

## Auswirkungen des Klimawandels auf die Bewässerung ausgewählter Gemüsekulturen

Jana Zinkernagel

13.11.2025

www.hs-geisenheim.de

## Spannungsfeld Bewässerung im Gemüseanbau

- **Hohe Ansprüche** an Wasserversorgung für **hohe Produktqualität**
- **Hohe Empfindlichkeit** gegenüber Umweltextremen wie **hohe Temperatur**
- **Hoher** und zunehmend **steigender** Wasserbedarf



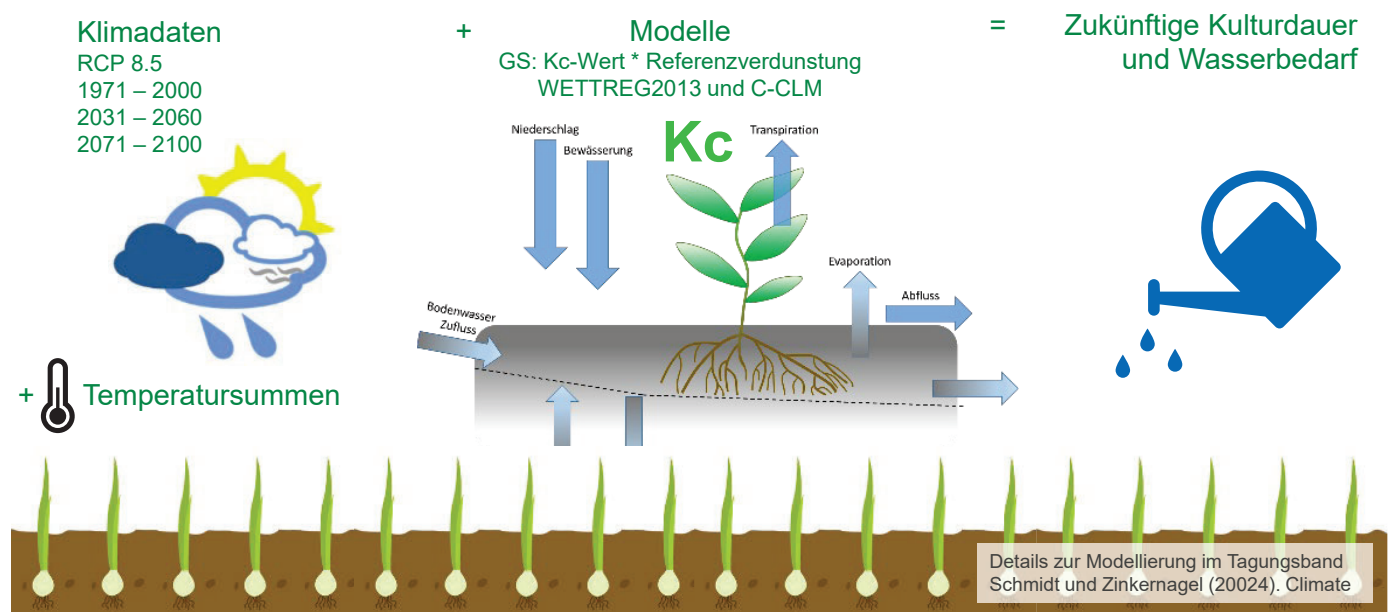
Randen an Kopfsalat bei hoher Transpiration  
Bild: pflanzenschutzdienst.rp-giessen.de/

Kultur	Wasserbedarf (mm)	Veränderungen zu 1961-1990 (mm)
...		
Porree früh	236	+58
Zucchini früh	203	+39
Zwiebel, Sommer	168	+48

Zinkernagel et al., 2022. Berichte über Landwirtschaft 100/2

1. Wie verändert der **Klimawandel** den **Bewässerungsbedarf**?
2. Ist das aktuelle **Bewässerungsmanagement** dafür geeignet?
3. Welche **Optionen** gibt es für den **zukünftigen Gemüsebau**?

## 1. Wie verändert der Klimawandel den Bewässerungsbedarf? Simulationen

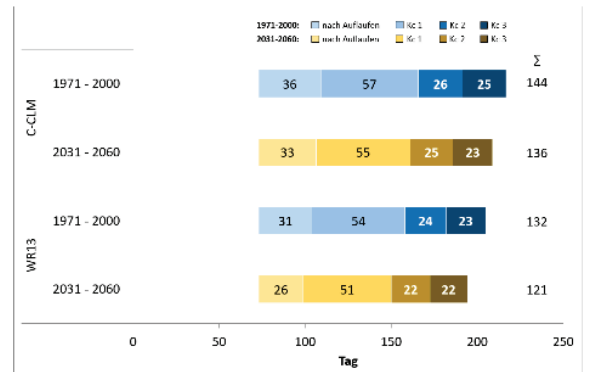
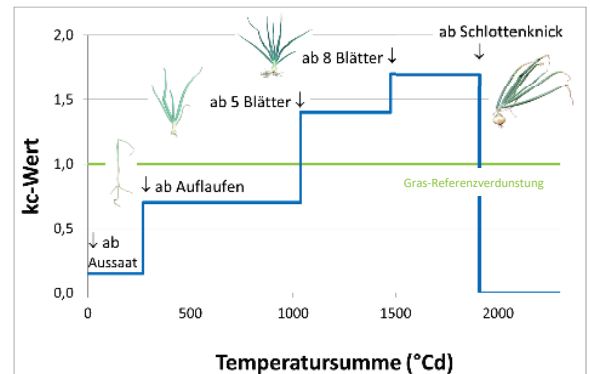


## Beschleunigte Pflanzenentwicklung und Kulturdauer - spezifisch für Entwicklungsstadien (Kc)

Zeitlicher Ablauf von Entwicklungsstadien durch  
Temperatursumme vorhersagen

Höhere Temperatur führt zu Verkürzung einzelner  
Entwicklungsstadien

Bewässerungsbedürftige Stadien der Keimung oder  
Laubblattbildung (Kc 1) verkürzen sich im Mittel um drei Tage



## Klimatische Wasserbilanz wird stärker negativ - unterschiedlich für Entwicklungsstadien

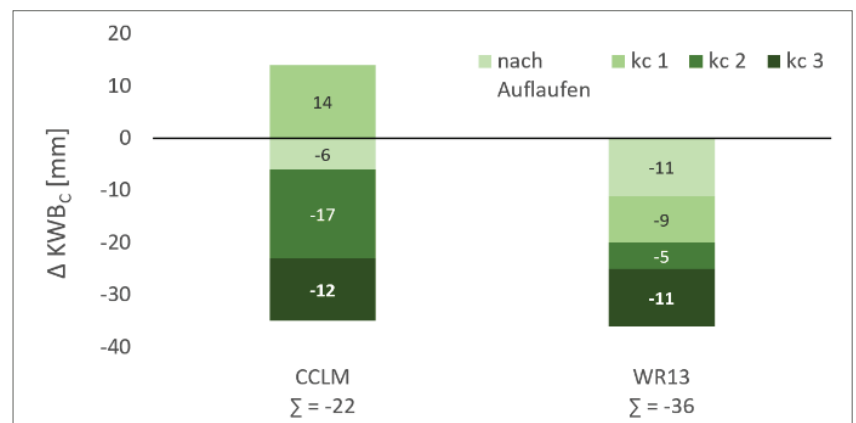
- Klimaparameter  und Entwicklungsstadien (Kc)



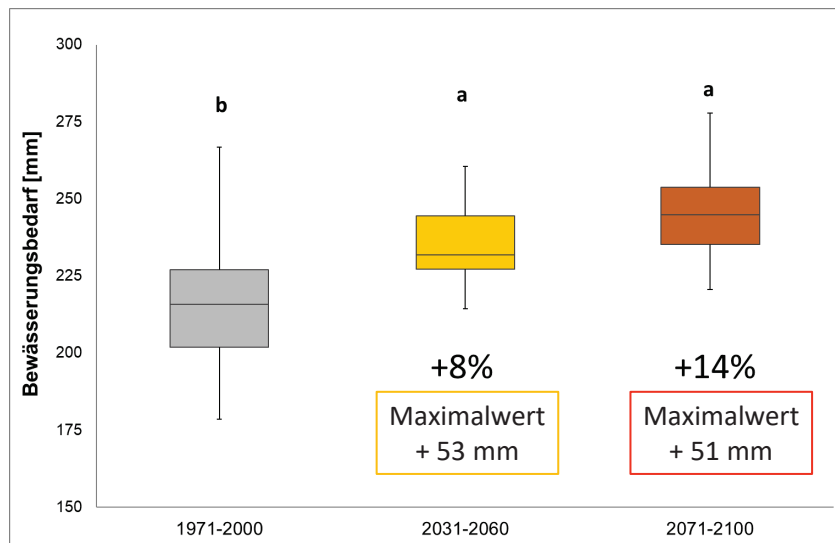
bestimmen Höhe des Wasserbedarfs

- Zunehmendes Wasserdefizit für Entwicklungsstadien unterschiedlich
- Verkürzung einzelner Stadien steigert deren Vulnerabilität für Wassermangel: v.a. bei zeitgleichen Trockenperioden

Quelle: Schmidt und Zinkernagel, (2024). Climate



## Bewässerungsbedarf von Zwiebel im Hessischen Ried steigt - mit hohen Extremwerten



30-jähriges Mittel des Zusatzwasserbedarfs von Zwiebel im Hessischen Ried in zwei Perioden der Zukunft für RCP 8.5 simuliert mit WETTREG2013

a, b, c: signifikante Mittelwertvergleiche nach Tukey ( $\alpha=0,05$ ) innerhalb eines Modells und eines Szenarios werden durch unterschiedliche Buchstaben symbolisiert

## Raschere Kulturentwicklung und höherer Wasserbedarf - Konsequenzen für die Bewässerung

Aus **höherer Anfälligkeit** empfindlicher Entwicklungsstadien **für Wassermangel**

- Intoleranz für verzögerte Bewässerung
- Bedarf **präziserer Bewässerungssteuerung**
- **Zeitnahe Bewässerungsmaßnahme**

Bei **parallelem satzweisen, kleinschlägigen Anbau verschiedener Kulturen**:

- **Zeitgleiche** Bewässerung erforderlich
- **höheres Wasserangebot** nötig
- **Mehr und effizientere Bewässerungstechnik**





## 2. Ist das aktuelle Bewässerungsmanagement dafür geeignet? Status quo Bewässerungstechnik

### Rohrberegnung, stationär verlegt

- hohe Parallelität auf kleinen Schlägen realisierbar wg. **hoher Anzahl**
- schlechte Wasserverteilung
- hoher Arbeitszeitbedarf

☞ **Wassernutzungseffizienz ↓**



Bild: [www.riesner-pumpen.de/landwirtschaft/bewasserung/rohrberegnung](http://www.riesner-pumpen.de/landwirtschaft/bewasserung/rohrberegnung)

### Mobile Beregnungsmaschinen mit Starkregner

- Zeitgleicher kleinschlägiger Einsatz begrenzt wg. hoher Arbeitsbreite und **kleinen Flotten**
- Arbeitszeitbedarf und Fixkosten gering
- schlechte Wasserverteilung bei Wind
- hoher Energiebedarf

☞ **Wassereffizienz und Schlagspezifisierbarkeit ↓**



Bild: Mittelstand 4.0-Kompetenzzentrum Kaiserslautern / A. Sell

Gödeke et al., 2024. KTBL  
S. Brimmers und H. Garming (2025)

## Aktuelles Bewässerungsmanagement dafür geeignet? Status quo Bewässerungstechnik

### Mobile Beregnungsmaschinen mit Düsenwagen

- bessere Wasserverteilung und –effizienz bei Wind
  - niedrigerer Energiebedarf
  - viele Überfahrten bei kleinen Einzelgaben
- ☞ **Schlagspezifisierbarkeit und Parallelität ↓ wg. höheren Fixkosten**



Bild: beinlich-beregnung.de

### Tropfbewässerung

- Hohe Wassereffizienz
  - niedrigerer Energiebedarf
  - sehr hoher Arbeitszeitbedarf
  - nicht für Qualitätsbewässerung z. B. bei Kopfsalat
- ☞ **hohe Parallelität, nur für langstehende Reihenkulturen**



Gödeke et al., 2024. KTBL  
S. Brimmers und H. Garming (2025)

## Aktuelles Bewässerungsmanagement dafür geeignet? Grenzen für zukünftigen Einsatz

- Zu geringe Parallelität der Bewässerung bei vielen Schlägen
- Zu hoher Ressourceneinsatz
- Zu ungleichmäßige Wasserverteilung
- Geringe Automatisierbarkeit



Beregnungsmaschinen mit  
Starkregner

Bild: Mittelstand 4.0-Kompetenzzentrum  
Kaiserslautern / A. Sell



Rohrberegnung

Bild: [www.riesner-pumpen.de/landwirtschaft/bewaesserung/rohrberegnung](http://www.riesner-pumpen.de/landwirtschaft/bewaesserung/rohrberegnung)



Tropfbewässerung



Beregnungsmaschinen mit  
Düsenwagen

Bild: [beinlich-beregnung.de](http://beinlich-beregnung.de)

## Aktuelles Bewässerungsmanagement dafür geeignet? Wasserbedarfsermittlung

Zukünftige Bewässerungssteuerung  
muss erfüllen:

- **Präzisiere Prognose** von Bewässerungsereignissen:  
**Termin** und **Wassermenge**
- Berücksichtigung Klimawandeleffekte  
→ **Prognose:**  
**Pflanzenentwicklung** und **Witterung**
- Benutzerfreundlichkeit
- **Automatisierbarkeit** der  
**Bedarfsermittlung** und **Bewässerung**

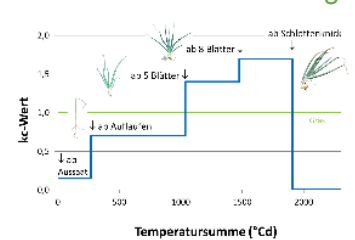
### Betriebsübliche Entscheidung



### Bodenfeuchtesensoren



### Geisenheimer Steuerung



### Klimatische Wasserbilanz

<https://www.alb-bayern.de/>

### 3. Optionen für den zukünftigen Gemüsebau Bewässerungstechnik

### 3. Optionen für den zukünftigen Gemüsebau Bewässerungstechnik

bei veränderten Betriebsstrukturen !?  
Schlaggröße > 50 ha

Investition in Kreis- und Linearberegnung  
→ **teilflächenspezifische Bewässerung** für gesteigerte

- Wasserproduktivität der Technik ( $\frac{\text{Ertrag}}{\text{Einheit Bewässerungswasser}}$ )
- Wasserproduktivität der Kultur ( $\frac{\text{Ertrag}}{\text{Einheit Verdunstung}}$ ),  
in Kombination mit Sensor-Rückkopplungssystem

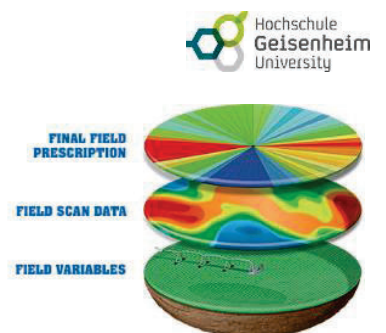
O' Shaughnessy et al. (2019) Biol. Sys. Eng.

mit bisherigen Betriebsstrukturen

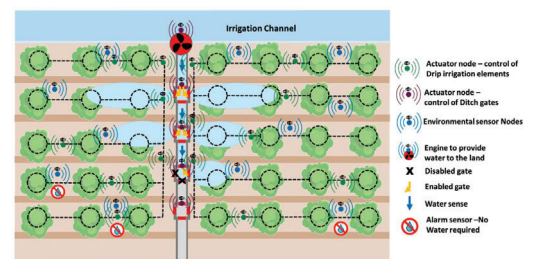
- Mehr Infrastruktur mit hoher Effizienz auf kleinen Schlägen



Bild: [www.lindsay.com/euas/de/beregnung](http://www.lindsay.com/euas/de/beregnung)



Teilflächenspezifische Bewässerung mit Center-Pivot  
Bild: Agricultural Instruction Inc., USA



Automatisierte Sensorgestützte Tropfbewässerung, teilflächenspezifisch  
Lloret et al. (2021) Sensors


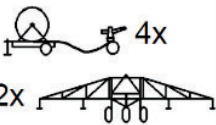
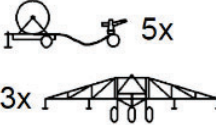
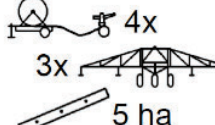
## Optionen für den zukünftigen Gemüsebau Limitierung durch Kosten

Simulation der Kosten bei Einsatz effizienterer Bewässerungstechnik

- Repräsentative Betriebsstruktur am Niederrhein:

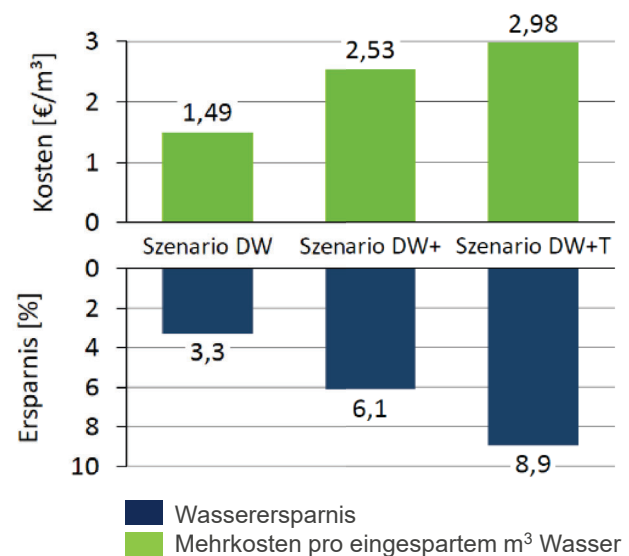
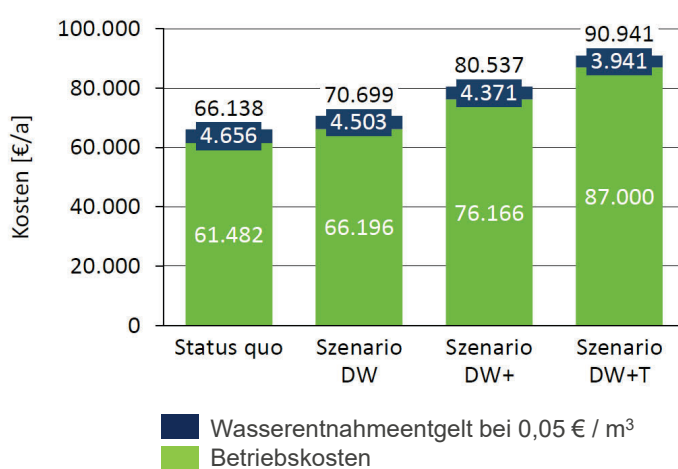
Eissalat (14 ha)	Mini-Romanasalat (14 ha)	Kohlrabi (14 ha)	Porree (26 ha)
Nettokulturfläche: 68 ha, Anbaufläche: 117 ha (alle Kulturgänge)			

- Ausstattungsszenarien

Status quo	Szenario DW	Szenario DW+	Szenario DW+T
6x 	2x  4x	3x  5x (mehr Kapazität)	3x  4x 5 ha (mehr Kapazität)

Brimmers und Garming (2025), DGG-Proceedings, in preparation

## Optionen für den zukünftigen Gemüsebau Mehr effiziente Technik: Wasserersparnis mit hohen Kosten verbunden



Brimmers und Garming (2025), DGG-Proceedings, in preparation



## Optionen für den zukünftigen Gemüsebau

### Wasserbedarfsermittlung

**Sensorgestützte Systeme:** Wireless Sensor Networks mit

#### a. geringem Energiebedarf:

- Balance zwischen Energie-Effizienz, Messqualität und Übertragungshäufigkeit

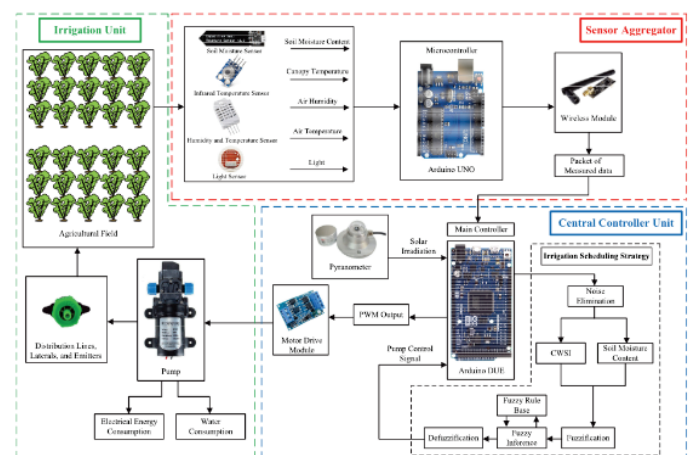
#### b. geringen Kosten:

- günstige Mikrochips mit Funk-Mikrocontrollern
- Daten- und energiesparende Funkstandards (z.B., ZigBee, [www.csa-iot.org](http://www.csa-iot.org))

#### c. Nutzung von open-source Microcontroller (z.B.: Arduino UNO R3, [www.Arduino.cc](http://www.Arduino.cc))

- zur automatisierten Umsetzung der Bewässerungsempfehlung

Wireless Sensor Unit  
Pathan&Hate (2016)  
Int.J.Eng.Res.&Tech.



Intelligentes Bewässerungssteuerungssystem mit energie- und kostengünstiger IT, Boden-, Pflanzen- und Klimasensoren  
Jamroon et al. (2020) IEEE

## Optionen für den zukünftigen Gemüsebau

### Wasserbedarfsermittlung

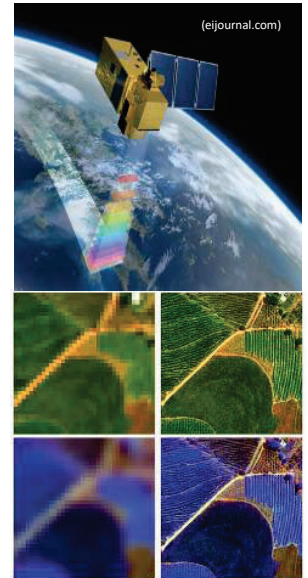
#### Systeme aus Klimatischer Wasserbilanz und Sensoren:

Ersetzen „manueller“ Erfassung von Kc-Stadien durch Spektrale Sensoren

- ✓ **Datenverfügbarkeit** von (Sentinel-2) Satellitenbildern als open-source
- ✓ **hohe zeitlicher und räumlicher Auflösung**,  
u.a. durch Modelle des **Maschinellen Lernens (ML)**:  
S2DR3 Modell skaliert alle Banden von Sentinel-2 runter auf 3 m

Einbinden von **Sensoren** (Boden, Pflanze, Klima) zum **Trainieren** von **ML Modellen**

- ✓ Auswahl **erforderliche Art** und **Anzahl von Sensoren** für Bewässerungspraxis
- ✓ **Anpassungsfähigkeit** durch ML an: verschiedene Bodentypen, Entwicklungsstadien und Klima, Integration verschiedener Datenquellen und Skalierbarkeit: Parzelle - Feld - Betrieb
- ✓ **ANNI: Artificial Neural Network for Irrigation**  
Rubo und Zinkernagel (2025). Agric. Water. Manag.



S2DR3 model for reconstructing high resolution textures across spectral bands of Sentinel-2 imagery. Source: medium.com

## Klimawandel-bedingter Änderungsbedarf der Bewässerung im Gemüsebau

### Fazit

- Höherer und kurzfristig variablerer Wasserbedarf
- Steigende Anfälligkeit für Wassermangel bei abnehmenden Sommerniederschlägen
- Zukünftige Bewässerungstechnik: höhere Effizienz, Parallelität und Zeitnähe  
Automatisierung
- Zukünftige Wasserbedarfsermittlung: Klimawandel-präzisierte Entscheidungsgrundlagen  
Benutzerfreundlichkeit und Kosteneffizienz  
Anbindung an Bewässerungstechnik
- Kosten zur zukünftiges Bewässerungsmanagement müssen zu erwirtschaften sein
- Forschung & Entwicklung für kleinschlägige Betriebsstrukturen mit vielen Kulturen und Sätzen

**Auf Ihre Diskussion freue ich mich**