

## Hintergrund

Die Unsicherheit in der Entwicklung des Klimas erfordert geeignete Strategien in der Bewässerungswirtschaft und Methoden die zuverlässig und robust auf die sich verändernden Umweltbedingungen reagieren können, eine ausreichende Versorgung landwirtschaftlicher Kulturen mit Wasser ermöglichen und einen hohen Ernteertrag garantieren. Eine dieser Strategien ist die Defizitbewässerung. Dabei wird die Pflanze gezielt Trockenstress ausgesetzt. Richtig angewandt führt dies zu einer Erhöhung der Wasserproduktivität, dem Verhältnis aus Ertrag zu eingesetzter Wassermenge, in dem die zugeführte Bewässerungsmenge auf die stresssensitiven und -insensitiven Phasen der Pflanze abgestimmt ist. Eine gute Bewässerungssteuerung ist dabei unverzichtbar.

## Arten der Bewässerungssteuerung

Eine Bewässerungssteuerung kann auf drei Arten erfolgen:

1. Basierend auf einer Beobachtung der Reaktion der Pflanze auf Trockenstress, d.h. Messung des Wassergehaltes in Bestandteilen der Pflanze oder durch physiologische Reaktionen wie sie etwa beim Welken auftreten.
2. Durch Berechnungen des Bodenwasserhaushaltes, bei der die Menge des zuzuführenden Wassers über Schätzungen der Evapotranspiration erfolgen.
3. Über Zustandsgrößen des Bodens, bei der entweder der Wassergehalt oder die Saugspannung des Bodens als Indikator für das Auslösen einer Bewässerung dienen. Eine Steuerung erfolgt über einen in den Boden eingebrachten Sensor zur Messung der entsprechenden Größe.

Diese sensorbasierte Steuerung einer Bewässerung ermöglicht nicht nur die Bestimmung des genauen Zeitpunktes einer Bewässerung, sondern auch die benötigte Bewässerungsmenge.

## Optimale Schwellenwerte und Bewässerungsmengen

Die Bestimmung robuster Bewässerungsschwellenwerte und Bewässerungsmengen, die zuverlässig zu einem hohen Ernteertrag und hoher Wasserproduktivität führen, ist über einen gekoppelten Ansatz aus Simulation und Optimierung am erfolgversprechendsten. Diese Methode erlaubt die Berücksichtigung der Variabilität des Klimas und gewährleistet die Übertragbarkeit des erstellten Modells auf andere Standorte.

Die hier angewandte Methode zur Bestimmung optimaler Bewässerungsschwellenwerte und Bewässerungsmengen besteht aus drei Teilen: (i) dem Wettergenerator LARS-WG, mit dessen Hilfe Wetterzeitreihen mit statistisch gleichen Eigenschaften wie im Beobachtungszeitraum erzeugt und dadurch Klimavariabilität und Klimaveränderung simuliert werden, (ii) der Optimierungsmethode CMA-ES, die optimale Lösungen für die angewandte Bewässerungsmethode unter Berücksichtigung vorhandener Randbedingungen findet, und (iii) dem Pflanzenwachstumsmodell Daisy, das Pflanzenproduktion und Wassertransport im Boden simuliert.

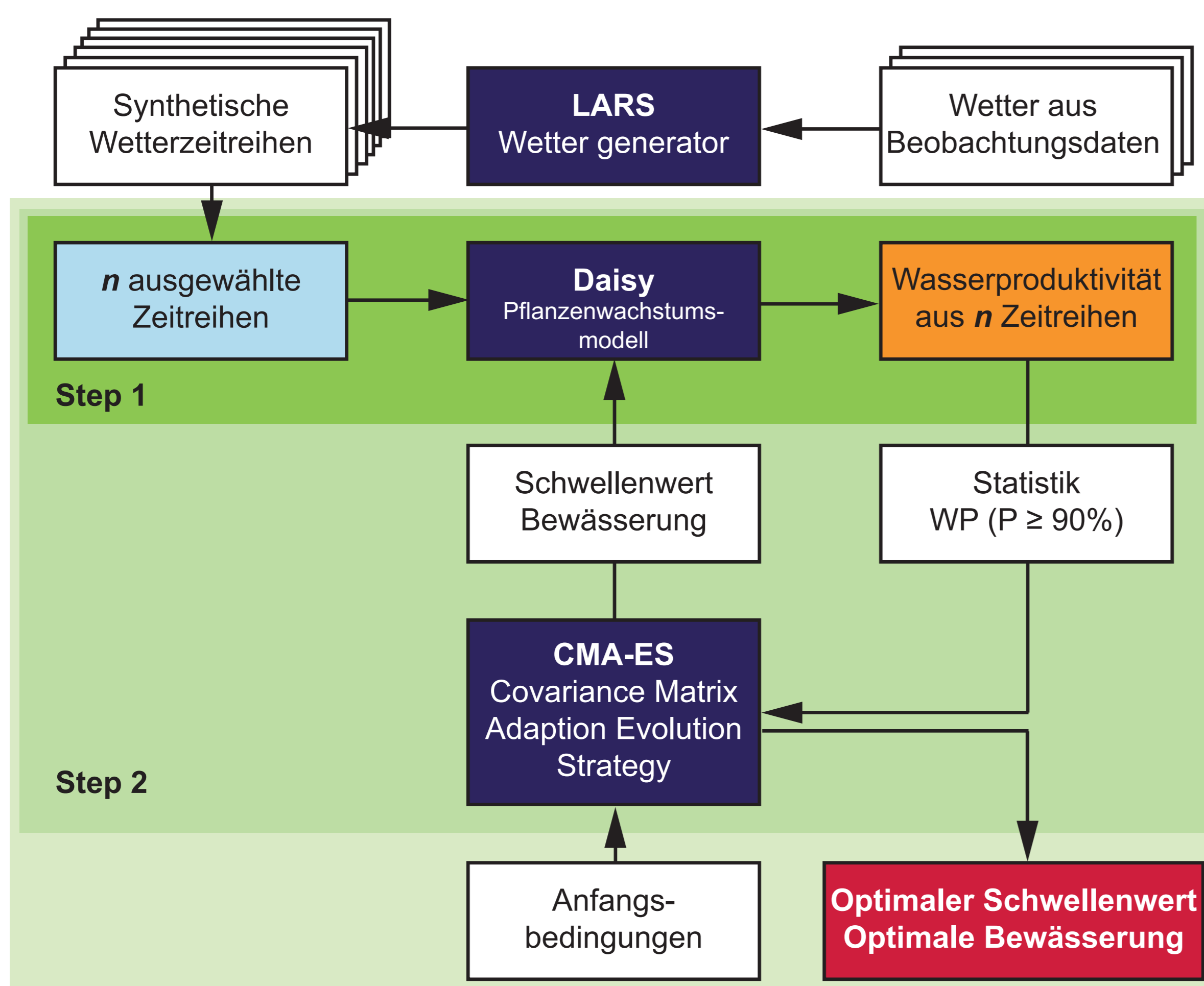


Abb. 1 Darstellung der methodischen Abfolge bei der Bestimmung zuverlässiger und robuster Bewässerungsschwellenwerte und Bewässerungsmengen für sensorbasierte Bewässerungssysteme.

Optimale Bewässerungsschwellenwerte und Bewässerungsmengen werden wie folgt bestimmt (Abb. 1). Anhand beobachteter Wetteraufzeichnungen werden mit Hilfe des Wettergenerators LARS-WG synthetische Wetterzeitreihen erzeugt. Diese dienen als Eingangsdatensatz für Berechnungen im Pflanzenwachstumsmodell Daisy, bei der Ertrag und Wasserverbrauch für eine gewählte Kombination aus Bewässerungsschwellenwert

und Bewässerungsmenge für alle synthetischen Wetterzeitreihen bestimmt werden. Die sich daraus ergebenden Wasserproduktivitäten werden statistisch ausgewertet. Auf dieser Basis wählt der Optimierungsalgorithmus CMA-ES so lange eine neue Kombination aus Schwellenwert und Bewässerungsgabe aus und berechnet die sich daraus resultierenden Wasserproduktivitäten neu aus, bis das Optimierungsziel, hier etwa die Maximierung des 90%-Quantils der errechneten Wasserproduktivitäten für die gewählte Kombination aus Schwellenwert und Bewässerungsmenge, erreicht ist.

## Anwendung und Ergebnisse

Die Methode wurde angewandt um optimale Schwellenwerte und Bewässerungsmengen für verschiedene sensorbasierte Strategien zu berechnen. Diese Strategien umfassen zwei Defizitbewässerungsstrategien. Eine mit einem konstanten Schwellenwert über die gesamte Entwicklungsphase der Pflanze ( $T_{D1}$ ) und eine mit vier Schwellenwerten, die an die Entwicklung der Pflanze angepasst ist ( $T_{D4}$ ). Zum Vergleich wurde der Schwellenwert für eine Bedarfsbewässerung berechnet. Zu Beginn wurden alle Strategien ausreichend mit Wasser versorgt, damit in der Frühphase kein Trockenstress auftritt und die Entwicklung der Pflanze nicht beeinträchtigt wird.

Anschließend erfolgte die Durchführung eines Bewässerungsversuches mit tröpfchenbewässertem Mais in der Pflanzenversuchsanstalt Dürnast (Technische Universität München).



Abb. 2 Versuchstandort in Freising im Gewächshaus (links) und Freiland (rechts).

Die Ergebnisse der Optimierung sind in Abb. 3 dargestellt. Die Strategie  $T_{D1}$  erzielte im Bewässerungsversuch einen Ertrag von  $12.8 \text{ t ha}^{-1}$  und wurde mit  $415 \text{ mm}$  bewässert. Die sich daraus ergebende Wasserproduktivität beträgt  $3.1 \text{ kg m}^{-3}$  und unter Berücksichtigung der Speicheränderung im Boden  $2.3 \text{ kg m}^{-3}$ . Bei Strategie  $T_{D4}$  wurden  $11.3 \text{ t ha}^{-1}$  geerntet und  $407 \text{ mm}$  Wasser eingesetzt. Hier beträgt die Wasserproduktivität  $2.8 \text{ kg m}^{-3}$ , wenn nur das Bewässerungswasser Berücksichtigung findet, ansonsten liegt diese bei  $2.0 \text{ kg m}^{-3}$ . Für die Bedarfsbewässerungsstrategie wurde ein Ertrag von  $12.9 \text{ t ha}^{-1}$  eingefahren und  $571 \text{ mm}$  für Bewässerung aufgewandt. Die sich daraus resultierende Wasserproduktivität beträgt  $2.3 \text{ kg m}^{-3}$ , sowohl mit als auch ohne Berücksichtigung der Speicheränderung.

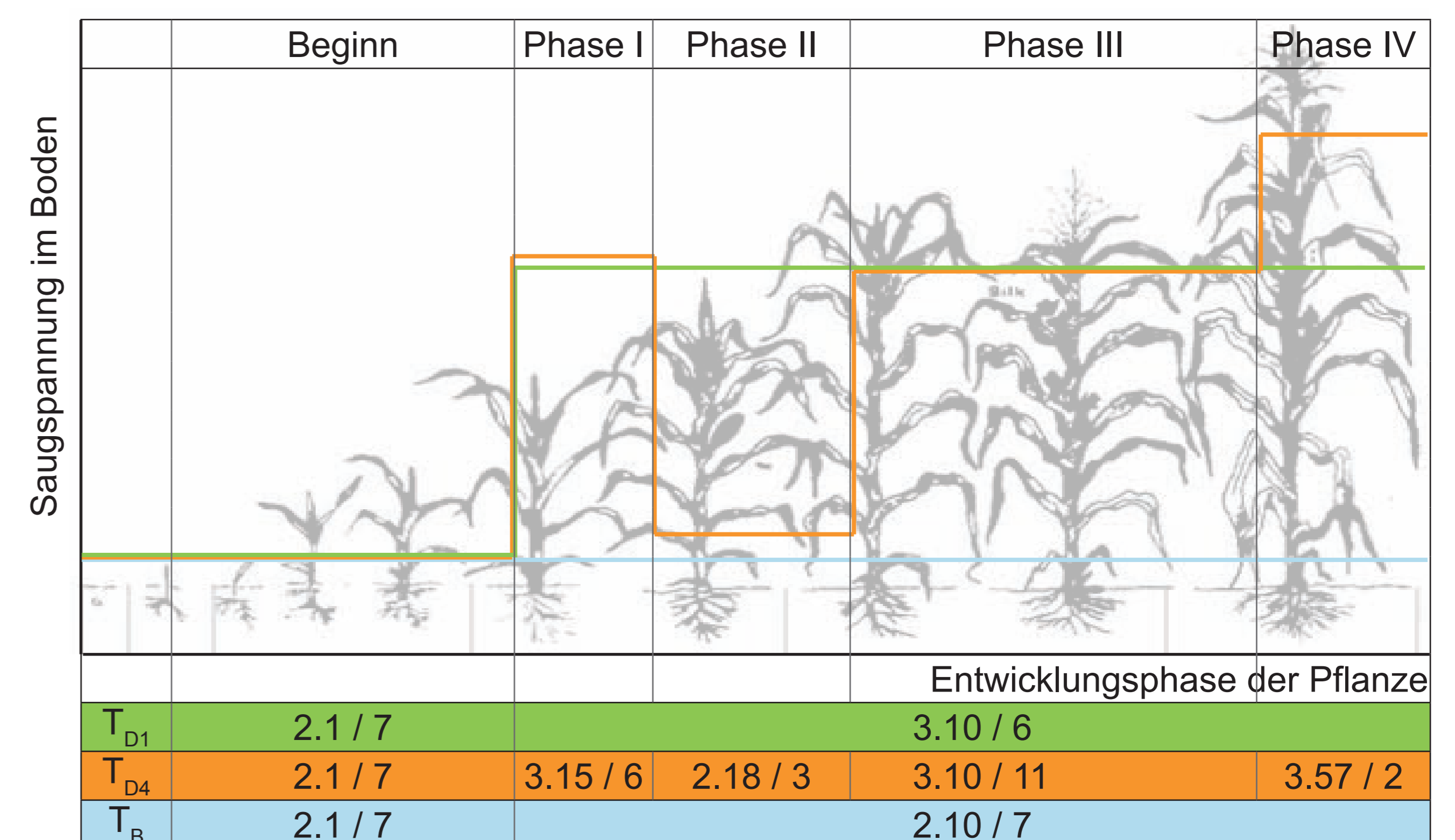


Abb. 3 Darstellung der Optimierungsergebnisse für die drei untersuchten Strategien Defizitbewässerung mit einem ( $T_{D1}$ ) und vier Schwellenwerten ( $T_{D4}$ ) sowie der Bedarfsbewässerung ( $T_B$ ) mit qualitativen Verlauf der Schwellenwerte für die einzelnen Strategien (oben) und tabellierten Ergebnissen (unten) bestehend aus Schwellenwert (pF) / Bewässerungsmenge (mm).

## Ausblick

Die Ergebnisse der Versuche können genutzt werden, um das Pflanzenwachstumsmodell weiter zu verbessern. Im Anschluss ermöglicht dies, weitere Simulationsrechnungen durchzuführen, in denen verschiedene Szenarien unter veränderten Randbedingungen wie etwa Klimavariabilität und Klimaveränderung untersucht werden können. Auswirkungen auf Pflanze und Boden können so sichtbar gemacht und die zukünftige Ertragsentwicklung untersucht werden. Dies ermöglicht die Ableitung geeigneter Maßnahmen, um auf etwaige unerwünschte Folgen reagieren zu können.