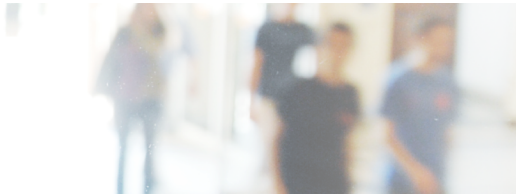


Das Wetter: schön aber kompliziert

Wettervorhersage von damals bis Heute

Reto Stauffer



Das Wetter: schön aber kompliziert

Was steckt eigentlich hinter einer “falschen” Vorhersage

Geschichte der Meteorologie

Aristoteles (ca. 350 v.Chr.)

“Wetter: durch Bewegung der Sterne und Planeten”

Geschichte der Meteorologie

Aristoteles (ca. 350 v.Chr.)

“Wetter: durch Bewegung der Sterne und Planeten”

Bis ca. 1900

Wettersvorhersage aus Beobachtungen des Himmels
(*Bauernregeln*)

Geschichte der Meteorologie

Aristoteles (ca. 350 v.Chr.)

“Wetter: durch Bewegung der Sterne und Planeten”

Bis ca. 1900

Wettersvorhersage aus Beobachtungen des Himmels
(*Bauernregeln*)

Erste physikalische Idee

“Dynamik der Atmosphäre” (Bjerknes, 1900). Einziges Problem: er konnte seine Gleichungen nicht lösen.

Geschichte der Meteorologie

1. Weltkrieg

“Wettervorhersage durch numerische Prozesse” (Richardson).

Geschichte der Meteorologie

1. Weltkrieg

“Wettervorhersage durch numerische Prozesse” (Richardson).

- löste das Problem von Bjerknes

Geschichte der Meteorologie

1. Weltkrieg

“Wettervorhersage durch numerische Prozesse” (Richardson).

- löste das Problem von Bjerknes
- erste 6h-Vorhersage (benötigte ca. 6 Wochen)

Geschichte der Meteorologie

1. Weltkrieg

“Wettervorhersage durch numerische Prozesse” (Richardson).

- löste das Problem von Bjerknes
- erste 6h-Vorhersage (benötigte ca. 6 Wochen)
- seine Hochrechnung: 64 000 “computer” wären nötig um mit dem Wetter Schritt zu halten

Geschichte der Meteorologie

1. Weltkrieg

“Wettervorhersage durch numerische Prozesse” (Richardson).

- löste das Problem von Bjerknes
- erste 6h-Vorhersage (benötigte ca. 6 Wochen)
- seine Hochrechnung: 64 000 “computer” wären nötig um mit dem Wetter Schritt zu halten

Erfindung des Computers (von Neumann)

- 1946: ENIAC; 24 h für eine 24-h-Vorhersage

Geschichte der Meteorologie

1. Weltkrieg

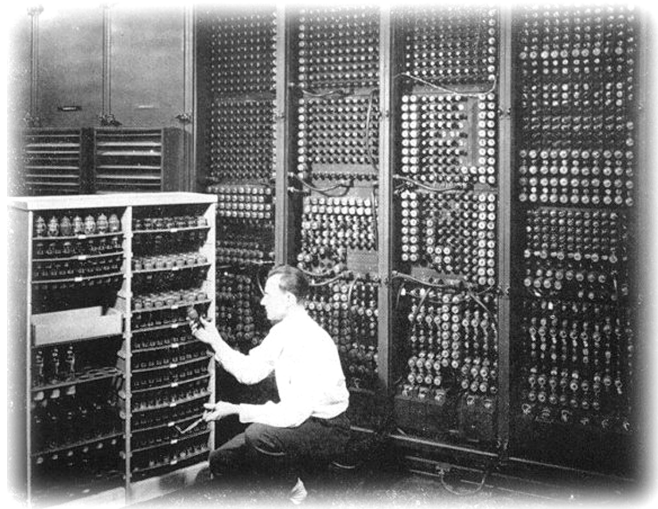
“Wettervorhersage durch numerische Prozesse” (Richardson).

- löste das Problem von Bjerknes
- erste 6h-Vorhersage (benötigte ca. 6 Wochen)
- seine Hochrechnung: 64 000 “computer” wären nötig um mit dem Wetter Schritt zu halten

Erfindung des Computers (von Neumann)

- 1946: ENIAC; 24 h für eine 24-h-Vorhersage
- 1955: EDVAC; tägliche Vorhersagen (USAF)

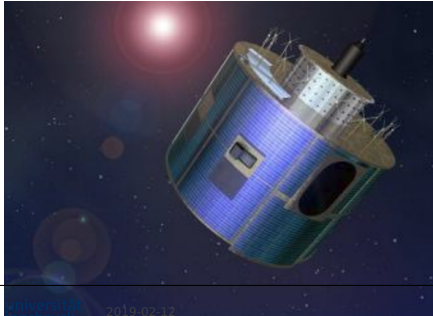
Geschichte der Meteorologie



Heute



Heute



Numerische Wettervorhersage

Funktionsprinzip

Anfangszustand



Analyse

- Schritt 1: Analyse (ist-Zustand)

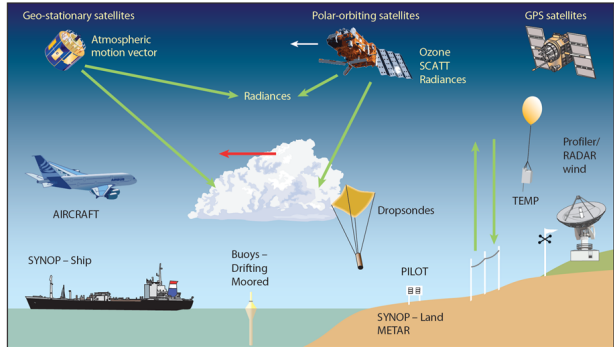
Numerische Wettervorhersage

Funktionsprinzip

Anfangszustand



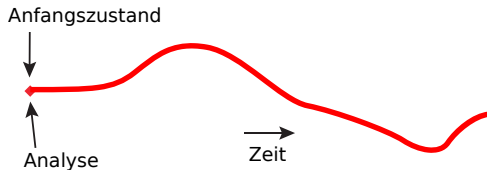
Analyse



- Schritt 1: Analyse (ist-Zustand)

Numerische Wettervorhersage

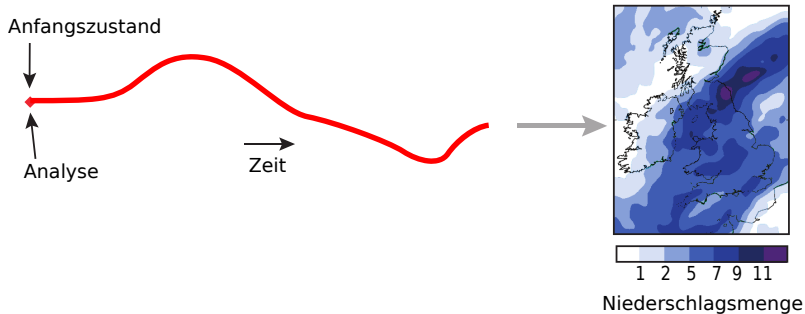
Funktionsprinzip



- Schritt 1: Analyse (ist-Zustand)
- Schritt 2: Prognose

Numerische Wettervorhersage

Funktionsprinzip



- Schritt 1: Analyse (ist-Zustand)
- Schritt 2: Prognose

Numerische Wettervorhersage

Navier-Stokes

$$\rho \left(\frac{\partial \mathbf{v}}{\partial t} + (\mathbf{v} \cdot \nabla) \mathbf{v} \right) = -\nabla p + \mu \nabla^2 \mathbf{v} + \left(\lambda + \frac{1}{3} \mu \right) \nabla (\nabla \cdot \mathbf{v}) + \mathbf{f}$$

Massenerhaltung

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{v}) = 0$$

Impulserhaltung

$$\frac{\partial m}{\partial t} + \nabla \cdot (\mathbf{v} m) = \nabla \cdot (\mathbf{S} - p \mathbf{I}) + \rho \mathbf{g}$$

Numerische Wettervorhersage

Einziges Problem

- es existiert keine exakte Lösung
- zählt zu den 7 Millenium-Problemen.
- Preisgeld: 1 Million US-Dollar.



Numerische Wettervorhersage

Einziges Problem

- es existiert keine exakte Lösung
- zählt zu den 7 Millenium-Problemen.
- Preisgeld: 1 Million US-Dollar.

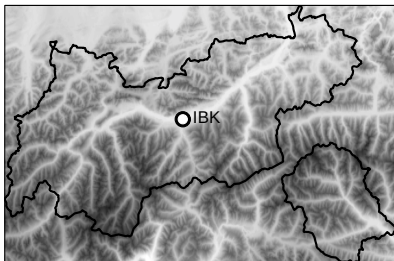
Ausweg

- über Näherungsverfahren
- Vereinfachung der Natur



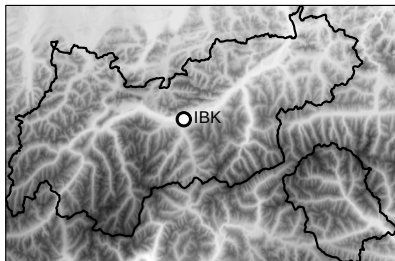
Numerische Wettervorhersage

Real Topography

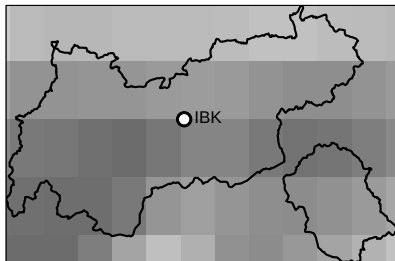


Numerische Wettervorhersage

Real Topography

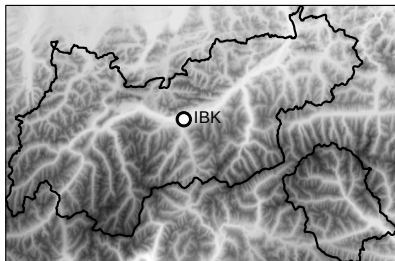


Model Topography

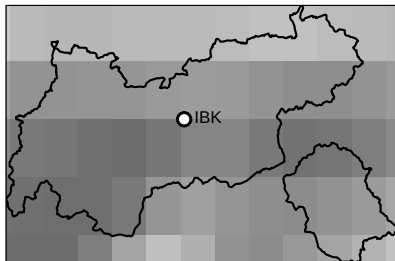


Numerische Wettervorhersage

Real Topography



Model Topography

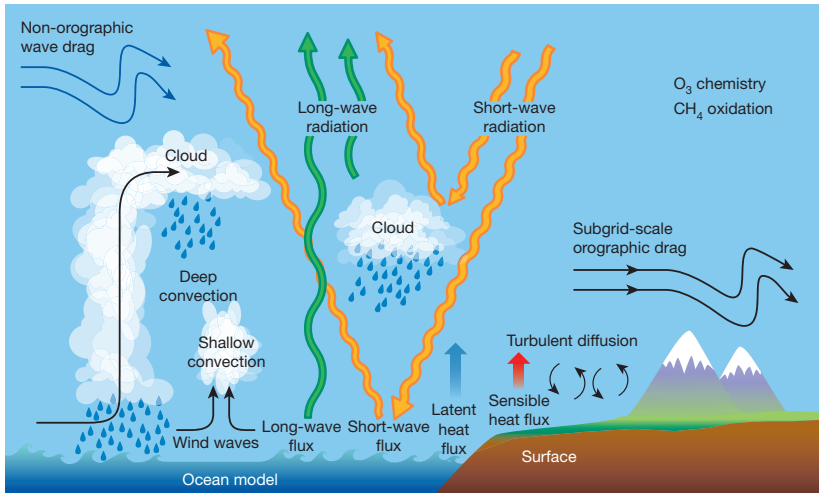


- Klimamodelle: 100 – 300km
- Globalmodelle: 18 – 50km
- Lokalmodelle: 1 – 10km
- Forschung: bis 2m

Numerische Wettervorhersage



Numerische Wettervorhersage



Fehlerquellen

Manchmal passt die Wettervorhersage nicht perfekt.
Was sind mögliche Fehler?

Fehlerquellen

Manchmal passt die Wettervorhersage nicht perfekt.
Was sind mögliche Fehler?

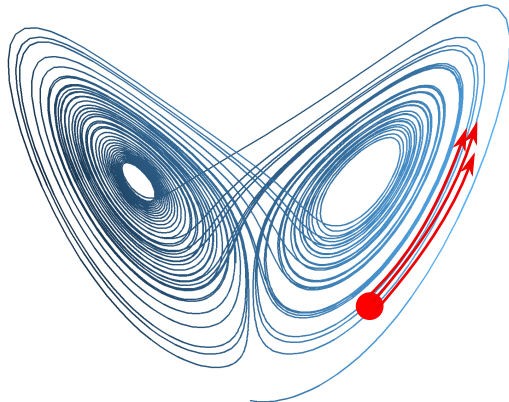
- zu wenig oder zu ungenaue **Beobachtungen**
- Fehler in der **Analyse**
- **Vereinfachung** der Natur
- **unbekannte Prozesse** in der Atmosphäre
- numerische/mathematische **Approximation**
- **Rundungsfehler** beim Berechnen
- ...

Fehlerquellen

Manchmal passt die Wettervorhersage nicht perfekt.
Was sind mögliche Fehler?

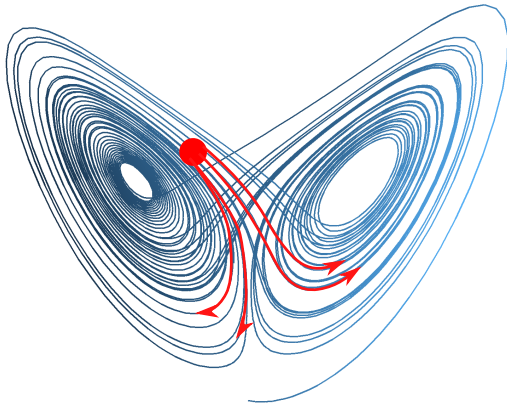
- zu wenig oder zu ungenaue **Beobachtungen**
- Fehler in der **Analyse**
- **Vereinfachung** der Natur
- **unbekannte Prozesse** in der Atmosphäre
- numerische/mathematische **Approximation**
- **Rundungsfehler** beim Berechnen
- ...
- die Atmosphäre selbst ist ein **chaotisches System**

Chaos-Theorie



Chaos-Theorie (Lorenz 1963), bekannt geworden als der Schmetterlings-Effekt.

Chaos-Theorie



Chaos-Theorie (Lorenz 1963), bekannt geworden als der Schmetterlings-Effekt.

Numerische Wettervorhersage

Ensemble-Vorhersagen

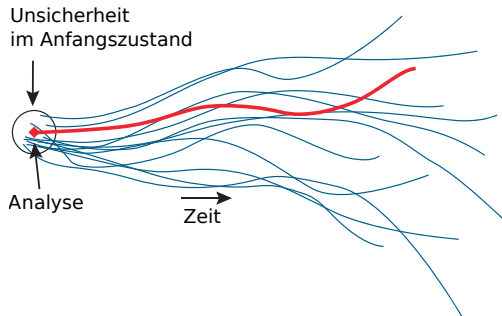
Unsicherheit
im Anfangszustand



Analyse

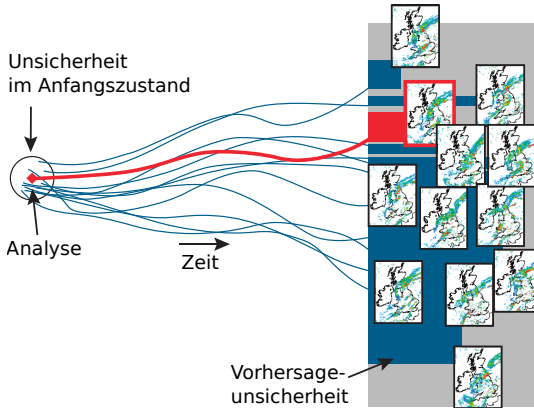
Numerische Wettervorhersage

Ensemble-Vorhersagen



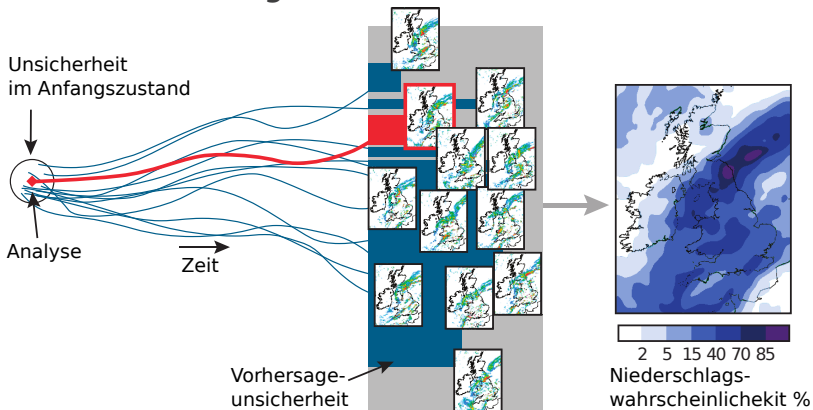
Numerische Wettervorhersage

Ensemble-Vorhersagen



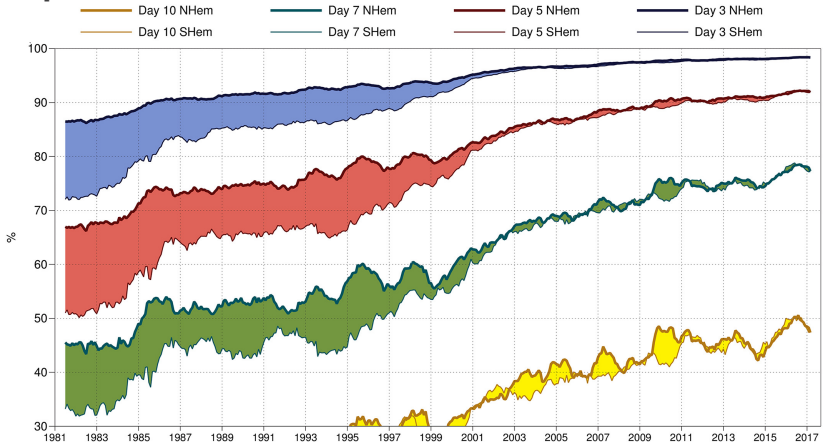
Numerische Wettervorhersage

Ensemble-Vorhersagen

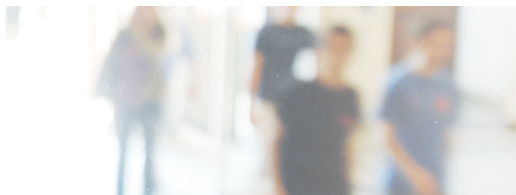


Entwicklung Vorhersagegüte

Improvements



Anomalie-Korrelations-Koeffizient 500 hPa Geopotential, ECMWF.int.



Danke für euere Aufmerksamkeit!

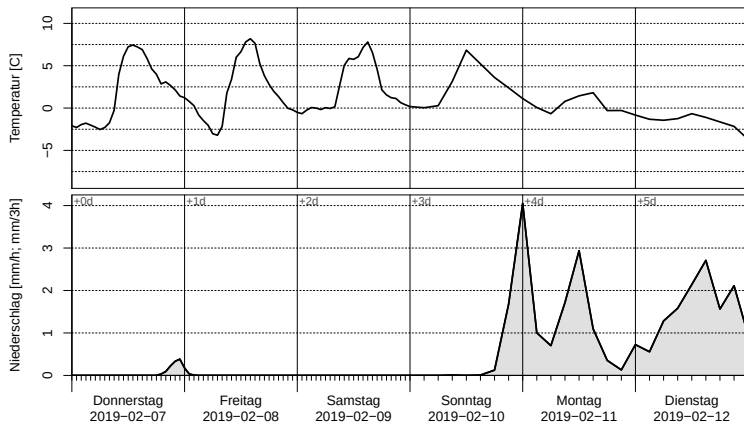
Quellenangaben

- Seite 3: Wikipedia (<https://wikipedia.org>)
- Seite 4: Wikipedia (<https://wikipedia.org>), ECMWF (<https://www.ecmwf.int>)
- Seite 5: Atmosphärische Beobachtungen, <https://www.ecmwf.int>
- Seite 5: Niederschlagsbeispiel: Bauer et al. (2015)*
- Seite 7: ECMWF (<https://www.ecmwf.int>)
- Seite 10: Parametrisierung: Bauer et al. (2015)*
- Seite 12: Lorenz-Attraktor: Wikipedia (<https://wikipedia.org>)
- Seite 13: Ensemble-Generierung: Bauer et al. (2015)*
- Seite 14: Entwicklung der Vorhersagegüte: ECMWF (<https://www.ecmwf.int>)
- Seite 18: Skalendiagramm: Fortak (1982): *Meteorologie*. 2 Auflage. ISBN 978-3496005063

* Bauer, Thorpe, and Brunet (2015): The Quiet Revolution of Numerical Weather Prediction. *Nature*, **525**, 47–55,
doi:<https://doi.org/10.1038/nature14956>

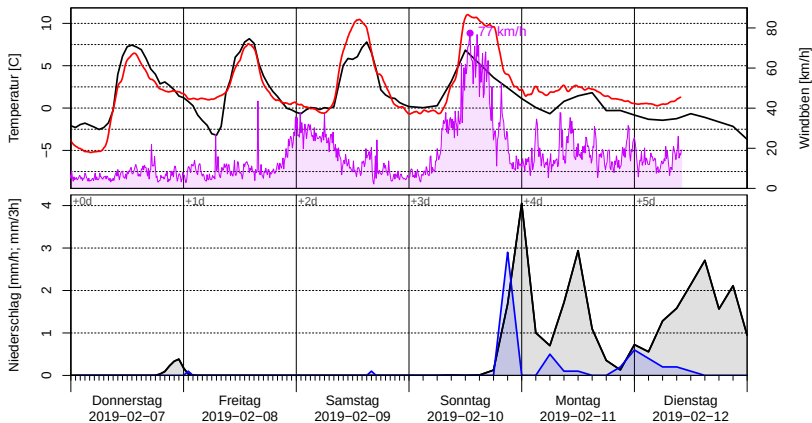
Numerische Wettervorhersage

Vorhersage für Innsbruck, 07 – 13 Februar 2019



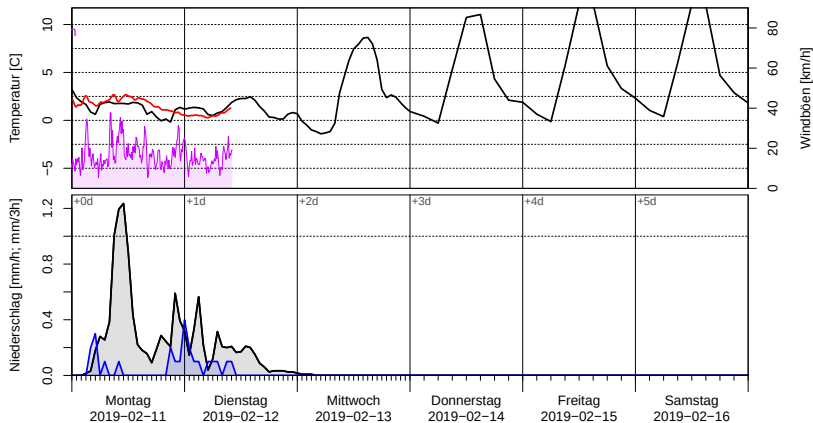
Numerische Wettervorhersage

Vorhersage für Innsbruck, 07 – 13 Februar 2019



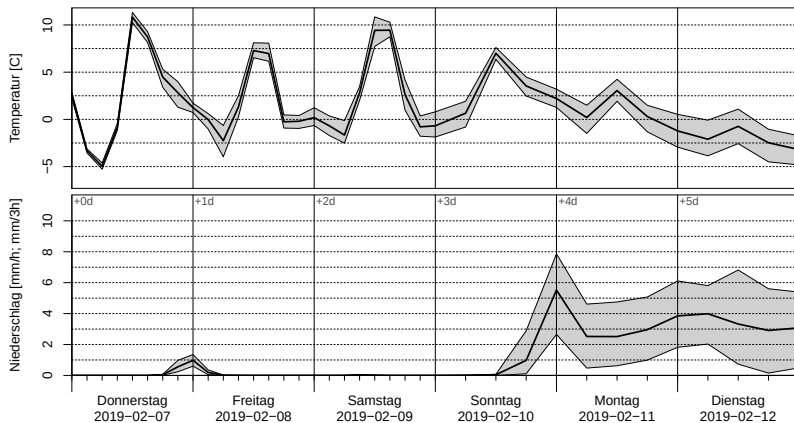
Numerische Wettervorhersage

Vorhersage für Innsbruck, 11 – 17 Februar 2019



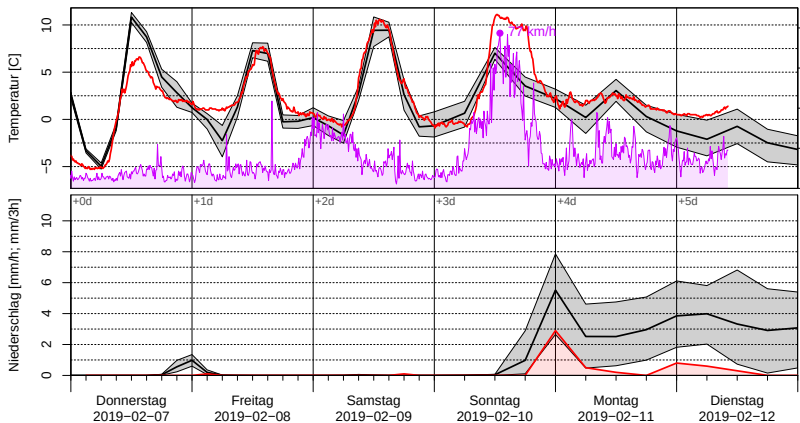
Numerische Wettervorhersage

Vorhersage für Innsbruck, 07 – 13 Februar 2019



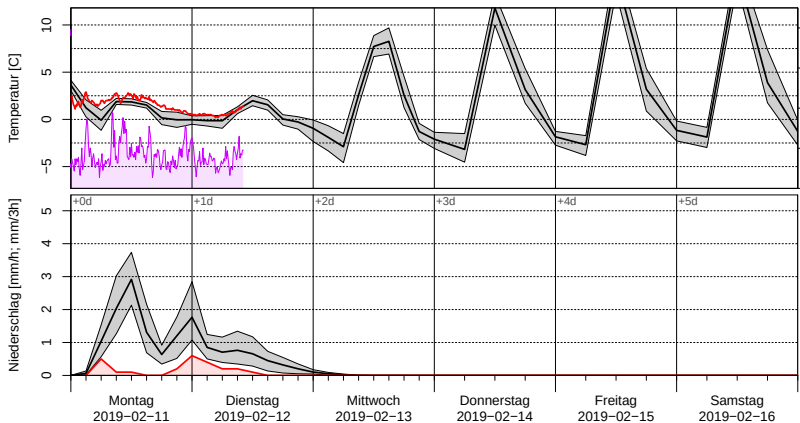
Numerische Wettervorhersage

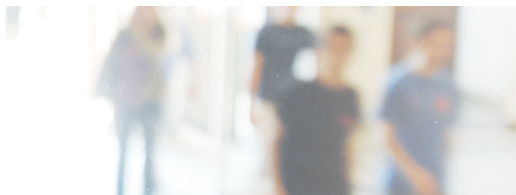
Vorhersage für Innsbruck, 07 – 13 Februar 2019



Numerische Wettervorhersage

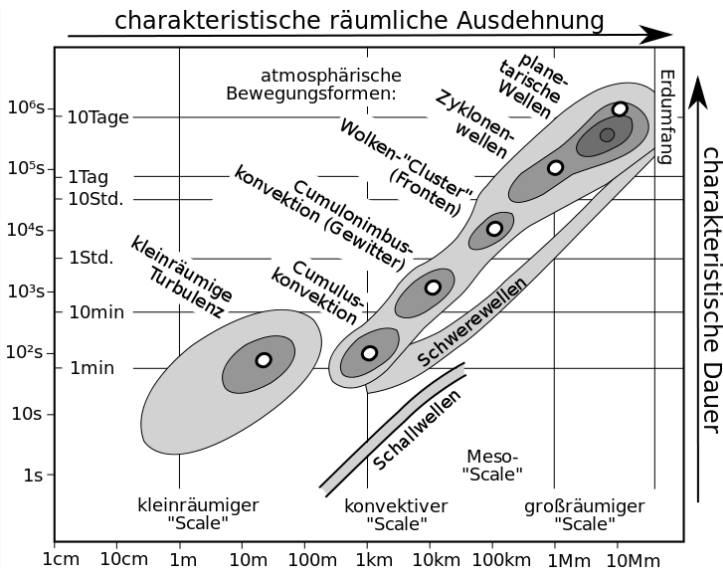
Vorhersage für Innsbruck, 11 – 17 Februar 2019



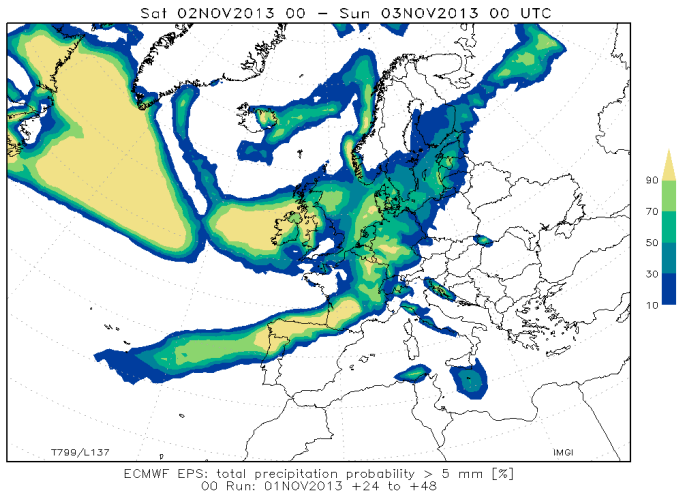


Appendix

Skalen

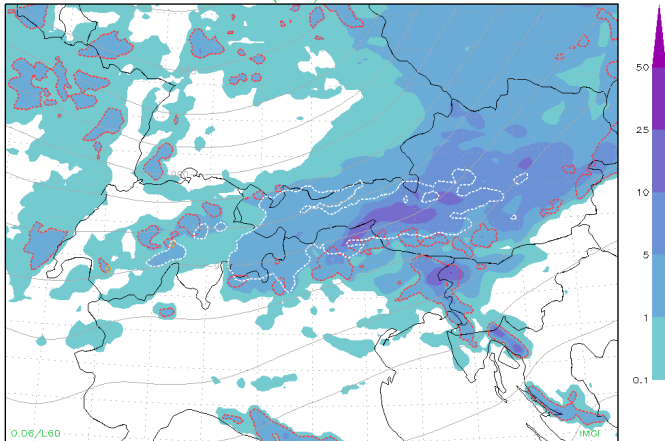


Skalen

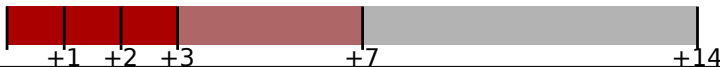


Skalen

00 UTC Run: 01NOV2013 +63 (-3h) Sun 03NOV2013 15 UTC



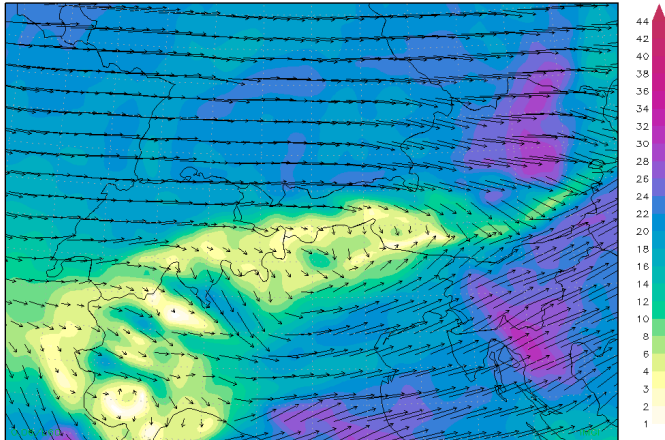
COSMO7 FORECAST: precipitation (snow and rain) [mm]
convective precipitation > 1 mm [red contours]; snow > 1 mm [white contours];
graupel > 1 mm [green contours]; convective snow > 1 mm [yellow contours]



Skalen

00 UTC Run: 01NOV2013 +63

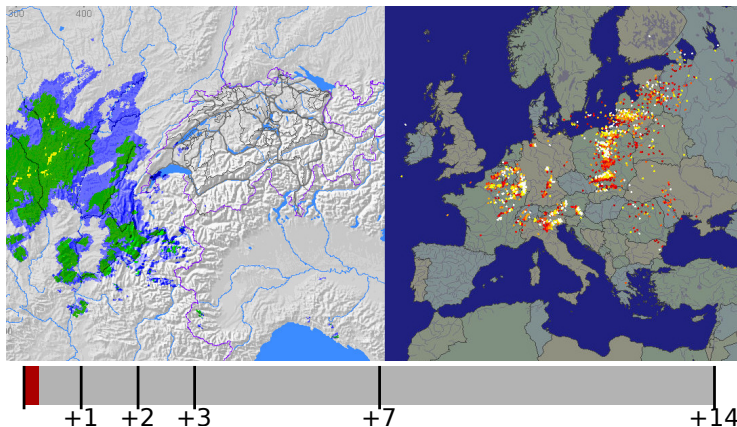
Sun 03NOV2013 15 UTC



COSMO7 FORECAST: wind at 2000m MSL [ms⁻¹, vectors]



Die Wettervorhersage



Radarbild: <https://metradar.ch>, Blitzmessung:
<https://blitzortung.org>.