

# Landesweite Simulation und Zukunftsprojektion der Fließgewässertemperaturen in Baden-Württemberg mit LARSIM

Ingo Haag, Dirk Aigner, Mathias Seibert, Kai Gerlinger  
HYDRON GmbH, Karlsruhe

Internationaler LARSIM-Anwenderworkshop 2018  
13. März 2018

Auftraggeber: Landesanstalt für Umwelt Baden-Württemberg (LUBW)

- Einführung / Motivation
- Modellgrundlagen
- Simulation / Validierung für Klimawandel-Studie
- Zukunftsprojektionen
- Zusammenfassung und Ausblick

# Einführung: Bedeutung der Wassertemperatur



→ Leitparameter für die Wasserbeschaffenheit

# Einführung: Motivation

## Beobachteter klimatisch bedingter Wassertemperatur-Anstieg:

- Mitteleuropa im 20. Jahrhundert:  $\sim +1^{\circ}\text{C} \dots +1,5^{\circ}\text{C}$  (Haag 2009)
- Für BW-Messstellen ohne Wärmeleiter seit 1990: ca.  $+0,4 (\pm 0,2)^{\circ}\text{C}/\text{Dekade}$  (IAWG 2017)

- Signifikante, klimatisch bedingte Zunahmen der Wassertemperaturen und Auswirkungen auf Fließgewässer-Biozönose werden bereits beobachtet
- Im Zuge des Klimawandels sind weiter zunehmende Wassertemperaturen und ökologische Auswirkungen wahrscheinlich
- Zur Abschätzung der zu erwartenden Änderungen sind Modelle zur Simulation, Regionalisierung und Projektion von Wassertemperaturen notwendig

## Weitere Anwendungsgebiete:

- Planungswerkzeug (Genehmigungsverfahren, Anpassungsmaßnahmen)
- Gewässerüberwachung
- Operationeller Betrieb (Niedrigwasser-/Wassertemperaturmanagement)
- ...

# Einführung: Steuergrößen der Wassertemperatur

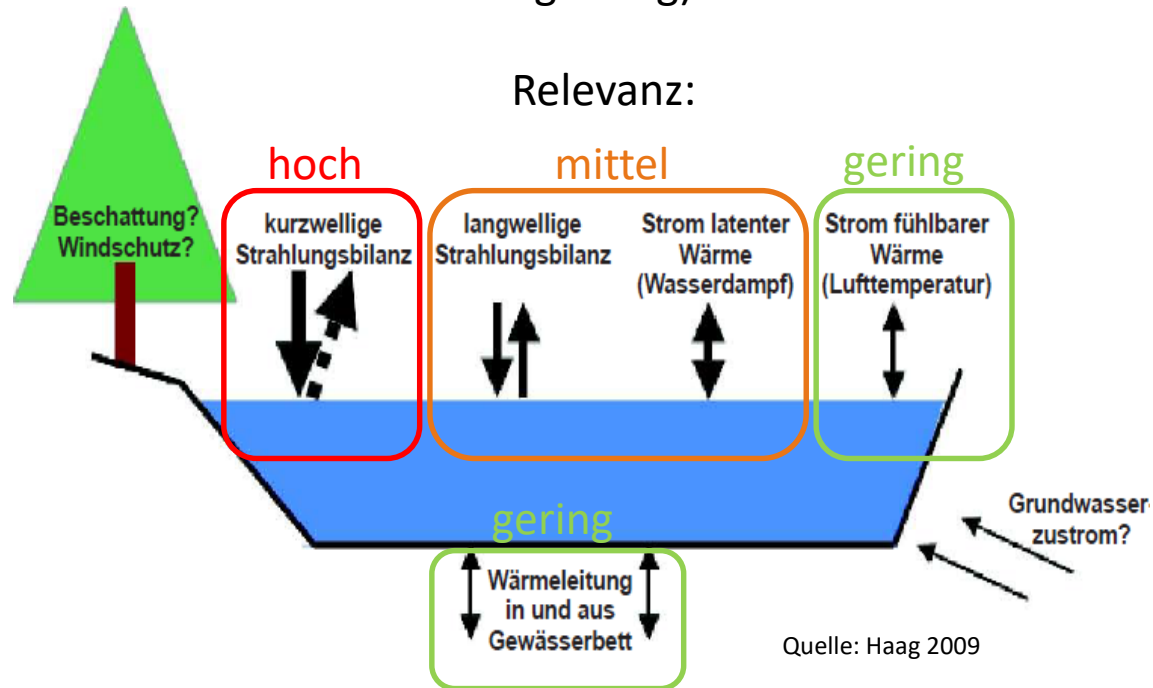
## In Quellbereichen:

→ Abflussbildung / Grundwassertemperatur

## Nach relativ kurzer Fließstrecke:

→ Energiebilanz (Wärmeaustausch zwischen Gewässer und Umgebung):

- Energieflüsse
- Statische Gewässerstruktur, z. B.:
  - Beschattung
  - Tiefen-Breiten-Verhältnis
- + Direkte anthropogene Einflüsse, z.B.:
  - Einleiter (Abwärme, Kläranlagen)
  - Talsperren (Hypolimnion)
- + Wassermenge / Abfluss



- Meteorologie (dynamisch)
- Abfluss / Wassermenge (dynamisch)
- Gewässerstruktur (statisch)

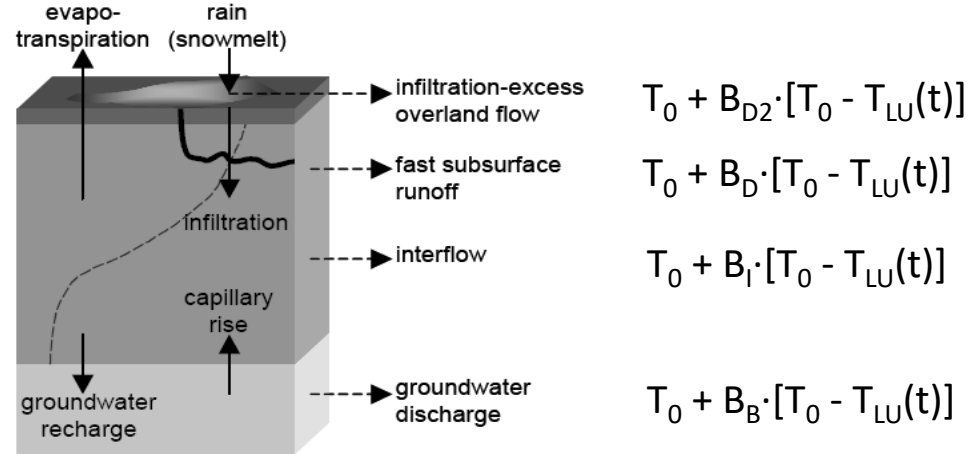
← Klimawandel ?

# Modellgrundlagen

LARSIM Wasserhaushalts- und Wassertemperatur-Modell (LARSIM-WWM) = Weiterentwicklung des LARSIM-WHM mit physikalisch basierter Simulation der Fließgewässertemperatur (Haag & Luce 2008)

## Quellbereiche / Abflussbildung:

- Empirisch auf Basis von Aufenthaltszeit, mittlerer und aktueller Lufttemperatur
- Nur in Quellbereichen relevant



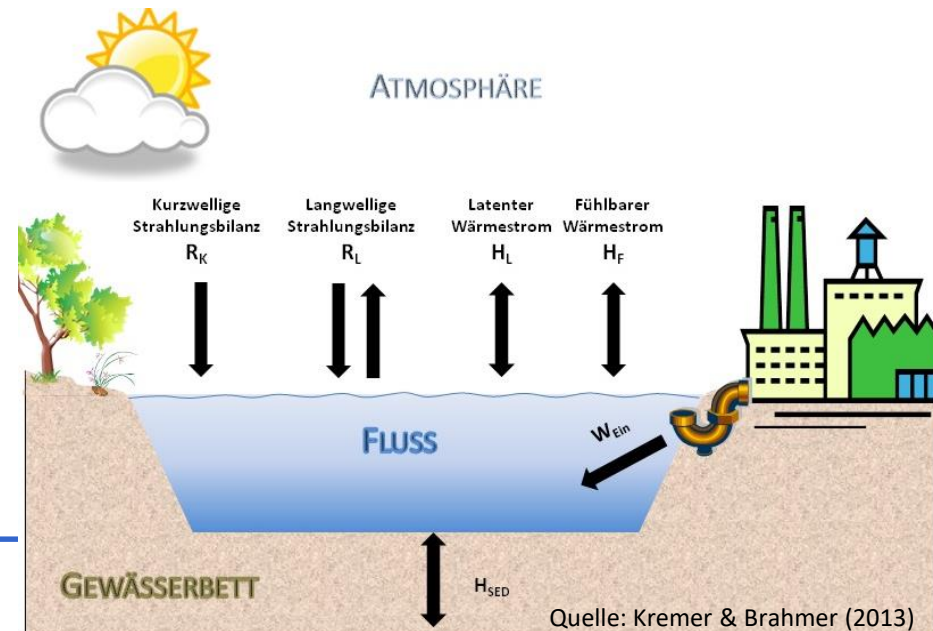
## Fließstrecken (i.d.R. maßgebliche Prozesse):

- Energiebilanz inkl. Austausch mit Gewässerbett

$$\frac{dT_W}{dt} = \frac{R_K + R_L + H_L + H_F + H_{sed}}{c_p \cdot \rho_W \cdot h}$$

- Lokale Quellen (Kraftwerke, Industrie, Kläranlagen)
- Transport von Wärmeinhalt im Gewässernetz mit 1D Advektion-Dispersion

$$\frac{\partial T_W}{\partial t} + u \cdot \frac{\partial T_W}{\partial x} - E_x \cdot \frac{\partial^2 T_W}{\partial x^2} - S = 0$$

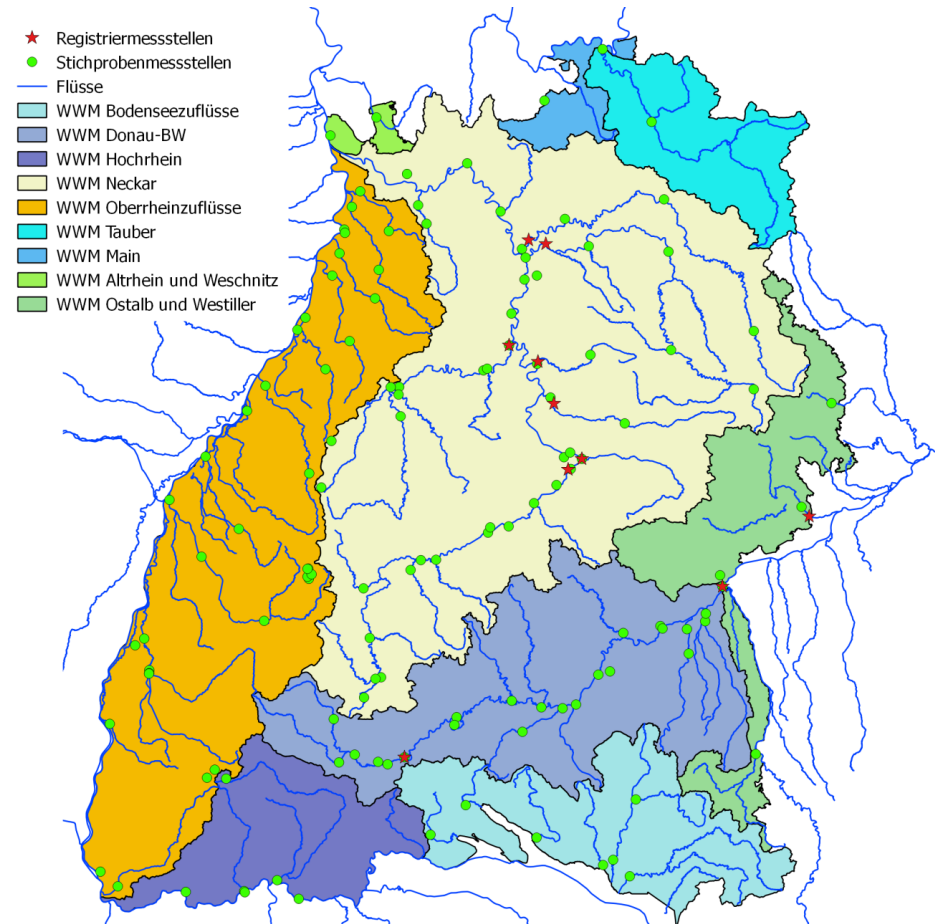


# Modellgrundlagen

- Entwicklung von LARSIM-WWM 2004 zum operationellen Management der Wärmebelastung im Neckar / Gesamtes Neckar-EZG (Haag, Luce, Badde 2005)
- Seit dem weitere operationelle WWM für Rhein von Basel bis Köln, hessischen Main, Südhessen, Nordhessen (z. B. Kremer & Brahmer 2013)
- Anwendung für Wärmelastpläne (Neckar, Rhein) sowie Klimafolgeuntersuchungen Neckar (2005) und Rhein (2014) (Badde et al. IKS-R-Bericht 214, 2014)

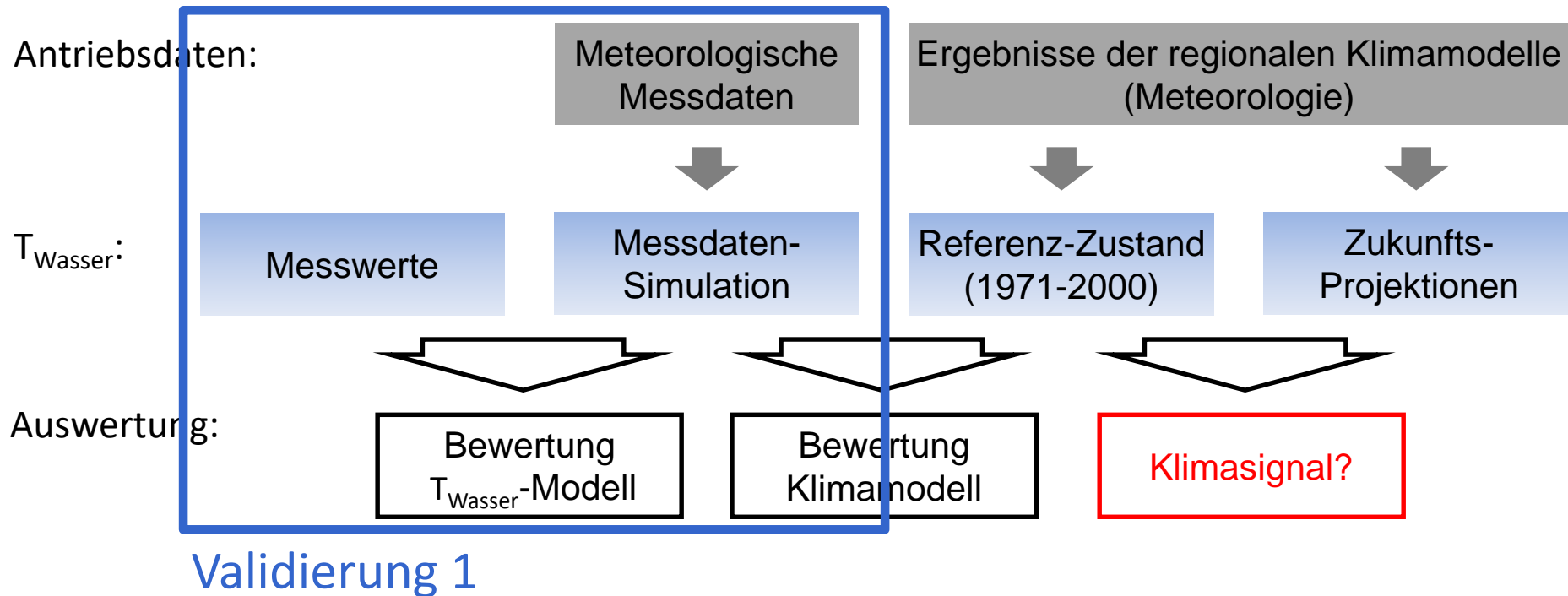
## Nun landesweite WWM für Baden-Württemberg

- 10 LARSIM-WWM auf Basis bestehender WHM
- 1 km<sup>2</sup>-Rastermodelle
- Tages- und Stundenwertmodelle
- Physikalisch basierte Parametrisierung anhand von Gebietseigenschaften (Jahresmitteltemperatur, Gewässerbreite, ...)
- Validierung und Nachjustierung von 2 Parametern anhand von ~ 130 Messstellen
- Landesweit Wasserhaushalt & Wassertemperatur mit selben LARSIM-Modellläufen
- Räumlich differenzierte Aussagen für ca. 40.000 Berechnungsknoten





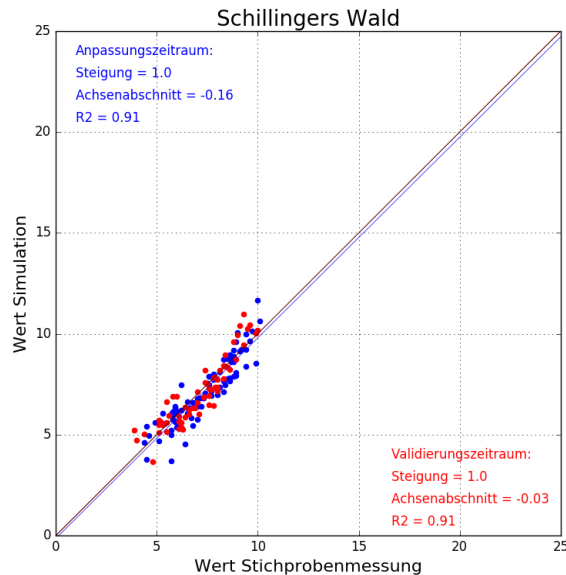
# Simulation / Validierung



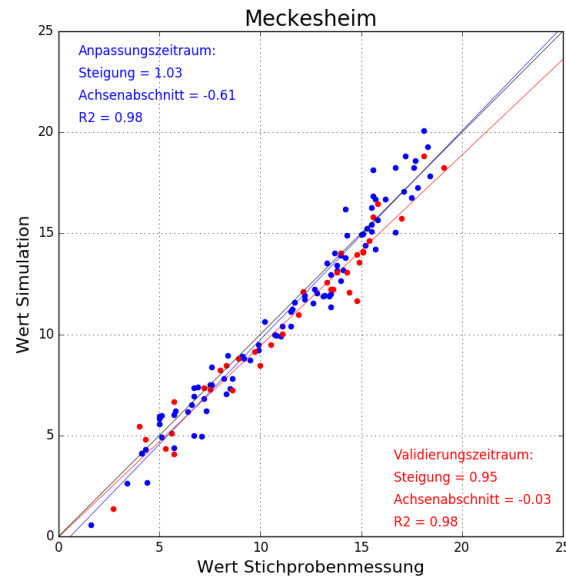
- Simulationen ohne Wärmeeinleiter → natürliche Wassertemperaturen
- Vergleich mit punktuellen Messwerten (zeitliche Dynamik)
- Nachbildung beobachteter Trends
- Analyse des räumlichen Musters (z. B. vgl. mit Fischgemeinschaften)



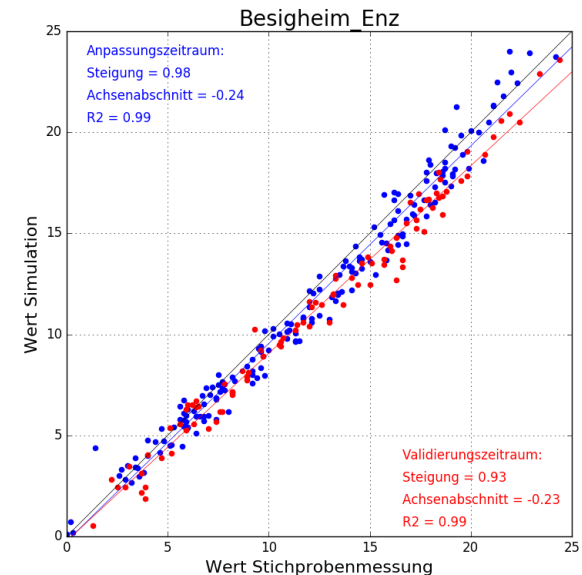
## Stichproben-Messstellen



Huttenbächle  
Hochschwarzwald  
7 km<sup>2</sup>



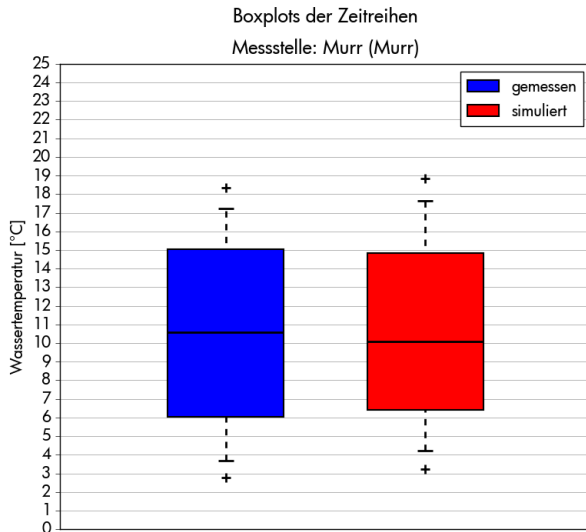
Elsenz  
Kraichgau  
260 km<sup>2</sup>



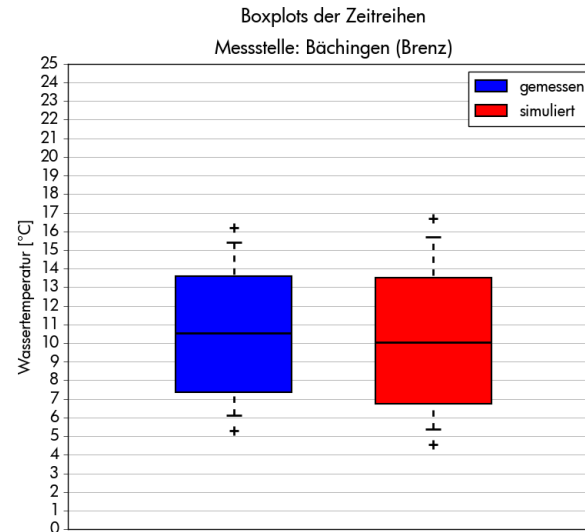
Enz  
Neckarbecken  
2.200 km<sup>2</sup>

→ Gleichmaßen gute Ergebnisse für unterschiedliche große EZG (~ ab 5 km<sup>2</sup>)  
→ und unterschiedliche Naturräume

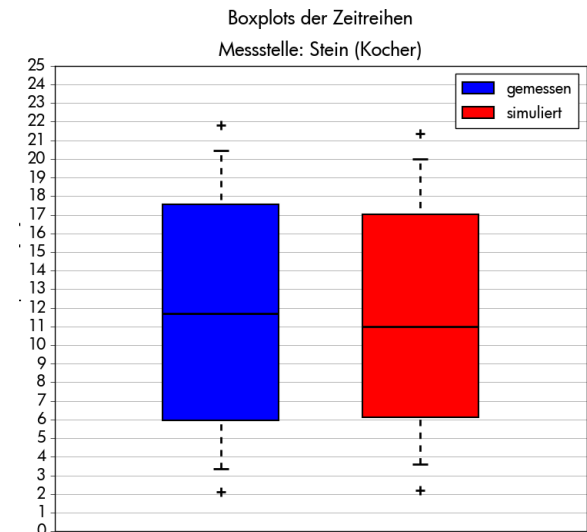
## Kontinuierliche Messstellen



Murr  
Neckarbecken  
504 km<sup>2</sup>



Brenz  
Schwäbische Alb (Karst)  
810 km<sup>2</sup>



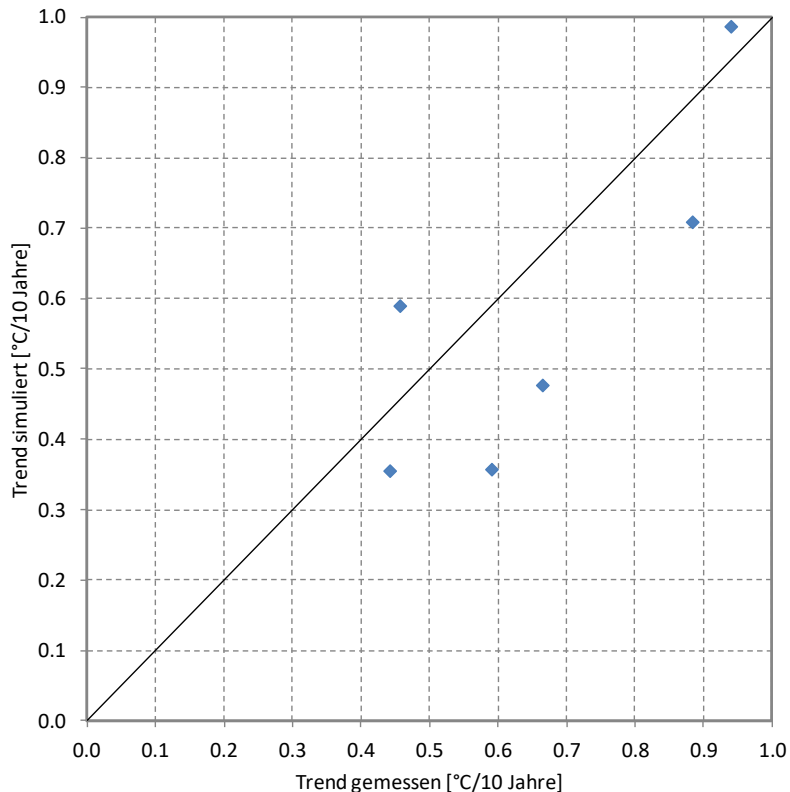
Kocher  
Kocher-Jagst-Ebene  
1.932 km<sup>2</sup>

→ Zeitliche Dynamik und räumliche Unterschiede in der Dynamik werden gut nachgebildet

# Simulation / Validierung

## Validierung: Vergleich von Trendanalysen für Messwerte und Simulation

Station	Daten von-bis	n	Trend gemessen [ $^{\circ}\text{C}/10$ Jahre]	Trend simuliert [ $^{\circ}\text{C}/10$ Jahre]
Murr/Murr	1991-2000	10	0.46	0.59
Neustadt/Rems	1981-2000	14	0.94	0.99
Plochingen/Fils	1990-2000	10	0.44	0.36
Stein/Kocher	1981-2000	17	0.59	0.36
Untergriesheim/Jagst	1982-2000	18	0.66	0.48
Wendlingen/Neckar	1987-2000	11	0.88	0.71



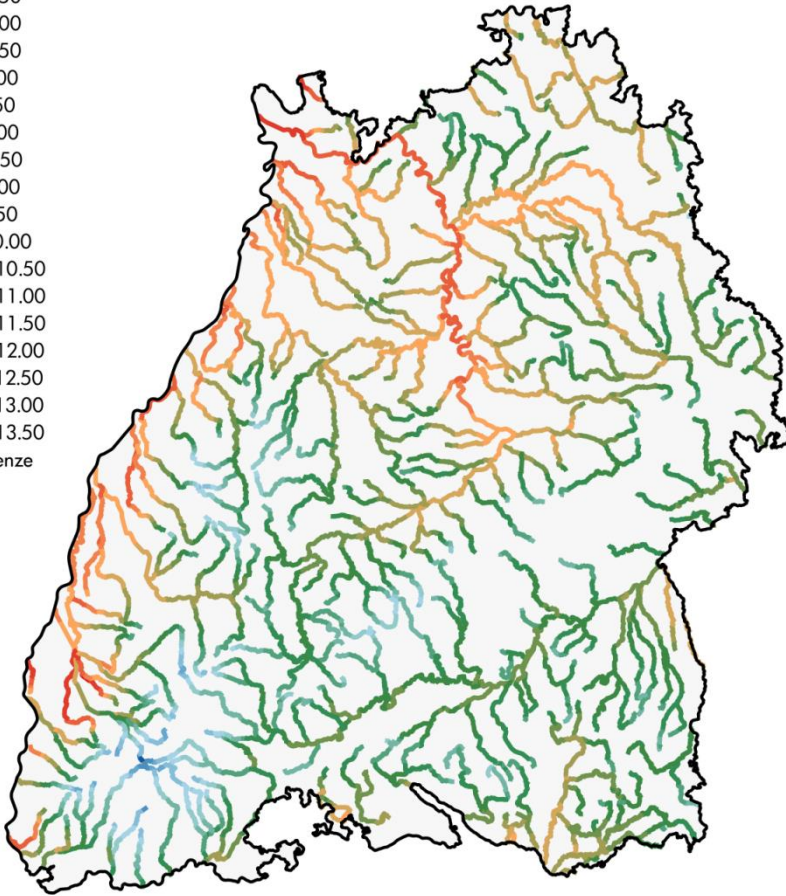
- Mittlerer beobachteter Trend der Jahresmittel der Wassertemp. Von  $\sim +0,6$   $^{\circ}\text{C}/\text{Dekade}$  wird vom Modell gut nachgebildet
- Unterschiede zwischen Messstellen werden ebenfalls nachgebildet

→ Das Modell kann klimatisch bedingte Trends der Wassertemperatur korrekt nachbilden

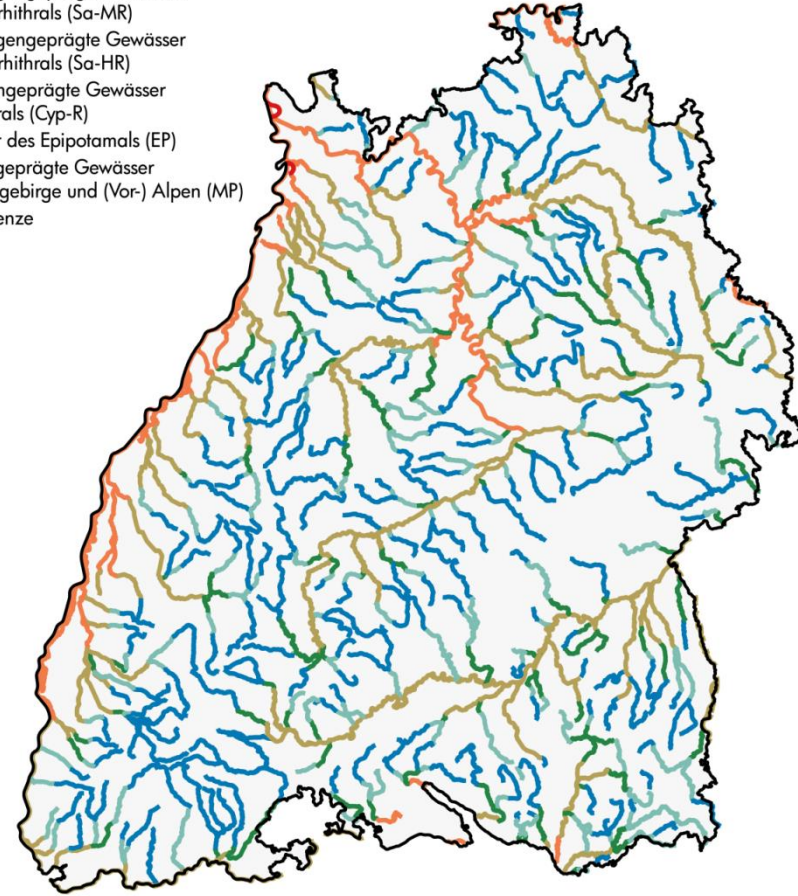
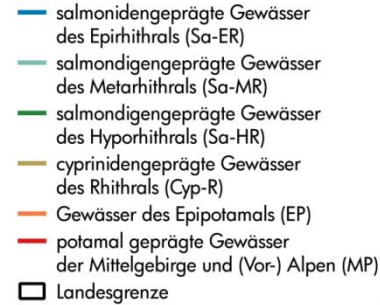
# Simulation / Validierung

## Räumliche Struktur

Langjähriges Mittel der Wassertemperatur [°C]



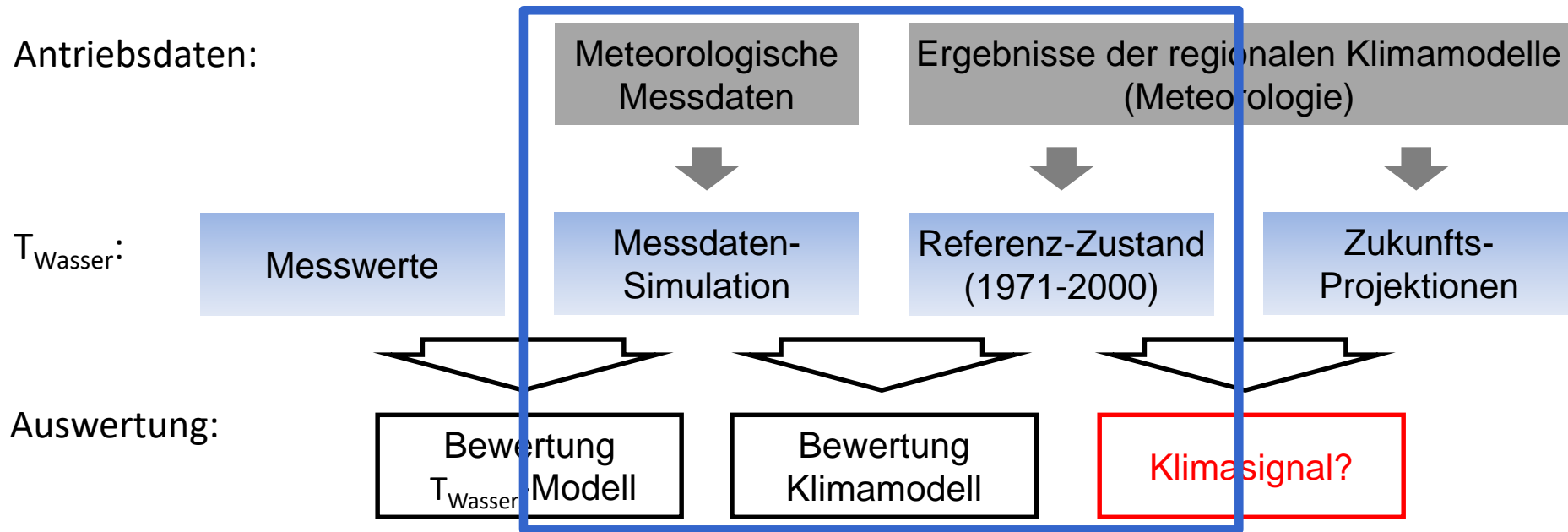
Fischgemeinschaften



→ Realistische räumliche Struktur

→ Gute Übereinstimmung mit Karte der Fischgemeinschaften

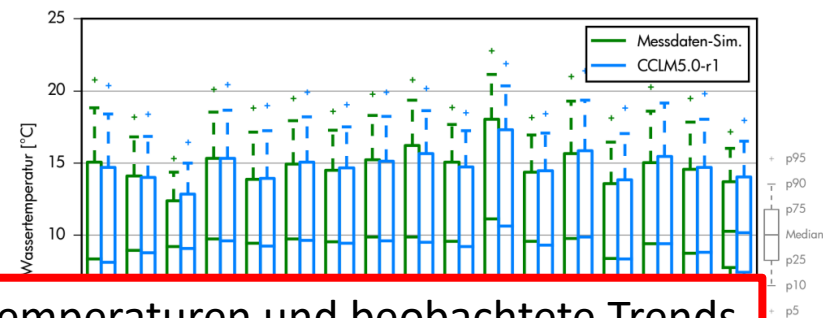
# Simulation / Validierung



## Validierung 2

### Bewertung verwendeter regionaler Klimamodelle:

- Auf Basis des RCP8.5-Szenarios
- COSMO CLM 5.0 (run1) und RCA4 (run12)
- **Referenz-Zustand mit Input aus Klimamodellen ähnlich gut wie mit Messdaten**



- Raum-zeitliche Dynamik der Wassertemperaturen und beobachtete Trends werden gut nachgebildet
- LARSIM-WWM und verwendete Klimamodelle sind geeignet, um gesuchtes Klimasignal zu ermitteln

# Zukunftsprojektionen

Antriebsdaten:

Meteorologische  
Messdaten

Ergebnisse der regionalen Klimamodelle  
(Meteorologie)

$T_{\text{Wasser}}$ :

Messwerte

Messdaten-  
Simulation

Referenz-Zustand  
(1971-2000)

Zukunfts-  
Projektionen

Auswertung:

Bewertung  
 $T_{\text{Wasser}}$ -Modell

Bewertung  
Klimamodell

Klimasignal

## Regionale Klimamodelle:

- Auf Basis des RCP8.5-Szenarios
- COSMO CLM 5.0 (run1) und RCA4 (run12)

## Zukunftsprojektionen (hier):

- Nahe Zukunft (2021-2050)
- Ferne Zukunft (2071-2100)

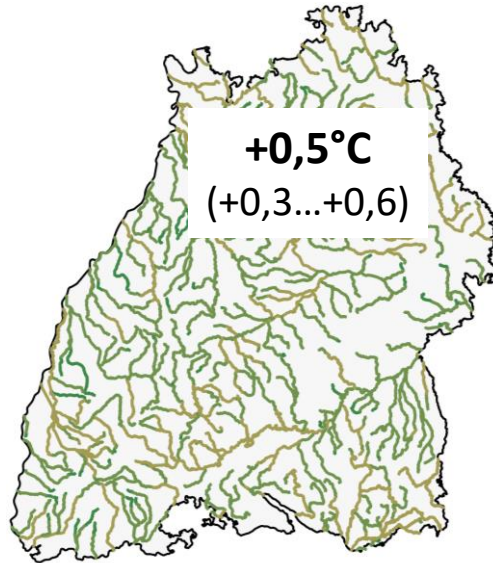


# Zukunftsprojektionen: Mittleres Klimasignal für BW

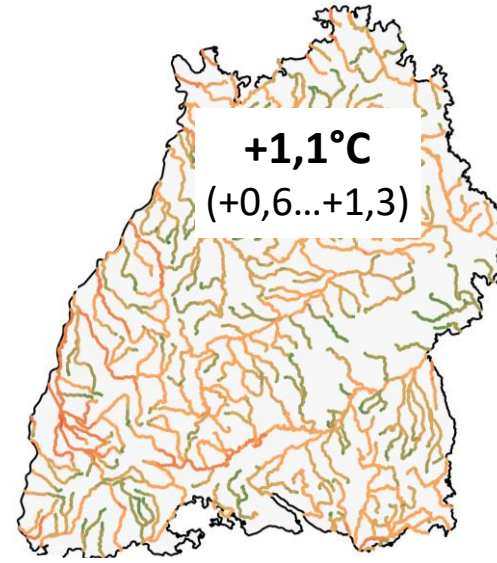
Für Baden-Württemberg projizierte Zunahme der mittleren Wassertemperatur  
(Tagesmittelwerte)

Klimasignal für die  
**Nahe Zukunft**

CCLM5.0-r1

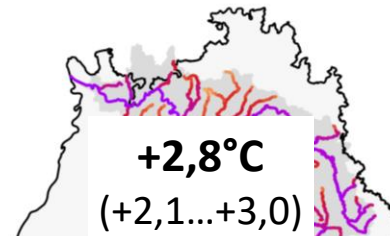


RCA4



Klimasignal für die  
**Ferne Zukunft**

Nur Neckar-Einzugsgebiet



- Spürbare Zunahme der Fließgewässertemperaturen zu erwarten
- Klimamodelle decken wahrscheinliche Bandbreite ab (vgl. BLfU 2014)
- Regionale Differenzierung auch durch Gewässerstruktur / Naturräume
- Aussagen für ferne Zukunft als Tendenz zu verstehen

Projizier  
Zunahm

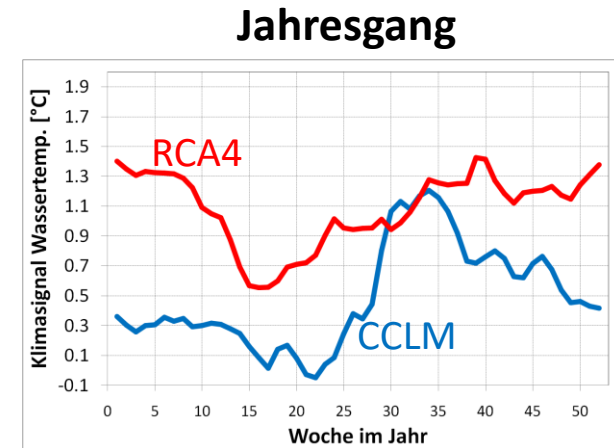


# Zukunftsprojektionen: Mittleres Klimasignal für BW

Für Baden-Württemberg projizierte Zunahme der mittleren, minimalen, maximalen Wassertemperatur (Tagesmittelwerte)

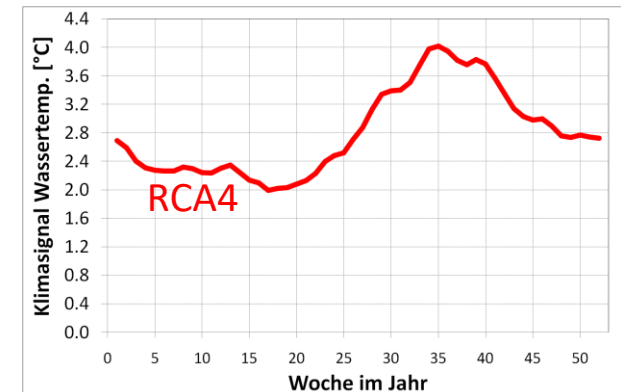
Klimasignal für die  
**Nahe Zukunft**

	CCLM5.0-r1	RCA4
<b>Langjähriges Mittel</b>	+0.5°C	+1.1°C
<b>Mittleres Jahresmax.</b>	+1.3°C	+1.3°C
<b>Mittleres Jahresmin.</b>	+0.2°C	+1.2°C



Klimasignal für die  
**Ferne Zukunft**  
Nur Neckar-EZG

		RCA4
<b>Langjähriges Mittel</b>		+2.8°C
<b>Mittleres Jahresmax.</b>		+3.8°C
<b>Mittleres Jahresmin.</b>		+2.5°C



→ Stärkere Zunahme der Maxima / Sommertemperaturen

## Gewässerökologische Kennwerte:

- Häufigkeit und Dauer mit der Schwellenwerte über- oder unterschritten werden
- Geben Hinweise auf mögliche ökologische Folgen

Fischgemeinschaften	Winter	Sommer
salmonidengeprägte Gewässer des Epirhithrals (Sa-ER)	8,0	20,0
salmonidengeprägte Gewässer des Metarhithrals (Sa-MR)	10,0	20,0
salmonidengeprägte Gewässer des Hyporhithrals (Sa-HR)	10,0	21,5
cyprinidengeprägte Gewässer des Rhithrals (Cyp-R)	10,0	23,0
Gewässer des Epipotamals (EP)	10,0	25,0
potamal geprägte Gewässer der Mittelgebirge und (Vor-) Alpen (MP)	10,0	28,0



## Fischgemeinschafts-Spezifische $T_{\text{Wasser}}$ -Kennwerte:

- Überschreitung Sommer-Schwellenwert
- Überschreitung Winter-Schwellenwert
- Unterschreitung Winter-Schwellenwert

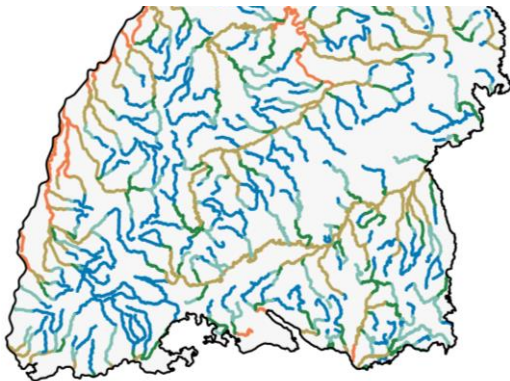
## Kombination Abfluss und Wassertemperatur:

- Gleichzeitige Überschreitung Sommer-Schwellenwert und Unterschreitung von MNQ  
→ Gewässerökologisch kritische Phasen

## Weitere Kennwerte:

- Unterschreitung von 2°C (Hemmnis für die Ausbreitung von Neozoen)

OGewV-Schwellenwerte



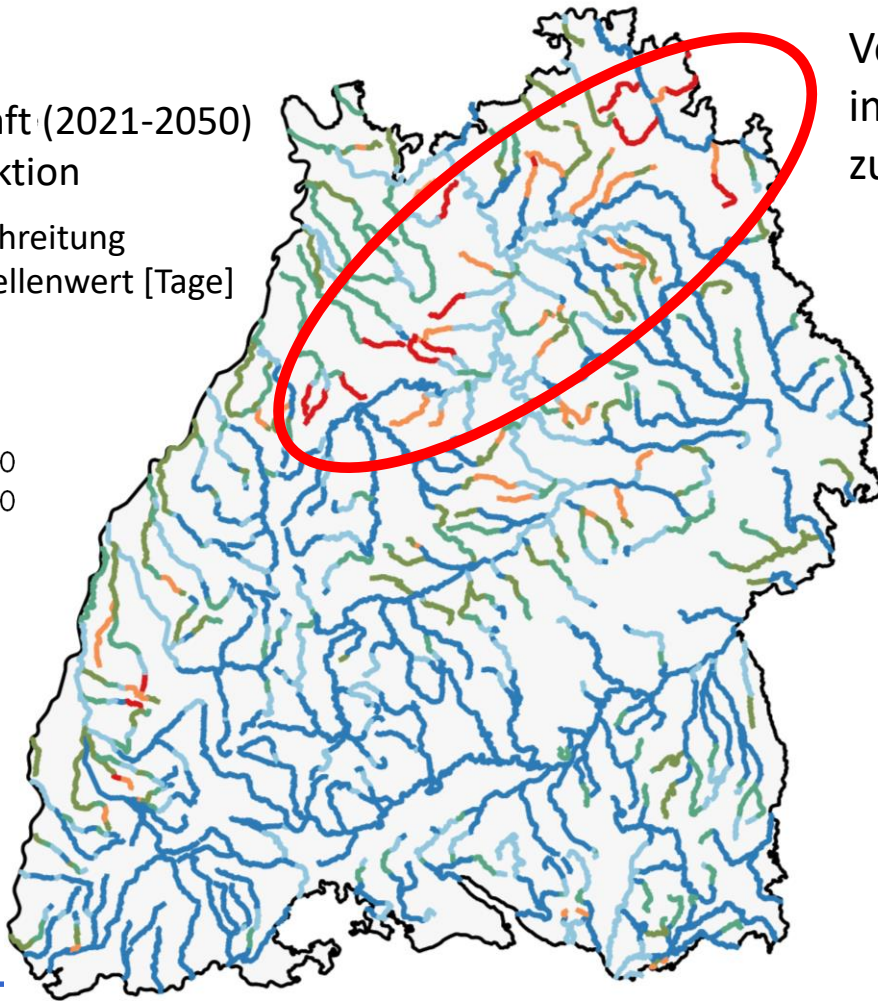
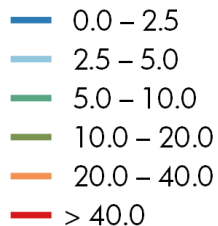
# Ergebnisse: Klimasignal Kennwerte für BW

## Beispiel: Überschreitung Winter-Schwellenwert (nahe Zukunft)

→ Kennwert für Temperatur-Präferenz der Fischgemeinschaft

Nahe Zukunft (2021-2050)  
RCA4-Projektion

SumD Überschreitung  
Winter-Schwellenwert [Tage]



Vor allem obere Forellenregion  
im Kraichgau sowie an Zuflüssen  
zu Tauber und Jagst

- Identifikation kritischer Flussabschnitte
- Hinweis auf längszonale Verschiebung der Fischgemeinschaften
- Hier Reduktion der oberen Forellenregion

# Zukunftsprojektionen: Folgerungen für BW

- Für die nahe Zukunft ist ein Anstieg der mittleren Fließgewässer-Temperaturen im Bereich zwischen ca. 0,5°C und 1,3°C realistisch
- Für die ferne Zukunft bleibt der Trend erhalten, die Projektionen sind aber noch unsicher (~ +2°C ... + 3°C)
- Das Ausmaß der Erwärmung wird auch durch die unterschiedliche Sensitivität der Gewässer für den Klimawandel regional und flussspezifisch variieren
- 2°C werden z.B. an Rhein- und Neckarzuflüssen voraussichtlich seltener und kürzer unterschritten (→ reduzierte Hemmung für die Ausbreitung von Neozoen)
- Voraussichtlich spürbare Zunahme von gewässerökologisch kritischen Phasen mit geringem Abfluss und zeitgleich hoher Wassertemperatur
- Hinweise auf längszonale Verschiebung der Fischgemeinschaften (und gesamter Biozönose)
- Voraussichtlich spürbare Verkleinerung der oberen Forellenregion
- Lokalisierung von voraussichtlich besonders kritischen Regionen/Flussabschnitten

# Zusammenfassung und Ausblick

- LARSIM-WWM erlauben regionalisierte Aussagen zu Abfluss **und** Wassertemperaturen
- Seit 14 Jahren erfolgreicher operationeller Einsatz für Management von Niedrigwasser und Wärmebelastung
- Erfolgreicher landesweiter Einsatz der Modelle für Klimaprojektionen in BW (Abflüsse + Wassertemperaturen mit denselben Modellen)
- Weitergehende ökologische Auswertungen (z. B. Fischhabitatmodellierung, Makrozoobenthos-Index ...)

## Weitere Anwendungsbereiche der LARSIM-WWM:

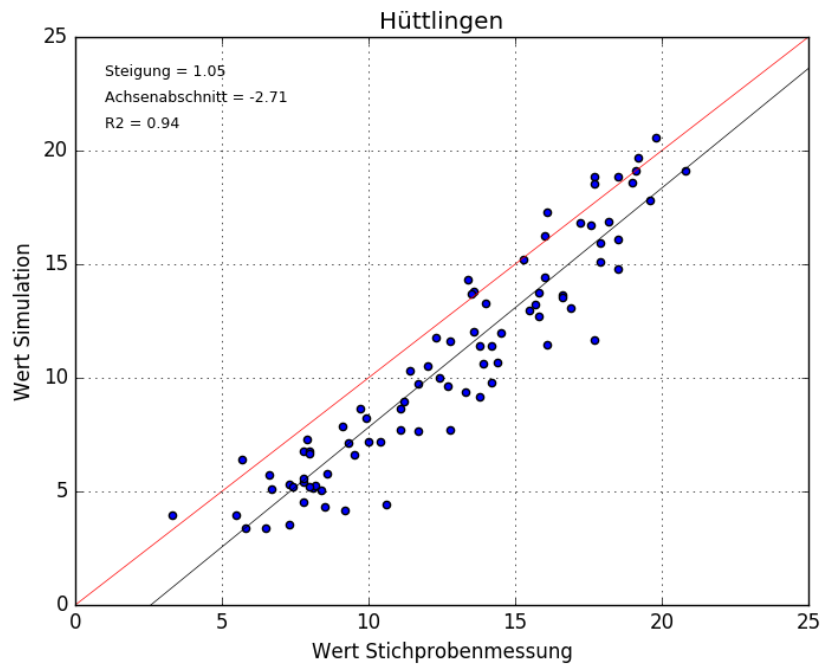
- Gewässerüberwachung und wasserwirtschaftliche Planung (z. B. Genehmigungsverfahren, Lastpläne ...)
- Analyse zur Wirksamkeit von Anpassungsmaßnahmen

→ Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit

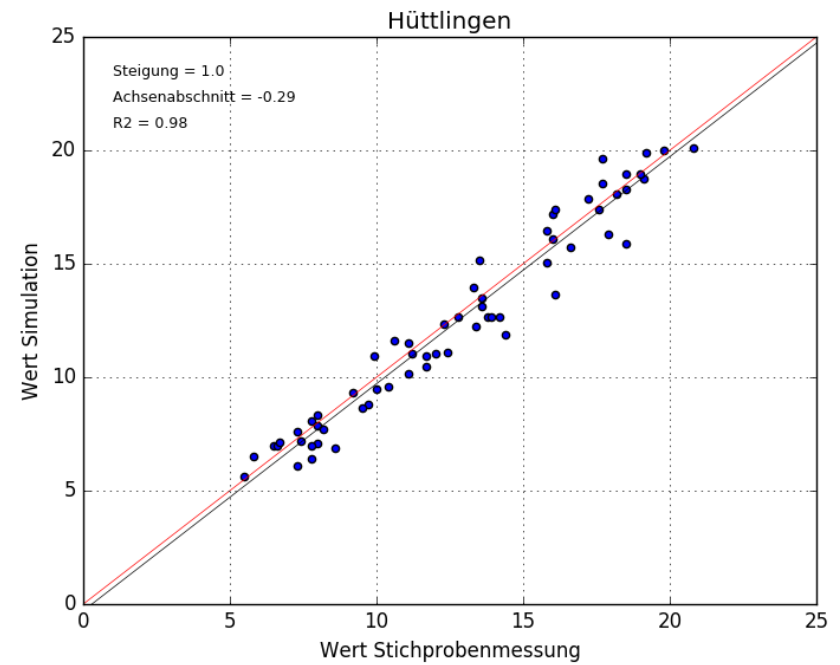
# Zusatzfolien

# Simulation

ohne Einleiter



mit Einleiter





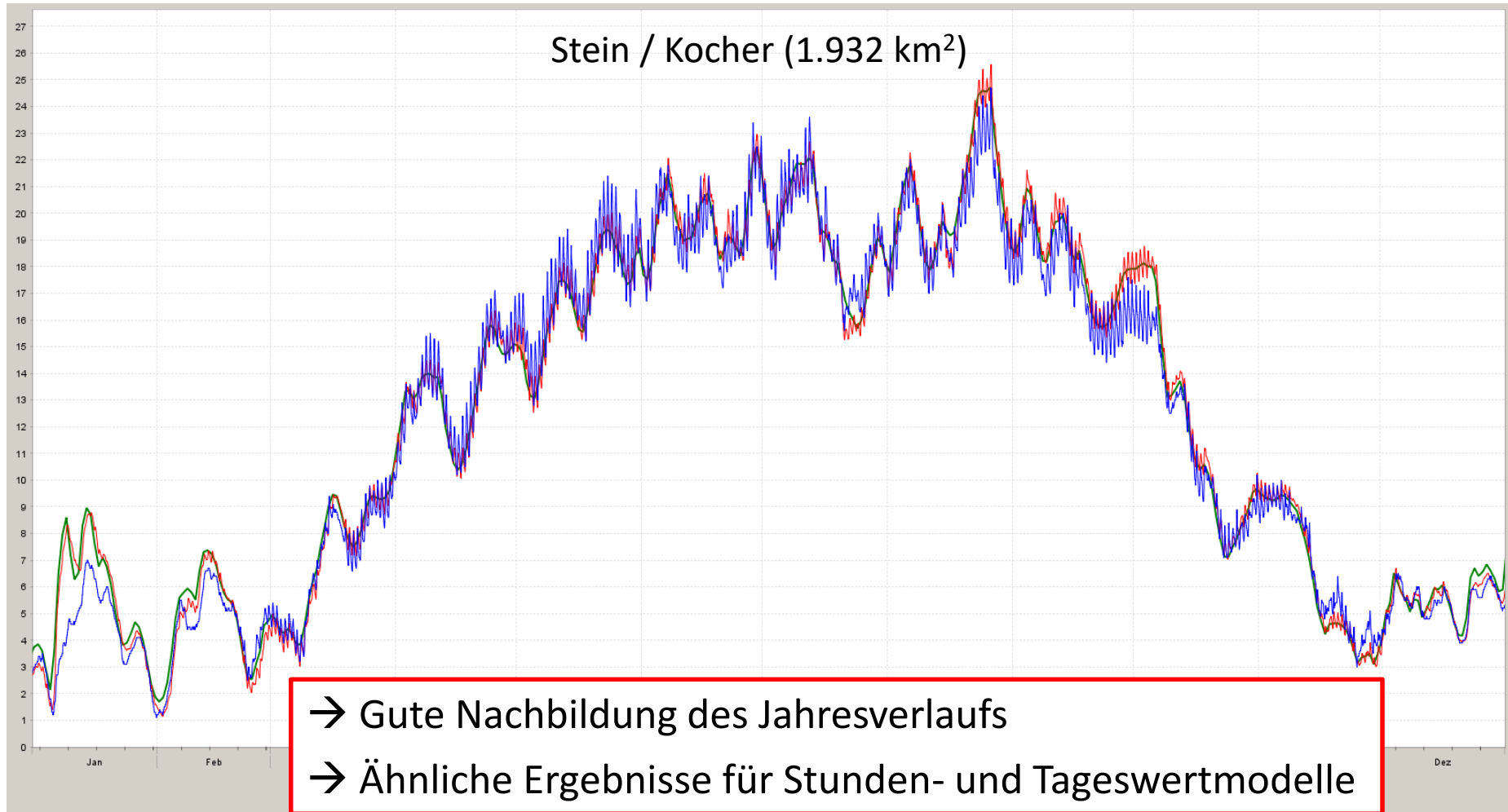
# Simulation / Validierung

Kontinuierliche Messstellen

blau = gemessen

rot = simuliert

grün = simuliert (Tageswerte)



# Ergebnisse: Klimasignal Kennwerte für BW

**Beispiel: Zeitgleich  $Q < MNQ$  und  $T_{\text{wasser}} > \text{Sommer-Schwellenwert}$**

→ Kennwert für gewässerökologisch kritische Situationen

- $O_2$ : Löslichkeit und Wiederbelüftung gering bei gleichzeitig hoher Zehrungsrate
- Geringe „Verdünnung“ von Abwasser bei gleichzeitig erhöhter Toxizität von Schadstoffen
- Erhöhte Gefahr für epidemische Krankheitsausbreitung

