

# KUUKAUDEN KESKILÄMPÖTILAN, LÄMPÖSUMMAN JA SADEMÄÄRÄN PAIKALLISTEN ARVOJEN JOHTAMINEN ILMATIETEEN LAITOKSEN MITTAUSTIEDOISTA

RISTO OJANSUU ja HELENA HENTTONEN

*ESTIMATION OF LOCAL VALUES OF MONTHLY MEAN TEMPERATURE, EFFECTIVE TEMPERATURE  
SUM AND PRECIPITATION SUM FROM THE MEASUREMENTS MADE BY THE FINNISH  
METEOROLOGICAL OFFICE*

Saapunut toimitukselle 26. 5. 1983

Tutkimuksessa verrataan liukuvien keskiarvojen menetelmää ja trendipintamenetelmää sekä edellisten yhdistelmää kuukauden keskilämpötilan ja sademäärän paikallisten arvojen laskennassa. Aineistona ovat Ilmatieteen laitoksen julkaisemat säähavaintoasemien kuukausitiedot vuodesta 1881 alkaen.

Malleissa käytetään hyväksi kuukauden keskilämpötilan ja sademäärän tilastollista riippuvuutta meren läheisyydestä, järvisyydestä ja korkeudesta merenpinnasta. Kaikki käytetyt tunnuksot ovat merkitseviä kuukauden keskilämpötilan selittäjiä. Yksittäisten vuosien ilmastotietojen tasoituksessa parhaiksi osoittautuivat trendipinnat ja yhdistelmämenetelmät. Pitkien havaintosarjojen laskennassa stabiilein on yhdistelmämenetelmä, jossa käytetään pitkän ajan keskiarvoihin (1931-1960) perustuvaa trendipintaa vuotuisten pintojen asemesta.

Lisäksi esitetään harhaton menetelmä lämpösummien laskemiseksi kuukausittaisista keskilämpötiloista.

## 1. JOHDANTO

Tutkittaessa sääolojen vuotuisen vaihtelun ja puiden kasvun välisiä suhteita on olennaista, että puuston kasvutiedot ja säätiedot on mitattu olosuhteiltaan toisiaan vastaavissa paikoissa. Aina ei ole mahdollista käyttää tutkimuskohteen välittömässä läheisyydessä tehtyjä säähavaintoja. Tällöin halutut säätiedot joudutaan johtamaan kauempana tehtyjen mittausten perusteella. Ilmatieteen laitoksen säähavaintoasemien mittaukset muodostavat tähän tehtävään sekä ajallisesti että maantieteellisesti varsin kattavan aineiston.

Kasvupaikan sääolojen vaihtelu on luonteeltaan satunnaista ja jaksollista tietyn keskiarvon tai loivan trendin ympärillä. Usein keskiarvoja pidetään vakioina ja kasvupaikan ilmastotekijät kuvataan pitkän ajan keskiarvoina. Ilmastotekijöistä on esitetty keskiarvotietoja taulukkoina, jotka perustuvat joko

graafiseen tasoitukseen (esim. Kolkki 1966 ja Solantie 1976) tai kohdepisteen ympäristön havaintojen aritmeettisiin keskiarvoihin (esim. Vaajama 1966, Helimäki 1967, Solantie 1976).

Määrittelemällä tietyn pisteen säätietojen johtamiselle matemaattiset säännöt voidaan paikkaan sidottuja ilmastollisia aikasarjoja laskea tehokkaasti tietokoneella. Tämän työn tavoitteena on tutkia liukuvien keskiarvojen menetelmän ja trendipintamenetelmän sekä edellisten yhdistelmän ominaisuuksia meteorologisten tietojen tasoittamisessa. Tarkasteltaviksi tunnuksiksi on valittu kuukausien keskilämpötilat ja sademäärät.

Malleissa käytetään hyväksi lämpötilojen ja sademäärien tilastollista riippuvuutta merisyydestä, järvisyydestä ja korkeudesta merenpinnasta. Merisyydellä tarkoitetaan tässä

työssä meren lähivaikutusta. Maantieteellisesti mallit on rajattu Suomen alueelle ja ajallisesti vuodesta 1881 siihen vuoteen, jolta on viimeksi käytettävissä olevaa tietoa käsiteltävistä ilmastollisista tunnuksista. Lisäksi esitetään menetelmä lämpötilan vuotuisen kulun tasoittamiseksi harhattomasti kuukausien keskilämpötilojen suhteen sekä harhatto-

mien lämpösummaestimaattien laskentamenetelmä.

Tutkimus kuuluu Suomen Akatemian rahoittamaan ja apul.prof. Pekka Kilkin johtamaan tutkimusprojektiin "Puuta kuvaavat mallit". Apul.prof. Kilkin lisäksi käsikirjoituksen ovat lukeneet prof. Matti Leikola, apul.prof. Simo Poso, FL Raino Heino, MML Risto Päivinen ja MH Markku Siitonen ja tehneet siihen huomioon otettuja korjaus ehdotuksia.

## 2. AINEISTOT

Tasointumallien perusaineistona ovat Suomen Meteorologisessa vuosikirjassa julkaistut vuosien 1881–1979 kuukausittaiset keskilämpötilat ja sademäärät havaintoasemittain sekä havaintoasemien sijaintitiedot yhtenäiskoordinaatistossa ja korkeudet merenpinnasta. Lisäksi käytettävissä ovat ruotsalaisten Haaparannan ja Karesuondon asemien sekä norjalaisen Karasjoen aseman mittaukset.

Toiminnassa olleiden säähavaintoasemien määrä on vaihdellut tarkateltavan ajanjakson kuluessa. Taulukossa 1 on esitetty vuosittain niiden asemien lukumäärät, joilta on ollut käytettävissä vähintään yhden kuukauden keskilämpötilatieto. Myös havaintojen alueel-

linen jakauma on ollut varsin epätasainen. Kuvassa 1 on esitetty käytettävissä olevat saahavaintoasemat vuosina 1881, 1913, 1946 ja 1978.

Tasointumallien laadinnassa käytettiin lisäksi apuaineistona normaalikaudelta 1931–1960 julkaistuja kuukausittaisen keskilämpötilojen (Kolki 1966) ja sademäärien (Helimäki 1967) keskiarvoja niiltä havaintoasemilta, joiden korkeus merenpinnasta tunnettiin.

Kuukausien keskilämpötilat on ilmastollisissa vuosikirjoissa esitetty vuorokausien keskilämpötilojen aritmeettisina keskiarvoina. Vuorokauden keskilämpötila on laskettu vuorokauden eri aikoina mitatuista kolmesta

Taulukko 1. Toiminnassa olleiden säähavaintoasemien lukumäärät vuosina 1881–1978.

Table 1. Numbers of the active observation stations in Finland during the period 1881–1978.

Vuosi year	Asemia obs.st.	Vuosi year	Asemia obs.st.	Vuosi year	Asemia obs.st.	Vuosi year	Asemia obs.st.	Vuosi year	Asemia obs.st.	Vuosi year	Asemia obs.st.
1881	17	1898	35	1915	56	1932	103	1948	105	1964	144
1882	18	1899	34	1916	63	1933	118	1949	108	1965	142
1883	20	1900	35	1917	59	1934	117	1950	96	1966	143
1884	23	1901	40	1918	59	1935	118	1951	80	1967	144
1885	23	1902	40	1919	61	1936	120	1952	84	1968	145
1886	25	1903	38	1920	60	1937	122	1953	85	1969	141
1887	24	1904	40	1921	57	1938	125	1954	88	1970	147
1888	24	1905	41	1922	54	1939	127	1955	99	1971	152
1889	25	1906	40	1923	62	1940	96	1956	100	1972	158
1890	26	1907	42	1924	72	1941	99	1957	102	1973	157
1891	35	1908	47	1925	79	1942	91	1958	129	1974	157
1892	35	1909	53	1926	88	1943	96	1959	125	1975	163
1893	35	1910	55	1927	93	1944	93	1960	125	1976	164
1894	35	1911	56	1928	95	1945	89	1961	124	1977	162
1895	35	1912	61	1929	97	1946	105	1962	135	1978	161
1896	35	1913	61	1930	98	1947	105	1963	136	1979	157
1897	34	1914	50	1931	103						



Kuva 1. Säähavaintoasemat 1881, 1913, 1946 ja 1978.

Figure 1. Active observation stations in Finland in the years 1881, 1913, 1946 and 1978.

lämpötilasta seuraavilla kaavoilla (esim. Heino 1974):

$$T=1/3(t_7+t_{14}+t_{21}) \quad (2.1) \text{ vv. 1881-1900}$$

$$T=1/4(t_7+t_{14}+2t_{21}) \quad (2.2) \text{ vv. 1901-1926}$$

$$T=1/4(t_7+t_{15}+2t_{21}) \quad (2.3) \text{ vv. 1927-1946}$$

$$T=1/5(2t_8+t_{14}+2t_{20})+k \quad (2.4) \text{ v. 1947-}$$

loka-helmikuu

$$T=1/4(t_8+t_{14}+2t_{20})+a(t_{20}-t_{\min})+0.10$$

maaliskuu-syyskuu

missä a ja k ovat kuukausittaisia empiirisesti määritettyjä parametrejä,  $t_i$  ilmaisee lämpötilalukeman hetkellä h ja  $t_{\min}$  on vuorokauden minimilämpötila.

Kaavojen luotettavuutta on Heino (1974) tarkastellut empiirisesti. Ennen vuotta 1947 käytetyt keskilämpötilan laskentakaavat antoivat n. 0.35 °C:n yliarvion vuorokausien keskilämpötiloille touko-heinäkuussa. Kaavaan (2.4) on tehty pieniä muutoksia vuosina 1951, 1959 ja 1971. Niillä ei kuitenkaan ole merkittävää vaikutusta kaavojen luotettavuuteen. Kaava (2.4) on lähes harhaton vuoro-

### 3. TASOITUSMENETELMÄT

#### 3.1. Kuukauden keskilämpötilan ja sademäärän tasoitus

##### 3.1.1. Menetelmille asetettavat vaatimukset

Puiden kasvun ilmastollisen vaihtelun tutkimiseen tarkoitettuja meteorologisten tietojen tasoitusmenetelmältä voidaan vaatia:

1. Ajallista jatkuvuutta
2. Alueellista jatkuvuutta
3. Harhattomuutta kohdepisteen maantieteellisen sijainnin suhteen
4. Pientä keskivirhettä

Tasoitusmallilla lasketuissa aikasarjoissa ei saa esiintyä havaintoasemaverkoston tai mitausmenetelmien muutoksista aiheutuvia epäjatkuvuuskohdita. Mahdollisuudet tuottaa ajallisesti jatkuvia aikasarjoja riippuvatkin lähinnä tasoitettavan aineiston ominaisuuk-

kauden keskilämpötilan estimaattori. Tässä työssä on käytetty julkaistuja keskilämpötiloja korjaamatta niitä nykyisiä laskentakaavoja vastaaviksi.

Aineistosta ei ole poistettu lämpömittarikojujen rakenteen muutoksesta 1920-luvun alussa mahdollisesti aiheutuvaa havaintosarjojen perusteiden muuttumista. Myöskään uudentyypin Wildin sademittarin käyttöönotosta vuonna 1909 (esim. Huovila 1966) aiheutuneita muutoksia ei ole otettu huomioon.

Meren lähivaikutuksen ja järvisyyden vaikutuksen tutkimiseksi määritettiin maanmittauslaitoksen GT-kartoilta Suomen alueelta ja kapealta vyöhykkeeltä rajojen ulkopuolelta järvien ja meren peittävyysprosentit yhtenäiskoordinaatiston mukaan rajatuilta 5 km × 5 km ruuduilta. Jokaiseen ruutuun sijoitettiin 9 pistettä systemaattisesti ja järviin tai mereen sattuneiden pisteiden lukumäärät tallennettiin erikseen. Otoksen perusteella laskettiin ruuduittaiset järvisyy- ja merisyyssprosentit.

Aineistot ovat tallennettuina Metsäntutkimuslaitoksen VAX 11/780 tietokoneella.

sista, eivät niinkään käytettävästä tasoitusmenetelmästä.

Alueellisesti jatkuva tasoitus muodostaa yhtenäisen pinnan käytetyssä koordinaatistossa. Koska meteorologisten tietojen jakama on todellisuudessa jatkuva, merkitsevät epäjatkuvuuskohdat poikkeamaa ilmiön todellisesta luonteesta. Lisäksi tasoituksen epäjatkuvuuskohdat vaikeuttavat luotettavuustietojen tulkintaa.

Tasoitus voidaan tehdä harhattomasti mallissa selittävinä olevien muuttujien suhteen. Jos tasoitus tehdään vain havaintopisteen pituus- ja leveysasteiden perusteella, ei tulosta voi olettaa harhattomaksi muiden tarkasteltavaan ilmiöön vaikuttavien maantieteellisten tekijöiden suhteen. Käyttämällä esim. havaintopisteen korkeutta merenpinnasta, järvisyyttä ja merisyyttä apuna tasoituksessa, voidaan päästä myös niiden suhteen harhattomaan tasoitustulokseen.

Mallin täyttäessä edellä esitetyt vaatimukset voidaan sen hyvyttä arvostella keskivirheen avulla. Keskivirheen suuruuteen vaikuttavat käytetyn tasoitusmenetelmän lisäksi havaintoverkoston ja tasoitettavan muuttujan ominaisuudet. Lisäksi vaikuttaa laskentajakson pituus. Esimerkiksi vuorokauden sademäärässä voi olla alueellisesti erittäin voimakasta satunnaisvaihtelua, joka kuitenkin vähenee, jos tarkastellaan pitkien ajanjaksojen kuten kuukauden, vuoden tai vuosijakson sademääriä.

##### 3.1.2. Liukuvien keskiarvojen menetelmä

Yksinkertainen tasoitusmenetelmä on kohdepisteen arvon laskeminen ympäristön havaintojen painotettuna keskiarvona. Painot (w) lasketaan kaavalla (3.1) havaintopisteiden ja kohdepisteen välisten etäisyyksien (d) funktiona. Tiettyä maksimietäisyyttä (d<sub>max</sub>) kauempana sijaitsevien havaintopisteiden painot määritellään nolliksi. Jos maksimietäisyyttä lähempänä ei kuitenkaan ole tehty havaitoja, siirretään kohdepisteelle lähimmän havaintopisteen arvo.

$$w = \begin{cases} 1 - \left(\frac{d}{d_{\max}}\right)^q, & d \leq d_{\max} \\ 0, & d > d_{\max} \end{cases} \quad (3.1)$$

Menetelmällä saadaan alueellisesti lähes jatkuva tasoituspinta. Epäjatkuvuuskohtia syntyy, kun maksimietäisyyttä lähempänä ei ole yhtään havaintoasemaa ja kohdepisteen pieni siirto aiheuttaa lähimmän havaintoaseman muuttumisen toiseksi. Epäjatkuvuuskohtiensa lisäksi tasoituspinta ei ole differoituva painokertoimien (w) ensimmäisten derivaattojen epäjatkuvuuskohdissa. Liukuvien keskiarvojen menetelmän heikkouksia ovat harhaisuus taipuneiden pintojen tasoituksessa ja herkkyys havaintopisteiden ryhmittäisyydelle (Ripley 1981).

Kaavan (3.1) parametrien q ja d<sub>max</sub> vaikutusta tasoituksen luotettavuuteen tutkittiin empiirisesti havaintoasemille tasoittaen laskettujen ja niillä mitattujen tietojen erotuksien avulla. Erotuksen laskennassa ei käytetty aseman omia mittaustietoja. Menettelyllä

saadaan kuva tasoituksen luotettavuudesta havaintoverkon keskiosissa, mutta se voi johdattaa keskivirheen yliarvioon havaintoverkon reunoilla.

##### 3.1.3. Trendipintamenetelmä

Toisena tasoitusmenetelmänä kokeiltiin pituus- ja leveysasteiden määrittämiä trendipintoja. Trendipinta saadaan laskemalla pienimmän neliösumman menetelmällä regressiomalli muotoa:

$$f(x,y) = \sum_{r+s \geq p} a_{rs} x^r y^s \quad (3.2)$$

missä p on pinnan asteluku (esim. Ripley 1981). Esimerkkinä annetaan kolmen alimman asteluvun mallit:

$$a$$

$$a+bx+cy$$

$$a+bx+cy+dx^2+exy+fy^2,$$

missä a,b,c,d,e ja f ovat regressiokertoimia sekä x ja y pinnan määrittävät koordinaatit.

Mallin (3.2.) parametrien estimointia tavallisella pns-menetelmällä haittaa selittävien muuttujien korreloituneisuus. Tässä työssä käytetään Rippleyn (1981) suosittelemaa ortogonaaliin polynomeihin perustuva menetelmä (esim. Seber 1971).

Tasoitusmallin luotettavuutta voidaan tarkastella regressiomallin keskivirheen avulla. Regressiomallin residuaalit eivät kuitenkaan ole välttämättä toisistaan riippumattomia ja normaalisti jakautuneita, vaan läheisten havaintojen virheet voivat olla positiivisesti korreloituneita.

Trendipintamenetelmällä saadaan alueellisesti jatkuva pinta, joka on differoituva p-1 kertaa. Menetelmän heikkoutena on sen joustamattomuus pienillä asteluvuilla ja korkean asteluvun pintojen taipuminen havaintoverkoston reunoilla epäloogisesti, mikä voi johdattaa harhaisiin tuloksiin.

Pituus- ja leveysasteisiin sidottu trendipinta kuvaa vain tarkasteltavan ilmiön suuri-alaista vaihtelua. Muut ilmiöön vaikuttavat tunnuksat kuvautuvat trendipinnassa suur-



alueittain keskimääräisesti. Lisäämällä pintaan halutut maantieteelliset tunnuksat saadaan pinta noudattamaan niiden aiheuttamaa pienialaisempaa vaihtelua. Havaintopisteiden koordinaattien lisäksi keskilämpötilaa ja sademäärää selittävinä maantieteellisinä muuttujina käytettiin korkeutta merenpinnasta, merisyysyä sekä järvisyyttä. Merisyys- ja järvisyyksien indeksi lasketaan liukuvien keskiarvojen menetelmällä meren ja järvien ruuduttaisiin peittävyysprosentteihin perustuen. Ruutujen painot ( $w$ ) lasketaan kaavalla (3.1) niiden keskipisteiden ja kohdepisteen etäisyyden funktiona.

Trendipintoja merkitään tässä työssä selittävien muuttujien asteluvun mukaan siten, että asteluvut esitetään järjestyksessä:

- (1) y-koordinaatti eli leveysaste
- (2) x-koordinaatti eli pituusaste
- (3) korkeus merenpinnasta
- (4) merisyys
- (5) järvisyys

Esimerkiksi pinta, jossa tasokoordinaatit ovat mukana kolmansilla asteilla ja muut muuttujat toisilla asteilla, merkitään  $T(3,3,2,2,2)$ . Selittäviä muuttujia tällaisessa mallissa on yhteensä 24 kappaletta.

### 3.1.4. Yhdistelmämenetelmä

Kolmantena tasoitusmenetelmänä kokeiltiin liukuvien keskiarvojen ja trendipintojen yhdistelmää. Yhdistelmämenetelmän ensimmäisessä vaiheessa lasketaan tarkasteltavaa muuttujaa kuvaava trendipinta. Seuraavaksi lasketaan selitettävien muuttujien estimaatit trendipinnan avulla. Estimaattien ja mitattujen arvojen erotukset tasoitetaan liukuvien keskiarvojen menetelmällä. Lopullinen malli muodostuu trendipinnan ja tasoitettujen residuaalien summana.

Yhdistelmämallit merkitään niissä käytettyjen trendipintojen avulla, esim.  $Y(3,3,2,2,2)$ . Jos trendipinta on laskettu normaalikauden keskiarvoille, merkitään vastavasti esim.  $YN(1,1,1,1,1)$ .

### 3.2. Lämpösumman laskenta

Lämpötilan vuotuisen kulun tarkastelu on välttämätöntä, jos halutaan laskea sellaisia biologisesti mielenkiintoisia lämpötilatunnuksia kuin lämpösummia ja termisten kausien pituuksia. Koska tämän työn tarkoitus on palvella lähinnä metsäntutkimuksen tarpeita, pyrittiin lämpötilan kulun luotettavaan tasoitukseen kasvukauden aikana ja sen välittömässä läheisyydessä.

Lämpötilan vuotuisen kulun tasoitus tehdään numeerisesti. Ensimmäisessä vaiheessa lasketaan tasoituskäyrä kuukausien keskimäisten päivien kohdalle sijoitettujen kuukausien keskilämpötilojen kautta splini-funktiolla. Laskennassa käytetään IMSL-ohjelmakirjaston aliohjelmaa ICSICU (IMSL Library 2, 1977). Tältä peruskäyrältä lasketut kuukausien keskilämpötilat ovat kuitenkin harhaisia. Harhan poistamiseksi lasketaan uusi tasoituskäyrä estimoitujen keskilämpötilojen ja todellisten keskilämpötilojen erotuksille. Vähentämällä peruskäyrältä saaduista vuorokauden keskilämpötiloista vastaavat korjauskäyrän arvot saadaan kuukausien keskilämpötilojen suhteen lähes harhaaton lämpötilan vuotuisen kulun tasoitus.

Suoraan lopulliselta tasoituskäyrältä lasketut lämpösummaestimaatit ovat kuitenkin harhaisia, koska menettely ei ota huomioon todellisten lämpötilojen vaihtelua tasoituskäyrän ympärillä. Olettamalla vuorokauden keskilämpötilojen poikkeamat tasoituskäyrästä normaalisti jakautuneiksi ja varianssi tunnetuksi voidaan lämpösumman estimaatti laskea harhattomasti (kuva 2).

Annettua kynnyslämpötilaa (esim.  $5\text{ }^\circ\text{C}$ ) korkeampien lämpötilojen todennäköisyys on

$$P_0 = F(G_0) \quad (3.3)$$

missä

$$G_0 = (G-R)/\sigma$$

$F(x)$  = normaalijakauman kertymäfunktio  
cumulative normal distribution

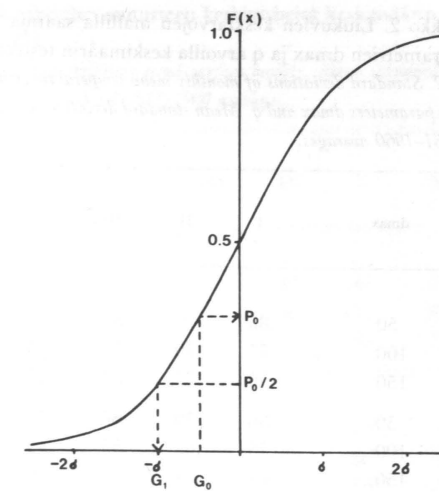
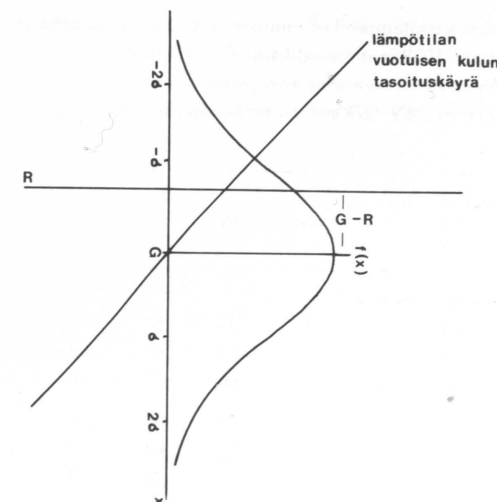
$G$  = tasoituskäyrältä saatu vuorokauden keskilämpötila

$R$  = kynnyslämpötila

$\sigma$  = vuorokauden keskilämpötilan hajonta tasoituskäyrän suhteen

$\sigma$  = vuorokauden keskilämpötilan hajonta tasoituskäyrän suhteen

$\sigma$  = vuorokauden keskilämpötilan hajonta tasoituskäyrän suhteen



Kuva 2. Vuorokauden keskilämpötilan satunnaisvaihtelun huomioonottaminen lämpösumman laskennassa kuukausikeskiarvoihin perustuvalta tasoituskäyrältä.  $f(x)$  = vuorokauden keskilämpötilan todennäköisyyden tiheysfunktio ja  $F(x)$  = vuorokauden keskilämpötilan todennäköisyyden kertymäfunktio. Selitys tekstissä.

Figure 2. The effect of variation in the daily mean temperature on the temperature sum derived from the smoothing curve based on monthly mean temperatures.  $f(x)$  = probability density distribution of diurnal mean temperature and  $F(x)$  = cumulative probability distribution of diurnal mean temperature. See text for explanations.

Kynnyslämpötilan ylittävä keskimääräinen lämpötila on

$$m = (G_0 - G_1) \sigma \quad (3.4)$$

missä  $G_1 = F^{-1}(P_0/2)$

Tulo  $P_0 \times m$  on vuorokauden lämpösummakertymän odotusarvo. Kasvukauden tai sen osan lämpösumman estimaatti saadaan vuorokauden lämpösummakertymän odotusarvojen summana.

## 4. TULOKSET

### 4.1. Alueellinen tasoitus

Tasoitusmallien luotettavuutta testattiin pääasiassa niiden keskivirheiden avulla. Tietyn menetelmän eri muuttujayhdistelmien antamat keskivirheet ovat keskenään vertailukelpoisia, mutta menetelmien välisessä vertailussa on otettava huomioon keskivirheen erilainen laskutapa. Trendipintamenetelmän keskivirheen laskenta vastaavalla tavalla kuin liukuvien keskiarvojen menetelmässä olisi vaatinut useiden vuorokausien pituisen laskenta-ajan.

Testiaineistona käytettiin vuosien 1969–1978 keskilämpötila- ja sademäärähavaintoja, joille laskettiin kuukausittain mallit. Keskivirheet laskettiin kullekin kuukaudelle 10 mallin antamien keskivirheiden keskiarvona. Lisäksi keskivirheet laskettiin normaalikauden 1931–1960 keskiarvojen tasoitustuloksille.

Liukuvien keskiarvojen menetelmää testattiin kaavan (3.1) parametrin  $q$  arvoilla 0.5, 1.0 ja 2.0 sekä parametrin  $d_{max}$  arvoilla 50, 100 ja 150 km. Saadut keskivirheet on esitetty taulukoissa 2 ja 3. Parametrin  $q$  arvo ei vai-



Taulukko 2. Liukuvien keskiarvojen mallilla saatuja kuukauden keskilämpötilan ennusteen keskivirheitä erilaisilla parametrien dmax ja q arvoilla keskimäärin testikaudella 1969–1978 ja normaalikauden 1931–1960 keskiarvoilla.  
Table 2. Standard deviations of monthly mean temperature estimates calculated with the moving averages model with different values of the parameters dmax and q. Mean standard deviations during the test period 1969–1978 and standard deviations of the normal period 1931–1960 averages.

q	dmax	Kuukausi – month											
		I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
		Testikausi – test period											
0,5	50	,86	,79	,65	,51	,78	,68	,52	,52	,54	,67	,71	,95
	100	,77	,70	,55	,45	,75	,64	,47	,48	,53	,65	,68	,84
	150	,90	,77	,57	,47	,79	,68	,48	,51	,60	,73	,76	,95
1,0	50	,86	,79	,66	,51	,78	,68	,52	,53	,54	,66	,71	,94
	100	,75	,69	,55	,45	,74	,64	,47	,47	,52	,64	,66	,83
	150	,84	,74	,56	,46	,78	,66	,47	,50	,57	,70	,73	,90
2,0	50	,86	,80	,66	,52	,79	,69	,53	,53	,55	,67	,71	,94
	100	,75	,69	,56	,45	,74	,64	,47	,47	,50	,62	,65	,83
	150	,79	,70	,54	,45	,75	,64	,46	,48	,54	,66	,69	,86
		normaalikausi – normal period											
1,0	100	,73	,67	,50	,45	,66	,63	,44	,43	,52	,54	,58	,66

Taulukko 3. Liukuvien keskiarvojen mallilla saatuja kuukauden sademäärän ennusteen keskivirheitä erilaisilla parametrien dmax ja q arvoilla keskimäärin testikaudella 1969–1978 ja normaalikauden 1931–1960 keskiarvoilla.  
Table 3. Standard deviations of monthly precipitation sum estimates calculated with the moving averages model with different values of the parameters dmax and q. Mean standard deviations during the test period 1969–1978 and standard deviations of the normal period 1931–1960 averages.

q	dmax	Kuukausi – month											
		I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
		Testikausi – test period											
0,5	50	9,60	7,31	7,80	8,99	8,19	13,80	19,71	18,07	13,62	9,36	12,10	10,37
	100	8,36	6,49	6,87	7,79	7,60	12,17	17,48	16,88	12,79	9,00	10,73	9,37
	150	8,53	6,78	7,23	8,35	8,32	12,98	18,53	18,18	13,63	10,19	11,29	9,99
1,0	50	9,97	7,88	7,86	9,02	8,19	13,78	19,81	18,07	13,69	9,38	12,17	10,43
	100	8,41	6,48	6,85	7,75	7,41	11,92	17,31	16,51	12,50	8,65	10,69	9,30
	150	8,48	6,62	7,04	8,01	7,95	12,53	17,98	17,51	13,15	9,62	10,95	9,66
2,0	50	10,05	7,53	7,98	9,11	8,21	13,84	20,03	18,21	13,88	9,48	12,32	10,59
	100	8,63	6,60	6,97	7,89	7,30	11,90	17,42	16,33	12,37	8,47	10,85	9,33
	150	8,32	6,50	6,86	7,72	7,52	12,00	17,39	16,70	12,60	8,91	10,62	9,33
		normaalikausi – normal period											
1,0	100	5,85	4,43	3,85	4,23	3,06	5,14	6,61	6,57	4,99	4,89	5,18	5,77

kuttanut merkittävästi kuukausien keskilämpötilojen tai sademäärien tasoituksessa. Tasoitussympyrän säde 100 km johti keskimäärin pienimpään keskivirheeseen kummankin tun-

nuksen tasoituksessa. Keskivirhe oli kasvukauden aikana kuukauden keskilämpötilan tasoituksessa n. 0.57 °C ja sademäärän tasoituksessa keskimäärin n. 13 mm/kk. Normaali-

Taulukko 4. Trendipintamalleilla saatuja kuukauden keskilämpötilan ennusteen keskivirheitä keskimäärin testikaudella 1969–1978 ja normaalikauden 1931–1960 keskiarvoilla.  
Table 4. Standard deviations of monthly mean temperatures calculated with different trend surface models. Mean standard deviations during the test period 1969–1978 and standard deviations of the normal period 1931–1960 averages.

Trendipinta trend surface	Kuukausi – month												
	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	
		Testikausi – test period											
T(1,1,1,1,1)	,91	,82	,64	,40	,52	,54	,44	,41	,33	,47	,67	,89	
T(3,3,0,0,0)	,89	,70	,55	,45	,71	,60	,44	,52	,60	,72	,82	,94	
T(3,3,2,2,2)	,49	,48	,43	,28	,33	,31	,29	,31	,27	,36	,37	,49	
		normaalikausi – normal period											
T(1,1,1,1,1)	,53	,50	,46	,34	,42	,47	,46	,36	,32	,28	,34	,40	
T(3,3,0,0,0)	,84	,60	,43	,37	,64	,57	,39	,47	,63	,67	,75	,80	
T(3,3,2,2,2)	,44	,38	,38	,26	,33	,30	,31	,30	,30	,24	,26	,34	

Taulukko 5. Trendipintamalleilla saatuja kuukauden sademäärän ennusteen keskivirheitä keskimäärin testikaudella 1969–1978 ja normaalikauden 1931–1960 keskiarvoilla.  
Table 5. Standard deviations of monthly precipitation sums calculated with different trend surface models. Mean standard deviations during the test period 1969–1978 and standard deviations of the normal period 1931–1960 averages.

Trendipinta trend surface	Kuukausi – month												
	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	
		Testikausi – test period											
T(1,1,1,1,1)	10,00	7,80	8,32	9,99	10,27	15,23	20,31	21,28	16,82	13,77	12,78	10,38	
T(3,3,0,0,0)	8,99	6,64	7,07	8,19	8,78	13,21	17,97	17,78	14,67	10,34	11,22	9,65	
T(3,3,2,2,2)	7,86	5,89	6,21	7,13	7,79	11,43	15,93	15,52	12,88	8,58	9,85	8,26	
		normaalikausi – normal period											
T(1,1,1,1,1)	5,72	4,28	3,76	3,31	2,94	5,60	5,57	5,60	5,65	5,06	5,81	6,32	
T(3,3,0,0,0)	5,65	4,19	3,61	3,40	3,07	4,82	6,70	6,84	5,59	5,26	5,55	5,92	
T(3,3,2,2,2)	5,30	3,93	3,42	3,70	2,46	3,93	4,91	5,27	5,15	4,19	4,90	5,21	

likauden keskiarvoille vastaavat virheet olivat 0.54 °C ja n. 5 mm/kk.

Merisyyssindeksin ja järvisyyssindeksin laskennassa tarvittavien parametrien q ja dmax vaikutusta tasoitustulokseen tutkittiin normaalikauden 1931–1960 keskilämpötila-aineistossa. Pinnalla T(3,3,2,2,2) olivat pienimmän keskivirheen antaneita parametrien arvoja merisyyssindeksillä q=1 ja dmax = 20 km järvisyyssindeksillä q = 1 ja dmax = 15 km, joita käytettiin kaikissa jatkolaskelmissa.

Trendipintamenetelmän testituloksia tarkastellaan taulukoissa 4 ja 5 kolmen erilaisen pinnan avulla: T(3,3,0,0,0), T(1,1,1,1,1) ja T(3,3,2,2,2). Suurimman keskivirheen kuukauden keskilämpötilan tasoituksessa antoi

pelkkiin tasokoordinaatteihin perustuva pinta T(3,3,0,0,0). Lineaarinen pinta T(1,1,1,1,1), jossa olivat mukana myös korkeus merenpinnasta sekä merisyyss- ja järvisyyssindeksit, johti hieman pienempään keskivirheeseen. Selvästi parhaaseen tulokseen yksittäisen kuukauden keskilämpötilan tasoituksessa päästiin monimutkaisimmalla koikeilulla pinnalla T(3,3,2,2,2). Kasvukaudella kuukauden keskilämpötilan keskivirhe oli testikaudella keskimäärin 0.30 °C ja normaalikauden keskiarvoilla 0.31 °C. Kuukauden sademäärän tasoituksessa antoi pinta T(1,1,1,1,1) suurimman keskivirheen. Paras tulos saatiin pinnalla T(3,3,2,2,2). Kasvukauden aikana keskivirhe oli testiaineistossa

Taulukko 6. Yhdistelmämalleilla saatuja kuukauden keskilämpötilan ennusteen keskivirheitä keskimäärin testikaudella 1969–1978 ja normaalikauden 1931–1960 keskiarvoilla.

Table 6. Standard deviations of monthly mean temperature estimates calculated with different aggregated models. Mean standard deviations during the test period 1969–1978 and standard deviations of the normal period 1931–1960 averages.

Trendipinta trend surface	Kuukausi - month °C											
	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
YN(1,1,1,1,1)	,66	,66	,57	,35	,44	,44	,38	,38	,32	,46	,49	,69
YN(2,2,2,2,2)	,63	,63	,56	,35	,41	,38	,39	,38	,32	,45	,45	,64
Y(3,3,2,2,2)	,51	,50	,49	,30	,33	,33	,31	,34	,29	,42	,46	,52

Taulukko 7. Yhdistelmämalleilla saatuja kuukauden sademäärän ennusteen keskivirheitä keskimäärin testikaudella 1969–1978 ja normaalikauden 1931–1960 keskiarvoilla.

Table 7. Standard deviations of monthly precipitation sum estimates calculated with different aggregated models. Mean standard deviations during the test period 1969–1978 and standard deviations of the normal period 1931–1960 averages.

Trendipinta trend surface	Kuukausi - month mm											
	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
YN(1,1,1,1,1)	8,38	6,43	6,77	7,57	7,45	11,88	16,91	16,35	12,31	8,61	10,73	9,25
YN(2,2,2,2,2)	8,59	6,45	6,82	7,60	7,46	11,95	16,94	16,30	12,30	8,62	10,70	9,15
Y(3,3,2,2,2)	8,04	6,09	6,39	7,32	7,42	11,65	16,44	16,40	12,16	8,45	10,03	8,33

Taulukko 8. Trendipinnan YN(1,1,1,1,1) kertoimet kuukausittain. y = leveysaste, x = pituusaste, z = korkeus merenpinnasta, M = merisyysindeksi ja J = järvisyysindeksi.

Table 8. Coefficients of monthly trend surfaces YN(1,1,1,1,1). y = latitude, x = longitude, z = height above the sea level, M = sea index and J = lake index.

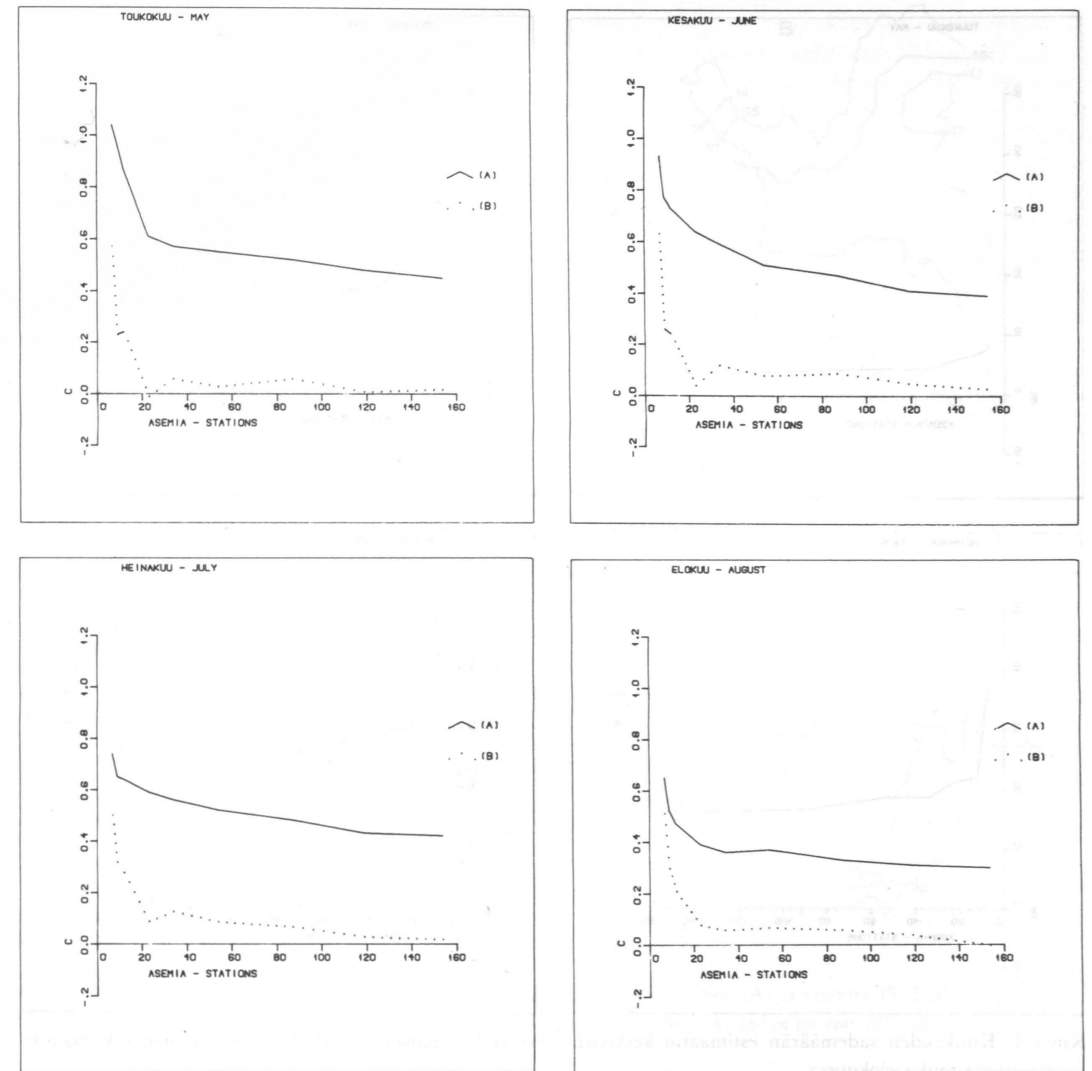
Muuttuja variable	Kuukausi - month Kerroin - coefficient											
	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
y°C/100 km	-,51	-,47	-,45	-,49	-,54	-,43	-,33	-,37	-,40	-,52	-,56	-,55
x°C/100 km	-,71	-,67	-,46	-,08	,03	,26	,15	,07	-,10	-,24	-,35	-,61
z°C/100 m	-,43	-,41	-,33	-,49	-,53	-,47	-,36	-,42	-,46	-,42	-,55	-,51
M°C/10 %	,26	,17	,05	-,12	-,29	-,22	-,06	,10	,18	,21	,22	,25
J°C/10 %	,10	,14	,18	,09	,03	,04	,08	,16	,22	,21	,18	,10

keskimäärin n. 13 mm/kk ja normaalikauden keskiarvoilla n. 4 mm/kk.

Yhdistelmämallin testauksessa käytettiin liukuvien keskiarvojen mallin parametrien arvoja  $q = 1$  ja  $d_{max} = 100$  km. Testauksia tehtiin kolmella erilaisella trendipinnalla. Ensimmäisessä kokeilussa normaalikaudesta 1931–1960 laskettuja keskimääräisiä pintoja YN(1,1,1,1,1) ja YN(2,2,2,2,2) ja lisäksi tasoitettavalta vuodelta laskettua pintaa Y(3,3,2,2,2) (taulukot 6 ja 7). Yhdistelmämalleista selvästi pienimmän keskivirheen kuukauden keskilämpötilalle antoi vuosittain

laskettu pinta Y(3,3,2,2,2). Käytettäessä normaalikaudelta laskettuja trendipintoja, YN(1,1,1,1,1) ja YN(2,2,2,2,2), ei pinnan asteluvun kohottaminen parantanut tasoitustulosta merkittävästi. Kuukausittaiset keskivirheet olivat kasvukaudella n. 0.36 °C ja n. 13 mm/kk.

Normaalikaudelle lasketun trendipinnan YN(1,1,1,1,1) kertoimet osoittavat kuukauden keskilämpötilan lineaarisen tilastollisen riippuvuuden selittävästä muuttujasta (taulukko 8). Pituusastetta ja järvisyysindeksiä lukuun ottamatta kaikki muuttujat olivat



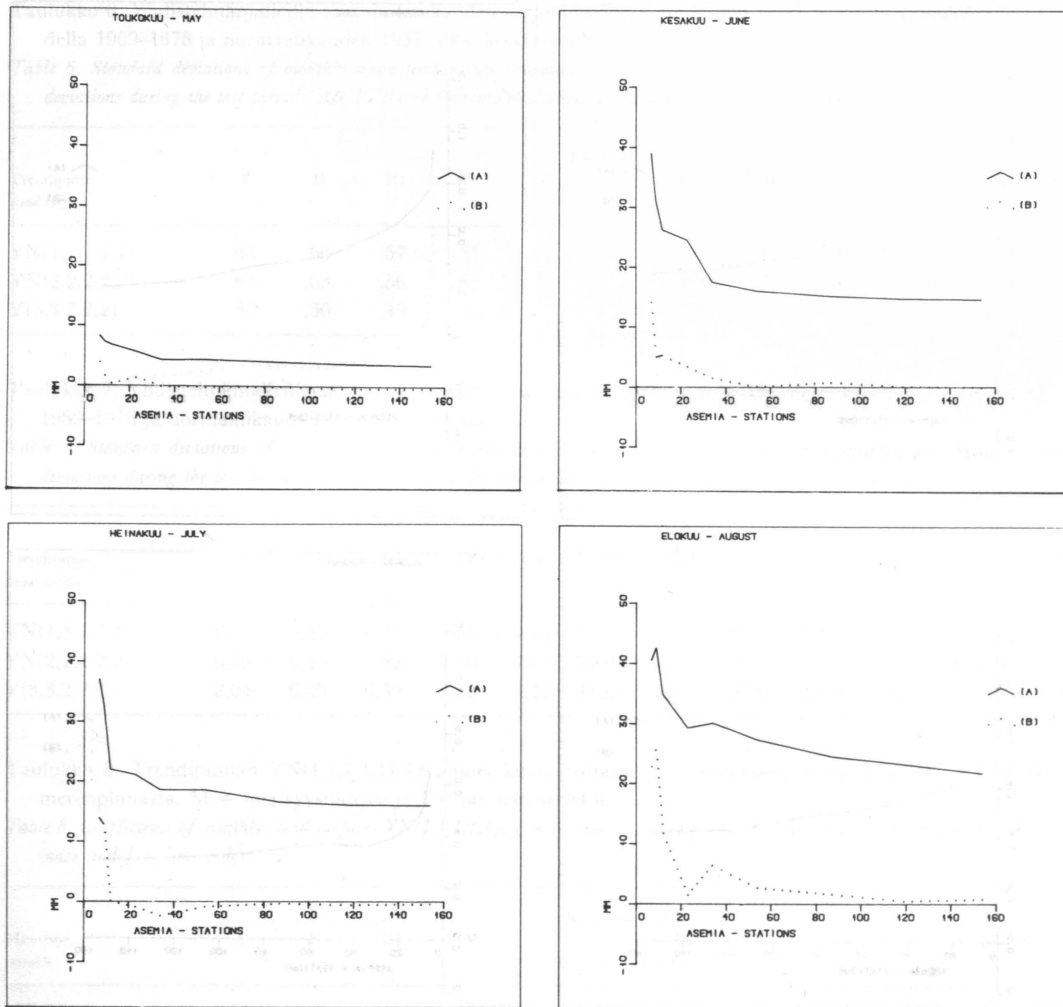
Kuva 3. Kuukauden keskilämpötilan estimaatin keskivirhe (A) ja kokonaisharha (B) havaintoasemien lukumäärän funktiona touko—elokuussa.

Figure 3. The standard deviation (A) and bias (B) of the estimate of monthly mean temperatures from May to August as a function of the number of observation stations.

merkitseviä koko vuoden. Järvisyysindeksi oli merkitsevä maaliskuussa, elokuussa ja melkein merkitsevä heinäkuussa.

Edellä esitetyt tulokset koskevat pääosin vain testijaksoa, joten ne kuvaavat mallien luotettavuutta ainoastaan tilanteessa, jossa havaintoasemia on n. 150 sijottuneena suhteellisen tasaisesti koko maahan. Asemaverkoston ajallisen muutoksen vaikutusta tasoitustuloksen luotettavuuteen tarkasteltiin vuoden 1978 havaintojen avulla. Tasoitusmallin

keskivirheet ja kokonaisharhat laskettiin toiminnassa olleiden asemien residuaaleista (154 kpl). Tasoitus tehtiin ensin vuoden 1978 asemaverkoston avulla. Seuraavaksi käytettiin tasoituksessa vain niitä vuonna 1978 toiminnassa olleita havaintoasemia, jotka olivat toiminnassa vuonna 1968. Näin jatkettiin aina vuoteen 1898 asti. Vuodesta 1898 yhtäjaksoisesti vuoteen 1978 toimineita asemia oli 7. Näin saatu asemaverkoston muutos vastaa hyvin asemien alueellisen jakauman muutos-



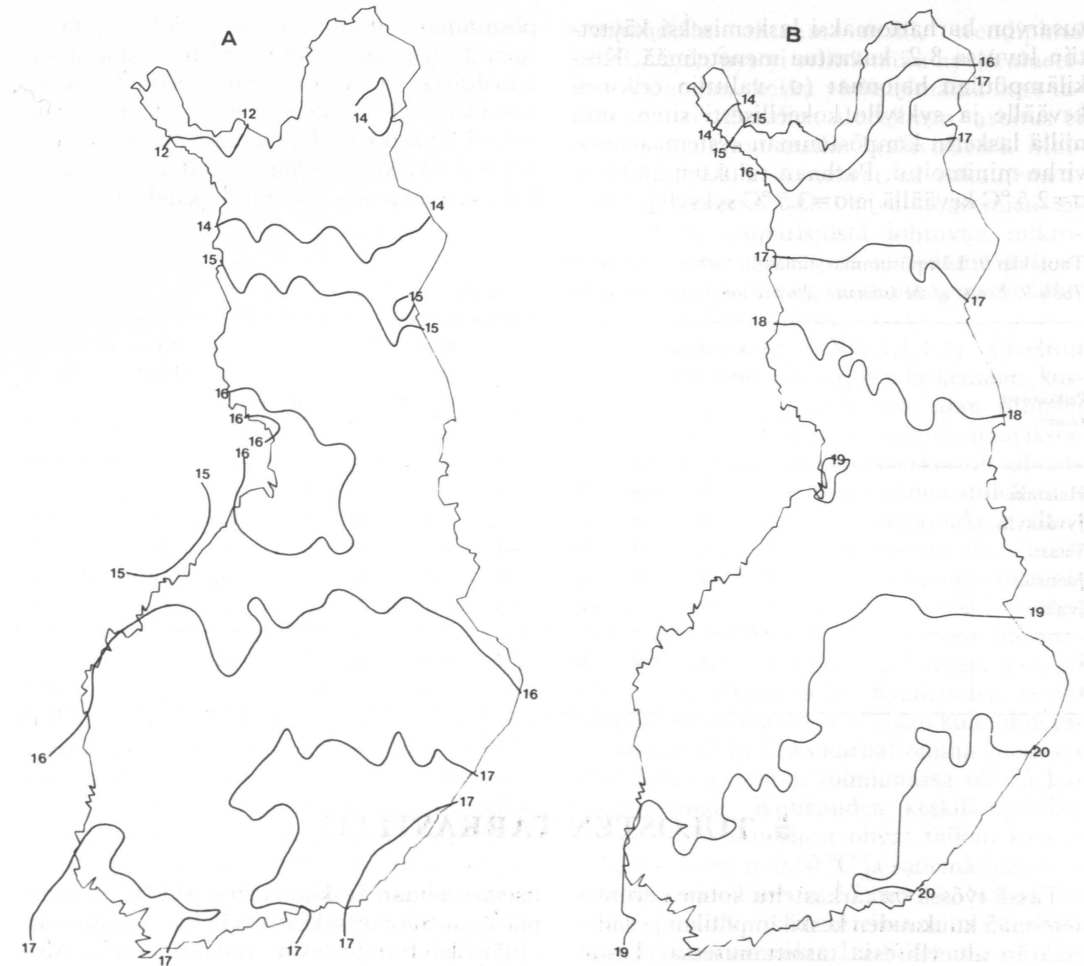
Kuva 4. Kuukauden sademäärän estimaatin keskivirhe (A) ja kokonaisharha (B) havaintoasemien lukumäärän funktiona touko-elokuussa.

Figure 4. The standard deviation (A) and bias (B) of the estimate of the monthly precipitation sum from May to August as a function of the number of observation stations.

ta niiden lukumäärän funktiona.

Testikaudella pienimpään keskivirheeseen johtaneen mallin,  $T(3,3,2,2,2)$ , laskennassa menetetään 25 vapausastetta, joten sen laske- miseksi on oltava käytössä vähintään 26 ase- man tiedot. Kun pintaa kokeiltiin 1800-luvun lopun ja 1900-luvun alun havaintoaineistoon, muodostui joustava kolmannen asteen pinta puutteellisen havaintoverkoston alueilla liian kaarevaksi, ja varsinkin asemaverkoston reu- nojen ulkopuolella estimaatit olivat epäloogi- sia ja satunnaisia. Koska joustavan trendi-

pinnan käyttö ei ole mahdollista 1880-luvulla ja sen käyttö johtaa epäloogisiin tuloksiin vielä 1900-luvun puolella, tarkasteltiin vain yhdistelmämallin  $YN(1,1,1,1,1)$  ominaisuuksia pitkien aikasarjojen laskennassa. Kuvissa 3 ja 4 on esitetty systemaattisen virheen ja keskivirheen riippuvuus havaintoasemien lu- kumäärästä. Tasoituksen luotettavuus tietty- nä ajanjaksona voidaan lukea kuvista suo- raan niinä vuosina toiminnassa olleiden ha- vaintoasemien lukumäärien kohdalta (vrt. taulukko 1).



Kuva 5. Heinäkuun keskilämpötila keskimäärin normaalikaudella 1931-1960 (A) ja vuonna 1972 (B).  
Figure 5. The mean temperature in July on the average during the period 1931-1960 (A) and in the year 1972 (B).

Tulosten tarkastelua varten laadittiin tieto- koneohjelma, jolla voidaan piirtää laskettujen keskitunnusten sama-arvokäyräkarttoja Suo- men alueelle. Karttaohjelmaa varten tallen- nettiin koko maasta  $20 \text{ km} \times 16.8 \text{ km}$ :n ruu- duissa maanpinnan keskimääräinen korkeus merenpinnasta, joka saatiin neljän systemaati- tisesti sijoitetun pisteen keskiasvona. Kartan perusyksikköinä ovat korkeusruutujen keski- pisteisiin lasketut ilmastotiedot. Kuvassa 5 on esimerkkinä heinäkuun keskilämpötilan alueellinen jakauma laskettuna mallilla  $YN(1,1,1,1,1)$  normaalikauden 1931-1960 keskiarvoilla ja vuoden 1972 arvoilla.

#### 4.2. Lämpösunnan laskenta

Lämpösunnan estimoinnin testiaineisto- na käytettiin vuosien 1972-1974 vuorokau- den keskilämpötiloista  $5 \text{ }^\circ\text{C}$  kynnyslämpötila- lla laskettuja lämpösunnia Helsingissä, Vaasassa, Jyväskylässä, Joensuussa ja Ivalos- sa. Ensin laskettiin lämpösunnat suoraan lämpötilan vuotuisen kulun käyrältä. Lasken- tamenetelmä aliarvioi lämpösunnaa kevääl- lä keskimäärin n. 11 d.d.yksikköä, syksyllä n. 23 d.d.yksikköä ja koko kasvukaudella n. 34 d.d.yksikköä.

Vuorokauden lämpösunnakertymän odo-



tusarvon harhattomaksi laskemiseksi käytettiin luvussa 3.2. kuvattua menetelmää. Keskilämpötilan hajonnat ( $\sigma$ ) valittiin erikseen keväälle ja syksyille kokeellisesti siten, että niillä laskettu lämpösunnan systemaattinen virhe minimoitui. Parhaan tuloksen antoivat  $\sigma=2.5$  °C keväällä ja  $\sigma=3.5$  °C syksyllä. Läm-

pösunnan estimoinnin testitulokset johdettuna harhattomista kuukauden keskilämpötilatiedoista on esitetty taulukossa 9. Koko kasvukaudelle maksimirheet olivat -19 ja +13 d.d.yksikköä. Keskiarvo oli keväällä n. 5 d.d.yksikköä, syksyllä n. 10 d.d.yksikköä ja koko kasvukautena n. 9 d.d.yksikköä.

Taulukko 9. Lämpösunnan estimaatin virheet testiaineistossa.

Table 9. Errors of the estimated effective temperature sum in the test material.

Paikkakunta Locality	Kasvukausi Vegetation period				Kevät Spring Vuosi - Year (y - $\bar{y}$ )d.d.				Syksy Autumn			
	1972	1973	1974	$\bar{x}$	1972	1973	1974	$\bar{x}$	1972	1973	1974	$\bar{x}$
	Helsinki	-1,	5,	-18,	-5,	-1,	-6,	5,	-1,	-1,	11,	-23,
Jyväskylä	2,	5,	-4,	1,	4,	-3,	4,	2,	-2,	8,	-8,	-1,
Vaasa	8,	8,	2,	6,	-1,	-7,	3,	-2,	9,	15,	-1,	8,
Joensuu	1,	14,	8,	8,	9,	3,	8,	7,	-8,	11,	0,	1,
Ivalo	3,	-19,	3,	-4,	3,	-6,	7,	1,	0,	-13,	-4,	-6,
$\bar{x}$	3,	3,	-2,	1,	3,	-4,	5,	1,	0,	6,	-7,	-0,
s				9,1				5,2				10,2

## 5. TULOSTEN TARKASTELU

Tässä työssä on tarkasteltu kolme eri menetelmää kuukauden keskilämpötilan ja sademäärän alueellisessa tasoitamisessa. Tasoituksessa käytettiin tasokoordinaatin lisäksi hyväksi tasoitettavien tunnusten riippuvuutta korkeudesta merenpinnasta, meren läheisyydestä ja alueen järvisyydestä. Samalla tuloseksi saatiin kuukauden keskilämpötilan keskimääräinen tilastollinen riippuvuus näistä tunnuksista normaalikaudella 1931-1960.

Leveysasteen keskimääräiseksi vaikutukseksi kuukauden keskilämpötilaan saatiin heinäkuussa lähes sama tulos kuin keskiarvo Vaajaman (1966) esittämistä leveysasteen vaikutuksista vuorokauden minimi- ja maksimilämpötiloihin. Sen sijaan Vaajama sai leveysasteen vaikutuksen toukokuussa n. 15 % ja syyskuussa n. 30 % suuremmaksi kuin tässä työssä. Pituusasteella ei ole suoraa vaikutusta ilmastoon. Sen kertoimissa on kuitenkin nähtävissä samanlainen vuodenaikojen mukainen vaihtelu kuin mantereisuudella on kuukausittaisiin keskilämpötiloihin.

Tässä työssä saadut korkeusgradientit ovat

itseisarvoltaan keskimäärin n. 0.1 °C pienempiä kuin Suomessakin sovelletut Ångströmin (1958) käyttämät (esim. Solantie 1976). Meren lähivaikutusta kuvaavan merisyysindeksin parhaan tuloksen antavaksi säteeksi saatiin 20 km. Vaajaman (1966) mukaan meren lähivaikutus vuorokauden minimi- ja maksimilämpötiloihin ulottuu n. 5-8 km:n päähän rantaviivasta. Koska meren lähivaikutus on määritelty eri tavoin ja koska merisyysindeksin laskennassa vaikuttavat 8 km:ä kauempana olevat alueet vain n. 5-10 %:n painolla, ei eroa voitane kuitenkaan pitää merkittävänä. Järvisyyden vaikutus kuukauden keskilämpötiloihin saatiin tilastollisesti merkitseväksi kevättalvella ja loppukesällä sekä syksyllä. Tulos poikkeaa Solantien (1976) johtopäätöksestä, että järvisyys on kuukauden keskilämpötilakarttoja tasoitettaessa merkittävä tekijä kesä-elokuussa.

Edellä olevassa tarkastelussa käytetty lineaarinen trendipinta kuvaa maantieteellisten tekijöiden vaikutukset koko maassa yhtä suuriksi. Selittävien muuttujien yhdysvaiku-

tuksia ei mallissa esiinny. Korkeamman asteen trendipinnat antavat mahdollisuuden myös alueellisen vaihtelun ja yhdysvaikutusten tutkimiseen.

Trendipintamenetelmällä saadaan aina alueellisesti jatkuva tasoitustulos. Sen sijaan liukuvien keskiarvojen menetelmässä ja yhdistelmämenetelmässä voi esiintyä alueellisia epäjatkuvuuskohtia alueilla, joilla kohdepisteen ja lähimmän havaintoaseman välinen etäisyys on suurempi kuin parametrin  $d_{max}$  arvo kaavassa (3.1, s. 147). Parametrin  $d_{max}$  arvolla 100 km on tällaista aluetta havaintojakson alussa vuonna 1881 suurin osa maasta, mutta jo 1900-luvun alkupuolella vain osassa Itä- ja Pohjois-Suomea (ks. kuva 1, s. 145).

Liukuvien keskiarvojen menetelmässä käytettiin hyväksi ainoastaan havaintoasemien tasokoordinaatteja. Muiden tekijöiden vaikutus kuvautuu siinä alueittain tasoitussympyrän sisäpuolisten havaintoasemien painotettujen keskiarvojen mukaisesti. Mikäli jonkin osa-alueen havaintoasemat eivät edusta sen keskimääräistä korkeus-, merisyys- ja järvisyyttä, johtaa tällainen menettely alueellisesti harhaiseen tulokseen. Sama havaintoasemien epäedustavuudesta johtuva alueellisten harhojen mahdollisuus on myös pelkkiin tasokoordinaatteihin perustuvassa trendipinnassa. Sekä liukuvien keskiarvojen menetelmän että pinnan  $T(3,3,0,0,0)$  kuukauden keskilämpötilan estimaatin keskiarvoiksi kasvukauden aikana saatiin n. 0.57°C, mikä osoittaa tasokoordinaateista riippumattoman alueellisen vaihtelun suuruuden.

Sademäärän tasoituksessa liukuvien keskiarvojen menetelmällä saatiin pienempi keskiarvo kuin pinnalla  $T(3,3,0,0,0)$ , koska sademäärän vaihtelu on alueellisesti satunnaisempaa kuin lämpötilan vaihtelu.

Tasokoordinaateista riippumattomien tekijöiden suurta vaikutusta kuukauden keskilämpötilaan osoittaa se, että lineaarisen pinnan  $T(1,1,1,1,1)$  keskiarvo oli selvästi pienempi kuin tasokoordinaatteihin perustuvan joustavan pinnan  $T(3,3,0,0,0)$  keskiarvo. Kuukauden sademäärän riippuvuus tässä työssä käytetyistä tasokoordinaateista riippumattomista muuttujista oli selvästi heikompi kuin kuukauden keskilämpötilan vastaava riippuvuus.

Parhaan tuloksen yksittäisen kuukauden keskilämpötilan ja sademäärän tasoituksessa

testikaudella antanut malli, trendipinta  $T(3,3,2,2,2)$ , pystyi selittämään hyvin alueellisen vaihtelun, koska yhdistelmämallissa ta-pahtunut residuaalien alueellinen tasoitus ei enää pienentänyt mallin keskiarvoa. Mallin  $T(3,3,2,2,2)$  keskiarvo, kasvukautena n. 0.30 °C, osoittavatkin havaintoasemien sijainnista ja ympäristöstä johtuvan mikro-vaihtelun suuruutta, jota ei voitane paljoakaan vähentää ilman havaintoasemien lähi-ympäristön kuvaamista.

Yhdistelmämalli  $YN(1,1,1,1,1)$  soveltuu parhaiten pitkien aikasarjojen laskentaan, koska sen antamat tulokset ovat ajan suhteen kaikkein luotettavimpia. Tarkasteluajanjakson alun harvan havaintoasemaverkoston aiheuttama harha ennusteiden kokonaistuloksessa johtuu pääasiassa tarkasteluajanjakson alku-puolen asemaverkoston huonosta alueellisesta edustavuudesta. Asemien lukumäärän ollessa alle 25 sijoittuvat lähes kaikki asemat rannikolle ja Länsi-Suomeen, joten Itä-Suomen estimaatit ovat ekstrapolointeja havaintoaineiston ulkopuolelle. Kuukauden keskilämpötilan estimaatteja voidaan kuitenkin pitää keskimäärin lähes harhattomina vuodesta 1891 lähtien, jolloin toiminnassa oli 35 havaintoasemaa. Kuukauden keskilämpötilan estimaatin keskiarvo olivat tällöin kasvukauden aikana n. 0.50 °C ja sademäärän estimaatin keskiarvo n. 17 mm/kk. Sen sijaan 1880-luvun alun estimaateissa esiintyy selvää harhaisuutta varsinkin Itä-Suomessa.

Lämpösunnan laskennassa on vuorokausikeskilämpötilojen hajonnan huomioon ottaminen välttämätöntä, jos halutaan kuukausien keskilämpötilojen suhteen harhattomalta tasoituskäyrältä lasketut lämpösunnan estimaatit harhattomiksi ja vertailukelpoisiksi vuorokauden keskilämpötiloista lasketujen lämpösunnan estimattien kanssa. Käytettäessä luvussa 3.2 esitettyä menetelmää häviää harha lähes kokonaan ja satunnaisvirhe jää pieneksi verrattuna alueellisesta tasoituksesta johtuvaan virheeseen. Olettamalla, että peräkkäisten kuukausien keskilämpötilojen estimointivirheiden välinen korrelaatio on 1.0, on kasvukauden lämpösunnan estimaatin keskiarvo n. 75 d.d.yksikköä 1890-luvulla ja n. 50 d.d.yksikköä 1970-luvulla. Todellisuudessa korrelaatio on pienempi ja keskiarvoinkin vastaavasti pienempiä. Esitetyt lämpösunnan estimaatin keskiarvoet lienevät kuitenkin lähellä oikeita.

## KIRJALLISUUS

- HEINO, R. 1974. Keskilämpötilan määrittämisestä. Ilmatieteen laitos, tutkimusosasto 50.
- HELMÄKI, U. 1967. Taulukoita ja karttoja Suomen sadeoloista kaudelta 1931–1960. Liite Suomen meteorologiseen vuosikirjaan 66:2–1966.
- HUOVILA, S. 1966. Lämpötilan ja sademäärän kuukausikeskiarvojen todennäköisyydestä Suomessa. Ilmatieteellisen keskuslaitoksen tiedonantoja 11.
- IMSL-Library 2, Reference Manual, Edition 6. 1977. International Mathematical and Statistical Library, INC. Houston, Texas.
- KOLKKI, O. 1966. Taulukoita ja karttoja Suomen lämpöoloista kaudelta 1931–1960. Liite Suomen meteorologiseen vuosikirjaan 65:1a–1965.
- RIPLEY, B. D. 1981. Spatial Statistic. Wiley, New York.
- SEBER, G. A. F. 1977. Linear Regression Analysis. Wiley, New York.
- SOLANTIE, R. 1976. Järvien vaikutus lämpötilan mesoskaala-analyyysiin Suomessa. Ilmatieteen laitoksen tiedonantoja 30.
- VAAJAMA, P. 1966. On the distribution of maximum and minimum temperatures in Finland during the period 1931–1960. Ilmatieteellisen keskuslaitoksen toimituksia 63.
- ÅNGSTRÖM, A. 1958. Sveriges klimat. Andra upplagan. Generalstabens litografiska anstalts förlag, Stockholm.

## SUMMARY

*ESTIMATION OF LOCAL VALUES OF MONTHLY MEAN TEMPERATURE, EFFECTIVE TEMPERATURE SUM AND PRECIPITATION SUM FROM THE MEASUREMENTS MADE BY THE FINNISH METEOROLOGICAL OFFICE*

### 1. Introduction

In studying the relationships between weather and the annual growth of trees, it is of great importance that the weather variables fully represent the conditions at the growing site. Weather observations measured close to the object of study are not always available. In such cases the weather variables have to be derived from observations made at some distance away.

Methods involving the use of moving averages, trend surfaces and their combination are compared in deriving local values of monthly mean temperatures and precipitation sums from the observations made by the Finnish Meteorological Office. An unbiased method for smoothing annual temperature curves and for deriving estimates of the effective temperature sums based on this curve is also presented.

### 2. Material

The basic material comprises the monthly mean temperatures and precipitation sums recorded at meteorological observation stations, which have been published in the Finnish Meteorological Yearbooks 1881–1979. The numbers of annually active stations are presented in Table 1. The station grid in 1881, 1913, 1946 and 1978 is illustrated in Figure 1. Averages of the monthly mean temperatures (Kolkki 1966) and precipitation sums for the meteorological normal period, 1931–1960, were used as an auxiliary material.

The proportions of sea and lake areas were estimated by means of systematic point sampling with nine points in 5 km × 5 km squares. It was thus possible to study the statistical influence of sea and lakes on the monthly mean temperatures and precipitation sums.

### 3. Methods

A good general method for smoothing out meteorological data should fulfill the following requirements:

1. continuity in time
2. continuity in space
3. unbiasedness in relation to the geographical location of the object point
4. small standard deviation

If a particular smoothing method fulfills the first three conditions, then its goodness can be measured by the standard deviation.

In the method of moving averages, the value of the object point is calculated as weighted mean of the observations made at the surrounding stations. Weights are calculated as a function of the distance between stations and the object point (formula 3.1.). If there are no active stations inside the radius of the maximum distance (dmax), then the object point assumes the value of the nearest station.

A trend surface model is a generalization of polynomial regression with longitude, latitude, height above sea

level, sea index, and lake index as independent variables (formula 3.2.). The integer p in formula 3.2. is the order of the trend surface. Trend surface parameters may be estimated with a method based on the orthogonal-polynomial technique suggested by Ripley (1981).

The trend surface was first calculated with plane coordinates. It described the large scale variation. Variables independent of the plane coordinates were added to the model in order to explain the variation caused by the height above sea level, the sea index and the lake index. These indices were determined by the formula 3.1. from the sea and lake cover percentages for the 5 km × 5 km squares.

In this study, the trend surface variables are given in the following order:

- (1) y-coordinate i.e. latitude
- (2) x-coordinate i.e. longitude
- (3) height above sea level
- (4) sea index
- (5) lake index

For example, a surface polynomial with plane coordinates of the third order and other variables of the second order, is written T(3,3,2,2,2). The components of this polynomial model comprise 24 terms altogether.

In the combination model, a trend surface of the temperature or precipitation variable of interest is calculated first. Estimates of the response variable for each observation point are calculated using this trend surface model. The differences between the measured values and the estimated values are smoothed with the method of moving averages. The final result is obtained by adding the trend surface and the smoothed residuals. The resulting combined model is written, for example Y(3,3,2,2,2), where the numbers refer to the order of the respective variable in the trend surface model. Models with trend surface calculated from the mean annual values during the normal period are written, for example YN(1,1,1,1,1).

The reliability of the areal smoothing models was measured by means of their standard deviations. The standard deviation of a regression model was used as a direct estimate of the standard deviation of trend surface model. Standard deviations and biases of the moving averages and combination models were calculated from residuals between the estimates and the values measured at the observation stations. Estimates for each station were derived without observations made on that particular station. Monthly mean temperatures and precipitation sums at all stations during 1969–1978 were used as the testing material. Furthermore, standard deviations of the estimates of the mean monthly temperatures and precipitation sums were calculated for the normal period, 1931–1960.

## 4. Results and conclusions

The effects of the values of parameters dmax and q on the values of the sea and the lake indices were tested with the mean monthly temperature data of the normal period 1931–1960. The parameter values q=1 and dmax=20 km (sea index) and q=1 and dmax=15 km (lake index) gave the lowest standard deviation values with the trend surface T(3,3,2,2,2). These parameter values were used in the calculations.

The trend surface method always generates a surface which is continuous in space. The method of moving average or the combination method may not fulfill the continuity requirement if the distances between the observation stations are greater than the chosen radius dmax. Such situations are common at the beginning of the observation period, but since the beginning of the 20th century there are only a few such areas in the eastern and northern parts of Finland (fig. 1, p. 145).

The moving average method yielded the lowest standard deviations with parameter values dmax=100 km and q=1. These values were used at all calculations with the combination models. Only plane coordinates were used in this method. The effects of the other variables are described as weighted means according to the formula 3.1. If the observation stations in a certain part of the area are not representative with respect to the variables, which are independent of the plane coordinates, then the smoothing results are areally biased. For the same reason areal biases may also appear in the trend surface model T(3,3,0,0,0), which is based merely on the plane coordinates. The standard deviations of the monthly mean temperatures estimated with both moving averages and T(3,3,0,0,0) models were 0.57 °C for the growing season.

The significantly lower standard deviation in the trend surface model T(1,1,1,1,1), as compared to the trend surface T(3,3,0,0,0), shows the influence of the variables, which are independent of the plane coordinates. Monthly precipitation sums are not as dependent on the altitude, sea index and lake index as the monthly mean temperatures.

The coefficients of the trend surface YN(1,1,1,1,1) show the statistical mean effects of latitude, longitude, height above sea level, the sea index, and the lake index on the averages of the monthly mean temperatures during 1931–1960 (Table 8).

Trend surface model T(3,3,2,2,2), which gives the lowest standard deviation, yields already unbiased estimates of the monthly mean temperatures and precipitation sums. Smoothing the residuals in the combination model Y(3,3,2,2,2) does not decrease the standard deviation of the estimates. The standard deviation of the model T(3,3,1,1,1), about 0.30 °C, results from the microscale variation caused by the location of the observa-

tion stations.

The results presented above are valid only during the test period 1969–1978 when there was about 150 active observation stations located relatively regularly. The influence of changes in the station grid was studied using the observations made in 1978. The biases and standard deviations of the smoothing models were calculated from the residuals of all stations (154 altogether). The first smoothing was made with all stations. In the second phase, only the stations which were also active in 1968 were used. This procedure was continued until 1898. The number of stations active continuously from 1898 to 1978 was only 7. The method gives a good approximation of the real change in the spatial distribution of the stations as a function of the number of active stations.

At least 26 observations are required to calculate the trend surface  $T(3,3,2,2,2)$ . The model  $T(3,3,2,2,2)$  was tested with the material of the end of the 19th century and the beginning of the 20th century. The resulting trend surface was too curved and the model was illogical in eastern Finland, since the observation stations were clustered on the western coast.

Combination model  $YN(1,1,1,1,1)$  is the most suitable for calculating long local time series, because it gives the most reliable results with respect to time. Bias and standard error as a function of the frequency of active observation stations are presented in Figures 3 and 4. The high standard errors and biases are caused by the poor areal representation of the observation stations. Estimates of monthly mean temperatures are almost unbiased since 1891 when there were 35 active stations. The monthly standard deviations of the mean temperatures and precipitation sums decrease over the period 1891 to 1978 from 0.50 °C to 0.36 °C and from 17 mm/month to 13 mm/month. In order to derive meteorological maps the height above sea level was determined for 20 km × 16.8 km squares with four points located systematically. Figures 5a and 5b give examples of the results.

## 5. Estimation of the effective temperature sum

The annual smoothing curve for temperature is estimated from monthly mean temperatures by means of a spline-function. This smoothing curve yields biased

monthly mean temperatures. The bias is corrected with another smoothing curve, which is calculated from the residuals between the measured monthly mean temperatures and the monthly mean temperatures obtained from the first smoothing curve. The result is unbiased in relation to the monthly mean temperatures.

The estimates of the effective temperature sum calculated directly from the unbiased annual temperature smoothing curve are biased, because the procedure does not take into account the variation in the diurnal mean temperatures. It is possible to calculate unbiased estimates of the effective temperature sums by means of the formulas 3.3 and 3.4, if we suppose that the distribution of the diurnal mean temperatures derived from the smoothing curve is normal (see also Figure 2). The product

$$P_0 \times m,$$

where

$P_0$  = the probability of a higher temperature than the minimum effective temperature

$m$  = the expectation of a temperature higher than the minimum effective temperature

is the expectation in the diurnal increase in the effective temperature sum. The estimate of the annual or periodic effective temperature sum can be calculated by integrating the diurnal expectations over the period.

The method for estimating the effective temperature sum was tested with the effective temperature sums calculated from diurnal mean temperatures during the period 1972–1974 in Helsinki, Vaasa, Jyväskylä, Joensuu and Ivalo. The effective minimum temperature was 5 °C. As the temperature sums were integrated from the annual smoothing curve, the mean underestimation in the spring was 11 d.d., in the autumn 23 d.d. and for the whole growing season 34 d.d. As the standard deviations of the diurnal mean temperatures were supposed to be 2.5 °C in the spring and 3.5 °C in the autumn the estimates were unbiased and the standard deviation of the estimate was 5 d.d. in the spring, 10 d.d. in the autumn and 10 d.d. for the whole growing season. Consequently the local estimates of the effective temperature sum during the growing season have a maximum standard deviation of 50 d.d. at the end of the period 1890–1979 and 75 d.d. at the beginning of the same period.