

ABSCHLUSSBERICHT

EIP-Projekt Entwicklung eines internet- gestützten Informations- und Beratungs- systems zur Erhöhung der Wassernutzungseffizienz im Obstbau (AquaC+)

Zuwendungsempfänger:

Versuchs- und Kontrollring für den Integrierten Anbau von Obst und Gemüse
im Land Brandenburg e. V.

Dorfstrasse 1, 14513 Teltow, OT Ruhlsdorf

Telefon: 03328. 35175 35 / E-Mail: info@vkr-bb.de

Projektkoordination:

Versuchs- und Kontrollring für den Integrierten Anbau von Obst und Gemüse
im Land Brandenburg e. V.

Dorfstr. 1, 14513 Teltow, OT Ruhlsdorf

Dr. Andreas Jende (Projektkoordinator)

Tel.: 03328 35 175 35 / E-Mail: info@vkr-bb.de / url: www.aquacplus.info



EUROPÄISCHE UNION
Europäischer Landwirtschaftsfonds
für die Entwicklung des
ländlichen Raums



Mitglieder der Operationellen Gruppe und assoziierte Partner:

- Versuchs- und Kontrollring für den integrierten Anbau von Obst und Gemüse im Land Brandenburg e. V., Herr Dr. Andreas Jende, Dorfstr. 1, 14513 Teltow, OT Ruhlsdorf
- Leibniz-Institut für Agrartechnik und Bioökonomie e. V. (ATB), Abteilung Technik im Gartenbau, Frau Dr. Manuela Zude, Max-Eyth-Allee 100, 14469 Potsdam-Bornim
- Märkische Obstbau GmbH, Herr Jörg Seidel, Schmiedegasse 5 a, 14550 Groß Kreutz OT Schmergow
- Obstgut Franz Müller GmbH, Frau Anke Wollanik, Dorfstraße 1, 15345 Altlandsberg, OT Wesendahl
- Josef Jakobs Spargelhof GbR, Herr Jürgen Jakobs, Schäpe 21, 14547 Beelitz, OT Schäpe

Mitglieder ohne Antrag auf Zuwendung und neue, assoziierte Mitglieder:

- BB Brandenburger Obst GmbH, Paolo Dallago, Dorfstraße 37, 15345 Altlandsberg-Wesendahl, Tel.: 03341-498770, E-Mail: guenzel@bb-obst.com
- Obsthof Herzberg, Wilhelm Herzberg, Bodenreform 9, 15234 Frankfurt (Oder), Tel.: 0177 4494425, E-Mail: info@obsthof-herzberg.de

Projektlaufzeit: 2016-2021

Budget: 505.931,06 EUR

Datum: 28.01.2022

Autoren: Dr. Nikos Tsoulas, Dr. habil. Manuela Zude-Sasse, Dr. Andreas Jende



EUROPÄISCHE UNION
Europäischer Landwirtschaftsfonds
für die Entwicklung des
ländlichen Raums



Inhaltsverzeichnis

1. Kurzfassung in deutscher Sprache
 2. Kurzfassung in englischer Sprache
 3. Situation zu Projektbeginn
 - 3.1 Ausgangssituation
 - 3.2 Aufgabenstellung und Ziele des Vorhabens
 4. Projektverlauf
 5. Projektergebnisse
 - 5.1 Datenauswertung
 - 5.1.1 Bestandskartierung durch Überfliegung
 - 5.1.2 Scheinbare elektrische Leitfähigkeit des Bodens
 - 5.1.3 Bodentextur
 - 5.1.4 Durchwurzelungstiefe
 - 5.1.5 Wurzelwasserpotential
 - 5.1.6 Modellmodule
 - 5.1.6.1 TAW, RAW
 - 5.1.6.2 Feldangepasster Bestandskoeffizient
 - 5.1.6.3 Feldangepasste Wasserbilanzierung
 - 5.1.6.4 Wasserinterzeption
 - 5.1.6.5 Dendrometerinformation
 - 5.2 Diskussion und Schlussfolgerungen
 - 5.3 Beitrag der Ergebnisse zu förderpolitischen EIP-Zielen
 - 5.4 Nutzen der Ergebnisse für die Praxis
 - 5.5 Gegenüberstellung der ursprünglich geplanten zu den tatsächlich erreichten Zielen
 - 5.6 Wirtschaftliche und wissenschaftliche Anschlussfähigkeit und weiterführende Fragestellungen
 6. Zusammenarbeit der operationellen Gruppe
 7. Kommunikations- und Disseminationskonzept
- Quellen
- Anhänge:
- Publikationen
-

1. Kurzfassung in deutscher Sprache

Im Projekt AquaC+ wurde ein Verfahren entwickelt, um den täglichen Wasserbedarf auf Einzelbaumebene zu berechnen. Grundlage für die tägliche Wasserbilanz sind Klimadaten, die mit Hilfe von Wetterstationen erhoben werden. Wetterstationen wurden in den drei Partnerbetrieben installiert und später hinzukommende Partner rüsteten bestehende Wetterstation nach.

Für die genaue Berechnung der Wasserbilanz in AquaC+ wurden darüber hinaus Untersuchungen der örtlichen räumlich-aufgelösten Bodeneigenschaften (Kartierung der elektrischen Bodenleitfähigkeit, Bodenfeuchtemessungen, Bodentexturanalysen, Tropfbilder) durchgeführt. Bodenanalysen erfolgten durch eine detaillierte Rasterbodenbeprobung für die Kartierung der Bodeneigenschaften. Die scheinbare elektrische Leitfähigkeit (ECa) des Bodens wurde räumlich analysiert, wodurch die Bodenzonen mit ähnlichen Bodeneigenschaften innerhalb der Obstanlage identifiziert werden konnten. Die räumliche Variabilität von ECa variiert ähnlich wie die Bodentextur und beide Variablen erscheinen mit korrelierten Mustern.

Im Projekt wurden Pflanzendaten mit Hilfe des Vegetationsindex durch Überfliegungen, durch tägliche Variation des Stammdurchmessers mittels Dendrometer, die Fruchtentwicklungsphasen mittels Fruchtgaswechsellanalysen, das Wurzelwasserpotenzial mit der Scholanderbombe, die Durchwurzelungstiefe durch Wurzelausschlämmung, die Blattfläche durch LiDAR-Analysen sowie die Fruchtqualität in den Versuchsanlagen erfasst. Die Fruchtentwicklung wurde in den Obstplantagen sowohl in trockenen als auch in feuchten Bodenzonen untersucht.

Das Verfahren ist auf der Webseite von AquaC+ abrufbar, wo die beteiligten Betriebe, bei funktionierender Wetterstation, die tägliche Wasserbilanz einsehen und den Wasserbedarf ihrer Obstkulturen tagesaktuell, akkurat ermitteln können. Somit ist es für die Betriebe möglich, die knappe Ressource Wasser präzise einsetzen zu können.

2. Kurzfassung in englischer Sprache

In AquaC+ project, a method was developed to calculate the exact water requirements of individual fruit trees. With the help of precision horticulture technologies that have been introduced during the last decade, new insights into the temporal and spatial variability in orchards could be observed. The basis for the estimation of tree water balance is climate data collected with the help of weather stations.

The spatial variability of ECa varies according to the soil texture on a spatial scale and often appears to be correlated. Furthermore, ECa, along with soil texture, can be an indicator of soil moisture. The project results were able to confirm that spatial soil variability leads to corresponding water requirements.

In the project, plant data was recorded to determine the vegetation index with drone flights, the daily variation of stem diameter by means of dendrometers, the fruit development phases by

means of fruit gas exchange analyses, the root water potential with the Scholander bomb, the rooting depth by root slurry, the leaf area by LiDAR analyses, and the fruit quality in the experimental plants. Fruit development was studied in the orchards in dry and wet soil zones.

The procedure is available on the AquaC+ website, where the participating farms can view the daily water balance if the weather station is functioning. This makes it possible for the farms to accurately determine the water requirements of their fruit crops on a daily basis in order to be able to precisely use the scarce resource of water.

3. Situation zu Projektbeginn

3.1 Ausgangssituation

Die Bewässerung ist ein relativ teures sowie arbeits- und energieintensives Verfahren, das jedoch bei obstbaulichen Kulturen in Brandenburg zur Verbesserung der Ertragsleistung, der Ertragssicherheit und Produktqualität eingesetzt werden muss. Mit der gesteuerten Bereitstellung von Zusatzwasser kann gleichzeitig ein wesentlicher Beitrag zum Umweltschutz geleistet werden, da es zu einer optimierten Nährstoffumsetzung im Boden und zu einer verringerten Nährstoffauswaschung kommt. Die Brandenburger Böden weisen durch ihren pleistozänen und postpleistozänen Ursprung eine hohe, kleinräumige Variabilität auf. Bestehende Bodenkarten sind räumlich zu grob aufgelöst, um Neuanlagen zu charakterisieren und hinsichtlich des notwendigen Bewässerungssystems zu bewerten. Darüber hinaus wird der effektive Wasserbedarf der Obstgehölze derzeit nicht berücksichtigt. Denn bei obstbaulichen Kulturen ist der Wasserbedarf neben klimatischen Faktoren vom Stadium der Fruchtentwicklung beeinflusst.

Vorhandene Modelle der Bewässerungssteuerung (Geisenheimer Modell, BEREST, FAO-56) sind bislang nicht systematisch in der Praxis brandenburgischer Unternehmen eingeführt worden. Der effektive, variierende Wasserbedarf in den Phasen der Pflanzen- und speziell Fruchtentwicklung wird bislang in der Praxis nicht beachtet. Dementsprechend erfassen die bisher eingesetzten Sensoren in den Anlagen wenige Wetterdaten, womit lediglich indirekt ein Defizit der Wasserversorgung ermittelt werden kann. Erste Erfahrungen der Bewässerungssteuerung über die klimatische Wasserbilanz wurden unter Thüringer Standortverhältnissen für Dauerkulturen im Obstbau gesammelt. Die zusätzliche Einbindung von Bodendaten und Pflanzensensoren für die Ermittlung des effektiven Wasserbedarfs der verschiedenen Obstarten sowie Sorten/Unterlage Kombinationen hat ein hohes wirtschaftliches und ökologisches Potenzial.

In Brandenburg sind 85 % der obstbaulichen Dauerkulturen bewässerungsfähig. Die Bewässerungspraxis hat sich dabei in den vergangenen Jahren permanent weiterentwickelt und erfüllt neben der reinen Wasserversorgungsfunktion in Trockenperioden immer mehr Zusatzfunktionen wie bspw. zur Risikominimierung als Frostschutzberegnung, zur

Bestandsklimatisierung während längerer Hitzeperioden und/oder als Fertigungsanlage. Sowohl die Entscheidung für ein Bewässerungssystem als auch die betriebliche Entscheidung für die Bewässerungssteuerung beinhaltet damit mehr Parameter als in den zurückliegenden Jahren und bedarf zusätzlicher Entscheidungshilfen. Speziell für die Bewässerungssteuerung sollte diese Entscheidungsunterstützung im Projekt erarbeitet werden.

3.2 Aufgabenstellung und Ziele des Vorhabens

Ziel des Projekts AquaC+ war es, den Wasserbedarf der verschiedenen Obstarten Apfel, Süßkirsche und Heidelbeere durch Wasserbilanzierung zu ermitteln, um eine effektive Steuerung der Bewässerungsanlagen zu ermöglichen.

Es war bekannt, dass die Bodenarten räumlich variieren und je nach Betriebsstandort somit auch die Verfügbarkeit von Wasser für die Pflanzen. Daher sollten standortspezifisch die Umweltdaten sowie räumlich aufgelöst Pflanzen- und Bodenparameter ermittelt werden. Die Auswirkungen der Bodenmuster (Kartierung) auf die tatsächliche Wurzeltiefe war eine zusätzliche Fragestellung. Verschiedene Pflanzensensoren sollten hinsichtlich ihres Nutzens für den Brandenburger Obstbau getestet werden.

Unter Verwendung eines Bewässerungsmodells sollte der unterschiedliche Wasserbedarf analysiert werden. Schließlich sollte so ein datenbasierter Ansatz entwickelt werden, der eine praxisnahe, online-fähige Anwendung für die Obstbauproduktion ermöglicht.

Meilenstein 1 wurde entsprechend Vorhabensplanung im Projektmonat 12 erreicht. Nach einem Projektjahr war die räumliche Charakterisierung der sechs Versuchsanlagen erfolgt. Daten zur Bewässerung im ersten Projektjahr sowie die erzielten Erträge und Fruchtqualität lagen für eine spätere Bewertung des neuen Ansatzes vor. Die Wetterstationen waren installiert.

Meilenstein 2 wurde nach 36 Projektmonaten teilweise erreicht. Die Wasserbilanzierung bei den OG Partnern war online verfügbar, jedoch erfolgte im Nachgang eine Überarbeitung, so dass Meilenstein 2 mit einigen Monaten Verzögerung noch im Projektrahmen erreicht wurde. Die Daten sind mittlerweile online verfügbar und auf der Projektwebseite des Versuchs- und Kontrollring abrufbar.

Die Charakterisierung der Fruchtentwicklungsphasen ist erfolgt, Koeffizienten zur Wichtung der Wasserbilanzierung und deren Terminierung entsprechend der Gegebenheiten in den Versuchsanlagen liegen vor.

Meilenstein 3 wurde zum Projektende erreicht, wobei die Dendrometerdaten erhoben, jedoch für die Einbindung in die Wasserbilanzierung verworfen wurden. Eine erhöhte Relevanz hatten Blattflächenanalysen zur Berechnung der Kronentranspiration und Wasserinterzeption. Die Daten wurden zur Publikation bei einem wissenschaftlichen Verlag eingereicht.

4. Projektverlauf

Das Projekt startete am 01.07. 2016. mit einem Kick-Off-Meeting, auf dem sich alle Teilnehmenden kennenlernten, die Anlagen und Sorten in den jeweiligen Betrieben/Anbauregionen festgelegt und die Versuche für das erste Projektjahr geplant wurden.

Tabelle 1: Im Projekt AquaC+ beprobte Anlagen

Standort	Fruchtart	Sorte	Größe [ha]
Josef Jakobs Spargelhof GbR	Heidelbeere	'Bluecrop'	0.3
		'Duke'	0.5
Märkische Obstbau GmbH	Süßkirsche	'Regina'	0.3
	Apfel	'Gala'	0.4
Obstgut Franz Mül- ler GmbH	Apfel	'Elstar'	0.5
		'Pinova'	0.4

Arbeitspakete - Entsprechend der AquaC+ Vorhabensbeschreibung wurden die Fragestellungen in folgenden Arbeitspaketen bearbeitet.

- I. *Anlagencharakterisierung:* Das ATB führte unter personeller Beteiligung des jeweiligen Betriebes die räumliche Charakterisierung der Anlagen durch. Berücksichtigt wurden die Bestandseigenschaften durch Überfliegung und Auswertung der RGB-Aufnahmen. Die Böden wurden mittels scheinbarer elektrischer Leitfähigkeitswerte kartiert. Die Arbeiten erfolgen unter Anleitung eines ATB-Wissenschaftlers durch Nachwuchswissenschaftler und Techniker des ATB. Die Wetterstationen wurden von den Betrieben, unterstützt vom Projektberater installiert und weiterhin von den Betrieben gewartet.
- II. *Datenbasis für Bewässerungssteuerung:* Es wurden umfangreiche mehrjährige Messdaten in den Anlagen erhoben. Die Arbeiten wurden vom Versuchs- und Kontrollring und ATB geplant. Die Durchführung erfolgte ebenfalls gemeinsam. Die Wasserbilanzierung wurde angepasst an die Feldbedingungen in den Betrieben. Eine Datenbank mit Frontend wurde vom ATB aufgebaut. Der Algorithmus wurde vom ATB-Mitarbeiter weiterentwickelt und gemeinsam erfolgte die Einbindung in das Modell, wobei zunächst das Geisenheimer Modell getestet und dann final der FAO-56-Ansatz unter Berücksichtigung der Bodenvariablen verwendet wurde. Die Fortschritte in der Verfahrensentwicklung wurden publiziert.
- III. *Implementierung:* Wetterdaten und Ergebnisse der Wasserbilanzierung wurden durch das ATB auf der Webseite des Kontrollring online verfügbar gemacht. Eine Dokumentation erfolgte hinsichtlich aller praxisnahen Messprotokolle, die ebenfalls online verfügbar gemacht wurden.

- IV. *Validierung*: Die Validität und Bewertung des entwickelten Verfahrens in den Produktionsanlagen und der Referenzanlage wurde 2020 durchgeführt.
- V. *Publikation*: Die Verbreitung findet in der Obstbau-Community durch den Versuchs- und Kontrollring, Berater und dem ATB statt: Auf der hierfür erstellten Webseite des Kontrollrings, in Fachzeitschriften, auf den Brandenburger Obstbautagen und im Rahmen eines offenen, durch das Projekt DiLan organisierten Workshops. Die wissenschaftlichen Erkenntnisse wurden zur Publikation eingereicht, bzw. bereits veröffentlicht.

5. Projektergebnisse

5.1 Datenerhebung

5.1.1 Bestandskartierung durch Überfliegung

Die bei Überfliegungen gewonnenen RGB-Aufnahmen lieferten die ersten Daten zur Charakterisierung der räumlichen Variabilität des Bestandes. Die Flugkampagnen wurden kurz nach der Vollblüte der Bäume durchgeführt. Die Flugmissionen erfolgten mit einem Octacopter (CiS GmbH, Rostock), der mit einer RGB-Kamera (α -6000, Sony, Tokio, Japan) ausgestattet war. Das System hatte ein Gewicht von weniger als 2 kg und war für Flugzeiten von bis zu 30 Minuten ausgelegt. Um Unschärfen zu reduzieren und den Kamerawinkel zu fixieren, wurde ein zwei-Achsen-Gimbal verwendet. Die Kamera hatte die folgenden Spezifikationen: 24,7 Megapixel-APS-C-Chip mit einer Sensorgröße von 23,6 mm × 15,8 mm, mit einem daraus resultierenden Pixelabstand von 3,9 μ m. Die bei allen Kampagnen verwendete Brennweite betrug 16 mm und die Blende war auf 5,6 eingestellt. Die Verschlusszeit wurde aufgrund der wechselnden Lichtverhältnisse adaptiv variiert. Das detaillierte Flugbild wurde bei einer Flughöhe von ca. 10 m durchgeführt. Die Flugbahn erfolgte entlang der Baumreihen, während die Kamera Schrägaufnahmen mit einem Winkel von 20° gegen den Nadir machte. Die Flugeschwindigkeit wurde auf 1 m/s eingestellt, was in einer Bildüberlappung von 92 % bzw. 85 % an der ersten abgebildeten Baumwand für den Kontur- bzw. Detailflug resultierte. Die Flugkampagnen fanden in Heidelbeeren (Schäpe), Kirschen (Schmergow) und Äpfeln (Wesendahl) statt.

Für die Schätzung der Vegetation wurden mehrere Vegetationsindizes getestet. Die finale Darstellung erfolgte mit dem Grün-Rot-Vegetationsindex (GRVI). Der GRVI ist ein Index, der aus sichtbaren Bildern berechnet werden kann (Motohka et al., 2010). Der Index basiert auf dem G/R-Verhältnis, das gemäß der folgenden Gleichung definiert ist: $GRVI = (G-R) / (G+R)$ (1)

Motohka et al. (2010) bewerteten die Verwendung des GRVI als phänologischen Indikator. Die Arbeitsgruppe kam zu dem Schluss, dass der GRVI-Index zwischen grüner Vegetation (Index über 0), Wasser und Schnee (Index um 0) und Böden (Index unter 0) unterscheiden kann. Darüber hinaus wurden die zu den einzelnen Bäumen gehörenden grünen Pixel ausgeschnitten, um die räumliche Variabilität der Baumkronenfläche zu schätzen.

Die Vegetation war bei einem Mittelwert von $5,52 \pm 0,23$ Standardabweichung (SD) bei Heidelbeeren (Abb. 1) erkennbar. Ähnliche Werte wurden bei den jungen Kirschbäumen

festgestellt (Abb. 2). Die höchsten Werte wurden in der Apfelplantage (7,24) ermittelt, während das Unkraut in den Reihen einen GRVI von sogar 9,41 aufwies. Die Bedeckungsfläche bei Heidelbeer-Pflanzen schwankte zwischen 0,8 und 8,1 m² bedingt durch die Inhomogenität der Heidelbeerpflanzen, wobei sich die häufigsten Werte zwischen 0,85 und 1,24 m² zeigten. Bei Äpfeln und Kirschen hingegen war die Variabilität weniger ausgeprägt.

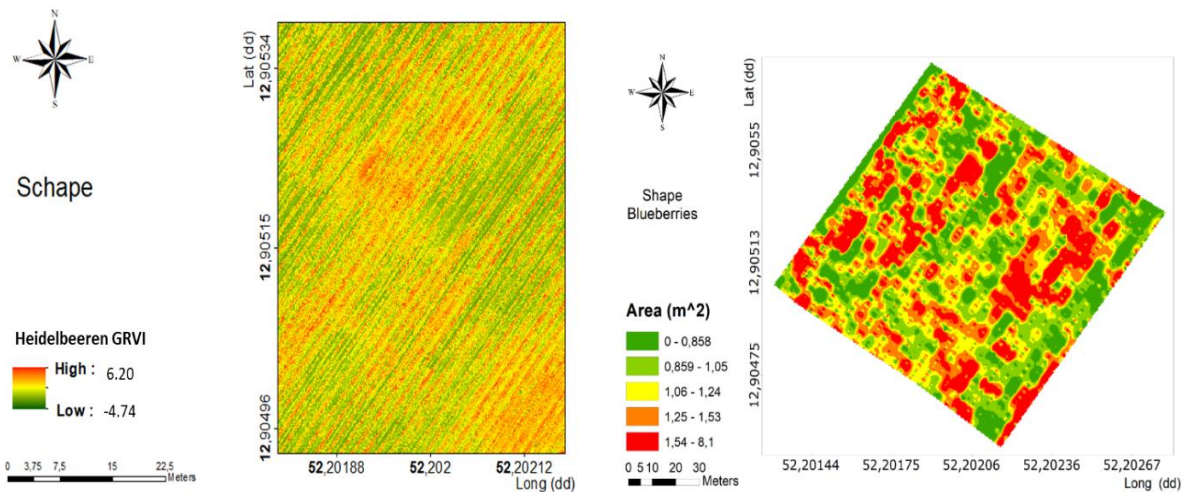


Abbildung 1. Kartierte Falschfarbendarstellung basierend auf zusammengeführten RGB Bildern, wobei dargestellt sind (links) der Grün-Rot-Vegetationsindex (GRVI) und (rechts) die Kronenbedeckung in Quadratmetern bei Heidelbeeren, Schäpe, 2017.

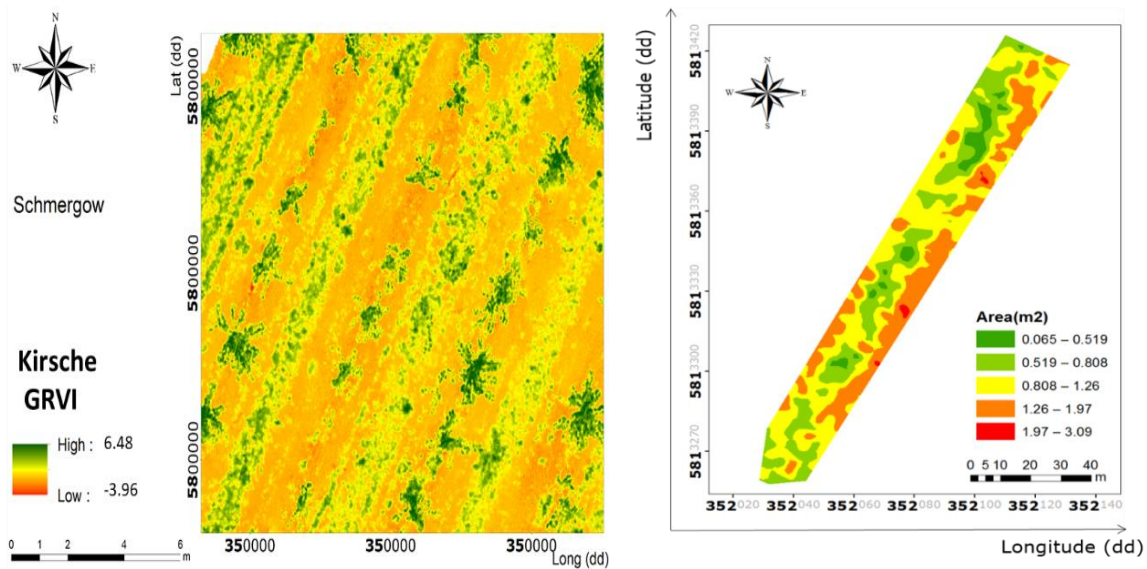


Abbildung 2. Kartierte Falschfarbendarstellung basierend auf zusammengeführten RGB Bildern, wobei dargestellt sind (links) der Grün-Rot-Vegetationsindex (GRVI) und (rechts) die Kronenbedeckung in Quadratmetern bei Süßkirsche, Schmergow, 2017

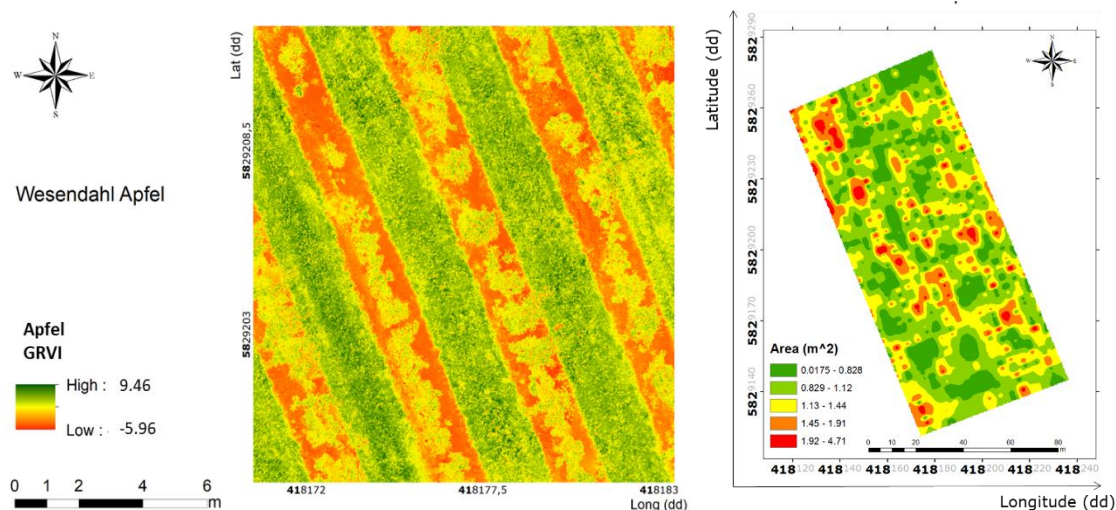


Abbildung 3. Kartierte Falschfarbendarstellung basierend auf zusammengefügteten RGB Bildern, wobei dargestellt sind (links) der Grün-Rot-Vegetationsindex (GRVI) und (rechts) die Kronenbedeckung in Quadratmetern bei Apfel, Wesendahl, 2017

5.1.2 Scheinbare elektrische Leitfähigkeit des Bodens

Die scheinbare elektrische Leitfähigkeit (ECa) des Bodens wird von einer Reihe von Bodenparametern beeinflusst, wie z. B. dem Salzgehalt, der Bodentextur, der Feuchtigkeit, dem Anteil an Wurzeln und anderen organischen Stoffen. Somit liefert die ECa-Messung wertvolle Informationen zur Variabilität der Bodeneigenschaften im Feld und die Abgrenzung von Zonen wird ermöglicht. In vorangegangenen Arbeiten am ATB wurde gezeigt, dass die ECa, gemessen in Brandenburg, einen Einfluss auf das vegetative und generative Wachstum von Obstbäumen hat (Käthner und Zude-Sasse, 2015) und sich dies auf den Bewässerungsbedarf der einzelnen Kulturen auswirkt. Im Projekt AquaC+ wurde die ECa als Indikator für die Bodenvariabilität in allen Anlagen erfasst. Zudem wurden in einzelnen Anlagen zusätzlich zur ECa Bodenproben in den ermittelten Zonen entnommen und die Bodentextur (Korngrößenverteilung) im Labor bestimmt.

Die ECa-Messung des Bodens wurde mit einem galvanisch gekoppelten Widerstandssystem mit einer Wenner-Elektrodenkonfiguration bei Feldkapazität durchgeführt. Die vier Elektroden waren äquidistant. Die Elektroden waren in einer geraden Linie an der Bodenoberfläche angeordnet, wobei die beiden äußeren Elektroden als Strom- oder Senderelektroden dienten, während die beiden inneren Elektroden die Potential- oder Empfängerelektroden darstellten. Die Untersuchungstiefe ist durch den Elektrodenabstand definiert. Er wurde auf 50 cm festgelegt, was einer Untersuchungstiefe von 25 cm entspricht.

Die Visualisierung der Ergebnisse zeigt für Brandenburg typische Sand- und Lehmlinsen variabler Größe (Abb. 4-7). In den Heidelbeeren wurden keine ECa-Karten angefertigt, da durch Einbringung von Substrat in den Pflanzreihen die Heidelbeerpflanzen nicht ausreichend mit dem gewachsenen Boden verbunden waren. Die hinsichtlich der ECa-Werten ausgewerteten Karten lassen die räumliche Variabilität der Projektanlagen erkennen und verdeutlichen die

Notwendigkeit der Standortcharakterisierung für die effiziente Wassernutzung zur Qualitäts-optimierung. Nicht nur die Ausbreitung des durchwurzelten Raums, sondern auch die Wasserhaltefähigkeit des Bodens wird hierdurch beeinflusst. Zur Anlagencharakterisierung wurden die elektrische Bodenleitfähigkeit in den gesamten Anlagen und zusätzlich die Einzelbaumerträge der Bäume stichprobenartig (100 - 450 Bäume in einer Anlage) erfasst. Aus den räumlichen Daten zur ECa und der Fruchtertragskapazität wurden Karten für die entsprechenden Anlagen erstellt.

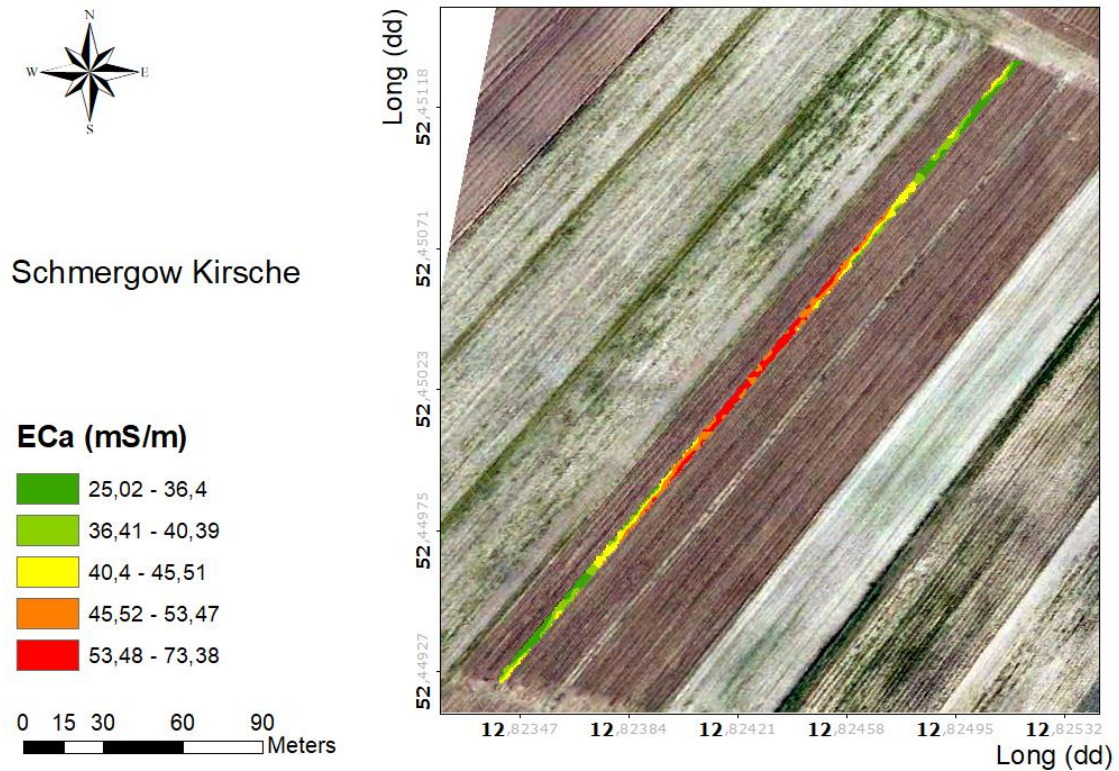


Abbildung 4. Karte der Bodenleitfähigkeit in Schmergow (Süßkirsche, 2017) auf dem Hintergrund der Google-Satellitenbilder.

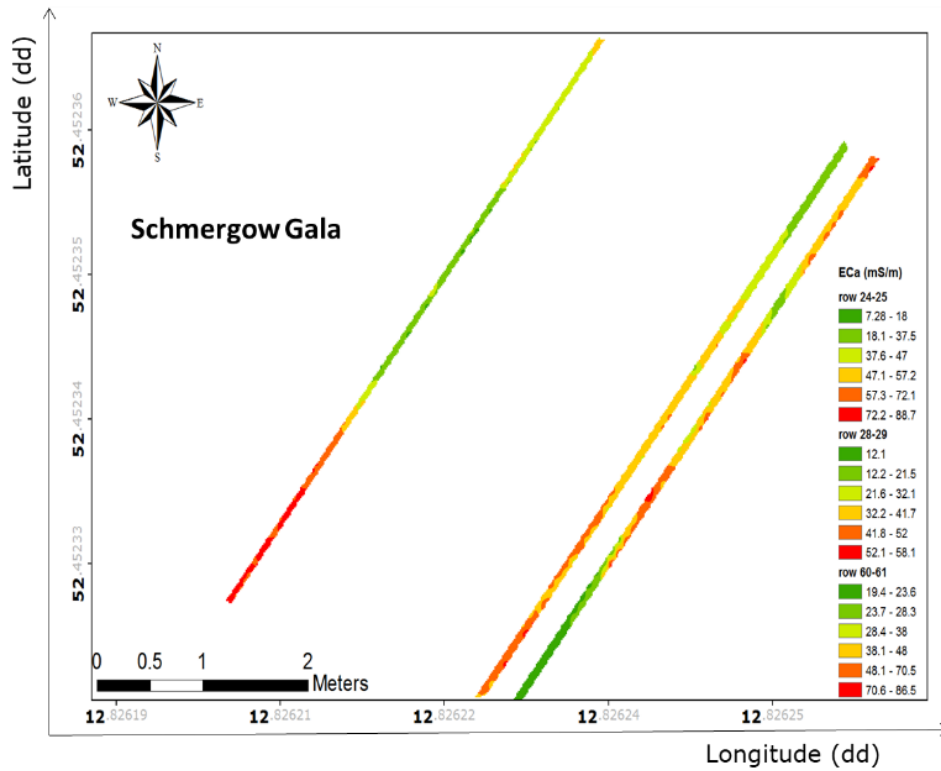


Abbildung 5. Karte der scheinbaren elektrischen Bodenleitfähigkeit in Schmergow (Apfel, Gala), 2017

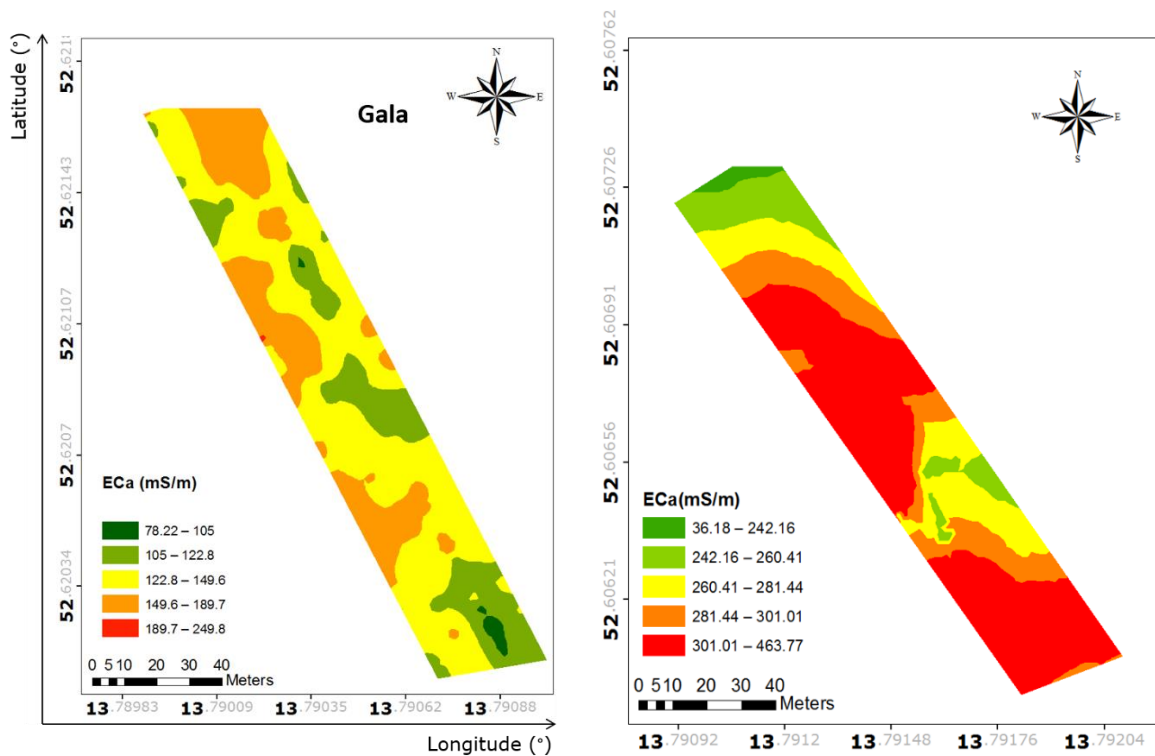


Abbildung 6. Karte der scheinbaren elektrischen Bodenleitfähigkeit in Wesendahl (links) Gala (rechts) Elstar, 2017

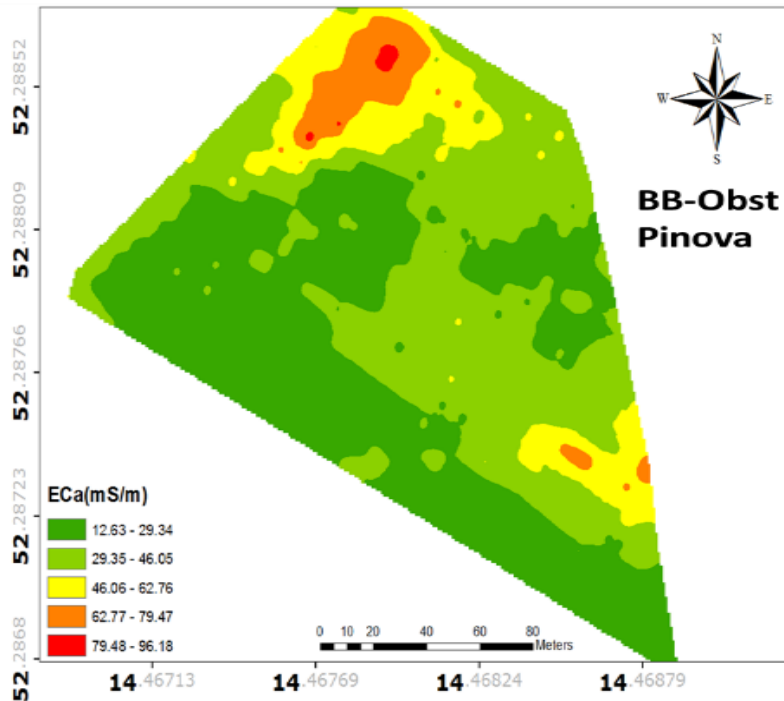


Abbildung 7. Karte der scheinbaren elektrischen Bodenleitfähigkeit in Altlandsberg (Apfel, Pinova), 2018

5.1.3 Bodentextur

Entsprechend der Muster der ECa-Karte wurden Probenahmestellen ausgewählt, die den ECa-Wertebereich innerhalb der Obstanlage abdecken. Die Proben wurden in 30 cm und 60 cm Tiefe bei Süßkirsche und Apfel (Tabellen 2, 3) unter Verwendung eines kombinierten Bodenprobennehmers von Edelman gesammelt. Die Proben wurden mit der Sedimentationsmethode analysiert, die auf der unterschiedlichen Absetzzeit von Partikeln unterschiedlicher Größe basiert, die als Ton, Schluff und Sand definiert sind, aus denen die Bodentextur aufgebaut ist (Taubner et al. 2009).

Die Ergebnisse der ANOVA unter Berücksichtigung von ECa als abhängigen Faktor der Bodenklassen zeigten, dass ECa von den sandigen Böden beeinflusst wurde. Genauer gesagt schien die ECa von mittlerem Schluff beeinflusst zu sein, mit $F = 3,91$ und auch ECa wurde von mittlerem Sand mit $F = 7,55$ beeinflusst. Es wurde jedoch kein weiterer Zusammenhang zwischen ECa und verbleibenden Bodenklassen beobachtet. Schluff war positiv mit ECa verwandt, während Sand eine negative Korrelation zeigte (Tabelle 4). Darüber hinaus korrelierte die Schüttdichte positiv mit Sand und mittlerem Sand. Ähnliche Ergebnisse wurden früher von Corwin und Lesch 2013 erhalten, die schlussfolgerten, dass die ECa von der Bodentextur und der Bodenfeuchtigkeit beeinflusst wird (Hedley und Yule 2009; Sudduth et al. 2005). Es wurde eine signifikant negative Korrelation zwischen ECa und Wurzeltiefe gefunden ($r = -0.822$). Darüber hinaus korrelierten Sand, Mittelsand und Grobsand positiv mit der Wurzeltiefe, während die Wurzeltiefe negativ mit Schluff korrelierte.

Tabelle 2. Beschreibende Statistik der Bodentextur (n = 5), Schmergow (Süßkirsche)

Row	Baum	Ton	Schluff (fein)	Schluff (mittel)	Schluff (grob)	Sand (fein)	Sand (mittel)	Sand (grob)	Bodenart
		<0.002	0.002-0.01	0.01-0.02	0.02-0.06	0.06-0.2	0.2-0.63	0.63-2.0	(nach KA5)
10	17	7.9	3.4	6.1	10.0	36.0	32.6	4.0	SI2
10	60	7.5	2.8	6.9	9.9	36.8	31.9	4.2	SI2
10	100	4.8	4.0	5.4	8.8	39.3	33.6	4.1	Su2
13	50	9.7	4.3	4.6	7.6	36.3	32.9	4.6	SI3
13	90	6.6	3.8	6.1	7.3	37.7	34.1	4.4	SI2

Tabelle 3. Beschreibende Statistik der Bodentextur (n = 20), Wesendahl (Apfel)

	Mean	SD	Range	Minimum	Maximum	CV%
Schluff (fein) [mg kg ⁻¹]	26.00	8.12	27.00	11.00	38.00	31
Schluff (mittel) [mg kg ⁻¹]	40.25	11.92	39.00	22.00	61.00	30
Schluff (grob) [mg kg ⁻¹]	77.75	19.33	73.00	42.00	115.00	25
Sand (fein) [mg kg ⁻¹]	302.85	60.76	228.00	153.00	381.00	20
Sand (mittel) [mg kg ⁻¹]	395.20	47.17	146.00	323.00	469.00	12
Sand (grob) [mg kg ⁻¹]	117.75	63.64	245.00	40.00	285.00	54

Tabelle 4. Deskriptive Statistik für die Partikelgrößenverteilung, die Lagerdichte und den volumetrischen Wassergehalt bei Feldkapazität (FC₀) und am Welkepunkt (WP₀) in 30 cm, sowie die scheinbare elektrische Leitfähigkeit (ECa), die Standardabweichung (SD) und den Varianzkoeffizienten (CV) liefert (n = 10)

	Range	Minimum	Maximum	Mean	SD	Variance	CV %
Schluff (fein) (mg kg ⁻¹)	2.60	1.80	4.40	3.07	0.93	0.87	30.36
Schluff (mittel) (mg kg ⁻¹)	3.60	3.50	7.10	6.00	1.26	1.60	21.08
Schluff (grob) (mg kg ⁻¹)	2.50	13.30	15.80	14.41	0.96	0.93	6.68
Sand (fein) (mg kg ⁻¹)	2.10	34.50	36.60	35.23	0.73	0.54	2.086
Sand (mittel) (mg kg ⁻¹)	5.10	27.10	32.20	29.81	1.65	2.71	5.51
Sand (grob) (mg kg ⁻¹)	2.10	4.30	6.40	5.55	0.61	0.37	10.91
Lagerdichte (g cm ⁻³)	0.45	0.74	1.19	1.01	0.13	0.02	12.43
ECa (mS/m)	74.76	11.95	86.70	46.90	14.29	1.06	30.46
FC ₀ (cm ³ /cm ³)	6.00	23.00	29.00	25.80	2.09	4.38	8.11
WP ₀ (cm ³ /cm ³)	5.00	4.00	9.00	6.90	1.37	1.88	19.89

5.1.4 Durchwurzelungstiefe

Parallel zur Bodenprobenahme wurde die Wurzeltiefe entsprechend der ECa-Variation (n = 120) gemessen. Der Boden um die Wurzel herum wurde mit Wasser ausgespült und die Wurzeltiefe als mit dieser Methode sichtbare maximale Wurzeltiefe bestimmt.

Die ECa-Werte im Wurzelraum der vermessenen Bäume variierten zwischen 2.99 und 11.71 mS m⁻¹. Die gemessene Wurzeltiefe bei Apfel mit der Unterlage M9 betrug ungefähr 20 cm, mit C.V = 18.82 %, wobei die FAO eine Mindestwurzeltiefe von 1 m für Apfelbäume vorschlägt. Der Wert ist für Sämlingsunterlagen relevant, die jedoch in Brandenburg keinen Einsatz finden. Das flachere Wurzelsystem trat hauptsächlich im Süden und im mittleren Nordteil des Feldes auf, während die Wurzeln im Südwesten und Südosten tiefer waren. Im Südteil und im mittleren Nordteil des Feldes wurden erhöhte ECa-Werte gemessen, während im West- und Ostteil niedrigere Werte gemessen wurden (Abb. 8). Zwischen der ECa und der Wurzeltiefe wurde eine starke negative Beziehung mit $r = -0.80$ und $r = -0.58$ in Regionen mit niedriger bzw. hoher ECa beobachtet. Bei Kirschen mit der Unterlage Gisela-5 wurden erhöhte Durchwurzelungstiefen festgestellt (Tabelle 5).

Abbildung 8. Falschfarbenkarte der Durchwurzelungstiefe bei Apfel am Standort Altlandsberg

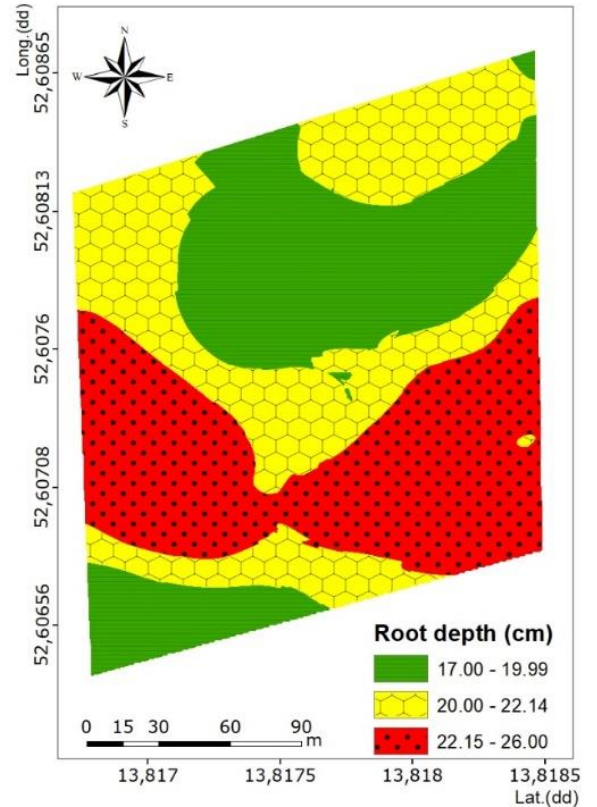


Tabelle 5. Beschreibende Statistik zur Durchwurzelungstiefe in Bereichen mit hohen, mittleren und niedrigen Werten der scheinbaren elektrischen Bodenleitfähigkeit (ECa) bei Apfel ($n = 30$) und Süßkirsche ($n = 30$) am Standort Altlandsberg, wobei die Standardabweichung (SD) und die Varianz (CV) angegeben sind.

Wurzeltiefe [cm]	ECa	Min	Max	Mean	SD	CV [%]
Apfel	Niedrig	0.3	0.35	0.33	0.01	0.05
	Mittel	0.25	0.3	0.27	0.02	0.07
	Hoch	0.24	0.28	0.25	0.01	0.06
Kirschen	Niedrig	0.48	0.53	0.51	0.02	0.04
	Mittel	0.39	0.55	0.47	0.08	0.17
	Hoch	0.35	0.49	0.42	0.07	0.16

5.1.5 Wurzelwasserpotential

Die Wurzeln wurden mit Bodenkernprobennehmer und einem Messer in 10–20 cm Tiefe für jeden Probebaum beprobt. Zur Messung des Wurzelwasserpotentials wurde eine Scholander-Druckkammer (Plant Water Status Console 3000, Soil Moisture Equipment Corp., USA) verwendet. Die Wurzel wurde in der Kammer gasdicht eingeschlossen. Wenn der Druck in der Kammer den Turgordruck der Wurzel erreichte, trat aus dem Xylem Wasser aus (Turner,

1988). Am Gleichgewichtspunkt, wenn der Druck in der Kammer dem Druck des Wurzelwasserpotentials (MPa) entspricht, wurde der Druck aufgezeichnet (Herppich und Geyer, 2001).

Die Messungen wurden über den Verlauf der Vegetationsperiode durchgeführt. Für jeden beprobten Baum, bei Apfel ($n = 20$) und Kirschen ($n = 20$), wurde der Durchschnitt von vier Messungen genommen. Die Messungen erfolgten bei Morgendämmerung und am Mittag. Das Wurzelwasserpotential während der Morgendämmerung und Mittags korrelierte bei Apfelbäumen positiv, was bedeutet, dass die Bäume keinen starken Trockenstress erlitten. Dies wird durch das wiederangesättigte Gewebe am Morgen angezeigt. Die deutlich verringerten Werte während der Mittagszeit erscheinen aufgrund der offenen Spaltöffnungen und des aktiven Photosyntheseapparates. Das Wurzelwasserpotential zeigte einen Mittelwert von $-0.84 \text{ MPa} \pm 0.25 \text{ SD}$ am Morgen und $-1.33 \text{ MPa} \pm 0.23 \text{ SD}$ gemessen am Mittag in den Apfelbäumen. Bei Süßkirschen zeigte das Wurzelwasserpotential während der Saison einen sehr variablen Bereich, beginnend von -0.34 bis -5.35 MPa im Morgengrauen und von -0.67 bis -6.77 MPa am Mittag. Die niedrigsten Werte wurden in Gebieten mit niedrigem ECa dargestellt, während die höchsten Werte in Gebieten mit hohem ECa auftraten. Die Werte liegen insgesamt in bereits früher gemessenen Bereichen (Dodd et al. 2010; Whitmore und Whalley 2009). Das mittags gemessene Wurzelwasserpotential wurde weiter genutzt, um die kritischste Wasserdefizitsituation unter Berücksichtigung früherer Studien zu adressieren (Naor et al. 1999). Das Wurzelwasserpotential mittags definiert den tatsächlichen Welkepunkt (WP) und damit den für den Baum zugänglichen volumetrischen Bodenwassergehalt. Dieser wurde in der Wasserbilanz weiter betrachtet.

Für das allgemein angenommene $WP_0 = -1.5 \text{ MPa}$ und die Bodentextur, die im niedrigen ECa Bereich gemessen wurde, betrug der volumetrische Wassergehalt $6 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$. Unter Berücksichtigung der Variabilität der Bodentextur wurde der volumetrische Wassergehalt bei WP_0 auf $8 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ erhöht. Die ECa zeigte eine positive Korrelation mit $\Psi_{F,dawn}$ und $\Psi_{H,dawn}$ ($r = 0.46$ und $r = 0.67$). Eine weitere deutlich positive Korrelation ergab sich zwischen der Lagerdichte und dem Wurzelwasserpotential mittags während der Zellteilung und während der Ernte ein Zusammenhang ($r = 0.47$ und $r = 0.56$).

5.1.6 Modellmodule

5.1.6.1 TAW, RAW

Neben der Bodentextur kann ECa als Indikator für den Bodenfeuchtigkeitsgehalt dienen, da die Bodeneigenschaften den Wassergehalt beeinflussen (Hedley et al, 2010). Hedley und Yule (2009) berichteten, dass die räumliche Variation der Bodenwasserrückhalteeigenschaften stark mit der räumlichen Variation der Bodentextur über ein Feld korreliert, und stellten fest, dass offensichtlich Bodenzonen mit hohen ECa-Werten innerhalb eines Felds eine erhöhte Wasserhaltekapazität im Vergleich zu leicht strukturierten Böden mit niedrigen ECa-Werten zeigen. Daher bestimmt die Textur bei der Berechnung des Wasserhaushalts einer Obstanlage die Feldkapazität, die für die Berechnung des gesamten verfügbaren Wassergehalts des Bodens (TAW) entscheidend ist. Darüber hinaus wird die Fähigkeit der Pflanzen, Wasser zu extrahieren, durch die Bodenbeschaffenheit und das Wurzelwasserpotential beeinflusst, die

innerhalb der Obstanlage räumlich variieren können. Dieser Parameter wird als pflanzenverfügbare Wassergehalt in der Wurzelzone (RAW) definiert und als Schwellenwert für den Bewässerungsbedarf verwendet (Jensen und Allen, 2016).

Tabelle 6. Das Wasserpotenzial des Bodens bei Feldkapazität (FC₀) und angenommenem Welkepunkt unter Berücksichtigung der Bodentextur und des entsprechenden volumetrischen Wassergehalts (VWC; cm³/cm³).

	Low ECa		Mid ECa		High ECa	
	Mean	VWC	Mean	VWC	Mean	VWC
FC ₀ [cm ³ cm ⁻³]	-0.33	22.3	-0.3	25	-0.26	27
WP ₀ [cm ³ cm ⁻³]	-1.5	6.00	-1.2	7.00	-1.01	8.00

Der TAW zeigte über die Jahre einen Mittelwert von 32,53 mm mit $\pm 3,01$ SD bei Apfelbäumen und 52,76 mm $\pm 5,22$ SD bei Kirschen (Abb. 9). Außerdem wurde eine Korrelation zwischen ECa und TAW in Regionen mit niedrigem ($r = 0,75$), mittlerem ($r = 0,50$) und hohem ($r = 0,47$) ECa bei Apfelbäumen festgestellt. Die Regionen mit einem tieferen Wurzelsystem wiesen höhere Werte des TAW auf und umgekehrt für die flacheren Wurzelsysteme. Dies wurde bereits für eine Apfelanlage publiziert (Tsoulias et al., 2018). Die ECa Werte zeigten eine negative Korrelation mit der Lagerdichte ($r = -0,71$) und eine positive Korrelation mit TAW ($r = 0,45$) bei Kirschbäumen. Dieses Ergebnis stimmt mit früheren Arbeiten überein, in denen beobachtet wurde, dass die räumlichen Muster des verfügbaren Wassers in der Wurzelzone und der ECa-Wert hoch korreliert sind (McCutcheon et al., 2006, Lo et al., 2017). Außerdem passen sich die Wurzeln an das verfügbare Bodenwasser an, was durch die Korrelation von ECa und Wurzeltiefe deutlich wird. Erste Simulationen räumlicher Bewässerungsdefizite durch einen im ATB programmierten Algorithmus lieferten ortsspezifische Informationen, die publiziert wurden. Da eine räumlich aufgelöste Bewässerungssteuerung derzeit in der Praxis noch nicht möglich ist, wurde die Wasserbilanzierung und Berechnung des notwendigen Zusatzwasser als drei feldspezifische Werte ausgegeben, die Bereiche der Anlage mit hohen, mittleren und niedriger Wasserhaltekapazität widerspiegeln.

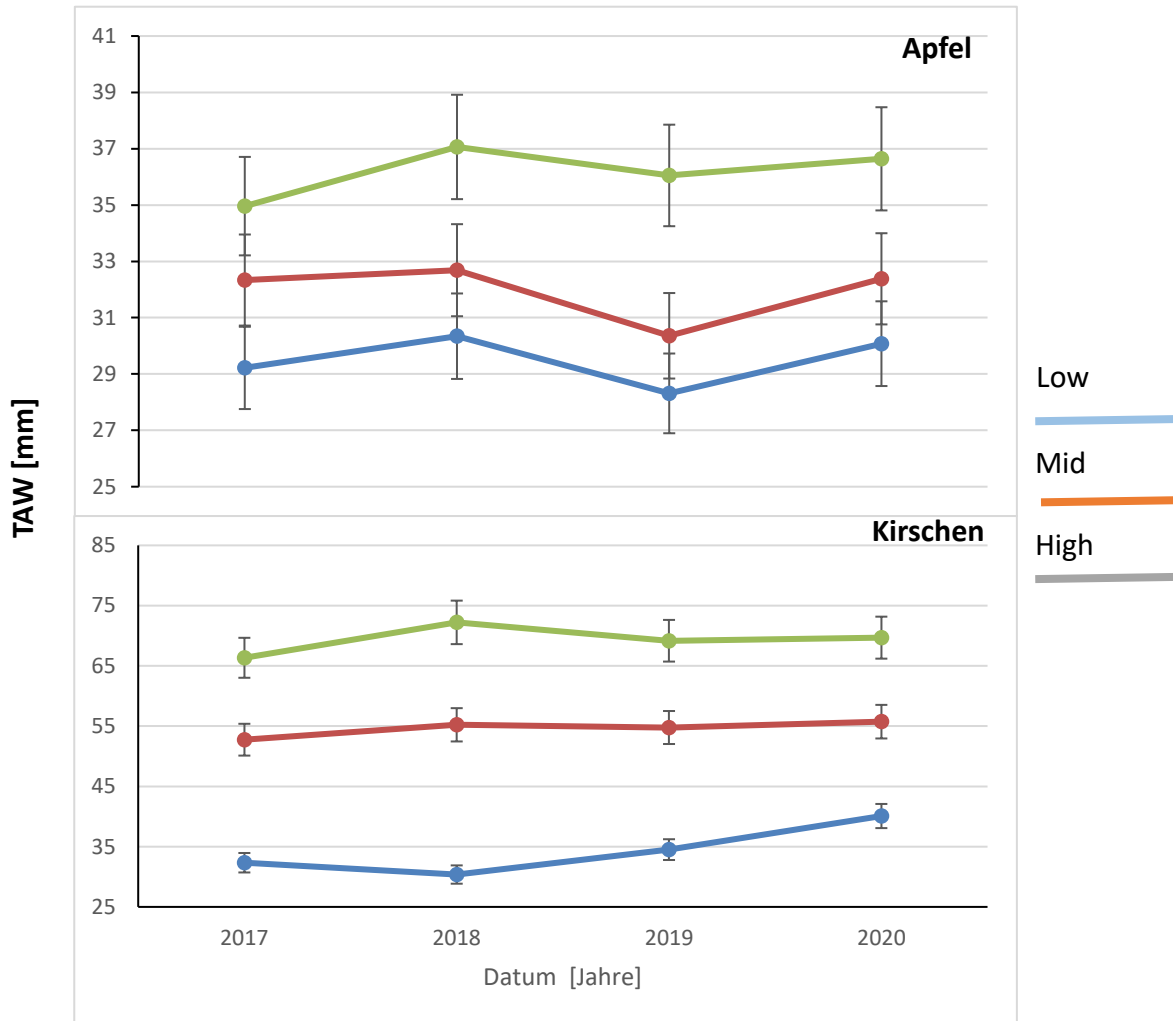


Abbildung 9. Verlauf des Gesamtwassergehalts in Anlagenbereichen mit niedrigen (low), mittleren (mid) und hohen (high) Werten der elektrischen Bodenleitfähigkeit (ECa).

5.1.6.2 Feldangepasster Bestandskoeffizient

Für die Terminierung des kultur- und entwicklungsstadienspezifischen Bestandskoeffizienten (Kc-Wert) wurden umfangreiche physiologische Messungen, teilweise unter Beteiligung der Betriebe durchgeführt. entwickelt.

Hierzu zählen bei Kernobst Gaswechselfmessungen (Sauerstoffverbrauch in der Aeroben Atmung und dem alternativen Atmungsweg, Kohlendioxid-Abgabe) zur zeitlich aufgelösten Darstellung der charakteristischen Verläufe im Verlauf der Fruchtentwicklung. Für die genaue Beschreibung der Fruchtentwicklungsstadien auf zellulärer Ebene wurden Methoden zur mechanischen Zellvereinzelung (osmotische Aufweitung und zentrifugale Trennung) und Zeldarstellung mittels konfokaler Laserscanningmikroskopie sowie Zellzählung erarbeitet und präzisiert. Die Messergebnisse werden in Teilen noch nach Projektende ausgewertet, da zum einen die Bearbeiterin frühzeitig aus dem Projekt ausgeschieden war. Zum anderen wurde in der Projektdiskussion auf Vorschlag des Projektberaters, der Zeitpunkt für die Kc-Wertterminierung in der Wasserbilanzierung mit dem Ende der Zellstreckungsphase bei Apfel festgelegt.

Das Monitoring phänologischer Entwicklungsstadien durch die Größenbestimmung bei Süßkirsche und Heidelbeere fanden unter regelmäßiger Mitwirkung der Praxispartner sowohl in den Projektbetrieben als auch am Referenzstandort in Marquardt durch Studierende statt. Händische Messungen zur Ermittlung der fruchtspezifischen Wachstumsrate wurden durch Größenbestimmungen mittels Bildaufnahmen durch Smartphones und Referenzhintergrundtafel ergänzt. Mit der vom ATB entwickelten mobilen App („Cherry Harvest Size“ im Google Play Store) liegt somit eine praxistaugliche Lösung für die spätere Implementierung der fruchtentwicklungsabhängigen Terminierung der Kc-Werte bei Beeren und Steinobst vor.

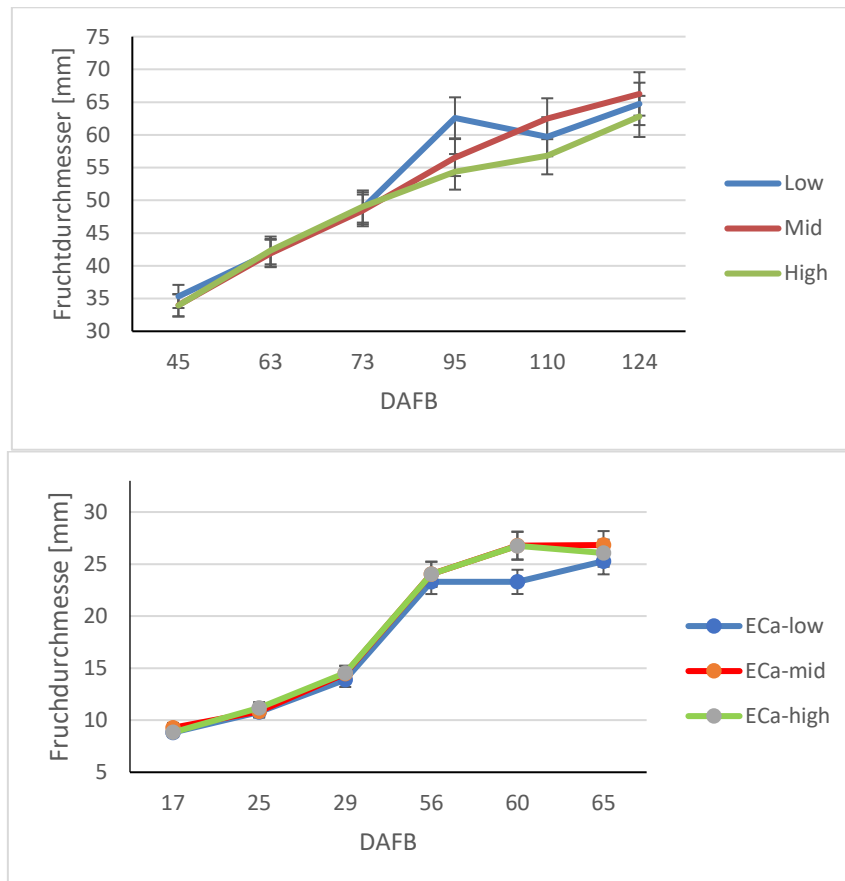


Abbildung 10. Zunahme der Fruchtgröße in drei Bodenzonen mit niedriger (low), mittlerer (mid) und hoher (high) scheinbarer elektrischer Leitfähigkeit (ECa) bei Apfel in Frankfurt/O. und Süßkirschen (Altlandsberg).

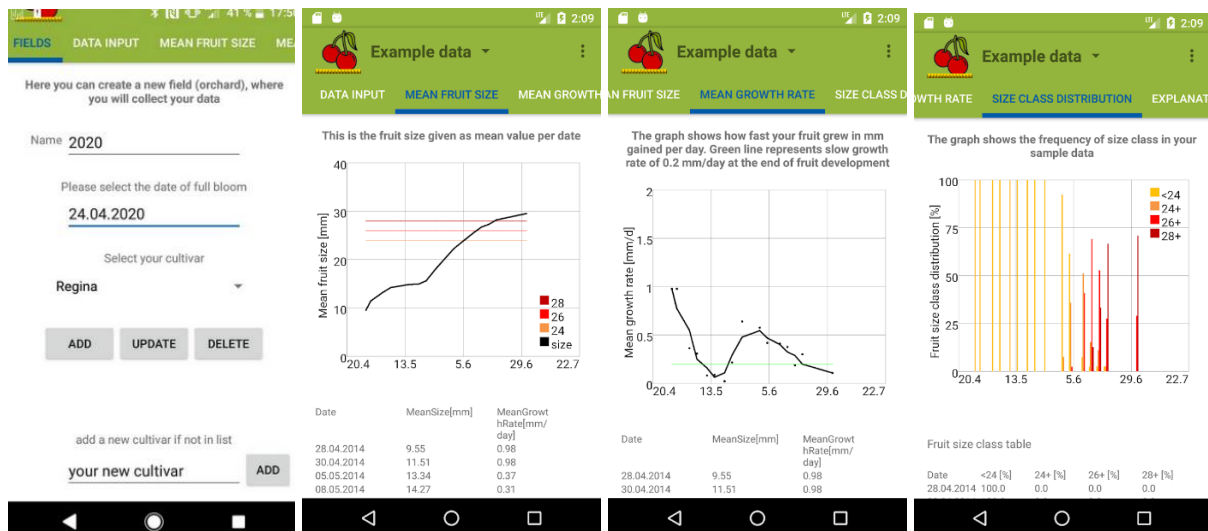


Abbildung 11. Ansichten der mobilen App „Cherry Harvest Size“ (Android Betriebssystem, Google Play Store) zur Fruchtgrößenanalyse mit dem Ziel die Steinaushärtungsphase zu bestimmen.

5.1.6.3 Feldangepasste Wasserbilanzierung

Um das Modell zur Wasserbilanzierung zu erarbeiten, wurden folgende Pflanzen, Boden und Wetterdaten benötigt:

- Georeferenzierung
- Wetterdaten (Temperatur, Niederschlag, Globalstrahlung, Luftfeuchtigkeit, Windgeschwindigkeit, Evapotranspiration)
- Bodentextur
- Volumetrischer Wassergehalt des Bodens bei Feldkapazität (Boden) und am Welkepunkt (Wurzelwasserpotenzial)
- Elektrische Bodenleitfähigkeit (ECa)
- Durchwurzlungstiefe
- Bewässerungsgaben
- Kronenhöhe (später ersetzt durch mittels LiDAR bestimmter Blattfläche)

Das Modell nutzt sowohl zeitlich als auch räumlich aufgelöste Daten. Auf Grundlage der Daten der Standortcharakterisierung und der Charakterisierung der Fruchtentwicklungsphasen, welche die Basis für die Terminierung der Kc-Faktoren (pflanzen- und entwicklungsstadienspezifischer Wichtungsfaktor) bilden, wurde mittels der Wetterdaten der in den Anlagen befindlichen Wetterstationen die Wasserbilanz berechnet. Während die standortspezifischen Daten einmalig in einer Eingabemaske händisch eingetragen werden, erfolgt die Verarbeitung der viertelstündlich aufgezeichneten meteorologischen Daten automatisiert in der ATB-Cloud.

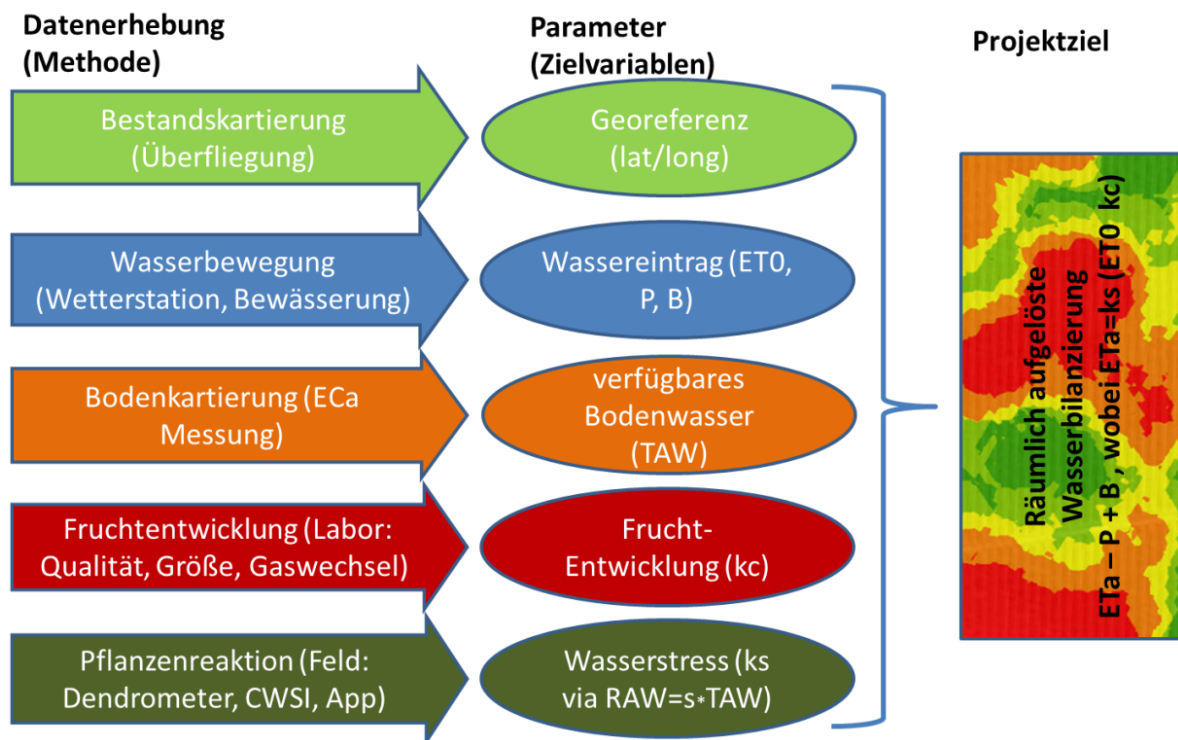


Abbildung 12. Methodenskizzierung in AquaC+

Die Wetterdaten werden von den im Feld befindlichen Wetterstationen aufgezeichnet. Jede Station zeichnet Lufttemperatur (T), relative Luftfeuchtigkeit (RH), Windgeschwindigkeit (u), Sonneneinstrahlung (Rn) auf, wobei die Daten in der Datenbank <http://technologygarden.atb-potsdam.de> gespeichert werden.

Spezielle Fragestellung:

Terminierung der Kc-Werte bei Kulturheidelbeeren als Dammkultur in Substrat

Das Wachstum der Früchte wird hauptsächlich durch die Wasserversorgung bestimmt, der tatsächliche Wasserbedarf variiert jedoch innerhalb der Entwicklungsphasen (Jorquera-Fontena et al., 2017). In früheren Arbeiten wurde gezeigt, dass die Zellzahl ein wichtiger Faktor für die endgültige Größe der Heidelbeere ist (Johnson und Malladi, 2011). Daher ist die Vermeidung von Trockenstress der Frucht sowohl bei der Zellteilung als auch bei der Zellstreckung entscheidend, um die sortentypische, hohe Fruchtqualität zu erreichen. Eine intensive Bewässerung zu Beginn der Fruchtentwicklung kann jedoch zu Rissen in den verholzten Bereichen der Pflanze führen. Für Phase II ist eine reduzierte Wasserversorgung ausreichend. Die Bestimmung dieses größenstabilen Stadiums wird jedoch derzeit nicht für die tägliche Wasserbilanzierung genutzt. Besonders der Übergang von Phase II zu Phase III weist ein Potential auf, präzise den erhöhten Kc Wert einzusetzen. Weiterhin zeigen die kommerziell verwendeten Sorten eine hohe Variabilität der Aufblühfolge innerhalb der Infloreszenz und weiterhin innerhalb der Pflanze, wodurch eine selektive Ernte bei Heidelbeere wirtschaftlich sinnvoll ist. Insbesondere in diesem späten Stadium der Fruchtentwicklung kann Wassermangel zu Ertragsverlusten führen.

Der Schwellenwert, der den Beginn von Trockenstress anzeigt, wird üblicherweise durch den

pflanzenverfügbaren Bodenwassergehalt (readily available water, RAW) angezeigt (Jensen et al., 1990; Allen et al., 1998). Eine Standardmethode zur Ermittlung des Bewässerungsbedarfs der Kultur ist die Berechnung der im Feld vorliegenden an die Pflanzenentwicklung angepassten aktuellen Evapotranspiration (ET_c). Die Berücksichtigung der ET_c ermöglicht eine präzise Wasserbedarfsberechnung und Reduzierung der Bewässerung während Wachstumsperioden, welche von weniger ausgeprägten Wasserbedarf gekennzeichnet sind. Die Ermittlung der ET_c erfolgt unter Verwendung von Richtlinien der Ernährungs- und Landwirtschaftsorganisation (FAO) (Allen et al., 1998), wobei die potentielle Evapotranspiration (ET_o) mit einem kultur- und entwicklungsphasenspezifischen Faktor (K_c) gewichtet wird. Bei Anwendung dieser Methode wurde eine erhöhte Wassernutzungseffizienz und verringerter Bewässerungsbedarf in Heidelbeeren der Sorte 'Star' festgestellt (Keen und Slavich, 2012).

Der K_c-Wert wird derzeit beim Aufbrechen der Knospen, bei Vollblüte und zu Beginn der Ernte verändert.

$$K_{cb,ini} = K_{cb,ini(tab)} + [0.04 (u-2) - 0.4(RH-45)] \left(\frac{h}{3}\right)^{0.3}$$

$$K_{cb,mid} = K_{cb,mid(tab)} + [0.04 (u-2) - 0.4(RH-45)] \left(\frac{h}{3}\right)^{0.3}$$

$$K_{cb,end} = K_{cb,end(tab)} + [0.04 (u-2) - 0.4(RH-45)] \left(\frac{h}{3}\right)^{0.3}$$

Der standortangepasste Zeitpunkt der Umstellung des K_c war für Heidelbeere noch wenig untersucht, obwohl die exakte Terminierung des K_c auf Grundlage der Fruchtentwicklungsphasen potentiell einen Vorteil darstellt (Pereira et al., 2015). In AquaC+ wurde eine neue Terminierung der K_c-Werte basierend auf der Fruchtentwicklungsphasen vorgeschlagen. Die Ergebnisse der Messungen des Durchmesser im Verlauf der Fruchtentwicklung zeigen die typische doppelsigmoide Wachstumskurve bei Heidelbeere (Retamales und Hancock, 2012). Die Entwicklungsphase I, Zellteilung, ist gekennzeichnet durch eine schnelle Zunahme des Fruchtdurchmessers, gefolgt von einer größenstabilen Periode, der Embryonalentwicklung in Entwicklungsphase II. Den Abschluss bildet die Entwicklungsphase III mit deutlicher Zunahme des Fruchtdurchmessers, der Zellstreckung. Die berechnete Wachstumsrate lässt einen Rückgang des ersten Anstiegs bereits zu Beginn der Messungen erkennen. Für die Ermittlung des Übergangs von K_{c,ini} zu K_{c,mid} wurde die Änderung von Phase II zu Phase III gewählt. Im Jahr 2017 änderte sich das Wachstumsverhalten von Phase II zu Phase III für 'O'Neal' bei 28 Tagen nach Vollblüte (TnVb) und für 'Bluecrop' bei 43 TnVb, gefolgt von einem Anstieg des Fruchtdurchmessers. Im Jahr 2018 erfolgte dieser Übergang für beide Sorten, 'Bluecrop' und 'Duke', bei 30 TnVb. Der relativ frühe Termin ergab sich aufgrund der hohen Temperaturen im Jahr 2018.

Die Zeitpunkte der K_c-Umstellung wurde in den zweijährigen Versuchsreihen weiterhin angepasst an die sehr lange selektive Ernteperiode (Brandes et al., 2018). Die Größen- und Farbmessungen bei den Heidelbeersorten O'Neal, Duke und Blue Crop wiesen eine extrem hohe Varianz auf, so dass eine selektive Ernte und Wasserversorgung im gesamten Erntefenster notwendig sind.

Tabelle 7. Monatlicher Wasserbedarf von 'Bluecrop' und 'Duke' im Jahr 2018 (Mittelwert \pm Standardabweichung) basierend auf FAO-feldangepasstem täglichen Wasserbedarf (WB_{RF}) und zusätzlich angepasst an die gemessene Fruchtentwicklung und Erntefenster bei Heidelbeere (WB_{FD}).

Fall	Wasserbedarf [mm]					
	März	April	Mai	Juni	Juli	August
WB_{RF}	6.01 ± 3.70	12.76 ± 2.30	24.58 ± 5.92	36.63 ± 1.84	31.05 ± 6.88	25.73 ± 0.97
min	0.00	8.25	15.74	31.74	22.59	24.21
max	11.71	17.47	33.78	39.54	40.88	27.03
WB_{FD}	0.38 ± 1.06	12.58 ± 4.13	26.95 ± 4.77	33.20 ± 2.65	28.58 ± 6.27	23.06 ± 0.57
min	0.00	5.09	18.55	29.45	19.82	22.26
max	3.99	18.14	35.15	38.79	39.04	23.76

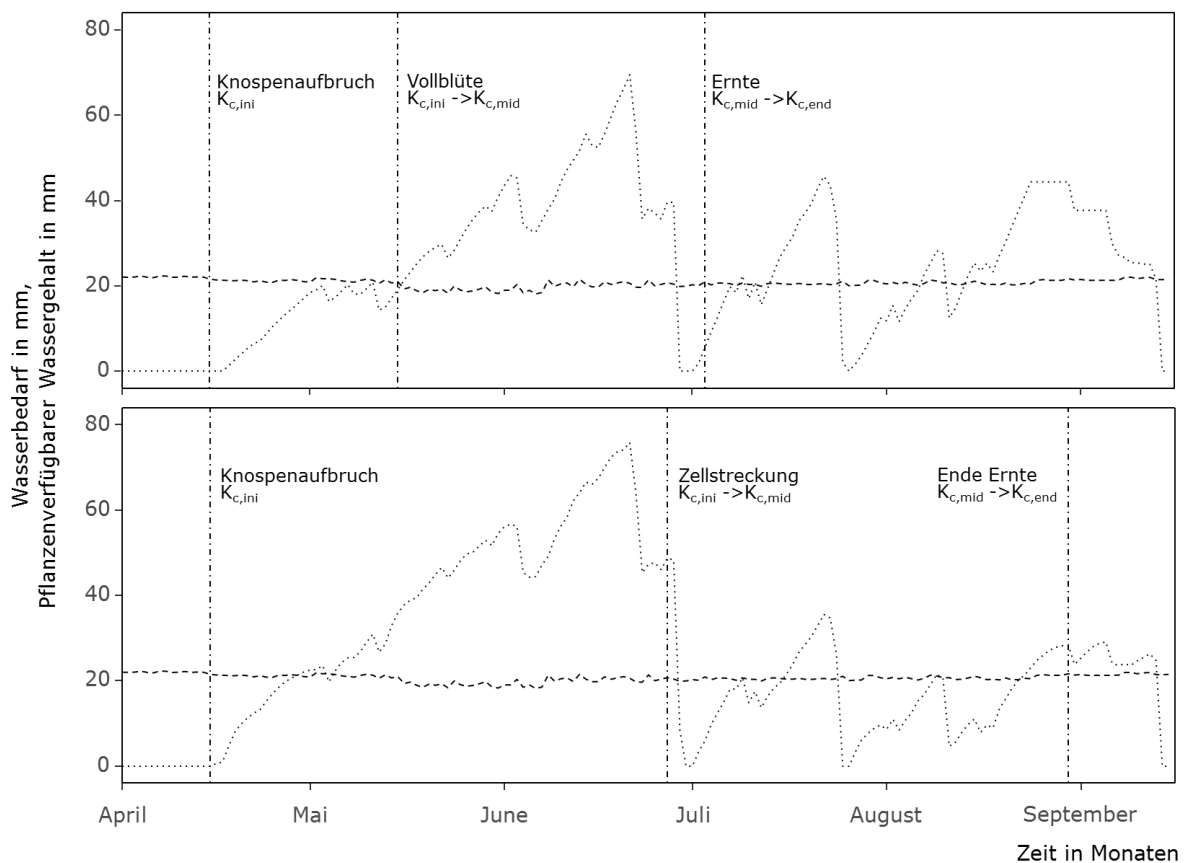


Abbildung 13. Feldangepasste Wasserbilanz (mm; gepunktete Linie) nach FAO (WB_{RF} ; oben) und zusätzlich an die Fruchtwachstumsstadien adaptierte Terminierung der Pflanzenkoeffizienten (K_c) (WB_{FE} ; unten) sowie der pflanzenverfügbare Bodenwassergehalt (mm; gestrichelte Linie) im Jahr 2017. Die Übergänge des K_c sind zur Orientierung (vertikale strichpunktierte Linien) eingetragen. Heidelbeeren, Schäpe.

Die Analysen wurden in Matlab (Version R2017a, Mathworks) durchgeführt (Abbildung 13). Die Analyse der Fruchtentwicklungsphasen und Erstellung der Abbildungen erfolgte in R (R-Coreteam, 2018).

Im Bewässerungsmanagement sollte nicht nur der tägliche Wasserbedarf, sondern auch der Schwellenwert für Trockenstress, welcher als pflanzenverfügbare Bodenwassergehalt (RAW) angegeben wird, berücksichtigt werden. Obwohl der Wasserbedarf der regulierten Wasserbilanz (WB_{FD}) durch den fruchtspezifischen Ansatz reduziert wurde, überstieg das Wasserdefizit in beiden Jahren den RAW deutlich. Die Terminierung des K_c beeinflusst die ET_c , welche ein Faktor bei der Berechnung des RAW ist. Obwohl das Modell in beiden Fällen auf vergleichbaren Feldbedingungen bei Heidelbeere basiert, unterscheiden sich die Bewässerungsbedürfnisse in den einzelnen Fällen. Die Anpassung der Wasserbilanzierung an die Bedürfnisse der Frucht in den jeweiligen Fruchtentwicklungsphasen ergab einen erhöhten Bewässerungsbedarf von 247 mm im Jahr 2017 und 186 mm im Jahr 2018 im Vergleich zur FAO-basierten Wasserbilanzierung im relevanten Zeitraum zwischen Knospenaufbruch und Ernte. Basierend auf den Ergebnissen dieser Untersuchung ermöglicht die zeitliche Anpassung des K_c -Übergangs, unter Berücksichtigung der Fruchtentwicklungsphasen, die Beachtung des Trockenstresses der Frucht selbst, nicht nur der Pflanze.

Süßkirschen

Das final in AquaC+ genutzte Modell zur Ermittlung der Wasserbilanz basiert auf Vorgaben der FAO (FAO-56). In einer Süßkirschenanlage der Sorte 'Regina' auf Gisela 5 konnten mittels Daten zur elektrischen Bodenleitfähigkeit Karten erstellt werden, um die räumlichen Unterschiede aufzuzeigen. In Abbildung 4 ist der Boden von zwei Reihen (177 m) 'Regina' (120 Bäume) dargestellt, wobei im mittleren Bereich eine sehr kleine Bodenkörnung vorlag, während an den Rändern leicht sandigerer Boden festgestellt wurde.

In Abbildung 14 sind die Schwellenwerte als horizontale Linien dargestellt - für den sandigen Randbereich (oben) sowie für den hinsichtlich Wasserversorgung günstigeren mittleren Bereich (unten). Die Werte variieren täglich geringfügig aufgrund der Versickerung von Bodenwasser. Die mittleren Schwellenwerte in den Randbereichen der Anlage wurden bei 21 mm und im mittleren Bereich der Anlage bei 35 mm ermittelt (Abbildung 14). Somit fällt in den Randbereichen die Wasserbilanz häufiger negativ aus, sichtbar am Überschreiten des Schwellenwertes. Erste Ergebnisse der Wasserbilanzierung bei Süßkirsche (Daten aus 2017, Berechnung 2019) zeigten einen 100 mm geringeren Bewässerungsbedarf als von der FAO empfohlen (Tabelle 8). Obwohl das Jahr 2017 ein Ausnahmejahr mit hohen Niederschlagsmengen war und die untersuchte Anlage sehr hohe Wasserhaltekapazität aufweist, heben die Ergebnisse die Notwendigkeit einer brandenburgspezifischen kulturabhängigen Betrachtung des Bewässerungsbedarfs hervor.

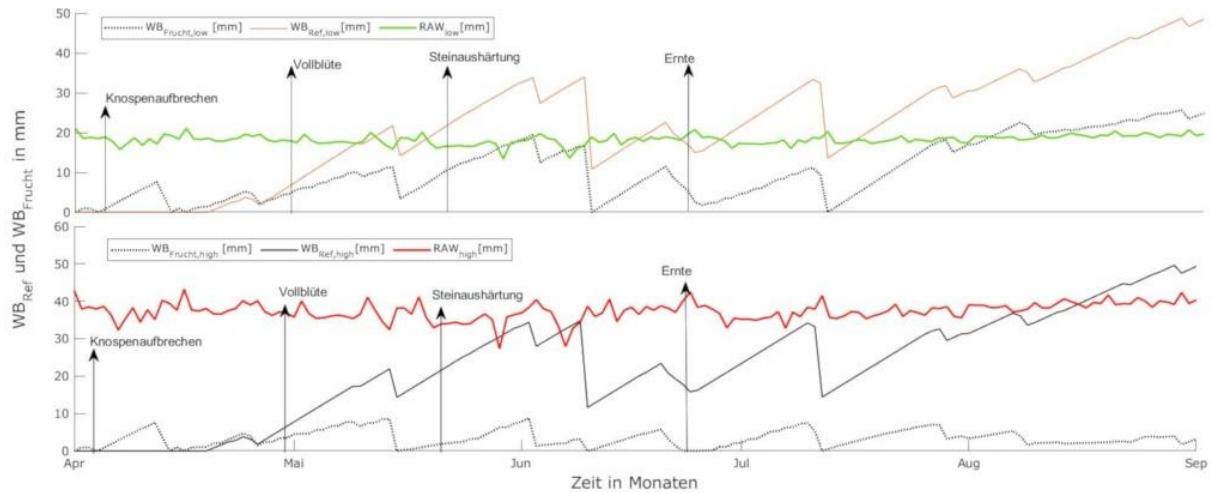


Abbildung 14. Wasserbilanzierung basierend auf den in der Anlage ermittelten Bewässerungsschwellenwerten (readily available water content / pflanzenverfügbares Wasser, RAW) für die grob (oben, RAW_{low}) und feinkörnigeren (unten, RAW_{high}) Bodenbereiche. Die Wasserbilanz (WB) wurde nach Tabellenwerten geschätzt (WB_{Ref}) und in der Anlage entsprechend Welkepunkt, Wurzeltiefe, Blüten- und Fruchtentwicklung ermittelt (WB_{Frucht}). Ein Wasserbedarf ist bei Überschreiten des Schwellenwertes gegeben.

Tabelle 8. Deskriptive Statistik des Wasserbilanzierung entsprechend der FAO-Tabellenwerte (oberer Tabellenbereich; RF) und unter Berücksichtigung der feldspezifischen Variablen für sandige, mittlere und schluffige Bereiche (unterer Tabellenbereich; RD) einer Süßkirschenanlage

		April _{RF}	Mai _{RF}	Juni _{RF}	Juli _{RF}	Au- gust _{RF}	Septem- ber _{RF}	Ok- tober _{RF}
Low ECa	Mean	16.85	62.56	100.57	32.37	18.14	54.01	65.03
	SD	9.73	26,17	23,74	16,23	8,09	10,20	4,19
	C.V. (%)	57.7	41.84	23.61	50.14	44.61	18.88	6.45
Mid ECa	Mean	16.85	62.56	100.56	31.70	17.36	53.20	64.07
	SD	9.73	26.17	23.77	15.97	8.09	10.19	4.14
	C.V. (%)	57.72	41.84	23.63	50.39	46.59	19.16	6.47
High ECa	Mean	16.85	62.56	99.78	27.51	12.49	46.72	56.21
	SD	9.73	26.17	24.41	13.94	7.72	10.19	3.44
	C.V. (%)	57.72	41.84	24.47	50.66	61.82	21.81	6.12
		April _{RD}	Mai _{RD}	Juni _{RD}	Juli _{RD}	Au- gust _{RD}	Septem- ber _{RD}	Ok- tober _{RD}
Low ECa	Mean	13.44	46.25	66.11	10.69	13.79	46.79	54.77
	SD	7.73	19.47	22.88	7.01	7.71	9.46	3.66
	C.V. (%)	57.54	42.10	34.60	65.62	55.92	20.21	6.68
Mid ECa	Mean	13.44	46.25	65.22	4.18	8.52	41.89	46.41
	SD	7.73	19.47	23.25	2.73	6.55	9.46	2.91
	C.V. (%)	57.54	42.10	35.65	65.26	76.78	22.59	6.28

	Mean	13.44	46.25	64.44	3.42	6.97	35.74	39.43
High	SD	7.73	19.47	23.53	2.28	5.16	9.31	2.96
ECa	C.V. (%)	57.54	42.10	36.51	66.51	73.97	26.06	7.51

Apfel

Die Bestimmung des Schwellenwerts (RAW) erfolgte wiederum anhand der Wasserhaltekapazität des Bodens und der FAO-Tabellenwerte hinsichtlich K_c -Terminierung und angenommenen 1 m Wurzeltiefe (RAW_{RF}) in den verschiedenen ECa Zonen (Abb. 15). Die Werte wurden verglichen mit feldangepassten Variablen und gemessener Wurzeltiefe in den drei ECa Zonen (RAW_{RD}). Es wurde somit entsprechend der Bodenzonen der beste, mittlere und schlechteste Fall, der in den Obstanlagen eintritt, berechnet. Die RAW_{RD} von Zonen mit niedrigem ECa und hohem ECa wurde als Schwellenwert für einen niedrigen (RAW_{low}) bzw. hohen (RAW_{high}) Bewässerungsschwellenwert verwendet. Diese Schwellenwerte wurden im zeitlichen Verlauf des Wasserbedarfs (entsprechend WB_{RF} und WB_{RD}) in Zonen mit niedrigem, mittlerem und hohem ECa-Wert berücksichtigt (Abb. 16).

Der Wasserbedarf entsprechend WB_{RF} lag in allen ECa-Zonen zwischen April und Mitte Juni über den Schwellenwerten und erreichte 120 mm (Abb. 15). Anfang Juni und Juli kam es zu einem steilen Rückgang des Wasserbedarfs aufgrund der Zunahme der Niederschlagsmenge. Die Bilanz in den Regionen mit niedrigem und mittlerem ECa wies jedoch einen starken Anstieg über das RAW_{high} auf. Der steile Anstieg des Wasserbedarfs im August wurde durch den Wechsel von $K_{c,mid}$ zu $K_{c,end}$ unterbrochen. Ein geringer Rückgang des Wasserbedarfs in den Regionen mit hohem, mittlerem und niedrigem ECa-Wert zeigte sich vor dem Blattfall, der Wasserbedarf blieb jedoch über dem RAW_{high} .

Die Ergebnisse von WB_{RD} zeigten einen ähnlichen Trend, der jedoch auf einen geringeren Wasserbedarf im Vergleich zum früheren Modell hindeutet (Abb. 16, Tabelle 9). Der Wasserbedarf von WB_{RD} für alle ECa-Regionen blieb zwischen April und Mitte Juni über den beiden Schwellenwerten und erreichte 90 mm. Die Wirkung der verminderten Wurzeltiefe gegenüber dem Tabellenwert der FAO zeigte sich in der Wasserbilanz, als die Berechnung von $K_{c,full,mid}$ begonnen hatte. Im Gegensatz zum WB_{RF} verringerten hier die Regenfälle den Wasserbedarf erheblich, so dass das Wasserdefizit im Juni unter dem RAW_{low} lag. Außerdem stiegen in diesem Modell nur die niedrigen ECa-Werte an, was zu zwei Wasserstressereignissen im Juli führte. Andererseits blieb der tägliche Wasserbedarf in den Regionen mit mittlerem und hohem ECa-Wert bis Ende Juli unter dem RAW_{low} Wert. Der Wechsel von $K_{c,mid}$ zu $K_{c,end}$ wirkt sich auf den Wasserbedarf aus. Der Wasserbedarf variierte täglich und stieg in allen ECa-Regionen oberhalb des RAW_{high} von Mitte August bis Mitte Oktober. Ein stetiger Rückgang des Wasserbedarfs in den mittleren und hohen ECa-Regionen wurde vor dem Abwurf der Blätter festgestellt. Dies ist durch den verringerten Kohlendioxidbedarf und somit verminderte Stomataöffnung der alternden Blätter begründet. Trotz des Rückgangs des Wasserbedarfs in den niedrigen ECa-Regionen blieb der Saldo jedoch über dem RAW_{high} . Die Tatsache, dass RAW_{low} und RAW_{high} nahe beieinander lagen,

deutet darauf hin, dass die Bäume mit den Bodeneigenschaften und den Anforderungen der Evapotranspiration durch ein angepasstes Wurzelwachstum an den Standort adaptiert waren.

Die täglichen Werte aus jeder ECa-Region wurden für jedes Modell verglichen, um die Unterschiede zwischen ihnen zu bewerten. Dies geschah mit Hilfe der nichtparametrischen Friedman-Analyse. Die Modelle wurden nach der ECa-Region auf dem Feld verglichen. Das Chi-Quadrat stellt die Varianz der mittleren Ränge für jede ECa-Zone dar, je näher an der Null, desto geringer die Streuung der Werte. Auf dem Signifikanzniveau von 0.01 wurde ein signifikanter Unterschied zwischen der niedrigen ECa-Region der beiden Modelle dargestellt ($r = 0.001$). Außerdem wurde in dieser Region das höchste Chi-Quadrat ermittelt (Chi-Quadrat = 36.8), was auf eine hohe Varianz zwischen den Werten hinweist. Darüber hinaus unterschieden sich die beiden Modelle in den Regionen mit niedrigem und mittlerem ECa Wert mit $r = 0.006$ bzw. $r = 0.003$ ebenfalls signifikant voneinander. Allerdings blieb der Chi-Quadrat-Wert im Vergleich zur niedrigen ECa-Region relativ niedrig.

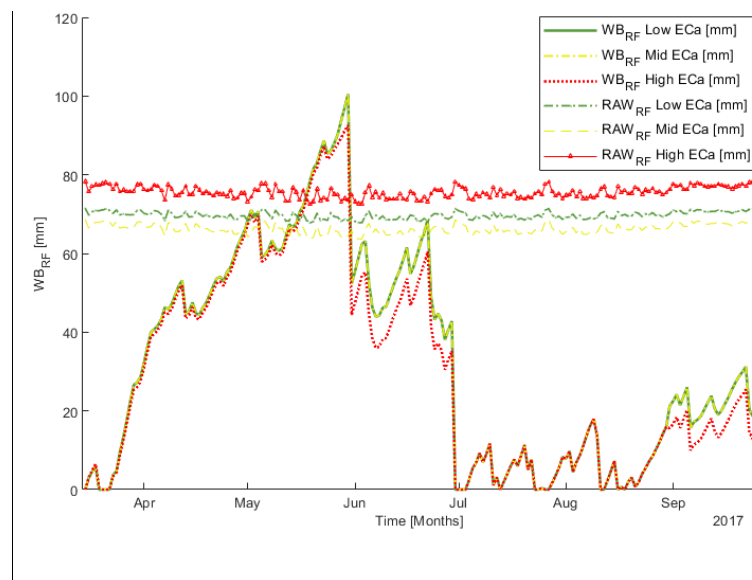


Abbildung 15. Tägliche Wasserbilanz und Schwellenwert des pflanzenverfügbaren Wassergehalts (RAW) in Bodenzonen mit niedriger, mittlerer und hoher scheinbarer elektrischer Leitfähigkeit des Bodens (ECa) entsprechend der FAO-Tabellenwerte bei Apfel

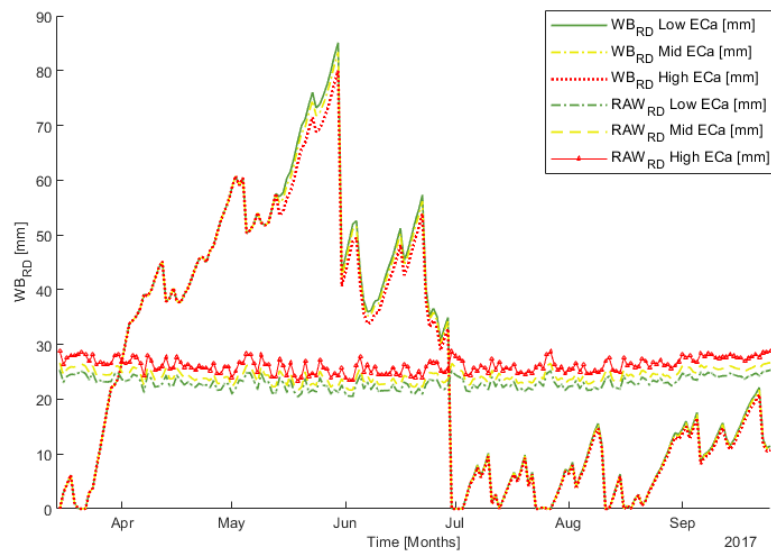


Abbildung 16. Tägliche Wasserbilanz und Schwellenwert des pflanzenverfügbaren Wassergehalts (RAW) in Bodenzonen mit niedrigem, mittlerer und hoher scheinbarer elektrischer Leitfähigkeit des Bodens (ECa) unter Berücksichtigung der gemessenen Wurzeltiefen bei Apfel

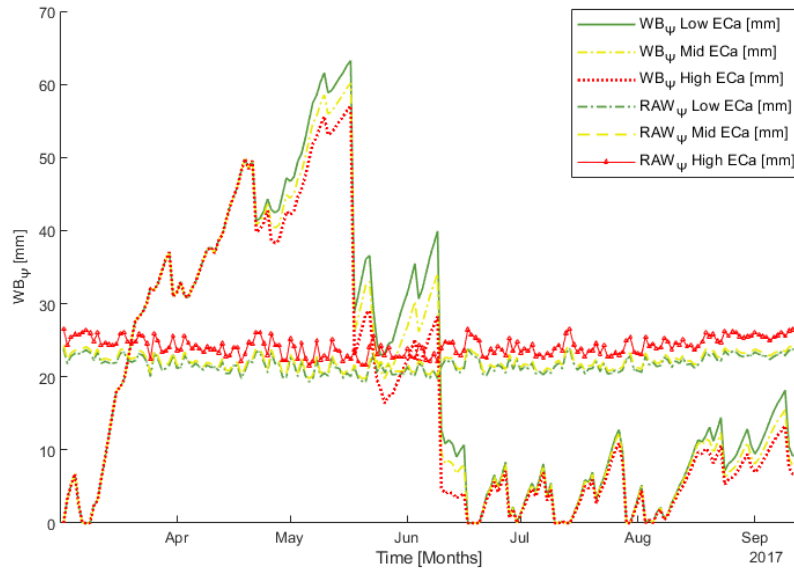


Abbildung 17. Tägliche Wasserbilanz und Schwellenwert des pflanzenverfügbaren Wassergehalts (RAW) in Bodenzonen mit niedrigem, mittlerer und hoher scheinbarer elektrischer Leitfähigkeit des Bodens (ECa) entsprechend der gemessenen Wurzelwasserpotenziale bei Apfel

Tabelle 9. Deskriptive Statistik des Wasserbilanzierung entsprechend der FAO-Tabellenwerte (oberer Tabellenbereich; 0) und unter Berücksichtigung der feldspezifischen Variablen für sandige, mittlere und schluffige Bereiche (unterer Tabellenbereich; RD) einer Süßkirschenanlage

		April ₀	Mai ₀	Juni ₀	Juli ₀	August ₀	September ₀
Low ECa	Mean	19.68	39.21	19.78	2.85	4.69	6.12
	SD	0.77	1.76	2.40	0.09	0.14	0.24
	CV%	3.91	4.50	12.11	2.99	2.89	3.88
Mid ECa	Mean	20.18	40.37	20.92	2.90	4.77	6.28
	SD	3.05	3.40	3.31	2.70	2.57	1.38
	CV%	15.11	8.41	15.80	93.15	53.87	21.97
High ECa	Mean	20.74	41.63	15.46	2.96	4.87	6.45
	SD	0.27	0.59	0.86	0.03	0.05	0.09
	CV%	1.29	1.41	5.54	0.98	0.99	1.36
		April _{RD}	Mai _{RD}	Juni _{RD}	Juli _{RD}	August _{RD}	September _{RD}
Low ECa	Mean	21.74	44.40	18.43	3.07	5.06	6.79
	SD	7.02	10.80	8.87	2.65	4.22	4.47
	CV%	32.32	24.32	48.15	86.44	83.44	65.80
Mid ECa	Mean	21.36	43.59	17.59	3.03	4.99	6.66
	SD	6.91	10.79	8.84	2.64	4.19	4.44
	CV%	32.36	24.75	50.25	87.05	84.08	66.58
High ECa	Mean	22.00	45.04	19.73	3.10	5.10	6.87
	SD	15.97	10.95	9.18	2.70	4.26	4.52
	CV%	72.61	24.32	46.51	87.07	83.53	65.81

Einbindung der Blattflächen für die Schätzung der Transpirationsrate

In einer Apfelanlage wurde eine räumlich aufgelöste Analyse des Wasserdefizits in einer Apfelanlage (*Malus x domestica* 'Gala'/M9) durchgeführt, wobei neben der Kartierung der scheinbaren elektrischen Leitfähigkeit des Bodens (ECa) zusätzlich ein LiDAR-Laserscanner-System zur Schätzung der Blattfläche jedes Baum (LALiDAR) verwendet wurde. LALiDAR korrelierte positiv mit ECa (Tabelle 10).

*Tabelle 10. Pearson Korrelationskoeffizient zwischen der scheinbaren elektrischen Bodenleitfähigkeit (ECa) und mittels LiDAR Laserscanner ermittelten Blattfläche LA_{LiDAR}. N = betrachtete Baumanzahl. Signifikante Korrelation bei p = 0.01 (**) und bei 0.05 (*).*

	N	niedrige EC _a	mittlere EC _a	hohe EC _a
LA _{LiDAR} [m ²].	28	0.74*	0.86**	0.68**

Da die Transpirationsrate der Baumkronen von der Blattfläche abhängt, wurde eine Korrektur der Wasserbilanz mit Hilfe der LiDAR-Blattflächendaten durchgeführt. Die feldspezifisch angepasste Evapotranspiration nach FAO (ET_{c,RF}) sowie die feldspezifisch angepasste Wasserbilanz nach FAO und zusätzlichen Blattflächendaten (ET_{c,LiDAR}) wurden verglichen.

$$ET_{c,RF} = (K_s K_{cb,RF} + K_e) ET_0$$

$$ET_{c,LiDAR} = (K_s K_{cb,LiDAR} + K_e) ET_0$$

Die monatlichen Werte des Referenz-Wasserbilanzierungsmodells (WBRF), das auf angepassten FAO-Werten basiert, waren in Bereichen mit niedrigem ECa um 36,3 mm niedriger als die Werte des Modells, das LALiDAR (WBLiDAR) nutzte. Die von den LiDAR-Messungen abgeleiteten Pflanzendaten können somit die Wasserbilanzierung in Obstplantagen verbessern.

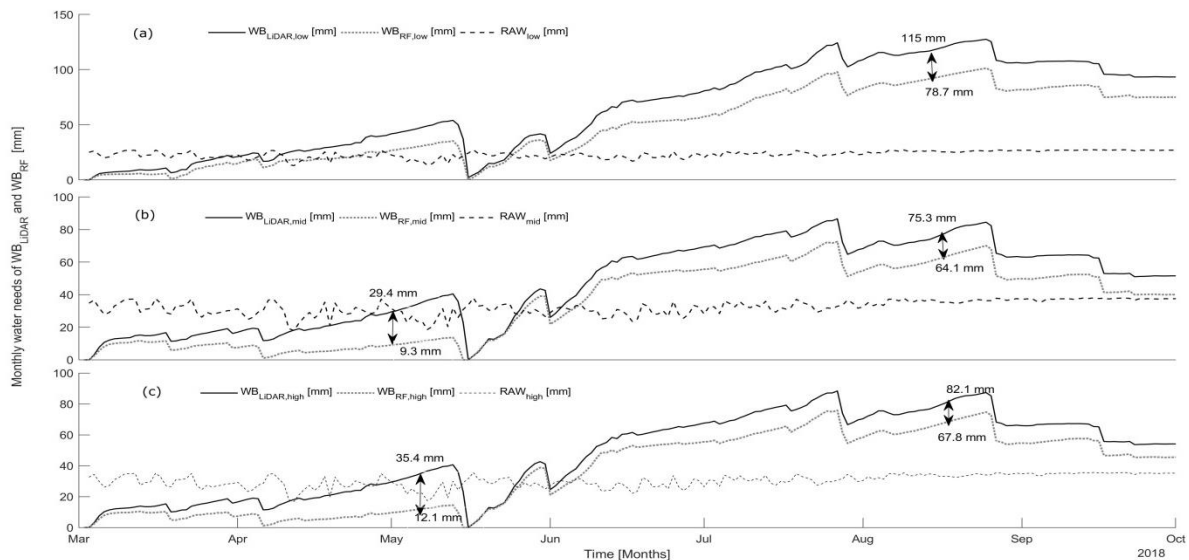


Abbildung 18. Tägliche Wasserbilanz und Schwellenwert des pflanzenverfügbaren Wassergehalts (RAW) in Bodenzone mit niedriger (a), mittlerer (b) und hoher (c) scheinbarer elektrischer Leitfähigkeit des Bodens (ECa) entsprechend des feldangepassten FAO-Ansatzes (WBRF) und zusätzlicher Betrachtung der Blattfläche (WB_{LiDAR})

5.1.6.4 Wasserinterzeption

Im Hinblick auf das Bewässerungsmanagement spielen die Baumkronen eine entscheidende Rolle bei den hydrologischen Prozessen. Während und nach einem Regenereignis fangen sie beträchtliche Mengen an Regen auf und verdunsten das Oberflächenwasser von der Krone in die Atmosphäre. Die Nettoaufnahme von Wasser in den Boden und somit Verfügbarmachung zur Aufnahme in den Baum wird durch die Berücksichtigung des Wasserverlustes bestimmt. Der Umfang dieser Wasserinterzeption durch die Baumkronen ist ein wichtiger Bestandteil der saisonalen Wasserbilanz ganzer Obstanlagen.

Für den Versuch wurden die Baumkronen von Süßkirschenbäumen mit einem LiDAR-System gescannt. Aus den Daten wurden Blatt- und Holzoberflächen segmentiert. Es wurde eine hohe Variabilität der Baumkronenoberflächen festgestellt. Die Variabilität trat zwischen den Anlagen und innerhalb der Anlagen auf. Die Apfelbäume zeigten weniger Adaptationskapazität als die Kirschbäume und somit führte die Bodenvariabilität in den Apfelanlagen zu großen Unterschieden der Baumkrone. Die Unterschiede waren jedoch auch bei Süßkirsche sichtbar, wobei darüber hinaus auch starke Schnittmaßnahmen zur Kronenunterschieden führten. Die Unterschiede innerhalb der Anlage nahmen mit ansteigendem Baumalter zu.

Für den Süßkirschen-Versuch wurden die baumspezifischen Daten in ein modifiziertes Modell mit und ohne Berücksichtigung des Windeinflusses implementiert. Die Ergebnisse zeigen, dass das

modifizierte Modell in der Lage ist, die Niederschlagsverluste darzustellen. Die Wasserinterzeption einzelner Bäume variierte von 18,6 % bis 22,6 % und 21,8 % bis 26,5 % mit bzw. ohne Berücksichtigung des Windes (Abbildung 19). Der Netto-Eintrag an Niederschlagswasser war somit rechnerisch deutlich verringert (Tabelle 11). Im kommerziellen Kirschenanbau kann die vorgeschlagene Methode ein präzises Bewässerungsmanagement unterstützen.

Tabelle 11. Monatlicher Wasserverlust durch Wasserinterzeption in der Baumkrone unter Berücksichtigung der Blattfläche (LAI) und Holzoberfläche (SAI) bei Süßkirsche (n = 255 Bäume)

Zeit	Anzahl der Regenfälle	Niederschlag (mm)	LAI + SAI*	Interzeption (%)*		Nettoniederschlag (mm)	
				Mit Wind	Ohne Wind	Mit Wind	Ohne Wind
April	4	13.2	3.58 ±0.40	28.51 ±0.78	22.41 ±0.66	9.44	10.24
Mai	11	34.4	5.76 ±0.91	30.62 ±0.58	26.51 ±0.50	23.87	25.28
Juni	7	91	8.53 ±0.59	16.53 ±0.19	5.90 ±0.18	75.96	85.63
Juli	9	73.2	12.17 ±0.44	26.45 ±0.11	23.32 ±0.11	53.84	56.13
Total	31	211.8	7.51	22.99	16.30	163.10	177.2 8

*Standardabweichung für die im Bestand gemessenen Unterschiede von LAI + SAI

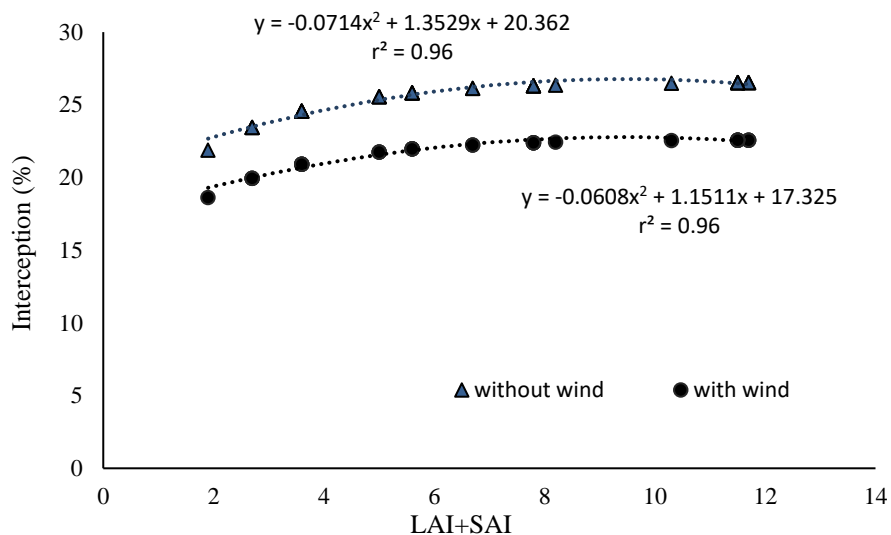


Abbildung 19. Beziehung zwischen den gemessenen Blatt- (LAI) und Holz- (SAI) Oberflächen von Bäumen in der Süßkirschenanlage und der Wasserinterzeption mit und ohne Windeinfluss

5.1.6.5 Dendrometerinformation

Dendrometer wurden bei Apfel und Kirsche installiert. Die Datenübertragung erfolgte mit dem Datenfluss der AquaC+ Wetterstationen. Wie für bewässerte Bäume erwartet, war die Dauer des scheinbaren Zuwachsindex (SRI) im Projekt schwach, aber positiv mit dem Niederschlag korreliert (Abb. 20). Allerdings sind die Auswirkungen der Niederschläge und die Dauer der Zuwachphase stark von der Jahreszeit abhängig, mit negativen Korrelationen im Sommer, aber positiven im Herbst (Vieira et al., 2013).

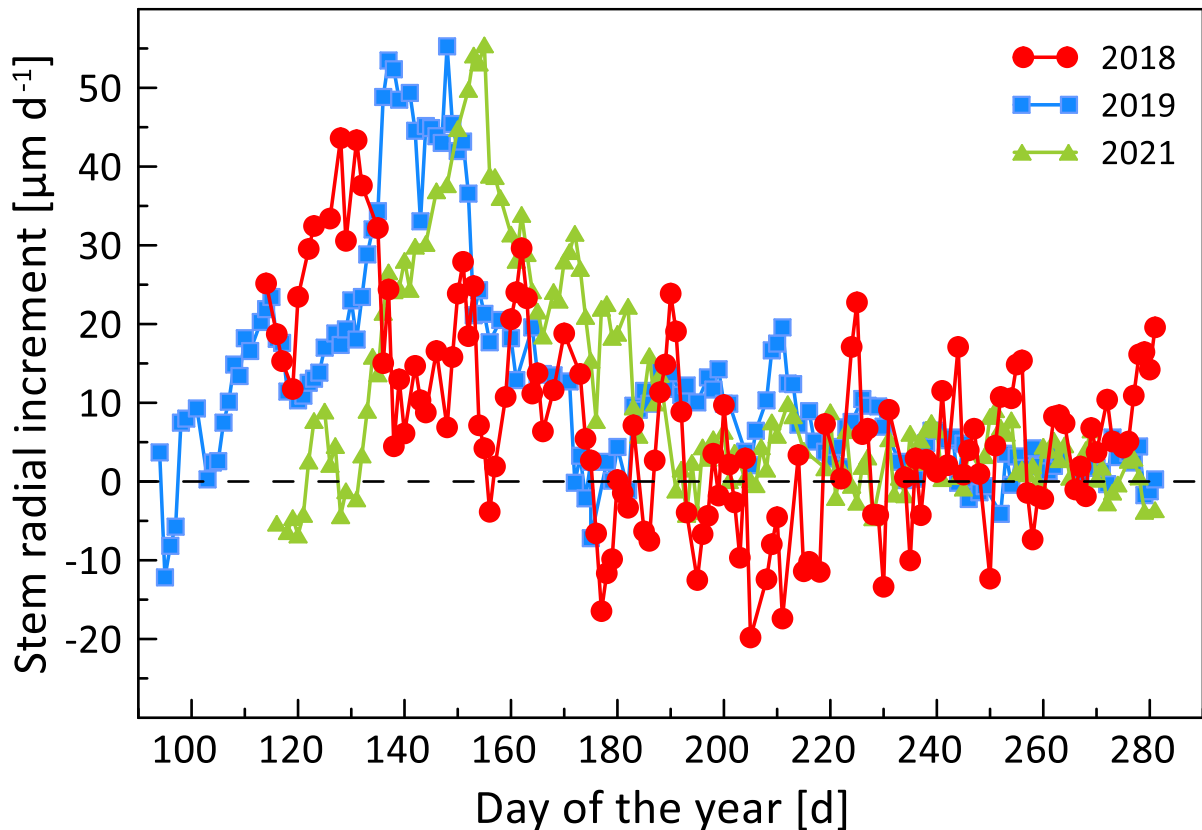


Abbildung 20. Täglicher Zuwachs des Stammdurchmesser (Dendrometerdaten, SRI) im Verlauf der drei Jahre 2018, 2019, 2021 bei Apfel am Standort Marquardt

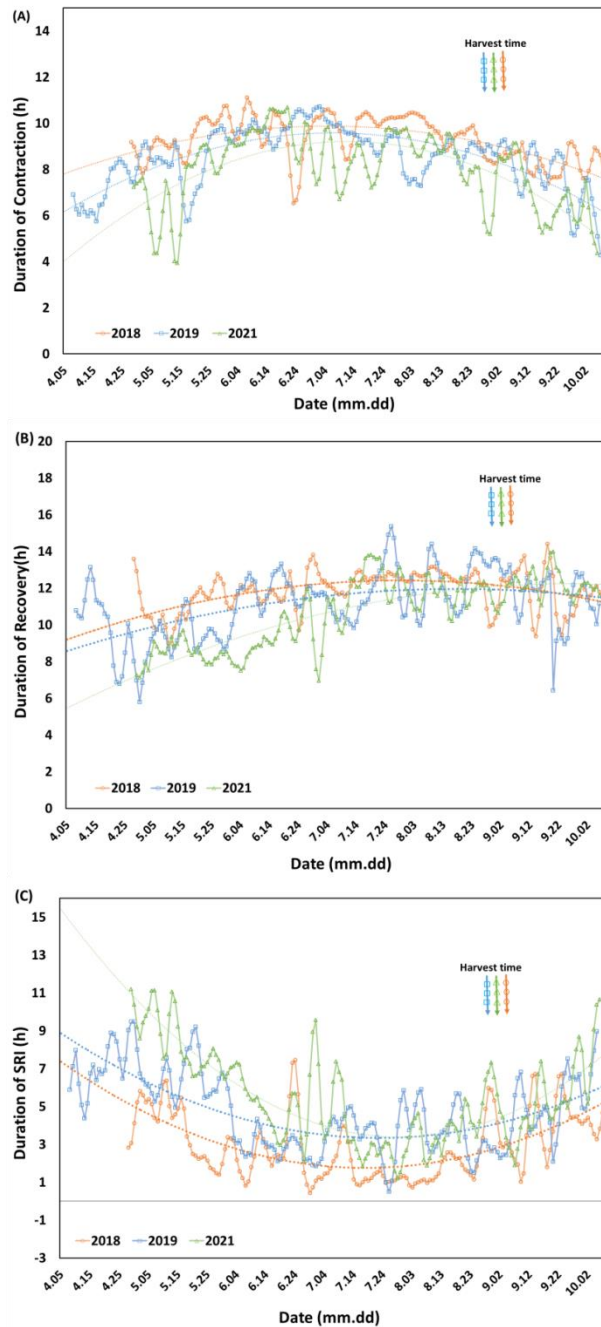


Abbildung 21. Zeitreihen der Dendrometerdaten bei Apfel am Standort Marquardt: Dauer der Stammkontraktion (A), Wiederansättigung (B), Dauer des scheinbaren Zuwachs (SRI; C) in den Vegetationsperioden 2018 (rote Linien), 2019 (blaue Linien) und 2021 (grüne Linien). Der Erntetermin ist für jede Saison markiert.

Die Bestimmtheitsmaße der Beziehungen zwischen Wasserdampf-sättigungsdruck (VPD) und der täglichen Differenz des Stammdurchmessers (MDS), der Dauer der Kontraktions-, Erholungs- (Wiederansättigungs-) und SRI-Phasen wurden für die Vor- und Nacherntezeiträume (Abb. 21) untersucht. Die Korrelation zwischen MDS und VPD war in allen Jahren nach der Ernte höher als vor der Ernte. Die Beziehungen zwischen der Dauer der verschiedenen Phasen und dem VPD unterschieden sich jedoch vor und nach der Ernte nicht merklich. In allen Jahren waren Dauer und Amplitude (d. h. MDS) der Kontraktionsphase eng und positiv linear korreliert; diese Beziehung war jedoch vor der Ernte besser als nach der

Ernte. Insgesamt wurden mittels der Dendrometer umweltrelevante Daten erhoben und die Ergebnisse sollen umfangreich publiziert werden. Für die Bewässerungssteuerung eignen sich Dendrometerdaten jedoch zum heutigen Stand kaum, da die Daten keine quantitativen Aussagen für die Wasserbilanzierung liefern.

5.2 Diskussion und Schlussfolgerungen

Auf Basis der Analysedaten und des im ATB weiterentwickelten Algorithmus ist die Wasserbilanz für alle nunmehr 4 Standorte des Projektes tagesaktuell auf der AquaC + Projektwebsite verfügbar. Der notwendige Zugriff auf das Datenbanksystem der Firma Pessl und die Implementierung der Daten in die ATB-eigene Serverdatenbank konnte durch das Verbundprojekt des Versuchs- und Kontrollrings, dem ATB und den Praxispartnern realisiert werden.

Das Ziel der räumlich und zeitlich aufgelösten Wasserbilanzierung für den Brandenburger Obstbau wurde gemäß Vorhabensbeschreibung im Berichtszeitraum erfolgreich verfolgt und entsprechend der Teilschritte umgesetzt. Hierfür wurden die Daten der spezifischen Methoden schrittweise in das Bewässerungsmodell für Apfel, Süßkirsche und Heidelbeere eingebracht. Die Wasserbilanz berücksichtigt derzeit auf Betriebsebene die aktuellen Wetterdaten, Bodenwerte und verfügbare Pflanzendaten. Auch die Einbindung der bestandsbezogenen Kc-Wertterminierung ist eingebunden und Veränderungen können mittels Eingabemaske händisch zugetragen werden.

Die am ATB entwickelte Anwendung "Cherry Harvest Size" wird zur Unterstützung der Bestimmung der Wachstumsrate bei Süßkirschen und Heidelbeeren eingesetzt. Die bildgestützte Messung der Fruchtgrößen mit einem Smartphone wurde programmiert und für beide Kulturen durch Messungen im Verlauf der Fruchtentwicklung validiert.

Mit dem entwickelten Wasserbilanzmodell zur Abschätzung des täglichen Wasserbedarfs von Bäumen können die tatsächlichen Pflanzen- und Bodeninformationen bewertet werden. Das Modell dient somit als Entscheidungshilfe für die Planung des Bewässerungssystems und ermöglicht es zu entscheiden, ob und in welchem Umfang die Bewässerung bestimmter Bäume notwendig ist. Der Ansatz stützt sich auf frühere Arbeiten von Allen et al. (1998). Um die Wasserbilanz darüber hinaus baumgerecht durchführen zu können, ist es notwendig, eine Technik zu entwickeln, die dazu in der Lage ist. Diese wird aus Sensoren bestehen, die Baummerkmale erfassen (z.B. Sensoren an Wetterstationen, Fruchtzählung oder die Blattflächenbestimmung), einem Datenverarbeitungsprogramm und der Bewässerungstechnik im Feld. So können Entscheidungen zur Steuerung der täglichen Wassergabe für jeden Baum datenbasiert getroffen werden, sofern ein Bewässerungssystem für die baumweise Regelung verfügbar ist. Zum heutigen Stand in der Praxis kann zumindest die datenbasierte Bewässerung entsprechend des minimalen, durchschnittlichen oder maximalen Wasserbedarf als Entscheidungsunterstützung genutzt werden.

Die räumliche Wasserbilanzierung unter Berücksichtigung der Boden- und Pflanzendaten bietet die Chance Wasser sehr viel effizienter einzusetzen: Es wird hierbei nicht immer weniger

Wasser benötigt, sondern in einigen Anbauflächen mehr und in anderen weniger. Die Wassergabe wird jedoch hinsichtlich der Jahresverteilung an die Bedürfnisse der Bäume angepasst. Die Berücksichtigung der standortangepassten Terminierung der Kc-Werte ermöglicht Wassergabe zum Zeitpunkt des tatsächlichen Bedarfs durch die Ernteprodukte.

Die in AquaC+ erarbeitete Wasserbilanz soll in einem Brandenburger Ringversuch im Apfelanbau erprobt werden. Das ATB hat sich bereit erklärt, die entwickelte Webserver-Struktur für weitere 18 Monate fortzuführen. Im Anschluss muss eine kommerzielle Lösung für die Verstetigung der Projektergebnisse erreicht werden.

5.3 Beitrag der Ergebnisse zu förderpolitischen EIP-Zielen

Im Projektrahmen hat ein Austausch zwischen Praxis und ATB-Forschung stattgefunden. Die Fragestellung wurde aus der Erfahrung des Versuchs- und Kontrollring in Interaktion mit den Obstbaubetrieben generiert. Die Variabilität der Bodenzusammensetzung stellt seit Jahrzehnten eine große Herausforderung für die Betriebe dar. Wenn sich die datenbasierte Bewässerungssteuerung in der Praxis umsetzen lässt, kann dies zu einer erhöhten Ressourcennutzungseffizienz in den Anlagen führen. Die Digitalisierung der Prozesse wird durch die online-Bereitstellung der tagesaktuellen Wasserbilanzierung jedes Projektpartnerbetriebes unterstützt.

5.4 Nutzen der Ergebnisse für die Praxis

Das Projekt lieferte zuverlässige Daten, um den Einfluss der Bodenvariabilität auf die Wasserverfügbarkeit der Bodenzonen und somit den Schwellenwert für die Bewässerungssteuerung (RAW) für Brandenburger Betriebe zu berechnen. Ein zusätzlicher Wasserbedarf wird durch das Überschreiten des RAW in einem online Tool auf der Projektwebseite des Versuchs- und Kontrollring angezeigt. Das angestrebte Online-Tool ist in einer Beta-Version verfügbar und wurde mit Brandenburger Betrieben getestet.

Die im Projekt entwickelten Methoden und Protokolle zur Erfassung räumlicher Daten und zur Modellierung des Wasserbedarfs der Bäume können genutzt werden, um Methoden zur Bewässerungsplanung unter Berücksichtigung der räumlichen Variabilität innerhalb der Obstanlage zu entwickeln.

5.5 Gegenüberstellung der ursprünglich geplanten zu den tatsächlich erreichten Zielen

Die in der Vorhabenbeschreibung geplanten Arbeiten und Ziele wurden vollständig umgesetzt. Neue Erkenntnisse liegen hinsichtlich der Nutzung von Satellitendaten in der Bewässerungssteuerung vor. Odi-Lara und Mitarbeiter (Odi-Lara et al., 2016) integrierten Satellitenbilder in eine tägliche Bodenwasserbilanz für die Kc-Berechnung in einer

Apfelplantage. Es wurde angenommen, dass die tägliche Messung der Kc-Werte mögliche Überschätzungen des Wasserbedarfs aus den FAO-Werten verbessern kann. Ein anderes Projekt des ATB zur Nutzung von Satellitendaten (Zare et al., 2020) zeigt jedoch, dass die Brandenburger Obstanlage kaum mit Satellitenbildern auszuwerten sind, da sie nicht über die notwendige räumliche und zeitliche Auflösung verfügen. Die Eingabe von feldspezifischen Parametern zum Boden und Bestand sowie die Erhaltung einer Wetterstation wie in AquaC+ durchgeführt, sind zum heutigen Wissensstand unumgängliche Voraussetzung für die datenbasierte Bewässerungssteuerung.

5.6 Wirtschaftliche und wissenschaftliche Anschlussfähigkeit und weiterführende Fragestellungen

Die Bestimmung von standort- und kulturspezifischen Kc-Werten war nicht Projektziel, könnte jedoch weiteres Potenzial für die präzise Bewässerung haben. Ebenso ist die Wasserbewegung an der Tropfstelle nicht Projektinhalt gewesen, woraus sich jedoch Koeffizienten für die Steuerung der Bewässerung ergeben könnten. Kulturbedingte Anpassungen an den Wasserbedarf von Obst sind jedoch auch durch sich gegenseitig beeinflussende Komponenten wie Baumgröße, Blütenansatz und Erntebelastung bestimmt (Naor, 2006). Diese muss der Produktionsleiter individuell beachten. Alle Projektergebnisse regen jedoch dazu an, Pflanzendaten zu integrieren und räumlich aufgelöste Bodendaten zu berücksichtigen. Der erarbeitete Prototyp in Form des online Tools für die datenbasierte Bewässerung muss nun verstetigt werden, indem kommerzielle Anbieter das Verfahren übernehmen. Das ATB wird in der Saison 2022 und 2023 die Unterstützung ohne weitere Fördermittel bereitstellen, um die Nutzung in einem durch die Obstbauversuchsstation Müncheberg koordiniertem Apfel-Ringversuch zu ermöglichen.

6. Zusammenarbeit der operationellen Gruppe

Die Versuche wurden entsprechend der besprochenen Versuchsfragen geplant, die sich aus den durch den Koordinator oder die Betriebe organisierte Projekttreffen ergaben.

Am ATB fanden im 14-tägigen Intervall Treffen in der Arbeitsgruppe (Tsoulas, Zude-Sasse) zum aktuellen Stand und Fortschritt des Projektes (Versuchsreihen, Auswertung, Programmierung, Publikationen) statt.

Problem durch ausgesetzte Stellenbesetzung am ATB: Da 1,5 Jahre am ATB die Stelle des Projektbearbeiters unbesetzt war, konnte sich das ATB über diesen Zeitraum lediglich über wenige (nicht geförderte) Studenten und aus Haushaltsmitteln in das Projekt einbringen. Personalkosten sind entsprechend am ATB nicht angefallen. Die Kommunikation zwischen den Partnerbetrieben und Nachwuchswissenschaftler fand aufgrund der fehlenden Mitwirkung des ATB jedoch kaum statt. So konnte die Ende 2019 erwartete online-Stellung der Wasserbilanzierung nicht termingerecht erreicht werden, wodurch in der Praxis fühlbar noch

kein Ergebnis angekommen war. Die Arbeiten wurden jedoch im letzten Projektjahr durch die erfolgte Neubesetzung umgesetzt. Offen ist lediglich die Datenanalyse und Publikation von Fruchtgaswechseldaten.

Aufgaben des Projektkoordinators

Koordination des Projekts. Kommunikation mit den beteiligten Obstbauern, der ILB und der Arbeitsgruppe am ATB. Planung der Messungen und Publikationen. Kommunikation mit dem externen Berater.

Organisation der Prozesse zur Entscheidung und Steuerung

Während beim LEAD - Partner vor allem gesamtorganisatorische Maßnahmen, die Verwaltung sowie die Koordination von Zuarbeiten erfolgten, war das ATB als Wissenschaftspartner für die Durchführung und Auswertung der Messungen verantwortlich, wobei am Kontrollring Herr Achim Feil und im späteren Projektverlauf Frau Nele Handtke unterstützt. Dabei wurden situationsangepasste Kommunikationswege (Whatsapp, sms, Telefonate) genutzt. Besuche der Betriebe erfolgten vorrangig im Rahmen der Messungen in den Anlagen.

Die Zusammenarbeit aller Mitglieder der operationellen Gruppe fand vorrangig in Projekttreffen statt. Die gemeinsamen Projekttreffen aller OG - Mitglieder sind das zentrale Entscheidungsgremium. Diese basieren wiederum auf den inhaltlichen Vorarbeiten des LEAD - Partners, Anregungen der Betriebe und Ergebnispräsentationen der (Nachwuchs-)Wissenschaftler.

7. Kommunikations- und Disseminationskonzept

Die Projektergebnisse wurden im Rahmen von Obstbautagen, auf der IPM in Essen, bei Veranstaltungen anderer OGs zur Bewässerung (Anhang: Nachweis der Veröffentlichungen) kommuniziert. Im Frühjahr 2018 wurde im Ergebnis eines DVS - Arbeitstreffen ein länderübergreifendes Projekttreffen mit dem Schwerpunkt Bewässerung vorbereitet. Der OG-Workshop "Nachhaltige Bewässerung" wurde mit Beteiligung von AquaC+ am 4. und 5. September in Suderburg (Niedersachsen) durchgeführt.

Arbeitsergebnisse aus AquaC+ wurden ebenfalls mehrfach beim Projekttreffen der OG PRIMEFRUIT vorgestellt.

Im Rahmen eines Besuches der Staatssekretärin Dr. Carolin Schilde am Standort Schmergow präsentierten LEAD-Partner, Praxispartner und Wissenschaftspartner zusammen das Projekt AquaC+ und konnten dadurch agrarpolitisch wichtige Themen aus unterschiedlichen Gesichtspunkten darstellen. Im Rahmen eines Besuches des Staatssekretärs Dr. Kralinski am Standort Schäpe präsentierten LEAD-Partner, Praxispartner und Wissenschaftspartner zusammen das Projekt AquaC+ und konnten dadurch agrarpolitisch wichtige Themen aus unterschiedlichen Gesichtspunkten darstellen.

Auch im Rahmen des Feldtages des ATB-Forschungsstandortes in Marquardt erhält diese Verknüpfung von Wissenschaft und Praxis positives Feedback und Anregungen für weitere

Vernetzungsmöglichkeiten.

Im Europäischen Rahmen nahm der Versuchs- und Kontrollring an zwei EIP – Agri Workshops mit Vorträgen zu AQUA C+ in Portugal (11.10. – 13.10.2017, Dr. A. Jende) und in Frankreich (24.06. – 25.06.2019, Achim Feil) teil.

Eine Fachexkursion wurde vom ATB organisiert und gemeinsam mit den Betrieben nach Großbritannien durchgeführt. Hierbei erhielten die Betriebe neue Impulse aus der exzellenten Beratungsleistung in England. Zur Exkursion wurde auf dem Brandenburger Obstbautag ausführlich berichtet.

Es wurde eine Reihe von wissenschaftlichen Publikationen in etablierten Fachzeitschriften und Open Access erstellt, wobei letztere im Internet frei verfügbar sind. Alle Publikationen und Veranstaltungen wurden auf dem Twitter Account der Arbeitsgruppe Präzisionsobstbau (#prec_hort) und teilweise auf der Homepage vom ATB beworben. Es wurden praxisnahe Artikel für die Zeitschriften „Landtechnik“ und „Besseres Obst“ verfasst. Darüber hinaus wurde zur Erläuterung des komplexen Versuchsvorhaben ein Erklärvideo gedreht.

Die EIP-Förderung ist ein geeignetes Instrument, um Wissen vor Ort zu generieren und sowohl der Praxis als auch der Wissenschaft zur Verfügung zu stellen.

Quellen

Aggelopoulou, K., Castrignanò, A., Gemtos, T., & De Benedetto, D. (2013). Delineation of management zones in an apple orchard in Greece using a multivariate approach. *Computers and Electronics in Agriculture*,90, 119–130. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2012.09.009>.

Allen, R. G., Pereira, L. S., Raes, D., & Smith, M. (1998). Crop evapotranspiration—guidelines for computing crop water requirements-FAO Irrigation and Drainage Paper 56. FAO, Rome, 300(9), D05109.

Brandes, N., Tsoulas, N., & Zude-Sasse, M. (2018). Ermittlung des kultur- und standortangepassten Wasserbedarfs unter Berücksichtigung der Fruchtentwicklungsphasen bei Kulturheidelbeere (*Vaccinium corymbosum* L.) / Calculating field adapted irrigation requirements of Highbush Blueberry (*Vaccinium corymbosum* L.) considering fruit developmental stage. *Landtechnik/Agricultural Engineering* 73: 179-183

Corwin, D. L., & Plant, R. E. (2005). Applications of apparent soil electrical conductivity in precision agriculture. *Computers and Electronics in Agriculture*,46, 1–3. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2004.10.004>.

Daccache, A., Ciurana, J. S., Diaz, J. R., & Knox, J. W. (2014). Water and energy footprint of irrigated agriculture in the Mediterranean region. *Environmental Research Letters*,9(12), 124014. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/9/12/124014>.

Ferreira, M. I. (2017). Stress coefficients for soil water balance combined with water stress indicators for irrigation scheduling of woody crops. *Horticulturae*,3(2), 38. <https://doi.org/10.3390/horticulturae3020038>.

Dodd, I. C., Egea, G., Watts, C. W., & Whalley, W. R. (2010). Root water potential integrates discrete soil physical properties to influence ABA signalling during partial rootzone drying. *Journal of Experimental Botany*,61(13), 3543–3551. <https://doi.org/10.1093/jxb/erq195>.

Hedley, C. B., & Yule, I. J. (2009). A method for spatial prediction of daily soil water status for precise irrigation scheduling. *Agricultural Water Management*,96(12), 1737–1745. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2009.07.009>.

Hedley, C. B., Bradbury, S., Ekanayake, J., Yule, I. J., & Carrick, S. (2010, November). Spatial irrigation scheduling for variable rate irrigation. In *Proceedings of the New Zealand Grassland Association* (Vol. 72, pp. 97-102). New Zealand Grassland Association.

- Herppich, W. B., & Geyer, M. (2001). Osmotic and elastic adjustment, and product quality in cold-stored carrot roots (*Daucus carota* L.). *Gartenbauwissenschaft*, 66(1), 20-26.
- Humphreys, M. T., Raun, W. R., Martin, K. L., Freeman, K. W., Johnson, G. V., & Stone, M. L. (2005). Indirect estimates of soil electrical conductivity for improved prediction of wheat grain yield. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 35(17-18), 2639-2653. <https://doi.org/10.1081/LCSS-200030421>.
- Jensen, M. E., & Allen, R. G. (2016). *Evaporation, evapotranspiration, and irrigation water requirements*. Manual 70. Reston, VA: ASCE
- Juhász, Á., Sepsi, P., Nagy, Z., Tőkei, L., & Hrotkó, K. (2013). Water consumption of sweet cherry trees estimated by sap flow measurement. *Scientia Horticulturae*, 164, 41-49. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2013.08.022>
- Käthner, J., & Zude-Sasse, M. (2015). Interaction of 3D soil electrical conductivity and generative growth in *Prunus domestica* L. *European Journal of Horticultural Science*, 80(5), 231-239.
- Lo, T. H., Heeren, D. M., Mateos, L., Luck, J. D., Martin, D. L., Miller, K. A., ... Shaver, T. M. (2017). Field characterization of field capacity and root zone available water capacity for variable rate irrigation. *Applied Engineering in Agriculture*, 33(4), 559-572. <https://doi.org/10.13031/aea.11963>.
- McCutcheon, M. C., Farahani, H. J., Stednick, J. D., Buchleiter, G. W., & Green, T. R. (2006). Effect of soil water on apparent soil electrical conductivity and texture relationships in a dryland field. *Biosystems Engineering*, 94(1), 19-32. <https://doi.org/10.1016/j.biosystem-seng.2006.01.002>.
- Mostafa, H., Kowshik K.S., Tsoulas, N., & Zude-Sasse, M. (2022). Using LiDAR technique and modified Community Land Model for calculating water interception of cherry canopy. *Agricultural Water Management* (In review)
- Motohka, T., Nasahara, K. N., Oguma, H., & Tsuchida, S. (2010). Applicability of green-red vegetation index for remote sensing of vegetation phenology. *Remote Sensing*, 2(10), 2369-2387. <https://doi.org/10.3390/rs2102369>
- Naor, A., Klein, I., Hupert, H., Grinblat, Y., Peres, M., & Kaufman, A. (1999). Water stress and crop level interactions in relation to nectarine yield, fruit size distribution, and water potentials. *Journal of the American Society for Horticultural Science*, 124(2), 189-193.
- Naor, A., Gal, Y., & Peres, M. (2006). The inherent variability of water stress indicators in apple, nectarine and pear orchards, and the validity of a leaf-selection procedure for water potential measurements. *Irrigation Science*, 24(2), 129-135. <https://doi.org/10.1007/s00271-005-0016-6>.
- Odi-Lara, M., Campos, I., Neale, C. M., Ortega-Farías, S., Poblete-Echeverría, C., Balbontín, C., & Calera, A. (2016). Estimating evapotranspiration of an apple orchard using a remote sensing-based soil water balance. *Remote Sensing*, 8(3), 253.
- Oldoni, H., & Bassoi, L. H. (2016). Delineation of irrigation management zones in a quartzipsamment of the Brazilian semiarid region. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, 51(9), 1283-1294. <https://doi.org/10.1590/s0100-204x2016000900028>.
- Paço, T. A., Ferreira, M. I., Rosa, R. D., Paredes, P., Rodrigues, G. C., Conceição, N., ... Pereira, L. S. (2012). The dual crop coefficient approach using a density factor to simulate the evapotranspiration of a peach orchard: SIMDualKc model versus eddy covariance measurements. *Irrigation Science*, 30(2), 115-126. <https://doi.org/10.1007/s00271-011-0267-3>.
- Penzel, M., Herppich, W. B., Weltzien, C., Tsoulas, N., & Zude-Sasse, M. (2021). Modeling of Individual Fruit-Bearing Capacity of Trees Is Aimed at Optimizing Fruit Quality of *Malus x domestica* Borkh. 'Gala'. *Frontiers in Plant Science*, 1323. <https://doi.org/10.3389/fpls.2021.669909>
- Shaner, D. L., Khosla, R., Brodahl, M. K., Buchleiter, G. W., & Farahani, H. J. (2008). How well does zone sampling based on soil electrical conductivity maps represent soil variability? *Agronomy Journal*, 100(5), 1472-1480. <https://doi.org/10.2134/agronj2008.0060>.
- Sudduth, K. A., Kitchen, N. R., Wiebold, W. J., Batchelor, W. D., Bollero, G. A., Bullock, D. G., ... Thelen, K. D. (2005). Relating apparent electrical conductivity to soil properties across the north-central USA. *Computers and Electronics in Agriculture*, 46(1-3), 263-283. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2004.11.010>.

Taubner, H., Roth, B., & Tippkötter, R. (2009). Determination of soil texture: Comparison of the sedimentation method and the laser-diffraction analysis. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 172(2), 161–171. <https://doi.org/10.1002/jpln.200800085>.

Tsoulias N; Zude-Sasse M (2019). Wieviel Wasser brauchen eigentlich Kirschen? *Besseres Obst* 5: 16-18

Tsoulias, N., Paraforos, D., Brandes, N., Fountas, S., & Zude-Sasse, M. (2018). Calculating the water deficit of apple orchard by means of spatially resolved approach. In *Proceedings of the 14th International Conference on Precision Agriculture*, Montreal, Quebec, Canada

Tsoulias, N., Paraforos, D. S., Fountas, S., & Zude-Sasse, M. (2019, July). Calculating the water deficit spatially using LiDAR laser scanner in an apple orchard. In *Proceedings of the European 12th Conference of Precision Agriculture*, Montpellier, France (pp. 8-11).

Tsoulias N; Gebbers R; Zude-Sasse M (2020). Using data on soil ECa, soil water properties, and response of tree root system for spatial water balancing in an apple orchard. *Precision Agriculture* 21: 522–548. <https://doi.org/10.1007/s11119-019-09680-8>

Vatsanidou, A., Nanos, G. D., Fountas, S., Baras, J., Castrignano, A., & Gemtos, T. A. (2017). Nitrogen replenishment using variable rate application technique in a small hand-harvested pear orchard. *Spanish journal of agricultural research*, 15(4), 5.

Vieira, J., Rossi, S., Campelo, F., Freitas, H., & Nabais, C. (2013). Seasonal and daily cycles of stem radial variation of *Pinus pinaster* in a drought-prone environment. *Agricultural and Forest Meteorology*, 180, 173-181. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2013.06.009>

Whitmore, A. P., & Whalley, W. R. (2009). Physical effects of soil drying on roots and crop growth. *Journal of Experimental Botany*, 60(10), 2845–2857. <https://doi.org/10.1093/jxb/erp200>.

Zude-Sasse, M., Fountas, S., Gemtos, T.A. & Abu-Khalaf, N. (2016). Applications of precision agriculture in horticultural crops. *Eur.J.Hortic.Sci.* 81(2), 78-90. <https://doi.org/10.17660/eJHS.2016/81.2.2>

Anhang: Schriftliche Publikationen

- a. Seifert B; Brandes N; Regen C; Zude-Sasse M (2017). Smartphone-gestützte Analyse der Fruchtgrößenentwicklung zur Ernteterminbestimmung bei Süßkirschen. Obstbau 5: 303 – 305
- b. Brandes N; Regen C; Intreß J; Seifert B; Zude-Sasse M (2017): Qualität nach Maß - die Fruchtgröße im Auge behalten! Besseres-Obst.at. 17-18
- c. Brandes N; Tsoulias N; Zude-Sasse M (2018). Ermittlung des kultur- und standortangepassten Wasserbedarfs unter Berücksichtigung der Fruchtentwicklungsphasen bei Kulturheidelbeere (*Vaccinium corymbosum* L.) / Calculating field adapted irrigation requirements of Highbush Blueberry (*Vaccinium corymbosum* L.) considering fruit developmental stage. Landtechnik/Agricultural Engineering 73: 179-183
- d. Tsoulias N; Zude-Sasse M (2019). Wieviel Wasser brauchen eigentlich Kirschen? Besseres Obst 5: 16-18
- e. Tsoulias N; Paraforos DS; Fountas S; Zude-Sasse M (2019). Calculating the water deficit spatially using LiDAR laser scanner in an apple orchard. ECPA, Technical Paper: 14762
- f. Tsoulias N; Gebbers R; Zude-Sasse M (2020). Using data on soil ECa, soil water properties, and response of tree root system for spatial water balancing in an apple orchard. Precision Agriculture 21: 522–548. <https://doi.org/10.1007/s11119-019-09680-8>
- g. Mostafa H; Tsoulias N; Saha KK; Zude-Sasse (2022). Using LiDAR technique and modified Community Land Model for calculating cherry canopy water interception.