

SÄTEILYMITTARIN M/FRANKFURT SOVELTUVUUS ENERGIATASEMITTAUKSIIN

HANNU MANNERKOSKI

SUMMARY:

USE OF CHEMICAL TOTALIZER OF RADIATION IN ENERGY BALANCE MEASUREMENTS

Saapunut toimitukselle 1978-05-30

Tutkimuksessa on testattu säteilymittaria m/Frankfurt yksinkertaisen energiataseen (haihduntaenergia = nettosäteilyenergia — ilmaan siirtyvä lämpöenergia) osatekijöiden mittauksessa tavoitteena haihdunnan estimointi. Mittarin toiminta perustuu sokeriliuoksen inversion lämpötilariippuvuuteen, joka on eksponentiaalinen. Mittarilla todetaan voitavan määrittää 2—6 vuorokauden jakojen säteilysummia luotettavasti keskimääräisen säteilyvoimakkuuden ollessa alle $20 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-2}$ vuorokaudessa. Ilmaan siirtyvän lämpöenergian määrittäminen on ilmeisen epätarkkaa, kuten samalla myös haihdunta-arvojen laskeminen. Eri kasvustojen haihduntavertailussa on siten tyydyttävä nettosäteilystä mahdollisiin päätelmiin.

1. JOHDANTO

Veden haihtuminen on elolliselle luonnolle hyvin tärkeä ilmiö, sillä se pitää yllä veden kiertokulkua. Haihtumisen määrään eli haihduntaan vaikuttavat monet tekijät, kuten ilman vesihöyrynpainevajaus, lämpötila, tuuli, ilmanpaine ja veteen liuenneet aineet. Maasta ja kasveista tapahtuvaan haihduntaan vaikuttavat lisäksi maan vesipitoisuus, vedenläpäisevyys, vedenpidätyskyky ja lämpövarasto sekä maata peittävän kasvipeitteen laatu.

Haihdunta paljaasta maasta on pienempi kuin vesipinnasta samoissa sääolosuhteissa. Kasvipeitteisen maan haihdunta on yleensä suurempi kuin paljaan maan, sillä kasvit saavat vettä vielä riittävästi, vaikkei maan

pinnassa enää ole paljonkaan vettä haihtumiseen (MOLCHANOV 1963, BAUMGARTNER 1965, 1967). Joissakin tapauksissa voi elinvoimainen kasvipeite haihduttaa jopa enemmän kuin vesipinta (PENMAN 1963, BAUMGARTNER 1965, 1967). Metsän haihdunta on keskimäärin suurempi kuin ruohikon tai paljaan maan ja vastaa suurin piirtein haihduntaa vesipinnasta (LÜTZKE 1966, RAUNER 1966, BAUMGARTNER 1967, RUTTER 1968).

Haihdunnan mittaamenetelmiä on monia, mutta kaikkiin olosuhteisiin soveltuva yleis menetelmä ei ole (ks. esim. MOLCHANOV 1963, MUNN 1966, FEDERER 1970). Veden haihtuminen kuluttaa energiaa, jota tulee

pääasiassa auringosta säteilyenergiana. Haihdunta on siis mahdollista laskea energiataseesta. Täydelliseen energiataseeseen on otettava mukaan kaikki mittauspaikeille tulevat ja sieltä lähtevät energiavirrat sekä mittauspaikeissa tapahtuvat energian sitoutumiset ja varastoitumiset (TANNER 1960, KING 1961, REIFSNYDER 1967). Yleisimmin käytetty muoto on (ks. esim. FRANSSILA 1930, TANNER 1960, BAUMGARTNER 1965, 1967, LÜTZKE 1966, BRINGFELT 1975):

$$S \pm E \pm L \pm B = 0,$$

jossa S on nettosäteilyenergia, E haihdunnan kuluttama energia sekä L ilmaan ja B maahan siirtyvä lämpöenergia. Kaavaan tulisi ottaa mukaan myös fotosynteesi- ja hengitysenergia sekä metsikön kasvimassan lämpövaraston muutokset varsinkin seurattaessa vuorokautista taseen kulkua (esim. KING 1961, MUNN 1966, FEDERER 1970, BELOTSERKOVSKAYA 1972, STEWART ja OLIVER 1972). Kokonaisissa vuorokausitaseissa näiden osuus on kuitenkin hyvin pieni (esim. KING 1961). Sama koskee osittain myös maan lämpövaraston muutoksia, lukuunottamatta maan keväistä lämpiämis- ja syksyistä jäähtymiskautta (esim. BLACK ja McNAUGHTON 1972, BRINGFELT 1975).

Tasekaava voidaan ratkaista haihdunnan kuluttaman energian suhteen ja kun se esitetään yksinkertaisimmassa muodossaan, saadaan

$$E = S - L,$$

jossa arvot ovat positiivisia tullessaan mittauspaikeille ja negatiivisia poistuessaan siltä. Kaava edellyttää nettosäteilyn sekä maanpinnan ja ilman välisen lämmönvaihdon mittaamista (esim. BRECHTEL 1973). Nettosäteily voidaan mitata suoraan nettosäteilymittareilla (TANNER 1960, STANHILL ym. 1966, BLACK ja McNAUGHTON 1972, BRINGFELT 1975) tai laskea mitatuista osatekijöistä (esim. REIFSNYDER 1967). Ilmaan siirtyvän lämpöenergian mittaaminen ei yleensä ole mahdollista suoraan, vaan se lasketaan ilman lämpötila- ja tuulennopeusgradienttien avulla (ks. esim. TANNER 1960, KING 1961, MUNN 1966, FEDERER 1970, BRINGFELT 1975). Puuston latvuston heterogeenisuuden huomioon ottaminen vaatii useita mittauspaikeja samaan metsikköön

(FEDERER 1970, DROPPA ja HAMILTON 1973).

Säteilyn määrittämiseksi mitataan yleensä säteilyenergian muuttumista lämpöenergiaksi (DIRMHIRN 1964). Lämpötilan jatkuvat rekisteröintilaitteet ovat kuitenkin kalliita. Hydrologiset tutkimukset vaativat laajojen alueiden, kuten valuma-alueiden säteilyolojen kartoittamista. Tämä vaatii runsaan määrän mittareita, joten niiden on oltava halpoja, luotettavia ja helposti käsiteltäviä. BRECHTEL (1968, 1973) on kehittänyt tällaista mittaria käyttämällä inverttisokerieli ns. Pallmann-menetelmää (PALLMANN ym. 1940) lämpötilanmittauksessa. Mittarilla saadaan haluttujen ajanjaksojen summa-arvoja, jotka hydrologisissa ja ekologisissa tutkimuksissa usein ovat riittäviä. BRECHTEL (1968) toteaa menetelmän soveltuvan suhteellisten säteilyarvojen mittaukseen ja olevan käyttökelpoinen laajahkon alueen säteilyolojen kuvaamiseen.

Tässä tutkimuksessa testattiin Brechtelin aloitteesta säteilymittaria m/Frankfurt (BRECHTEL 1973) Suomen olosuhteissa. Ensinnä tutkittiin mittarin ja inverttisokerimenetelmän käyttökelpoisuutta nettosäteilyn osatekijöiden mittaukseen käyttäen eri tavoin koottuja mittaussyksiköitä ja sijoittamalla niitä eri korkeuksille maan pinnasta. Tuloksia verrattiin myös bellaanisäteilymittarilla saatuihin. Varsinaisena päättehtävänä tutkittiin mittarin käyttöä haihdunnan määrittämisessä energiataseen avulla. Nettosäteilyä ja sen komponentteja sekä ilmaan siirtyvän lämmön määrää mitattiin haihdunta-astian ja lysimetrin yläpuolelta. Energiataseesta laskettua haihdunnan estimaattia verrattiin mitattuun haihduntaan. Samalla saatiin informaatiota mittarin käyttökelpoisuudesta ilmaan siirtyvän lämmön mittaukseen, jota tutkittiin myös tuulimittausten avulla. Kolmanneksi pyrittiin vertailemaan erilaisia kasvustoja haihdunnan suhteen käyttäen säteilymittarilla m/Frankfurt mitattuja tai niistä laskettuja tunnuksia.

Tutkimus sai alkunsa Horst M. Brechtelin vieraillessa stipendiaattina Suomessa elo-syyskuussa 1970. Työ on ollut osana professori Leo Heikuraisen johtamassa metsäojituksen seurauksia selvittävässä tutkimuksessa ja sitä ovat apurahoin tukeneet Suomen Akatemia ja Suomen Luonnon-

varain Tutkimussäätiö. Suomen Akatemian apurahalla olin myös tutustumassa Brechtelin tutkimuksiin Hessenissä Saksan Liittotasavallassa.

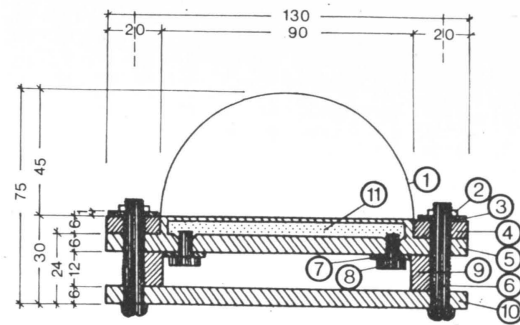
Käsikirjoituksen ovat lukeneet Leo Heikurainen, Kustaa Seppälä ja Seppo Huovila. Kaikille tutkimukseen vaikuttaneille esitän parhaat kiitokseni.

2. SÄTEILYMITTARIN M/FRANKFURT RAKENNE, TOIMINTA JA KÄYTTÖ

Kemiallisen säteilysummaimen, säteilymittarin m/Frankfurt perusyksikkö on mittausrasia (kuva 1:5 ja BRECHTEL 1973). Rasian pinta ottaa vastaan säteilyä ja asetetaan osoittamaan ylös maanpinnalle tulevaa ja alas maanpinnan menettämää säteilyä mitattaessa. Käyttämällä säteilyä vastaanottavassa pinnassa eri värejä saadaan mitatuksi eri aallonpituusalueita. Musta pinta mittaa kaikkia aallonpituuksia, valkea vain pitkäaaltoista säteilyä, koska se heijastaa lyhytaaltoisen (DIRMHIRN 1964). Mittausrasiat paitsi absorpoivat ja heijastavat säteilyä, myös säteilevät itse (emissiosäteily) ja lämpöä siirtyy niistä ilmaan sekä kuluu niiden pinnalle mahdollisesti tulleen sadeveden haihtumiseen. Kaksi viimeksi mainittua voidaan osittain poistaa käyttämällä polyeteleenistä suojakupua, joka läpäisee säteilyn kaikkia aallonpituuksia vääristämättä tuloksia absoluuttisesti mustan säteilyyn verrattuna. Mittausrasiat kootaan mitausyksiköiksi kuvan 1 mukaisesti. Vuodesta 1972 alkaen maalattiin taustalevyt ja puristusrenkaat valkoisiksi ulkopuolisen säteilyvaikutuksen vähentämiseksi.

Mittausrasiat täytetään sokeriliuoksella, jonka käyttö lämpötilan rekisteröintiin perustuu ruokosokerin eli sakkaroosin hajoamiseen happamassa liuoksessa fruktoosiksi ja glukoosiksi (PALLMANN ym. 1940). Ilmiötä sanotaan inversioksi. Sakkaroosi kiertää valoa oikealle. Glukoosi kiertää valoa myös oikealle, mutta fruktoosi sitä voimakkaammin vasemmalle. Täten inversion edistyessä kiertokulma oikealle pienenee ja täydellisesti hydrolysoituneena glukoosin ja fruktoosin seos, inverttisokeri, kiertää valoa vasemmalle (esim. SCHMITZ ja VOLKERT 1959).

Inversionopeus kasvaa suorassa suhteessa sokeriliuoksen vetyionikonsentraatioon ja toisaalta nopeuskerroin kasvaa eksponentiaalisessa suhteessa lämpötilaan (SCHMITZ ja VOLKERT 1959). Jos lämpötila pysyy koko mittausajan lähes samana, saadaan tällä



Kuva 1. Säteilymittarin m/Frankfurt mitausyksikön rakenne yksipuolisena. Mitat millimetreinä.

Selitykset:

- 1 — polyeteleenikupu, kirkas
- 2 — kuusikulmainen mutteri, messinkiä
- 3 — aluslevy, rautaa
- 4 — puristusrenkas, muovia
- 5 — mittausrasia, muovia
- 6 — messinkiruuvi
- 7 — tiivisterengas, kumia
- 8 — muoviruuvi
- 9 — välirenkas, muovia
- 10 — taustalevy, muovia
- 11 — sokeriliuos, 30 cm³

Fig. 1. Construction of the measuring unit of Frankfurt radiometer, one-faced. Dimensions in millimetres.

Explanation:

- 1 — clear polyethylene cup
- 2 — hexagonal brass nut
- 3 — steel washer
- 4 — holding plate
- 5 — flat polyethylene container
- 6 — brass bolt
- 7 — rubber washer
- 8 — plastic screw
- 9 — insulating spacer, polyethylene
- 10 — bottom plate, polyethylene
- 11 — sugar solution, 30 cm³

menetelmällä oikea keskilämpötila. Luonnossa lämpötila yleensä vaihtelee, ja koska korkeilla lämpötiloilla on suurempi paino kuin alhaisilla, tulos on korkeampi kuin aritmeettinen keskilämpötila. Ero on sitä suurempi, mitä suurempi on lämpötilan vaihteluamplitudi (ks. myös LÜTZKE 1963). Toinen vakiolämpötilassakin esiintyvä epälineaarisuuslähde on kiertokulmanmuutoksen hidastuminen hydrolyysin loppuvaiheessa (SCHMITZ ja VOLKERT 1959). Tämä virhe vaikuttaa yleensä vasta, kun liuos muuttuu oikealle kiertävästä vasemmalle kiertäväksi eli kulma laskee alle arvon 0°.

Sokeriliuos valmistettiin seuraavasti (ks. SCHMITZ ja VOLKERT 1959):

Liuos A: Liuotetaan 1000 g kidesokeria 1000 ml:an vettä.

Liuos B: Sekoitetaan keskenään liuokset 1 ja 2.

Liuos 1: Sekoitetaan 9 ml väkevää suolahappoa (37 % HCl) ja 15 ml formaliinia 600 ml:an vettä.

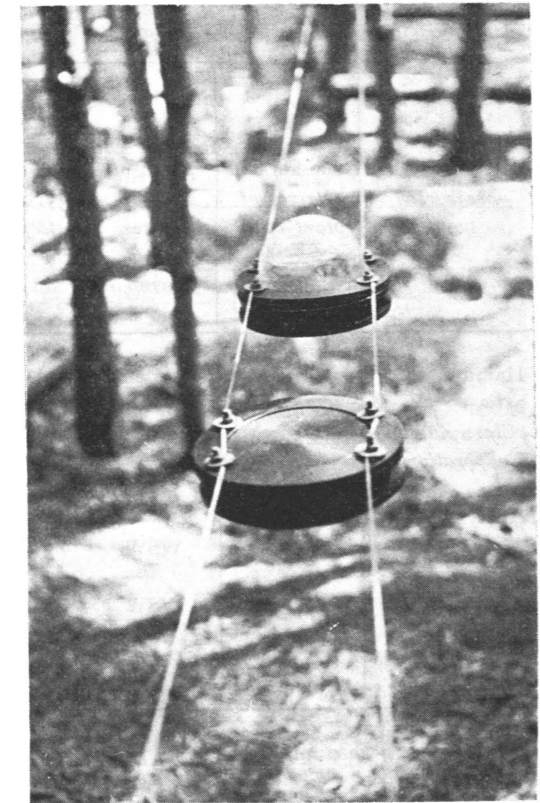
Liuos 2: Sekoitetaan 8 g kiteistä natriumsitraattia (Na₃C₆H₅O₇ · 2H₂O) 400 ml:an vettä.

Lopullinen käyttöliuos saadaan sekoittamalla liuokset A ja B keskenään. Saadun liuoksen optinen kiertokulma on noin 51° ja pH noin 1,8. Happamuutta voidaan tarpeen mukaan säädellä HCl- tai NaOH-lisäyksin. Puskurina toimiva natriumsitraatti pitää liuoksen happamuuden likimain vakiona koko mittausajan ja formaliini estää mikrobitoiminnan liuoksessa. Koko mittausarjan vaatima liuosmäärä on suositeltavaa valmistaa kerralla, sillä tällöin eivät liuosten mahdolliset erot vaikuta tuloksiin. Liuosta voidaan säilyttää pitkiäkin aikoja jäädytettynä ja lyhyitä aikoja jääkaappilämpötilassa. Inversio on lähellä 0° C hyvin hidas ja jäätympisteiden alapuolella sitä ei tapahdu ollenkaan.

Rasiat täytetään kaatamalla liuosta sisään toisesta pohjareistä, jolloin ilma poistuu toisesta. Rasiat kuljetetaan kylmälaukussa säteilyltä suojassa mitauspaikalle, missä mitausyksiköt kootaan tarvittavista osista (ks. kuva 1). Mittausyksiköt ripustetaan vaijerien varaan mitauspaikalle (kuva 2). Sokeriliuoksesta mitataan alkukiertokulma

mahdollisimman samanaikaisesti ripustamisen kanssa.

Rasioita pidetään maastossa haluttu ajanjakso, jonka pituus määräytyy käytetyn sokeriliuoksen happamuuden ja säteilyosuhteiden mukaan. Loppukiertokulman tulisi olla yli 0, mutta mielellään alle 30 astetta. Sovitus on tehtävä mustien tulevaa säteilyä mittaavien rasioiden mukaan, koska muutos niissä on nopein. Mittausjakson lopussa rasiat irrotetaan vaijereista ja kuljetetaan mahdollisimman nopeasti kylmälaukuissa laboratorioon mitattaviksi ns. kehäpolariometrillä, jonka lukutarkkuus on 0,05°.



Kuva 2. Säteilymittarin m/Frankfurt yksipuolisia mitausyksiköitä vaijerien varaan kiinnitettynä. Molemmat mittaavat tulevaa säteilyä, toinen polyeteleenikuvulla suojattuna, toinen ilman kupua.

Fig. 2. One-faced Frankfurt radiometer measuring units supported by two horizontal wires. Both measure incoming radiation, one is covered with a polyethylene cup, the other uncovered.

3. KOKEIDEN SUORITUS

Ensimmäisessä kokeessa Yliopiston metsä-
asemalla tehtiin kesän 1971 aikana mittauk-
sia haihdunta-astiassa olevan vesipinnan
(Class A Pan), niityn ja 11-vuotiaan mänty-
taimiston yläpuolella. Taulukkoon 1 on
kerätty tietoja mittauspaikeista sekä rasioi-
den määrästä ja sijainnista niillä. Mittaus-
yksiköt olivat kaksipuolisia mitattaessa sa-
maa aallonpituusaluetta sekä ylhäältä että
alhaalta päin. Käytetyn sokeriliuoksen pH

oli 1,7. Säteilymittarilla m/Frankfurt tehty-
jen mittausten lisäksi mitattiin haihdunta-
astiasta haihdunta ja sen vierestä ilman
lämpötila termohygrografilla, sademäärä ke-
säsademittareilla (5 kpl), tuulen nopeus
kuppianemometrillä, auringonpaistetunnit
aurinkoautografilla ja lyhytaaltainen koko-
naissäteily Ilmatieteen laitoksen bellaani-
mittarilla.

Toinen koe oli TKK:n rakennusinsinööri-

Taulukko 1. Tietoja Yliopiston metsäasemalla tehdyn kokeen mittauspaikeista.
Table 1. Data for measuring points at the University Forest Station.

Mittauspaike Measuring point	Kasvipeit- teen korkeus Height of plant cover cm	Maanpinnan kaltevuuden Slope of ground surface suunta jyrkkyys direction steepness %		Säteilymittarien keski- määräinen etäisyys Mean height of radiometers maanpin- kasvi- nasta peitteen from ground pinnasta surface from surf. of plant cover cm cm		Mittausrasioita tunnusta ¹⁾ koh- den, kpl No. of measuring containers per parameter ¹⁾				
		R _{woLup}	R _{soLup}	R _{so}	R _{suLup}	R _s				
Haihdunta- astia (Class A Pan) Evaporation pan Niitty Meadow 11-vuotias mäntytaimisto 11-year old Scots pine stand	— 20 170	— WSW WSW	— 7 3	28 84 183	— 64 13	3 2 —	3 3 3	3 3 3	3 3 —	5 — —

- ¹⁾ R_{woLup} — maanpinnalle tuleva pitkäaaltoinen säteily
R_{soLup} — » » säteily (kaikki aallonpituudet)
R_{so} — » » » (» ») ÷ ilmaan siirtyvä lämpö
R_{suLup} — maanpinnan menettämä säteily (» »)
R_s — ilman lämpötila säähavaintokojussa
w-valkea, s-musta pinta, o-ylöspäin, u-alaspäin, Lup-polyetyleenikupu
- ¹⁾ R_{woLup} — incoming long-wave radiation
R_{soLup} — » radiation (all-wave)
R_{so} — » » (» ») minus sensible heat
R_{suLup} — outgoing » (» »)
R_s — air temperature in weather shelter
Surface of measuring container: w-white, s-black, o-upwards, u-downwards, Lup-covered with polyethylene cup.

osaston maa- ja vesiteknillisen laboratorion
lysimetri- ja sääasemalla. Mittauksia tehtiin
neljän lysimetrin (koko 3,17 m × 3,17 m) ylä-
puolella. Näistä oli kahdessa nurmipintaista
hietaa ja toisissa kahdessa kasvipeitte-
töntä savea ja turvetta. Mittausjaksoja oli
kolme touko-kesäkuussa 1972. Sääasemalta
saatiin tarpeellisia vertailutietoja. Käyte-
tyn sokeriliuoksen pH oli 2,1. Mittausyksiköt
olivat vaijerien varassa 90 cm:n korkeudella
maanpinnasta.

Kolmannessa kokeessa testattiin mittaus-
yksiköiden rakennetta Yliopiston metsä-
asemalla elokuussa 1972. Rasioita ripustet-
tiin vaijerien varaan niityn yläpuolelle sekä
yksi- että kaksipuolisina yksikköinä. Sokeri-
liuoksen pH oli 1,9 ja mittausjaksojen (4

kpl) pituudet vaihtelivat kolmesta viiteen
vuorokauteen. Mukana olivat seuraavat
mittausyksiköt (ks. taulukko 1, alaviite 1)
viitenä toistona:

$$\text{Yksipuoliset: } R_{soLup}, R_{suLup}, R_{so}$$

$$\text{Kaksipuoliset: } \frac{R_{soLup}}{R_{suLup}}, \frac{R_{so}}{R_{suLup}}, \frac{R_{woLup}}{R_{suLup}}$$

Neljännessä kokeessa tehtiin energiatase-
mittauksia metsäojituksen seurausvaikutuk-
sia selvittävän tutkimuksen koealoilla 3
(muuttuma) ja 5 (neva) kesällä 1974.
Koealat sijaitsevat Yhtyneet Paperitehta
Oy:n ja Rosenlew Oy:n mailla Juupajoen
kunnan Lylyn kylässä. Tietoja niistä esite-
tään taulukossa 2. Säteilymittausyksiköt

Taulukko 2. Tietoja Lylyn koekentällä tehdyn kokeen mittauspaikeista.
Table 2. Data for measuring points on the Lyly experimental field.

Kuvaustunnus Characteristic	Koeala Sample plot	
	Ojittamaton neva Undrained open bog	Muuttuma, ojitettu Transformation, drained
Suotyyppi	VSN	VSNmu
Peatland type	Ordinary sedge bog	Ordinary sedge bog forested after drainage
Ojitusvuosi	—	n. 1935
Drainage year	—	ca. 1935
Puulaji	—	mänty
Tree species	—	Scots pine
Runkoluku, kpl/ha	—	1740
No. of stems/hectare	—	4,5
Puuston keskipituus, m	—	20,7
Mean height of trees, m	—	1,8
Puuston kuutiomäärä, m ³ /ha	—	>150
Volume, m ³ /ha	—	>150
Puuston kasvu, m ³ /ha/a	—	0—10
Increment, m ³ /ha/yr.	—	20—40
Turvekerroksen paksuus, cm	>150	20—40
Thickness of peat layer, cm	—	Sphagnum recurvum/96 %
Pohjavesipinnan keskimääräinen etäisyys maanpinnasta, cm	0—10	Pohlia nutans/24 % Pleurozium schreberi/20 % Sphagnum recurvum/13 %
Mean depth of ground water table, cm	—	Carex rostrata/24 % Eriophorum vaginatum/54 %
Pohjakerroksen peittävimmat kasvilajit Dominant plant species of bottom layer coverage	—	Betula nana/26 %
Kenttäkerroksen peittävimmat kasvilajit Dominant plant species of field layer coverage	—	

olivat muuttuma-koealalla puuston latvuston yläpuolelle tornien väliin rissapyörien ja painojen avulla kiristettyjen vaijerien varassa. Rasiat kiinnitettiin vaijereihin toisessa tornissa ja siirrettiin niiden avulla mittauspaikalle tornien väliin. Toisessa tornissa oli säähavaintokojussa termohygrografi sekä bellaanisäteilymittari (WILSKA 1968). Toisessa tornissa oli tuulimittari noin 1,5 m latvustason yläpuolella. Nevalla säteilymittausyksiköt olivat metrin korkeudelle kiristettyjen vaijerien varassa. Koealalla oli säähavaintokojussa termohygrografi ja bellaanisäteilymittari ja tuulimittari 1,5 m:n korkeudella maanpinnasta sekä piirtävä sademittari ja kaksi kesäsademittaria. Rasioi-

den määrät vaihtelivat 3–4 kpl kutakin mitattua tunnusta kohden. Käytetyn sokeriliuoksen pH oli 1,9.

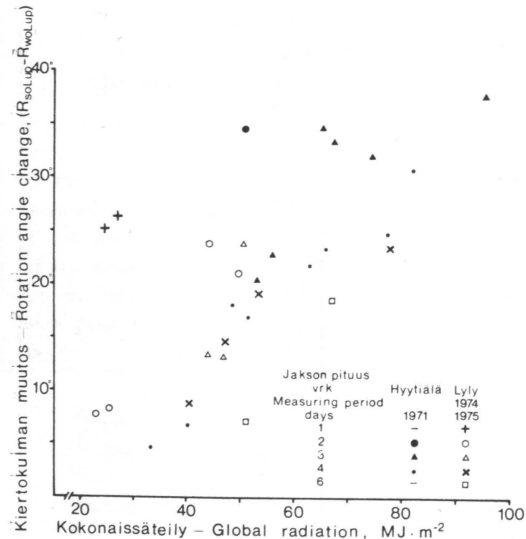
Lyllyn koekentällä mitattiin lisäksi energiataseen avulla haihduntaa lysimetristä. Lysimetri oli kooltaan 235 cm × 400 cm ja sen syvyys oli 20 cm. Se oli upotettu suon pintaan ja erotettu muovikalvolla ympäröivästä turpeesta. Lysimetristä tapahtuvaa haihduntaa seurattiin myös punnitsemalla kymmentä peltiastioihin (25 cm × 25 cm × 20 cm) sijoitettua turvenäytettä. Vaijerit olivat 10, 40, 70 ja 100 cm:n korkeudella turpeen pinnasta. Mittausjaksoja saatiin kesällä 1974 kahdeksan ja kesällä 1975 kuusi. Sokeriliuoksen pH oli 1,9.

4. TULOKSET

4.1. Vertailu bellaanisäteilymittariin

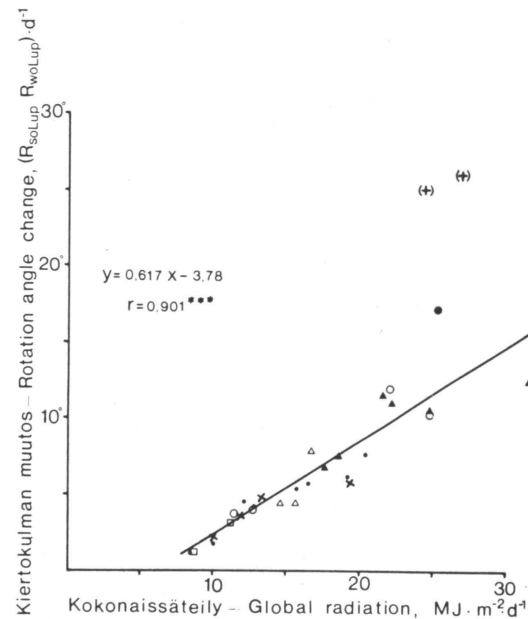
Säteilymittarin m/Frankfurt käyttökel-
poisuutta tutkittaessa verrataan sen antamia tuloksia bellaanisäteilymittarilla saatuihin. Bellaani mittaa lyhytaaltoista kokonaissä-

teilyä (aallonpituus < 3 μm). Säteilymit-
tarilla m/Frankfurt saadaan vastaava tunnus
mustien ja valkoisten rasioiden tulosten
erotuksena ($R_{soLup} - R_{woLup}$). Kuvassa 3 esi-
tetään aineisto siltä osin kuin sokeriliuok-
sen pH oli 1,7–1,9. Mukana ovat vain mit-



Kuva 3. Säteilymittarilla m/Frankfurt mitatun lyhytaaltoisen kokonaissäteilytunnuksen suhde bellaanilla mitattuun.

Fig. 3. Correlation between the parameter for global radiation measured by a Frankfurt radiometer throughout the measuring periods and that measured by a bellani-type radiometer.



Kuva 4. Kuten kuva 3, mutta vuorokausikeskiarvoina.

Fig. 4. As Fig. 3, but daily mean values.

tausjaksot, joiden lopussa sokeriliuoksen kiertokulma oli yli 0°. Eripituiset jaksot ryhmittyvät omiksi pisteparvikseen, eli sama säteilysumma saa aikaan sitä suuremman kiertokulmanmuutoksen, mitä lyhyempänä ajanjaksona se kertyy. BRECHTEL (1968) ei saanut tätä esille, koska hänen aineistonsa oli pieni ja säteilyolot mittausaikana hyvin tasaiset. Hän toteaa kuitenkin kalibraation olevan erilainen eri jaksonpituuksille ja sääolosuhteille.

Kuvassa 4 esitetään tulokset laskettuina vuorokausikeskiarvoiksi. Nyt pisteparvi tiivistyy ja sille voidaan laskea suoraviivainen kuvaaja, jos jätetään huomiotta yhden vuorokauden pituiset jaksot. Vuorokauden pituiset jaksot kuvastavat sokeriliuoksen inversionopeuden eksponentiaalista suhdetta lämpötilaan, sillä ne olivat lämpimiä ja aurinkoisia. Toisaalta lyhyissä jaksoissa pääsevät mahdolliset virheet vaikuttamaan enemmän kuin pitkissä. Jaksoja on myös liian vähän eksponenttifunktion laskemiseksi. Kuvasta havaitaan hajonnan kasvavan suureksi säteilyn ylittäessä 20 MJ · m⁻² vuorokaudessa. Ilmeisesti suoraviivaista taositusta voidaan käyttää vain tähän rajaan asti luotettavasti. Toisaalta näyttää mahdolliselta käyttää yhteistä kalibraatiosuoraa eripituisillekin jaksoille, joiden sää on ainakin osaksi sateista ja pilvistä.

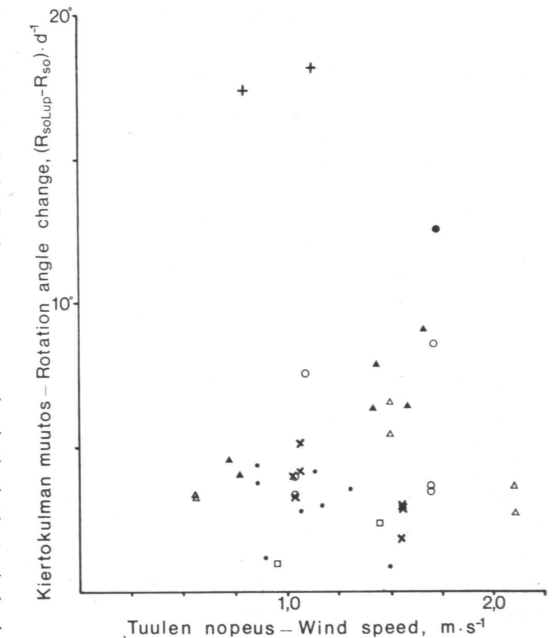
4.2. Vertailu tuulimittauksiin

BRECHTEL (1973) esittää olevan mahdollista käyttää muovikuvulla suojatun ja suojaamattoman mustan rasian tulosten erotusta ($R_{soLup} - R_{so}$) kuvaamaan ilmaan siirtyvän lämmön määrää (L). Hän ei tosin ole testannut hypoteesiaan mittauksin. Ilmaan siirtyvän lämmön määrän esitetään olevan suoraan verrannollinen tuulen nopeuteen (MUNN 1966, FEDERER 1970). Kuvassa 5 esitetään mitatun tunnuksen suhdetta jakson keskimääräiseen tuulen nopeuteen. Korrelaatiota ei esiinny. Syitä on mahdollista löytää useita. Mitattu tunnus painotuu päivään, mutta tuulen nopeus on vuorokauden keskiarvo ja lämpövirrat ovat yöllä ja päivällä erisuuntaiset. Myös muut tuulen ja säteilyn ajoittumiserot vaikuttavat jaksojen suhteisiin. Tuulen nopeuden ohella on pyörteisyydellä vaikutusta lämmön siirtymiseen.

4.3. Mittausyksikköjen rakenne

Nettosäteilymittauksessa on hyvin tärkeää tulo- ja ulossäteilyä mittaavien osien välillä oleva eristys, jotta kumpikaan ei pääse vaikuttamaan toistensa antamiin tuloksiin. Käytetyssä mittausyksikössä jää kaksipuolisena rasioiden väliin 12 mm:n ilmakerros. Eristeellä on suurin vaikutus aurinkoisella säällä. Mittausaikana sää oli vaihtelevaa, ja jaksoa 2 lukuunottamatta oli osa jaksojen päivistä aurinkoisia. Sääolot vastaavat keskimäärin luvussa 4.1. hyväksytyjä jaksoja.

Testauksen tulokset (taulukko 3) osoittavat, että tulosäteilyarvot saadaan jonkin verran suurempia kaksi- kuin yksipuolisilla mittausyksiköillä. Syynä on alaspäin olevan kuvun suojaaman rasian paljasta taustalevyä korkeampi lämpötila ja suurempi



Kuva 5. Säteilymittarilla m/Frankfurt mitatun ilmaan siirtyvää lämpöenergiaa kuvaavan tunnuksen ($L = R_{soLup} - R_{so}$) vuorokausikeskiarvojen suhde jaksojen keskimääräiseen tuulen nopeuteen. Merkkien selitykset kuten kuvassa 3.

Fig. 5. Correlation between the daily mean values of the parameter for sensible heat measured by Frankfurt radiometer ($L = R_{soLup} - R_{so}$) and mean wind speed during the measuring periods. Symbols as in Fig. 3.

Taulukko 3. Kokeessa 3 suoritettujen mittausten tuloksia rasioiden välisen eristyksen testaamiseksi.
Table 3. Results of experiment carried out to test insulation between containers.

Testattava tunnus Parameter	Mittausyksikkö Measuring unit	Mittausjakso — Measuring period			
		1	2	3	4
R _{soLup}	R _{soLup}	57,5	33,9	33,7	28,5
	R _{soLup} /R _{suLup}	60,0	35,5	35,0	32,2
	t-arvo ¹⁾ — t-value ¹⁾	2,58*	2,16	1,08	2,28
R _{suLup}	R _{suLup} , R _{woLup} /R _{suLup} ²⁾	32,8	18,4	17,5	12,0
	R _{soLup} /R _{suLup}	35,4	20,1	21,0	15,7
	t-arvo ¹⁾ — t-value ¹⁾	3,88**	6,07***	10,94***	13,21***
R _{suLup}	R _{suLup} , R _{woLup} /R _{suLup} ²⁾	32,8	18,4	17,5	12,0
	R _{so} /R _{suLup}	30,5	18,1	19,2	13,3
	t-arvo ¹⁾ — t-value ¹⁾	3,38**	1,00	6,73***	5,20***
R _{suLup}	R _{so} /R _{suLup}	30,5	18,1	19,2	13,3
	R _{soLup} /R _{suLup}	35,4	20,1	21,0	15,7
	t-arvo ¹⁾ — t-value ¹⁾	9,80***	10,00***	5,83***	10,00***
R _{so}	R _{so}	39,0	20,9	22,3	15,2
	R _{so} /R _{suLup}	40,4	21,8	22,5	15,6
	t-arvo ¹⁾ — t-value ¹⁾	1,35	1,73	0,40	0,36
S =	R _{soLup} , (R _{woLup} /R _{suLup}) ²⁾	24,7	15,5	16,2	16,5
R _{soLup} - R _{suLup}	R _{soLup} /R _{suLup}	24,6	15,4	14,0	16,5

1) Keskiarvojen eron merkitsevyytasot: 95 % (*), 99 % (**), 99,9 % (***).

2) R_{suLup} yksin mittausjaksoissa 1 ja 2 sekä R_{woLup}/R_{suLup}-mittausyksikkö jaksoissa 3 ja 4.

1) Significance levels for difference between mean values: 95 % (*), 99 % (**), 99,9 % (***).

2) R_{suLup} alone during measuring periods 1 and 2, and measuring unit R_{woLup}/R_{suLup} during periods 3 and 4.

lämpökapasiteetti. Samoin saadaan maanpinnan menettämälle säteilylle suurempi arvo kaksi- kuin yksipuolisilla mittausyksiköillä, vaikka viimeksi mainituissa on musta taustalevy. Paras tulos saadaan, kun yläpuolella on valkoinen rasia (R_{woLup}). Taustalevyt tulee siis maalata valkoisiksi. Jo kuvun käyttö kaksipuolisen mittausyksikön yläpuolisessa rasiassa aiheuttaa merkitsevän eron alapuolisen rasian tuloksiin. Nettosäteilytunnukseen (S = R_{soLup} - R_{suLup}) ei mittausyksikköjen laatu vaikuta, sillä yksi- ja kaksipuolisten välinen ero on nettosäteilyn kummassakin osatekijässä samansuuruinen.

Jos siis tarkoituksena on mitata vain nettosäteilyä, voidaan se tehdä myös kaksipuolisilla yksiköillä. Jos lisäksi halutaan saada nettosäteilyn erisuuntaisille komponenteille suuruudeltaan mahdollisimman oikeat arvot,

on käytettävä yksipuolisia mittausyksiköitä, joissa on valkoiseksi maalattu taustalevy. Tämä tulee kysymykseen esimerkiksi mitattaessa tunnus lyhytaaltoiselle kokonaissäteilylle. Yleensä voi samassa mittausarjassa käyttää vain joko yksi- tai kaksipuolisia mittausyksiköitä.

4.4. Haihdunta-astian energiatase

Tulokset esitetään vain jaksoista, joiden lopussa sokeriliuoksen kiertokulma ei laskeutunut alle 0°. Näitä on 15. Taulukossa 4 esitetään erilaisten säteilytunnusten ja niiden avulla laskettujen energiataseen osatekijöiden korrelaatiot haihdunta-astiasta mitatun haihdunnan kanssa. Kertoimet ovat aina lievästi parempia, kun ilman lämpötilan vaikutus otetaan huomioon vähentä-

mällä säähavaintokojussa sijainneiden rasioiden (R_s) tulokset. Kaikki kertoimet ovat erittäin merkitseviä 0,1 % riskillä. Maanpinnan menettämisen säteilyn korrelaatio haihdunnan kanssa on erittäin merkitsevä ja positiivinen. Nettosäteilyn korrelaatio on hyvin samanlainen kuin maanpinnalle

Taulukko 4. Säteilymittarilla m/Frankfurt mitattujen ja näistä laskettujen tunnusten vuorokausikeskiarvojen ja haihdunta-astiasta (Class A Pan) mitatun haihdunnan väliset lineaariset korrelaatiokerroimet.

Table 4. Linear correlation coefficients between the daily mean values of the parameters obtained with Frankfurt radiometer and measured pan evaporation (Class A Pan).

Tutkittu tunnus ¹⁾ Parameter ¹⁾	Korrelaatiokerroin ²⁾ Correlation coefficient ²⁾
R _{soLup}	0,953
R _{soLup} - R _s	0,962
R _{woLup}	0,769
R _{woLup} - R _s	0,938
R _{soLup} - R _{woLup}	0,959
R _{so}	0,870
R _{so} - R _s	0,926
R _{suLup}	0,847
R _{suLup} - R _s	0,953
S = R _{soLup} - R _{suLup} ³⁾	0,955
L = R _{soLup} - R _{so} ³⁾	0,939
E = S - L	0,866
V _E ³⁾	0,724

1) Katso taulukon 1 alaviite.

2) Kaikki kertoimet merkitseviä 99,9 %:n todennäköisyydellä ja kertoimien välinen keskimääräinen merkitsevä ero on noin 0,180.

3) S - nettosäteilyenergia

L - ilmaan siirtyvä lämpöenergia

E - haihduntaan kuluva energia

V_E - E:n avulla laskettu haihdunta

1) See footnote in Table 1.

2) All coefficients significant at 99,9 % level and mean significant difference between coefficients is 0,180.

3) S - net radiation

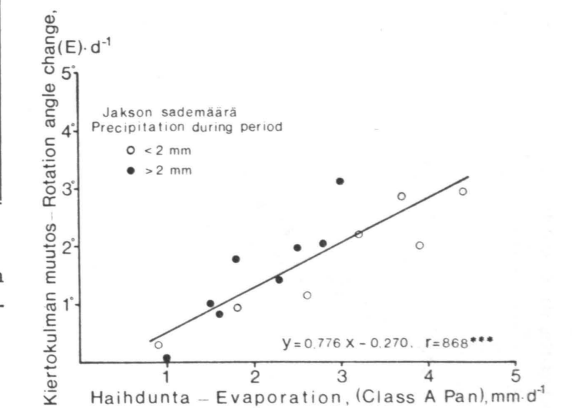
L - sensible heat

E - latent heat

V_E - evaporation, calculated through E

tulevan säteilyn kaikkia aallonpituuksia kuvaavan tunnuksen (R_{soLup}). Teoriassa nettosäteilyn korrelaation pitäisi olla parempi, koska se osoittaa maanpinnan hyväksi lopulta jäävää energiaa. Samalla paikalla ilmenevät tulosäteilyerot näkyvät myös suoraan nettosäteilyssä. Inverttisokerimenetelmä korostaa tulevan säteilyn osuutta, koska sitä mittaavien rasioiden lämpötilanvaihtelut ovat suurempia kuin alaspäin suunnattujen. Nettosäteilyarvoihin vaikuttavat myös kahden tunnuksen mittausvirheet, jotka saattavat olla joko toisiaan lisääviä tai vähentäviä.

Kuvassa 6 esitetään energiataseen haihduntaan kuluva osa E kiertokulmanmuutoksena mitatun haihdunnan suhteen. E saadaan laskemalla kaavasta E = S - L = (R_{soLup} - R_{suLup}) - (R_{soLup} - R_{so}) = R_{so} - R_{suLup}. Laskennassa ei siis tarvita R_{soLup}-arvoja. Rasioiden kiertokulma-arvoissa esiintyvä hajonta siirtyy sellaisenaan E-arvoihin, aiheuttaen niihin suuren suhteellisen hajonnan. Korrelaatio on kuitenkin erittäin merkitsevä ja osoittaa E-arvon kuvaavan haihduntaa. E-arvot ovat suuruudeltaan lähellä haihduntamillimetriarvoja (V = 0,971 × E + 0,871; r = 0,866).

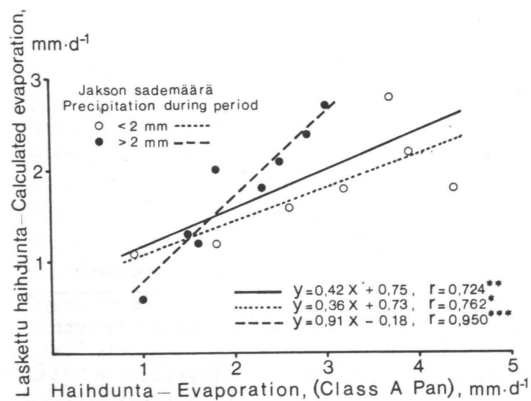


Kuva 6. Säteilymittarilla m/Frankfurt mitatuista arvoista energiatasekaavalla lasketun haihduntaan kuluva energia kuvaavan tunnuksen ja haihdunta-astiasta mitatun haihdunnan suhde vuorokausikeskiarvoina.

Fig. 6. Correlation between the parameter for latent heat calculated by energy balance from the values obtained by Frankfurt radiometer and measured pan evaporation (daily mean values).

Hyvä korrelaatio säteilymittarilla m/ Frankfurt mitatun lyhytaaltoisen kokonaissäteilyn tunnuksen ja bellaanilla mitatun kokonaissäteilyn välillä (ks. kuva 4) osoittaa, että kiertokulmanmuutokset voidaan muuttaa energiayksiköiksi. Näin voidaan laskea E:lle arvot myös jouleissa ja muuttaa nämä haihduntamillimetreiksi, koska yhden vesimillimetrin haihtumiseen kuluu $2,47 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-2}$. Laskettuja haihdunta-arvoja voidaan sitten verrata mitattuihin. Epävarmuutta aiheuttaa se, että erityisesti aurinkoisina päivinä R_{soLup} -rasioiden lämpötilat ovat korkeampia kuin R_{so} -rasioiden. Tällöin sama energiamäärä aiheuttaa eri rasioissa erisuuruisten kiertokulmanmuutoksen ja joule/aste -arvo tulee lyhytaaltoisen kokonaissäteilyn avulla pienempi kuin sen pitäisi olla E-arvoissa. E saa siis liian pienen energia-arvon ja laskettu haihdunta jää todellista pienemmäksi. Tämä näkyikin selvästi kuvasta 7, jossa verrataan laskettua haihduntaa mitattuun. Ero laskettujen ja mitattujen arvojen välillä kasvaa siirryttäessä aurinkoisiin ja lämpimiin jaksoihin.

Kaikkien tunnusten korrelaatio haihdunnan kanssa on luonnollista, sillä kaikki säteilytunnukset korreloivat voimakkaasti keskenään. Keskinäisten korrelaatioiden vuoksi ei voidakaan varmasti sanoa parasta mitattavaa säteilytunnusta. Kun on kysy-



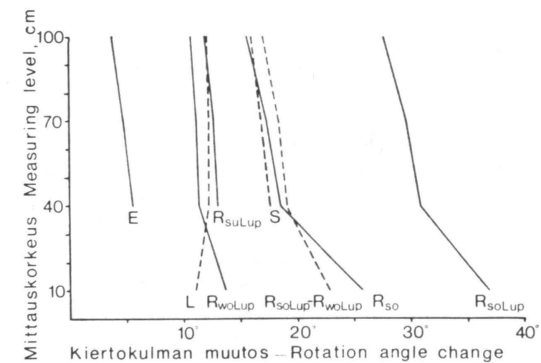
Kuva 7. Haihduntaan kuluva energiaa kuvaavasta tunnuksesta lasketun haihdunnan suhde haihdunta-astiasta mitattuun haihduntaan vuorokausikeskiarvoina.

Fig. 7. Correlation between the evaporation calculated from the parameter for latent heat and measured pan evaporation (daily mean values).

mys astian vesipinnasta tapahtuvasta haihdunnasta, lienee nyt mitatuista tulevan säteilyn kaikkia aallonpituuksia kuvaava tunnus yleensä riittävä ($V = 0,187 \times R_{\text{soLup}} + 0,488; r = 0,953$).

4.5. Lylyn lysimetrin energiatase

Mittausyksiköiden sijoituskorkeus vaikuttaa niiden antamiin tuloksiin (kuva 8). R_{soLup} - ja R_{so} -rasioiden kiertokulmanmuutokset suurenevät yhtä paljon siirryttäessä alaspäin. Niiden erotus (L) pysyy näin ollen lähes vakiona 10 cm:n korkeudelle asti. Monesti oletetaankin turbulentsin lämpövirran ilmassa olevan vakio korkeuden suhteen ja lämmön siirtymisnopeuden pienenevän selvästi vasta maanpinnan läheisessä diffuusio- eli lämmön fysikaalisen johtumisen kerroksessa (vrt. MUNN 1966). Kiertokulmanmuutosten suureneminen johtuu pääasiassa ilman lämpötilan vaihteluamplitudin ja maksimilämpötilan noususta siirryttäessä lähemmäksi maanpintaa. Lasketuista tunnuksista nettosäteily seuraa mitattujen tunnusten kulkua 40 cm:n korkeudelle. Siirryttäessä metrissä alas 40 cm:in ei absoluuttinen muutos ole millään tunnuksella suuri, mutta suhteellinen muutos on E-arvoissa. Ne ovat 40 cm:n korkeudella keskimäärin 50 % ja niiden avulla lasketut haihdunnat 35 % suurempia kuin metrin korkeudella.

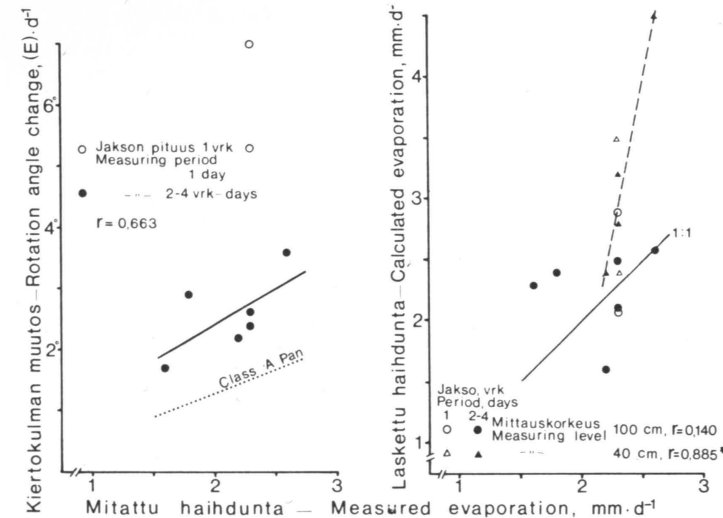


Kuva 8. Säteilymittarin m/Frankfurt mittausyksiköiden korkeuden vaikutus mitattujen ja niistä laskettujen tunnusten arvoihin.

Fig. 8. Effect of height of the Frankfurt radiometer measuring units on the measured values and on parameters calculated from these values.

Lisäksi vertaillaan eri säteily- ja energia-tasetunnuksia lysimetristä mitattuun haihduntaan. Tulokset ovat yleensä samanlaisia kuin haihdunta-astiastakin, eli kaikki tunukset korreloivat hyvin haihdunnan kanssa. Kuvassa 9 esitetään E-arvon ja haihdunnan välinen korrelaatio. Korrelaation heikkoutteen on syynä aineiston pienuus, vaihtelualueen kapeus ja mahdollinen virheiden

kasaantuminen. E:n avulla lasketussa haihdunnassa (kuva 9) on 100 cm:n korkeudella niin runsas hajonta, että korrelaatiota mitatun haihdunnan kanssa ei esiinny. Lasketut haihdunta-arvot ovat suuruudeltaan kuitenkin lähellä mitattuja. Niiden keskiarvo on 2,31 mm ja mitattujen haihduntojen 2,18. Laskettu haihdunta on vuorokauden pituisillakin jaksoilla muita vastaava, koska



Kuva 9. Säteilymittarilla m/Frankfurt mitatuista arvoista energiatasekaavalla lasketun haihduntaan kuluva energiaa kuvaavan tunnuksen ja siitä lasketun haihdunnan suhteet lysimetristä mitattuun haihduntaan.

Fig. 9. Correlation between the parameter for latent heat calculated by energy balance from the values obtained by Frankfurt radiometer as well as between the evaporation calculated from this parameter and the measured evaporation from lysimeter (daily mean values).

Taulukko 5. Säteilymittarilla m/Frankfurt mitattujen ja näistä lasketujen haihduntaa kuvaavien tunnusten vuorokausikeskiarvojen vertailu Lylyn koekentän koelajojen kesken (neva = N, muuttuma = Mu).

Table 5. Values of parameters measured with Frankfurt radiometer at two different plots on the Lyly experimental field and parameters calculated from these values (N = open bog, Mu = forested drainage area of an open bog).

Mittausjakso Measuring period	Laskettu haihdunta Calculated evaporation mm		Kiertokulman muutos, astetta Change in rotation angle, degrees								Merkitsevät erot koelajojen välillä Significant differences between sample plots			
			E ²⁾		R _{suLup} ¹⁾		S ²⁾		L ²⁾		E ²⁾	R _{suLup}	S ²⁾	L ²⁾
			N	Mu	N	Mu	N	Mu	N	Mu				
8	0,1	1,2	0,0	1,1	5,4	5,0	3,8	4,3	3,7	3,2	+	+	+	-
9	1,0	1,9	0,8	1,5	5,2	5,0	3,9	4,0	3,0	2,5	+	-	-	+
10	1,4	3,4	1,9	3,9	6,6	6,0	8,5	8,3	6,6	4,4	+	+	-	+
11	1,0	2,7	0,7	1,4	4,1	3,6	4,0	3,5	3,3	2,1	+	+	-	+
12	0,6	1,8	0,4	1,0	3,5	2,9	3,2	3,3	2,8	2,3	+	+	-	-

1) Katso taulukon 1 alaviite. — See footnote in Table 1.

2) Katso taulukon 4 alaviite 3. — See footnote 3 in Table 4.

korkeiden kiertokulma-arvojen vuoksi yhtä astetta vastaava energiamäärä jää pieneksi. Muilta mittauskorkeuksilta lasketut keskiarvot ovat: 70 cm—2,68 mm ja 40 cm—3,13 mm. Ne eivät poikkea merkitsevästi metrin korkeudelta lasketuista.

4.6. Erilaisten kasvustojen vertailu

Lylyn koealueella verrattiin luonnontilaisen varsinaisen saranevan (neva) ja noin 40 vuotta sitten ojitetun varsinaisen saraneva-muuttuman (muuttuma) haihduntoja sä-

Taulukko 6. Säteilymittarilla m/Frankfurt mitattujen tunnusten avulla laskettu haihduntaan kulu-
neen energian kiertokulma-arvo Yliopiston metsäasemalla eri mittauspaikoilla mittausjaksottain.

Table 6. Rotation angle value of latent heat calculated from the parameters measured by the Frankfurt radiometer at measuring points at the University Forest Station.

Jakso n:o Measuring period	E ¹⁾ , aste. d ⁻¹ — degree.d ⁻¹			Merkitsevät erot mittaus- paikkojen välillä Significant differences between measuring points
	Class A Pan 1	Niitty Meadow 2	11-v. mänty- taimisto 11-year old Scots pine stand 3	
8	2,0	0,8	1,5	2/3
9	1,2	0,8	0,7	1/3
10	3,1	2,0	1,9	—
11	6,1	2,9	3,8	1/2
12	3,0	0,9	1,8	1/2
13	1,8	1,2	1,1	—
14	3,4	1,5	2,3	1/2, 1/3, 2/3
16	7,1	3,1	5,0	1/2, 1/3, 2/3
17	8,4	3,4	5,8	1/2, 1/3, 2/3
18	7,0	2,6	4,6	1/2, 1/3, 2/3
19	2,9	1,1	1,4	1/2, 1/3
20	1,4	1,0	0,9	1/2, 1/3
21	2,0	1,4	1,5	1/2, 1/3
22	4,0	2,2	3,0	1/2
23	5,5	4,2	4,0	1/2
24	5,0	2,2	2,6	1/2
25	2,0	1,1	1,5	1/2, 1/3, 2/3
26	6,7	3,6	5,4	1/2, 2/3
27	2,1	2,0	1,9	—
28	2,2	1,7	1,6	—
29	1,0	0,3 ²⁾	0,7	1/2
30	0,8	0,4	0,5	1/2
31	0,9 ²⁾	0,0 ²⁾	0,7	2/3
32	0,3	-0,0 ²⁾	0,4	1/2, 2/3
33	0,1 ²⁾	-0,1 ²⁾	-0,0 ²⁾	—

1) Katso taulukon 4 alaviite 3.

2) Arvo ei poikkea merkitsevästi nolasta.

1) See footnote 3 in Table 4.

2) Value does not differ significantly from zero.

teilymittarin m/Frankfurt avulla. Kesällä 1974 saatiin viisi vertailukelpoista jaksoa. Tulokset esitetään taulukossa 5. Yhtä poikkeusta lukuunottamatta on muuttuman laskettu haihdunta suurempi kuin nevan. Haihduntaan kuluneen energian kiertokulma-arvojen (E) suhteen tulos on sama. Nevalla maanpinta menettää yleensä eniten säteilyä. Tämä ero johtuu ainakin osaksi pinnalle tulleen säteilymäärän eroista, eikä yksin pinnan ominaisuuksista. Tulevan säteilyn osalta ero keskittyy lyhytaaltoiseen osaan eli kysymys on todennäköisesti ympäristön varjostus- ja heijastusvaikutuksista. Nettosäteily ottaa huomioon erot tulevan säteilyn määrissä. Nettosäteilyn osalta ei kasvustojen välillä yleensä ole eroja. Vain yhden jakson aikana on nettosäteilyenergia suurempi muuttumalla kuin nevilla. L-arvo on nevilla kaikissa jaksossa suurin, vaikkei aina merkitsevästi. Koska nettosäteilyssä ei ole eroja, on luonnollista, että E ja samalla sen avulla laskettu haihdunta

jäävät nevilla pienemmiksi kuin muuttumalla. Toisaalta nevan ja muuttuman L-arvot eivät liene kovinkaan vertailukelpoisia, koska puuston päältä on vaikea sanoa tasoa, joka vastaisi kaikissa oloissa tiettyä tasoa aukealla alueella. Mittausten tuloksista ei voida varmuudella päätellä haihduntaeroja muuttuman ja nevan välillä.

Yliopiston metsäasemalla oli haihduntaastian päällä tapahtuvan mittauksen lisäksi mittausyksiköitä myös niityn ja 11-vuotiaan tiheen mäntytaimiston energiataseen määrittämiseksi ja haihduntaerojen tutkimiseksi (taulukko 6). Vesipinnan E-arvo on aina vähintään yhtä suuri kuin niityn tai mäntytaimiston. Runsassateisina jaksoina ovat niityn ja mäntytaimiston E-arvot lähinnä vesipinnan arvoa. Mäntytaimiston E-arvo poikkeaa sitä enemmän niityn arvosta, mitä suurempi on jakson keskimääräinen vuorokautinen kokonais säteily.

Maanpinnan menettämän säteilyn todetaan olevan aina pienin vedestä ja suurin

Taulukko 7. Säteilymittarilla m/Frankfurt mitattujen ja niistä laskettujen tunnusten arvot Otaniemessä kokeen eri mittauspaikoilla.

Table 7. Values of parameters measured with Frankfurt radiometer at different points in the Otaniemi area and parameters calculated from these values.

Jakso n:o Meas- uring period	E ¹⁾			Korjattu E ²⁾ Corrected E ²⁾			R _{suLup} ³⁾			Merkitsevät erot mittaus- paikkojen välillä Significant differences between measuring points	
	aste . d ⁻¹ degree . d ⁻¹									E	R _{suLup}
	Turve Peat 1	Savi Clay 2	Ruoho Grass 3	Turve Peat 1	Savi Clay 2	Ruoho Grass 3	Turve Peat 1	Savi Clay 2	Ruoho Grass 3		
1	0,1 ⁴⁾	-0,6	-0,1 ⁴⁾	0,6	0,1	0,5	4,3	5,1	4,8	1/2	1/2, 1/3
2	0,4 ⁴⁾	-1,2	-0,2 ⁴⁾	2,3	0,9	1,9	15,5	17,4	16,8	1/2, 2/3	1/2, 1/3, 2/3
3	2,3	-0,9	0,6 ⁴⁾	5,9	2,7	4,0	26,7	30,6	28,8	1/2, 1/3, 2/3	1/2, 1/3, 2/3

1) Katso taulukon 4 alaviite 3.

2) Korjattu E on laskettu ottamalla huomioon kaksipuolisten mittausyksiköiden käyttö R_{suLup}-tunnusta mitattaessa.

3) Katso taulukon 1 alaviite.

4) Arvo ei poikkea merkitsevästi nolasta.

1) See footnote 3 in Table 4.

2) The corrected value for E has been calculated by taking into account the error given by two-faced measuring units in measuring the parameter R_{suLup}.

3) See footnote in Table 1.

4) Value does not differ significantly from zero.

niityltä. Niityn ja vesipinnan välinen ero kasvaa kokonaissäteilyn lisääntyessä. Koska mäntytaimiston osalta tällaista ei esiinny, kasvaa niityn ja sen ero säteilyn lisääntyessä, kuten E-arvoistakin todettiin.

Maanpinnalle tulevassa säteilyssä oli myös eroja kasvustojen kesken, mikä haittaa pinnan menettämisen säteilyn erojen tarkastelua. Erojen vaikutus poistuu käytettäessä nettosäteilytunnusta. Sen osalta tulokset ovat samanlaisia kuin E-arvojen ja maanpinnan menettämisen säteilyn suhteen. Tulokset siis osoittavat haihdunta-astian vesipinnasta haihtuvan vettä eniten ja 11-vuotiaasta mäntytaimistosta yleensä enemmän kuin niityltä.

Otaniemen lysimetrien energiatasemittausten tuloksia esitetään taulukossa 7. Nurmikko- ja savilysimetriä E-arvoissa esiintyy myös negatiivisia arvoja. Syy näihin voi olla mittausyksiköiden rakenteessa. Kuvulla suojatut rasiat olivat kaksipuoli-

5. TULOSTEN TARKASTELU

5.1. Säteilymittarin ja mittausmenetelmän luotettavuus

Säteilymittarin m/Frankfurt luotettavuutta heikentävät useat virhelähteet. Osa niistä liittyy säteilystä syntyvän lämmön rekisteröijänä toimivaan sokeriliuokseen, osa käytetyn mittarin rakenteeseen ja mittausmenetelmän suorituksen. Sokeriliuokseen ja sen inversioon liittyvistä virheistä ei kaikilla (ks. SCHMITZ ja VOLKERT 1959, LÜTZKE 1963) ole merkitystä, kun vertaillaan kiertokulma-arvoja keskenään tai käytetään vertailumittareita mittausten yhteydessä.

Suomessa säätila vaihtelee nopeasti, joten pitkät mittausjaksot eivät ole hyviä. Jakson aikaiset säätilan vaihtelut aiheuttavat ylimääräistä hajontaa tuloksiin esiintymisajankohdastaan riippuen. Nyt käytetyt 2–4(–6) päivän pituiset mittausjaksot tuntuvat sopivilta. Tällöin on paras sokeriliuoksen pH 1,8–1,9 tienoilla. Keskipäivällä pH voisi olla vähän korkeampi ja keväällä ja syksyllä vähän matalampi, mutta koska tulosten vertailukelpoisuus vaatii jatkuvasti saman liuoksen käyttöä, on tyydyttävä kompromissiin. Siksi nytkin osa keskikesän

sisä ja suojaamattomat yksipuolisissa mittausyksiköissä. E-arvoa laskettaessa ($E = R_{so} - R_{suLup}$) tulee R_{suLup} -arvo suhteellisesti liian suureksi. Jos aiemmin taulukossa 3 esitetyistä tuloksista arvioidaan tarvittava korjaus, nousevat kaikki E-arvot nollan yläpuolelle. Kahden nurmikkolysimetrien arvot ovat hyvin samansuuruiset ja niistä esitetään vain keskiarvo. Turvelysimetristä lasketut E-arvot eivät poikkea paljon nurmikon arvoista, mutta savilysimetristä ne ovat selvästi pienimmät. Maanpinnan menettämisen säteilyn arvot ovat suurimmat savilysimetristä, pienimmät turvelysimetristä ja nurmikkopintaisista siltä väliltä. Tulokset osoittavat, että haihdunta on pienintä savi- ja suurinta turvelysimetristä. Haihduntaerot ovat suurimmat viimeisessä jaksossa, jolloin haihduntaedellytykset olivat parhaat eli lämpötila korkein, kyllästysvajaus suurin ja sademäärä pienin.

jaksoista on hylättävä liian suurten ja osa kevään ja syksyn jaksoista liian pienten kiertokulmanmuutosten vuoksi. Itse pH-arvon mittaamisessa ja säätämisen tapauksissa virheillä ei ole muuta merkitystä kuin vaikutus jaksonpituuteen, jos käytetään koko ajan samaa liuosta (vrt. SCHMITZ ja VOLKERT 1959).

Säteilymittauksessa haittaavat eniten säteilylle alttiiden mustien pintojen korkeat maksimilämpötilat ja suuret lämpötilanvaihtelut, jolloin jo normaalissa ilman lämpötilanmittauksessa esiintyvät vaikeudet (ks. LÜTZKE 1963) vielä korostuvat. Lisäksi lämpötilanvaihtelut ovat mustissa rasioissa paljon suuremmat kuin valkoisissa ja toisaalta ylöspäin olevissa suuremmat kuin alaspäin olevissa. Ne rasiat, joissa lämpötilanvaihtelu on suuri, antavat suhteellisesti suurempia arvoja kuin ne, joissa se on pieni. Rasioiden oma emissiosäteily tosin tasoittaa jonkin verran eroja (BRECHTEL 1968).

Mitatun säteilyn aallonpituusalueesta on huomattava, että olettamus säteilyn 100 %:sta imeytymisestä mustaan rasiaan ja lyhytaaltoisen säteilyn 100 %:sta heijastu-

misesta valkoisesta rasiasta ei pidä täysin paikkaansa. On nimittäin hyvin vaikeaa saada aikaan absoluuttisesti musta tai täysin heijastava valkoinen pinta (BRECHTEL 1968). Säteilymittarilla m/Frankfurt ja bellaanisäteilymittarilla mitattujen kokonaissäteilyjen aallonpituusalueiden vastavuutua ei siis tiedetä tarkasti.

Mittausyksikön rakenne vaikuttaa mitaustuloksiin. BRECHTEL (1968) käytti yksittäisiä rasioita lautaan kiinnitettyinä eikä tutkinut yläpuolisten ja alapuolisten vaikutusta toisiinsa. Nyt käytettiin myöhemmin kehitettyä mallia (BRECHTEL 1973), josta voidaan koota mittausyksiköitä usealla eri tavalla. Jos mitataan samalla yksiköllä tulo- ja ulossäteilyä, on riittävä eristys eri tunnuksia mittaavien osien välillä tärkeä. Säteilymittarin m/Frankfurt kaksipuolisessa mittausyksikössä rasioiden väliin jäävä 12 mm:n ilmakerros osoittautui riittämättömäksi eristeeksi. Suositeltavaa onkin käyttää vain yksipuolisia mittausyksiköitä valkoisella taustalevyllä varustettuina.

Mittausyksikön sijoituskorkeudella on vaikutusta tuloksiin. Mittaukset on parasta tehdä korkeudelta, jossa korkeuserojen vaikutus on mahdollisimman pieni. Noin metrin korkeus osoittautui hyväksi (vrt. BRECHTEL 1968). Tätä korkeutta suositellaan yleensä säteilytasemittauksiin (MUNN 1966). Yliopiston metsäasemalla mittausyksiköt olivat haihdunta-astian yläpuolella vain 30 cm:n korkeudella vesipinnasta. Lylyssä mittariden etäisyys puuston latvustasosta ei myöskään vastannut tavoiteltua metrin suositusta. Puusto aiheuttaa tuulen suhteen niinsanotun nollatason siirtymän, ja lisäksi on otettava huomioon metsän pinnan karkeus (esim. BAUMGARTNER 1967, BRINGFELT 1975). Näiden avulla voidaan laskea aukeaa vastaava perustaso. Lylyssä perustasoksi voidaan arvioida noin 390 cm. Mittausyksiköt olivat keskimäärin 420 cm:n korkeudella eli siis liian alhaalla neville oleviin verrattuna, mikä johtaa liian suuriin mittausarvoihin. Metsäasemalla 11-vuotias mäntytaimisto oli alueeltaan pieni eikä siihen voi soveltaa yleisiä laskuperusteita. Mittariden korkeus lienee vertailukelpoinen haihdunta-astian, muttei niityn kanssa.

Toinen mittausyksiköiden sijaintiin liittyvä tekijä on niitä kannattavien vajajien painuminen, mikä saattaa eri yksiköt eri-

laiseen kulmaan auringonsäteilyyn nähden. Suurimmassa osassa mittauksia variaatiokertoimen arvo on kuitenkin alle 5 %. Hajonnat ovat siis suhteellisen pieniä, ja keskiarvot luotettavia. Suurimmat variaatiokertoimet esiintyvät yleensä syksyisin, kun kiertokulmanmuutokset jäävät pieniksi.

Tulokset osoittavat, että säteilymittarilla m/Frankfurt saadaan määritetyksi säteilyluotettavasti 2–6 vuorokauden pituisilla jaksoilla keskimääräiseen vuorokautiseen kokonaissäteilymäärään 20 MJ·m⁻² asti. Tämän rajan alapuolella riippuvuus on suoraviivainen ja hajonta pientä, edellyttäen että menetelmän luotettavuuteen vaikuttavat tekijät otetaan huomioon.

5.2. Säteilymittarin soveltuvuus energiatasemittauksiin

Energiatasetta tarkastellaan tässä haihdunnan määrittämisen kannalta. Haihduntaan vaikuttavat hyvin monet tekijät, mutta käytännössä kannattaa pyrkiä suhteellisen yksinkertaisiin riippuvuuksiin (esim. KING 1961). Inverttisokerimenetelmää sovellettaessa BRECHTEL (1973) esittää käytettäväksi energiataseen yksinkertaisinta muotoa, jossa haihduntaan kuluva energia katsotaan nettosäteilyenergian ja ilmaan siirtyvän lämpöenergian erotukseksi. Molemmat mitataan säteilymittarilla m/Frankfurt BRECHTELIN (1973) ehdottamalla tavalla. Useampiakaan tekijöitä mukaan otettaessa ei päästä tilastollisesti kovin luotettaviin tuloksiin (esim. DZERDZEEVSKII 1962, BELOTSERKOVSKAYA 1972, BLACK ja McNAUGHTON 1972).

Nettosäteily oli Yliopiston metsäasemalla keskimäärin 87 % ja Lylyssä 98 % kokonais- eli globaalisäteilystä. FRANSSILAN (1930) mittauksissa nettosäteily oli 68–83 % kokonaissäteilystä. Nettosäteily tulee siis yliarvioduksi lyhytaaltoiseen kokonaissäteilyyn verrattuna. Bellaania vertailumittarina käytettäessä tulee siis nettosäteilyn energia-arvoihin virhettä, joka voidaan välttää käyttämällä vertailuna nettosäteilymittaria. Samalla poistuu valkoisten rasioiden käyttötarve ja työmäärä vähenee, jos tarkoitukseen on vain nettosäteilyn mittaaminen.

Ilmaan siirtyvän lämpöenergian mittausmenetelmä kuvasi tässä tutkimuksessa, pal-

jonko ilmaan voi siirtyä lämpöä mittausyksikön lämpötilan omaavasta kappaleesta. Haihduttavan pinnan lämpötila ei nouse aurinkoisella säällä näin korkeaksi. Saatu L-arvo ei siis vastaa todellista haihduntaastian vesipinnasta tai kasvipeitteestä ilmaan siirtyvää lämpö määrää kuin korkeintaan pääosin pilvisillä jaksoilla. Tulokset osoittavat, että L:n vähentäminen S:stä ei paranna korrelaatiota haihdunnan kanssa, sillä E:n korrelaatio on heikompi kuin S:n. Saadut L-arvot ovat myös liian suuria suhteessa S:n arvoihin, jolloin E-arvot jäävät liian pieniksi erityisesti aurinkoisella säällä. Jakson säätilan samansuuntainen vaikutus vahvistuu vielä laskettaessa haihduntaa E:n avulla (ks. sivu 170).

Haihdunta-astiasta tapahtuvan haihdunnan arvioimiseen soveltuu tulosten mukaan jo yksin tulevan säteilyn määrä (vrt. esim. PENMAN 1963). Se selittää noin 90 % haihdunnan vaihtelusta. Tulevan säteilyn tunnus ei kuitenkaan sovellu eri kasvustojen vertailuun. Albedo ja emissio vaikuttavat kasvustojen menettämän säteilyn määrään, jonka avulla vertailu voidaan tehdä, jos tulevan säteilyn määrät eivät eroa toisistaan. Albedoa pidetään tärkeimpänä kasvustojen välisiä eroja aiheuttavana tekijänä (esim. STANHILL ym. 1966, RUTTER 1972). Kun eroja on myös tulevan säteilyn määrässä, vertailu on tehtävä nettosäteilyn avulla. Tässä työssä mitatun L-arvon ei voi katsoa pystyvän ottamaan huomioon kasvustojen välisiä eroja. Siksi E-arvon laskemisella on merkitystä vain, jos halutaan saada selville haihdunnan suuruusluokka millimetreinä. Laskettuun haihduntaan jää kuitenkin epävarmuustekijäksi L:n vaikutus, ja kasvustojen vertailu voi johtaa vääriin päätelmiin. Tämän lisäksi yksinkertaistetussa energiataseessa huomiotta jäävät tekijät voivat aiheuttaa virhemahdollisuuksia.

Haihduntaan kuluvan energian tarkastelu osoittaa avosuon (varsinainen saraneva) haihdunnan olevan lähes aina selvästi pienempi kuin saman suotyypin muuttumavaiheen männikön. Tulos on päinvastainen MUSTOSEN ja SEUNAN (1972) esittämiin verrattuna. Edellä todettiin E-arvon tarkastelun voivan johtaa vääriin päätelmiin. Myös mittausyksiköiden korkeusase-

maerojen todettiin johtavan liian suuriin arvoihin muuttumakoealalla. Usein todettua metsän niittyä pienemmän albedon aikaansaamaa nettosäteilyeroa ei esiintynyt muuttuman ja nevan välillä (esim. PENMAN 1963, LÜTZKE 1966, STANHILL ym. 1966, BAUMGARTNER 1967, RUTTER 1972). Tämä viittaa ojitetun saranevan muuttumavaiheen männikön haihdunnan yhtäsuuruuteen luonnontilaisen saranevan kanssa. Aukean ja metsän kokonaisuuhduntojen ero riippuu paljon sateiden esiintymisestä, koska metsässä latvustoon pidättyneen veden haihdunnalla on suuri merkitys (vrt. MOLCHANOV 1963, RUTTER 1968, STEWART ja OLIVER 1972).

Niityn ja nuoren mäntytaimiston haihduntaeroja tutkittaessa E-arvo ja maanpinnan menettämä sekä nettosäteily viittaavat männikön suurempaan haihduntaan niittyyn verrattuna. Männikön haihdunta jää taas useimmiten selvästi alle haihdunta-astiasta tapahtuneen. Tulokset pitävät yhtä aiempien kivennäismailla tehtyjen havaintojen kanssa (vrt. RAUNER 1966, BAUMGARTNER 1967, RUTTER 1968). Toisessa kokeessa samat tunnuksat osoittavat yhtäpitävästi paljaan turvepinnan haihduttavan eniten, paljaan savipinnan vähiten ja hietamaalla kasvavan nurmikon siltä väliltä. Maan lämmittämiseen kuluvan energian huomioon ottaminen ei todennäköisesti muuttaisi tilannetta. Tavallisesti esitetään nurmikon haihduttavan enemmän kuin paljas maa (esim. LÜTZKE 1966). PENMANIN (1963) mukaan turpeesta haihtuu eniten, hiekasta vähemmän ja savesta vähiten ja erot ovat suurimmat juuri keväällä.

Inverttisokerimenetelmällä saadaan siis esille eroja erilaisten kasvustojen välillä. Aina kun eroja ilmenee energiataseesta lasketun haihduntaan kuluneen energian määrässä, erot ilmenevät myös nettosäteilyarvoissa ja maanpinnan menettämän säteilyn määrässä. Ensin mainittuun liittyy useita epävarmuustekijöitä. Säteilymittarilla m/Frankfurt ei täten kannata mitata energiatasetta kokonaisuudessaan, vaan sen käyttö rajoittuu säteilyolosuhteiden kuvaukseen ja esimerkiksi nettosäteilyn tai maanpinnan menettämän säteilyn avulla tehtäviin päätelmiin haihduntaeroista.

8. KIRJALLISUUSLUETTELO

- BAUMGARTNER, A. 1965. The heat, water, and carbon dioxide budget of plant cover: methods and measurements. *Methodology of Plant Eco-physiology: Proc. Montpellier Symp.*, UNESCO, Paris, 495–512.
- » — 1967. Energetic bases for differential vaporization from forest and agricultural lands. In *Forest Hydrology* (Sopper, W. E. & Lull, H. W., Ed.), 381–389.
- BELOTSERKOVSKAYA, O. A. 1972. On the moisture and thermal balance for forests of the Byelorussian polessie. UNESCO, Int. Symp. Hydrol. marshriden areas, 17–24 July, 1972, Minsk, Byelorussian SSR. 15 s.
- BLACK, T. A. & MCNAUGHTON, K. G. 1972. Average Bowen-ratio methods of calculating evapotranspiration applied to a Douglas fir forest. *Boundary-Layer Meteorol.* 2, 466–475.
- BRECHTEL, H. M. 1968. Strahlungsmessungen auf reaktionskinetischer Grundlage und Anwendungsmöglichkeiten für hydrologische Zwecke. *Deut. Gewässerkundliche Mitt.* 12, 142–147.
- » — 1973. Chemický totalizátor globálneho žiarenia. Summary: Chemical totalizer of radiation. *Problémy modernej bioklimatológie, Vydavateľstvo Slovenskej Akadémie Vied, Bratislava* 1973, 383–396.
- BRINGFELT, B. 1975. Mikrometeorologiska metoder att bestämma avdunstning. *Vannet i Norden* 3, 12–28.
- DIRMHORN, I. 1964. Das Strahlungsfeld im Lebensraum. *Akademische Verlagsgesellschaft, Frankfurt am Main.* 426 s.
- DROPPA, J. G. & HAMILTON, H. L. Jr. 1973. Experimental variability in the determination of the energy balance in a deciduous forest. *J. Appl. Meteorol.* 12, 781–791.
- DZERDZEEVSKIL, B. L. 1962. Study of the heat balance of the forest. *Silva Fenn.* 113, 17 s.
- FEDERER, C. A. 1970. Measuring forest evapotranspiration — theory and problems. *USDA For. Serv. Res. Pap. NE-165.* 25 s.
- FRANSSILA, M. 1930. Mikroklimatische Untersuchungen des Wärmehaushalts. *Ilmatiet. Keskuslait. Toim.* 20, 103 s.
- KING, K. M. 1961. Evaporation from land surfaces. *Proc. Hydrol. Symp. No. 2, Evaporation, Toronto, 1 & 2 March,* 55–82.
- LÜTZKE, R. 1963. Über die Problematik von Temperaturmessungen mit der eT-Methode bei lokalklimatologischen und standortskundlichen Untersuchungen. *Arch. Forstw.* 12, 1053–1065.
- » — 1966. Vergleichende Energieumsatzmesungen im Walde und auf einer Wiese. *Arch. Forstw.* 15, 995–1015.
- MOLCHANOV, A. A. 1963. Hydrological role of forests. *Israel Program for scientific translations, Jerusalem,* 407 s.
- MUNN, R. E. 1966. *Descriptive micrometeorology.* Academic Press, New York—London, 245 s.
- MUSTONEN, S. & SEUNA, P. 1972. Influence of forest draining on the hydrology of an open bog in Finland. UNESCO, Int. Symp. Hydrol. Marsh-riden areas, 17–24 July, 1972, Minsk, Byelorussian SSR. 12 s.
- PALLMANN, H., EICHENBERGER, E. & HASLER, A. 1940. Eine neue Methode der Temperaturmessung bei ökologischen oder bodenkundlichen Untersuchungen. *Ber. Schw. Bot. Ges.* 50, 337–362.
- PENMAN, H. L. 1963. *Vegetation and hydrology.* Commonw. Bur. of Soils, Techn. Commun. No. 53, 124 s.
- RAUNER, YU. L. 1966. Methodik und einige Ergebnisse der experimentellen Erforschung des Wärmehaushaltes der Waldbestände. *Angew. Meteorol.* 5, 157–165.
- REIFSNYDER, W. E. 1967. Forest meteorology: the forest energy balance. *Intern. Rev. For. Res.* 2, 127–179.
- RUTTER, A. J. 1968. Water consumption by forests. In *Water deficits and plant growth, Vol. II, Plant water consumption and response.* (Kozłowski, T. T., Ed.). Academic Press, New York—San Francisco—London, 23–84.
- » — 1972. Evaporation from forests. In *Research papers in forest meteorology.* (Taylor, J. A., Ed.), 75–90.
- SCHMITZ, W. & VOLKERT, E. 1959. Die Messung von Mitteltemperaturen auf reaktionskinetischer Grundlage mit dem Kreispolarmeter und ihre Anwendung in Klimatologie und Bioökologie, speziell in Forst- und Gewässerkunde. *Zeiss-Mitt.* 1, 300–337.
- STANHILL, G., HOFSTEDER, G. J. & KALMA, J. D. 1966. Radiation balance of natural and agricultural vegetation. *Quart. J. R. Meteorol. Soc.* 92, 128–140.
- STEWART, J. B. & OLIVER, S. A. 1972. Evaporation studies at Thetford, Norfolk. In *Research papers in forest meteorology* (Taylor, J. A., Ed.), 91–99.
- TANNER, C. B. 1960. Energy balance approach to evapotranspiration from crops. *Proc. Soil Sci. Soc. Amer.* 24, 1–19.
- WILSKA, M. G. 1968. A new liquid distillation type instrument for integrating solar radiation. *Geophysica* 10, 81–87.

SUMMARY:

USE OF CHEMICAL TOTALIZER OF RADIATION IN ENERGY BALANCE MEASUREMENTS

The aim of the investigation was to test, under Finnish conditions, the chemical totalizer of radiation (Frankfurt radiometer) developed by BRECHTEL (1973), and especially its use in determining evaporation through energy balance calculations. The radiometer is based on the temperature dependence of the inversion rate of a sugar solution. The exponential nature of the relationship, however, limits the usefulness of the method. The basic part of the meter consists of a flat polyethylene container (Fig. 1: 5 and BRECHTEL 1973), which is filled with a sugar solution. The complete measuring units (Fig. 1 and 2) are suspended between two horizontal wires above the measuring point. The inversion rate of the sugar solution is measured as the change in rotation angle using a circle polarimeter.

The experiments consisted of measuring with a Frankfurt radiometer two components of the energy balance, net radiation and sensible heat, above an evaporation pan (Class A Pan) and above various types of plant cover at the University Forest Station (Table 1), and on various peatland sites at Lyly (Table 2) in Central Finland as well as above lysimeters at Otaniemi in South Finland. For comparison, evaporation from an evaporation pan was measured at the Forest Station and from a shallow peat lysimeter at Lyly. Results are given for those measuring periods only in which the final rotation angle was positive. The parameter for incoming short-wave (global) radiation obtained with the Frankfurt radiometer, i.e. the difference between the rotation angle changes in black and white containers, was compared to global radiation measured by a bellani-type radiometer. The relationship was different for measuring periods of different length (Fig. 3), although daily mean values showed a high uniformity (Fig. 4). Regression is linear up to the amount $20 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ of global radiation. The difference between results from the polyethylene cup-covered and uncovered containers, which has been used as a parameter for the sensible heat, did not correlate with the

mean wind speed (Fig. 5). Furthermore, it became evident that the results obtained using one-faced measuring units and double-faced ones (facing both upward and downward) were not similar (Table 3). In the double-faced units, the 12 mm air layer between the containers does not provide sufficient insulation. The background plates must also be painted white. All the recorded radiation parameters showed highly significant correlation with the pan evaporation values (Table 4). The correlation between the evaporation values calculated from the energy balance equation (latent heat = net radiation - sensible heat) and those measured from the evaporation pan can be seen in Fig. 7. The results also depend on the height at which the measuring units are placed (Fig. 8). The best height was found to be about one metre. The evaporation values obtained from measurements made above the lysimeter were also approximately the same as those obtained by weighing (Fig. 9.).

Evaporation from different types of plant cover was compared using several measured parameters (Tables 5-7). Comparison between a tree-covered and an open area remained uncertain because of the different measuring heights (Table 5). The results from the experiment carried out at the University Forest Station show that evaporation was highest from the water surface in an evaporation pan, and in general higher from an 11-year old Scots pine stand than from a meadow (Table 6). The measurements at Otaniemi show that evaporation from clay was the lowest and from peat the highest. Evaporation from grass-covered fine sand fell between these two (Table 7). In cases where there were differences in the latent heat of evaporation calculated using the energy balance equation, differences were already to be seen in the parameters for net radiation or outgoing radiation. This is due to the uncertainty in measuring sensible heat by the method in question. It can be concluded from these results that the Frankfurt radiometer is best suited to describing radiation conditions.