



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DRESDEN

BLÜTENSTADT
WERDER (HADEL)



Wissenschaftliche Untersuchungen
der Möglichkeiten und Grenzen
wassersparender Bewässerung des
Obstanbaus in der Region Werder (Havel)

Abschlussbericht

Prof. Dr. Niels Schütze, Dr. Franz Lennartz, Lisa Kuhnert

31. Januar 2026



Professur für Hydrologie
Institut für Hydrologie und Meteorologie
TU Dresden

Wissenschaftliche Untersuchungen der Möglichkeiten und Grenzen wassersparender Bewässerung des Obstanbaus in der Region Werder (Havel)

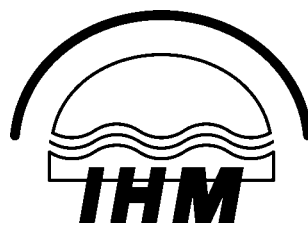
Abschlussbericht

Prof. Dr. Niels Schütze

Dr. Franz Lennartz

Lisa Kuhnert

31. Januar 2026



Professur für Hydrologie, Institut für Hydrologie und
Meteorologie, TU Dresden

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	5
2	Soll-Ist-Abgleich und Meilensteinplan	7
3	Darstellung der Ergebnisse	9
3.1	Voruntersuchungen	9
3.1.1	Gebietsbegehung, Auswahl der Messstandorte	9
3.1.2	Literaturstudie zur Obstbaumbewässerung und Sichtung aktueller Bewässerungsmethoden und Bewässerungstechnik	11
3.1.3	Überprüfung der Wasserhaushaltsbilanz für den Glindower See auf der Basis vorhandener Wasserhaushaltsberechnungen	19
3.1.4	Berechnung und Beurteilung der Grasreferenzverdunstung für die letzten 34 Jahre	23
3.2	Aufbau einer Projektdatenbank	26
3.2.1	Relevante Wetterdaten auf täglicher Basis seit 2016	26
3.2.2	Bodendaten aus verfügbaren Karten	27
3.2.3	Pflanzendaten	28
3.2.4	Pläne der Felder	31
3.2.5	Pläne des Leitungsnetzes	31
3.2.6	Bewässerungssystem & Steuerung	33
3.2.7	Monitoring Daten	34
3.3	Einrichten der Messstandorte und Datenerhebung	36
3.3.1	Einrichtung repräsentativer Standorte und Bäume	36
3.3.2	Entnahme von Bodenproben und Bohrstockanalyse	37
3.3.3	Einrichten des „Monitoringsystems Boden“ für Bodenwasserpotential und Bodenwassergehaltsmessungen in unterschiedlichen Tiefen und horizontalen Abständen	39
3.3.4	Nach Auswertung und Analyse der Wetterdaten des DWD und VKR-BB ggf. Aufbau einer eigenen Wetterstation an dem Messstandort	40
3.3.5	Hochaufgelöste Analyse und Abbildung mikroklimatischer Einflüsse auf das Bewässerungsmanagement des Untersuchungsstandortes	41
3.3.6	Installation von Saftflussmessungen an Einzelbäumen	42
3.4	Modellierung und Durchführung von Bewässerungsexperimenten	43
3.4.1	Modellierung	43
3.4.2	Durchführung	45

3.4.3	Ausgewählte Simulationsergebnisse und Vergleich mit einem Bewässerungsversuch	46
3.5	Modellierung des Bewässerungsbedarfs	48
3.5.1	Modellierung	48
3.5.2	Aufbau der Simulationsexperimente mit AquaCrop am Standort Werder	50
3.5.3	Simulation der historischen Bedarfsentwicklung	51
3.5.4	Simulation der zukünftigen Bedarfsentwicklung	52
3.5.5	Einschränkungen der Modellierung, insbesondere Frostschäden	53
3.5.6	Vergleich mit Bewässerungskapazitäten nach Ertüchtigung des Brauchwasserwerks	54
3.6	Frostschutzberechnung: Gefährdungsabschätzung und Wasserbedarf	56
3.6.1	Ereignisanalyse 2024	56
3.6.2	Wasserbedarf zur Frostschutzberechnung	57
3.7	Zusammenfassung und Empfehlungen	59
Literatur		67
A Verzeichnisse		69
B Installierte Messinfrastruktur		73

1. Einleitung

Der hier vorgelegte Bericht orientiert sich eng an dem Arbeits- und Meilensteinplan, der im Angebot vom 29.11.2021 vorgelegt wurde. Dabei ist zu berücksichtigen, dass der ursprünglich für 01.12.2021 geplante Projektbeginn auf den 01.08.2022 verschoben wurde. Der Abgabetermin des Berichtes berücksichtigt den verspäteten Projektbeginn und eine kostenneutralen Laufzeitverlängerung¹.

Wir (der AN) haben nach Auftragserteilung und in Absprache mit dem AG dem Projekt eine weitere wesentliche Komponente hinzugefügt, die im ursprünglichen Untersuchungskonzept nicht enthalten war und deshalb im Plan der Arbeitspakete nicht aufgeführt ist. Für genaue Untersuchungen der mikroklimatischen Unterschiede, die durch Topografie, Exposition und Lage im Bestand entstehen, haben wir in Zusammenarbeit mit [IOT Plan Dresden](#) auf vier ausgewählten Flächen 100 Temperatur- und Luftfeuchtigkeitssensoren in zwei unterschiedlichen Höhen installiert. Um diese Messungen vergleichend zu bewerten und zu interpretieren, haben wir in Zusammenarbeit mit der Professur Geosensorsysteme der TU Dresden ein 3D-Modell der Felder durch Laserscanning mit Drohnen erstellt. Die Messungen der Sensoren erfolgen alle 20 min und werden per Funk an ein Gateway übermittelt, das die Daten dann an die TUD/ Professur für Hydrologie sendet, wo sie automatisch ausgewertet werden. Dieses System ist seit dem 1.10.2022 funktional, lieferte Daten bis zum Auslaufen des Mietvertrags der Sensoren zum 30.10.2025 mit Ergebnissen, die unter Kapitel 3.3.5 beschrieben werden. Dieses zusätzliche Arbeitspaket hat den Titel: „Hochaufgelöste Analyse und Abbildung mikroklimatischer Einflüsse auf das Bewässerungsmanagement des Untersuchungsstandortes“.

Die Fertigstellung der beauftragten Arbeiten wird erst im Soll-Ist-Abgleich des ursprünglichen Arbeitsplans dargestellt. Die Ergebnisse der durchgeführten Arbeiten werden in Kapitel 3 „Darstellung der Ergebnisse“ gezeigt. Zusätzlich wurden Ergebnisse auf zwei öffentlichen Veranstaltungen des Auftraggebers am 25.09.2023 und am 08.10.2024 vorgestellt.

¹Einer kostenneutralen Laufzeitverlängerung des Projekts bis zum 31.12.2025 wurde vom Auftraggeber am 01.11.2024 zugestimmt.

2. Soll-Ist-Abgleich und Meilensteinplan

Meilenstein	Stand der Arbeiten
1. Voruntersuchung	
1.1 Gebietsbegehung und Auswahl der Messstandorte	✓ ²
1.2 Literaturstudie zur Obstbaumbewässerung und Sichtung aktueller Bewässerungsmethoden und Bewässerungstechnik	✓
1.3 Überprüfung der Wasserhaushaltsbilanz für den Glin-dower See auf der Basis vorhandener Wasserhaushaltsberechnungen	✓
1.4 Berechnung und Beurteilung der Grasreferenzverdunstung für die letzten 6 Jahre	✓
2. Aufbau einer Projektdatenbank	
2.1 Relevante Wetterdaten auf täglicher Basis seit 2016	✓
2.2 Bodendaten aus verfügbaren Karten	✓
2.3 Pflanzendaten (Sorten, Alter, LAI, Wurzeltiefe und Ausbreitung)	✓
2.4 Pläne der Felder	✓
2.5 Pläne des Leitungsnetzes	✓
2.6 Bewässerungssystem und Steuerung	✓
2.7 Monitoring Daten	✓
3. Einrichten der Messstandorte und Datenerhebung	
3.1 Auswahl repräsentativer Standorte und Bäume	✓
3.2 Entnahme von Bodenproben und Bohrstockanalyse	✓
3.3 Einrichten des „Monitoringsystems Boden“ für Bodenwasserpotential und Bodenwassergehaltsmessungen in unterschiedlichen Tiefen und horizontalen Abständen	✓
3.4 Nach Auswertung und Analyse der Wetterdaten des DWD und VKR-BB ggf. Aufbau einer eigenen Wetterstation an dem Messstandort	✓

²Legende: ✓ - Durchgeführt; ⚙ - in Bearbeitung; x - Geplant

2. Soll-Ist-Abgleich und Meilensteinplan

	Meilenstein	Stand der Arbeiten
3.5	Monitoring des Wasserverteilungssystems und der Wassermenge an den Tropfern	✓
3.6	Testaufbau mit unterschiedlichen Bewässerungswasser- verteilungsmethoden	✓
3.7	Installation von Saftflussmessern	✓
3.8	Durchführung des Monitorings mit regelmäßiger Betreuung der Messstationen und Erstauswertung und Ablage der Rohdaten	✓
4.	Durchführung von Bewässerungsexperimenten	
4.1	Umbau von Tropfern und anderen Wasserapplikationssystemen	✓
4.2	Monitoring der Experimente	✓
4.3	Auswertung und Ablage der Rohdaten	✓
5.	Aufbau von SVAT Modellen mit Parametrisierung und Kalibrierung	
5.1	Aufbau von Aquacrop zur Bestimmung des Pflanzenwasserbedarfs	✓
5.1.1	Testrechnungen auf der vorhandenen Datenbasis und Erstellung von Wasserbilanzen	✓
5.2	Aufbau von HYDRUS 2D zu Strömungsberechnungen von Bewässerungsvorgängen	✓
5.2.1	Modellparametrisierung, Modellkalibrierung, Modellvalidierung	✓
6.	Durchführung von Simulationsstudien mit den Zielen:	✓
6.1	Der optimalen Wasserverteilung im Wurzelraum	✓
6.2	Der Minimierung von Verdunstungsverlusten und des Feldwasserbedarfs	✓
6.3	Geringe Anforderungen an das Zuleitungssystem	✓
6.4	Optimale Bewässerungsmanagementpläne und Bewässerungssteuerung	✓
7.	Wasserbedarfsberechnung und Druckanforderungen für die Frostschutzberechnung	✓
8.	Zusammenführung der Ergebnisse und Analyse	✓
9.	Berichterstattung und Projektmanagement	✓

3. Darstellung der Ergebnisse

Die Reihenfolge der dargestellten Ergebnisse orientiert sich an dem Plan der Arbeitspakete aus dem Angebot, enthält unter Kapitel 3.3.5 aber das in der Einleitung beschriebene und im Angebot nicht enthaltene Arbeitspaket „Hochaufgelöste Analyse und Abbildung mikroklimatischer Einflüsse auf das Bewässerungsmanagement des Untersuchungsstandortes“.

3.1. Voruntersuchungen

3.1.1. Gebietsbegehung, Auswahl der Messstandorte

Insgesamt wurden seit Projektbeginn 16 Fahrten in das Projektgebiet sowie eine Fahrt nach Werder (Havel) zur Projektpräsentation unternommen. An drei Ortsterminen im Projektgebiet haben wir uns mit Vertretern der örtlichen Akteure getroffen, dabei wurden uns die örtlichen Gegebenheiten und Besonderheiten gezeigt und wir hatten Gelegenheit, mit den Teilnehmern über ihre Erwartungen an dem Projekt und über die Schwerpunktsetzung der Untersuchungen zu diskutieren. An zwei Terminen haben wir gemeinsam mit Herrn Giese (Geschäftsführer der Havelfrucht GmbH) die Untersuchungsflächen festgelegt, wobei die Topografie des Geländes sowie der Apfelanbau als maßgebliche Feldfrucht berücksichtigt wurden. An drei Terminen haben wir 102 Temperatur- und Luftfeuchtesensoren auf drei ausgewählten Flächen im Obstbestand in 1.5 m und 3.7 m Höhe installiert. Die Firma IOT Plan Dresden hat dafür das Fernübertragungssystem installiert. Auf dieser Basis können wir quasi in Echtzeit auf die Messdaten zugreifen.

Um diese Daten später in einem Simulationsmodell zur Beschreibung der mikroklimatischen Verhältnisse auswerten zu können, wurden in Zusammenarbeit mit der Professur für Geosensorsysteme der TU Dresden an drei Terminen 3D-Laserscans mit Drohnen durchgeführt³. Das an die örtlichen Gegebenheiten angepasste Simulations-

³Ergebnisse enthält die Arbeit von P. Hecker: Fusion von in Baumplantagen erzeugten Punktwolken mittels Handheld-Lidar und UAV-Bilddaten – Entwicklung eines Workflows, TU Dresden, (Hecker 2024).

3. Darstellung der Ergebnisse



Abbildung 3.1.: Installierte Sensorik im Feld und Bodenprobenahme

modell AquaCrop kann dann zur Simulation verschiedener Wetterszenarien und deren Auswirkungen auf den Wasserverbrauch der Obstkulturen und damit auf den Bewässerungsbedarf genutzt werden.

An vier weiteren Terminen haben wir eine komplexe Wetterstation und eine Bodenwasserstation inkl. Solarpanels für die Stromversorgung und Fernübertragung installiert. Mit der Installation der Bodenwasserstation am 17.05.2023 wurde die für das Projekt vorgesehene Messtechnik vervollständigt, getestet und ist funktional. An diesen Terminen haben wir auch umfangreiche Bodensondierungen und Bodenansprachen durchgeführt. Die Ergebnisse dieser Sondierungen sind direkt in die Standortwahl und den Aufbau der Bodenwasserstation eingeflossen und werden bei der späteren Modellierung des Bodenwasserhaushalts berücksichtigt.

Am 07. März 2024 wurden an drei ausgewählten Bäumen Saftflusssensoren des Typs UGT SFM-5 installiert. Die Sensoren erfassen seit der Installation kontinuierlich die Transpirationsraten der Bäume und befinden sich weiterhin im operativen Messbetrieb; die valide Messperiode wird ab dem 13. März 2024 ausgewiesen. Die erhobenen Daten werden zur Analyse des pflanzenspezifischen Wasserverbrauchs herangezogen, und die Messreihe dauert bis heute an.

Damit haben wir die messtechnische Grundlage geschaffen, die Voraussetzung für eine erfolgreiche Projektbearbeitung war. Mit der Verfügbarkeit lokaler Messdaten über mehrere Wachstumsperioden lassen sich zuverlässiger als bisher Aussagen über den gegenwärtigen und zukünftigen Wasserbedarf abgeben (Abbildung 3.1). Durch die Erhebung lokaler Daten (Monitoring von Boden, Klima und Pflanze) können die notwendigen Modelle (wie AquaCrop oder HYDRUS) so parametrisiert und kalibriert werden, dass nicht nur eine präzise, bedarfsgerechte und wassersparende Steuerung, sondern auch die Simulation und Bewertung zukünftiger Maßnahmen überhaupt erst möglich werden. Die Übersicht des Messsystems kann im Anhang, Tab. B.1 nachgeschlagen werden.

3.1.2. Literaturstudie zur Obstbaumbewässerung und Sichtung aktueller Bewässerungsmethoden und Bewässerungstechnik

Insgesamt wurden 28 Literaturquellen zum Thema Bewässerung mit dem Schwerpunkt Bewässerung im Apfelanbau analysiert. Eine umfassende Diskussion der Ergebnisse aus der Literaturstudie kann im Folgenden eingesehen werden. Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass das von uns entworfene Untersuchungskonzept in wesentlichen Punkten deutlich innovativer ist, als der derzeit gültige und in der analysierten Literatur reflektierte beste Stand der Technik.

Der Pflanzenwasserbedarf

Die überragende Rolle des Wassers in Pflanzen als Transportmedium und in vielen physiologischen Funktionen ist in einer Vielzahl biologischer Standardwerke beschrieben. Da wir uns in diesen Untersuchungen auf die Möglichkeiten der wassersparenden Bewässerung von Obstbäumen konzentrieren wollen, wird diese hier nur sehr verkürzt angesprochen.

Wasser ist das Medium zum Transport gelöster Minerale und organischer Substanzen in der Pflanze, diese werden mit dem Wasser durch die Wurzel aufgenommen. Der größte Teil des durch die Wurzel aufgenommenen Wassers wird jedoch nicht in der Pflanze gespeichert, sondern verlässt diese als Transpiration (Verdunstung durch die Spaltöffnungen) wieder. Somit trägt das Wasser auch zur Thermoregulation der Pflanze bei. Eine wichtige physiologische Rolle hat Wasser in der Pflanze als Elektronendonator in der Photosynthese. Besonders die photosynthetisch und stoffwechselltechnisch aktiven Pflanzengewebe bestehen zu 85 - 95 % aus Wasser (Schopfer und Brennicke 2010). Aus diesen Funktionen wird die überragende Rolle der Pflanzenwasserversorgung für die Ertragsbildung deutlich. Der Wasserbedarf von Pflanzen hängt von der Pflanzenart, dem Wachstumsstadium, der aktiven Blattoberfläche und den klimatischen Randbedingungen ab.

Die Verdunstung (Evaporation) von einer freien Wasserfläche kann anhand meteorologischer Standarddaten berechnet werden (Berechnung der potentiellen Evaporation *EP* nach dem Ansatz von Penman 1948). Dieser Ansatz wurde 1965 von Monteith unter Nutzung eines Analogieansatzes so erweitert, dass er zur Berechnung der Transpiration von Pflanzen genutzt werden kann (Berechnung der potentiellen Evapotranspiration *ET* nach der Methode von Penman – Monteith). Die Einführung von Widerständen bzw. Parametern, die die Transpirationsprozesse der Pflanze beschreiben, ermöglicht die Beschreibung des komplexen Zusammenspiels zwischen Pflanze und Atmosphäre.

$$\lambda ET = \frac{\Delta(R_n - G) + \rho_a c_p \frac{(e_s - e_a)}{r_a}}{\Delta + \gamma(1 + \frac{r_s}{r_a})} \quad (3.1)$$

Die Energiehaushaltskomponenten sind λET (latenter Wärmestrom), R_n (Nettostrahlung) und G (Bodenwärmestrom), die anderen Komponenten sind $(e_s - e_a)$ (Sättigungsdefizit Luft), ρ_a (mittlere Dichte der Luft bei konstantem Druck), c_p (spezifische Wärme der Luft), Δ (Steigung der Sättigungsdampfdruck-Temperatur Kurve), γ (Psychrometerkonstante) sowie r_s (Stomatawiderstand) und r_a (Oberflächen- bzw. aerodynamischer Widerstand).

Für eine ausführliche Herleitung dieser Gleichung sowie all ihrer Komponenten siehe Dyck und Peschke (1995).

Die Evapotranspiration kann auch durch Quantifizierung der Zu- und Abflüsse sowie der Wasservorratsänderung beschrieben werden. Es gibt mehrere Methoden, diese Quantifizierung durchzuführen. Genaue Ergebnisse liefern wägbare Lysimeter (Bodenmonolithen). Durch Wägung der Bodenmonolithen können Wasserverluste (durch Transpiration und Evaporation) und Wasserzufuhr (durch Niederschlag und Bewässerung) quantifiziert werden. Dadurch lässt sich die reale Evapotranspiration ET als Restglied der Wasserbilanzgleichung bestimmen (Dyck und Peschke 1995).

$$ET = P - RG - \Delta S \quad (3.2)$$

ET steht hier für die reale Evapotranspiration, P für Niederschlag bzw. Wasserzufuhr, RG für die Sickerwassermenge und ΔS für die Wasservorratsänderung (Speicher).

Der Wasserbedarf entspricht ET (Evaporation von der Oberfläche des betrachteten Bodenmonolithen und Transpiration der Pflanze) bzw. nur T (nur Transpiration der Pflanze). Die Transpiration lässt sich durch Unterbinden der Evaporation ermitteln. Die Untersuchungen von Green und Clothier (1998) und Girona et al. (2011) liefern hierfür gute Beispiele.

Bestimmung des Pflanzenwasserbedarfs nach FAO

Einen vereinfachten Ansatz zur Bestimmung des Pflanzenwasserbedarfs bietet die FAO im *FAO Irrigation and Drainage Paper 56* an (Allen et al. 1998). Dabei wird für einen bestimmten Standort anhand meteorologischer Parameter die potentielle Verdunstung einer Referenzvegetation (Bermudagrass in einem genau definierten Wachs-

tumszustand und Grad der Wasserversorgung) mit dem *Penman-Monteith-Ansatz* bestimmt. Zur Ermittlung des Wasserbedarfs anderer Anbaukulturen wird diese sogenannte Grasreferenzverdunstung ET_0 mit dem pflanzenspezifischen Faktor k_c (c für *crop*) angepasst. Der Faktor k_c bildet die prozentuale Abweichung des pflanzenspezifischen Wasserbedarfs ET_c von der Grasreferenzverdunstung ET_0 ab .

$$ET_c = ET_0 \cdot k_c \quad (3.3)$$

Beispielsweise wäre bei $k_c = 1$ der Pflanzenwasserbedarf $ET_c = ET_0$, bei einem $k_c = 0.8$ wäre ET_c 80% von ET_0 . Die Angabe von ET_c erfolgt in Millimeter pro betrachteter Zeiteinheit bzw. Liter pro m^2 Fläche und Zeiteinheit.

Da der pflanzenspezifische Wasserbedarf abhängig von der Anbaukultur ist, unterscheiden sich die k_c -Werte unterschiedlicher Vegetationsarten. Ursachen hierfür sind beispielsweise Unterschiede in aerodynamischen Eigenschaften, die die Kopplung der Vegetationsschicht an die Atmosphäre beeinflussen (der Potentialunterschied zwischen Boden und Atmosphäre ist der Hauptantrieb für Wassertransport innerhalb der Pflanzen), unterschiedliche Charakteristika der Stomata (z.B. wie viele Stomata ein Blatt besitzt und unter welchen Bedingungen diese schließen) und Unterschiede in der Albedo der Pflanzen.

Trockenstress kann zu einer Verringerung des k_c -Wertes führen, ist jedoch bei Bewässerung vernachlässigbar (Allen et al. 1998). Auch weisen die meisten Pflanzen ausgeprägte Entwicklungsphasen mit teils großen Unterschieden hinsichtlich des Wasserbedarfs auf (Meier 2018). Daraus ergibt sich ein saisonaler Verlauf des pflanzenspezifischen Wasserbedarfs, welcher z.B. durch einen zeitlich variablen k_c -Faktor abgebildet werden kann. Die FAO empfiehlt, den Verlauf des k_c -Faktors anhand der Entwicklungsphasen der jeweiligen Anbaukultur in $k_{c,ini}$, $k_{c,mid}$ und $k_{c,end}$, also Initialphase, Mittelphase und Endphase zu unterteilen. Zusätzlich kann der Einfluss von Frost oder Bodenbedeckung auf den Pflanzenwasserbedarf berücksichtigt werden. Von der FAO bereitgestellte Tabellen mit k_c -Faktoren für unterschiedliche Pflanzen, Wachstumsstadien und Regionen wurden durch Messungen der ET_c mit unterschiedlichen Methoden, wie z.B. Lysimeter, Saftflussmessungen oder Messungen des Bodenwassergehaltes ermittelt (Doorenbos und Pruitt 1977).

Bestimmung des k_c -Faktors für den Apfelanbau auf Basis der Literatur

Die Ermittlung der k_c -Faktoren ist nicht trivial und meist standortgebunden, da diese immer nur in direktem Zusammenspiel von Umgebungseinflüssen, lokalem Klima und pflanzenspezifischen Eigenschaften ermittelt werden kann (Steduto et al. 2012). Das zeigte sich auch in den vielen wissenschaftlichen Arbeiten zur Bestimmung des k_c -Wertes, welcher nicht nur eine hohe saisonale Variabilität aufweist, sondern auch mitunter von Jahr zu Jahr schwankt. k_c -Faktoren, welche für einen bestimmten Standort ermittelt wurden, sind nicht unbedingt auf andere Standorte übertragbar. Gerade bei hoch und unregelmäßig stehenden Kulturen (wie z.B. Obstbaumpflanzungen) ist durch eine erhöhte Rauigkeit und stärkere Kopplung der Vegetation an die Atmosphäre eine solche Übertragung mit Unsicherheiten behaftet (Annandale und Stockle 1994).

Häufig werden im Obstanbau veredelte Pflanzen verwendet. Die Veredelung bzw. die Auswahl der Unterlage beeinflusst die Transpirationsleistung der Pflanze. Die Wasseraufnahme wird angetrieben durch den Potenzialunterschied zwischen dem Wasser im Boden und in der Atmosphäre. Die einzige Regelmöglichkeit in diesem System sind die Stomata, über deren Öffnungsgrad der Gasaustausch zwischen Pflanze und Atmosphäre reguliert wird. Form und Ausprägung des Wurzelwerkes haben nur einen indirekten Einfluss auf die Wasseraufnahmen, da das Wurzelwerk bestimmt, in welchem Radius und in welcher Tiefe Wasser angezapft werden kann. Die Favorisierung von schwachwüchsigen Unterlagen wie z.B. M9 (Vyvyan, 1955) kann die Transpirationsleistung des Baumes beeinflussen (Atkinson et al. 1999)

Zwei Faktoren, die den Wasserbedarf von Apfelbäumen wesentlich beeinflussen, sind ET_0 und die Größe der Baumkrone bzw. die Ausprägung des Laubdaches (Steduto et al. 2012). Messungen zeigen, dass der Anstieg des k_c -Faktors parallel zum Wachstum des Laubdaches verläuft. Mit Erreichen der maximalen Ausprägung der Bedeckung stagniert auch der k_c -Faktor (Steduto et al. 2012). Auch Girona et al. (2011) zeigten anhand von Lysimeter-Versuchen mit Apfel- und Birnenbäumen, wie groß der Einfluss der Baumkrone auf ET_0 ist. Die Apfelbäume, die, auch aufgrund der Art der Bewirtschaftung, eine wesentlich breitere Krone im Verlauf der fünf Jahre ausbildeten, zeigten eine stärkere Zunahme im errechneten Maximum der k_c -Faktoren (Jahr 1: 0.48; Jahr 5: 1.04). Die Birnbäume zeigten im Verlauf über die fünf Jahre eine wesentlich schwächere Zunahme im errechneten Maximum der k_c -Faktoren (Jahr 1: 0.71; Jahr 4: 0.88; keine Daten für Jahr 5). Marsal et al. (2013) nutzen die Daten aus dem Experiment von Girona et al. (2011) für Modellversuche. Eine von Girona et al. (2011) vorgeschlagene Beziehung zwischen k_c (Mitte der Saison) und der über LAI-Messungen ermittelten Lichtinterzeption konnte erfolgreich umgesetzt werden, allerdings musste der k_c -Faktor nach oben korrigiert werden. Einige Studien versuchten, Werte für

k_c auf Grundlage von Gegebenheiten der untersuchten Plantage, z.B. Reihenabstand und Breite der Grasbedeckung, für jeden Monat einzeln zu berechnen (Fallahi et al. 2010).

Neben der Bestimmung des k_c -Faktors ist auch eine gute meteorologische Erfassung des Standortes für die erfolgreiche Anwendung der Grasreferenzverdunstung wichtig. Jiang und He (2021) untersuchten verschiedene Bewässerungsstrategien für Apfelplantagen in Pennsylvania. Dabei wurden Ernteertrag und die Bewässerungsmenge unter Anwendung der Grasreferenzverdunstung der FAO, einer bodenfeuchtegetriebenen Bewässerungsmethode sowie der konventionellen Bewässerung auf Basis der Erfahrung der lokalen Bauern verglichen. Sowohl die Anwendung der Grasreferenzverdunstung als auch die bodenfeuchtegetriebene Bewässerung brachten deutlich höhere Ernteerträge bei gleichzeitig geringerer Bewässerungsmenge als bei der konventionellen Bewässerung. Die bodenfeuchtegetriebene Bewässerung zeigte deutlich bessere Ergebnisse hinsichtlich Ertrag und Wasserbedarf als die auf der Grasreferenzverdunstung basierende Bewässerung. Die Autoren führen dies jedoch auf eine möglicherweise unzureichende Abdeckung des Standorts durch die verwendeten meteorologischen Daten zurück und empfehlen den Aufbau einer Klimastation am Standort, was die Grasreferenzverdunstung verbessern könnte.

Im Bundesstaat New York wurden anhand von Saftflussmessungen und Messungen des Gasaustauschs in Folie eingewickelten Bäumen Transpirationswerte gemessen und daraus Werte für k_c ermittelt, die weit unter den in der Literatur gegebenen Werten lagen (Dragoni et al. 2005). Grund hierfür war, dass für diesen Standort das herkömmliche ET_0/k_c -Modell der FAO der Strahlung einen zu großen und dem Sättigungsdampfdruck einen zu geringen Einfluss einräumt. Zusätzlich wurde eine verbesserte Kopplung der Pflanzen im Bestand an die Atmosphäre vorgenommen. Damit ist das Modell sehr spezifisch an den lokalen Apfelanbau als auch das lokale, humide Klima angepasst. Das Modell ist über einen Zeitraum von zwei Jahren hinweg mit guten Ergebnissen getestet worden und mittlerweile mit einer meteorologischen Datenbank verknüpft, sodass eine präzise Steuerung der Bewässerungssysteme mithilfe von Vorhersagen und Analysen möglich ist. Mittlerweile umbenannt in „Cornell Apple Irrigation Modell“ können in Echtzeit Bewässerungsempfehlungen gegeben werden. Die guten Ergebnisse in der Bewässerungssteuerung zeigten sich auch darin, dass trotz eines niederschlagsreichen Sommers keine Überbewässerung stattfand. Es ist zudem erweitert worden, um auch Bodenart und Wurzelverteilung mit in die Berechnung einzubeziehen. Das Modell wurde von den Benutzern gut angenommen. Es hat eine lokale Gültigkeit und steht der Öffentlichkeit bzw. den Anwendern vor Ort zur Verfügung.

3. Darstellung der Ergebnisse

Eine weitere Möglichkeit, den k_c -Faktor für Apfelplantagen zu ermitteln, stellt die Einbindung von Satellitendaten in Bodenwasserhaushaltsmodelle dar (Odi-Lara et al. 2016). Dabei wurde für eine Apfelplantage in einer semi-ariden Region in Chile der k_c -Faktor in einen basalen Faktor k_{cb} für die Transpirationskomponente, einen Evaporationsfaktor k_E sowie einen Wasserstressfaktor k_S aufgeteilt. Der k_{cb} -Faktor wird über einen aus Satellitendaten ermittelten Vegetationsindex bestimmt und der berechnete Pflanzenwasserbedarf ET_c über Messungen des latenten Wärmestroms mittels Eddy-Kovarianz angepasst. Mit diesen Daten wurde dann ein Bodenwasserhaushaltsmodell betrieben, welches über zwei Vegetationsperioden erfolgreich getestet wurde.

Zusammenfassend werden in Tabelle 3.1 die aus der aufgeführten Literatur zusammengetragenen k_c -Faktoren für Apfelbäume aufgeführt.

Tabelle 3.1.: Zusammenfassung der in der Literaturrecherche gefundenen k_c -Faktoren für Apfelbäume

Referenz	Zeitpunkt	k_c -Faktor
FAO (Allen et al. 1998) (Apfel, ohne Bodenbedeckung, Berücksichtigung Frostperioden)	ini	0.45
	mid	0.95
	late	0.7
FAO (Allen et al. 1998) (Apfel, mit Bodenbedeckung, Berücksichtigung Frostperioden)	ini	0.5
	mid	1.2
	late	0.95
Girona et al. (2011)	mid	1
	August - September, angepasst	0.95
Marsal et al. (2013)	mid, über mehrere Jahre	0.55-0.96
Fallahi et al. (2010)	Juli - August	1.04
	September	1
Jiang und He (2021)	mid	0.75-0.95
	angepasst	0.9
Dragoni et al. (2005)	Juli (ohne Wasserstress)	0.8
	August (mit Wasserstress)	0.5
Odi-Lara et al. (2016)	mid, über mehrere Jahre	0.6-0.77
	nach Bewässerung/ Regenereignis	0.83-1.22
	3-4 Tage nach Bewässerung/ Regenereignis	0.41-0.42

Durchwurzelung und Wasseraufnahmecharakteristiken

Neben der Kenntnis des globalen Wasserbedarfs unterschiedlicher Apfelsorten haben Durchwurzelungstiefe, die Wurzelverteilung und die Wurzelwasseraufnahme zusammen mit den hydraulischen Bodencharakteristika einen maßgeblichen Einfluss auf die

Auswahl der Bewässerungsmethode und die optimalen Bewässerungssteuerung. Die Schwerpunkte der Literaturanalyse lagen auf den Parametern maximale Durchwurzelungstiefe und -breite, Tiefe des maximalen Wasserentzuges und die Verteilung von Feinwurzeln. Die Ergebnisse sind in Tabelle 3.2 zusammengefasst. Im Apfelanbau werden häufig veredelte Sorten verwendet, mit Edelreisern, die auf meist schwachwüchsige Unterlagen (z.B. M9 und M26) aufgepfropft werden. Die Auswahl einer geeigneten Unterlage ermöglicht eine Anpassung der Apfelplantage an die lokalen Böden und klimatischen Bedingungen (Webster und Wertheim 2003).

Levin et al. (1980) untersuchten die Wurzelverteilung und die Bodenfeuchte in einer Apfelplantage mit Tropfbewässerung. Die Untersuchung der Wurzeln wurde mittels eines Bodenprofils lotrecht zur Reihe der untersuchten Bäume durchgeführt. Im Gegensatz zur täglichen Bewässerung führten zweimal wöchentlich stattfindende Bewässerungsgaben zur Ausbildung eines breiteren Wurzelsystems der Bäume. Aufgrund des hohen Kiesanteils des Bodens traten hohe Sickerverluste des Bewässerungswassers auf. Zur Verringerung dieser wurden gepulste Bewässerungsgaben empfohlen, da diese besser auf die Wurzelwasseraufnahme der Apfelbäume abzustimmen sind.

Green und Clothier (1998) untersuchten unterschiedliche Bewässerungsmethoden an ausgewachsenen Apfelbäumen. Mittels TDR-Sonden wurden die räumlichen und zeitlichen Muster der Wasseraufnahme durch die Wurzeln untersucht. Zusätzlich wurden Saftflussmessungen am Stamm über die Temperatur-Gleichgewichtsmethode nach Granier, A. (1985) gemessen. Nach Ende des Bewässerungsexperimentes wurde die Wurzelichte mit Bodenkernanalysen ermittelt. Durch die wechselseitig des Stammes stattfindende Bewässerung konnte eine Anpassung der Wurzelsysteme innerhalb kurzer Zeit an verschiedene Bedingungen beobachtet werden. Außerdem konnte festgestellt werden, dass Apfelbäume für ihre Wasserversorgung eher auf die Wasserverfügbarkeit nahe der Erdoberfläche angewiesen sind als auf die Verteilung ihrer Feinwurzeln in der Tiefe.

Mpelasoka et al. (2001) verglichen mit Lysimetern die Antwort von Apfelbäumen auf Defizitbewässerung mit einer Kontrollbewässerung (volle Bewässerung). Die Fruchtqualität konnte durch die Defizitbewässerung verbessert werden, ein Einfluss des Fruchtbehanges auf die Fruchtqualität konnte nicht gezeigt werden. Die Qualität wurde anhand gängiger Parameter wie Fruchtgröße, Festigkeit des Fruchtfleisches und Zuckergehalt [°Brix] bestimmt.

Tanasescu und Paltineanu (2004) untersuchten die Auswirkungen unterschiedlicher Bewässerungsmethoden (Sprinklerbewässerung, Mikrosprinklerbewässerung, Tropfbewässerung und nicht bewässert) auf die Wurzelverteilung der Apfelsorte Golden Delicious, veredelt auf MM106. Die verschiedenen Bewässerungsmethoden hatten einen

3. Darstellung der Ergebnisse

Tabelle 3.2.: Parameter für den Wurzelwasserentzug von Apfelbäumen unterschiedlichen Alters aus der Literatur

Referenz	Tiefe [m]	Radius [m]	Tiefe max. Wasserentzug [m]	Alter [a]
Levin et al. (1980)	1	1.7-2.25	-	3
Green und Clothier (1998)	1	1.2	bis 0.4	14
Mpelasoka et al. (2001)	1.2	0.5	-	4
Tanasescu und Paltineanu (2004)	1	>0.5	bis 0.4	7-14
Sharma und Chauhan (2005)	1	1.5	0.25	12
Sokalska et al. (2009)	1	0.6	0.2-0.4	10-13
Boaga et al. (2013)	0.4	0.5	0.3	7
Azzeddine et al. (2014)	1.2	0.7	0.2-0.3	8
Jiang und He (2021)	0.75-0.9	-	-	„mature“

großen Einfluss auf die Baumwurzelquerschnittsfläche und den Ernteertrag. In 40 cm Tiefe wurde der größte Anteil der aktiven Baumwurzelquerschnittsflächen beobachtet und fast alle Wurzeln befanden sich oberhalb von 1m Tiefe. In gemäßigten Klimazonen werden die Mikrosprinklerbewässerung sowie die Tropfbewässerung als beste Bewässerungsmethoden für den Apfelbaum empfohlen.

Sharma und Chauhan (2005) untersuchten die Wurzelsysteme von zwölfjährigen Apfelbäumen auf den Unterlagen M7 und MM106. Hier wurde ein Großteil der Wurzeln zwischen 0 und 50 cm Tiefe beobachtet. Die horizontale Ausbreitung der Wurzeln schwankte zwischen 50 und 150 cm Stammabstand.

Boaga et al. (2013) testeten das Verfahren der Widerstandstomographie (ERT, electrical resistivity tomography), um die Interaktionen zwischen Boden und Pflanze in einer Apfelplantage dreidimensional abzubilden. Der experimentelle Aufbau besteht aus insgesamt 72 Elektroden an der Bodenoberfläche und im Wurzelraum. Zusätzlich wurden TDR-Sonden zur Messung der Bodenfeuchte installiert. Es wurden drei Bewässerungsverfahren, jeweils Einzelereignisse, untersucht. Vor allem unter trockenen Bedingungen konnten sehr gute Abbildungen der dynamischen Wasserbewegung im Boden erzielt werden. Der vorgestellte Ansatz zur Abbildung der Bodenprozesse wurde als vielversprechend eingestuft, besonders in Hinblick auf die Quantifizierung der Wasserflüsse im System Boden-Pflanze-Atmosphäre.

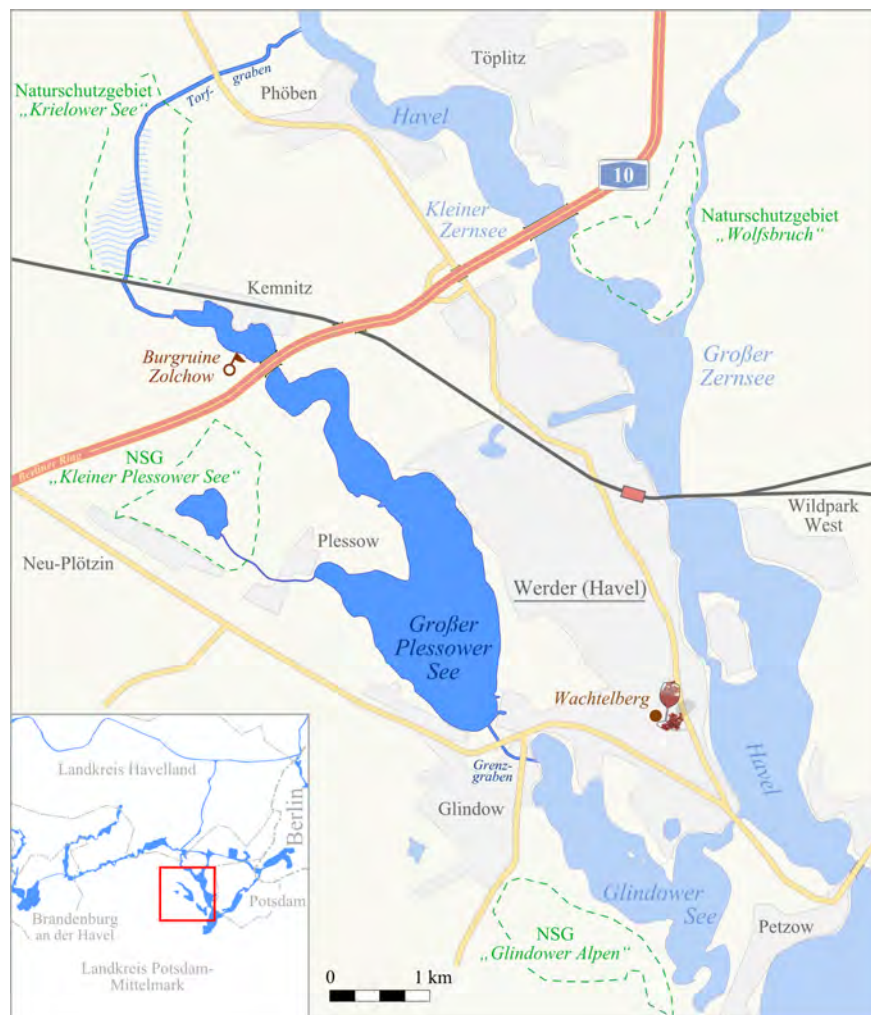


Abbildung 3.2.: Karte des Potsdamer Bogens der Havel mit Glindower See und Großem Plessower See. Quelle: Wikipedia

3.1.3. Überprüfung der Wasserhaushaltsbilanz für den Glindower See auf der Basis vorhandener Wasserhaushaltsberechnungen

Für dieses Projekt ist die Wasserhaushaltsbilanz des Glindower Sees insbesondere für Trockenzeiten von zentraler Bedeutung, da in diesen Zeiträumen die Wasserentnahmen zur Bewässerung durch das Brauchwasserwerk Glindow hoch sind. Gleichzeitig besteht die Gefahr kritischer Wasserstände sowie erhöhter Wassertemperaturen und damit verbundener chemischer und biologischer Belastungen. Zur Bewertung dieser Zustände ist eine Wasserhaushaltsbilanz mit einer zeitlichen Auflösung von etwa einer Woche bis maximal einem Monat erforderlich.

In der Wasserhaushaltsbilanz werden alle Zuflüsse und Abflüsse des Sees innerhalb

3. Darstellung der Ergebnisse

des gewählten Zeitschrittes bilanziert. Zu den Zuflüssen zählen der Niederschlag auf die Seefläche, oberirdische Zuflüsse sowie insbesondere unterirdische Zuflüsse aus dem Grundwasser. Der Glindower See ist dabei als grundwassergespeister See einzuordnen, dessen Wasserhaushalt maßgeblich durch den regionalen Grundwasserstand beeinflusst wird. Abflüsse umfassen die Verdunstung von der Seefläche, oberirdische Abflüsse, unterirdische Abflüsse sowie die Wasserentnahmen.

Abbildung 3.2 zeigt den Potsdamer Havelbogen mit dem daran angebundene Glindower See. Der See steht über den Strenggraben mit der Havel in Verbindung. Am südlichen Ende besteht eine weitere Verbindung über den Grenzgraben zum Großen Plessower See, der wiederum über den Torfgraben an die Havel angeschlossen ist. Für beide Verbindungen (Strenggraben und Grenzgraben) liegen derzeit keine kontinuierlichen Pegel- oder Abflussmessungen vor. Entsprechend sind weder die Zuflüsse aus der Havel noch die Abflüsse dorthin quantitativ belastbar bestimmt.

Aufgrund fehlender Messdaten an den Verbindungsgewässern kann keine direkte Messbilanz erstellt werden. Als Unterlagen waren für das Projekt nur Berichte verfügbar, die keine detaillierten Berechnungen der Wasserhaushaltsbilanz enthalten (z.B. Ramm 1999). Stattdessen erfolgt eine überschlägige Abschätzung auf Basis regionaler hydrologischer Kennwerte, klimatischer Mittelwerte sowie geometrischer Kenndaten des Sees. Die Verbindung zum Großen Plessower See wird dabei als mengenmäßig untergeordnet betrachtet und in der Bilanz vernachlässigt.

Die nachfolgend dargestellte Wasserhaushaltsbilanz des Glindower Sees stellt eine vereinfachte, überschlägige Abschätzung dar und dient der Einordnung der Größenordnungen der wesentlichen Wasserhaushaltskomponenten. Sie ersetzt keine detaillierte wasserwirtschaftliche Untersuchung und ist nicht als Grundlage für eine wasserrechtliche Entscheidung geeignet.

Die vereinfachte Wasserbilanz des Glindower Sees ergibt sich unter den getroffenen Annahmen zu:

$$\Delta S = P \cdot A + Q_{\text{GW}} - E \cdot A - Q_{\text{Havel}} - Q_{\text{Entnahme}}$$

mit der Speicheränderung ΔS , dem Niederschlag P , der Seefläche A , dem Grundwasserzufluss Q_{GW} , der Verdunstung E , dem Abfluss zur Havel Q_{Havel} sowie den Wasserentnahmen Q_{Entnahme} .

Der Glindower See ist als grundwassergespeistes Gewässer einzuordnen. Der unterirdische Zufluss wird daher als maßgebliche Wasserhaushaltskomponente betrachtet und überschlägig aus der Grundwasserneubildung des Einzugsgebietes abgeleitet. Die Abschätzung erfolgt vereinfachend mit dem Abflussbeiwert-Verfahren.

Für das Einzugsgebiet des Glindower Sees mit überwiegend sandigen Substraten und geringer Reliefenergie wird ein Abflussbeiwert von:

$$c = 0,2$$

angesetzt.

Die jährliche Grundwasserneubildung ergibt sich damit zu:

$$Q_{GW} = P \cdot A_{EZG} \cdot c$$

mit der Einzugsgebietsfläche A_{EZG} .

Die verwendeten klimatischen Eingangsdaten (Niederschlag und potenzielle Verdunstung) basieren auf langjährigen Mittelwerten aus dem Regionalen Klimainformationssystem ReKIS und sind als repräsentative Orientierungswerte für den Betrachtungsraum Werder (Havel) zu verstehen.

Unter Ansatz dieser Klimadaten ergeben sich überschlägig folgende mittlere Wasserhaushaltsgrößen:

$$P \approx 0,55 \text{ m/a}, \quad A \approx 1,95 \text{ km}^2, \quad A_{EZG} \approx 30 \text{ km}^2$$

Hieraus resultieren:

$$P \cdot A \approx 1,1 \text{ Mio. m}^3/\text{a}$$

$$Q_{GW} \approx 3,3 \text{ Mio. m}^3/\text{a}$$

$$E \cdot A \approx 1,3 \text{ Mio. m}^3/\text{a}$$

Unter der vereinfachenden Annahme, dass die Verbindung zum Großen Plessower See mengenmäßig untergeordnet ist, ergibt sich daraus ein langfristig erneuerbarer Abfluss des Glindower Sees (einschließlich Abfluss zur Havel) von:

$$Q_{\text{erneuerbar}} \approx 3,1 \text{ Mio. m}^3/\text{a}$$

Zur vorsorgenden Bewertung der langfristigen Nutzbarkeit wird ein Nachhaltigkeitsbereich von etwa 20–25 % des erneuerbaren Abflusses angesetzt. Dieser Bereich ist als Orientierungsrahmen zu verstehen, unter Berücksichtigung wasserwirtschaftlicher Vorsorgegrundsätze sowie ökologischer Mindestanforderungen. Daraus ergibt sich eine nachhaltig nutzbare Wasserressource in der Größenordnung von:

$$Q_{\text{nutzbar}} \approx 0,6\text{--}0,8 \text{ Mio. m}^3/\text{a}$$

3. Darstellung der Ergebnisse

Die dargestellten Ergebnisse sind aufgrund der vereinfachten Methodik sowie der fehlenden direkten Messdaten an den Verbindungsgewässern mit entsprechenden Unsicherheiten behaftet. Für eine weitergehende, belastbare Bewertung wären detaillierte Wasserhaushaltsberechnungen erforderlich, wie sie beispielsweise im *Wasserhaushaltsportal Sachsen* auf Grundlage räumlich differenzierter Klimadaten, bodenhydrologischer Parameter und gekoppelter Modellansätze durchgeführt werden.

3.1.4. Berechnung und Beurteilung der Grasreferenzverdunstung für die letzten 34 Jahre

Für eine erste Einschätzung wurden die meteorologischen Parameter der DWD-Station Potsdam (ID=3987) zur Berechnung der Grasreferenzverdunstung mit dem *Penman-Monteith-Ansatz* verwendet. Dafür stehen im Projekt tägliche Daten für den Zeitraum 1.1.1991 - 31.12.2025 zur Verfügung und könnten mit Einschränkungen historisch bis 1893 erweitert werden. Die Ergebnisse der letzten 34 Jahre werden in den folgenden Abbildungen gezeigt:

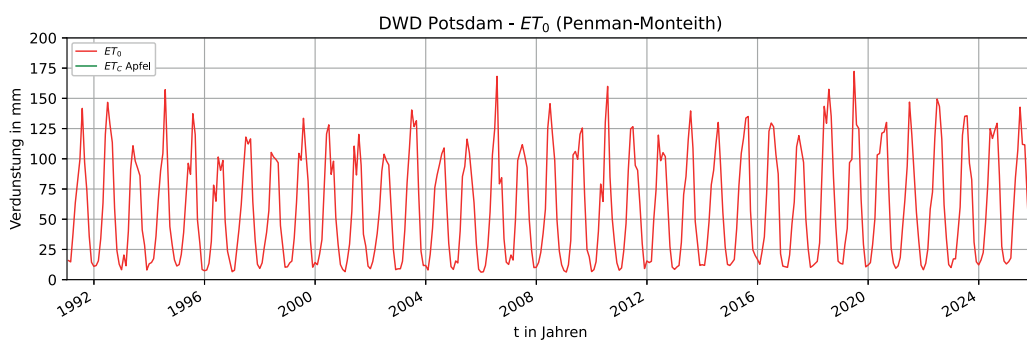


Abbildung 3.3.: Monatliche ET_0 -Werte 1991-heute

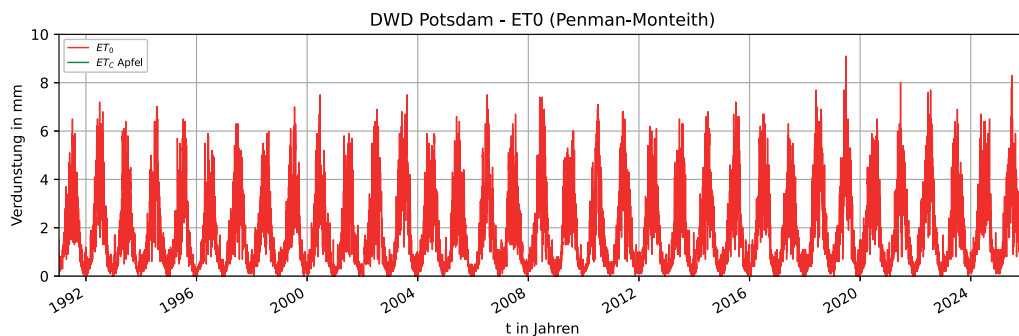


Abbildung 3.4.: Tägliche ET_0 -Werte 1991-heute

Zur Ermittlung des Wasserbedarfs der Apfelbäume wird die Grasreferenzverdunstung ET_0 mit dem abgeleiteten Verlauf des pflanzenspezifischen Faktors k_c (Tabelle 3.6) angepasst. Um den extremen Wasserbedarf abzuschätzen, kann man als Faustformel ET_0 für die Sommermonate direkt anwenden. Als extremes Jahr kann 2019 herangezogen werden. Dort sind tägliche potentielle Verdunstungsraten von bis zu 9 mm beobachtet worden. Die monatliche Spitze von etwa 150-175 mm lässt auf mittlere

3. Darstellung der Ergebnisse

tägliche potentielle Verdunstungsraten von bis zu 5-6 mm schließen. Der wöchentliche Pflanzenwasserbedarf lag im Sommer 2019 also etwa bei 35-40 mm. Dies sind Werte, die für die Zukunft als Regelfall in den Sommermonaten zu erwarten sind. Allerdings sind die folgenden Einschränkungen zu beachten:

- Die Abschätzung bezieht sich auf den Netto-Pflanzenwasserbedarf, d.h. der Wirkungsgrad der verwendeten Tropfbewässerungsmethode (etwa 90%) ist nicht berücksichtigt.
- Die Abschätzung setzt einen homogenen Pflanzenbestand voraus. Durch die Bewirtschaftungsgassen kann man von einer effektiven Anbaufläche von etwa 50% ausgehen, d.h. der Netto-Pflanzenwasserbedarf müsste halbiert werden.
- Es wird davon ausgegangen, dass der volle Pflanzenwasserbedarf des Pflanzenbestandes befriedigt werden soll.

Die Ergebnisse der letzten 10 Jahre für die Grasreferenzverdunstung ET_0 zusammen mit dem abgeleiteten Verlauf des pflanzenspezifischen Faktors k_c (Tabelle 3.6) sind:

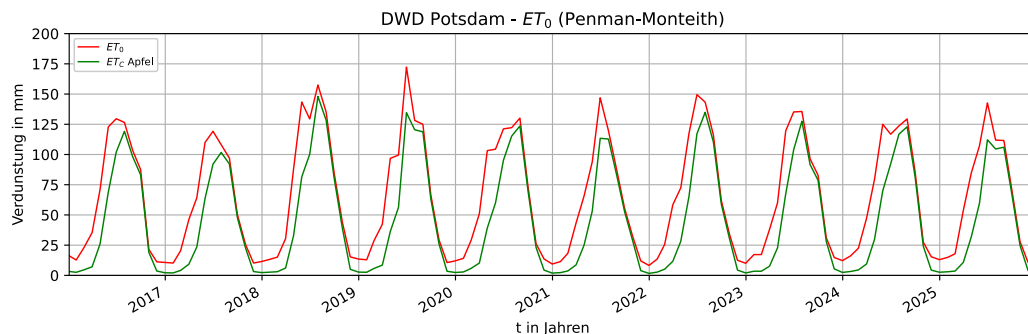
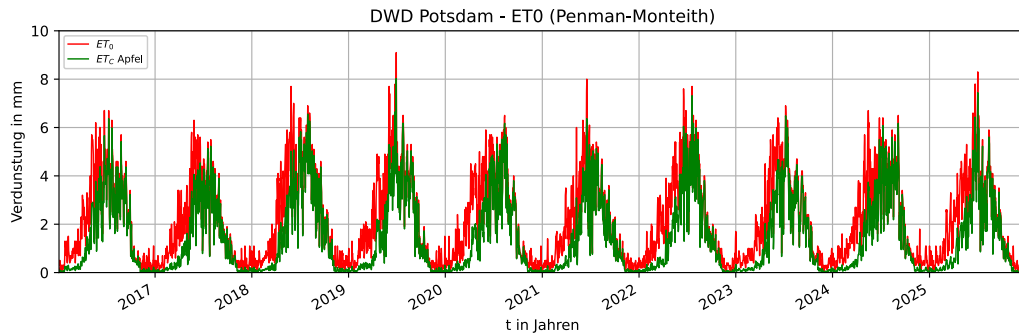


Abbildung 3.5.: Monatliche ET_c -Werte 2016-heute

Diese Ergebnisse zeigen im Vergleich zur Abbildung 3.3, dass in den letzten 10 Jahren die Grasreferenzverdunstung ET_0 und damit die pflanzenspezifische potentielle Evapotranspiration ET_c im Verhältnis der letzten 34 Jahre durchgehend überdurchschnittlich hoch waren.

Zur detaillierten Bewertung der lokalen Wasserverfügbarkeit wurden die klimatischen Wasserbilanzen (KWB) der Jahre 2023 bis 2025 analysiert und die Daten der DWD-Station Potsdam mit den Messwerten der lokalen Energiebilanzstation in Werder verglichen. Die KWB definiert sich als Differenz aus Niederschlag (P) und der kulturspezifischen potentiellen Verdunstung (ET_c). Während die ET_c auf Basis der DWD-Daten für beide Standorte als Referenz herangezogen wurde, zeigen die Niederschlagsmessun-

Abbildung 3.6.: Tägliche ET_c -Werte 2016-heute

gen erhebliche räumliche Abweichungen.

Die lokale Station in Werder verzeichnete während der Vegetationsperioden konsistent und signifikant geringere Niederschlagsmengen als die Referenzstation in Potsdam. Dies führt dazu, dass das vor Ort ermittelte Wasserdefizit (KWB Station) drastisch höher ausfällt als das aus den Regionaldaten abgeleitete Defizit. Besonders gravierend zeigt sich dieser Effekt im Jahr 2023: Während die KWB auf Basis der DWD-Daten ein Defizit von $-122,3$ mm ausweist, liegt das reale Defizit auf der Plantage bei $-267,2$ mm. Auch in den Jahren 2024 und 2025 bestätigt sich dieser Trend mit lokalen Defiziten von über -225 mm.

Diese Ergebnisse belegen, dass die alleinige Nutzung regionaler Wetterdaten (DWD) das Dürrerisiko am Standort Werder systematisch unterschätzt. Die lokalen Messungen verdeutlichen, dass der reale Zusatzwasserbedarf zur Deckung der Bilanzdefizite deutlich höher liegt, als es die Modelle für Potsdam vermuten lassen. Tabelle 3.3 fasst diese Bilanzen für die Vegetationsperioden zusammen.

Tabelle 3.3.: Vergleich der gemessenen klimatischen Wasserbilanzen (KWB) während der Vegetationsperiode zwischen der DWD-Station Potsdam und der lokalen Energiebilanzstation Werder (Datenbasis: 2023–2025).

Jahr	ET_c (DWD) [mm]	P (DWD) [mm]	P (Werder) [mm]	KWB (DWD) [mm]	KWB (Werder) [mm]
2023	533,0	410,7	265,8	-122,3	-267,2
2024	551,3	343,5	326,2	-207,8	-225,1
2025	521,1	302,2	266,0	-218,9	-255,1

Anmerkung: $KWB = P - ET_c$. Negative Werte zeigen ein Wasserdefizit an.

3.2. Aufbau einer Projektdatenbank

Die Projektdaten integrieren die Daten aller Messungen (Tab. B.1) sowie relevante Datenprodukte des DWD und des Erdbeobachtungsprogramms der Europäischen Union *Copernicus*. Die Integration zeigt die folgende Abbildung:

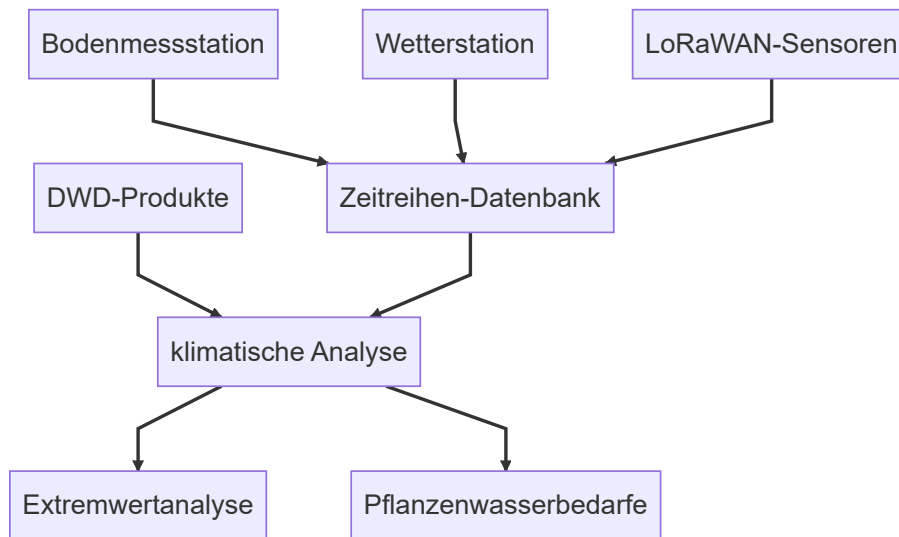


Abbildung 3.7.: Integration relevanter Daten in der Projektdatenbank

3.2.1. Relevante Wetterdaten auf täglicher Basis seit 2016

Im Projekt wurden tägliche Wetterdaten aus Stationsmessungen und Datenprodukten des DWD sowie des Erdbeobachtungsprogramms der Europäischen Union *Copernicus* und des *Regionalen Klimainformationssystems ReKIS* zusammengestellt. Die Tabelle 3.4 gibt eine Übersicht:

Tabelle 3.4.: Vorhandene Datenprodukte und Länge der Zeitreihen

Produkt	räumliche Auflösung	Zeitraum	Merkmal
DWD Stationsdaten	Punkt	1991–heute	Stationsdaten
ReKIS RaKliDa	Raster (1km x 1km)	1961–heute	interpolierte Stationsdaten
ReKIS Klimaprojektionen	Raster (1km x 1km)	1961–2100	downgescalte Klimamodelldaten
ERA5-Land	Raster (1km x 1km)	1950–heute	Klimamodelldaten mit assimilierten Stationswerten

3.2.2. Bodendaten aus verfügbaren Karten

Die Bodenentwicklung im Projektgebiet ist im Wesentlichen durch die glaziale Serie geprägt. Während der drei großen Kaltzeiten (Elster-/Saale-/Weichsel-Kaltzeit) transportierten die Gletscher aus Skandinavien und dem Baltikum große Mengen an Lockermaterial nach Mitteleuropa, Vorstoß- und Rückzugphasen prägten das Relief. In den verfügbaren Bodenkarten der BGR Brandenburg (BÜK200 der BGR, Abbildung 3.8a) sowie im Geoportal des Landes Brandenburg (BÜK300 INSPIRE Brandenburg, Abbildung 3.8b) sind im Untersuchungsgebiet vorrangig Braunerden zu finden, die sich aus glazialen Sedimenten entwickelt haben und periglazial überprägt sind. Die Böden sind geringfügig vergleyst und zeigen Spuren von Lessivierungen (Tonverlagerungen). Typische Horizontabfolgen sind gepflügter Oberboden; eluvial-lessivierter Oberboden; verwitterter/verbraunter, tonangereicherter Unterboden; verbraunter Untergrundhorizont aus Lockersubstrat (Ap/Ael/Bt/Bv/ICv). Dominierende Bodenarten sind Sande (Ss) mit Lagerungsdichten der Klasse Ld3 (mittel). Im Bereich des Unterbodens findet sich häufig ein deutlich verlehmtter Horizont (Ls4) mit hohen Lagerungsdichten (Ld4). Typische Zusammensetzungen der Korngrößen für diese Bodenarten befinden sich in Tabelle 3.5.

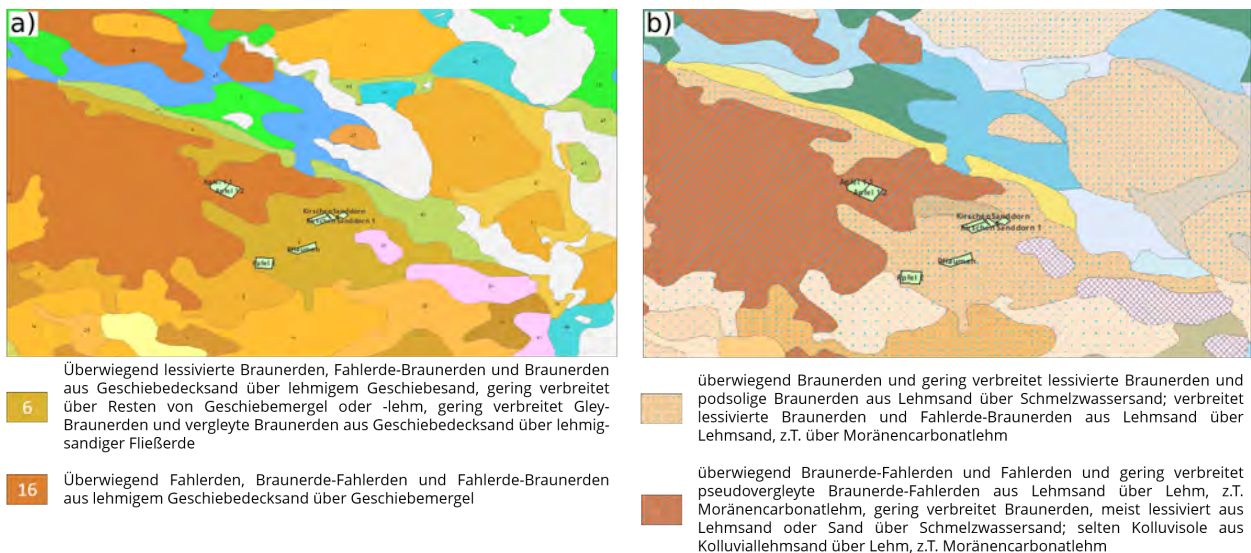


Abbildung 3.8.: Bodenkarten des Landes Brandenburg im Projektgebiet: a) BÜK200 der BGR. b) BÜK300 des Geoportals Brandenburg (Inspire).

3. Darstellung der Ergebnisse

Tabelle 3.5.: Kornzusammensetzung der im Untersuchungsgebiet vorkommenden Bodenarten

Bodenart	Ton	Schluff	Sand
Ss	0-5%	0-10%	85-100%
Ls4	17-25%	15-30%	45-68%

3.2.3. Pflanzendaten

Die Pflanzendaten umfassen die kultivierte Apfelsorte und Unterlage, das Alter der Bestände, den saisonalen Verlauf des Pflanzenkoeffizienten (k_c), die Dimensionen der Wurzelgeometrie (Tiefe und Ausbreitung) sowie den Blattflächenindex (LAI).

Die Erkenntnisse zur Bestimmung des k_c -Faktors sowie der Wurzelgeometrie aus der Literaturrecherche (siehe Kapitel 3.1.2) wurden für den Standort konkretisiert und weiterentwickelt. Zur Bestimmung des k_c -Faktors für Apfelbäume auf Basis der Literatur liegen folgende Annahmen zugrunde (Abbildung 3.9):

- Die Apfelbäume sind ausgewachsen bzw. gut angewachsen und bereits mindestens zwei Jahre am untersuchten Standort.
- Da es sich um einen Anbau in einer Plantage handelt und kommerziell produziert wird, bestehen die Bäume aus Unterlage und Edelreis und werden in irgendeiner Form „erzogen“, sind also in ihrem Wachstum nicht frei.
- Es werden schwachwüchsige Unterlagen verwendet (M9, M26 etc.), da diese in der kommerziellen Produktion bevorzugt werden.



Abbildung 3.9.: Pflanzenbestand auf der Apfelplantage zu unterschiedlichen Jahreszeiten

Für Apfelbäume liegen im *FAO Irrigation and Drainage Paper Nr. 56* Allen et al. 1998 verschiedene k_c -Faktoren tabelliert vor. Dabei werden Länge der Wachstumsperioden, Bodenbedeckung und Frosteinflüsse berücksichtigt. So ergibt sich z.B. für Apfel unter

Annahme von möglichen Frostperioden und keiner Bodenbedeckung der Verlauf des saisonalen k_c -Faktors in Abbildung 3.10 und Tabelle 3.6.

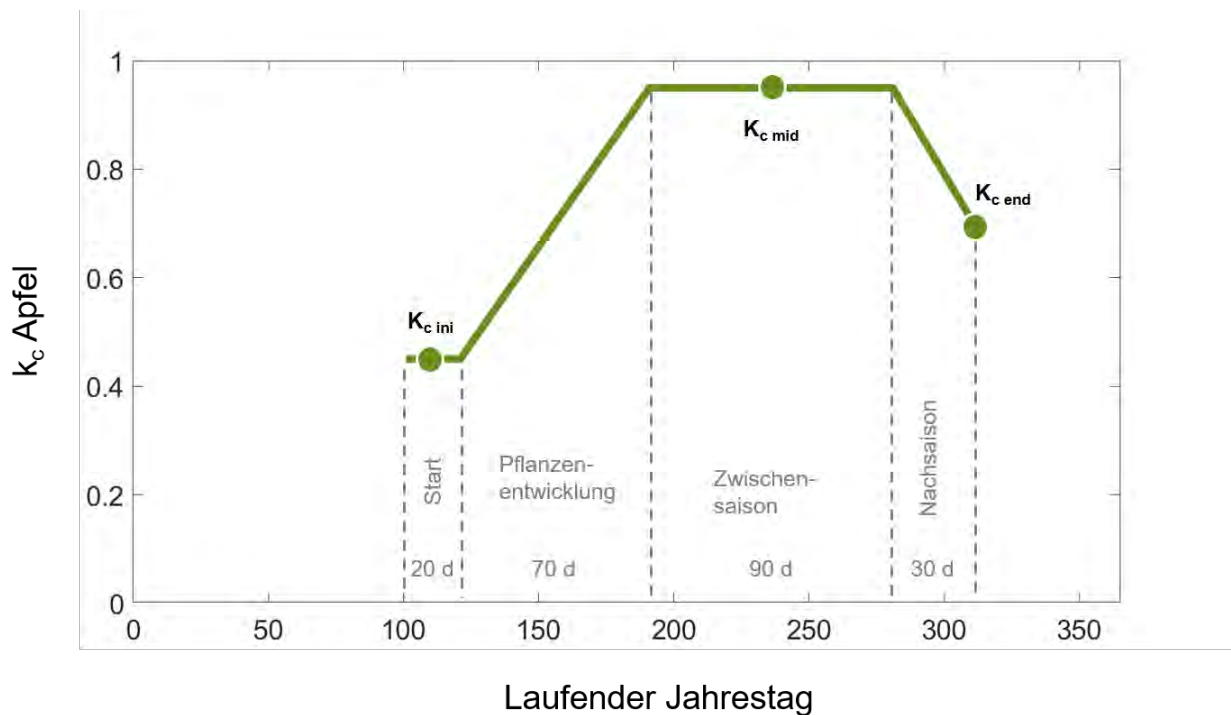


Abbildung 3.10.: Saisonaler Verlauf des k_c -Faktors nach FAO für den Apfelanbau mit Frostperioden und ohne Bodenbedeckung in Abhängigkeit des laufenden Jahrestages. Der Start der Initialphase ist variabel und hängt von den jährlichen Witterungsbedingungen ab.

Tabelle 3.6.: k_c -Werte und Länge der Vegetationsperioden für Apfel (mit Frostperioden, ohne Bodenbedeckung) nach FAO mit variablem Beginn der Vegetationsentwicklung am $DOY_{start,ini}$. DOY steht für den laufenden Jahrestag (day of the year). DOY Start und DOY Ende für einen beispielhaften Verlauf der Vegetationsentwicklung innerhalb eines Jahres mit Beginn der Vegetationsentwicklung am 1. Mai (DOY 121).

DOY Start	DOY Ende	Länge [d]	k_c	Bemerkung
1	100		0.2	k_c ohne Laub
101	120	20	0.45	$k_{c,ini}$
121	190	70	$k_c = 0.0072 \cdot DOY + (0.45 - 0.0072 \cdot DOY_{121})$	$k_{c,ini} - k_{c,mid}$
191	280	90	0.95	$k_{c,mid}$
281	310	30	$k_c = -0.0083 \cdot DOY + (0.95 + 0.0083 \cdot DOY_{281})$	$k_{c,mid} - k_{c,end}$
311	365		0.2	k_c ohne Laub

Für die für Apfel angegebenen k_c -Faktoren ist nicht erkennbar, wie diese ermittelt und welche Bäume (Unterlage, Sorte, Alter, Standort) untersucht wurden. Daher werden diese Werte zunächst als Ersteinschätzung verwendet. Am Standort der Klimastation befindet sich schwachwüchsige Unterlage (M26), die mit der Sorte Topaz veredelt wurde.

3. Darstellung der Ergebnisse

Die Wurzeln der betrachteten Bäume erreichen laut Literatur in einem Alter von circa fünf Jahren ihre maximale Tiefe von 1.2 m bis 1.5 m. Die horizontale Ausdehnung wurde in der Literatur mit 1 m angegeben, also einem Radius von 0.5 m. Die Abstände zwischen den einzelnen Bäumen auf der Untersuchungsfläche betragen circa 1.2 m. Auch konnte durch zahlreiche Bohrstockeinschläge auf der Versuchsfläche eine verdichtete Lehmschicht in ca. 0.5 bis 0.9 m Tiefe festgestellt werden. Es ist anzunehmen, dass die Apfelbäume nicht tiefer als diese Schicht wurzeln, da sich das Sickerwasser auf dieser Schicht hauptsächlich horizontal verteilt. Aufgrund dieser Erkenntnisse wurde die maximale Wurzeltiefe mit 0.8 m und ein Radius von 0.6 m geschätzt. Die Tiefe des maximalen Wasserentzuges wurde auf 0.3 m geschätzt, mit einem Radius von ebenfalls 0.3 m (Tabelle 3.7).

Tabelle 3.7.: Vorläufige Beschreibung der Wurzelgeometrie

Parameter	Tiefe [cm u. GOK]
Maximale Wurzeltiefe	80
Tiefe maximaler Wasserentzug	30
Maximaler Radius	60
Radius maximaler Wasserentzug	30

3.2.4. Pläne der Felder

Um die unterschiedlichen klimatischen Bedingungen im Untersuchungsgebiet zu erfassen, wurden vier Felder mit Sensoren ausgestattet (siehe Abbildung 3.11).

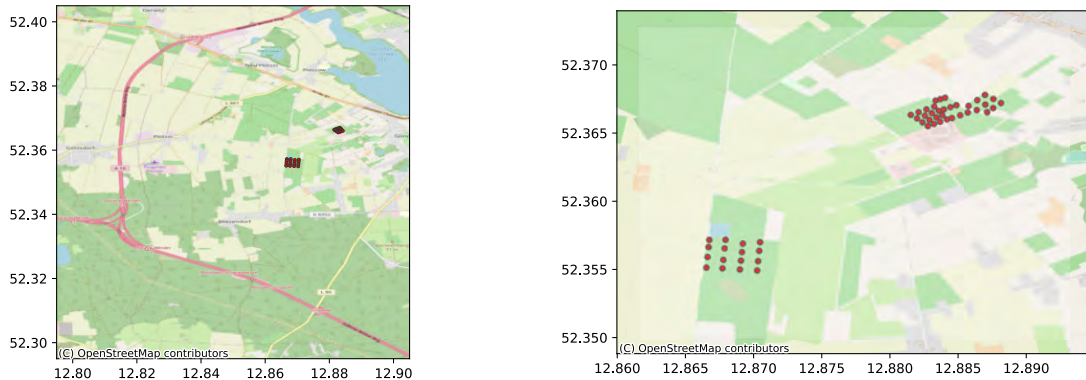


Abbildung 3.11.: Felder im Monitoring sowie Standorte der LowCost-Sensoren zur Messung von Temperatur und Luftfeuchte (rot, siehe auch Tab. B.1)

In Tabelle 3.8 ist die Ausstattung mit Sensoren für die 4 Felder aufgeführt:

Tabelle 3.8.: Installierte Sensorik

Feld	low-cost	Klima (Energiebilanz)	Bodenwasser
Sanddorn Süd	installiert	-	-
Sanddorn Nord	installiert	-	-
Kirschplantage	installiert	-	-
Apfelplantage	installiert	installiert	installiert

Das mehrstufige Messdesign mit Sensoren unterschiedlicher Qualität und räumlicher Auflösung lässt eine Analyse mikroklimatischer Einflüsse auf das Bewässerungsmanagement zu sowie die Möglichkeit, Abweichungen und Korrekturverfahren zu Daten der DWD-Klimastation Potsdam abzuleiten. Zusätzlich kann auch das lokale Messdesign optimiert werden, d.h. eine hohe Kosteneffizienz bei hoher Datenqualität erreicht werden.

3.2.5. Pläne des Leitungsnetzes

Der Auftraggeber hat eine Skizze des Leitungsnetzes des Rohrleitungssystems zur Verfügung gestellt, welche in Abbildung 3.12 dargestellt ist.

3.2.6. Bewässerungssystem & Steuerung

Bisher liegen Informationen zum Wasserverbrauch für das gesamte Versorgungsgebiet vor. Auszüge daraus sind in Tabelle 3.9 zu sehen. Die Havelfrucht GmbH bewässert bei Trockenheit jeden 2. Tag 26.400 l/ha.

Tabelle 3.9.: Betriebsdaten Brauchwasser von April bis Juni 2023

Datum	$P_{Brauch}[m^3]$	$P_1[m^3]$	Datum	$P_{Brauch}[m^3]$	$P_1[m^3]$
01.04.2023	5040356	3520067	17.05.2023	5075008	3597646
02.04.2023	5040981	3523454	18.05.2023	5076501	3599254
03.04.2023	5041159	3524823	19.05.2023	5078342	3601046
04.04.2023	5041159	3524823	20.05.2023	5080084	3602825
05.04.2023	5041160	3527768	21.05.2023	5082192	3604092
06.04.2023	5041304	3529289	22.05.2023	5084736	3605466
07.04.2023	5042066	3530851	23.05.2023	5086956	3606863
08.04.2023	5042708	3532461	24.05.2023	5088790	3608231
09.04.2023	5043558	3534229	25.05.2023	5090453	3609813
10.04.2023	5044107	3535779	26.05.2023	5092682	3611303
11.04.2023	5044532	3538108	27.05.2023	5095408	3613047
12.04.2023	5044532	3540489	28.05.2023	5098145	3614851
13.04.2023	5044533	3542521	29.05.2023	5100788	3616312
14.04.2023	5044534	3544205	30.05.2023	5103594	3618238
15.04.2023	5044535	3545886	31.05.2023	5106286	3620010
16.04.2023	5044536	3547577	01.06.2023	5109629	3622377
17.04.2023	5044537	3549241	02.06.2023	5112426	3624110
18.04.2023	5044538	3550873	03.06.2023	5112426	3624110
19.04.2023	5045351	3552486	04.06.2023	5112426	3624110
20.04.2023	5046995	3554158	05.06.2023	5118985	3629717
21.04.2023	5048642	3555644	06.06.2023	5122539	3631571
22.04.2023	5049627	3557197	07.06.2023	5125927	3633532
23.04.2023	5050559	3558596	08.06.2023	5130186	3635388
24.04.2023	5050595	3560335	09.06.2023	5134321	3637194
25.04.2023	5051058	3561793	10.06.2023	5138328	3639303
26.04.2023	5052250	3563688	11.06.2023	5141954	3641228
27.04.2023	5053266	3565576	12.06.2023	5145512	3643547
28.04.2023	5054291	3567327	13.06.2023	5149296	3645975
29.04.2023	5055163	3569048	14.06.2023	5152999	3648261
30.04.2023	5055845	3570750	15.06.2023	5159692	3650342
01.05.2023	5056595	3572179	16.06.2023	5160123	3651947
02.05.2023	5057438	3573713	17.06.2023	5161712	3655000
03.05.2023	5058326	3575424	18.06.2023	5162905	3657004
04.05.2023	5059429	3576866	19.06.2023	5164520	3658773
05.05.2023	5060605	3578335	20.06.2023	5167518	3660709
06.05.2023	5061686	3580242	21.06.2023	5169380	3662443
07.05.2023	5062606	3582122	22.06.2023	5171093	3664253
08.05.2023	5063531	3583878	23.06.2023	5172626	3665983
09.05.2023	5064375	3585402	24.06.2023	5172626	3665983
10.05.2023	5065344	3587322	25.06.2023	5172626	3665983
11.05.2023	5066512	3588654	26.06.2023	5175407	3670325
12.05.2023	5067740	3590033	27.06.2023	5176322	3671279
13.05.2023	5069290	3591500	28.06.2023	5177062	3671744
14.05.2023	5070788	3593008	29.06.2023	5177765	3672297
15.05.2023	5072392	3594604	30.06.2023	5178468	3672765
16.05.2023	5073784	3596107			

3.2.7. Monitoring Daten

Eine erste Auswertung der erhobenen Daten aus dem mehrstufigen Messdesign ist in den Abbildungen 3.13 bis 3.16 für die Temperatur und den Niederschlag zu sehen. Schlussfolgerungen sind:

- Die Tagesmittelwerte der Temperatur aller Stationen liegen relativ nahe beieinander. Abweichungen sind in den extremeren Wertebereichen (kalten und heißen Tagen) zu beobachten.
- Tagesminima aller Stationen im Untersuchungsgebiet weichen von den gemessenen Tagesminima der DWD-Station Potsdam an kalten Tagen relativ stark ab, d.h. die DWD-Station Potsdam kann nicht direkt zur Warnung und Beurteilung der Gefährdung der Pflanzenbestände durch Fröste herangezogen werden. Die niedrigsten Temperaturen wurden auf der Apfelplantage beobachtet.
- Tagesmaxima der südexponierten Stationen im Untersuchungsgebiet weichen von den gemessenen Tagesmaxima der DWD-Station Potsdam und der installierten Klimastation an heißen Tagen relativ stark ab, d.h. es gibt in südexponierten Pflanzenbeständen eine erhöhte potentielle Evapotranspiration. Dadurch entsteht dort auch ein vergleichsweise höherer Pflanzenwasserbedarf.
- Die Tagessummen für den gemessenen Niederschlag sind für die installierte Klimastation häufig geringer als die der DWD-Station Potsdam. Das Ergebnis wurde durch beide installierten Klimastationen vor Ort bestätigt..

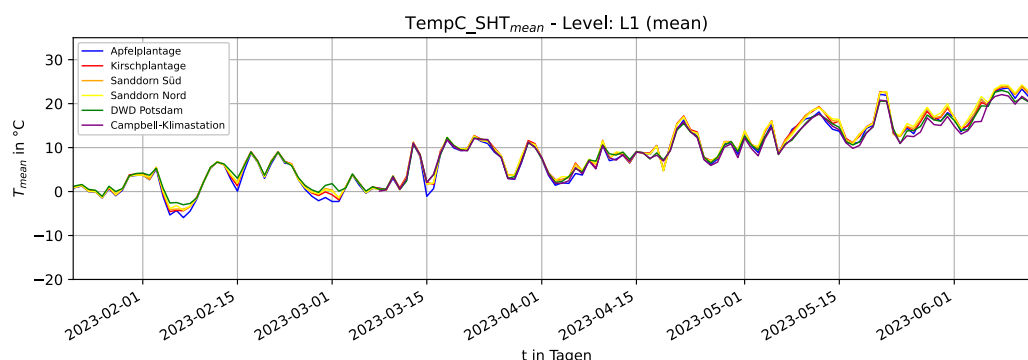


Abbildung 3.13.: Entwicklung der Tagesmittelwerte für Temperaturen für verschiedene Datenquellen und Standorte

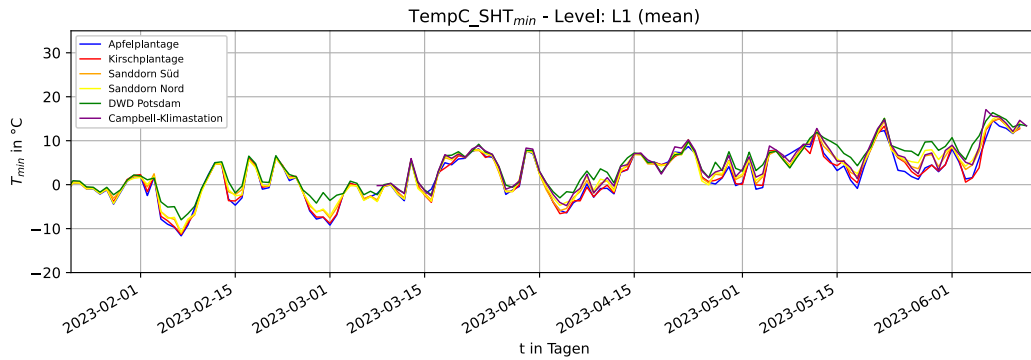


Abbildung 3.14.: Entwicklung der Tagesminima für Temperaturen für verschiedene Datenquellen und Standorte

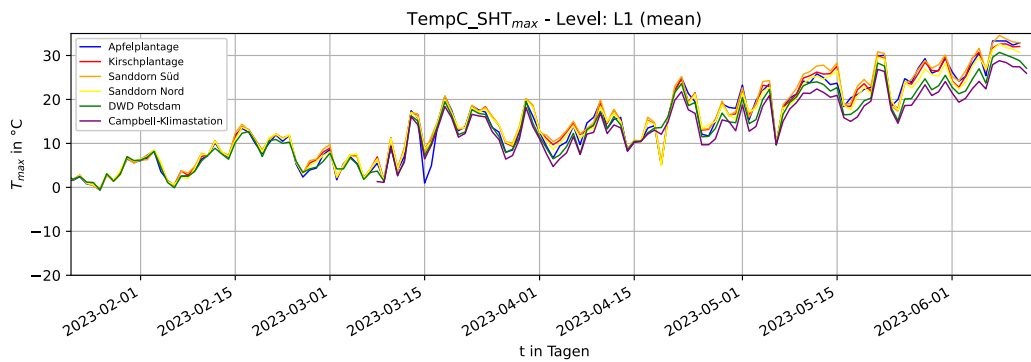


Abbildung 3.15.: Entwicklung der Tagesmaxima für Temperaturen für verschiedene Datenquellen und Standorte

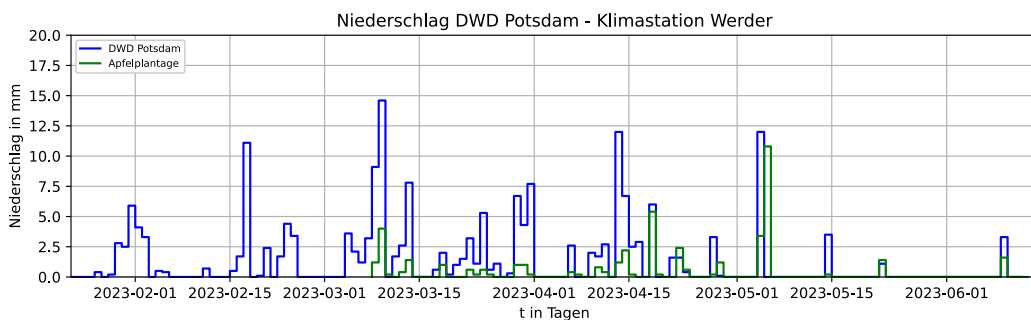


Abbildung 3.16.: Entwicklung der Tagessummen für Niederschläge für verschiedene Datenquellen

3.3. Einrichten der Messstandorte und Datenerhebung

3.3.1. Einrichtung repräsentativer Standorte und Bäume

Um im weiteren Verlauf des Projektes die Entwicklung realitätsgerechter und wassersparender Bewässerungsszenarien zu gewährleisten, ist es wichtig, dass Daten und Parameter für z.B. Boden, Pflanzen und Klima an Standorten erhoben werden, die für die gesamte Versuchsfläche repräsentativ sind. Im Gespräch mit Herrn Giese (Betriebsleiter Havelfrucht) wurde die Obstsorte Apfel ausgesucht, da es sich um die Hauptmarktfrucht des Betriebes handelt und der Apfelanbau in der Region dominiert. Als Versuchsfläche wurde die unter Kapitel 3.2.4 beschriebene Fläche ausgewählt. Auf dieser Fläche haben wir dann durch 12 Bohrstockeinschläge und 2 Bodenschurfe eine intensive, flächenhafte Bodenansprache vorgenommen. Die Ergebnisse sind unter Kapitel 3.3.2 dargestellt. Auf diese Weise konnte unter Berücksichtigung der Einschränkungen, die sich aus den Anforderungen der Wirtschaftsweise (hier insbesondere der Fahrgassen) ergeben, ein guter Standort für die Bodenwasserstation gefunden werden. Dabei wird sowohl der Bodenwassergehalt als auch das Bodenwasserpotential zwischen 2 typischen Apfelbäumen gemessen. An diesem Standort wurde dann auch die Wetterstation aufgebaut. Der Standort ist in Abbildung 3.17 gezeigt.

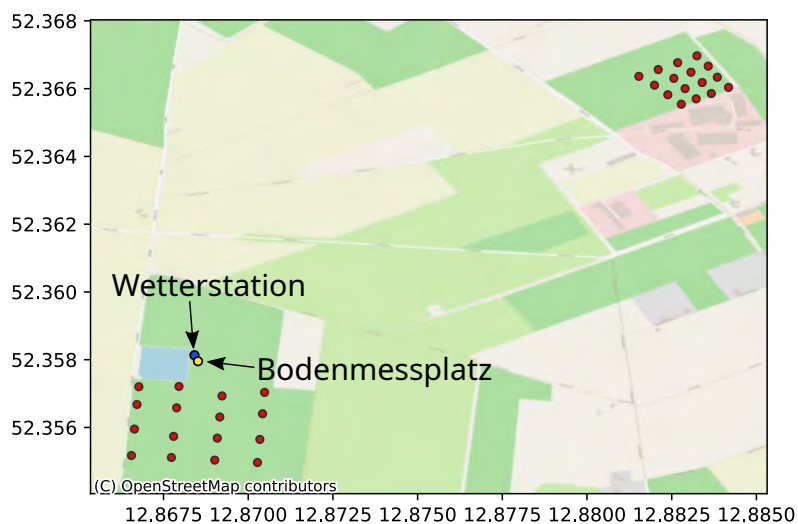


Abbildung 3.17.: Standorte der Wetterstation (blau), der Bodenmessstation (gelb) sowie der LowCost-Sensoren zur Messung der Temperatur und relativen Luftfeuchte (rot) in der Plantage Apfel 2

3.3.2. Entnahme von Bodenproben und Bohrstockanalyse

Auf der Apfelplantage wurden mehrere Bohrstockanalysen durchgeführt, welche im Wesentlichen den gesammelten Informationen aus den vorhandenen Bodenkarten entsprechen (Tabelle 3.10). Je nach Standort konnten Bohrkern mit maximaler Tiefe zwischen 60 und 100 cm entnommen werden. Der Oberboden sowie der Untergrundhorizont (A- und C-Horizont) sind durch reine Sande charakterisiert. Leichte Anzeichen einer Lessivierung waren bei einigen Bohrkernen sichtbar, jedoch nicht sehr ausgeprägt, da der Tonanteil sehr gering ist. Die im Unterboden vorkommende Lehmschicht wurde in den meisten Bohrkernen aufgefunden, variierte jedoch in der Tiefe (zwischen 50 und 70 cm u. GOK, Abbildung 3.18). Die Fingerprobe ergab ein deutlich bindigeres und formbareres Gefüge als in den darüber- sowie darunterliegenden Horizonten. Auf Grundlage dieser Ergebnisse wurden zwei Standorte für Bodenschürfe gewählt. Der erste diente zur Entnahme von ungestörten Bodenproben aus dem Oberboden an der Grenze zur Lehmschicht, der zweite diente einer genauen Bodenansprache sowie der Entnahme von Bodenproben aus verschiedenen Tiefen. Bei dem zweiten Bodenschurf wurde eine Tiefe von 70 cm u. GOK erreicht (Abbildung 3.19). Innerhalb dieser Tiefe konnte an dem Standort keine Lehmschicht gefunden werden, daher wurde vom Grund des Bodenschurfs eine weitere Bohrstockprobe entnommen, die ebenfalls kein Vorkommen der Lehmschicht aufwies, jedoch konnte mit der Fingerprobe eine Zunahme des Tonanteils mit größerer Tiefe festgestellt werden. Es wurden gestörte und ungestörte Proben für Untersuchungen der Körnungsverteilung, Retention und Leitfähigkeit entnommen, welche im weiteren Verlauf untersucht werden. Diese Parameter werden u.a. bei Bewässerungssimulationen benötigt.



Abbildung 3.18.: Vorgefundene Bodenhorizonte sowie Mächtigkeiten in den Bohrstockanalysen

3. Darstellung der Ergebnisse

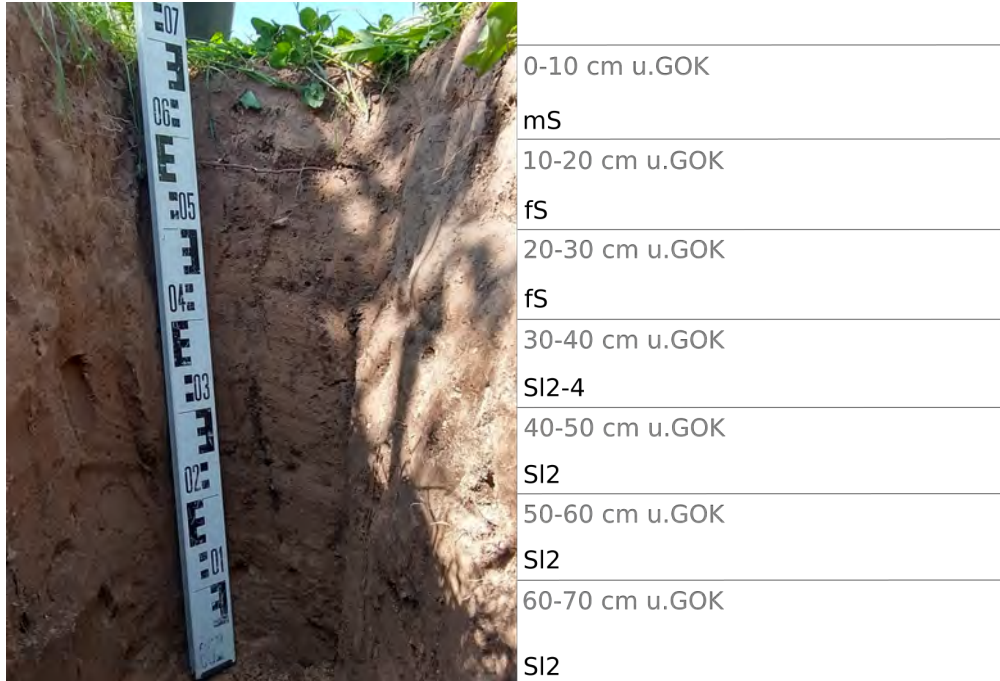


Abbildung 3.19.: Bodenschurf auf der Plantage Apfel 2

Tabelle 3.10.: Durchgeführte Bohrstockanalysen im Untersuchungsgebiet

Bodenanalyse	Anzahl	Datum	Bodenart (Fingerprobe)	Tiefe Lehmschicht
Bohrstockanalyse	6	08.03.2023	sS-Ls (Mittelsand)	55-70 cm u.GOK
Bodenschurf	1	08.03.2023	sS-Ls (Mittelsand)	60cm u.GOK
Bohrstockanalyse	3	18.04.2023	sS-Ls (Mittelsand)	53-60 cm u.GOK
Bohrstockanalyse	3	17.05.2023	sS-Ls (Mittelsand)	75 cm u.GOK
Bodenschurf	1	17.05.2023	sS-Ls (Mittelsand)	110 cm u.GOK

3.3.3. Einrichten des „Monitoringsystems Boden“ für Bodenwasserpotential und Bodenwassergehaltsmessungen in unterschiedlichen Tiefen und horizontalen Abständen

Am 17.05.2023 errichteten wir eine Bodenmessstation (Abbildung 3.20). Diese befindet sich in unmittelbarer Nähe zur Wetterstation in einer Baumreihe (Abbildung 3.17). Zeitgleich wurde ein Bodenschurf für eine Bodenansprache und zur Probenentnahme angelegt (siehe Kapitel 3.3.2). Mit den Ergebnissen der Bodenansprache wurden die Tiefen für die Installation der Sensoren festgelegt: In 15-20 cm, 55-60 cm sowie 75-80 cm u. GOK wurden [TEROS12-Sonden](#) zur Messung der Bodenfeuchte, Temperatur und Leitfähigkeit installiert. Zur Messung der Saugspannung im Boden wurden zusätzlich [T4e-Tensiometer](#) in den Tiefen 30, 60 und 90 cm u. GOK installiert. Die Sensoren wurden zusätzlich in verschiedenen Distanzen zum Stamm eingebracht, um die Wasserverteilung im Wurzelraum optimal beobachten zu können. Material aus den Bohrungen zum Einbau der Sensoren wurden ebenfalls für Laboranalysen entnommen, sodass für den konkreten Standort Bodenparameter ermittelt werden können (siehe Kapitel 3.3.2). Die Daten werden mit einer hohen zeitlichen Auflösung geloggt und mit einem Funkmodul an die TU Dresden übertragen.



Abbildung 3.20.: Bodenmessstation in der Plantage Apfel 2

3.3.4. Nach Auswertung und Analyse der Wetterdaten des DWD und VKR-BB ggf. Aufbau einer eigenen Wetterstation an dem Messstandort

Am 08.03.2023 haben wir eine Wetterstation aufgebaut, mit welcher neben Lufttemperatur, Luftfeuchte, Windrichtung und -geschwindigkeit und Niederschlagsmengen auch die einfallende und ausgehende Strahlung gemessen wird (Abbildung 3.21). Damit kann die Nettostrahlung direkt gemessen werden. Die Nettostrahlung ist ein wichtiger Parameter zur Bestimmung des Pflanzenwasserbedarfs ET_c . Durch die Direktmessung kann die Genauigkeit für den lokalen Standort erhöht werden. Die Parameter der Messung sowie daraus berechnete Werte können im Bericht [online](#) eingesehen werden.



Abbildung 3.21.: Wetterstation in der Plantage Apfel 2

Zur Erweiterung des lokalen Monitorings wurde am 26. Oktober 2023 ergänzend zur bestehenden Hauptstation eine Wetterstation des Herstellers Barani Design installiert. Das System setzt sich aus dem kompakten Sensormodul MeteoHelix IoT Pro (für Temperatur, Luftfeuchte, Globalstrahlung und Luftdruck) sowie Komponenten zur Messung von Niederschlag und Wind zusammen. Die Sensoren entsprechen den WMO-Standards. Die Station fungiert als Ausfallreserve, um potenzielle Datenlücken der primären Station zu schließen und als preiswerte Alternative.

3.3.5. Hochaufgelöste Analyse und Abbildung mikroklimatischer Einflüsse auf das Bewässerungsmanagement des Untersuchungsstandortes

Für genaue Untersuchungen der mikroklimatischen Unterschiede, die durch Topografie, Exposition und Lage im Bestand entstehen, haben wir in Zusammenarbeit mit [IOT Plan Dresden](#) auf vier ausgewählten Flächen 100 Temperatur- und Luftfeuchtigkeitssensoren in zwei unterschiedlichen Höhen installiert. Die Messungen der Sensoren erfolgen alle 20 Min. und werden per Funk an ein Gateway übermittelt, das die Daten dann an die TUD/Professur für Hydrologie sendet, wo sie automatisch ausgewertet werden.

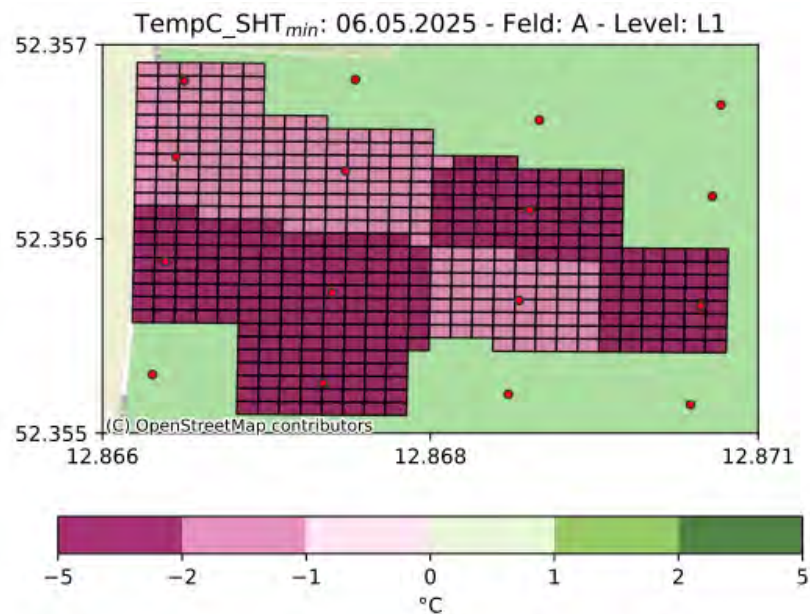


Abbildung 3.22.: Temperaturverteilung kalte Nacht - Apfelplantage im Bestand

Nach der Auswertung der räumlichen Variabilität der Temperaturen auf den vier Flächen lässt sich feststellen:

- die Apfelplantage ist eine *Kälteinsel* bei Nachtfrösten, insbesondere die südliche Seite;
- im Bestand treten durch die geringere Turbulenz Temperaturen bei Frostnächten auf, die im Vergleich zu den Werten über den Bestand bis zu 2 °C geringer sein können;
- dies trifft im geringeren Maße auch auf die Kirschplantage zu;

- die Kuppe des Telegraphenberges und der südlich orientierte Hang bis hinunter zur nördlichen Seite der Kirschplantage sind *Hotspots*, hier treten Temperaturunterschiede bei den Tagesmaxima bis zu 5 °C auf.

Diese Aussagen werden nachfolgend mit Beispielen für eine *kalte Nacht* (Abbildung 3.22) illustriert. Dabei geht es um die relativen Unterschiede in der räumlichen Verteilung. Die absoluten Werte der low-cost Sensoren weichen bei extremen Verhältnissen etwa 1-3 °C nach oben bzw. nach unten ab. Leere Farbfelder bedeuten, dass dort aktuell keine Messwerte vorliegen.

3.3.6. Installation von Saftflussmessungen an Einzelbäumen

Am 07. März 2024 wurde die Installation der Saftflussmessung auf der Apfelplantage durchgeführt. Hierbei wurden an drei ausgewählten Bäumen Sensoren des Typs UGT SFM-5 installiert, die seitdem kontinuierlich Daten erfassen. Für eine präzise Einrichtung wurden vorab spezifische Baumparameter wie der Stammumfang in verschiedenen Höhen, die Borkendicke sowie die Tiefe des Splintholzes ermittelt. Die Daten werden stündlich online in die Messdatenbank übertragen.

3.4. Modellierung und Durchführung von Bewässerungsexperimenten

Zur Simulation der komplexen Bodenwasserdynamik und Bewertung verschiedener Bewässerungsstrategien wurde das Softwarepaket **HYDRUS-2D/3D** verwendet. Diese Software löst numerisch die Richards-Gleichung für die variabel gesättigte Wasserströmung sowie die Konvektions-Dispersions-Gleichung für den Wärme- und Stofftransport in porösen Medien mithilfe eines Finite-Elemente-Schemas. Eine entscheidende Komponente für die Simulation der Obstplantage ist die Einbeziehung eines Senkterms S in die Strömungsgleichung zur Berücksichtigung der Wurzelwasseraufnahme, welche über das Feddes-Modell beschrieben wird. Für die spezifischen Standortbedingungen in Werder wurde das Modellgebiet in ein zweidimensionales Finite-Elemente-Netz diskretisiert, um spezifische Tropfbewässerungsszenarien unter variablen Flussrandbedingungen sowie atmosphärischen Interaktionen zu simulieren.

3.4.1. Modellierung

Für die detaillierte prozessbasierte Analyse der Bodenwasserbewegung wurde das Modell **HYDRUS-2D/3D** (Version 5) eingesetzt. Im Gegensatz zu vorangegangenen Studien wurde die Modellgeometrie als zweidimensionaler vertikaler Längsschnitt entlang der Baumreihe definiert, um die Interaktion benachbarter Tropfer und die Wurzelüberlappung abzubilden, siehe Abb. 3.23 und 3.24. Das Finite-Elemente-Netz wurde insbesondere an der Bodenoberfläche und den Schichtgrenzen verfeinert, um numerische Stabilität bei den hohen hydraulischen Gradienten während der Infiltration zu gewährleisten.



Verwendete Sensoren (je 3):

- Saftfluss: UGT - SFM-5
- Tensiometer: T4e
- Bodenfeuchte: Meter - TEROS12
- Bodentemperatur: Meter - TEROS12
- Elektrische Leitfähigkeit: Meter - TEROS12

Zeitliche Auflösung:

- Alle Sensoren: 20 min
- Nach Prozessierung: 1 h, 1 d

Zeitliche Messperiode:

- Saftfluss: 13.3.2024 – heute (25.3. VS)
- Sonstige Sensoren: 17.5.2023 – heute

Abbildung 3.23.: Boden- und Saftfluss-Messsystem

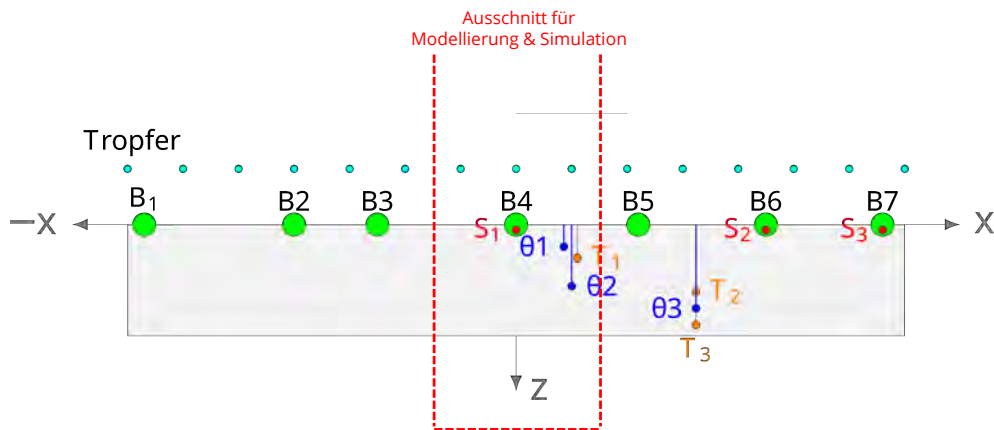


Abbildung 3.24.: Modellgebiet als Ausschnitt des Messsystems mit Tropfern, Bäumen: B, Tensiometern: T, Feuchtesensoren: θ , Saftflusssensoren: S.

Bodenhydraulische Parametrisierung Ein wesentlicher Unterschied zu früheren Arbeiten (vgl. Blauth) besteht in der Datengrundlage der Bodenparameter. Anstatt generische Pedotransferfunktionen (wie Rosetta) zu nutzen, wurden die bodenhydraulischen Funktionen (Retentionskurve und Leitfähigkeitsfunktion) aus standortspezifischen Messkampagnen abgeleitet. Hierfür wurden ungestörte Bodenproben aus verschiedenen Horizonten (Sand im Oberboden, lehmiger Sand mit Tonanteil im Unterboden) entnommen und im Labor mittels der **ku-pF-Apparatur** sowie der **HYPROP-Methode** analysiert. Ergänzend wurden vor Ort Infiltrationsversuche durchgeführt, um die gesättigte hydraulische Leitfähigkeit (K_s) unter Feldbedingungen zu validieren.

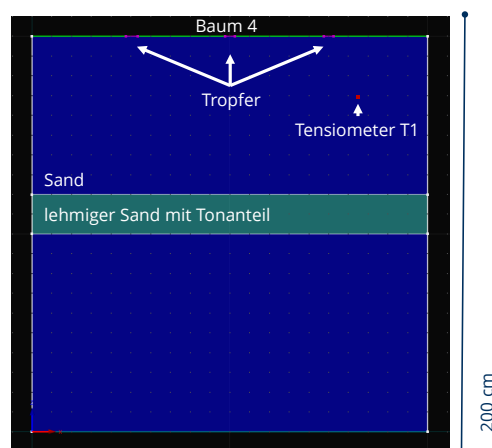


Abbildung 3.25.: Modell Setup

Dies ermöglicht eine präzise Abbildung der lokalen Schichtung, wobei insbesondere der Übergang vom sandigen Oberboden zum dichteren Unterboden (ca. 90 cm Tiefe) für die vertikale Wasserbewegung entscheidend ist, siehe Abb. 3.25.

Wurzelraum und Randbedingungen Die Wurzelwasseraufnahme wurde über das Feddes-Modell implementiert, wobei die räumliche Verteilung der Wurzeln auf Literaturwerten für die am Standort verwendeten schwachwüchsigen Unterlagen (M9/M26) basiert, siehe Abb. 3.26. Als obere Randbedingung wirken atmosphärische Flüsse (Evaporation und Transpiration, abgeleitet aus AquaCrop) sowie variable Flussrandbedingungen an den Positionen der Tropfer. Der untere Rand wurde als Free Drainage“ definiert.

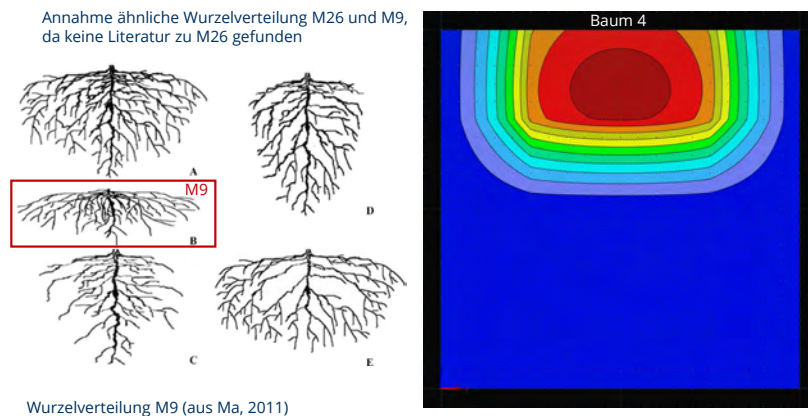


Abbildung 3.26.: Wurzelverteilung Längsschnitt

3.4.2. Durchführung

Für die Hydrus-Simulationen wurde ein 2D-Modell mit Hydrus über einen Zeitraum von zwei Strahlungstagen im Sommer vom 25.05. bis 27.05.2023 über 48 h erstellt. Diese Phase wurde ohne Niederschlag und mit hoher potenzieller Verdunstung ausgewählt, um die Bodenwasserbewegung unter Bedingungen einer hohen ET_0 zu untersuchen.

Simulationsvarianten Um optimale Bewässerungsstrategien abzuleiten, wurde eine umfangreiche Zahl an Simulationsszenarien berechnet. Diese untersuchen die Sensitivität des Systems auf drei Hauptfaktoren:

1. **Anfangsbedingungen (Initialer Bodenfeuchtestatus):** Es wurden drei Szenarien für das Matrixpotenzial zu Beginn der Bewässerung definiert, um unterschiedliche Stresslevel der Bäume zu simulieren:
 - –200 hPa: Start bei noch ausreichender Bodenfeuchte.
 - –400 hPa: Start bei beginnendem Trockenstress.
 - –800 hPa: Start bei stark ausgetrocknetem Boden (kritischer Bereich).
2. **Bewässerungsdauer und -menge:** Für die Standard-Tropfbewässerung (2 l/h pro Tropfer) wurden Varianten mit **2, 5 und 10 Stunden** Bewässerungsdauer simuliert. Ziel war es zu prüfen, ob längere Intervalle zu einer besseren lateralen Wasserverteilung führen oder lediglich die unproduktive Versickerung (Perkolati-on) erhöhen.

3. **Bewässerungstechnik:** Vergleichend zur punktuellen Tropfbewässerung wurde der Einsatz von **Mikrosprinklern** simuliert. Hierbei wurde eine flächigere Verteilung (Benetzungsradius ca. 50–100 cm) mit einer Rate von 20 l/h angenommen, um die Effizienz bei der Durchfeuchtung des gesamten Wurzelraums gegenüber der Tropfbewässerung zu bewerten.

3.4.3. Ausgewählte Simulationsergebnisse und Vergleich mit einem Bewässerungsversuch

Die Ergebnisse dieser Variantenrechnungen dienen dazu, Bewässerungskonfigurationen zu identifizieren, die das Wasser optimal im Wurzelraum halten und Sickerwasserverluste minimieren.

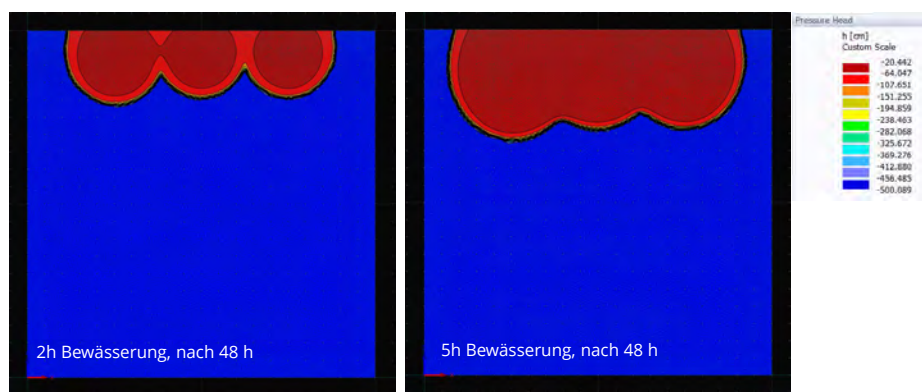


Abbildung 3.27.: Bewässerung mit 2 l/h Tropfer für 2h und 5 h mit entsprechend 8 mm und 20 mm Bewässerungsmenge

Die mit **HYDRUS-2D/3D** durchgeführten Simulationen zur Bodenwasserdynamik lieferten entscheidende Erkenntnisse für die Optimierung der Bewässerungssteuerung am Standort Werder. Ein zentraler Fokus der Untersuchung lag auf dem Vergleich verschiedener Bewässerungsdauern bei konstanter Tropferleistung (2 l/h), um die vertikale Wasserverteilung im Wurzelraum der Apfelbäume zu bewerten.

Vergleich der Bewässerungsintervalle: 2h vs. 5h. Die Simulationsergebnisse zeigen signifikante qualitative Unterschiede in der Benetzungstiefe, abhängig von der Bewässerungsdauer. Bei einer Bewässerungsdauer von lediglich **2 Stunden** (entspricht einer Gabe von ca. 8 mm bei der vorliegenden Bestandsdichte) dringt die Feuchtigkeitsfront primär in den Oberboden ein. Die Simulationen belegen, dass in diesem Szenario lediglich die oberen **30 bis 40 cm** der Bodenzone effektiv durchfeuchtet werden. Da die Wurzeln der Apfelbäume (auf M9-Unterlage) jedoch tiefer reichen und der Boden bei trockenen Anfangsbedingungen (Saugspannung ca. -400 bis -500 hPa) eine hohe Saugkraft besitzt, verbleibt das Wasser oberflächennah und erreicht die tieferen Wurzelbereiche nicht ausreichend. Dies führt zu ineffizienter Wasserverfügbarkeit, da das Wasser in der obersten Schicht stärker der Evaporation ausgesetzt ist und der kritische Wurzelraum unterversorgt bleibt.

Im Gegensatz dazu zeigt die Simulation einer **5-stündigen Bewässerung** (entspricht ca. 20 mm) eine deutlich verbesserte Tiefenwirkung. Die Benetzungszone erweitert sich hierbei auf eine Tiefe von **50 bis 60 cm**. Diese Strategie gewährleistet, dass das Wasser in den Hauptwurzelraum infiltriert, wo es von den Pflanzen effizienter aufgenommen werden kann, anstatt an der Oberfläche zu verdunsten.

Validierung durch einen Bewässerungsversuch 2024. Die aus den Modellen abgeleitete Empfehlung, die Bewässerungsintervalle zugunsten einer besseren Tiefendurchfeuchtung zu verlängern, wurde durch praktische Feldversuche im Spätsommer 2024 bestätigt. Die Protokolle des „Versuchs Speicherbecken TU Dresden“ dokumentieren, dass in der kritischen Phase (20.08., 03.09. und 05.09.2024) gezielt Bewässerungsblöcke mit einer Dauer von jeweils **ca. 5 Stunden** gefahren wurden.

Die Auswertung der Feuchte- und Tensionsmessungen dieser Experimente, bei denen insgesamt 72 mm Wasser (in einer Sequenz aus 3 × 5 h und 1 × 3 h) auf einen initial trockenen Boden aufgebracht wurden, bestätigte die Modellvorhersagen: Das Wasser wurde effektiv im Wurzelraum gehalten, ohne dass es zu nennenswerten Sickerwasserverlusten (Perkolation) in den Unterboden kam.

Zusätzlich bestätigten die Saftfluss- und Tensiometermessungen im Vergleich verschiedener Bewässerungsmengen, 8 mm versus 72 mm, dass die Baumwurzeln in den tieferen Schichten nur aktiv werden, wenn der darüberliegende Wurzelraum in eine geringe Bodenfeuchte / hohe Saugspannung aufwies.. Dies verifiziert die Schlussfolgerung, dass längere Bewässerungsintervalle (5h) notwendig sind, um die hydraulische Barriere des trockenen Oberbodens zu überwinden und den Bodenwasserspeicher nachhaltig aufzufüllen, während kurze Intervalle (2h) lediglich eine oberflächliche und damit ineffiziente Benetzung bewirken.

Deshalb können Wassergaben von 20 mm – 50 mm pro Bewässerungsereignis ohne Einschränkung empfohlen werden. In Bezug auf das Bewässerungssystem zeigen die Simulationen, dass dem Tropfsystem gegenüber dem aufwendigeren Mikro-Sprinklersystem für die Deckung des Pflanzenwasserbedarfs der Vorzug zu geben ist⁴. Die Simulationen zeigten auch, dass Tropfleitungen mit 2 l/h Durchfluss die untere empfohlene Grenze darstellen und der Bereich bis 8 l/h Durchfluss mit entsprechend kürzeren Bewässerungszeiten und Tropfabständen wie im Bewässerungsexperiment genutzt werden kann.

⁴Für die Frostschuttbewässerung ist dagegen die Installation eines Mikro-Sprinklersystems über dem Bestand zu empfehlen.

3.5. Modellierung des Bewässerungsbedarfs

Die berechneten Flächenangaben beziehen sich ausschließlich auf die **effektive Anbaufläche** (Netto-Bestandsfläche). Flächenbedarfe für Bewirtschaftungsgassen, Vorgewende und logistische Infrastruktur sind in dieser Betrachtung nicht enthalten. Die Unterscheidung ist im Obstanbau essenziell, da die Diskrepanz zwischen Netto- und Bruttofläche signifikant ist.

Für die Umrechnung kann als Faustformel angenommen werden, dass durch die Bewirtschaftungsgassen die effektive Anbaufläche (Netto) oft nur etwa 50 % der Brutto-Anbaufläche ausmacht. Zusätzlich ist zu beachten, dass sich die folgenden Berechnungen auf den **Netto-Pflanzenwasserbedarf** beziehen, d. h. der Wirkungsgrad der eingesetzten Tropfbewässerungsmethode (z. B. etwa 90 %) ist zunächst nicht berücksichtigt.

Sei

- N_{PWB} der Netto-Pflanzenwasserbedarf [l/m^2],
- A_{brutto} die Brutto-Anbaufläche [m^2],
- f_{netto} der Nettoflächenanteil an der Bruttofläche (Faustwert: $f_{\text{netto}} \approx 0,5$),
- η der Wirkungsgrad der Bewässerung (z. B. $\eta \approx 0,9$).

Die Netto-Bestandsfläche ergibt sich zu

$$A_{\text{netto}} = f_{\text{netto}} \cdot A_{\text{brutto}}$$

Der auszubringende Gesamtwasserbedarf W_{ges} ergibt sich damit zu:

$$W_{\text{ges}} = \frac{N_{\text{PWB}} \cdot A_{\text{brutto}} \cdot f_{\text{netto}}}{\eta}$$

3.5.1. Modellierung

An der TU Dresden wurde ein **Bewässerungsmodellierungs-Framework (BmF)** entwickelt (Zott 2025), um das Bewässerungsmanagement von Apfelplantagen an verschiedenen mitteldeutschen Standorten (u. a. Werder) zu analysieren. Kern dieses Frameworks ist das prozessbasierte Pflanzenwachstumsmodell **AquaCrop** (in der

Open-Source-Variante AquaCrop-OS), welches in die *Deficit Irrigation Toolbox* (DIT), ebenfalls eine Entwicklung der TU Dresden, integriert wurde. AquaCrop simuliert die Entwicklung der Biomasse und des Ertrags in Abhängigkeit von der Wasserverfügbarkeit, indem es die Evapotranspiration strikt in Transpiration (produktiver Wasserverbrauch) und Bodenverdunstung (unproduktiver Verlust) trennt.

Herausforderung der Mehrjährigkeit Eine zentrale methodische Herausforderung bestand darin, dass AquaCrop ursprünglich für einjährige Feldfrüchte konzipiert wurde. Für die Anwendung auf mehrjährige Dauerkulturen wie Apfelbäume mussten spezifische Anpassungen vorgenommen werden, um die physiologischen Eigenschaften eines bereits etablierten Bestandes abzubilden.

Parametrisierung der Apfelbäume Um ein standortübergreifend anwendbares und physiologisch plausibles „Cropfile“ (Pflanzenparameter-Datei) zu erstellen, haben wir eine vierstufige Parametrisierungsstrategie,:

1. **Kalibrierung des Blühbeginns (HI_{start}):** Der Parameter HI_{start} definiert den Beginn der Ertragsbildung. Dieser Wert wurde anhand phänologischer Beobachtungsdaten des Deutschen Wetterdienstes (DWD) zum Beginn der Apfelblüte (Indikator A2) kalibriert. Durch den Vergleich simulierter und beobachteter Blühterminen wurde der Schwellenwert für die kumulierte Temperatursumme (Growing Degree Days, GDD) auf **323 GDD** festgelegt, da hier der geringste Fehler (RMSE) auftrat.
2. **Übernahme globaler Parameter:** Temperatur- und Wachstumsparameter wurden teilweise aus dem globalen Raster-Pflanzenmodell ACEA (Mialyk & Su, 2024) übernommen, welches ebenfalls auf AquaCrop basiert. Dazu gehören beispielsweise die Basistemperatur ($T_{base} = 3\text{ °C}$) und die obere Temperaturschwelle ($T_{upp} = 30\text{ °C}$).
3. **Anpassung an die Bestandsstruktur:** Spezifische Parameter wurden angepasst, um die Realität einer Apfelplantage abzubilden:
 - **Durchwurzelungstiefe ($PctZ_{min}$):** Da es sich um ausgewachsene Bäume handelt, wurde der Anteil der minimal wirksamen Durchwurzelungstiefe auf **100 %** gesetzt (statt des Standards von 70 % für einjährige Pflanzen), um ein über Jahre etabliertes Wurzelsystem zu simulieren.
 - **Maximale Kronenbedeckung (CC_x):** Aufgrund der typischen Reihenbepflanzung mit unbedeckten Fahrgassen wurde die maximale Kronenbedeckung auf **0,7** (70 %) begrenzt, da nicht die gesamte Bodenfläche durch das Blätterdach beschattet wird.
 - **Pflanzendichte:** Diese wurde mittels Luftbildanalysen für die Standorte auf Werte zwischen 1100 und 3300 Bäumen pro Hektar geschätzt.

4. **Wasserproduktivität:** Der normierte Wasserproduktivitätskoeffizient (WP^*), welcher die Biomasseproduktion pro Einheit transpirierten Wassers beschreibt, wurde auf **17 g/m²** festgelegt.

3.5.2. Aufbau der Simulationsexperimente mit AquaCrop am Standort Werder

Die Simulationen für den Standort Werder decken sowohl einen historischen Zeitraum (1981–2023) unter Verwendung von RDS- und ERA5-Land-Klimadaten als auch eine Zukunftsprojektion (2024–2099) unter dem Emissionsszenario RCP8.5 ab. Der experimentelle Aufbau unterscheidet sich in einigen Parametern vom allgemeinen Framework, um spezifische Fragestellungen für das Forschungsprojekt in Werder zu beantworten. Die Simulationen wurden für verschiedene Kombinationen aus Anfangsbedingungen und Bewässerungsstrategien durchgeführt.

Anfangsbedingungen des Bodenwassers (WC_0) Um die Unsicherheit bezüglich des Bodenwassergehalts zu Beginn der Vegetationsperiode abzubilden, wurden für jedes Szenario zwei Varianten der Startbedingungen definiert:

- **Feldkapazität ($WC_0 = FC$):** Der Bodenwasserspeicher ist zu Saisonbeginn vollständig gefüllt. Dies wird unter den gegebenen klimatischen Bedingungen als das wahrscheinliche Szenario angesehen, da Niederschläge außerhalb der Vegetationsperiode den Speicher in der Regel auffüllen.
- **50% der nutzbaren Feldkapazität ($WC_0 = 50\%nFK$):** Diese Variante stellt eine konservativere Annahme dar, bei der der Boden zu Saisonbeginn bereits teilweise entleert ist. Ein Wert von 0% wurde als unrealistisch verworfen, da winterliche Niederschläge ein komplettes Austrocknen verhindern.

Bewässerungsvarianten und -strategien Für den Standort Werder wurden drei grundlegende Bewässerungsstrategien implementiert, die sich in ihrer Steuerung und Zielsetzung unterscheiden:

1. **Regenfeldbau (RFB):** Diese Variante dient als Referenzszenario ohne künstliche Bewässerung. Die Wasserversorgung der Bäume erfolgt ausschließlich durch natürlichen Niederschlag.
2. **Vollbewässerung (vollBw):** Im Gegensatz zum allgemeinen Framework (dort Schwellenwert 90%) wurde die Vollbewässerung für die spezifischen Werder-Simulationen so konfiguriert, dass eine Wassergabe ausgelöst wird, sobald die Bodenfeuchte unter **80%** der Feldkapazität fällt. Ziel ist die Vermeidung von Trockenstress zur Erreichung des maximalen Ertragspotenzials.
3. **Defizitbewässerung (defBw) und Ertrags-Wasser-Produktionsfunktion:** Für die Defizitbewässerung wurde der Optimierungsalgorithmus **GET-OPTIS** der

Deficit Irrigation Toolbox (DIT) verwendet (DIT-Methode 7). Hierbei wurde ein generischer Bewässerungsplan optimiert, der über alle Jahre hinweg angewendet werden kann.

Um eine sogenannte *Crop-Water Production Function* (CWPF) zu erstellen und die Beziehung zwischen eingesetztem Wasser und Ertrag zu quantifizieren, wurden Simulationen mit fest definierten Obergrenzen für das saisonale Bewässerungsvolumen durchgeführt:

- **50 mm** Zusatzwasser
- **100 mm** Zusatzwasser
- **200 mm** Zusatzwasser

Diese Abstufung ermöglicht die Analyse der Wasserproduktivität (WP_{BW}), also des Ertragsgewinns pro eingesetzte Einheit Wasser, um den Zielkonflikt zwischen Ertragssicherung und Wassersparen transparent zu machen.

3.5.3. Simulation der historischen Bedarfsentwicklung

Die durchgeführten Simulationen mit der *Deficit Irrigation Toolbox* (DIT) für den historischen Zeitraum von 1981 bis 2023 liefern eine detaillierte Quantifizierung des Wasserbedarfs und der Ertragseffekte am Standort Werder. Der Klimareferenzdatensatz (RDS) stellt für den Zeitraum 1961–2023 lückenlose, regional interpolierte meteorologische Zeitreihen (u. a. Niederschlag und potenzielle Verdunstung) bereit. Im Gegensatz zu anderen untersuchten mitteldeutschen Standorten erwies sich Werder in den Ergebnissen in Tab. 3.11 als deutlich wasserlimitiert, was sich daran zeigt, dass die Erträge⁵ deutlich niedriger ausfallen. im reinen Regenfeldebau signifikant unter denen aller Bewässerungsszenarien liegen.

Die Ergebnisse belegen konsistent, dass bereits moderate Zusatzwassergaben die Ertragssicherheit massiv erhöhen. Die Analyse der sogenannten *Crop-Water-Production-Function* (CWPF) verdeutlicht jedoch ein Gesetz des abnehmenden Ertragszuwachses: Der Übergang vom Regenfeldebau zu einer Defizitbewässerung von 50 mm bewirkt den größten relativen Ertragsanstieg und weist zugleich die höchste Wasserproduktivität (WP_{BW}) auf. Eine Steigerung der Wassergabe auf 100 mm oder 200 mm führt zwar zu einer weiteren Stabilisierung der maximalen Erträge, der zusätzliche Gewinn fällt jedoch im Verhältnis zum eingesetzten Wasser geringer aus.

Bei einer Vollbewässerungsstrategie (Ziel: Vermeidung von Trockenstress) variierte der durchschnittliche saisonale Zusatzwasserbedarf je nach Anfangsbedingungen und

⁵Der Trockenmasseanteil wird hier mit 20% angenommen: 4,39 t/ha $\hat{=}$ **21,95** t/ha.

3. Darstellung der Ergebnisse

Tabelle 3.11.: Simulierte mittlere Erträge und Bewässerungsmengen für den Standort Werder (1981–2023) unter verschiedenen Anfangsbedingungen (FC = Feldkapazität, 50nFK = 50% nutzbare Feldkapazität).

Anfangsbedingung	Strategie	Trockenertrag [t/ha]	Wasserbedarf [mm]
FC	Regenfeldbau (RFB)	4,39 ± 0,67	0
	Defizit 50 mm	4,69 ± 0,46	50
	Defizit 100 mm	4,83 ± 0,34	100
	Vollbewässerung	4,87 ± 0,30	126 ± 49
50nFK	Regenfeldbau (RFB)	4,33 ± 0,71	0
	Defizit 50 mm	4,65 ± 0,51	50
	Defizit 100 mm	4,79 ± 0,37	100
	Vollbewässerung	4,87 ± 0,30	164 ± 51

Klimadaten zwischen 104 mm und 164 mm. Auffällig ist, dass Szenarien mit ungünstigeren Startbedingungen (50 % nutzbare Feldkapazität zu Saisonbeginn) zwar höhere Bewässerungsmengen erfordern, durch die Bewässerung aber fast das gleiche Ertragsniveau erreichen wie Szenarien mit optimalen Startbedingungen. Zusammenfassend zeigt die historische Analyse, dass eine gesteuerte Defizitbewässerung für Werder die effizienteste Strategie ist, um mit begrenzten Wasserressourcen hohe Erträge zu sichern.

3.5.4. Simulation der zukünftigen Bedarfsentwicklung

Für den Standort Werder sind die Ergebnisse einer detaillierten Zukunftssimulation über den Zeitraum 2024 bis 2099, die auf dem Emissionsszenario RCP8.5 („Business-as-usual“) basiert. Die Ergebnisse zeigen, dass sich die Rahmenbedingungen für den Apfelanbau signifikant verändern werden. Unter den projizierten Klimabedingungen nehmen sowohl die mittleren Erträge als auch deren Variabilität im Regenfeldbau zu. Dieser Anstieg des mittleren Ertragspotenzials wird primär auf die physiologische Wirkung erhöhter CO₂-Konzentrationen und Temperaturen zurückgeführt, geht jedoch mit zunehmender Unsicherheit einher.

Die Simulationen in Abb. 3.28 verdeutlichen, dass Bewässerung in Zukunft eine noch zentralere Rolle für die Ertragssicherheit spielen wird. Während die Erträge im unbewässerten Anbau stärker schwanken, stabilisiert die Zusatzbewässerung das Ertragsniveau und sichert die durch den Klimawandel steigenden Ertragspotenziale ab. Eine Analyse der Zeiträume zeigt dabei einen Trend: In der zweiten Jahrhunderthälfte (2062–2099) steigen sowohl die mittleren Erträge als auch die Wasserproduktivität der Bewässerung (WP_{BW}) im Vergleich zur ersten Hälfte (2024–2061) an.

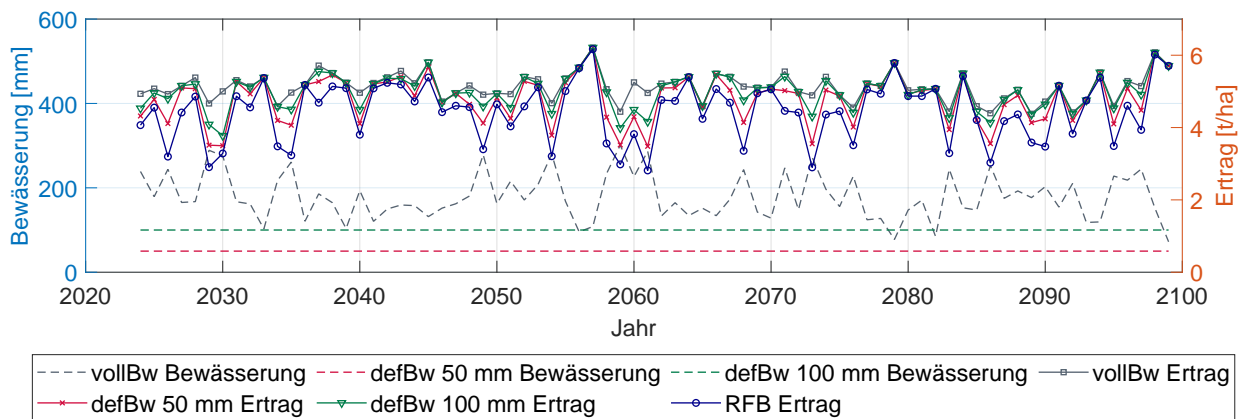


Abbildung 3.28.: Erträge und Wasserbedarfe für verschiedene bewässerungsstrategien für den Zeitraum 2024–2099 für das Emissionsszenario RCP8.5

Hinsichtlich des Wasserbedarfs prognostiziert das Modell für eine Strategie der Vollbewässerung (Vermeidung von Trockenstress) im Gesamtdurchschnitt jährliche Zusatzwassermengen zwischen 135 mm und 179 mm. Auch in der Zukunftsprojektion erweist sich die Defizitbewässerung als besonders effizient. Die Strategie mit einer Begrenzung auf maximal 50 mm Zusatzwasser erzielt die höchste Wasserproduktivität, da bereits geringe Wassergaben die größten relativen Ertragszuwächse bewirken. Höhere Wassergaben (bis zur Vollbewässerung) steigern zwar den absoluten Ertrag weiter, jedoch mit abnehmender Effizienz pro eingesetztem Kubikmeter Wasser.

Tabelle 3.12.: Simulierte mittlere Erträge und Bewässerungsmengen für den Standort Werder im Zukunftszeitraum (2024–2099) unter dem Szenario RCP8.5.

Anfangsbedingung	Bewässerungsstrategie	Ø Ertrag [t/ha]	Ø Wasser [mm]
Start bei FC	Regenfeldbau (RFB)	4,45 ± 0,82	0
	Defizit 50 mm	4,79 ± 0,64	50
	Defizit 100 mm	4,99 ± 0,49	100
	Vollbewässerung	5,12 ± 0,38	179 ± 55

3.5.5. Einschränkungen der Modellierung, insbesondere Frostschäden

Obwohl das verwendete AquaCrop-Modell in der Lage ist, realistische mittlere Ertragsniveaus abzubilden, unterliegen die Ergebnisse wesentlichen methodischen Einschränkungen. Ein zentrales Defizit ist die Nichtberücksichtigung von Ertragsverlusten durch Extremwetterereignisse wie Spätfröste während der Blüte oder durch Schädlings- und Krankheitsdruck, da AquaCrop den Ertrag primär als Funktion der Wasserverfügbarkeit und der klimatischen Verdunstungsnachfrage simuliert.

Insbesondere die Zukunftsprojektionen zeigen zwar steigende potenzielle Erträge durch höhere Transpirationsraten, vernachlässigen jedoch das steigende Risiko von Ertragsausfällen durch eine phänologische Verfrühung der Blüte und damit verbundene Spätfröste. Die Analyse der historischen Klimadaten für den Standort Werder (1981–2023) offenbart bereits einen klaren Trend: Während der 10-jährige Mittelwert des Blühbeginns Anfang der 1980er Jahre noch bei etwa Tag 120 (Ende April) lag, hat sich dieser Zeitpunkt in der jüngeren Vergangenheit bereits auf Werte um den Tag 110 (Mitte April) vorverlegt.

Diese Tendenz zur Verfrühung verschärft sich in der Zukunftssimulation für den Zeitraum 2024 bis 2099 unter dem Hochemissionsszenario RCP8.5 massiv. Die Modellprojektionen zeigen eine kontinuierliche Verschiebung des Blühbeginns auf immer frühere Zeitpunkte im Jahr. Gegen Ende des 21. Jahrhunderts wird ein mittlerer Blühbeginn deutlich unter Tag 100, teilweise bis hin zu Tag 90 (Ende März/Anfang April), prognostiziert.

Des Weiteren basieren die Simulationen auf der Annahme einer optimalen Nährstoffversorgung und eines optimalen Managements, sodass biophysikalische Limitierungen jenseits des Wasserstress (z. B. Bodenfruchtbarkeit oder Salzstress) unberücksichtigt bleiben. Schließlich konnte mangels standortspezifischer Ertragsdaten keine Validierung oder Kalibrierung des Modells auf die lokalen Apfelsorten und Gegebenheiten erfolgen; stattdessen wurde eine generalisierte, physiologisch plausible Parametrisierung verwendet, weshalb die Ergebnisse primär als relative Trends zwischen den Bewässerungsszenarien und nicht als exakte absolute Ertragsprognosen zu interpretieren sind.

3.5.6. Vergleich mit Bewässerungskapazitäten nach Ertüchtigung des Brauchwasserwerks

Berechnungsgrundlagen Die nachfolgenden Kalkulationen basieren auf einer maximalen nachhaltigen Wasserentnahme aus dem Glindower See von 0,8 Mio. m³ pro Jahr, wie sie im Rahmen der Wasserhaushaltsbilanz als Obergrenze identifiziert wurde. Zur Ermittlung des Brutto-Wasserbedarfs an der Entnahmestelle wurde ein Systemwirkungsgrad der Tropfbewässerung von 75 % angesetzt (Brutto = Netto/0,75). Die in der Tabelle ausgewiesene *Netto-Fläche* beschreibt den effektiv bewässerten Wurzelraum (Baumstreifen). Da Fahrgassen und Vorgewende unbewässert bleiben, entspricht dies in der Praxis einer realen *Brutto-Plantagenfläche*, die überschlägig mit dem Faktor 2 angenommen werden kann.

Tabelle 3.13.: Kalkulierte Bewässerungskapazitäten bei einem jährlichen Dargebot von 0,8 Mio. m^3 basierend auf Simulationsdaten für Werder.

Zeithorizont	Strategie	Netto-Bedarf [mm]	Brutto-Bedarf [m^3/ha]	Max. Netto-Fläche [ha]	Max. Brutto-Fläche* [ha]
Historisch (1981–2023)	Defizit (Optimum)	100	1.333	600	≈ 1.200
	Vollbewässerung	140	1.867	428	≈ 856
Zukunft (2024–2099)	Vollbewässerung	180	2.400	333	≈ 666
	Klimaresilienz	200	2.667	300	≈ 600

*Schätzung unter Annahme, dass ca. 50% der Plantagenfläche effektiv bewässert werden.

Analyse der Szenarien Die Gegenüberstellung der historischen Simulationen (1981–2023) und der Zukunftsprojektionen (2024–2099, Szenario RCP8.5) verdeutlicht die wachsenden Herausforderungen für das Wassermanagement in Werder. Historisch betrachtet stellte die gesteuerte Defizitbewässerung mit 100 mm Zusatzwasser die effizienteste Strategie dar. Mit dem Limit von 0,8 Mio. m^3 könnten unter diesen Bedingungen rechnerisch bis zu 600 ha Netto-Fläche versorgt werden, was theoretisch die Bewirtschaftung sehr großer Plantagenbereiche ermöglichen würde.

Der Blick in die Zukunft zeigt jedoch, dass der steigende Verdunstungsanspruch der Atmosphäre (Vapor Pressure Deficit) und die veränderte Niederschlagsverteilung den Wasserbedarf drastisch erhöhen. Um in Zukunft Trockenstress sicher zu vermeiden (Vollbewässerung), steigt der mittlere Bedarf auf ca. 180 mm, in Sicherheitskalkulationen für Extremjahre sogar auf weit über 200 mm. Dies halbiert die versorgbare Fläche im Vergleich zum historischen Optimum beinahe auf nur noch 300 ha Netto-Fläche.

Daraus leitet sich eine klare Handlungsempfehlung ab: Um trotz Klimawandel die bestehenden Anbauflächen mit dem begrenzten Dargebot des Glindower Sees zu sichern, ist eine Abkehr von der Vollbewässerung hin zu einer strikten, phänologisch gesteuerten Defizitbewässerung (z. B. Begrenzung auf 200 mm) notwendig. Dies maximiert die Wasserproduktivität (WP_{BW}) und verhindert die Übernutzung der lokalen Wasserressourcen.

Die neue Pumpkapazität von 640 m^3/h im Hauptbetrieb ermöglicht theoretisch die Förderung von ca. 1,2 Mio. m^3 pro Saison (bei 120 Tagen à 16 h). Der limitierende Faktor ist jedoch die nachhaltige Verfügbarkeit der Wasserressource (0,8 Mio. m^3). Um trotz steigenden Wasserbedarfs die bestehenden Anbauflächen zu halten, sollten jedoch zusätzliche Maßnahmen auf der Verbraucherseite wie die Rotation der Wassergabe, Quotierung oder alternative Bewässerungsstrategie in Betracht gezogen werden.

3.6. Frostschutzberechnung: Gefährdungsabschätzung und Wasserbedarf

3.6.1. Ereignisanalyse 2024

In den Nächten vom 21. bis 23. April 2024 verzeichneten die Low-Cost-Sensoren auf den Apfel- und Kirschplantagen ein kritisches Spätfrostereignis, das durch einströmende Kaltluft verursacht wurde. Während die DWD-Referenzstation in Potsdam Tiefstwerte von -2 °C in 2 Metern Höhe registrierte, ermöglichte das Sensornetzwerk eine detaillierte Auflösung der mikroklimatischen Verhältnisse vor Ort.

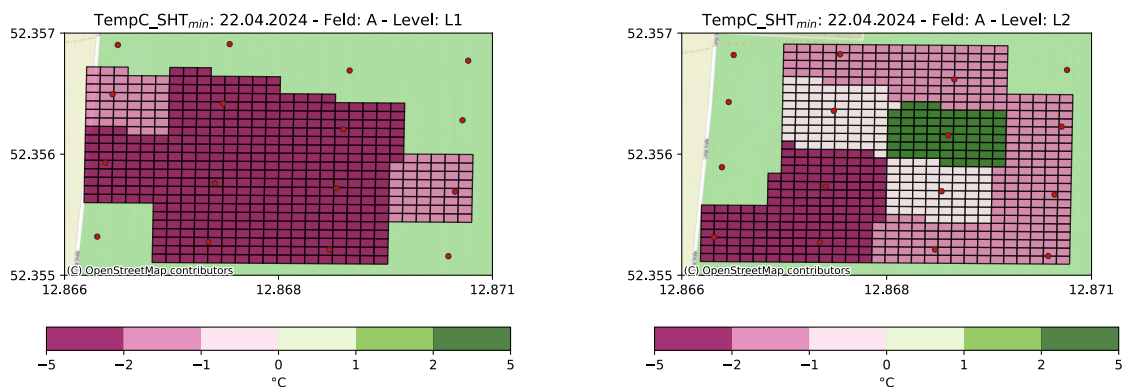


Abbildung 3.29.: Temperaturverteilung in der Apfelplantage im Bestand (links) und über dem Bestand (rechts) – T_{min} bis Mitternacht (22.4.)

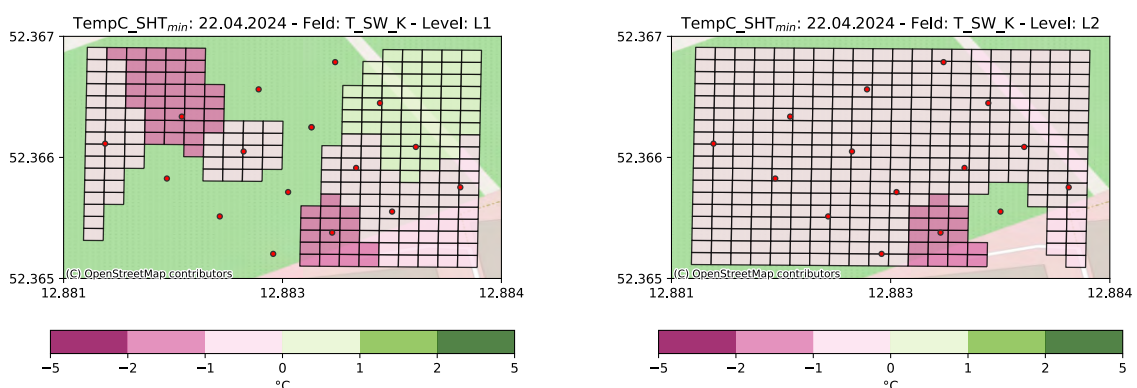


Abbildung 3.30.: Temperaturverteilung in der Kirschplantage im Bestand (links) und über dem Bestand (rechts) – T_{min} bis Mitternacht (22.4.)

Die Ereignisanalyse zeigt signifikante Temperaturunterschiede zwischen den Messhö-

hen: Die Temperaturen innerhalb des Pflanzenbestandes lagen dabei systematisch etwa 1 bis 2°C niedriger als über der Krone. Besonders in der Nacht zum 23. April, als der Wind abflachte, verstärkte sich die Bildung von Kaltluftseen. Die räumliche Analyse identifizierte spezifische Teilflächen innerhalb der Plantagen – insbesondere Senken in der Apfelanlage – als exponierte Kälteinseln, in denen die kritischen Temperaturschwellen für die Blüten früher und länger unterschritten wurden als auf Kuppen oder in der Kirschplantage. Diese Daten sind essenziell für das Risikomanagement, da sie belegen, dass Frostschtutzmaßnahmen wie die Berechnung nicht pauschal, sondern priorisiert auf diesen kälteanfälligen Teilflächen erfolgen müssen, um Ernteaufälle effizient zu vermeiden.

3.6.2. Wasserbedarf zur Frostschtutzberechnung

Basierend auf den realisierten Installationsparametern des Pumpwerks (Ist-Zustand) wird eine differenzierte Betrachtung zwischen dem regulären Hauptbetrieb (Neuinstallation) und dem Betrieb unter Zuschaltung der Notfallreserve (Altbestand) durchgeführt.

Die Werte werden im Folgenden stets im Format **Hauptbetrieb** (Hauptbetrieb + Notfallreserve) angegeben.

Technische Leistungsdaten

- **Hauptbetrieb (Neu):** 2 Pumpen à 260 m³/h + 1 Pumpe à 120 m³/h = **640 m³/h**.
- **Notfallreserve (Alt):** 3 Pumpen à 100 m³/h = 300 m³/h.
- **Gesamtkapazität:** 640 + 300 = 940 m³/h.

Verfügbare Tagesmengen (24h-Betrieb) Bei einem 24-stündigen Dauerbetrieb (z. B. zur Befüllung von Pufferspeichern) ergeben sich folgende Fördervolumina:

$$V_{\text{Tag}} = Q \cdot 24 \text{ h} = \mathbf{15.360 \text{ m}^3} \text{ (22.560 m}^3\text{)} \quad (3.4)$$

Szenarioanalyse: Frostschtutzberechnung (20 mm Gabe) Die Berechnungen basieren auf einem Wasserbedarf von 200 m³/ha für eine 6-stündige Frostnacht. Dies entspricht einem kontinuierlichen Volumenstrombedarf von 33 m³/(ha · h).

1. Direktbetrieb (Ohne Pufferung) Im Direktbetrieb ohne Zwischenspeicher ist die schützbare Fläche durch die momentane Förderleistung der Pumpen limitiert:

$$A_{\text{direkt}} = \frac{Q}{33 \text{ m}^3/(\text{ha} \cdot \text{h})} \approx \mathbf{19,4} \text{ Hektar (28,5 Hektar)} \quad (3.5)$$

Hydraulische Einordnung: Der Volumenstrom im Hauptbetrieb (**640 m³/h**) ist hydraulisch unkritisch und liegt im sicheren Bereich des Bestandsnetzes. Bei Zuschaltung der Reserve (940 m³/h) steigt der Druckverlust, bleibt jedoch für das Hauptnetz P1 (Teil A+B) technisch beherrschbar, sofern keine Engpässe in Endsträngen (z. B. Göhlsdorf) vorliegen.

2. Pufferbetrieb (Mit 24h-Speicherbewirtschaftung) Durch die Nutzung von dezentralen Speicherteichen kann die Tagesfördermenge angesammelt und in der kurzen Frostnacht ausgebracht werden:

- **Maximale schützbare Fläche:**

$$A_{\text{max}} = \frac{V_{\text{Tag}}}{200 \text{ m}^3/\text{ha}} = \mathbf{76,8} \text{ Hektar (112,8 Hektar)}$$

- **Erforderliches Speichervolumen:** Das Speichervolumen muss die Differenz zwischen dem hohen Bedarf der Frostnacht und der parallelen Nachspeisung durch die Pumpen abdecken:

$$V_{\text{Speicher}} = V_{\text{Bedarf,6h}} - V_{\text{Pumpen,6h}}$$

$$V_{\text{Speicher}} = (\mathbf{15.360} (22.560)) - (\mathbf{3.840} (5.640))$$

$$V_{\text{Speicher}} = \mathbf{11.520} \text{ m}^3 (16.920 \text{ m}^3)$$

Fazit Die im P1 installierte Neutechnik ermöglicht im dauerhaften Hauptbetrieb den Frostschutz für ca. **19 ha** im Direktzugriff oder bis zu **77 ha** bei Errichtung eines Pufferspeichers von rund **11.500 m³**. Die Hinzunahme der alten Reservepumpen würde das Potenzial theoretisch auf (113 ha) erhöhen, setzt jedoch die dauerhafte Betriebsbereitschaft der Alttechnik voraus und erhöht das Risiko hydraulischer Netzengpässe.

3.7. Zusammenfassung und Empfehlungen

Notwendigkeit der Bewässerung zur Deckung des Pflanzenwasserbedarfs und zukünftige Entwicklung. Die durchgeführten wissenschaftlichen Untersuchungen bestätigen, dass die Bewässerung der Obstplantagen in der Region Werder (Havel) eine essentielle Maßnahme zur Ertragssicherung und Qualitätserhaltung darstellt. Die Analysen historischer Klimadaten (1981–2023) und zukünftiger Klimaprojektionen (2024–2099) zeigen, dass der Standort Werder wasserlimitiert ist und der Niederschlag allein nicht ausreicht, um den Wasserbedarf der Apfelbäume vollständig zu decken. Während im Regenfeldbau sowohl die mittleren Erträge als auch deren Variabilität zunehmen, gewinnt die Zusatzbewässerung unter den projizierten Klimabedingungen (Szenario RCP8.5) zunehmend an Bedeutung, um Mindesterträge zu stabilisieren und die Ertragssicherheit gegenüber wachsenden klimatischen Unsicherheiten zu gewährleisten.

Gefährdung durch Spätfröste. Der Obstanbau in der Region Werder ist während der sensiblen Blühphase durch das Auftreten von Spätfrösten in seiner Ertragssicherheit stark gefährdet. Wie kritisch diese Situation bereits im Ist-Zustand ist, verdeutlicht die Ereignisanalyse der Frostnächte vom 21. bis 23. April 2024, bei denen einströmende Polarluft zu erheblichen Schäden führte. Die lokalen Messungen zeigten signifikante mikroklimatische Abweichungen: Die Temperaturen innerhalb des Pflanzenbestandes lagen systematisch 1 bis 2 K niedriger als über der Krone, wobei sich insbesondere in den topografischen Senken der Apfelplantage ausgeprägte Kälteinseln bildeten, in denen die kritischen Temperaturschwellen deutlich länger unterschritten wurden. Für die Zukunft weisen die durchgeführten Klimaprojektionen (2024–2099) darauf hin, dass dieses Risiko durch eine phänologische Vorverlagerung der Apfelblüte weiter zunimmt.

Förderleistung für Bewässerungsmaßnahmen und Stabilität. Der gegenwärtige Zustand der Wasserversorgung wird durch die installierten Pumpwerkkapazitäten definiert. Das Pumpwerk stellt im regulären Hauptbetrieb eine Leistung von 640 m³/h bereit, die durch die Zuschaltung der Notfallreserve auf insgesamt 940 m³/h erhöht werden kann. Die Stabilität der Versorgung ist jedoch durch das historisch gewachsene Rohrleitungsnetz begrenzt, das ursprünglich nicht für die heute geforderte Gleichzeitigkeit der Entnahmen durch Groß- und Kleinabnehmer ausgelegt war. Dies führt insbesondere bei Lastspitzen zu kritischen Versorgungsengpässen und Druckverlusten.

Jährliches natürliches Wasserdargebot. Auf Grundlage einer überschlägigen Wasserhaushaltsabschätzung ergibt sich für den Glindower See eine nachhaltig nutzbare Gesamtentnahmemenge für die Summe aller wasserwirtschaftlichen Nutzungen in einer Größenordnung von bis zu 0,8 Mio. m³/a, wobei diese Angabe als Orientierungswert zu verstehen ist und detaillierte Wasserhaushaltsberechnungen, wie sie beispielsweise im *Wasserhaushaltsportal Sachsen* auf Grundlage räumlich differenzierter Klimadaten, bodenhydrologischer Parameter und gekoppelter Modellansätze, für genauere Aussagen erforderlich sind. Dies gilt insbesondere für die Abschätzung der zukünftigen Wasserverfügbarkeit.

Hinweis zur Verwendung von Begriffen zur Bemessung von Bewässerungsflächen. Bei der Kommunikation muss zwischen der effektiven Anbaufläche (Baumreihen) und der Bruttofläche (inkl. Fahrgassen) unterschieden werden. Da bei Tropfbewässerung nur die Baumreihe bewässert wird, entspricht der Wasserbedarf für 300 ha Nettofläche einer realen Plantagenfläche von ca. 600 ha (bei 50 % Flächennutzung). Dies betrifft auch die Verwendung der Begriffe *Netto-* und *Gesamtwasserbedarf* für die Pflanzenbestände unter Berücksichtigung des Bewässerungswirkungsgrads der verwendeten Bewässerungsmethode. Davon sind die Wasserbedarfe zur Frostschutzbewässerung zu unterscheiden.

Empfehlungen

1. Detaillierte Wasserhaushaltsberechnung. Um die langfristige Versorgungssicherheit der Obstplantagen zu gewährleisten und eine fundierte Basis für zukünftige wasserrechtliche Erlaubnisverfahren zu schaffen, wird eine detaillierte Wasserhaushaltsberechnung mit den folgenden Inhalt empfohlen:

- **Detaillierte Modellierung:** Durchführung räumlich hochaufgelöster Wasserhaushaltsberechnungen auf Grundlage räumlich differenzierter Klimadaten und bodenhydrologischer Parameter,
- **Messkampagne:** Integration einer Messkampagne zur Erfassung der realen hydraulischen Austauschbeziehungen mit den verbundenen Gewässern (Havel, Großer Plessower See).
- **Zukunftsprognose:** Abschätzung der zukünftigen Wasserverfügbarkeit unter Berücksichtigung der Klimaprojektionen (Szenario RCP8.5), da bereits historische Daten eine Wasserlimitierung des Standortes zeigen und der Bewässerungsbedarf zukünftig steigen wird.

2. Grobe Schätzung des minimalen Netto-Wasserbedarfs. Es wird empfohlen, für die kurzfristige Kapazitätsplanung pauschal einen Netto-Bedarf von 200 mm

pro m^2 zur Deckung des Pflanzenwasserbedarfs von Apfelbäumen anzusetzen. Dieser Wert deckt auf Basis der lokalen Messungen das Defizit auch in trockenen Jahren (wie 2023/2025) ab, sofern der Bodenwasserspeicher im Frühjahr gefüllt ist und die Wassergabe effizient gesteuert wird. Dies resultiert in einer effektiven Anbaufläche zur Bewässerung von ca. 300 ha ohne Berücksichtigung der Frostschutzbewässerung. Es kann jedoch angenommen werden, dass der aktuelle Betrieb der Bewässerungsanlagen ineffizienter ist und der aktuelle Verbrauch über dieser Annahme liegt. Deshalb sollte der Verbrauch pro Flächeneinheit für alle Betriebe statistisch auf Basis von Verbrauchsmessungen ausgewertet werden.

3. Anpassung an den Klimawandel. Planungen sollten einen zukünftigen Netto-Wasserbedarf für Vollbewässerung von bis zu 250 mm (statt bisher ca. 200 mm) berücksichtigen, um auch unter den Bedingungen des Klimawandels (Szenario RCP8.5) Ertragsicherheit zu gewährleisten. Dies könnte durch den Einsatz einer Defizitbewässerungsstrategie auf 200 mm reduziert werden.

4. Anpassung der Wasser-Tarife auf der Basis des pauschalen Wasserbedarfs Die Wasserpreise können in einem zweistufigen Tarif unter Berücksichtigung des Netto-Bedarfs von 200 mm pro m^2 und der Anbaufläche in einem Basispreis für die Wassermenge aus Nettobedarf mal Anbaufläche und einen erhöhten Preis für die darüberliegende Wassermenge gestaffelt sein, um eine höhere Effizienz der Bewässerungsanlagen zu erreichen.

5. Einsatz von Tropfbewässerung. Die hydraulischen Modellierungen von Bewässerungssystemen favorisieren den Einsatz von Tropfbewässerungsanlagen zur Deckung des Pflanzenwasserbedarfs. Diese Konfiguration erweist sich als effektiv, wenn Bewässerungszeiten länger (bis zu 5 h) sind und gleichzeitig seltener (wöchentlich) bewässert wird. Zusätzlich hat sich herausgestellt, dass Bewässerungsmaßnahmen zur Deckung des Pflanzenwasserbedarfs vor Mai keinen zusätzlichen Nutzen erbringen.

6. Einsatz von Frostschutzbewässerung, aber Priorisierung von Kälteinseln beim Frostschutz. Die Bereitstellung einer wirksamen Frostschutzberegnung ist angesichts der durch den Klimawandel bedingten phänologischen Verfrühung der Blüte und der damit steigenden Spätfrostgefahr eine unverzichtbare Maßnahme zur Vermeidung von Ernteaussfällen. Da ein flächendeckender Frostschutz hydraulisch nicht darstellbar ist, müssen Schutzmaßnahmen auf mikroklimatische "Kälteinseln" (z. B. Senken) konzentriert werden. Die installierten Sensoren haben gezeigt, dass Temperaturunterschiede von 2–4 K zwischen einzelnen Standorten auftreten, was eine gezielte Priorisierung einzelner Standorte ermöglicht.

7. Dezentrale Pufferung für Spitzenlasten. Die erforderliche Förderleistung und die hydraulische Kapazität des Verteilungsnetzes übersteigen die momentane Förderleistung der Pumpen deutlich. Zur Realisierung des Frostschutzes auf einer Gesamtfläche größer als 19 ha ist die Errichtung dezentraler Speicherbecken zwingend erforderlich, die über 24 Stunden hinweg mit niedriger Last befüllt und in der Frostnacht mittels Booster-Pumpen entleert werden.

8. Hydraulische Entlastung der Endstränge. Die Bestandsanalysen zeigen massive Druckverluste in den Endsträngen (z. B. Knoten 29, Bereich Göhlsdorf) bei hohen Entnahmeraten. Bewässerungspläne müssen so gestaltet werden (z. B. durch einen 7-Tages-Zyklus), dass die kritische Netzbelastung nicht überschritten wird, um Unterdruckschäden zu vermeiden.

9. Anbau spätblühender Sorten mit trockenresistenter Unterlage Es wird empfohlen, als begleitende Klimaanpassungsmaßnahme die Eignung spätblühender Obstsorten zu prüfen.

10. Standortspezifisches Monitoring. Die Fortführung des Monitorings mittels Tensiometern, Bodenfeuchtesensoren und preiswerten IoT-Klimastationen wird empfohlen. Die räumliche Auflösung kann jedoch sehr viel gröber als die implementierten Sensorfelder zur Temperatur- und Feuchtemessung sein. Dies hilft der Priorisierung betroffener Flächen zur Frostschtzbewässerung und ermöglicht auch die Abschätzung der räumlichen Variabilität des Pflanzenwasserbedarfs der Pflanzenbestände.

Danksagung

An dieser Stelle möchten wir uns bei allen Projektbeteiligten bedanken. Ein besonderer Dank gilt der Stadt Werder, insbesondere Herrn Stefan Marten als Auftraggeber des Projektes, für die gute Kooperation. Ebenfalls bedanken möchten wir uns beim Betrieb Havelfrucht GmbH, insbesondere bei Herrn Giese und Herrn Bertz, für die Unterstützung und Beratung vor Ort. Außerdem möchten wir uns bei Frau Martina Otto vom LfU Brandenburg für den guten Austausch bedanken. Unser Dank gilt auch dem Land Brandenburg für die Finanzierung des Projektes.

Prof. Dr. Thomas Wöhling und Falk Wieland haben uns maßgeblich beim Aufbau und Betrieb des Messsystems unterstützt. Corina Hauffe hat bei der Durchsicht des Berichts geholfen. Ihnen danken wir sehr herzlich.

Weiterhin danken wir den Studierenden Christin Bertold, Katrin Blauth, Katja Ehrenberg, Pauline Hecker und Martin Zott für Ihre Unterstützung durch ihre Tätigkeit im Praktikum und bei ihren Abschlussarbeiten.

Schließlich haben uns Simon Rietschel und Christian Rudolf von der Firma IoT Plan geholfen, alle Probleme der Datenübertragung in den Griff zu bekommen und mit den Low-Cost Sensoren eine neue Beobachtungsmethode zu untersuchen.

Dresden, den 31. Januar 2026

Literatur

- Allen, Richard, L. Pereira und M. Smith (1998). „Crop evapotranspiration - Guidelines for computing crop requirements.“ In: *FAO Irrigation and drainage, Paper 56*.
- Annandale, J. G. und Claudio O. Stockle (1994). „Fluctuation of crop evapotranspiration coefficients with weather: a sensitivity analysis“. In: *Irrigation Science*.
- Atkinson, Christopher et al. (Sep. 1999). „Drought tolerance of apple rootstocks: Production and partitioning of dry matter“. In: *Plant and Soil* 206, S. 223–235. DOI: [10.1023/A:1004415817237](https://doi.org/10.1023/A:1004415817237).
- Azzeddine, Chenafi et al. (Juni 2014). „Evaluation of regulated deficit irrigation for apple trees cv. 'gala' based on midday stem water potential and soil matrix potential“. In: *Acta Horticulturae* 1038, S. 137–144. DOI: [10.17660/ActaHortic.2014.1038.15](https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2014.1038.15).
- Boaga, Jacopo, Matteo Rossi und Giorgio Cassiani (2013). „Monitoring Soil-plant Interactions in an Apple Orchard Using 3D Electrical Resistivity Tomography“. In: *Procedia Environmental Sciences* 19. Four Decades of Progress in Monitoring and Modeling of Processes in the Soil-Plant-Atmosphere System: Applications and Challenges, S. 394–402. ISSN: 1878-0296. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.proenv.2013.06.045>.
- Doorenbos, J. und W. Pruitt (1977). „Guidelines for predicting crop water requirements.“ In: *FAO Irrigation and Drainage, Paper 24*.
- Dragoni, D., A. Lakso und R. Piccioni (Mai 2005). „Transpiration of apple trees in a humid climate using heat pulse sap flow gauges calibrated with whole-canopy gas exchange chambers“. In: *Agricultural and Forest Meteorology* 130, S. 85–94. DOI: [10.1016/j.agrformet.2005.02.003](https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2005.02.003).
- Dyck, Siegfried und Gerd Peschke (1995). *Grundlagen der Hydrologie*. 3., stark bearb. Aufl. Berlin: Verl. für Bauwesen. ISBN: 3345005867.
- Fallahi, Esmaeil et al. (2010). „Efficient Irrigation for Optimum Fruit Quality and Yield in Apples“. In: *HortScience* 45, S. 1616–1619. DOI: [10.21273/HORTSCI.45.11.1616](https://doi.org/10.21273/HORTSCI.45.11.1616).
- Girona, Joan et al. (2011). „A comparative study of apple and pear tree water consumption measured with two weighing lysimeters“. In: *Irrigation Science* 29, S. 55–63. ISSN: 1432-1319. DOI: [10.1007/s00271-010-0217-5](https://doi.org/10.1007/s00271-010-0217-5).

- Granier, A. (1985). „Une nouvelle méthode pour la mesure du flux de sève brute dans le tronc des arbres“. In: *Ann. For. Sci.* 42.2, S. 193–200. DOI: [10.1051/forest:19850204](https://doi.org/10.1051/forest:19850204).
- Green, Steve und Brent Clothier (1998). „The root zone dynamics of water uptake by a mature apple tree“. In: *Plant and Soil* 206.1, S. 61–77. ISSN: 0032079X, 15735036.
- Hecker, Pauline (2024). „Fusion von in Baumplantagen erzeugten Punktwolken mittels Handheld-Lidar und UAV-Bilddaten – Entwicklung eines Workflows“. Masterarbeit. TU Dresden.
- Jiang, X. und L. He (2021). „Investigation of effective irrigation strategies for high-density apple orchards in Pennsylvania“. In: *Agronomy* 11.4. ISSN: 2073-4395. DOI: [10.3390/agronomy11040732](https://doi.org/10.3390/agronomy11040732).
- Levin, I., R. Assaf und B. Bravdo (Juli 1980). „IRRIGATION, WATER STATUS AND NUTRIENT UPTAKE IN AN APPLE ORCHARD“. In: *Acta Horticulturae* 92, S. 255–264. ISSN: 2406-6168. DOI: [10.17660/ActaHortic.1980.92.33](https://doi.org/10.17660/ActaHortic.1980.92.33).
- Marsal, J. et al. (2013). „Crop coefficient (Kc) for apple: comparison between measurements by a weighing lysimeter and prediction by CropSyst“. In: *Irrigation Science* 31.3, S. 455–463. ISSN: 1432-1319. DOI: [10.1007/s00271-012-0323-7](https://doi.org/10.1007/s00271-012-0323-7).
- Meier, Uwe (2018). „Growth stages of mono- and dicotyledonous plants: BBCH Monograph“. en. In: *Open Agrar Repository*. DOI: [10.5073/20180906-074619](https://doi.org/10.5073/20180906-074619).
- Mpelasoka, B., M. Behboudian und S. Green (2001). „Water use, yield and fruit quality of lysimeter-grown apple trees: responses to deficit irrigation and to crop load“. In: *Irrigation Science* 20.3, S. 107–113. ISSN: 1432-1319. DOI: [10.1007/s002710100041](https://doi.org/10.1007/s002710100041).
- Odi-Lara, Magali et al. (2016). „Estimating Evapotranspiration of an Apple Orchard Using a Remote Sensing-Based Soil Water Balance“. In: *Remote Sensing* 8.3. ISSN: 2072-4292. DOI: [10.3390/rs8030253](https://doi.org/10.3390/rs8030253).
- Ramm, Kerstin (1999). *Seenberichte: Parsteiner See, Glindowsee, Großer Plessower See*. Studien und Arbeitsberichte Heft 8. PDF online verfügbar; Zugriff am 27.01.2026. Rangsdorf: Natur und Text. ISBN: 3-9805567-6-X.
- Schopfer, Peter und Axel Brennicke (2010). *Pflanzenphysiologie*. Heidelberg: Spektrum, Akad. Verl. ISBN: 9783827423511.
- Sharma, D. und J. Chauhan (Nov. 2005). „Effect of different rootstocks on root distribution of apple“. In: *Acta Horticulturae* 696, S. 167–171. DOI: [10.17660/ActaHortic.2005.696.28](https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2005.696.28).
- Sokalska, D. et al. (2009). „Spatial root distribution of mature apple trees under drip irrigation system“. In: *Agricultural Water Management* 96.6, S. 917–924. ISSN: 0378-3774. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2008.12.003>.

- Steduto, P. et al. (2012). „Crop Yield Response to Water. FAO Irrigation and Drainage Paper 66.“ In: *Experimental Agriculture* 49. ISSN: 0014-4797. DOI: [10.1017/S0014479712001366](https://doi.org/10.1017/S0014479712001366).
- Tanasescu, N. und Cristian Paltineanu (Jan. 2004). „Root distribution of apple tree under various irrigation systems within the hilly region of Romania“. In: *International Agrophysics* 18.
- Webster, A. D. und S. J. Wertheim (2003). *Botany, Production and Uses*. CABI International, S. 91–124.
- Zott, Martin (2025). „Testung des Bewässerungsmanagements von Apfelplantagen an verschiedenen mitteldeutschen Standorten“. Magisterarb. TU Dresden.

A. Verzeichnisse

Abbildungsverzeichnis

3.1	Installierte Sensorik im Feld und Bodenprobenahme	10
3.2	Karte des Potsdamer Bogens der Havel mit Glindower See und Großem Plessower See. Quelle: Wikipedia	19
3.3	Monatliche ET_0 -Werte 1991-heute	23
3.4	Tägliche ET_0 -Werte 1991-heute	23
3.5	Monatliche ET_c -Werte 2016-heute	24
3.6	Tägliche ET_c -Werte 2016-heute	25
3.7	Integration relevanter Daten in der Projektdatenbank	26
3.8	Bodenkarten des Landes Brandenburg im Projektgebiet: a) BÜK200 der BGR. b) BÜK300 des Geoportals Brandenburg (Inspire).	27
3.9	Pflanzenbestand auf der Apfelplantage zu unterschiedlichen Jahreszeiten	28
3.10	Saisonaler Verlauf des kc-Faktors nach FAO für den Apfelanbau mit Frostperioden und ohne Bodenbedeckung in Abhängigkeit des laufenden Jahrestages. Der Start der Initialphase ist variabel und hängt von den jährlichen Witterungsbedingungen ab.	29
3.11	Felder im Monitoring sowie Standorte der LowCost-Sensoren zur Messung von Temperatur und Luftfeuchte (rot, siehe auch Tab. B.1)	31
3.12	Skizze des Leitungsnetzes für P_{Brauch} und P_1	32
3.13	Entwicklung der Tagesmittelwerte für Temperaturen für verschiedene Datenquellen und Standorte	34
3.14	Entwicklung der Tagesminima für Temperaturen für verschiedene Datenquellen und Stand- orte	35
3.15	Entwicklung der Tagesmaxima für Temperaturen für verschiedene Datenquellen und Stand- orte	35
3.16	Entwicklung der Tagessummen für Niederschläge für verschiedene Datenquellen	35

3.17 Standorte der Wetterstation (blau), der Bodenmessstation (gelb) sowie der LowCost-Sensoren zur Messung der Temperatur und relativen Luftfeuchte (rot) in der Plantage Apfel 2	36
3.18 Vorgefundene Bodenhorizonte sowie Mächtigkeiten in den Bohrstockanalysen	37
3.19 Bodenschurf auf der Plantage Apfel 2	38
3.20 Bodenmessstation in der Plantage Apfel 2	39
3.21 Wetterstation in der Plantage Apfel 2	40
3.22 Temperaturverteilung kalte Nacht - Apfelplantage im Bestand	41
3.23 Boden- und Saftfluss-Messsystem	43
3.24 Modellgebiet als Ausschnitt des Messsystems mit Tropfern, Bäumen: B, Tensiometern: T, Feuchtesensoren: θ , Saftflusssensoren: S.	44
3.25 Modell Setup	44
3.26 Wurzelverteilung Längsschnitt	45
3.27 Bewässerung mit 2 l/h Tropfer für 2h und 5 h mit entsprechend 8 mm und 20 mm Bewässerungsmenge	46
3.28 Erträge und Wasserbedarfe für verschiedene bewässerungsstrategien für den Zeitraum 2024–2099 für das Emissionsszenario RCP8.5	53
3.29 Temperaturverteilung in der Apfelplantage im Bestand (links) und über dem Bestand (rechts) – T_{min} bis Mitternacht (22.4.)	56
3.30 Temperaturverteilung in der Kirschplantage im Bestand (links) und über dem Bestand (rechts) – T_{min} bis Mitternacht (22.4.)	56

Tabellenverzeichnis

3.1 Zusammenfassung der in der Literaturrecherche gefundenen k_c -Faktoren für Apfelbäume .	16
3.2 Parameter für den Wurzelwasserentzug von Apfelbäumen unterschiedlichen Alters aus der Literatur	18
3.3 Vergleich der gemessenen klimatischen Wasserbilanzen (KWB) während der Vegetationsperiode zwischen der DWD-Station Potsdam und der lokalen Energiebilanzstation Werder (Datenbasis: 2023–2025).	25
3.4 Vorhandene Datenprodukte und Länge der Zeitreihen	26
3.5 Kornzusammensetzung der im Untersuchungsgebiet vorkommenden Bodenarten	28

3.6	k_c -Werte und Länge der Vegetationsperioden für Apfel (mit Frostperioden, ohne Bodenbedeckung) nach FAO mit variablem Beginn der Vegetationsentwicklung am $DOY_{Start,ini}$. DOY steht für den laufenden Jahrestag (day of the year). DOY Start und DOY Ende für einen beispielhaften Verlauf der Vegetationsentwicklung innerhalb eines Jahres mit Beginn der Vegetationsentwicklung am 1. Mai (DOY 121).	29
3.7	Vorläufige Beschreibung der Wurzelgeometrie	30
3.8	Installierte Sensorik	31
3.9	Betriebsdaten Brauchwasser von April bis Juni 2023	33
3.10	Durchgeführte Bohrstockanalysen im Untersuchungsgebiet	38
3.11	Simulierte mittlere Erträge und Bewässerungsmengen für den Standort Werder (1981–2023) unter verschiedenen Anfangsbedingungen (FC = Feldkapazität, 50nFK = 50% nutzbare Feldkapazität).	52
3.12	Simulierte mittlere Erträge und Bewässerungsmengen für den Standort Werder im Zukunftszeitraum (2024–2099) unter dem Szenario RCP8.5.	53
3.13	Kalkulierte Bewässerungskapazitäten bei einem jährlichen Dargebot von 0,8 Mio. m^3 basierend auf Simulationsdaten für Werder.	55
B.1	Übersicht der installierten Messsysteme im Projektgebiet Werder mit Installationszeiträumen und erfassten Parametern, basierend auf den Feldprotokollen und dem Abschlussbericht.	74

B. Installierte Messinfrastruktur

Das Monitoring-Konzept basiert auf einem mehrstufigen Ansatz, der atmosphärische, pedologische und pflanzenphysiologische Parameter integriert. Das Rückgrat der Datenerfassung bilden die Low-Cost-Sensoren, die ab Oktober 2022 ein hochaufgelöstes Bild des Mikroklimas (Temperatur und Feuchte) in den Beständen lieferten. Um diese Daten zu validieren und detaillierte Energiebilanzen zu berechnen, wurde im März 2023 eine komplexe Campbell-Klimastation installiert, die die volle Strahlungsbilanz und den Bodenwärmestrom erfasst. Ergänzend wurde im Oktober 2023 eine Barani-Klimastation (MeteoHelix/MeteoWind) installiert. Diese dient als Bindeglied zwischen den hochpräzisen Daten der Campbell-Station und den flächigen Low-Cost-Sensoren, da sie WMO-Standards erfüllt, aber kostengünstiger und wartungsärmer ist. Im Bodenbereich liefert die Bodenwasserstation seit Mai 2023 entscheidende Daten zur Wasserverfügbarkeit, wobei hier die Kombination aus Wassergehalt (Teros 12) und Saugspannung (Tensiometer) eine detaillierte Analyse des Pflanzenstresslevels ermöglicht. Komplettiert wird das System durch Saftflusssensoren, die seit März 2024 die direkte Transpiration der Bäume messen und so die Reaktion der Pflanze auf die atmosphärischen Bedingungen quantifizieren.

B. Installierte Messinfrastruktur

Tabelle B.1.: Übersicht der installierten Messsysteme im Projektgebiet Werder mit Installationszeiträumen und erfassten Parametern, basierend auf den Feldprotokollen und dem Abschlussbericht.

Messsystem	Startdatum	Status / Ende	Erfasste Messgrößen
Low-Cost-Sensoren (100 Sensoren + Gateway)	01.10.2022	30.10.2025 (Vertragsende)	Lufttemperatur, Relative Luftfeuchte (in 2 Höhen: Bestand & über Krone),
Drohnenbefliegung (Laserscanning)	19.10.2022	Einmalige Kampagne	3D-Punktwolken, Geländemodell (DGM), Vegetationsstruktur,
Campbell-Klimastation (Energiebilanzstation)	08.03.2023	In Betrieb	Lufttemp., rel. Feuchte, Wind (v & dir), Niederschlag, 4-Komponenten-Strahlung (kurz/lang, ein/aus), Bodenwärmestrom
Bodenwasserstation (Monitoring Boden)	17.05.2023	In Betrieb	Bodenfeuchte (volumetrisch), Boden- temperatur, Elektr. Leitfähigkeit (EC), Saugspannung (Tensiometer)
Barani-Klimastation (MeteoHelix/Wind/Rain)	26.10.2023	In Betrieb	Lufttemp., rel. Feuchte, Luftdruck, Globalstrahlung, Niederschlag, Wind (v & dir),
Saftflusssensoren (3 x UGT SFM-5)	07.03.2024	In Betrieb	Transpirationsrate (Saftfluss)