

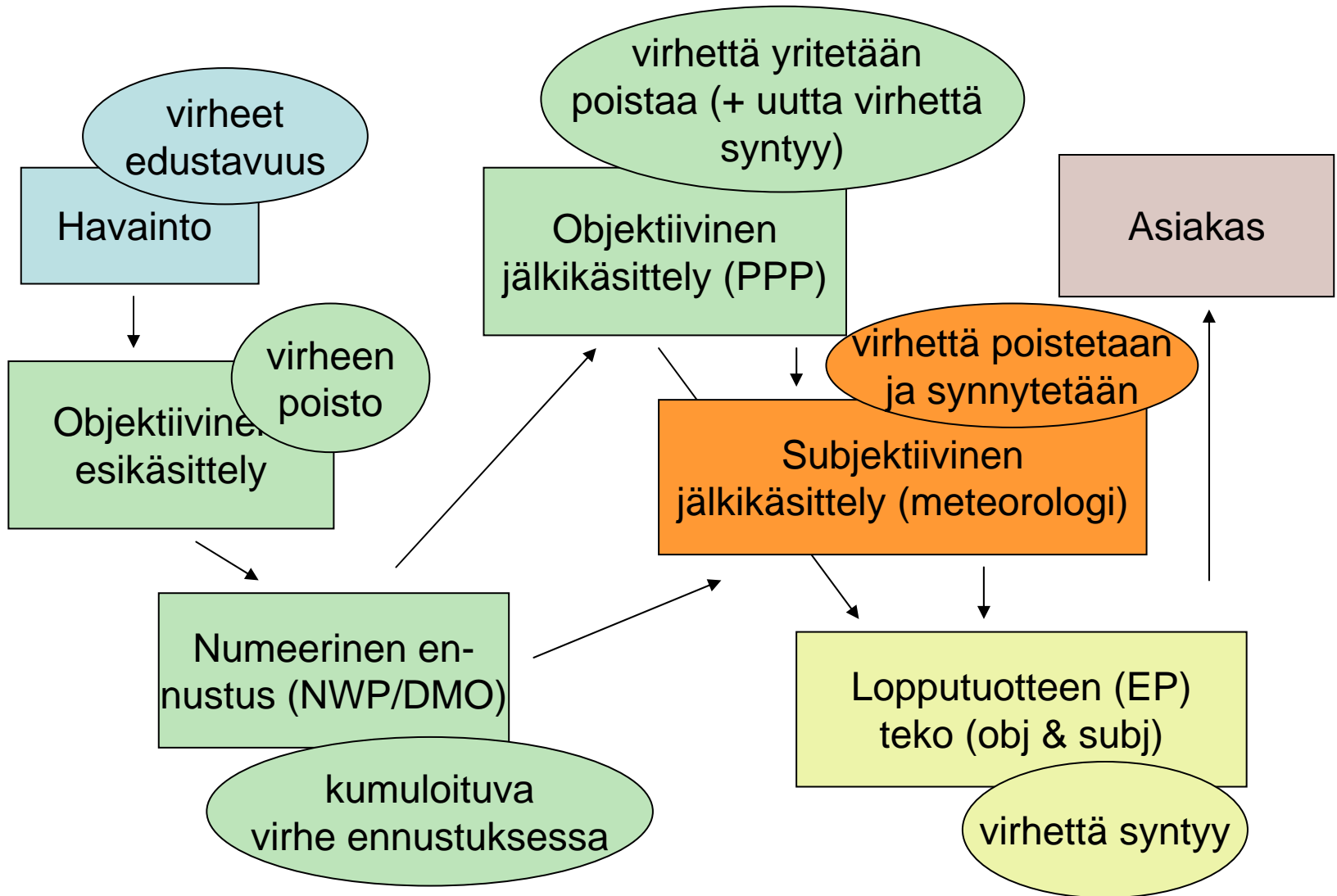
Varmuudesta epävarmuuteen

1. Yleistä ennustamiseen liittyvästä epävarmuudesta
2. Havaintojen epävarmuus ja edustavuus
3. Ennustettavuus
4. Sääennusteiden verifiointi
 1. Jatkuvat suureet
 2. Luokitellut suureet
 3. Todennäköisyysennusteet
5. Esimerkkejä

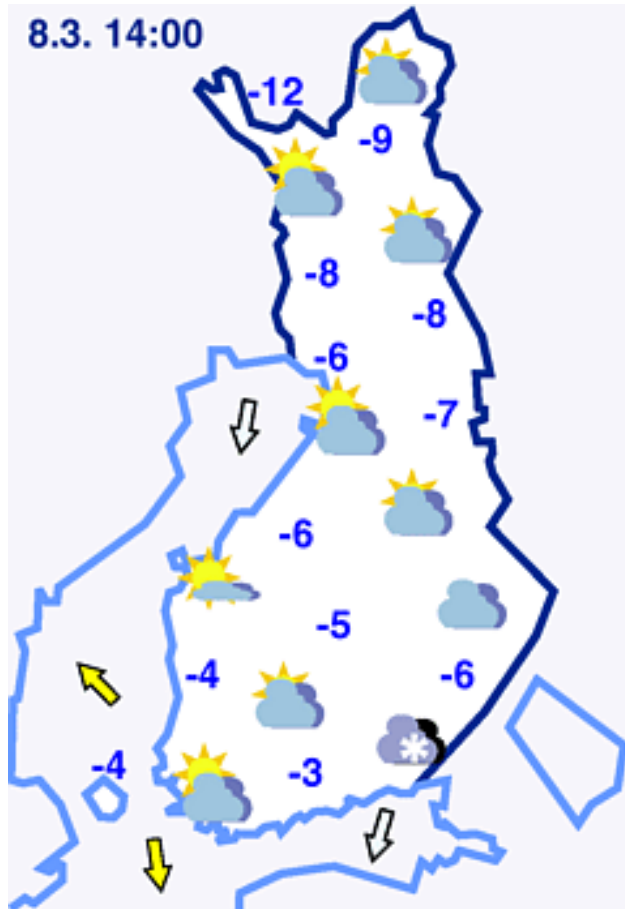
1. Yleistä ennustamiseen liittyvästä epävarmuudesta

- Ennustamiseen liittyy virhettä, joka kasvaa ennustusajan pidentyessä. Lopulta virhe kasvaa niin suureksi, että ennuste on käyttökelvoton. Käyttökelpoisuuden raja riippuu ennusteen käyttötarkoituksesta ja käyttäjän prosessista.
- Ennusteen meteorologista laadunarviointia kutsutaan ammattislangissa verifiointiksi. Siinä ennustetta verrataan havaintoihin. Lopputuotteita verifioitaessa käytetään piste-ennusteita ja ennusteiden laatua kuvattaessa käytetään monia tilastollisia tunnuslukuja.
- Lisäksi voidaan meteorologisia ennustekenttiä (NWP) verifioida analysoituja kenttiä vastaan ja tarkastella tuloksia alueellisina keskiarvoina.
- Meteorologisella laaduntarkkailulla on merkitystä kaikissa vaiheissa (havaintotoiminta, numeerinen ennustaminen (DMO/NWP), tilastollisesti jälkikäsitellyt tuotteet (PPP), lopputuotteet (EP), asiakastuotteet,...)
- Usein verifiointilla (laaduntarkkailulla) yritetään selvittää sisäisen prosessin eri osissa syntyvä lisäarvo lopulliseen tuotteeseen.

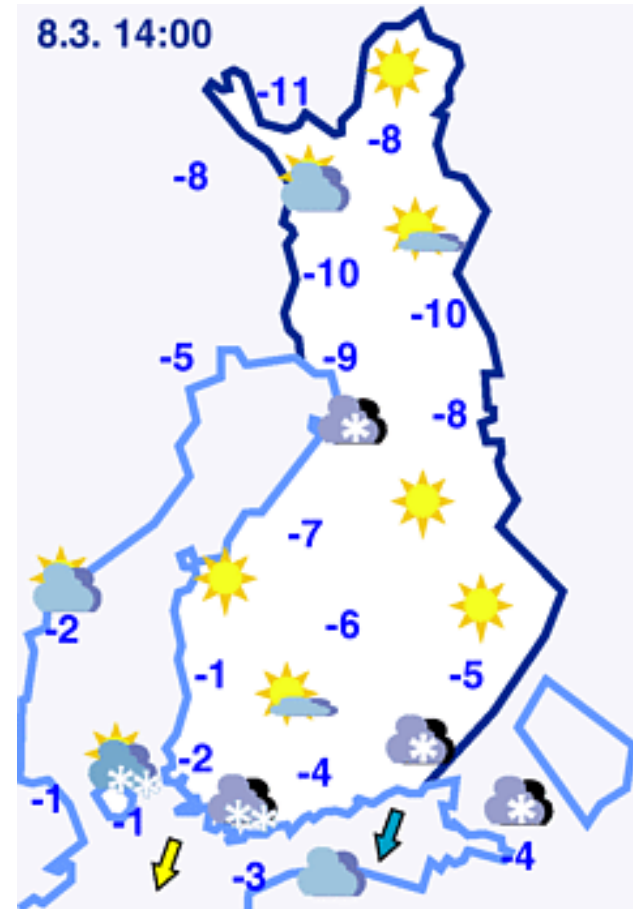
Prosessi: prosessin eri osissa epävarmuus kasvaa



Ennuste ja havainto (esimerkki 1)

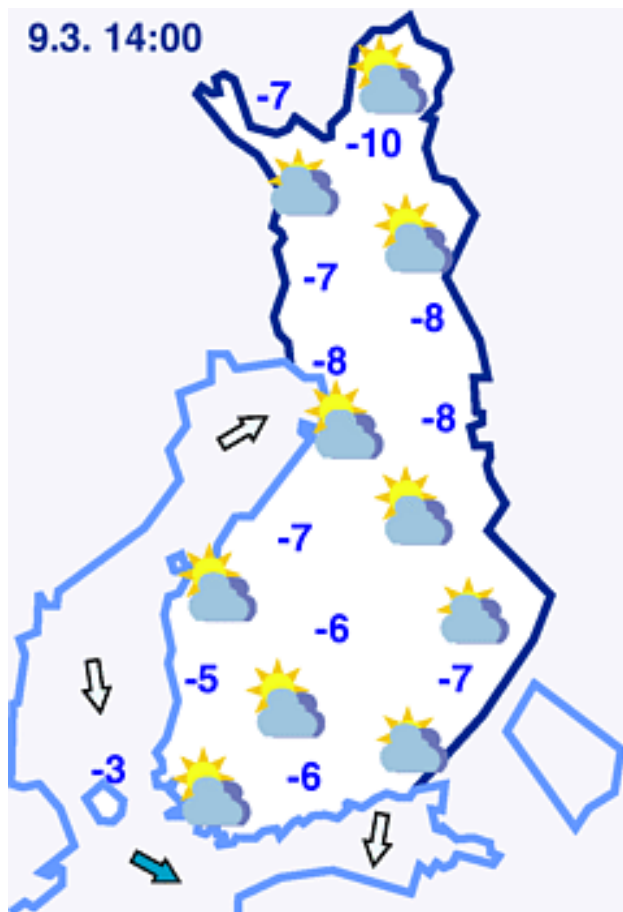


1 vuorokauden ennuste

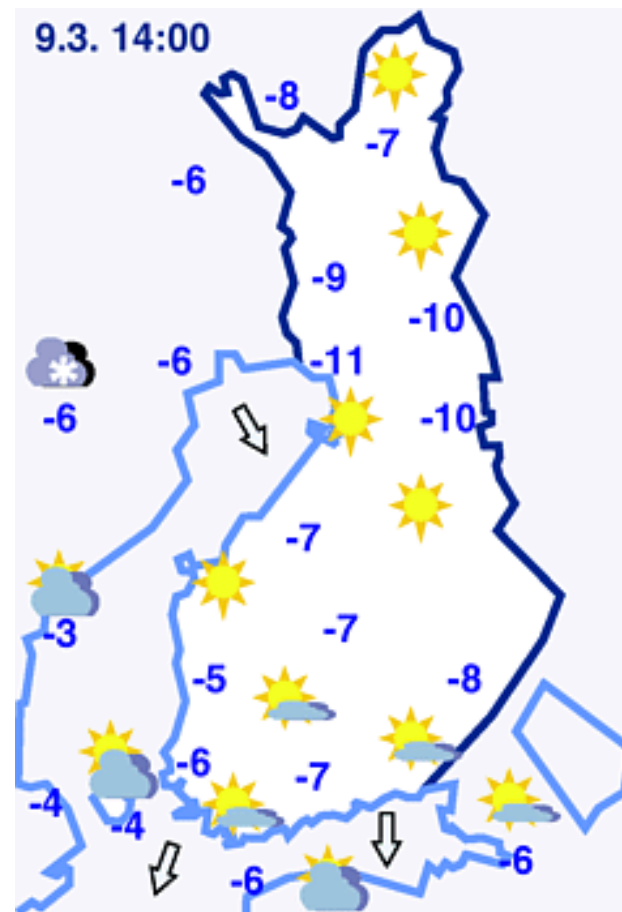


vastaava havainto

Ennuste ja havainto (esimerkki 2)



2 vuorokauden ennuste

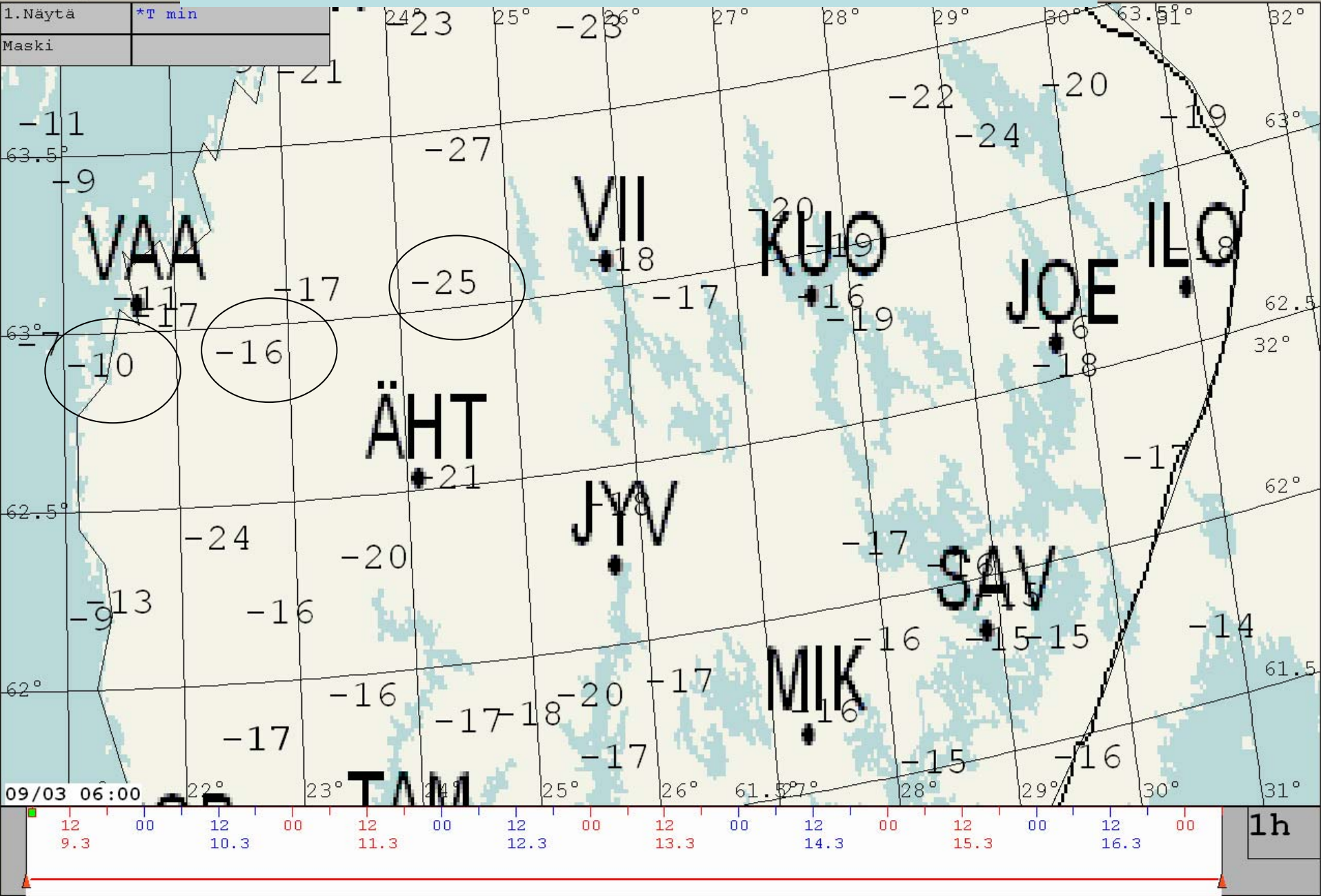


vastaava havainto

2. Havaintojen epävarmuus ja edustavuus

- **Ennuste ja havainto edustavat ehkä eri asiaa** (eri ajanhetki, eri paikka, erilainen mittauskorkeus, havaintopaikan katveet tuulelle, auringonsäteilylle,....)
- Alkuperäisessä numeerisessa ennusteessa oleva **hilaväli** (esim. 22 km x 22 km vastaa pinta-alaa 484 km², vert. Helsingin ja Vantaan yhteinen maapinta-ala on 426 km²) **melko suuri pienimittakaavaisten ilmiöiden kuvaamiseen.**
- Mittauspaikat on valittu siten, että mittarit voidaan yleensä asentaa. Esim. avomerellä sopivia mittauspaikkoja ei ole.
- Joissain tapauksissa malli ja havainto edustavat eri asiaa tai verifioitava suure on johdettu epäsuorasti (esim. toisen mallin avulla mallin muista tiedoista).
- Havainnoissa tai ennusteissa voi olla virheitä, jotka ovat tulleet esim. viestityksen tai muun käsittelyn yhteydessä (outliers).

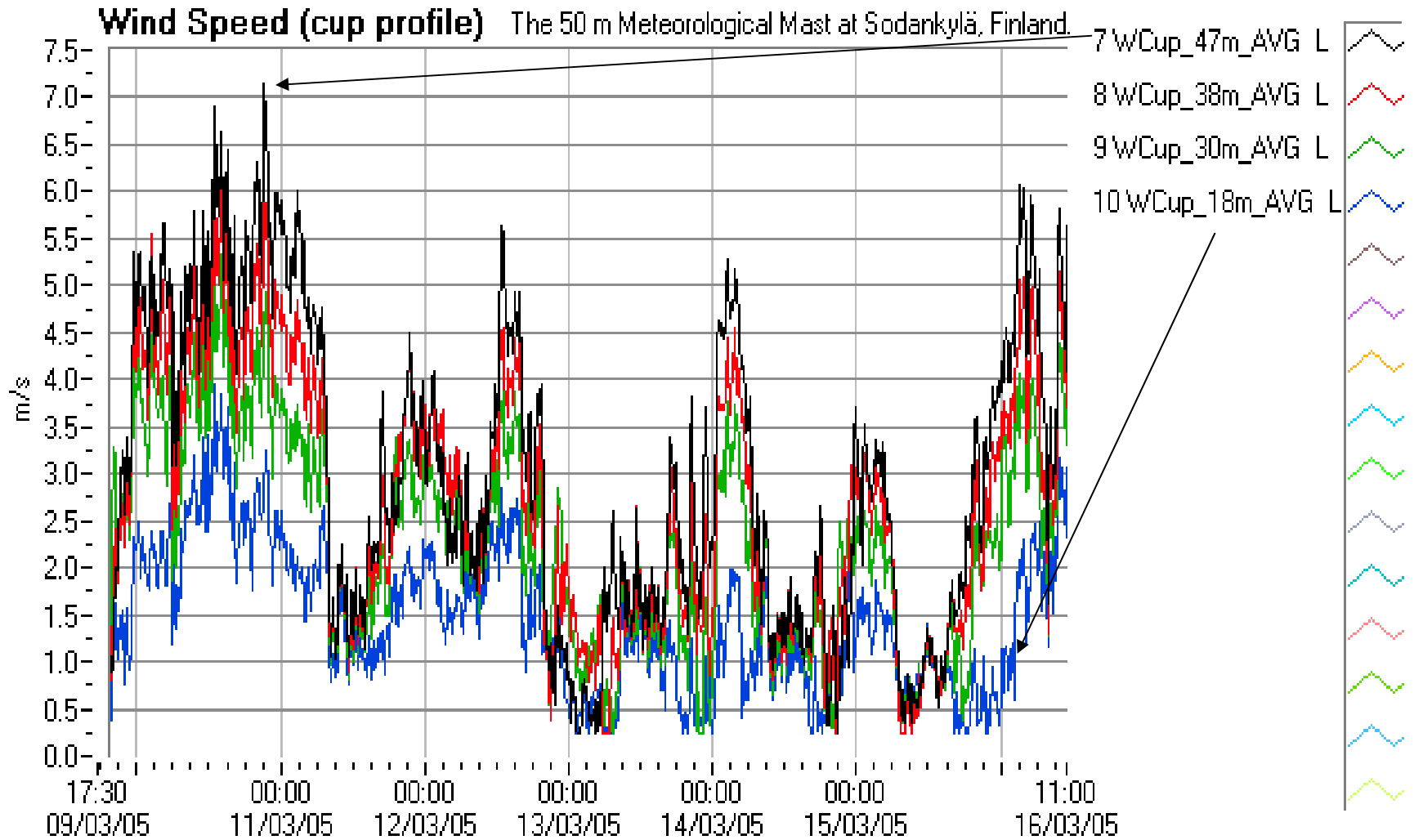
Esimerkki yön minimilämpötiloista Keski-Suomessa 9.3.2005



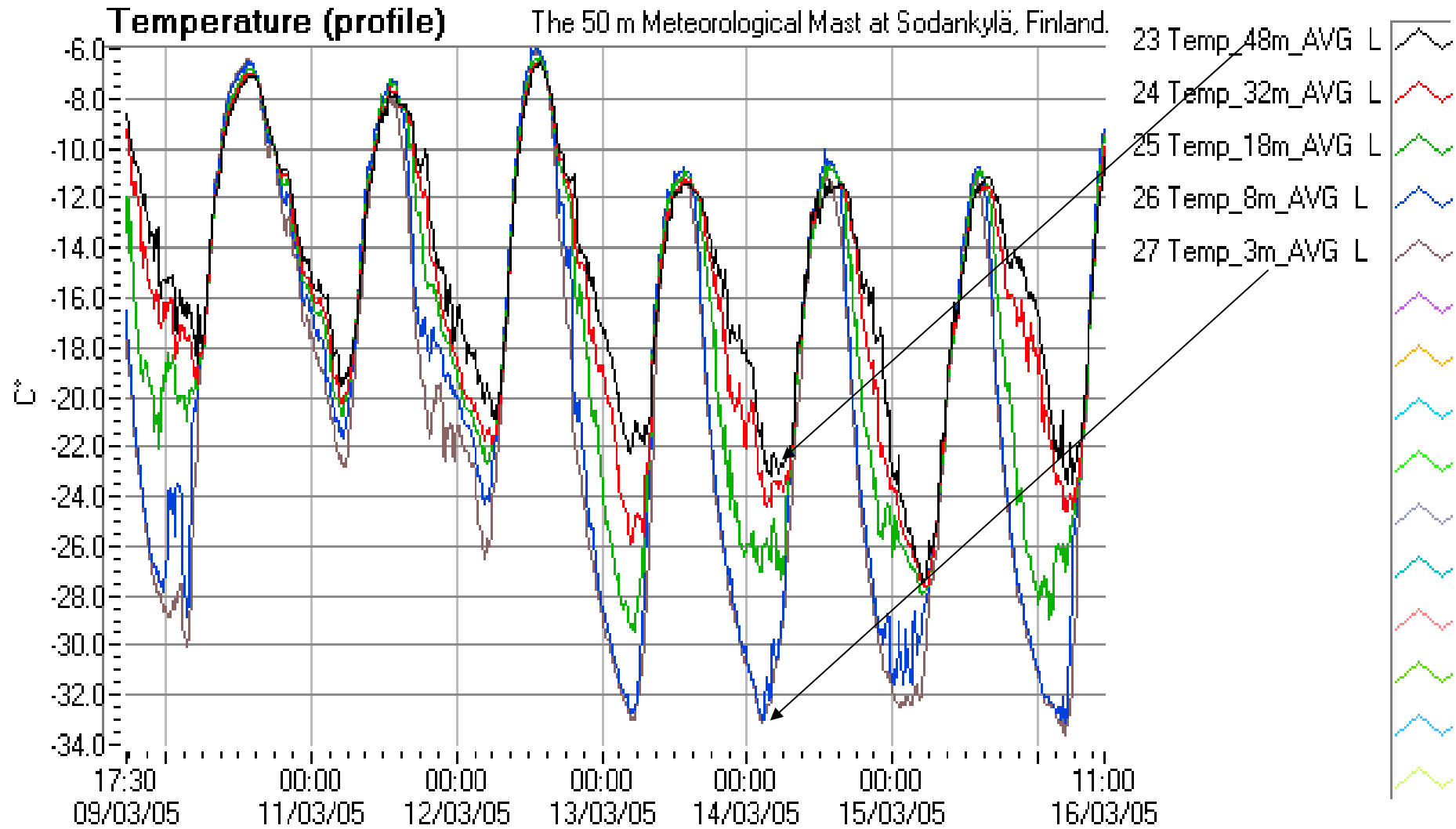
09/03 06:00

1h

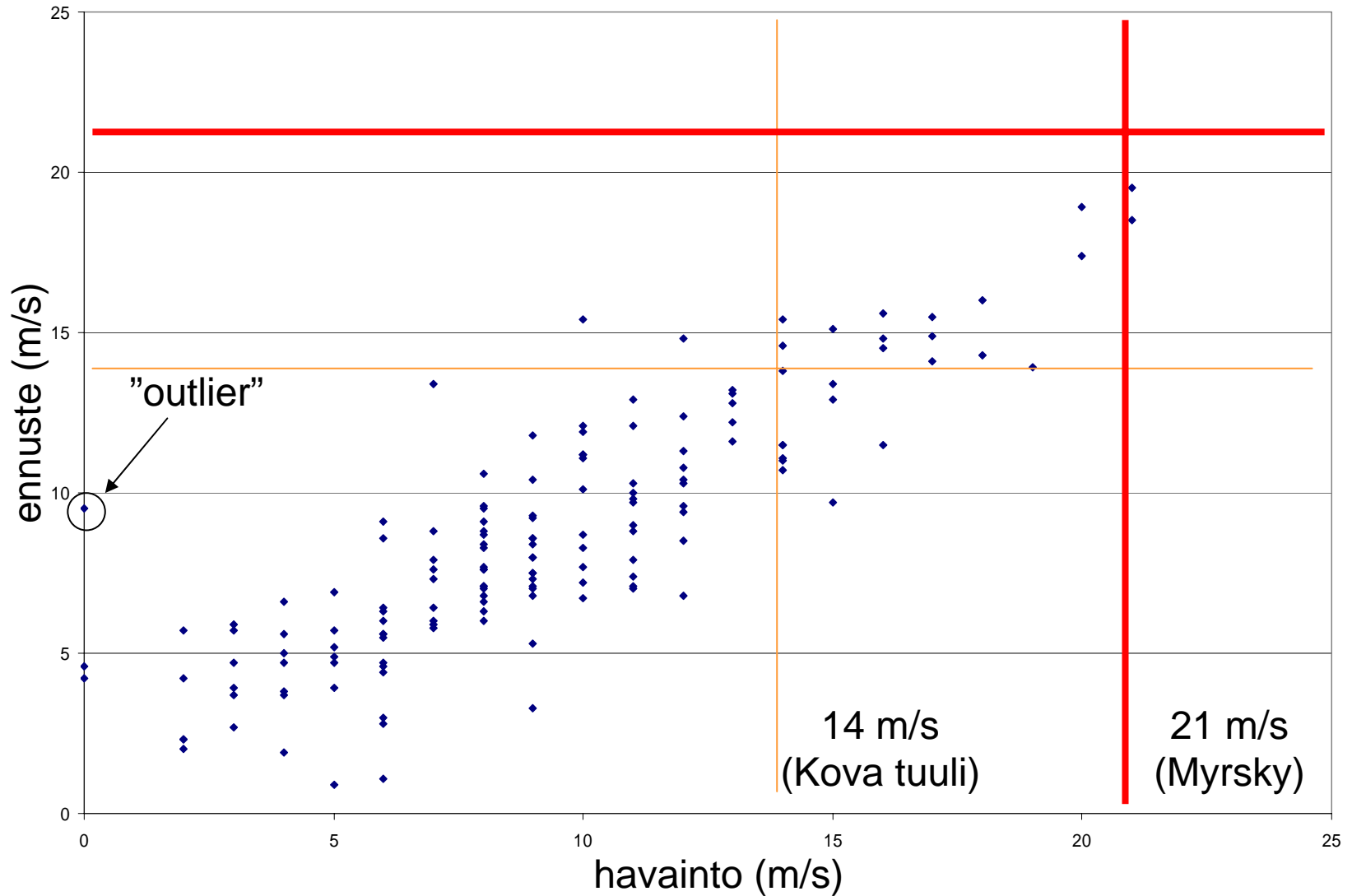
Esimerkki tuulen nopeuden ajan ja mittauskorkeuden mukaan



Esimerkki lämpötilan vaihtelusta vuorokaudenajan ja mittauskorkeuden mukaan



Tuulen nopeuden havainto ja +48 tunnin ennuste Utössä tänä talvena (scatter)



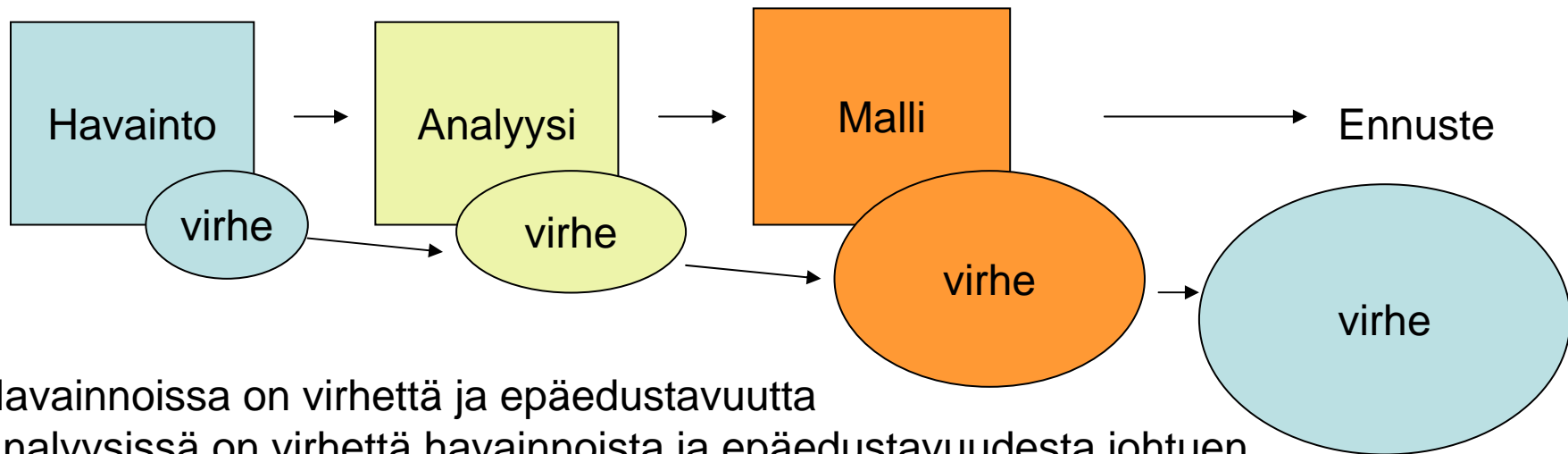
Ennustettavuus

- Ennustamiseen liittyy virhettä, joka kasvaa ennustusajan pidentyessä. Lopulta virhe kasvaa niin suureksi, että ennuste on käyttökelvoton. Käyttökelpoisuuden raja riippuu käyttäjästä.
- Ennustettavuus loppuu siinä vaiheessa kun ennusteen keskimääräinen virhe kasvaa suuremmaksi kuin klimatologisen ennusteen virhe.
- Tarkastelemme aihetta muutaman esimerkin valossa. Niissä on laskettu todellisista ennusteista verifiointisuureita (MAE ja RMSE), joiden kuvaajat esitetään ennustusajan funktiona.
- Ennustettavuuden ymmärtämiseksi määritellään käsitteet klimatologia (tai klimatologinen ennuste) ja persistenssi (tai persistenssi-ennuste). Niitä käytetään usein referenssinä, johon lopputuotetta (EP), jälkikäsiteltyä tuotetta (PPP) tai numeerista ennustetta (DMO/NWP) verrataan.

Ennustettavuus

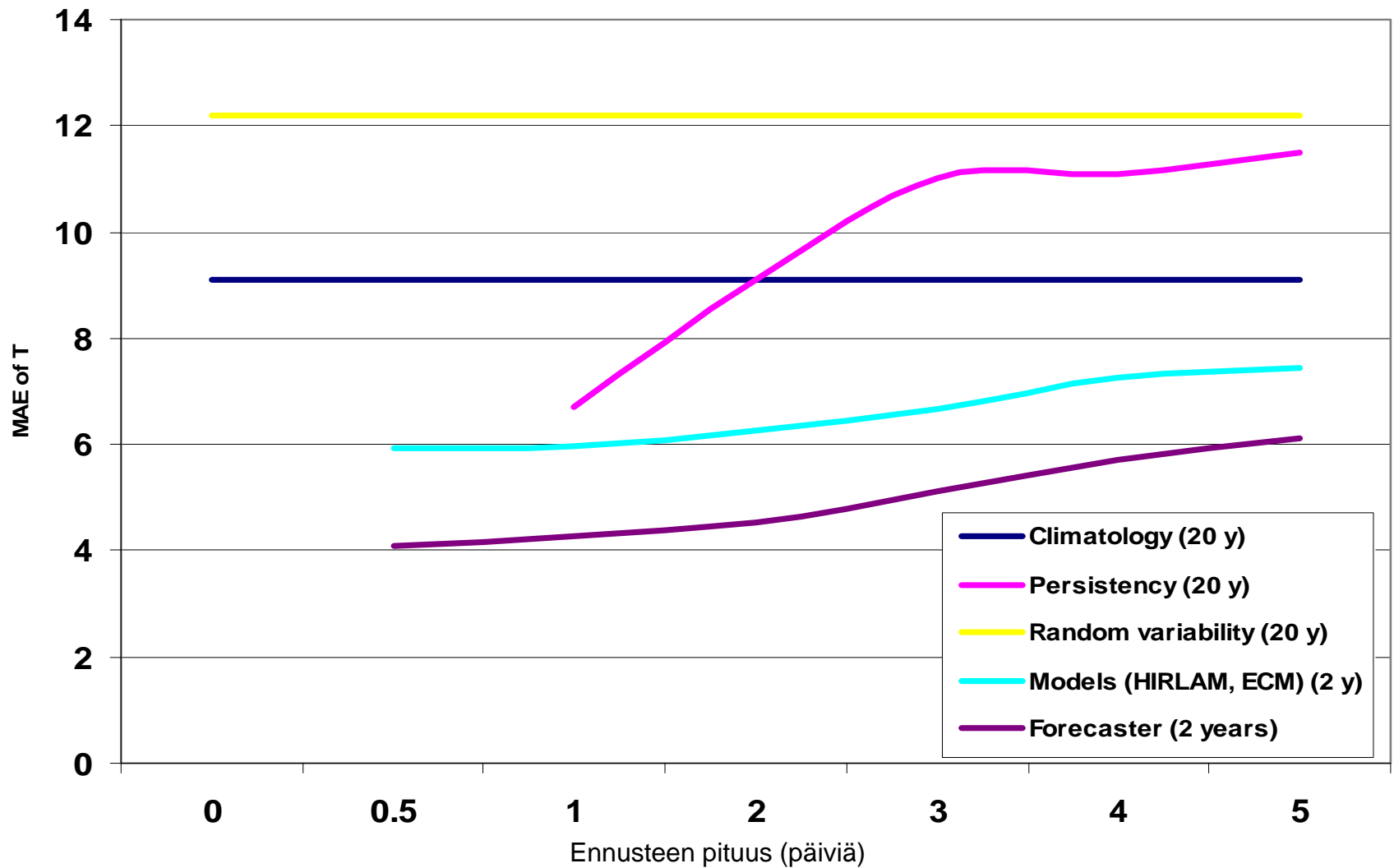
- klimatologia (tai klimatologinen ennuste)
 - havainto-asemalle on laskettu tietyn ajankohdan ja muuttujan pitkäaikainen keskiarvo (esim. 30 vuoden aritmeettinen keskiarvo 06 UTC mitattavasta T_{min} (yön minimi) lämpötilasta joulukuun alusta helmikuun loppuun). Klimatologisessa ennusteessa tätä klimatologista arvoa käytetään ennusteena ennustettaessa yön minimilämpötilaa ko. asemalle talvella.
- persistenssi (tai persistenssi-ennuste)
 - persistenssi-ennusteessa ennusteena käytetään viimeisintä havaintopisteen havaintoarvoa ennustepäivälle +1 vrk, +2 vrk, +3 vrk, ...+10 vrk. Eli jos ennustamme ensi yölle minimilämpötilaa tiettyyn pisteeseen, käytämme viime yönä havaittua arvoa ennusteena.
- persistenssi on yleensä hyvä referenssiennuste lyhyissä ennustuspituuksissa (tunneista muutamaan vuorokauteen) ja klimatologia on hyvä vertailukohta pidemmissä ennusteissa.

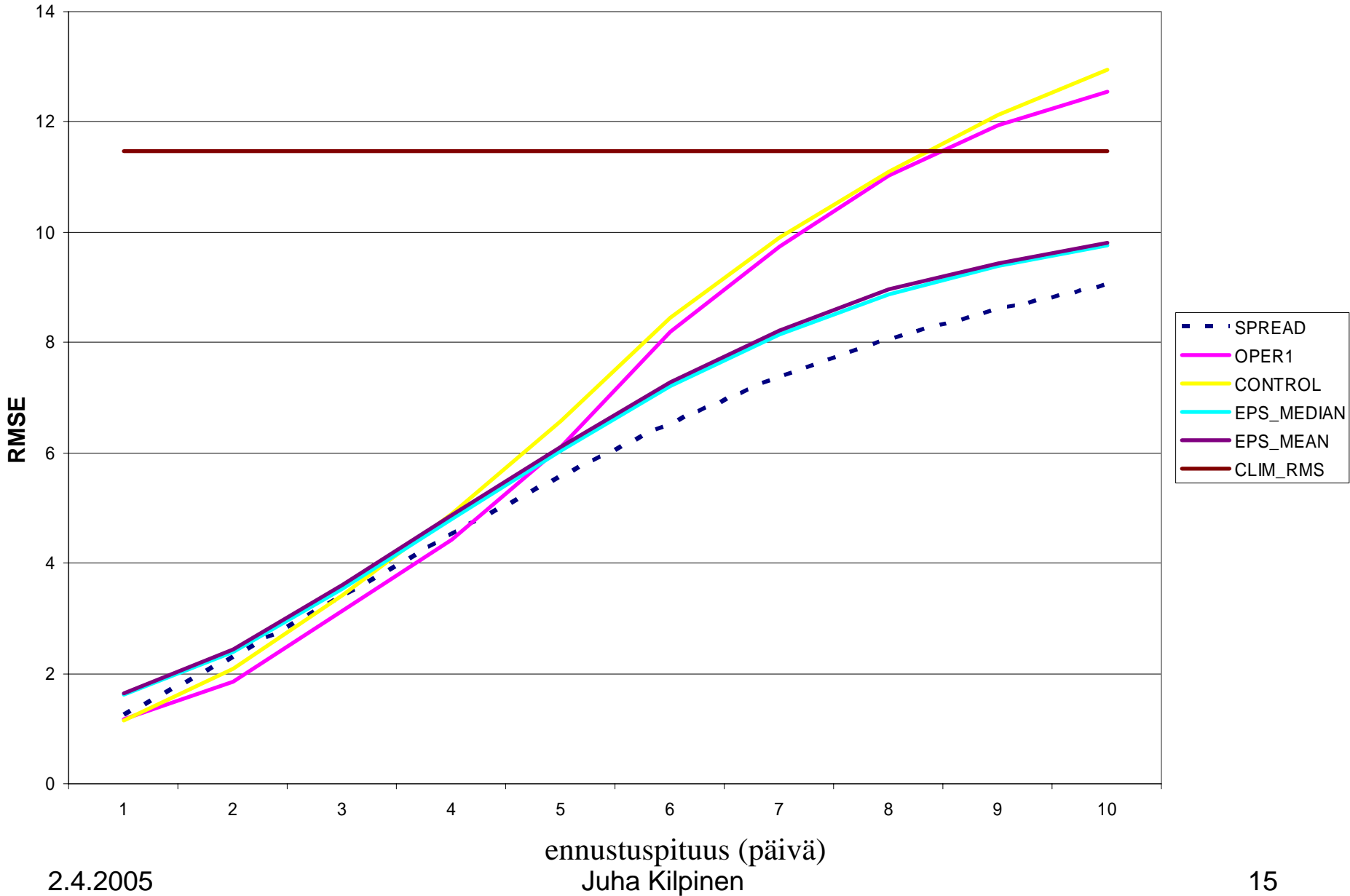
Virheen kumuloituminen



Havainnoissa on virhettä ja epäedustavuutta
Analyysissä on virhettä havainnoista ja epäedustavuudesta johtuen
Ennustusmallissa on virhettä (puutteellinen fysiikka ja resoluutio) ja
lopullisessa ennusteessa kaikki virheet havainnoista, analyysimenetelmistä,
puutteellisesta mallifysiikasta ja numeerisista laskentavirheistä kumuloituvat
ja lopulta ennustuspituuden kasvaessa peittävät alleen koko ennustussignaalin.

Sodankylän lämpötilaennusteiden MAE (Mean Absolute Error) talvella yöllä



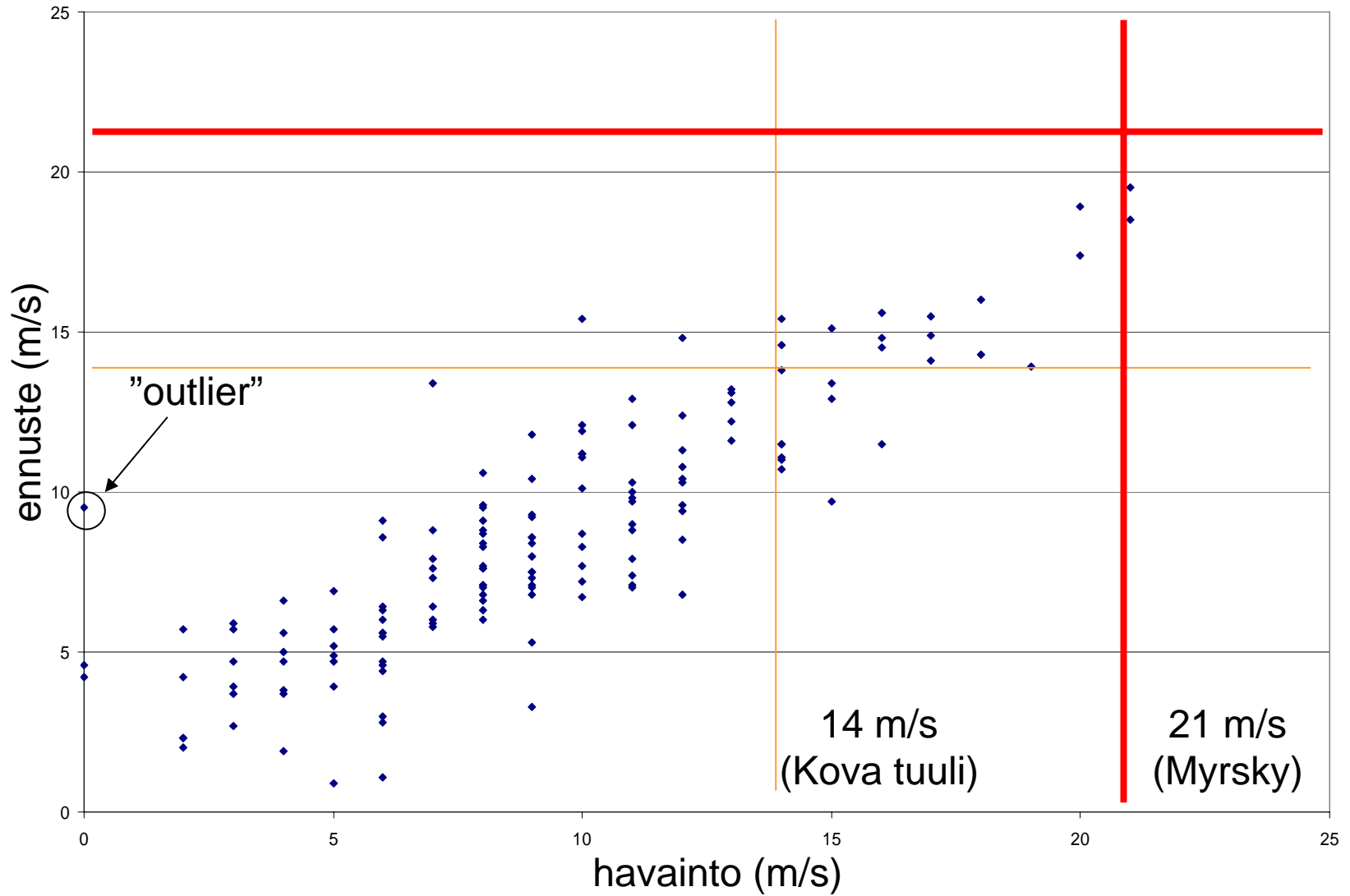


4. Sääennusteiden verifiointi

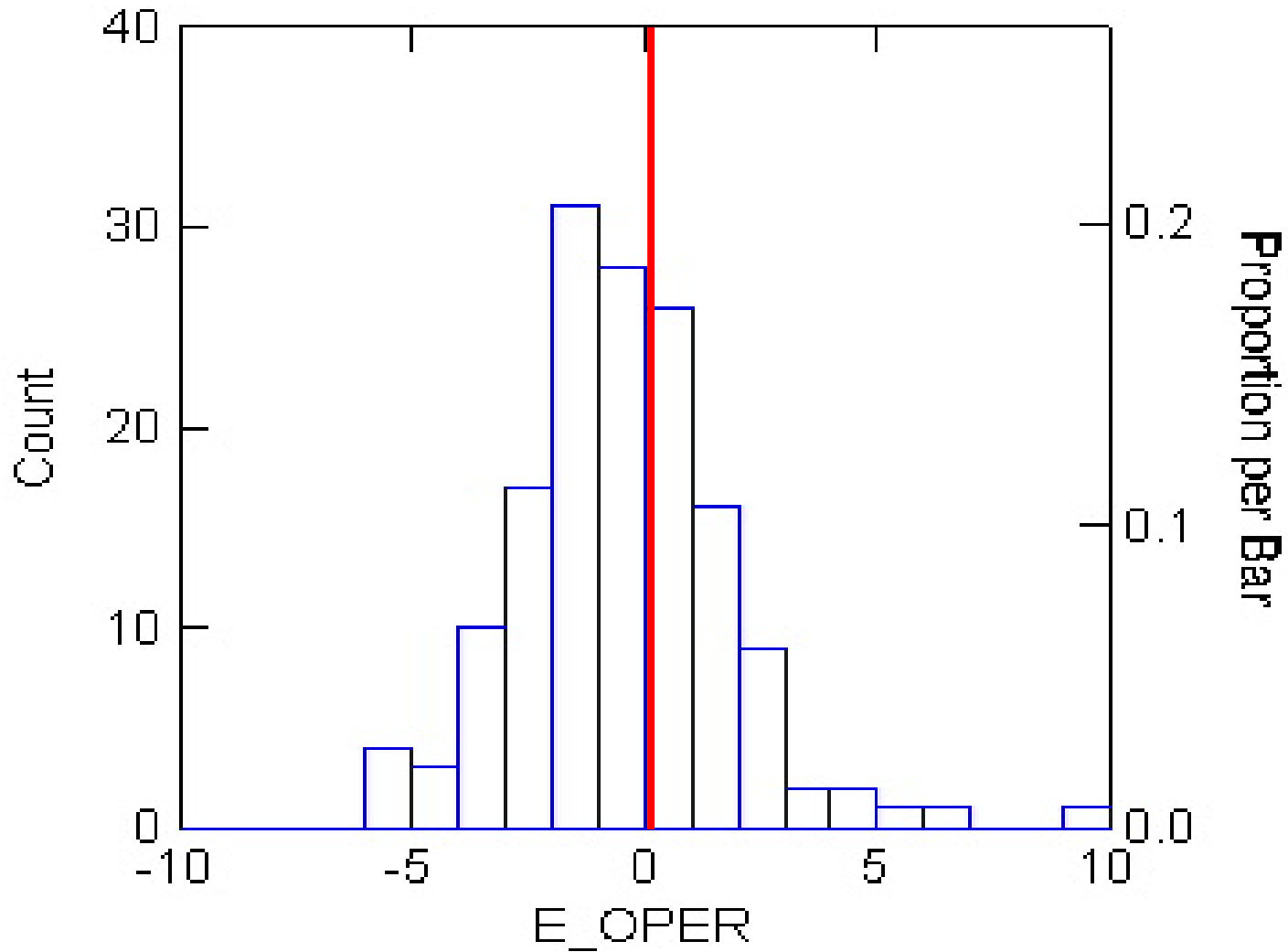
(keskitytään jatkossa vain piste-ennusteiden tilastolliseen verifiointiin)

- Tarkasteltavina tiedonlähteinä numeeriset, suorat, malliennusteet, jälkikäsitellyt malliennusteet ja lopputuotteet.
- Malleista tarkasteltavana usein suorat mallituotteet (Direct Model Output, **DMO**).
- Jälkikäsitellyt mallituotteet (Post-processed Products, **PPP**) ovat usein sellaisia, joista on tilastollisin menetelmin (esim. lineaarinen regressio tai Kalman suodatin) poistettu systemaattista virhettä.
- Lopputuotteet (End Products, **EP**) ovat niitä meteorologisia tuotteita, joita lopulliset asiakkaat käyttävät ja niissä päivystävä meteorologi on voinut tehdä viimeisen muokkauksen ennusteeseen.
- Ennen objektiivista ennusteiden verifiointia on usein syytä käyttää ennusteiden ja havaintojen silmämääristä katselua (grafiikan avulla). Tämä (eyeball) menetelmä paljastaa aineistoja paljon ja auttaa mm. virheellisten havaintojen etsinnässä.
- Aina on kuitenkin muistettava, että yhtä ainoaa verifiointisuureta ei pidä käyttää päätöksenteon pohjana.

Tuulen nopeuden havainto ja +48 tunnin ennuste Utössä tänä talvena (scatter)



Esimerkki virheen jakautumasta samassa esimerkkiaineistossa

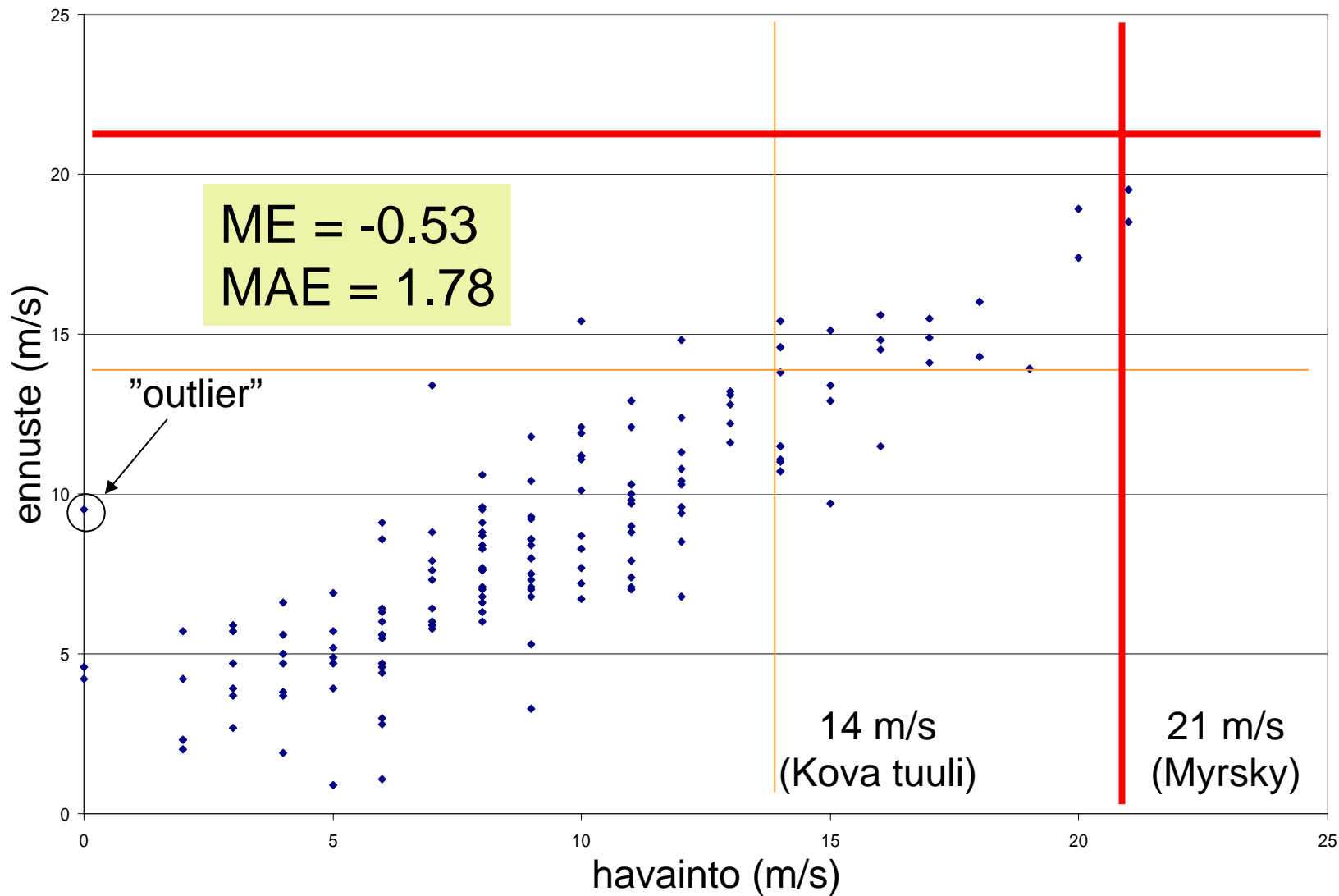


Verifiointi

- Jatkuvat suureet (deterministiset ennusteet)
 - Lämpötila: kiinteä ajankohta, T_{min} , T_{max} , vuorokauden keskiarvo, jne.
 - Tuulen nopeus ja suunta: kiinteä ajankohta, joku aikakeskiarvo,..
 - Sadekertymä: esim. 3, 6, 12 tai 24 tunnin kertymä
 - Pilvisyys: kiinteä ajankohta, aikakeskiarvo, usein luokiteltuna
- Luokitellut suureet (deterministiset ennusteet)
 - Sade: (on/ei tai erilaisilla raja-arvoilla luokiteltu)
 - Lumisade: kuten edellä
 - Kovat tuulet: (vs. ei kovat tuulet, erilaiset raja-arvot)
 - Halla: (on/ei)
 - Sumu: (on/ei)
 - Mikä tahansa muu: esim. lämpötila alle -7 astetta tien pinnassa

- Jatkuvat suureet
 - Absoluuttisia verifiointimittareita ovat mm. luotettavuutta (reliability) ja tarkkuutta (accuracy) arvioivat suureet
 - Kesquivirhe (Mean Error, ME)
 - **ME** = $(1/n)\Sigma(f_i - o_i)$, jossa f_i viittaa ennusteeseen ja o_i havaintoon
 - Keskimääräinen absoluuttivirhe /Mean Absolute Error, MAE)
 - **MAE** = $(1/n)\Sigma|f_i - o_i|$, jossa f_i viittaa ennusteeseen ja o_i havaintoon
 - Ns. RMS virhe (Root Mean Squared Error, RMSE)
 - **RMSE** = $\text{SQRT}((1/n)\Sigma(f_i - o_i)^2)$, jossa f_i viittaa ennusteeseen ja o_i havaintoon

Tuulen nopeuden havainto ja +48 tunnin ennuste Utössä tänä talvena (scatter)



- Jatkuvat suureet

- Suhteellisia verifiointimittareita (parannus suhteessa referenssiennusteeseen (klimatologia, persistenssi)

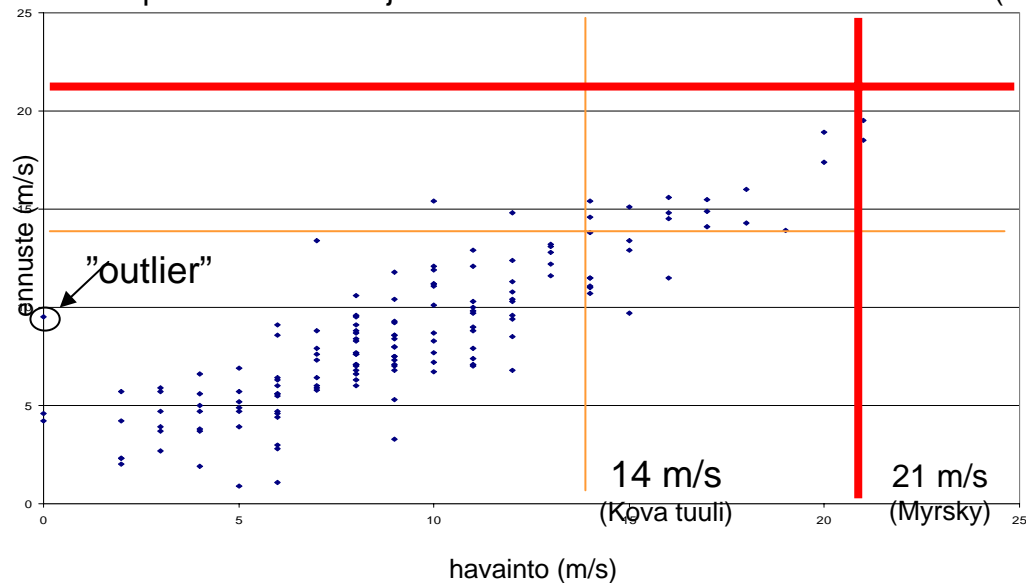
- Skill score (SS)

- $SS = (A - A_{ref}) / (A_{perf} - A_{ref})$, jossa A on jokin tarkkuus suure (accuracy measure), A_{ref} vastaa referenssiennusteesta (klimatologia, persistenssi, sattuma) laskettu suure ja A_{perf} ns. täydellisen ennusteen saama tarkkuus suureen arvo
 - MAE:n tapauksessa SS yksinkertaistuu muotoon **$SS = 1 - A/A_{ref}$**
 - **$MAE_SS = 1 - MAE/MAE_{ref}$**

Verifiointi

- Luokitellut suureet (deterministiset ennusteet)
 - käsitellään vain on/ei tyyppiset ennusteet, jatkuvat muuttujat voidaan aina muuttaa on/ei –tyyppisiksi valitsemalla sopivia kynnyсарvoja (esim. kuva). Luokittelun voi tehdä myös useammalle luokalle.

Tuulen nopeuden havainto ja +48 tunnin ennuste Utössä tänä talvena (scatter)



2 x 2 kontingenssitaulukko (on/ei) –tyyppisille ennusteille

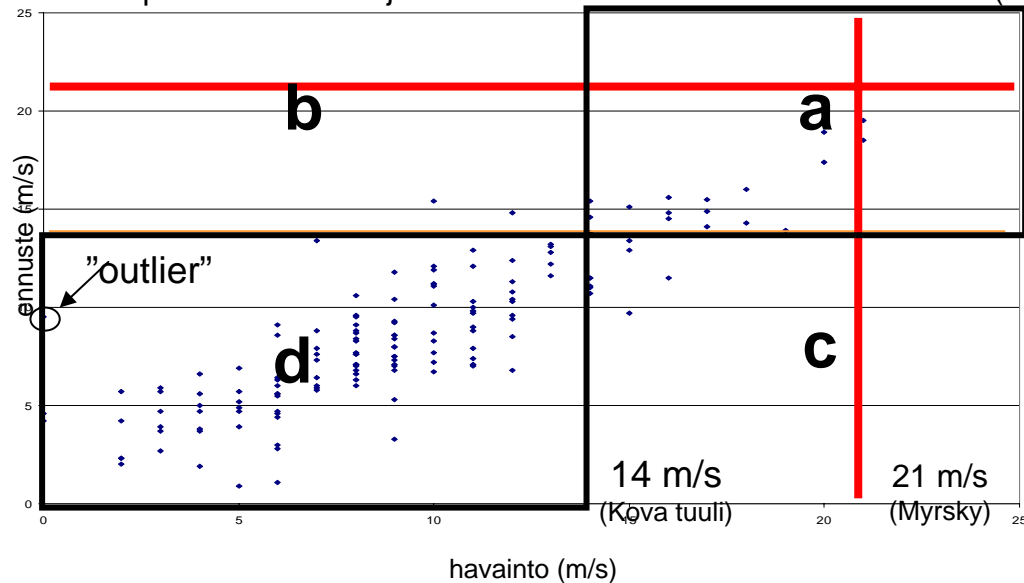
Event forecasted (f_i)	Event observed (o_j)		Marginal total
	Yes	No	
Yes	Hit	False alarm	Fc Yes
No	Miss	Correct rejection	Fc No
Marginal total	Obs Yes	Obs No	Sum total

Event forecasted (f_i)	Event observed (o_j)		Marginal total
	Yes	No	
Yes	a	b	a+b
No	c	d	c+d
Marginal total	a+c	b+d	a+b+c+d=n

Verifiointi

- Luokitellut suureet (deterministiset ennusteet)
 - käsitellään vain on/ei tyyppiset ennusteet, jatkuvat muuttujat voidaan aina muuttaa on/ei –tyyppisiksi valitsemalla sopivia kynnyсарvoja (esim. kuva). Luokittelun voi tehdä myös useammalle luokalle.

Tuulen nopeuden havainto ja +48 tunnin ennuste Utössä tänä talvena (scatter)



a=15
b=2
c=11
d=123

TAF ennusteen näkyvyyden kontingenssitaulukko

Contingency

For=EFOU Hour=1

Metars 20 min after: 202

Metars 50 min after: 4

VIS [m]	METAR								
	0	150	350	600	800	1500	3000	5000	8000
TAF 0									
150									0.25
350									0.25
600									
800			0.25				0.30		0.25
1500							1.50	0.50	0.25
3000							2.25	0.50	4.60
5000							0.75	1.50	12.50
8000			0.75				6.20	2.50	169.90

VIS	Quality								
	0	150	350	600	800	1500	3000	5000	8000
POD yes	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.20	0.30	0.90
POD no	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	0.99	0.97	0.93	0.44
FAR yes	0.00	1.00	1.00	0.00	1.00	1.00	0.69	0.90	0.05
FAR no	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.04	0.02	0.71

HIT RATE: 84.71

Special statistics VIS	Quality	
	< 1500 m	< 3000 m
POD yes	0.25	0.25
POD no	0.99	0.98
FAR yes	0.81	0.93
FAR no	0.00	0.00

- Näkyvyyssennusteet on luokiteltu 9 luokkaan ICAO:n luokitukseen mukaan
- Luokitelluista ennusteista on laskettu tunnuslukuja (POD, FAR, HR, ..)
- Lisänä värit indikoimassa tuloksia

Verifiointi

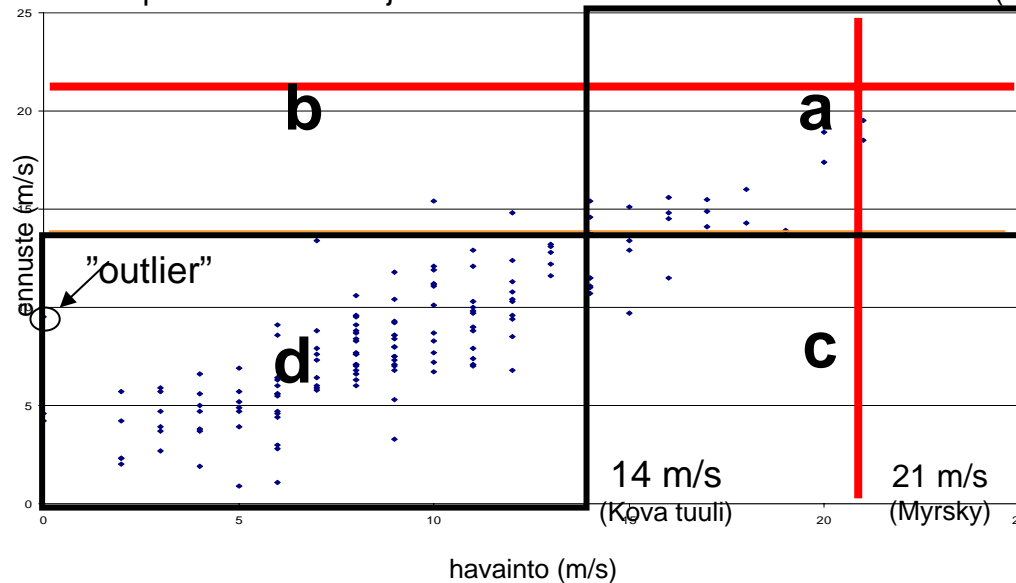
Absoluuttiset mittarit

- Luotettavuus (Bias~ME jatkuvissa muuttujissa)
 - $B = (a+b)/(a+c)$ [\sim Fc Yes/Obs Yes]
- Osuvuus (Proportion Correct)
 - $PC = (a+d)/n$ [\sim (Hits+Correct rejections)/n]
- Probability Of Detection
 - $POD = a/(a+c)$ [\sim Hits/Obs Yes]
- False Alarm Ratio
 - $FAR = b/(a+b)$ [\sim False alarms/Fc Yes]
- False Alarm Rate
 - $F = (b/(b+d))$ [False alarms/Obs No]

Verifiointi

- Luokitellut suureet (deterministiset ennusteet)
 - käsitellään vain on/ei tyyppiset ennusteet, jatkuvat muuttujat voidaan aina muuttaa on/ei –tyyppisiksi valitsemalla sopivia kynnyksarvoja (esim. kuva).

Tuulen nopeuden havainto ja +48 tunnin ennuste Utössä tänä talvena (scatter)



a=15
b=2
c=11
d=123

B=0.65
PC=0.91
POD=0.58
FAR=0.12

Verifiointi

Suhteelliset mittarit

- Hanssen-Kuipers Skill Score (KSS), ~True Skill Statistics (TSS), ~Pierce Skill Score (PSS)
 - $KSS = POD - F$ [$\sim(Hits/Obs\ Yes) - (False\ alarms/Obs\ NO)$]
- Threat Score (TS)
 - $TS = a/(a+b+c)$ [$\sim Hits/(Hits+False\ alarms+Misses)$]
- Equitable Threat Score (ETS)
 - $ETS = (a-ar)/(a+b+c-ar)$ [$\sim(Hits-Hits\ random)/(Hits + False\ alarms+Misses-Hits\ random)$], missä $ar=(a+b)(a+c)/n$ on satunnaisennusteiden osumien määrä
- Heidke Skill Score (HSS)
 - $HSS = 2(ad-bc)/\{(a+c)(c+d)+(a+b)(b+d)\}$ [\sim]

Verifiointi

- Todennäköisyysennusteet:
 - Mallit tuottavat jo nykyisin myös todennäköisyysennusteita (esim. ECMWF:n EPS ennusteet tai tilastollisella tulkinnalla jälkikäsitellyt deterministiset numeeriset ennusteet (esim. MOS, Model Output Statistics))
 - Meteorologien tuottamat subjektiiviset todennäköisyysennusteet
- Yleisin todennäköisyysennusteiden laatumittari on Brier Score (BS)
 - $BS = (1/n)\sum(p_i - o_i)^2$, jossa p_i on ennustettu todennäköisyys ja o_i vastaava havainto.
- Muita mittareita on lukuisa joukko ja niistä voi löytää lisätietoja kirjallisuusviitteistä.

Lähteet

- Nurmi, P.I., 2003. Recommendations on the verification of local weather forecasts, ECMWF Technical Memorandum, no. 430, pp19.
- Murphy, A.H. and R.L. Winkler, 1987. A general Framework for Forecast Skill, Mon. Wea. Rev., 15, 221-232.
- Wilks, D.S., 1995. Statistical Methods in the Atmospheric Sciences: An Introduction (Chapter 7: Forecast Verification) (Academic Press).