

ÅNGSTRÖMIN HALLANENNUSTUSMENETELMÄN SOVELTAMISESTA SUOMEN OLOIHIN

MATTI FRANSSILA

Ilmatieteellinen keskuslaitos, Helsinki

Saapunut 10. 3. 1955

Mahdollisimman tehokas ja taloudellinen hallantorjunta edellyttää riittävän ajoissa annettuja hallanennustuksia. Sen vuoksi on eri maissa kehitetty joukko menetelmiä, joilla yön alin lämpötila voidaan määrittää edellisenä päivänä suoritettujen havaintojen avulla. Nämä menetelmät perustuvat lakeihin, joita maanpinnan läheisen ilmakerroksen yöllinen jäähtyminen noudattaa.

Ilman yöllinen jäähtyminen jaetaan tavallisesti kahteen osaan, staattiseen ja dynamiseen.

Staattisella jäähtymisellä tarkoitetaan maanpinnan ja ilmakehän ulossäteilystä johtuvaa jäähtymistä. Sen voimakkuus riippuu paitsi efektiivisen ulossäteilyn voimakkuudesta myös vaihdosta ja maan fysikaalisista ominaisuuksista. Se on voimakkainta huonosti lämpöjohtavilla mailla yön ollessa selkeä ja tyyni. Näissä oloissa maanpinta menettää runsaasti lämpöä ulossäteilyn välityksellä, mutta maan pintakerroksista ja maanpinnan läheisistä ilmakerroksista maanpintaa kohti suuntautuva lämmön siirtyminen on hidasta.

Dynaamisella jäähtymisellä tarkoitetaan paikalle virtaavan kylmän ilman aiheuttamaa jäähtymistä. Se on voimakkainta kylmän rintaman kulkiessa paikan yli, mutta saman ilmamassan piirissäkin sillä on jonkin verran merkitystä.

Edellä mainittuja osia ei voida tarkasti erottaa toisistaan, sillä muuttamalla ilmakehän lämpötila- ja kosteusoloja dynaamiset tekijät aiheuttavat muutoksia efektiivisen ulossäteilyn voimakkuudessa ja vaikuttavat siten staattisen jäähtymisen suuruuteen.

Ilman staattinen jäähtyminen tietyllä paikalla voidaan ennustaa melkoisella tarkkuudella vain tällä paikalla suoritettujen meteorologisten havaintojen avulla. Dynaamisen jäähtymisen ennustaminen sensijaan edellyttää säätietoja varsin laajalta alueelta. Se on sen vuoksi mahdollista vain sääkarttojen avulla.

Ilman staattisen jäähtymisen ennustamiseksi kehitetyt menetelmät voidaan jakaa kahteen päätyyppiin:

1) menetelmiin, jotka ottavat huomioon efektiivisen ulossäteilyn ja vaihdon voimakkuuden sekä maan fysikaaliset ominaisuudet ja

2) menetelmiin, jotka perustuvat pääasiassa 2 m korkeudessa suoritettuihin lämpötila- ja kosteusmittauksiin.

Edelliseen ryhmään kuuluvat menetelmät ovat teoreettiselta kannalta parempia, sillä ne lähtevät perustekijöistä, jotka määräävät ilman yöllisen jäähtymisen voimakkuuden. Käytännössä ne ovat sensijaan hankalampia, sillä niiden käyttö edellyttää varsin vaativia ja suuritöisiä mittauksia.

Valittaessa jollekin tietylle seudulle parhaiten sopivaa menetelmää, on kiinnitettävä huomiota seudun ilmastoon ja maaston luonteeseen. Ryhmään 1) kuuluvien, varman teoreettisen pohjan omaavien menetelmien käyttö tulee kysymykseen ennenkaikkea laajoilla, homogeenisilla alueilla, joilla minimilämpötila ei sanottavasti vaihtelee vaakasuorassa suunnassa ja jossa yhdellä paikalla suoritettavat havainnot sen vuoksi voidaan yleistää melko laajalle alueelle. Epähomogeenisilla alueilla sen sijaan, joilla minimilämpötila vaihtelee huomattavasti maaston laadusta riippuen, on edullisempaa käyttää yksinkertaisempia ryhmään 2) kuuluvia menetelmiä, koska lämpötilaminimin ennustamisessa ei missään tapauksessa voida saavuttaa suurta tarkkuutta.

Meidän mikroilmastollisesti varsin epähomogeenisessa maassamme tulevat lähinnä kysymykseen ryhmään 2) kuuluvat yksinkertaiset menetelmät. Tutkittuani joukon näitä menetelmiä olen tullut siihen tulokseen, että ÅNGSTRÖMIN (1) kehittämä menetelmä soveltuu parhaiten meidän oloihimme.

ÅNGSTRÖM on lähtenyt DEFANTIN yöllistä jäähtymistä esittävästä kaavasta

$$(1) \quad dT = a (T - \Theta) dt,$$

jossa dT on lämpötilan muutos ajassa dt , T ilman lämpötila, Θ eräs ilman absoluuttisen kosteuden funktio ja a eräs vakio. Integroimalla tämän yhtälön sekä käyttämällä Θ :lle ja kyllästetyn vesihöyryn paineelle eräitä likimääräisiä lausekkeita hän saa vuorokauden minimilämpötilalle t_m muotoa

$$(2) \quad t_m = Ct_1 - C_0 t_0 - k$$

olevan lausekkeen, jossa t_1 on psykrometrin kuivan lämpömittarin ja t_0 kostean lämpömittarin lukema sekä C , C_0 ja k vakioita, jotka riippuvat pilvisyydestä ja paikallisista tekijöistä sekä siitä, minä vuoden- ja vuorokauden aikana havainnot on suoritettu. ÅNGSTRÖM on saanut C :lle arvoja, jotka vaihtelevat välillä 0.83—1.12, ja C_0 :lle arvoja, jotka ovat välillä 0.12—0.15.

MEINANDER (3) ja FRANSSILA (4) ovat tutkineet ÅNGSTRÖMIN yhtälön käyttökelpoisuutta Suomen oloissa, edellinen Turun lentokentällä v. 1938—41, jälkimmäinen Malmin lentokentällä v. 1946—47 suoritettujen havaintojen avulla. Näiden tutkimusten mukaan voidaan tällä menetelmällä saavuttaa meidän oloissamme noin 2°:een tarkkuus. Kun minimilämpötilan paikalliset vaihtelut ovat meillä varsin suuria, on tulosta pidettävä melko tyydyttävänä.

Koska näyttää siltä, että ÅNGSTRÖMIN menetelmä on meidän oloihimme varsin sopiva, olen laskenut kaavassa (2) esiintyvät vakiot 11 meikäläistä sääasemaa varten. Seuraavassa taulukossa esitetään näiden asemien koordinaatit (φ ; λ) ja korkeus (H) sekä lyhyt kuvaus aseman ympäristöstä.

Taulukko 1. Sääasemien koordinaatit ja korkeus sekä ympäristön kuvaus

Asema	φ	λ	H	Ympäristön kuvaus
Turku	60°27'	25°11'	6	Lentokenttä
Malmi	60°15'	25°03'	15	Lentokenttä
Jokioinen	60°49'	23°28'	85	Hiukan ympäristöään korkeammalla sijaitseva puistikko asutuskeskuksessa
Niinisalo	61°51'	22°28'	134	Paljaaksihakattu kangas
Luonetjärvi	62°24'	25°40'	141	Lentokenttä
Rissala	63°00'	27°48'	96	Lentokenttä, kolmelta puolen veden ympäröimä
Ylistaro	62°57'	22°53'	50	Laajahkon viljelysaukean reuna
Kauhava	63°06'	23°05'	40	Lentokenttä
Kajaani	64°13'	27°43'	140	Itään viettävä rinne pienen puutarha-alueen reu- nassa
Kemi	65°47'	24°33'	10	Lentokenttä
Sodankylä	67°22'	26°39'	178	Harvaa mäntymetsää kasvavalla kankaalla sijait- seva pihamaa

Ko. asemista edustavat Ylistaro ja lentokenttäasemat (lukuunottamatta Rissalaa, jonka ilmasto on sitä ympäröivien vesien vuoksi melko tasainen) tasaisilla viljelysalueilla vallitsevia olosuhteita.

Yhtälön (2) kertoimien määrittämiseen käytettiin tavallisella psykrometrillä suoritettuja kosteushavaintoja sekä alkoholiminimilämpömittarilla mitattuja minimilämpötilan arvoja. Mittarit oli sijoitettu englantilaiseen kojuun 2 m korkeudelle.

Kuten edellä mainittiin, edellyttää ÅNGSTRÖMIN menetelmä, että sama ilmassa, jossa psykrometrihavainnot on suoritettu, pysyy vallitsevana seuraavaan aamuun asti. Tutkimuksessa käytettiin sen vuoksi ainoastaan sellaisten vuorokausien havaintoja, joiden aikana (klo 8:sta seuraavaan aamuun laskettuna) ilmassa ei vaihtunut.

Yhtälön (2) vakioiden määrittäminen suoritettiin seuraavalla tavalla:

Ensin asetettiin ÅNGSTRÖMIN mukaan likimääräisesti $C_1 = 1$ ja sen jälkeen määritettiin vakiot C_0 ja k pienimmän neliösumman keinoa käyttäen. C_0 :lle saatiin tällä tavoin arvoja, jotka vaihtelivat välillä 0.08—0.18 keskiarvon ollessa 0.13. Kun termi $C_0 t_0$ on suhteellisen pieni, asetettiin kaikille sääasemille yksinkertaisuuden vuoksi $C_0 = 0.1$. Sijoittamalla nämä C_1 :n ja C_0 :n arvot yhtälöön (2) saadaan:

$$(2) \quad t_m = t - 0.1 t_0 - k$$

Sen jälkeen kun vakiot C_0 ja C_1 oli määritetty tutkittiin vakion k riippuvaisuutta paikallisista tekijöistä, havaintoajasta ja vuodenajasta sekä pilvisyydestä ja tuulennopeudesta. Tämä tutkimus osoittaa että k voidaan kirjoittaa muotoon

$$k = a - b \left(\frac{N}{10} \right)^{1.74} - c v,$$

jossa N on pilvisuus (asteikossa 0—10) ja v tuulen nopeus (m/sek) sekä a , b ja c vakioita, jotka riippuvat paikallisista tekijöistä, ja siitä vuoden- ja vuorokauden-

ajasta, jona havainnot on suoritettu. ÅNGSTRÖMIN yhtälö voidaan siis kirjoittaa muotoon

$$(3) \quad t_m = t - 0.1 t_o - a + b \left(\frac{N}{10} \right)^{1.74} + c v$$

Taulukko 2. Vakion a arvot

Asema	Toukokuu			Kesäkuu			Heinäkuu			Elokuu			Syyskuu		
	Havaintoaika														
	8	14	20	8	14	20	8	14	20	8	14	20	8	14	20
Turku	5.0	7.6	6.5	3.2	4.8	4.2	3.0	4.1	3.4	2.9	4.6	3.7	3.5	5.5	3.8
Malmi	5.0	6.6	6.2	3.6	4.3	4.1	3.7	4.5	4.1	4.7	5.9	5.4	5.2	7.0	5.5
Jokioinen ..	4.4	7.2	6.3	3.5	5.1	4.3	3.0	4.6	4.0	3.6	5.9	4.9	3.5	6.4	4.3
Niinisalo	2.8	5.4	4.2	2.2	3.8	2.9	1.2	2.5	1.8	1.5	3.5	2.6	2.8	5.3	3.1
Luonetjärvi..	4.3	6.3	5.5	3.5	4.6	4.3	4.0	5.0	4.7	5.0	6.6	5.4	5.9	8.1	6.3
Rissala	2.3	4.4	3.8	0.0	1.4	1.0	0.9	0.7	0.6	1.3	2.7	2.1	2.4	3.9	2.9
Ylistaro	6.2	8.8	7.6	4.6	6.7	5.8	4.0	5.8	5.0	4.5	7.9	6.2	3.8	7.8	4.8
Kauhava ..	5.9	9.2	7.5	4.5	6.2	5.7	4.9	5.8	5.5	6.5	8.6	7.7	7.1	9.5	7.4
Kajaani	3.0	5.0	4.6	1.8	2.9	2.9	1.1	2.3	2.1	2.5	3.9	3.1	2.4	3.9	2.5
Kemi	7.1	8.3	6.8	4.4	5.8	4.9	3.7	5.0	4.9	4.4	6.2	5.7	4.3	6.3	5.0
Sodankylä ..	4.1	5.9	5.3	3.3	4.5	4.0	3.2	4.5	4.5	4.7	6.8	6.2	4.5	6.9	5.3

Tässä yhtälössä esiintyvien vakioiden a , b ja c arvot eri sääasemilla esitetään taulukoissa 2 ja 3. Niistä ilmenee, että vakiot riippuvat huomattavasti paikallisista tekijöistä. Koska lämpötilan amplitudi kuvaa melko hyvin paikan mikroilmastoa, on odotettavissa, että ko. vakiot riippuvat amplitudin suuruudesta. Senvuoksi las-

Taulukko 3. Vakioiden b ja c arvot

Asema	b					c
	Kuukausi					
	V	VI	VII	VIII	IX	V—IX
Turku	5.2	3.4	2.0	2.3	2.3	0.16
Malmi	3.1	2.3	2.3	3.4	3.4	0.27
Jokioinen	4.1	2.0	2.4	3.1	3.5	0.27
Niinisalo	2.7	1.8	0.6	1.0	3.2	0.07
Luonetjärvi.....	3.0	2.0	2.7	4.0	5.3	0.13
Rissala	1.6	0.3	0.3	1.9	2.1	0.04
Ylistaro	6.2	5.2	3.1	3.4	3.6	0.29
Kauhava	6.1	2.3	2.3	5.6	5.7	0.17
Kajaani	3.5	2.0	2.0	3.2	3.3	0.07
Kemi	3.1	2.0	1.2	3.2	3.3	0.37
Sodankylä	2.7	3.0	3.4	3.5	3.8	0.16

kettiin lämpötilan amplitudin A ja vakioiden a , b ja c väliset korrelatiot. Saadut korrelatiokertoimet vaihtelivat jonkin verran riippuen siitä, minkä kuukauden ja vuorokauden ajan havainnoista ne oli laskettu. Keskimäärin A :n ja a :n väliselle korrelatiolle saatiin arvo 0.75 sekä A :n ja b :n väliselle korrelatiolle arvo 0.57. Pienin korrelatiokerroin (0.39) saatiin A :n ja c :n väliselle korrelatiolle, mikä johtunee siitä, että eri sääasemilla suoritettut tuulihavainnot eivät ole paikallisista tekijöistä ja anemometrin erilaisesta asemasta johtuen täysin toisiinsa verrattavissa.

Koska lämpötilan amplitudin A ja vakioiden a , b ja c välillä vallitsee suhteellisen hyvä korrelatio, voidaan ko. vakiot esittää melko tarkasti seuraavilla amplitudin A lineaarisilla funktioilla.

$$(4) \quad \begin{aligned} a &= 1.3 (A - 10) + a_{10} \\ b &= 0.9 (A - 10) + b_{10} \\ c &= 0.08 (A - 10) + 0.13 \end{aligned}$$

Yhtälössä esiintyvien vakioiden a_{10} ja b_{10} arvot ilmenevät taulukosta 4.

Taulukko 4. Vakioiden a_{10} ja b_{10} arvot

a_{10}					b_{10}									
Havaintoaika														
Klo 14		Klo 20			Klo 8, 14, 20									
Kuukausi														
V	VI	VII	VIII	IX	V	VI	VII	VIII	IX	V	VI	VII	VIII	IX
4.5	3.9	2.0	4.9	8.5	3.5	3.3	1.7	4.0	6.6	2.2	1.9	0.6	2.6	5.0

Yhtälöiden (4) avulla voidaan suuret a , b ja c laskea jokaista paikkaa varten, josta on lämpötilahavainnoja saatavissa lämpötilan amplitudin laskemiseksi. a ja b saadaan näiden yhtälöiden avulla määritetyksi $0.5^\circ - 1.0^\circ$:n tarkkuudella.

Yhtälön (3) avulla laskettujen minimilämpötilojen tarkkuus käy selville taulukosta 5, jossa esitetään lasketun minimilämpötilan t_m keskipoikkeus, havaitusta minimilämpötilasta t_m' ($\vartheta = \frac{1}{n} \sum |t_m - t_m'|$)

Keskipoikkeuksen arvo riippuu melkoisesti paikallisista tekijöistä. Se vaihtelee yleensä 1:stä 2:een asteeseen ja on pienin niillä sääasemilla, joilla vallitsee tasaiset lämpöolot. Keskipoikkeus riippuu myös jonkin verran vuodenajasta ollen pienin keskikesällä.

Havaintoajalla on suhteellisen vähän vaikutusta saavutettuun tarkkuuteen. Klo 20 suoritetuilla havainnoilla saavutetaan keskimäärin vain 0.2° suurempi tarkkuus kuin klo 8 havainnoja käytettäessä.

Käytettäessä taulukoissa 2 ja 3 esitettyjä vakioita saadaan yhtälön (3) avulla yön alin lämpötila 2 m korkeudessa. Jotta saataisiin kasvillisuuskerroksen alin lämpötila, jonka tunteminen on hallanennustuksen kannalta tärkeintä, on yhtälön

Taulukko 5. Laskettujen lämpötilaminimien keskiarvot (9) vastaavista havaituista arvoista

Asema	Toukokuu			Kesäkuu			Heinäkuu			Elokuu			Syyskuu			Touko-syyskuu		
	Havaintoaika																	
	8	14	20	8	14	20	8	14	20	8	14	20	8	14	20	8	14	20
Turku	1.9	1.8	1.7	1.9	1.6	1.8	1.7	1.9	1.7	2.2	1.9	1.6	3.0	2.7	2.2	2.1	2.0	1.8
Malmi	1.8	1.8	1.8	1.6	1.5	1.5	1.9	1.6	1.6	1.8	1.9	1.9	3.0	3.1	2.4	2.2	2.0	1.8
Jokioinen	1.8	1.7	2.0	1.1	1.1	1.2	1.5	1.4	1.4	1.8	1.4	1.3	2.2	2.2	1.8	1.7	1.6	1.6
Niinisalo ..	1.6	1.6	1.5	1.7	1.6	1.2	1.3	1.2	1.0	1.2	1.0	0.9	1.8	1.6	1.3	1.5	1.4	1.6
Luonetjärvi	2.0	2.0	2.1	1.7	1.7	1.5	1.6	1.3	1.3	1.8	1.7	1.5	2.0	1.6	1.6	1.8	1.7	1.6
Rissala ..	1.6	1.7	1.5	1.6	1.1	1.0	1.3	1.0	0.9	1.4	1.2	1.1	1.3	1.4	1.2	1.4	1.3	1.1
Ylistaro ..	1.8	1.5	1.5	2.0	1.7	1.7	1.9	1.8	2.0	2.4	1.9	2.1	2.3	2.2	2.2	2.1	1.8	1.9
Kauhava	2.0	2.0	1.9	2.1	2.1	1.9	2.2	1.7	1.9	2.2	2.0	1.9	2.3	2.1	2.0	2.2	2.0	1.9
Kajaani ..	1.5	1.4	1.5	1.6	1.4	1.3	1.4	1.2	1.2	1.7	1.4	1.3	1.7	1.4	1.3	1.6	1.4	1.3
Kemi	2.1	2.3	2.0	1.8	2.0	1.8	1.7	1.6	1.6	2.0	2.0	2.2	1.7	2.2	2.3	1.9	2.0	2.0
Sodankylä	1.6	1.3	1.5	1.3	1.2	1.3	1.7	1.5	1.3	2.2	2.0	1.8	2.4	2.4	2.0	1.8	1.7	1.6

(3) avulla laskettuihin arvoihin tehtävä korjaus, jonka arvo riippuu pilvisyydestä, tuulen nopeudesta ja paikallisista tekijöistä. Tämän korjauksen arvoa ei valitettavasti tarkasti tunneta, sillä meillä ei ole riittävästi selvitetty maanpinnan läheisen ilmakehän lämpöoloja. Jonkinlaisen käsityksen antamiseksi asioista mainittakoon kuitenkin, että eräiden maassamme suoritettujen mikroilmastollisten havaintojen mukaan kasvillisuuskerroksessa on selkeinä tyyninä öinä 3—4° ja täysin pilvisinä öinä 0.2°—0.5° kylmempää kuin 2 m korkeudessa. Selkeällä tyynellä säällä, jolloin hallaa pääasiassa esiintyy, on yhtälön (3) mukaan lasketuista arvoista siis vähennettävä 3—4 astetta, kasvillisuuskerroksen alimman lämpötilan saamiseksi.

KIRJALLISUUTTA

- (1) ÅNGSTRÖM, A. Studies of the Frost Problem I, II and III. Geografiska annaler 1920, 1921, 1923.
- (2) DEFANT, A. Die nächtliche Abkühlung der unteren Luftschichten und der Erdoberfläche in Abhängigkeit vom Wasserdampfgehalt der Atmosphäre. Sitz. ber. d. Akad. d. Wissenschaften in Wien, Mothem. naturw. Kl. II a, 125.B., 10 H.
- (3) MEINANDER, RUNAR 1942. Beräkning av det nattliga temperaturminimet vid frostprognoser. Terra 54.
- (4) FRANSSILA, MATTI 1948. On the Forecasting of Frost with ÅNGSTRÖM's Formula. Geophysica 3. Helsinki.

Zusammenfassung:

ÜBER DIE ANWENDUNG DER ÄNGSTRÖM'SCHEN METHODE DER FROSTVORHERSAGE
IN BEZIEHUNG AUF FINNISCHE VERHÄLTNISSE

MATTI FRANSSILA

Meteorologische Zentralanstalt, Helsinki

Von der Ängström'schen Formel zur Vorausberechnung des nächtlichen Temperaturminimums ausgehend wird eine Gleichung von der Form

$$(1) \quad t_m = t_o - 0.1 t_1 - a + b \left(\frac{N}{10} \right)^{1.74} + cv$$

hergeleitet, wo t_1 die Temperatur des Trockenens und t_o die Temperatur des feuchten Thermometers, sowie N die Bewölkung und v die Windgeschwindigkeit sind. Die Konstanten a , b und c in dieser Gleichung werden für einige finnische Wetterstationen bestimmt und die Abhängigkeit derselben von der Jahres- und Tageszeit sowie von lokalen Faktoren untersucht. Es wird nachgewiesen, dass die Konstanten eine ziemlich gute Korrelation zu der täglichen Temperaturamplitude haben, so dass sie durch lineare Funktionen der Amplitude ausgedrückt werden können.

Für die mittlere Abweichung der nach der Gleichung (1) berechneten Temperaturminima von den beobachteten Temperaturminima werden Werte von $1-2^\circ$ C erhalten.