

Klimawandel: Die Indizienkette auf der regionalen Skala

Christoph Schär

Institut für Atmosphäre und Klima

ETH Zürich

<http://www.iac.ethz.ch/people/schaer>



Bern, 20. November 2019

11. Symposium Anpassung an den Klimawandel

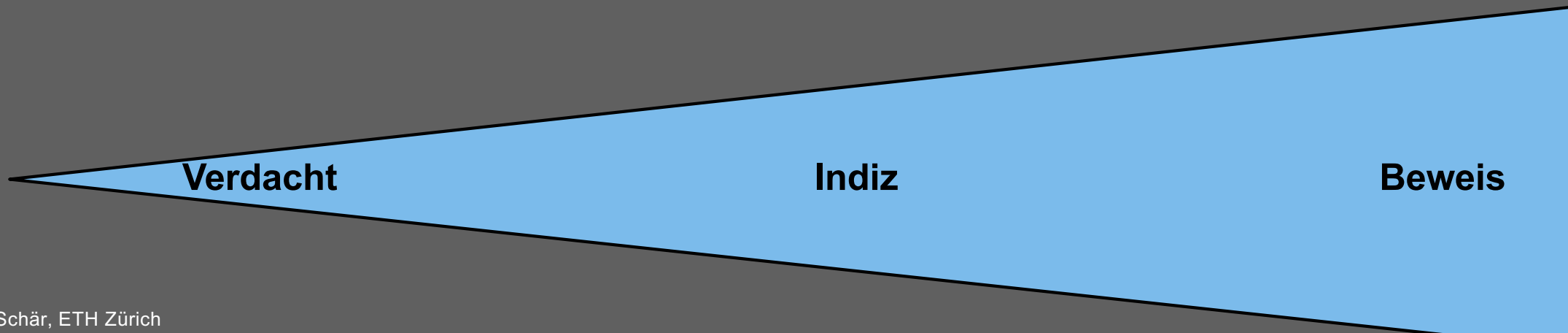
Indizien

Allgemein gilt, dass ein Indiz mehr als eine Behauptung, aber weniger als ein Beweis ist.

(Wikipedia 2019)

Indiz – eine erwiesene Tatsache, aus der in unmittelbarer Schlussfolgerung der Beweis für eine andere, nicht unmittelbare beweisbare, Tatsache abgeleitet wird.

(dtv-Lexikon 1992)



«Multiple lines of evidence» (IPCC)

Die drei Säulen der wissenschaftlichen Methodik

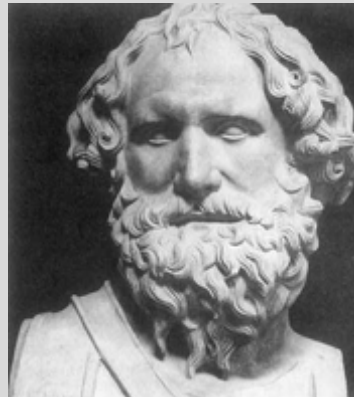
Galileo Galilei
(1564–1642)



Experiment



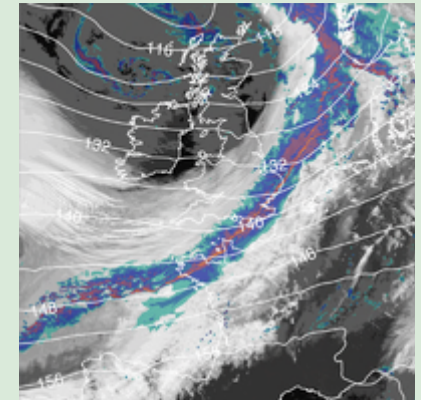
Archimedes
(ca. 287–212 BC)



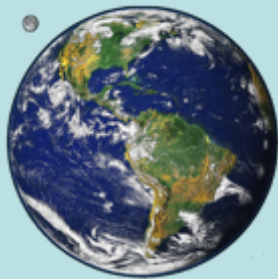
Theorie



Seit einigen
Jahrzehnten



numerische
Simulation

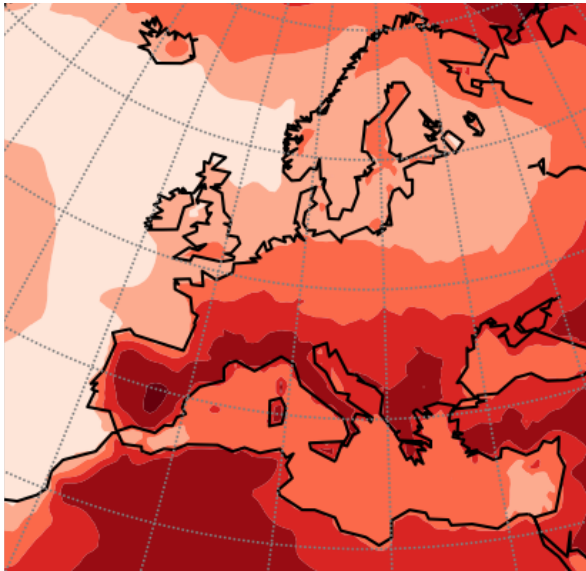


Wichtig: das aktuelle «Experiment» mit dem Planeten Erde gilt nicht als wissenschaftliches Experiment, da es nur einmal durchgeführt werden kann!

**Gesucht: konsistente
Indizienketten basierend auf
Beobachtungen, Theorie und
Simulation**

Beispiele (regionale Skala)

**Sommerhitze und
Trockenheit
im Mittelmeerraum**



«Mediterrane
Verstärkung»

**Grossräumige
Starkniederschläge**



Tägliche
Niederschläge

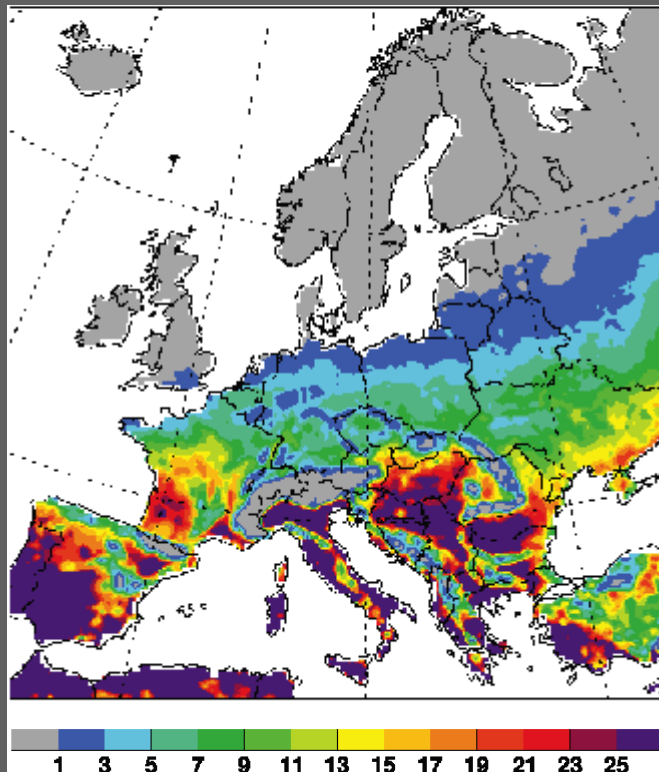
**Kurzfristige
Starkniederschläge**



Stündliche
Niederschläge

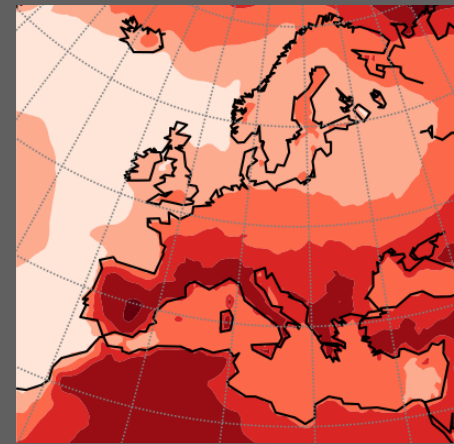
Mediterrane Verstärkung

Gefährliche Hitzewellen

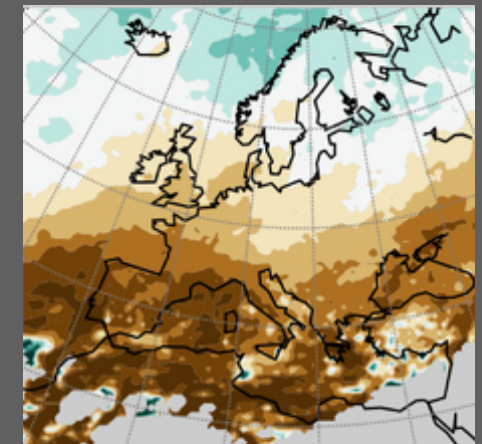


Fischer und Schär (2010)

Projektionen 2070-2099 (Sommer), RCP8.5

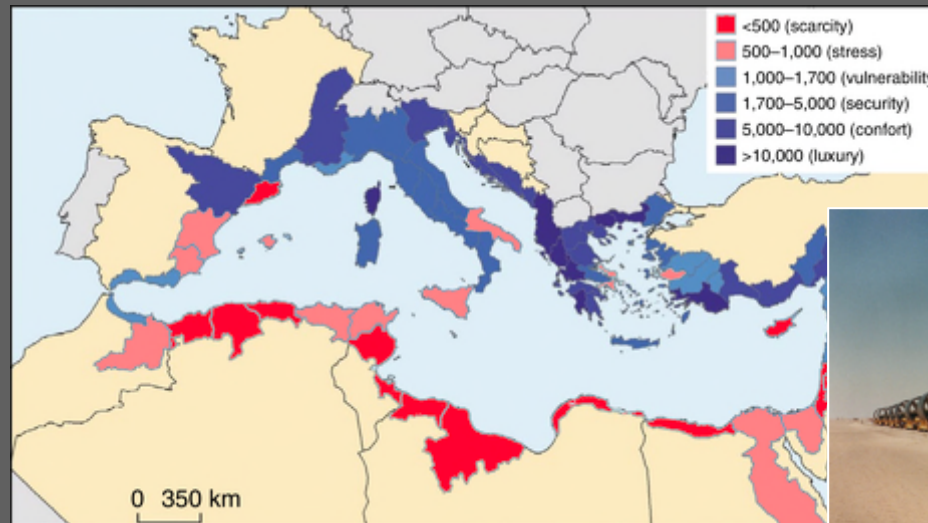


Temperatur



Niederschlag

Wasser-Ressourcen



Cramer et al. (2018)

m³ pro
Person
und Jahr



Libyen (1980er Jahre)

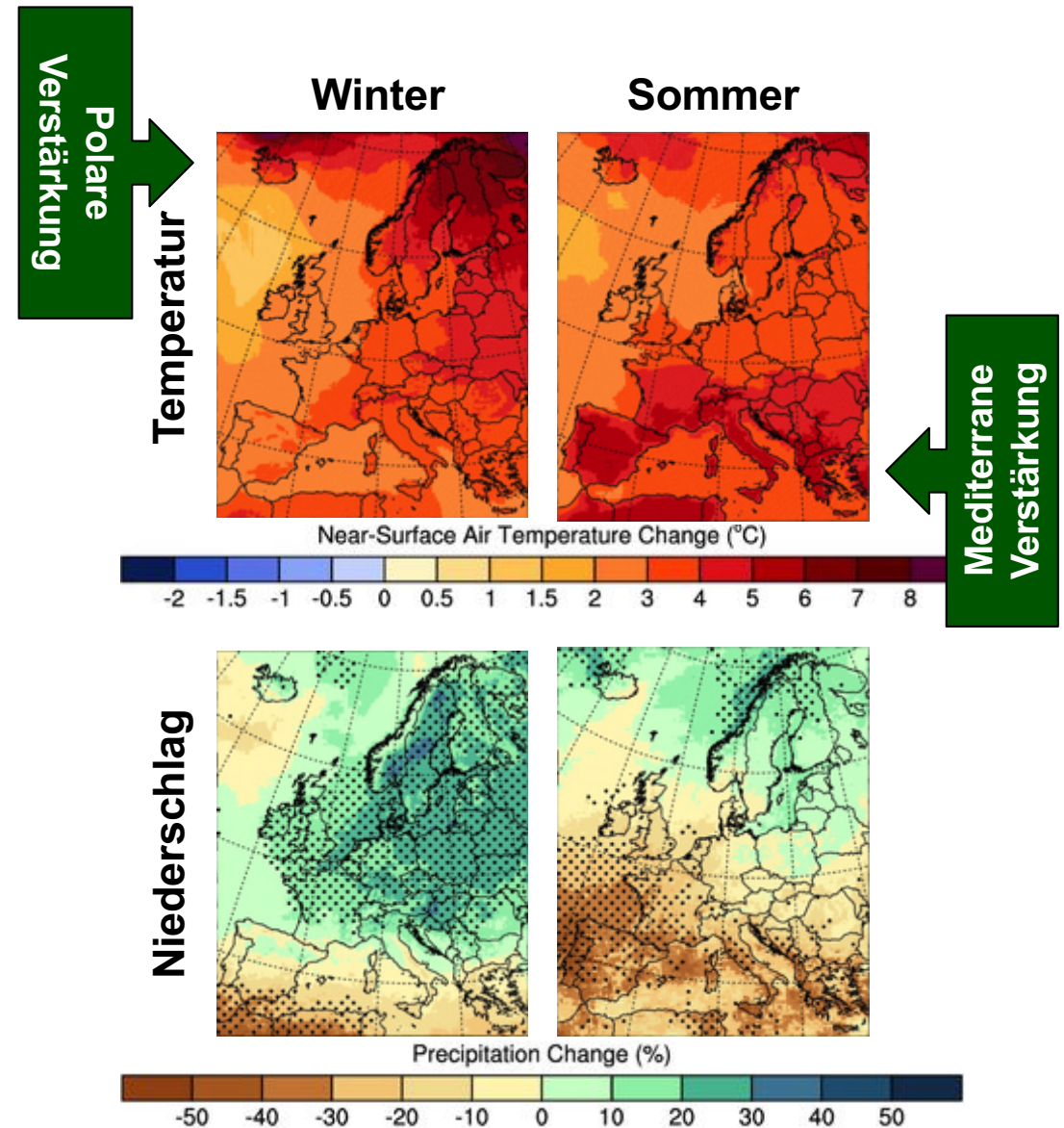
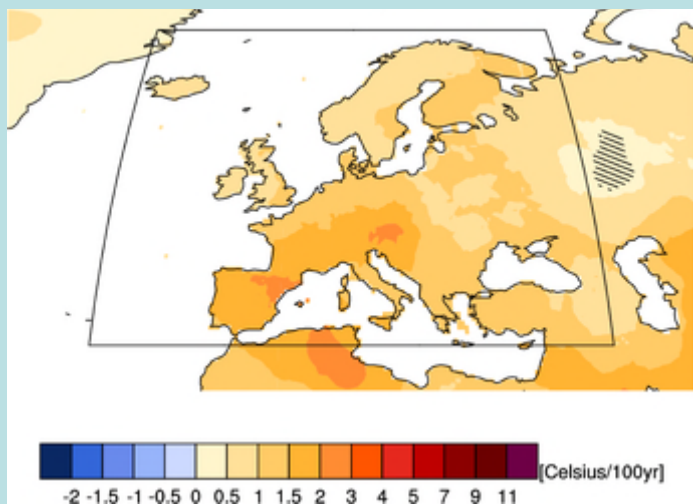
Mediterrane Verstärkung

Modell:

- 2070-2099 vs 1980-2009
- Euro-CORDEX Modelle (CH2018), Ensemble Median

Beobachtung

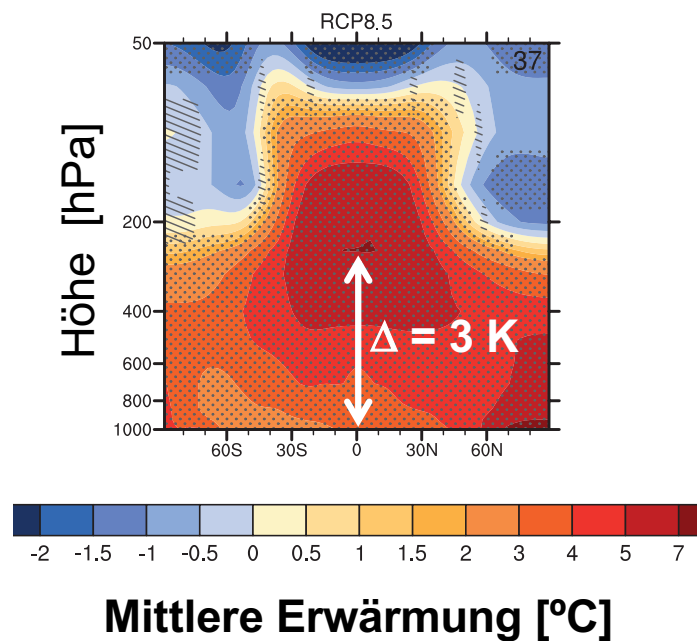
- Trend 1901-2019 [°C / 100 Jahre]
Juni - August



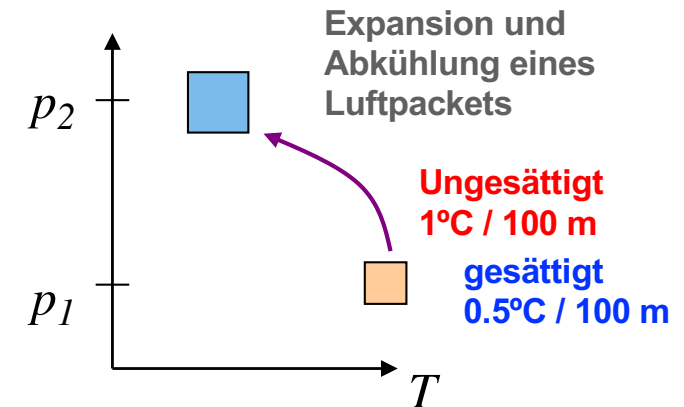
Mediterrane Verstärkung

Theorie: Thermodynamischer Effekt und vertikaler Temperaturgradient

- Thermodynamischer Effekt: mittlere Erwärmung und Anfeuchtung
- Lapse-Rate Effekt: Höhere Troposphäre erwärmt sich stärker als bodennahe Schichten.

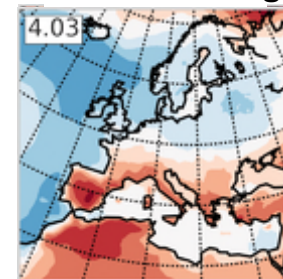


- Hängt zusammen mit Feuchtigkeit und vertikalem T-Gradienten (Lapse-Rate)

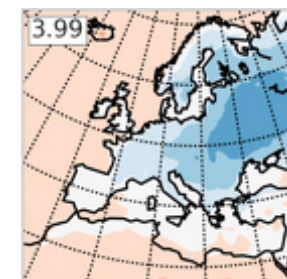


- Wird durch Modell-Rechnung bestätigt

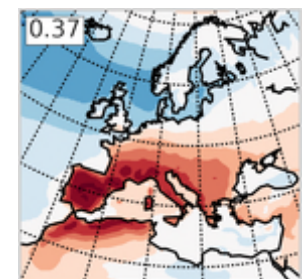
Nord-Süd-Kontrast der Erwärmung



Volle Modell-simulation

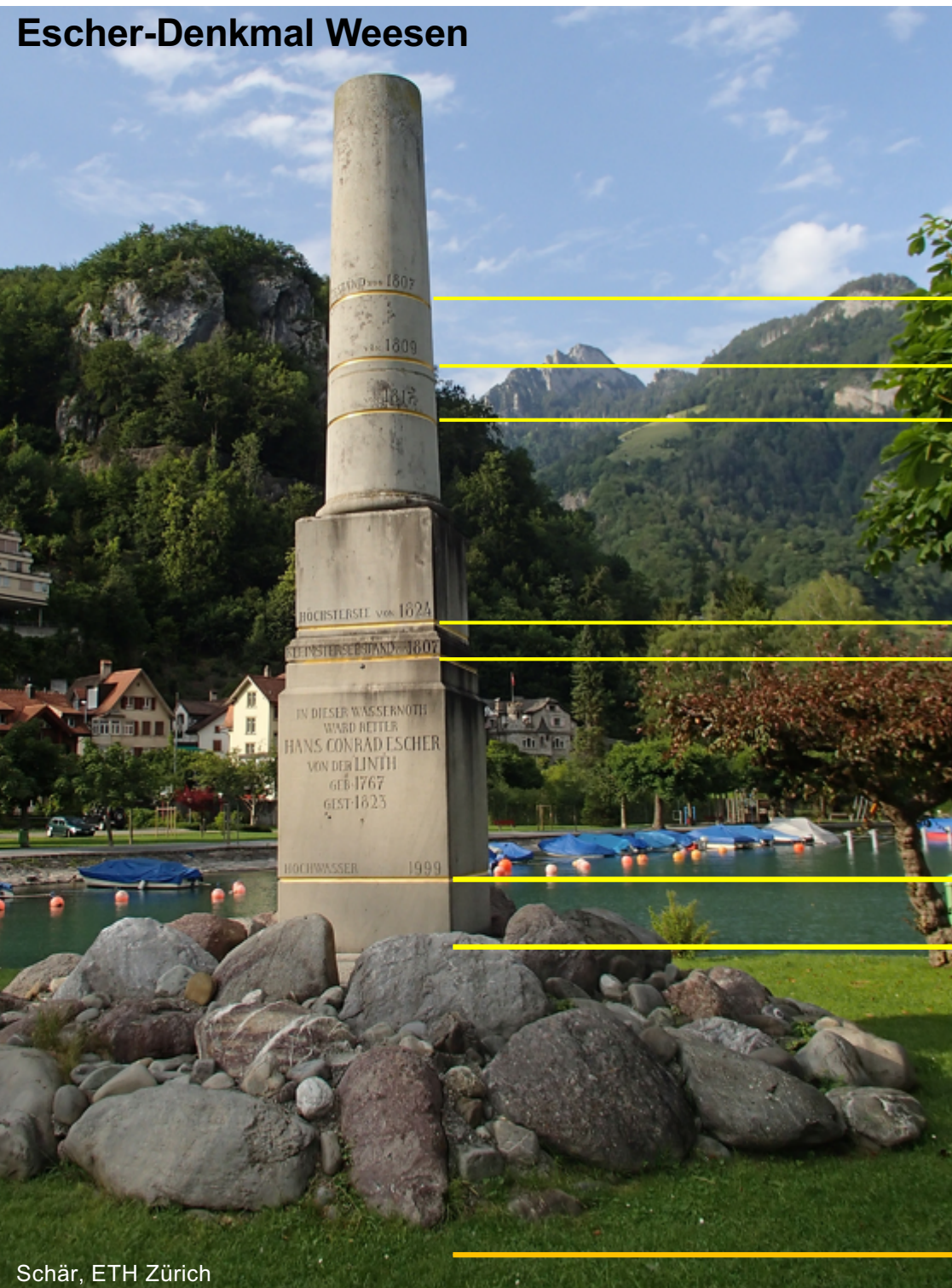


Antrieb nur durch Thermodynamischen Effekt



Zusätzlich mit Lapse-Rate Effekt

Langanhaltende Niederschläge



1807

1809

1817

Vor Linth-Korrektur

1824

1807

1999

+ 3.10 m

2005

+ 2.67 m

Höchststände
seit 1930

2003

– 0.51 m

Sommer-Tiefststand
seit 1930

Niederschlagsextreme

Theorie: Clausius-Clapeyron

- Warme Luft kann mehr Wasser aufnehmen und transportieren.
- **Klimawandel: Intensitäts-Zunahme von Starkniederschlägen um bis zu 6.5% pro °C Erwärmung**



Clausius-Clapeyron
Beziehung

$$\frac{1}{e_{sat}} \frac{de_{sat}}{dT} = \frac{L}{R_v T^2}$$

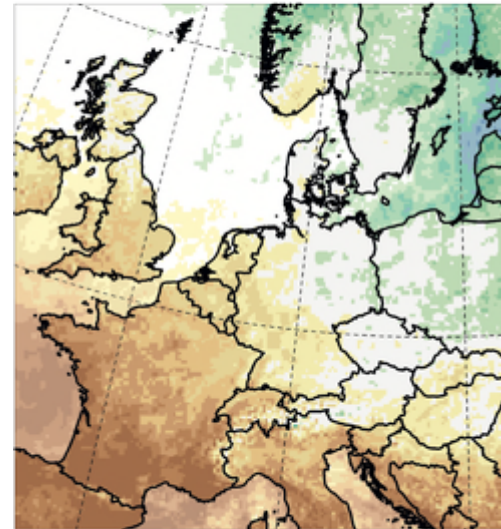


(Rudolf Clausius 1850, @ETH 1855-1867)

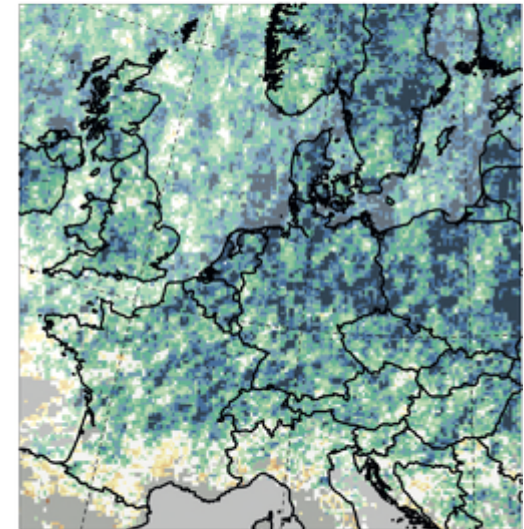
Modelle: Sommerniederschläge

- 2046-2075 versus 1981-2010, ohne Klimaschutz

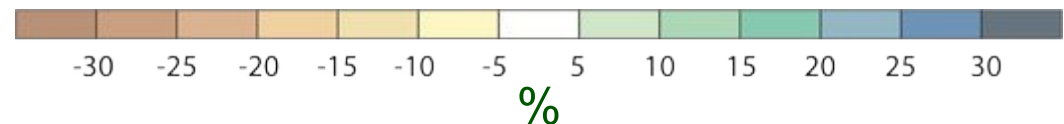
Niederschlagsmenge nimmt ab



Extreme Ereignisse nehmen zu



Rückkehrperiode 100 Jahre

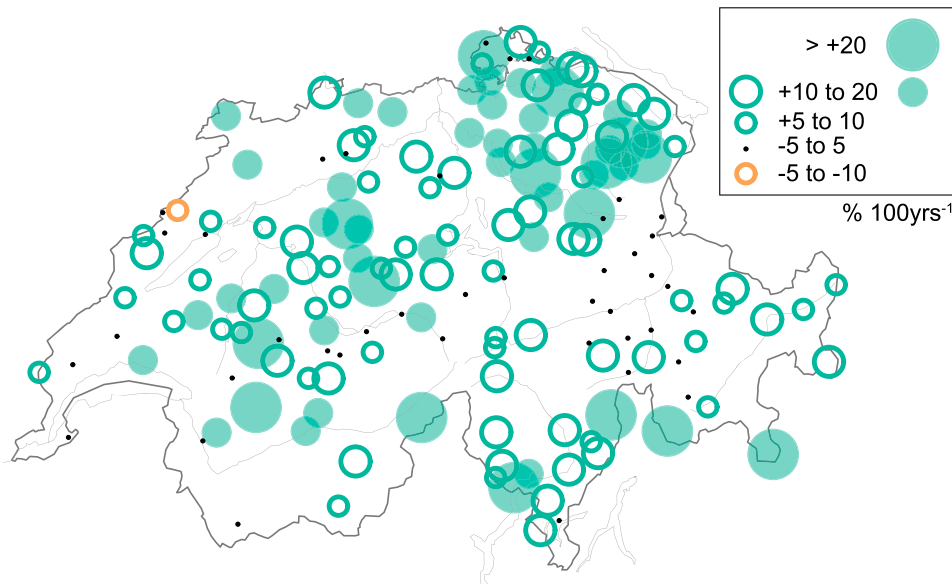


- **Modelle bestätigen Clausius-Clapeyron**

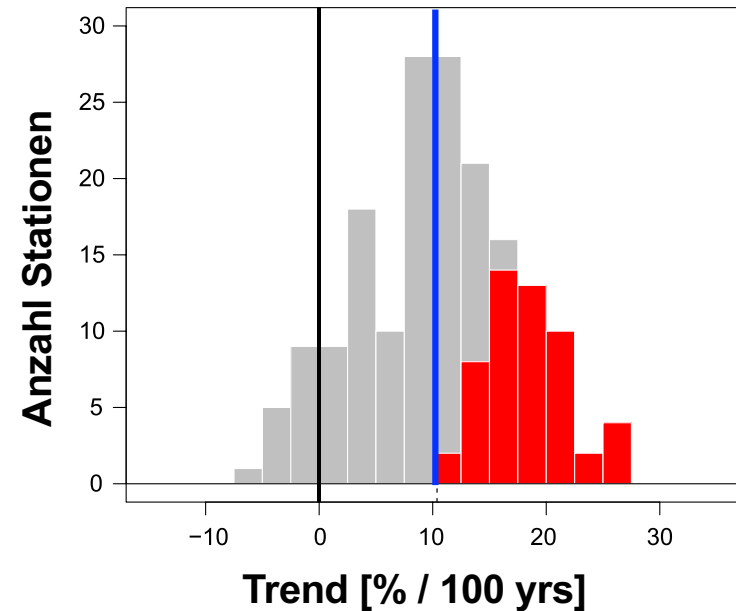
Niederschlagsextreme

Beobachtungen: Trends von Starkniederschlägen

- 185 Niederschlagsstationen der MeteoSchweiz, seit 1900
- Rückkehrperiode 1 Jahr



**31% der Stationen
haben signifikante Zunahme
der Intensität**



**Durchschnittliche Zunahme 7.4 % / °C.
Konsistent mit Clausius-Clapeyron**

Gewitter und “Flash floods”

Bahnhof Lausanne, 11. Juni 2018
41 mm Niederschlag in 10 min



Zürich, Haldenegg



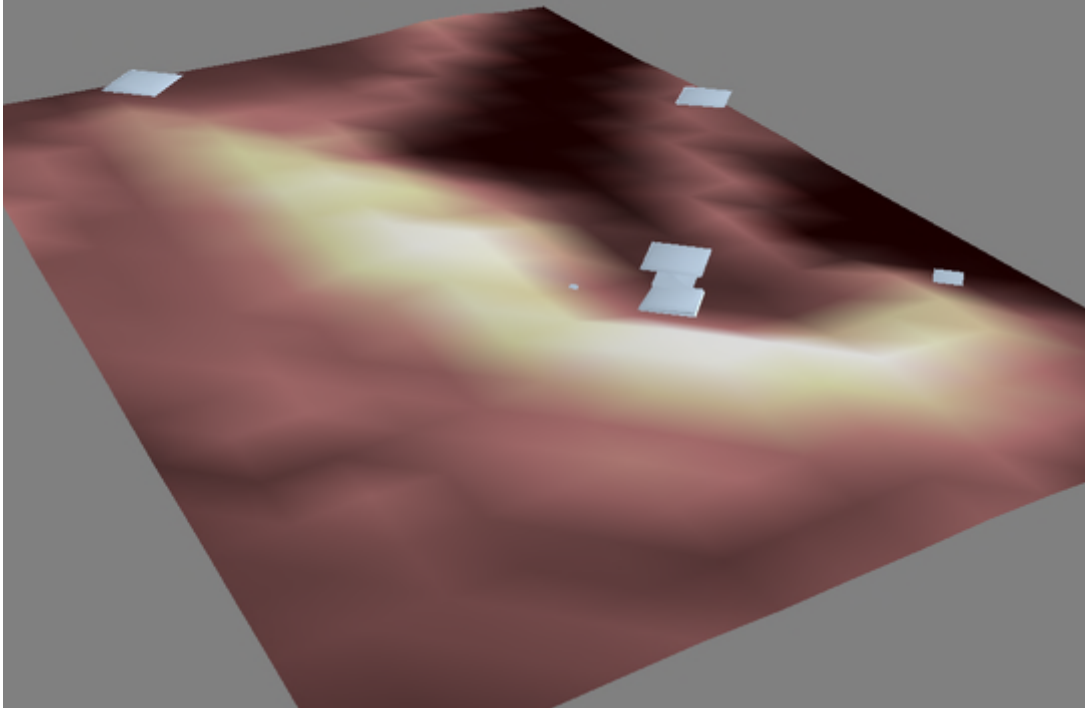
Gewitter über dem Millstätter-See, Österreich



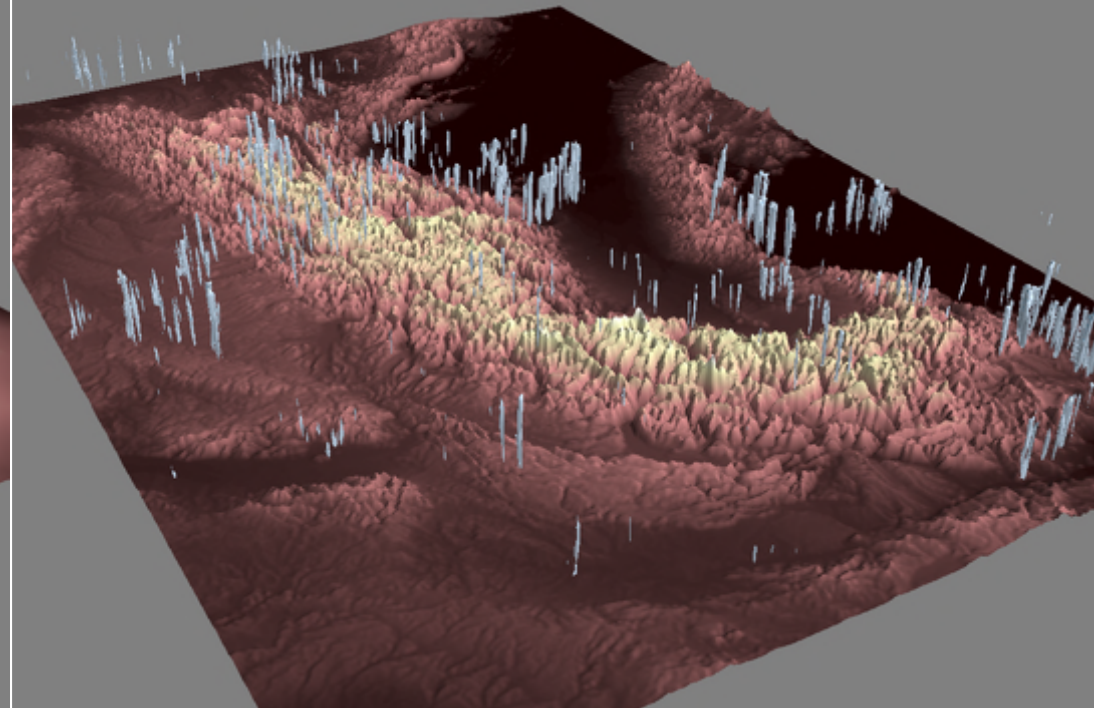
Gitterabstand in Klimamodellen

Bewölkung über dem Alpenraum
(flüssige Wolkentröpfchen)

Konventionelles Modell: $\Delta x = 50$ km



Hochauflösendes Modell: $\Delta x = 1$ km

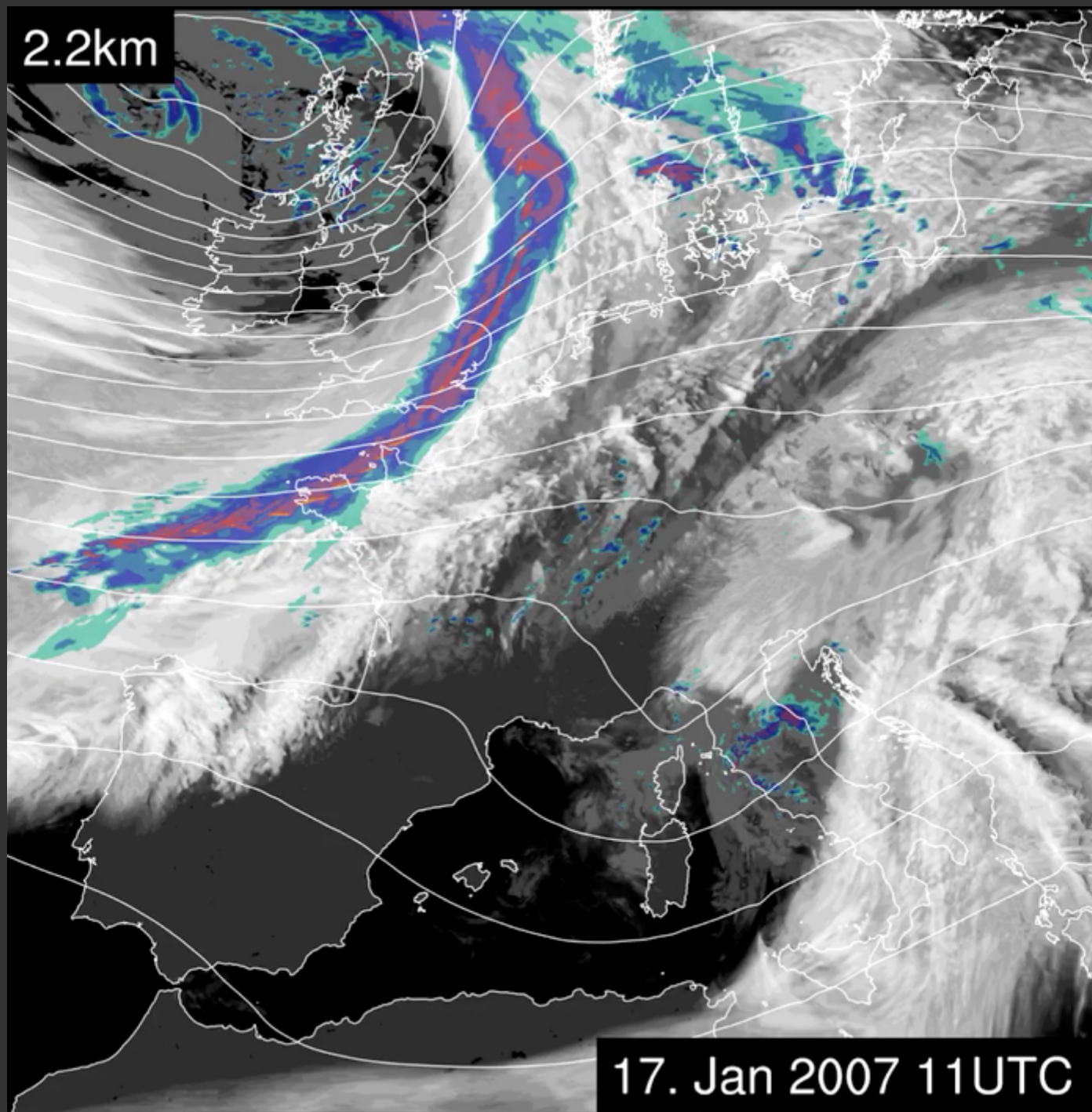


COSMO-Modell:

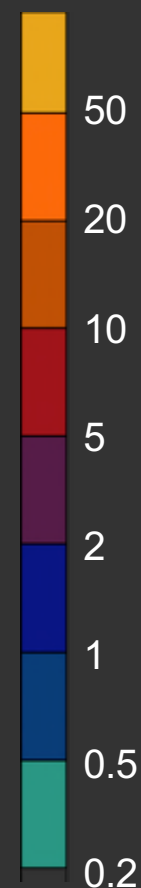
- läuft auf GPUs (PizDaint, CSCS, Lugano)
- eines der ersten Modelle seiner Art
- erlaubt hochauflösende Klimasimulationen
- Zusammenarbeit MeteoSchweiz / CSCS / ETH

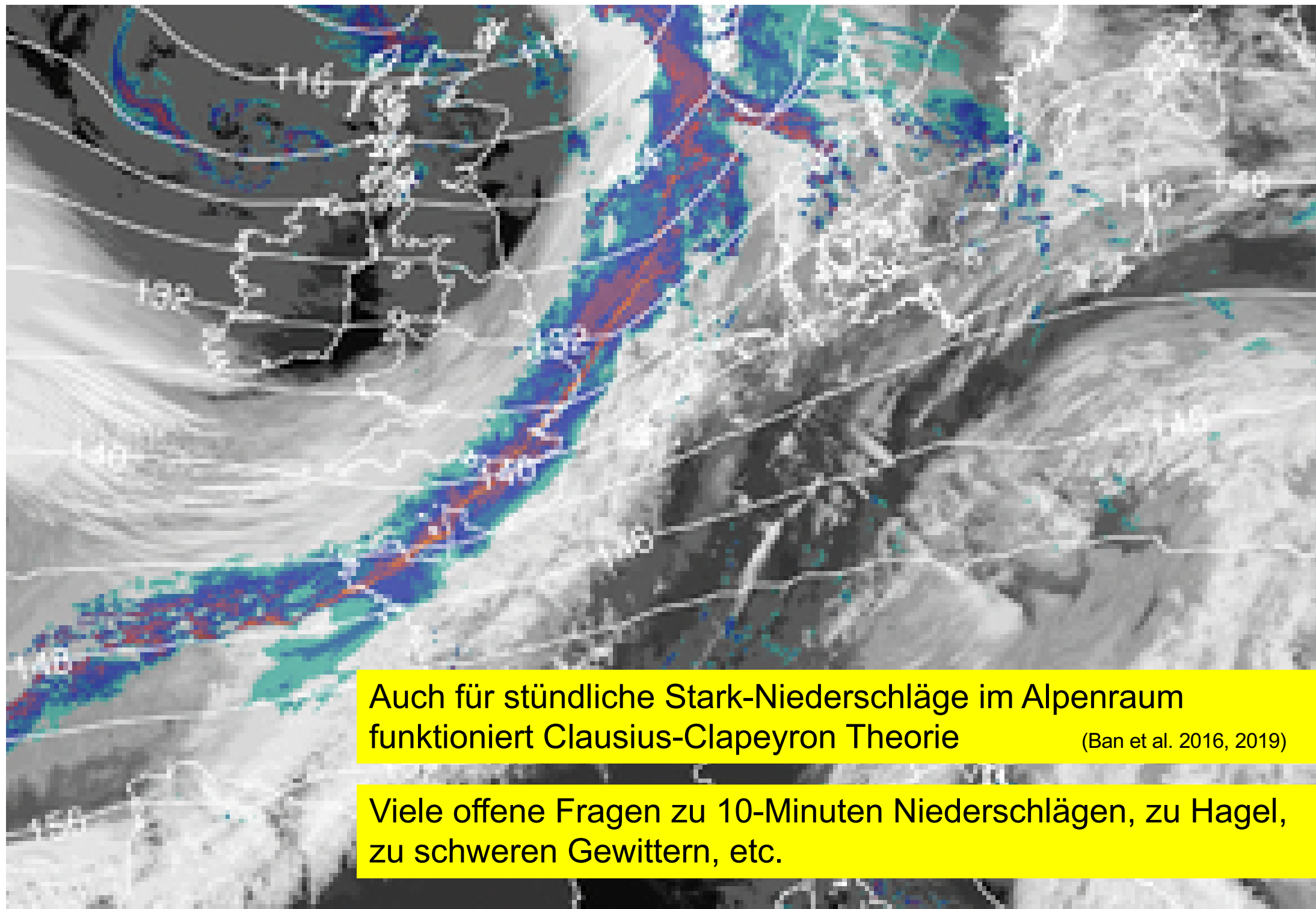
2.2km

$\Delta x = 2 \text{ km}$ Simulation über Europa



mm/h





Auch für stündliche Stark-Niederschläge im Alpenraum
funktioniert Clausius-Clapeyron Theorie

(Ban et al. 2016, 2019)

Viele offene Fragen zu 10-Minuten Niederschlägen, zu Hagel,
zu schweren Gewittern, etc.

Folgerungen

Der globale Klimawandel ist durch zahlreiche Untersuchungen überzeugend belegt.

- Wichtig um Mitigation voranzutreiben!

Zunehmend überzeugende Indizienketten für regionale Auswirkungen: Hitzewellen, Reduktion Schnee, Starkniederschläge, ...

- Wichtig um Adaptation (Anpassung) voranzutreiben!