## Professur für Hydrologie Albert-Ludwig-Universität Freiburg i. Br.

Karuna Jutglar

# Der Einfluss von Ackerfrüchten und Fruchtfolgen auf Wasserhaushalt, Grundwasserneubildung und Abfluss

Weiterentwicklung des Landnutzungstyps Ackerland in RoGeR, Evaluierung mit wägbaren und landwirtschaftlichen Lysimetern & Modellanwendung mit Klima und Boden aus Baden-Württemberg



Masterarbeit unter der Leitung von Prof. Dr. Markus Weiler; Korreferenten: apl. Prof. Dr. Jens Lange & Robin Schwemmle

Oktober, 2021

## Inhalt

Zu	samme	enfassung	7
]	Deutsc	h	7
]	Englis	ch	7
1.	Einl	eitung	9
2.	Met	hoden und Materialien	11
	2.1	RoGeR - Allgemeine Modellbeschreibung	11
	2.2	Weiterentwicklung des Landnutzungstyps Ackerland	11
	2.2.	1 Dynamische Vegetationsentwicklung	. 11
	2.2.2	2 Dual Kc Ansatz zur Berechnung der Evapotranspiration von Ackerfrüchten	13
	2.3	Parametrisierung der Ackerfrüchte	15
	2.4	Material aus der Forschungsanstalt Agroscope Reckenholz-Zürich	17
	2.5	Daten Aufbereitung und Herleitung Hydrologischer Variablen aus Lysimetermasse	21
	2.6	Boden Parametrisierung	23
	2.7	Modellevaluierung und Modellvergleich	23
,	2.8	Einfluss von Ackerfrüchten/Fruchtfolgen im Vergleich zum Klimawandel	25
3.	Erge	ebnisse	28
	3.1	Herleitung hydrologischer Variablen ausgehend von Lysimeter Gewicht und AWAT-Fil-	ter
	Anwei	ndung	. 28
	3.2	Boden Parametrisierung	. 31
	3.2	Modellevaluierung mit Lysimeter Daten aus Reckenholz-Zürich	. 33
	3.2.	1 Dynamische Vegetationsentwicklung	. 33
	3.2.	2 Hydrologische Variablen	. 35
1	3.3 und Ol	Einfluss von Ackerfrüchten/Fruchtfolgen auf den Wasserhaushalt, Grundwasserneubildu perflächenabfluss	ng 39
	3.4	Einfluss von Ackerfrüchten/Fruchtfolgen im Vergleich zum Klimawandel in Baden-	
	Württe	emberg	. 44
4.	Disl	cussion	. 49
4	4.1	AWAT-Filter Anwendung mit 10-minütigen Lysimeter Daten	. 49
	4.2	Dynamische Pflanzenentwicklung mit Temperatursummen	. 49
	4.3	Parameter Unsicherheit	. 49
1	4.3 und Al	Einfluss von Ackerfrüchten/Fruchtfolgen auf den Wasserhaushalt, Grundwasserneubildu ofluss	ng 51
	4.4	Einfluss von Ackerfrüchten/Fruchtfolgen im Vergleich zum Klimawandel	52
5.	Sch	ussfolgerung	53
6.	Lite	raturverzeichnis	54
7.	Anh	ang	68

#### Verzeichnis der Abbildungen im Text

Abbildung 1: Wachstumsverlauf der Bodenbedeckung (CC) von Saat bis Ernte nach Steduto et al. Abbildung 2: Generalisierte Kurve der Pflanzen Koeffizienten während der Vegetationsperiode (nach Abbildung 3: Literaturwerte zur maximalen Wurzeltiefe (Zr max). Q ..... 17 Abbildung 4: Fruchtfolgen auf Lysimeter 1, 2, 3, 4, 8 und 9......20 Abbildung 6: Mittelwert der gemessen volumetrischen Bodenfeuchte ( $\theta$ ) aus 10, 30, 60 und 90cm Abbildung 7: Der Verlauf der ETa währende der Vegetationsperiode auf den Lysimetern 1-9 (Zeilen) Abbildung 8: Die ETa Summen von vollständigen Vegetationsperioden der Ackerfrüchte...... 30 Abbildung 10: Vergleich der Unterschreitungswahrscheinlichkeit von  $\theta_{M}$  (schwarz) mit der modellierten Bodenfeuchte (farbig), der in Lysimeter (Zeilen) und unterschiedlichen Bodenparametern Abbildung 11: Modelliertes Zr- und CC-Wachstum im Vergleich mit den tatsächlichen Vegetationsperioden der Ackerfrüchte (farbige Balken) auf den Lysimetern 2, 3, 4, 8 und 9. Dabei wird  $Z_r$  in negativen und CC in positiven Werten dargestellt, weil CC auf der Oberfläche und  $Z_r$  im Boden Abbildung 12: Vergleich der Entwicklung des monatlichen  $\theta$ -Minimum in 10, 30, 90cm Bodentiefe Abbildung 13: Totale Wasserbilanz der Oberfläche untergliedert in Lysimeter (Zeilen), Vegetation-Abbildung 14: Die Modellgüte (KGE > 0) der hydrologischen Variablen Niederschlag (N), aktuelle Evapotranspiration (ET<sub>a</sub>), Sickerwasserrate ( $Q_s$ ), Bodenspeicheränderung ( $\Delta S$ ) und mittlere Bodenfeuchte ( $\theta_M$ ) untergliedert in Lysimeter (Zeilen), Vegetations-/Winterperiode (Spalten) und Abbildung 15: Mittelwerte Jahresverlauf der hydrologischen Variablen (Zeilen) Niederschlag (N), Evapotranspiration (ET), Sickerwasserrate ( $Q_s$ ), Bodenspeicheränderung ( $\Delta S$ ) und Bodenfeuchte ( $\theta$ ) Abbildung 16: Jährlicher Verlauf von Niederschlag (N), aktuelle Evapotranspiration (ET<sub>a</sub>) und Abbildung 17: Verlauf der modellierten  $\theta$ -Zeitreihe im Vergleich zu  $\theta_M$  (schwarze Linie) untergliedert in Lysimeter (Zeilen), Modellvarianten (farbige Linien) und Ackerfruchtanbauzeiträume (farbige Abbildung 18: Kerndichte-Diagramm zu den Jahrestagen der Phänologie-Stadien (a) Saat und Ernte und (b) maximale Pflanzenntwicklung, die in Pflanzenbedeckung (CC) und Wurzeltiefe (Zr) Abbildung 19: Totale Wasserbilanz im Zeitraum 2006-2020 untergliedert in Böden (Spalten), Modell Abbildung 20: Vergleich des mittleren Jahresverlaufs (2006-2020) zwischen dem Standard-Landnutzungstyps Ackerland und den mit der Modellerweiterung doy\_dyn modellierten Fruchtfolgen Abbildung 21: Literaturvergleich der Temperatursummen (T<sub>sum</sub>) für die Phänologie-Stadien maximale 

#### Verzeichnis der Tabellen im Text

Tabelle 1: Parameter der Modellerweiterung.    16
Tabelle 2: DWD-Klimastationen, die zur Parametrisierung der Referenz Temperatursummen (T <sub>sum ref</sub> )
verwendet wurden
Tabelle 3: Messmethodik der Messdaten zu Lysimetergewicht, Sickerwasser und volumetrischer
Bodenfeuchte (Prasuhn et al., 2009, 2016; Sturzenegger, 2010)
Tabelle 4: Die mittlere Körnungsverteilung und Lagerungsdichte aus der Laborauswertung von den
Stechzylinderproben aus dem Bodenherkunftsort Grafenried. Summen ergeben nicht 100%, weil die
Korngrößenanteile Mittelwerte aus mehreren Stechzylinder-Proben sind
Tabelle 5: Die pF Kurve und gesättigte Leitfähigkeit aus der Laborauswertung von den
Stechzylinderproben aus dem Bodenherkunftsort Grafenried
Tabelle 6: Bewirtschaftung der Lysimeter 1, 2, 3, 4, 8 und 9 nach Oberholzer et al. (2017) 19
Tabelle 7: Meteorologische Daten in 10min Auflösung von der 20m entfernten Klimastation (Inhaber:
Meteo-Schweiz)
Tabelle 8: Parametereinstellungen für den AWAT-Filter zur Berechnung von N und ETa. Ausnahmen
wegen stürmischen Vegetationsperioden vorhanden
Tabelle 9: Bodenkennwerte f     ür die RoGeR-Modellierung
Tabelle 10: Varianten der Modellerweiterung in der Modellevaluierung
Tabelle 11: In der Evaluation einbezogene Ackerfrüchte.    25
Tabelle 12: Bodenkennwerte der drei typischen Ackerböden aus BW 27
Tabelle 13: Monokulturen und Fruchtfolgen verwendet in der Modellanwendung. GrL = Grassland
Standard-Landnutzungstyp, AL = Ackerland Standard-Landnutzungstyp, SM = Silagemais, WW =
Winterweizen, WR = Winterrapes, ZR = Zuckerrübe, WZ = Winterzwischenfrucht
Tabelle 14: Der langjährige Mittelwert für das Winter- und Sommerhalbjahrs von 1960-1990 (aus
WaBoA, 2012) und 2006-2020 zu den meteorologischen RoGeR-Inputdaten N, $ET_0$ und T. Das
Verhältnis der langjährigen Mittelwerte bilden den Korrektur-Faktor
Tabelle 15: ANOVA Tabelle zu den hydrologischen Variablen ETa, Qs, Q mit den Prädikatoren Klima,
Boden, Modell

## Verzeichnis der Abbildungen im Anhang

#### Verzeichnis der Tabellen im Anhang

Anhang-Tabelle 1: Liste der verwendeten Symbole und Abkürzungen
Anhang-Tabelle 2: Einzeländerungen an der Phänologie-Datenbank (Steinbrich et al., 2020)
Anhang-Tabelle 3: T <sub>base</sub> und T <sub>ut</sub> aus der Literaturrecherche zu Temperatursummen der
Pflanzenentwicklungs-Stadien (Quellen in A.Tab 12)
Anhang-Tabelle 4: Recherche-Flag zur Recherche der Phänologie-Stadien Saat, maximale Entwicklung
und Ernte
Anhang-Tabelle 5: Abgeschätzte Bodenbedeckung beim Saataufgang (CC0) anhand von FAO (2012
und Munzert & Frahm (2006)
Anhang-Tabelle 6: Quellen zu den Literaturwerten zu Zr max, die in Abbildung 3 dargestellt sind 72
Anhang-Tabelle 7: Kalender zur Bewirtschaftng der Lysimeter 2,3,4,8 und 9 79
Anhang-Tabelle 8: Mittlere Bodenkennwerte der Stechzylinder Proben pro Bodentiefe
Anhang-Tabelle 9: Zusammenfassung der Saat- und Erntezeitpunkte der Fruchtfolgenglieder 80
Anhang-Tabelle 10: Python-Skript für die AWAT-Filter Anwendung befindet sich digital im
Verzeichnis R_skripte\awat_filter.py
Anhang-Tabelle 11: Pedotransferfunktionen von Heike Puhlmann 80
Anhang-Tabelle 12: Fehlwerte in M nach Datenaufbereitung
Anhang-Tabelle 13: Fehlwerte in Qs nach Datenaufbereitung
Anhang-Tabelle 15: Quellen zu den Literaturwerten zu T <sub>sum</sub> , die in Abbildung 21, Anhang-Abbildung
8 und Anhang-Tabelle 2 dargestellt sind
Anhang-Tabelle 16: Literaturwerte zu dem Wasserentzug [%] der nutzbaren Feldkapazität in gegebener
Bodentiefe
Anhang-Tabelle 17: Quellen zu Wurzelwachstumswerten, die in A-Abb, 9 dargestellt sind,

## Zusammenfassung

#### Deutsch

Der Wasserhaushalt, die Grundwasserneubildung und die Abflussbildung sind durch Ackerfrüchte und Fruchtfolgen beeinflusst. Dennoch wird Ackerland in hydrologischen Modellen häufig mit vereinfachter Pflanzenentwicklung oder nur als Grasland charakterisiert. Diese Masterarbeit stellt eine Modellerweiterung für das Niederschlags-Abflussmodell RoGeR (Runoff Generation Reserach) vor, die die dynamische Entwicklung von Ackerfrüchten in einem neuen Evoptranspirations-Ansatz für den Landnutzungstyp Ackerland berücksichtigt. Die Modellerweiterung und der vereinfachte Standard-Landnutzungstyp für Ackerland und Grasland wurden mit observierten Daten (2010-2017) zu aktueller Evapotranspiration (ET<sub>a</sub>), Sickerwasserrate ( $Q_s$ ) und Bodenfeuchte ( $\theta$ ) aus der Lysimeter Anlage Agroscope Reckenholz-Zürich evaluiert. Die Herleitung von  $ET_a$  und Lysimeter Niederschlag (N) erfolgte basierend auf der hochaufgelösten Lysimetermasse-Messung und der AWAT-Filter Anwendung. Die Evaluation und der Vergleich zwischen Modellerweiterung und Standard-Landnutzugtypen erfolgte über den Kling-Gupta-Koeffizient (KGE). Die Modellgüte der Modellerweiterung war signifikant höher als die der Standard-Landnutzungstypen für ET<sub>a</sub> (KGE: 0.142 vs. -0.57) und  $\theta$  (KGE: 0.48 vs.-1.48), aber nicht signifikant für Q<sub>s</sub> (KGE: 0.16 vs. 0.12). Allgemein ist die Modellgüte der Modellerweiterung gering, weil die Berechnung der Pflanzenentwicklung über den Temperatursummen-Ansatz Probleme und Limitationen zeigte und observierte ET<sub>a</sub> und N-Input bei starkem meteorologischem Einfluss sich als unsicher herausstellten. Im Vergleich zwischen den Lysimetern war die Modellgüte für ET<sub>a</sub> bei Lysimetern mit guter Pflanzenentwicklungs-Modellierung (KGE: 0.31) signifikant höher als mit schlechter (KGE: 0.01). Dieser Unterschied verdeutlicht die Relevanz des Einflusses der Ackerkulturen und Fruchtfolgen, der sich wesentlich zwischen Winter- und Sommerkulturen unterscheidet und von einem vereinfachten Standard-Landnutzungstyp nicht abgebildet werden kann. Weiterführende Modellanwendung der RoGeR-Modellerweiterung mit 8 Fruchtfolgen und Klima & Bodendaten aus BW gibt erste Hinweise, dass auf mächtigen Böden der Unterschied in ET<sub>a</sub> und Q<sub>s</sub> zwischen einem vereinfachten Standard-Landnutzungstyp und Fruchtfolgen größer als der Effekt des Klimasignals zwischen 1960-1990 und 2006-2020 ist.

#### Englisch

Arable crops and crop rotations have an impact on the water balance, groundwater recharge and runoff generation. However, cropland is often characterized in hydrological models with an oversimplified crop development or as grassland. This master's thesis presents a model extension for the precipitationrunoff model RoGeR (Runoff Generation Research) that incorporates dynamic crop development in a new evoptranspiration approach for cropland. The model extension and the simplified standard land use type for cropland and grassland were evaluated with observed data (2010-2017) on actual evapotranspiration (ET<sub>a</sub>), seepage rate (Qs), and soil moisture (0) from the Agroscope Reckenholz-Zurich lysimeter facility. ETa and lysimeter precipitation (N) were derived based on the high-resolution lysimeter mass measurement and AWAT filter application. Evaluation and comparison between model extension and standard land use types was made using the Kling-Gupta coefficient (KGE). The model goodness of the model extension was significantly higher than standard land use types for ET<sub>a</sub> (KGE: 0.142 vs. -0.57) and  $\theta$  (KGE: 0.48 vs.-1.48), but not significantly so for Qs (KGE: 0.16 vs. 0.12). In general, the model goodness of the model extension is low because the calculation of plant development via the temperature sum approach showed problems and limitations, and observed ET<sub>a</sub> and N input proved to be uncertain under strong meteorological influence. In a comparison between lysimeters, model goodness for ET<sub>a</sub> was significantly higher on lysimeters with good plant development modeling (KGE: 0.31) than with poor (KGE: 0.01). This difference highlights the relevance of the influence of arable crops and crop rotations, which differs substantially between winter and summer crops and cannot be represented by a simplified standard land use type. Further, model application of the RoGeR model extension with 8 crop rotations and climate & soil data from BW indicates that on deep soils the

difference in ETa and Qs between a simplified standard land use type and crop rotation is larger than the effect of the climate signal between 1960-1990 and 2006-2020.

Keywords: RoGeR, Ackerland, Fruchtfolgen, Wasserhaushalt, Grundwasserneubildung, Evapotranspiration, Baden-Württemberg, Klimawandel.

## 1. Einleitung

Wassernutzung durch Pflanzen (i.e. Transpiration) ist ein wichtiger Transferprozess im terrestrischen Wasser-, Energie- und Nährstoffhaushalt (Berry et al., 2006). Global wird der Transpirations-Anteil an der Evapotranspiration (ET) in terrestrischen Ökosystemen durch Modellierung auf 38-80% (Wang-Erlandsson et al., 2014) und durch Isotopen-Analyse auf 80-90% (Jasechko et al., 2013) geschätzt. Für die Wassernutzung durch landwirtschaftliche Kulturpflanzen werden 30-70% der globalen Frischwasserentnahmen verwendet (Howell, 2001; Siebert et al., 2010). Im Kontext von Wasserknappheit durch rasanten Populationsanstieg und Klimawandel ist die Wassernutzung durch landwirtschaftliche Kulturpflanzen ein relevanter Forschungsgegenstand für die weltweite Lebensmittelversorgung (White et al., 2011). Sicherheit in der Lebensmittelversorgung erfordert die Intensivierung des Wasser- und Nährstoffmanagements in der Landwirtschaft, dass die Optimierung von Fruchtfolgen und Bewässerung im Ackeranbau einbezieht (Mueller et al., 2012). Fruchtfolgen reduzieren den Oberflächenabfluss (Duan et al., 2020), Perkolation ((Manevski et al., 2015) und den Bodenwassergehalt in Abhängigkeit zur ihrer Bodenbedeckung und Wurzeltiefe, die zwischen Ackerkulturen unterschiedlich ist (Prabhakara et al., 2015; Schmidhalter et al., 1994; X. Zhao et al., 2018). Da in den Jahren von 2001-2012 nur 41% des Ackerlands in Europa jedes Jahr bewirtschaftet wurde (Estel et al., 2016), sind durch die Optimierung und Intensivierung von Fruchtfolgen Einflüsse auf den Wasserhaushalt, Grundwasserneubildung und Oberflächenabfluss zu erwarten, bislang unbekannt.

ET ist durch die Vegetationsform geprägt. Feldversuche mit fortschreitende ET Messtechniken aus Bown Ratio, Eddy Korrelation, wägbaren Lysimetern und Isotopenanalyse bildeten die Grundlage für die Aufstellung und Evaluierung von ET-Berechnungsmethoden (K. Wang & Dickinson, 2012). ET-Berechnungsmethoden unterscheiden sich nach ihren Inputdaten und Genauigkeit (Liu et al., 2017; Xu & Chen, 2005). Im Vergleich ist die physikalische Penman-Monteith (PM) Gleichung eine robuste und akkurate ET-Berechnungsmethode, weil sie die physikalischen Widerstände der lokalen atmosphärischen und vegetativen Umwelt einbezieht (Monteith, 1965). Die genannten ET-Messtechniken sind für groß-skalare ET<sub>c</sub> Abschätzungen wegen kleinen Messnetzen und heterogenen Landschaftstypen ungeeignet, weshalb hier Fernerkundungsansätze oder Oberflächenmodelle, die die Vegetation explizit berücksichtigen (i. e. soil-vegetation-atmosphere transfer (SVAT) Modelle), verwendet werden (Kalma et al., 2008; K. Wang & Dickinson, 2012).

In SVAT-Modellen aus den Fachbereichen Landwirtschaft und Hydrologie ist die Entwicklung von Ackerkulturen unterschiedlich komplex abgebildet. Landwirtschaftliche Modelle wie APSIM (Keating et al., 2003) und DSSAT (Jones et al., 2003) berechnen die Pflanzenentwicklung in Abhängigkeit zu Temperatur, Wasser-, Salz-, Nährstoff- und CO<sub>2</sub>-Gehalt. Kollas et al. (2015) stellen aber im Vergleich von 17 Fruchtfolgen-Modellierungen mit Standorten aus Europa fest, dass der Effekt von Bewässerung wegen der fehlerhaften Modellierung der Bodenwassergehalts-Dynamik in und Dürren landwirtschaftlichen Modellen unterschätzt wird. In der hydrologischen Modellierung ist das Prozessverständnis zur Bodenwassergehalts-Dynamik fortgeschritten (Devia et al., 2015; Fatichi et al., 2016), welches in landwirtschaftlichen Modellen bisweilen fehlt (Jia et al., 2011). Der klassische Ansatz in hydrologischen Modellen zur Berechnung der aktuellen ET (ET<sub>a</sub>) als Funktion zur potenzieller ET  $(ET_p)$  und Bodenfeuchte ( $\theta$ ) vernachlässigt aber die Vegetationsentwicklung (Zhao et al., 2013). Denn die Evapotranspiration von Vegetationsformen wie Ackerkulturen (ET<sub>c</sub>) folgt der Pflanzenentwicklung, die Evaporation (E) und Transpiration (T) gegensätzlich beeinflusst. Der Anteil T steigt und E sinkt mit fortschreitender Vegetationsentwicklung, die in landwirtschaftlichen Modellen über den Blattflächenindex (LAI) oder die Pflanzen-Bodenbedeckung beschrieben wird (Ritchie, 1972; Allen & Pereira, 2009). Zu klassischen hydrologischen Modellen gehören die deutschen physikalischen Wasserhaushaltsmodell WASIM (Schulla, 2019), GWN-BW (Gudera & Morhard, 2015) und LARSIM (Bremicker, 2000), die ursprünglich die Vegetationsentwicklung in Form eines jährlich wiederholenden Interzeptionsspeichers und konstanter Wurzeltiefe vereinfachen.

Die Forschung zur Wassernutzung und zum Klimawandel steht vor der Herausforderung das Fachbereichswissen zu hydrologischen und biologischen Prozessen in Modellen zu vereinen (Arora, 2002). Dazu sind in Siad et al. (2019) Ansätze zur Koppelung von hydrologischen und landwirtschaftlichen Modellen zusammengefasst, von diesen hydrologischen Modellen manche in ihrer ursprünglichen Version entweder Ackerland vereinfacht oder nur Gras- und Waldflächen annehmen. Berücksichtigung der Vegetationsentwicklung in hydrologischen Modellen durch einen physikalischen Ansatz (Bai et al., 2018; Donohue et al., 2010; Gerten et al., 2004; Manfreda et al., 2005; Thompson et al., 2011) oder die Implementierung eines eigenen Pflanzenmodell-Moduls (Gayler et al., 2014; Liu et al., 2016; van den Hoof et al., 2011; Xiong et al., 2019) verbesserten die Übereinstimmung mit beobachteten hydrologischen Variablen. Physikalische Ansätze sind durch die Datenverfügbarkeit eingeschränkt, weil diese Fernerkundungsdaten für den LAI-Input und Vegetationswiderstands-Parameter der PM-Gleichung benötigen. Implementierte Pflanzenmodell-Module in hydrologischen Modellen berechnen mit geringer Parameteranzahl eine Pflanzenentwicklung, die limitiert und unsicher ist. Ein praktikabler Ansatz ist der Dual Kc-Ansatz, der ausgehend von der Referenz-Verdunstung (ET0) und einem empirischen Pflanzenkoeffizient (Kc) die ETc in Abhängigkeit zur Pflanzenentwicklung berechnet (Allen & Pereira, 2009) und einfach in deterministischen Modellen zur ET<sub>c</sub>-Berechnung zu implementieren ist (Pereira et al., 2020). Der Vorteil des Dual-Kc-Ansatz gegenüber physikalischen Ansätzen ist, dass Vegetationswiderstände der PM-Gleichung nicht in der Anzahl wie Kc-Werte in der FAO-Datenbank vorhanden sind (Allen et al., 1998), die stetig erweitert (Er-Raki et al., 2021; Mobe et al., 2020) und für relevante Ackerkulturen stätig evaluiert werden (e.g. Oberholzer, Prasuhn, & Hund, 2017).

Der Einfluss der Ackerfrüchten auf den Wasserhaushalt, Grundwasserneubildung und Oberflächenabfluss ist für das Bundesland Baden-Württemberg (BW) ungeklärt, obwohl die landwirtschaftliche Fläche mit 40%, davon 57.5% Ackerland, ein relevanter Flächennutzungsanteil darstellt (Statistisches Landesamt Baden-Württemberg, 2021). Weiterentwicklungen deutscher berücksichtigen teilweise Wasserhaushaltsmodelle (WaSiM, GWN-BW) die dynamische Vegetationsentwicklung, aber quantifizieren in Studien den Einfluss der Ackerfrüchte und Fruchtfolgen bisweilen nicht. RoGeR ist ein physialisch basiertes Nederschlags-Abfluss Modell und liefert für BW auch in nicht bemessenen Einzugsgebieten eine Datengrundlage zu Abflussprozessen (Steinbrich & Weiler, 2012). In RoGeR wird aber der Landnutzungstyp "Ackerland" vereinfacht, weil die Pflanzenentwicklung als durchschnittliche und jährlich wiederholende Pflanzenentwicklung angenommen und ET<sub>a</sub> eine Funktion zu ET<sub>p</sub> und  $\theta$  ist. Deshalb ist es das Ziel dieser Masterarbeit, den Landnutzungstyp Ackerland in Roger mit einem einfachen Pflanzenmodell und dem Dual-Kc-Ansatz weiterzuentwickeln, sodass die zeitliche Dynamik der Ackerkulturen und Fruchtfolgen in der ET-Berechnung berücksichtigt wird, um folgende Forschungsfragen zu beantworten:

- 1. Wie beeinflussen Ackerfrüchte und Fruchtfolgen den Wasserhaushalt, die Grundwasserneubildung und den Oberflächenabfluss?
- 2. Was beeinflusst den Wasserhaushalt, die Grundwasserneubildung und Oberflächenabfluss in Baden-Württemberg stärker Ackerfrüchte/Fruchtfolgen oder Klimawandel?

Im ersten Schritt Entwicklung und Parametrisierung der RoGeR-Modellerweiterung für Ackerfrüchte und Fruchtfolgen. Im zweiten Schritt Evaluierung mit wägbaren und landwirtschaftlichen Lysimetern und Vergleich der Modellerweiterung mit den vereinfachten Standard Landnutzungstypen für Ackerland und Grasland. Abschließend Anwendung der evaluierten Modellerweiterung mit typischen Ackerböden und Klimadaten aus Baden-Württemberg (2006-2020), um den Einfluss der Fruchtfolgen mit dem des Klimawandels zu vergleichen.

## 2. Methoden und Materialien

#### 2.1 RoGeR - Allgemeine Modellbeschreibung

RoGeR beinhaltet ein komplexes hydrologisches Prozessverständnis. Der zeitlich hochaufgelöste Abflussbildungsprozess berücksichtigt präferenziellen Makroporenfluss, Niederschlagslänge/Intensität und Bodenfeuchtevorbedingung. In Baden-Württemberg wurden der Abflussbildungsprozess, wie auch der daraus resultierende Abfluss in bemessenen Einzugsgebieten mit unterschiedlicher Größe und Boden validiert (Steinbrich et al., 2016). RoGeR Anwendungen sind zu finden in den Hydrologie-Fachbereichen Boden (Steinbrich et al., 2016), Extremereignis (Ries et al., 2020; Weiler et al., 2017), Grundwasser (Steinbrich et al., 2020a) und Stadt (Leister et al., 2018; Steinbrich et al., 2018).

Der Landnutzungstyp Ackerland wurde für die 1D-Wasserhaushaltsvariant weiterentwickelt, die nur vertikale hydrologische Prozesse in den Kompartimenten Oberfläche und Boden berücksichtigt. RoGeR unterteilt in Niederschlags- und Nicht-Niederschlags-Zeiträume, um Niederschlags- (At=10min oder  $\Delta t=1h$ ) gegenüber Nicht-Niederschlags-Zeitraum ( $\Delta t=1d$ ) in höherer zeitlicher Auflösung zu modellieren. Als Input gehen ein Niederschlag (N) [mm/10min], Evapotranspiration (ET) [mm/tag] und Tagesmitteltemperatur (T<sub>mean</sub>) [°C]. Niederschlag kann in Oberflächenspeicher (e.g. Mulden), durch Interzeption und bei niedrigen Temperaturen auch in Schnee zurückgehalten werden. Der nicht zurückgehaltene Anteil infiltriert oder bildet Oberflächenabfluss. Wasser infiltriert in den ersten Bodenspeicher und kann durch lange Makroporen auch direkt in den zweiten Bodenspeicher infiltrieren. Potentielle Infiltrationskapazität vor dem Niederschlag ist abhängig von den Eigenschaften des ersten Bodenspeichers, zu denen Mächtigkeit, Feldkapazität, Bodenfeuchtevorbedingung und Versiegelungsgrad gehören. Überschreitet der erste Bodenspeicher die Feldkapazität, perkoliert das Wasser erst in den zweiten Bodenspeicher und weiterführend ins Grundwasser. Tiefenperkolation ist abhängig von der Wasserleitfähigkeit des Bodens (Ks) und der Wasserleitfähigkeit des geologischen Untergrunds (K<sub>f</sub>). Bei niedrigen Bodenmatrixpotential kann Wasser vom Grundwasser wieder in den Boden aufsteigen.

#### 2.2 Weiterentwicklung des Landnutzungstyps Ackerland

Die Modellerweiterung für den Landnutzungstyp Ackerland in RoGeR beinhaltet ein simples Pflanzen-Modell und einen neuen Verdunstungsansatz. Der Verdunstungsansatz basiert auf die Pflanzenentwicklung von Ackerfrüchten, weshalb im ersten Teil das Phänologie-Modell und im zweiten Teil der neue Verdunstungsansatz erläutert werden. Die folgenden Formeln implementierte Robin Schwemmle in den RoGeR Python Code, der auf Anfrage im privaten Github Bereich zur Verfügung gestellt werden kann.

#### 2.2.1 Dynamische Vegetationsentwicklung

Die Pflanzen-Bodenbedeckung (CC [-]) und Wurzeltiefe ( $Z_r$  [mm]) von Ackerfrüchten beeinflussen hydrologische Prozesse (siehe Einleitung) und unterliegen einer Entwicklung, die in Abhängigkeit zur Temperatur (T [°C]) und volumetrischer Bodenfeuchte ( $\theta$  [m<sup>3</sup>m<sup>-3</sup>]) steht. Die Pflanzenentwicklung wird in fünf Phänologie Stadien (1) Saat, (2) Austrieb, (3) Maximale Entwicklung, (4) Zerfall, und (5) Ernte untergliedert und über das Wachstumsgradtage-Verfahren (McMaster et al., 1997) berechnet. Wachstumsgradtage (GDD [°Cd<sup>-1</sup>]) beziffern die tägliche Temperatursumme, die zum täglichen Pflanzenwachstum führt

$$GDD = \left[\frac{(T_{max} + T_{min})}{2}\right] - T_{base} \tag{1}$$

$$\left[\left(\frac{T_{max} + T_{min}}{2}\right)\right] < T_{base} \rightarrow \left[\left(\frac{T_{max} + T_{min}}{2}\right)\right] = T_{base} \tag{2}$$

$$\left[\left(\frac{T_{max} + T_{min}}{2}\right)\right] > T_{ut} \rightarrow \left[\left(\frac{T_{max} + T_{min}}{2}\right)\right] = T_{ut}$$
<sup>(3)</sup>

wovon  $T_{max}$  und  $T_{min}$  die maximale und minimale Tagestemperatur [°C] sind.  $T_{base}$  und  $T_{ut}$  sind Temperaturgrenzwerte [°C], die den Annahme-Bereich für lineares Pflanzenwachstum pro Kelvin definieren (Davidson & Campbell, 1983): Tägliches Pflanzenwachstum beginnt bei  $T_{base}$  und nimmt über  $T_{ut}$  nicht weiter zu. Die Summe an GDD im Zeitraum bis zum Phänologie Stadium werden als Temperatursummen ( $T_{sum}$ [°C]) ausgedrückt

$$T_{sum} = \sum_{t=t_0}^{t_i} GDD_t \tag{4}$$

wovon t<sub>0</sub> [d] der gewählte Startzeitpunkt und t<sub>i</sub> [d] der Zeitpunkt des Einsetzens des i-ten Phänologie-Stadiums ist. T<sub>sum</sub> ist ein konservativer Parameter, da T<sub>sum</sub> zur Erreichung eines Phänologie-Stadiums in jeder Vegetationsperiode am gleichen Anbauort dieselbe ist, hingegen die Anzahl an Tagen bis zum Phänologie Stadium in Abhängigkeit zur Temperatur variiert. Deshalb wird T<sub>sum</sub> zur Berechnung der Phänologie Stadien verwendet und GDD statt Tag als Zeiteinheit (t) für die Pflanzen-Modellierung gewählt.

Nach (Steduto et al., 2009) wird die CC Entwicklung durch GDD in einen Wachstums- und einen Zerfallsabschnitt differenziert (Abbildung 1). Der Wachstumsabschnitt ist in den Zeitraum vor und nach der Hälfte der maximalen Pflanzen-Bodenbedeckung (CC<sub>max</sub> [-]) untergliedert

$$CC = \begin{cases} C = CC_0 e^{CGC*t}, & CC < CC_{max}/2 \\ CC_{max} - (CC_{max} - CC_0) * e^{-CGC*t}, & CC \ge CC_{max}/2 \end{cases}$$
(5)

worin in beiden Wachstums-Zeiträumen der Zuwachs an CC pro GDD durch die Bodenbedeckungs-Wachstumsrate CGC [GDD<sup>-1</sup>] ausgedrückt ist. Im ersten Wachstums-Zeitraum ist das exponentielle Wachstum unbegrenzt und beginnt mit der Pflanzen-Bodenbedeckung beim Austrieb (CC<sub>0</sub> [-]). Im zweiten Wachstums-Zeitraum ist das exponentielle Wachstum durch CC<sub>max</sub> begrenzt. CC zerfällt, wenn T<sub>sum</sub> für das Zerfall-Stadium erreicht wurde. Hier wird analog zu CGC der Zerfall an CC pro GDD durch die Bodenbedeckungs-Zerfallsrate (CDC [GDD<sup>-1</sup>]) ausgedrückt.

$$CC = CC_{max} * \left[ 1 - 0.05 \left( e^{\frac{CDC}{CC_{max}} * t} - 1 \right) \right]$$
(6)

 $Z_r$  [m] beschreibt in der Modellerweiterung die Tiefe des ersten Bodenspeichers in RoGeR, weshalb die Anfangs-Wurzeltiefe der Evaporationstiefe  $Z_e = 150$ mm entspricht.  $Z_r$ -Wachstum wird durch beschränktes exponentielles Wachstum in Abhängigkeit zur maximalen Wurzeltiefe  $Z_r$  max [m] beschrieben. Analog zum CC-Wachstum wird das  $Z_r$ -Wachstum pro GDD durch die Wurzel-Wachstumsrate (RGC [GDD<sup>-1</sup>]) ausgedrückt.

$$Z_r = Z_{r\,max} - (Z_{r\,max} - Z_{r\,0}) * e^{RGC * t}$$
(7)

Genannte Wachstumsraten zu CC und  $Z_r$  werden durch den Wasserstress-Koeffizient (K<sub>ws</sub>) auf die aktuelle Wachstumsrate (XXX<sub>a</sub>) reduziert, hingegen Zerfallsraten verstärkt werden:

$$CGC_a = K_{ws} * CGC \tag{8}$$

$$CDC_a = (1.5 - K_{ws}) * CDC \tag{9}$$

$$RGC_a = K_{ws} * RGC \tag{10}$$

Oberhalb des pflanzenspezifischen Bodenwassergahlts Grenzwerts ( $\theta_p$ ) ist kein Wasserstress vorhanden ( $K_{ws} = 1$ ). Unterhalb  $\theta_p$  wird der Wasserstress durch die lineare Abnahme  $K_{ws}$  ausgedrückt:

$$K_{ws} = \begin{cases} 1, \quad \theta > \theta_p \\ \frac{\theta - \theta_{pwp}}{\theta_p - \theta_{pwp}}, \quad \theta_{pwp} \le \theta \le \theta_p \end{cases}$$
(11)

 $\theta_p$  ist abhängig zur die Bodenfeuchte bei Feldkapazität ( $\theta_{fk})$  und  $\theta_{pwp}$ 

$$\theta_p = (1-p) * \left(\theta_{fk} - \theta_{pwp}\right) + \theta_{pwp} \tag{12}$$

wovon p der Anteil an der nutzbaren Feldkapazität (nFK) ist, der ohne Wasserstress von der Pflanze entzogen werden kann. Wird  $\theta_{pwp}$  erreicht, kommt das Wachstum zum Erliegen (K<sub>ws</sub> = 0).



Abbildung 1: Wachstumsverlauf der Bodenbedeckung (CC) von Saat bis Ernte nach Steduto et al. (2009).  $CC_0$  ist die Bodenbedeckung beim Austrieb und  $CC_{max}$  die maximale Bodenbedeckung. CGC ist die Bodenbedeckungs-Wachstumsrate [GDD<sup>-1</sup>] und CDC die Bodenbedeckungs-Zerfallsrate [GDD<sup>-1</sup>].

#### 2.2.2 Dual Kc Ansatz zur Berechnung der Evapotranspiration von Ackerfrüchten

Entlang der Pflanzenentwicklung wird über den Dual-K<sub>c</sub> Ansatz (Allen, Pereira, Smith, Raes, & Wright, 2005) die aktuelle Evapotranspiration (ET<sub>a</sub> [mm]) einer Ackerfrucht (ET<sub>c</sub> [mm]) ausgehend von der Referenzverdunstung (ET<sub>0</sub> [mm]) berechnet. ET<sub>0</sub> ist die ET einer Referenz-Ackerfrucht (e.g. Gras oder Alfalfa), zu deren standardisierten Anbauverfahren physikalische Parameter zur ET-Berechnung bekannt sind. Empfohlenes ET<sub>0</sub>-Berechnungsverfahren ist die nach (Allen et al., 1998) standardisierte physikalische Penman-Monteith Gleichung, die in der Praxis aufgrund von fehlenden meteorologischen Inputdaten auch in vereinfachten Varianten verwendet wird (Pereira et al., 2015; Sturzenegger, 2010). Über den empirischen Pflanzenkoeffizienten (K<sub>c</sub> [-]) wird ausgehend von ET<sub>0</sub> die ET<sub>c</sub>.

$$K_c = \frac{ET_c}{ET_0} \tag{13}$$

 $K_c$  wird im Dual- $K_c$  Ansatz unterteilt in den basalen Koeffizienten ( $K_{cb}$  [-]) und den Evaporation-Koeffizienten ( $K_e$  [-]), um zwei durch CC-Wachstum gesteuerte Prozess zu differenzieren.

$$K_c = K_{cb} + K_e \tag{14}$$

$$Tr = ET_0 * K_{cb} \tag{15}$$

$$E = ET_0 * K_e \tag{16}$$

Hiervon beschreibt  $K_{cb}$  die Zunahme der Transpiration (Tr [mm]) und  $K_e$  die Abnahme der Evaporation (E [mm]) nach Niederschlag oder Bewässerung durch CC-Wachstum

$$K_{cb} = K_{c \min} + K_d (K_{c \min} - K_{c \min})$$
<sup>(17)</sup>

$$K_e = K_{cb\ mid} - K_{cb} \tag{18}$$

wovon die empirischen Koeffizienten  $K_{c min}$  [-] und  $K_{c mid}$  [-] den Wertebereich von  $K_{cb}$  bei feuchtem Boden und bei (1) CC<sub>0</sub> und (2) CC<sub>max</sub> umfassen. Da  $K_{c mid}$  bei feuchtem Boden und CC<sub>max</sub> erhoben wird, entspricht er der physikalischen Obergrenze der ET<sub>c</sub>. Dabei beschreibt der Pflanzendichte-Koeffizient ( $K_d$  [-]) den Anstieg von  $K_{cb}$  durch CC-Wachstum. Hier wird  $K_d$  als CC angenommen (Allen & Pereira, 2009).  $K_{cb}$  und  $K_e$  werden an die aktuelle Bodenfeuchte durch  $K_{ws}$  (Formel 11) und  $K_r$ , dem Wasserstress-Koeffizient für die Evaporation nach Niederschlag oder Bewässerung, angepasst:

$$K_{cb\ a} = K_{ws} * K_{cb} \tag{19}$$

$$K_{e\ a} = K_r * K_e \tag{20}$$

E ist maximal nach Niederschlag oder Bewässerung ( $K_r = 1$ ) und kann bis zum nächsten Niederschlag oder Bewässerung maximal das Wasservolumen (TEW [mm]) dem Boden entziehen. Überschreitet die aktuelle Entleerung (D) das Wasservolumens (REW [mm]), das ohne Wasserstress evaporiert wird, sinkt  $K_r$  linear auf null.

$$K_r = min\left(\frac{1}{TEW - D}\right)$$
(21)

TEW bezieht sich auf die Evaporationstiefe  $Z_e$  und ist abhängig zu  $\theta_{fc}$ ,  $\theta_{pwp}$  und der monatlichen ET<sub>0</sub>. Z<sub>e</sub> schwankt zwischen groben und feinen Boden (100-150mm; Allen, 2011) und wird hier mit 150mm angenommen.

$$TEW = \left(\theta_{fk} - 0.5 * \theta_{pwp}\right) * z_e \left[ min\left(\sqrt{\frac{ET_0}{5}}, \frac{1}{1}\right) \right]$$
(22)

REW wird in Abhängigkeit zu der mittleren Bodenart von Sand (Sa [%]) und Ton (To [%]) berechnet und liegt zwischen 5 bis 12mm (Ritchie, Godwin, & Singh, 1989).

$$REW = \begin{cases} 20 - 0.15Sa & Sa > 80\\ 11 - 0.06Cl & To > 50\\ 8 + 0.08Cl & Sa > 80 \& To < 50 \end{cases}$$
(23)

RoGeR unterteilt in Niederschlag- und Nicht-Niederschlagszeiträume. Bei Beginn des Nicht-Niederschlags Zeitraum (t = t<sub>0</sub>) wird D durch E und Tr pro Zeitschrift (t) aufsummiert. Dabei wird T anteilmäßig von  $Z_e$  zu  $Z_r$  einbezogen, weil eine gleichmäßige Transpiration im Wurzelbodenspeicher angenommen wird.

$$D(t) = \sum_{t=t_0}^{t} E + Tr * \frac{Z_e}{Z_r}$$
(24)

Abschließend wird ET<sub>a</sub> über die erläuterten Pflanzen-Koeffizienten berechnet

$$ET_c = ET_0 * (K_{cb} * K_{ws} + K_e * K_r)$$
<sup>(25)</sup>

wozu Abbildung 2 die Dynamik der Pflanzen-Koeffizienten und somit der  $ET_c$  zusammenfasst.  $K_{cb}$  folgt dem CC-Wachstum, der durch Wasserstress reduziert werden kann. Während dem CC Wachstum entstehen nach Niederschlag und Bewässerung kurze Hochpunkte durch  $K_e$ , die die maximale  $ET_a$  auch in der jungen Pflanzenentwicklung erreichen können.



Abbildung 2: Generalisierte Kurve der Pflanzen Koeffizienten während der Vegetationsperiode (nach Allen et al., 2005). K<sub>cb</sub> ist der basale Koeffizient, der dem Bodenbedeckungswachstum folgt und durch den Wasserstressfaktor K<sub>ws</sub> (in Abbildung als K<sub>s</sub> genannt) reduziert wird. K<sub>e</sub> ist der Evaporations-Koeffizient, der nach Niederschlag oder Bewässerung kurzzeitige Hochpunkte abbildet. K<sub>cm</sub> ist der mittlere Pflanzenkoeffizient, der im Mittel den Einfluss von Bodenbedeckungswachstum, Wasserstress und Niederschlag oder Bewässerung beschreibt.

#### 2.3 Parametrisierung der Ackerfrüchte

Die Modellerweiterung umfasst Parameter aus den Kategorien Phänologie, Pflanzenwachstum und Verdunstung (Tabelle 1), die individuell an die Ackerfrüchte angepasst wurden. Ausgangspunkt der Parametrisierung ist der Abschlussbericht "Generierung von einheitlichen Datengrundlagen für die hydraulische Modellierung von Starkregenereignissen" (Steinbrich et al., 2020b), der einerseits eine Selektion von in Baden-Württemberg (BW) vorkommenden Ackerfrüchten und andererseits Referenz-Jahrestag zu den Phänologie Stadien Saat, maximale Entwicklung und Ernte wie auch zu CC<sub>max</sub>

beinhaltet. Diese Phänologie-Datenbank wurde in drei Schritten bearbeitet und kategorisiert. Erstens Zusammenfassung der 145 Langnamen in 55 Kategorien und Unterscheidung bei Getreidearten und Zwischenfrüchte in Sommer- und Winterkulturen. Zweitens Gegenprüfung der Phänologischen Stadien von Frau Finck (LTZ), mit der phänologischen Jahresstatistik des DWD (Deutscher Wetter Dienst (DWD), 2020), mit einem Praxishandbuch-Landwirtschaft (Die Landwirtschaft, 2006) und weiteren Internetseiten und Prüfungskennzeichnung durch einen Recherche-Flag (Anhang-Tabelle 4). Einzelne Änderungen an der Phänologie-Datenbank (Steinbrich et al., 2020b) sind in Anhang-Tabelle 2 gelistet. Drittens Hinzufügung relevanter Kategorien (e.g. Rote Bete) für die weitere Modellierung.

Kategorie	Parameter	Einheit	Beschreibung
	T <sub>base</sub>	°C	Basis Temperatur: Beginn des täglichen
			Pflanzenwachstums
Phänologie	T <sub>ut</sub>	°C	Oberer Temperaturgrenzwert: Ende des täglichen
			Pflanzenwachstums.
	T <sub>sum</sub>	°C	Temperatursumme der Phänologie Stadien
	CGC	GDD <sup>-1</sup>	Pflanzenbodenbedeckungs-Wachstumsrate
	CDC	GDD <sup>-1</sup>	Pflanzenbodenbedeckungs-Zerfallsrate
Dflonzonwoohotum	CRC	GDD <sup>-1</sup>	Wurzeltiefe-Wachstumsrate
Phanzenwachstum	$CC_0$	-	Pflanzenbodenbedeckung beim Austrieb
	CC <sub>max</sub>	-	Maximale Pflanzenbodenbedeckung
	Z <sub>r max</sub>	mm	Maximale Wurzeltiefe
	K <sub>c mid</sub>	-	Pflanzenkoeffizient bei feuchtem Boden und
			maximaler Pflanzenbodenbedeckung
	K <sub>c min</sub>	-	Pflanzenkoeffizient bei feuchtem Boden und geringer
Verdunstung			Pflanzenbodenbedeckung
	р	-	Anteil an der nutzbaren Feldkapazität, der ohne
			Wasserstress von der Pflanze entzogen wird
	Ze	mm	Evaporationstiefe

Tabelle 1: I	Parameter a	ler Modelle	erweiterung
--------------	-------------	-------------	-------------

Ausgehend vom Referenz-Jahrestag wurde  $T_{sum}$  zu den Phänologie Stadien Saat, maximale Entwicklung und Ernte nach Formel 1-4 für jede Ackerkultur berechnet.  $T_{base}$  und  $T_{ut}$  entstammen aus einer Literaturrecherche zu 27 Ackerfrüchten (Anhang-Tabelle 3). Für Ackerfrüchte ohne Literaturwerte werden für C4-Pflanzen ( $T_{base} = 10^{\circ}$ C) und C3-Pflanzen ( $T_{base} = 0^{\circ}$ C) und  $T_{ut} = 30^{\circ}$ C angenommen. Temperaturdaten zur Berechnung von  $T_{sum}$  entstammen aus (1) der Klimareferenzperiode (1990-2020) und (2) drei Klimastationen aus der Hauptanbauregion BW (Tabelle 2). Der Mittelwert von  $T_{sum}$  wird als Referenz-Temperatursumme ( $T_{sum ref}$  [°C]) dem Referenz-Jahrestag zugeordnet. Das Austrieb-Stadium bezieht sich auf Literaturwerte zu 22 Ackerfrüchte. Für Ackerfrüchte mit fehlenden Literaturwert wird der Median aus den 22 Ackerfrüchten (120 GDD nach Aussaat) angenommen. Das Zerfalls-Stadium vor der Ernte wird für alle Ackerkulturen 5% niedriger als die Temperatursumme der Ernte bzw. 15 Tage vor der Ernte angenommen.

Tabelle 2: DWD-Klimastationen, die zur Parametrisierung der Referenz Temperatursummen ( $T_{sum ref}$ ) verwendet wurden.

Ort	DWD-ID	Hochwert	Rechtswert	Höhe über Normal Null
Rheinau-	4169	48.67	7.994	131
Memprechtshofen				
Mannheim	5906	49.5062	8.5585	98
Emmendingen-	1224	48.138	7.835	201
Mundingen				

 $CC_{max}$  entstammt aus der überarbeiteten Phänologie-Datenbank (Steinbrich et al., 2020b) und  $CC_0$  wurde anhand von Foord Agrcultural Organization (FAO) (2012) und Die Landwirtschaft (2006) für die in Anhang-Tabelle 5 gelisteten Ackerfrüchte abgeschätzt und auf Ackerfrüchte mit ähnlichen Aussaatverfahren extrapoliert. Aus der Literaturrecherche zu  $Z_{r max}$  von 42 Ackerfrüchten wird der Median der Literaturwerte der jeweiligen Ackerfrucht zugeordnet (Abbildung 3). Die Anpassung des exponentiellen Wachstummodells an die berechnete  $T_{sum ref}$  ergibt die Wachstumsraten des Pflanzenwachstums (CGC und RGC) zwischen Austrieb und maximaler Entwicklung. Dazu Umstellung der Formel 5 nach CGC (CC =  $CC_{max}/2$ ) und Formel 7 nach RGC ( $Z_r = Z_rmax$ ). Angelehnt an FAO (2012) wird CDC für Sommerkulturen 0.002 GDD<sup>-1</sup> geringer als für Winterkulturen 0.005 GDD<sup>-1</sup> angenommen.



Abbildung 3: Literaturwerte zur maximalen Wurzeltiefe ( $Z_{r max}$ ). Quellenverweise sind in Anhang-Tabelle 6 einzusehen. Die schwarze Horizontale ist ein typischer Mittelwert für Ackerland, der in Oberflächen Modellen Verwendung findet (Gayler et al., 2014).

Die Verdunstungs-Parameter  $K_{c mid}$  und p für CC-Wachstum entstammen aus der FAO-Datenbank (Allen et al., 1998). Für Z<sub>r</sub>-Wachstum ist angenommen, dass es im Vergleich zu CC-Wachstum robuster gegenüber Wasserstress ist (p = 0.75; Wang, 1997). Nach (Allen & Pereira, 2009) werden  $K_{c min} = 0.15$  und  $Z_e = 150$ mm angenommen, die der Evaporation auf lehmigen Boden entspricht.

#### 2.4 Material aus der Forschungsanstalt Agroscope Reckenholz-Zürich

Die Datengrundlage der Modellevaluierung entstammt aus der Lysimeter Anlage der landwirtschaftlichen Forschungsanstalt Agroscope Reckenholz-Tänikon ART in Zürich, die im März 2009 mit 72 Lysimetern, davon 12 wägbare Lysimeter, in Betrieb genommen wurde. Technisch werden

die Lysimeter mit einer 1m<sup>2</sup> Kreisoberfläche und 1.5m Lysimeter Tiefe beschrieben. Die Lysimeter Tiefe setzt sich aus einem Bodenmonolith (1.35m) und einer darunterliegenden freien Drainage (0.15m) aus grobkörnigem Substrat zusammen. Das Versuchsdesign umfasst unterschiedliche Fruchtfolgen, Böden, Bodenbearbeitungs- und Düngeanwendungen, um die Effektivität von landwirtschaftlichen Maßnahmen zur Minderung der Nitratauswaschung zu untersuchen (Prasuhn et al., 2016).

Der Masterarbeit wurden Messdaten zu Lysimetermasse (M [g]), Sickerwasserrate ( $Q_s$  [mm t<sup>-1</sup>]) und volumetrischer Bodenfeuchte (0 [m<sup>3</sup>m<sup>-3</sup>]) in 10-minütigerAuflösung von sechs wägbaren Lysimetern für den Zeitraum 2010-2017 zur Verfügung gestellt, deren Messmethodik in Tabelle 3 zusammengefasst und in der Masterarbeit (Sturzenegger, 2010) detailliert beschrieben ist. Die Genauigkeit von M beträgt 10g und entspricht bei einer 1m<sup>2</sup> Lysimeteroberfläche und einer angenommenen Wasserdichter von 1000g/l einem Wasserhöhenfehler von 0.01mm (=l/m<sup>2</sup>). Gestört wird M durch menschlich Eingriffe wie Bodenbearbeitung-, Management- und Düngungsmaßnahmen, die für die Lysimeter in einem Kalender übergeben wurde (Anhang-Tabelle 7).  $\theta$  wurde in 10, 30, 60 und 90cm Bodentiefe jeweils von zwei FDR-Sonden gemessen, die bei nur genereller Kalibrierung eine Messgenauigkeit von 0.05 m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup> (=5%) aufweisen (Delta-T Devices, 1999). Diese 2 FDR-Sonden zeigten wegen der heterogenen Matrixbeschaffenheit teilweise einen Unterschied in den Messwerten derselben Bodentiefe, der größer sein konnte als die Messungenauigkeit (Meurer, 2012; Sturzenegger, 2010). Der Mittelwert der 2 FDR-Sonden wird für die Evaluierung verwendet. Qs wird über die Steigung der kumulierten 100ml Kippwagen Messung berechnet, dessen Funktionstüchtigkeit bis zu einer Sickerwasserrate von 51/min gewährleistet ist. Qs-Messungenauigkeiten können durch die Verunreinigung der Waage wie auch durch falsch detektierte Kippwagen während hoher Sickerwassermenge eintreten. Diese Messungenauigkeiten wurden in einem internen Eichverfahren für korrigierte Sickerwassermengen berücksichtigt, die für Lysimeter 3 und 9 in täglicher Auflösung nachträglich von Volker Prasuhn zur Verfügung gestellt wurden. Im Durchscnitt sind die unkorrigierten gegenüber den korrigierten Q<sub>s</sub> Tageswerten -0.35 mm/tag kleiner, wobei die minimale und maximale Differenz -1mm/tag und 78mm/tag beträgt. In aggregierten Jahresewerten schwankt die prozentuale Abweichung zwischen ±6%, hiervon Lysimeter 3 im Jahre 2014 mit einer um 16.4% erhöhte korrigierten Q<sub>s</sub> ausgenommen ist.

Messung	Abkürzung	Methodik	Hersteller	Einheit	Genauig-
					Kelt
Lysimeter	Μ	Scherstab Wägezellen	UGT,	gramm	10g =
Gewicht		mit UGT WM 100	Münchberg,		0.01mm
			Deutschland		
Sickerwasser-	$Q_s$	Kippwage (100ml)	unbekannt	mm t <sup>-1</sup>	ca. 6%
rate					
Volumetrische	θ	Frequenzbereichs-	Delta-T	$m^3m^{-3}$	0.05 m <sup>3</sup> m <sup>-3</sup>
Bodenfeuchte		reflektrometrie (FDR)	Devices,		
		mit ThetaProbe ML2x	Burwell,		
			Vereinigtes		
			Königreich		

Tabelle 3: Messmethodik der Messdaten zu Lysimetergewicht, Sickerwasser und volumetrischer Bodenfeuchte (Prasuhn et al., 2009, 2016; Sturzenegger, 2010).

Alle sechs Lysimeter beinhalten Bodenmonolithe aus demselben Ursprungsort "Grafenried". In 10, 35, 60 und 105cm Bodentiefe wurden mehrere Stechzylinder Proben entnommen und im Labor analysiert. Die mittleren Bodenkennwerte der Stechzylinder Proben pro Bodentiefe wurden der Masterarbeit übergeben (Anhang-Tabelle 8). Davon ist die Korngrößenverteilung inklusive Lagerungsdichte (LD) in Tabelle 4 und die pF-Kurve inklusive gesättigter Leitfähigkeit (K<sub>s</sub>) in Tabelle 5 zusammengefasst.

Die freie Drainage besteht aus drei Sand und Kies Schichten (0.10-0.50mm; 0.71-1.25mm; 3.15-5.6mm), zu denen keine Bodenkennwerte ermittelt wurden.

Tabelle 4: Die mittlere Körnungsverteilung und Lagerungsdichte aus der Laborauswertung von den Stechzylinderproben aus dem Bodenherkunftsort Grafenried. Summen ergeben nicht 100%, weil die Korngrößenanteile Mittelwerte aus mehreren Stechzylinder-Proben sind.

Tiefe	Proben	Lagerungsdichte	(LD)	Ton	Schluff	Sand	Bodenart
[cm]	Anzahl	[g/cm <sup>3</sup> ]		[%]	[%]	[%]	
10	13	1.46		16.0	31.6	50.4	S14
35	3	1.58		20.1	26.4	53.1	Ls4
60	4	1.55		18.0	23.6	58.2	Ls4
105	2	1.62		15.6	27.2	57.1	S14
Mittelwert	-	1.55		17.4	27.2	54.7	Ls4

Tabelle 5: Die pF Kurve und gesättigte Leitfähigkeit aus der Laborauswertung von den Stechzylinderproben aus dem Bodenherkunftsort Grafenried.

Tiefe [cm]	K <sub>s</sub> [mm/h]	Gesamt Poren [Vol%]	pF < 1.5 [Vol%]	pF 1.5-1.8 [Vol%]	pF 1.8 -2 [Vol-%]	pF 2.0 – 3 [Vol-%]	pF 3.0 – 4.2 [Vol-%]	pF > 4.2 [Vol-%]
10	4.23	44.4	9.6	2	1.3	2.4	11.6	17.5
35	1.34	40.6	9.2	1.4	1.1	2.1	7.7	19.1
60	0.88	42.2	9.5	1.6	1.2	2.3	8.2	19.4
105	0.22	39.9	7.8	1.4	1.0	2.9	8.1	18.8
Mittel-	1.67	41.8	9.02	1.6	1.6	2.4	8.9	18.7
wert								

Die Lysimeter wurden unterschiedliche bewirtschaftet. Die Bepflanzung (Abbildung 4) von Lysimeter 2, 3 und 8 ist hauptsächlich durch Winterkulturen und von Lysimeter 4 und 9 durch Sommerkulturen geprägt. Lysimeter 1 wird nach der standardisierten Bewirtschaftung der FAO Gras-Referenzverdunstung (ET<sub>0</sub>) bewirtschaftet (Allen et al., 1998). Lysimeter 2, 3 und 8 unterscheiden sich in der Düngemenge und Lysimeter 4 und 9 in der Art der Düngung (Tabelle 6).

Tabelle 6: Bewirtschaftung der Lysimeter 1, 2, 3, 4, 8 und 9 nach Oberholzer et al. (2017)

Lysimeter	Behandlung
1	Standardisierter Gras Anbau nach FAO 56 (Allen et al, 1998)
2	130% der offiziell empfohlenen Düngemenge (mineralische Düngung)
3	100%
4	70%
8	Intensive organische Düngung
9	Intensive organische und mineralische Misch-Düngung



Abbildung 4: Fruchtfolgen auf Lysimeter 1, 2, 3, 4, 8 und 9. Tabellarische Zusammenfassung von Start und Ende der Vegetationsperioden in Anhang-Tabelle 9. Ackerfrüchte: SM = Silagemais, ZR = Zuckerrübe, RB = Rote Bete, Gr = Gras, WW = Winterweizen, WG = Wintergerste, WT = Wintertriticale, WR = Winterraps, WP = Winterphacelia, WZ = Winterzwischenfrucht; B = Brache.

Meteorologische Daten in 10min Auflösung entstammen aus der 20m entfernten amtlichen Klimastation von Meteo-Schweiz. Hiervon sind die verwendeten meteorologischen Variablen in Tabelle 7 zusammengefasst. In der Evaluierung mehrerer ET-Berechnung Methoden wurde in Sturzenegger (2010) festgestellt, dass bei diesen gegeben meteorologischen Daten die nach Makkink vereinfachte FAO Penman-Monteith Gleichung die beste ET Abschätzung erbrachte. Die potenzielle Evapotranspiration ( $ET_p$ ) nach Makkink war in 10min Auflösung Bestandteil der Datenübergabe.

$$ET_p = \frac{\Delta d}{\Delta d + \gamma} * \left(c_1 * \frac{R_s}{L}\right) + c_2$$
(26)

Hiervon ist  $\Delta d$  [kPa °C<sup>-1</sup>] die Steigung der Sättigungs-Dampfdruckkurve, die bei gegebenem mittleren Stundenwert der Lufttemperatur (T [°C]) nach Formel 27 berechnet wird; R<sub>s</sub> [MJ m<sup>-2</sup> day<sup>-1</sup>] die gemessene Globalstrahlung; L [MJ m<sup>-2</sup> mm<sup>-1</sup>] die spezifische Evaporationswärme zur Umrechnung der Strahlung in ET Äquivalente in Abhängigkeit zu T nach Formel 28;  $\gamma$  [kPa °C<sup>-1</sup>] die psychometrische Konstante in Abhängigkeit zum atmosphärischen Luftdruck (P [kPa]) nach Formel 29 und c<sub>1</sub> [-] und c<sub>2</sub> [mm d<sup>-1</sup>] zwei empirische Makkink Koeffizienten, deren Standard Wert mit c<sub>1</sub> = 0.62 und c<sub>2</sub> = -0.12 mm day<sup>-1</sup> festgelegt sind.

$$\Delta d = \frac{4098 * \left[ 0.6108 * exp\left(\frac{17.27 * T}{T + 237.3}\right) \right]}{(T + 237.3)^2}$$
(27)

$$L(T) = 0.0864 * (28.4 - 0.028 * T)$$
<sup>(28)</sup>

$$\gamma = 0.665 * 10^{-3} * P \tag{29}$$

Tabelle 7: Meteorologische Daten in 10min Auflösung von der 20m entfernten Klimastation (Inhaber: Meteo-Schweiz).

Variable	Abkürzung	Einheit
Lufttemperatur 2m über Boden	Т	°C
Niederschlag	Ν	mm
Globalstrahlung	Rs	$W/m^2$
Atmosphärischer Luftdruck (Monatswert)	Р	kPa

## 2.5 Daten Aufbereitung und Herleitung Hydrologischer Variablen aus Lysimetermasse

Datenaufbereitung und statistische Auswertung basiert auf der Statistik-Programmiersprache R (R Core Team, 2020), wozu im Weiteren die verwendeten Erweiterungs-Pakete genannt werden. Entsprechend zu Oberholzer et al. (2017) wurde M in drei Schritten aufbereitet. Im ersten Schritt Entfernung aller M Daten während einer Bodenbearbeitung. Zweitens Ausreißer-Entfernung aller Datenpunkte 30min vor und nach einer Lysimeter-Gewichtsänderungen ( $\Delta$ M) höher 20kg/10min oder geringer -5kg/10min. Drittens lineare Interpolation zwischen allen Datenlücken kleiner drei Stunden unter Verwendung des R-Package "zoo". Der dritte Schritt wurde auch für Q<sub>s</sub> und  $\theta$  durchgeführt.

M beschreibt das integrierte Signal der Bodenwasserdynamik, wenn M und der  $\theta$ -Mittelwert aus 10, 30, 60 und 90cm Bodentiefe miteinander korrelieren. Die Korrelation wird mit dem nichtparametrischen Korrelationskoeffizient nach Kendall ( $\tau$ ) berechnet, bei dem ein doppelt so hoher  $\tau$  auch einer doppelt so hohen Korrelation entspricht (Legendre & Legendre, 2013). Da bei allen Lysimetern eine hohe Korrelation zwischen M und dem  $\theta$ -Mittelwert aus 10, 30, 60 und 90cm Bodentiefe besteht (Mittelwert:  $\tau = 0.74$ ), wird im Weiteren aus M der Bodenspeicher (S [mm]), die Bodenspeicheränderung ( $\Delta$ S [mm $\Delta$ t<sup>-1</sup>]), die Bodenfeuchte ( $\theta_{M}$  [-]), die aktueller Evapotranspiration (ET<sub>a</sub> [mm]) und der Niederschlang (N [mm]) hergeleitet.

M beschreibt das integrierte Signal der Bodenwasserdynamik ( $\Delta M=\Delta S$ ), weshalb S über einen Offset zu M berechnet werden kann. S bezieht sich auf den Wassergehalt im Bodenmonolith (0-1350mm) und M auf den ganzen Lysimeter (0-1500mm), wodurch auch S der Kiesschicht (1350-1500mm) in M einbezogen ist. Der Offset zwischen S und M wurde mit Formel 30 im Zeitraum bei Feldkapazität ( $\theta \approx \theta_{fk}$ ) und geringer M Schwankungen (-1000g tag<sup>-1</sup> <  $\Delta M$  > 1000 g tag<sup>-1</sup>) abgeschätzt, weil der Haftwassergehalt der sortiertem Kiesschicht bei Feldkapazität mit ca. 5% Porenanteil (Hölting & Coldewey, 2013) bei 15cm Kiesschichtmächtigkeit einem vernachlässigbaren Wassergehalt von 7.5mm darstellt.

$$Offset = M - \theta * Z_{\text{Bodenmonolith}}$$
(30)

Hiervon entspricht  $\theta$  dem Mittelwert der FDR-Messungen aus 10, 30, 60 und 90cm Bodentiefe und Z<sub>Bodenmonolith</sub> der Mächtigkeit des Bodenmonoliths (Z<sub>Bodenmonolith</sub> = 1350mm). Weiterführend wurde die aus M hergeleitete Bodenfeuchte ( $\theta_M$ ) aus der Division von S und Z<sub>Bodenmonolith</sub> berechnet.

$$\theta_M = \frac{S}{Z_{\text{Bodenmonolith}}} \tag{31}$$

 $ET_a$  und Lysimeterniederschlag werden über den Masssenfluss im Lysimetersystem hergeleitet (Peters et al., 2014). Die totale Masse des Lysimeter Systems ( $M_{tot}$ ) wird über M und der Summe der Massenflüsse rein und aus dem Lysimeter ( $M_{out}$ ) beschrieben.

$$M_{tot} = M + M_{out} \tag{32}$$

Der Lysimeter ist zu den Seiten begrenzt, weshalb der Massenfluss nur über die untere Randbedingung (i.e.  $Q_s$ ) und die obere Randbedingung erfolgt. Der kumulative Massenfluss der oberen Randbedingung ( $M_{up}$ ) wird berechnet nach

$$M_{up} = (M + Q_s) - M_{tot; t_0}$$
(33)

wovon Mtot; to der Masse des Lysimeter Systems am Anfang der Datenaufzeichnung entspricht. Wegen der genauen Messung und hohen zeitlichen Auflösung von M, kann die positive  $\Delta M_{up}$  als N und die negative  $\Delta M_{up}$  als ET<sub>a</sub> interpretiert werden. Wegen Wind und starken Regen ist ein meteorologischer Einfluss auf die genaue M-Messung anzunehmen. Deshalb wurde  $M_{up}$  mit dem AWAT-Filter aus Peters et al (2014) geglättet, der für 1-minütige Lysimeterdaten entwickelt wurde. Programmiert wurde der AWAT- Filter von Robin Schwemmle in Python (Anhang-Tabelle 10). Der AWAT-Filter besteht aus einem gleitenden Mittelwert und einem Grenzwert Filter, die in Abhängigkeit zur Signalstärke angepasst werden, um Zeiträume mit hoher Signalstärke (Sturm) und geringer Signalstärke (Schönwetter) differenziert zu filtern. Dazu müssen zwei Parameter festgelegt werden. Erstens die maximale Ausdehnung des Bearbeitungsfenster (wmax), in dem in Abhängigkeit zur statistisch berechnete Signalstärke das gleitende Mittel angewendet wird. Zweitens der maximale Rausch-Grenzwert ( $\phi_{max}$ ), der nicht-signifikante von signifikanten Gewichtsänderungen unterscheidet. Die minimale Ausdehnung des Bearbeitungsfenster ( $\omega_{min}$ ) ist durch die zeitliche Auflösung (10min) vorgegeben und der minimale Rausch-Grenzwert wird mit 0.08mm nach Oberholzer et al. (2017) etwas höher als die M-Messgenauigkeit angenommen. Neben den meteorologischen Einfluss ist das Datenrauschen auch abhängig von der aktuellen Ackerfrucht. Eine große Ackerfrucht wie Mais verursacht mehr Rauschen als eine kleine Zuckerrübe. Deshalb werden die Parametereinstellungen für  $\omega_{max}$  und  $\phi_{max}$  aus Oberholzer et al. (2017) entnommen, die für Ackerfrüchte und mit 5-minütiger M-Auflösung die AWAT-Filter Parameter spezifische für Ackerfrüchte kalibriert haben (Tabelle 8). Abschließend werden entsprechend zu Oberholzer et al. (2017) Ausreißer in den aggregierten Tageswerten der ET<sub>a</sub> manuell entfernt. In der Datenaufbereitung werden ET<sub>a</sub> und N mit den Ergebnissen aus Oberholzer et al. (2017) plausibilisiert, die den erweiterten Datensatz der Lysimeteranlage Reckenholz-Zürich für 2009-2015 auswerteten.

Tabelle 8: Parametereinstellungen für den AWAT-Filter zur Berechnung von N und ET<sub>a</sub>. Ausnahmen wegen stürmischen Vegetationsperioden vorhanden.

Ackerfrucht	Wmax	ф <sub>max</sub>	Bermerkung
Silage Mais	31	0.4	Ausnahme: 2012: $\omega_{max} = 120$ , $\phi_{max} = 0.8$
Winter Weizen	20	0.24	
Winter Gerste	20	0.24	
Zuckerrübe	20	0.15	Ausnahme: 2011: $\omega_{max} = 31$ , $\phi_{max} = 0.24$
Winter Raps	15	0.15	
Gründüngung	15	0.15	Auch angenommen für Winter Phacelia und Gras

#### 2.6 Boden Parametrisierung

Für die Modellierung mit RoGeR werden über die gesamte Bodentiefe (i.e. 1.35m) gemittelten Kennwerte zu  $\theta_{lk}$ ,  $\theta_{nfk}$ ,  $\theta_{pwp}$  und K<sub>s</sub> benötigt (Tabelle 9). Im Labor erfolgt  $\theta$ -Messung bei angelegter Bodenwasserspannung, die im dekadischen Logarithmus des Betrags der Bodenwasserspannung (pF [hPa]) angegeben sind. Dabei entspricht das gesättigte Porenvolumen bei < 1.8pF der LK, n bei 1.8-4.2pF der nFK und bei >4.2pf dem PWP, die aus Tabelle 5 entnommen sind. Die benötigte Wasserleitfähigkeit (Kf) der unterliegenden freien Drainage wird mit 2500 mm/h angenommen, das nach Hölting & Coldewey (2013) dem Wertebereich von sandigem Kies entspricht. Ergänzend zu den durch die pF-Kurve ermittelten Bodenkennwerte werden anhand der mittleren Bodenart und Lagerungsdicht (LD) mit Tabellen (1) aus einem Handbuch zu Bodenphysikalischen Kennwerten und Berechnungsverfahren für die Praxis (Wessolek et al., 2009) und (2) aus einem Excel Dokument mit Pedotransferfunktionen (Anhang-Tabelle 11) von Heike Puhlmann (Forstliche Versuchs- und Forschungsanstalt Baden-Württemberg) Bodenkennwerte abgeschätzt und in Tabelle 9 zum Vergleich dargestellt. Nach (Wessolek et al., 2009) wird die im Labor ermittelte LD der Kategorie LD2 (1.33-1.55 g/cm<sup>3</sup>) zugeordnet, in der die Trockenraumdichte für die im Labor festgestellte Bodenart (Ls4-Sl4) bei 1.25-1.35 g/cm<sup>3</sup> liegt. Ausgehend davon wird in der Spalte für Trockenrohdichte = 1.3 g/cm<sup>3</sup> und gegebener Bodenart (Ls4, Sl4) die Bodenkennwert LK, FK und NFK aus der Tabelle entnommen. Heike Puhlmann verwendet für die Bodenart Ls4 und Sl4 dieselbe Pedotransferfunktion, die mit dem Ton-, Schluff- und Sandanteil und LD die Bodenkennwerte berechnet. Der Vergleich mit den abgeschätzten Bodenkennwerten zeigt, dass mit gegebener Bodenart und LD eine höhere  $\theta_{nfk}$  und geringerer  $\theta_{pwp}$  möglich ist (Tabelle 9). Weitere Bodenparameter sind die Dichte und Tiefe der vertikalen Makroporen (MP), die aus (Steinbrich et al., 2016) entnommen sind (i.e. 75 MP/m<sup>2</sup> und 300mm MP-Länge). Als Initialwerte für die Bodenfeuchte im Ober- und Unterbodenspeicher wird  $\theta_{M}$ am Anfang der Datenaufzeichnung gewählt und für die Wurzeltiefe mit 600mm angenommen.

Bodenkennwert	Stechzylinder	Rote Heft	Rote Heft	Pedotransferfunktion					
	Proben mit	Reihe Sl4	Reihe Ls4	Heike Puhlmann					
	Laboranalyse								
$\theta_{lk}$ [-]	0.11	0.08	0.08	0.08					
θ <sub>fk</sub> [-]	0.32	0.33	0.33	0.34					
$\theta_{nfk}$ [-]	0.13	0.20	0.18	0.19					
$\theta_{\text{pwp}}$ [-]	0.19	0.13	0.15	0.15					
K <sub>s</sub> [mm/h]	1.7			1.6					
K <sub>f</sub> [mm/h]	2500								

Tabelle 9: Bodenkennwerte für die RoGeR-Modellierung

#### 2.7 Modellevaluierung und Modellvergleich

Die im Labor ermittelten Bodenkennwerte unterscheiden sich zu den über die Bodenart abgeschätzten Bodenkennwerte (Tabelle 9). Deshalb wurden Modelldurchläufe mit drei Bodenparameter Einstellungen ( $\theta_{pwp}$ =0.19 &  $\theta_{nfk}$ =0.13;  $\theta_{pwp}$ =0.15 &  $\theta_{nfk}$ =0.17;  $\theta_{pwp}$ =0.15 &  $\theta_{nfk}$ =0.19) evaluiert. Entsprechend zu Andreas Steinbrich et al. (2020a) wurde die Parametereinstellung für die Modellevaluierung und Modellvergleich gewählt, die die Unterschreitungswahrscheinlichkeit der Bodenfeuchte am besten abbildet.

Im Vorfeld der Evaluierung der hydrologischen Variablen und Prozesse wird das der Modellerweiterung zugrundliegende Pflanzen-Modell evaluiert. Es liegt kein Datensatz zu Bodenbedeckung oder Wurzeltiefe vor, weshalb nur näherungsweise die Pflanzenentwicklung in drei Schritten evaluiert wurde. Im ersten Schritt wurden  $T_{sum}$  mit dem Referenz-Jahrestagen der Phänologie Stadien Saat, maximale Entwicklung und Ernte berechnet (siehe Kapitel Parametrisierung) und

darauffolgend der Jahrestag der Phänologischen Stadien mit Tsum ref zurückgerechnet, um die Variabilität durch intrajährliche Temperaturschwankungen allgemein zu beschreiben. Im zweiten Schritt wurden der Jahrestag der Phänologie-Stadien Saat und Ernte mit T<sub>sum ref</sub> für den Temperaturdatensetz der vorliegenden Lysimeteranlage berechnet und über die Differenz zu dem beobachteten Jahrestag der Phänologie-Stadien eingeordnet. Die modellierte Wurzeltiefe-Entwicklung wird im dritten Schritt näherungsweise über die Entwicklung des monatlichen Bodenfeuchtedefizits in 10, 30, 60 und 90cm evaluiert. Dazu wurde als Nullhypothese angenommen, dass die Wurzelentwicklung der von oben nach unten sinkenden Bodenfeuchte vorrausgeht. Die Evaluierung beschränkt sich auf Ackerfrüchte, die für die Modellierung der vorliegenden Lysimeteranlage parametrisiert wurden (Abbildung 4 oben und Tabelle 11 unten). Es sind drei Winterzwischenfrucht Kategorien vorhanden, weil Winterzwischenfrucht abhängig zum Erntezeitpunkt der Vorkultur im August, September und Oktober gesät wird.

Die hydrologischen Modellierungsergebnisse wurden nach festgelegten Kriterien evaluiert. Wie gut das Modell die festgelegten Kriterien erfüllt bzw. nicht erfüllt, quantifiziert die Modellgüte. Im Vergleich zwischen Modellvarianten und Modellparametrisierungen wird das Vergleichsobjekt mit der höchsten Modelgüte ausgewählt. Ein weitverbreitetes Verfahren zur Berechnung der Modellgüte ist der Kling-Gupta Effizienzkoeffizient (KGE), der das gewählte Modell mit dem Mittelwert der beobachteten Daten vergleicht (Gupta et al., 2009). KGE ist dimensionslos und liegt in der Reichweite (-inf bis 1]. Je näher KGE an dem Wert 1 liegt, desto akkurater beschreiben die simulierten (sim) die observierten (obs) Daten hinsichtlich der zeitlichen Dynamik (r), dem Bias ( $\beta$ , Verhältnis der Mittelwerte ( $\mu$ )) und der Variabilität ( $\alpha$ , Verhältnis der Standardabweichung ( $\sigma$ )). Der Wert 1 wird erreicht, wenn r = 1,  $\beta$  = 0 und  $\alpha$  = 1 und somit die Eucliden Distanz (ED) gleich 0 ist. Liegt der KGE über 0, ist das Modell besser als der Mittelwert der beobachteten Daten.

$$\alpha = \sigma_{sim} / \sigma_{obs} \tag{34}$$

$$\beta = \mu_{sim}/\mu_{obs} \tag{35}$$

$$KGE = 1 - ED \tag{36}$$

$$ED = \sqrt{(r-1)^2 + (\alpha - 1)^2 + (\beta - 1)^2}$$
(37)

Im Modellvergleich werden drei Varianten der Modellerweiterung untereinander und mit den Standard Landnutzungstypen zu Grass und Ackerland verglichen, weil hydrologische Modelle ursprünglich Ackerland vereinfachten oder nur Grass- und Wald berücksichtigten (siehe Einleitung). In zwei Varianten der Modellerweiterung wird die dynamische Entwicklung der Phänologie mit festgelegten Jahrestagen zu Saat und Ernte eingegrenzt, hingegen in der dritten Variante alle Phänologie Stadien über T<sub>sum</sub> berechnet werden. In den zwei Varianten mit festgelegten Jahrestagen zu Saat und Ernte wird mit und ohne Wasserstress und in der dritten Varianten ohne festgelegte Jahrestage mit Wasserstress modelliert. Die Varianten der Modellerweiterung sind in Tabelle 10 gelistet und ermöglichen die Evaluierung von (1) eingeschränkter vs. vollkommener Phänologischen Dynamik und (2) den Einfluss von Wasserstress.

Für die Modellevaluierung und den Modellvergleich werden nur vollständige Tageswerte bestehend aus den hydrologischen Variablen N, dS,  $Q_s$ ,  $ET_a$  und  $\theta_M$  verwendet. Der Schwerpunkt der Modellevaluierung liegt auf der Vegetationsperiode (Mitte März bis Mitte Oktober), weil wegen Tau und Frost das Lysimetergewicht im Winterhalbjahr (Mitte Oktober bis Mitte März) für die  $ET_a$ Abschätzung nicht verlässlich verwendet werden kann. Außerhalb der Vegetationsperiode wird die modellierte  $ET_a$  anhand der  $ET_p$  evaluiert, um dS,  $Q_s$  und  $\theta_M$  auch im Winterhalbjahr zu evaluieren. Im Fokus steht dabei die Signifikanz des Unterschieds zwischen Ackerfrüchte/Fruchtfolgen und Modellvarianten, die über den Signifikanztest der Varianz-Analyse (ANOVA) getestet wurde. Ist die Untergliederung durch den Prädikator signifikant, wird "Tukey's honest significant difference test" (TuckeyHSD) durchgeführt, um die Signifikanz des Unterschieds zwischen den Prädikatorlevel zu untersuchen (Abdi & Williams, 2010).

Variante der	Beschreibung						
Modellerweiterung							
DOY_GDD	Saat und Ernte sind durch Jahrestage festgelegt, zwischen denen die						
	Pflanzenentwicklung mit dem Temperatursummen-Verfahren ohne						
	Wasserstress berechnet wird						
DOY_DYN	Saat und Ernte sind durch Jahrestage festgelegt, zwischen denen die						
	Pflanzenentwicklung mit dem Temperatursummen-Verfahren ur						
	Wasserstress berechnet wird						
DYN	Pflanzenentwicklung komplett mit dem Temperatursummen-Verfahren und						
	mit Wasserstress berechnet						

Tabelle 10: Varianten der Modellerweiterung in der Modellevaluierung.

Tabelle 11: In der Evaluation einbezogene Ackerfrüchte.

Kultur	Abkürzung			
Winter Weizen	WW			
Winter Gerste	WG			
Winter Raps	WR			
Winter Phacelia	WP			
Winter Triticale	WT			
Winterzwischenfrucht Saat im Oktober	WZ_okt			
Winterzwischenfrucht Saat im September	WZ_sep			
Winterzwischenfrucht Saat im August	WZ_aug			
Winter Grasanbau	WGr			
Sommer Grasanbau	SGr			
Silage Mais	SM			
Körner Mais (nicht auf Lysimeteranlage	KM			
vorhanden aber relevant in BaWü)				
Zuckerrübe	ZR			
Rote Bete	RB			

#### 2.8 Einfluss von Ackerfrüchten/Fruchtfolgen im Vergleich zum Klimawandel

Die Modellerweiterung berücksichtigt den Einfluss von Ackerkulturen und Fruchtfolgen auf den Wasserhaushalt, Grundwasserneubildung und Oberflächenabfluss, der im letzten Schritt mit dem Einfluss des Klimas eingeordnet wird. Dazu wurde eine Modellanwendung mit typischen Ackerböden und meteorologischen Inputdaten aus Baden-Württemberg in einem faktoriellen Versuchsdesign für den Zeitraum 2006-2020 durchgeführt. Es beinhaltet die zwei Standard Landnutzungstypen Gras- und Ackerland, zwei Modellerweiterungs-Varainten (doy\_dyn und dyn), drei typische Ackerböden, vier Fruchtfolgen, vier Monokulturen und meteorologischen Inputdaten aus einer Klimastationen, die als weitere Variante auf den Klimareferenz Zeitraum 1960-1990 korrigiert wurde (i.e. 264 Modelldurchläufe). Fruchtfolgen werden im Versuchszeitraum so oft verschoben, bis jedes Fruchtfolgenglied in jedem Jahr modelliert wurde, um den Einfluss der einzelnen Jahre auszuschließen.

Bei der Auswahl der drei typischen Ackerböden wurde berücksichtigt, dass die Ackerböden in (1) den am häufigsten vorkommenden Bodengesellschaften in BW-Ackeranbaugebiet (i.e. Braunerde, Parabraunerde-Pseudogley, Kolluvien, Lösslehmböden (WaBoA, 2012)) und (2) den drei nFK-Klassen (nFK < 100mm; 100mm > nFK > 200mm; nFK > 200mm) aus dem Schlussbericht "Nachhaltige

Biomassebereitstellung für die Bioökonomie in BW" (Weiler, 2021) liegen. Die nFK [mm] wurde für i Bodenhorizonte berechnet nach

$$nFK = \sum_{i=1}^{n} \left[ \left( \theta_{fk\_i} - \theta_{pwp\_i} \right) z_i \right]$$
38

wovon  $z_i$  [mm] die Mächtigkeit des Bodenhorizont i ist. Entsprechend diesen Kriterien wurden aus dem LGRB-Kartenviewer (Landesamt für Geologie, 2021) 3 Referenz-Bodenprofile (Tabelle 12 uns Abbildung 5) entnommen, die über Bodenkennwerte zu  $\theta_{fk}$ ,  $\theta_{pwp}$  und  $\theta_{nfk}$ , Bodenart und Trockenraumdichte (TD) pro durchwurzelten Bodenhorizont verfügen. Über die Bodenart und Trockenraumdichte wurden die Bodenkennwerte wie im Kapitel (Boden Parametrisierung) nach Pedotransferfunktionen von Heike Puhlmann gegengeprüft und K<sub>s</sub> abgeschätzt. Allgemein ergab die Pedotransferfunktionen-Anwendung eine tendenziell höhere Feldkapazitäten. Kf entstammt aus der Karte "Durchlässigkeitsverteilung oberer Grundwasserleiter" des LGRB-Kartenviewer. Initialwerte für die Bodenfeuchte sind  $\theta_{fk}$  und 300mm Wurzeltiefe für alle Böden. Typische in Ba-Wü verwendete Fruchtfolgen entstammen aus Weiler (2021), die in Tabelle 13 zusammengefasst sind. Die vier Monokulturen sind aus den Fruchtfolgeliedern der ausgewählten Fruchtfolgen entnommen. Die ausgewählte DWD-Klimastation (1443) aus BW befindet sich bei Freiburg (Latitude: 48.9233, Longitude: 7.8344) auf Höhe 236 über Normal Null und ist Teil der Klimastationen, die den meteorologischen Input für die Anwendung von RoGeR in BW liefern. Deshalb liegt ein RoGeR-Inputdatensatz mit N, ET<sub>0</sub> und T bereits in korrigierter Form für den Zeitraum 2006-2020 vor. Der zweite Inputdatensatz wurde auf die Klimareferenzperiode (1960-90) mit einen Korrektur-Faktor korrigiert, der den prozentualen Unterschied des langjährigen Mittelwerts von 1960-1990 zu 2006-2020 für das Winter- (November bis April) und Sommerhalbjahr (Mai bis Oktober) beziffert (Tabelle 14). Die Langjährigen Mittelwerte zu 1960-1990 entstammen aus dem WaBoA (2012).



Abbildung 5: LGRB-Musterprofil der ausgewählten typischen Ackerböden aus BW.

ID	ID LGRB	Bodentyp und Bodenart	Bodentiefe [m]	LD [g/cm <sup>3</sup> ]	θ <sub>lk</sub> [-]	θ <sub>fk</sub> [-]
7	7911.3	Humose Pararend-	0.93	1.42	0.19	0.29
	Hoch-stätten 2	zina (Lu) auf Nieder-terrasse				
26	6921.2	Pseudovergleytes	1.5	1.55	0.13	0.35
	Mundels-heim 2	Kolluvium (Ut3)				
54	7120.214	Pelosol (Tu3)	0.6	1.5	0.05	0.38
	Hem-mingen					

Tabelle 12: Bodenkennwerte der drei typischen Ackerböden aus BW.

ID	θ <sub>nfk</sub> [-]	nFK [mm]	θ <sub>pwp</sub> [-]	K <sub>s</sub> [mmh <sup>-1</sup> ]	K <sub>f</sub> [mmh <sup>-1</sup> ]
7	0.15	129	0.14	3.4	10000
26	0.23	343	0.12	1.4	0.3
54	0.12	75	0.26	0.4	0.1

Tabelle 13: Monokulturen und Fruchtfolgen verwendet in der Modellanwendung. GrL = GrasslandStandard-Landnutzungstyp, AL = Ackerland Standard-Landnutzungstyp, SM = Silagemais, WW =Winterweizen, WR = Winterrapes, ZR = Zuckerrübe, WZ = Winterzwischenfrucht.

Fruchtfolgen Nummer	Fruchfolge
1	GrL
2	AL
3	SM
4	WW
5	WR
6	ZR
7	WZ+ZR-WW-WW
8	WZ+SM-WW-SM-WW
9	WR-WW-GR-GR
10	WR-WW-SM-WW

Tabelle 14: Der langjährige Mittelwert für das Winter- und Sommerhalbjahrs von 1960-1990 (aus WaBoA, (2012)) und 2006-2020 zu den meteorologischen RoGeR-Inputdaten N,  $ET_0$  und T. Das Verhältnis der langjährigen Mittelwerte bilden den Korrektur-Faktor.

ID- RoGeR	ID- DWD	Variabel	Einheit	Jahreszeit	1960- 1990	2006- 2020	Korrektur- Faktor	
24	1443	Ν	[mm y <sup>-1</sup> ]	Sommer	542	553	0.93	8
24	1443	Ν	[mm y <sup>-1</sup> ]	Winter	403	382	1.0	6
24	1443	$ET_0$	[mm y <sup>-1</sup> ]	Sommer	491	540	0.9	1
24	1443	$ET_0$	[mm y <sup>-1</sup> ]	Winter	175	197	0.8	9
24	1443	Т	[°C]	Sommer	16	17	0.9	6
24	1443	Т	[°C]	Winter	5	6	0.8	5

### 3. Ergebnisse

## 3.1 Herleitung hydrologischer Variablen ausgehend von Lysimeter Gewicht und AWAT-Filter Anwendung

Nach dem Entfernen der Bodenbearbeitungstage konnten im zweiten Schritt der Datenaufbereitung einzelne hohe Gewichtsänderungen ( $\Delta M > 20 \text{ mm } 10 \text{min}^{-1} \mid \Delta M < -5 \text{ mm } 10 \text{min}^{-1}$ ) durch den groben Grenzwertfilter erfasst werden (Anhang-Abbildung 1). Weiterhin auffällig sind einzelne hohe  $\Delta M > 15$ mm 10min<sup>-1</sup> und 4% der negativen  $\Delta M$ , die unter der maximalen Verdunstungsrate -0.15mm/10min von unbewachsenem Boden liegen (van Bavel & Hillel, 1976). Diese auffälligen Datenpunkte weisen eine um 90% erhöhte mittlere Windgeschwindigkeit (5.4 m/s) auf. Da M wegen des meteorologischen Einflusses nachträglich mit dem AWAT Filter behandelt wird, wurde der grobe Grenzwertfilter nicht weiter angepasst. Im Durchschnitt sind insgesamt 3.6% M-Fehlwerte für Lysimeter 3-9 und 0.61% für Lysimeter 1-2 vorhanden. Kommen an einem Tag M-Fehlwerte zusammenhängend in 3 Stunden vor, wurde der Tag zu einen M-Fehltag und in der weiteren Analyse ausgeschlossen. M-Fehltage liegen häufiger im Winter als im Sommer (Anhang-Tabelle 12). Im Winter 2012 wurden unplausibel hohe Gewichtsmessungen für Lysimeter 3 von seitens Agroscope als Fehlwerte markiert, weshalb Lysimeter 3 mit 7.1% die meisten M-Fehlwerte aufweist. Im Durchschnitt sind  $Q_s$ -Fehlwerte (0.9%) weniger als M-Fehlwerte (Anhang-Tabelle 13). Os-Nullwerte kommen auf Lysimeter 3 an 63 Tagen und auf Lysimeter 9 an 13 Tagen vor, davon sind 33 und 22 Sommertage, an denen auch M-Fehlwerte vorkommend. Insgesamt beträgt Q<sub>s</sub> im Durchschnitt 0.007mm/10min und kommt aufgrund der Berechnung über die Steigung der kumulierten 100ml Kippwagenmessung in konstanten Wertabschnitten vor, besonders im Sommer bei wenigen Kippwagen-Messungen. θ-Fehlwerte betragen im Durchschnitt 0.6%, hiervon  $\theta$  in 90cm Bodentiefe auf Lysimeter 8 wegen fehlender Datenauzeichnung im Zeitraummit Mai 2016 bis Mai 2017 mit 12.5% θ-Fehlwerte ausgenommen ist.

Die über M hergeleitete Bodenfeuchte ( $\theta_M$ ) folgt der Dynamik der gemessenen volumetrischen Bodenfeuchte ( $\theta$ ; Mittelwert zwischen den Lysimetern:  $\tau = 0.74$ ). Der Vergleich dieser zwei Bestimmungsansätze der Bodenfeuchte in Abbildung 6 zeigt, dass allgemein die Übereinstimmung im Winterhalbjahr gegenüber dem Sommerhalbjahr höher ist und besonders in den trockenen Sommern (2011, 2015, 2017)  $\theta_M$  bis zu 30% (Lysimeter 2 in 2017) tiefer als  $\theta$  abfällt, was einem Unterschied in S von 97mm entspricht.

Die Anwendung des AWAT-Filters auf 10min Lysimeter Daten ergab allgemein eine hohe Anzahl an Ausreißern in der ET<sub>a</sub> Berechnung, die durch die 30% Verringerung des Parameters  $\omega_{max}$  aus Tabelle 8 reduziert wurde. Dennoch waren insgesamt für alle Lysimeter an 140 Tagen Ausreißer mit über 11mm/Tag bis 30mm/Tag vorhanden (Anhang-Abbildung 2). An diesen Tagen war die mittlere Sickerwasserrate mit 9.4mm/Tag deutlich höher als der Mittelwert des gesamten Datensatz (1mm/Tag). Dass der AWAT-Filter mit Tagen hoher Sickerwasserrate Probleme bereitet, stellen auch Oberholzer et al. (2017) fest. Die meisten Ausreißer befanden sich bei Silage Mais und dem bewässerten Gras-Referenz Anbausystem. Diese 140 Ausreißer wurden entfernt, aber wegen der hohen Anzahl durch lineare Interpolation wieder gefüllt, um im weiteren Verlauf auch Tage mit hoher Sickerwasserrate analysieren zu können. Allgemein ist der ET<sub>a</sub>-Verlauf während der Vegetationsperiode in Abbildung 7 konsistent zwischen denselben Kulturen auf unterschiedlichen Lysimetern. Die ET<sub>a</sub>-Summen während der Vegetationsperiode (Abbildung 8) wiedergeben die drei Kulturen-Gruppen (A) Sommer-, (B) Winterkulturen und (C) Winter Zwischenfrüchte (TukeyHSD, p = \*\*), wobei Winterraps wegen seiner hohen ET<sub>a</sub>-Summe hier den Sommerkulturen zugeordnet ist. Oberholzer et al. (2017) werteten den vollständigen Datensatz (12 wägbare Lysimeter) derselben Lysimeter Anlage im Zeitraum 2009-2015 mit 5-minütiger M-Auflösung aus. Im Vergleich dazu überschätzt die vorliegende Berechnung die ETa besonders bei Silagemais und Winterraps im Durchschnitt um 30-35%. Insgesamt kann die durchgeführte Berechnung für die Evaluierung des ET<sub>a</sub>-Verlaufs verwendet und muss im Bezug zur absoluten Größe kritisch betrachtet werden.



Variable —  $\theta$  —  $\theta_M$ 

Abbildung 6: Mittelwert der gemessen volumetrischen Bodenfeuchte ( $\theta$ ) aus 10, 30, 60 und 90cm Bodentiefe und aus dem Lysimetergewicht hergeleitete Bodenfeuchte ( $\theta_{M}$ ).



Kalender Jahr

Abbildung 7: Der Verlauf der ETa währende der Vegetationsperiode auf den Lysimetern 1-9 (Zeilen) im Zeitraum 2011-2017 (Spalten). Die blaue Glättungslinie wurde mit dem Glättungsverfahren LOESS (Spannweite = 0.5) erstellt und verdeutlicht den ETa-Verlauf.



Abbildung 8: Die ETa Summen von vollständigen Vegetationsperioden der Ackerfrüchte: SM =Silagemais, ZR = Zuckerrübe, RB = Rote Bete, SGr = Sommergras, WW = Winterweizen, WG =Wintergerste, WT = Wintertriticale, WR = Winterraps, WP = Winterphacelia, WZ =Winterzwischenfrucht. Wintergras ist WZ zugeordnet. Die blauen Horizontalen sind Vergleichsmittelwerte aus Oberholzer et al, 2017. Buchstaben untergliedern in voneinander signifikant unterschiedliche Gruppen.

Der Niederschlag in der Vegetationsperiode wird über M und der AWAT-Filter Anwendung hergeleitet und zur Korrektur des meteorologischen Niederschlags verwendet (Abbildung 9). Der korrigierte Niederschlag ist im Durchschnitt 8.4% höher, wovon Lysimeter 1 ausgenommen ist, und liegt in der Größenordnung von Oberholzer et al. (2017) (Mittelwert: 7.6 ±5.6%). Lysimeter 1 wird nach dem standardisierten Gras-Referenz Anbau bewässert. Hier beträgt in der Vegetationsperiode 2016 und 2017 die Abweichungsmenge zum meteorologischen Niederschlag 355mm und 539mm, die ein Anhaltspunkt für die unbekannte Bewässerungsmenge ist. Insgesamt ist die Abweichung zum meteorologischen Niederschlag konsistent in Bezug auf die Vegetationshöhe der aktuellen Anbaukultur, da in Jahren mit großen Ackerfrüchten (2012: Silagemais vs. Wintergetreide, 2013: Rote Brache) der korrigierte Niederschlag höher Bete vs. Wintergetreide mit ist. Der Niederschlagsunterschied zwischen den Lysimetern ist in den trockene Jahre 2011, 2015 und 2017 geringer als in den feuchten Jahren 2012, 2013 und 2016.



Abbildung 9: Vergleich des korrigierten und unkorrigierten Niederschlags. Korrigierter Niederschlag beinhalltet in der Vegetationsperiode den Niederschlag, der über Lysimetermasse (M) und der AWAT-Filter Anwendung hergeleitet wurde.

#### 3.2 Boden Parametrisierung

Die modellierten Bodenfeuchte wird mit  $\theta_M$  in Abbildung 10 evaluiert, um die Bodenkennwerte  $\theta_{pwp}$ und  $\theta_{nfk}$  für die weitere Modellevaluierung auszuwählen. Allgemein können mit den Labor Bodenkennwerten ( $\theta_{pwp} = 0.19$ ,  $\theta_{nfk} = 0.13$ ) die niedrigen Unterschreitungswahrscheinlichkeiten nicht abgebildet werden, weshalb  $\theta_{pwp} = 0.15$  nach den Abschätzungen aus Tabelle 9 gesetzt wird. Dennoch werden die niedrigen Unterschreitungswahrscheinlichkeiten auch mit  $\theta_{pwp}=0.15$  nicht abgebildet. Deshalb wurde K<sub>c mid</sub> nach Oberholzer et al. (2017) in den Modellerweiterungs-Varianten erhöht, weil Ackerpflanzen wegen der Lysimeter Bauweise mehr Licht und Feuchtigkeit als im geschlossen Feldanbau erhalten und dadurch mehr transpirieren (i.e. Oaseneffekt). Durch K<sub>c mid</sub>- Erhöhung können die Modellerweiterungs-Varianten die niedrigen Unterschreitungswahrscheinlichkeiten besser als die Standard-Landnutungstypen abbilden, wobei die Unterschreitungswahrscheinlichkeiten geringer 0.5 weiterhin überschätzt werden. Bei der Anpassung von  $\theta_{pwp}$  an die niedrigen Unterschreitungswahrscheinlichkeiten werden die hohen Unterschreitungswahrscheinlichkeiten durch die Erhöhung der  $\theta_{nfk}$ = 0.19 für Lysimeter 1,3,4 und 9 und  $\theta_{nfk} = 0.17$  für Lysimer 2 gut abgebildet. Zusammenfassend wird  $\theta_M$  mit der Parametereinstellung ( $\theta_{pwp} = 0.15$ ,  $\theta_{nfk} = 0.19$ ) und erhöhten K<sub>c mid</sub> (nach Oberholzer et al. (2017)) am besten wiedergegeben und deshalb für die weitere Modellevaluierung ausgewählt. Dieselbe Parameterauswahl ergibt auch die im Anhang dargestellte Evaluierung mit  $\theta$  (Anhang-Abbildung 4).



Abbildung 10: Vergleich der Unterschreitungswahrscheinlichkeit von  $\theta_M$  (schwarz) mit der modellierten Bodenfeuchte (farbig), der in Lysimeter (Zeilen) und unterschiedlichen Bodenparametern (Spalten) untergliedert ist.  $\theta$  wurde a) mit Standard  $K_{c \, mid}$  und b) mit erhöhtem  $K_{c \, mid}$  wegen Oaseneffekt (Oberholzer et al., 2017) modelliert.

#### 3.2 Modellevaluierung mit Lysimeter Daten aus Reckenholz-Zürich

#### 3.2.1 Dynamische Vegetationsentwicklung

In der Parametrisierung der Modellerweiterung wurde  $T_{sum}$  ausgehend von dem Referenz-Jahrestag der Phänologie-Stadien (1) Saat, (2) maximale Entwicklung und (3) Ernte anhand von drei DWD-Klimastationen im Zeitraum 1990-2020 berechnet. Die  $T_{sum}$ -Standardabweichung ist bei den Winter-(134 GDD) gegenüber Sommerkulturen (89 GDD) höher (TukeyHSD, p = \*\*\*) und bei maximaler Entwicklung (89 GDD) geringer als bei Saat (125 GDD) und Ernte (140 GDD) (TukeyHSD, p = \*). Der  $T_{sum}$ -Mittelwert wird als  $T_{sum ref}$  dem Referenz-Jahrestag der jeweiligen Ackerfrucht zugeordnet. Werden die Phänologie Stadien Saat, maximale Entwicklung und Ernte mit  $T_{sum ref}$  anhand derselben Klimadaten zurückgerechnet, ist die Jahrestag-Standardabweichung des Saats- gegenüber Erntezeitpunkts (14 vs. 36Tage) höher (TukeyHSD, p = \*\*). Die Differenz von Jahrestag zu Referenz-Jahrestag beträgt im Durchschnitt 4 Tage und der Interquantielen-Abstand liegt zwischen -7 bis 11 Tagen (Anhang-Abbildung 3). Extreme Abweichung bis zu -114 und 263 Tage werden für den Erntezeitpunkt festgestellt.

Im Vergleich der modellierten zu den beobachteten Saat- und Erntezeitpunkte in der Lysimeteranlage Reckenholz-Zürich werden Saat und Ernte tendenziell bei Sommerkulturen zu früh und Winterkulturen zu spät modelliert (2 vs. -19 Tage). Besonders der modellierte Erntezeitpunkt von Winterkulturen, die bereits im Sommer ausgesät werden (e.g. Winter Raps, Winter Zwischenfrucht in 2013), setzten bis zu 4-5 Monate zu spät ein. Insgesamt ist die Abweichung der Phänologie Stadien für Saat und Ernte sensitiv zu Temperaturanomalien, weshalb in zwei Varianten der Modellerweiterung (doy dyn, doy gdd) die dynamische Pflanzenentwicklung zwischen festen Saat- und Erntezeitpunkten eingegrenzt wurde (Abbildung 11). Kein Unterschied besteht zwischen doy dyn und doy gdd, weshalb auf dieser Lysimeteranlage Wasserstress während der Wachstums- und Zerfallsphase nicht relevant ist. Der kalte Winter (2012/13) verursacht bei der Modellierung ohne festen Saat- und Erntezeitpunkte (dyn) einen verspäteten Erntezeitpunkt von Winterraps und Winterzwischenfrucht und verhindert auf Lysimeter 3 und 9 das Wachstum der folgenden Sommerkultur Rote Bete. Extreme Jahreszeiten wie der Winter (2012/13) verursachen bei doy\_dyn und doy\_gdd kein Ausbleiben des Wachstums von Sommerkulturen und sind somit robuster gegenüber Temperaturanomalien. Dennoch gibt es auch einen Unterschied zwischen den festgelegten und tatsächlichen Saat- und Erntezeitpunkten. Zum Beispiel die Sommerkulturen Zuckerrübe und Rote Bete werden bis zu einen Monat später in der Lysimeteranlage geerntet, als in der Parametertabelle der Modellerweiterung vorgegeben ist.

Das modellierte  $Z_r$ -Wachstum wird im Zusammenhang zu  $\theta$  in 10, 30, 60, 90 cm Bodentiefe in Abbildung 12 dargestellt. Allgemein ist die  $\theta$ -Variabilität in 10cm Bodentiefe doppelt so hoch wie die Variabilität in 30, 60, 90cm Bodentiefe (Standardabweichung = 0.16 vs. 0.33).  $\theta$  in 10cm Bodentiefe sinkt auf  $\theta_{pwp}$  am Ende von Winterkulturen (Ernte: Juni-Juli) und nach Winterzwischenfrüchte (Ernte: März-April) erst in der nachfolgenden Sommerkultur. Darauffolgend sinkt  $\theta$  auch in den tieferen Bodenschichten, erreicht aber nur in den Trockenjahren 2011, 2015 und 2017 auch  $\theta_{pwp}$  in 90cm Bodentiefe. Nach der Ernte der Winter- und Sommerkultur regeneriert sich  $\theta$  in den tiefen Bodenschichten, wohingegen  $\theta$  in 10cm Bodentiefe länger erniedrigt bleibt. Das modellierte  $Z_r$ -Wachstum erreicht seine maximale Entwicklung vor dem Eintreten der  $\theta$ -Absenkung in tieferen Bodenschichten und wird nach der Ernte auf die Evaporationstiefe (0.15m) zurückgesetzt, wenn sich  $\theta$ in den tieferen Bodentiefe regeneriert. Im trockenen Jahr 2015 ist die negative Entwicklung der Bodenfeuchte ausgeprägter unter permanenten Grasbewuchs (Lysimeter 4,9) als unter abwechselnden Winter- und Sommerkulturanbau (Lysimeter 3,8). Dies kann durch das modellierte  $Z_r$  nicht wiedergegeben werden, weil noch kein permanenter Ackerfrucht-Anbau in der Modellerweiterung implementiert ist.



Abbildung 11: Modelliertes  $Z_r$ - und CC-Wachstum im Vergleich mit den tatsächlichen Vegetationsperioden der Ackerfrüchte (farbige Balken) auf den Lysimetern 2, 3, 4, 8 und 9. Dabei wird  $Z_r$  in negativen und CC in positiven Werten dargestellt, weil CC auf der Oberfläche und  $Z_r$  im Boden wächst. Wachstum ist abhängig zur Temperatur, weshalb Maximum, Mittelwert und Minimum der Tagestemperatur mit dargestellt sind. Ackerfrüchte-Abkürzungen: SM = Silagemais, ZR = Zuckerrübe, RB = Rote Bete, SGr = Sommergras, WW = Winterweizen, WG = Wintergerste, WT = Wintertriticale, WR = Winterraps, WP = Winterphacelia, WZ = Winterzwischenfrucht; B = Brache.



Abbildung 12: Vergleich der Entwicklung des monatlichen  $\theta$ -Minimum in 10, 30, 90cm Bodentiefe wird mit der monatlichen Wurzeltiefe ( $Z_r$ ). Die Farbskala von  $\theta$ -Minimum unterteilt sich in den Bereich oberhalb von  $\theta_{pwp}$  (lila) und unterhalb von  $\theta_{pwp}$  (rot). Alle Werte oberhalb  $\theta_{fk}$  entsprechen demselben Farbton (gesättigtes lila).

#### 3.2.2 Hydrologische Variablen

Die totale Wasserbilanz der Oberfläche ist mit ihren Wasserbilanzgliedern N, ET, Qs, \DeltaS und Oberflächenabfluss (Q) in Abbildung 13 dargestellt und in (1) Lysimeter-Nummer, (2) Vegetation-/Winterperiode und (3) Modellvariante/Lysimeter untergliedert. Die Modellvarianten zeigen keinen Wasserbilanzfehler und die Lysimeter Daten einen negativen Wasserbilanzfehler (i.e. Wasserfluss ist höher als der Niederschlagsinput), der im Durchschnitt 14.5% von N entspricht. In der Vegetationsperiode ist ET im Durchschnitt um 9% höher als der Niederschlag und S entleert sich, wobei auf dem Gras-Lysimeter 1 die ET um 11% geringer als N ist. Im Winter ist ET im Durchschnitt 80% geringer als N, weshalb S sich füllt und Q<sub>s</sub> im Durchschnitt 61% höher als im Sommer ist. Allgemein ist der Unterschied zwischen Modellierung und observierten Daten im Winter geringer als im Sommer, der den Bezug und Fokus der folgenden Evaluierung darstellt. Die Unterschätzung von ET ist bei den Varianten der Modellerweiterung (41%) um 15 Prozentpunkte geringer als bei den Standard Landnutzungstypen (56%; TukeyHSD, p=\*\*\*) und auf Lysimeter 3 & 8 (38%) um 11 Prozentpunkte geringer als auf Lysimeter 2, 4 & 9 (49%; TukeyHSD, p=\*\*\*), wobei auf Lysimeter 1 mit 60% die ET-Unterschätzung am höchsten ist. Demzufolge ist die Überschätzung von  $Q_s$  bei den Modellerweiterungsvarianten (88%) um 71 Prozentpunkte geringer als bei den Standard Landnutzungstypen (151%, TukeyHSD, p = \*\*\*) und auf Lysimeter 1, 3 & 8 (64%) 87 Prozentpunkte geringer als auf Lysimeter 4 und 9 (147%; TukeyHSD, p = \*\*\*), wovon Lysimeter 2 mit 400% die Q<sub>s</sub>-Überschätzung am höchsten ist. Die Entleerung und Füllung von S durch den ET-Unterschied zwischen

Vegetations- und Winterperiode wird in der Modellierung nicht abgebildet. Der modellierte Anteil des Oberflächenabflusses am Niederschlag beträgt im Durchschnitt 2.1% und ist bei den Modellerweiterungsvarianten (2.3%) höher als bei den Standard Landnutzungstypen (1.9%).



Abbildung 13: Totale Wasserbilanz der Oberfläche untergliedert in Lysimeter (Zeilen), Vegetation-/Winterperiode (Spalten) und Daten vom Lysimeter (schwarz) und Modellvarianten (Farbe). Der Wasserbilanzfehler (Error) berechnet sich nach: Error = N-( $ET+Q_s+\Delta S+Q$ ). Wasserbilanzglieder: N= Niederschlag, ET = Evapotranspiration,  $Q_s$ = Sickerwassermenge,  $\Delta S$  = Bodenspeicheränderung, Q=Oberflächenabflus. Vegetationsperiode: Mitte März bis Mitte Oktober; Winterperiode: Mitte Oktober bis Mitte März.

Die Modellierung der hydrologischen Variablen  $ET_a$ ,  $Q_s$  und  $\theta$  in der Vegetationsperiode stehen im Fokus der Modellevaluierung. Insgesamt ist die Modellierung der  $ET_a$  und  $\theta$  in der Vegetationsperiode mit der Modellerweiterungsvarianten signifikant besser als mit den Standard-Landnutzungstypen (TukeyHSD, p = \*\*), dennoch ist KGE allgemein gering. In der Vegetationsperiode ist KGE für  $ET_a$ (doy\_dyn & doy\_gdd: 0.08, dyn = 0.142, Grassland: -0.86, crop: -0.57) geringer als für  $\theta$  (doy\_dyn & doy\_gdd: 0.23, dyn = 0.48, Grassland: -1.48, crop: -1.57). Q<sub>s</sub> wird nicht signifikant in die Modellvarianten untergliedert (ANOVA, p =0.36) und liegt für alle Modellvarianten über 0 (doy\_dyn & doy\_gdd: 0.16, dyn = 0.06, Grassland: 0.12, crop: 0.02).
Weiterführend werden in Abbildung 14 Modellierungsergebnisse, die besser als der Mittelwert der beobachteten Daten sind (KGE > 0), dargestellt und zwischen (1) Lysimeter, (2) Vegetation-/Winterperiode und (3) Modellvariante differenziert. In Anhang-Abbildung 5 sind die untergliederten Modellierungsergebnisse mit Modellgüte KGE < 0 dargestellt, die öfter bei den Standard Landnutzungstypen Gras- und Ackerland als bei den Modellerweiterungs-Varianten vorkommen (TukeyHSD; p=\*) und am häufigsten für Lysimeter 2 und  $\Delta$ S sind. Gründe für Modellgüte KGE < 0 sind für ET<sub>a</sub> hohes Bias ( $\beta_{Mittelwert} = 2.1$ ) und hohe Variabilität ( $\alpha_{Mittelwert} = 1.8$ ) besonders in der Vegetationsperiode und bei den Standard Landnutzungstypen,  $\Delta$ S hohes negatives und positives Bias ( $\beta_{Interquantilenabstand} = -6.4 - 6.9$ ), Qs geringe Korrelation (r = 0.23) besonders auf Lysimeter 2 und für  $\theta$ eine zu hohe Variabilität ( $\alpha_{Mittelwert} = 3.3$ ) besonders im Winter.

Die Modellierungsergebnisse mit Modellgüte KGE > 0 unterscheidet sich signifikant zwischen den hydrologischen Variablen, Vegetations-/Winterperiode und Modellvariante (ANOVA, p=\*\*\*). ET<sub>a</sub> im Winter und  $\theta$  in Vegetationsperiode werden besser als in der jeweils anderen Zeitperiode modelliert, weil die Korrelation (r < 0.5) mit der modellierten ET<sub>a</sub> in Vegetationsperiode gering und die Variabilität ( $\alpha$  > 2) von der modellierten  $\theta$  im Winter zu hoch ist. Die Modellgüte für ET<sub>a</sub> in der Vegetationsperiode ist bei der Modellerweiterung höher auf Lysimeter 3 und 8 (KGE = 0.31) gegenüber Lysimeter 4 und 9 (KGE = 0.01). Die Modellgüte für Q<sub>s</sub> (KGE = 0.25) ist insgesamt wegen geringer Korrelation (r < 0.5) und hoher Variabilität ( $\alpha$  = 1-1.5) niedrig, aber KGE < 0 nur auf Lysimeter 2 und 3. Auf Lysimeter 1, der nur mit dem Standard Landnutzungstyp Grasland modelliert wurde, liegt die Modellgüte KGE > 0 für Q<sub>s</sub> &  $\theta$  in Vegetations- und Winterperiode und für ET<sub>a</sub> &  $\Delta$ S nur im Winter. Modellgüte KGE < 0 für ET<sub>a</sub> &  $\Delta$ S im Sommer, weil die Variabilität ( $\alpha$ =2.1) und das Bias ( $\beta$ =2.5) für ETa und für  $\Delta$ S das Bias ( $\beta$ =0.9) hoch sind.



Modell • Acker • Gras • doy\_dyn • doy\_gdd • dyn

Abbildung 14: Die Modellgüte (KGE > 0) der hydrologischen Variablen Niederschlag (N), aktuelle Evapotranspiration (ET<sub>a</sub>), Sickerwasserrate (Q<sub>s</sub>), Bodenspeicheränderung ( $\Delta$ S) und mittlere Bodenfeuchte ( $\theta_M$ ) untergliedert in Lysimeter (Zeilen), Vegetations-/Winterperiode (Spalten) und Modellvariante (Farbe). KGE (-inf;1] setzt sich zusammen aus dem Variabilitätskoeffizient ( $\alpha$ [0;inf)), Bias-Koeffizient ( $\beta$  (inf;inf)) und Persons-Korrelationskoeffizient (r [0;1]). Vegetationsperiode: Mitte März bis Mitte Oktober; Winterperiode: Mitte Oktober bis Mitte März. Modellgüte (KGE < 0) ist separat in Anhang-Abbildung 5 dargestellt.

# 3.3 Einfluss von Ackerfrüchten/Fruchtfolgen auf den Wasserhaushalt, Grundwasserneubildung und Oberflächenabfluss

Die Anbauverfahren auf der Lysimeteranlage kann in Winter- und Sommerkulturen Fruchtfolgen und langjähriger Grasanbau untergliedert werden. Winterkulturen werden im Oktober gesät und im Juni geerntet, wobei Winterraps bereits im Sommer gesät wird. Auf eine Winterkultur folgt eine Sommerbrache oder der Anbau einer Zwischenfrucht. Sommerkulturen werden im Mai gesät und spätestens Anfang Oktober geerntet. Vor einer Sommerkultur wird eine Zwischenfrucht im Oktober gesät. Der Haupt-Kulturzeitraum umfasst somit Oktober bis Oktober des nächstens Jahrs, zu dem der mittlere Jahres-Verlauf der hydrologischen Variablen zwischen Winter- und Sommerkulturen in Abbildung 15 verglichen wird. Der Niederschlag ist in November bis Januar und während der maximalen ET<sub>a</sub> in Mai bis Juli erhöht. Die monatliche ET<sub>a</sub>-Summe ist maximal für Winterkulturen (Mai) ein Monat früher als für Sommerkulturen (Juni) und bleibt bei Sommerkulturen bis August erhöht, wohingegen bei Winterkulturen ET<sub>a</sub> bis Juli wieder abfällt. ET<sub>a</sub> Maximum ist für Sommerkulturen 45% und für Winterkulturen 55% höher als die PET. Während des ET<sub>a</sub>-Maximums ist  $Q_s$  und  $\theta$  bei Winterkulturen niedriger, weil Winterkulturen bereits ab März und Sommerkulturen erst ab Mai dem Boden Wasser entziehen ( $\Delta S < 0$ ).  $\theta$ -Minimum erreichen die Sommerkulturen erst im August-September, wenn unter Winterkulturen der Bodenspeicher sich bereits wieder regeneriert ( $\Delta S$ > 0). Das Maximum der monatlichen ET<sub>a</sub>-Summe unterschätzen die Modellerweiterung (50%) und der Standard-Landnutzungstyp (60%) und zeigen einen verspäteten Hochpunkt im Juni. Deshalb wird besonders während des  $ET_a$ -Summen Maximums  $Q_s$  und  $\theta$  deutlich überschätzt. Bei den Modellerweiterungsvarianten ist Q in der Brache (Juli-September) nach Winterkulturen und im Saat-(Mai) und Erntemonat (Juli-September) der Sommerkulturen erhöht, wenn die Mächtigkeit des ersten Bodenspeicher im Modell gering ist. Standard-Landnutzungstypen mit konstanter Mächtigkeit des ersten Bodenspeicher haben in der Vegetationsperiode keine Q-Hochpunkte, wobei die Modellierung mit Standard-Landnutzungstyp Grasland im Mai bei Winterraps hohes Q anzeigt. Der Vergleich von Sommer- und Winterkulturen-Fruchtfolgen mit mehrjährigen Grasanbau ist schwierig, weil Gras nur auf Lysimeter 4 und 9 in denselben Jahren 2015-16 angebaut und auf Lysimeter 1 (2016-17) bewässert wurde (siehe Anhang-Abbildung 6). Tendenziell folgt Grasanbau den Verlauf der Sommerkulturen-Fruchtfolgen und Bewässerung erhöht ET und Qs.

Unter Betrachtung des jährlichen Verlaufs von  $ET_a$  und  $Q_s$  in Abbildung 16 ist der Unterschied zwischen den modellierten und observierten Daten für  $ET_a$  nicht abhängig (ANOVA, p = 0.6) und für  $Q_s$  abhängig (ANOVA; p = \*\*) von dem Niederschlag in der Vegetationsperiode. In den trockenen Vegetationsperioden von 2011, 2014, 2015 & 2017 ist  $Q_s$ -Verlauf zwischen den Lysimetern ähnlich, dem die Modellerweiterungs-Varianten und im extrem trocken Jahre 2015 auch die der Standard Landnutzungstypen folgen. In den feuchten Vegetationsperioden 2012, 2013 & 2016 ist der Unterschied der Variablenverläufe zwischen den Lysimetern größer als in den trockenen Jahren, diesen Unterschied geben die Modellvarianten nicht wieder. Hier in den feuchten Vegetationsperioden überschätzen  $Q_s$  besonders die Standard Landnutzungstypen. Die Übereinstimmung der modellierten  $Q_s$  und  $ET_a$  sind bei den Modellierungsvarianten deutlich besser als die Standard-Landnutzungstypen, wenn das Pflanzenwachstum gut wiedergegeben wird (e.g. 2011 auf Lysimeter 4 und 9, 2013 auf Lysimeter 3 und 8, 2014 auf allen Lysimetern).

 $ET_a$  und N der observierten und modellierten Daten werden in Abbildung 16 auch mit den meteorologischen Variablen verglichen. Unkorrigierter meteorologischer Niederschlag unterscheidet sich besonders in 2012, wenn Lysimeter 4 & 9 in der frühen Vegetationsperiode mehr Niederschlag durch den Silagemais einfangen, und in 2016 und 2017, wenn die Kurve von Gras-Lysimeter 1 durch Bewässerung stärker ansteigt als bei den anderen Lysimeter. Am Ende der Vegetationsperiode ist  $ET_a$  im Durchschnitt 59% höher als die PET (nach Makkink), wobei Lysimeter 3 & 8 (44%) eine geringere Abweichung als Lysimeter 2,4 & 9 (60%) und Lysimeter 1 (85%) haben (TukeyHSD, p = \*\*\*). Allgemein steigen die  $ET_a$ -Kurven besonders am Anfang der Vegetationsperiode schneller als die PET-

Kurve und nähern sich gegen Ende der Vegetationsperiode der PET Kurve wieder an. Der Unterschied zwischen  $ET_a$  und  $ET_p$  ist in den feuchten Anfangsmonaten der Vegetationsperiode (2010, 2013, 2016) größer ist als in trockenen (2011, 2012, 2014). Diesen schnellen  $ET_a$ -Anstieg am Anfang der Vegetationsperiode bilden die Modellvarianten nicht ab, sondern folgen der PET Kurve.

Der θ-Verlauf in Abbildung 17 zeigt, dass allgemein die Standard Landnutzungstypen die θ-Minima am Ende von Winter- oder Sommerkulturen nicht abbilden, wohingegen die Varianten der Modellerweiterung die 0-Minima nach Winterkulturen (e.g. Lysimeter 4 & 9 in 2011, 2014 & 2017 und auf Lysimeter 2, 3 & 8 in 2016) erreichen. θ-Minima nach Sommerkulturen (Zuckerrübe, Silagemais, Rote Bete) und im Besonderen Zuckerrübe auf Lysimeter 2 (2017) werden aber auch von den Modellerweiterungs-Varianten überschätzt. In 2017 auf Lysimeter 2 sinkt 0 nicht so weit wie auf Lysimeter 3 und 8 mit derselben Anbaukultur, weil korrigierter N auf Lysimeter 2 ca. 10% höher ist. Das extremste  $\theta$ -Minima der Zeitreihe (2015) ist unter permanenten Grasanbau ausgeprägter als nach Silagemais und wird allgemein von dem Modellvarianten überschätzt. Die Modellerweiterungs-Varianten mit festen Saat- und Erntezeitpunkten (doy\_dyn, doy\_gdd) unterscheiden sich zu der Modellerweiterungs-Variante ohne festen Saat- und Erntezeitpunkte (dyn) besonders in den Jahren 2011 (Lysimeter 4,9) und 2013 (Lysimeter 3,8), wenn die modellierten Erntezeitpunkte voneinander stark abweichen (Abbildung 11 oben). Durch eine verspäteten Erntezeitpunkt mit der Modellerweiterung dyn dauert das  $\theta$ -Minima in 2011 zu lange an, aber das  $\theta$ -Minima nach Winterraps (2013) wird durch einen verspäteten Erntezeitpunkt besser abgebildet. In den ersten vier Wintern 2010-2013 sind Zeiträume mit  $\theta > \theta_{fk}$  vorhanden, in denen die Modelle nur nach Niederschlagsereignissen  $\theta$  $> \theta_{fk}$  erreichen.



Abbildung 15: Mittelwerte Jahresverlauf (2006-2020) der hydrologischen Variablen (Zeilen) Niederschlag (N), Evapotranspiration (ET), Sickerwasserrate ( $Q_s$ ), Bodenspeicheränderung ( $\Delta S$ ) und Bodenfeuchte ( $\theta$ ) untergliedert in Winter- und Sommerkulturen (Spalten). Weitere Untergliederung in Lysimeterdaten und PET (schwarz) und Modellvarianten (farbe).



Abbildung 16: Jährlicher Verlauf von Niederschlag (N), aktuelle Evapotranspiration  $(ET_a)$  und Sickerwasserrate  $(Q_s)$  in der Vegetationsperiode (Mitte-März bis Mitte Oktober). Modellierungsergebnisse (Farbe) werden mit den Lysimeterdaten (schwarz) verglichen und in Lysimeter (Strichform) unterschieden. Als Referenz sind die meteorologischen Daten (lila) angegeben: potentielle Evapotranspirations nach Makkinik  $(ET_p)$  Für  $ET_a$  und der unkorrigierte meteorologischer Niederschlag für N. Auf Lysimeter 3 beginnt der Verlauf wegen Fehlwerten im Lysimetergewicht erst im Mai.



Abbildung 17: Verlauf der modellierten  $\theta$ -Zeitreihe im Vergleich zu  $\theta_M$  (schwarze Linie) untergliedert in Lysimeter (Zeilen), Modellvarianten (farbige Linien) und Ackerfruchtanbauzeiträume (farbige Rechtecke). Ackerfrüchte-Abkürzungen: SM = Silagemais, ZR = Zuckerrübe, RB = Rote Bete, SGr = Sommergras, WW = Winterweizen, WG = Wintergerste, WT = Wintertriticale, WR = Winterraps, WP = Winterphacelia, WZ = Winterzwischenfrucht; B = Brache.

## 3.4 Einfluss von Ackerfrüchten/Fruchtfolgen im Vergleich zum Klimawandel in Baden-Württemberg

RoGeR Anwendung für eine Klimastation und drei Ackerböden aus BW im Zeitraum 2006-2020 erfolgte mit der Modellerweiterung und dem Standard-Landnutzungstyp für Ackerland. Als Variant wurden meteorlogischen Inputdaten (2006-2020) auf die Klimareferenzperiode 1960-90 korrigierte, um den Einfluss der Ackerfrüchten/Fruchtfolgen mit dem des Klimawandels zwischen 1960-1990 bis 2006-2020 einzuordnen. Die erhöhten  $K_{c mid}$ -Parameter, die in der Lysimeter-Modellierung wegen dem Oaseneffekt verwendet wurden, werden in dieser Modellanwendung nicht verwendet. Die Modellerweiterung berücksichtig 8 Fruchtfolgen (2 Winter-Monokulturen, 2 Sommermonokulturen, 4 komplexe Fruchtfolgen;

Tabelle 13 oben), deren modelliereten Pflanzenentwicklungsstadien in Abbildung 18 dargestellt sind. Allgemein haben die mit dem Temperatursummen-Ansatz brechneten Saat- und Erntezeitpunkte (Modellerweiterungsvariante dyn) eine breite Abweichung zu den Referenz-Jahrestagen (Abbildung 18a). Das Klimasignal verschiebt den Saat- und Erntezeitpunkt und veengt den Hauptzeitraum, in dem Saat und Ernte hauptsächlich stattfindet. Die Saat- und Erntezeitpunkte in extrem heißen Jahren wie 2018, 2019, 2020 entfernen sich durch das Klimasignal weiter von dem Haupzeitraum der Saat und Ernte, die durch kleine Hügel im Kernel-Dichtediagramm dargestellt sind. Der Klimaeffekt ist bei der maximalen Pflanzenentwicklung weniger ausgeprägt (Abbildung 18b), der bei der Modellerweiterungs-Variante mit festen Saat und Erntezeipunkte nicht sichtbar ist. In der Modellerweiterung-Variante mit festen Saat und Erntezeipunkten ist der Hauptzeitraum der maximalen Pflanzentwicklung enger, wobei der Zeitpunkt des Wurzeltiefe-Maximums zwischen Saat und Ernte weiter verteilt ist als der Zeitpunkt des Bodenbedeckungs-Maximums.

Abbildung 19 stellt die totale Wasserbilanz im Zeitraum 2006-2020 dar, die signifikant in Boden, Modell und Klima untergliedert ist (ANOVA, p = \*\*\*). Der Anteil der erklärten Varianz zu ET<sub>a</sub>, Q<sub>s</sub> und Q ist höher für den Prädikator Modell als für den Prädikator Klima, wobei zu Q der Prädikator Boden deutlich mehr Varianz erklärt als Klima und Modell zusammen (siehe ANOVA Tabelle in Tabelle 15). Standard-Landnutzungstyp Grasland gegenüber Ackerland hat im Durchschnitt geringere ET<sub>a</sub> (7%) aber höhere Q<sub>s</sub> (10%) und Q (23%) und Modellerweiterungs-Variante doy gegenüber doy\_dyn hat im Durschnitt geringere Et<sub>a</sub> (5%), aber höhere  $Q_s$  (8%) und Q (10%). Davon werden Ackerland und doy dyn für den folgenden Vergleich zwischen Standard-Landnutzungstyp und Modellerweiterung ausgewählt. Unterschiede zwischen den Modell-Varianten, hydrologischen Variablen und Klima sind abhängig vom Boden (ANOVA, p = \*\*\*). Q nimmt mit dem Boden-Tongehalt zu aber der Unterschied zwischen den Standard-Landnutzungstypen und Modellerweiterung nimmt ab, der im Durchschnitt 64% (Boden 7), 52% (Boden 26) und 33% (Boden 54) beträgt. Auf dem mächtigsten Boden (26) ist ETa 10% höher und Qs 21% niedriger bei der Modellerweiterung, wohingegen auf den anderen Böden die Standard-Landnutzungstypen höhere  $ET_a$  (4%) und niedrigere Qs (6%) vorweist. Die Klima Korrektur verringert auf allen Böden ETa (9%) und erhöht Q (5-11%, zunehmend mit Tongehalt) und Qs (10-15%, zunehmend mit Ks und Mächtigkeit).

Tabelle 15: ANOVA Tabelle zu den hydrologischen Variablen ETa, Qs, Q mit den Prädikatoren Klima, Boden, Modell. Ds: Freiheitsgrade, SS: Summe der Abweichungsquadrate, MS: SS pro Freiheitsgrad, F-Wert: Wert des F-tests.

Variable	Prädikator	Df	SS	MS	F-Wert	P-wert
ETa	Klima	1	1956	1956	842	***
	Boden	1	1620	1620	697	***
	Model	3	2377	792	341.1	***
	Residuen	545826	957862	2.3		
Qs	Klima	1	2536	2536	463	***
	Boden	1	2674	2674	488	***
	Model	3	2704	901	165	***
	Residuen	545826	1267938	5.5		
Q	Klima	1	18	18	10	**
	Boden	1	9983	9983	5689	***
	Model	3	108	36	21	***
	Residuen	545826	969075	2		

Der Unterschied der 8 Fruchtfolgen ist durch den Error Balken (Standardabweichung der 8 Fruchtfolgen-Modellierung) in Abbildung 19 und im direkten Vergleich in Anhang-Abbildung 7 dargestellt. Der Unterschied zwischen den modellierten Fruchtfolgen ist wesentlich durch den Unterschied zwischen Sommer- und Winter-Monokulturen geprägt, deren mittleren Jahresverlauf im Vergleich zu dem Standard-Landnutzungstyp Ackerland und komplexen Fruchtfolgen in Abbildung 20 dargestellt ist. Dieser ist bei der Modellerweiterungs-Variante dyn größer als bei doy\_dyn, weil dyn besonders für Winterkulturen zu langen Vegetationsperioden berechnet (Abbildung 18a), weshalb die Fruchtfolgen nur für doy\_dyn in Abbildung 20 dargestellt sind. Winter-Monokulturen zeigen die höchste ET<sub>a</sub> bis zu ihrer Ernte im Juni, worauf die Sommer-Monokulturen im August ihre maximale Entwicklung und ET<sub>a</sub> erreichen. Komplexe Fruchtfolgen folgen dem Verlauf von Winterkulturen im Frühjahr und erreichen ihr ET<sub>a</sub>-Maximum mit den Sommer-Monokulturen im Juli, liegen aber im Frühjahr wie auch im Sommer zwischen der ETa von Sommer- und Winter-Monokulturen. Der Unterschied zwischen Sommer- und Winter-Monokulturen nimmt mit der Mächtigkeit des Bodentyps ab und nähert sich dann dem allgemeinen Verlauf des Standard-Landnutzungstyps Ackerland. Das ETa-Maximum ist auf dem mächtigen Kolluvium-Boden bei den Fruchtfolgen der Modellerweiterung um 24-32% höher als bei dem Standard-Landnutzungstyp, weshalb die Perkolation um 88-93% geringer ist. Auf dem Pelosol erreichen Sommerkulturen ihr Maximum im August nicht, wodurch sich ET<sub>a</sub> (8-12%) und Q<sub>s</sub> (34-42%) von Modellerweiterung und Standard-Landnutzungstyp geringer unterscheiden als auf dem Kolluvium. Auffallend ist auf dem Pararendzina mit dem höchsten Ks-Wert, dass Qs der Winter-Monokultur und der komplexen Fruchtfolgen in den Monaten Juli-August nach der Winterkulturen-Ernte um 55-60% höher ist als bei dem Standard-Landnutzungstyp ist. Während dem Erntezeitpunkt von Winterkulturen ist Q im Durchschnitt um 72% für Winter-Monokulturen und komplexe Fruchtfolgen erhöht, was auf dem Kolluvium und Pelosol (85%) stärker ausgeprägt ist als auf dem Paraendzina (55%). Außerhalb der Vegetationsperiode von Sommerkulturen ist Q allgemein um 55% erhöht und Qs auf dem Pararendzina 15% erhöht, auf dem Kolluvium 15% erniedrigt und auf dem Pelosol 5% erniedrigt. Der Effekt des Klimasignals reduziert besonders im Zeitraum der Pflanzenentwicklung von März bis August die ETa um 6-9%, erhöht Qs relativ gleichmäßig im Jahr um 11-18% und Q besonders im Oktober bis Dezember um 18-23%. Zusammenfassend sind im mittleren Jahresverlauf die markanten Unterschiede zwischen den in der Modellerweiterung berücksichtigten 8 Fruchtfolgen größer als der Klimaeffekt, aber allgemein abhängig von den Bodeneigenschaften.



Abbildung 18: Kerndichte Diagramm zu den Jahrestagen der Phänologie-Stadien (a) Saat und Ernte und (b) maximale Pflanzenentwicklung, die in Pflanzenbedeckung (CC) und Wurzeltiefe (Zr) untergliedert ist. Saat und Ernte werden nicht wie maximale Entwicklung zwischen den zwei Varianten der Modellerweiterung (farbe) untergliedert, weil doy\_dyn feste Saat und Erntezeitpunkte berücksichtigt. Die in der Referenztabelle hinterlegen Jahrestage für die Phänologie-Stadien sind mit vertikalen gestrichelten Linien eingezeichnet.



Abbildung 19: Totale Wasserbilanz im Zeitraum 2006-2020 untergliedert in Böden (Spalten), Modell (Farbe) und Klima-Szenario (Transparenz). Standabweichung zwischen den berücksichtigten Fruchtfolgen in Tabelle 13 ist als Errorbalken bei den Modellerweiterungvarianten angegeben. Wasserbilanzglieder:  $N = Niederschlag, ET = Evapotranspiration, Q_s = Perkolation, \Delta S = Bodenspeicheränderung, Q = Oberflächenabfluss. Die Meteorologischen Daten liegen für den Zeitraum 2006-2020 vor und sind als Variante auf den Klimareferenzzeitraum 1960-90 korrigiert worden.$ 



Abbildung 20: Vergleich des mittleren Jahresverlauf (2006-2020) zwischen dem Standard-Landnutzungstyp Ackerland und den mit der Modellerweiterung doy\_dyn modellierten Fruchtfolgen und Sommer-/ Winter-Monokulturen. Der Jahresverlauf ist untergliedert in die hydrologischen Variablen (Zeilen) Niederschlag (N), aktuelle Evapotranspiration ( $ET_a$ ), Perkolation ( $Q_s$ ) und Oberflächenabfluss (Q) und Böden aus BW (Spalten). Modellierung mit den meteorologische Inputdaten, die auf die Klimareferenzperiode 1960-1990 korrigiert wurden, sind als gestrichelte Linie dargestellt. Der Effekt des Klimasignals zwischen 2006-2020 und der Klimareferenzperiode (1960-90) ist durch die farbige Fläche zwischen den Linientypen dargestellt.

### 4. Diskussion

### 4.1 AWAT-Filter Anwendung mit 10-minütigen Lysimeter Daten

Die Evapotranspiration (ET) wurde über das Lysimeter Gewicht und die Anwendung des AWAT-Filters hergeleitet, der für 1minütige Lysimeter Daten entwickelt und validiert wurde (Peters et al., 2014). Zur Herleitung der ET über das Lysimeter Gewichts wird die Annahme getroffen, das bei dem gegebenen Messintervall Niederschlag (N) und ET nicht gleichzeitig auftreten. Für 5minütige Auflösung wurde der AWAT-Filter erfolgreich für den erweiterten Lysimeterdatensatz aus Reckenholz-Zürich angewendet (Oberholzer et al., 2017). Von der Lysimeter Anlage Reckenholz-Zürich übergebene Lysimeter Daten lagen im Kontext der Masterarbeit aber nur in 10minütiger Auflösung vor. Im Vergleich mit Oberholzer et al., (2017) sind die berechneten ET-Summen für Sommerkulturen während der Vegetationsperiode generell 7% und für Silagemais und Winterraps in 2012 mit windigem Frühjahr bis zu 35% höher. Der ET<sub>a</sub>-Verlauf während der Vegetationsperiode war plausibel und konsistent zwischen Lysimetern mit desselben Anbaukultur, zeigte aber Ausreißer ET>12mm/tag an Tagen mit hoher Sickerwasserrate (Q<sub>s</sub>). Lysimeter Niederschlag war 8.4% höher als der meteorologische Niederschlag und liegt im Unsicherheitsbereich des Mittelwert 7.6 ±5.6% aus Oberholzer et al. (2017), zeigte aber im stürmischen 2012 eine Abweichung von 30% zum meteorologischen Niederschlag. Es ist anzunehmen, dass der AWAT-Filter mit 10minütiger Auflösung das Rauschen durch meteorologischen Einfluss nicht effizient filtern konnte und dadurch die absoluten Werte überschätzt aber der Verlauf dennoch getreu wiedergegeben wurde.

### 4.2 Dynamische Pflanzenentwicklung mit Temperatursummen

Die Anwendung des Temperatursummen-Verfahren ergab für Winterkulturen eine Abweichung vom modellierten zu beobachteten Erntezeitpunkt von mehreren Monaten und für Sommerkulturen ein gesamter Wachstumsstillstand in kalten Jahren. Das ET-Maximum im Frühjahr tritt bei Winterkulturen-Fruchtfolgen 1 Monat früher als bei Sommerkulturen-Fruchtfolgen ein, das die Modellerweiterung zu spät abbildet, weil die modellierte maximale Pflanzenentwicklung zu spät einsetzt. Probleme bei der Pflanzenentwicklungsmodellierung über Wachstumsgradtage bei Temperaturanomalien stellt Liu et al. (2016) fest, die auch den Wachstumsgradtage-Ansatz als erste Variante zur Implementierung einer dynamischen Pflanzenentwicklung in das Oberflächenmodell Noah-Mp wählten. Deshalb wurden wie in den Modellerweiterungen von WaSiM und GWN-BW feste Saat- und Erntezeitpunkte eingeführt. Dadurch wird aber der Einfluss des Klimasignals vernachlässig, der zu einer Verengung und Verschiebung des Zeitraums für Saat und Ernte führt, dass die vorgestellte RoGeR-Modellanwendung für BW und Siebert & Ewert (2012) für Gerste in Deutschland feststellen. Statt die Phänologie durch feste Jahrestage einzugrenzen, kann die Unsicherheit durch die Implementierung von weiteren Umweltfaktoren verbessert werden. Photoperiode (Verhältnis der Länge von Tag zu Nacht) und Winterkälte schützen die Pflanze vor zu frühem Austrieb (Körner & Basler, 2010). Dies kann analog zu Wachstumsgradtagen in Form von Winterruhegradtagen im Pflanzen-Modell berücksichtigt werden (e.g. für Winterweizen in Siebert & Ewert (2012)). Für den Saatzeitpunkt kann statt einer Temperatursumme, die von der Tageslänge und Saatzeitpunkt in der Feldstudie abhängt, das Überschreiten (Sommerkulturen) und Unterschreiten (Winterkulturen) einer pflanzenspezifischen Tagesdurchschnittstemperatur verwendet werden (e.g. van den Hoof et al. (2011)).

### 4.3 Parameter Unsicherheit

Für den Literaturvergleich der parametrisierten Temperatursummen ( $T_{sum}$ ) der Phänologie Stadien in Abbildung 21 wurden folgende Annahmen getroffen, weil in einer landwirtschaftlichen Bonitur mehr Phänologie-Stadien differenziert werden als für die Bestimmung der Pflanzen-Bodenbedeckung (CC) relevant sind: Maximalen Entwicklung bei Stadium (Flowering/tasseling/silking/heading) und LAI > 3.5 (Dardanelli et al., 1997; Hoffmann, 2019); Zerfallsphase bei Reife oder explizit genanntem Zerfallsbeginn und LAI < 3.5 nach maximaler Entwicklung. Allgemein liegen die Literaturwerte in der Reichweite von  $T_{sum}$ , die mit Referenz-Jahrestagen und Klimadaten aus Baden-Württemberg berechnet wurden. Für Wintergetreide-Sorten und Zuckerrübe sind  $T_{sum}$  in der Literatur geringer und für Silage Mais höher. Für Winterzwischenfrucht ist  $T_{sum}$  in zwei Literaturstudien deutlich höher, weil Winterzwischenfrucht allgemein zu unterschiedlichen Zeitpunkten gesät (August-Oktober) und eingearbeitet (März-Mais) wird. Unterschiede in  $T_{sum}$  sind begründet mit der Wahl der Berechnungsformel und Basis-Temperatur (McMaster et al., 1997) und der lokalen Tageslänge und Saatzeitpunkt (Aslam et al., 2017). Deshalb ist die Modellerweiterungs-Parametrisierung nur für BW-Klima und einem durchschnittlichen Anbauverfahren gültig.



Abbildung 21: Literaturvergleich der Temperatursummen  $(T_{sum})$  für die Phänologie-Stadien maximale Entwicklung und Ernte.  $T_{sum}$  wurde mit Referenz-Jahrestage und Temperaturdaten aus Baden-Württemberg (BW) berechnet (Kreise) und mit Literaturwerte (Vierecke) verglichen. Einzelner Kreis ist  $T_{sum}$  in einem Anbaujahr im Zeitraum 1990-2020 bei einer von drei ausgewählten Klimastationen in BW.  $T_{sum}$  wurde ausgehend von der Saat der Ackerfrucht angegeben (häufige Angabe in der Literatur). Weitere parametrisierte Ackerfrüchte sind mit Literaturwerten in Anhang-Abbildung 8 dargestellt. Quellenangaben zum  $T_{sum}$ -Literaturvergleich sind in Anhang-Tabelle 14. gelistet.

Das Wachstum der Wurzeltiefe (RGC) und der Bodenbedeckung (CGC) werden in Abhängigkeit zur Temperatur und Bodenfeuchte berechnet. CGC liegt in der Größenordnung von den Wachstums-Parametern des Aquacrop-Modells (Food Agricultural Organization (FAO), 2012), aus welchem der Wachstum-Ansatz entnommen wurde. RGC liegt ebenfalls in der Größenordnung von Literaturwerten (Anhang-Abbildung 9). Mackay & Barber, 1984 zeigen aber in ihrem Versuch zu Mais, dass das Wurzelwachstum bei optimaler Bodentemperatur und Nährstoffversorgung bis zu vier Mal so hoch wie das durchschnittliche Wurzelwachstum ist. Dies steht im Zusammenhang mit dem Vergleich von Lysimetern derselben Anbaukultur aber unterschiedlicher Stickstoffdüngung. Hier erreichte Lysimeter 2 (130% der empfohlenen Düngemenge) die höchste ET und die tiefste gemessene Bodenfeuchte ( $\theta$ )-Minima in 2017. Die Zunahme der Wassernutzung und Biomasse von Ackerfrüchten durch Wasserversorgung und Stickstoffdüngung ist ein relevanter Umweltfaktor (Ogola et al., 2002), aber nicht in der Modellerweiterung berücksichtig. Deshalb musste der Pflanzen-Koeffizient K<sub>c mid</sub> nach (Oberholzer et al., 2017) wegen des Oasen-Effekts um bis zu 45% für die Lysimeter-Modellierung erhöht werden und verdeutlicht damit die Unsicherheit der allgemeinen Pflanzen-Koeffizienten aus der FAO-Datenbank, die grundlegend in Allen et al. (2005) und Allen & Pereira (2009) diskutiert wird. Des

Weiteren hemmt der Tongehalt das Wurzelwachstum (Tennant, 1976), diese Wachstumshemmnis für die evaluierten Lysimeter nicht relevant aber für Tonböden in BW relevant ist. Der Tongehalt wird in RoGeR zwar für Trockenrisse in der Abflussbildung aber nicht für das Wurzelwachstum berücksichtig.

## 4.3 Einfluss von Ackerfrüchten/Fruchtfolgen auf den Wasserhaushalt,

### Grundwasserneubildung und Abfluss

Allgemein ergab die Evaluierung mit den Lysimeterdaten aus Reckenholz-Zürich eine ETa-Unterschätzung und folglich eine Überschätzung von  $Q_s$  und  $\theta$ . Diese Abweichung zu den beobachteten Lysimeterdaten war auf Lysimetern mit guter gegenüber schlechter Pflanzenentwicklungs-Modellierung (ET<sub>a</sub>: 38%/55%, Q<sub>s</sub>: 64%/147%) und Modellerweiterungs-Varianten gegenüber Standard-Landnutzungstypen (ET<sub>a</sub>: 41%/56%, Q<sub>s</sub>: 88%/151%) geringer. Die Anwendung eines numerischen Modells in Möck et al. (2013) für den Zeitraum 2010 bis 2011 desselben Lysimeter Datensatzes zeigte besonders in der Trockenperiode 2011 auch eine Q<sub>s</sub>-Überschätzung, die in diesen Zeitraum der RoGeR Modellierung bei Sommerkulturen größer war. In 2011 wurde die Pflanzenentwicklung von Zuckerrübe zu kurz modelliert, wodurch die maximale ET<sub>a</sub> nicht eintrat und  $\theta$  und folglich Q<sub>s</sub> wieder anstieg. Bei Winterkulturen wurde das Pflanzenwachstum zwar zu lang berechnet, doch wurde das θ-Minima korrekt und somit auch Qs zufriedenstellend wiedergegeben. In Steinbrich et al. (2020a) und Steinbrich et al. (2018) wurden die Modellierungsergebnisse mit Q<sub>s</sub> von zwei nicht wägbaren Gras-Lysimetern aus Riedholzbach und St. Arnold evaluiert und zeigten mit einer Qs-Unterschätzung von <1% des Niederschlags eine für die Autoren zufriedenstellende Übereinstimmung. Des Weiteren wurde in Steinbrich et al. (2020a) die modellierte  $\theta$  mit Bodenfeuchtemessungen von dem Gras-Lysimeter aus Riedholzbach und 7 weiteren landesweiten BW-Messtandorten evaluiert, unter denen auch ein unbewachsener Ackerstandort eine zufriedenstellende Übereinstimmung ergab. Gute Übereinstimmung zwischen modellierten und gemessenen Q aber hohe Unsicherheiten in der ET<sub>a</sub> Modellierung, ergeben hydrologischen Modellen wie HBV und mHM, die wie die Standard-Landnutzungstypen denselben vereinfachten Ansatz der ET<sub>a</sub> Berechnung als Funktion von  $ET_p$  und  $\theta$  verwenden (Rakovec et al., 2016; Rientjes et al., 2013). Diese  $ET_a$ -Unsicherheiten konnten durch die Modellerweiterung reduziert werden, diese im Vergleich mit den Lysimeterdaten aus Reckenholz-Zürich dennoch groß sind.

In der Zusammenfassung von 23 Bergungsversuchen in Ries et al. (2018) zeigt RoGeR mit den Standard-Landnutzungstypen eine gute Übereinstimmung mit den gemessenen Q für Gras und unbewachsene Ackerstandorte. Der Oberflächenabfluss (Q) ist aber im Vergleich zwischen Modellerweiterung und Standard-Landnutzungstypen bei der Lysimeter-Modellierung ca. 20% und bei der BW-Modellanwendung mit unterschiedlichen Ackerböden ca. 50% höher. Dieser Unterschied wird auf den Zeitraum nach der Ernte zurückgeführt, wenn in der Modellerweiterung die Mächtigkeit des Wurzelbodenspeichers von maximaler Mächtigkeit auf die Evaporationstiefe (15cm) und die maximale Bodenbedeckung auf 0 zurückgesetzt wird. Dadurch verringert sich (1) die potenzielle Infiltrationskapazität vor einen Niederschlagsereignis, die in RoGeR über die Mächtigkeit des ersten von zwei Bodenspeichers definiert ist, und (2) die  $ET_a$ , die parallel zur Pflanzenbodenbedeckung zu und abnimmt. Da die deutschen Niederschlags-Abflussmodelle WaSiM und GWN-BW wie auch andere Speichermodelle (e.g. Bai et al., 2018) in ihrer Erweiterung zur dynamische Vegetationsentwicklung kein dynamisch wachsenden Bodenspeicher berücksichtigen, ist kein Literaturvergleich möglich.

ET beeinflusst das über die Wurzeltiefe definierte Wasservolumen, das in der Modellerweiterung in Abhängigkeit zur Pflanzentwicklung dynamisch berechnet wird. Die Wassernutzungs-Effizient der Pflanze nimmt mit der Wurzellänge ab, weshalb häufig in deterministischen Modellen wie HYDRUS-1D (Vogel et al., 1996), WAVE (Vanclooster et al., 1995) und DAISY (Hansen et al., 1990) die Wassernutzung abhängig zur Bodentiefe differenziert ist. Hier wird die Wasseraufnahme durch Wurzeln über einen Sinkterm in der Richards Gleichung einbezogen (Wu et al., 1999), dass in dem 2-Schicht Modell RoGeR nicht möglich ist. Relevante Modellierungsunterschiede zwischen ein 2-Schicht Modell und einem tiefendifferenzierten Modell sind in der Pflanzenentwicklung zu erwarten, wenn die Pflanze während einer Trockenheit ihre Wasseraufnahme nicht in tiefere Wurzelbereiche verlagern kann (Guswa et al., 2002). Da während der Dürre 2011, 2015, 2017 die gemessene Bodenfeuchte ( $\theta$ ) bis in 90cm Bodentiefe absank und somit die Ackerfrüchte ihre Wasseraufnahme in tiefere Wurzelbereiche verlagern konnten, ist kein Einfluss der Vereinfachung der Bodenfeuchte durch einen Bodenspeicher auf das Pflanzenwachstum und somit auf die Transpirationsleistung von Ackerfrüchten anzunehmen. Oberholzer et al. (2017) stellt aber für den erweiterten Lysimeterdatensatz aus Reckenholz-Zürich fest, dass zwei Drittel der Wassernutzung in den ersten 30cm Bodentiefe stattfindet. Zudem zeigt der Vergleich mit Literaturstudien zu der Wassernutzung von Ackerfrüchten bei gegebener Wurzeltiefe (Anhang-Tabelle 15), dass bis 0.5m (Zuckerrübe) - 0.7m (Winterweizen) Bodentiefe 100% und bei maximaler Wurzeltiefe ( $Z_{r max}$ ) nur noch 20% des verfügbaren Wassers durch Pflanzen genutzt wird. Auch die Wassernutzung bei Mais von 150% in den oberen 50cm (Cabelguenne & Debaeke, 1998) verdeutlich, dass sich die Transpirationsleistung von Ackerfrüchten auf dem Oberboden fokussiert und dort auch festgebundenes Wasser entziehen kann. Dies steht im Zusammenhang mit  $\theta$  in 10, 30, 60 und 90cm, die eine doppelte so hohe  $\theta$ -Variabilität in 10cm Bodentiefe zeigte.

In der Modellanwendung mit Klima & Boden aus BW zeigte sich im durchschnittlichen Jahresverlauf auf dem mächtigen Boden 26 ein deutlicher Unterschied zwischen dem Standard-Landnutzungstyp für Ackerland und der Modellerweiterung, der auf den anderen Böden mit geringer Mächtigkeit schwächer ausgeprägt ist. Hier ist die  $ET_a$  bei der Modellerweiterung in der maximalen Entwicklung bis zu 32% höher, wodurch Perkolaton ( $Q_s$ ) bis 93% geringer war. Auch in Gayler et al. (2014) wird durch die Implementierung des dynamischen Wurzelwachstum in das tiefendifferenzierte Energie- und Wasserbilanzmodell Noah-WB festgestellt, dass gemessene Energieflüsse und Bodenfeuchte auf Ackerflächen in BW (Kraichgau und schwäbische Alb) besser abgebildet wurden. Hier war ein sensitiver Parameter die maximale Wurzeltiefe, die durch die Bodenmächtigkeit beschränkt ist und durch die häufig ungenaue Angabe zur Bodenmächtigkeit eine relevante Parameter-Unsicherheit einbrachte. Beide Modellanwendungen zeigen für Klima und Boden aus BW, dass Wurzelwachstum hydrologische Variablen beeinflusst und für eine flächenmäßige Modellierung von BW die Genauigkeit der Angaben zur Bodenmächtigkeit die Unsicherheit des Einflusses von Ackerfrüchten/Fruchtfolgen auf den Wasserhaushalt bestimmt.

### 4.4 Einfluss von Ackerfrüchten/Fruchtfolgen im Vergleich zum Klimawandel Allgemein ergaben Modellkoppelungen von hydrologischen und landwirtschaftlichen Modellen eine höhere Genauigkeit zu ET und $\theta$ (Siad et al., 2019; Y. Zhang et al., 2021). Hierbei sind berücksichtigte Fruchtfolgen häufig vereinfacht (e.g. nur Winter und Sommer Monokulturen), weil empirische Langzeit Fruchtfolgen Daten zu hochaufgelösten und komplexen Fruchtfolgen fehlen. Deshalb beschäftigt sich die aktuelle Forschung mit Methoden der Integrierung von komplexeren Fruchtfolgen, um den Effekt der Vereinfachung zu quantifizieren (Sietz et al., 2021). Erst als nächsten Schritt ist der Vergleich des Einflusses von Ackerfrüchten und Fruchtfolgen zu anderen Einflussfaktoren wie den Klimawandel möglich, der allgemein zu einer sich verändernden Vegetation und Landnutzung (Gan et al., 2021; Piao et al., 2010; Rasouli et al., 2019; Tomer & Schilling, 2009) aber nicht im direkten Vergleich zu dem Einfluss von Ackerfrüchten und Fruchtfolgen in der Literatur diskutiert wird. Hierzu gibt die Modellanwendung der RoGeR-Modellerweiterung mit 8 Fruchtfolgen und Klima & Bodendaten aus BW erste Hinweise, dass auf mächtigen Böden der Unterschied in ETa und Qs zwischen einem vereinfachten Standard-Landnutzungstyp und Fruchtfolgen größer als der Effekt des Klimasignals zwischen 1960-1990 und 2006-2020 ist.

### 5. Schlussfolgerung

Diese Masterarbeit stellt eine Modellerweiterung für das Niederschlags-Abfluss Modell RoGeR vor, die den Einfluss von Ackerfrüchten und Fruchtfolgen im Landnutzungstyp Ackerland implementiert. Hier bildet das dynamische Wachstum von Wurzelbodenspeicher und Bodenbedeckung die Grundlage für einen neuen Evapotranspirations-Ansatz, der den Einfluss der Pflanzenentwicklung auf Evaporation und Transpiration berücksichtig. Allgemein war in der Modellevaluierung mit wägbaren Lysimetern aus Reckenholz-Zürich die Modellgüte der Modellerweiterung gegenüber einem vereinfachten Standard-Landnutzungstyp besser, besonders wenn die Pflanzenentwicklung gut modelliert wurde. Die dynamische Berechnung der Pflanzenentwicklung mit dem Temperatursummen-Ansatz zeigte jedoch Probleme und Limitationen, weshalb insgesamt die Modellgüte der Modellerweiterung niedrig war. Ein weiterer Grund liegt in der Aufbereitung des Lysimeter Gewichts, dessen 10-minütige Auflösung sich als zu grob für eine effiziente AWAT-Filterung des meteorologischen Einflusses herausstellte. Weiterführend gab die Modellanwendung der evaluierten RoGeR-Modellerweiterung mit 8 Fruchtfolgen und Klima & Bodendaten aus BW erste Hinweise, dass auf mächtigen Böden der Unterschied in aktueller Evapotranspiration (ET<sub>a</sub>) und Perkolation (Q<sub>s</sub>) zwischen einem vereinfachten Standard-Landnutzungstyp und Fruchtfolgen größer als der Effekt des Klimasignals zwischen 1960-1990 und 2006-2020 ist.

Insgesamt wurden wesentliche Unterschiede in Fruchtfolgen festgestellt, die durch einen vereinfachten Standard-Landnutzungstyp nicht abgebildet werden. Dadurch verdeutlichen die Ergebnisse die Relevanz des Einflusses von Ackerfrüchten und Fruchtfolgen und die Chance durch die Implementierung von dynamischen Pflanzenwachstum auf Ackerland hydrologische Variablen besser abzubilden und Prozesse zu verstehen. Für die Evaluierung neuer Modellansätze zu Fruchtfolgen sind wägbare Lysimeter Daten mit Fruchtfolgen geeignet, können aber trotz aufwendiger Aufbereitung durch meteorologischen Einfluss unsicher sein. Weitere Unsicherheiten sind in den Parametern einfacher Pflanzenmodellen enthalten, weil wegen den hohen Parametrisierung-Aufwand relevante Einflussfaktoren wie Boden-Nährstoffgehalt oder Pflanzen-Winterruhe nicht einbezogen sind. Auf Böden mit großer Mächtigkeit erreichen Pflanzen ihre maximale Wurzeltiefe und Transpiration, weshalb die Bodenmächtigkeit den Einfluss von Ackerfrüchten steuert und deshalb genau angegeben werden muss.

Hydrologische Variablen reagieren sensitive zu der Implementierung der Pflanzenentwicklung von Ackerfrüchten und Fruchtfolgen, weshalb die Unsicherheit in der Pflanzenentwicklungs-Modellierung in die hydrologische Auswertung mitaufgenommen werden muss. Hierzu bedarf es für die weitere Evaluierung der Unsicherheiten mit den wägbaren Lysimeterdaten aus Reckenholz-Zürich einen verbesserten Ansatz oder höher aufgelöste Lysimeter Daten, um den meteorologischen Einfluss besser zu filtern. Weitere Überlegungen sind zum unsicheren Temperatursummen-Ansatz notwendig, um einerseits die Pflanzenentwicklungs-Modellierung robust gegenüber Temperaturanomalien zu gestalten und andererseits die Veränderung der Vegetationsperiode durch den Klimawandel nicht durch feste Saat und Ernte-Zeitpunkte zu vernachlässigen. Ausgehend von der modellierten Pflanzen-Bodenbedeckung besteht die Möglichkeit die Verschlämmungsneigung des Ackers im Kontext von Starkregen zu berücksichtigen. Die weiterführende Modellanwendung der RoGeR-Modellerweiterung für ganz Baden-Württemberg kann im Vergleich zu den aktuellen Modellierungsdaten den Einfluss der Ackerfrüchte und Fruchtfolgen quantifizieren und damit einen wichtigen Beitrag in der aktuellen agro-hydrologischen Forschung leisten.

### 6. Literaturverzeichnis

- Abdi, H., & Williams, L. J. (2010). Tukey's Honestly Significant Difference (HSD) Test. *Encyclopedia of Research Design*.
- Allen, R. G. (2011). Skin layer evaporation to account for small precipitation events-An enhancement to the FAO-56 evaporation model. *Agricultural Water Management*, 99(1), 8–18. https://doi.org/10.1016/j.agwat.2011.08.008
- Allen, R. G., & Pereira, L. S. (2009). Estimating crop coefficients from fraction of ground cover and height. *Irrigation Science*, 28(1), 17–34. https://doi.org/10.1007/s00271-009-0182-z
- Allen, R. G., Pereira, L. S., Raes, D., & Smith, M. (1998). *Crop evapotranspiration: guidelines for computing crop water requirements*. Food and Agriculture Organization of the United Nations.
- Allen, R. G., Pereira, L. S., Smith, M., Raes, D., & Wright, J. L. (2005). FAO-56 Dual Crop Coefficient Method for Estimating Evaporation from Soil and Application Extensions. *Journal* of Irrigation and Drainage Engineering, 131(1), 2–13. https://doi.org/10.1061/(asce)0733-9437(2005)131:1(2)
- Anar, M. J., Lin, Z., Hoogenboom, G., Shelia, V., Batchelor, W. D., Teboh, J. M., Ostlie, M., Schatz, B. G., & Khan, M. (2019). Modeling growth, development and yield of Sugarbeet using DSSAT. *Agricultural Systems*, *169*, 58–70. https://doi.org/10.1016/j.agsy.2018.11.010
- Andales, A. A., Bartlett, A. C., Bauder, T. A., & Wardle, E. M. (2020). Adapting a cloud-based irrigation scheduler for sugar beets in the high plains. *Applied Computational Electromagnetics Society Journal*, 36(4), 479–488. https://doi.org/10.13031/aea.13902
- Aslam, M. A., Ahmed, M., Stöckle, C. O., Higgins, S. S., Hassan, F. ul, & Hayat, R. (2017). Can Growing Degree Days and Photoperiod Predict Spring Wheat Phenology? *Frontiers in Environmental Science*, 5. https://doi.org/10.3389/fenvs.2017.00057
- Bai, P., Liu, X., Zhang, Y., & Liu, C. (2018). Incorporating vegetation dynamics noticeably improved performance of hydrological model under vegetation greening. *Science of the Total Environment*, 643, 610–622. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.06.233
- Baraibar, B., Murrell, E. G., Bradley, B. A., Barbercheck, M. E., Mortensen, D. A., Kaye, J. P., & White, C. M. (2020). Cover crop mixture expression is influenced by nitrogen availability and growing degree days. *PLoS ONE*, 15(7 July). https://doi.org/10.1371/journal.pone.0235868
- Bauer, A., Frank, A. B., & Black, A. L. (1984). Estimation of Spring Wheat Leaf Growth Rates and Anthesis from Air Temperature'. *Agronomy Journal*, *76*, 829–836.
- Berry, S. L., Farquhar, G. D., & Roderick, M. L. (2006). Co-Evolution of Climate, Soil and Vegetation. *Encyclopedia of Hydrological Sciences*. https://doi.org/10.1002/0470848944.hsa011
- Bijanzadeh, E., Barati, V., Emam, Y., & Pessarakli, M. (2019). Sowing date effects on dry matter remobilization and yield of triticale (Triticosecale wittmack) under late season drought stress. *Journal of Plant Nutrition*, 42(7), 681–695. https://doi.org/10.1080/01904167.2019.1568463
- Bootsma, A., Anderson, D., & Gameda, S. (2004). Potential impacts of climate change on agroclimatic indices in southern regions of Ontario and Quebec. Technical Bulletin ECORC Contribution, 03-284, 69-92.
- Borg, H., & Grimes, D. W. (1986). Depth Development of Roots with Time: An Empirical Description.

- Bouchet, A. S., Laperche, A., Bissuel-Belaygue, C., Snowdon, R., Nesi, N., & Stahl, A. (2016). Nitrogen use efficiency in rapeseed. A review. Agronomy for Sustainable Development, 36(2). Springer-Verlag France. https://doi.org/10.1007/s13593-016-0371-0
- Boyd, N. S., Brennan, E. B., Smith, R. F., & Yokota, R. (2009). Effect of seeding rate and planting arrangement on rye cover crop and weed growth. *Agronomy Journal*, *101*(1), 47–51. https://doi.org/10.2134/agronj2008.0059
- Brant, V., Krofta, K., Kroulík, M., Zábransky, P., Prochazka, P., & Pokorny, J. (2020). Distribution of root system of hop plants in hop gardens with regular rows cultivation. *Plant, Soil and Environment*, 66(7), 317–326. https://doi.org/10.17221/672/2019-PSE
- Bremicker, M. (2000). Das Wasserhaushaltsmodell LARSIM: Modellgrundlagen und Anwendungsbeispiele. Freiburger Schriften zur Hydrologie - Institut für Hydrologie, 11, p. 119
- Brown, K. F., & Biscoe, P. v. (1985). Fibrous root growth and water use of sugar beet. *The Journal of Agricultural Science*, *105*(3). https://doi.org/10.1017/S0021859600059591
- Brown, K. F., Messem, A. B., Dunham, R. J., & Biscoe, P. v. (1987). Effect of drought on growth and water use of sugar beet. *The Journal of Agricultural Science*, 109(3). https://doi.org/10.1017/S0021859600081636
- Burger, M., Dumlao, M. R., Wang, J., Moradi, B. A., Horwath, W. R., & Silk, W. K. (2017). Cover crop development related to nitrate uptake and cumulative temperature. *Crop Science*, 57(2), 971–982. https://doi.org/10.2135/cropsci2016.09.0741
- Cabelguenne, M., & Debaeke, P. (1998). Experimental determination and modelling of the soil water extraction capacities of crops of maize, sunflower, soya bean, sorghum and wheat. *Plant and Soil*, 202, 175–192. https://doi.org/https://doi.org/10.1023/A:1004376728978
- Canadell, J., Jackson, R. B., Ehleringer, J. B., Mooney, H. A., Sala, O. E., & Schulze, E. D. (1996). Maximum rooting depth of vegetation types at the global scale. *Oecologia*, *108*(4), 583–595.
- Christensen, J. R. (1947). Root Studies. XI. Raspberry Root Systems. *Journal of Pomology and Horticultural Science*, 23(4), 218–226. https://doi.org/10.1080/03683621.1947.11513671
- Christiansen, J. S., Thorup-Kristensen, K. ., & Kristensen, H. L. (2006). Root development of beetroot, sweet corn and celeriac, and soil N content after incorporation of green manure. *The Journal of Horticultural Science and Biotechnology*, 81(5), 831–838. https://doi.org/10.1080/14620316.2006.11512146
- Coker, E. G. (1958). The Root Development of Black Currants Under Straw Mulch and Clean Cultivation. *Journal of Horticultural Science*, *33*(1), 21–28. https://doi.org/10.1080/00221589.1958.11513910
- Cross, H. Z., & Zuber, M. S. (1972). Prediction of Flowering Dates in Maize Based on Different Methods of Estimating Thermal Units 1. Agronomy Journal, 64(3), 351-355.
- d'Andrimont, R., Taymans, M., Lemoine, G., Ceglar, A., Yordanov, M., & van der Velde, M. (2020). Detecting flowering phenology in oil seed rape parcels with Sentinel-1 and -2 time series. *Remote Sensing of Environment*, 239. https://doi.org/10.1016/j.rse.2020.111660
- Dardanelli, J. L., Bachmeier, O. A., Sereno, R., & Gil, R. (1997). Field Crops Research Rooting depth and soil water extraction patterns of different crops in a silty loam Haplustoll. *Field Crops Research*, *54*, 29–38. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0378-4290(97)00017-8

- Davidson, H. R., & Campbell, C. A. (1983). THE EFFECT OF TEMPERATURE, MOISTURE AND NITROGEN ON THE RATE OF DEVELOPMENT OF SPRING WHEAT AS MEASURED BY DEGREE DAYS. Can. J. Plant Sci., 63, 833. https://doi.org/https://doi.org/10.4141/cjps83-106
- Davitaya, F. F. (1965). A method of predicting heat supply and duration of the growth period. . *Agronomy Journal*, 2(2), 109–119.
- Deutscher Wetter Dienst (DWD). (2020). Phänologische Jahresstatistik. Zuletzt aufgerufen am 10.09.2021, https://www.dwd.de/DE/leistungen/phaeno\_sta/phaenosta.html
- Devia, G. K., Ganasri, B. P., & Dwarakish, G. S. (2015). A Review on Hydrological Models. *Aquatic Procedia*, 4, 1001–1007. https://doi.org/10.1016/j.aqpro.2015.02.126
- Die Landwirtschaft. (2006). *Pflanzliche Erzeugung Lehrbuch für Landwirtschaftsschulen* (M. Munzert & J. Frahm, Eds.; 1st ed.). München: BLV Buchverlag GmbH & Co. KG.
- Dofing, S., Karlsson, M., Exp Stn, F., & Fireweed, E. (1993). Growth and Development of Uniculm and Conventional-Tillering Barley Lines. *Agronomy Journal*, 85(1), 58-61.
- Dolciotti, I., Mambelli, S., Grandi, S., & Venturi, G. (1998). Comparison of two Sorghum genotypes for sugar and fiber production. *Industrial Crops and Products*, 7(2-3), 265-272.
- Donohue, R. J., Roderick, M. L., & McVicar, T. R. (2010). Can dynamic vegetation information improve the accuracy of Budyko's hydrological model? *Journal of Hydrology*, *390*(1–2), 23–34. https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2010.06.025
- Duan, J., Liu, Y.-J., Yang, J., Tang, C.-J., & Shi, Z.-H. (2020). Role of groundcover management in controlling soil erosion under extreme rainfall in citrus orchards of southern China. *Journal of Hydrology*, 582. https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2019.124290
- Durrant, M. J., Love, B. J. G., Messem, A. B., & Draycott, A. P. (1973). Growth of crop roots in relation to soil moisture extraction. *Ann. Appl. Bid*, 74, 387–394. https://doi.org/10.1111/j.1744-7348.1973.tb07759.x
- Edey, S. N. (1977). Growing degree-days and crop production in Canada. *Publication Agriculture Canada*, 1635.
- Ehlers, W., & Goss, M. (2003). Water Dynamics in Plant Production. CABI Publishing.
- Er-Raki, S., Bouras, E., Rodriguez, J. C., Watts, C. J., Lizarraga-Celaya, C., & Chehbouni, A. (2021). Parameterization of the AquaCrop model for simulating table grapes growth and water productivity in an arid region of Mexico. *Agricultural Water Management*, 245. https://doi.org/10.1016/j.agwat.2020.106585
- Estel, S., Kuemmerle, T., Levers, C., Baumann, M., & Hostert, P. (2016). Mapping cropland-use intensity across Europe using MODIS NDVI time series. *Environmental Research Letters*, *11*(2). https://doi.org/10.1088/1748-9326/11/2/024015
- Fatichi, S., Vivoni, E. R., Ogden, F. L., Ivanov, V. Y., Mirus, B., Gochis, D., Downer, C. W., Camporese, M., Davison, J. H., Ebel, B., Jones, N., Kim, J., Mascaro, G., Niswonger, R., Restrepo, P., Rigon, R., Shen, C., Sulis, M., & Tarboton, D. (2016). An overview of current applications, challenges, and future trends in distributed process-based models in hydrology. *Journal of Hydrology*, 537. https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2016.03.026

- Food Agricultural Organization (FAO). (2012). *Aqua Crop Version 4.0 Reference Manual, Annex 1*. Zuletzt aufgerufen am 30.08.2021, http://www.fao.org/fileadmin/user upload/faowater/docs/AquaCropV40Annexes.pdf
- Gabrielle, B., Denoroy, P., Gosse, G., Justes, E., & Andersen, M. N. (1998). A model of leaf area development and senescence for winter oilseed rape. In *Field Crops Research*, 57.
- Gan, G., Liu, Y., & Sun, G. (2021). Understanding interactions among climate, water, and vegetation with the Budyko framework. *Earth-Science Reviews*, 212. https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2020.103451
- Gayler, S., Wöhling, T., Grzeschik, M., Ingwersen, J., Wizemann, H. D., Warrach-Sagi, K., Högy, P., Attinger, S., Streck, T., & Wulfmeyer, V. (2014). Incorporating dynamic root growth enhances the performance of Noah-MP at two contrasting winter wheat field sites. *Water Resources Research*, 50(2), 1337–1356. https://doi.org/10.1002/2013WR014634
- Gerten, D., Schaphoff, S., Haberlandt, U., Lucht, W., & Sitch, S. (2004). Terrestrial vegetation and water balance—hydrological evaluation of a dynamic global vegetation model. *Journal of Hydrology*, 286(1–4). https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2003.09.029
- Ghamarnia, H., Miri, E., & Ghobadei, M. (2014). Determination of water requirement, single and dual crop coefficients of black cumin (Nigella sativa L.) in a semi-arid climate. *Irrigation Science*, *32*(1), 67–76. https://doi.org/10.1007/s00271-013-0412-2
- Gilmore, J. E. C., & Rogers, J. S. (1958). Heat units as a method of measuring maturity in corn 1. *Agronomy Journal*, *34*(5), 611–615.
- Greenwood, D. J., Gerwitz, A., Stone, A., & Barnes, A. (1982). Root development of vegetable crops. *Plant and Soil*, 68(1), 75–96.
- Gregory, P. (1994). Root growth and activity. In K. Boote, T. Sinclair, & G. Paulsen (Eds.), *'Physiology and determination of crop yield'*. (pp. 65–93). The American Society of Agronomy, Crop Science Society of America, and Soil Science Society of America.
- Grzesiak, M. T., Marcińska, I., Janowiak, F., Rzepka, A., & Hura, T. (2012). The relationship between seedling growth and grain yield under drought conditions in maize and triticale genotypes. *Acta Physiologiae Plantarum*, 34(5), 1757–1764. https://doi.org/10.1007/s11738-012-0973-3
- Gudera, T., & Morhard, A. (2015). Hoch aufgelöste Modellierung des Bodenwasserhaushalts und der Grundwasserneubildung mit GWN-BW. *Hydrol Wasserbewirtsch*, 9(3), 205–216.
- Gupta, H. v., Kling, H., Yilmaz, K. K., & Martinez, G. F. (2009). Decomposition of the mean squared error and NSE performance criteria: Implications for improving hydrological modelling. *Journal of Hydrology*, *377*(1–2). https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2009.08.003
- Guswa, A. J., Celia, M. A., & Rodriguez-Iturbe, I. (2002). Models of soil moisture dynamics in ecohydrology: A comparative study. *Water Resources Research*, *38*(9), 5-1-5–15. https://doi.org/10.1029/2001wr000826
- Hansen, S., Jensen, H. E., Nielsen, N. E., & Svendsen, H. (1990). Daisy: Soil Plant Atmosphere System Model. *IN: NPO Report, A10.*
- Heng, L. K., Hsiao, T., Evett, S., Howell, T., & Steduto, P. (2009). Validating the FAO aquacrop model for irrigated and water deficient field maize. *Agronomy Journal*, 101(3), 488–498. https://doi.org/10.2134/agronj2008.0029xs

- Hoffmann, C. M. (2019). Importance of canopy closure and dry matter partitioning for yield formation of sugar beet varieties. *Field Crops Research*, 236, 75–84. https://doi.org/10.1016/j.fcr.2019.03.013
- Hofmann, B., & Christen, O. (2007). Effect of sowing date and genotype on the yield, yield formation and root development of winter oilseed rape. . *N Proceedings of the 12th International Rapeseed Congress, Wuhan, China*, 139–142.
- Holen, C. D., & Dexter, A. G. (1997) A growing degree day equation for early sugarbeet leaf stages. IN: Sugarbeet Extension Reports, Sugarbeet Research and Extension Board of Minnesota and North Dakota, 27, 152–157.
- Hölting, B., & Coldewey, W. G. (2013). *Hydrogeologie*. Heidelberg: Spektrum Akademischer Verlag. https://doi.org/10.1007/978-3-8274-2354-2
- Howell, T. A. (2001). Enhancing Water Use Efficiency in Irrigated Agriculture. *Agronomy Journal*, 93(2), 281–289.
- Iannucci, A., Terribile, M. R., & Martiniello, P. (2008). Effects of temperature and photoperiod on flowering time of forage legumes in a Mediterranean environment. *Field Crops Research*, 106(2), 156–162. https://doi.org/10.1016/j.fcr.2007.11.005
- Idso, S., Jackson, R., & Reginato, R. (1978). Extending the 'degree day' concept of plant phenological development to include water stress effects. *Ecology*, *59*, 431–433.
- Jackson L. E., & Stivers L. J. (1993). Root Distribution of Lettuce under Commercial Production Implications for Crop Uptake of Nitrogen. *Biological Agriculture & Horticulture*, 9(3), 273–293.
- Jamont, M., Piva, G., & Fustec, J. (2013a). Sharing N resources in the early growth of rapeseed intercropped with faba bean: Does N transfer matter? *Plant and Soil*, *371*(1–2), 641–653. https://doi.org/10.1007/s11104-013-1712-2
- Jamont, M., Piva, G., & Fustec, J. (2013b). Sharing N resources in the early growth of rapeseed intercropped with faba bean: does N transfer matter? *Plant and Soil*, *371*(1–2). https://doi.org/10.1007/s11104-013-1712-2
- Jasechko, S., Sharp, Z. D., Gibson, J. J., Birks, S. J., Yi, Y., & Fawcett, P. J. (2013). Terrestrial water fluxes dominated by transpiration. *Nature*, 496(7445). https://doi.org/10.1038/nature11983
- Jia, Y., Shen, S., Niu, C., Qiu, Y., Wang, H., & Liu, Y. (2011). Coupling crop growth and hydrologic models to predict crop yield with spatial analysis technologies. *Journal of Applied Remote Sensing*, 5(1). https://doi.org/10.1117/1.3609844
- Jones, J. W., Hoogenboom, G., Porter, C. H., Boote, K. J., Batchelor, W. D., Hunt, L. A., Wilkens, P. W., Singh, U., Gijsman, A. J., & Ritchie, J. T. (2003). The DSSAT cropping system model. *European Journal of Agronomy*, 18(3–4), 235–265. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S1161-0301(02)00107-7
- Jungers, J. M., Frahm, C. S., Tautges, N. E., Ehlke, N. J., Wells, M. S., Wyse, D. L., & Sheaffer, C. C. (2018). Growth, development, and biomass partitioning of the perennial grain crop Thinopyrum intermedium. *Annals of Applied Biology*, 172(3), 346–354. https://doi.org/10.1111/aab.12425
- Juskiw, P. E., Jame, Y., & Kryzanowski, L. (2001). Phenological Development of Spring Barley in a Short-Season Growing Area. Agronomy Journal, 93(2). https://doi.org/10.2134/agronj2001.932370x

- Kalma, J. D., McVicar, T. R., & McCabe, M. F. (2008). Estimating land surface evaporation: A review of methods using remotely sensed surface temperature data. In *Surveys in Geophysics* (Vol. 29, Issues 4–5, pp. 421–469). https://doi.org/10.1007/s10712-008-9037-z
- Keating, B. A., Carberry, P. S., Hammer, G. L., Probert, M. E., Robertson, M. J., Holzworth, D., Huth, N. I., Hargreaves, J. N. G., Meinke, H., Hochman, Z., Mclean, G., Verburg, K., Snow, V., Dimes, J. P., Silburn, M., Wang, E., Brown, S., Bristow, K. L., Asseng, S., ... Smith, C. J. (2003). An overview of APSIM, a model designed for farming systems simulation. *European Journal of Agronomy*, *18*(3–4), 267–288. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S1161-0301(02)00108-9
- Kirkegaard, J. A., & Lilley, J. M. (2007). Root penetration rate A benchmark to identify soil and plant limitations to rooting depth in wheat. *Australian Journal of Experimental Agriculture*, 47(5), 590–602. https://doi.org/10.1071/EA06071
- Kollas, C., Kersebaum, K. C., Nendel, C., Manevski, K., Müller, C., Palosuo, T., Armas-Herrera, C. M., Beaudoin, N., Bindi, M., Charfeddine, M., Conradt, T., Constantin, J., Eitzinger, J., Ewert, F., Ferrise, R., Gaiser, T., Cortazar-Atauri, I. G. de, Giglio, L., Hlavinka, P., ... Wu, L. (2015). Crop rotation modelling—A European model intercomparison. *European Journal of Agronomy*, 70. https://doi.org/10.1016/j.eja.2015.06.007
- Körner, C., & Basler, D. (2010). Phenology Under Global Warming. *Science*, 327(5972). https://doi.org/10.1126/science.1186473
- Kristensen, H. L., & Thorup-Kristensen K. (2002). Root depth and nitrogen uptake from deep soil layers in organic vegetable production A preliminary study. *Proceedings of the ISHS Workshop Towards an Ecologically Sound Fertilisation in Field Vegetable Production*, 571, 203–208.
- Kristensen, H. L., & Thorup-Kristensen, K. (2004). Uptake of N-15 labeled nitrate by root systems of sweet corn, carrot and white cabbage from 0.2-2.5 meters depth. *Plant and Soil*, 265(1–2), 93– 100. https://doi.org/10.1007/s11104-005-0696-y
- Kristensen, H. L., & Thorup-Kristensen, K. (2007). Effects of vertical distribution of soil inorganic nitrogen on root growth and subsequent nitrogen uptake by field vegetable crops. *Soil Use and Management*, 23, 338–347. https://doi.org/10.1111/j.1475-2743.2007.00105.x
- Kutschera, L. (1960). *Wurzelatlas mitteleuropaischer Ackerunkrauter und Kulturpflanzen: 1. Band.* Frankfurt am Main: DLG-Verlag.
- Kutschera, L., Lichtenegger, E., & Sobotik, M. (2009). Wurzelatlas der Kulturpflanzen gemässigter Gebiete mit Arten des Feldgemüsebaues: 7. Band. Frankfurt am Main: DLG-Verlag.
- Landesamt für Geologie, R. und B. (LGRB). (2021, August). *LGRB-Kartenviewer. Online-GIS Anwendung mit Karten zu Bodenkunde und Hydrogeologie.* Zuletzt aufgerufen am 1.09.2021, https://maps.lgrb-bw.de/
- Lauzon, J., Tremblay, G. F., Bélanger, G., Seguin, P., Lajeunesse, J., & Gervais, R. (2019). Alfalfa and timothy nutritive value in contrasting agroclimatic regions. *Agronomy Journal*, 111(3), 1371–1380. https://doi.org/10.2134/agronj2018.10.0634
- Legendre, P., & Legendre, L. (2013). Numerical Ecology. 3. Band. Amsterdam: Elsevier Science.
- Leister, H., Steinrich, A., Schütz, T., & Weiler, M. (2018). Wie kann die hydrologische Komplexität von Städten hinreichend in einem Wasserhaushaltsmodell abgebildet werden? Forum Für Hydrologie Und Wasserbewirtschaftung, 38, 227– 235.

- Liu, X., Chen, F., Barlage, M., Zhou, G., & Niyogi, D. (2016). Noah-MP-Crop: Introducing dynamic crop growth in the Noah-MP land surface model. *Journal of Geophysical Research*, 121(23), 13,953-13,972. https://doi.org/10.1002/2016JD025597
- Liu, X., Xu, C., Zhong, X., Li, Y., Yuan, X., & Cao, J. (2017). Comparison of 16 models for reference crop evapotranspiration against weighing lysimeter measurement. *Agricultural Water Management*, 184, 145–155. https://doi.org/10.1016/j.agwat.2017.01.017
- Mackay, A. D., & Barber, S. A. (1984). Soil Temperature Effects on Root Growth and Phosphorus Uptake by Corn 1. Soil Science Society of America Journal, 48(4), 818–823. https://doi.org/https://doi.org/10.2136/sssaj1984.03615995004800040024x
- Malik, A., Shakir, A. S., Ajmal, M., Khan, M. J., & Khan, T. A. (2017a). Assessment of AquaCrop Model in Simulating Sugar Beet Canopy Cover, Biomass and Root Yield under Different Irrigation and Field Management Practices in Semi-Arid Regions of Pakistan. *Water Resources Management*, 31(13), 4275–4292. https://doi.org/10.1007/s11269-017-1745-z
- Malik, A., Shakir, A. S., Ajmal, M., Khan, M. J., & Khan, T. A. (2017b). Assessment of AquaCrop Model in Simulating Sugar Beet Canopy Cover, Biomass and Root Yield under Different Irrigation and Field Management Practices in Semi-Arid Regions of Pakistan. Water Resources Management, 31(13). https://doi.org/10.1007/s11269-017-1745-z
- Manevski, K., Børgesen, C. D., Andersen, M. N., & Kristensen, I. S. (2015). Reduced nitrogen leaching by intercropping maize with red fescue on sandy soils in North Europe: a combined field and modeling study. *Plant and Soil*, 388(1–2), 67–85. https://doi.org/10.1007/s11104-014-2311-6
- Manfreda, S., Fiorentino, M., & Iacobellis, V. (2005). DREAM: a distributed model for runoff, evapotranspiration, and antecedent soil moisture simulation. *Advances in Geosciences*, *2*, 31–39. https://doi.org/https://doi.org/10.5194/adgeo-2-31-2005
- McMaster, G. S. (2005). Phytomers, phyllochrons, phenology and temperate cereal development. In *Journal of Agricultural Science*, 143 (2–3), 137–150. https://doi.org/10.1017/S0021859605005083
- Mcmaster, G. S., & Smika, D. E. (1988). ESTIMATION AND EVALUATIONOF WINTER WHEAT PHENOLOGYINTHECENTRALGREATPLAINS, *Agricultural and Forest Meteorology*, 43.
- Mcmaster, G. S., Wilhelm, W., & Morgan, J. A. (1992). Simulating winter wheat shoot apex phenology, *Agricultural Science*, 119(1), 1-12.
- McMaster, G. S., & Wilhelm, W. W. (2003). Phenological responses of wheat and barley to water and temperature: Improving simulation models. *Journal of Agricultural Science*, *141*(2), 129–147. https://doi.org/10.1017/S0021859603003460
- McMaster, G. S., Wilhelm, W. W., & Frank, A. B. (2005). Developmental sequences for simulating crop phenology for water-limiting conditions. *Australian Journal of Agricultural Research*, 56(11), 1277–1288. https://doi.org/10.1071/AR05068
- Mcmaster, G. S., Wilhelm, W., & Wilhelm, W. W. (1997). Growing degree-days: one equation, two interpretations Growing degree-days: one equation, two interpretations. *Agricultural and Forest Meteorology*, 87, 291–300. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0168-1923(97)00027-0
- Meurer, K. (2012). nverse Modellierung des Wassertransports inGroßlysimetern der Forschungsstation Zürich-Reckenholz. Master-Theis, Institut für Geoökologie.

- Meyer, W., Tan, C., Barrs, H., & Smith, R. (1990). Root growth and water uptake by wheat during drying of undisturbed and repacked soil in drainage lysimeters. *Australian Journal of Agricultural Research*, *41*(2). https://doi.org/10.1071/AR9900253
- Miller, P., Lanier, W., Assistant, I., Brandt, S., & Canada, A. (2018). Using Growing Degree Days to Predict Plant Stages. Ag/Extension Communications Coordinator, Communications Services, Montana State University-Bozeman, Bozeman, Reprint 7/18.
- Mobe, N. T., Dzikiti, S., Zirebwa, S. F., Midgley, S. J. E., von Loeper, W., Mazvimavi, D., Ntshidi, Z., & Jovanovic, N. Z. (2020). Estimating crop coefficients for apple orchards with varying canopy cover using measured data from twelve orchards in the Western Cape Province, South Africa. Agricultural Water Management, 233. https://doi.org/10.1016/j.agwat.2020.106103
- Möck, C., Prasuhn, V., Brunner, P., & Hunkeler, D. (2013). Modellierung der zukünftigen Grundwasserneubildung in der Schweiz basierend auf hoch auflösenden Lysimeterdaten. In A. Sonnleitner (Ed.), *Grumpensteiner Lysimetertagung* (pp. 2017–2020). Lehr- und Forschungszentrum für Landwirtschaft.
- Monteith, J. L. (1965). Evaporation and environment. *Symposia of the Society for Experimental Biology*, 19.
- Moriondo, M., & Bindi, M. (2006). Comparison of temperatures simulated by GCMs, RCMs and statistical downscaling: potential application in studies of future crop development. *Climate Research*, *30*. https://doi.org/10.3354/cr030149
- Morrison, M. J., McVetty, P. B. E., & Shaykewich, C. F. (1989). The determination and verification of a baseline temperature for the growth of Westar summer rape. *Canadian Journal of Plant Science*, *69*(2), 455–564.
- Mueller, N. D., Gerber, J. S., Johnston, M., Ray, D. K., Ramankutty, N., & Foley, J. A. (2012). Closing yield gaps through nutrient and water management. *Nature*, 490(7419), 254–257. https://doi.org/10.1038/nature11420
- Neild, R. E., & Seeley, M. W. (1977). Historical Research Bulletins of the Nebraska Agricultural Experiment Station (1913-1993) Agricultural Research Division of IANR. http://digitalcommons.unl.edu/ardhistrbhttp://digitalcommons.unl.edu/ardhistrb/41
- Oberholzer, S., Prasuhn, V., & Hund, A. (2017). Crop water use under Swiss pedoclimatic conditions – Evaluation of lysimeter data covering a seven-year period. *Field Crops Research*, 211, 48–65. https://doi.org/10.1016/j.fcr.2017.06.003
- Ogola, J. B. O., Wheeler, T. R., & Harris, P. M. (2002). Effects of nitrogen and irrigation on water use of maize crops. *Field Crops Research*, 78(2–3), 105–117. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0378-4290(02)00116-8
- Papantoniou, A. N., Tsialtas, J. T., & Papakosta, D. K. (2013). Dry matter and nitrogen partitioning and translocation in winter oilseed rape (Brassica napus L.) grown under rainfed Mediterranean conditions. *Crop and Pasture Science*, 64(2), 115–122. https://doi.org/10.1071/CP12401
- Payero, J. O., & Irmak, S. (2013). Daily energy fluxes, evapotranspiration and crop coefficient of soybean. Agricultural Water Management, 129, 31–43. https://doi.org/10.1016/j.agwat.2013.06.018
- Pereira, L. S., Allen, R. G., Smith, M., & Raes, D. (2015). Crop evapotranspiration estimation with FAO56: Past and future. *Agricultural Water Management*, 147,4–20. https://doi.org/10.1016/j.agwat.2014.07.031

- Pereira, L. S., Paredes, P., & Jovanovic, N. (2020). Soil water balance models for determining crop water and irrigation requirements and irrigation scheduling focusing on the FAO56 method and the dual Kc approach. *Agricultural Water Management*, 241. https://doi.org/10.1016/j.agwat.2020.106357
- Peters, A., Nehls, T., Schonsky, H., & Wessolek, G. (2014). Separating precipitation and evapotranspiration from noise - A new filter routine for high-resolution lysimeter data. *Hydrology and Earth System Sciences*, 18(3), 1189–1198. https://doi.org/10.5194/hess-18-1189-2014
- Piao, S., Ciais, P., Huang, Y., Shen, Z., Peng, S., Li, J., Zhou, L., Liu, H., Ma, Y., Ding, Y., Friedlingstein, P., Liu, C., Tan, K., Yu, Y., Zhang, T., & Fang, J. (2010). The impacts of climate change on water resources and agriculture in China. *Nature*, 467(7311). https://doi.org/10.1038/nature09364
- Prabhakara, K., Dean Hively, W., & McCarty, G. W. (2015). Evaluating the relationship between biomass, percent groundcover and remote sensing indices across six winter cover crop fields in Maryland, United States. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 39, 88–102. https://doi.org/10.1016/j.jag.2015.03.002
- Prasuhn, V., Humphrys, C., & Spiess, E. (2016). Seventy-Two Lysimeters for Measuring Water Flows and Nitrate Leaching under Arable Land. NAS International Workshop on Applying the Lysimeter Systems to Water and Nutrient Dynamics, 124–146.
- Prasuhn, V., Spiess, E., & Seyfarth, M. (2009). Die neue Lysimeteranlage Zürich-Reckenholz. 13. *Grumpensteiner Lysimetertagung*.
- Przulj, N., & Momcilovic, V. (2013). Effects of cultivar and year on leaf number in winter barley. *Zbornik Matice Srpske Za Prirodne Nauke*, 125, 87–93. https://doi.org/10.2298/zmspn1325087p
- R Core Team. (2020). *R: A language and environment for statistical computing*. R Foundation for Statistical Computing. https://www.R-project.org/.
- Rakovec, O., Kumar, R., Attinger, S., & Samaniego, L. (2016). Improving the realism of hydrologic model functioning through multivariate parameter estimation. *Water Resources Research*, 52(10). https://doi.org/10.1002/2016WR019430
- Rasouli, K., Pomeroy, J. W., & Whitfield, P. H. (2019). Are the effects of vegetation and soil changes as important as climate change impacts on hydrological processes? *Hydrology and Earth System Sciences*, *23*(12). https://doi.org/10.5194/hess-23-4933-2019
- Rientjes, T. H. M., Muthuwatta, L. P., Bos, M. G., Booij, M. J., & Bhatti, H. A. (2013). Multi-variable calibration of a semi-distributed hydrological model using streamflow data and satellite-based evapotranspiration. *Journal of Hydrology*, 505. https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2013.10.006
- Ries, F., Kirn, L., & Weiler, M. (2018). Projektbericht Validierung von Oberflächenabflüssen nach Starkregen an Hängen in Baden-Württemberg. *Projektbericht für die Landesanstallt für Umwelt Baden-Württemberg (LUBW), unveröffentlicht.*
- Ries, F., Kirn, L., & Weiler, M. (2020). Runoff reaction from extreme rainfall events on natural hillslopes: a data set from 132 large-scale sprinkling experiments in south-western Germany. *Earth System Science Data*, 12(1). https://doi.org/10.5194/essd-12-245-2020
- Ritchie, J. T., Godwin, D. C., & Singh, U. (1989). Soil and weather inputs for the IBSNAT crop models. In *Proc. IBNAT Symp.: Decision Support System for Agrotechnology Transfer* (Vol. 1,

pp. 31–45). Dept. Agron. and Soil Sci., Coll. of Trop. Agric. and Human Resources, Univ. of Hawaii.

- Salazar-Gutierrez, M. R., Johnson, J., Chaves-Cordoba, B., & Hoogenboom, G. (2013). Relationship of base temperature to development of winter wheat. In *International Journal of Plant Production*, 7 (4), 741-762.
- Sanderson, M. A., Karnezos, T. P., & Matches, A. G. (1994). (1994) Morphological Development of Alfalfa as a Function of Growing Degree Days (JPA). *J. Prod. Agric*, 7 (2), 239-242.
- Sands, P., Hacket, C., & Nix, H. (1979). A model of the development and bulking of potatoes (Solanum tuberosum L.). Derivation from well-managed field crops. *Field Crops Res*, 29(3), 309–331.
- Santiveri, F., Romagosa, I., & Royo, C. (2001). Assessing genotypic variability for plant development in spring and winter triticale. *Cereal Research Communications*, 29(3–4). https://doi.org/10.1007/BF03543682
- Schenk, M., Heins, B., & Steingrobe, B. (1991). The significance of root development of spinach and kohlrabi for N fertilization. *Plant and Soil*, 135(2), 197–203.
- Schulla, J. (2019). Model Description WaSiM (Water balance Simulation Model). Zuletzt aufgerufen am 25.04.2021, http://www.wasim.ch/en/products/wasim\_description.htm
- Siad, S. M., Iacobellis, V., Zdruli, P., Gioia, A., Stavi, I., & Hoogenboom, G. (2019). A review of coupled hydrologic and crop growth models. *Agricultural Water Management*, 224. https://doi.org/10.1016/j.agwat.2019.105746
- Siebert, S., Burke, J., Faures, J. M., Frenken, K., Hoogeveen, J., Döll, P., & Portmann, F. T. (2010). Groundwater use for irrigation - A global inventory. *Hydrology and Earth System Sciences*, 14(10), 1863–1880. https://doi.org/10.5194/hess-14-1863-2010
- Siebert, S., & Ewert, F. (2012). Spatio-temporal patterns of phenological development in Germany in relation to temperature and day length. *Agricultural and Forest Meteorology*, *152*(1), 44–57. https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2011.08.007
- Sietz, D., Conradt, T., Krysanova, V., Hattermann, F. F., & Wechsung, F. (2021). The Crop Generator: Implementing crop rotations to effectively advance eco-hydrological modelling. *Agricultural Systems*, 193. https://doi.org/10.1016/j.agsy.2021.103183
- Smit, A. L., Booij, R., Enserink, C. T., & Vanderwerf, A. (1995). Rooting Characteristics and Nitrogen-Utilization of Brussels-Sprouts and Leeks. . . *Biological Agriculture & Horticulture*, 11(1–4), 247–256.
- Song, X., Gao, X., Dyck, M., Zhang, W., Wu, P., Yao, J., & Zhao, X. (2018). Soil water and root distribution of apple tree (Malus pumila Mill) stands in relation to stand age and rainwater collection and infiltration system (RWCI) in a hilly region of the Loess Plateau, China. *Catena*, 170, 324–334. https://doi.org/10.1016/j.catena.2018.06.026
- Statistisches Landesamt Baden-Württemberg (Statisik-BW). (2021, October 1). Ladnwirtschaftlichezählung 2020-endgültige Ergebnisse zur Bodennutzung, Pressemitteilung 161/2021 aus Stuttgart vom 18. Juni 2021. Zuletzt aufgerufen am 1.10.2021, Https://Www.Statistik-Bw.de/Presse/Pressemitteilungen/2021161

- Steduto, P., Hsiao, T. C., Raes, D., & Fereres, E. (2009). Aquacrop-the FAO crop model to simulate yield response to water: I. concepts and underlying principles. *Agronomy Journal*, 101(3), 426– 437. https://doi.org/10.2134/agronj2008.0139s
- Steinbrich, A., Henrichs, M., Leistert, H., Scherer, H., Schuetz, T., Uhl, M., & Weiler, M. (2018). Ermittlung eines naturnahen Wasserhaushalts als Planungsziel für Siedlungen. Forum Für Hydrologie Und Wasserbewirtschaftung, 62, 400–409. https://doi.org/10.5675/HyWa\_2018,6\_3
- Steinbrich, A., Leistert, H., & Weiler, M. (2016). Model-based quantification of runoff generation processes at high spatial and temporal resolution. *Environmental Earth Sciences*, 75(21). https://doi.org/10.1007/s12665-016-6234-9
- Steinbrich, A., Leistert, H., & Weiler, M. (2020a). Forschungsprojekt zur Erarbeitung von Grundlagen für die landesweite Abschätzung-der Vulnerabilität von Grundwasser gegenüber Stoffeinträgen durch Sickerwasser und-eines flächendetaillierten Grundwasserneubildungs-Index (GwN-I) Abschlussbericht der zweiten Projektphase. Projektbericht für die Landesanstallt für Umwelt Baden-Württemberg (LUBW), unveröffentlicht.
- Steinbrich, A., Leistert, H., & Weiler, M. (2020b). Forschungsprojekt zur Generierung von einheitlichen Datengrundlagen für die hydraulische Modellierung von Starkregenereignissen Projektphase 2 Abschlussbericht für die LUBW zu den im Werkvertrag vereinbarten Leistungen. Projektbericht für die Landesanstallt für Umwelt Baden-Württemberg (LUBW), unveröffentlicht.
- Steinbrich, A., & Weiler, M. (2012). Abflussbildung und Abflusskomponenten (Atlastafel 6.5), Einzugsgebietsbezogene Abflussbildung (Atlastafel 6.6), Direktabflu sshöhe: Hundertjährliches Nieder-schlagsereignis (Atlastafel 6.7), 4. Lieferung. Umweltministerium Baden-Württemberg. http://www.hydrology.uni-freiburg.de/forsch/waboa/
- Strik, B. C., Davis, A. J., Bryla, D. R., & Orr, S. T. (2020). Individual and combined use of sawdust and weed mat mulch in a new planting of Northern Highbush Blueberry I. Impacts on plant growth and soil and canopy temperature. *HortScience*, 55(8), 1280–1287. https://doi.org/10.21273/HORTSCI15122-20
- Sturzenegger, L. (2010). *Data preparation and evaluation of the lysimeter station Reckenholz-Evapotranspiration modelling*. Master-Thesis, Institute of Environmental Engineering.
- Summerfield, R. J., Roberts, E. H., Ellis, R. H., & Lawnf, R. J. (1991). TOWARDS THE RELIABLE PREDICTION OF TIME TO FLOWERING IN SIX ANNUAL CROPS. I. THE DEVELOPMENT OF SIMPLE MODELS FOR FLUCTUATING FIELD ENVIRONMENTS. Experimental Agriculture, 27(1), 11-31
- Tennant, D. (1976). Wheat root penetration and total available water on a range of soil types. *Australian Journal of Experimental Agriculture*, *16*(81). https://doi.org/10.1071/EA9760570
- Thompson, S. E., Harman, C. J., Konings, A. G., Sivapalan, M., Neal, A., & Troch, P. A. (2011). Comparative hydrology across AmeriFlux sites: The variable roles of climate, vegetation, and groundwater. *Water Resources Research*, 47(10). https://doi.org/10.1029/2010WR009797
- Thorup-Kristensen, K. (1993). Root development of nitrogen catch crops and of a succeeding crop of broccoli. *Acta Agriculture Scandinavica B-Plant Soil Sciences*, *43*(1), 58–64.
- Thorup-Kristensen, K. (1998). Root growth of green pea (Pisum sativum L.) genotypes. *Crop Science*, *38*(6), 1445–1451.

- Thorup-Kristensen, K. (2006a). Effect of deep and shallow root systems on the dynamics of soil inorganic N during 3-year crop rotations. *Plant and Soil*, 288, 233–248. https://doi.org/10.1007/s11104-006-9110-7
- Thorup-Kristensen, K. (2006b). Root growth and nitrogen uptake of carrot, early cabbage, onion and lettuce following a range of green manures. *Soil Use and Management*, *22*, 29–38. https://doi.org/10.1111/j.1475-2743.2005.00012.x
- Thorup-Kristensen, K., & van den Boogaard, R. (1998). Temporal and spatial root development of cauliflower (Brassica oleracea L. var. botrytis L.). *Plant and Soil*, 201(1), 37–43.
- Thorup-Kristensen, K., Cortasa, M. S., & Loges, R. (2009). Winter wheat roots grow twice as deep as spring wheat roots, is this important for N uptake and N leaching losses? *Plant and Soil*, 322(1), 101–114. https://doi.org/10.1007/s11104-009-9898-z
- Tomer, M. D., & Schilling, K. E. (2009). A simple approach to distinguish land-use and climatechange effects on watershed hydrology. *Journal of Hydrology*, *376*(1–2). https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2009.07.029
- van Bavel, C. H. M., & Hillel, D. I. (1976). Calculating potential and actual evaporation from a bare soil surface by simulation of concurrent flow of water and heat. *Agricultural Meteorology*, 17(6). https://doi.org/10.1016/0002-1571(76)90022-4
- van den Hoof, C., Hanert, E., & Vidale, P. L. (2011). Simulating Dynamic Crop Growth with an Adapted Land Surface Model-JULES-SUCROS: Model Development and Validation. *Agricultural and Forest Meteorology*, 151(2), 137–153. https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2010.09.011
- van den Pol-Van Dasselaar, A., Aarts, H. F. M., de Vliegher, A., Elgersma, A., Reheul, D., Reijneveld, J. A., Verloop, J., & Hopkins, A. (2015). Grassland and forages in high output dairy farming systems in Flanders and the Netherlands, *18th Symposium of the European Grassland Federation*.
- van Heemst, H. d. J. (1986). Crop phenology and dry matter distribution. In Modelling of agricultural production: *Weather, Soils and Crop*, 27–40.
- Vanclooster, M., Viaene, P., Diels, J., & Feyen, J. (1995). A deterministic evaluation analysis applied to an integrated soil-crop model. *Ecological Modelling*, 81, 183–195. https://doi.org/10.1016/0304-3800(94)00170-M
- Vinten, A. J. A., Davies, R., Castle, K., & Baggs, E. M. (1998). Control of nitrate leaching from a Nitrate Vulnerable Zone using paper mill waste. *Soil Use and Management*, *14*(1), 44–51.
- Vocanson, A., Jeuffroy, M. H., & Roger-Estrade, J. (2006). Effect of sowing date and cultivar on root system development in pea (Pisum sativum L.). *Plant and Soil*, 283, 339–352. https://doi.org/10.1007/s11104-006-0024-1
- Vogel, T.-, Huang, K., Zhang, R., & van Genuchten, M. Th. (1996). The HYDRUS code for simulating water flow, solutetransport and heat movement in variably-saturated porous media, Version 5.0. Research Report No. 132.
- WaBoA. (2012). *Wasser und Boden Atlas (WaBoA): Vol. 4 Auflage*. Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz BadenWürttemberg . http://www.hydrology.unifreiburg.de/forsch/waboa/

- Wang, E. (1997). Development of a Generic Process-Oriented Model for Simulation of Crop Growth. Herbert Utz Verlag Wissenschaft.
- Wang, K., & Dickinson, R. E. (2012). A review of global terrestrial evapotranspiration: Observation, modeling, climatology, and climatic variability. In *Reviews of Geophysics*, 50(2). https://doi.org/10.1029/2011RG000373
- Wang-Erlandsson, L., van der Ent, R. J., Gordon, L. J., & Savenije, H. H. G. (2014). Contrasting roles of interception and transpiration in the hydrological cycle – Part 1: Temporal characteristics over land. *Earth System Dynamics*, 5(2). https://doi.org/10.5194/esd-5-441-2014
- Weaver, J. E., & Bruner, W. E. (1927). *Root development of vegetable crops*. McGraw-Jill Book Company, Inc.
- Weiler, M. (2021). Nachhaltige Biomassebereitstellung für die Bioökonomie in Baden-Württemberg, Schlussbericht, Förderkennzeichen: 7533-10-5-189B, unveröffentlicht.
- Weiler, M., Pohl, S., & Steinbrich, A. (2017). Starkregenrisikomanagement Untersuchungen in Pilotgebieten. In: 6. KLIWA-Symposium, 170-179.
- Wessolek, G., Kaupenjohann, M., & Renger, M. (2009). *Bodenphysikalische Kennwerte und Berechnungsverfahren für die Praxis, Bodenökologie und Bodengenese* (Vol. 40). Technische Universität Berlin.
- White, J. W., Hoogenboom, G., Kimball, B. A., & Wall, G. W. (2011). Methodologies for simulating impacts of climate change on crop production. *Field Crops Research*, 124(3), 357–368. https://doi.org/10.1016/j.fcr.2011.07.001
- Wiggans, S. (1986). ) The effect of seasonal temperatures on maturity of oats planted at different dates. *Agronomy Journal*, 48, 21–25.
- Wizemann, H. D., Ingwersen, J., Högy, P., Warrach-Sagi, K., Streck, T., & Wulfmeyer, V. (2014). Three year observations of water vapor and energy fluxes over agricultural crops in two regional climates of Southwest Germany. *Meteorologische Zeitschrift*, 24(1), 39–59. https://doi.org/10.1127/metz/2014/0618
- Wu, J., Zhang, R., & Gui, S. (1999). Modeling soil water movement with water uptake by roots. *Plant and Soil*, 215, 7–17. https://doi.org/https://doi.org/10.1023/A:1004702807951
- Wyland, L. J., Jackson, L. E., Chaney, W. E., Klonsky, K., Koike, S. T., & Kimple, B. (1996). Winter cover crops in a vegetable cropping system: Impacts on nitrate leachingoil water, crop yield, pests and management costs. *Agriculture Ecosystems & Environment*, 59(1–2), 1–17.
- Xie, Y., & Kristensen, H. L. (2017). Intercropping leek (Allium porrum L.) with dyer's woad (Isatis tinctoria L.) increases rooted zone and agro-ecosystem retention of nitrogen. *European Journal* of Agronomy, 82, 21–32. https://doi.org/10.1016/j.eja.2016.09.017
- Xiong, L., Xu, X., Ren, D., Huang, Q., & Huang, G. (2019). Enhancing the capability of a hydrological model to simulate the regional agro-hydrological processes in watersheds with shallow 2 groundwater: Based on the SWAT framework. Journal of Hydrology, 572, 1-16. https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2019.02.043
- Xu, C. Y., & Chen, D. (2005). Comparison of seven models for estimation of evapotranspiration and groundwater recharge using lysimeter measurement data in Germany. *Hydrological Processes*, 19(18), 3717–3734. https://doi.org/10.1002/hyp.5853

- Zhang, X., Pei, D., & Chen, S. (2004). Root growth and soil water utilization of winter wheat in the North China Plain. *Hydrological Processes*, *18*(12), 2275–2287. https://doi.org/10.1002/hyp.5533
- Zhang, Y., Wu, Z., Singh, V. P., He, H., He, J., Yin, H., & Zhang, Y. (2021). Coupled hydrology-crop growth model incorporating an improved evapotranspiration module. *Agricultural Water Management*, 246. https://doi.org/10.1016/j.agwat.2020.106691
- Zhao, L., Xia, J., Xu, C., Wang, Z., Sobkowiak, L., & Long, C. (2013). Evapotranspiration estimation methods in hydrological models. *Journal of Geographical Sciences*, 23(2). https://doi.org/10.1007/s11442-013-1015-9

7. Anhang Anhang-Tabelle 1: Liste der verwendeten Symbole und Abkürzungen

Name	Einheit	Symbol/Abkürzung
AWAT-Filter Parameter, maximale Ausdehnung	[-]	ω <sub>max</sub>
des Bearbeitungsfenster		
AWAT-Filter Parameter, maximaler Rausch-	[-]	φ <sub>max</sub>
Grenzwert		
Bodenfeucht volumetrisch, Feldkapazität	$[m^3m^{-3}]$	$\theta_{\rm fk}$
Bodenfeuchte volumetrisch, hergeleitet	$[m^3m^{-3}]$	$\theta_{M}$
ausgehend vom Lysimetergewicht		
Bodenfeuchte volumetrisch, Luftkapazität	$[m^3m^{-3}]$	$\theta_{lk}$
Bodenfeuchte volumetrisch, nutzbare	$[m^3m^{-3}]$	$\theta_{\rm nfk}$
Feldkapazität		
Bodenfeuchte volumetrisch, permanentem	$[m^3m^{-3}]$	$\theta_{ m pwp}$
Welkepunkt		
Bodenspeicher	[mm]	S
Bodenspeicher, Änderung	[mm∆t <sup>-1</sup> ]	$\Delta S$
Dekadischer Logarithmus des Betrags der	[hPa]	pF
Bodenwasserspannung		
Deutscher Wetter Dienst		DWD
Evaporation	[mm]	E
Evaporation, aktuelle Entleerung	[mm]	D
Evaporations- Tiefe	[mm]	Ze
Evaporations-Koeffizient	[-]	K <sub>e</sub>
Evaporationswärme spezifisch	$[MJ m^{-2} mm^{-1}]$	L
Evaporations-Wasservolumen, das ohne	[mm]	REW
Wasserstress dem Boden entzogen wird		
Evaporation-Wasservolumen, das maximal dem	[mm]	TEW
Boden entzogen wird		
Evapotranspiration	[mm]	ET
Evapotranspiration, aktuell	[mm]	$ET_a$
Evapotranspiration, potenziell	[mm]	ET <sub>p</sub>
Evapotranspiration, Referenz	[mm]	$ET_0$
Evapotranspiration, von einer Ackerfrucht	[mm]	
Feldkapazität	[mm]	FK
Feldkapazität, nutzbar für die Pflanze	[mm]	nFK
Food and Agriculture Organization		FAO
Globalstrahlung gemessen	$[MJ m^{-2} day^{-1}]$	Rs
KGE: Blas-Koeffizient	[-]	β
KGE: Variabilität-Koeffizient	[-]	α
Kling-Gupta Effizientkoeffizient	[-]	KGE
Korrelation-Koeffizient nach Kendall	[-]	τ
Korrelation-Koeffizient nach Pearson	[-]	r LD
Lagerungsdichte	[gcm <sup>-3</sup> ]	LD
Luftdruck atmosphärisch	[kPa]	P
Lufttemperatur		T
Lufttemperatur, Tagesmaximum		T <sub>max</sub>
Lufttemperatur, Tagesminimum		T <sub>min</sub>
Luttemperatur, Tagesmittelwert	[°C]	1 mean
Lysimetergewicht, Anderung	$[Kg\Delta t^{-1}]$ oder	
T	mm∆t 'j	М
Lysimetermasse	[Kg]	1VI 7
wachtigkeit des Bodenorizont	լՠՠֈ	L

Makkink Koeffizienten	[mm d <sup>-1</sup> ]	c <sub>1</sub> ,c <sub>2</sub>
Makroporen		MP
Massenfluss	[kg]	$\mathbf{M}_{\mathrm{out}}$
Massenfluss kumulativ der oberen	[kg]	$M_{up}$
Randbedingung		
Niederschlag	[mm]	Ν
Oberflächen-Abfluss	[mm]	Q
Pflanzen-Bodenbedeckung	[-]	CC
Pflanzen-Bodenbedeckung Wachstumsrate	[GDD <sup>-1</sup> ]	CGC
Pflanzen-Bodenbedeckung Zerfallsrate	[GDD <sup>-1</sup> ]	CDC
Pflanzen-Bodenbedeckung, beim Austrieb	[-]	$CC_0$
Pflanzen-Bodenbedeckung, maximal	[-]	CC <sub>max</sub>
Pflanzen-Koeffizient	[-]	K <sub>c</sub>
Pflanzen-Koeffizient, basal	[-]	K <sub>cb</sub>
Pflanzen-Koeffizient, gemessen bei feuchtem	[-]	K <sub>c min</sub>
Boden und geringer Pflanzen-Bodenbedeckung		
Pflanzen-Koeffizient, gemessen bei feuchtem	[-]	K <sub>c mid</sub>
Boden und maximaler Pflanzen-		
Bodenbedeckung		
Psychrometrsche Konstante	[kPa °C⁻¹]	$\gamma$
Sandgehalt	[Mu C ] [%]	Sa
Sickerwasserrate / Perkolation	$[mm\Lambda t^{-1}]$	$O_{\alpha}$
Steigung der Sättigungs-Dampfdruckkurve	$[kPa \circ C^{-1}]$	Ad
Temperaturgrenzwert für Pflanzenwachstum		
Basis/Unterer Grenzwert	[ 0]	1 Dase
Temperaturgrenzwert für Pflanzenwachstum	[°C]	Т
Oberer Grenzwert	[ ]	I ut
Temperatursumme eines gewählten Zeitraums	[°C]	Т
Tongehalt	[%]	To
Totale Masse der Lysimeter Systems	[/0] [kg]	N.
Transpiration	[Kg]	Tr
Transpiration	$\begin{bmatrix} 111111 \end{bmatrix}$	
Volumetrische Rodenfeuchte	[gcm]	A A
Washetumagradtaga [Crowing dagrad daya]		
Wasserleitföhigkeit des Dedens ansättigt	[ Uu <sup>*</sup> ] [mmh-1]	
wasserieuranigken des Bodens, gesattigt		Ν <sub>s</sub> V
wasserieuranigkeit des geologischen	[mmn +]	<b>Ν</b> f
Untergrunds	r ı	V
wasserstress, Anteil an der nutzbaren	[-]	Νr
Feldkapazitat, der ohne Wasserstress von der		
Prianze entzogen wird		
Wasserstress-Koetfizient für Evaporation	<b>5</b> 3	
Wasserstress, Ptlanzen Bodenfeuchte-Grenzwert	[-]	$\Theta_{\rm p}$
tür Wasserstress	<b>5</b> 3	
Wasserstress-Koeffizient für Pflanzen-	[-]	$K_{ws}$
Bodenbedeckungswachstum		
Wurzeltiefe	[mm]	Zr
Wurzeltiefe, beim Wachstumsbeginn	[mm]	$Z_{r 0}$
Wurzeltiefe, maximal	[mm]	Z <sub>r max</sub>
Wurzelwachstumsrate	[GDD <sup>-1</sup> ]	RGC
Zeitdauer zwischen zwei Zeitpunkten	[tag oder GDD]	$\Delta t$
Zeitpunkt, Anfang	[tag oder GDD]	to

Ackerfrucht	Termin	Alt	Neu	Ouelle
Ölfrüchte	Aussaat	15/03	15/05	https://www.muenchner-kindl-senf.de/news/senf-
(e.g. Senf)				und-sonnenblumen-wir-waren-bei-der-aussaat-
<i>νε</i> ,				dabei
Klee	Aussaat	01/03	01/04	https://www.landwirtschaftskammer.de/riswick/pdf
				/anbau_von_gras_und_kleegras_im_fruehjahr_201
				3.pdf
Brennnessel	Max	1/04	01/07	https://www.kraeuter-
				buch.de/kraeuter/Brennnessel.html und ernte von
o		01/07	01/00	15/12
Obstbau	Max	01/05	01/09	Eigene Praxis-Erfahrung aus Obstbau
Silphie	Ernte	20/08	01/09	https://www.biogas-forum-
				bayern.de/De/Energiepfianzen/nachnaitig-
				enneuerbar- onorgio StockbriofoEnorgionflanzon html
Silphia	Max	Iuni	01/07	Siehe oben
Buchweizen	Max	Juni	15/07	https://www.garteniournal.net/buchweizen-bluete
Duchweizen	IVIAN	Juill	13/07	https://www.garenjournal.net/odenweizen-olucie
Esparsette	Max	1/05	1/06	https://www.pflanzen-vielfalt.net/wildpflanzen-a-
Lispuisette	1,101	1/00	1/00	z/%C3%BCbersicht-a-h/esparsette-saat/
Frühkartoffel	Max	Juni	15/05	https://www.gartenlexikon.de/kartoffeln-bluehen-
				nicht/
Erbsen	Max	15/08	25/05	https://www.gartenratgeber.net/pflanzen/erbsen.ht
				ml
Sojabohne	Max	15/08	20/07	https://www.lfl.bayern.de/mam/cms07/publikatione
				n/kooperationen/dateien/soja-anbau-
				verwendung_handreichung-unterricht_lfl-
				kooperation.pdf
Ackerbohne	Maximu	Anoust	20/06	https://de.wikipedia.org/wiki/Ackerbohne
Ackerbonne	m	August	20/00	https://de.wikipedia.org/wiki/Ackerboline
Sonnenblu-	Ernte	1/10	20/09	Praxishandbuch Landwirtschaft (Die
me	Linte	1/10	20/07	Landwirtschaft, 2006)
Sonnenblum	CCmax	80%	95%	FAO (2012)
e				()
Zucker Rübe	CCmax	73%	90%	FAO (2012)
Spargel	Saat	01/06	20/04	Saat entspricht hier die Ausbringung der Folie.
				http://www.spargelseiten.de/folienspargel.html
Spargel	CCmax	40	50	Nach der Ernte darf Spargel hochwachsen und
				bedeckt damit auch den Boden, der nicht durch
				Folie bedeckt ist.
~				http://www.spargelseiten.de/folienspargel.html
Schallenfrüc				Gleichsetzung mit Beerenobst, weile beide
hte		1 /1 1	1/10	Anbautorm Strauch
Zuckerruben	Ernte	1/11	1/10	https://www.landschafftleben.at/lebensmittel/zucke
7. alromiile an	CCmar	0.5	0.05	r/nerstellung/anbau-prianzenschutz-und-ernte
Luckerruben	CUIIIax	0.5	0.93	Malik et al. (2017)
Sommerrone	CCmay	15/07	10/05	https://www.gartandialog.da/hlystogait_rops/
Rote Posto	ССШал Nou	13/07	10/03	https://www.gaitenuialog.ue/bluetezett-taps/
NOIE Deele	angelegt			tionon/doton/informationon/n_10094.rdf
	angelegt			uonen/daten/informationen/p_19984.pdf

Anhang-Tabelle 2: Einzeländerungen an der Phänologie-Datenbanl (Steinbrich et al., 2020)

Phacelia	Neu			https://www.oekolandbau.de/landwirtschaft/pfl
	angelegt			anze/spezieller-
				pflanzenbau/zwischenfruechte/anbaugrundsaet
				ze-und-mischungsbeispiele/
				https://www.plantura.garden/gartentipps/zierpf
				lanzen/phacelia
Wintergerste	Saat			Wird ca. eine Woche früher als Winterweizen
				ausgesät (Die Landwirtschaft, 2006)
Winterraps	Maximu	21/05	10/05	Oberholzer et al. (2017)
-	m			
Getreidearten	$CC_{max}$			Prabhakara et al. (2015)
Futterlegumi	Max	10/07	01/06	https://www.landwirtschaftskammer.de/riswic
nosen, Klee,				k/pdf/anbau_von_gras_und_kleegras_im_frueh
Gras				jahr_2013.pdf

Anhang-Tabelle 3:  $T_{base}$  und  $T_{ut}$  aus der Literaturrecherche zu Temperatursummen der Pflanzenentwicklungs-Stadien (Quellen in A.Tab 12). Pro Ackerfrucht ist der Median aus den Literaturwerten angegeben,

Ackerkultur	T <sub>base</sub> [°C]	T <sub>ut</sub> [°C]
Ackerbohne	0	
Erbsen	0	
Feldgemüse	0	28
Flachs	0	
Futterleguminosen	5	
Kartoffel	4	28
Koernermais	10	30
Küchenkräuter	6	
Linsen	0	
Luzern	5	
Reben	10	35
Schalenfrüchte	5	
Senf	0	
Sojabohnen	9	30
Sommergerste	0	25
Sommergetreide	0	32
Sommerhafer	0	
Sommerraps	0	25
Sommertriticale	0	
Sonnenblume	7	32
Sorghum	10	30
Wintergerste	0	25
Wintergetreide	0	25
Winterhafer	2	
Winterraps	0	27
Wintertriticale	0	
Zuckerrüben	3	30

Anhang-Tabelle 4: Recherche-Flag zur Recherche der Phänologie-Stadien Saat, maximale Entwicklung und Ernte.

Recherche Flag	Prüfung durch
1	Finck und DWD
2	Finck oder DWD
3	Nicht geprüft oder durch Internetseiten

Anhang-Tabelle 5: Abgeschätzte Bodenbedeckung beim Saataufgang (CC0) anhand von FAO (2012) und (Die Landwirtschaft, 2006).

Ackerfrucht	CC0 [-]	Bestandsdichte	Jungpflanzen-Bodenbedeckung
		[Pflanze/m <sup>2</sup> ]	[m²/pflanze]
Körnermais	0.00585	9	0.00065
Silomais	0.00585	9	0.00065
Wintergerste	0.03	200	0.00015
Sommergerste	0.03	200	0.00015
Winterweizen	0.03	200	0.00015
Sommerweizen	0.03	200	0.00015
Zuckerrüben	0.0008	8	0.0001
Kartoffeln	0.006	4	0.0015
Sojabohne	0.015	30	0.0005
sonnenblume	0.0035	7	0.0005
sorghum	0.006	20	0.0003

Anhang-Tabelle 6: Quellen zu den Literaturwerten zu maximaler Wurzeltiefe ( $Z_{r max}$ ), die in Abbildung 3 dargestellt sind, befinden sich digital im Verzeichnis

$Daten\_Parametrisierung \ AG\_Anhang\_Tabellen \ Lieteraturverzeichnis\_maximale\_Wurzeltiefe.docximale\_Varzeltie$
$und Daten_Parametrisierung   AG_Anhang_Tabellen   Literaturwerte_maximale_Wurzeltiefe.xlsx$

Ackerfrucht	Kategorie	Z <sub>r max</sub> [m] Von	Z <sub>r max</sub> [m] Bis	Quelle
Bohnen	Ackerbohne	1.1		(Kutschera et al., 2009)
Ackerbohne	Ackerbohne	1.5	1.9	(Borg & Grimes, 1986)
Limabohne	Ackerbohne	1	2	(Borg & Grimes, 1986)
Bohne	Ackerbohne	0.5	0.7	(Allen et al., 1998)
Bohne	Ackerbohne	0.6	0.9	(Allen et al., 1998)
Bohne	Ackerbohne	0.8	1.2	(Allen et al., 1998)
Bohne	Ackerbohne	0.5	0.7	(Allen et al., 1998)
Bohne	Ackerbohne	0.6	1	(Allen et al., 1998)
Bohne	Ackerbohne	1	2	(Allen et al., 1998)
Artischoke	Artischocke	1.71		(Kutschera et al., 2009)
Artischoke	Artischocke	1.77		(Kutschera et al., 2009)
Johannisbeere	Beerenobst		1.2	(Coker, 1958)
Blaubeere	Beerenobst	0.3		(Strik et al., 2020)
Himbeere	Beerenobst	0.9	1.7	(Christensen, 1947)
Beeren	Beerenobst	0.6	1.2	(Allen et al., 1998)
Kornblume	Zierpflanzen	0.5		(Kutschera, 1960)
Brennessel	Brennnesseln	0.8		(Kutschera, 1960)
Erbsen	Erbsen	0.7		(Greenwood et al., 1982)
Erbsen	Erbsen	1.6		(Kutschera et al., 2009)
---------------------	--------------	------	----------	---
Erbsen	Erbsen	0.75		(Thorup-Kristensen, 1998)
Erbsen	Erbsen	1.06		(Vocanson et al., 2006)
Erbsen	Erbsen	0.98		(Weaver & Bruner, 1927)
Erbse	Erbsen	1		(Ehlers & Goss, 2003)
Erbse	Erbsen	1	2.4	(Borg & Grimes, 1986)
Kichererbse	Erbsen	0.6	1	(Allen et al., 1998)
Kichererbse	Erbsen	0.6	1	(Allen et al., 1998)
erdbeere	Erdbeeren	0.6	1.2	(Borg & Grimes, 1986)
Erdbeeren	Erdbeeren	0.2	0.3	(Allen et al. 1998)
Esperrette	Esparsette	0.7	0.00	(Kutschera $1960$ )
Blumenkohl	Feldgemüse	0.8		(Greenwood et al. 1982)
Blumenkohl	Feldgemüse	1.12		(Kutschera et al. 2009)
Blumenkohl	Feldgemüse	0.95		(Thorun-Kristensen & yan
Diumenkom	Telugeinuse	0.95		den Boogaard 1998)
Blumenkohl	Feldaemiica	1 37		(Wegyer & Bringer 1007)
Brokkoli	Foldgomüse	1.57		(Wetavel & Diuller, 1927) (Kutashara at al. 2000)
DIOKKUII	Feldgemüse	1.12		(Kutschera et al., 2009) (Thoman Kristenson, 1002)
DIOKKUII	Feldgemüse	1.12		(Thorup-Kristensen, 1993)
Brokkon Chishesi	Feldgemuse	0.75		(Wyland et al., 1996)
	Feldgemuse	1.0		(Kutschera et al., $2009$ )
Chichori	Feldgemuse	1.4		(Kutschera et al., 2009)
Chichori	Feldgemuse	1.05		(Kutschera et al., 2009)
Chichori	Feldgemüse	1.2		(Kutschera et al., 2009)
Chichori	Feldgemüse	2.29		(Weaver & Bruner, 1927)
Chinakohl	Feldgemüse	1.44		(Kristensen & Thorup- Kristensen, 2007)
Chinakohl	Feldgemüse	1.61	1.3	(Kutschera et al., 2009)
Fenchel	Feldgemüse	1.1	2.1	(Kutschera et al., 2009)
Aubergine	Feldgemüse	1.5	2.4	(Borg & Grimes, 1986)
Augenbohne	Feldgemüse	1	1.5	(Borg & Grimes, 1986)
blumenkoh	Feldgemüse	0.9	1.5	(Borg & Grimes, 1986)
Bohne	Feldgemüse	1.3		(Ehlers & Goss, 2003)
Feldsalat	Feldgemüse	0.2		(Kutschera, 1960)
gurke	Feldgemüse	1.2	1.8	(Borg & Grimes, 1986)
Knoblauch	Feldgemüse	0.6	1	(Borg & Grimes, 1986)
Kohlrabi	Feldgemüse	1.5	2	(Borg & Grimes, 1986)
Kürbis	Feldgemüse	1.5	2.4	(Borg & Grimes, 1986)
Lauch	Feldgemüse	0.4	0.8	(Borg & Grimes, 1986)
Mangold	Feldgemüse	1.8	2.4	(Borg & Grimes, 1986)
petersilie	Feldgemüse	0.9	1.5	(Borg & Grimes, 1986)
Salat	Feldgemüse	1.5	2.5	(Borg & Grimes, 1986)
spinat	Feldgemüse	1.5	2	(Borg & Grimes, 1986)
tomate	Feldgemüse	1 4	2.6	(Borg & Grimes 1986)
Zwiebeln	Feldgemüse	0.4	1	(Borg & Grimes, 1986)
Tomate	Feldgemüse	0.7	2	(Food Agricultural
1 onnute	i chagonhube		<i>L</i>	Organization (FAO). 2012
Grünkohl	Feldgemüse	1.27		(Kutschera et al., 2009)
Knoblauch	Feldgemüse	0.8		(Kutschera et al 2009)

Knoblauch	Feldgemüse	0.76	(Weaver & Bruner, 1927)
Kohlrabi	Feldgemüse	1.4	(Kutschera et al., 2009)
Kohlrabi	Feldgemüse	0.6	(Schenk et al., 1991)
Kohlrabi	Feldgemüse	2.59	(Weaver & Bruner, 1927)
Krautstiel	Feldgemüse	1.6	(Kutschera et al., 2009)
Kürbis	Feldgemüse	2.02	(Kristensen & Thorup-
	-		Kristensen, 2007)
Kürbis	Feldgemüse	0.95	(Kutschera et al., 2009)
Kürbis	Feldgemüse	1.83	(Weaver & Bruner, 1927)
Lauch	Feldgemüse	0.5	(Kristensen & Thorup-
<b>x</b> 1	<b>F</b> 11 "	1.05	Kristensen, 2007)
Lauch	Feldgemüse	1.25	(Kutschera et al., 2009)
Lauch	Feldgemüse	0.45	(Smit et al., 1995)
Lauch	Feldgemüse	0.85	(Thorup-Kristensen K., 2006)
Lauch	Feldgemüse	0.76	(Weaver & Bruner, 1927)
Lauch	Feldgemüse	0.5	(Xie & Kristensen, 2017)
Nuesslisalat	Feldgemüse	0.2	(Kutschera et al., 2009)
Pastinake	Feldgemüse	0.8	(Greenwood et al., 1982)
Pastinake	Feldgemüse	1.5	(Kutschera et al., 2009)
Pastinake	Feldgemüse	2.74	(Weaver & Bruner, 1927)
Rettich	Feldgemüse	1.53	(Kutschera et al., 2009)
Rettich	Feldgemüse	2.19	(Weaver & Bruner, 1927)
Rosenkohl	Feldgemüse	1.47	(Kutschera et al., 2009)
Rosenkohl	Feldgemüse	1	(Smit et al., 1995)
Rote Beete	Rote Beete	1.87	(Kristensen & Thorup- Kristensen, 2007)
Rote Beete	Rote Beete	3.04	(Kutschera et al., 2009)
Rote Beete	Rote Beete	2.4	(Thorup-Kristensen K., 2006)
Rote Beete	Rote Beete	3.35	(Weaver & Bruner, 1927)
Rettich	Feldgemüse	1.53	(Kutschera et al., 2009)
Rettich	Feldgemüse	2.19	(Weaver & Bruner, 1927)
Rosenkohl	Feldgemüse	1.47	(Kutschera et al., 2009)
Rosenkohl	Feldgemüse	1	(Smit et al., 1995)
Salat	Feldgemüse	0.6	(Greenwood et al., 1982)
Salat	Feldgemüse	0.75	(Jackson L. E. & Stivers L. J., 1993)
Salat	Feldgemüse	0.61	(Thorup-Kristensen, 2006b
Salat	Feldgemüse	0.3	(Vinten et al., 1998)
Schwarzwurze 1	Feldgemüse	1.7	(Kutschera et al., 2009)
Sellerie	Feldgemüse	1.1	(Kutschera et al., 2009)
Sellerie	Feldgemüse	1.1	(Kutschera et al., 2009)
Spinat	Feldgemüse	1.47	(Kutschera et al., 2009)
Spinat	Feldgemüse	0.6	(Schenk et al., 1991)
Spinat	Feldgemüse	1.83	(Weaver & Bruner, 1927)
Topinambur	Feldgemüse	1.3	(Kutschera et al., 2009)
Weiskohl	Feldgemüse	2.2	(Kristensen & Thorup- Kristensen K 2002)

Weiskohl	Feldgemüse	2.38		(Kristensen & Thorup- Kristensen 2004)
Weiskohl	Feldgemüse	2.42		(Kristensen & Thorup-
				Kristensen, 2007)
Weiskohl	Feldgemüse	1.7		(Kutschera et al., 2009)
Weiskohl	Feldgemüse	2.4		(Thorup-Kristensen, 2006)
Weiskohl	Feldgemüse	1.25		(Thorup-Kristensen, 2006b)
Wirsing	Feldgemüse	1.5		(Kutschera et al., 2009)
Zuchini	Feldgemüse	1.2		(Kutschera et al., 2009)
Brokolie	Feldgemüse	0.4	0.6	(Allen et al., 1998)
Rosenkohl	Feldgemüse	0.4	0.6	(Allen et al., 1998)
Weiskohl	Feldgemüse	0.5	0.8	(Allen et al., 1998)
Karotten	Feldgemüse	0.5	1	(Allen et al., 1998)
Blumenkohl	Feldgemüse	0.4	0.7	(Allen et al., 1998)
Sellerie	Feldgemüse	0.3	0.5	(Allen et al., 1998)
Knoblauch	Feldgemüse	0.3	0.5	(Allen et al., 1998)
Salat	Feldgemüse	0.3	0.5	(Allen et al., 1998)
Zwiebeln	Feldgemüse	0.3	0.6	(Allen et al., 1998)
Spinat	Feldgemüse	0.3	0.5	(Allen et al., 1998)
Radieschen	Feldgemüse	0.3	0.5	(Allen et al., 1998)
Tomaten	Feldgemüse	0.7	1.5	(Allen et al., 1998)
Gurke	Feldgemüse	0.7	1.2	(Allen et al., 1998)
Kürbis	Feldgemüse	1	1.5	(Allen et al. $1998$ )
Zuchini	Feldgemüse	0.6	1	(Allen et al. $1998$ )
Riiben	Feldgemüse	0.6	1	(Allen et al. $1998$ )
Pastinake	Feldgemüse	0.5	1	(Allen et al. $1998$ )
Kohlrahi	Feldgemüse	0.5	1	(Allen et al. $1998$ )
Zwiebeln	Feldgemüse	1	1	(Kutschera et al. 2009)
Zwiebeln	Feldgemüse	0.98		(Weaver & Bruner 1927)
Zwiebeln	Feldgemüse	0.50		(Greenwood et al. 1982)
Zwiebeln	Feldgemüse	0.0		(Thorup-Kristensen, 2006b)
Elacha	Flocks	0.55	1.5	(Thorup-Kristensen, 2000b) (Borg & Grimos, 1086)
Loinkrout	Flachs	1	1.5	(Borg & Orifles, 1980) (Kutschere, 1960)
Elasha	Flachs	0.0	1.5	(Allow at al 1008)
Flaciis	Flacins	1	1.5	(Allell et al., 1998)
Fullemubeli	hte	2.2		(Kristensen 2004)
Karotte	Futterhackfrüc	1.5	3	(Borg & Grimes, 1986)
	hte	1.0	5	(Doig & Chines, 1900)
Kohl	Futterhackfrüc	1.5	2.4	(Borg & Grimes, 1986)
	hte			-
meerrettich	Futterhackfrüc	3	4.5	(Borg & Grimes, 1986)
	hte		_	
parstinak	Futterhackfrüc	2	3	(Borg & Grimes, 1986)
Dattich	hte Futtorbookfrijo	1 4	2.1	(Porg & Grimos 1086)
Kettich	hte	1.4	2.1	(Bolg & Gillies, 1980)
Rüben	Futterhackfrüc	1.8	3.3	(Borg & Grimes, 1986)
	hte	1.0	2.5	(2019 02 0111100, 1700)
Rüben	Futterhackfrüc	1.8		(Borg & Grimes, 1986)
	hte			-

Steckrübe	Futterhackfrüc	1.5	2	(Borg & Grimes, 1986)
Karotten	Futterhackfrüc	1.1		(Kristensen & Thorup-
Karotten	hte Futterhackfrüc	1.28		Kristensen K., 2002) (Kristensen & Thorup-
	hte			Kristensen, 2004)
Karotten	Futterhackfrüc	1.7		(Kutschera et al., 2009)
Karotten	Futterhackfrüc hte	3.05		(Weaver & Bruner, 1927)
Karotten	Futterhackfrüc hte	1.25		(K. Thorup-Kristensen, 2006b)
Rueben	Futterhackfrüc hte	0.8		(Greenwood et al., 1982)
Rueben	Futterhackfrüc hte	1.25		(Kutschera et al., 2009)
Rueben	Futterhackfrüc hte	1.68		(Weaver & Bruner, 1927)
Weidelgras	Futterlegumin	0.6		(Kristensen & Thorup- Kristensen, 2004)
gras	Futterlegumin osen	1.8		(Canadell et al., 1996)
Klee	Klee	0.8		(Ehlers & Goss, 2003)
Klee	Klee	0.5	0.9	(Kutschera, 1960)
Rotklee	Klee	1.4	1.8	(Borg & Grimes, 1986)
Trespengrass	Futterlegumin	1	1.4	(Borg & Grimes, 1986)
Trespengrass	osen Futterlegumin	1.1		(Canadell et al., 1996)
wicke	osen Wicken	0.6	0.8	(Kutschera, 1960)
	Futterlegumin	1	1.5	(Allen et al., 1998)
	osen Kloo	0.6	0.0	(Allon at al 1008)
	Kicc Euttorlogumin	0.0	0.9	(Allen et al., 1998)
	osen	0.0	1	(Allell et al., 1998)
	Futterlegumin	1	1.5	(Allen et al., 1998)
	Futterlegumin	0.5	1.5	(Allen et al., 1998)
Gras	Futterlegumin	0.5	1	(Allen et al., 1998)
Hanf	Hanf	1.1		(Kutschera, 1960)
Hopfen	Hopfen	1	2.25	(Brant et al., 2020)
Hopfen	Hopfen	1	1.2	(Allen et al., 1998)
Kartoffel	Kartoffel	1.1		(Ehlers & Goss, 2003)
Kartoffel	Kartoffel	0.5	2.4	(Borg & Grimes, 1986)
Kartoffel	Kartoffel	1.4		(Canadell et al., 1996)
Kartoffel	Kartoffel	1		(Kutschera, 1960)
Kartoffel	Kartoffel	-	1.8	(Food Agricultural
				Organization (FAO), 2012)
Kartoffel	Kartoffel	0.4	0.6	(Allen et al., 1998)
Zuckermais	Koernermais	0.8	1.2	(Allen et al., 1998)
Mais	Koernermais	1.1		(Ehlers & Goss, 2003)

Mais	Koernermais	1.9		(Dardanelli et al., 1997)
Mais	Koernermais	1.8	3	(Borg & Grimes, 1986)
Mais	Koernermais	1.3	2.4	(Canadell et al., 1996)
Mais	Koernermais	1.1		(Kutschera, 1960)
Zuckermais	Koernermais	1.5	1.8	(Borg & Grimes, 1986)
Mais	Koernermais	1.6		Hannes Leistert
Körnermais	Koernermais	1	1.7	(Allen et al., 1998)
Zuckermais	Koernermais	0.5		(Kristensen & Thorup-
				Kristensen K., 2002)
Zuckermais	Koernermais	0.58		(Kristensen & Thorup-
	V	1 74		Kristensen, 2004)
Zuckermais	Koernermais Käsksester	1.74	0.0	(weaver & Bruner, $1927$ )
Minze	Kuchenkrauter	0.4	0.8	(Allen et al., 1998)
Petersilie	Kuchenkrauter	0.97		Kutschera et al. $(2009)$
Petersilie	Kuchenkrauter	1.22		(Weaver & Bruner, 1927)
Petersilie	Kuchenkrauter	1.6		(Kutschera et al., 2009)
Rucola	Kuchenkrauter	0.88		(2017) (2017)
Rucola	Küchenkräuter	1.4		Kristensen & Stavridou
<b>D</b> 1	¥7.0.1 1.0.	1.5		(2017)
Rucola	Küchenkräuter	1.5		(Kutschera et al., 2009)
Schnittlauch	Küchenkräuter	0.6		(Kutschera et al., 2009)
Leindotter	Leindotter	0.5	0.7	(Kutschera, 1960) $(\mathbf{D}_{1}, \mathbf{C}_{2}, \mathbf{C}_{3}, \mathbf{C}_{3})$
linse/lentil	Linsen	0.6	0.7	(Borg & Grimes, 1986)
linse/lentil	Linsen	0.6	0.0	(Kutschera, 1960)
Linse	Linsen	0.6	0.8	(Allen et al., 1998)
Lupinie	Lupine	1.0	2.5	Canadell et al. $(1996)$
Luzern	Luzern	1.8	2.4	(Borg & Grimes, 1986)
Luzern	Luzern	1.4	27	(Enlers & Goss, 2003)
Luzern	Luzern	1.2	3.7	(Canadell et al., 1996)
Luzern	Luzern	1.2	2	(Kutschera, 1960) $(Aller et al. 1008)$
Luzern	Luzern		3	(Allen et al., 1998)
Platterbse	Platterbse	0.6	2	(Kutschera, 1960)
Trauben	Reben	1	2	(Allen et al., 1998) $(D_{10} + C_{10} + 1000)$
Rhababer	Rhabarber	2	3	(Borg & Grimes, 1986)
Rhababer	Rhabarber	2.44		(Kutschera et al., 2009)
Rhababer	Rhabarber	3.05		(Weaver & Bruner, 1927)
Rhababer	Rhabarber	2.44		(Kutschera et al., 2009)
Rhababer	Rhabarber	3.05	1	(Weaver & Bruner, 1927)
Erdnuss	Schalenfrüchte	0.5	l	(Allen et al., 1998)
Nuss	Schalenfrüchte	0.6	1	(Allen et al., 1998)
Erdnuss	Schalenfrüchte	1.5		(Dardanelli et al., 1997)
Sent	Sent	1.2		(Kutschera, 1960)
Soja	Sojabohnen	2.3		(Dardanelli et al., 1997)
Soja	Sojabohnen	1.9		(Dardanelli et al., 1997)
Soja	Sojabohnen	1.3	2	(Dardanelli et al., $1997$ )
Soja	Sojabohnen	1.5	3	(Borg & Grimes, 1986)
Soja	Sojabohnen	1.8		Canadell et al. (1996)

Soja	Sojabohnen		2.4	(Food Agricultural
5	5			Organization (FAO), 2012)
Sojabohne	Sojabohnen	0.6	1.3	Allen et al., 1998)
Sommer-	Sommer-	0.8	1.8	(Kirkegaard & Lilley,
weizen	getreide			2007)
Sommer-	Sommer-	1	1.5	(Allen et al., 1998)
weizen	getreide	27		
Sonnenblume	Sonnenblume	2.7		Canadell et al. (1996)
Sonnenblume	Sonnenblume	1.5	•	(Ehlers & Goss, 2003)
Sonnenblume	Sonnenblume	2.3	2.9	(Dardanelli et al., 1997)
Sonnenblume	Sonnenblume	1.5	3	(Borg & Grimes, 1986)
Sonnenblume	Sonnenblume	1.3	_	(Kutschera, 1960)
Sonnenblume	Sonnenblume		3	(Food Agricultural
Common h hanne o	Composite la sur o	0.9	15	Organization (FAO), $2012$ )
Sonnenblume	Sonnenblume	0.8	1.5	(Allement al., 1998)
K1W1	Sonstiges Obst	l O C	1.5	(Allen et al., 1998)
Hirse	Sorghum	0.6	1.2	(Kutschera, 1960)
Sorghum	Sorghum	1.5	2.4	(Borg & Grimes, 1986)
Sorghum	Sorghum	1.1	• •	Canadell et al. (1996)
Sorghum	Sorghum		2.8	(Food Agricultural
Hime	Conchange	1	2	Organization (FAO), $2012$ )
Hirse	Sorgnum	1	2	(Allement al., 1998)
Sorgnum	Sorgnum	1	2	(Allen et al., 1998) ( $\mathbf{P}_{a}$ ( $\mathbf{P}_{a}$ ( $\mathbf{P}_{a}$ ))
Spargel	Spargel	l	2	(Borg & Grimes, 1986)
Spargel	Spargel	0.6	0.9	(Allen et al., 1998)
Spargel	Spargel	3.19		(Kutschera et al., 2009)
Spargel	Spargel	3.2		(Weaver & Bruner, 1927)
Apfelbaum	Streuobst	4.5	7.5	(Song et al., 2018)
Obstbäume	Streuobst	1	2	(Allen et al., 1998)
Obstbäume	Streuobst	1	2	(Allen et al., 1998)
Walnuss	Streuobst	1.7	2.4	(Allen et al., 1998)
Süßkartoffel	Süßkartoffeln	1	1.5	(Borg & Grimes, 1986)
Süßkartoffel	Süßkartoffeln	1	1.5	(Allen et al., 1998)
Gerste	Wintergerste	1.1		Hannes Leistert
Gerste	Wintergerste	1.5	2.4	(Borg & Grimes, 1986)
Gerste	Wintergerste	1.3	2.2	Canadell et al. (1996)
Wintergerste	Wintergerste	1.2		(Kristensen & Thorup-
<b>a</b> .	** **		2.5	Kristensen K., 2002)
Gerste	Wintergerste		2.5	(Food Agricultural Organization (EAO) 2012)
Gerste	Wintergerste	1	15	(Allen et al. 1998)
Roggen	Wintergetreide	15	1.5	(Canadell et al. 1996)
Doggon	Wintergetreide	1.5		(Kutschere, 1960)
Woizon	Wintergetreide	1.2		(Ethers & $Goss (2003)$
Weizen	Wintergetreide	1.0	2	(Emers & Goss, 2003) $(Borg & Grimos, 1086)$
Weizen	Wintergetreide	1.3	5	(Borg & Grinnes, 1980)
vv eizen	Wintergetreide	1.2		(Considell at al. 1900)
Hartweizen	wintergetreide	2.5		(Canadall et al., 1990)
weizen	wintergetreide	5		(Canadell et al., 1996) $(Canadell et al., 1996)$
weizen	wintergetreide	1.8		(Canadell et al., 1996)
Weizen	Wintergetreide	1.5		(Canadell et al., 1996)

Weizen	Wintergetreide	1.4		(Canadell et al., 1996)
Weizen	Wintergetreide	1		(Canadell et al., 1996)
Weizen	Wintergetreide	1.2		Hannes Leistert
Sommerweize	Sommergetrei	2.2		(Thorup-Kristensen et al.,
n Wintomuoizon	de Wintergotroide	1 1		(Themme Vristenson et al.
winterweizen	wintergetreide	1.1		(Thorup-Kristensen et al., 2009)
Weizen	Wintergetreide		2.4	(Food Agricultural Organization (FAO), 2012)
Winterweizen	Wintergetreide	1.5	1.8	(Allen et al., 1998)
Wintergerste	Wintergetreide	1.15		(Kristensen & Thorup- Kristensen, 2004)
Hafer	Winterhafer	1.6		(Ehlers & Goss, 2003)
Hafer	Winterhafer	1.5	2.9	
Hafer	Winterhafer	1.6	2.6	(Borg & Grimes, 1986)
Hafer	Winterhafer	1.8		(Canadell et al., 1996)
Hafer	Winterhafer	0.8		(Kutschera, 1960)
Hafer	Winterhafer	1	1.5	(Allen et al., 1998)
Raps	Winterraps	1.5		(Ehlers & Goss, 2003)
Raps	Winterraps	2	3	(Borg & Grimes, 1986)
Raps	Winterraps	1.25		Hannes Leistert
Raps	Winterraps	1	1.5	(Allen et al., 1998)
Zuckerrübe	Zuckerrüben	0.7	1.2	(Allen et al., 1998)
Zuckerrübe	Zuckerrüben	1.2		(Ehlers & Goss, 2003)
Zuckerrübe	Zuckerrüben	1.4	2	(Borg & Grimes, 1986)
Zuckerrübe	Zuckerrüben	1		(Kutschera, 1960)
Zuckerrüben	Zuckerrüben	1.2		Hannes Leistert
Zuckerrüben	Zuckerrüben		2.4	(Food Agricultural
				Organization (FAO), 2012)
Sellerie	Feldgemüse	1.55	1.8	(Christiansen et al., 2006)
Rote Beete	Rote Beete	0.45	0.6	(Christiansen et al., 2006)
Zuckermais	Koernermais	0.6	0.9	(Christiansen et al., 2006)
Zuckerrüben	Zuckerrüben	1		(Malik et al., 2017a)
Zuckerrüben	Zuckerrüben	1.2		(Brown & Biscoe, 1985a)
Zuckerrüben	Zuckerrüben	1.4	1.7	(Brown et al., 1987a)
Raps	Winterraps	0.85	2.1	(Jamont et al., 2013a)
Raps	Winterraps	0.4	0.8	(Bouchet et al., 2016)
Winterraps	Winterraps	0.4	0.6	(Hofmann & Christen, 2007)
Winterweizen	Wintergetreide		2	(Zhang et al., 2004)
Wintertriticale	Wintertriticale	1.2	1.5	(Burger et al., 2017)

Anhang-Tabelle 7: Kalender zur Bewirtschaftung der Lysimeter 2,3,4,8 und 9 befindet sich digital im Verzeichnis Daten\_Parametrisierung\AG\_Anhang\_Tabellen\Kalender\_Bewirtschaftung

Anhang-Tabelle 8: Mittlere Bodenkennwerte der Stechzylinder Proben pro Bodentiefe befinden sich digital im Verzeichnis Daten\_Parametrisierung\AG\_Anhang\_Tabellen\soil\_properties\_grafenried.csv

Anhang-Tabelle 9: Zusammenfassung der Saat- und Erntezeitpunkte der Fruchtfolgenglieder sind digital im Verzeichnis

 $Daten\_Parametrisierung \ AC\_Frucht folgen \ lysimeter\_anbaukulturen\_zusammen fassung.csv$ 

Anhang-Tabelle 10: Python-Skript für die AWAT-Filter Anwendung befindet sich digital im Verzeichnis R\_skripte\awat\_filter.py

Anhang-Tabelle 11: Pedotransferfunktionen von Heike Puhlmann sind digital im Verzeichnis Daten\_Parametrisierung\AG\_Anhang\_Tabellen\Pedotransferfunktionen

Anhang-Tabelle 12: Fehlwerte in M nach Datenaufbereitung. Bezug liegt auf das hydrologische Winter- und Sommerhalbjahr (November bis April; Mai bis Oktober).

Lysimeter	Fehlwerte	Fehltage	Winter-Fehltage	Sommer-Fehltage
	[%]	[Anzahl]	[Anzahl]	[Anzahl]
1	0.27	3	2	1
2	0.96	8	3	5
3	7.09	220	166	54
4	2.71	158	67	91
8	2.54	96	67	29
9	2.09	67	20	47
Durchschnitt	0.61	5.5	2.5	3
Lysimeter 1-2				
Durchscnitt	3.6	135	100	55
Lysimeter 3-9				

Anhang-Tabelle 13: Fehlwerte in  $Q_s$  nach Datenaufbereitung. Bezug liegt auf das hydrologische Winter- und Sommerhalbjahr (November bis April; Mai bis Oktober).

Lysimeter	Fehlwerte	Fehltage	Winter-Fehltage	Sommer-Fehltage
	[%]	[Anzahl]	[Anzahk]	[Anzahl]
1	3.8	32	11	21
2	3.8	32	11	21
3	0.68	2	2	0
4	1.17	39	11	28
8	0.96	33	22	11
9	0.34	1	1	0
Durchschnitt	3.8	5.5	11	21
Lysimeter 1-2				
Durchscnitt	0.59	121	9	10
Lysimeter 3-9				



Anhang-Abbildung 1: Grenzwertfilter des zweiten Schritts der Datenaufbereitung. Alle Gewichtsänderungen über 20kg/10min und geringer 5kg/10min sind als Ausreißer rot markiert. Bodenbearbeitungstage wurden bereits im ersten Schritt der Datenaufbereitung als Fehlwerte gesetzt.



ETa > 11mm/tag • FALSE • TRUE

Anhang-Abbildung 2: Der Verlauf der ETa währende der Vegetationsperiode auf den Lysimetern 1-9 (Zeilen) im Zeitraum 2011-2017 (Spalten). Rot markiert sind 126 ETa Ausreißer  $ET_a > 11mm/Tag$ .



Anhang-Abbildung 3: Die Abweichung von berechneten Jahrestage zu den Referenz-Jahrestage ist für ausgewählte Ackerfrüchte dargestellt. Für den Zeitraum 1990-2020 wurden anhand von Referenz-Temperatursummen die Jahrestage für Saat, maximale Entwicklung (Max) und Ernte berechnet.



Anhang-Abbildung 4: Vergleich der Unterschreitungswahrscheinlichkeit von  $\theta$  (schwarz) mit der modellierten Bodenfeuchte  $\theta_{mod}$  (farbig).  $\theta_{mod}$  wurde a) mit Standard  $K_{c mid}$  und b) mit erhöhtem  $K_{c mid}$ wegen Oaseneffekt (Oberholzer et al., 2017) modelliert. Die Modelldurchläufe mit unterschiedlichen Bodenparametern zu  $\theta_{pwp}$  und  $\theta_{nfk}$  sind in den Spalten und die Lysimeter 1, 2, 3, 4, 8 und 9 in den Zeilen dargestellt.



Modell • Acker • Gras • doy\_dyn • doy\_gdd • dyn

Anhang-Abbildung 5: Die Modellgüte (KGE < 0) der hydrologischen Variabeln Niederschlag (N), aktuelle Evapotranspiration (ET<sub>a</sub>), Sickerwasserrate ( $Q_s$ ), Bodenspeicheränderung ( $\Delta S$ ) und mittlere Bodenfeuchte ( $\theta_M$ ) untergliedert in Lysimeter (Spalten), Vegetations-/Winterperiode (Spalten) und Modellvariante (Farbe). KGE (-inf;1] setzt sich zusammen aus dem Variabilitätskoeffizient ( $\alpha[0;inf)$ ), Bias-Koeffizient ( $\beta$  (inf;inf)) und Persons-Korrelationskoeffizient (r [0;1]). Nicht dargestellt ist ein Ausreiser für  $\Delta S$  auf Lysimeter 2 mit KGE = -5563.Vegetationsperiode: Mitte März bis Mitte Oktober; Winterperiode: Mitte Oktober bis Mitte März.



Anhang-Abbildung 6: Mittelwerte Jahresverlauf der hydrologischen Variablen (Zeilen) Niederschlag (N), Evapotranspiration (ET), Sickerwasserrate ( $Q_s$ ), Bodenspeicheränderung ( $\Delta S$ ) und Bodenfeuchte ( $\theta$ ) untergliedert in Winter- und Sommerkulturen (Spalten). Weitere Untergliederung in Lysimeterdaten und PET (schwarz) und Modellvarianten (farbe).



Anhang-Abbildung 7: Totale Wasserbilanz untergliedert in Böden (Spalten), Fruchfolgen (Farbe) und Klima-Szenario (Transparenz). Wasserbilanzglieder: ET = Evapotranspiration,  $Q_s = Perkolation$ ,  $\Delta S = Bodenspeicheränderung$ , Q = Oberflächenabfluss. Die Meteorologischen Daten liegen für den Zeitraum 2006-2020 vor und sind als Klima-Sczenario auf den Klimareferenzzeitraum 1960-90 korrigiert worden. Ausschreibung der Fruchtfolgen sind in Abbildung 4 der Methodik.



Anhang-Abbildung 8: Literaturvergleich der Temperatursummen  $(T_{sum})$  für die Phänologie-Stadien maximale Entwicklung und Ernte.  $T_{sum}$  wurde mit Referenz-Jahrestagen und Temperaturdaten aus Baden-Württemberg (BW) berechnet (Kreise) und mit Literaturwerte (Vierecke) verglichen. Einzelner Kreis ist  $T_{sum}$  in einem Anbaujahr im Zeitraum 1990-2020 bei einer von drei ausgewählten Klimastationen in BW.  $T_{sum}$  wurde ausgehend von der Saat der Ackerfrucht angegeben (häufige Angabe in der Literatur). Quellenangaben zum  $T_{sum}$ -Literaturvergleich sind in Anhang-Tabelle 14 gelistet.

Anhang-Tabelle 14: Quellen zu den Literaturwerten zu  $T_{sum}$ , die in Abbildung 21, Anhang-Abbildung 8 und Anhang-Tabelle 3 dargestellt sind.  $T_{sum}$  zu den Phänologie-Stadien Austrieb, maximale Entwicklung (Maximum), Reife, Ernte Biofix das Pflanzen-Stadium ab dem  $T_{sum}$  berechnet wurde.. Befinden sich digital im Verzeichnis:

Daten\_Parametrisierung\AG\_Anhang\_Tabellen\Lieteraturverzeichnis\_Temperatursummen.docx und Daten\_Parametrisierung\AB\_Datenrecherche\Zusammenfassung\_Parameterrecherche.xlsx

Kategorie	Quelle	Ort	Latitude	Höhe über	T <sub>base</sub>	Tut	Bio-	Aus-	Maxi	Rei-	Zer-	Ernte
				Normal- Null	[°C]	[°C ]	fix	trieb Taum	mum Taum	fe Taum	fall Taum	T <sub>sum</sub> [C°]
						1		[C°]	[C°]	[C°]	[C°]	[0]
Ackerbohne	(Jamont et al.,	Greenhouse,	47.28		0		Saat		1087		1890	
	2013b)	Frankreich										
Ackerbohne	(Iannucci et al., 2008)	Süd Italien	41.31	76	1.7		Saat		833			
Erbsen	(Miller et al., 2018)	Montana, US	46.86	600	0		Saat	200	1050	1300	1550	
Erbsen	(Miller et al., 2018)	Montana, US	46.86	600	0		Saat	180	1050	1400	1700	
Erbsen	(Iannucci et al., 2008)	Süd Italien	41.31	76	2.4		Saat		770			
Esparsette	(Iannucci et al., 2008)	Süd Italien	41.31	76	5.5		Saat		711			
Feldgemüse	(Edey, 1977)				0							
Feldgemüse	(Edey, 1977)				0							
Feldgemüse	(Edey, 1977)				0							
Feldgemüse	(Edey, 1977)				10							
Feldgemüse	(Food Agricultural Organization (FAQ) 2012)				7	28	Saat	50	900	1400	1600	
Flachs	Miller et al., 2018	Montana, US	46.86	600	0		Saat	120	950	1300	1600	
Futterleguminosen	(Bootsma et al., 2004)	Quebec, KA			5.5							
Futterleguminosen	(Bootsma et al., 2004)	Quebec, KA			5							
Futterleguminosen	(Sands et al., 1979)	Finnland	63.08		5		Saat		286			
Futterleguminosen	(Sands et al., 1979)	Finnland	63.08		5		Saat		343			

Futterleguminosen	(Sands et al. 1070)	Finnland	63.08		5		Saat		373			
Futterleguminosen	(Sands et al., 1979)	Finnland	63.08		5		Saat		525 AA7			
Futterleguminosen	(Sands et al., 1979)	Finnland	63.08		5		Saat		447 104			
Futterleguminesen	(Sands et al., 1979)	Finiliand	62.08		5		Saat		194			
Futterleguminosen	(Sands et al., 1979)	Finnland Eingland	63.08		5		Saat		095			
Futterleguminosen	(Sands et al., 1979)	Finnland	63.08		5		Saat		315			
Futterleguminosen	(Sands et al., 1979)	Finnland	63.08		5		Saat	1 50	943	0.50	1000	
Kartoffel	(Food Agricultural Organization (FAO), 2012)				2	26	Saat	150	500	950	1200	
Kartoffel	(Sands et al., 1979)				7	30						
Klee	(Iannucci et al., 2008)	Süd Italien	41.31	76	3.9		Saat		954			
Klee	(Iannucci et al., 2008)	Süd Italien	41.31	76	3.5		Saat		1128			
Klee	(Iannucci et al., 2008)	Süd Italien	41.31	76	5.7		Saat		577			
Silagemais	(Cross & Zuber, 1972)	Columbia, Missouri, USA	28.9	210	10	30	Saat		775			
Silagemais	(Gilmore & Rogers, 1958)	Texas, US	30.6		10		Saat		820			
Silagemais	(Heng et al., 2009)	California Davis, US	38.32	20	8	30	Saat	70	900	1220	1600	
Silagemais	(McMaster, 2005)	Central Great Plains	40		10	30	Saat	50	905		1655	
Silagemais	(Neild & Seeley, 1977)	Mead, Nebraska, US	41.2	180	10		Saat	89	815	1080	1346	
Silagemais	(Neild & Seeley, 1977)	Mead, Nebraska, US	41.2	180	10		Saat	100	926	1230	1527	
Silagemais	(van Heemst, 1986)				10	30	Aus- trieb		650		1300	
Küchenkräuter	(Ghamarnia et al., 2014)	Kermanshah, Iran	34.21	1319	5.5		Saat	208	1278	1654		
Linsen	Miller et al., 2018	Montana, US	46.86	600	0		Saat	160	1050	1500	1750	

Luzern	(Sanderson et al.,	Texas, US	32.2	185	5		Saat		518			
Luzern	(Sanderson et al.,	Texas, US	32.2	185	5		Saat		646			
Luzern	1994) (Sanderson et al.,	Texas, US	32.2	185	5		Saat		696			
Luzern	(Lauzon et al., 2010)	Normandin, KA	48.49	137	5		Saat		405			
Luzern	(Lauzon et al., $2019$ )	St-augustin, KA	46.48	43	5		Saat		632			
Luzern	(Lauzon et al., 2019)	Ste-Anne, KA	45.26	36	5		Saat		572			
Reben	(Er-Raki et al., 2021)				10	35						
Schalenfrüchte	(Edey, 1977)				5							
Senf	(Miller et al., 2018)	Montana, US	46.86	600	0		Saat	110	900	1250	1550	
Sojabohnen	(Food Agricultural Organization (FAO), 2012)				5	30	Saat	150	1150	1850	2150	
Sojabohnen	(Payero & Irmak, 2013)	North Platte, Nebraska	41.3	400	10	30	Saat	104	520	1246	1446	1450
Sojabohnen	Sojabohnen	(Payero & Irmak, 2013)	41.3	400	10	30	Saat	173	646	1366	1495	
Sojabohnen	(Summerfield et al., 1991)				8.6	26	Saat		700			
Sommergerste	(Dofing et al., 1993)	Fairbanks AK	64.51	60	0				718	1300		
Sommergerste	(Dofing et al., 1993)	Palmer, AK	61.34	35	0		Saat		713	1240		
Sommergerste	(Juskiw et al., 2001)	North Alberta, Ka	58		0	25	Saat	91	756	1126	1268	
Sommergerste	(Juskiw et al., 2001)	North Alberta, Ka	58		0	25	Saat	192	1109	1387	1702	
Sommergerste	(Juskiw et al., 2001)	North Alberta, Ka	58		0	25	Saat	133	916	1242	1455	

Sommergerste	(McMaster, 2005)	Central Great	40		0		Saat	100	850		1350	
Sommergetreide	(Bauer et al., 1984)	USDA Mandan,	46.46	270	0		Saat	100	900			
Sommergetreide	(Davidson & Campbell, 1983)	Swift Current, KA	50.2	744	2.4		Aus- trieb		706	1070		1500
Sommergetreide	(McMaster et al., 2005)	Central Great Plains	40		0	35	Saat	100	985		1685	
Sommerhafer	(Siebert & Ewert, 2012)	Deutschland			0		Saat	112	867		1585	1848
Sommerraps	(Morrison et al., 1989)				5	25	Saat	100	700	1150		
Sommerraps	(Miller et al., 2018)	Montana, US	46.86	600	0		Saat	160	1070	1440	1550	
Sommerraps	(Miller et al., 2018)	Montana, US	46.86	600	0		Saat	110	930	1270	1380	
Sommertriticale	(Grzesiak et al., 2012)	Greenhaus			10		Saat				1311	
Sommertriticale	(Santiveri et al., 2001)	north-east Spain	41.39	200	0		Saat	85	1400	1450	1900	
Sommertriticale	(Santiveri et al., 2001)	north-east Spain	41.39	200	0		Saat	95	1250	1500	2100	
Sommertriticale	(Santiveri et al., 2001)	north-east Spain	41.39	200	0		Saat	90	1300	1550	2000	
Sommertriticale	(Grzesiak et al., 2012)	Greenhaus			5		Saat				1118	
Sonnenblume	(Davitaya, 1965)				10							
Sonnenblume	(Food Agricultural Organization (FAO), 2012)				4	30	Saat	150	1200	1550	2350	
Sonnenblume	(Miller et al., 2018)	Montana, US	46.86	600	0		Saat	140	1400	1700	1970	
Sonnenblume	(Moriondo & Bindi, 2006)				10	35	Saat	70	532	1300		
Sorghum	(Dolciotti et al., 1998)	North italy	44.3		13	30	Saat		650	800	1250	

Sorghum	(Food Agricultural				8	30					
	(FAO), 2012)										
Sorghum	(Neild & Seeley, 1977)	Mead, Nebraska, US	41.2	180	10		Saat	123	780	1070	1240
Sorghum	(Neild & Seeley, 1977)	Mead, Nebraska, US	41.2	180	10		Saat	145	940	1256	1415
Wicke	(Iannucci et al., 2008)	Süd Italien	41,31	76	0		Saat		1138		
Wicke	(Iannucci et al., 2008)	Süd Italien	41,31	76	1.9		Saat		1337		
Wintergerste	(Food Agricultural Organization (FAO), 2012)				0	25	Saat	100	1300	1800	
Wintergerste	(McMaster et al., 2005)	Central Great Plains	40		0		Saat	100			
Wintergerste	(McMaster et al., 2005)	Central Great Plains	40		0		1. Jan.		960		1760
Wintergerste	(Przulj & Momcilovic, 2013)	Serbien			0		Saat		1223		
Wintergerste	(Przulj & Momcilovic, 2013)	Serbien			0		Saat		1400		
Wintergetreide	(Food Agricultural Organization (FAO), 2012)				0	25	Saat	120	1200	1700	2100
Wintergetreide	(Idso et al., 1978)				5.5						
Wintergetreide	(Mcmaster et al., 1992)	Central Great Plains	40		0		1. Jan.		900	1050	1620
Wintergetreide	(Mcmaster & Smika, 1988)	Central Great Plains	40		0	25	1. Jan.		900	1460	1700
Wintergetreide	(Mcmaster & Smika, 1988)	Central Great Plains	40		0	25	Saat	145	1690	2200	2400
Wintergetreide	(McMaster, 2005)	Central Great Plains	40		0		1. Jan.		995		1795

Wintergetreide	(McMaster & Wilhelm 2003)	Central Great	40	1534	0		1. Ian		950		1657	
Wintergetreide	(Miller et al., 2018)	Montana, US	46.86	600	0		Saat	125	1174	1556	1665	
Wintergetreide	(Miller et al., 2018)	Montana, US	46.86	600	0		Saat	110	1145	1400	1522	
Wintergetreide	(Salazar-Gutierrez et al., 2013)		32		0		Saat		1710			2790
Wintergetreide	(Salazar-Gutierrez et al., 2013)		32		0		Saat		1530			2680
Winterhafer	(Miller et al., 2018)	Montana, US	46.86	600	0		Saat		1230	1600	1730	
Winterhafer	(Wiggans, 1986)				4.5							
Winterraps	(d'Andrimont et al., 2020)	Brandenburg, Mecklenurg, Bayern, DE	49.7		3		1. Jan.		425			
Winterraps	(Gabrielle et al., 1998)	Chalons	41.2	90	0		Saat	120	1700		2300	
Winterraps	(Papantoniou et al., 2013)	Nord Griechenland	40.38	6	0	27	Saat		1600	2100		2700
Wintertriticale	(Santiveri et al., 2001)	north-east Spain	41.39	200	0		Saat	95	1442	1550	2150	
Wintertriticale	(Santiveri et al., 2001)	north-east Spain	41.39	200	0		Saat	100	1399	1600	2112	
Wintertriticale	(Santiveri et al., 2001)	north-east Spain	41.39	200	0		Saat	115	1480	1650	2202	
Wintertriticale	(Bijanzadeh et al., 2019)	Darab, Iran	28.29	1100	4							
Zuckerrüben	(Davitaya, 1965)				10							
Zuckerrüben	(Food Agricultural Organization (FAO), 2012)				5	30	Saat	30	900	1800	2100	
Zuckerrüben	(Andales et al., 2020)	Colerado, US	40	760	1.1	30	Aus- trieb				2944	
Zuckerrüben	(Holen & Dexter, 1997)				1.1		Saat	237	1253			
Zuckerrüben	(Anar et al., 2019)	North dekoat, US			3		Saat	40	940	1640		

Zuckerrüben	(Hoffmann, 2019)	Göttingen, DE	51.5	150	3		Saat	790	1450	1894
Zuckerrüben	(Hoffmann, 2019)	Göttingen, DE	51.5	150	3		Saat	850	1500	2130
Zuckerrüben	(Hoffmann, 2019)	Göttingen, DE	51.5	150	3		Saat	930	1550	2270
Zuckerrüben	(Hoffmann, 2019)	Göttingen, DE	51.5	150	3		Saat	1040	1600	2371
Wintergetreide	(Wizemann et al., 2014)	Kraichgau BW, DE	48.9	319	0	37	Saat			2476
Wintergetreide	(Wizemann et al., 2014)	Nellingen BW, DE	48.5	690	0	37	Saat			2537
Wintergetreide	(Wizemann et al., 2014)	Kraichgau BW, DE	48.9	319	0	37	Saat			2351
Wintergetreide	(Wizemann et al., 2014)	Nellingen BW, DE	48.5	690	0	37	Saat			2444
Winterraps	(Wizemann et al., 2014)	Kraichgau BW, DE	48.9	319	10	30	Saat			1894
Winterraps	(Wizemann et al., 2014)	Nellingen BW, DE	48.5	690	10	30	Saat			1508
Silagemais	(Wizemann et al., 2014)	Kraichgau BW, DE	48.9	319	5		Saat			1080
Silagemais	(Wizemann et al., 2014)	Nellingen BW, DE	48.5	690	5		Saat			739
Silagemais	(Wizemann et al., 2014)	Kraichgau BW, DE	48.9	319	5		Saat			1099
Silagemais	(Wizemann et al., 2014)	Nellingen BW, DE	48.5	690	5		Saat			854
Gründüngung/Zwis chenfrucht Winter	(Prabhakara et al., 2015)	Maryland, US	38.9	60	4		Saat	450		
Gründüngung/Zwis chenfrucht Sommer	(Burger et al., 2017)	Davis CA, US	38.32	20	5		Saat			540
Gründüngung/Zwis chenfrucht Sommer	(Burger et al., 2017)	Davis CA, US	38.32	20	5		Saat			551
Gründüngung/Zwis chenfrucht Sommer	(Burger et al., 2017)	Davis CA, US	38.32	20	5		Saat			820
Gründüngung/Zwis chenfrucht Sommer	(Baraibar et al., 2020)	Pennsylvania, US	40.43	160	0		Saat			2254

Gründüngung/Zwis	(Baraibar et al.,	Pennsylvania, US	40.43	160	0	Saat		1873
chenfrucht Sommer	2020)							
Gründüngung/Zwis	(Baraibar et al.,	Pennsylvania, US	40.43	160	0	Saat		1750
chenfrucht Sommer	2020)							
Gründüngung/Zwis	(Baraibar et al.,	Pennsylvania, US	40.43	160	0	Saat		1445
chenfrucht Sommer	2020)							
Gründüngung/Zwis	(Baraibar et al.,	Pennsylvania, US	40.43	160	0	Saat		1498
chenfrucht Sommer	2020)							
Gründüngung/Zwis	(Baraibar et al.,	Pennsylvania, US	40.43	160	0	Saat		1163
chenfrucht Sommer	2020)							
Gründüngung/Zwis	(Boyd et al., 2009)	Salinas CA, US	36.6	10	0	Saat	413	1350
chenfrucht Winter								
Gründüngung/Zwis	(Boyd et al., 2009)	Salinas CA, US	36.6	10	0	Saat	462	1576
chenfrucht Winter								
Sommer Gras	(Jungers et al.,	Salina Kansas,	38.8	170	0	Saat	200 1400 2800	) 3700
	2018)	US						

Anhang-Tabelle 15: Literaturwerte zu dem Wasserentzug [%] der nutzbaren Feldkapazität in gegebener Bodentiefe. Genannt sind Ackerfrüchte, die in der Lysimeteranlage vorkommen, und ihre maximale Referenz-Wurzeltiefe.

Ackerfrucht	Z <sub>r max</sub> [m] im	Tiefe [m] mit 100%	Tiefe[m] mit 80%	Tiefe[m] mit 20%	Quelle
	Modell	Wasserentzug	Wasserentzug	Wasserentzug	
Mais	1	0.6	1	1.5	Cabelguenne & Debaeke (1998)
Silage Mais	1	0.57 +0.08			Oberholzer et al. (2017)
Körnermais	1.5	0.7 + 0.11			Oberholzer et al. (2017)
Zuckerrübe	1.2	0.38 +0.11			Oberholzer et al. (2017)
Zuckerrübe	1.2	0.5	0.6	1	(Brown & Biscoe, 1985a)
Zuckerrübe	1.2			0.92	(Durrant et al., 1973)
Winterweizen	1.5	0.45 +0.09			Oberholzer et al.
Weizen	1.5	0.7	0.9	1.6	Cabelguenne &
Wintergerste	1.5	0.56 +0.09			Oberholzer et al.
Gründüngung	0.5-1.1	0.59 + 0.1			(2017) Oberholzer et al. (2017)
Raps	1.5	0.73 + 0.09			Oberholzer et al. (2017)



Anhang-Abbildung 9: Wurzel-Wachstumskonstante (RGC [cm/tag]), die in der Modellerweiterung verwendet werden (Kreise), im Vergleich mit Literaturstudien (Vierecke). In der Parametertabelle der Modellerweiterung ist RGC nicht in cm/tag angegeben, aber Literaturstudien wird RGC häufig in cm/tag angegeben, weshalb für den Vergleich RGC zu cm/tag umgerechnet wurde. 2 cm/tag ist ein typischer Wurzelwachstumswert in Oberflächenmodellen und ist als horizontale Linie eingetragen. Quellenangaben zu den dargestellten Literaturwerten sind in Anhang-Tabelle 16 einzusehen.

Anhang-Tabelle 16: Quellen zu Wurzelwachstumswerten, die in A-Abb, 9 dargestellt sind, befinden sich digital im Verzeichnis:

 $Daten\_Parametrisierung \ AG\_Anhang\_Tabellen \ Lieteraturverzeichnis\_Wurzelwachstumn. docx \ und \ Daten\_Parametrisierung \ AB\_Datenrecherche \ Zusammenfassung\_Parameterrecherche. xlsx$ 

Acker-	RGC	Boden	Bodentempe-	Nähr-	Quelle
frucht	[cm tag <sup>-1</sup> ]		ratur [°C]	stoff	
Silage-mais	2.46				(Dardanelli et al., 1997)
Winter-					(Kristensen & Thorup-
gerste					Kristensen, 2004)
Winter-	0.79				(Kirkegaard & Lilley,
Weizen					2007)
Winter-	1.13				(Kirkegaard & Lilley,
Weizen					2007)
Winter-	1.36				(Meyer et al., 1990)
Weizen					

Winter-	4.27					(Meyer et al., 1990)
weizen Winter	1 20	deen sonds				(Tennent 1076)
Weizen	1.39	sandy loams				(Tennant, 1970)
Winter-	0.87	deen sands				(Gregory 1994)
Weizen	0.07	sandy loams				(010g01y, 1774)
Winter-	0.57	sand over				(Tennant 1976)
Weizen	0.07	clay				(101111111, 1970)
Allgemein	2					(Gayler et al., 2014)
Mais	13					Allmaras et al 1975
Mais	9.73	silt loam	2	>5		(Mackay & Barber
1 <b>viu</b> is	2.15	Sint Iouin				(1984)
Mais	5.26	silt loam	1	8		(Mackay & Barber,
						1984)
Mais	2.1	silt loam	1	8		(Mackay & Barber,
						1984)
Mais	9.73	silt loam	2	25	22kg	(Mackay & Barber,
					P/ha	1984)
Mais	7.23	silt loam	2	25	0kg	(Mackay & Barber,
					P/ha	1984)
Mais	4.47	silt loam	2	25	44kg P	(Mackay & Barber,
				_	/ha	1984)
Mais	2.94	silt loam	1	8	44kg P	(Mackay & Barber,
				0	/ha	1984)
Mais	2.36	silt loam	1	8	22kg	(Mackay & Barber,
N7 ·	1 67	·1, 1	1	0	P/ha	1984) (M. 1. 9 D. 1
Mais	1.57	silt loam	1	8	OKg D/h a	(Mackay & Barber,
Zualtamaia	2 11				P/na	(Weaver & Druner
Zuckermais	2.11					(weaver & Druner, 1027)
Zuckermais	2 51					(Weaver & Bruner
Luckermais	2.31					(Weaver & Druner, 1927)
Zuckermais	2 84					(Weaver & Bruner
Zuekennuis	2.01					(1927)
Zuckerrübe	0.72	clav				(Brown & Biscoe.
	0172					1985b: Malik et al
						2017b)
Zuckerrübe	1.33	sandy clay				(Brown & Biscoe, 1985
		loam				<b>、</b>
Zuckerrübe	1.22	sandy loam				(Brown et al., 1987b)
Winterraps	0.42	sandy loam				(Hofmann & Christen,
		·				2007)
Winterraps	0.75	sandy loam				(Hofmann & Christen,
_						2007)
Winterweiz	1		vor Winter			(Thorup-Kristensen et
en						al., 2009)
Winterweiz	0.35		Winter			(Thorup-Kristensen et
en						al., 2009)
Winterweiz	1.5		nach Winter			(Thorup-Kristensen et
en						al., 2009)

## Ehrenwörtliche Erklärung

Hiermit erkläre ich, dass die Arbeit selbständig und nur unter Verwendung der angegebenen Hilfsmittel angefertigt wurde.

Ort, Datum