukaan maan lämpövaraston muutokseen, muodostuu roudan sulamisjaksosta, huhtikuun jälkipuoliskosta, huippu maahan sitoutuneelle energialle. Tällöin peräti 800-1100 cal cm⁻² säteilyenergiaa on sitoutunut maahan. Tämä vastaa 14-19 mm haihduntaa ja edustaa 40-50 % nettosäteilyn energiasta. Säteilyn lisäksi on myös sadannan mukana tullut

energiaa, vuonna 1968 noin 80 cal cm⁻² ja vuonna 1969 noin 180 cal cm⁻² roudan sulamisaikana.

Kesäkuussa maan lämpenemiseen on kulunut molempina vuosina 350-400 cal cm⁻² eli 5 % nettosäteilystä. Tämä vastaa 6 mm haihduntaa.

Heinäkuussa maan lämpenemiseen on kulunut noin 150 cal cm⁻² eli noin 2 % nettosäteilystä. Haihduntana tämä vastaa 2-3 mm.

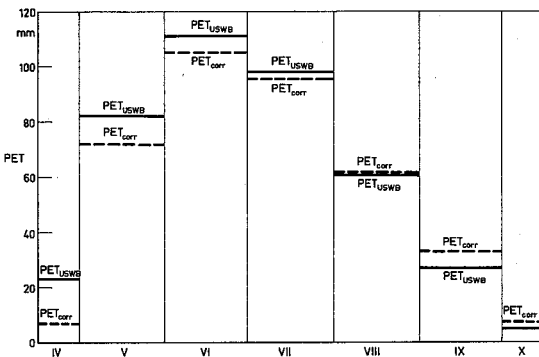
Elokuussa maan lämpövarasto on vuonna 1968 kasvanut, vuonna 1969 pienentynyt. Molemmissa tapauksissa muutos on ollut itseisarvoltaan samaa luokkaa eli noin 100 cal cm⁻², joka vastaa 1-2 mm:n haihduntaa.

Syyskuussa maa on luovuttanut lämpöenergiaansa 300-400 cal cm⁻², mikä vastaa noin 6 mm:n haihduntaa. Maan energiavaraston pieneminen syyskuussa on samaa suuruusluokkaa kuin kasvu kesäkuussa.

Lokakuun alkupuoliskolla maan lämpövarasto on pienentynyt 130-200 cal cm⁻², mikä vastaa 2-3 mm:n haihduntaa.

Mainittakoon, että Kulmala (1970) on todennut Jokioisissa kesällä 1968 maan lämpenemiseen kuluneen energian olleen kesäkuussa 16,0 %, heinäkuussa 6,4 % ja elokuussa 8,7 % nettosäteilystä, jotka ovat selvästi suurempia kuin Vihdissä todetut. Vähäiseltä osin tämä ero johtunee siitä, että syvin lämpötilahavainto Vihdissä on ollut vain 1 m syvyydellä maassa, kun lämpötilamuutoksia tapahtuu vaimeana vielä muutaman metrin syvyydelläkin. Koko lämpövaraston muutoksista syvemmät maakerrokset edustavat kuitenkin hyvin pientä osaa.

Kuvassa 17 on esitetty potentiaalinen evapotranspiraatio USWB:n kaavalla laskettuna keskimäärin 1953-1972 sekä vuosien 1968-1969 maan lämpövaraston keskimääräisellä muutoksella korjattuna Vihdissä.



Kuva 17. Potentiaalinen evapotranspiraatio Vihdissä 1958-1970 keskimäärin USWB:n kaavalla laskettuna (PET_{USWB}) sekä vuosien 1968-1969 maan lämpövaraston muutoksella korjattuna (PET_{corr}).

Fig. 17. Mean potential evapotranspiration at Vihti in 1958-1970 computed by the USWB formula and values corrected by changes in soil heat storage.

Maan lämpövaraston muutoksia ei ole ollut mahdollista laskea tarkasti Pohjois-Suomen olosuhteissa, koska samanaikaiset maan kosteus- ja lämpötilamittaukset puuttuvat. Voidaan kuitenkin päätellä, että tilanne Pohjois-Suomessa poikkeaa Etelä-Suomen oloista jossain määrin. Roudan sulaminen ja maan lämpeneminen alkaa pohjoisessa 1-3 viikkoa myöhemmin kuin etelässä, jolloin myös lämpenemisen haihduntaa pienentävä vaikutus ajoittuu pohjoisessa myöhäisem-

mäksi. Maan maksimilämpötilat jäävät keskikesällä pohjoisessa selvästi Etelä-Suomen arvoja matalammiksi, joten maan lämpenemiseen sitoutunut energia on Pohjois-Suomessa pienempi. Toisaalta kuitenkin routakerros on pohjoisessa suuresta vaihtelusta huolimatta yleensä niin paljon paksumpi kuin etelässä, että roudan sulamiseen ja maan lämpenemiseen kulunut energia yhteensä lienee Pohjois-Suomessa hieman suurempi kuin Etelä-Suomessa. Maan lämpötilavaihtojen perusteella voidaan karkeasti arvioida, että maan lämpenemiseen kulunut energia ilman sulamisenergiaa on Etelä-Suomessa suuruusluokkaa 5000 J cm^{-2} eli 1200 cal cm^{-2} ja Pohjois-Suomessa $3000-4500 \text{ J cm}^{-2}$ eli $700-1100 \text{ cal cm}^{-2}$. Jos oletetaan maan kosteudeksi roudan sulamisvaiheessa 40 % tilavuudesta, edellyttää 10 cm:n routakerroksen sulaminen noin 1200 J cm^{-2} . 40 cm:n paksuinen routakerros vaatii siten sulaakseen energiaa likimain saman verran kuin Etelä-Suomessa sitoutuu maan lämpenemiseen roudan sulamisen ja maan lämpövaraston maksimin välisenä aikana.

Maan lämpövaraston pieneminen alkaa Etelä- ja Pohjois-Suomessa suunnilleen samaan aikaan, mutta jatkuu etelässä merkittävänä pitempään kuin pohjoisessa. Tällöin vastaavasti maasta vapautuu energiaa Etelä-Suomessa myöhemmin kuin Pohjois-Suomessa.

4. KASTELUTARVE

4.1 Minimivedentarpeen vajuus

Taulukossa 11 on esitetty viljelykasvien likimääräinen minimivedentarve kasvukauden aikana Suomessa Kaiteran (1942) mukaan.

Kaitera (1942) on määritellyt minimivedentarpeen sademääräksi, jota pienempi sademäärä muodostuu kasvua rajoittavaksi tekijäksi huolimatta sopivista viljely- ja muokkaustoimenpiteistä.

Keskimääräinen sadanta on touko-kesäkuussa selvästi taulukossa 9 esitettyjä minimivedentarpeen arvoja pienempi Etelä- ja Länsi-Suomessa (taulukko 12). Minimivedentarpeen ja sadannan erotuksesta käytetään tässä nimitystä sadannan minimivajuus.

Minimivajuus vaihtelee suuresti eri vuosina ja

Taulukko 11. Viljelykasvien likimääräinen minimivedentarve (mm) eri kuukausina Suomen eteläpuoliskossa (Kaitera 1942).

Table 11. Minimum water demand of crops (mm) in southern Finland (Kaitera 1942).

Viljelykasvit Crop	Minimivedentarve (mm) eri kuukausina Minimum water demand (mm) in various months					
	V	VI	VII	VIII	IX	V-IX
	Heinämaat ja laitumet Hay, pasture	50	80	80	80	50
Syysviljat Winter grains	50	60	50	40	40	130-180
Kevätviljat Spring grains	40	70	60	30	-	170-250
Peruna Potato	-	40	60	70	50	170-250
Juurikasvit Root plants	30	60	70	70	50	200-300

eri kuukausina. Etelä-Suomessa Vihdissä ja Anjalassa keskimääräinen minimivajaus on kevätiljoilla toukokuussa noin 5 mm ja kesäkuussa 30 mm. Länsi-Suomessa Ylistarossa on viljakasvien keskimääräinen minimivajaus toukokuussa 0 mm ja kesäkuussa 30 mm. Heinä- ja elokuussa keskimääräinen sadanta ylittää kevätiljojen minimivedentarpeen sekä Vihdissä, Anjalassa että Ylistarossa.

Näillä paikkakunnilla on 20 vuoden havainto-

jakson vuosista ollut sellaisia, joissa sadanta on ollut minimivedentarvetta pienempi toukokuussa 60-65 %, kesäkuussa 90-95 % ja heinäkuussa 30-50 %.

Heinä- ja juurikasvien vedentarve on viljakasvien tarvetta suurempi loppukesällä, heinäkuussa ja erityisesti elokuussa. Niinpä ne kärsivät vedenpuutetta useina vuosina vielä heinä-elokuussakin.

4.2 Optimisadannan vajas

Hooli (1971) on eräiden maatalouskoeasemien ja maataloustilastojen perusteella määrittänyt sadannan, joka pitkäaikaisten havaintojen perusteella antaa suurimman sadon. Taulukossa 13 on esitetty yhteenveto näistä ko. tutkimuksen optimisadannoista touko-elokuussa.

Taulukossa 13 esitettyjen optimisadantojen vaihtelu johtuu pääasiassa maaperäeroista, sillä koalueiden ilmasto-oloissa ei ole suuria eroja ja myös satotason yleisen nousun vaikutusta on eliminoitu trenditarkastelulla. Sadanta on ollut selvästi tärkein satoisuuteen vaikuttava säätekijä alueilla, joilla maan kosteusolot ovat olleet epäedullisimmat hietä- ja aitosaven huomattavan osuuden vuoksi. Sen sijaan kosteusoloiltaan edullisilla alueilla, kuten eloperäisillä mailla on sadannan merkitys satoisuuteen ollut selvästi vähäisempi.

Taulukko 12. Sadannan keskimääräinen minimivajaus (mm) ja vajauksellisten vuosien osuus (%) Anjalassa, Vihdissä ja Ylistarossa touko-elokuussa 1953-1972.

Table 12. Average deficit of minimum water demand (mm) and the percentage of deficit years (%) at Anjala, southeastern Finland, Vihti, southern Finland and Ylistaro, western Finland in 1953-1972.

Kasvi Plant	Paikkakunta Community	Sadannan minimivajaus (mm) ja vajauksellisten vuosien osuus (%) eri kuukausina Average deficit of minimum water demand (mm) and the percentage of deficit years (%)							
		Toukokuu May		Kesäkuu June		Heinäkuu July		Elokuu August	
		mm	%	mm	%	mm	%	mm	%
Heinä Hay	Anjala	16	75	38	90	1	55	-6	50
	Vihti	14	70	40	95	7	60	-13	40
	Ylistaro	9	65	39	95	12	65	-3	45
Kevätviljat Spring cereals	Anjala	6	65	28	90	-19	30	-56	10
	Vihti	4	60	30	95	-13	40	-63	5
	Ylistaro	-1	60	29	95	-8	50	-53	15
Juurikasvit Root plants	Anjala	-4	50	18	80	-9	40	-16	40
	Vihti	-6	50	20	70	-3	45	-23	35
	Ylistaro	-11	40	19	80	2	50	-13	40

Taulukko 13. Viljelykasvien optimisadanta (mm) Etelä-Suomessa (Hooli 1971). Koalueiden maalajit: Vihdin Maasoja I = turve; Maasoja II = savi; Tammisto = liejusavi; Jokioinen = aitosavi; Uusimaa ja Varsinais-Suomi = pääasiassa hietasavi, hiesusavi, liejusavi; Satakunta = pääasiassa hietä, multamaa.

Table 13. Optimum precipitation (mm) for crops in South Finland (Hooli 1971). Soil types of test areas: Vibti, Maasoja I = peat land; Maasoja II = clay; Tammisto = clay-gyttja; Jokioinen = heavy clay; Uusimaa and Varsinais-Suomi = mainly silt and clay-gyttja; Satakunta = mainly fine sand, silt and humus.

Kasvi Plant	Paikkakunta Place	Optimisadanta (mm) Optimum precipitation					
		V	VI	VII	VIII	V-VI	V-VII
Kevätvehnä Spring wheat	Tammisto	50	68	107		108	184
	Jokioinen	47	66	84	106	97	286
	Uusimaa	70		120	91		
	Varsinais-Suomi	31	71			101	198
	Satakunta	51		89			
Ohra Barley	Tammisto		93		57	128	243
	Jokioinen	64	82			121	74
	Uusimaa			72	94		
	Varsinais-Suomi		64	111		98	190
Kaura Oats	Satakunta		59	96			
	Maasoja I	40			42		
	Maasoja II		86	89	83	75	166
	Tammisto		104	90		107	286
	Jokioinen		82			150	240
Peruna Potato	Varsinais-Suomi		76	95			238
	Satakunta		81	96			
	Maasoja I	23	38		92		
	Maasoja II	23		105	172		
	Tammisto		56	75	73	103	
Heinä Hay	Jokioinen			92	114		
	Varsinais-Suomi		79	64		81	
	Satakunta	51	56	77	102		
	Maasoja I		63				
	Maasoja II		45			75	
Varsinais-Suomi		55	53			136	
	Satakunta	62	71				

Taulukon 13 arvot esittävät niitä sademääriä, joiden vallitessa on tutkimusalueilla saatu suurimmat sadot. Koska kyseessä ovat luonnonsateet, liittyy niihin joukko muita säätekijöitä, jotka vaikuttavat satoon. Merkitsevän sateisuus yleensä mm. runsasta pilvipittoa, vähäistä säteilyä ja usein myös alempia lämpötiloja kesäaikana, vaikkakaan korrelaatiot eivät ole olleet tilastollisesti merkitseviä (Hooli 1971). Näin ollen on satoa lisäävien runsaiden sateiden kanssa samanaikaisesti vaikuttamassa usein satoa alentavia tekijöitä. Sadetuksen yhteydessä eivät nämä negatiiviset tekijät yleensä ole vaikuttamassa ja tämän vuoksi kastelun optimaalinen vedentarve ainakin alkukesällä lienee suurempi kuin optimisadanta.

Hallgren (1947) on Ruotsissa vastaavalla taval-

la määrittänyt touko-kesäkuun optimisadannaksi ohralla 100-110 mm ja kauralla 100-120 mm. Hallgren on katsonut tutkimustensa perusteella myös, että optimisadanta suurenee lämpötilan noustessa. Lämpötilalla ei kuitenkaan ilmeisesti ole tässä suhteessa ratkaisevaa merkitystä Suomen oloissa (Hooli 1971).

4.3 Sadannan vajuus potentiaalisen evapotranspiraation perusteella

Taulukossa 14 ja kuvissa 18-21 on esitetty USWB:n kaavalla lasketun PET:n ja sadannan keskimääräinen erotus jaksolta 1958-1970 touko-heinäkuussa eräillä paikkakunnilla Suomessa. Erotusta

Taulukko 14. Ilmastollinen sadannan vajuus PET-P (mm) eräillä paikkakunnilla Suomessa keskimäärin 1958-1970.
Table 14. Average precipitation deficit PET-P (mm) in Finland in May-July 1958-1970.

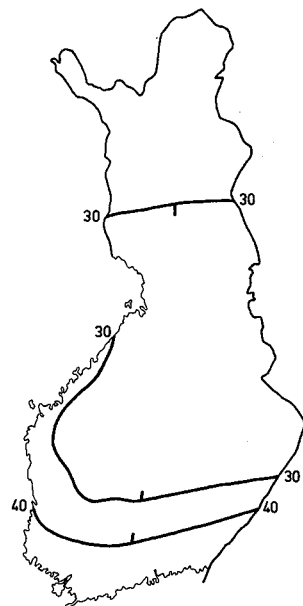
Paikkakunta <i>Community</i>	Keskimääräinen sadannan vajuus PET-P (mm) <i>Mean rainfall deficit PET-P</i>			
	V	VI	VII	V-VII
Kotka	39	73	32	144
Utti	40	76	27	143
Vihti	44	78	14	136
Jokioinen 1)	39	71	7	117
Kokemäki	31	68	29	129
Kankaanpää 2)	31	61	31	123
Juupajoki	29	58	9	96
Lappeenranta 3)	43	68	26	136
Jyväskylä	26	55	0	81
Ähtäri	27	41	19	87
Ylistaro	25	72	34	131
Vaasa 4)	37	79	41	157
Kruununkylä	36	76	42	154
Haapajärvi	25	57	43	126
Outokumpu	24	47	19	90
Revonlahti	26	51	37	114
Vieremä	20	41	15	76
Ristijärvi 5)	22	42	15	79
Pelso 6)	16	39	18	72

- 1) Kauden 1965-1970 arvot muunnettu vastaamaan kautta 1958-1970
- 2) Kauden 1960-1970 arvot muunnettu vastaamaan kautta 1958-1970
- 3) Vuodesta 1965 alkaen arvot Ruokolahdesta
- 4) Vaasan havaintokauden 1961-1970 arvot muunnettu vastaamaan kautta 1958-1970
- 5) Vuodet 1969-1970 Kajaanista. Kauden 1959-1970 arvot muunnettu vastaamaan kautta 1958-1970
- 6) Kauden 1965-1970 arvot muunnettu vastaamaan kautta 1958-1970

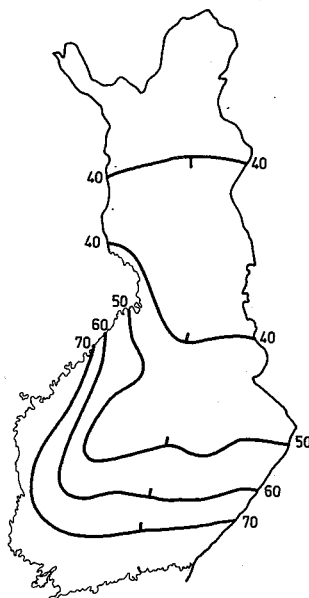
nimitetään tässä yhteydessä ilmastolliseksi sadannan vajaukseksi.

Taulukon 14 arvoista osa on jouduttu redusoi-
 maan kautta 1958-1970 vastaavaksi lähellä sijaitsevan havaintoaseman perusteella. Niinpä Jokioisten havaintosarjan keskiarvot on muunnettu vastaamaan kautta 1958-1970 Vihdin havaintojen perusteella, Kankaanpään arvot Kokemäen havaintojen perusteella, Vaasan arvot Ylistaron havaintojen perusteella, Ristijärven arvot Revonlahden perusteella sekä Pelson arvot Ristijärven ja Revonlahden perusteella.

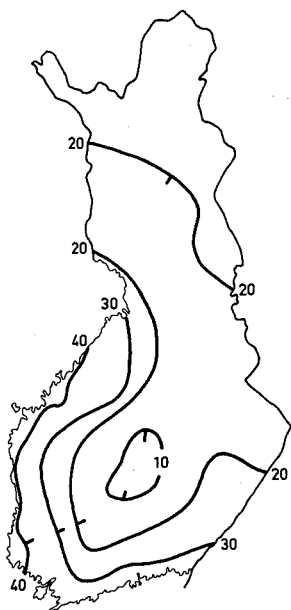
Potentiaalisen evapotranspiraation havaintojen



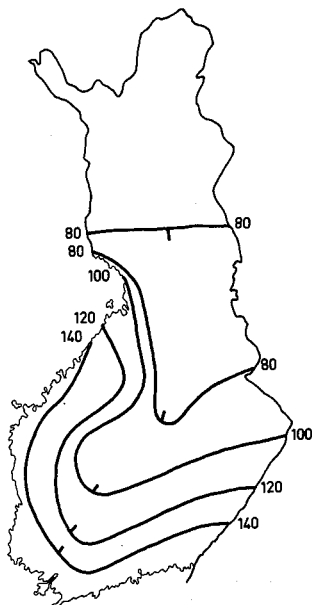
Kuva 18. Sadannan vajuus PET-P (mm) keskimäärin toukokuussa 1958-1970 Etelä- ja Keski-Suomessa.
Fig. 18. Mean precipitation deficit PET-P (mm) for May in Finland 1958-1970.



Kuva 19. Sadannan vajuus PET-P (mm) keskimäärin kesäkuussa 1958-1970 Etelä- ja Keski-Suomessa.
Fig. 19. Mean precipitation deficit PET-P (mm) for June in Finland in 1958-1970.



Kuva 20. Sadannan vajeus PET-P (mm) keskimäärin heinäkuussa 1958-1970 Etelä- ja Keski-Suomessa. Fig. 20. Mean precipitation deficit PET-P (mm) for July in Finland in 1958-1970.



Kuva 21. Sadannan vajeus PET-P (mm) keskimäärin touko-heinäkuussa 1958-1970 Etelä- ja Keski-Suomessa. Fig. 21. Mean precipitation deficit PET-P (mm) for May-July in Finland in 1958-1970.

Taulukko 15. Keskimäärin kerran 20 vuodessa sattuva sadannan vajeus PET-P (mm) kesäkuussa ja touko-heinäkuussa vuosijakson 1958-1970 perusteella.

Table 15. Precipitation deficit PET-P (mm) with probable recurrence interval of 20 years in Finland in 1958-1970.

Paikkakunta Community	(PET-P) 1/20 (mm)	
	Kesäkuu June	Touko-heinäkuu May-July
Kotka	100	240
Utti	120	255
Vihti	115	250
Kokemäki	115	240
Juupajoki	110	215
Lappeenranta	115	230
Jyväskylä	115	170
Ylistaro	120	250
Kruununkylä	145	285
Haapajarvi	120	230
Outokumpu	140	210
Revonlahti	130	265
Vieremä	125	205
Ristijärvi	150	240

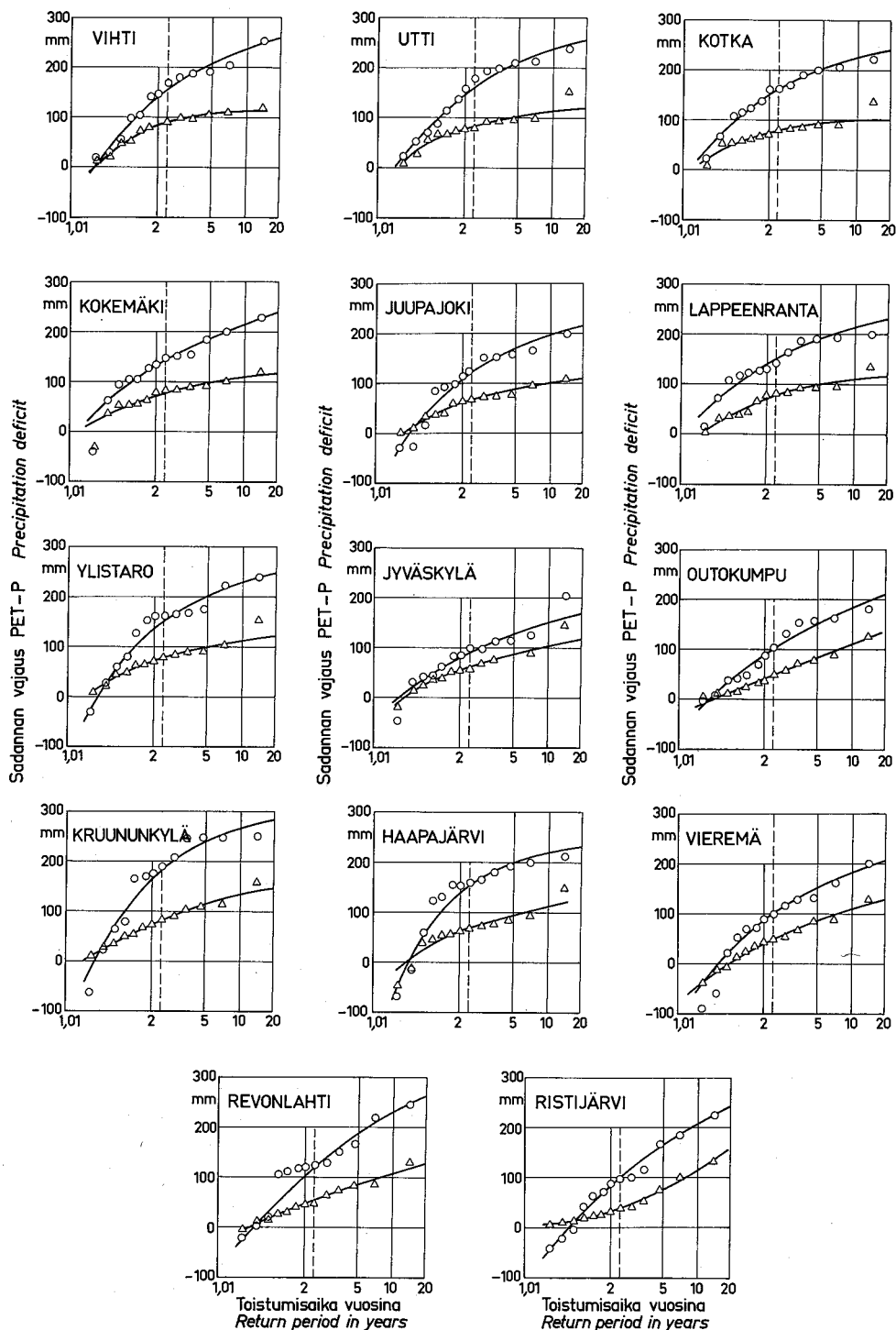
vähyyden vuoksi ovat kuvien 18-21 käyrät likimääräisiä. Niitä on pyritty täsmentämään pitkäaikaisen sadehavaintojen (Helimäki 1967) perusteella.

Kuten kuvista 18-21 voidaan todeta, on eteläisellä ja läntisellä rannikkoalueella keskimäärin selvästi suurin sadannan vajeus (PET-P). Vaikka Oulun-Kemin rannikkoalueelta ei ole suoranaisia PET-havaintoja, sadannan vähyyys näillä alueilla viittaa siihen, että sadannan vajeus tälläkin rannikkokaistalla on suuri.

Kuvassa 22 on esitetty kesäkuun ja touko-heinäkuun sadannan vajauksen (PET-P) toistuvuus erällä paikkakunnilla vuosijakson 1958-1970 perusteella. Näiden toistuvuusanalyysien perusteella arvioidut keskimäärin kerran 20 vuodessa sattuvat vajaukset on esitetty taulukossa 15.

Voidaan todeta, että USWB:n kaavan perusteella lasketut sadannan vajaukset ovat Pohjois-Suomen olosuhteissa huomattavan suuria toistuvuudeltaan harvinaisina kesinä. Tämä johtuu ilmeisesti osittain siitä, että pohjoisessa on teoreettinen tulosäteily hiukan suurempi kuin etelässä ja edellytykset voimakkaaseen haihduntaan keskikesällä pohjoisessa ovat siten olemassa.

Pohjois-Suomen suurten sadannan vajuusten merkitystä kastelua ajatellen vähentää se, ettei



Kuva 22. Kesäkuun (kolmiot) ja touko-heinäkuun (ympyrät) sadannan vajauksen toistuvuus erällä paikkakunnilla Suomessa vuosijakson 1958-1970 perusteella.

Fig. 22. Frequency analysis of precipitation deficit for June (triangles) and for May-July (circles) in Finland in 1958-1970.



Kuva 23. Pellon osuus alasta Suomessa (%) (Mustonen 1968).

Fig. 23. Percentage of cultivated land in Finland (Mustonen 1968).

peltoa ole maan pohjoisemmissa osissa niin runsaasti kuin etelässä (kuva 23) eikä maanviljelys ole niin voimaperäistä kuin etelämpänä. Lisäksi maan lämpeneminen sitoo energiaa Pohjois-Suomessa vielä keskikesälläkin, mikä vähentää todelliseen haihtumiseen jäävää energiaa kuten kohdassa 3.23 on esitetty.

Sadannan keskimääräisen vajauksen suhteen pellon osuus noudattelee sadannan vajauksen vaihtelua Suomessa niin, että sadannan vajuus on suurin siellä, missä peltoa on runsaimmin. Lisäksi poudanarkojen maalajien osuus on suurin samalla suurimman sadannan vajauksen alueella Lounais-Suomessa (Elonen 1976).

Kuten edellä on todettu, potentiaalisen evapotranspiraation käyttö soveltuu lähinnä kastelutarpeen suunnitteluun. Sen sijaan jatkuvaan kastelutarpeen arviointiin käytännössä se on hieman liian hankala. Kuten kohdassa 3.22 esitettiin, voidaan tulosäteilyn ja veden höyrystymislämmön perusteella laskea vesimäärä, jonka käytettävissä oleva energia voi muuttaa haihdunnaksi, mikäli maassa on kosteutta riittävästi. Olettaessa, että 60 % tulevasta kokonaissäteilystä käytetään haihduntaan (Puustjärvi 1970, Gates & Hanks 1967), saadaan esim. Etelä-Suomen keskimääräisestä kesäkuun tulevasta kokonaissäteilystä (500 cal/cm²d) haihduntaa 5 mm/d.

Täten lasketut haihdunta-arvot ovat ilmeisesti peltoviljelyä ajatellen kuitenkin liian suuria ja vaativat jo potentiaalisen haihdunnan tasolle (PET/USWB) redusoimista varten korjauskertoimeksi likimain luvun 0,7.

4.4 Kastelutarve maan kosteuden ja veden sitoutuneisuuden perusteella

Maaperään perustuvan kasteluajankohdan valinta perusteena voidaan käyttää joko maan vesipitoisuutta tai veden sitoutuneisuutta. Maalajivaihtelu aiheuttaa vesipitoisuuden ja veden sitoutuneisuuden vuorosuhteeseen huomattavaa vaihtelua (kuvat 12 ja 13). Käytännössä valitaan sadetusajankohdan kriteeriksi yleensä joko vesipitoisuusraja, joka vastaa tiettyä osuutta hyötykapasiteetista tai kiinteä sitoutuneisuusraja. Tällöin valintakriteerit eivät kaikilla maalajeilla vastaa toisiaan.

Sadetusajankohdan valinnasta hyötykapasiteetin perusteella on karkeana ohjearvona usein esitetty (mm. Johansson 1970, Clark 1967, Windsor & Chow 1971), että edullisin sadetusajankohta on silloin, kun maan hyödyllisestä vesikapasiteetista on kulunut 50 %. Eri kasveille on kuitenkin esitetty huomattavasti poikkeavia prosenttirajoja, ja samojen viljelykasvienkin kohdalla esiintyy vaihteluja (taulukko 16).

Prosenttirajojen todellinen merkitys riippuu suuresti tarkasteltavan maakerroksen paksuudesta. On selvää, että ohuessa maakerroksessa saavutetaan esim. 50 %:n raja nopeammin kuin paksussa maakerroksessa. Yleensä kerrospaksuudeksi otetaan kyseisen kasvin juuristosyvyys tai tehokas juuristosyvyys.

Taulukko 16. Sadetusajankohdan määrittäminen juuristokerroksen hyötykapasiteetin perusteella.

Table 16. Tolerable depletion of available soil water storage in the root layer.

Viljelykasvi <i>Crop</i>	Sallittu hyötykapasiteetin tyhjentyminen <i>Tolerable depletion of available water storage</i>	Viite <i>Reference</i>
Vehnä <i>Wheat</i>	50 %	Johansson 1970 Clark 1967 Windsor & Chow 1971
	70-80 % kasvuvaiheessa 90 % kypsymisvaiheessa	Robins et al. 1967 »
Ohra <i>Barley</i>	65-75 % kasvuvaiheessa 80-90 % kypsymisvaiheessa	» »
Peruna <i>Potato</i>	30-50 % 25 %	» Linner 1976
Kaalit <i>Cabbage</i>	50 %	Vittum & Flocker 1967
Maissi <i>Corn</i>	55-65 %	Robins et al. 1967

On esitetty (Israelsen & Hansen 1962, Danielson 1967), että kasvit ottavat transpiraatioon tarvitsemastaan vedestä 40 % juuristovyöhykkeen ylimmästä neljänneksestä, 30 % seuraavasta, 20 % seuraavasta ja 10 % alimmasta neljänneksestä, jolloin tehokkaana juuristovyöhyteenä voidaan pitää 70-80 % suurimmasta juuristovyöhykkeestä. On myös esitetty (Penman 1963), ettei ole olemassa kiinteitä kasvikohtaisia juuristovyöhykkeitä, vaan että kasvi pyrkii muodostamaan kussakin maalaajissa sellaisen juuristovyöhykkeen, että juuristovyöhykkeen hyötykapasiteetti on tälle kasville ominainen vakio. Useat tutkijat ovat kuitenkin suosittaneet eri kasveille verrattain kiinteitä kasvikohtaisia tehokkaan juuristovyöhykkeen arvoja. Taulukossa 17 on esitetty Salosen (1949) tutkimuksessa todettuja juuriston keskimääräisiä maksimisyvyyskerroksia eräillä viljelykasveilla Suomessa.

Juuristovyöhykkeen vaihtelee Salosen tutkimuksen mukaan huomattavasti ollen esim. kevätiljoilla yleensä välillä 35-90 cm. Vaihtelu ei kuitenkaan selity johdonmukaisesti maalajien eroavuudella kahta tapausta lukuunottamatta:

- 1) pohjamaan ollessa hapan jäävät happamuuden suhteen arat kasvit matalajuuriseksi
- 2) pohjamaan ollessa hyvin tiivistä ja kovaa eivät

Taulukko 17. Eräiden viljelykasvien suurin juuristovyöhykkeen keskimäärin Suomessa (Salonen 1949).

Table 17. Mean maximum root depth of crops (cm) in Finland (Salonen 1949).

Viljelykasvi <i>Crop</i>	Suurin juuristovyöhykkeen <i>Maximum root depth</i> cm
Kevätvehnä, <i>Spring wheat</i>	50
Ohra, <i>Barley</i>	60
Kaura, <i>Oats</i>	60
Syysvehnä, <i>Winter wheat</i>	85
Ruis, <i>Rye</i>	60
Apila 1. vuosi, <i>Clover 1. year</i>	55
Apila 2. vuosi, <i>Clover 2. year</i>	75
Timotei 1. vuosi, <i>Timothy 1. year</i>	40
Timotei 2. vuosi, <i>Timothy 2. year</i>	50
Peruna, <i>Potato</i>	40

muiden kuin apilan juuret pysty tunkeutumaan siihen muuten kuin halkeamia ja madonreikiä myöten.

Savimaissa juuret ovat tunkeutuneet vähintään yhtä syväälle kuin löyhemmissä hiekka- ja hietamaissa savimaiden halkeamista johtuen.

Salosen tutkimuksessa todetut juuristovyöhykkeet ovat kautta linjan selvästi pienempiä kuin kasvinviljelylle edullisemmillä alueilla ulkomailla on todettu. Niinpä esim. kevätiljoille esitetään ulkomaisissa tutkimuksissa yleisesti (Clark 1967, p.12, Robins & al. 1967, p. 625) 150-200 cm juuristovyöhykkeitä. Myös Vihdin ja Kähärin & Elosen (1969) tutkimukset (kohta 6.23) viittaavat melko pieniin juuristovyöhykkeisiin.

Kastelua ajatellen sopivan juuristokerroksen valinnalla on oleellinen merkitys oikean kastelujärjestelmän löytämiseksi. Mikäli lähtökohdaksi otetaan liian paksu kerros, johtaa se auttamattomasti sadetuksen myöhästymiseen.

Maaveden sitoutuneisuutta pidetään yleensä (mm. Haise & Hagan 1967) maan vesipitoisuutta parempana kasvien kastelutarpeen indikaattorina, koska se vastaa paremmin kasvien vedenotto-mekanismia. Ongelman muodostaa tässäkin kriteerissä maaveden jännityksen mittaussyvyys. On esitetty mittaamista usealta syvyydeltä (Taylor 1952), mikä kuitenkin useita instrumentteja (tensiometrejä tms.) vaativana ei käytännössä juuri tule kysymykseen. On myös esitetty, että juuriston suurimman aktiivisuuden syvyyttä voidaan käyttää mittaussyvyytensä (Taylor 1965).

Tämä vastannee Suomessa likimain 15-20 cm syvyyttä eli multakerroksen alaosa, jota mm. Elonen on suositellut (Elonen 1975).

Taulukossa 18 on esitetty eri viljelykasveille sallittavat maaveden sitoutuneisuuden arvot juuriston suurimman aktiivisuuden syvyydellä Haisen ja Haganin mukaan.

Taulukko 18. Eri viljelykasveille sallittavat maaveden jännityksen arvot juuriston suurimman aktiivisuuden syvyydellä (Haise & Hagan 1967).

Table 18. Tolerable soil water suction for maximum yields of various crops at the depth of maximum root activity.

Kasvi Plant	Maaveden jännitys Soil water suction bar
Viljakasvit, kasvun aikana <i>Small grains, vegetative</i>	0,40-0,50
Viljakasvit, kypsymisvaiheessa <i>Small grains, ripening</i>	8-12
Peruna, <i>Potato</i>	0,30-0,50
Kaali, <i>Cabbage</i>	0,60-0,70
Heinä, sinimailanen, kasvun aikana <i>Alfalfa, vegetative</i>	2-4
Heinä, sinimailanen, kasvun jälkeen <i>Alfalfa, ripening</i>	8-15
Tomaatti, <i>Tomato</i>	0,80-1,50
Mansikka, <i>Strawberry</i>	0,20-0,30

Keskimääräisessä ruokamullassa Ruotsissa (kuva 13, käyrät 5 ja 6, Andersson 1972) vastaa esim. 0,50 baria 31 % vesipitoisuutta eli 65 % hyötykapasiteetista. Kun kyseisen maan kenttäkapasiteetti on 39 %, on suurin mahdollinen kasiteluveden varastoitumismäärä esim. 50 cm kerroksessa 8 % x 500 mm = 40 mm, mikäli maa oletetaan homogeeniseksi.

Taulukossa 19 on esitetty maaveden jännityksen ja maan vesipitoisuuden vastaavuus eräillä maalajeilla Anderssonin (1972) pF-käyrien perusteella. Taulukkoon on myös merkitty eri kosteusarvoilla maassa jäljellä oleva kosteus prosentteina hyötykapasiteetista sekä suurin sadetusmäärä, joka voi varastoitua eri maalajeihin mainituissa kosteusoloissa. Maan kosteuden ja kenttäkapasiteetin erotuksesta käytetään nimitystä maan kosteusvajausta.

Eri kasveille suositeltavat suurimmat sallitut maaveden jännitykset, sekä tässä jännityksessä ko. kasvin tehokkaaseen juuristosyvytyteen varastoituva maksimivesimäärä eri maalajeissa on esitetty taulukossa 20. Tehokkaaksi juuristosyvytydeksi on otettu 75 % Salosen (1949) esittämistä suurimmista juuristosyvytyksistä, suurin sallittu maaveden jännitys on määritetty Haisen ja Haganin (1967) mukaan ja eri maalajien vedensitomisoimaisuudet ovat Anderssonin (1972) tutkimusten mukaiset (kuva 13).

Taulukko 19. Maaveden jännitys, sitä vastaava maan kosteus, käytettävissä oleva maan kosteus ja kosteusvajausta eräillä maalajeilla.

Table 19. Soil water suction, the respective soil moisture, available soil moisture and soil moisture deficit of different soils.

Maaveden jännitys Soil water suction		Vesipitoisuus (SM) eri maalajeissa ¹⁾ Soil moisture (SM) in different soils ¹⁾ % vol							Käytettävissä oleva maan kosteus Available soil moisture (SM-WP)/(FC-WP) %							Maan kosteusvajausta Soil moisture deficit (FC-SM) % vol						
bar	pF	2	4	6	8	10	Tv	2	4	6	8	10	Tv	2	4	6	8	10	Tv			
0,20	2,3	27	33	36	39	41	53	59	81	90	86	90	71	14	6	3	4	2	16			
0,40	2,6	21	29	33	37	40	41	41	69	79	78	85	50	20	10	6	6	3	28			
0,50	2,7	20	27	31	36	40	37	38	62	72	75	85	43	21	12	8	7	3	32			
1,00	3,0	17	18	26	34	38	28	29	34	55	68	75	27	24	21	13	9	5	41			
2,00	3,3	14	14	22	30	36	23	20	22	41	54	65	18	27	25	17	13	7	46			
3,00	3,5	12	13	20	27	34	21	15	19	34	43	55	14	29	26	19	16	9	48			
5,00	3,7	10	11	17	23	31	19	9	12	24	28	40	11	31	28	22	20	12	50			
10,00	4,0	8	9	13	18	26	16	3	6	10	11	15	5	33	30	26	25	17	53			

1) Numerot viittaavat kuvan 13 maalajeihin, *indices refer to fig. 13.*

Taulukko 20. Eräille kasveille suositeltavat suurimmat sallitut maaveden jännitykset sekä tätä vastaavat maan kosteusvajaukset 25 cm ja tehokkaan juuristosyvyyden kerroksessa eräillä maalajeilla.

Table 20. Tolerable soil water suction and the respective soil moisture deficit in the 25 cm and in the efficient root layer.

Kasvi Plant	Maaveden- jännitys Soil water bar	Maan kosteusvajaus tehokkaan juuristosyvyyden kerroksessa ¹⁾ Soil moisture deficit in the layer of efficient root depth ¹⁾ mm						Maan kosteusvajaus 25 cm kerroksessa Soil moisture deficit in 25 cm surface layer of soil mm					
		2	4	6	8	10	Tv	2	4	6	8	10	Tv
		Mansikka, <i>Strawberry</i>	0,20							35	15	8	10
Peruna, <i>Potato</i>	0,40	60	30	18	18	8	84	50	25	15	15	7	70
Kevätvehnä, <i>Spring wheat</i>	0,50	79	45	30	26	11	120	53	30	20	18	8	80
Ohra, kaura, ruis, <i>Barley, oats, rye</i>	0,50	95	54	36	32	15	145	53	30	20	18	8	80
Tomaatti, <i>Tomato</i>	1,00							60	53	33	23	13	103
	2,00							68	63	43	33	18	115
Heinä 1. vuosi, <i>Hay 1st year</i>	3,00	105	94	69	65	33	170	73	65	48	45	23	120
Heinä 2. vuosi, <i>Hay 2nd year</i>	3,00	140	120	90	85	43	225	73	65	48	45	23	120
	5,00							78	70	55	50	30	125
Kypsyvät viljakasvit, <i>Grain crops, ripening</i>	10,00	130	120	105	100	70	210	83	75	65	63	43	133

1) Numerot viittaavat kuvan 13 maalajeihin, *indices refer to fig. 13.*

Maalaji on oletettu huokoisuus- ja veden sitoutuneisuusominaisuuksiensa suhteen homogeeniseksi tehokkaaseen juuristosyvyyteen saakka. Käytännössä tämä ei pidä täysin paikkaansa, sillä syvemmällä oleva maa sisältää vähän orgaanista ainesta eikä tästä johtuen varastoi vettä tilavuusyksikköä kohden yhtä paljon kuin multakerros.

Tämän vuoksi on taulukossa esitetty myös suurin mahdollinen varastoituminen 25 cm ruokamultakerroksessa, joka yleensä voidaan olettaa likimain homogeeniseksi. Kastelua ajatellen lie-nee kasvien suurin suositeltava kastelumäärä eri maalajeilla hieman 25 cm kerroksen perusteella laskettuja arvoja suurempi, mutta juuristosyvyyden perusteella laskettuja arvoja pienempi.

5. VALUNTA

5.1 Kesäaikaisen valunnan toistuvuus

Kasteluveden saantia ja riittävyttä arvioitaessa on oleellista alkukesän, lähinnä kesäkuun valun-
ta. Tosin eräät tutkimustulokset viittaavat siihen,

että kastelutarve on usein merkittävä jo touko-kesäkuun vaihteessa (Elonen 1976). Tässä yhteydessä tarkastellaan valuntaa kuitenkin lähinnä kesäkuun osalta, sillä toukokuussa on vettä lähes poikkeuksetta riittävästi saatavissa. Toisaalta kastelutarve etenkin viljakasvien osalta ei ole merkittävä enää kesäkuun jälkeen.

Taulukossa 21 on esitetty eräiden vesistöjen keskimäärin kerran 20 vuodessa sattuvien ja keskimääräisten kuukausivalumien arvot kesä- ja heinäkuussa.

Kuvassa 24 on esitetty toistuvuusanalyysien perusteella piirretyt valumakäyrät touko-elokuussa. Käyrät esittävät valuman suuruutta keskimäärin kerran 2,3, 5, 10 ja 20 vuodessa kesäaikana. Toistuvuusanalyysit on tehty kuukausiarvojen ja kesäkuussa 10 päivän arvojen perusteella ja tämä tasoittaa käyrien kulkua. Tasoitus on tarpeen vuosisarjojen lyhyiden vuoksi.

Taulukossa 21 ja kuvasta 24 voidaan todeta, että kesäkuun keskivaluma on Etelä- ja Lounais-Suomen järveltämillä valuma-alueilla 1-2 l/s km² ja kasvaa voimakkaasti järvisyyden lisääntyessä. Keskimäärin kerran 20 vuodessa jää kesäkuun valuma 30-40 %:iin kesäkuun keskivalumasta.

Taulukko 21. Kesäkuun ja heinäkuun keskivaluma ja keskimäärin kerran 20 vuodessa sattuva valuma (l/skm²) eräissä vesistöissä Suomessa.

Table 21. Mean runoff (l/s km²), and runoff with probable recurrence interval of 20 years in June and July in southern and western Finland.

Vesistö Basin	Ala Area km ²	Järvisyys Lake percentage %	Kesäkuu June		Heinäkuu July	
			q 1/20	Mq	q 1/20	Mq
Aurajoki	727	0,2	0,30	1,3	0,31	1,6
Loimijoki	2 650	3,5	1,3	4,4	0,59	2,4
Mäntsälänjoki	780	2,5	1,5	3,8	0,39	2,4
Lapuanjoki	3 690	3,0	2,1	5,9	1,0	3,1
Kiskonjoki	600	9,8	2,0	4,6	0,44	1,9
Pihlajavesi	375	10,5	6,4	16,0	3,2	8,2
Kylmänoja	4,04	0	0,9	2,8	1,1	2,5
Löytäneenoja	5,64	0	0,05	0,7	0	0,38
Niittyjoki	29,7	0	1,2	2,1	1,0	2,9
Haapajyrä	6,09	0	0,22	1,7	0,02	0,85
Kainastonluoma	79,2	0	0,56	2,7	0,10	1,5
Kuikkisenoja	8,05	0	1,0	3,2	0,20	1,2

5.2 Kesäkuun valunta

Seuraavassa käytetään yksittäisten vuosien kesäkuun keskivalumasta nimitystä kesäkuun valuma sekaannuksen välttämiseksi useiden vuosien keskiarvojen kanssa. Samaa periaatetta on noudatettu lämpötilan suhteen ja myös lyhenteissä.

Kuten voidaan todeta mm. taulukosta 21 ja kuvasta 24, kesäkuun valuma vaihtelee varsin paljon eri vuosina ja eri alueilla. Käyttäen vesihallituksen hydrologian toimiston ns. pienten alueiden aineistoa on kesäkuun valumalle valikoivan regressioanalyysin avulla laskettu malli. Analyysissä on ollut mukana 300 havaintoa vuosijaksolla 1958-1971. Mallissa on ollut selittävinä muuttujina maanpinnan kaltevuus (LS), valuma-alueen ala (A), kesäkuun lämpötila (T₆), toukokuun lämpötila (T₅), kesäkuun sadanta (P₆), toukokuun sadanta (P₅), huhtikuun sadanta (P₄), lumen vesiarvo 15.3. (WS), pellon osuus valuma-alasta (FP), suon osuus valuma-alasta (PP), ojitetun suon osuus valuma-alasta (PP_d), puuston kuutiomäärä valuma-alaa kohti (VS), sekä sora-alueiden (GP), hiekka-alueiden (SP), hieta-alueiden (HP), soramoreenialueiden (GMP), hiekkamoreenialueiden (SMP), hietamoreenialueiden (HMP) ja metsän (MP) osuus valuma-alueen alasta.

Selittäjien transformaatioina on lisäksi ollut

regressioanalyysissä valittavina

(LS)², (A)^{1/3}, (T₅)², (T₆)², (P₄)², (P₅)², (P₆)², (WS)², (FP)², FP + PP_d, GP + SP + GMP + SMP, GP + SP + HP + GMP + SMP + HMP

Selittävän ja tärkeimpien selittävien muuttujien väliset korrelaatiokertoimet tuhannesosina on esitetty seuraavassa asetelmassa:

L	(LS) ²	A	(A) ^{1/3}	T ₆	(T ₆) ²	T ₅
159	117	-9	-30	6	15	-149
(T ₅) ²	P ₆	(P ₆) ²	WS	(WS) ²	P ₅	(P ₅) ²
-171	582	602	225	203	172	166
P ₄	(P ₄) ²	FP	(FP) ²	PP	PP _d	VS
-5	2	-390	-370	206	56	203
GP	SP	HP	GMP	SMP	HMP	MP
-59	-68	-207	-28	99	205	450

Parhaita selittäjäyhdistelmiä on esitetty yhtälöissä (17)-(22)

$$q_6 = 0,00060 (P_6)^2 + 0,22 \quad R=0,602 \quad (17)$$

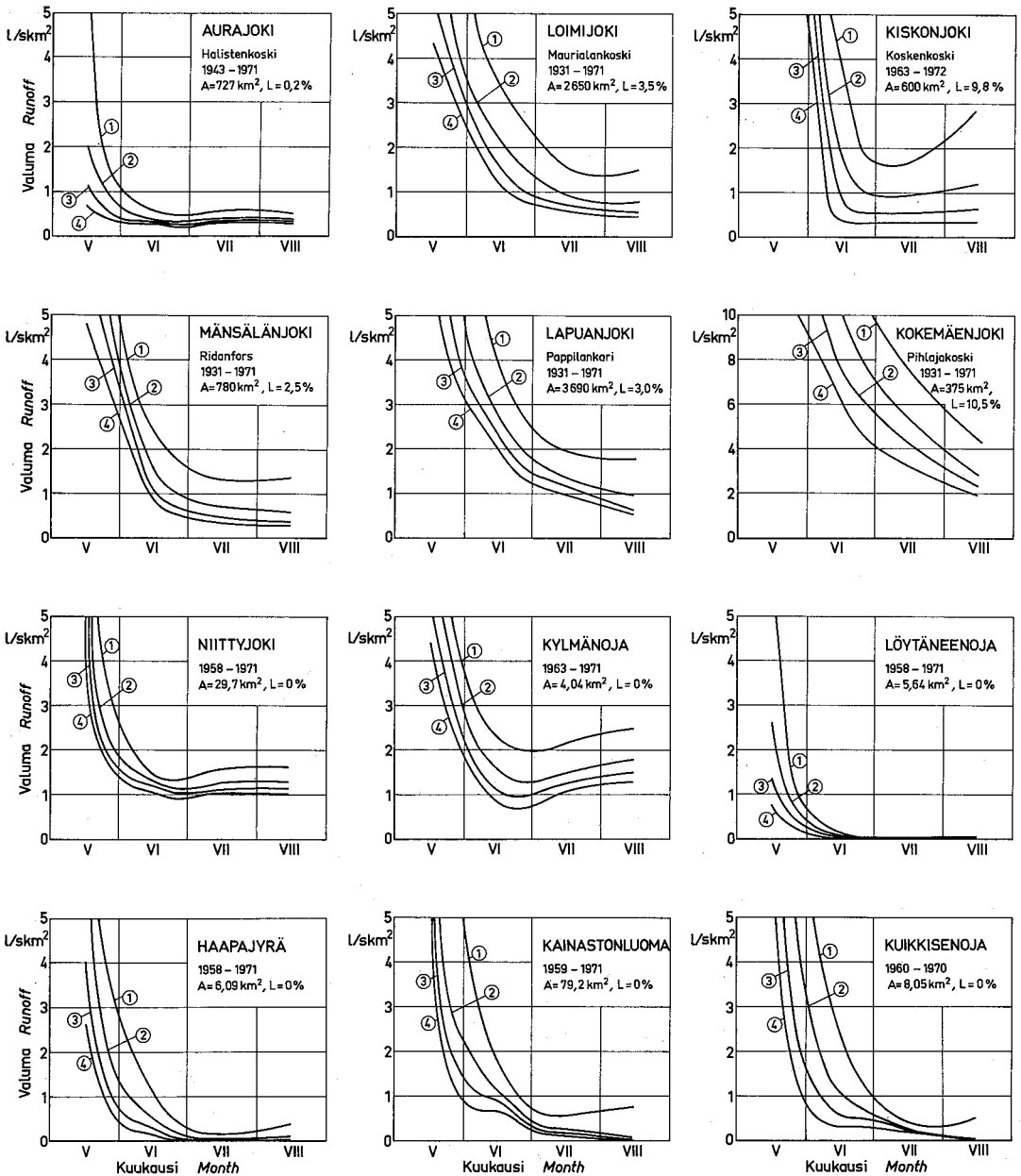
$$q_6 = 0,00056 (P_6)^2 + 0,054 MP - 0,16 \quad R=0,716 \quad (18)$$

$$q_6 = 0,00057 (P_6)^2 + 0,053 MP - 0,21 T_5 + 0,19 \quad R=0,731 \quad (19)$$

$$q_6 = 0,00056 (P_6)^2 + 0,053 MP - 0,17 T_5 + 0,013 P_5 - 0,66 \quad R=0,738 \quad (20)$$

$$q_6 = 0,00057 (P_6)^2 - 0,045 FP + 0,32 \quad R=0,689 \quad (21)$$

$$q_6 = 0,00058 (P_6)^2 - 0,044 FP - 0,014 (T_5)^2 + 0,42 \quad R=0,710 \quad (22)$$

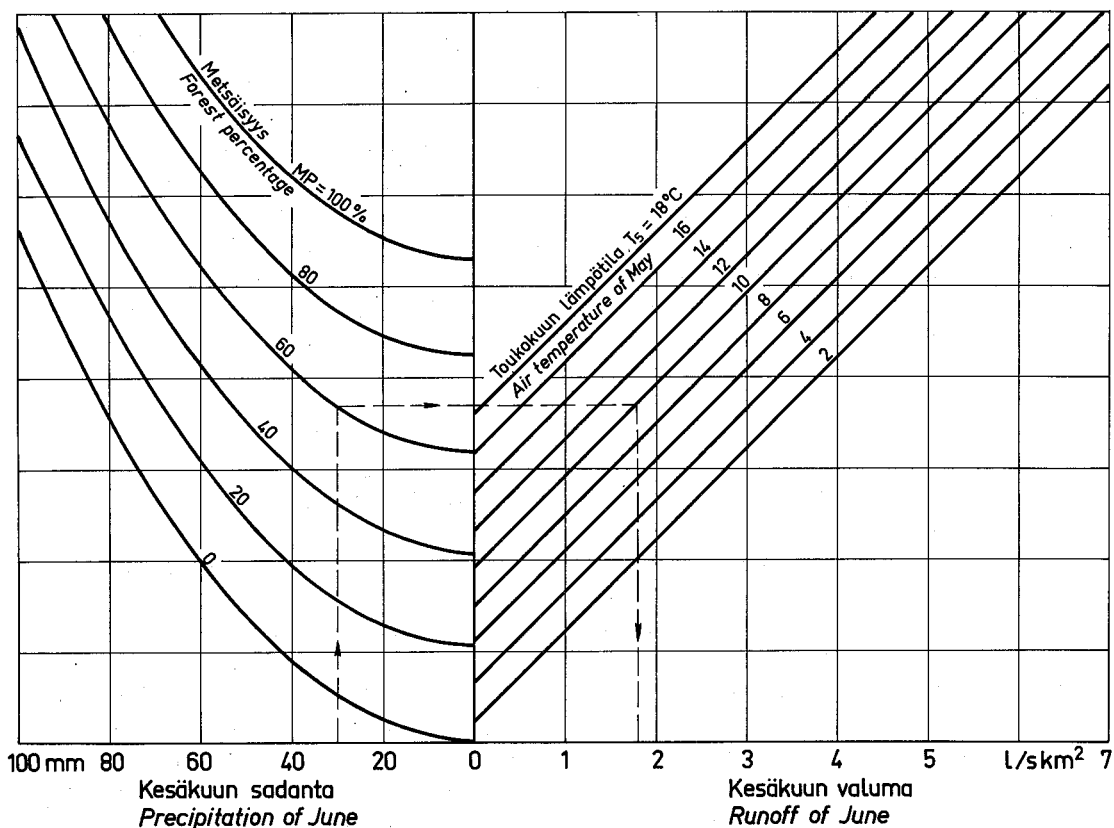


Kuva 24. Keskimäärin kerran 2,3(=1), 5(=2), 10(=3) ja 20(=4) vuodessa sattuva valuma (l/skm^2) kesäaikana eräissä vesistöissä Suomessa. Käyrät on määritetty kuukausiarvojen perusteella, paitsi kesäkuun osalta 10 vuorokauden arvojen perusteella.

Fig. 24. Runoff (l/skm^2) with probable recurrence interval of 2,3 (=1), 5(=2), 10(=3) ja 20(=4) years in summer-time in some basins in Finland. Curves are based on monthly values, except in June on 10 days values.

Yhtälö 19 on esitetty nomogrammilla kuvassa 25. Regressioanalyysissa ovat kesäkuun valumaa selittäneet parhaiten kesäkuun sadanta, metsä-

syys, pellon osuus, lumen vesi-arvo 15.3., toukokuun sadanta ja lämpötila sekä puuston kuuttimäärä ja maanpinnan kaltevuus.



Kuva 25. Kesäkuun valuman (l/skm²) riippuvuus kesäkuun sadannasta (mm), toukokuun lämpötilasta (°C) ja valuma-alueen metsäisyydestä (%).

Fig. 25. Runoff (l/skm²) for June as a function of precipitation in June (mm), May temperature (°C) and forest percentage of drainage area.

Sadannan neliömuodon paremmuus lineaariseen muotoon verrattuna on melko pieni, mutta looginen, sillä sademäärän kasvaessa myös sateen valuntaa aiheuttava osuus kasvaa niin, että valunnan suuruus lähestyy asymptoottisesti sadantaa, jos sade jatkuu äärettömän kauan. Myös toukokuun sadanta (P₅) lisää regressioanalyysin mukaan jossain määrin kesäkuun valuntaa, mikä on luontevaa lisääntyneen maan kosteuden ja suuremman resessiovalunnan perusteella.

Lämpötiloista toukokuun lämpötila (T₅) on osoittautunut kesäkuun valuntaan vaikuttavaksi niin, että mitä lämpimämpi toukokuu sitä pienempi kesäkuun valunta. Tämäkin on luontevaa sekä suoranaisesti suuremman haihtumisen ja maan vesivaraston tyhjentymisen kautta että välillisesti korkeisiin lämpötiloihin usein liittyvän vä-

hästateisuuden kautta. Lisäksi toukokuun lämpötila on voimakkaasti maantieteellistä sijaintia osoittava indeksi.

Maaliskuun lumen vesiarvolla (WS) on ollut kesäkuun valuntaan saman tapainen vaikutus kuin toukokuun sadannalla, siis lähinnä vaikutusta maan kosteussuhteisiin kesäkuussa. Lisäksi lumen vesiarvo on alueen sijaintia osoittava indeksi.

Aluetekijöistä on parhaaksi selittäjäksi osoittautunut metsäisyys. Metsäisyydellä on tällöin tarkoitettu varsinaisen metsämaan ja metsää kasvavan suon yhteenlaskettua osuutta koko valuma-alueen alasta. Metsäisyydellä on suoranaista vaikutusta kesäkuun valuntaan lähinnä sulamisen hidastumisen ja maan kosteana pysymisen kautta. Metsäisyys lienee kuitenkin lähinnä

eräänlainen summaindeksi, sillä merkitseehan suuri metsän osuus samalla yleensä suurta puuston kuutiomäärää ($r=0,602$), suurta karkeiden maalajien osuutta ($r=0,484$), suurta suon osuutta ($r=0,354$) ja ennen kaikkea vähäistä pellon osuutta ($r=-0,896$).

Pellon osuus on analyysissa ollut voimakkaasti kesäkuun valuntaa pienentävä. Peltoselittäjään pätee käänteisesti suurelta osalta se, mitä edellä on sanottu metsäisyydestä. Peltoselittäjä ei kuitenkaan tule mukaan malleissa, joissa metsäisyys on mukana johtuen metsäisyyden ja pellon osuuden voimakkaasta korrelaatiosta. Suoritettaessa regressioanalyysi ilman metsäisyysselittäjää saadaan yhtälöt (21) ja (22). Verrattaessa toisiaan vastaavia yhtälöitä esim. (18) ja (21) toisiinsa voidaan todeta, että metsäisyysselittäjän sisältävä yhtälö (18) antaa hieman paremman selittävyyden.

Maanpinnan kaltevuus on ollut jonkin verran kesäkuun valuntaa suurentava. Tämä on selitettävissä mm. lumen sulamisen viivästyksenä ja mahdollisesti karkeiden maalajien runsautena. Toisaalta karkeiden maalajien runsaus ei ole tässä analyysissa osoittautunut kesäkuun valuntaa lisääväksi tekijäksi, kuten olisi ollut otaksuttavissa.

Mallien selittävyys ylimalkaan ei ole erityisen hyvä. Se johtunee osaksi selitettävän muuttujan luonteesta, osaksi joidenkin tarpeellisten selittäjien puuttumisesta. Se, ettei kesäkuun valunta ole luonnollinen kokonaisuus epäilemättä vaikeuttaa sen selittämistä muilla muuttujilla. Toisaalta esim. lumitietojen osalta saattaisi jokin loppupalven vearvo olla parempi selittäjä, mutta koska maaliskuun puoliväliin arvo on yleensä helpoimmin saatavissa, ei loppupalven arvoja ole analyysissa käytetty.

Malleja kehitettäessä tulisi mallien testaus pyrkiä aina suorittamaan riippumattomalla aineistolla. Tässä tapauksessa se olisi ollut mahdollista vain kehittämisaineistoa oleellisesti vähentämällä, mikä taas olisi huomattavasti heikentänyt kehittämislähtökohtaa.

Voidaan myös katsoa, että lähellä toisiaan sijaitsevien havaintoalueiden aineisto olisi yhdistettävä, koska nämä havainnot eivät ole toisistaan riippumattomia. Tähän ei ole menty useammatkin syystä. Ensinnäkin yhdistämisessä menetään huomattava määrä informaatiota. Toiseksi lähekkäisten havaintoalueiden keskinäistä korrelaatiota esiintyy lähinnä meteorologisten tekijöi-

den osalta ja niistäkin selittäjänä tärkein, sadanta saattaa vaihdella suuresti lyhyilläkin etäisyyksillä, kuten kohdassa 2 on todettu. Sen sijaan aluetekijät saattavat poiketa toisistaan oleellisesti aivan lähekkäisilläkin alueilla. Kolmanneksi havaintoaineiston maantieteellistä jakautumaa arvioitaessa tulisi lähtökohdaksi ottaa koko se alue, jolla malleja sovelletaan, eikä niinkään yksittäisiä alueiden lähekkäisyyksiä. Tässä suhteessa käytetyn aineiston maantieteellistä jakautumaa voidaan pitää oikein painottuneena.

6. SADETUSTUTKIMUKSET VIHDISSÄ

6.1 Koejärjestelyt

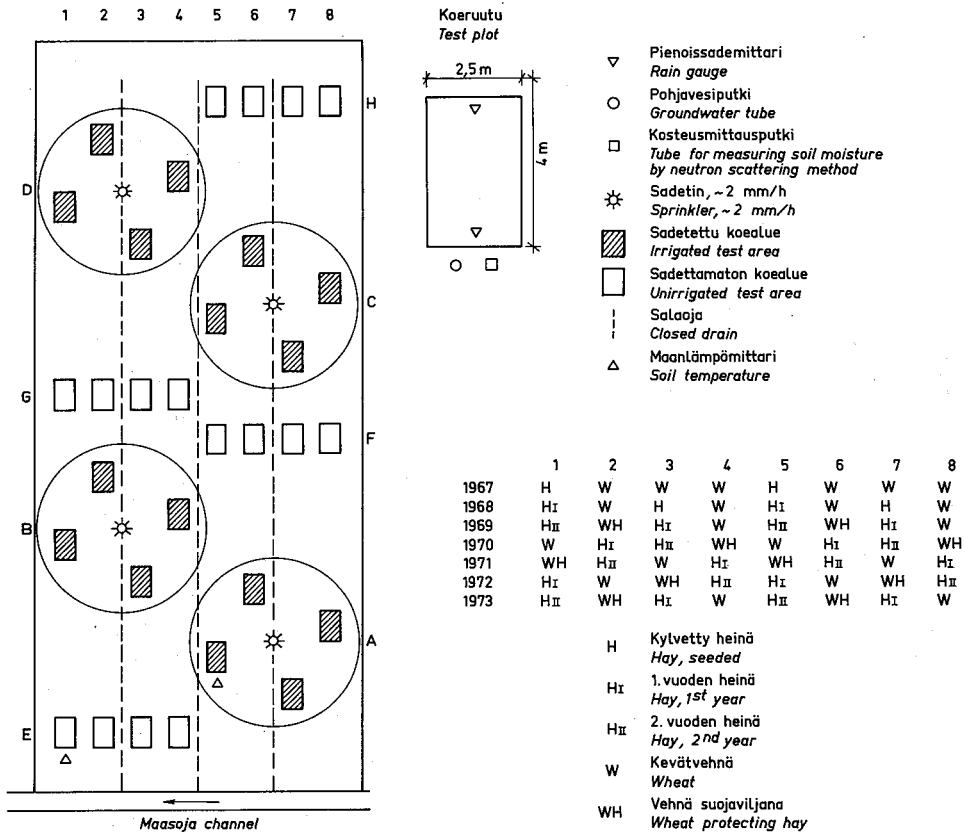
Maataloushallituksen maa- ja vesiteknillisen tutkimustoimiston toimesta perustettiin vuonna 1967 Vihdin Maasojan koekentän yhteyteen hydrometeorologinen sadetuskoee, jonka tarkoituksena oli erityisesti selvittää sadetuksen ja eräiden meteorologisten tekijöiden vaikutusta maan kosteusoloihin. Vesihallituksen perustamisen jälkeen koetoiminta siirtyi vesihallituksen hydrologian toimiston hoitoon. Koejärjestelyt on esitetty kuvassa 26.

Tutkimusalueella on 32 koeruutua á 10 m², joista 16 ympyräsadetuslaittein (Bauer) sadetettua ja 16 sadettamatonta. Alue on salaojitettu muovisalaojilla ja alueella on viljelty kiertoviljelynä kevätvehnää (Svenno) ja heinää. Jokaisessa koeruudussa on neutroniputki maan kosteuden mittaamista varten, pohjavesi- ja routaputki sekä sadetetuissa koeruuduissa lisäksi 2 pienoissademittaria 70 cm korkeudella.

Maankosteusmittaukset on tehty aluksi Troxler- ja vuodesta 1972 lähtien Basc Nea-merkkisellä mittarilla. Mittaukset on tehty keskimäärin n. 2 kertaa kuukaudessa ja sadetuskautena lisäksi ennen ja jälkeen sadetuksen. Mittaukset on tehty 50 cm pintakerroksessa 5-10 cm välein ja syvemmillä 20-60 cm välein. Troxler-maankosteusmittariin on kuulunut sekä pinta- että syvyysanturi, mutta Basc Neaan vain syvyysanturi.

Kosteusmittarin toimintahäiriöt ovat aiheuttaneet mittauksiin runsaasti katkoja, eikä pintakosteuksia ole voitu tästä syystä lainkaan mitata vuodesta 1972 alkaen.

Sadetus on suoritettu 4 sadettimella, joi-



Kuva 26. Sadetusalueen koejärjestelyt Vihdissä, Etelä-Suomessa 1967-1973.
 Fig. 26. Irrigation experiment at Vihti, southern Finland in 1967-1973.

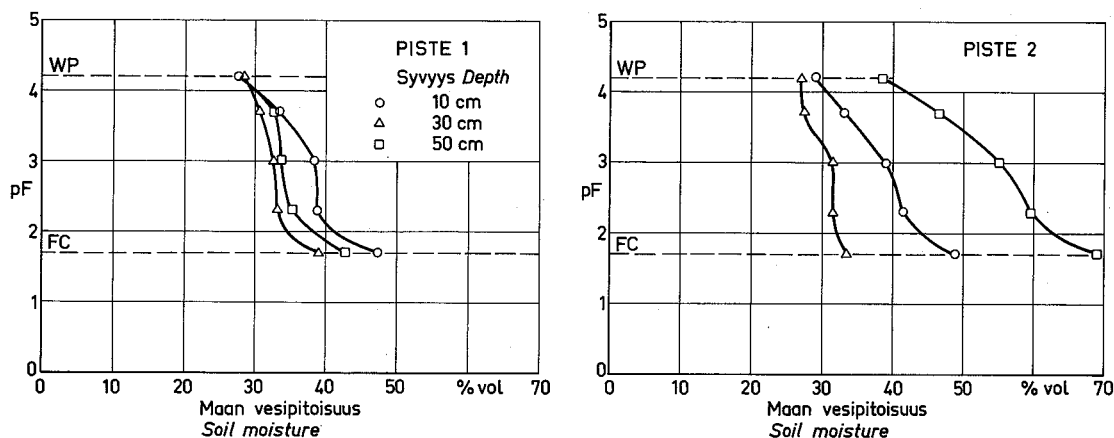
den antoisuus on ollut käytetyllä pumpulla 2-3 mm/h. Sadetukset on suoritettu öisin, jolloin kerralla on sadetettu 20-25 mm. Sadetuksia on annettu kesän aikana 3-4 pyrkien pitämään maan kosteustila sellaisena, etteivät kasvit kärsi kuivuudesta. Joissakin tapauksissa olisi todennäköisesti vieläkin runsaampi sadetus ollut edullista kasvien kasvun kannalta, sillä eräinä vuosina varsinkin kesäkuun lopussa ja heinäkuussa on sadettujenkin ruutujen kosteus alentunut lähelle lakastumisrajaa.

Maan lämpötilaa on mitattu koealueella yhdessä sadetetuissa ja yhdessä sadettamattomassa ruudussa. Mittaussyvyyydet ovat olleet 2,5, 5, 10, 15, 20, 30, 50 ja 100 cm. Myös routahavainnot on tehty. Sadetuskoealueen välittömässä läheisyydessä on lisäksi ilmastohavainnointiasema, jolla mitataan mm. ilman lämpötilaa, kosteutta, sadantaa, auringon säteilyä sekä tuulen nopeutta ja suuntaa.

6.2 Koealueen maaperä

6.2.1 Maan rakenne

Koealueen maaperä voidaan luokitella laihaksi saveksi. Savilajitteen ($\phi < 0,002$ mm) osuus on suoritettujen rakeisuusanalyysien mukaan molemmissa päissä koekenttää noin 30 % lisääntyen lievästi syvemmälle mentäessä ja karkeimman maalajitteen, hiedan ($\phi = 0,02-0,2$ mm) osuus noin 20 %. Multavuuden suhteen koealue ei ole täysin homogeeninen. Koealueen laita, kaista 1 on varsinkin Maasojan puoleisesta päästä lähikaistojaan multavampi. Edelleen maan humuspitoisuus kasvaa mentäessä kauemmaksi Maasojasta. Tämä haittaa jossain määrin maan kosteuden määrittämistä, sillä orgaaninen aine vaikuttaa käytetyn neutronikosteusmittarin antamiin arvoihin. Haittaa ei kuitenkaan voida pitää vakavana, koska tässä tutkimuksessa käsitellään kosteuseroja käyt-



Kuva 27. pF-käyrät Vihdin sadetusalueen eteläosasta alueelta A (piste 1) ja pohjoisosasta alueelta D (piste 2).
Fig. 27. pF-curves for Vihdi irrigation plot, left=southern part of the plot, right=northern part of the plot.

täen vertailupohjana samojen mittauspisteiden tuloksista laskettuja keskiarvoja.

Humuspitoisuuden vaihtelulla on myös vaikutusta satoihin. Kerrannaisten määrästä ja sijoittelusta johtuen maaperäerojen vaikutukset kuitenkin eliminoituvat keskiarvotuloksissa varsin tehokkaasti.

6.22 Maan vedensitomiskyky

Sadetuskoalueelta on tehty pF-määrittymiset kahdesta pisteestä Helsingin Yliopiston Maanviljelyskemian laitoksen toimesta. Näiden määrittymisten tulokset on esitetty kuvassa 27 ja taulukossa 22.

Taulukko 22. Kenttäkapasiteetti FC, lakastumisraja WP ja hyötykapasiteetti FC-WP Vihdin sadetuskoalueella.
Table 22. Field capacity, wilting point and available soil water storage (% vol.) in the Vihdi irrigation experiment.

Piste n:o Point no.	Syvyys (cm) Depth (cm)	Vesipitoisuus (til.%) Soil moisture (% vol.)		
		FC	WP	FC-WP
1	10	47,4	27,6	19,8
1	30	39,1	28,2	10,9
1	50	42,7	28,0	14,7
1	100	43,0	27,6	15,4
2	10	48,8	29,0	19,8
2	30	33,4	27,1	6,3
2	50	69,1	38,6	30,5
2	100	55,0	29,0	26,0

Piste 1 sijaitsee Maasojan puoleisessa päässä koalueutta, piste 2 koalueen toisessa päässä. pF-määrittymisen perusteella on pisteessä 1 ruokamullan eli 20 cm pintakerroksen kenttäkapasiteetti 94,8 mm, lakastumisrajaa vastaava vesipitoisuus 55,2 mm ja hyötykapasiteetti 39,6 mm. Pisteessä 2 vastaavat arvot ovat 97,6 mm, 58,0 mm ja 39,6 mm. Kenttäkapasiteetti, lakastumisraja ja hyötykapasiteetti 40 cm kerroksessa ovat olleet pisteessä 1 173,0 mm, 111,6 mm ja 61,4 mm ja pisteessä 2 164,4 mm, 112,2 mm ja 52,2 mm.

Kuten kuvasta 27 ja taulukosta 22 voidaan todeta, on varsinkin lakastumisrajaa vastaava maan vesipitoisuus suuri, tilavuusprosentteissa noin 28 % luokkaa. Rakeisuudeltaan likimain Vihdin sadetuskoalueen kaltaiselle maalajille ovat Heinenon (1954 s.103) ja Andersson (kuva 13) esittäneet noin luokkaa 18-20 % olevia arvoja. Erot Anderssonin ja Vihdin tutkimuksen välillä sekä vaihtelu Vihdin eri näytepisteiden välillä johtuvat ilmeisesti humuspitoisuuden eroista ja vaihtelusta. Humuspitoisuuden huomattava vaihtelu oli Vihdissä selvästi todettavissa maanäytteiden oton yhteydessä.

6.23 Aktiivisen maakerroksen paksuus

Aktiivisella maakerroksella tarkoitetaan tässä kerrosta, jonka kosteutta kasvit voivat käyttää hyväkseen ja jossa myös maan kosteusvaihtelut pääasiassa tapahtuvat. Tämän kerroksen paksuus

vaihtelee mm. maalajista, kasvista ja kasvuvaiheesta riippuen. Vihdin koalueella valittiin maan kosteusvaihteluita tarkasteltaessa aktiivisen maakerroksen paksuudeksi 40 cm toisaalta juuristoanalyysin perusteella, toisaalta siksi että sadeiden ja sadetusten vaikutukset rajoittuivat miltei poikkeuksetta 40 cm pintakerrokseen (kohta 6.4). Juuristoanalyysissa kesällä 1969 todettiin, että täysin kehittyneellä vehnällä oli yli 70 % koko juuristomassasta alle 10 cm syvyydessä sekä sadetuissa että sadettamattomissa ruuduissa (taulukko 23). Alle 5 cm syvyydessä oli sadettamattoman vehnän juuristosta 29 % ja sadetetun vehnän juuristosta 44 %. Sadetetun vehnän juuristo on pyrkinyt siten sijoittumaan hieman lähemmäksi maanpintaa kuin sadettamattoman, mutta jo 10 cm kerroksessa ero on tasoittunut niin, että edellä mainitut prosenttiosuudet ovat 71 % sadettamattomalla ja 73 % sadetetulla vehnällä.

Taulukko 23. Juuristomassan jakautuma (%) sadetetulla ja sadettamattomalla vehnämaalla Vihdissä 1969 sadonkorjuun jälkeen.

Table 23. The distribution of root mass (%) at Vihti in the autumn of 1969.

Syvyys Depth	Juuristomassan jakautuma Distribution of root mass %			
	SadetetTU Irrigated		Sadettamaton Unirrigated	
	Vehnä Wheat %	Rikkaruohot Weeds %	Vehnä Wheat %	Rikkaruohot Weeds %
0-2,5	18,1	21,9	8,5	16,3
2,5-5	26,3	23,8	20,6	17,2
5-7,5	15,0	22,7	22,1	22,2
7,5-10	13,6	15,6	20,0	21,8
10-12,5	11,3	5,7	14,3	9,3
12,5-15	5,6	5,4	10,0	9,0
15-17,5	3,2	1,0	2,9	3,5
17,5-20	2,7	1,6	0,9	0,7
20-22,5	1,7	1,0	0,4	
22,5-25	1,3	1,2	0,2	
25-27,5	1,0	0,1	0,1	
27,5-30	0,2			

Juuristomassan jakautuma määritettiin leikkaamalla maasta noin 50 cm leveä, 40 cm syvä ja 10 cm paksu viipale. Viipale kiinnitettiin sen ollessa vielä irroitamattomana maassa naulale-

vyyn. Kevyen vesisuihkun avulla pestiin maa pois naulalevystä, jolloin juuret jäivät levyyn jäljelle. Samankaltaista menetelmää ovat kuvanneet myös Salonen (1953), Kähäri & Elonen (1969), Pavlychenko (1937), Weaver & Darland (1949), Weaver & Voigt (1950) ja Upchurch (1951).

Juuristomassan suuren keskittymisen lähelle maanpintaa ovat todenneet myös mm. Kähäri & Elonen (1969), Salonen (1953), Pumphrey & Koehler (1958), Bloodworth et al. (1958), Foth (1962), Lorenz & Rogler (1964).

Kähäri & Elonen (1969) totesivat juuristomassan jakautuman sadetetulla ja sadettamattomalla vehnällä saman kaltaiseksi kuin Vihdin tutkimuksessa, joskaan sadetetun vehnän juuriston sijoittuminen lähelle maanpintaa ei ollut niin selvä kuin Vihdissä. Kähäri ja Elonen totesivat myös juuriston kasvun ja kasvin maanpäällisten osien kasvun olevan keskenään voimakkaassa positiivisessä korrelaatiossa.

6.24 Maaperän ravinnetila

Koalueella on suoritettu ravinnetutkimus syksyllä 1969 ja 1970 Viljavuuspalvelu Oy:n toimesta. Tällöin on jokaisesta 32 koeruudusta otettu vuonna 1969 30 cm ja 1970 25 cm pintakerroksesta maanäytteet, joista on tutkittu pH, kalkki, kali, fosfori ja johtoluku. Näiden 2 vuoden tulokset ovat olleet varsin yhtäpitäviä. Samoja ruutuja koskevien näytteiden erot ovat olleet pieniä yleensä niin, että vuoden 1970 arvot ovat hieman suurempia kuin vuoden 1969 johtuen ilmeisesti näytemaakerrosten paksuuseroista. Taulukossa 24 on esitetty yhteenveto ravinnetutkimuksesta 1970.

Jos normaalissa peltoviljelyssä pidetään tavoitteena tyydyttävää viljavuusluokkaa (Kurki 1968) on maa hieman liian hapan ja myös vaihtuvan kalin ja fosforin määrä sekä vesiliukoisten suolojen johtoluku ovat hieman alle tyydyttävän rajan. Ruokamullan multavuus on yleensä kohtalaisen hyvä, joko multava tai erittäin multava. Kaiken kaikkiaan koalueen ravinnetila on matalahko. Verrattaessa sadetettuja ja sadettamattomia ruutuja keskenään, on sadetuissa ruuduissa keskimäärin suurempi pH (ero tilastollisesti melkein merkitsevä, riski <5 %), suurempi kalkin määrä

Taulukko 24. Sadetettujen ja sadettamattomien koeruutujen keskimääräinen pH, kalkki, kali, fosfori ja johtoluku 25 cm pintamaakerroksessa Vihdissä syksyllä 1970.

Table 24. The average values of pH, calcium, potassium, phosphorus and conductivity in a 25 cm surface layer at Vihti in the autumn of 1970.

Koeruutu tai taso Test plot or level	pH	Kalkki Calcium mg Ca/l	Kali Potassium mg K/l	Fosfori Phosphorus mg P/l	Johtoluku Conductivity 10 x millim ho/cm
Sadetettu, <i>Irrigated</i>	5,5	2 513	145	4,6	1,1
Sadettamaton, <i>Unirrigated</i>	5,3	2 170	177	5,4	1,3
Tyydyttävä taso, <i>Satisfactory level</i>	5,8-6,2	2 000-2 600	200-300	6-15	4

(ero vahvasti merkitsevä, riski <0,1 %), pienempi kalin ja fosforin määrä (erot eivät tilastollisesti merkitseviä) kuin sadettamattomissa ruuduissa.

Sadetettujen ja sadettamattomien koeruutujen välillä todetut erot ovat joidenkin komponenttien kohdalla melko suuria. Sadetetuissa ruuduissa on maan happamuus edullisempi, mutta koska fosforin ja kalin määrä on pienempi kuin sadettamattomissa ruuduissa ei sadetettuja koeruutuja voitane pitää kasveille ainakaan edullisempina.

6.25 Lannoitus

Koalueen lannoitus on likimain vastannut normaalia Suomessa käytettyä peltoviljelyn lannoitusta. Käytetyt lannoitemäärät käyvät ilmi seuraavasta asetelmasta

	Vehnä	Heinä
1967	800 kg PK/ha 200 kg OS/ha	800 kg PK/ha 200 kg OS/ha
1968	800 kg PK/ha 400 kg OS/ha	»
1969	800 kg PK/ha 400 kg OS/ha ¹⁾	»
1970	1 200 kg PK/ha 600 kg OS/ha ²⁾	»
1971	»	»
1972	»	»
1973	»	»

1) suojaviljana 200 kg OS/ha

2) suojaviljana 300 kg OS/ha

Asetelmassa PK tarkoittaa ammonioitua fosfori-kali-lannosta, jossa typen, fosforin ja kalin prosenttiosuudet ovat 2 % (NH₄), 17 % (P₂O₅) ja 15 % (K₂O). Vajaa puolet (7,5 %) P₂O₅:stä on

nopealiukoisessa muodossa. Oulun salpietarin (OS) typpipitoisuus on 27,5 %, josta nitraattityyppiä on puolet (13 %). Mainittakoon vertailun vuoksi, että käytännön viljelyssä ehkä yleisimmässä lannoitteessa, normaali Super-Y-lannoksessa ovat N-P-K-osuudet 15-20-15 ja lähes kokonaan nopealiukoisessa muodossa.

6.3 Havaintotulokset

Havaintotulokset käyvät pääosiltaan ilmi liitteenä 4 olevista kuvista, joissa on esitetty yhteenveto maankosteusmittausten perusteella lasketuista 40 cm pintakerroksen kosteusvaihteluista, vuorokauden keskilämpötila, Class A-astialla mitattu haihdunta, U.S. Weather Bureauin haihdunta-kaavalla laskettu potentiaalinen evapotranspiratio (PET) sekä sade- ja sadetusmäärät.

6.31 Ilman lämpötila, sadanta ja sadetus

Vuorokauden keskilämpötilan vaihtelu, korjaamaton sadanta ja pienoissademittareilla kaikkien sadetettujen ruutujen keskiarvoina lasketut sadetusmäärät käyvät ilmi liitteestä 4. Sade- ja sadetusmääriä ei ole korjattu mm. tuulen aiheuttaman virheen suhteen, koska sademäärät normaalisti ilmoitetaan näinä korjaamattomina arvoina. Tuuli ja kostutusvirheistä johtuen esitetyt sadanta-arvot ovat noin 5 % liian pieniä, sen sijaan yöllä suhteellisen tuulettomana aikana suoritettujen sadetusten vesimäärissä ei tuuli- ja kostutusvirhetä todennäköisesti juuri esiinny.

Sadetukset on suoritettu yksinomaan yöllä aamulla klo 19-20 illalla ja päättyen klo 7-8 aamulla. Sadetusmäärät on mitattu kussakin koeruudussa

olevilla 2 pienoissademittarilla, jotka ovat 70 cm korkeudella maanpinnasta. Mittareiden sijoitusta maanpinnalle on tutkittu ensimmäisenä kesänä. Tällöin todettiin, että sijoitettaessa mittarit maanpintaan ovat suuret virheet mahdollisia kasvillisuuden aiheuttaman peittämisen tai veden johtamisen vuoksi. Sadetusveden jakautuminen ei ole ollut täysin tasaista, mutta ruuduittaiset arvot ovat kuitenkin varsin lähellä todellisia, koska mittarit ovat olleet ruudun molemmissa päissä. Eri ruutujen kesken ovat sadetusrakenteiden erot pienempiä ja kun laskelmissa mm. kohdassa 6.4 on käytetty usean ruudun keskiarvoja, ei epätaoisesta sadetuksen jakautumisesta aiheudu merkittäviä virheitä. Satoihin sadetuksen epätaoisella jakautumisella saattaa olla jossain määrin heikentävä vaikutus (Varlev 1976).

Sadetetut määrät ovat käytetyn pumpun pienehköstä tehosta johtuen olleet yleensä alle 30 mm eli keskimäärin 20-25 mm kerralla. Näin ollen sadetusintensiteetti on ollut noin 2 mm/h, mikä on noin puolet käytännön keskimääräisestä sadetusrankkuudesta Suomessa. Pieni sadetusintensiteetti pidentää sadetusaikaa, mikä todennäköisesti lisää interseptiohäviötä, mutta pienentää valunta- ja mahdollisesti myös perkolaatiohäviötä.

6.32 Astiahaidunta ja PET

Haidunta Class A-astialla mitattuna ja potentiaalisenä evapotranspiraationa on eri kuukausina vaihdellut seuraavasti:

	Toukokuu	Kesäkuu	Heinäkuu	Elokuu
1967 Class A	81	135	149	83
PET	65	104	101	45
1968 Class A	72	168	112	89
PET	65	124	84	59
1969 Class A	87	148	120	117
PET	95	126	110	88
1970 Class A	94	141	105	77
PET	93	139	90	74
1971 Class A	123	124	142	89
PET	109	118	124	77
1972 Class A	82	135	127	80
PET	77	124	126	66
KA Class A	90	142	126	89
1967-72 PET	84	123	106	68

Yksittäisinä vuorokausina ovat suurimmat haihdunnat olleet tutkimuskautena astiahaiduntana noin 9 mm ja potentiaalisenä evapotranspiraationa 7 mm luokkaa.

6.33 Maan kosteus

Maan kosteus on vaihdellut kasvukauden aikana 40 cm pintakerroksessa keskimäärin sadetetuissa ruuduissa 40 mm ja sadettamattomissa ruuduissa 50 mm. Alkukesällä ja runsaiden sateiden jälkeen on maan kosteus ollut lähellä kenttäkapasiteettia tai hieman ylikin. Maan kosteus kasvaa routakerroksessa talven aikana kosteuden siirtyessä maan lämpötilagradientin vaikutuksesta kylmemmän lämpötilan suuntaan (Day, Bolt & Anderson 1967), ja on siten melko suuri tässä kerroksessa jo sulamisvaiheen alkaessa. Myös Vihdin sadetuskokeen yhteydessä tämä on ollut selvästi todettavissa. Heinä-elokuussa on varsinkin sadettamattomien ruutujen kosteustila laskenut useina vuosina lakastumisrajaa (112 mm) vastaavan kosteuden lähelle. Pienimmät 40 cm kerroksessa mitatut maankosteudet ovat olleet sadetetuissa ruuduissa noin 120 mm lukuunottamatta poikkeuksellisen vähäsateista kesää 1969, jolloin elokuun puolessa välissä mitattiin sadetetuissakin ruuduissa vain vajaa 110 mm vettä 40 cm pintakerroksessa.

Sadettamattomissa ruuduissa ovat maan vesipitoisuudet olleet keski- ja loppukesällä yleensä noin 20 mm sadetettujen ruutujen arvoja pienemmät ja poikkeuksellisenä kesänä 1969 on vesipitoisuus pudonnut alle 100 mm:n.

Maan kosteusmittauksissa on eräitä lähinnä käytetystä neutronimittaustekniikasta aiheutuvia ongelmia ja virhemahdollisuuksia. Ensinnäkin maan kosteusmuutosten mittaustulokset eri syvyyksillä riippuvat jossain määrin kosteusmittauksen ajankohdasta sadetukseen nähden. Vihdin tapauksessa maan pintakosteus on mitattu noin 1-2 tuntia sadetuksen päättymisen jälkeen ja kosteus syvemmillä maan sisässä noin 2-10 tuntia sadetuksen päättymisen jälkeen. Käytetyllä mittaustavalla on pintamittaus kestänyt noin 1 1/2 -2 tuntia ja syvemmillä olevien pisteiden mittaaminen 8-10 tuntia. Kosteusmittauksen pitkä kesto aika lisää luonnollisesti haihduntaa. Toi-

saalta maan pintakosteus, josta haihdunta herkimmin tapahtuu, on mitattu sängen pian sadetuksen jälkeen. Kun maan kosteus syvemmällä maassa on mitattu osittain useita tunteja pintakosteuden mittaamisen jälkeen, on mahdollista, että kosteuden tunkeutuessa maassa alaspäin, osa pintakosteuden mittaamisen yhteydessä mitatusta kosteudesta mitataan uudelleen syvemmällä. Kun kuitenkin kosteuden muutokset ko. tiiviissä hiesusavessa ovat syvemmissä maakerroksissa olleet ylimalkaankin pieniä, ei tästä ilmeisesti voi aiheutua merkittävää virhettä.

Käytetystä kosteusmittaustekniikasta saattaa aiheutua toinenkin virhe, jonka seurauksena mitatut sadetuksen aiheuttamat kosteusmuutokset olisivat liian suuria. Mitattaessa kosteutta lähellä maan pintaa saattaa osa neutronikosteusmittarin lähettämästä nopeiden neutronien säteilystä karata maanpinnan yläpuolelle, jolloin mittaustuloksena saadaan liian pieni kosteus. Karkaamista tapahtuu sitä enemmän, mitä vähemmän maassa on vetyioneja eli mitä kuivempaa maa on.

Kolmannen virhetekijän muodostavat maan pintakosteuden mittaustulokset ja erityisesti maan kosteuden syvyysuuntaisen jakautuman poikkeaminen oletetusta lineaarisesta. Mittari on kalibroitu tutkimusalueen maaperäolosuhteissa käyttäen pintamittauksen kalibroinnissa matalia, 3 cm korkuisia näytepurkkeja. Näin ollen 0-syvyyden kosteus vastaa noin 3 cm pintakerroksen keskimääräistä kosteutta, vaikka myös tätä syvemmällä oleva kosteus vaikuttaa mittaustulokseen. Kun pintakosteuden mittaukseen käytetty anturi saa suurimman vaikutuksensa aivan maan pinnasta, on nimenomaan ylimpien senttimetrien kosteudella ratkaiseva merkitys pintamittauksen tulokselle. Jos maan pinta on erittäin märkä, saattaa anturi antaa liian suuria vesipitoisuusarvoja pintakerrosta kuvaamaan, ja pinnan kuivuttua vastaavasti liian pieniä. Lisäksi on huomattava, että kosteus on maassa epätasaisesti jakautuneena siten, ettei mitattu kosteus välttämättä edusta tarkasti lähiympäristöään. Samaa kosteutta (maan yleinen kosteustila vakio, sama mittaussyvyys) tarkoittavien mittaustulosten keskihajonta on Taylorin (1955) ja Staplen & Lehanen (1962) mukaan 10 % luokkaa.

Oman ongelmansa pintakosteuden mittaamisessa muodostaa pinnan laatu, tasaisuus ja ennenkaikkea kasvipeite. Kun pinta-anturi on tasapoh-

jainen, noin 15 x 25 cm² laajuinen "silitysrauta", merkitsee anturin erilainen painautuminen alustaa vasten vaihtelua mittaustulokseen. Tämän tekijän aiheuttamaa epätarkkuutta on yritetty vähentää valitsemalla mittauskohdat keskenään mahdollisimman samanlaisiksi ja ottamalla mittaustulokseksi aina kahden mittauksen keskiarvo.

6.34 Pohjaveden syvyys

Koealueen pohjavedenpinta on ollut alueen lounaispäässä alkukesällä noin 100 cm syvyydessä laskien loppukesään tultaessa yleensä 20-25 cm. Joinakin vuosina on pohjavedenpinta elokuussa laskenut yli 150 cm syvyyteen. Alueen koillispäässä pohjavedenpinta on noin 20-25 cm korkeammalla ja on vaihdellut alkukesän 75 cm syvyydestä loppukesän noin 100 cm:iin. Syvimmillään on pohjavesi tässä osassa aluetta ollut yli 130 cm syvyydessä.

Sadetus on vaikuttanut pohjaveden korkeuteen selvästi. Keskimääräinen pohjavedenpinnan nousu on ollut noin 9 cm, kun vastaava sadetuskanta on ollut noin 21 mm. Näin on tapahtunut siitä huolimatta, ettei maankosteus pohjavedenpinnan läheisessä yläpuolisessa maakerroksessa ole kasvanut. Maahuokokset ovat täten toimineet ohuiden putkien tavoin johtaessaan vettä alaspäin. Pohjaveden pinta on tasoittunut 2-3 päivän kuluessa sadettamattomia ruutuja vastaavaksi.

6.35 Roudan syvyys

Roudan syvyyshavainnot on tehty ns. metyleenisiniputkilla, joita alkuvuosisina on verrattu routauraudalla suoritettuihin havaintoihin. Vuoden suurin roudan syvyys on vaihdellut sekä sadetetuissa että sadettamattomissa ruuduissa välillä 24-69 cm keskiarvon ollessa sadetetuissa 41,1 cm ja sadettamattomissa 42,0 cm. Sadetetuilla ja sadettamattomalla alueella ei siis tässä suhteessa ole ollut juuri mitään eroa. Myöskään vehnää ja heinää edellisellä kesänä kasvaneilla ruuduilla ei ole ollut eroa.

Roudan sulaminen näyttää tapahtuneen yleensä sadettamattomissa ruuduissa hivenen nopeammin kuin sadetetuissa ruuduissa. Ero on yleensä pieni eikä sitä kaikkina vuosina ole todettavissa

lainkaan.

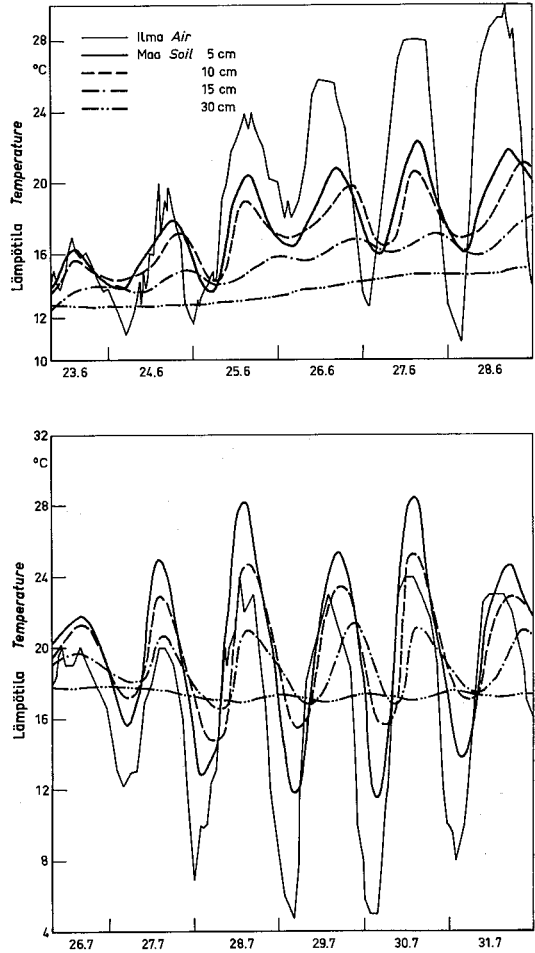
Roudan syvyys- ja sulamishavaintojen tulkin-
taa vaikeuttaa maaperän epähomogeenisuus. Hu-
muspitoisempien ruutujen routa näyttää sulaneen
hiukan hitaammin kuin savipitoisten; toisaalta
humuspitoiset ruudut ovat routaantuneet hieman
matalampaan.

6.36 Maan lämpötila

Maan lämpötila on lähellä pintaa (2,5 cm syvyy-
dessä) ollut kesäaikana yleensä ilman lämpötilaa
selvästi korkeampi, vuorokauden maksimilämpö-
tilojen osalta noin 5 °C, minimilämpötilojen osalta
noin 10 °C. Maan lämpötilan vaihtelut ovat ol-
leet vuorokauden aikana maan pintaosissa (2,5
cm syvyudessa) noin 10 °C luokkaa lämpimimpänä
kesäaikana, jolloin maan maksimilämpötilat
ovat kohonneet 30 asteen lähelle ja sen ylikin.
Syvemmillä maan sisässä ovat lämpötilan vaihte-
lut olleet paljon pienempiä ja niinpä jo 30 cm sy-
vyudessa on vuorokautinen lämpötilan vaihtelu
ollut yleensä vain muutamia asteen kymmenes-
osia minimin osuessa suunnilleen ilman lämpötilan
maksimin sattumisaikaan. 100 cm syvyudessa
vuotuinen maksimilämpötila on jäänyt 13-14 °C
paikkeille. Tämä lämpötila on saavutettu miltei
poikkeuksetta elokuun alkupuolella.

Maan lämpötilavaihtelun suuruus riippuu päi-
si säteilyenergiasta myös maan kosteudesta. Kun
maan ominaislämpö on sitä suurempi, mitä koste-
empää se on, vaatii märkä maa samansuuruisista
lämpötilamuutosta kohden enemmän energiaa
kuin kuiva maa. Kuvassa 28 on esitetty maan
lämpötilan vaihtelu eri syvyyksillä Vihdissä kah-
della viikon jaksolla kesällä 1972. Molempina
viikkoina ilman lämpötilavaihtelut ovat suuria
ja maksimilämpötilat korkeita. Sen sijaan maan
lämpötilavaihtelut poikkeavat toisistaan selvästi.
Heinäkuun lopulla ovat maan lämpötilavaihtelut
olleet paljon suurempia kuin kesäkuun lopulla ja
pintamaan maksimilämpötilat huomattavasti yli
ilman lämpötilan. Tämä johtuu pääasiassa siitä,
että maan kosteus heinäkuussa on ollut pienempi
kuin kesäkuussa, mutta todennäköisesti osittain
myös siitä, että koeruudusta on korjattu heinä
ennen heinäkuun havaintoviikkoa.

Sadetus on alentanut pintamaan (2,5 cm) läm-
pötilaa (kuva 29) yleensä muutamalla asteella.

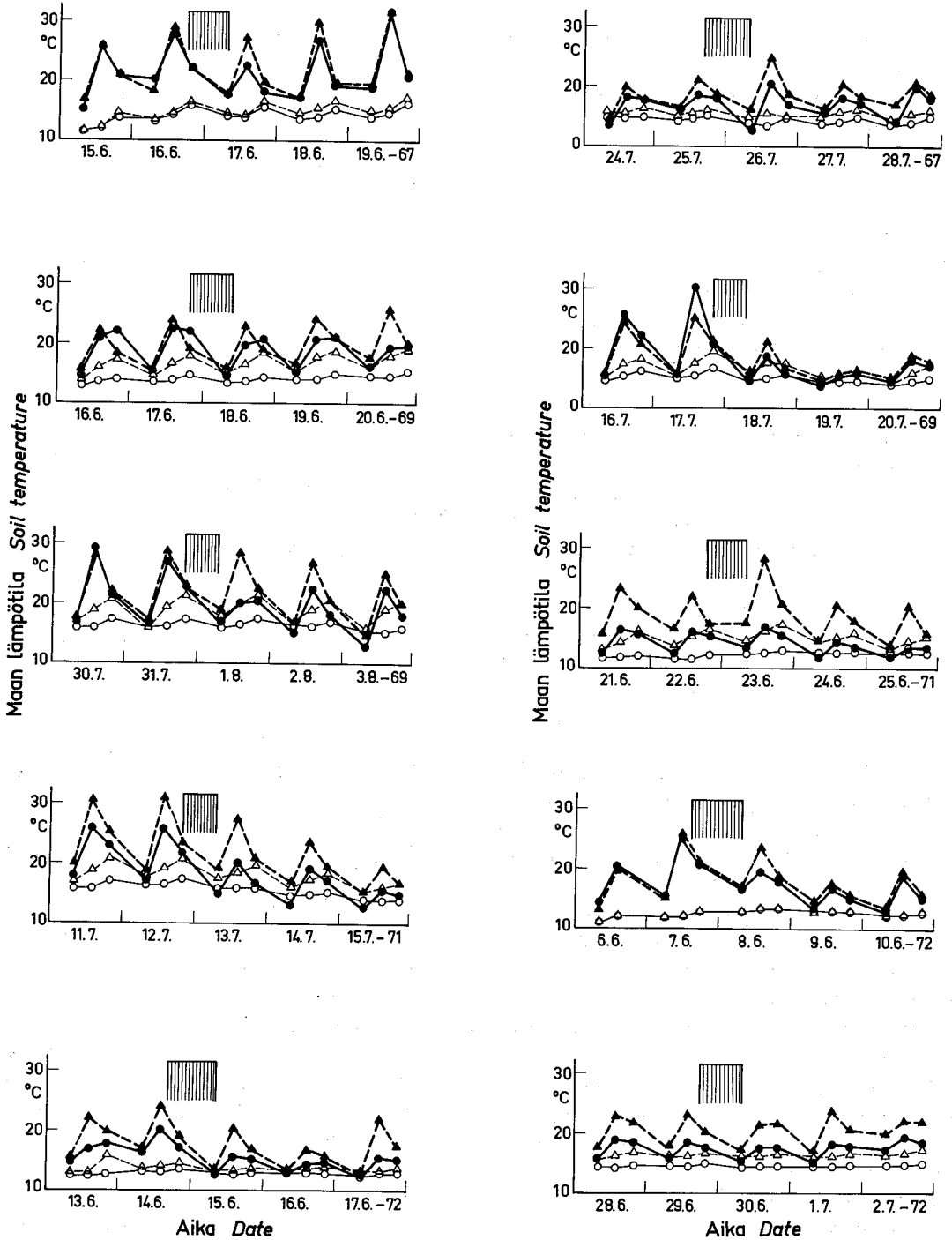


Kuva 28. Maan lämpötila (°C) eri syvyyksillä Vihdissä 1972.

Fig. 28. Soil temperature (°C) at Vibti in 1972.

Keskimääräinen alennus on ollut noin 2,2 °C
vaihtelun ollessa eri tapauksissa 0-6,5 °C. Vaiku-
tus on kohdistunut erityisesti maksimilämpötilaan
sadetusta seuranneena päivänä ja on tuntunut 2-3
vuorokauden ajan lähinnä maksimilämpötilojen
alenemisena. Sadetuksen jäähdyttävä vaikutus
on ollut todettavissa lievästi vielä 20 cm syvyy-
dessä, mutta vasta 6-10 tuntia sadetuksen
päättymisen jälkeen.

Mainittakoon, että Kaliforniassa ovat Wierenga
et al. (1971) todenneet sinimailasta kasvavassa
maassa 5 cm syvyydellä 2 °C lämpötilan alennuk-
sen noin 5-6 tunniksi kasteltaessa 14 asteisella ve-
dellä ilman lämpötilan ollessa noin 25 °C.



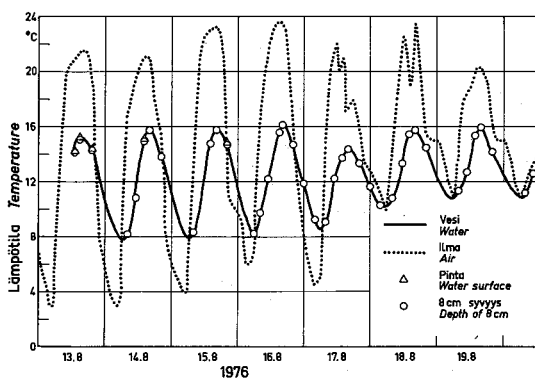
Kuva 29. Sadetuksen vaikutus maan lämpötilaan 2,5 cm (paksu viiva) ja 20 cm (ohut viiva) syvyydellä Vihdissä 1967-1973. Ympyrät tarkoittavat sadetettua koeruutua, kolmiot sadettamatonta koeruutua.

Fig. 29. The influence of sprinkler irrigation on the temperature of soil at a depth of 2,5 cm (thick line) and 20 cm (thin line) at Vibti in 1967-1973. Circles indicate irrigated test plot, triangles indicate unirrigated test plot.

6.37 Sadetusveden lämpötila

Sadetusveden lämpötilasta ei ole jatkuvia mittauksia, mutta kesällä 1976 on sadetukseen käytetyn puron veden lämpötilaa mitattu noin viikon ajan. Näiden mittausten mukaan veden lämpötila vaihteli purosessa vuorokauden aikana varsin voimakkaasti vuorokautisten maksimi- ja minimilämpötilojen erojen ollessa 8 °C:n luokkaa (kuva 30). Mittausajanjaksona olivat myös ilman lämpötilan vaihtelut suuria, n. 15 °C vuorokaudessa. Ylimalkaan veden lämpötilavaihtelut ovat seuranneet sangen kiinteästi ilman lämpötilavaihteluja, tosin pienellä viiveellä ja selvästi pienemmällä amplitudilla. Kyseessä oleva puro, Maasoja, on valuma-alueeltaan noin 5 km² ja se kulkee peltoaukeiden halki sadetusalueesta yläjuoksulle päin noin 700 m matkan. Mainittakoon, että Englannissa on Smith (1976) todennut vastaavanlaisessa purosessa miltei täysin samanlaisia lämpötilavaihteluja. Kun sadetukset Vihdissä on suoritettu yöaikaan ja pääasiassa alkukesällä öiden ollessa suhteellisen kylmiä ja lämpötilan vuorokausivaihtelun suuri, lienee sadetusveden lämpötila ollut yleensä sadetuksen alkaessa illalla lähes 20 °C ja kylmimmillään 10-15 °C aamuyöllä.

McCormick (1968) on todennut kastelun kylmällä vedellä hidastavan kasvua ja esittänyt kastelun aloittamisen siirtämistä ajankohtaan, jolloin maa on ehtinyt lämmetä 45 cm syvyydeltä noin 13 °C lämpötilaan. Toisaalta on mahdollista, että



Kuva 30. Veden lämpötila sadetukseen käytetyssä Maasojoissa Vihdissä elokuussa 1976.

Fig. 30. Variation of water temperature in Maasoja brook in August 1976.

sadetusvesi lämpenee ilman läpi kulkiessaan lähelle ilman lämpötilaa, jolloin veden alkulämpötilalla ei olisi oleellista merkitystä. Tutkimustuloksia tästä ei kuitenkaan ole käytettävissä.

6.4 Sadetushäviöt

6.41 Aikaisemmat tutkimukset

Sadetushäviöitä syntyy periaatteessa kolmessa vaiheessa:

- 1) vedenoton ja varastoinnin yhteydessä
- 2) vedenjohtamisen yhteydessä
- 3) itse sadetuspaikalla

Vedenoton ja varastoinnin sekä veden johtamisen yhteydessä syntyvät häviöt ovat lähinnä vuoto-, suoto- ja varastoaltaan osalta haihtumishäviöitä. Myös vedenjohtamisen yhteydessä syntyy haihtumishäviöitä. Niiden merkitystä voidaan kuitenkin Suomen oloissa pitää erittäin vähäisenä. Tähän viittaavat mm. Lauritzenin ja Terrellin (1967) esittämät arviot, joiden mukaan Yhdysvaltojen länsiosissa johtamisen yhteydessä syntyvät haihduntahäviöt ovat 1-1,5 % johdetusta vesimäärästä. Vesikasvit saattavat kuitenkin aiheuttaa merkittäviä häviöitä transpiraation kautta (Israelsen & Hansen 1962, Swarner 1967). Itse sadetuspaikalla häviöitä muodostuu interseptiohaihdunnasta, perkolaatiosta ja pintavalunnasta.

Sadetushäviöille käänteiselle suurelle, sadetuksen tehokkuudelle, on esitetty useita määritelmiä (Israelsen & Hansen 1962, Jensen, Swarner & Phelan 1967). Israelsen & Hansen (1962) ovat määritelleet erikseen mm. veden johtamisen, jakelun, hyödyntämisen, varastoitumisen ja jakelun tehokkuuden. Veden johtamisen tehokkuudella tarkoitetaan tällöin sadettavalle maatilalle tai sadettavalle peltoalueelle tulleen ja vedenottopaikalta otetun vesimäärän suhdetta. Veden jakelun eli itse sadettamisen tehokkuus on määritelty juuristokerrokseen varastoituneen ja sadetusalueelle tulleen vesimäärän suhteena.

Jensen (1967) on käsitellyt sadetuksen tehokkuutta kokonaishäviöiden kannalta ja hänen mukaansa sadetuksen tehokkuus (?) voidaan määritellä seuraavasti

$$\eta = \frac{T + W_e + W_c + W_b}{W_i} \times 100 \% \quad (23)$$

jossa

η = sadetukseen tehokkuus (%)

T = kasvien transpiraatio

W_e = haihdunta maan ja kasvien pinnalta

W_c = maaperän suolapitoisuuden säätelemiseksi tarvittava vesi

W_b = kasvukudoksien rakentamiseen tarvittava vesi

W_i = sadetukseen otettu vesi

Tässä yhteydessä ei interseptiota ole luettu sadetukseen häviöihin. Tämä määritelmä on analoginen Jensenin esittämälle tehokkaan sadannan määritelmälle. Sen sijaan Jensenin, Swarnerin & Phelanin (1967) esittämässä määritelmässä on interseptiohaihdunta luettu häviöihin.

Todetut häviöt ovat yleensä olleet huomattavan suuria, joskin arviot ja mittaustulokset vaihtelevat. Israelien & Hansen (1962) ovat esittäneet valunta- ja perkolaatiohäviöiden olevan yhteensä yleensä 25 % luokkaa sadetuksesta vesimäärästä.

Willardson (1972, p. 241-242) on todennut sadetukseen vaikutuksesta maahan varastoituneen veden määräksi Utahissa, Yhdysvalloissa 1959 24-87 % sadetuksesta keskiarvon ollessa 46 %. Viljelykasvina on ollut peruna ja sadetuskäytöt ovat olleet keskimäärin 100 mm kerrallaan. Varastoitunut määrä on vaihdellut suuresti kasvukauden aikana riippuen mm. käytettävissä olevasta maan vedenvarastoimiskyvystä. Häviöiden osuus ylimalkaan on ollut erittäin suuri, keskimäärin 54 %.

Jensen, Swarner & Phelan (1967) ovat esittäneet likimääräisiksi keskiarvoiksi Yhdysvalloissa varastointihäviöille 5-10 %, vedenjohtamishäviöille 25-30 % ja tilakohtaisille häviöille 45-55 %. Kokonaishäviöiksi muodostuu tällöin 61-72 %.

Myös Stamm (1967) on todennut eräässä suuressa kasteluprojektissa, että juuristokerrokseen on varastoitunut vain alle puolet eli 35 % sadetukseen käytetystä vesimäärästä. Syinä huonoon tehokkuuteen ovat tässä tapauksessa olleet maaperän pieni hyötykapasiteetti, suotautuminen ojista maaperään sekä riittämättömät sadetusjärjestelyt tiloilla. Eräässä toisessa tapauksessa Yhdysvalloissa oli 21 kasteluprojektin keskimääräinen vedenjohtamisen tehokkuus 63,1 % vaihdellen 47,5-82,7 % (Jensen, Swarner & Phelan 1967). Tilakohtainen tehokkuus oli 32,3-78,2 % ja kes-

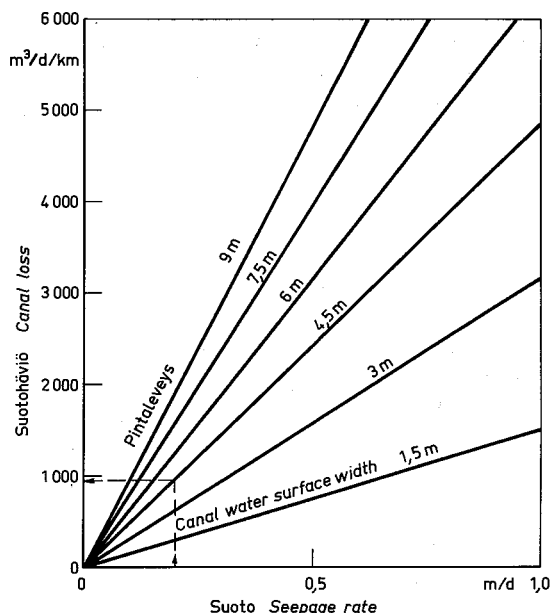
kimäärin 59,3 %. Häviöt ovat olleet yleensä sitä pienemmät mitä suurempi puute vedestä on ollut.

Suotohäviöt vedenjohtokanavista saattavat eräiden Yhdysvalloissa suoritettujen tutkimusten (Worstell 1976, Hart 1963) mukaan olla sängen huomattavia. Niinpä keskimääräinen suoto on ollut päällystämättömistä savi-hiesupohjaisista kanavista luokkaa 0,1-0,3 m/d (taulukko 25). Tämä vastaa esim. 5 m levyisestä kanavasta noin 500-1 500 m³/d kanavakilometriä kohden (kuva 31).

Taulukko 25. Keskimääräinen suoto (m/d) vedenjohtokanavista eri maalajeissa Worstellin (1976) mukaan Yhdysvalloissa.

Table 25. Seepage rates (m/d) of general soil groups in the USA (Worstell 1976).

Maalaji tai verhoitus Soil group or lining	Kokeiden lukumäärä Number of tests	Keskimääräinen suoto Average seepage rate m/d
Savi, Clay	20	0,07
Siltti, Hiesu, Silt	120	0,24
Hiekka, Sand	77	0,48
Betoni, Concrete	11	0,07
Tiivistetty maa, Compacted earth	45	0,05
Maasementti, Soil cement	5	0,02



Kuva 31. Suotohäviöt vedenjohtokanavista (Worstell 1976).

Fig. 31. Seepage rate from canals (Worstell 1976).

Vuoto- ja suotohäviöitä voidaan vähentää kiinnittämällä erityistä huomiota altaan ja vedenjohdotkanavien tai -putkien tiivistämiseen. Tiivistämisen yhteydessä voidaan käyttää myös erilaisia päällysteitä kuten polyetyleeni- tai vinyylikalvoja (Swarner 1967). Pienten altainen haihduntaa voidaan tehokkaasti vähentää myös veden pinnalle levitettävällä muovi- tai kemikaalikalvolla. Kemikaaleista ovat osoittautuneet käyttökelpoisiksi mm. eräät alkoholit, kuten hexadekanoli ja octadekanoli (Swarner 1967). Vesikasveja voidaan torjua paitsi erilaisilla mekaanisilla leikkureilla myös kemikaaleilla. Itse sadetuspaikalla on häviöiden välttämisen tärkein lähtökohta sopivan sadetuskokouksen määrän ja -intensiteetin valitseminen sekä toisaalta maan muokkaus- ja tasoitustoimenpiteet. Sadetuskokouksen kokonaismäärä ei saa ylittää juuristokerroksen vedenvarastoisuutta eikä intensiteetti maan infiltraatiokykyä. Toisaalta liian pienestä sadetuskokouksesta on seurauksena interseptiohäidynnän osuuden kasvu ja tällöin myös juuristo kehittyä lähelle maan pintaa aiheuttaen usein toistuvan kastelutarpeen. Myös sadetuskokouksen ajoittaminen pienen potentiaalisen haihdunnan ajankohtaan, esim. yöhön, saattaa merkittävästi pienentää haihduntahäviöitä.

6.42 Vihdin tutkimukset

Vihdin Maasojailla suoritetuissa sadetuskokeissa todetut sadetuskokouksen aiheuttamat maankosteuden muutokset 43 cm pintamaakerroksessa käyvät ilmi taulukoista 26 ja 27.

Taulukoissa 28 ja 29 on esitetty sadetuskokouksen aiheuttama maankosteuden kokonaismuutos 40 cm pintamaakerroksessa, suotautuminen pohjaveteen sekä interseptiohäidunta vehnällä (taulukko 28) ja heinällä (taulukko 29) Vihdissä 1967-1971.

Keskimääräinen maankosteusmuutos 40 cm pintamaakerroksessa on ollut sekä vehnällä että heinällä 13,5 mm (kuva 32). Vastaava keskimääräinen sadetuskokouksen määrä on ollut vehnällä 20,7 mm ja heinällä 20,6 mm. Näin ollen maankosteutena on mitattu sadetuskokouksesta määräästä keskimäärin 65,2 % vehnällä ja 65,5 % heinällä. Kun pohjaveteeksi suotautuneen veden määräksi on voitu jäljempänä esitettävällä tavalla laskea vehnällä 1,6 ja heinällä 1,3 mm, muodostuu interseption ja valun-

Taulukko 26. Maankosteuden muutos (tilavuus-%) eri syvyyksillä sadetuskokouksen vaikutuksesta vehnällä Vihdissä 1967-1971.

Table 26. Changes of soil moisture (% vol.) caused by irrigation of spring wheat at Vibti in 1967-1971.

Aika Date	Maankosteuden muutos (til.) syvyydellä (cm) Change in soil moisture (% vol.) at the depth (cm) of				
	0	13	23	33	43
	16.-17.6. 1967	9,1	0,7	-0,2	0,3
17.-18.7. 1967	8,3	3,3	1,7	0,7	-0,2
24.-25.7. 1967	6,8	3,6	1,9	1,3	0,7
30.-31.7. 1968	9,7	5,6	0,7	0,3	0,2
5.- 6.6. 1969	8,2	4,0	1,0	-0,1	-0,1
17.-18.6. 1969	13,0	3,6	0,0	0,1	0,0
1.- 2.7. 1970	13,4	2,0 ¹⁾	2,3 ²⁾	1,3 ³⁾	-0,1 ⁴⁾
27.-28.7. 1970	9,2	4,5 ¹⁾	2,8 ²⁾	3,1 ³⁾	1,3 ⁴⁾
2.- 3.6. 1971	16,0	0,6 ¹⁾	0,4 ²⁾	0,1 ³⁾	0,4 ⁴⁾
10.-11.6. 1971	14,1	-0,2 ¹⁾	0,0 ²⁾	0,2 ³⁾	0,1 ⁴⁾
22.-23.6. 1971	11,1	1,3 ¹⁾	0,8 ²⁾	0,5 ³⁾	1,0 ⁴⁾
M	10,8	3,5 1,6 ¹⁾	1,04	0,71	0,28

1) syvyys, *depth* 20 cm

2) " " 25 cm

3) syvyys, *depth* 30 cm

4) " " 40 cm

Taulukko 27. Maankosteuden muutos (tilavuus-%) eri syvyyksillä sadetuskokouksen vaikutuksesta heinällä Vihdissä 1967-1971.

Table 27. Changes of soil moisture (% vol.) caused by irrigation of hay at Vibti in 1967-1971.

Aika Date	Maankosteuden muutos (til.) syvyydellä (cm) Change in soil moisture (% vol.) at the depth (cm) of				
	0	13	23	33	43
	16.-17.6. 1967	8,7	0,8	0,0	-0,1
17.-18.7. 1967	5,6	1,7	0,1	0,2	0,1
24.-25.7. 1967	7,0	3,5	1,0	0,4	0,3
30.-31.7. 1968	9,7	5,1	1,9	1,1	0,4
5.- 6.6. 1969	10,7	3,4	-0,6	-2,0	-0,7
17.-18.6. 1969	12,5	7,5	2,4	0,9	-0,2
1.- 2.7. 1970	14,4	2,2 ¹⁾	1,7 ²⁾	0,8 ³⁾	0,3 ⁴⁾
27.-28.7. 1970	8,3	0,9 ¹⁾	2,8 ²⁾	1,3 ³⁾	0,4 ⁴⁾
2.- 3.6. 1971	16,4	2,8 ¹⁾	1,1 ²⁾	0,7 ³⁾	0,6 ⁴⁾
10.-11.6. 1971	13,1	2,5 ¹⁾	1,5 ²⁾	0,7 ³⁾	0,0 ⁴⁾
22.-23.6. 1971	11,5	1,9 ¹⁾	1,3 ²⁾	0,8 ³⁾	0,8 ⁴⁾
M	10,7	3,7 2,1 ¹⁾	1,2	0,44	0,15

1) syvyys, *depth* 20 cm

2) " " 25 cm

3) syvyys, *depth* 30 cm

4) " " 40 cm

Taulukko 28. Sadetusmäärä (I), sen aiheuttama maankosteuden kokonaismuutos 40 cm pintamaakerroksessa (ΔSM), suotautuminen pohjaveteen (ΔG) ja interseptiohaidunta (E_I) vehnällä Vihdissä 1967-1971.

Table 28. Irrigation (I), the total change of soil moisture in a 40 cm surface layer (ΔSM), percolation to ground water (ΔG) and interception (E_I) of spring wheat at Vibti in 1967-1971.

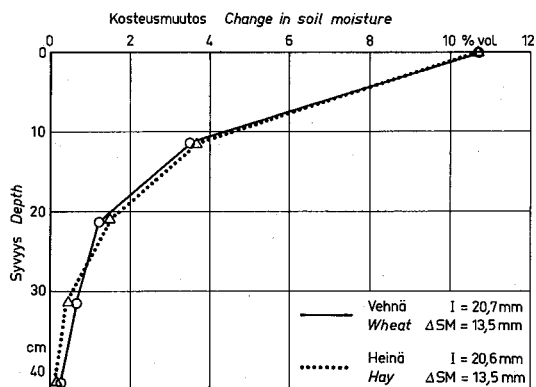
Aika Date	I mm	ΔSM mm	ΔG mm	E_I mm
16.-17.6. 1967	10,6	6,7	0,9	3,0
17.-18.7. 1967	19,7	11,4	0,9	7,4
24.-25.7. 1967	20,7	12,0	3,1	5,6
30.-31.7. 1968	18,0	13,6	2,8	1,6
5.- 6.6. 1969	18,4	10,9	1,6	5,9
17.-18.6. 1969	24,4	12,4	2,0	10,0
1.- 2.7. 1970	28,1	18,0	0,9	9,2
27.-28.7. 1970	23,0	19,7	2,1	1,2
2.- 3.6. 1971	21,3	17,3	0,5	3,5
10.-11.6. 1971	21,5	12,8	1,5	7,2
22.-23.6. 1971	21,6	14,1	1,2	6,3
Keskisarvo, Mean	20,7	13,5	1,6	5,5

Taulukko 29. Sadetusmäärä (I), sen aiheuttama maankosteuden kokonaismuutos 40 cm pintamaakerroksessa (ΔSM), suotautuminen pohjaveteen (ΔG) ja interseptiohaidunta (E_I) heinällä Vihdissä 1967-1971.

Table 29. Irrigation (I), the total change of soil moisture in a 40 cm surface layer (ΔSM), percolation to ground water (ΔG) and interception (E_I) of hay at Vibti in 1967-1971.

Aika Date	I mm	ΔSM mm	ΔG mm	E_I mm
16.-17.6. 1967	11,1	6,5	0,8	3,8
17.-18.7. 1967	17,7	5,8	0,2	11,7
24.-25.7. 1967	18,4	10,0	1,4	7,0
30.-31.7. 1968	18,0	15,2	0,9	1,9
5.- 6.6. 1969	21,5	5,8	1,2	14,5
17.-18.6. 1969	24,0	20,0	1,6	2,4
1.- 2.7. 1970	27,4	18,8	1,9	6,7
27.-28.7. 1970	23,0	11,9	2,8	8,3
2.- 3.6. 1971	23,7	21,1	0,7	1,9
10.-11.6. 1971	20,8	17,5	1,9	1,4
22.-23.6. 1971	20,8	15,5	1,4	3,9
Keskisarvo, Mean	20,6	13,5	1,3	5,8

nan yhteenlasketuksi osuudeksi keskimäärin 26,6 % vehnällä ja 28,1 % heinällä sadetusvesimäärästä. Koska sadetukset ovat olleet sängen vaimeita, on valunnan osuus häviöistä pieni. Eritään märissä olosuhteissa on todettu sadetuksen aikana ja sen jälkeen salaojista tulleen valunnan



Kuva 32. Sadetuksen aiheuttama keskimääräinen maankosteusmuutos vehnällä (yhtenäinen viiva) ja heinällä (katkoviiva) Vihdissä 1967-1971.

Fig. 32. The average change in soil moisture of wheat (unbroken line) and hay (broken line) at Vibti in 1967-1971.

olleen noin 10 % yhteisestä sadetus- ja sademäärästä. Tämä tilanne ei ole ollut normaali sadetus-tilanne, vaan pyrkimyksenä tällöin (vuonna 1974) on ollut saattaa maa mahdollisimman kosteaksi. Normaalioloissa on salaojavalunta ollut oleellisesti pienempi. Tätä tukee se, että koealueen lähellä sijaitsevilla Hövin tutkimusalueella, joka on myös salaojitettu, on kesä-heinäkuussa kuivahkoissa, sadetustilannetta vastaavissa oloissa noin 30 mm lyhytaikainen sade aiheuttanut vain alle 0,1 mm valunnan. Maaperäolot vastaavat likimain sadetuskoealueen oloja. Varsinaista pintavaluntaa ei sadetusten yhteydessä ole todettu lainkaan. Kosteuden siirtymistä yli 40 cm syvyyteen on sadetusten yhteydessä jossain määrin tapahtunut, sillä pohjaveden pinta on sadetettaessa noussut keskimäärin noin 9 cm (kohta 6.34). Kun maan tehokkaaksi huokoisuudeksi pohjaveden syvyydellä on todettu keskimäärin 2,1 %, vastaa 9 cm pohjavedenpinnan nousu 1,9 mm vesimäärää. Se, ettei kosteuden siirtyminen alaspäin ole näkynyt syvemmissä maankosteusmittauspisteissä juuri lainkaan, johtunee siitä, että kosteus alaspäin siirtyessään käyttää maassa olevia isoja huokosia, kuten juuritunneleita ja madonreikiä, jotka toimivat ohuiden putkien tavoin (Johnston & Cross 1949, Seuna 1974).

Interseptiohaidunnan suuruus on vaihdellut suuresti (taulukot 28 ja 29). Interseptiohaiduntaa on selitetty regressioanalyysillä, jossa valin-

naisina selittäjinä ovat olleet ilman lämpötila (°C), tuulen nopeus (m/s), ilman suhteellinen kosteus (%), vesihöyryn paine (mb), ilman kyllästysvajaus (mb), ilmanpaine (mb) ja kasvuvaihe (d). Lämpötilasta, tuulen nopeudesta ja ilman suhteellisesta kosteudesta on ollut mukana ilta-arvo klo 20, aamuarvo klo 8 ja keskiarvo sadetuksen alkamisesta maan pintakosteuden mittaamiseen. Lämpötilakeskiarvo on määritetty termogrammin avulla, mutta tuulen nopeus ja ilman suhteellinen kosteus sekä edelleen vesihöyryn paineen keskiarvo on jouduttu interpoloimaan. Kyllästysvajaus perustuu edellä kuvatulla tavalla saatuun ilman keskilämpötilaan ja vesihöyryn paineeseen. Ilmanpaine on ollut mukana ilta- ja aamuarvoina ja kasvuvaihe vuorokausina kylvöajankohdasta tai heinäällä niitosta lukien.

Interseptiohaihduntaa (mm/h) vehnällä ovat selittäneet parhaiten tuulen nopeus v ($r_{\bar{v}}=0,74$, $r_{v20}=0,65$ ja $r_{v8}=0,65$), kyllästysvajaus SD ($r=0,35$), ilman suhteellinen kosteus H ($r_{\bar{H}}=-0,30$, $r_{H20}=-0,42$ ja $r_{H8}=-0,23$) sekä kasvuvaihe k ($r=0,65$).

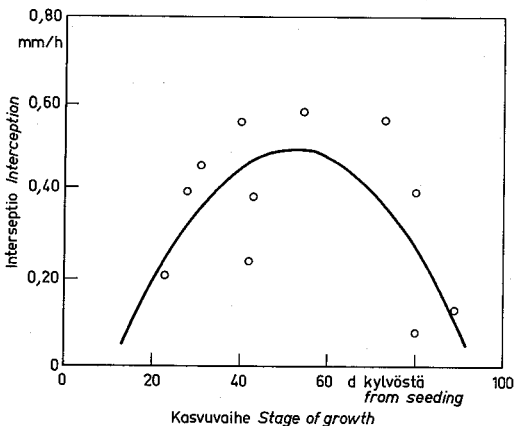
Eräillä selittäjäyhdistelmillä vehnän interseptiohaihdunta voidaan ilmaista kaavoilla (24)-(27).

$$E_I = 0,098 \bar{v} + 0,13 \quad R=0,74 \quad (24)$$

$$E_I = -0,00029 k^2 + 0,030 k - 0,29 \quad R=0,65 \quad (25)$$

$$E_I = 0,083 \bar{v} - 0,00017 k^2 + 0,020 k - 0,31 \quad R=0,82 \quad (26)$$

$$E_I = 0,090 \bar{v} - 0,00014 k^2 + 0,018 k + 0,019 SD - 0,42 \quad R=0,85 \quad (27)$$



Kuva 33. Vehnän interseptiohaihdunta (mm/h) Vihdissä 1967-1971.

Fig. 33. Interception of wheat (mm/h) at Vibti in 1967-1971.

Interseptiohaihdunnan ja kasvuvaiheen vuorosuhte (25) on esitetty kuvassa 33. Kaavoissa (24)-(27) mukana olevien selittäjien muoto on looginen, mutta aineiston vähäisyydestä johtuen jää selittäjien merkitsevyys vain tilastollisesti melkein merkitsevän tasolle ja osittain hieman sen allekin.

Haynes (1940) on esittänyt kokonaisinterseption osuudeksi apilalla 36,0 %, timoteilla 33,9 % ja kauralla 19,5 %, jotka vastaavat melko hyvin tämän tutkimuksen arvoja 26,6 % vehnälle ja 28,1 % heinälle.

6.5 Maankosteusmallit

6.51 Lineaariset mallit

Lineaarisia maankosteusmalleja kehiteltäessä on selitettävänä muuttujana ollut maankosteusmuutos kahden peräkkäisen kosteusmittauksen välillä 40 cm pintamaakerroksessa. Tarkasteltavana on ollut kasvukausi. Aineisto koskee vuosia 1967-1971 tapausten lukumäärän ollessa noin 60. Lineaarisia malleja kehiteltäessä on oletettu, ettei tutkimusalueelta tapahdu kasvukautena valuntaa. Lineaarisia malleja kehitettäessä ei myöskään maankosteustilaa ole otettu huomioon.

Selittävinä muuttujina ovat olleet sadantaa, sadetusta ja haihduntaa edustavat tekijät seuraavasti.

Sadannasta ja sadetuksesta transformaatiot:

$$\sum_i P_i, \sum_i (P_i - h) \text{ ja } \sum_i I_i$$

jolloin

P_i = vuorokausisadanta ns. normaalisademittarilla mitattuna (mm)

$\sum_i P_i$ = sadesumma kahden peräkkäisen maankosteusmittauksen välillä (mm)

h = interseptiota kuvaava vakio = 2, 3, 5 (mm/d) ja $P_i - h \geq 0$

$\sum_i I_i$ = sadetuserä kahden peräkkäisen maankosteusmittauksen välillä (mm)

Haihduntaa kuvaavina selittäjinä ovat olleet

$\sum_i E_{pi}$ = haihdunta (mm) Class A astiasta kahden peräkkäisen maankosteusmittauksen välillä

$\sum_i PET_i$ = potentiaalinen evapotranspiraatio (mm) em. aikavälinä

$\sum_i T_i$ = vuorokauden keskilämpötilojen summa (°C) em. aikavälinä

Potentiaalinen evapotranspiraatio on laskettu U.S. Weather Bureau'n haihduntakaavalla (Mustonen 1964, Mustonen & Seuna 1969) vuorokauden keskilämpötilan, vuorokauden keskikastepistemälämpötilan, tuulen nopeuden ja tulevan säteilyn avulla.

Mallien kehitys on suoritettu tavanomaista valikoivaa regressioanalyysia käyttäen. Yhtälöinä (28)-(39) on esitetty parhaita malliyhdistelmiä ja niiden yhteiskorrelaatiokertoimet.

Sadetettu kevätvehnä:

Irrigated spring wheat:

$$\Delta SM = \sum_i P_i - 0,167 \sum_i T_i + 0,69 \sum_i I_i \quad R = 0,85 \quad (28)$$

$$\Delta SM = \sum_i (P_i - 2) - 0,125 \sum_i T_i + 0,40 \sum_i I_i \quad R = 0,79 \quad (29)$$

$$\Delta SM = \sum_i P_i - 0,61 \sum_i E_{pi} + 0,81 \sum_i I_i \quad R = 0,79 \quad (30)$$

$$\Delta SM = \sum_i (P_i - 2) - 0,59 \sum_i PET_i + 0,76 \sum_i I_i \quad R = 0,73 \quad (31)$$

Sadetettu heinä:

Irrigated hay:

$$\Delta SM = \sum_i P_i - 0,169 \sum_i T_i + 0,74 \sum_i I_i \quad R = 0,86 \quad (32)$$

$$\Delta SM = \sum_i P_i - 0,63 \sum_i E_{pi} + 0,89 \sum_i I_i \quad R = 0,82 \quad (33)$$

$$\Delta SM = \sum_i (P_i - 2) - 0,126 \sum_i T_i + 0,54 \sum_i I_i \quad R = 0,81 \quad (34)$$

$$\Delta SM = \sum_i (P_i - 2) - 0,64 \sum_i PET_i + 0,90 \sum_i I_i \quad R = 0,80 \quad (35)$$

Sadettamaton kevätvehnä:

Unirrigated spring wheat:

$$\Delta SM = 0,410 \sum_i P_i - 0,31 \sum_i PET_i \quad R = 0,88 \quad (36)$$

$$\Delta SM = \sum_i P_i - 0,132 \sum_i T_i \quad R = 0,88 \quad (37)$$

Sadettamaton heinä:

Unirrigated hay:

$$\Delta SM = \sum_i P_i - 0,128 \sum_i T_i \quad R = 0,83 \quad (38)$$

$$\Delta SM = \sum_i P_i - 0,46 \sum_i E_{pi} \quad R = 0,79 \quad (39)$$

Kaikki selittäjät ovat merkitseviä vähintään 1 %:n merkitsevyystasolla, paitsi yhtälössä (31) $\sum_i I_i$, joka jää 2 %:n merkitsevyystasolle.

Saatujen tulosten perusteella voidaan todeta, että mallit, joissa haihduntatermin perustana on ollut lämpötila, ovat selittäneet yleensä parhaiten maankosteuden muutoksia (mallit (28), (29), (32), (34), (37), (38)). Potentiaalinen haihdunta on ollut yleensä lämpötilasummaa ja astiahaihduntaa huonompi maankosteuden muutosten selittäjä (31) ja (35). Syy tähän voi olla todellisen haihdunnan viive PET:n kaltaiseen meteorologiseen haihduntaindeksiin verrattuna, mikä taas johtuu lähinnä maan lämpövaraston muutoksiin kuluneesta energiasta. Lisäksi PET-analyseista on puuttunut vuosi 1971, joten tulokset eivät ole täysin vertailukelpoisia.

Interseption osuus on yleensä tullut edullisimmin huomioon otetuksi haihduntatermin yhteydessä (mallit (28), (30), (32), (33), (37), (38) ja (39)). Joissakin tapauksissa on myös interseption erottaminen suoraan sadannasta vakiosuuruusena antanut kohtalaisia yhdistelmiä (mallit (29), (31), (34) ja (35)). Interseption huomioonottaminen prosentiosuutena ei tämän tutkimuksen mukaan ole osoittautunut yleensä hyväksi. Tämä johtunee osittain siitä, että sadantatermin regressiokertoimen vapaa muodostuminen on aiheuttanut mallin latistumista, ts. pieniä kertoimia sekä sadantatetta haihduntatermille. Tämä on ilmeisesti ollut seurausta melko pitkästä maankosteuden havaintovälistä.

Verrattaessa sadanta- ja sadetustermien regressiokertoimia keskenään voidaan todeta, että sadannan kertoimen ollessa 1 on sadetustermien kerroin yleensä ollut 0,7-0,8 (mallit (28), (30), (32) ja (33)). Näin ollen sadetus on ollut tehottomampi lisäämään maan kosteutta kuin luonnonsade.

Ylimalkaan mallit ovat loogisia, vaikkei niiden selittävyys olekaan erityisen hyvä. Malleilla voitaneen arvioida koealueen tyypisessä maa-

perässä maan vesivaraston vähenemistä silloin, kun varasto täydentyy ajoittain lähelle kenttäkapasiteettia. Tällöin laskeminen voidaan aina aloittaa kenttäkapasiteetista. Sen sijaan pitkän kuivakauden maankosteutta laskettaessa tulee lineaarisen mallin suurin heikkous esille; vaikka haihtumiselle alttiin veden määrä maassa olisi pieni, on mallin haihduntatermi suuri, mikäli ilmastolliset olosuhteet sitä edellyttävät.

6.52 Epälineaariset mallit

Epälineaarisia malleja kehiteltäessä on pyritty ottamaan huomioon erityisesti maan kosteustilan vaikutus haihduntaan. Tällöin on pyritty kehittämään malli, jolla päivittäin voidaan laskea maan kosteustila sadannan, haihduntaindeksin ja edellisen päivän maankosteuden funktiona. Yhtälö on ollut muotoa (40)

$$SM_n = SM_{n-1} + P + I - aE \left(\frac{SM_{n-1}}{FC} \right)^b \quad (40)$$

SM_n = maan kosteus 40 cm:n pintakerroksessa päivänä n

SM_{n-1} = maan kosteus 40 cm:n pintakerroksessa edellisenä päivänä

P = sadanta päivien n ja n-1 välillä

I = sadetusmäärä n ja n-1 välillä

E = haihduntaindeksi n ja n-1 välillä
= astiahaihdunta (Class A), PET tai vuorokauden keskilämpötila T

FC = kenttäkapasiteetti = 170 mm

a ja b = etsittäviä kertoimia

Haihduntatermissä on käytetty muotoa $\frac{SM}{FC}$, jotta tulos olisi muodoltaan yleisempi kuin pelkä maan kosteus SM. Toisaalta ei otettu yleisesti käytettyä muotoa $\frac{SM - WP}{FC - WP}$ (mm. Bergström 1972, Shimshi et al. 1975) sen vuoksi, että käytestä maakerroksen ohuudesta (40 cm) johtuen esiintyi ajoittain maankosteuksia, jotka olivat alle laskutusrajan WP.

Mallin kertoimien määrittäminen suoritettiin iteraatioperiaatteella. Toiselle kertoimelle annettiin kiinteä arvo ja toisen kertoimen vaihdeltaessa annetuissa rajoissa laskettiin kaavan (40) avulla maankosteudet, joista tulostettiin ne päivät, joilta oli todellinen maankosteusmittaus. Samalla laskettiin todellisen ja lasketun kosteuden erot. Optimikohdan katsottiin muodostuvan sellaisella

kertoimen arvolla, jolla erojen neliösumma saavutti miniminsä. Koska aineisto oli jaettu 4 osaan (sadetettu ja sadettamaton vehnä, sadetettu ja sadettamaton heinä), muodostui kussakin iteraatiovaiheessa 4 erilaista optimia muuttuvalle kertoimelle. Saatu optimiarvo otettiin seuraavassa vaiheessa kiinteäksi ja laskettiin optimit toiselle kertoimelle. Laskeminen aloitettiin kunkin vuoden keväällä ensimmäisestä havaitusta arvosta lumen sulamisen jälkeen, jolloin maan kosteus oli lähellä kenttäkapasiteettia. Vaikka vesitaseen yhtälössä (40) ei ole valuntatermiä mukana, otettiin se huomioon siten, että maankosteuden ylärajaksi 40 cm kerroksessa asetettiin 180 mm, joka on 10 mm suurempi kuin kenttäkapasiteetti ja oli havaintojen mukaan suunnilleen suurin vesimäärä, joka ko. kerroksessa saattoi olla.

Edellä esitetyllä tavalla on saatu parhaiksi astiahaihduntaan perustuviksi malliyhdistelmiksi yhtälöt (41)-(44).

Sadetettu vehnä

$$SM_n = SM_{n-1} + P + I - 0,83 E_p \left(\frac{SM_{n-1}}{FC} \right)^4 \quad (41)$$

Sadettamaton vehnä

$$SM_n = SM_{n-1} + P - 1,33 E_p \left(\frac{SM_{n-1}}{FC} \right)^4 \quad (42)$$

Sadetettu heinä

$$SM_n = SM_{n-1} + P + I - 0,80 E_p \left(\frac{SM_{n-1}}{FC} \right)^4 \quad (43)$$

Sadettamaton heinä

$$SM_n = SM_{n-1} + P - 1,70 E_p \left(\frac{SM_{n-1}}{FC} \right)^4 \quad (44)$$

Parhaiksi potentiaaliseen evapotranspiraatioon perustuviksi malleiksi on saatu yhtälöt (45)-(48)

Sadetettu vehnä

$$SM = SM_{n-1} + P + I - 0,92 PET \left(\frac{SM_{n-1}}{FC} \right)^3 \quad (45)$$

Sadettamaton vehnä

$$SM = SM_{n-1} + P - 1,23 PET \left(\frac{SM_{n-1}}{FC} \right)^3 \quad (46)$$

Sadetettu heinä

$$SM = SM_{n-1} + P + I - 0,80 PET \left(\frac{SM_{n-1}}{FC} \right)^3 \quad (47)$$

Sadettamaton heinä

$$SM = SM_{n-1} + P - 1,56 PET \left(\frac{SM_{n-1}}{FC} \right)^3 \quad (48)$$

Lämpötilaan perustuvissa malleissa on käytetty vuorokauden keskilämpötilaa haihduntaindeksinä. Parhaiksi malleiksi on saatu (49)-(52)

$$\text{Sadetettu vehnä} \\ SM_n = SM_{n-1} + P + I - 0,24 T \left(\frac{SM_{n-1}}{FC} \right)^3 \quad (49)$$

$$\text{Sadettamaton vehnä} \\ SM_n = SM_{n-1} + P - 0,33 T \left(\frac{SM_{n-1}}{FC} \right)^3 \quad (50)$$

$$\text{Sadetettu heinä} \\ SM_n = SM_{n-1} + P + I - 0,22 T \left(\frac{SM_{n-1}}{FC} \right)^3 \quad (51)$$

$$\text{Sadettamaton heinä} \\ SM_n = SM_{n-1} + P - 0,39 T \left(\frac{SM_{n-1}}{FC} \right)^3 \quad (52)$$

Liitteessä 5 on esitetty mallilla lasketun ja havaitun maankosteuden erotusten neliösummat kertoimen a ja eksponentin b vaihdellessa.

Malleja tarkasteltaessa voidaan todeta, että vuorokauden keskilämpötilaan perustuvat mallit ovat pystyneet selittämään maankosteusvaihteluita parhaiten. Astiahaihduntaan ja potentiaaliseen evapotranspiraatioon perustuvat mallit ovat antaneet alkukesällä liian suuria ja loppukesällä liian pieniä maan kosteuden arvoja havaittuihin arvoihin verrattuna. Nämä erot selittyvät lähinnä maan lämpövaraston suurenemisellä keväällä ja pienenemisellä syksyllä, jolloin haihdunnalle jää vastaavasti vähemmän energiaa keväällä ja enemmän syksyllä. Ilman lämpötilavaihtelujen viive säteilyyn nähden (Tanner 1967) selittää lämpötilaan perustuvan haihdunnan paremmuutta tässä käytettyyn potentiaaliseen evapotranspiraatioon nähden.

Malleissa olevien haihduntatermien eksponentit ovat suuruusluokkaa 3-4. Tämä merkitsee sitä, että maankosteuden pienentyessä kenttäkapasiteettikosteudesta (n. 170 mm 40 cm:n kerroksessa) puoleen hyötykapasiteetista eli 140 mm:iin pienenee haihduntatermi noin 40 %. Koska haihduntatermi kuvaa maankosteuden pientymistä 40 cm pintakerroksessa, on siinä mukana myös mahdollinen kosteuden siirtyminen syvempiin maakerroksiin.

Haihduntatermien kertoimissa on todettavissa jossain määrin epäloogisuutta. Sadetettulla vehnällä ja heinällä ovat haihduntatermin kertoimen arvot kaikissa mallityypeissä pienempiä kuin vas-

taavasti sadettamattomalla vehnällä ja heinällä. Mikäli kertoimet asetetaan yhtä suuriksi, siirtyy ero eksponentteihin. Tämä johtuu ilmeisesti siitä, että sadettamattoman alueen maankosteuden taso on selvästi alempi kuin sadetetun ja erot kertoimissa tasoittavat sadetetun ja sadettamattoman alueen haihduntatermien suuruuteen muuten tulevia eroja. Yhdistämällä sadetettu ja sadettamaton aineisto saadaan likimain vehnällä PET:n perusteella

$$E = 1,1 \text{ PET} \left(\frac{SM_{n-1}}{FC} \right)^3 \text{ mm/d} \quad (53)$$

ja vuorokauden keskilämpötilan perusteella

$$E = 0,29 T \left(\frac{SM_{n-1}}{FC} \right)^3 \text{ mm/d} \quad (54)$$

sekä heinällä vastaavasti

$$E = 1,2 \text{ PET} \left(\frac{SM_{n-1}}{FC} \right)^3 \text{ mm/d ja} \quad (55)$$

$$E = 0,36 T \left(\frac{SM_{n-1}}{FC} \right)^3 \text{ mm/d} \quad (56)$$

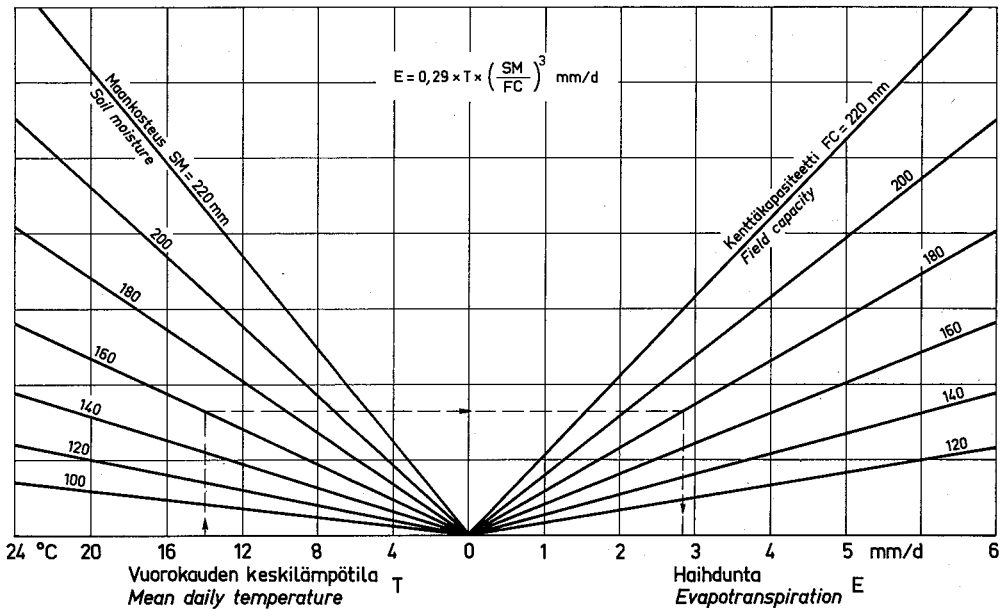
Kaava (54) on esitetty nomogrammina kuvassa 34.

Verrattaessa toisiinsa haihduntaa vehnällä ja heinällä, on haihdunta heinämaalta ollut hiukan suurempi kuin vehnämaalta.

Kaavalla (49) lasketun ja havaitun kosteuden välisen vuorosuhteen korrelaatiokerroin sadetettulla vehnällä on 0,73. Matala korrelaatiokerroin johtuu lähinnä siitä, että todellinen haihdunta on alkukesällä ollut pienempi ja loppukesällä suurempi kuin meteorologiset tekijät edellyttävät silloin kun maan lämpövaraston muutoksia ei oteta huomioon. Sadetusajankohdan määrittämistä ajatellen alkukesän haihdunnan lievä yliarviointi 40 cm kerroksessa sopii hyvin kahdestakin syystä. Ensinnäkin juuristosyvyys ja siten myös sen maakerroksen paksuus, jonka kosteus on kasvien käytettävissä, on alkukesällä pienempi kuin 40 cm. Toiseksi alkukesän vedenpuute vaikuttaa voimakkaasti satoa alentavasti (Elonen 1976).

Verrattaessa epälineaarisia ja lineaarisia malleja keskenään on huomattava, että lineaariset mallit on kehitetty peräkkäisten maankosteuserojen perusteella, epälineaariset taas iteroimalla koko kasvukausi lähtien havaitusta arvosta sen alussa. Näin ollen eivät lineaaristen ja epälineaaristen mallien korrelaatiokertoimet ole keskenään vertailukelpoisia.

Käytännössä, kun todellista maan kosteutta



Kuva 34. Aktiivisen maakerroksen vesivaraston väheneminen (mm/d) ilman lämpötilan (°C), ja maan suhteellisen kosteuden funktiona tiiviikhössä maassa vehnällä.

Fig. 34. Evapotranspiration of wheat (mm/d) as a function of air temperature (°C) and soil moisture.

ei keväälläkään tiedetä, voidaan ensimmäiseksi maan kosteudeksi otaksua kenttäkapasiteettia vastaava kosteustila noin 40 cm paksuisessa pintakerroksessa. Tämä otaksuma pitää Vihdin havaintojen mukaan erittäin hyvin paikkansa hetkellä, jolloin routa on sulanut maasta. Myös kasvukauden aikana voidaan kosteuden ylärajana pitää kenttäkapasiteettia vastaavaa kosteutta.

6.6 Sadetuksen vaikutus sadon määrään

6.6.1 Vehnä

Sadetuksen vaikutus vehnäsadon määrään käy ilmi taulukosta 30.

Keskimääräinen sato kuivapainona on ollut sadetetuissa koeruuduissa 2 318 kg/ha ja sadettamattomissa 1 286 kg/ha. Tällöin keskimääräinen sadonlisäys on ollut 1 032 kg/ha eli 80 % sadettamattomien ruutujen keskiarvosta. Satotaso on ollut ylimalkaan suhteellisen matala ja eräinä vuosina on joissakin sadettamattomissa koeruuduissa vallinnut lähes täysi kato. Syy sadettamattomien ruutujen huonoon satoon vuosina 1968, 1969, 1970 ja 1973 on todennäköi-

sesti ollut maankosteuden pieneneminen lähelle lakastumisrajaa jo kasvukauden aikaisessa vaiheessa. Koeruutujen kuivumisesta on todennäköisesti edistänyt viljelykaistojen kapeus, n. 5 m. Ilmeisesti myös maan muokkaus on kärsinyt ahtaista tiloista. Lisäksi koealueen lannoitustaso on ollut alkuvuosina matalahko. On myös mahdollista, että maan melko matala pH on alentanut vehnäsatoa, sillä koelajikkeena käytetty Svenno on verrattain vaateliias tässä suhteessa (Elonen 1977, pers. comm.). Eri vuosien satotulokset ovat poikenneet toisistaan melkoisesti varsinkin sadettamattomissa koeruuduissa. Myös saman vuoden yksittäisten ruutujen satomäärissä on hajonta melko suuri, vaikka kaikki saman vuoden ruuduittaiset koealat on rajattu paitsi mittaamalla, myös ottamalla mukaan tulevien vehnärivien lukumäärä samaksi. Toisaalta tästä johtuen ovat koeruutujen todelliset alat poikenneet teoreettisesta alasta jonkin verran ja tämä poikkeama on heijastunut myös hehtaarisatoihin. Suuresta hajonnasta johtuen jää keskimääräinen sadonlisäys 1 032 kg/ha tilastollisesti vain melkein merkitseväksi ($t=2,52$), kun testisuure t on laskettu eri vuosien keskiarvojen perusteella.

Taulukko 30. Vehnän kuiva, lajiteltu jyväsato (kg/ha) Vihdin sadetuskoealueella vuosina 1967-1973.
 Table 30. Grain yield of spring wheat (kg/ha) in the Vihti irrigation experiment in 1967-1973.

	Jyväsato (kg/ha) eri vuosina Grain yield (kg/ha) in years							
	1967	1968	1969	1970	1971	1972	1973	M
Sadetettu, <i>Irrigated</i>	3 192 ¹⁾	1 656	1 990	1 851	3 705	2 122	1 709	2 318
Sadettamaton, <i>Unirrigated</i>	2 060 ¹⁾	736	742	684	1 970	2 154	653	1 286
Sadonlisä (kg/ha), <i>Increase in yield (kg/ha)</i>	1 132	920	1 248	1 167	1 735	-32	1 056	1 032
Sadonlisä (%), <i>Increase in yield (%)</i>	55	125	168	17	89	-1,5	161	80

1) kosteudeksi on oletettu 20 % märkämpainosta

Tarkasteltaessa sadonlisäyksiä eri vuosina voidaan todeta sen vaihdelleen -32 kg/ha:sta 1 735 kg/ha:iin. Suurin sadonlisäys 1 735 kg/ha on saatu vuonna 1971, joka on alkukesän salta sateetomin vuosi koko havaintokaudella. Heikoin sadetustulos on vuodelta 1972.

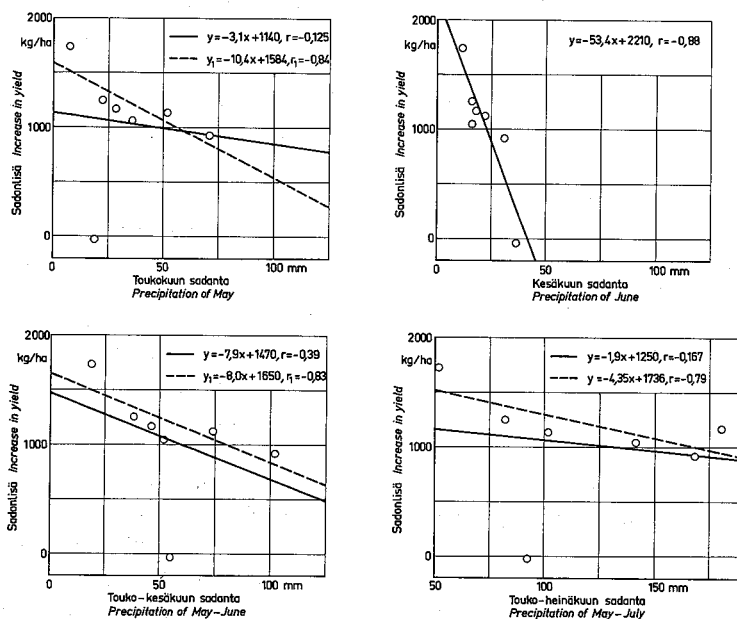
Saavutetulla sadonlisäyksellä ja kesäkuukausien sadannalla on ollut selvä riippuvuus (kuva 35). Erityisesti kesäkuun sadanta P_6 (mm) on korreloinut voimakkaasti sadonlisän Y (kg/ha)

kanssa regressioyhtälön ollessa

$$Y = -53,4 P_6 + 2 210, \quad r = -0,88 \quad (57)$$

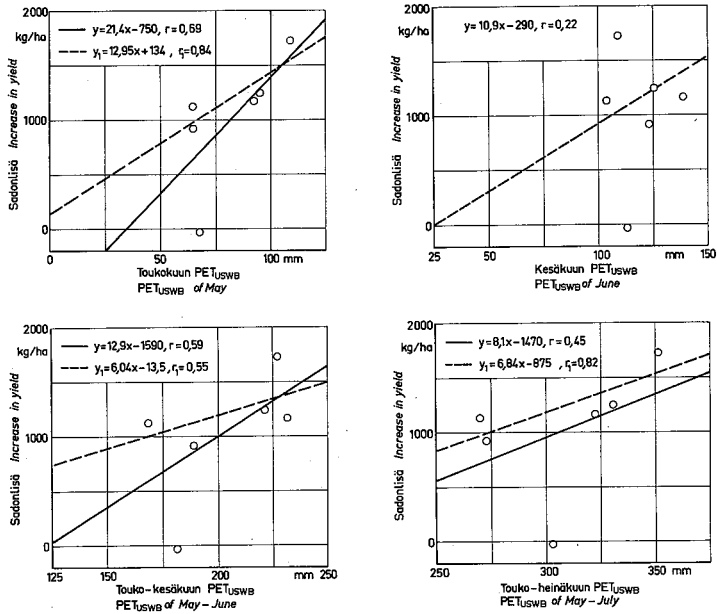
Regressioyhtälön mukaan sadonlisää ei kastelella saavuteta, jos kesäkuun sadanta ylittää 41,5 mm, mutta sadannan jäädessä tätä rajaa pienemmäksi on sadetuksella saatava sadonlisäys 534 kg/ha kymmentä sademillimetriä kohden.

Myös toukokuun, touko-kesäkuun ja touko-



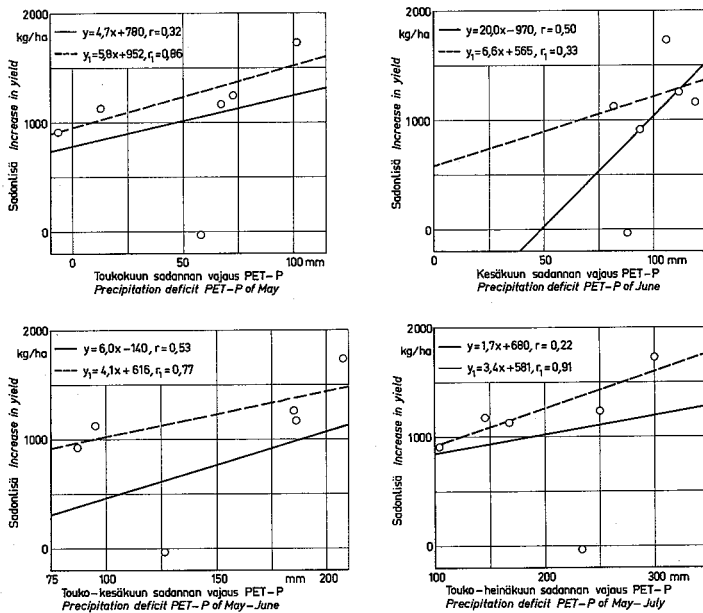
Kuva 35. Vehnäsadon lisäyksen (kg/ha) ja kesäajan sadannan (mm) vuorosuhde Vihdissä 1967-1973. Yhtenäinen viiva=kaikki vuodet mukana, katkoviiva=vuosi 1972 ei mukana.

Fig. 35. Increase in wheat yield (kg/ha) caused by irrigation vs. precipitation (mm) at Vihti in 1967-1973. Unbroken line=all years included, broken line=the year 1972 excluded.



Kuva 36. Vehnäsadon lisäyksen (kg/ha) ja potentiaalisen evapotranspiraation (mm) vuorosuhde Vihdissä 1967-1973. Yhtenäinen viiva=kaikki vuodet mukana, katkoviiva=vuosi 1972 ei mukana.

Fig. 36. Increase in wheat yield (kg/ha) vs. potential evapotranspiration (mm) at Vihti in 1967-1973. Unbroken line=all years included, broken line=the year 1972 excluded.



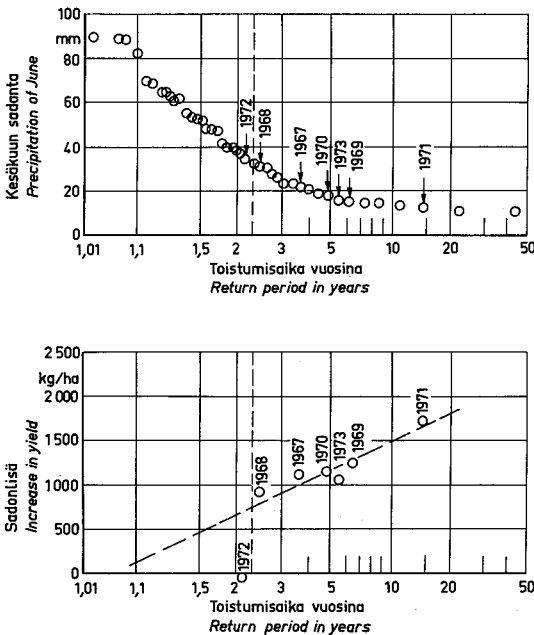
Kuva 37. Vehnäsadon lisäyksen (kg/ha) ja kesäaikaisen sadannan vajauksen (PET-P) (mm) vuorosuhde Vihdissä 1967-1973. Yhtenäinen viiva=kaikki vuodet mukana, katkoviiva=vuosi 1972 ei mukana.

Fig. 37. Increase in wheat yield (kg/ha) vs. precipitation deficit (mm) at Vihti in 1967-1973. Unbroken line=all years included, broken line=the year 1972 excluded.

heinäkuun sadannat korreloivat melko voimakkaasti sadonlisän kanssa, mikäli vuosi 1972 jätetään pois. Korrelaatiokertoimet ovat tällöin olleet toukokuussa $-0,84$, touko-kesäkuussa $-0,83$ ja touko-heinäkuussa $-0,79$.

Verrattaessa sadonlisää potentiaaliseen evapotranspiraatioon (kuva 36), ovat korrelaatiokertoimet olleet toukokuussa $0,69$, kesäkuussa $0,22$, touko-kesäkuussa $0,59$ ja touko-heinäkuussa $0,45$. Tässäkin tapauksessa vuosi 1972 heikentää korrelaatiota huomattavasti. Jos vuosi 1972 jätetään pois regressioanalyysistä, ovat korrelaatiokertoimet toukokuussa $0,84$, touko-kesäkuussa $0,55$ ja touko-heinäkuussa $0,82$.

Sadannan vajauksella (PET-P) on ollut selvä positiivinen korrelaatio saavutettuun sadonlisään. Korrelaatiokertoimet ovat olleet toukokuussa $0,32$, kesäkuussa $0,50$, touko-kesäkuun summan osalta $0,53$ ja touko-heinäkuun summan osalta $0,22$ (kuva 37) sekä vastaavasti ilman vuotta 1972 toukokuussa $0,86$, kesäkuussa $0,33$, touko-kesäkuussa $0,77$ ja touko-heinäkuussa $0,91$.

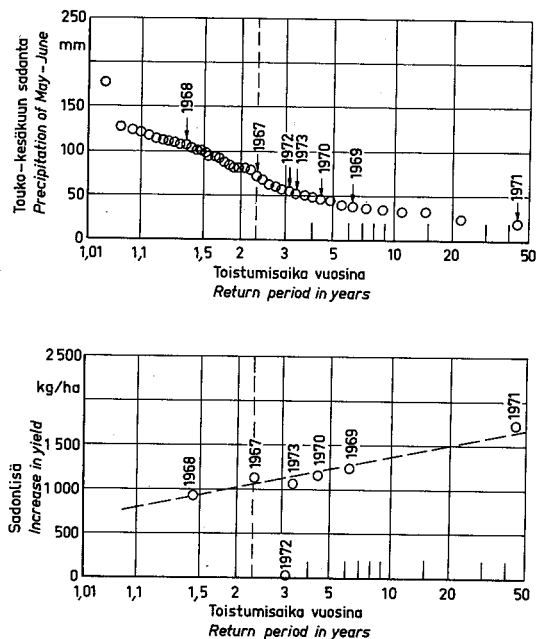


Kuva 38. Kesäkuun sadannan toistuvuusanalyysi (ylempi) ja tämän perusteella piirretty vehnäsadon lisäyksen toistuvuusanalyysi (alempi).

Fig. 38. Frequency analysis of June precipitation (above) and the corresponding frequency analysis of the increase in wheat yield (below) at Vibti.

Kaikkia korrelaatioita heikentää huomattavasti vuosi 1972. Kesä 1972 on ollut erittäin lämmin ja melko vähäsateinenkin, mutta kuitenkin sadetus ei ole parantanut satotulosta. Vehnä on kasvanut tällöin hyvin ilman sadetustakin (taulukko 30). Kesän lämpimyydestä ja vähäsateisuudesta huolimatta ei kosteudesta ole ilmeisesti ollut kovin suurta puutetta. Tähän viittaavat myös haihdunta-arvot, jotka ovat ilman kosteudesta ja tuulisuhteista johtuen olleet suhteellisen pieniä, jopa keskimääräistä pienempiä alkukesän osalta (Seuna 1973). Lisäksi sadetettu vehnä on lakoonnut jo ennen tuleentumista lähes täydellisesti.

Myös toistuvuusanalyysissä asettuvat sadonlisäykset vuotta 1972 lukuunottamatta varsin johdonmukaisesti (kuva 38 ja 39). Kuvassa 38 on sijoitettu sadonlisäykset Gumbelin toistuvuuspaperille siten, että niiden toistumisaikakoordinaatit ovat samat kuin ko. vuosien kesäkuun sadantasummien toistumisaikat. Silmävaraisesti piirretyn toistuvuuspuoran mukaan saadaan kesäkuun sadannaltaan normaalina vuotena sa-



Kuva 39. Touko-kesäkuun sadannan toistuvuusanalyysi (ylempi) ja tämän perusteella piirretty vehnäsadon toistuvuusanalyysi (alempi).

Fig. 39. Frequency analysis of precipitation in May-June (above) and the corresponding frequency analysis of the increase in wheat yield (below) at Vibti.

detuksella sadonlisäystä 750-800 kg/ha ja mikäli kesäkuun sadanta vastaa pienuudeltaan keskimäärin kerran 10 vuodessa sattuvaa sadantaa, on sadonlisäys noin 1 500 kg/ha.

Myös touko-kesäkuun (kuva 39) sadannan toistuvuusanalyysin perusteella sadonlisät asetuvat verrattain hyvin suoralle lukuunottamatta vuotta 1972. Silmävaraisesti piirretyn toistuvuus-suoran perusteella saadaan sadetuksella touko-kesäkuun sadannaltaan normaalina vuotena noin 1 050 kg/ha sadonlisä. Jos touko-kesäkuun vähäsateisuus vastaa keskimäärin kerran 10 vuodessa sattuvaa sadantaa, on sadonlisä noin 1 350 kg/ha.

Kara (1973 p. 83) on todennut sadetuksen kannattavuusrajaksi, ts. kustannuksia vastaavaksi sadonlisäyksi vehnällä 305 kg/ha. Regressioyhtälön (57) (kuva 35) mukaan on tätä sadonlisää vastaava kesäkuun sadanta 35,7 mm. Näin ollen sadetuksesta olisi taloudellista etua vain sellaisina kesinä, jolloin kesäkuun sadanta olisi pienempi kuin 35,7 mm. Toistuvuusanalyysin perusteella tämä vastaa likimain keskimäärin joka toinen vuosi sattuvaa tilannetta.

Toistuvuusanalyysien (kuva 38 ja 39) perusteella 305 kg/ha saavutetaan selvästi useammin. Kuvan 38 perusteella näin tapahtuu kun kesäkuun sademäärä alittaa 60 mm eli noin 8 vuotena 10:stä. Kuvan 39 perusteella sadetuksella saavutetaan käytännöllisesti katsoen joka vuosi vähintään 305 kg/ha suuruinen vehnäsadon lisäys.

Vaikka regressioyhtälön (57) korrelaatiokerroin onkin melko korkea, lienevät toistuvuusanalyysien perusteella arvioidut saavutettavat sadonlisäykset oikeampia, sillä toistuvuusanalyysissa ei haihduntaoloiltaan poikkeuksellinen vuosi 1972 vaikuta niin voimakkaasti kuin se tekee regressioyhtälössä (57).

Arvioitaessa kannattavuusrajan suuruutta yli-

malkaan, on otettava huomioon, että kesät 1962-1971 (Kara 1973) ovat olleet keskimäärin pitkäaikaista keskiarvoa vähäsateisempia. Vähäsateisuus on ollut poikkeuksellista tärkeimmän sadetuskuukauden, kesäkuun osalta, jonka sadanta on ollut keskimäärin 30 % pitkäaikaista keskiarvoa pienempi. Mikäli sadanta olisi ollut normaali, olisivat sadetuksella saadut sadonlisät olleet Vihdin sadetustutkimuksen tulosten perusteella selvästi pienempiä. Vähentynyt sadetustarve olisi ilmeisesti nostanut kannattavuusrajaa, sillä sadetuslaitteiden vähäinen käyttö on Karan (1973, p. 75) tutkimuksen mukaan suurin kustannuksia kohottava tekijä. Näin ollen sadetuksen kannattavuusrajat eri viljoille normalisadantaa vastaavissa oloissa ovat jo vuoden 1971 hintatasossa olleet todennäköisesti hieman korkeampia kuin Karan (1973) tutkimuksessa saadut 305 kg/ha vehnällä, 360 kg/ha mallasohralla, 460 kg/ha rehuohralla ja 495 kg/ha rehukauralla.

Vuodesta 1971 lähtien tapahtunut hintakehitys viittaa siihen, että kannattavuusraja on tällä hetkellä (1976) korkeampi kuin vuonna 1971. Vuodesta 1971 vuoteen 1975 on nimittäin viljan hinta noussut noin 30 %, mutta maataloustyöväen ohjetuntipalkat 90-100 % ja sadetuslaitteiden hinnat noin 85 % (Keskusosuusliike Hankkija).

6.62 Heinä

Sadetuksen vaikutus heinäsadon määrään käy ilmi taulukosta 31. Taulukon luvut esittävät kunkin vuoden 1. ja 2. sadon yhteenlaskettuja painoja sähkökuivattuna.

Keskimääräinen sato on ollut sadetetuissa koe-ruuduissa 7 074 kg/ha ja sadettamattomissa 5 323 kg/ha, jolloin sadetuksen aiheuttama sadonlisä on

Taulukko 31. Heinäsadon kuivapaino (kg/ha) Vihdin sadetuskocalueella vuosina 1968-1973.

Table 31. Dry weight of hay yield (kg/ha) in the Vibti irrigation experiment in 1968-1973.

	Heinäsadon kuivapaino (kg/ha) eri vuosina Dry weight of hay yield (kg/ha) in years						
	1968	1969	1970	1971	1972	1973	M
Sadetettu, <i>Irrigated</i>	9 868	4 951	7 987	5 030	6 533	8 072	7 074
Sadettamaton, <i>Unirrigated</i>	7 009	3 099	5 644	2 361	5 893	7 932	5 323
Sadonlisä (kg/ha), <i>Increase in yield (kg/ha)</i>	2 859	1 852	2 343	2 669	640	140	1 751
Sadonlisä (%), <i>Increase in yield (%)</i>	40,8	59,8	41,5	113,0	10,9	1,8	32,9

ollut 1 751 kg/ha. Vaikka keskimääräinen sadonlisä 1 751 kg/ha on 32,9 % sadettamattomasta sadosta, se ei ole tilastollisesti merkitsevä (riski > 5 %), kun t-arvo on laskettu vuosikeskiarvojen perusteella.

Sadonlisä ei heinäällä, päinvastoin kuin vehnällä, ole sanottavasti riippunut sademäärästä. Sadonlisä on vaihdellut noin 150-2 870 kg/ha välillä ilman selvää korrelaatiota kesäkuun tai kesä-heinäkuun sadantaan.

Apilan ja erityisesti nurminadan määrä on ollut yleensä sadetetuissa ruuduissa suurempi kuin sadettamattomissa ruuduissa. Sen sijaan rikkaruohojen määrässä ei ole ollut sanottavaa eroa sadettujen ja sadettamattomien ruutujen välillä.

Heinän valmistusmisaikaan ei sadetuksella ole ollut selvää vaikutusta; sen sijaan lakoontumista on sadetetuissa ruuduissa esiintynyt enemmän kuin sadettamattomissa.

Yhdysvalloissa ovat Stewart & Hagan (1969) todenneet heinäsadon sinimailasella olevan sitä suurempi mitä suurempi maan kosteusvarasto on ollut. Sadon määrä ei ole kuitenkaan enää lisääntynyt kun maan kosteusvarasto 40 cm maakerroksessa on ylittänyt noin 150 mm.

6.7 Sadetuksen vaikutus sadon laatuun

6.71 Vehnä

6.711 Kosteus ja tuleentuminen

Vehnän puintikosteus seiväskuivatuksen jälkeen on eri vuosina vaihdellut taulukon 32 osoittamalla tavalla.

Kaikkina 6 vuotena on sadetetun vehnän kos-

Taulukko 32. Vehnän kosteus (% kuivapainosta) seiväskuivatuksen jälkeen Vihdissä 1968-1973.

Table 32. The moisture of wheat (%) in the Vibti irrigation experiment in 1968-1973.

	Vehnän kosteus (% kuivapainosta) eri vuosina					
	Moisture of wheat (% of dry matter) in years					
	1968	1969	1970	1971	1972	1973
Sadetettu, Irrigated	17,2	19,5	17,5	19,0	13,5	9,0
Sadettamaton, Unirrigated	15,9	17,9	15,2	17,5	12,7	8,5

teus seiväskuivatuksen jälkeen ollut suurempi kuin sadettamattoman, vaikka erot eivät olekaan suuria.

Niittotuoreuksia, jotka leikkuupuintia silmäläpittäen olisivat merkittävämpiä, ei ole mahdollista vertailla, koska on käytetty seiväskuivatusta, jonka jälkeen puinti on suoritettu.

Suurempi kosteus sadetetuissa viljassa johtunee kasvuston rehevyydestä ja ennen kaikkea kasvun jatkumisesta pitempään kuin sadettamattomalla vehnällä. Näin ollen sadetus on tässä tapauksessa ilmeisesti pidentänyt kasvuaikaa. Myös vehnän tuleentumishavainnot viittaavat samaan suuntaan, sillä kaikkina 6 vuotena on sadettamaton vehnä tuleentunut aikaisemmin eron vaihdellessa muutamasta päivästä noin 1 1/2 viikkoon. Kasvun jatkuminen pitempään lienee seurausta siitä, että sadetuksia on suoritettu vuotta 1972 lukuunottamatta vielä heinäkuussa (vrt. Kara 1972 s. 36). Myös Elonen (1967) on todennut tuleentumisen viivästymistä sadetuksen vaikutuksesta, mikäli on sadetettu kesäkuun jälkeen, kuten Vihdissä on tehty. Toisaalta lakoontuminen on joissakin tapauksissa lisännyt sadetetun viljan kosteutta.

6.712 Puhtaus

Vehnän puhtaus on esitetty taulukossa 33, jolloin epäpuhtauksien osuuden muodostavat roskat, rikkaruohonsiemenet ja vieraat jyvät puinnin jälkeisessä sadossa.

Taulukossa 33 on kahtena vuotena sadetetun vehnän puhtaus ollut parempi ja 4 vuotena huonompi kuin sadettamattoman. Tämä ei kuitenkaan anna aivan täyttä kuvaa puhtaudesta ja rikkaruohojen määrästä ja sen vuoksi on koeruu-

Taulukko 33. Vehnän puhtaus (%) Vihdin sadetuskoealueella 1968-1973.

Table 33. The purity of wheat (%) in the Vibti irrigation experiment in 1968-1973.

	Vehnän puhtaus (%) eri vuosina					
	Purity of wheat (%) in years					
	1968	1969	1970	1971	1972	1973
Sadetettu Irrigated	95,7	98,4	97,1	97,3	96,6	96,2
Sadettamaton Unirrigated	87,2	95,7	97,2	97,8	97,2	97,6

Taulukko 34. Rikkaruohojen paino (R) ja vehnän paino olkineen (W) ilmakuivana (kg/ha) 1/4 m²-n näytealan perusteella Vihdin sadetuskoalueella 1968-1973.

Table 34. The weight of weeds (R) and wheat with straw (W) (kg/ha) in the Vibti irrigation experiment in 1968-1973.

	Paino (kg/ha) eri vuosina Weight (kg/ha) in years					
	1968	1969	1970	1971	1972	1973
Sadetettu R, <i>Irrigated R</i>	1 290	450	1 960	470	1 070	1 220
Sadetettu W, <i>Irrigated W</i>	5 050	7 530	5 830	7 890	5 950	4 520
Sadettamaton R, <i>Unirrigated R</i>	1 200	240	1 810	350	1 780	1 020
Sadettamaton W, <i>Unirrigated W</i>	2 940	3 340	4 700	2 960	4 650	2 030

duista otettu myös erillinen rikkaruohonäyte, joka on ilmakuivattu verkon päällä ja punnittu vehnä olkineen ja eri rikkaruohot.

Eri vuosina todetut vehnän ja rikkaruohojen painot ilmakuivana 1/4 m²-n näytteestä on esitetty taulukossa 34.

Vuotta 1972 lukuunottamatta ovat rikkaruohomäärät olleet sadetetuissa koeruuduissa suuremmat kuin sadettamattomissa. Erot ovat kuitenkin vuotta 1972 lukuunottamatta olleet melko pienet. Vuosi 1972 on ollut tässäkin suhteessa poikkeuksellinen, sillä huolimatta sadetettujen ruutujen edullisesta rikkaruohotilanteesta sadettamattomiin verrattuna, on sadetettujen ruutujen nettosato ollut pienempi kuin sadettamattomien.

6.713 Itävyys

Vehnän itävyyttä on tutkittu idättämällä 3 sadan jyvän erää kustakin koeruudusta. Yhteenvedo tuloksista on esitetty taulukossa 35.

Kolmena vuotena kuudesta on sadetettujen veh-

nän itävyys ollut parempi ja kolmena vuotena huonompi kuin sadettamattoman vehnän. Joinakin vuosina, kuten erityisesti 1972, on sadetettu vilja lakoontunut pahasti, jolloin myös itävyys on heikentynyt.

6.714 Hehtolitraino

Vehnän keskimääräiset hehtolitrainot on esitetty taulukossa 36.

Taulukko 36. Vehnän hehtolitraino Vihdin sadetuskoalueella 1968-1973.

Table 36. Weight of volume of wheat (kg/100 dm³) in the Vibti irrigation experiment in 1968-1973.

	Hehtolitraino (kg/100 dm ³) vuosina Weight of volume (kg/100 dm ³) in years					
	1968	1969	1970	1971	1972	1973
Sadetettu						
<i>Irrigated</i>	69,8	75,9	75,7	76,5	69,9	77,6
Sadettamaton						
<i>Unirrigated</i>	63,3	74,0	74,9	76,0	70,4	73,4

Vuotta 1972 lukuunottamatta on sadetettujen vehnän hehtolitraino ollut sadettamatonta suurempi. Kara (1972) on todennut kesäkuun sadetusten todennäköisesti nostavan hehtolitrainoa ja heinäkuun sadetuksen alentavan sitä. Vihdissä on sadetettu yleensä vielä heinäkuussakin, mutta hehtolitraino on silti noussut. Yksittäisinä vuosina poikkeaa sadetettujen ruutujen keskiarvo sadettamattomasta vuonna 1968 tilastollisesti melkein merkitsevästi (riski < 5 %) ja vuonna 1973 merkitsevästi (riski < 1 %). Muina vuosina ero ei ole merkitsevä.

Taulukko 35. Vehnän itävyys (%) Vihdin sadetuskoalueella 1968-1973.

Table 35. Germinating power of wheat (%) in the Vibti irrigation experiment in 1968-1973.

	Vehnän itävyys (%) eri vuosina Germinating power of wheat (%) in years					
	1968	1969	1970	1971	1972	1973
Sadetettu						
<i>Irrigated</i>	80,0	86,7	85,1	90,4	66,0	79,8
Sadettamaton						
<i>Unirrigated</i>	76,8	85,6	86,7	94,6	79,4	75,2

6.715 Jyväkoko

Jyväkoko on tutkittu määrittämällä 1 000 jyvän paino (taulukko 37).

Taulukko 37. Vehnän tuhannen jyvän paino (g) Vihdin sadetuskoealueella 1968-1973.

Table 37. Weight of thousand seeds (g) in the Vibti irrigation experiment in 1968-1973.

	Tuhannen jyvän paino (g) vuosina Weight (g) of 1000 seeds in years					
	1968	1969	1970	1971	1972	1973
Sadetettu Irrigated	6,57	7,90	7,60	8,43	6,76	7,06
Sadettamaton Unirrigated	6,76	7,36	6,91	7,57	6,48	5,51

Yhtä vuotta lukuunottamatta on sadetettun vehnän jyväpaino ollut suurempi kuin sadettamattoman.

6.72 Heinä

Heinän laatu on Vihdin tutkimuksen yhteydessä selvitelty lähinnä kasvilajikoostumuksen ja kasvukehityksen perusteella. Taulukossa 38 on esitetty apilan, nurminadan ja rikkaruohon painot kg/ha ilmakuivattuna 1/4 m²:n näytealan perusteella.

Taulukko 38. Apilan, nurminadan ja rikkaruohojen paino (kg/ha) ilmakuivana 1/4 m²:n näytealan perusteella. S=sadetettu, ei-S=sadettamaton, I=ensimmäinen sato, II=toinen sato.

Table 38. Weight of clover, meadow fescue and weeds (kg/ha). S=irrigated, ei-S=unirrigated, I=first yield, II=second yield.

Vuosi Year	Paino ilmakuivana (kg/ha) Air-dry weight (kg/ha)					
	Apila Clover		Nurminata Meadow fescue		Rikkaruohot Weeds	
	S	ei-S	S	ei-S	S	ei-S
1968 I	5 300	2 480	8 340	6 090	6 360	5 427
II	680	3 530	13 450	11 980	2 840	1 160
1969 I	1 060	1 150	7 980	5 120	3 630	2 090
II	1 010	1 090	6 120	3 170	1 340	2 600
1970 I	5 530	2 590	7 190	3 960	3 425	4 260
II	6 950	6 820	5 030	3 470	4 070	6 680
1971 I	4 420	1 315	2 680	230	5 040	1 210
II	2 870	2 180	1 790	220	2 700	4 130
1972 I	540	30	3 070	1 030	17 440	17 110
II	1 560	1 050	3 050	2 520	7 740	6 490
1973 I	990	580	4 580	4 010	5 560	3 270
II	1 560	1 050	3 050	2 520	7 740	6 490
M I	2 970	1 360	5 640	3 410	6 910	5 560
M II	2 280	2 450	5 100	3 690	3 970	4 630
M I-II	2 630	1 900	5 370	3 550	5 440	5 100

7. TULOSTEN EDUSTAVUUS

Esitettyjen tulosten edustavuuden selvittämiseksi on vertailtu eräitä tutkimusjaksojen meteorologisia suureita pitkäaikaisiin keskiarvoihin.

7.1 Sadannan vajauksen PET-P edustavuus

Jotta voitaisiin arvioida esitettyjen (taulukot 14-15, kuvat 18-22) sadannan vajuusten edustavuutta, on vertailtu jakson 1958-1970 lämpötiloja ja sadantaa pitkän jakson arvoihin (taulukot 39-41).

Taulukon 39 perusteella voidaan todeta, että toukokuun sademäärät ovat 1958-1970 olleet Länsi- ja Keski-Suomessa keskimäärin muutamia mm suurempia ja Itä-Suomessa pienempiä kuin vuosijakson 1931-1960 keskiarvot. Toukokuun lämpötiloissa ei tutkituilla asemilla ole ollut merkittäviä eroja kausien 1958-1970 ja 1931-1960 välillä. Maan lämpenemiseen tarvittava energia vastaa Vihdin havaintojen mukaan toukokuussa noin 10 mm haihduntaa. Kun tämä otetaan huo-

mioon vastaavat kuvassa 18 esitetyt ilmastollisen sadannan vajauksen arvot Länsi- ja Keski-Suomen osalta maan lämpövaraston muutoksella korjattu- ja ns. normaalijakson arvoja, mutta ovat Itä-Suomen osalta noin 10 mm liian suuria.

Kesäkuussa kauden 1958-1970 sekä sademäärät että lämpötilat poikkeavat ns. normaalikauden 1931-1960 arvoista siihen suuntaan, että kauden 1958-1970 sadannan vajaukset ovat liian suuria koko tutkitussa osassa Suomea. Kausien 1958-1970 ja 1931-1960 keskimääräinen lämpötilaero vastaa potentiaalisena haihduntana 5-6 mm/kk Etelä-Suomessa ja 2-3 mm Keski-Suomessa, mikäli muiden potentiaaliseen evapotranspiraatioon vaikuttavien tekijöiden oletetaan olleen näinä kausina samoja. Sadanta on ollut kaudella 1958-1970 Etelä-Suomessa noin 10 mm pienempi kuin 1931-1960. Maan lämpövaraston muutos vastaa Vihdin havaintojen mukaan kesäkuussa noin 5-6 mm haihduntaa. Yhteenvetona edellä esitetystä voidaan laskea, että ns. normaalikautta 1931-1960 vastaava kesäkuun potentiaalinen haihdunta, kun myös maan lämpeneminen otetaan huomioon, on eteläisellä rannikkovyöhyk-

Taulukko 39. Keskimääräinen korjaamaton sadanta (mm) ja lämpötila (°C) toukokuussa 1958-1970 ja 1931-1960 eräillä paikkakunnilla Suomessa.

Table 39. Mean precipitation (mm) (uncorrected values) and air temperature (°C) in May 1958-1970 and 1931-1960 in Finland.

Paikkakunta <i>Community</i>	Jakso <i>Period</i>	Sadanta (mm) <i>Precipitation (mm)</i>		Lämpötila (°C) <i>Temperature (°C)</i>	
		vaihteluväli <i>range</i>	keskiarvo <i>mean</i>	vaihteluväli <i>range</i>	keskiarvo <i>mean</i>
Helsinki,	1958-70	14-85	36	7,3-12,5	9,3
Kaisaniemi	1931-60	3-85	37	7,3-11,9	9,3
Kokemäki,	1958-70	12-90	39	6,6-12,2	8,9
maatalouskoeasema	1931-60	3-78	31 ¹⁾	5,8-11,7 ¹⁾	8,7
Jyväskylä,	1958-70	17-74	47	5,5-12,0	8,3
lentoasema	1931-60	6-95	41 ²⁾	5,3-11,9	8,7
Lappeenranta,	1958-70	19-61	31	6,3-13,2	9,2
lentoasema	1931-60	12-110	39 ³⁾	5,8-12,7	9,4
Ylistaro,	1958-70	16-79	45	5,7-12,2	8,3
maatalouskoeasema	1931-60	1-79	30	5,2-10,8	8,3
Kajaani,	1958-70	2-60	39	4,4-12,1	7,0
lentoasema	1931-60	9-103	38 ⁴⁾	3,5-10,1	6,9

1) 1931 Kokemäki, Riste

2) 1931-45, 1951-53, 1955 Jyväskylä kaupunki, 1954 Jyväskylä, Keljo

3) 1931-39, 1942, 1956 Lappeenranta kaupunki, 1940-41 Ruokolahti, Kotaniemi

4) 1931-56 Kajaani kaupunki

Taulukko 40. Keskimääräinen korjaamaton sadanta (mm) ja lämpötila (°C) kesäkuussa 1958-1970 ja 1931-1960 eräillä paikkakunnilla Suomessa.

Table 40. Mean precipitation (mm) (uncorrected values) and air temperature (°C) in June 1958-1970 and 1931-1960 in Finland.

Paikkakunta Community	Jakso Period	Sadanta (mm) Precipitation (mm)		Lämpötila (°C) Temperature (°C)	
		vaihteluväli range	keskiarvo mean	vaihteluväli range	keskiarvo mean
Helsinki,	1958-70	4-74	36	12,0-17,3	15,3
Kaisaniemi	1931-60	8-119	47	11,5-18,7	14,5
Kokemäki,	1958-70	4-129	37	11,7-16,5	14,5
maatalouskoeasema	1931-60	9-100	45 ¹⁾	10,9-17,3	13,6
Jyväskylä,	1958-70	8-126	49	11,8-16,7	14,4
lentoasema	1931-60	22-149	54 ²⁾	9,6-17,0	13,9
Lappeenranta,	1958-70	5-76	42	11,8-17,2	15,1
lentoasema	1931-60	5-87	48 ³⁾	12,3-19,2	15,0
Ylistaro,	1958-70	1-84	36	11,6-16,1	14,1
maatalouskoeasema	1931-60	7-122	56	9,7-17,3	13,5
Kajaani,	1958-70	12-88	50	10,7-15,6	13,4
lentoasema	1931-60	17-133	64 ⁴⁾	8,6-16,7	13,0

1) 1931 Kokemäki, Riste

2) 1931-45, 1951-53, 1955 Jyväskylä kaupunki, 1954 Jyväskylä, Keljo

3) 1931-39, 1941-45, 1947-56 Lappeenranta kaupunki, 1940, 1946 Ruokolahti, Kotaniemi

4) 1931-56 Kajaani kaupunki

Taulukko 41. Keskimääräinen korjaamaton sadanta (mm) ja lämpötila (°C) heinäkuussa 1958-1970 ja 1931-1960 eräillä paikkakunnilla Suomessa.

Table 41. Mean precipitation (mm) (uncorrected values) and air temperature (°C) in July 1958-1970 and 1931-1960 in Finland.

Paikkakunta Community	Jakso Period	Sadanta (mm) Precipitation (mm)		Lämpötila (°C) Temperature (°C)	
		vaihteluväli range	keskiarvo mean	vaihteluväli range	keskiarvo mean
Helsinki,	1958-70	25-111	69	14,9-18,7	16,7
Kaisaniemi	1931-60	12-121	62	15,6-20,5	17,8
Kokemäki,	1958-70	7-104	57	13,8-17,4	15,7
maatalouskoeasema	1931-60	7-175	72 ¹⁾	14,5-19,6	16,6
Jyväskylä,	1958-70	25-150	80	13,4-17,3	15,4
lentoasema	1931-60	13-229	91 ²⁾	14,1-20,8	16,9
Lappeenranta,	1958-70	24-134	72	14,2-18,6	16,3
lentoasema	1931-60	11-197	71 ³⁾	15,4-21,1	17,8
Ylistaro,	1958-70	3-121	60	13,5-17,6	15,3
maatalouskoeasema	1931-60	8-141	71	13,7-20,2	16,6
Kajaani,	1958-70	21-144	64	13,0-19,0	15,3
lentoasema	1931-60	15-154	71 ⁴⁾	13,6-19,6	16,1

1) 1931 Kokemäki, Riste

2) 1931-55 Jyväskylä kaupunki

3) 1931-39, 1941-43, 1945, 1947-56 Lappeenranta kaupunki
1940, 1944, 1946 Ruokolahti Kotaniemi

4) 1931-56 Kajaanin kaupunki

keellä noin 20 mm, läntisellä rannikkovyöhykkeellä noin 25 mm, sekä Keski- ja Itä-Suomessa 10-15 mm pienempi kuin kuvassa 19 esitetty ilmastollinen sadannan vajuus kaudelta 1958-1970.

Heinäkuu on sateiden osalta ollut 1958-1970 melko lähellä normaalia, suurempien erojen ollessa Länsi-Suomessa (Kokemäki, Ylistaro), jossa kausi 1958-1970 on ollut 10-15 mm kautta 1931-1960 vähäsateisempi. Sen sijaan lämpötilan suhteen ovat kaudet poikenneet toisistaan huomattavasti. Länsi-Suomen osalta vastannevat kauden 1958-1970 keskimääräiset sadannan vajaukset pitkän jakson arvoja, jos jälleen oletetaan muiden potentiaaliseen evapotranspiraatioon vaikuttavien tekijöiden olleen molemmilla kausilla yhtä suuria. Muussa osassa Suomea on kauden 1958-1970 perusteella laskettu keskimääräinen sadannan vajuus matalista lämpötiloista johtuen todennäköisesti noin 10 mm liian pieni ns. normaali-jaksoon verrattuna. Maan lämpövaraston muutoksilla ei heinäkuussa ole Vihdin havaintojen mukaan merkittävää vaikutusta haihduntaan ja sadannan vajaukseen.

7.2 Vihdin sadetuskokeiden 1967-1973 edustavuus

Vihdin sadetuskokesät ovat lämpötilojen osalta olleet lähellä pitkäaikaisia keskiarvoja kesäkuuta lukuunottamatta (taulukko 42). Kesäkuu on tutkimuskaudella ollut 1,2°C pitkäaikaista keskiarvoa lämpimämpi.

Taulukko 42. Kuukauden keskilämpötila (°C) Vihdissä touko-elokuussa 1967-1973 sekä keskimäärin 1931-1960. *Table 42. Monthly mean temperature (°C) for May-August at Vibti in 1967-1973 and 1931-1960.*

Vuosi Year	Kuukauden keskilämpötila (°C) Mean monthly temperature (°C)			
	V	VI	VII	VIII
1967	9,7	13,6	16,1	15,3
1968	7,4	16,2	14,5	15,3
1969	8,7	15,3	16,2	15,2
1970	9,3	16,2	16,0	14,4
1971	10,4	13,6	16,5	15,1
1972	9,1	16,4	19,3	15,9
1973	9,9	16,5	19,3	14,0
M 1967-73	9,2	15,4	16,8	15,0
M 1931-60	9,0	14,2	16,8	14,9

Sademäärien suhteen on tilanne lähes vastaava (taulukko 43). Tutkimuskauden 1967-1973 kuukausisadannat ovat kesäkuuta lukuunottamatta melko lähellä pitkäaikaisia keskiarvoja. Kesäkuun keskiarvo 21 mm on vain 46 % ns. normaalista. Kun myös touko- ja heinäkuun sademäärät ovat tutkimuskaudella olleet jonkin verran normaalia pienempiä, on sadannan vajuus tutkimuskauteen ollut pitkäaikaista keskiarvoa suurempi.

Taulukko 43. Sadanta (mm) Vihdissä touko-elokuussa 1967-1973 sekä keskimäärin 1931-1960.

Table 43. Precipitation (mm) for May-August at Vibti in 1967-1973 and 1931-1960.

Vuosi Year	Sadanta (mm) Monthly precipitation (mm)			
	V	VI	VII	VIII
1967	52	22	28	142
1968	71	31	67	111
1969	22	15	45	40
1970	28	18	134	35
1971	7	12	32	55
1972	19	36	37	188
1973	36	16	89	49
M 1967-73	33	21	62	89
M 1931-60	39	46	73	77

Haihdunnasta ei ole käytettävissä potentiaalisen evapotranspiraation arvoja vuodelta 1973, mutta kauden 1967-1972 perusteella on potenti-

Taulukko 44. Potentiaalinen evapotranspiraatio (mm) USWB:n kaavalla laskettuna Vihdissä touko-elokuussa 1967-1972 sekä keskimäärin 1953-1972.

Table 44. Potential evapotranspiration (mm) for May-August at Vibti in 1967-1972 and 1953-1972 computed by the USWB formula.

Vuosi Year	Potentiaalinen evapotranspiraatio (mm) Potential evapotranspiration (mm)			
	V	VI	VII	VIII
1967	65	104	104	45
1968	65	124	84	59
1969	95	126	110	88
1970	93	139	90	74
1971	109	118	124	76
1972	69	113	122	66
M 1967-72	83	121	105	67
M 1952-72	82	111	98	61

aalinen evapotranspiraatio Vihdissä ollut tutkimuskautena toukokuussa lähellä pitkäaikaista keskiarvoa, kesäkuussa ja heinäkuussa noin 10 % keskimääräistä suurempi (taulukko 44).

Näin ollen on tutkimuskausi ilmeisesti ollut sadetukselle edullisempi kuin pitkällä jaksolla keskimäärin. Tämän vuoksi ei tämän tutkimuksen keskimääräisiä sadonlisäyksiä voi pitää pitkän jakson keskimääräisenä, vaan on arvioitava keskimääräinen sadonlisä esim. toistuvuusanalyysin avulla, kuten kohdassa 6.61 on tehty.

8. LOPPUTIIVISTELMÄ

Tutkimuksessa on tarkasteltu kasteluveden tarpeen ja riittävyden arvioimista erityisesti alueellista vedenkäytön suunnittelua silmälläpitäen Suomen oloissa. Tällöin on tutkittu mm. sadannan ja meteorologisen haihduntaindeksin vaihtelua maan eri osissa sekä valunnan kesäaikaista suuruutta ja vaihtelua eräissä vesistöissä. Edelleen on kiinnitetty huomiota maankosteuden vaihteluihin sadettamattomalla ja sadetettulla pelto- maalla Etelä-Suomessa Vihdissä. Samalla alueella on tutkittu myös sadetuksen vaikutusta vehnä- ja heinäsadon määrään ja laatuun.

Vaikka sadetusta ei Suomessa voida pitää välttämättömänä vaan lähinnä täydentävänä toimenpiteenä, sattuu varsinkin tärkeimmillä viljanviljelyalueilla, Etelä-, Lounais- ja Länsi-Suomessa usein kesiä, jolloin sadanta selvästi rajoittaa viljelykasvien kasvua. Sadannan riittävyttä on tarkasteltu kasvien minimivedentarpeen (taulukot 11-12), kasvien optimivedentarpeen (taulukko 13) tehoisan sadannan ja kuivakausien (taulukot 1-2 ja kuvat 5-8) sekä potentiaalisen haihdunnan (PET) (taulukot 14-15 sekä kuvat 18-21) perusteella.

Tutkimuksen mukaan kevätiljojen minimivedentarve ylittää sadannan Etelä- ja Länsi-Suomessa toukokuussa 60 %:na, kesäkuussa 95 %:na ja heinäkuussa 40-50 %:na vuosista. Keskimääräinen näin laskettu sadannan vaje on Etelä-Suomessa (Vihti ja Anjala) toukokuussa noin 5 mm, kesäkuussa noin 30 mm ja heinäkuussa noin -15 mm (taulukko 12). Länsi-Suomessa (Ylistaro) ovat luvut vastaavasti toukokuussa -1 mm, kesäkuussa 29 mm ja heinäkuussa -8 mm (taulukko 12). Ne-

gatiiviset arvot tarkoittavat sadannan ylimäärää minimivedentarpeeseen nähden ja minimivedentarve on määritelty sadannaksi, jota pienempi sadanta sopivista viljely- ja muokkaustoimenpiteistä huolimatta muodostuu kasvien kehitystä rajoittavaksi tekijäksi.

Potentiaalinen evapotranspiraatio laskettuna USWB:n kaavalla ylittää sadannan pitkällä jaksolla keskimäärin Etelä- ja Lounais-Suomessa sekä länsirannikolla toukokuussa 40-45 mm:llä, kesäkuussa 60-65 mm:llä ja heinäkuussa 30-40 mm:llä. Sisä-Suomessa ero on toukokuussa 25-35 mm, kesäkuussa 50-55 mm ja heinäkuussa 10-30 mm (taulukko 14 ja kuvat 18-21). Kesäkuun keskimäärin kerran 20 vuodessa sattuva sadannan vaje on 1,5-3-kertainen keskimääräiseen sadannan vajuuteen verrattuna (taulukko 15). Toukoheinäkuun sadannan vaje on Etelä- ja Länsi-Suomessa keskimäärin 130-140 mm:n luokkaa pitkällä jaksolla.

Kuivakausia on tarkasteltu 7 paikkakunnalla Suomen eteläpuoliskolla vuosijakson 1951-1970 sadantojen perusteella. Kesäajan pisin yhtäjaksoinen kuivakausi, sadanta < 5 mm/7 d, alkaa Etelä- ja Länsi-Suomessa keskimäärin touko-kesäkuun vaihteessa ja kestää noin 20 d (kuva 7). Pisin kausi, jolloin sadanta < 20 mm/7 d alkaa Etelä- ja Länsi-Suomessa keskimäärin 10-15.5 ja kestää 45-55 d. Keskimäärin kerran 20 vuodessa sattuvan kuivakauden pituus on 1,5-2-kertainen keskimääräiseen kuivakauden pituuteen verrattuna.

Maan lämpötilavaihtelut ovat olleet kesäaikana pintamaassa suuria ja erityisesti maan ollessa kuiva (kuva 28). Pintamaa on tällöin lämmennyt vielä 5 cm syvyydessäkin 4-5 °C ilmaa lämpimämmäksi. Veden lämpötilavaihtelut valuma-alueeltaan 4 km²:n suuruisessa kasteluveden ottoon käytetyssä purossa ovat vaihdelleet noin 8 °C vuorokauden aikana, kun ilman lämpötila on samanaikaisesti vaihdellut noin 15-18 °C vuorokaudessa (kuva 30). Sadetus on alentanut pintamaan vuorokautista maksimilämpötilaa keskimäärin 2,2 °C ja vaikutus on tuntunut 2-3 vuorokauden ajan (kuva 29).

Maan lämpövaraston muutoksien vaikutusta haihduntaan on tarkasteltu Vihdissä 1968 ja 1969 (taulukko 10 ja kuva 17). Maan lämpövarasto on näinä vuosina kasvanut toukokuussa 8 ja 11 mm, kesäkuussa 6 mm ja heinäkuussa 2 ja 3 mm haihduntaa vastaavan määrän sekä pienentynyt syys-

kuussa 7 ja 5 mm ja lokakuussa 3 ja 2 mm haihduntaa vastaavan määrän. Elokuussa 1968 maan lämpövarasto on kasvanut haihdunnaksi muunnettuna 1 mm ja pienentynyt vuonna 1969 2 mm. Lämpövaraston muutokset ovat olleet nettosäteilystä toukokuussa noin 10 %, kesäkuussa 5 % ja heinäkuussa 2 %. Roudan sulamiseen tarvittava energia on ollut erittäin suuri, 40-50 % roudan sulamisajan nettosäteilystä vastaten 14-19 mm:n haihduntaa.

Kesäaikainen valunta vaihtelee eri vesistöissä suuresti (taulukko 21). Tärkeimmän kastelukauden, kesäkuun, keskivaluma on Etelä- ja Lounais-Suomen järveissä pienissä joissa 1-2 l/skm², ellei alueella ole huomattavaa pohjavesivaluntaa. Keskimäärin kerran 20 vuodessa on kesäkuun valuma vain 30-40 % keskimääräisestä (taulukko 21). Valuma pienenee kesäkuun aikana voimakkaasti ja on kuukauden lopussa yleensä alle puolet kuukauden alun arvosta (kuva 24). Pienissä joissa ja puroissa ovat kesäkuun lopun valumat yleensä vain vähän kesäalivalumaa suurempia.

Kesäkuun valuntaan voimakkaimmin vaikuttaviksi selittäjiksi ovat regressioanalyysissä osoittautuneet kesäkuun sadanta (neliömuodossa), alueen metsäisyys, pellon osuus, lumen vesiarvo maaliskuun puolivälissä, toukokuun sadanta ja lämpötila sekä puuston kuutiomäärä ja maanpinnan kaltevuus. Malli $q_6 = 0,00056 (P_6)^2 + 0,054 MP - 0,16$, jossa on mukana kesäkuun sadanta (P_6) ja metsäisyys (MP) on selittänyt kesäkuun valunnan (q_6) varianssista hieman yli 50 % (kuva 25). Metsäisyyden hyvä selittävyys on johtunut suureksi osaksi sen summaindeksiluonteesta. Suuri metsän osuus merkitsee mm. vähäistä pellon osuutta ja suurta karkeiden maalajien määrää.

Sadetuksen vaikutuksia maan kosteuteen ja viljelykasvien satoihin on tarkasteltu Vihdissä, Etelä-Suomessa vuosina 1967-1973 suoritettujen kenttäkokeiden perusteella. Koejärjestelyt on esitetty kuvassa 26. Alueella on suoritettu tavallisten ilmastohavaintojen (ilman lämpötila, suhteellinen kosteus, sadanta, tuulen nopeus, auringonpaistetuntien lukumäärä) lisäksi maan kosteuden, maan lämpötilan, pohjaveden syvyyden, roudan syvyyden ja sadetusmäärien mittauksia. Viljelykasveina olleista kevätvehnistä ja heinästä on selvitetty sadon määrä sekä laatutekijöistä kosteus,

tuleentuminen, puhtaus, itävyys, hehtolitrapaino ja jyväkoko vehnällä ja kasvilajikoostumus heinäällä.

Koalueen maaperä on laihaa savea, jossa savi-lajitteen ($\emptyset < 0,002$ mm) osuus on noin 30 %. Juuristoanalyysin perusteella (taulukko 23) on täysin kehittynyt kevätvehnän juuristomassasta 0-10 cm syvyydessä 70 % ja 0-5 cm syvyydessä sadetettulla 44 % ja sadettamattomalla 29 % juuristomassasta.

Sadetuksen aiheuttamat maan kosteusmuutokset ovat tapahtuneet miltei täysin 40 cm:n paksuisessa pintamaakerroksessa (taulukot 26-27). Tämän ja juuristomassan jakautuman vuoksi on tarkasteltavaksi aktiiviseksi maakerrokseksi otettu 40 cm:n pintakerros. Tämän pintakerroksen kenttäkapasiteetti on ollut 169 mm, lakastumisraja 112 mm ja hyötykapasiteetti 57 mm (kuva 27). Koalueen maaperä on ollut lievästi hapant (taulukko 24). Käytetty lannoitus on ollut osittain hidasliukoisessa muodossa, mutta määrä likimain normaalia peltoviljelyä Suomessa vastaava.

Sadetuksia on suoritettu yleensä 3-4 kertaa kesässä. Ne on annettu yöaikana yleensä klo 19-8 välisenä aikana, jolloin kerralla on sadetettu 20-25 mm sadetusintensiteetin ollessa noin 2 mm/h. Maan kosteuden lisääntyminen 40 cm:n pintamaakerroksessa on vastannut sekä vehnällä että heinäällä keskimäärin 65 % sadetetusta vesimäärästä (taulukot 28-29 sekä kuva 32). Pääosa häviöistä on muodostunut interseptionhaihdunnasta. Kun pohjaveteen on laskettu siirtyneen keskimäärin 2,0 mm vehnällä ja 1,8 mm heinäällä eikä valuntaa ole todettu, jää interseptionhaihdunnaksi 5,5 mm vehnällä ja 5,8 mm heinäällä. Tämä on sadetetusta vesimäärästä vehnällä 26,5 % ja heinäällä 28,1 %. Häviöiden suuruus on vaihdellut huomattavasti (taulukot 28-29). Parhaiten niitä ovat selittäneet tuulen nopeus, ilman kyllästysvajaus ja suhteellinen kosteus sekä kasvuvaihe (kuva 33):

Pintamaakerroksen kosteuksien ja kosteusmuutosten riippuvuutta eräistä meteorologisista tekijöistä on selvitetty regressioanalyysin avulla. Linearisessa regressioanalyysissä on ollut maan kosteusmuutosten selittäjinä sadanta, sadetusmäärä, ilman lämpötila, astiahaidunta ja potentiaalinen evapotranspiraatio sekä epälinearisissa malleissa lisäksi maan kosteus. Parhaaksi selittäjäksi on osoittautunut sadannan ja sadetusmäärän

ohella ilman lämpötila, jolloin on saatu

vehnälle

$$\Delta SM = \sum_i P_i - 0,167 \sum_i T_i + 0,69 \sum_i I_i, \quad R=0,85 \text{ ja}$$

heinälle

$$\Delta SM = \sum_i P_i - 0,169 \sum_i T_i + 0,74 \sum_i I_i, \quad R=0,86$$

Myös epälineaarisisa malleissa ovat osoittautuneet parhaiksi yhdistelmät, joissa lämpötila on ollut mukana sadannan, sadetuksen ja maan kosteustilan lisäksi. Tällöin on saatu

vehnälle

$$SM_n = SM_{n-1} + P + I - 0,24 T \left(\frac{SM_{n-1}}{FC} \right)^3$$

heinälle

$$SM_n = SM_{n-1} + P + I - 0,22 T \left(\frac{SM_{n-1}}{FC} \right)^3$$

Sadon määrään ja laatuun on sadetuksilla ollut voimakas vaikutus. Vehnäsato (jyvien kuivapaino) lisääntyi sadetuksen vaikutuksesta keskimäärin 1 032 kg/ha eli 80 % (taulukko 30). Saavutettu sadonlisäys (Y, kg/ha) on riippunut voimakkaasti kesäkuun sadannasta (P_6, mm) ($Y = -53,4P_6 + 2210$, $r = -0,88$). Ilman poikkeuksellista vuotta 1972 on korrelaatiokerroin myös toukokuussa ja touko-heinäkuussa ollut melko korkea ($r = -0,84$ ja $r = -0,79$).

Myös sadannan vajauksella (PET-P) on ollut vaikutusta sadonlisään korrelaatiokertoimien ollessa ilman vuotta 1972 toukokuussa $r = 0,86$, kesäkuussa $r = 0,50$ ja touko-heinäkuussa $r = 0,91$. Vuoden 1972 poikkeavuus yleisistä trendeistä on todennäköisesti johtunut ilman kosteuden aiheuttamasta vähäisestä haihdunnasta ja sadetun vehnän voimakkaasta lakoontumisesta kesken kasvukautta.

Toistuvuusanalyysin (kuvat 38-39) perusteella on sadetuksen aiheuttama sadonlisä 750-800 kg/ha, mikäli kesäkuun sadanta vastaa pitkäaikaista keskiarvoa ja 1 500 kg/ha, jos kesäkuun sadanta vastaa keskimäärin kerran 10 vuodessa sattuvaa vähäsateisuutta.

Sadetuksella on ollut vaikutusta sadon laatuun siten, että jyvien kosteus, hehtolitraino ja jyväpaino ovat nousseet. Itävyyteen ja puhtauteen ei sadetuksella ole todettu olevan vaikutusta.

Heinäsaato on lisääntynyt sadetuksen vaikutuksesta keskimäärin 1 751 kg/ha eli 33 % (taulukko 31).

Tulosten edustavuutta on tarkasteltu vertailemalla eräitä tutkimusjaksojen meteorologisia suureita pitkäaikaisiin keskiarvoihin. Vuosijakso 1958-1970 (taulukot 39-41) on vastannut toukuun osalta suunnilleen pitkäaikaista keskiarvoa sekä lämpötilan että sadannan suhteen. Kesäkuu 1958-1970 on ollut koko Suomessa keskimäärin pitkäaikaista keskiarvoa lämpimämpi ja vähäsaateisempi ja heinäkuu hiukan pitkäaikaista kylmempi, mutta sadannan suhteen suunnilleen normaali.

Vuosijakso 1967-1973 (taulukot 42-44) on kesäkuun osalta ollut keskimäärin 1,2 °C pitkäaikaista keskiarvoa lämpimämpi ja 25 mm vähäsaateisempi Vihdissä. Koska touko- ja heinäkuukin ovat olleet lähes 20 mm normaalia vähäsaateisempia ja lämpötilaltaan normaaleja, on vuosijakso 1967-1973 ilmeisesti ollut sadetukselle jonkin verran pitkäaikaista keskiarvoa edullisempi.

PÄÄTÖSMAININNAT

Tämän tutkimuksen perusaineisto on kerätty kastelukokeesta, joka perustettiin Vihdin Maasojan koekentälle professori Seppo E. Mustosen aloituksesta vuonna 1967. Tutkimukseen liittyvien mitausten suorittamisesta ovat Vihdissä vastanneet aluksi kenttämestari Yrjö Salmipuro ja hänen jälkeensä kenttämestari Veikko Salmipuro.

Tutkimusta on valvonut vesitalouden professori Jussi Hooli Helsingin Teknillisen Korkeakoulun rakennusinsinööriosastolta ja hän on esittänyt varteenotettuja korjaus- ja täydennysehdotuksia käsikirjoitukseen.

Professori Seppo E. Mustonen on antanut arvokkaita ja huomioonotettuja neuvoja sekä tutkimuksen kuluessa että käsikirjoitukseen tutustuttuaan. Myös professori Paavo Elonen on tutustunut käsikirjoitukseen esittäen erityisesti maaperään ja kasvinviljelyyn liittyvissä kysymyksissä tärkeitä neuvoja ja näkökohtia.

Tutkimukseen liittyvät tilastomatemattiset laskentatehtävät on suoritettu osaksi valtion tietokonekeskuksessa, osaksi vesihallituksessa FK Juhani Elorannan, FK Kari Aallon ja DI Harri Erikssonin johdolla.

Kuvien puhtaaksi piirtämisen on suorittanut piirtäjä Terttu Halme ja puhtaaksikirjoituksen konekirjoittaja Tuula Matilainen.

Kiitän saamastani avusta.

Helsingissä, syyskuussa 1977

Pertti Seuna

SUMMARY

Until the 1960s, irrigation was a method used very little to improve the yield of crops in Finland. Use was limited to the most intensive cultivation, e.g. horticulture. At the end of the 1960s sprinkling equipment began to be much more widely used for other farming, too. There are several reasons for this. At the end of the 1960s there were a few exceptionally dry summers in Finland's most important grain-raising areas. From the middle of the '60s to the beginning of the '70s several localities had only half of the long-term mean precipitation in June. At the same time experimental results on the advantages of irrigation became generally known. Cultivation intensity also began to reach a level at which irrigation became the most economical means of raising the harvest further. The large amount of sprinkling equipment over limited areas indicates that farmers have been influenced by the example of their neighbors.

The total area covered by sprinkling equipment has increased from only 21 000 ha in 1969 to about 50 000 ha in 1972 and over 80 000 in 1975, i.e. 3 % of Finland's total arable land. The real area sprinkled annually is, however, much smaller, i.e. 40-50 %, than the theoretical area.

Sprinkling in Finland is concentrated in the southern, southwestern and western sections of the country. In these areas there are often summers during which low precipitation clearly limits the growth of cultivated plants, even though sprinkling cannot really be considered imperative in Finland, but rather a supplementary measure. Since the water resources of these areas are the smallest in Finland, considering the water requirement, special measures have to be taken there to ensure the availability of sprinkling water in order to resolve conflicts of interest with other water requirements.

This study examines the need for and estimation of the availability of sprinkling water, especially with a view to regional water use planning in Finland. Precipitation and the potential evapotranspiration fluctuations in various parts of Finland, and the summer magnitude and variations in runoff in certain watercourses were studied. Furthermore, attention was paid to fluctuations in soil moisture in unsprinkled and

sprinkled fields in Vihti, southern Finland. The same area was also studied for the effects of sprinkling on the amount and quality of the wheat and hay crops.

According to the study, the minimum water requirement of spring grain exceeds precipitation (figures 1-4) in southern and western Finland in May in 60 %, in June in 95 % and in July in 40-50 % of the years studied (table 12). The average rainfall deficit computed in this way is 5 mm in May, 30 mm in June and -15 mm in July in southern Finland. In western Finland the figures are about 0 mm in May, 30 mm in June and -10 mm in July, respectively. The minimum water requirement was defined as the precipitation, so that regardless of suitable cultivation and tilling measures, less precipitation is a factor limiting the development of plants. Negative values mean an excess of precipitation in relation to minimum water requirement.

The potential evapotranspiration calculated with the U.S. Weather Bureau formula exceeds the long-term precipitation on average in southern and southwestern Finland and on the west coast in May by 40-45 mm, in June by 60-65 mm and in July by 30-40 mm. Inland, the difference is 25-35 mm in May, 50-55 mm in June and 10-30 in July (table 14 and figures 18-21). The average precipitation deficit with probable return period of 20 years is in June 1.5-3-fold the average precipitation deficit (table 15). The precipitation deficit of May-July in southern and western Finland is on average in the range 130-140 mm on a long period.

Dry spells were studied in 7 localities in the southern half of Finland for the period 1951-1970 on the basis of precipitation. The longest unbroken summer dry spell, with less than 5 mm of precipitation per 3 days, begins in southern and western Finland on average at the end of May or beginning of June and lasts 25-30 days (figure 6). The longest period with 20 mm of precipitation per 3 days, begins in southern and western Finland on average between May 10 and 15, and lasts 60-70 days. The longest dry spell, with less than 5 mm of precipitation per 7 days, begins in southern and western Finland on average at the end of May or beginning of June and lasts about 20 days (figure 7). With probable return period of 20 years the length of the dry spell is 1.5-2-fold the

average length of the dry spell.

The fluctuations in the temperature of the soil are large in the surface soil and especially when the soil is dry (figure 28). The surface soil was then 4-5 °C warmer than the air, even at a depth of 5 cm. The fluctuations in the water of a stream from a 4 km² drainage area used for sprinkling water intake were about 8 °C per day when the air temperature simultaneously fluctuated by about 15-18 °C per day (figure 30). Sprinkling reduced the daily maximum temperature of the surface soil on average by 2.2 % and the effect was felt for 2-3 days (figure 29).

The effect of changes in the heat storage of soil on evapotranspiration was studied in Vihti in 1968 and 1969 (table 10 and figure 17). The heat storage of soil during these years increased in May to an amount corresponding to 8 and 11 mm, in June 6 mm and in July 2 and 3 mm of evaporation, and decreased in September by an amount corresponding to 7 and 5 mm and in October 3 and 2 mm of evaporation. In August 1968 the heat storage of soil, converted into evaporation, grew by 1 mm and decreased in 1969 by 2 mm. Changes in the heat storage of the net radiation were about 10 % in May, 5 % in June and 2 % in July. The amount of energy needed to melt the frost was very large, i.e. 40-50 % of the net radiation, during the melting period.

The summer runoff varies greatly in the various watercourses (table 21). The mean runoff during the most important sprinkling month, June, was 1-2 l/s km² in the small rivers of lakeless southern and southwestern Finland unless the area had large ground water runoff. With probable return period of 20 years the June runoff was only 30-40 % of the average value (table 21). The runoff drops sharply in June and at the end of the month is usually less than half the value for the beginning of the month (figure 24). In small rivers and streams the runoff at the end of June is usually only slightly larger than the summer minimum runoff.

In regression analysis, the most important independent variables affecting June runoff have proved to be June precipitation (squared), the percentage of forest, the percentage of cultivated fields, the snow water equivalent in the middle of March, May precipitation and temperature, the

growing stock, and the land slope. The model $q_6 = 0.00056 (P_6)^2 + 0.054 MP - 0.16$, which includes the June precipitation (P_6) and the forest percentage (MP), has explained slightly over 50 % of the variance of June runoff (q_6) (figure 25). The good explaining ability of the forest percentage is mostly due to its nature as a sum index. A large percentage of forest means a small percentage of fields and a large amount of coarse soil types.

The effects of sprinkling on the soil moisture and yield of crops was examined in Vihti, southern Finland, on the basis of field tests made in 1967-1973. In addition to ordinary climatic observations (air temperature, relative humidity, precipitation, wind speed, number of hours of sunshine), the soil moisture, soil temperature, depth of ground water, depth of frost, and amount of sprinkling were also measured. The yield of the crop, and quality factors such as moisture, purity, germinating power, hectoliter weight and kernel size, were determined for spring wheat, and the plant species composition for hay.

The soil in the test area was loam clay in which the clay fraction ($\varnothing < 0.002$ mm) accounted for about 30 %. On the basis of a root analysis (table 23) 70 % of the completely developed spring wheat root mass was in the 10 cm top layer and 44 % of the sprinkled and 29 % of the unsprinkled root mass were in the upmost 5 cm layer.

The changes in moisture induced by sprinkling occurred almost completely in a surface soil layer 40 cm thick (tables 26-27). For this reason, and because of the root mass distribution, the active soil layer taken for examination was the 40 cm surface layer. The field capacity of this surface layer was 169 mm, the wilting point 112 mm and the available soil moisture storage 57 mm (figure 27). The soil of the test area was slightly acidic (table 24). The fertilizer used was partly in a slowly dissolving form, but the amount was approximately normal used in Finland.

Sprinkling was usually carried out 3-4 times a summer, usually during the night between 19.00 and 8.00, with 20-25 mm sprinkled at a time. The sprinkling intensity was about 2 mm/hr. The increase in the soil moisture in the 40 cm surface soil layer for both wheat and hay corresponded to an average of 65 % of the sprinkled water (tables 28-29 and figure 32). Most of the loss comprised interception. As the percolation to

the ground water was calculated to be on average 2.0 mm for wheat and 1.8 mm for hay, and no runoff was observed, the interception was 5.5 mm for wheat and 5.8 mm for hay. This is 26.5 % of the amount of water sprinkled for wheat and 28.1 % for hay. The amount of the losses varied considerably (tables 28-29). The best independent variables explaining the variation were the wind speed, saturation deficit and relative humidity of the air, and growth stage (figure 33).

The relationship between soil moisture and certain meteorological factors was determined using regression analysis. In linear regression analysis the independent variables for the changes in soil moisture were precipitation, the amount of water sprinkled, air temperature, pan evaporation and potential evapotranspiration, and in non-linear models also soil moisture. In linear form the best independent variable, in addition to precipitation and the amount of water sprinkled, was air temperature.

Then

$$\Delta SM \text{ wheat} = \sum_i P_i - 0.167 \sum_i T_i + 0.69 \sum_i I_i, \\ R=0.85 \text{ and}$$

$$\Delta SM \text{ hay} = \sum_i P_i - 0.169 \sum_i T_i + 0.74 \sum_i I_i, \\ R=0.86$$

In non-linear models, too, the best combinations are those in which temperature has been used in addition to precipitation, sprinkling and soil moisture state. This gives the following for wheat:

$$SM_n = SM_{n-1} + P + I - 0.24 T \left(\frac{SM_{n-1}}{FC} \right)^3$$

and for hay:

$$SM_n = SM_{n-1} + P + I - 0.22 T \left(\frac{SM_{n-1}}{FC} \right)^3$$

Sprinkling has had a marked effect on the amount and quality of the yield. The wheat crop (dry weight of grains) increased on average by 1 032 kg/ha, or 80 % as a result of sprinkling (table 30). The crop increase achieved (Y, kg/ha) depended strongly on precipitation in June (P_6 , mm) ($Y = -53.4P_6 + 2\ 210$, $r = -0.88$). Without 1972, an exceptional year, the correlation coefficient for May and May-July was also fairly high ($r = -0.84$ and $r = -0.79$).

The precipitation deficit, too (= the difference between potential evapotranspiration and precipitation) had an effect on the increase in yield, the correlation coefficients (excluding 1972) being $r = 0.86$ for May deficit, $r = 0.50$ for June deficit and $r = 0.91$ for May-July deficit. The divergence of 1972 from the general trends was evidently a result of the slight evaporation caused by the humidity of the air and the marked lying down of the wheat in the middle of the growing season. Frequency analysis (figures 38 and 39) gives the increase in yield caused by sprinkling as 750-800 kg/ha, if the precipitation in June corresponds to the long-term average, and 1 500 kg/ha if the precipitation in June corresponds to the low precipitation with probable return period of 10 years.

Sprinkling affected the quality of the yield by raising the kernel moisture, hectoliter weight and kernel weight. Sprinkling has not been found to have any effect on germination and purity.

The hay crop increased as a result of sprinkling on average by 1 751 kg/ha, or 33 % (table 31).

The representativeness of the results was examined by comparing the meteorological variables for certain research periods with the long-term averages. The period 1958-1970 (tables 39-41) corresponded pretty well to the long-term average for May for both temperature and precipitation. In 1958-1970 June was warmer and dryer than the long-term average for the whole of Finland, and July slightly cooler than the long-term average, but more or less normal for precipitation.

In Vihti, during the period 1967-1973 (tables 42-44) June was on average 1.2 °C warmer than the long-term average and there was 25 mm less precipitation. Since May and even July had nearly 20 mm less rain than normal and had normal temperatures, the period 1967-1973 was evidently somewhat more favorable for sprinkling than the long-term average.

KÄYTETYT MERKINNÄT

A	= valuma-alueen ala (km ²)
a	= sadannan vajauksellisten vuosien osuus (%)
a	= kerroin maankosteusyhtälöissä
b	= eksponentti maankosteusyhtälöissä
b	= varsien lakastuminen
C	= maan ominaislämpö (J/cm ³ °C tai cal/cm ³ °C)
D	= jakson pituus (d)
E	= haihdunta (mm)
E _I	= interseptiohaihdunta (mm)
E _{max}	= todellinen haihdunta optimaalisissa kosteusoloissa (mm)
E _{u max}	= todellinen haihdunta päävarastosta optimaalisissa kosteusoloissa (mm)
E _p	= astiahaihdunta (mm)
E _s	= evaporaatio = haihdunta maanpinnasta (mm)
ET	= evapotranspiraatio (mm)
?	= sadetuksen tehokkuus (%)
FC	= kenttäkapasiteetti (til.-% tai mm)
FP	= pellon osuus valuma-alasta (%)
G	= pohjavesivarasto (mm)
ΔG	= pohjavesivaraston muutos (mm)
GP	= sora-alueiden osuus valuma-alasta (%)
GMP	= soramoreenialueiden osuus valuma-alasta (%)
h	= maakerroksen paksuus (cm)
h	= interseptiota kuvaava vakio maankosteusyhtälöissä (mm)
H	= ilman suhteellinen kosteus (%)
HHs	= hienon hiesun pitoisuus (% ϕ =0.002-0.006 mm)
HP	= hietä-alueiden osuus valuma-alasta (%)
HMP	= hietamoreenialueiden osuus valuma-alasta (%)
I	= sadetusmäärä (mm)
k	= kasvuvaihe (d)
k	= kasvuvaihekerroin
L	= veden höyrystymislämpö=590 cal/g; 1 mm $\hat{=}$ 59 cal/cm ² $\hat{=}$ 247 J/cm ²
L	= järvisyys (%)
LS	= maanpinnan keskikaltevuus (%)
M	= keskiarvo
MP	= metsän osuus valuma-alasta (%)
Mq	= keskivaluma (l/s km ²)
N	= kuukauden järjestysluku
P	= sadanta (mm)

LIST OF SYMBOLS

<i>drainage area (km²)</i>
<i>percentage of precipitation deficit years (%)</i>
<i>coefficient in soil moisture equations</i>
<i>exponent in soil moisture equations</i>
<i>hailm destruction</i>
<i>specific heat of soil (J/cm³ °C or cal/cm³ °C)</i>
<i>length of period (d)</i>
<i>evaporation (mm)</i>
<i>interception (mm)</i>
<i>actual evapotranspiration during optimum soil moisture (mm)</i>
<i>actual evapotranspiration from main storage during optimum soil moisture (mm)</i>
<i>evaporation from Class A pan (mm)</i>
<i>evaporation from soil (mm)</i>
<i>evapotranspiration (mm)</i>
<i>efficiency of irrigation (%)</i>
<i>field capacity (%-vol or mm)</i>
<i>percentage of cultivated land (%)</i>
<i>ground water storage (mm)</i>
<i>change in ground water storage (mm)</i>
<i>percentage of gravel areas (%)</i>
<i>percentage of gravel moraine areas (%)</i>
<i>thickness of soil layer (cm)</i>
<i>constant indicating interception in soil moisture equations (mm)</i>
<i>relative humidity of air (%)</i>
<i>percentage of fine silt (%ϕ=0.002-0.006 mm)</i>
<i>percentage of fine sand areas (%)</i>
<i>percentage of fine sand moraine areas (%)</i>
<i>irrigation (mm)</i>
<i>stage of growth (d)</i>
<i>coefficient of growth stage</i>
<i>latent heat of vaporization=590 cal/g; 1 mm$\hat{=}$59 cal/cm²$\hat{=}$247 J/cm²</i>
<i>lake percentage (%)</i>
<i>mean land slope (%)</i>
<i>mean value</i>
<i>percentage of forest areas (%)</i>
<i>mean runoff (l/s km²)</i>
<i>number of month</i>
<i>precipitation (mm)</i>

P ₄	= huhtikuun sadanta (mm)	<i>precipitation of April (mm)</i>
P ₅	= toukokuun sadanta (mm)	<i>precipitation of May (mm)</i>
P ₆	= kesäkuun sadanta (mm)	<i>precipitation of June (mm)</i>
PET	= potentiaalinen evapotranspiraatio (mm)	<i>potential evapotranspiration (mm)</i>
PET _{corr}	= korjattu potentiaalinen evapotranspiraatio (mm)	<i>corrected potential evapotranspiration (mm)</i>
PET _J	= potentiaalinen haihdunta Johanssonin kaavalla (mm)	<i>potential evapotranspiration by Johansson formula (mm)</i>
PET _{USWB}	= potentiaalinen haihdunta USWB:n kaavalla (mm)	<i>potential evapotranspiration by USWB formula (mm)</i>
PP	= suon osuus valuma-alasta (%)	<i>percentage of peat land (%)</i>
PP _d	= ojitetun suon osuus valuma-alasta (%)	<i>percentage of drained peat land (%)</i>
q	= valuma (l/s km ²)	<i>runoff (l/s km²)</i>
q ₆	= kesäkuun keskivaluma yksittäisenä vuotena (l/s km ²)	<i>mean runoff of June in a single year (l/s km²)</i>
Q	= energia ilman lämpenemiseen (J/cm ² tai cal/cm ²)	<i>sensible heat (J/cm² or cal/cm²)</i>
R	= nettosäteily (J/cm ² tai cal/cm ²)	<i>net radiation (J/cm² or cal/cm²)</i>
R	= yhteiskorrelaatiokerroin	<i>multiple correlation coefficient</i>
r	= korrelaatiokerroin	<i>correlation coefficient</i>
S	= maan lämpövaraston muutos (J/cm ² tai cal/cm ²)	<i>change in soil heat storage (J/cm² or cal/cm²)</i>
s	= sadonkorjuu	<i>harvest</i>
Sa	= savipitoisuus (%Ø <0.002 mm)	<i>percentage of clay (%)</i>
SD	= ilman kyllästysvajaus (mb)	<i>moisture deficit of air (mb)</i>
SM	= maan kosteus (til.% tai mm)	<i>soil moisture (%-vol. or mm)</i>
ΔSM	= maan kosteuden muutos (til.% tai mm)	<i>change in soil moisture (%-vol. or mm)</i>
SP	= hiekka-alueiden osuus valuma-alasta (%)	<i>percentage of sand areas (%)</i>
SMP	= hiekkamoreenialueiden osuus valuma-alasta (%)	<i>percentage of sand moraine areas (%)</i>
T	= transpiraatio (mm)	<i>transpiration (mm)</i>
T	= lämpötila (°C)	<i>temperature (°C)</i>
T ₅	= toukokuun keskilämpötila yksittäisenä vuotena (°C)	<i>mean temperature of May in a single year (°C)</i>
T ₆	= kesäkuun keskilämpötila yksittäisenä vuotena (°C)	<i>mean temperature of June in a single year (°C)</i>
u	= oraalle tulo	<i>emergence</i>
v	= tuulen nopeus (m/s)	<i>wind velocity (m/s)</i>
VS	= puuston kuutiomäärä valuma-alaa kohden (m ³ /ha)	<i>volume of growing stock in total drainage area (m³/ha)</i>
W _b	= kasvikudoksien rakentamiseen tarvittava vesi (mm)	<i>water used in building plant tissue (mm)</i>
W _c	= maaperän suolapitoisuuden säätelyä varten tarvittava vesi (mm)	<i>water for regulation of salt concentration (mm)</i>
W _e	= haihdunta maan ja kasvien pinnalta (mm)	<i>evaporation from soil and plant surfaces (mm)</i>
W _i	= sadetukseen otettu vesi (mm)	<i>water supplied for irrigation (mm)</i>
WP	= lakastumisraja (til.% tai mm)	<i>wilting point (%-vol. or mm)</i>
WS	= lumen vesiarvo 15.3. (mm)	<i>water equivalent of snow (March 15) (mm)</i>
Y	= sadonlisä (kg/ha)	<i>increase in yield caused by irrigation (kg/ha)</i>

KIRJALLISUUTTA

- Allen, W.H. & Lambert, J.R. 1971. Application of the principle of calculated risk to scheduling of supplemental irrigation, I. concepts. *Agricultural Meteorology*, 8.
- Andersson, S. 1969. Markfysikaliska undersökningar i odlad jord. English summary. *Grundförbättring* 22.
- Andersson, S. & Wiklert, P. 1972. Markfysikaliska undersökningar i odlad jord. *Grundförbättring* No. 2-3, pp. 53-143.
- Baier, W. 1965. The interrelationship of meteorological factors, soil moisture and plant growth. *Int. J. Biometeor.*, Vol. 9. No. 1, pp. 5-20.
- Bennet, O.L. & Doss, B.D. 1963. Effects of soil moisture. Regime on yield and evapotranspiration from cool-season perennial forage species. *Agronomy Journal*, Vol. 55, pp. 275-278.
- Blaney, H.F. & Criddle, W.D. 1945. A method of estimating water requirements in irrigated areas from climatological data. U.S. Dept. of Agriculture, Soil Conservation Service.
- Blaney, H.F. & Criddle, W.D. 1950. Determining water requirements in irrigated areas from climatological and irrigation data. U.S. Dept. Agric. SCS.TP. 96. 48 p.
- Blaney, H.F. & Criddle, W.D. 1966. Determining consumptive use for water developments. *Irrigation & Drainage Specialty Conference*, Las Vegas, Nev., Nov. 2-4.
- Blaney, H.F. & Morin, K.V. 1942. Evaporation and consumptive use of water empirical formulae. *Amer. Geophys. Union, Trans.* 23. pp. 76-83.
- Bloodworth, M.E., Barleson, C.A. & Cowley, W.R. 1958. Root distribution of some irrigated crops using undisturbed soil cores. *Agronomy Journal*, Vol. 50, pp. 317-320.
- Boodt, M.de, Hartmann, R. & Meester, P.de. 1967. Determination of soil moisture characteristics for irrigation purposes by neutron-moisture meter and air-purged tensiometers. Isotope and radiation techniques in soil physics and irrigation studies. Proc. of a Symposium, Istanbul, 12-16 June, pp. 147-160.
- Brutsaert, W. 1965. Evaluation of some practical methods of estimating evapotranspiration in arid climates at low latitudes. *Water Resources Research* 1, pp. 187-191.
- Bryson, R.A. & Kuhn, P.M. 1952. Some regional heat budget values for northern Canada. *Geogr. Bulletin* 17. pp. 57-66.
- Budyko, M.I. 1956. The heat balance of the Earth's surface. Office Tech. Serv., U.S. Dep. Com., 259 p. Washington D.C.
- Buras, N., Nir, D. & Alperovits, E. 1973. Planning and updating farm irrigation schedules. *Journal of the Irrigation and Drainage Division, ASCE*, Vol. 99, No. IR 1, Proc. Paper 9586, March, pp. 43-51.
- Christiansen, J.E. 1968. Pan evaporation and evapotranspiration from climatic data. *Journal of the Irrigation and Drainage Division, ASCE*, Vol. 94, No. IR 2, Proc. Paper 5988, June, pp. 243-265.
- Clark, C. 1967. The economics of irrigation. 116 p.
- Dagg, M. 1967. The neutron-moisture gauge in agricultural and hydrogeological field studies in sub-humid areas. Isotope and radiation techniques in soil physics and irrigation studies. Proc. of a Symposium, Istanbul, 12-16 June, pp. 177-188.
- Damagnez, J.A. 1967. Production de matiere seche des cultures irriguees en zone Mediterranee aride. Isotope and radiation techniques in soil physics and irrigation studies. Proc. of a Symposium, Istanbul, 12-16 June, pp. 343-356.
- Danielson, R.E. 1967. Root systems in relation to irrigation. *Irrigation of Agricultural Lands*, ed. Hagan, R.M., Haise, H.R. & Edminster, T.W., pp. 390-424.
- David, W.P. & Hiler, E.A. 1970. Predicting irrigation requirements of crops. *Journal of the Irrigation and Drainage Division, ASCE*, Vol. 96, No. IR 3, Proc. Paper 7507, September, pp. 241-255.
- Day, P.R., Bolt, G.H. & Anderson, D.M. 1967. Nature of soil water. *Irrigation of Agricultural Lands*, ed. Hagan, R.M., Haise, H.R. & Edminster, T.W., pp. 193-208.
- Denmead, O.T., & Shaw, R.H. 1962. Availability of soil water to plants as affected by soil moisture content and meteorological conditions. *Agronomy Journal*, Vol. 54, pp. 385-390.
- Elonen, P. 1971. Kevätviljojen sadetus. *Vakolan tiedote* 15/71.
- Elonen, P. 1975. Sadetustarpeen määrittäminen. *Sadetusopas* pp. 35-38.
- Elonen, P. 1976. Kasvien vedensaannin turvaaminen. *Tuottava Maa*, osa II ed. Paatela, J. pp. 150-172.
- Elonen, P., Nieminen, L. & Kara, O. 1967. Kokemuksia kevätiljojen sadetuksesta savimaalla 1964-66. *Maatalous ja koetoiminta* 21.
- Elonen, P., Nieminen, L. & Kara, O. 1967. Sprinkler irrigation on clay soils in southern Finland. *Journal of the Scientific Agricultural Society of Finland*.
- Elonen, P., Rinne, S-L. & Suomela, H. 1975. Influence of irrigation and nitrogen fertilization on grain yield and some baking quality characteristics of spring wheat. *Journal of Scientific Agricultural Society of Finland*, Vol. 47, pp. 166-180.
- England, C.B. 1963. Water use by several crops in a weighing lysimeter. *Agronomy Journal*, Vol. 55, pp. 239-241.
- Ferguson, J. 1952. The rate of evaporation from shallow ponds. *Australian J. Sci. Res.* 5. pp.
- Forsman, A. 1969. Mät- och beräkningsmetoder för bestämning av avdunstning. Svenska kommittén för internationella hydrologiska dekaderna. Statens naturvetenskapliga forskningsråd, Report 4, 30 p.
- Foth, H.D. 1962. Root and top growth of corn. *Agronomy Journal*, Vol. 54, pp. 49-52.

- Fritschen, L.J. & van Bavel, C.H.M. 1964. The energy balance as affected by height and maturity of sudan grass. *Agronomy Journal*, Vol. 56, pp. 201-204.
- Fuchs, M., Tanner, C.B., Thurtell, G.W. & Black, T.A. 1969. Evaporation from drying surfaces by the combination method. *Agronomy Journal*, Vol. 61, Jan.-Feb. pp. 22-25.
- Gates, D.M. & Hanks, R.J. 1967. Plant factors affecting evapotranspiration. *Irrigation of Agricultural Lands*, ed. Hagan, R.M., Haise, H.R. & Edminster, T.W. Güreer, I. 1975. Hydrometeorological and water balance studies in Finland. Helsinki Univ. of Tech., Res. Pap. No. 49.
- Hagan, R.M. & Stewart, I.J. 1972. Water deficits irrigation design and programming. *Journal of the Irrigation and Drainage Division, ASCE*, Vol. 98, No. IR 2, Proc. Paper 8955, June, pp. 215-237.
- Hajdukovic, M., Jakovljevic, M. & Vajgand, V. 1967. Comparison of three methods of measuring soil moisture. Isotope and radiation techniques in soil physics and irrigation studies. Proc. of a Symposium, Istanbul, 12-16 June, pp. 117-127.
- Hall, W.A. & Butcher, W.S. 1968. Optimal timing of irrigation. *Journal of the Irrigation and Drainage Division, ASCE*, Vol. 94, No. IR 2, Proc. Paper 5988, June, pp. 267-275.
- Hallgren, G. 1947. Studies on the influence of precipitation on crop yields in Sweden with special reference to field irrigation. *The Annals of the Royal Agricultural College of Sweden*, Vol. 14, pp. 175-289.
- Hanks, R.J., Gardner, H.R. & Florian, R.L. 1969. Plant growth-evapotranspiration relations for several crops in the Central Great Plains. *Agronomy Journal*, Vol. 61, Jan.-Feb. pp. 30-33.
- Hargreaves, H. 1968. Consumptive use derived from evaporation pan data. *Journal of the Irrigation and Drainage Division, ASCE*, Vol. 94, No. IR 1, Proc. Paper 5863, March, pp. 97-105.
- Harrold, L.L., Peters, D.B., Dreibelbis, F.R. & McGuinness, J.L. 1959. Transpiration evaluation of corn grown on a plastic-covered lysimeter. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.* 23, pp. 174-178.
- Hart, F.C. 1963. Experience with seepage control in the Pacific Northwest. Proc. of the Seepage Symposium, Phoenix, Ariz. *ARS* 41-90, Feb., pp. 167-175.
- Haynes, J.L. 1940. Ground rainfall under vegetative canopy of crops. *Journal of American Society of Agronomy*, Vol. 32.
- Heinonen, R. 1953. Mekaanisesta maa-analyysista. Maataloustieteellinen aikakauskirja 1.
- Heinonen, R. 1954. Multakerroksen kosteussuhteista Suomen maalajeissa. *Agrogeologia julkaisuja* n:o 62.
- Heinonen, R. 1954. Om den nyttiga vattenkapaciteten i finska jordarter. *Nordisk jordbruksforskning* årg. 36.
- Helimäki, U.L. 1967. Taulukoita ja karttoja Suomen sadeoloista kaudelta 1931-1960. Tables and maps of precipitation in Finland, 1931-1960. Liite Suomen Meteorologiseen vuosikirjaan nide 66, osa 2.
- Henttonen, J. 1974. Kastelun yleisjärjestelyistä vesien moninaiskäytössä. 164 p.
- Herschfield, D. 1964. Effective rainfall and irrigation water requirements. *Journal of the Irrigation and Drainage Division, ASCE*, Vol. 90, No. IR 2, Proc. Paper 3920, June, pp. 33-47.
- Holmes, J.W., Taylor, S.A. & Richards, S.J. 1967. Measurement of soil moisture. *Irrigation of Agricultural Lands*, ed. Hagan, R.M., Haise, H.R. & Edminster, T.W. pp. 275-303.
- 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.
- Israelsen, O.W. & Hansen, V.E. 1962. Irrigation principles and practices. 447 p.
- Jensen, M.C. & Criddle, W.D. 1952. Estimated irrigation water requirements for Idaho. *Idaho Agr. Exp. Sta. Bulletin* No. 291, 23 p.
- Jensen, M.E. 1967. Evaluating irrigation efficiency. *Journal of the Irrigation and Drainage Division, ASCE*, Vol. 93, No. IR 1, Proc. Paper 5145, March, pp. 83-98.
- Jensen, M.E. 1969. Scheduling irrigation with computers. *Journal of Soil and Water Conservation*, Vol. 24, No.5, Sept.-Oct. pp. 193-195.
- Jensen, M.E. & Haise, H.R. 1963. Estimating evapotranspiration from solar radiation. *Journal of the Irrigation and Drainage Division, ASCE*, Vol. 89, No. IR 4 Proc. Paper 3737, Dec., pp. 15-41.
- Jensen, M.E., Robb, D.C. & Franzoy, C.E. 1970. Scheduling irrigations using climate-crop-soil data. *Journal of the Irrigation and Drainage Division, ASCE*, Vol. 96, No. IR 1, Proc. Paper 7131, March, pp. 25-38.
- Jensen, M.E., Swarner, L.R. & Phelan, J.T. 1967. Improving irrigation efficiency. *Irrigation of Agricultural Lands*, ed. Hagan, R.M., Haise, H.R. & Edminster, E.W. pp. 1120-1142.
- Jensen, M.E., Wright, J.L. & Pratt, B.J. 1971. Estimating soil moisture depletion from climate, crop and soil data. *Transactions of the American Society of Agricultural Engineers*, Vol. 14, No. 6, pp. 954-959.
- Jensen, M.E. et al. 1974. Consumptive use of water and irrigation water requirements. The Committee on Irrigation Water Requirements of the Irrigation and Drainage Division, ASCE.
- Jensen, P.A. & Somer, E. 1967. Scintillation techniques in soil-moisture and density measurements. Isotope and radiation techniques in soil physics and irrigation studies. Proc. of a Symposium, Istanbul, 12-16 June, pp. 31-48.
- Johansson, W. 1969. Meteorologiska elements inflytande på avdunstningen från Anderssons evaporimeter. English summary. *Grundförbättring* 22. pp. 88-105.
- Johansson, W. 1970. Bevattning i fältmässig odling. Rapport från Seminarium vid Alnarp, Sverige den 2-3 juli 1970.

- Johansson, W. 1973. Beräkning av potential evapotranspiration med ledning av observerade eller skattade värden för insolation. *Grundförbättring* 23, pp. 95-115.
- Johansson, W. 1974. Metod för beräkning av vatteninnehåll och vattenomsättningen i odlad jord med ledning av meteorologiska data. *Grundförbättring* 26, pp. 17-153.
- Johnson, W.C. 1969. Diurnal variation in growth rate of irrigated winter wheat. *Agronomy Journal*, Vol. 61, July-Aug., pp. 539-542.
- Kaitera, P. 1940. Sadonlisäyksistä sadetuskokeissa vuosina 1938-1940. Maanviljelysinsinööriyhdistyksen vuosikirja.
- Kaitera, P. 1942. Miten voin torjua kuivuutta. Porvoo.
- Kara, O. 1971. Sadetuksen tilakohtainen suunnittelu. *Vakolan tiedote* 15/71.
- 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.
- Kara, O., Seuna, P. & Heino, S. 1973. Sadetuksesta ja siihen liittyvistä tekijöistä erityisesti Kiskon seudulla. English summary: On irrigation in South-Western Finland. Vesihallituksen tiedotuksia 53. Helsinki.
- Keller, W. & Carlson, C.W. 1967. Irrigation of principal crops: Forage crops. *Irrigation of Agricultural Lands*, ed. Hagan, R.M., Haise, H.R. & Edminster, T.W. pp. 607-621.
- Kivisaari, S. & Elonen, P. 1974. Irrigation as a method of preventing detrimental late tillering of barley. *Journal of the Scientific Agricultural Society of Finland*, Vol. 3, pp. 194-207.
- Korhonen, K-H. & Gardemeister, R. 1970a. Uusi kaivu- luokitusjärjestelmä. *Rak. tekniikka* 11-12, pp. 706-713.
- Korhonen, K-H. & Gardemeister, R. 1970b. Geoteknillinen maalajiluokitus.
- Kulmala, A. 1970. Heat balance of the earth's surface at Jokioinen (60.8°N, 23.5°E, summer 1968. Ilmatieteen laitoksen toimituksia 74. Finnish Meteorological Institute contributions 74.
- Kurki, M. 1969. Viljavuustutkimuksen hyväksikäyttö. Viljavuuspalvelu Oy.
- Kähäri, J. & Elonen, P. 1969. Effect of placement of fertilizer and sprinkler irrigation on the development of spring cereals on the basis of root investigations. *Journal of the Scientific Agricultural Society of Finland*, Vol. 41, pp. 89-104.
- Lauritzen, C.W. & Terrell, P.W. 1967. Reducing water losses in conveyance and storage. *Irrigation of Agricultural Lands*, ed. Hagan, R.M., Haise, H.R. & Edminster, F.W. pp. 1105-1119.
- Laverton, S. 1964. Irrigation. 166 p. Lontoo.
- Linacre, E.T. 1967. Climate and the evaporation from crops. *Journal of the Irrigation and Drainage Division, ASCE*, Vol. 93, No. IR 4, Proc. Paper 5651, December, pp. 61-79.
- Linner, H. 1976. Bevattning av potatis. Seminar om bevattning, Alnarp 28-29 September.
- Lorenz, R.J. & Rogler, G.A. 1964. Effect of row spacing and nitrogen fertilizer on production of irrigated Russian wildrye: II Relative crown and root development. *Agronomy Journal*, Vol. 56, pp. 7-10.
- Lowry, R.L. & Johnson, A.F. 1942. Consumptive use of water for agriculture. *Amer. Soc. Civ. Eng., Trans.* 107. pp. 1243-1302.
- McCormick, J.A. 1968. Spring soil temperatures related to drainage problems. *Journal of the Irrigation and Drainage Division, ASCE*, Vol. 94, IR 1, Proc. Paper 5870, March, pp. 107-113.
- McCown, R.L. 1973. An evaluation of the influence of available soil water storage capacity on growing season length and yield of tropical pastures using water balance models. *Agricultural Meteorology* 11. Amsterdam.
- McCulloch, J.S.G. 1977. Examples of areal actual evapotranspiration by indirect methods. General report on the Technical Conference on assessment of real evaporation, Budapest, 23-25 May.
- McGuinness, J.L. & Parmele, L.H. 1972. Maximum potential evapotranspiration frequency - East Central U.S.. *Journal of the Irrigation and Drainage Division, ASCE*, Vol. 98, No. IR 2, Proc. Paper 8943, June, pp. 207-214.
- McHenry, J.R. & Gill, A.C. 1967. The influence of bulk density, slow neutron absorbers, and time on the calibration of neutron moisture probes. Isotope and radiation techniques in soil physics and irrigation studies. Proc. of a Symposium, Istanbul, 12-16 June, pp. 83-99.
- Makkink, G.F. 1957. Ekzameno de la formula de Penman. *Neth. J. Agr. Sci* 5. pp. 290-305.
- Marcesse, J. 1967. Determination in situ de la capacite de retention d'un sol au morgen de l'humidimetre a neutrons. Isotope and radiation techniques in soil physics and irrigation studies. Proc. of a Symposium, Istanbul, 12-16 June, pp. 137-146.
- Molz, F.J. 1972. Simulation of post-irrigation moisture movement. *Journal of the Irrigation and Drainage Division, ASCE*, Vol. 98, IR 4, Proc. Paper 9419, December, pp. 523-532.
- Molz, F.J. & Remson, J. 1971. Application of an extraction model to the study of moisture flow to roots. *Agronomy Journal*, Vol. 63, Jan. -Feb.
- Monteith, J.L. 1973. Principles of environmental physics. *Contemporary Biology*. 241 p.
- Muotiala, S. 1972. Kasteluvden saannin turvaaminen. Maarakennus ja kuljetus 4.
- Mustonen, S.E. 1964. Potentiaalisen evapotranspiraation määrittämisestä. *Acta Agr. Fenn.* 102,2.
- Mustonen, S.E. 1965a. Maataloushallituksen hydrologiset tutkimukset vuosina 1957-1964. Hydrologic investigations by the Board of Agriculture during the years 1957 to 1964. Maa- ja vesiteknillisiä tutkimuksia 11. Soil and hydrotechnical investigations 11.

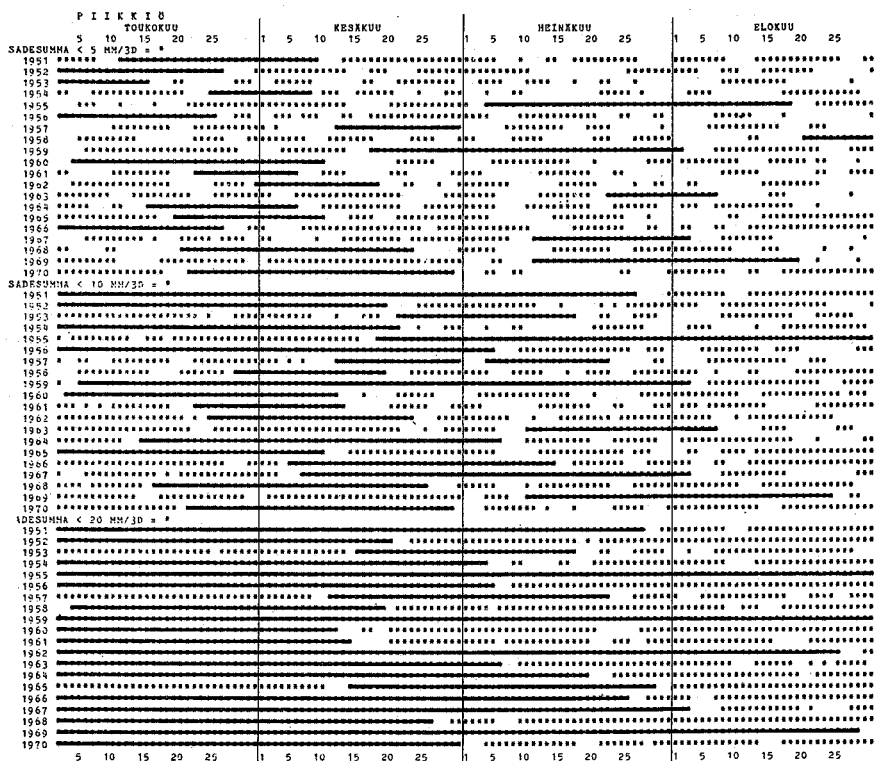
- Mustonen, S.E. 1965b. Meteorologisten ja aluetekijöiden vaikutuksesta valuntaan. Effects of meteorologic and basin characteristics on runoff. Maa- ja vesiteknillisiä tutkimuksia 12. Soil and hydrotechnical investigations 12.
- Mustonen, S.E. 1968. Ylivalumista pienillä järvettömillä alueilla. Rakennustekniikka No. 5.
- Mustonen, S.E. & McGuinness, J.L. 1967. Lysimeter and watershed evapotranspiration. Water Resources Research, Vol. 3, No. 4.
- Mustonen, S.E. & McGuinness, J.L. 1968. Estimating evapotranspiration in a humid region. U.S. Dept. of Agr. Tech. Bull. No. 1389.
- Mustonen, S.E. & Seuna, P. 1969. Maataloushallituksen hydrologisille havaintoalueille lasketut meteorologisen haihduntaindeksin vuorokausiarvot kesäaikana vuosina 1958-1967. Daily values of meteorological evaporation index for hydrological research basins for the Board of Agriculture in summertime during the years 1958...1967. Maa- ja vesiteknillisiä tutkimuksia 15. Soil and hydrotechnical investigations 15.
- Naakka, S. 1968. Kesäsaateista ja niiden aiheuttamasta valunnasta Länsi-Suomessa erityisesti silmällä pitäen elokuussa 1967 sattunutta rankkasadetta. Maa- ja vesiteknillisen tutkimustoimiston tiedotuksia 3.
- Nakayama, F.S. & van Bavel, C.H.M. 1963. Root activity distribution patterns of sorghum and soil moisture conditions. Agronomy Journal, Vol. 55, pp. 271-274.
- Niinivaara, K. 1953. Haihtumisesta pienehköiltä vesistöalueilta Suomessa. Summary: Evaporation from watersheds in Finland. Maa- ja vesiteknillisiä tutkimuksia 7.
- Nissi, T. 1971. Käytännön sadetustekniikkaa kevätviljapelloilla. Vakolan tiedote 15/71.
- Nixon, P.R., Lawless, G.P. & Richardson, G.V. 1972. Coastal California evapotranspiration frequencies. Journal of the Irrigation and Drainage Division, ASCE, Vol. 98, No. IR 2, Proc. Paper 8945, June, pp. 185-191.
- Palmen, E. & Söderman, D. 1966. Computation of the evaporation from the Baltic Sea from the flux of water vapor in the atmosphere. Helsingin yliopisto, Meteorologian laitos, Mitteilungen - Papers No. 106.
- Patil, A.C. & Christiansen, J.E. 1963. Comparison of four methods of computing evaporation. University Research Project U-193, College of Engineering, Utah State University.
- Pavlychenko, T.K. 1937. The soil-block washing method in quantitative root study. Can. J. Res. C15:33-57.
- Penman, H.L. 1948. Natural evaporation from open water, bare soil, and grass. Proceedings, Royal Society of London England, Series A, Vol. 193, pp. 120-145.
- Penman, H.L. 1963. Vegetation and hydrology. 124 p. Reading.
- Pruitt, W.O., von Oettingen, S. & Morgan, D.L. 1972. Central California evapotranspiration frequencies. Journal of the Irrigation and Drainage Division, ASCE, Vol. 98, No. IR 2, Proc. Paper 8941, June, pp. 177-184.
- Pumphrey, F.V. & Koehler, F.E. 1958. Forage and root growth of five sweetclover varieties and their influence on two following corn crops. Agronomy Journal, Vol. 50, pp. 323-326.
- Puustjärvi, V. 1973. Kasvuturve ja sen käyttö.
- Puustjärvi, V. 1969. Water-air relationships of peat in peat culture. Peat and Plant News, Vol. 2, No. 4, pp. 43-53.
- Puustjärvi, V. 1970. Water requirement of plants in peat culture. Peat and Plant News, Vol. 3, No. 2, pp. 19-30.
- Raney, W.A. 1967. Irrigation problems of humid-temperate and tropical regions. Irrigation of Agricultural Lands, ed. Hagan, R.M., Haise, R.H. & Edminster, T.W. pp. 1082-1085.
- Robins, J.S. 1967. Reducing irrigation requirements. Irrigation of Agricultural Lands, ed. Hagan, R.M., Haise, H.R. & Edminster, F.W. pp. 1144-1158.
- Robins, J.S. & Domingo, C.E. 1953. Some effects of severe soil moisture deficits at specific growth stages in corn. Agronomy Journal, Vol. 45, Dec. pp. 618-621.
- Robins, J.S., Musick, J.T., Finrock, D.C. & Rhoades, H.F. 1967. Irrigation of principal crops: Grain and field crops. Irrigation of Agricultural Lands, ed. Hagan, R.M., Haise, H.R. & Edminster, F.W. pp. 622-639.
- Robinson, F.E. 1963. Soil moisture tension, sugar cane stalk elongation, and irrigation interval control. Agronomy Journal, Vol. 55, pp. 481-484.
- Rognerud, B. 1975. Increased evapotranspiration due to irrigation. Nordic IHD Report No. 8.
- Rosenberg, N.J. 1969. Evaporation and condensation on bare soil under irrigation in the East Central Great Plains. Agronomy Journal, Vol. 61, July-Aug., pp. 557-561.
- Rosenberg, N.J. 1972. Frequency of potential evapotranspiration rates in Great Central Plains. Journal of the Irrigation and Drainage Division, ASCE, Vol. 98, No. IR 2, Proc. Paper 8946, June, pp. 203-206.
- Rossi, V. 1976. Auringon säteilyn mittauksien tuloksia Suomessa 1958-1967. Results of radiation measurements in Finland during the years 1958-1967. Liite Ilmatieteen laitoksen meteorologiseen vuosikirjaan. Räisänen, L. & Kara, O. 1969. Sadetuslaitteet. Vakolan tiedote 6.
- Salonen, M. 1949. Tutkimuksia viljelyskasvien juurten sijainnista Suomen maalajeissa. Investigation of the root positions of field crops in the soils of Finland. Acta Agr. Fenn. 70, 1, pp. 1-91.
- Saxton, K.E. & Lenz, A.T. 1967. Antecedent retention indexes predict soil moisture. Journal of the Hydraulics Division, ASCE, Vol. 93, No. Hy 4, Proc. Paper 5351, July, pp. 223-241.
- Schulz, E.F. 1973. Problems in applied hydrology. Water Resources Publications, Fort Collins.
- Seuna, P. 1970. Kasteluveden tarve. Maataloushallituksen maa- ja vesiteknillisen tutkimustoimiston tiedotuksia 2. Maatalousalueiden rationalisointitöistä, toim. Muotiala, S., Koskenvaara, P. & Heino, S.

- Seuna, P. 1973. A simple linear soil moisture model for irrigation purposes. The ninth European Regional Conference of I.C.I.D. Budapest.
- Seuna, P. 1974. Infiltration. Symposioesitelmä Wallingford 20-25 October.
- Seuna, P. & Kara, O. 1969. Maatalouden kastelutoiminnasta Neuvostoliitossa. Maataloushallituksen insinööriosaston maa- ja vesitekniillisen tutkimustoimiston tiedotuksia 3.
- Shimshi, D., Yaron, D., Bresler, E., Weisbrod, M. & Strateener, G. 1975. Simulation model for evapotranspiration of wheat: Empirical approach. Journal of the Irrigation and Drainage Division, Vol. 101, No. IR 1 March, pp. 1-12.
- Skidmore, E.L., Jacobs, H.S. & Powers, W.L. 1969. Potential evapotranspiration as influenced by wind. Agronomy Journal, Vol. 61, July-Aug., pp. 543-546.
- Slatyer, R.O. & McIlroy, I.C. 1961. Practical microclimatology. CSIRO, Plant Ind. Div. Canberra (Unesco sponsored). 328 p.
- Smith, K. 1975. Water temperature variations within a major river system. Nordic Hydrology, Vol. 6, No. 3, pp. 155-169.
- Staple, W.J. & Lehane, J.J. 1962. Variability in soil moisture sampling. Can. J. Soil. Sci. Vol. 42, pp.157-164.
- Stephens, J. C. 1965. Discussion of "Estimating evapotranspiration from insolation" by R.K. Lane. Journal of the Hydraulics Division, ASCE, Vol. 91, No. HY 5, Proc. Paper 4464, Sept., p. 171.
- Sternberg, Y.M. 1967. Analysis of sprinkler irrigation losses. Journal of the Irrigation and Drainage Division, ASCE, Vol. 93, No. IR 4, Proc. Paper 5672, December, pp. 111-124.
- Stewart, J.I. & Hagan, R.M. 1969. Predicting effects of water shortage on crop yield. Journal of the Irrigation and Drainage Division, ASCE, Vol. 95, No. IR 1, Proc. Paper 6443, March, pp. 91-104.
- Stewart, J.I., Hagan, R.M. & Pruitt, W.O. 1974. Functions to predict optimal irrigation programs. Journal of the Irrigation and Drainage Division, ASCE, Vol. 100, No. IR 2, Proc. Paper 10626, June, pp. 179-199.
- Strateener, G., Yaron, D., Bresler, E. & Shimshi, D. 1975. Simulation model for evapotranspiration of wheat: Effect of evaporative conditions. Journal of the Irrigation and Drainage Division, ASCE, Vol. 101, No. IR 1, Proc. Paper 11169, March, pp. 13-19.
- Tanner, C.B. 1967. Measurement of evapotranspiration. Irrigation of Agricultural Lands, ed. Hagan, R.M., Haise, H.R. & Edminster, T.W., pp. 534-574.
- Taylor, S.A. 1955. Field determinations of soil moisture. Agr. Eng. 36:654-659.
- Thorntwaite, C.W. 1944. Report of the Committee on Transpiration and Evaporation 1943-1944. Trans. Amer. Geoph. Un. 25, 5.
- Thorntwaite, C.W. 1948. An approach toward a rational classification of climate. Geogr. Rev. 38. pp. 55-94.
- Upchurch, R.P. 1951. The use of the trench-wash and soil-elution methods for studying alfalfa roots. Agronomy Journal, Vol. 43, pp. 552-555.
- USDA. 1967. Irrigation water requirements. U.S. Dept. of Agriculture, Engineering Div., Soil Conservation Service, Technical Release, No. 21, 88 p.
- Varley, I. 1976. Evaluation of nonuniformity in irrigation and yield. Journal of the Irrigation and Drainage Division, ASCE, Vol. 102, No. IR 1, Proc. Paper 12003, March, pp. 149-164.
- Veihmeyer, F.J. & Hendrickson, A.H. 1928. Soil moisture at permanent wilting of plants. Plant Physiology, Vol. 3. pp. 355-357.
- 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.
- Vitkevich, V.I. 1963. Agricultural meteorology. 320 p. Jerusalem.
- Vittum, M.T. & Flocker, W.J. 1967. Irrigation of principal crops: Vegetable crops. Irrigation of Agricultural Lands, ed. Hagan, R.M., Haise, H.R. & Edminster, E.W. pp. 674-685.
- Vough, L.R. & Marten, G.C. 1971. Influence of soil moisture and ambient temperature on yield and quality of alfalfa forage. Agronomy Journal, Vol. 63, Jan.-Feb.
- Weaver, J.E. & Darland, R.W. 1949. Soil-root relationship of certain native grasses in various soil types. Ecol. Monogr. 19:303-338.
- Weaver, J.E. & Voigt, J.W. 1950. Monolith method of root-sampling in studies on succession and degeneration. Bot. Gaz. 111:286-299.
- Wierenga, P.J., Hagan, R.M. & Gregory, E.J. 1971. Effects of irrigation water temperature on soil temperature. Agronomy Journal, Vol. 63, Jan.-Feb.
- Willardson, L.S. 1972. Attainable irrigation efficiencies. Journal of the Irrigation and Drainage Division, ASCE, Vol. 98, No. IR 2, Proc. Paper 8957, June, pp. 239-246.
- Windsor, J.S. & Chow, Ven Te. 1971. Model for farm irrigation in humid areas. Journal of the Irrigation and Drainage Division, ASCE, Vol. 97, No. IR 3, Proc. Paper 8355, September, pp. 369-385.
- Wiser, E.H. 1965. Irrigation planning using climatological data. Journal of the Irrigation and Drainage Division, ASCE, Vol. 91, No. IR 4, Proc. Paper 4551, December, pp. 1-11.
- WMO. 1965. Guide to hydrometeorological practices. No. 168. TP. 82.
- Worstell, R.V. 1976. Estimating seepage losses from canal systems. Journal of the Irrigation and Drainage Division, ASCE, Vol. 102, No. IR 1, Proc. Paper 11960, March, pp. 137-147.
- Wright, J.L. & Jensen, M.E. 1972. Peak water requirements of crops in Southern Idaho. Journal of the Irrigation and Drainage Division, ASCE, Vol. 98, No. IR 2, Proc. Paper 8940. June, pp. 193-201.
- Wu, I. & Liang, T. 1972. Optimal irrigation quantity and frequency. Journal of the Irrigation and Drainage Division, ASCE, Vol. 98, No. IR 1, Proc. Paper 8776, March, pp. 117-133.

- Wäre, M. 1947. Kevätvehnän sadetuskokeet vuosina 1941-1944. Maanviljelysinsinööriyhdistyksen vuosikirja 1947.
- Zein el Abedine, A., Abdalla, M.M. & Abdel-Al, Sh.I. 1967. Evapotranspiration studies on maize in Giza, United Arab Republic. Isotope and radiation techniques in soil physics and irrigation studies. Proc. of a Symposium, Istanbul, 12-16 June, pp. 317-378.
- Özbek, N., Aksoy, T. & Celebi, G. 1967. The neutron-moisture meter in studies of the effect of fallow on water conservation in arid regions. Isotope and radiation techniques in soil physics and irrigation studies. Proc. of a Symposium, Istanbul, 12-16 June, pp. 161-175.

Liite 1. Niiden kesäaikaisten kausien pituus ja sattumisaika, jolloin sadanta on ollut <5 mm/3 d, <10 mm/3 d ja <20 mm/3 d 7 paikkakunnalla Suomessa 1951-1970. Pisimmät kaudet on merkitty yhte-näisellä viivalla.

App. 1. The length and occurrence of summertime dry spells ($P < 5$ mm/3 d, $P < 10$ mm/3 d and $P < 20$ mm/3 d) in Finland in 1951-1970 at Piikkiö, Kokemäki, Anjala, Vihti, Ylistaro, Jyväskylä and Outokumpu.



	K O K E M M I I				K E S K K U U				H E I N K K U U				E L O K U U				
	5	10	15	20	25	1	5	10	15	20	25	1	5	10	15	20	25
SADESUHMA < 5 MM/3D = *	1951																
	1952																
	1953																
	1954																
	1955																
	1956																
	1957																
	1958																
	1959																
	1960																
	1961																
	1962																
	1963																
	1964																
	1965																
	1966																
	1967																
	1968																
	1969																
	1970																
SADESUHMA < 10 MM/3D = *	1951																
	1952																
	1953																
	1954																
	1955																
	1956																
	1957																
	1958																
	1959																
	1960																
	1961																
	1962																
	1963																
	1964																
	1965																
	1966																
	1967																
	1968																
	1969																
	1970																
SADESUHMA < 20 MM/3D = *	1951																
	1952																
	1953																
	1954																
	1955																
	1956																
	1957																
	1958																
	1959																
	1960																
	1961																
	1962																
	1963																
	1964																
	1965																
	1966																
	1967																
	1968																
	1969																
	1970																

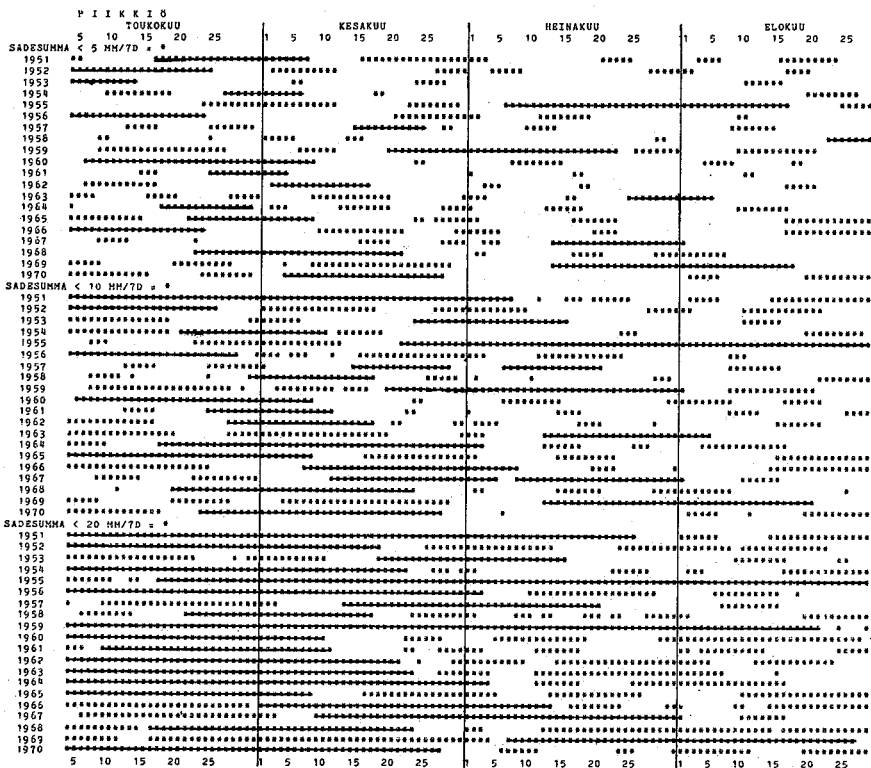
	A N J A L A				K E S K K U U				H E I N K K U U				E L O K U U				
	5	10	15	20	25	1	5	10	15	20	25	1	5	10	15	20	25
SADESUHMA < 5 MM/3D = *	1951																
	1952																
	1953																
	1954																
	1955																
	1956																
	1957																
	1958																
	1959																
	1960																
	1961																
	1962																
	1963																
	1964																
	1965																
	1966																
	1967																
	1968																
	1969																
	1970																
SADESUHMA < 10 MM/3D = *	1951																
	1952																
	1953																
	1954																
	1955																
	1956																
	1957																
	1958																
	1959																
	1960																
	1961																
	1962																
	1963																
	1964																
	1965																
	1966																
	1967																
	1968																
	1969																
	1970																
SADESUHMA < 20 MM/3D = *	1951																
	1952																
	1953																
	1954																
	1955																
	1956																
	1957																
	1958																
	1959																
	1960																
	1961																
	1962																
	1963																
	1964																
	1965																
	1966																
	1967																
	1968																
	1969																
	1970																

	J Y V K S K Y L A					KESKKUU					HEINKUU					ELOKUU									
	6	10	15	20	25	1	5	10	15	20	25	1	5	10	15	20	25	1	5	10	15	20	25		
SADESUHMA < 5 MM/3D = *																								
1951																								
1952																								
1953																								
1954																								
1955																								
1956																								
1957																								
1958																								
1959																								
1960																								
1961																								
1962																								
1963																								
1964																								
1965																								
1966																								
1967																								
1968																								
1969																								
1970																								
SADESUHMA < 10 MM/3D = *																								
1951																								
1952																								
1953																								
1954																								
1955																								
1956																								
1957																								
1958																								
1959																								
1960																								
1961																								
1962																								
1963																								
1964																								
1965																								
1966																								
1967																								
1968																								
1969																								
1970																								
SADESUHMA < 20 MM/3D = *																								
1951																								
1952																								
1953																								
1954																								
1955																								
1956																								
1957																								
1958																								
1959																								
1960																								
1961																								
1962																								
1963																								
1964																								
1965																								
1966																								
1967																								
1968																								
1969																								
1970																								

	O U T O K U H P U					KESKKUU					HEINKUU					ELOKUU									
	5	10	15	20	25	1	5	10	15	20	25	1	5	10	15	20	25	1	5	10	15	20	25		
SADESUHMA < 5 MM/3D = *																								
1951																								
1952																								
1953																								
1954																								
1955																								
1956																								
1957																								
1958																								
1959																								
1960																								
1961																								
1962																								
1963																								
1964																								
1965																								
1966																								
1967																								
1968																								
1969																								
1970																								
SADESUHMA < 10 MM/3D = *																								
1951																								
1952																								
1953																								
1954																								
1955																								
1956																								
1957																								
1958																								
1959																								
1960																								
1961																								
1962																								
1963																								
1964																								
1965																								
1966																								
1967																								
1968																								
1969																								
1970																								
SADESUHMA < 20 MM/3D = *																								
1951																								
1952																								
1953																								
1954																								
1955																								
1956																								
1957																								
1958																								
1959																								
1960																								
1961																								
1962																								
1963																								
1964																								
1965																								
1966																								
1967																								
1968																								
1969																								
1970																								

Liite 2. Niiden kesäaikaisten kausien pituus ja sattumisaika, jolloin sadanta on ollut <5 mm/7 d, <10 mm/7 d ja <20 mm/7 d 7 paikkakunnalla Suomessa 1951-1970. Pisimmät kaudet on merkitty yhteisellä viivalla.

App. 2. The length and occurrence of summertime dry spells ($P < 5 \text{ mm}/7 \text{ d}$, $P < 10 \text{ mm}/7 \text{ d}$ and $P < 20 \text{ mm}/7 \text{ d}$) in Finland in 1951-1970 at Piikkiö, Kokemäki, Anjala, Vihti, Ylistaro, Jyväskylän and Outokumpu.



	K O K E H A K I TOUKOKUU					KESAKUU					HEIHAUUU					ELOUUU									
	5	10	15	20	25	1	5	10	15	20	25	1	5	10	15	20	25	1	5	10	15	20	25		
SADESUNHA < 5 MM/7D = *																								
1951																								
1952																								
1953																								
1954																								
1955																								
1956																								
1957																								
1958																								
1959																								
1960																								
1961																								
1962																								
1963																								
1964																								
1965																								
1966																								
1967																								
1968																								
1969																								
1970																								
SADESUNHA < 10 MM/7D = *																								
1951																								
1952																								
1953																								
1954																								
1955																								
1956																								
1957																								
1958																								
1959																								
1960																								
1961																								
1962																								
1963																								
1964																								
1965																								
1966																								
1967																								
1968																								
1969																								
1970																								
SADESUNHA < 20 MM/7D = *																								
1951																								
1952																								
1953																								
1954																								
1955																								
1956																								
1957																								
1958																								
1959																								
1960																								
1961																								
1962																								
1963																								
1964																								
1965																								
1966																								
1967																								
1968																								
1969																								
1970																								

	A N J A L A TOUKOKUU					KESAKUU					HEIHAUUU					ELOUUU									
	5	10	15	20	25	1	5	10	15	20	25	1	5	10	15	20	25	1	5	10	15	20	25		
SADESUNHA < 5 MM/7D = *																								
1951																								
1952																								
1953																								
1954																								
1955																								
1956																								
1957																								
1958																								
1959																								
1960																								
1961																								
1962																								
1963																								
1964																								
1965																								
1966																								
1967																								
1968																								
1969																								
1970																								
SADESUNHA < 10 MM/7D = *																								
1951																								
1952																								
1953																								
1954																								
1955																								
1956																								
1957																								
1958																								
1959																								
1960																								
1961																								
1962																								
1963																								
1964																								
1965																								
1966																								
1967																								
1968																								
1969																								
1970																								
SADESUNHA < 20 MM/7D = *																								
1951																								
1952																								
1953																								
1954																								
1955																								
1956																								
1957																								
1958																								
1959																								
1960																								
1961																								
1962																								
1963																								
1964																								
1965																								
1966																								
1967																								
1968																								
1969																								
1970																								

	V I H T I					KESAKUU					HEINAKUU					ELOKUU									
	5	10	15	20	25	1	5	10	15	20	25	1	5	10	15	20	25	1	5	10	15	20	25		
SADESUHMA < 5 MM/7D =																								
1951																								
1952																								
1953																								
1954																								
1955																								
1956																								
1957																								
1958																								
1959																								
1960																								
1961																								
1962																								
1963																								
1964																								
1965																								
1966																								
1967																								
1968																								
1969																								
1970																								
SADESUHMA < 10 MM/7D =																								
1951																								
1952																								
1953																								
1954																								
1955																								
1956																								
1957																								
1958																								
1959																								
1960																								
1961																								
1962																								
1963																								
1964																								
1965																								
1966																								
1967																								
1968																								
1969																								
1970																								
SADESUHMA < 20 MM/7D =																								
1951																								
1952																								
1953																								
1954																								
1955																								
1956																								
1957																								
1958																								
1959																								
1960																								
1961																								
1962																								
1963																								
1964																								
1965																								
1966																								
1967																								
1968																								
1969																								
1970																								

	Y L I S T A R O					KESAKUU					HEINAKUU					ELOKUU									
	5	10	15	20	25	1	5	10	15	20	25	1	5	10	15	20	25	1	5	10	15	20	25		
SADESUHMA < 5 MM/7D =																								
1951																								
1952																								
1953																								
1954																								
1955																								
1956																								
1957																								
1958																								
1959																								
1960																								
1961																								
1962																								
1963																								
1964																								
1965																								
1966																								
1967																								
1968																								
1969																								
1970																								
SADESUHMA < 10 MM/7D =																								
1951																								
1952																								
1953																								
1954																								
1955																								
1956																								
1957																								
1958																								
1959																								
1960																								
1961																								
1962																								
1963																								
1964																								
1965																								
1966																								
1967																								
1968																								
1969																								
1970																								
SADESUHMA < 20 MM/7D =																								
1951																								
1952																								
1953																								
1954																								
1955																								
1956																								
1957																								
1958																								
1959																								
1960																								
1961																								
1962																								
1963																								
1964																								
1965																								
1966																								
1967																								
1968																								
1969																								
1970																								

	JYVASKYLÄ TOUKOKUU					KESÄKUU					HEINÄKUU					ELOKUU									
	5	10	15	20	25	1	5	10	15	20	25	1	5	10	15	20	25	1	5	10	15	20	25		
SADESUHMA < 5 MM/7D = a	*****																								
1951	*****																								
1952	*****																								
1953	*****																								
1954	*****																								
1955	*****																								
1956	*****																								
1957	*****																								
1958	*****																								
1959	*****																								
1960	*****																								
1961	*****																								
1962	*****																								
1963	*****																								
1964	*****																								
1965	*****																								
1966	*****																								
1967	*****																								
1968	*****																								
1969	*****																								
1970	*****																								
SADESUHMA < 10 MM/7D = a	*****																								
1951	*****																								
1952	*****																								
1953	*****																								
1954	*****																								
1955	*****																								
1956	*****																								
1957	*****																								
1958	*****																								
1959	*****																								
1960	*****																								
1961	*****																								
1962	*****																								
1963	*****																								
1964	*****																								
1965	*****																								
1966	*****																								
1967	*****																								
1968	*****																								
1969	*****																								
1970	*****																								
SADESUHMA < 20 MM/7D = a	*****																								
1951	*****																								
1952	*****																								
1953	*****																								
1954	*****																								
1955	*****																								
1956	*****																								
1957	*****																								
1958	*****																								
1959	*****																								
1960	*****																								
1961	*****																								
1962	*****																								
1963	*****																								
1964	*****																								
1965	*****																								
1966	*****																								
1967	*****																								
1968	*****																								
1969	*****																								
1970	*****																								

	OUTOKUMPU TOUKOKUU					KESÄKUU					HEINÄKUU					ELOKUU									
	5	10	15	20	25	1	5	10	15	20	25	1	5	10	15	20	25	1	5	10	15	20	25		
SADESUHMA < 5 MM/7D = a	*****																								
1951	*****																								
1952	*****																								
1953	*****																								
1954	*****																								
1955	*****																								
1956	*****																								
1957	*****																								
1958	*****																								
1959	*****																								
1960	*****																								
1961	*****																								
1962	*****																								
1963	*****																								
1964	*****																								
1965	*****																								
1966	*****																								
1967	*****																								
1968	*****																								
1969	*****																								
1970	*****																								
SADESUHMA < 10 MM/7D = a	*****																								
1951	*****																								
1952	*****																								
1953	*****																								
1954	*****																								
1955	*****																								
1956	*****																								
1957	*****																								
1958	*****																								
1959	*****																								
1960	*****																								
1961	*****																								
1962	*****																								
1963	*****																								
1964	*****																								
1965	*****																								
1966	*****																								
1967	*****																								
1968	*****																								
1969	*****																								
1970	*****																								
SADESUHMA < 20 MM/7D = a	*****																								
1951	*****																								
1952	*****																								
1953	*****																								
1954	*****																								
1955	*****																								
1956	*****																								
1957	*****																								
1958	*****																								
1959	*****																								
1960	*****																								
1961	*****																								
1962	*****																								
1963	*****																								
1964	*****																								
1965	*****																								
1966	*****																								
1967	*****																								
1968	*****																								
1969	*****																								
1970	*****																								

Liite 3. Eräitä yleisimpiä potentiaalisen haihdunnan laskentayhtälöitä.

App. 3. General formulae for computing potential evapotranspiration.

Penman

$$E = \frac{\Delta Q_n/L + \psi E_a}{\Delta + \psi} \quad \text{mm} \cdot \text{d}^{-1}$$

$$Q_n = \text{nettosäteily} \quad \text{cal} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$$

$$Q_n = (1-r) Q - Q_b$$

$$Q = \text{tuleva kokonaissäteily} \quad \text{cal} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$$

$$r = \text{albedo (lyhyt vihreä kasvusto } r \sim 0,25)$$

$$Q_b = \text{ulossäteily} = \frac{(T + 273)^4}{(0,56 - 0,09 \sqrt{e})(0,10 + 0,90 S/S_0)} \quad \text{cal} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$$

$$T = \text{vuorokauden keskilämpötila} \quad ^\circ\text{C}$$

$$S/S_0 = \text{suhteellinen auringonpaiste aika}$$

$$\sigma = \text{Stefan-Bolzmännin vakio}$$

$$L = \text{veden höyrystymislämpö} \\ 1 \text{ mm} \cdot \text{d}^{-1} \approx 59 \text{ cal} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$$

$$Q_n/L = \text{nettosäteilyä vastaava haihdunta-} \\ \text{ekvivalentti} \quad \text{mm} \cdot \text{d}^{-1}$$

$$\Delta = \text{kyllästyneen vesihöyrynpainekäyrän kaltevuus} \quad \text{mm Hg} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$$

$$\psi = \text{psykrometrivakio}$$

$$E_a = \text{ilman vedenottokyvyn mitta} \\ = 0,35 (1 + 0,54 v) (e_s - e_a) \quad \text{mm} \cdot \text{d}^{-1}$$

$$e_s = \text{kyllästyneen vesihöyrynpaine} \quad \text{mm Hg}$$

$$e_a = \text{vallitseva vesihöyrynpaine} \quad \text{mm Hg}$$

$$e_s - e_a = \text{ilman kyllästysvajaus}$$

$$v = \text{tuulen nopeus 2 m korkeudella} \quad \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$$

Blaney & Criddle

$$E = k \cdot p (0,457 \bar{T} + 8,13) \quad \text{mm/kk}$$

$$k = \text{kokeellinen haihduntakerroin}$$

$$\bar{T} = \text{kuukauden keskilämpötila} \quad ^\circ\text{C}$$

$$p = \text{auringonpaistetuntien maksimimäärä} \\ \text{ko. kuukautena prosenteissa koko vuoden teoreettisesta auringon paistejasta}$$

Kerroin k vaihtelee vuodenajan ja kasvipeitteen vaihdella. Kertoimen keskimääräinen arvo kasvukautena on 0,5-0,8.

Thornthwaite

$$E = 16 \cdot k \cdot (10 \bar{T}/I)^a \quad \text{mm} \cdot \text{kk}^{-1}$$

$$\bar{T} = \text{kuukauden keskilämpötila} \quad ^\circ\text{C}$$

$$I = \text{vuoden lämpöindeksi} = \sum i$$

$$i = \text{kuukauden lämpöindeksi} = (T_n/5)^{1,514}$$

$$T_n = \text{kuukauden normaali keskilämpötila} \quad ^\circ\text{C}$$

$$a = 6,75 \cdot 10^{-7} \cdot I^3 - 7,71 \cdot 10^{-5} \cdot I^2 + 1,792 \cdot 10^{-2} \cdot I + 0,49239$$

$$k = \text{vuorokauden ja kuukauden pituuskerroin} \\ = \bar{S}_0/12 \cdot d/30$$

$$\bar{S}_0 = \text{auringonpaistetuntien maksimimäärä vuorokaudessa}$$

$$d = \text{päivien lukumäärä kuukaudessa}$$

Johansson

$$E = 0,14 + 3,7 \cdot 10^3 \cdot Q + 0,13 v (e_m - e)$$

$$E = \text{potentiaalinen haihdunta} \quad \text{mm} \cdot \text{d}^{-1}$$

$$Q = \text{tuleva kokonaissäteily} \quad \text{cal} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$$

$$v = \text{vuorokauden keskimääräinen tuulen nopeus laskettuna klo 8, 14 ja 19 havaintojen keskiarvona}$$

$$e = \text{vuorokauden keskimääräinen vesihöyrynpaine laskettuna klo 8, 14 ja 19 havaintojen keskiarvona} \quad \text{mm Hg}$$

$$e_m = \text{kyllästyneen vesihöyrynpaine vuorokauden keskilämpötilassa} \quad \text{mm Hg}$$

Blaney & Morin

$$E = k T P (114-H)$$

$$E = \text{haihdunta} \quad \text{tuumaa} \cdot \text{kk}^{-1}$$

$$k = \text{kuukausikerroin}$$

$$T = \text{kuukauden keskilämpötila} \quad ^\circ\text{F}$$

$$P = \text{kuukauden keskimääräinen päivän pituus} \quad \%$$

$$H = \text{kuukauden keskimääräinen suhteellinen kosteus} \quad \%$$

Turc

$$E = (N + 80) [1 + (N + 45)^2 / 12]^{-1/2}$$

kun $\bar{T} > -2$ mm(10d)⁻¹,

$$E = (N + 10) [1 + (N + 10)^2 / 12]^{-1/2}$$

kun $\bar{T} \leq -2$ mm(10d)⁻¹,

l = ilman vedenottokyky
= $(\bar{T} + 2) \sqrt{\bar{Q}} / 16$ °C·cal^{1/2}·cm⁻¹

\bar{Q} = keskimääräinen tulosäteily cal·cm⁻²·d⁻¹

N = sadanta mm(10d)⁻¹

\bar{T} = ilman keskilämpötila °C

Makkink

$$E = 0,61 Q [\Delta / (\Delta + \psi)] - 0,12$$

Q = tuleva kokonaissäteily mm·d⁻¹
(1mm·d⁻¹ ≈ 59 cal·cm⁻²·d⁻¹)

Δ = kyllästyneen vesihöyryn painekäyrän kaltevuus mm Hg·°C⁻¹

ψ = psykrometrivakio = 0,49 mm Hg·°C⁻¹

Mellroy

$$E = \frac{s}{(s + \psi)} L (Q_n - S) + h (D - D_0)$$

mm

L = höyrystymislämpö cal·g⁻¹

$s = \frac{0,63}{p} \Delta W$ cal·g

p = ilmanpaine mb

ΔW = kyllästyneen vesihöyrynpainekäyrän kaltevuus keskimääräisessä kostean lämpömittarin lämpötilassa mb·°C⁻¹

Q_n = nettosäteily cal·cm⁻²

ψ = psykrometrivakio = 0,66 mb·°C⁻¹

S = energia maan lämpenemiseen cal·cm⁻²

D = kuivan ja kostean lämpömittarin lämpötilaero korkeudella z °C

D₀ = sama kuin D 0-tasolla °C

h = tuulikerroin mittarin korkeuden huomioonottamiseksi

Jensen & Haise

$$E = (0,014 T - 0,37) R_s$$

E = potentiaalinen haihdunta mm

T = ilman keskilämpötila °F

R_s = tuleva lyhytaaltainen kokonaissäteily mm

Hargreaves

$$E_t = k E_p$$

E_t = evapotranspiraatio

k = kasvuvaihekerroin (kohta 3.22)

E_p = haihdunta Class A astiasta tai

$$E_p = 17,4 d T (1,0 - H_n)$$

H_n = ilman suhteellisen kosteuden kuukausikeskiarvo keskipäivällä

d = kuukausittainen päivän pituuskerroin = päivän pituus/12 h

T = kuukauden keskilämpötila °C

H_n = kuukauden keskimääräinen ilman suhteellinen kosteus keskipäivällä desimaalimuodossa

Tätä kaavaa voidaan Christiansenin mukaan (ref. Hargreaves 1968, p. 98) parantaa ottamalla kaavaan mukaan tuulen nopeus, auringon paiste-aika ja korkeusasema. Muunnettu yhtälö voidaan tällöin esittää muodossa

$$E_p = 17,4 d \cdot T F_H F_W F_S F_E$$

jossa

$$F_H = 0,59 - 0,55 H_n^2$$

$$F_W = 0,75 + 0,0255 W_{kd} \text{ tai } 0,75 + 0,125 W_{kh}$$

$$F_S = 0,478 + 0,58 S$$

$$F_E = 0,950 + 0,0001 E$$

W_{kd} = keskimääräinen tuulen nopeus 2 m:n korkeudella (km/d)

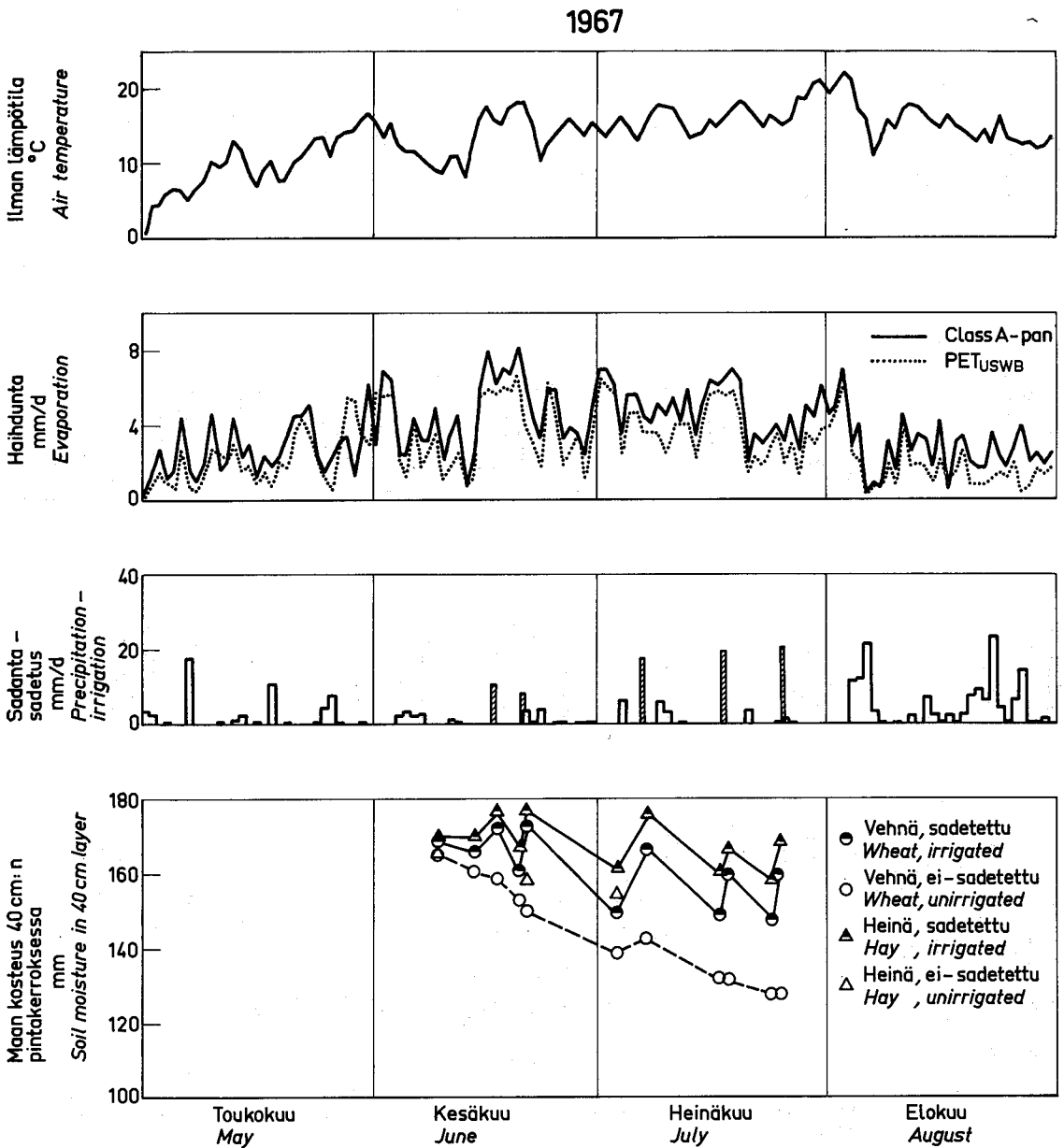
W_{kh} = keskimääräinen tuulen nopeus 2 m:n korkeudella (km/h)

S = todellisen auringonpaisteajan osuus teoreettisesta

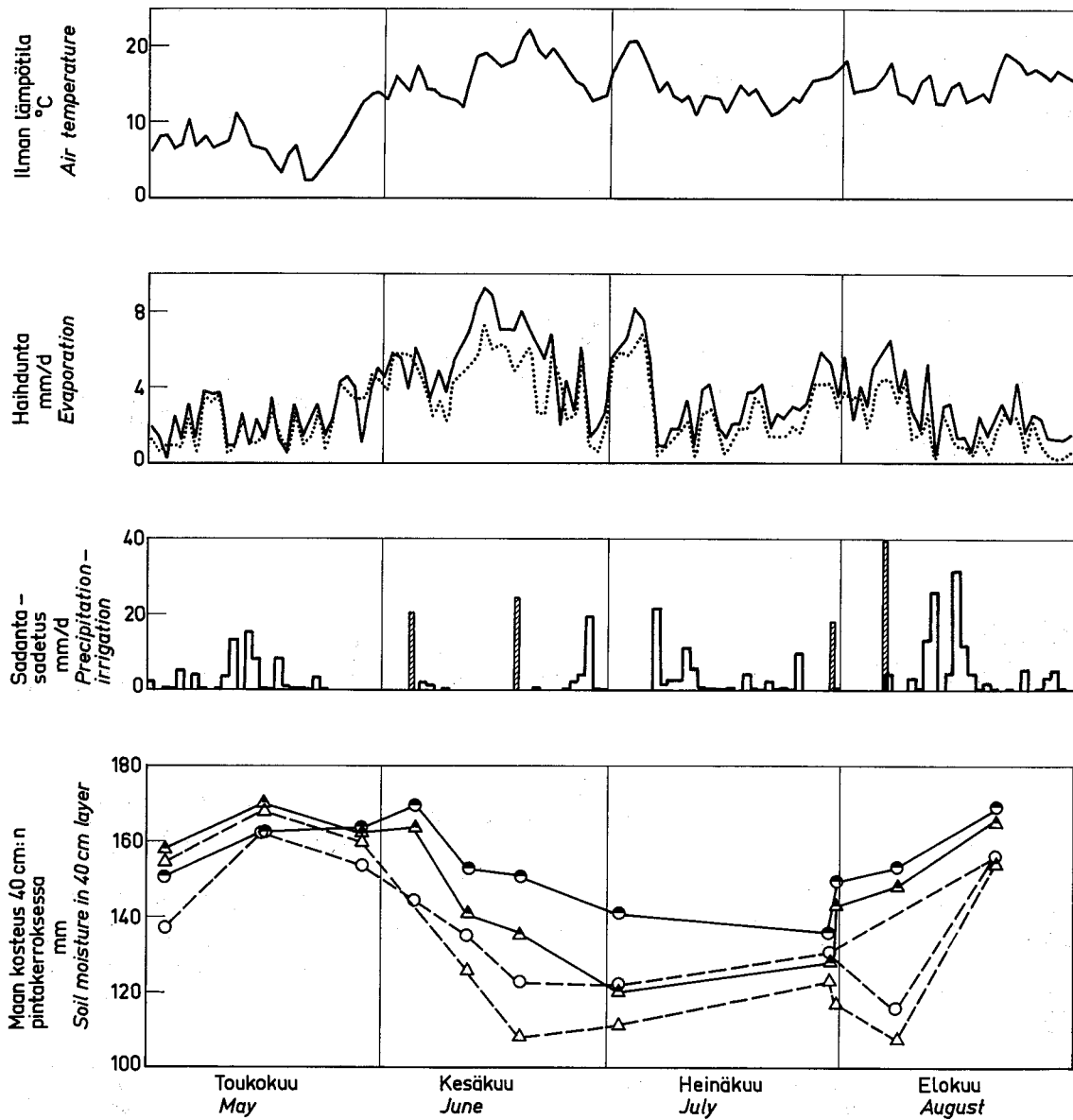
E = haihtumisastian korkeusasema (m)

Liite 4. Ilman lämpötilä, haihdunta Class A-astiasta ja PET:na, sadanta, sadetus ja maankosteus 40 cm pintamaakerroksessa Vihdissä 1967-1973.

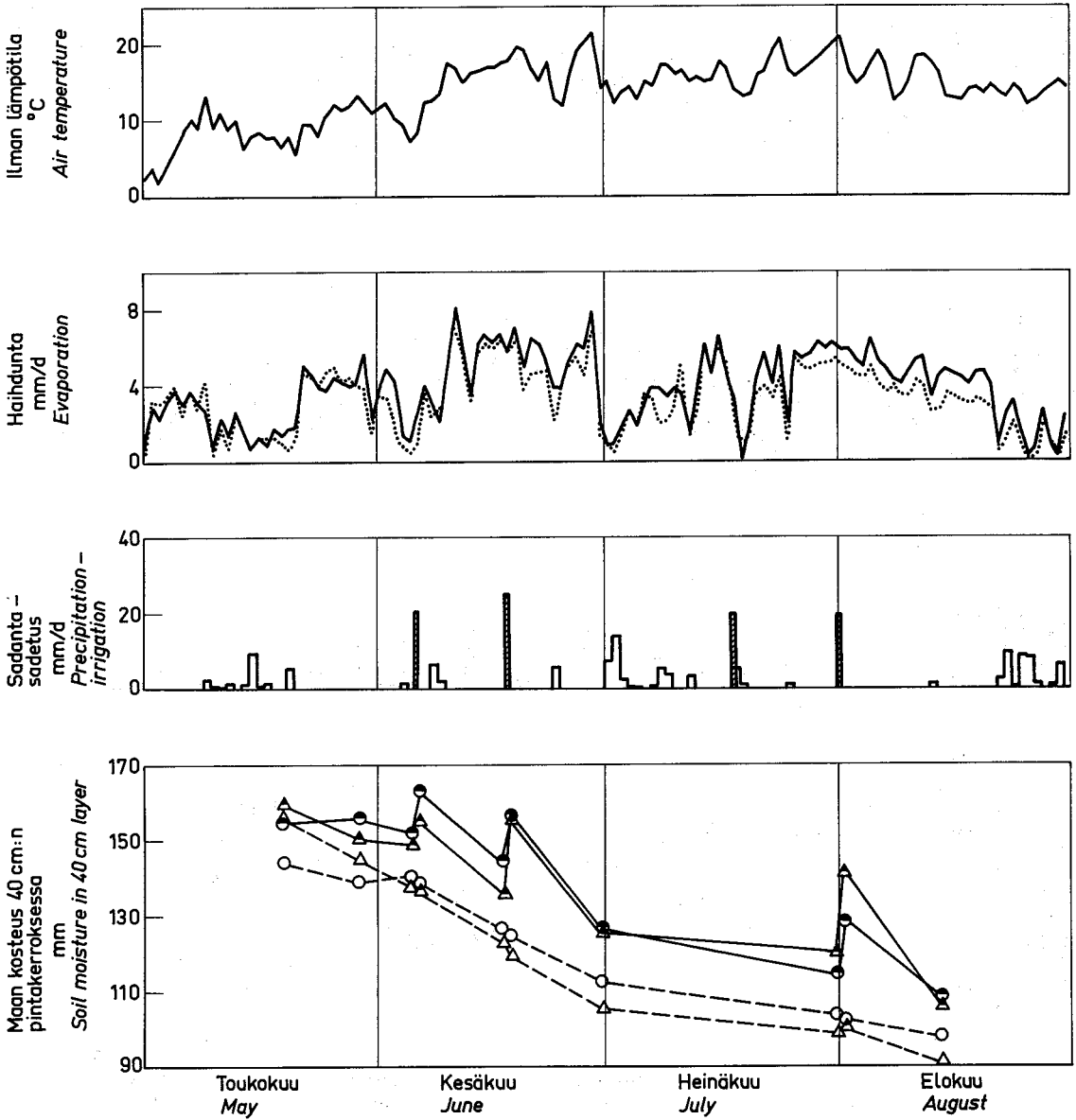
App. 4. Air temperature, evaporation from Class A pan, precipitation, irrigation and soil moisture in 40 cm surface layer at Vihti in 1967-1973.



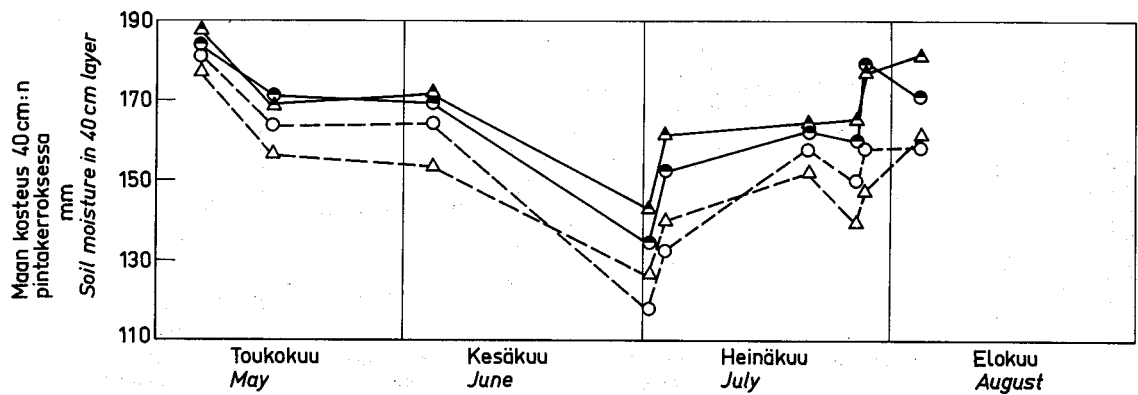
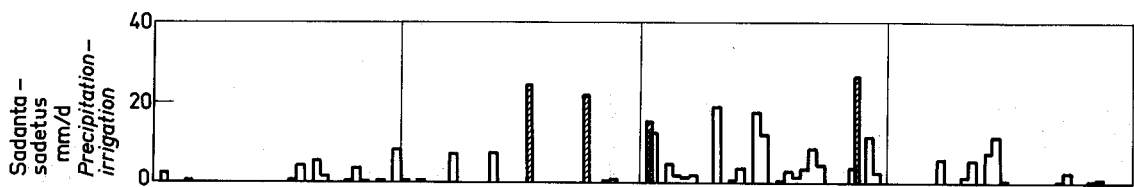
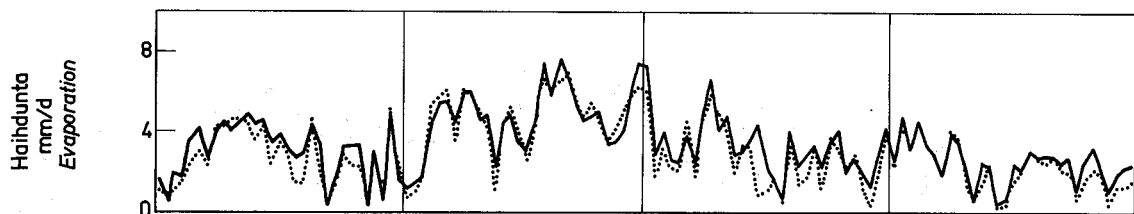
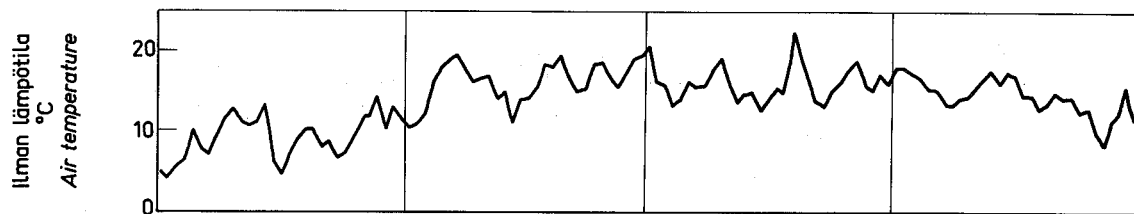
1968



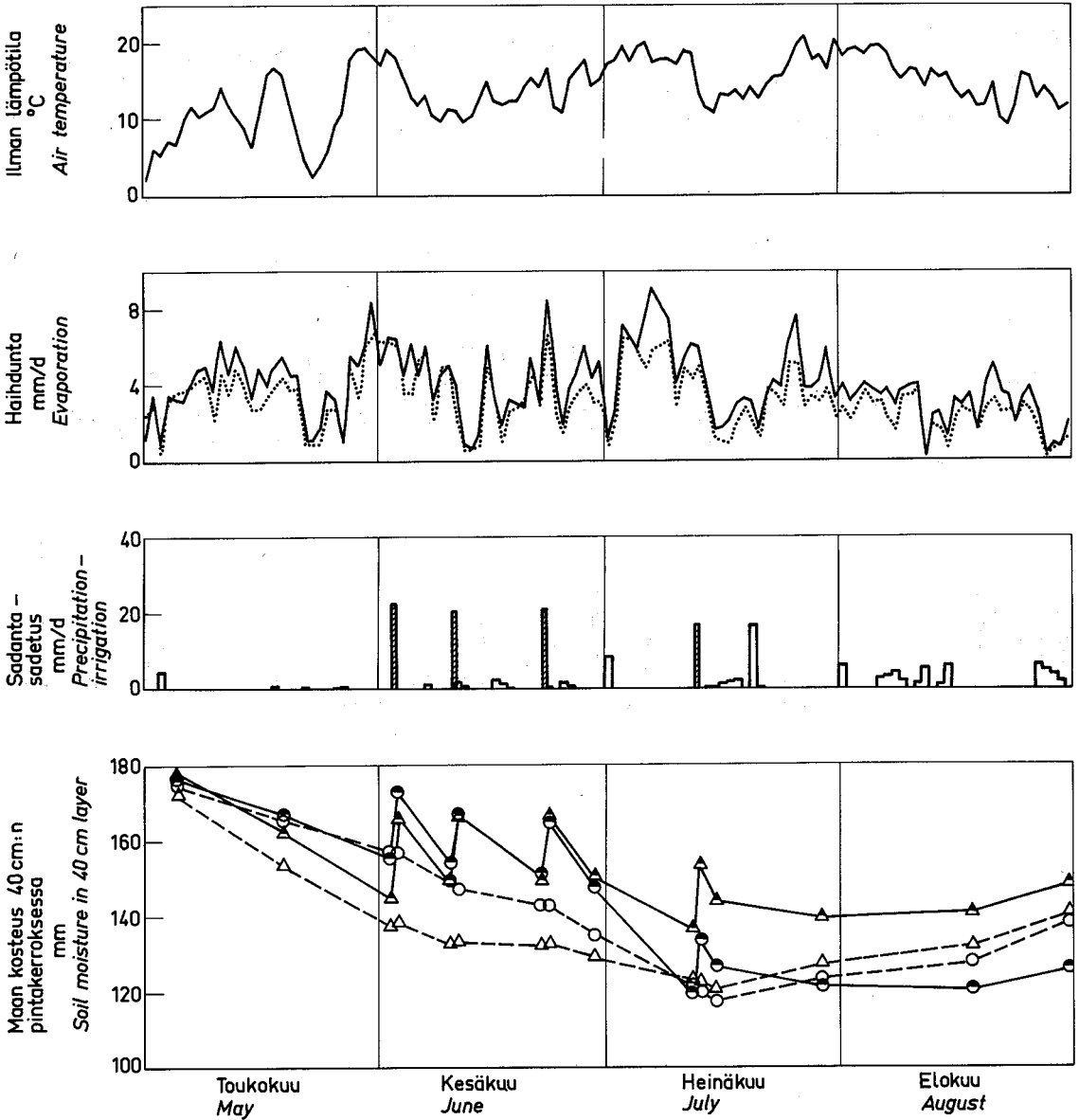
1969

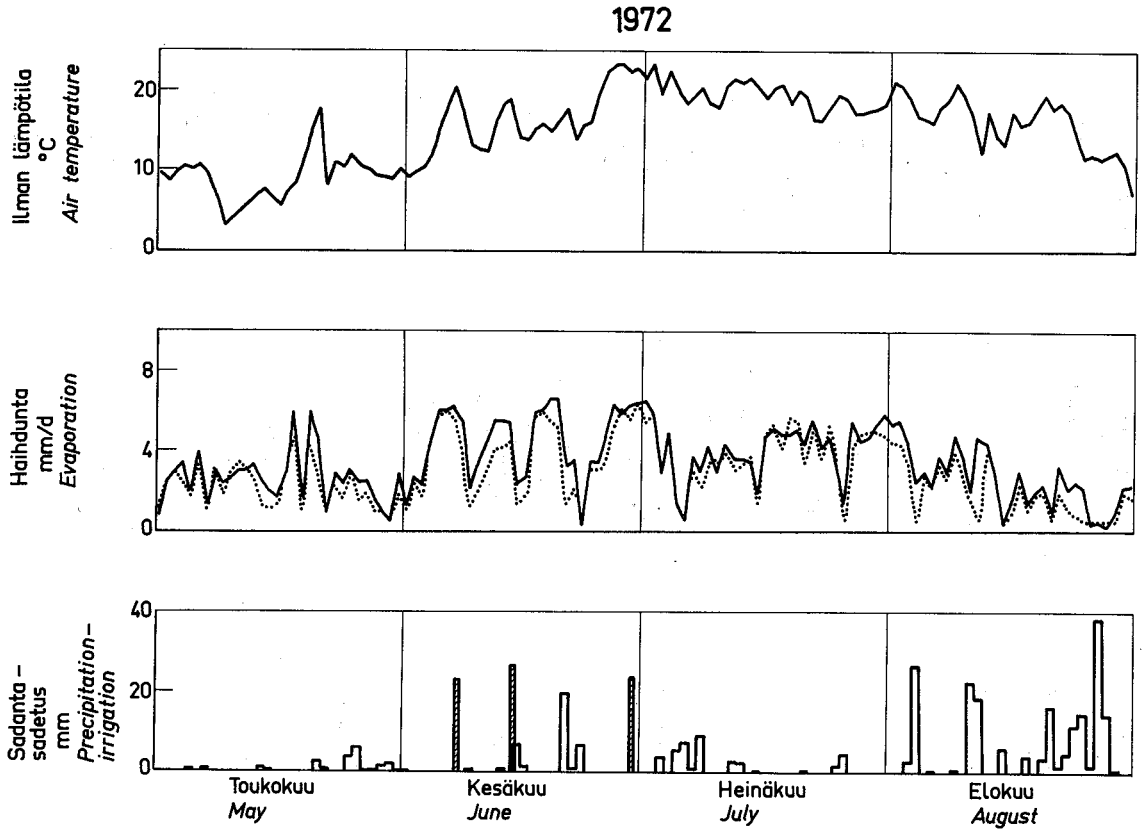


1970



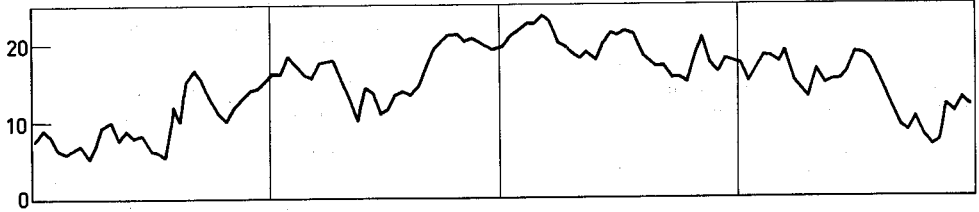
1971



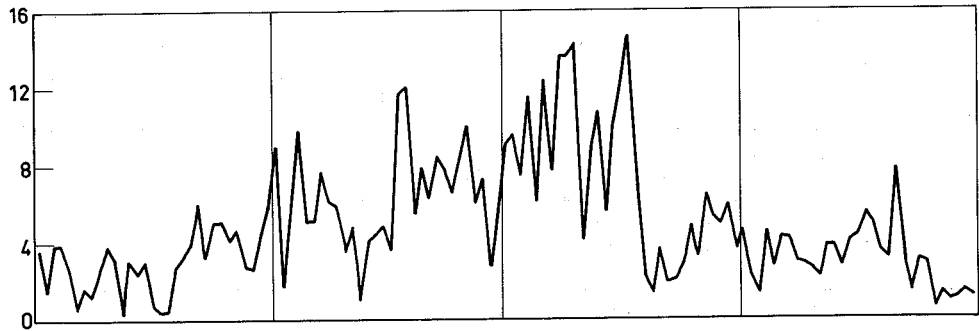


1973

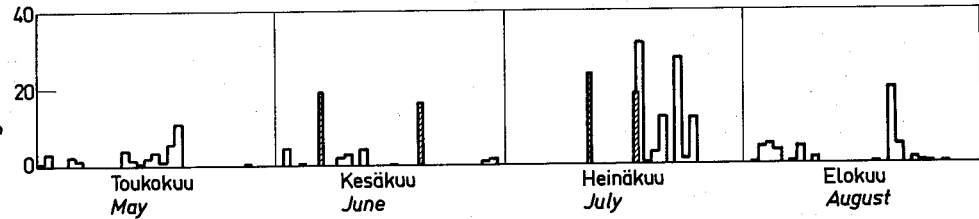
Ilman lämpötila
°C
Air temperature



Haihdunta
mm/d
Evaporation



Sadanta -
sadetus
mm.
Precipitation -
irrigation



Liite 5. Havaitun ja lasketun maankosteuden erotusten neliösummat sadetettulla (WI) ja sadettamattomalla (WU) vehnällä sekä sadetettulla (HI) ja sadettamattomalla (HU) heinällä Viidissä 1967-1973.

App. 5. Square sums of differences between observed and computed soil moisture at Vihti in 1967-1973. WI=irrigated wheat, WU=unirrigated wheat, HI=irrigated hay and HU=unirrigated hay.

5.1 Haihdunta laskettu class A-astian haihdunnan perusteella, kerroin $a = 1$.

Exponentti Exponent b	Jäännöseliösumma Residual sum of squares			
	WI	WU	HI	HU
1,0	77 493	47 156	89 963	38 349
2,0	29 396	16 194	35 501	19 090
3,0	17 308	13 749	20 277	21 096
4,0	13 990	17 088	15 088	26 060
5,0	13 501	21 372	13 392	31 053
6,0	14 062	25 539	13 136	35 562

5.2 Haihdunta laskettu class A-astian haihdunnan perusteella, exponentti $b = 4$.

Kerroin Coefficient a	Jäännöseliösumma Residual sum of squares			
	WI	WU	HI	HU
0,5	26 101	52 285	21 356	61 050
0,8	13 813	24 458	13 159	34 742
0,9	13 830	20 022	13 611	29 699
1,0	13 990	17 048	15 088	26 060
1,1	15 895	15 180	17 219	23 267
1,2	17 301	14 154	19 768	20 991
1,3	19 654	13 794	22 732	19 420
1,4	22 377	13 919	26 015	18 356
1,5	25 381	14 412	29 538	17 649
1,7	31 935	16 291	37 021	17 227
2,0	42 557	20 687	48 856	18 430

5.3 Haihdunta laskettu potentiaalisen evapotranspiraation perusteella, kerroin $a = 1$.

Exponentti Exponent b	Jäännöseliösumma Residual sum of squares			
	WI	WU	HI	HU
1,0	43 195	25 169	51 839	26 937
2,0	19 368	14 088	22 835	21 809
3,0	14 907	17 789	15 746	27 180
4,0	14 641	23 263	13 933	32 951
5,0	15 557	28 302	13 883	38 062

5.4 Haihdunta laskettu potentiaalisen evapotranspiraation perusteella, exponentti $b = 3$.

Kerroin Coefficient a	Jäännöseliösumma Residual sum of squares			
	WI	WU	HI	HU
0,5	32 961	61 958	26 505	69 472
0,8	15 430	27 668	13 853	36 963
0,9	14 353	21 707	14 076	31 195
1,0	14 907	17 789	15 746	27 180
1,1	16 462	15 441	18 226	24 043
1,2	18 974	14 352	21 565	22 054
1,3	22 709	14 226	25 433	20 741
1,4	25 673	14 842	29 641	19 854
1,5	29 649	16 008	34 217	19 538
1,7	38 475	19 452	44 093	20 033
2,0	53 108	26 603	60 071	22 939

5.5 Haihdunta laskettu ilman lämpötilan perusteella, exponentti $b = 3$.

Kerroin Coefficient a	Jäännöseliösumma Residual sum of squares			
	WI	WU	HI	HU
0,20	10 154		10 558	
0,21	9 047		9 978	
0,22	8 297		9 727	
0,23	7 859		9 764	
0,24	7 696		10 051	
0,25	7 773		10 553	
0,26	8 062		11 242	
0,31		10 857		16 568
0,32		10 008		15 805
0,33		9 895		15 180
0,34		9 906		14 679
0,35		10 028		14 276
0,36		10 257		13 955
0,37		10 587		13 742
0,38		11 010		13 625
0,39		11 511		13 595
0,40		12 090		13 643