



Auswirkungen des Klimawandels auf den Grundwasserhaushalt in Hessen

Beobachtungen und mögliche zukünftige Veränderungen

2. September 2021

Mario Hergesell

Hessisches Landesamt für Naturschutz,
Umwelt und Geologie

Dezernat Hydrogeologie, Grundwasser



1. Einführung

2. Beobachteter Klimawandel

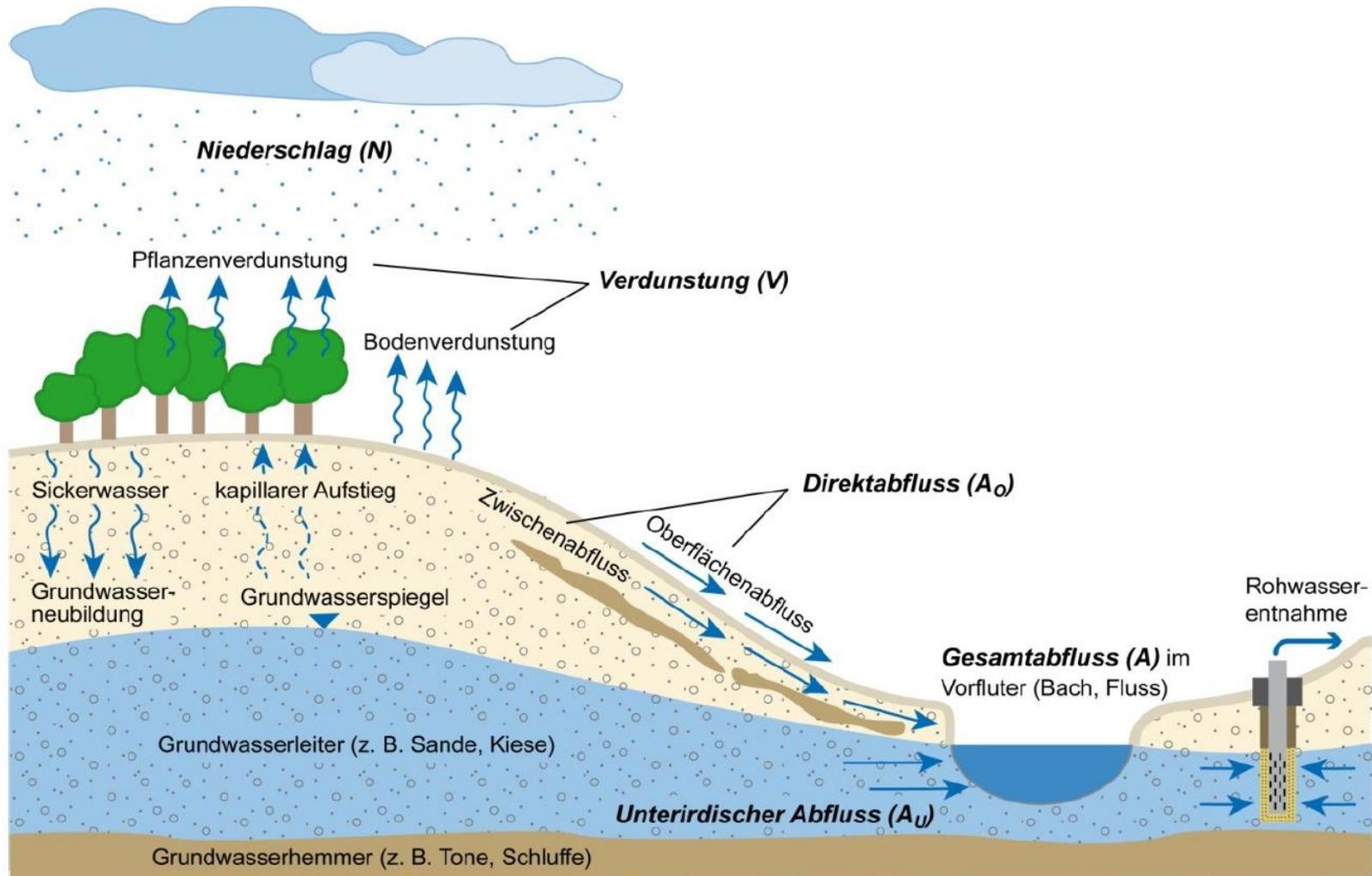
3. Mögliche Veränderungen in der Zukunft

4. Schlussfolgerungen und Fazit

Grundwasserneubildung als Teil des Wasserkreislaufs

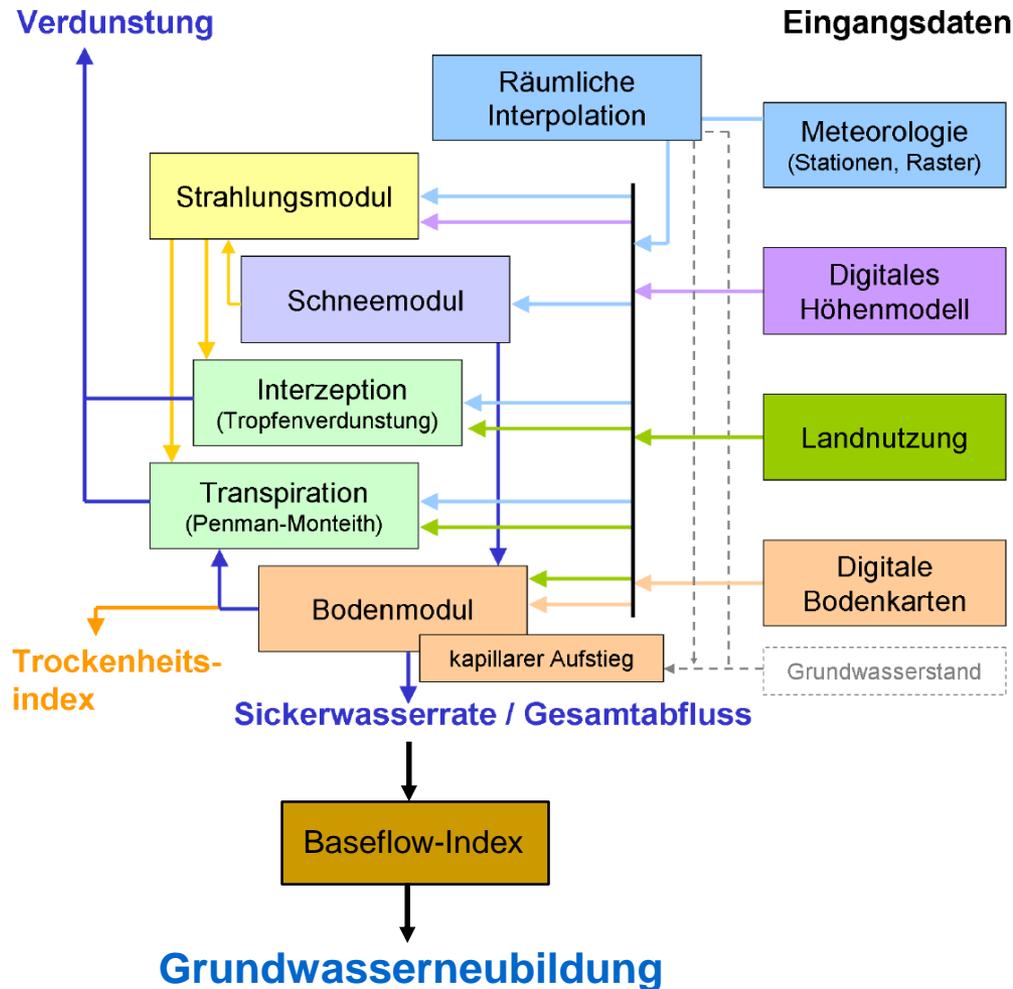
Vereinfachte Bilanz: $GWN = \text{Niederschlag} - \text{Verdunstung} - \text{Direktabfluss}$

- *klimasensitiv*
- *räumlich* und *zeitlich variabel*



Bodenwasserhaushaltsmodell **GWN-BW** (KLIWA)

Ermittlung der aktuellen Verdunstung, Gesamtabfluss und der Grundwasserneubildung



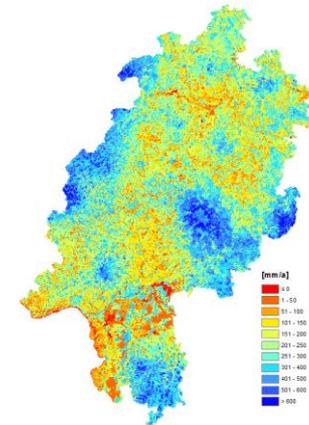
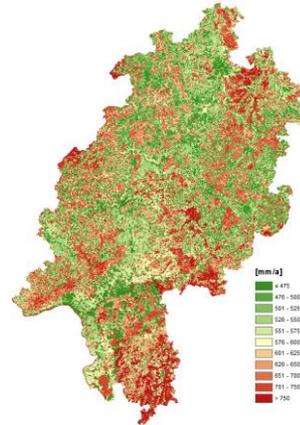
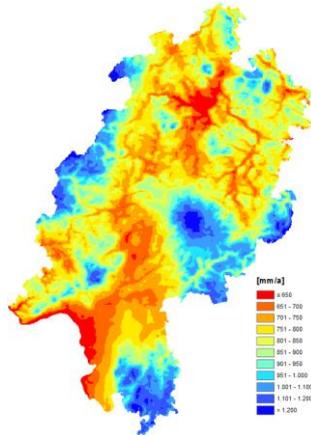
- Einheitliches Verfahren in den KLIWA-Partnerländern (Baden-Württemberg, Bayern, Rheinland-Pfalz, Hessen und Saarland)
- modular aufgebaut
- physikalisch basierte und konzeptionelle Prozessbeschreibung
- hohe zeitliche Auflösung -> Tageswerte
- räumliche Auflösung ist flexibel (Rasterdaten oder Grundflächen)

Wasserbilanzgrößen in Hessen (KLIWA Ist-Zustand 1971-2000)

Niederschlag: 769 mm/a

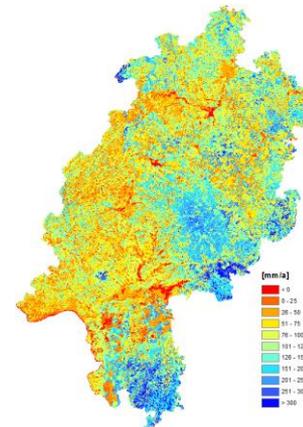
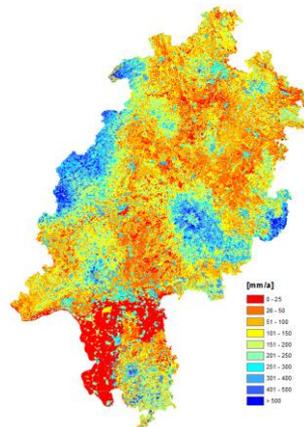
Reale Verdunstung: 523 mm/a

Gesamtabfluss: 246 mm/a

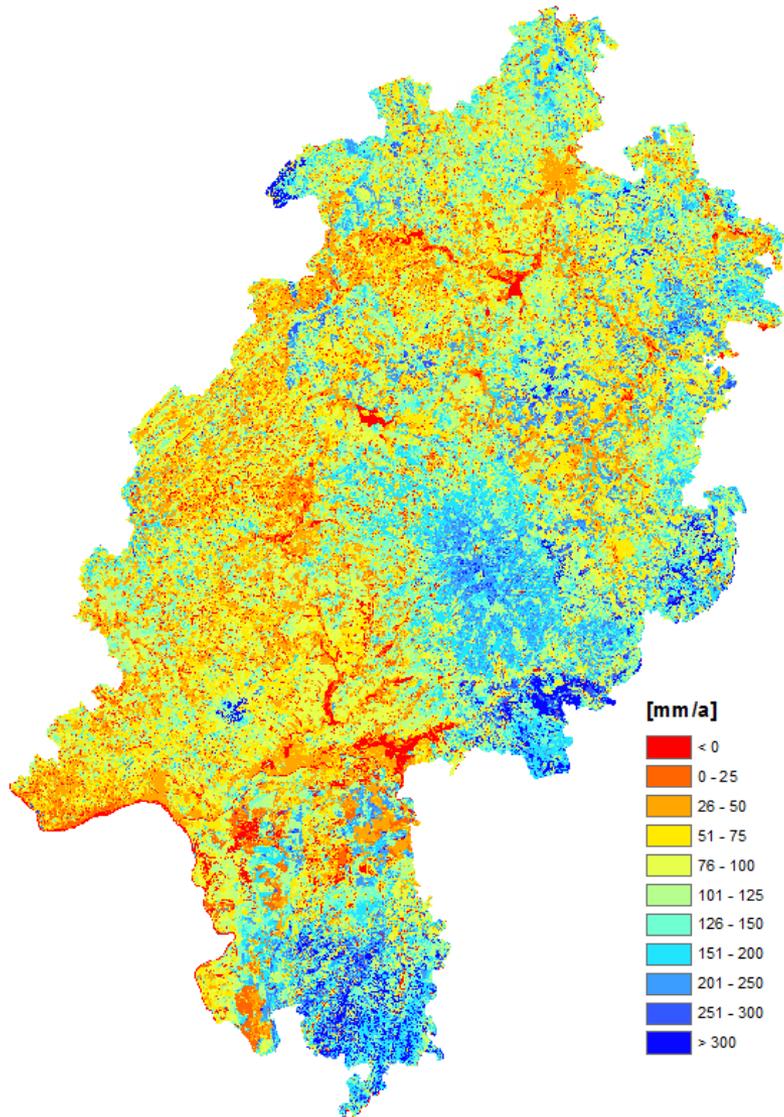


Direktabfluss: 144 mm/a

Grundwasserneubildung: 102 mm/a



Grundwasserneubildung



Langjähriges Mittel 1971-2000: 102 mm/a

Maßgebliche Größe für die natürliche Regenerationsfähigkeit des Grundwasserdargebots

Wasserwirtschaftlich bedeutsame Größe (nachhaltige GW-Bewirtschaftung, Wasserrechte, Wasserschutzgebiete)

Im langjährigen Mittel wird hessenweit jährlich rd. 5-fach mehr Grundwasser neu gebildet als gefördert

Große räumliche Variabilität (resultiert aus Überlagerung der Verteilung aller anderen Einflussgrößen)

Niederschlag ist die mit Abstand sensitivste Einflussgröße

Findet i.d.R. überwiegend im Winterhalbjahr statt

Entscheidend für Grundwasserstandsentwicklung



1. Einführung

2. Beobachteter Klimawandel

3. Mögliche Veränderungen in der Zukunft

4. Schlussfolgerungen und Fazit

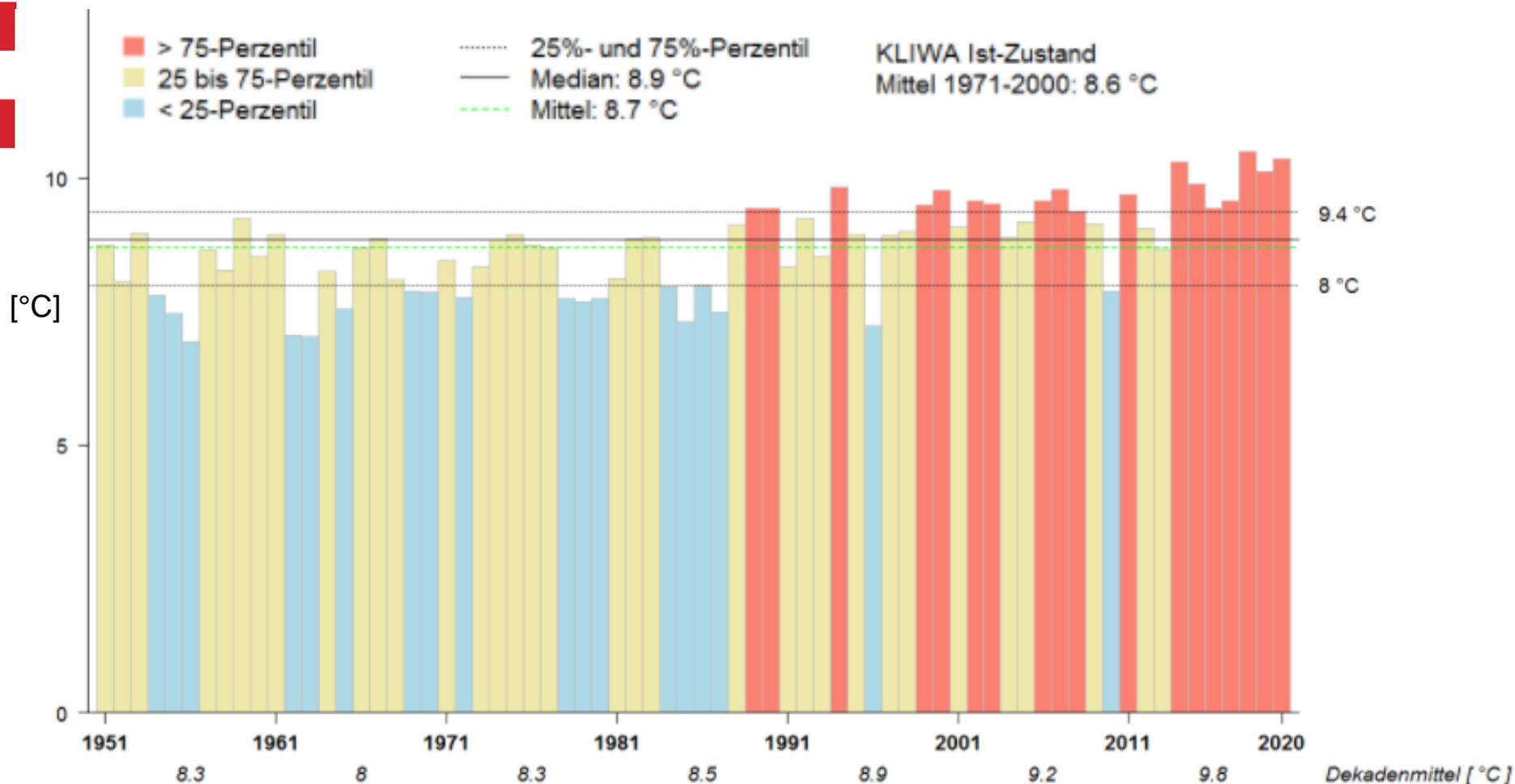
Entwicklung der Jahresmitteltemperatur in Hessen 1951-2020

Deutliche Erwärmung in den letzten 30 Jahren

2018 (10,5°C) wärmstes Jahr seit Messbeginn

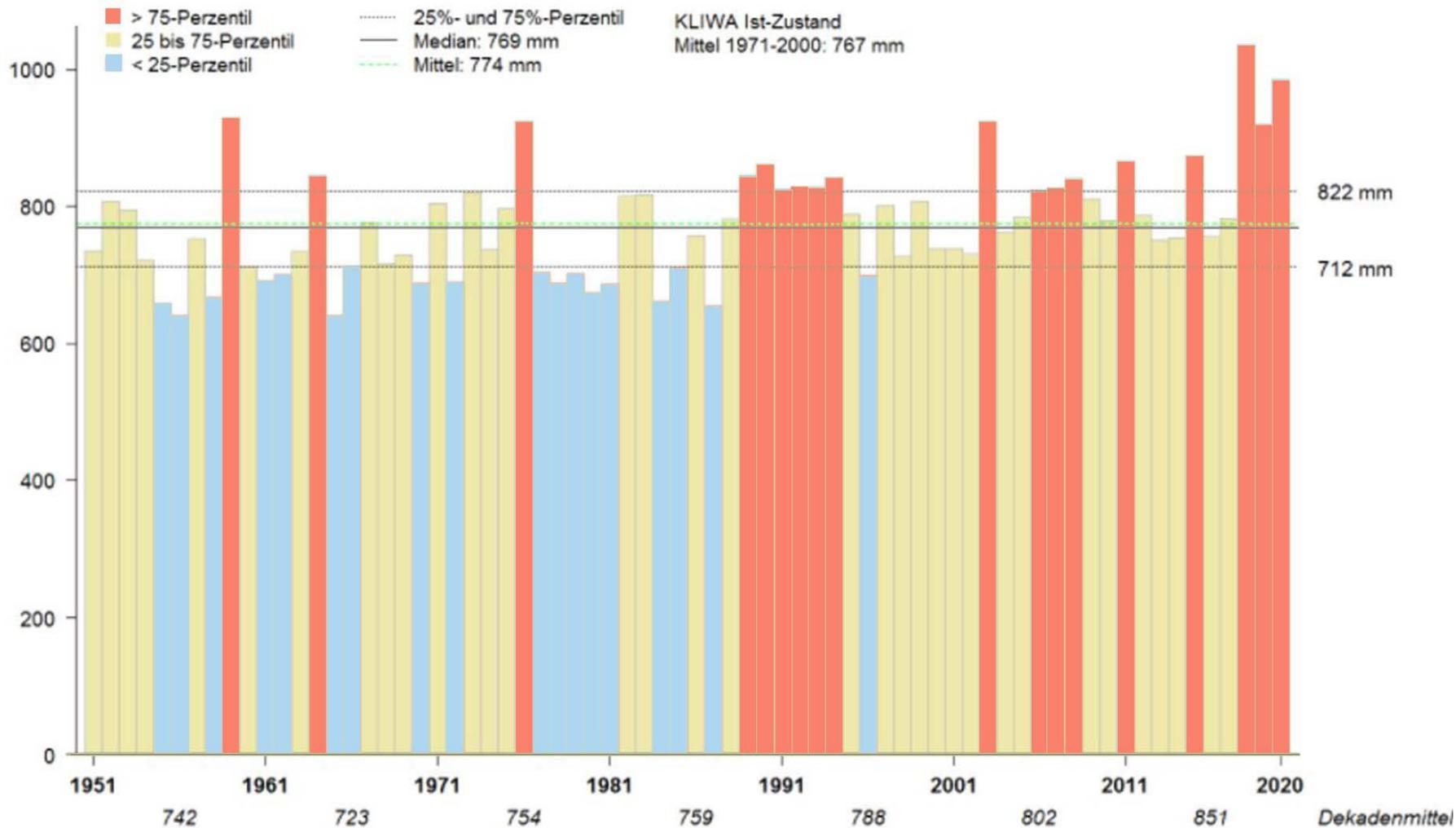
2020 (10,4°C) zweitwärmstes Jahr seit Messbeginn

2014 (10,3°C) drittwärmstes Jahr seit Messbeginn



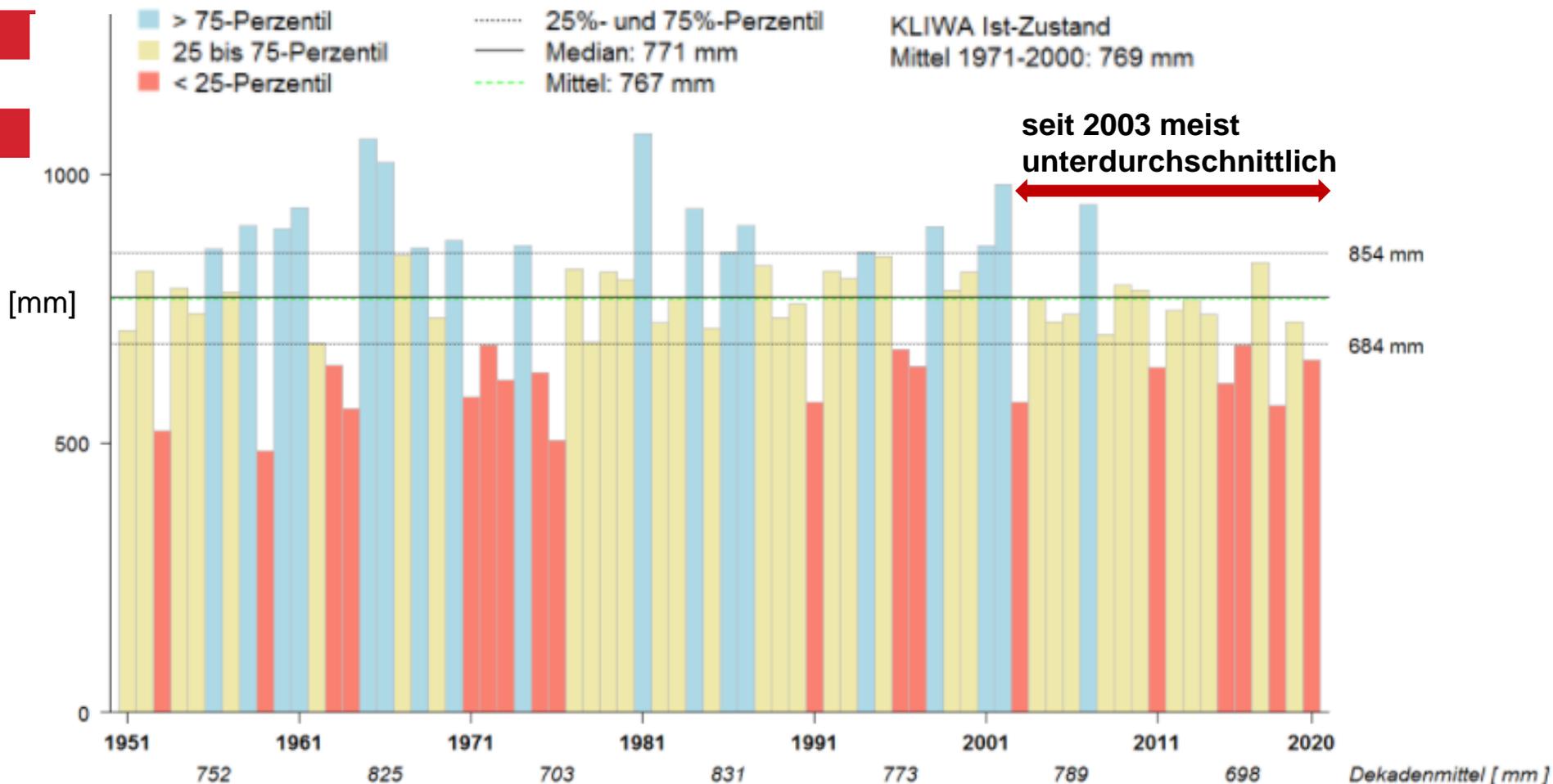
Entwicklung der potentiellen Verdunstung in Hessen 1951-2020

Deutlich zunehmender Trend
Durch Temperaturzunahme bedingt
Wirkt sich reduzierend auf die GWN aus



Entwicklung des Jahresniederschlags in Hessen 1951-2020

Hohe jährliche und dekadische Variabilität
Seit dem Jahr 2003 meist unterdurchschnittlich
Langfristig kein eindeutiger Trend



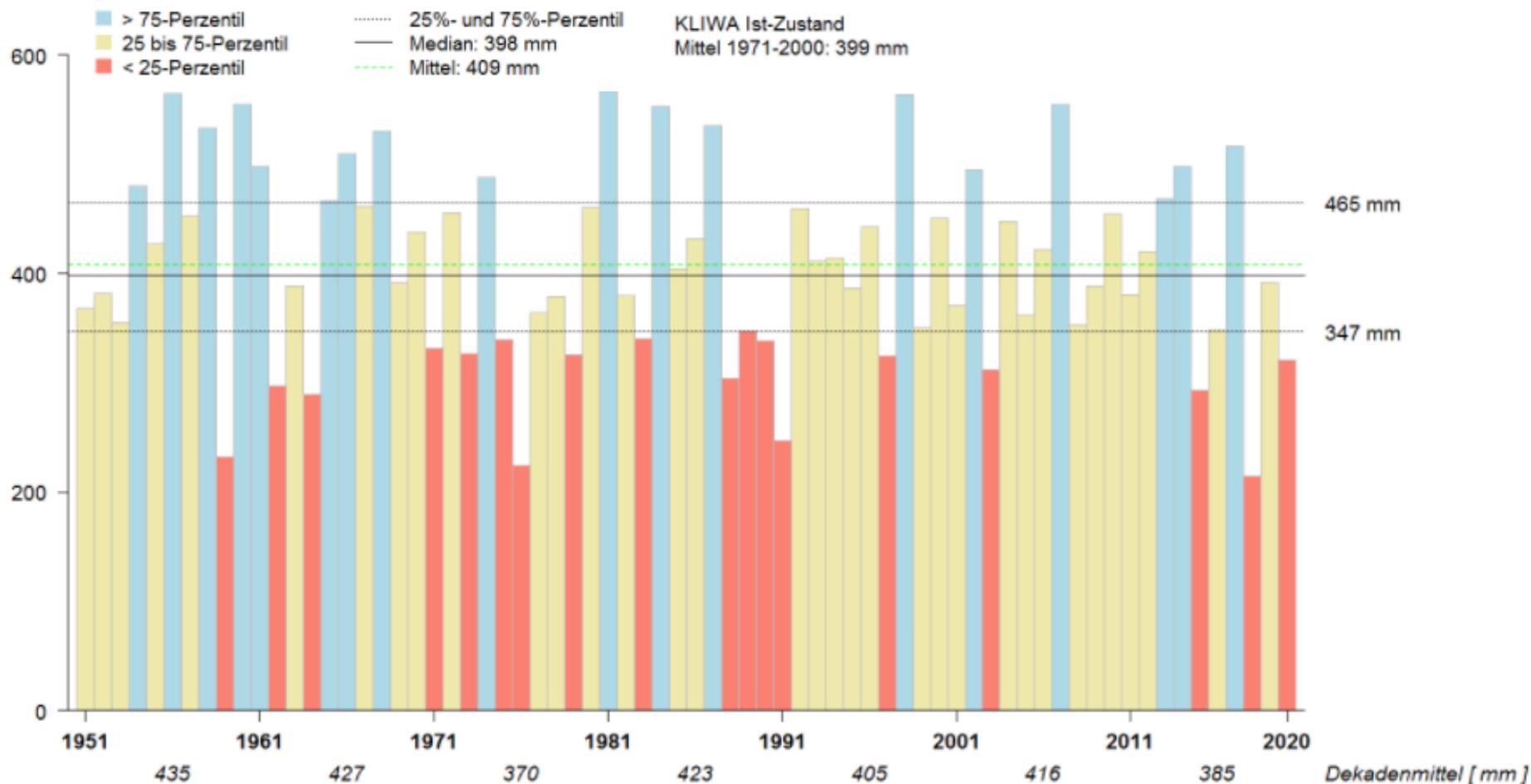
Entwicklung des Sommerniederschlags 1951-2020

(Hydrologisches Sommerhalbjahr -> weniger relevant für die GWN)

Hohe jährliche und dekadische Variabilität

Langfristig kein eindeutiger Trend

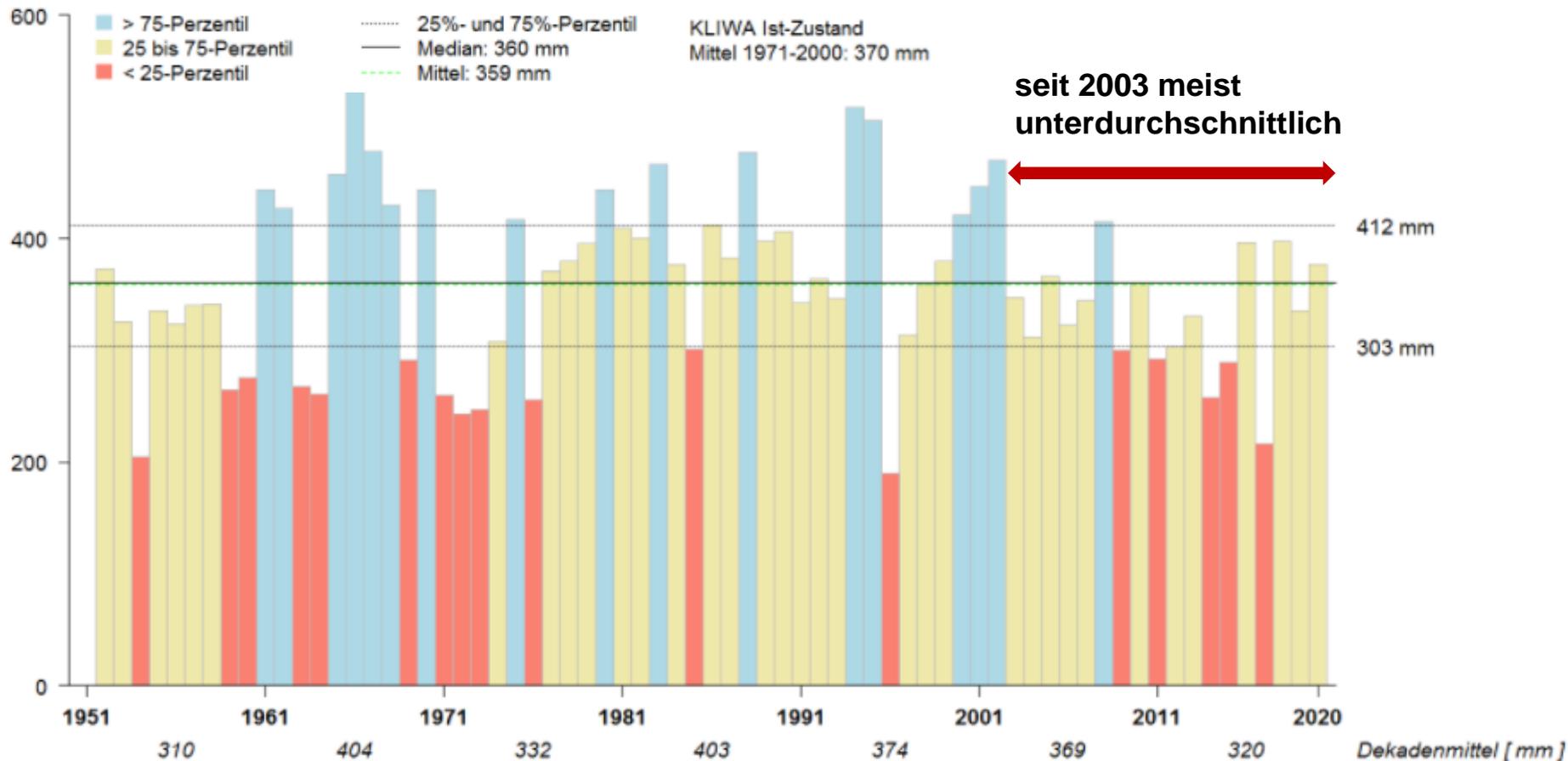
2018 extrem trockenes Sommerhalbjahr



Entwicklung des Winterniederschlags 1951-2020

(Hydrologisches Winterhalbjahr -> ist für die GWN maßgebend)

Hohe jährliche und dekadische Variabilität
Seit dem Jahr 2003 meist unterdurchschnittlich
Langfristig kein eindeutiger Trend



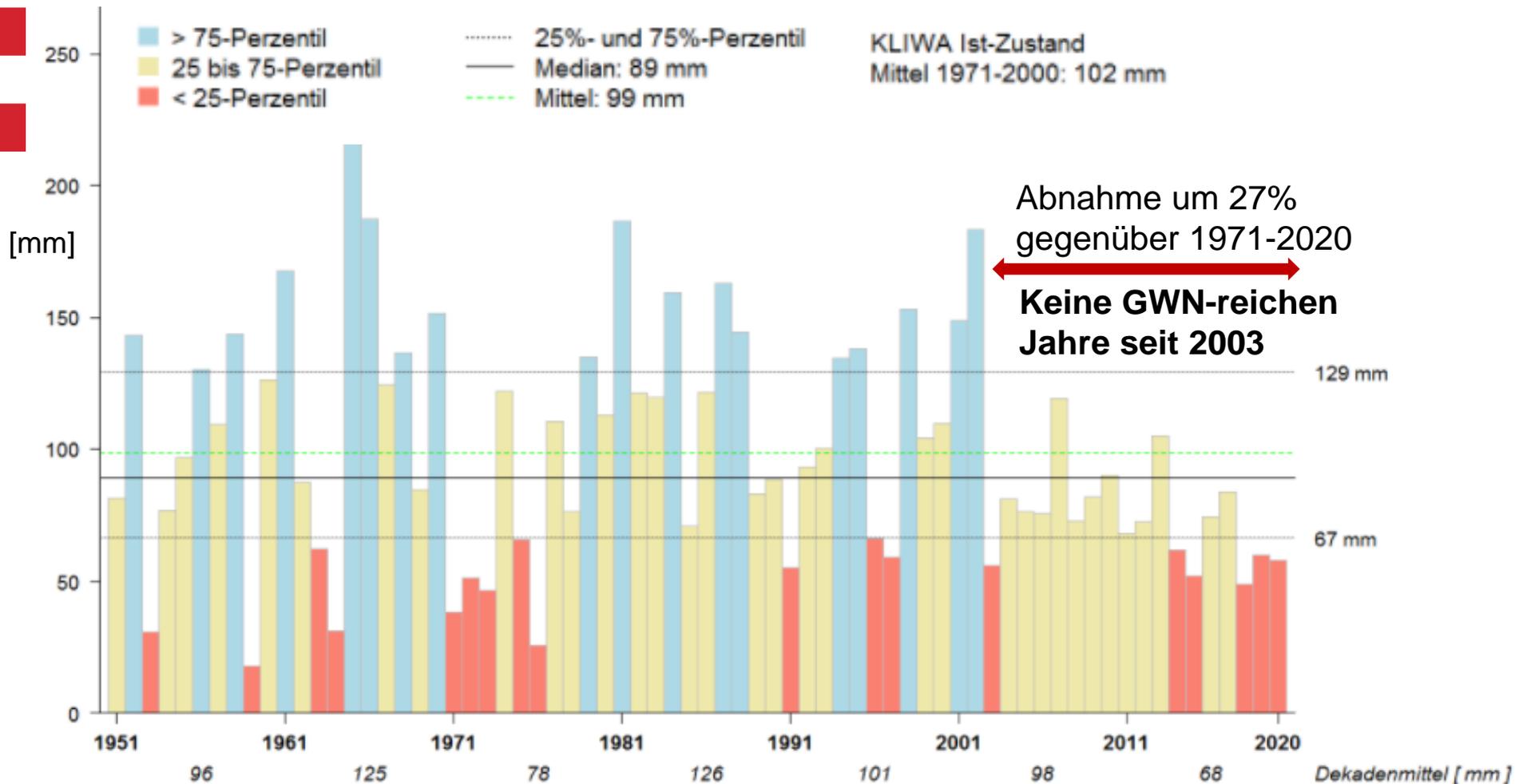
Entwicklung der Grundwasserneubildung Hessen 1951-2020

Bis 2003 extreme jährliche Variabilität

Seit 2003 meist unterhalb des Mittelwertes

Es gab früher schon extremere Einzeljahre

Seit 2003 keine Neubildungsreichen Nassjahre mehr, geringere jährliche Variabilität



Entwicklung der Grundwasserneubildung Hessen 1951-2020

Bis 2003 extreme jährliche Variabilität

Seit 2003 meist unterhalb des Mittelwertes

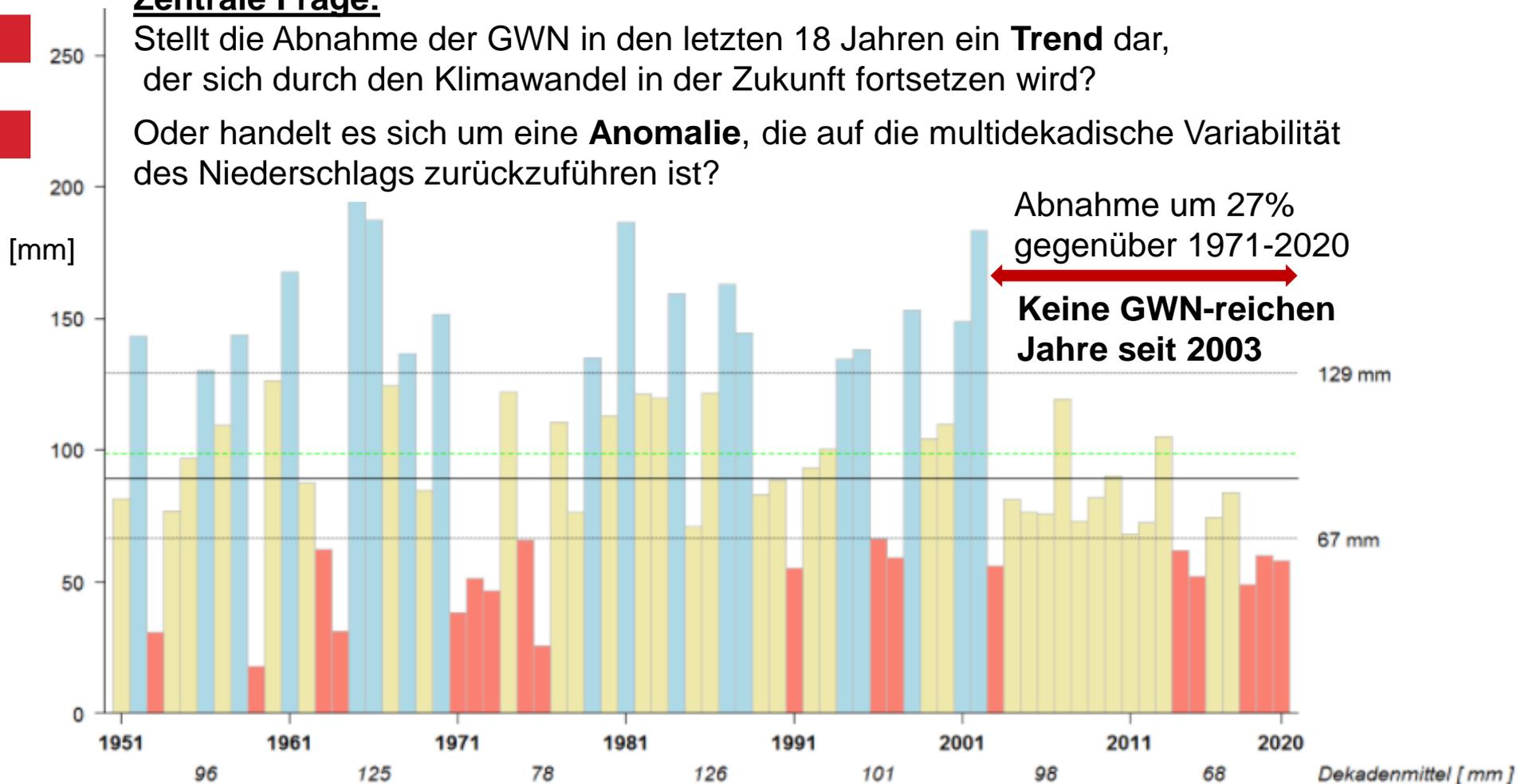
Es gab früher schon extremere Einzeljahre

Seit 2003 keine Neubildungsreichen Nassjahre mehr, geringere jährliche Variabilität

Zentrale Frage:

Stellt die Abnahme der GWN in den letzten 18 Jahren ein **Trend** dar, der sich durch den Klimawandel in der Zukunft fortsetzen wird?

Oder handelt es sich um eine **Anomalie**, die auf die multidekadische Variabilität des Niederschlags zurückzuführen ist?





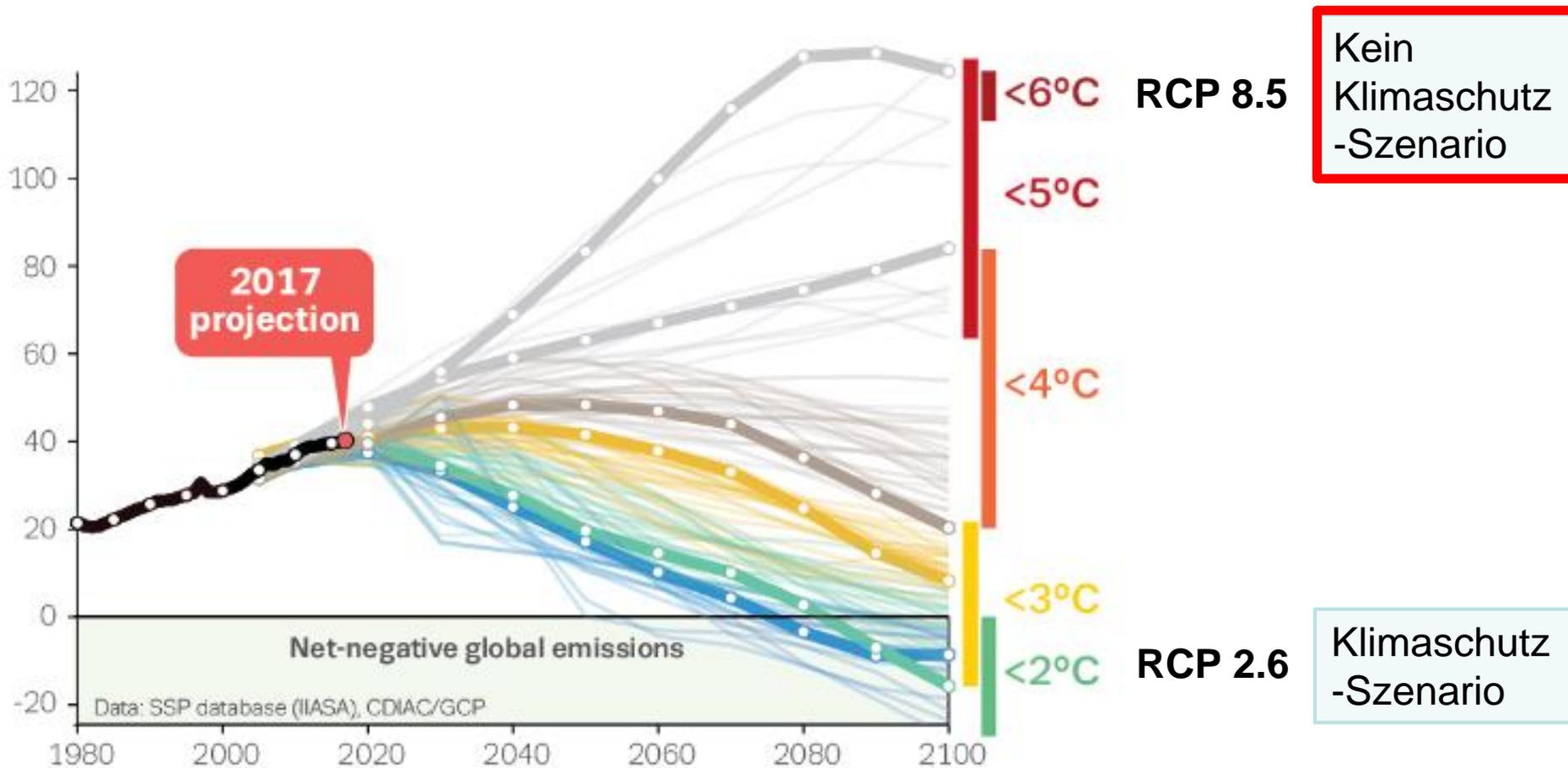
1. Einführung

2. Beobachteter Klimawandel

3. Mögliche Veränderungen in der Zukunft

4. Schlussfolgerungen und Fazit

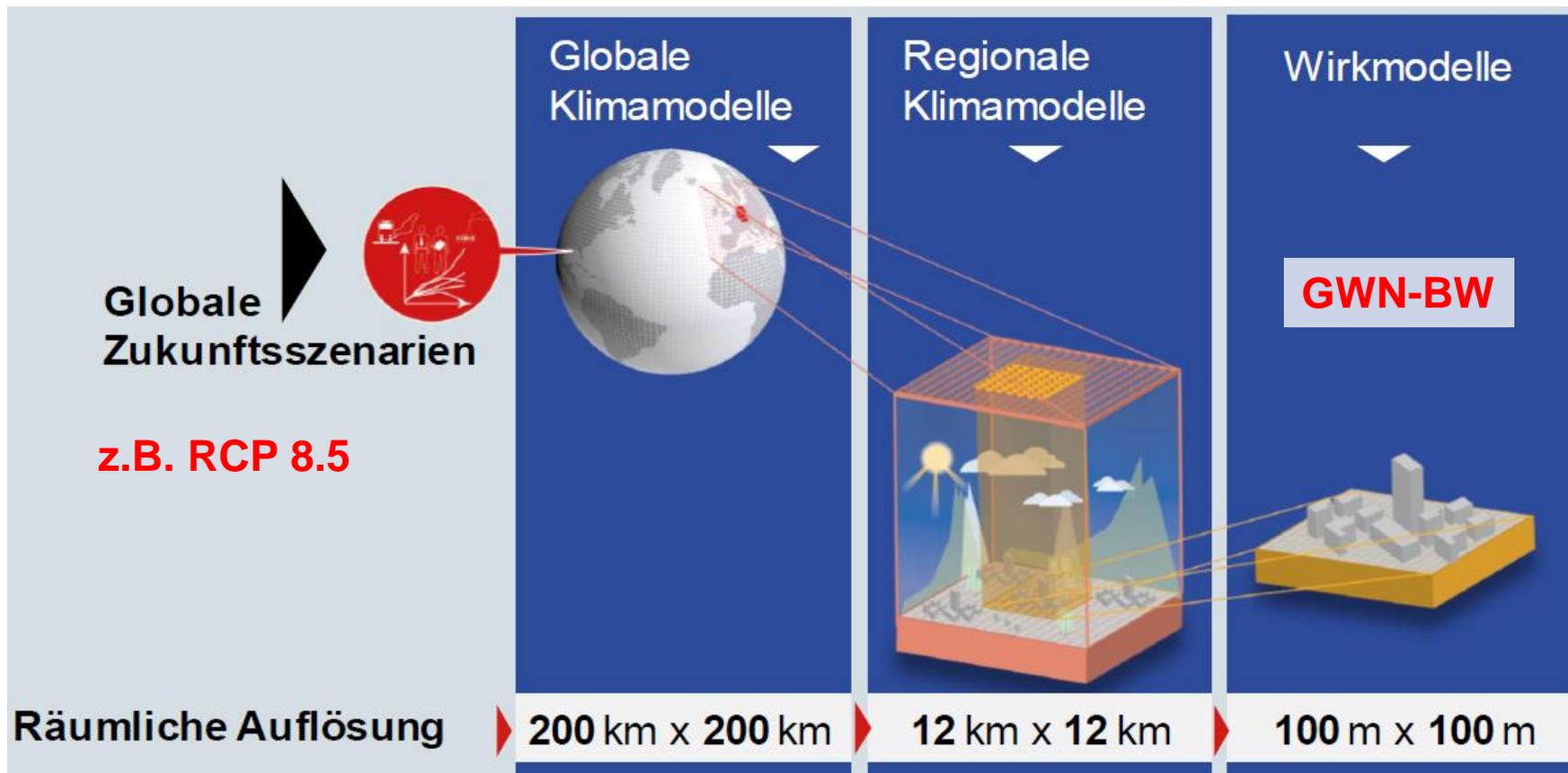
CO₂-Emissionen – Beobachtung und Szenarios



Globale CO₂-Emissionen von fossilen Brennstoffen und Zementproduktion:
Beobachtung und IPCC-Szenarios.

Klimaprojektionen

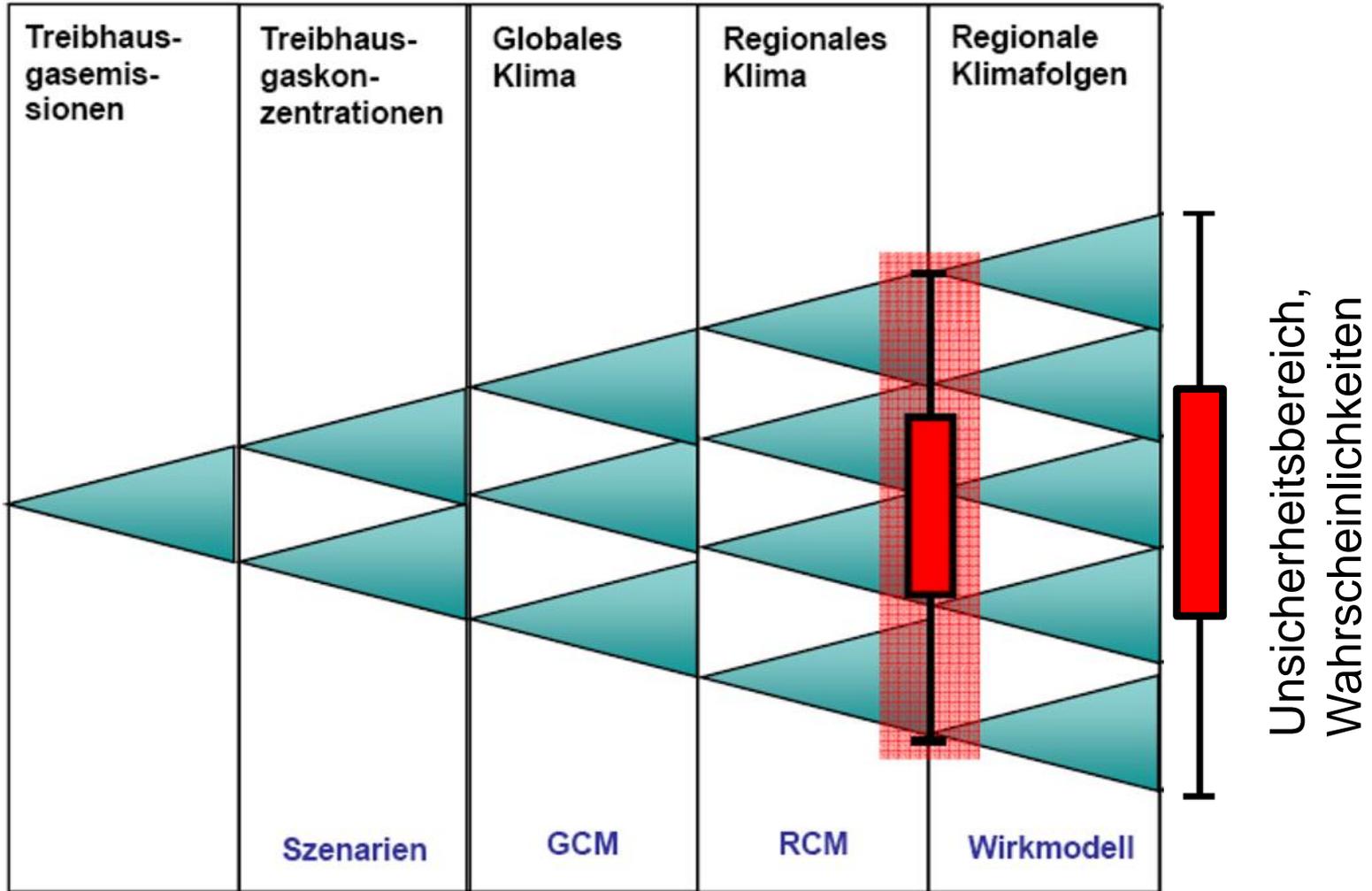
Gekoppelte Modelle auf unterschiedlichen Skalen -> Downscaling



Quelle: Walter, DWD KU11 (abgeändert)

Multimodell-Ensemble

Abschätzung von Unsicherheiten



Quelle: Imbery, DWD KU1 (abgeändert)

KLIWA-Ensemble

Emissions-szenario	Globales Klimamodell	Modellrun	Regional-modell	Regional-modell - Typ
RCP 8.5	EC-EARTH	r12i1p1	CCLM4-8-17	Dynamisch
RCP 8.5	EC-EARTH	r12i1p1	KNMI-RACMO2	Dynamisch
RCP 8.5	EC-EARTH	r12i1p1	SMHI-RCA4	Dynamisch
RCP 8.5	EC-EARTH	r1i1p1	KNMI-RACMO2	Dynamisch
RCP 8.5	MIROC5	r1i1p1	CCLM4-8-17	Dynamisch
RCP 8.5	HadGEM2	r1i1p1	WRF361H	Dynamisch
RCP 8.5	MPI-ESM	r1i1p1	CCLM4-8-17	Dynamisch
RCP 8.5	MPI-ESM	r1i1p1	SMHI-RCA4	Dynamisch
RCP 8.5	MPI-ESM	r1i1p1	WRF361H	Dynamisch
RCP 8.5	CanESM2	r1i1p1	Episodes2018	Statistisch
RCP 8.5	EC-EARTH	r12i1p1	Episodes2018	Statistisch
RCP 8.5	HadGEM2	r1i1p1	WETTREG2018	Statistisch
RCP 8.5	MPI-ESM	r1i1p1	WETTREG2018	Statistisch

13 Projektionen (mögliche Entwicklungspfade)

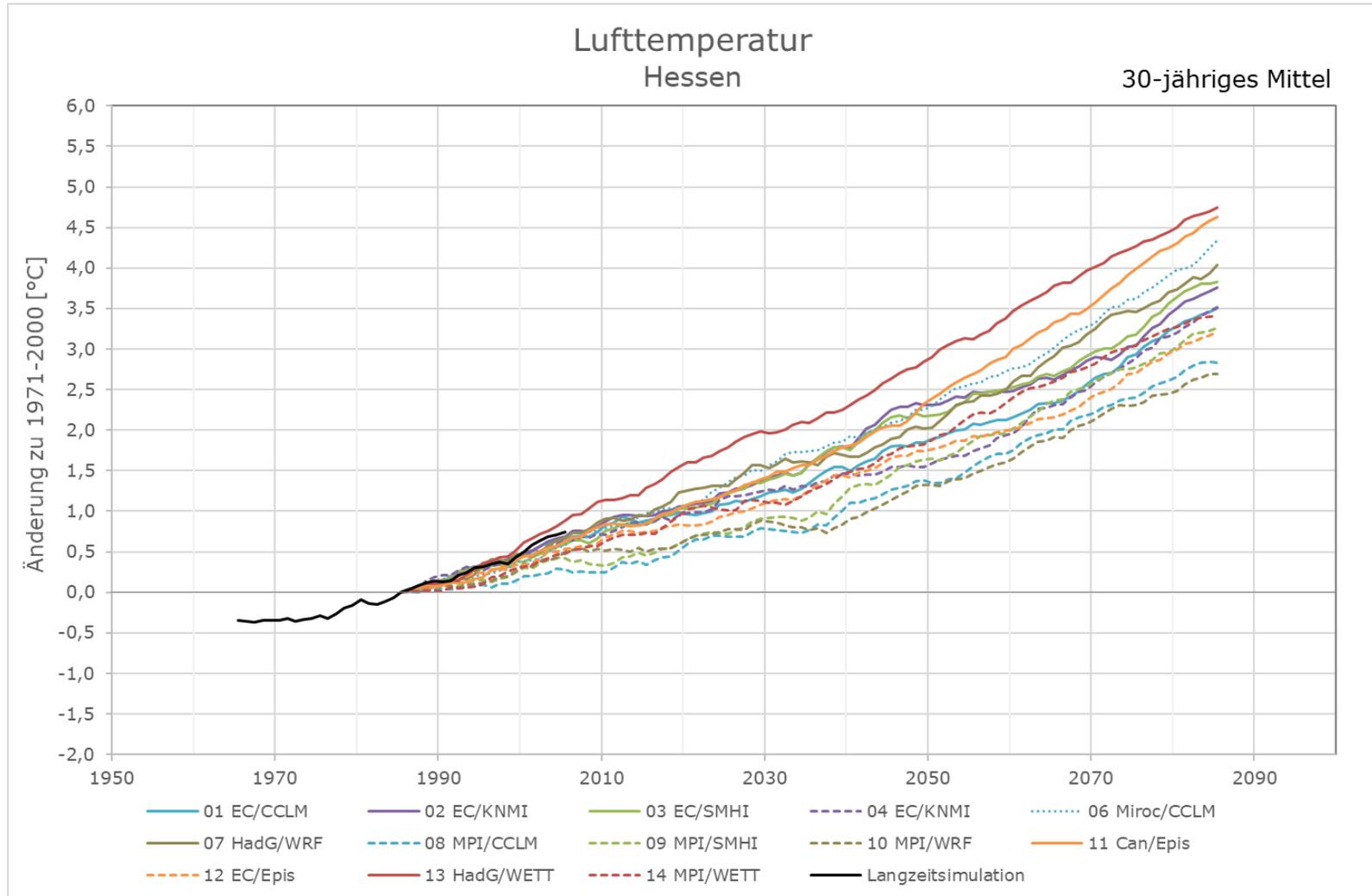
1 Emissionsszenario (Kein Klimaschutz-Szenario)

5 Globalmodelle

6 Regionalmodelle (4 dynamische und 2 statistische)

Alle Projektionen sind als gleichwertig anzusehen und haben die gleiche Eintrittswahrscheinlichkeit!

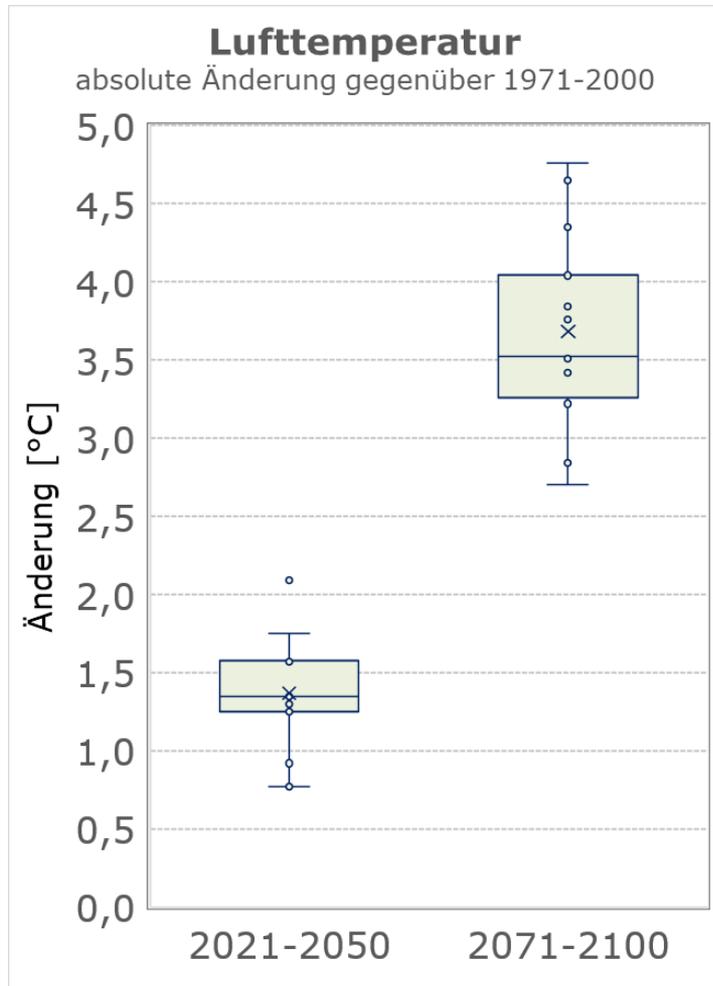
Temperatur – Entwicklungspfade (RCP 8.5)



**Die beobachtete Temperaturzunahme setzt sich fort
Klimasignal ist eindeutig und richtungsstabil**

Temperatur – Änderungssignale (RCP 8.5)

Absolute Änderung 2021-2050 (nahe Zukunft) und 2071-2100 (ferne Zukunft) gegenüber 1971-2000 (KLIWA Ist-Zustand)



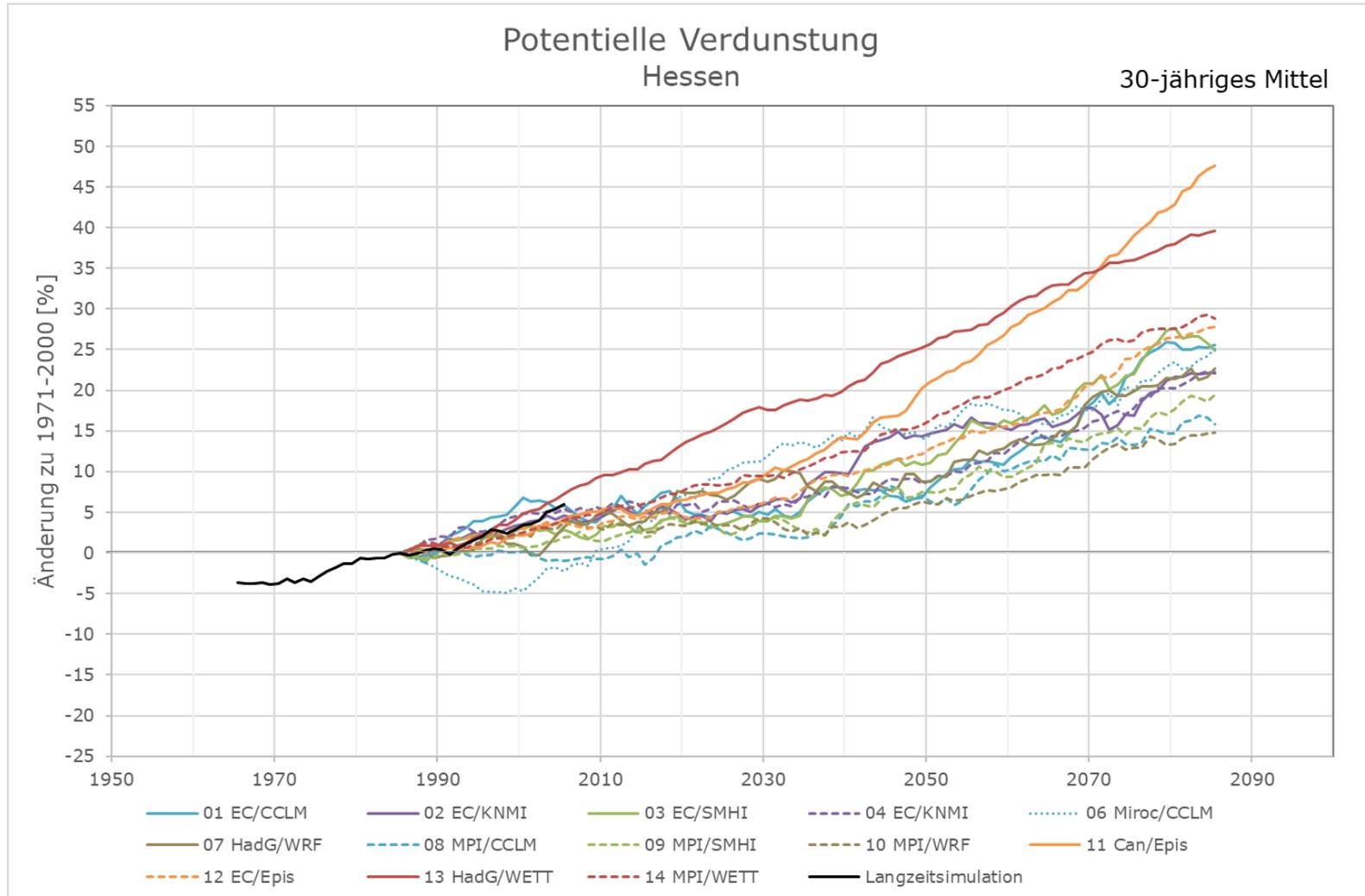
	<i>d Abs</i> 2021-2050	<i>d Abs</i> 2071-2100
Min	0,8	2,7
Max	2,1	4,8
Mittel	1,4	3,7
Median	1,4	3,5

Klimasignal ist eindeutig und richtungsstabil

Weitere Temperaturzunahme: 2,7°C bis 4,8°C bis Ende des Jahrhunderts

Zunahme der Temperatur wirkt sich **reduzierend auf die Grundwasserneubildung aus**

Potentielle Verdunstung – Entwicklungspfade (RCP 8.5)

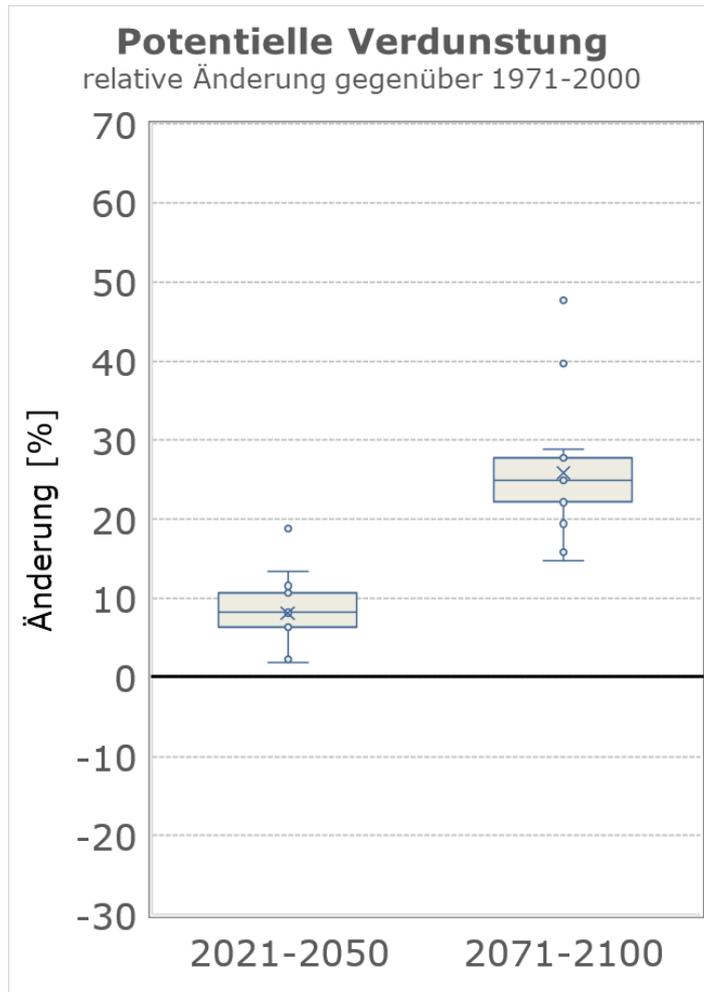


Die beobachtete Zunahme setzt sich fort

Klimasignal ist eindeutig und richtungsstabil, große Bandbreite in der fernen Zukunft

Potentielle Verdunstung – Änderungssignale (RCP 8.5)

Relative Änderung 2021-2050 (nahe Zukunft) und 2071-2100 (ferne Zukunft) gegenüber 1971-2000 (KLIWA Ist-Zustand)



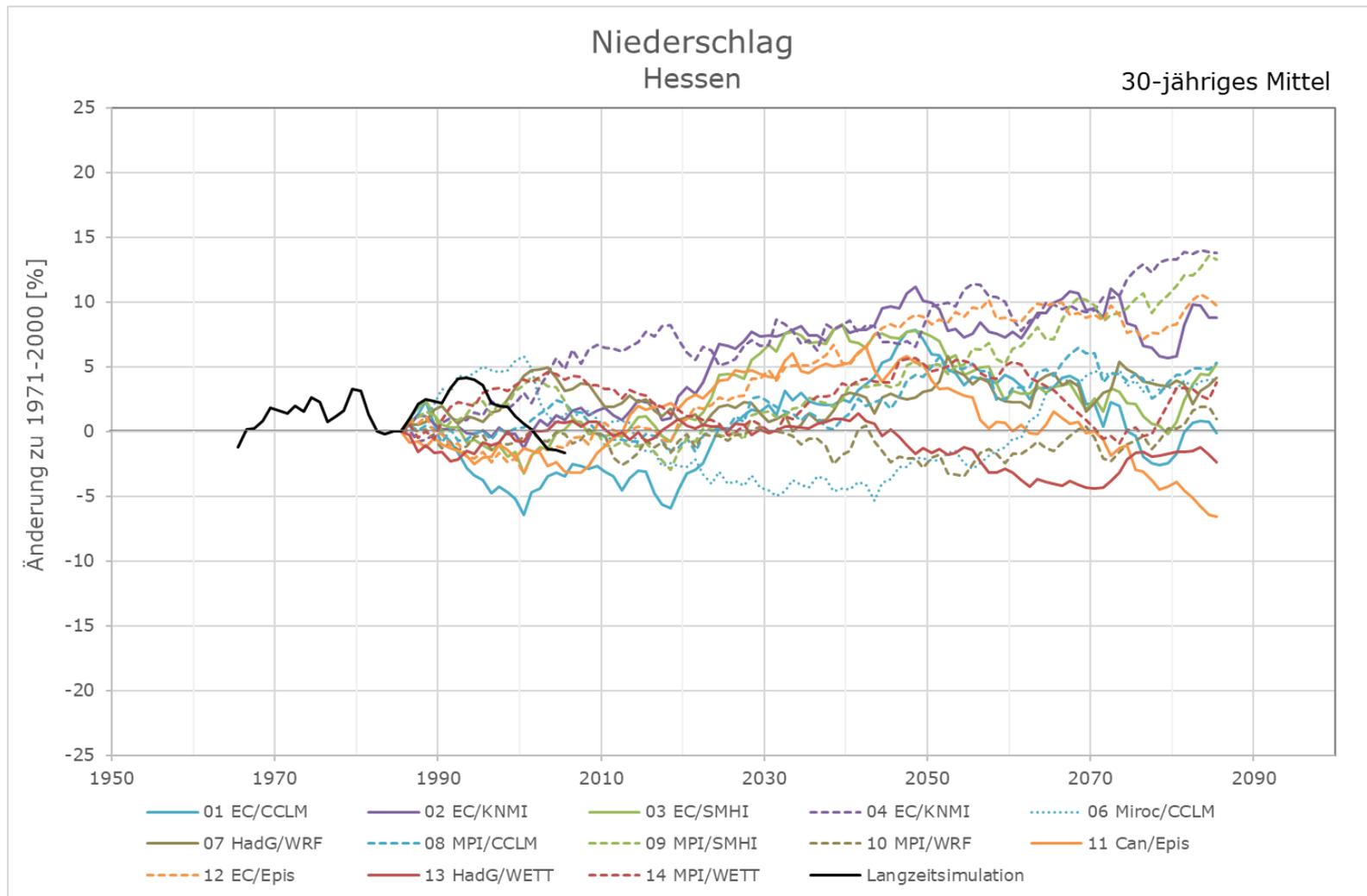
	<i>d</i> Rel [%] 2021-2050	<i>d</i> Rel [%] 2071-2100
Min	1,9	14,8
Max	18,8	47,7
Mittel	8,1	25,9
Median	8,2	24,9

Klimasignal ist eindeutig und richtungsstabil

Weitere Zunahme bis Ende des Jahrhunderts

**Zunahme der Verdunstung wirkt sich
reduzierend auf die Grundwasserneu-
bildung aus**

Niederschlag (Jahressumme) – Entwicklungspfade (RCP 8.5)

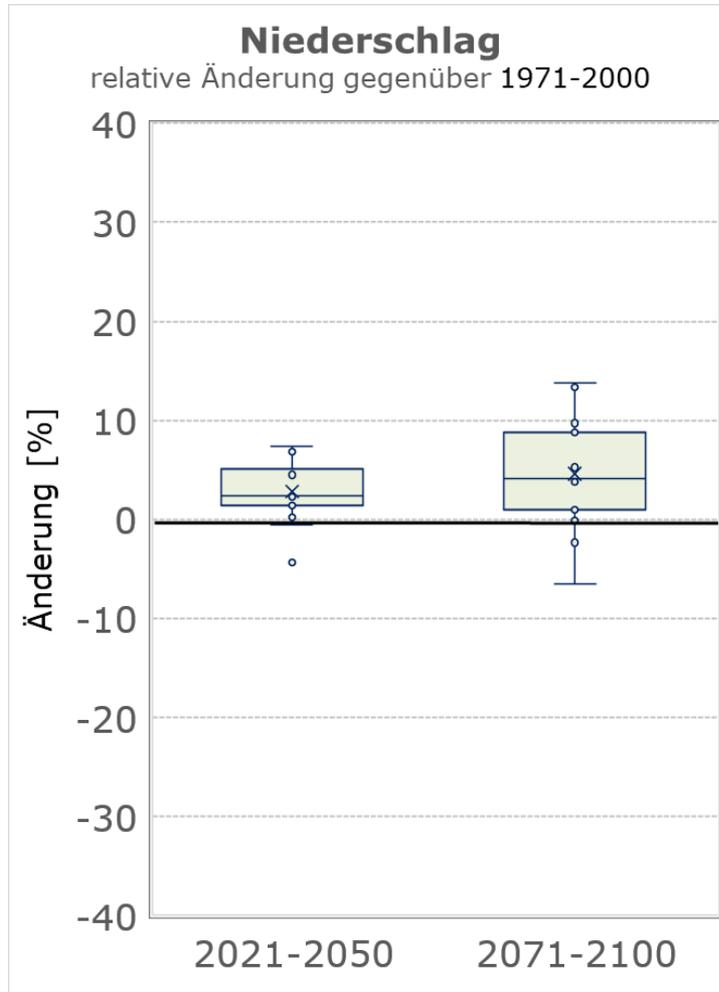


Klimasignal ist nicht eindeutig und nicht richtungsstabil

Multidekadische Variabilität überlagert Klimawandel -> kein eindeutiger Trend

Niederschlag (Jahressumme) – Änderungssignale (RCP 8.5)

Relative Änderung 2021-2050 (nahe Zukunft) und 2071-2100 (ferne Zukunft) gegenüber 1971-2000 (KLIWA Ist-Zustand)



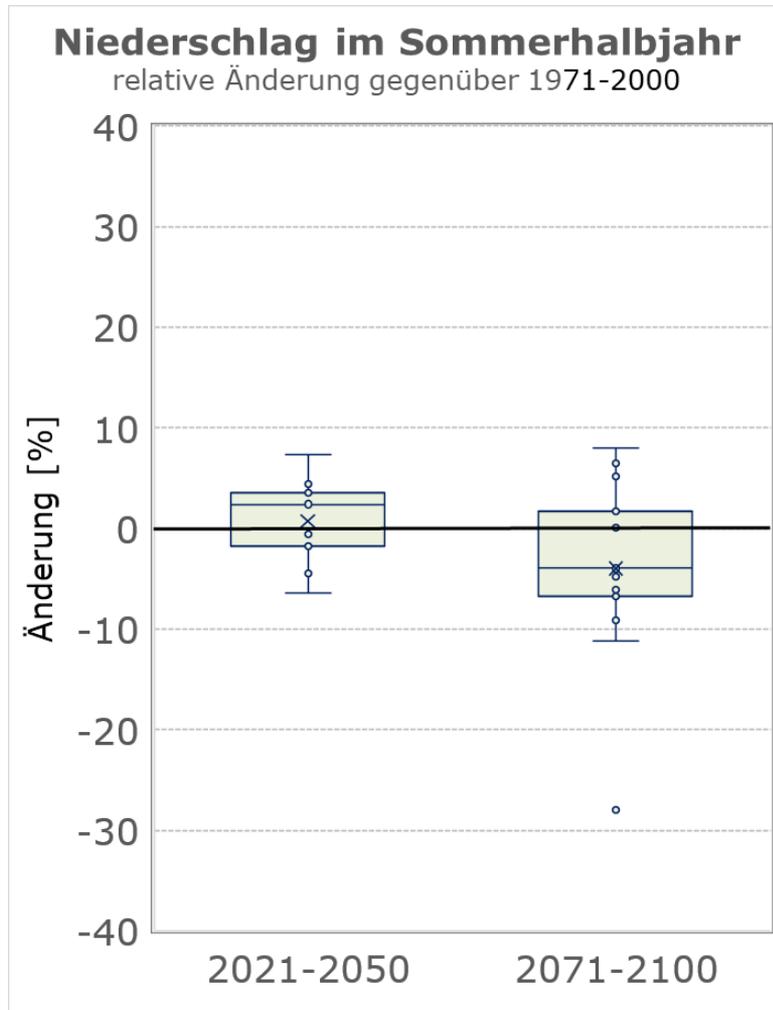
	<i>d</i> Rel [%] 2021-2050	<i>d</i> Rel [%] 2071-2100
Min	-4,4	-6,6
Max	7,4	13,8
Mittel	2,8	4,6
Median	2,4	4,1

Klimasignal ist nicht eindeutig und nicht richtungsstabil (unterschiedliche Vorzeichen)

Tendenziell leichte Zunahme, was der langfristigen Entwicklung der letzten 140 Jahre entspricht

Niederschlag (Hydrol. So-Hj) – Änderungssignale (RCP 8.5)

Relative Änderung 2021-2050 (nahe Zukunft) und 2071-2100 (ferne Zukunft) gegenüber 1971-2000 (KLIWA Ist-Zustand)



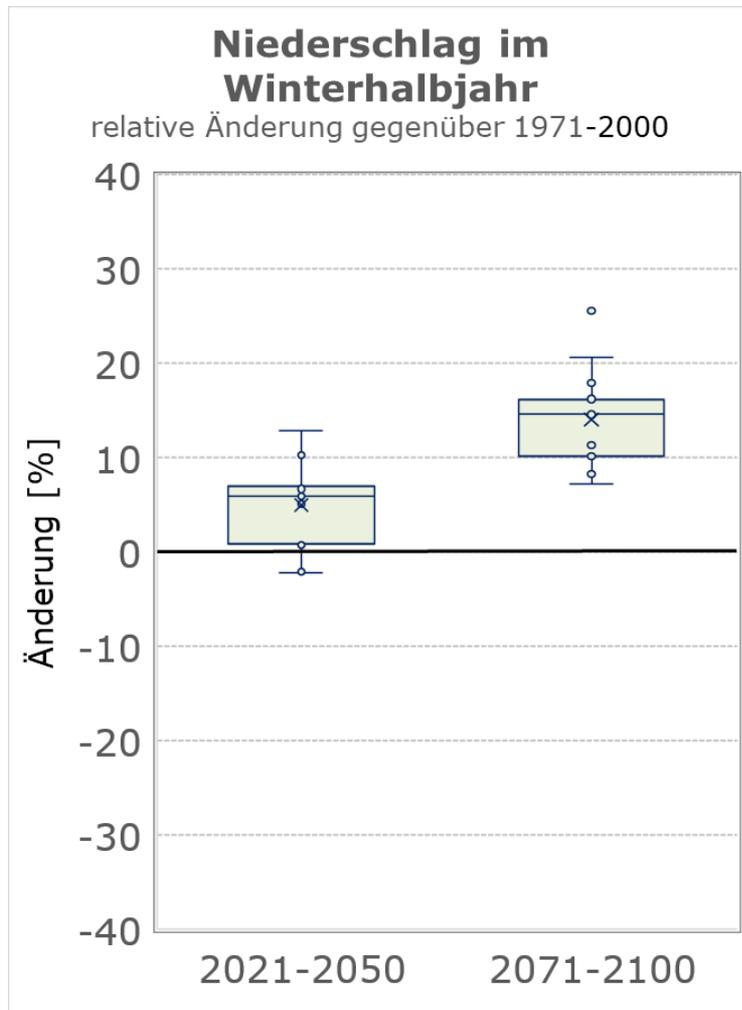
	<i>d</i> Rel [%] 2021-2050	<i>d</i> Rel [%] 2071-2100
Min	-6,4	-28,0
Max	7,3	7,9
Mittel	0,7	-4,0
Median	2,4	-4,0

Klimasignal ist nicht eindeutig und nicht richtungsstabil -> unterschiedliche Vorzeichen

Tendenziell leichte Abnahme in der fernen Zukunft (2071-2100)

Niederschlag (Hydrol. Wi-Hj) – Änderungssignale (RCP 8.5)

Relative Änderung 2021-2050 (nahe Zukunft) und 2071-2100 (ferne Zukunft) gegenüber 1971-2000 (KLIWA Ist-Zustand)



	$d\text{ Rel [\%]}$ 2021-2050	$d\text{ Rel [\%]}$ 2071-2100
Min	-2,2	7,2
Max	12,9	25,6
Mittel	5,0	14,0
Median	5,9	14,6

Klimasignal nicht richtungsstabil in der Nahen Zukunft -> unterschiedliche Vorzeichen

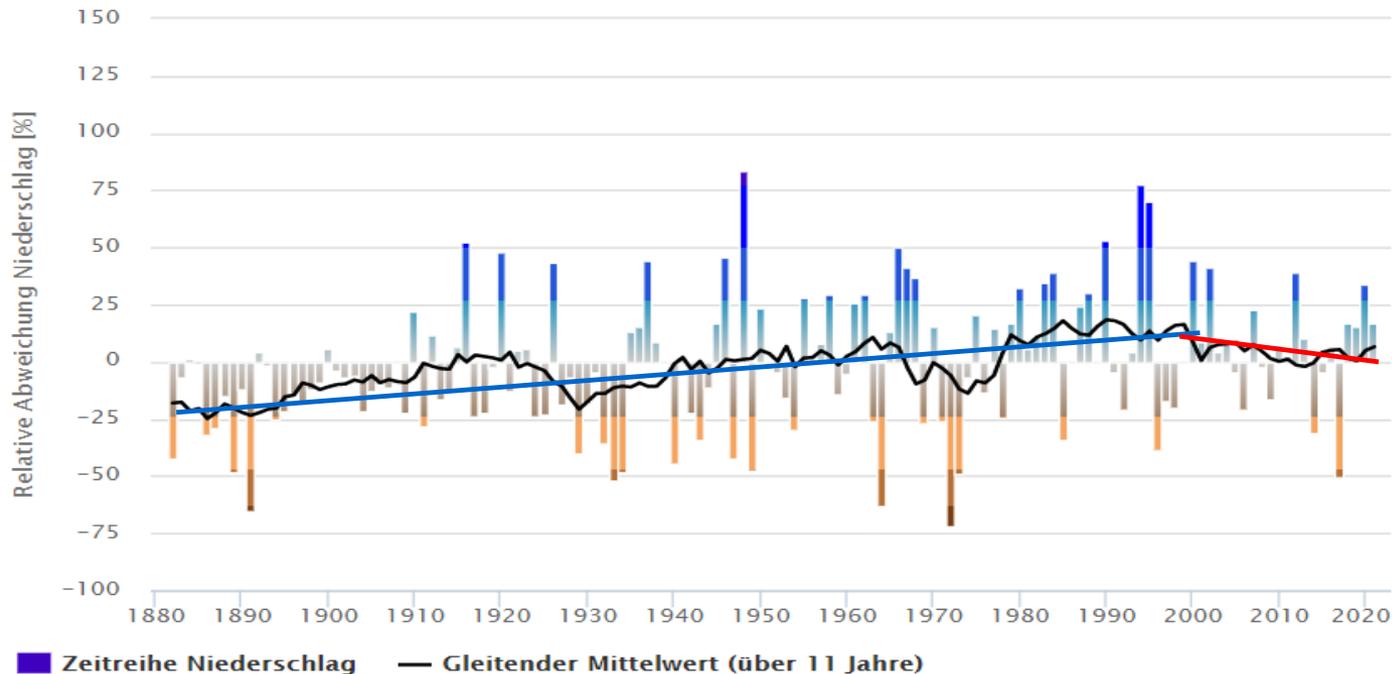
Relativ deutliche Zunahme in der fernen Zukunft (2071-2100)

Eine Zunahme der Winterniederschläge wirkt sich **positiv auf die GWN aus**

Niederschlag (Hydrol. Wi-Hj) – Änderungssignale (RCP 8.5)

Kein Widerspruch zwischen Gegenwart 2003-2020 (Abnahme) und projizierten Trends (Zunahme)

Niederschlag Quartalssumme Winter für Hessen



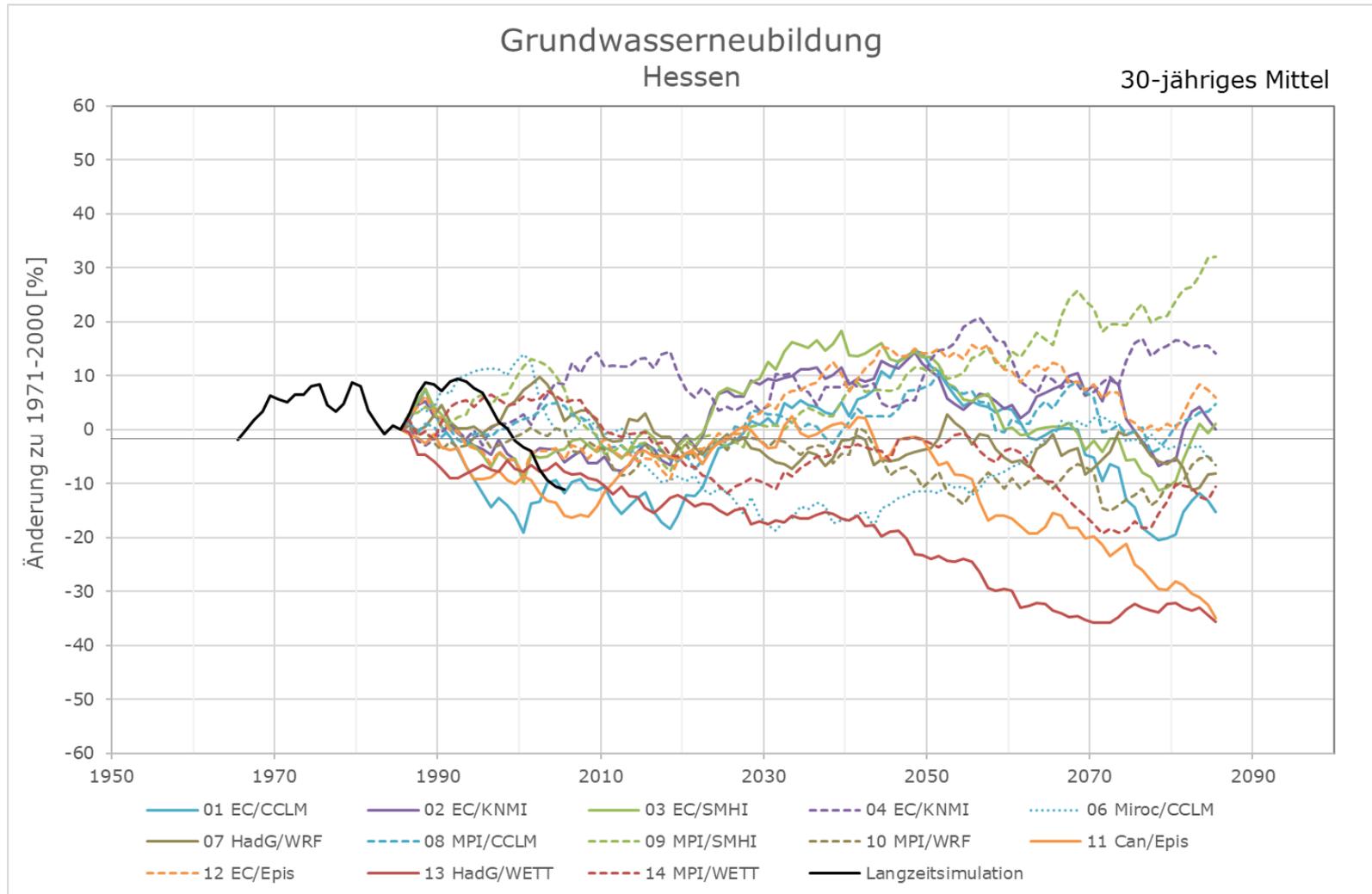
Die langfristige Entwicklung (seit 1881) zeigt eine tendenzielle Zunahme.

Erst in den letzten Jahren ist eine abnehmende Entwicklung zu beobachten.

Aufgrund der multidekadischen Variabilität wechseln sich Perioden mit geringen und höheren Niederschlägen ab.

Daher besteht noch kein Widerspruch zwischen der Beobachtung und den Projektionen.

Grundwasserneubildung – Entwicklungspfade (RCP 8.5)

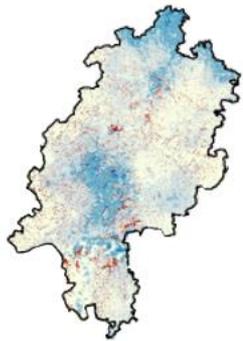


Klimasignal nicht eindeutig / nicht richtungsstabil
Sehr große Bandbreite am Ende des Jahrhunderts

Grundwasserneubildung – Änderungssignale (RCP 8.5)

Relative Änderung 2021-2050 (nahe Zukunft) gegenüber 1971-2000

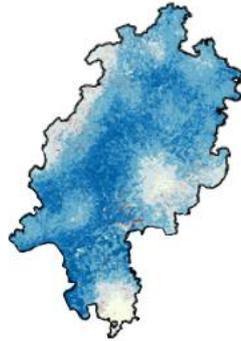
Max: +15,2 %



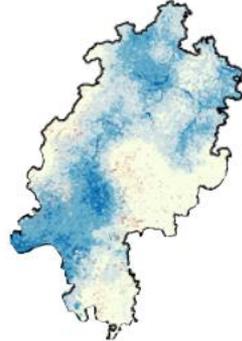
Projektion 01
EC-EARTH 12i1p1 CCLM4-8-17



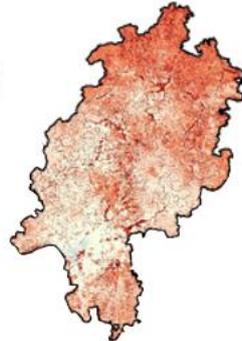
Projektion 02
EC-EARTH 12i1p1 KNMI-RACMO2



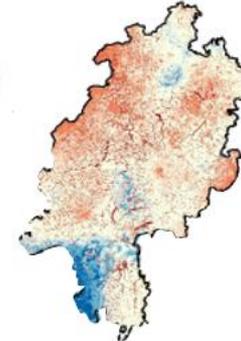
Projektion 03
EC-EARTH 12i1p1 KNMI RCA4



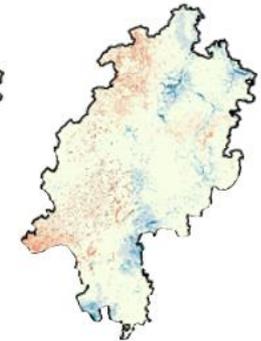
Projektion 04
EC-EARTH r1i1p1 KNMI-RACMO22E



Projektion 06
MIROC5 r1i1p1 CCLM4-8-17

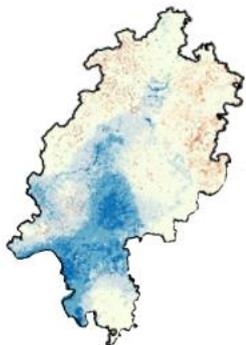


Projektion 07
HadGEM2 r1i1p1 WRF361H

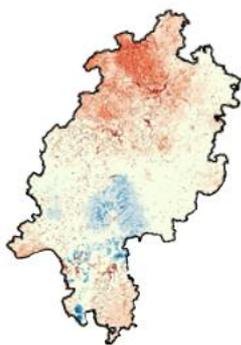


Projektion 08
MPI-ESM r1i1p1 CCLM4-8-17

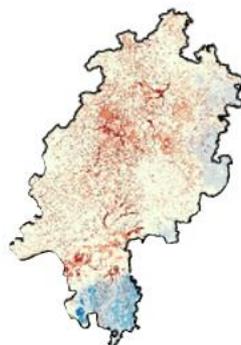
Min: -16,5 %



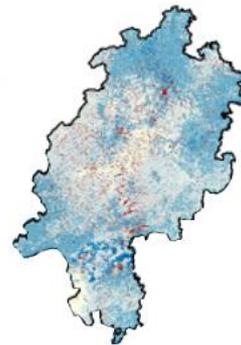
Projektion 09
MPI-ESM r1i1p1 SMHI-RCA4



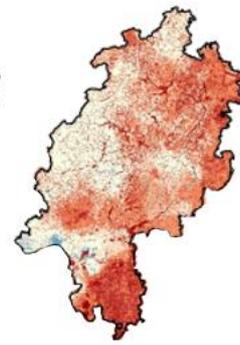
Projektion 10
MPI-ESM r1i1p1 WRF361H



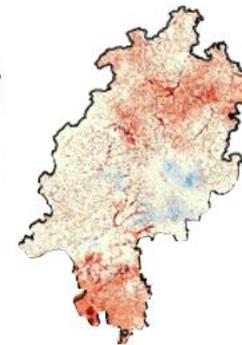
Projektion 11
CanESM2 r1i1p1 Episodes2018



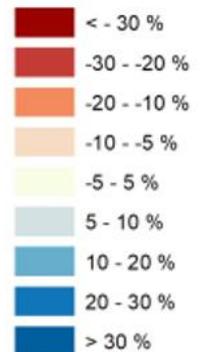
Projektion 12
EC-EARTH r12i1p1 Episodes2018



Projektion 13
HadGEM2 r1i1p1 WETTREG2018



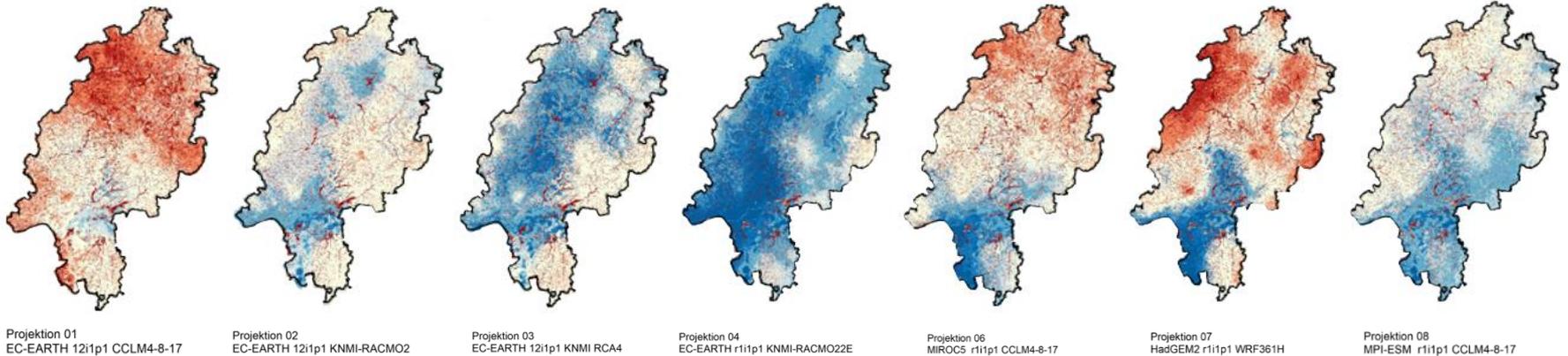
Projektion 14
MPI-ESM r1i1p1 WETTREG2018



Zum Teil deutliche regionale Unterschiede
Maximale Bandbreite: -16,5 % bis +15,2 %

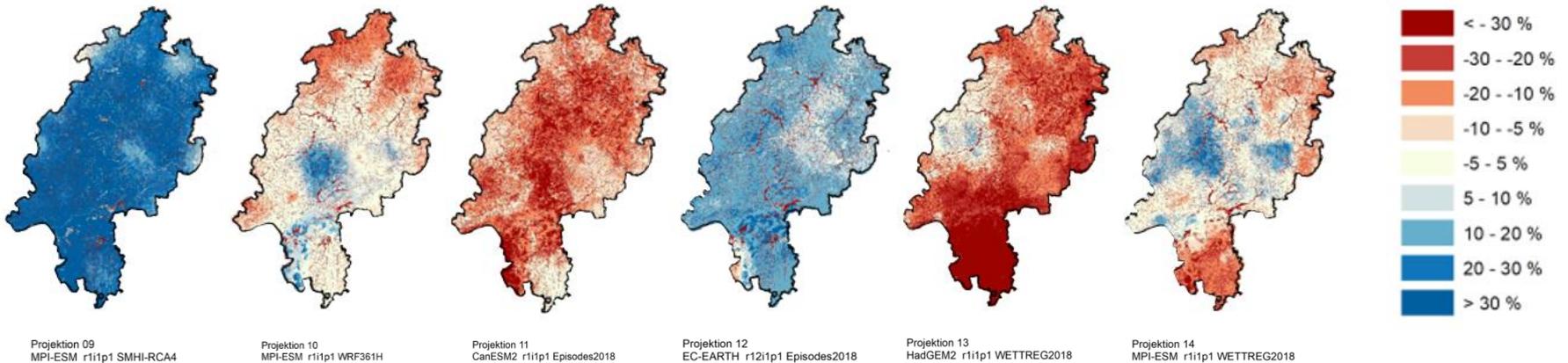
Grundwasserneubildung – Änderungssignale (RCP 8.5)

Relative Änderung 2071-2100 (ferne Zukunft) gegenüber 1971-2000



Max: +32,1 %

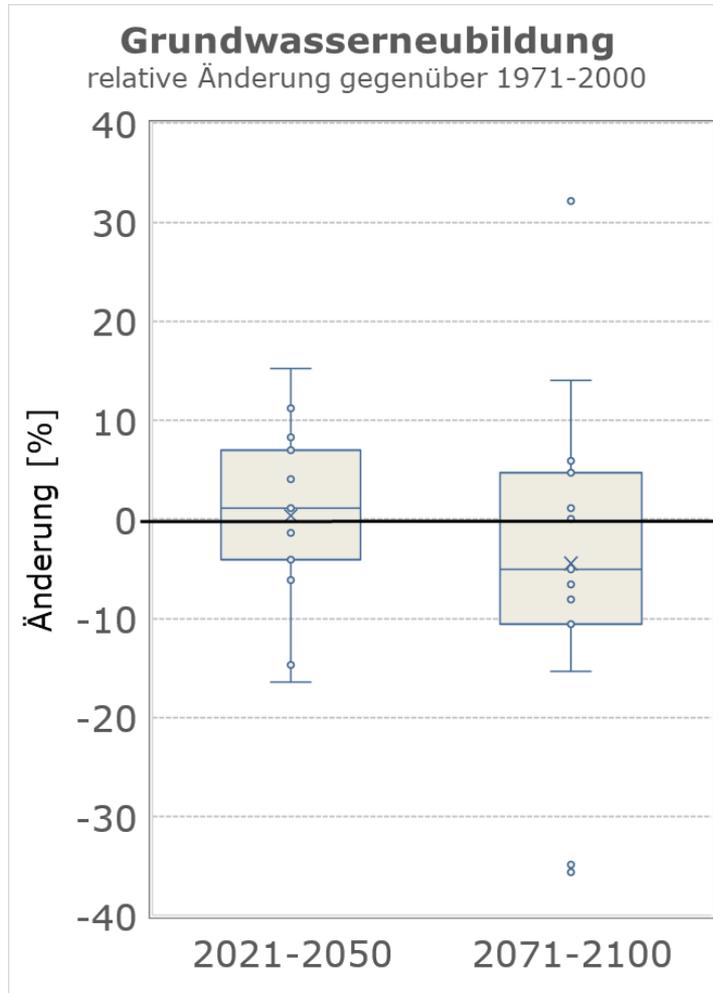
Min: -35,6 %



Zum Teil deutliche regionale Unterschiede
Maximale Bandbreite: -35,6 % bis +32,1 %

Grundwasserneubildung – Änderungssignale (RCP 8.5)

Relative Änderung 2021-2050 (nahe Zukunft) und 2071-2100 (ferne Zukunft) gegenüber 1971-2000 (KLIWA Ist-Zustand)



	<i>d</i> Rel [%] 2021-2050	<i>d</i> Rel [%] 2071-2100
Min	-16,5	-35,6
Max	15,2	32,1
Mittel	0,4	-4,5
Median	1,1	-5,0

Kein eindeutiger Trend

Klimasignal nicht richtungsstabil

Median und Mittelwert weichen nur wenig vom Ist-Zustand ab

Große Bandbreite / große Unsicherheiten



1. Einführung

2. Beobachteter Klimawandel

3. Mögliche Veränderungen in der Zukunft

4. Schlussfolgerungen und Fazit

Schlussfolgerungen und Fazit (1/2)

Die zukünftige Entwicklung der GWN ist mit großen Unsicherheiten verbunden (große Bandbreite mit unterschiedlichen Vorzeichen).

Die Unsicherheit ist auch dadurch begründet, dass viele Teilprozesse und Faktoren bei der GWN zusammenwirken. Es ist unklar, inwieweit eine Zunahme der Winterniederschläge die Wirkung der Erwärmung (Verdunstung) auf die Grundwasserneubildung kompensiert.

Die mittlere Änderung der Grundwasserneubildung erscheint für die nahe und ferne Zukunft moderat auszufallen. Es ist allerdings wahrscheinlich, dass das Auftreten einzelner Trockenjahre oder Trockenperioden, wie in den Jahren 2018-2020, in Zukunft häufiger und extremer wird.

Da die Eintrittswahrscheinlichkeit aller Projektionen gleich groß ist, sind die extremen Projektionen als realistische Entwicklungspfade anzusehen.

Insbesondere aus Gründen der Vorsorge (Sicherstellung der Trinkwasserversorgung) sollte man sich auf die Worst Case Szenarien einstellen. Die Realität hat uns in den Jahren 2018-2020 gezeigt, welche Extreme es schon heute geben kann.

Schlussfolgerungen und Fazit (2/2)

Aufgrund der multidekadischen Variabilität des Niederschlags kann die Abnahme der Grundwasserneubildung seit dem Jahr 2003 nicht eindeutig dem Klimawandel zugeschrieben werden.

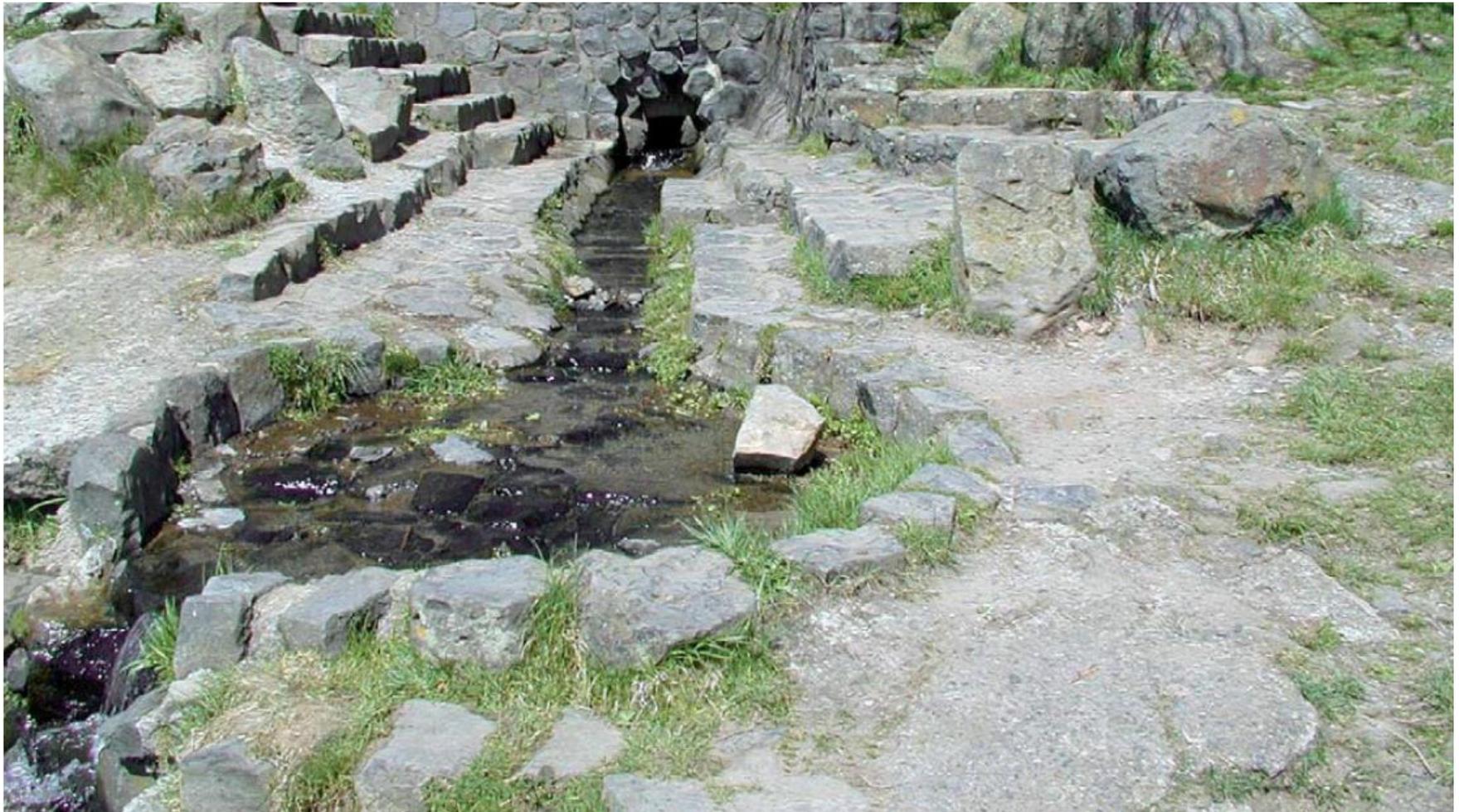
Der vermeindliche Widerspruch zwischen den reduzierten Niederschlägen im HyWiHj seit dem Jahr 2003 und der projizierten Zunahme der Niederschläge im HyWiHj ist immer noch durch die multidekadische Variabilität erklärbar.

Es lässt sich derzeit nicht klären, ob wir am Beginn einer längeren Trockenphase stehen, oder ob bald wieder nasse Jahre kommen.

Nach derzeitigem Kenntnisstand stellt die GWN-arme Periode seit 2003 (18 Jahre) im Kontext des projizierten Klimawandels (KLIWA-Ensemble) ein Extrem dar. Mit der Entwicklung der letzten 18 Jahre bewegen wir uns am unteren Randbereich der Klimaprojektionen.

Extreme Entwicklungen kann es aufgrund der multidekadischen Variabilität des Niederschlagregimes zu jeder Zeit geben (z.B. Trockenjahr 2018).

Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit!



Fuldaquelle, Wasserkuppe Rhön