

Loseblatt # 7

AGROFORSTLICHE LANDNUTZUNG ALS ANPASSUNGSSTRATEGIE AN DEN KLIMAWANDEL AM BEISPIEL VON UNTERSUCHUNGEN ZUM VERDUNST- TUNGSSCHUTZ IN SÜD-BRANDENBURG

Michael Kanzler, Christian Böhm



Agroforstliche Landnutzung als Anpassungsstrategie an den Klimawandel am Beispiel von Untersuchungen zum Verdunstungsschutz in Süd-Brandenburg

Autoren

Michael Kanzler, Christian Böhm

Anschriften und Kontaktdaten

Michael Kanzler, Brandenburgische Technische Universität Cottbus-Senftenberg, Fachgebiet Bodenschutz und Rekultivierung, Konrad-Wachsmann-Allee 6, 03046 Cottbus
e-mail: kanzlmic@b-tu.de

Dr. Christian Böhm, Brandenburgische Technische Universität Cottbus-Senftenberg, Fachgebiet Bodenschutz und Rekultivierung, Konrad-Wachsmann-Allee 6, 03046 Cottbus
e-mail: boehmc@b-tu.de

Forschungsprojekt

"Innovationsgruppe AUFWERTEN – Agroforstliche Umweltleistungen für Wertschöpfung und Energie"

Projektlaufzeit: 01.11.2014 bis 31.07.2019

URL: <http://agroforst-info.de/>

Förderung und Förderkennzeichen:

Die Förderung des Projektes erfolgte durch das Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) innerhalb des Rahmenprogramms Forschung für Nachhaltige Entwicklung (FONA)

Förderkennzeichen: 033L129

Die Verantwortung für den Inhalt dieses Loseblattes liegt bei den Autoren.

Cottbus, den 28.04.2020

INHALTSVERZEICHNIS

Abbildungsverzeichnis.....	2
Zusammenfassung	3
1 Einleitung	4
2 Material und Methoden.....	5
2.1 Lage und Beschreibung der Versuchsfläche	5
2.2 Versuchsaufbau.....	6
2.3 Messung der meteorologischen Kenngrößen.....	7
2.4 Datenaufbereitung.....	8
3 Ergebnisse und Diskussion	8
3.1 Makroklimatische Ausgangsbedingungen	8
3.2 Mikroklimatische Quantifizierung der potentiellen Verdunstung.....	9
3.3 Zusammenhang zwischen der potentiellen Verdunstung und anderen meteorologischen Parametern.....	12
4 Schlussfolgerungen	13
Literatur	13

ABBILDUNGSVERZEICHNIS

Abbildung 1: Schematische Darstellung des Versuchsaufbaus Agroforst-Demonstrationsfläche bei Neu Sacro in den Jahren 2016 und 2017.	6
Abbildung 2: Aufbau der Piché-Evaporimeter im 48 m breiten Ackerstreifen des Kurzumtrieb-Alley-Cropping-Systems bei Neu-Sacro in der Vegetationsperiode 2016.....	7
Abbildung 3: Klimatische Wasserbilanz der beiden Untersuchungsjahre a.) 2016 und b.) 2017. Die Niederschlags-, Lufttemperatur-, Dampfdruck- und Luftfeuchtedaten stammen von der DWD-Wetterstation in Cottbus. Die potentielle Evapotranspiration über Grassland (ET_p) nach Penman wurde mit Cropwat 8.0 auf Grundlage dieser Daten berechnet.	9
Abbildung 4: Ergebnisse der Evaporationsmessungen nach Piché aus dem Jahr 2016 am a.) 18. b.) 19. c.) 20. Juli sowie am d.) 31. August. Links oben sind die Summe der Globalstrahlung (G) und die Mittelwerte der Lufttemperatur (T), relativen Luftfeuchtigkeit (rF), der Windgeschwindigkeiten (u) sowie die Hauptwindrichtung(en) (WR) für die jeweiligen Messtage auf der Freifläche angegeben. Unterschiedliche Buchstaben zwischen den Messpositionen stehen für statistisch signifikante Unterschiede ($p \leq 0.05$, Einfaktorielle Varianzanalyse mit post-hoc Test). W = leeseitig bzw. westlich, O = luvseitig bzw. östlich von der Ackermitte (M) aus gesehen, Ref = Freifläche	10
Abbildung 5: Ergebnisse der Evaporationsmessungen nach Piché aus dem Jahr 2017 am a.) 23.05 b.) 02. c.) 11. und d.) 20. Juni. Links oben sind die Summe der Globalstrahlung (G) und die Mittelwerte der Lufttemperatur (T), relativen Luftfeuchtigkeit (rF), der Windgeschwindigkeiten (u) sowie die Hauptwindrichtung(en) (WR) für die jeweiligen Messtage auf der Freifläche angegeben. Unterschiedliche Buchstaben zwischen den Messpositionen stehen für statistisch signifikante Unterschiede ($p \leq 0.05$, Einfaktorielle Varianzanalyse mit post-hoc Test). W = leeseitig bzw. westlich, O = luvseitig bzw. östlich von der Ackermitte (M) aus gesehen, Ref = Freifläche ..	11
Abbildung 6: Zusammenhang zwischen der durchschnittlichen potentiellen Evaporation nach Piché mit a.) den durchschnittlichen Windgeschwindigkeiten und b.) dem durchschnittlichen Wasserdampfdruckdefizit während der drei Untersuchungstermine mit Winterweizen im Jahr 2016.....	12
Abbildung 7: Zusammenhang zwischen der durchschnittlichen potentiellen Evaporation nach Piché mit a.) den durchschnittlichen Windgeschwindigkeiten und b.) dem Wasserdampfdruckdefizit während der vier Untersuchungstermine im Jahr 2017.....	12

ZUSAMMENFASSUNG

Die regionale Wasserverfügbarkeit ist ein entscheidender Produktionsfaktor für landwirtschaftliche Kulturpflanzen, wird jedoch als Folge des Klimawandels aller Voraussicht nach künftig einer stärkeren Limitierung unterworfen sein. Für das durch Frühjahr- bzw. Sommertrockenheit einschneidend geprägte Bundesland Brandenburg könnte eine pflanzenbaulich ungünstige Niederschlagsverteilung sowie eine erhöhte Verdunstung während der Vegetationsperiode das landwirtschaftliche Produktionsrisiko weiter verschärfen bzw. in einer stärkeren Ertragsvariabilität münden. Folglich sind Klimaanpassungsmaßnahmen zur Steigerung der standörtlichen Wasserverfügbarkeit in dieser sensiblen Region dringend erforderlich. Die folgende Studie widmet sich Untersuchungen zur potentiellen Evaporation und deren meteorologischen Einflussparameter auf einer konventionell genutzten Agroforstfläche in Süd-Brandenburg. Ziel war es, auf der Basis erhobener mikroklimatischer Daten erste Aussagen bezüglich der potentiellen Eignung der Agroforstwirtschaft als mögliche Landnutzungsalternative in einer besonders stark durch Wasserdefizite geprägten Region zu treffen. Hierfür wurden räumlich und zeitlich hochauflösende Klimamessungen in einem von bis zu 5 m hohen Pappelhecken abgegrenzten Ackerstreifen eines im Kurzumtrieb bewirtschafteten Alley-Cropping Systems (SRACS; englisch: Short Rotation Alley Cropping System) sowie auf einer angrenzenden Freifläche durchgeführt. Die Erhebung der potentiellen Evaporation sowie von weiteren aus pflanzenbaulicher Sicht wichtigen meteorologischen Kenngrößen erfolgte während der Frühjahrs- bzw. Sommermonate der Jahre 2016 und 2017. Die Auswertung der insgesamt acht Messtermine ergab, dass im SRACS durchschnittlich etwa ein Drittel weniger Wasser verdunstet wurde als auf der konventionell bewirtschafteten Ackerfläche. Der Verdunstungsanspruch wurde dabei maßgeblich durch die Windgeschwindigkeit sowie das Wasserdampfdruckdefizit (WDD) bestimmt. Beide Parameter sind wiederum nachweislich durch die vorhandenen Gehölzstrukturen im SRACS zugunsten einer Erhöhung der potentiellen Wasserverfügbarkeit modifiziert worden. Diese ersten Ergebnisse weisen auf eine vielversprechende regionale Klimaanpassungsmaßnahme hin, müssen jedoch in Folgeuntersuchungen u.a. bei abweichenden Heckenabständen, anderen Witterungsbedingungen und Kulturpflanzen bestätigt werden.

1 EINLEITUNG

Eine reduzierte Wasserverfügbarkeit in Kombination mit einer höheren Verdunstungsnachfrage könnte sich künftig stärker negativ auf die landwirtschaftliche Produktivität und die Wassernutzungseffizienz der Kulturpflanzen auswirken und in einer höheren Ertragsvariabilität münden (European Environment Agency 2017). So deuten Änderungen in der Niederschlagsverteilung bereits darauf hin, dass sich Dürreereignisse häufen und sich zunehmend auf das Frühjahr und den Frühsommer verlagern. Die Einflussnahme des Klimawandels auf Agrarökosysteme wird dabei eher von Witterungsextremen bestimmt, als durch die bloße Änderung der durchschnittlichen Jahrestemperatur bzw. der jährlichen Niederschlagssumme, wie sich eindrucksvoll während der europäischen Sommertrockenheit von 2003 gezeigt hat (Ciais et al. 2005; Fink et al. 2004). Die Auswirkungen auf die landwirtschaftliche Pflanzenproduktion sind jedoch äußerst komplex, was zu einer erhöhten Unsicherheit bei der Abschätzung der realen Folgen führt. Dementsprechend ist die derzeitige Landnutzung in Europa an sich ändernde klimatische Bedingungen anzupassen. Reidsma et al. (2010) betonten in diesem Zusammenhang insbesondere die Rolle der Betriebsebene für eine erfolgreiche Anpassung an die klimatischen Veränderungen. Sie argumentieren, dass über eine optimierte Bewirtschaftung und Landnutzung den potenziellen Folgen der Klimavariabilität auf die Ernteerträge sowie auf das Einkommen der Landwirte entgegengewirkt werden kann. In diesem Zusammenhang wurde die agroforstliche Landnutzung, also die parallele Nutzung von Holz mit Kulturpflanzen und/oder Nutztieren auf derselben Fläche, im internationalen Raum bereits als eine sinnvolle Nutzungsalternative für eine klimafreundliche multifunktionale Landnutzung erkannt (Dinesh et al. 2017).

Es gibt verschiedene Ausprägungen von Agroforstsystemen, wobei Windschutzhecken und Alley-Cropping Systeme (ACS) als gängige Beispiele zu nennen sind. Sowohl Windschutzhecken als auch ACS bestehen aus linearen Heckenstrukturen, bei Erstgenannten sind diese zwischen 100 und 200 m voneinander entfernt und befinden sich oft nur an Feldrändern. Im Gegensatz dazu stehen die Hecken in ACS oft deutlich dichter beieinander (10 bis 100 m) und sind somit stärker in das landwirtschaftliche System integriert (Kurz et al. 2011). Allgemein gilt die Kombination aus Kulturpflanzen und schützenden Baumreihen als wichtige Klimaanpassungsmaßnahme in der Landwirtschaft. Diese Einschätzung basiert auf Studien, welche zeigten, dass Bäume gewisse Vorteile für das Mikroklima bewirken. Dazu gehören eine Reduktion von Windgeschwindigkeit und turbulenter Strömung sowie die Beeinflussung des Transports von Wasserdampf und Wärme zwischen der Atmosphäre und der Bodenoberfläche, was potentiell zu einer effizienteren Wasserausnutzung für das Pflanzenwachstum führen kann (Böhm et al. 2014; Everson et al. 2012; Nuberg et al. 2009). Ergebnisse aus Felduntersuchungen zeigten ferner, dass neben der Windgeschwindigkeit auch zahlreiche andere meteorologische Parameter (z. B. Bodentemperatur, Windböen, Geschwindigkeit, Windrichtung, Taupunkt und Niederschlag) durch Heckenstrukturen beeinflusst werden können (Karki und Goodman 2015).

Allerdings ist der Wirkungsbereich der Agrargehölze bzw. der Heckenstrukturen auf das Mikroklima begrenzt. Normalerweise erstreckt sich dieser bis zum maximal 10-fachen der Höhe der Windschutzhecken (Brenner et al. 1995; Cleugh 1998; McNaughton 1988) und wird ferner durch die Windrichtung und die Rauigkeit der Umgebung bestimmt (Nuberg et al. 2009). Dabei sind die Veränderungen der mikroklimatischen Bedingungen in Heckensystemen in der Regel sehr komplex und werden von zahlreichen Parametern beeinflusst.

Die Auswirkung des Mikroklimas auf Kulturpflanzen oder Weiden in agroforstlich genutzten Systemen der gemäßigten Breiten wurde bereits untersucht (z.B. Hawke und Wedderburn 1994; Inurreta-Aguirre et al. 2018), wobei neben einer verringerten Windgeschwindigkeit auch eine Abkühlung der Lufttemperatur beobachtet wurde. Die meisten dieser Studien wurden jedoch in Systemen mit einreihigen Pflanzverbänden bzw. Bäumen von bis zu 30 m Höhe durchgeführt, in

denen potentielle mikroklimatische Veränderungen möglicherweise übermäßig stark durch Beschattungseffekte geprägt sind. Untersuchungen zum Mikroklima in ACS mit niedrigeren, aber mehrreihig angeordneten Bäumen blieben hingegen weitestgehend auf Studien zur Modifizierung der Windgeschwindigkeit beschränkt (Böhm et al. 2014; Kanzler et al. 2015).

Das Bundesland Brandenburg gehört zu jenen Regionen in Deutschland, in denen aller Voraussicht nach die landwirtschaftliche Produktion am stärksten von den Folgen des Klimawandels betroffen sein wird. Prognostiziert werden z.B. die Zunahme der bereits hohen Niederschlagsvariabilität, mit intensiveren Frühjahrs- und Sommertrockenphasen sowie Starkniederschlagsereignissen im Winter (MLUL 2017). Diese aus pflanzenbaulicher Sicht ungünstigen Entwicklungen könnten das landwirtschaftliche Produktionsrisiko in dieser sensiblen Region künftig weiter deutlich verschärfen. Die vorliegende Studie widmet sich daher der Agroforstwirtschaft als mögliche Alternative zur Verbesserung der standörtlichen Wasserverfügbarkeit und hieraus resultierend der Ertragsstabilität. Untersuchungsgegenstand ist dabei eine konventionell bewirtschaftete Agroforst-Demonstrationsfläche in Süd-Brandenburg, in welcher die durch Gehölzstreifen verursachte Modifikation der potentiellen Evaporation sowie deren meteorologischen Einflussparameter quantifiziert und hieraus ableitend eine mögliche Verdunstungsschutzwirkung für die angrenzenden Ackerkulturen beurteilt wird.

2 MATERIAL UND METHODEN

2.1 Lage und Beschreibung der Versuchsfläche

Die folgenden Untersuchungen wurden auf einer etwa 70 ha großen landwirtschaftlichen Nutzfläche bei Neu Sacro (Landkreis Spree-Neiße, N51 4702400, E14 3705700E, 66 m a.s.l.) durchgeführt. Diese Region zeichnet sich durch einen gleichmäßig über das Jahr verteilten durchschnittlichen Jahresniederschlag von etwa 568 mm und eine mittlere Jahrestemperatur von 9,6 ° C (Wetterstation Cottbus, ca. 30 km westlich des Versuchsgeländes, Zeitraum 1981-2010; DWD 2016) aus. Der Grundwasserspiegel des Standorts wird vom nahe gelegenen Fluss Neiße beeinflusst und variiert im Jahresverlauf zwischen 2,5 und 0,8 m unter Geländeoberfläche. Die Bodentextur des Oberbodens (0-30 cm Bodentiefe) variiert zwischen lehmigem Sand und sandigem Lehm. Bodenprofilaufnahmen in bis zu 120 cm Tiefe ergaben teils deutliche Stauwassermerkmale, die stellenweise auf eine Pseudovergleyung hinweisen. Je nach Tongehalt konnten die beiden Bodentypen Gley- und Pseudogley-Vega identifiziert werden. Generell handelt es sich bei der Versuchsfläche um eine überwiegend flache und offene Agrarlandschaft, einer ursprünglich stark durch die Neiße geprägten Auenlandschaft.

Im Jahr 2010 wurde die bisher ausschließlich konventionell genutzte Ackerfläche in ein Kurzumtriebs-Alley-Cropping System (SRACS) mit etwa 640 m langen Gehölzstreifen, die in Nord-Süd-Richtung gepflanzt wurden, umgewandelt. Diese setzen sich aus jeweils vier etwa 160 m langen Blöcken mit wechselweise Robinie (*Robinia pseudoacacia* L.) und dem Pappelklon 'Max' (*Populus nigra* L. x *P. maximowiczii* Henry) zusammen. Die insgesamt sieben Agrarholzstreifen sind ca. 11 m breit, wobei beidseitig ein jeweils 1 m breiter Puffer zu den Ackerstreifen eingeplant wurde. Der Pflanzverband besteht aus vier Doppelreihen mit einem Abstand von 0,8 m innerhalb der Doppelreihe, 1,8 m zwischen den Doppelreihen und 0,9 m innerhalb der Einzelreihe. Die durchschnittliche Pflanzdichte beträgt somit rund 9.200 Bäume ha⁻¹. Die Gehölzstreifen werden im Kurzumtrieb bewirtschaftet und somit etwa alle drei bis fünf Jahre auf den Stock gesetzt, wobei die erste Ernte im Winter 2014/2015 erfolgte. Zu Beginn der hier vorgestellten Untersuchungen im Jahr 2016 betrug die durchschnittliche Baumhöhe in den Gehölzstreifen etwa 3 m und stieg bis zum Ende der Untersuchungen auf etwa 5 m an.

Zwischen den Gehölzstreifen befinden sich 24, 48 und 96 m breite Ackerfruchtstreifen, die konventionell bewirtschaftet werden. Die Breite entspricht dabei einem Vielfachen der in dem Betrieb üblichen Maschinenarbeitsbreite. Die Fruchtfolge der letzten Jahre (2010 bis 2017) lautet wie folgt: Mais (*Zea mays* L.) – Mais – Lupine (*Lupinus* spp.) – Solarigol-Kartoffeln (*Solanum tuberosum* L.) – Winterweizen (*Triticum aestivum* L.) – Zuckerrüben (*Beta vulgaris* L. var. *altissima*) – Winterweizen (*Triticum aestivum* L. var. Patras) – Wintergerste (*Hordeum vulgare* L.). Während der Untersuchungen zum Verdunstungsschutz im ACS wurde eine etwa 50 m entfernte Freifläche mit identischer Bewirtschaftung und vergleichbaren Boden- bzw. Bodenwasserbedingungen als Vergleichsfläche mituntersucht.

2.2 Versuchsaufbau

Die Instrumentierung der Versuchsfläche erfolgte auf einem 48 m breiten Ackerstreifen. Die Messungen wurden in Abständen von 3, 9 und 15 m westlich und östlich der Hecke sowie im Zentrum (24 m) dieses Streifens durchgeführt. Als Vergleich hierzu erfolgte ebenfalls die Instrumentierung einer benachbarten, analog bewirtschafteten Reinkulturfläche, die als Referenz herangezogen wurde (Abb. 1).

Die in 3 m Entfernung zum Gehölzstreifen aufgestellten Sensoren befanden sich außerhalb des Baumkronenbereiches, da dieser sich an der Ost- und Westseite der Ackerstreifen zum Zeitpunkt der Messung lediglich auf den ersten Meter erstreckte. Die Messungen auf der konventionell bewirtschafteten Freifläche (Referenz) erfolgten in einem, nicht durch Gehölzstrukturen beeinflussten Bereich (Entfernung zu Gehölzen > 150 m in östliche und > 450 m in westliche Richtung).

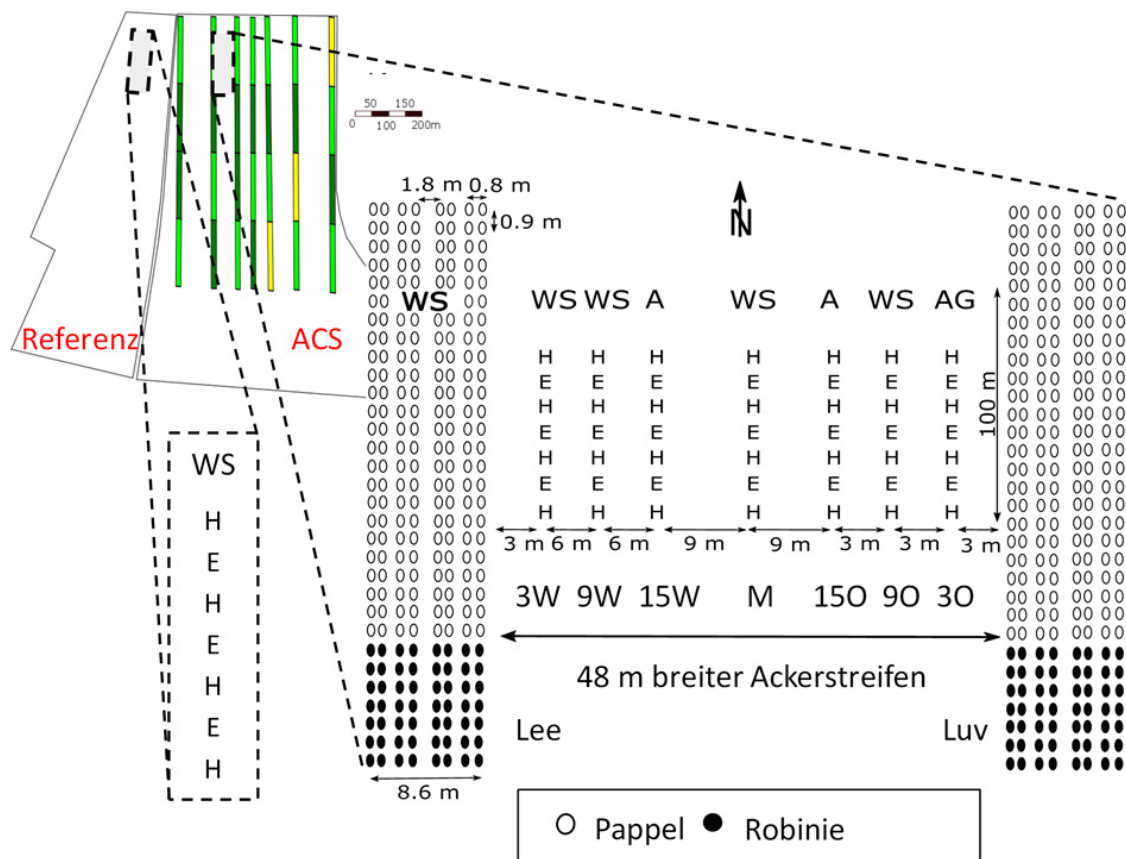


Abbildung 1: Schematische Darstellung des Versuchsaufbaus Agroforst-Demonstrationsfläche bei Neu Sacro in den Jahren 2016 und 2017. Abgebildet sind die Positionen der Hobo Pro v2 Temperatur- und Luftfeuchtesensoren (H), die Anemometer (A), die SKS1100 Sonnenstrahlungsmesser (G), die Wetterstationen (WS) und die Piché Evaporimeter (E). Lee und Luv wurden im Vorfeld der Untersuchungen basierend auf der Hauptwindrichtung der letzten Jahre definiert. Die Originalabbildung stammt aus Kanzler et al. (2019) und wurde für dieses Loseblatt modifiziert.

2.3 Messung der meteorologischen Kenngrößen

Insgesamt wurden an neun Positionen unter Verwendung von 36 Hobo Pro v2 Temperatur- und Luftfeuchte (U23001) -Datenloggern (Onset Computer Corporation, Bournemouth, MA 02532 USA) mit UV-Strahlenschutzkappen Klimamessungen durchgeführt. Um möglichst das Bestandesklima der angebauten Ackerfrüchte in Fruchthöhe zu erfassen, wurden die Hobo Pro v2 Datenlogger im Frühjahr 30 cm über der Bodenoberfläche installiert und während der Vegetationsperiode mehrfach in der Höhe angepasst (bei 70 und 110 cm). Um die Plausibilität der Temperaturmessreihen der Hobo Pro v2 Datenlogger zu gewährleisten, wurden diese mit den Datenreihen anderer Temperatursensoren (HYGROCLIP R3, Rotronic, Deutschland) von insgesamt sechs Wetterstationen abgeglichen. Zusätzlich zu den Temperatursensoren enthielten die Wetterstationen auch Sensoren zur Messung der Windgeschwindigkeit (A100R, Vector Instruments, UK), der relativen Luftfeuchtigkeit (HYGROCLIP R3, Rotronic, Deutschland), der Windrichtung (eine potentiometrische Windfahne W200P in einer Höhe von 2 m, Vector Instruments, UK) und Globalstrahlung (G, $\lambda = 400\text{--}1100\text{ nm}$), die auf Masten in einer Höhe von 1 m über der Bodenoberfläche installiert wurden.

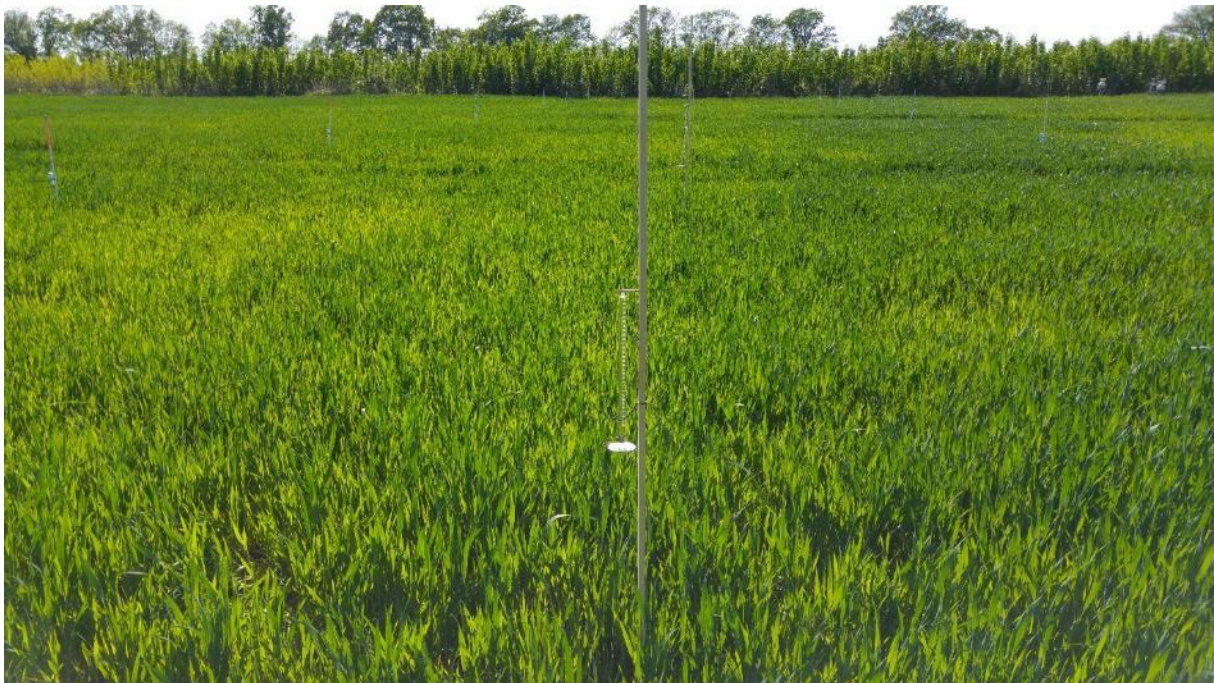


Abbildung 2: Aufbau der Piché-Evaporimeter im 48 m breiten Ackerstreifen des Kurzumtrieb-Alley-Cropping-Systems bei Neu-Sacro in der Vegetationsperiode 2016.

Die Daten wurden unter Verwendung von Datenloggern (Hobo Pro v2, GP1 und DL6, Delta-T Devices Ltd., Cambridge, UK) aufgezeichnet, wobei alle 10 Minuten eine Messung durchgeführt wurde. Um einen Vergleich der Windgeschwindigkeitsmessungen im Feld zu gewährleisten, wurden zusätzlich drei Anemometer (A100R, Vector Instruments, UK) an jeder Position, welche über keine reguläre Wetterstation verfügte, installiert. Die Quantifizierung der potentiellen Evaporation, die mit dem atmosphärischen Verdunstungsanspruch (AED; englisch: Atmospheric Evaporative Demand) gleichzusetzen ist, erfolgte mit Hilfe von Piché-Evaporimetern (Thies CLIMA, Göttingen, Deutschland, 33 cm Glasröhre; Abb. 2), welche an sechs Positionen im Ackerstreifen und an einer Position auf der Referenzfläche in jeweils dreifacher Wiederholung installiert wurden. Die Justierung der Piché-Evaporimeter erfolgte in 110 cm über der Bodenoberfläche, die Glasröhren wurden anschließend mit ungefähr 36 ml destilliertem Wasser gefüllt. Am Boden der Glasröhre wurde ein Filterpapier (140 g m^{-2} , $A = 23,8\text{ cm}^2$) montiert, das zum Druckausgleich in der Mitte perforiert und für 24 h im Feld belassen wurde. Die Wasserstände konnten anschließend direkt auf

einer Skala am Glasrohr abgelesen werden. Der abgelesene Wert entspricht dem Verdampfungswert, ausgedrückt in ml Wasser, mit einer Messgenauigkeit von 0,1 ml. Zusammenfassend erfolgten acht Messungen an regenfreien Tagen während der Sommermonate der beiden Untersuchungsjahre 2016 und 2017 bei unterschiedlichen Witterungsbedingungen.

2.4 Datenaufbereitung

Die Daten der Lufttemperatur und der relativen Luftfeuchtigkeit wurden in 10-minütigen Meßintervallen unter Verwendung von HOBO Pro v2 Datenloggern in vier Wiederholungen für jede Position ($n = 4$) aufgezeichnet. Alle 10 min-Werte wurden gemittelt und anschließend unter Verwendung der folgenden Gleichungen nach Gigon et al. (2004) zur Berechnung der zeitlich korrespondierenden Wasserdampfdruckdefizite (WDD) genutzt:

$$WDD = P_s(T_L) - P_a(T_L) \quad (1)$$

$$P_s(T_L) = 6,105 * 10^{\{7,45 * T_L / (235 + T_L)\}} \quad (2)$$

$$P_a(T_L) = \frac{rF}{100} * P_s(T_L) \quad (3)$$

T_L = Lufttemperatur, P_s = gesättigter Dampfdruck (hPa), rF = relative Luftfeuchtigkeit und P_a = aktueller Dampfdruck. Die beiden Dampfdruckparameter wurden anschließend von hPa in kPa für den Vergleich mit anderen Studien umgerechnet.

Die statistische Analyse wurde unter Verwendung der Software SigmaPlot (Systat Software, San Jose, CA, Version 12.5, 2011) durchgeführt. Alle Daten wurden mit dem Shapiro-Wilk-Test (W-Test) und dem Levene`s-Test auf Normalität und Varianzhomogenität getestet. Für normalverteilte Daten wurde die Einweg-ANOVA verwendet, alternativ die Kruskal-Wallis-ANOVA nach Rängen durchgeführt. Um signifikante Unterschiede zwischen den Positionen innerhalb des Gasenanbausystems festzustellen (z.B. Piché-Verdunstung), wurde ein Post-Hoc-Holm-Sidak-Test durchgeführt. Darüber hinaus erfolgten lineare Regressionsanalysen, um z.B. die kausalen Zusammenhänge zwischen den meteorologischen Parametern und der Verdunstung zu bestimmen.

3 ERGEBNISSE UND DISKUSSION

3.1 Makroklimatische Ausgangsbedingungen

Das Untersuchungsgebiet (Großraum Cottbus) ist makroklimatisch kontinental beeinflusst und geprägt durch warme Sommer sowie kalte Winter. Betrachtet man die aus pflanzenbaulicher Sicht fundamentale klimatische Wasserbilanz der beiden Untersuchungsjahre 2016 und 2017, so sind hier deutliche Wasserdefizite in der Frühjahrs- bzw. Sommerperiode erkennbar (Abb. 3). Folglich lassen sich für die im vorliegenden Beitrag betrachteten Untersuchungszeiträume potentiell negative Folgen für die regionale Wasserhaushaltssituation und somit auch für die Ertragsentwicklung der angebauten Ackerkulturen in der Region ableiten. Die negativen Bilanzergebnisse der Frühjahrs- und Sommermonate gehen dabei vorwiegend auf eine vergleichsweise niederschlagsarme, warme bzw. verdunstungsreiche Witterung zurück, mit teils dramatischen Folgen für die landwirtschaftliche Ertragsentwicklung in der Untersuchungsregion. So lagen die Ackerfruchterträge im Jahr 2016 im Landkreis Spree-Neiße von Winterweizen, Roggen, Winterraps und Wintermenggetreide deutlich unterhalb des Brandenburger Durchschnitts, während die Erträge für Silo- und Futtermais nur knapp über diesem lagen (Amt für Statistik Berlin-Brandenburg 2020). Gleichzei-

tig bildeten diese für den Pflanzenbau negativen Ausgangsbedingungen mit sehr heißen, niederschlagsfreien und teilweise windigen Frühjahrs- und Sommertagen eine gute Voraussetzung für diese Feldstudie.

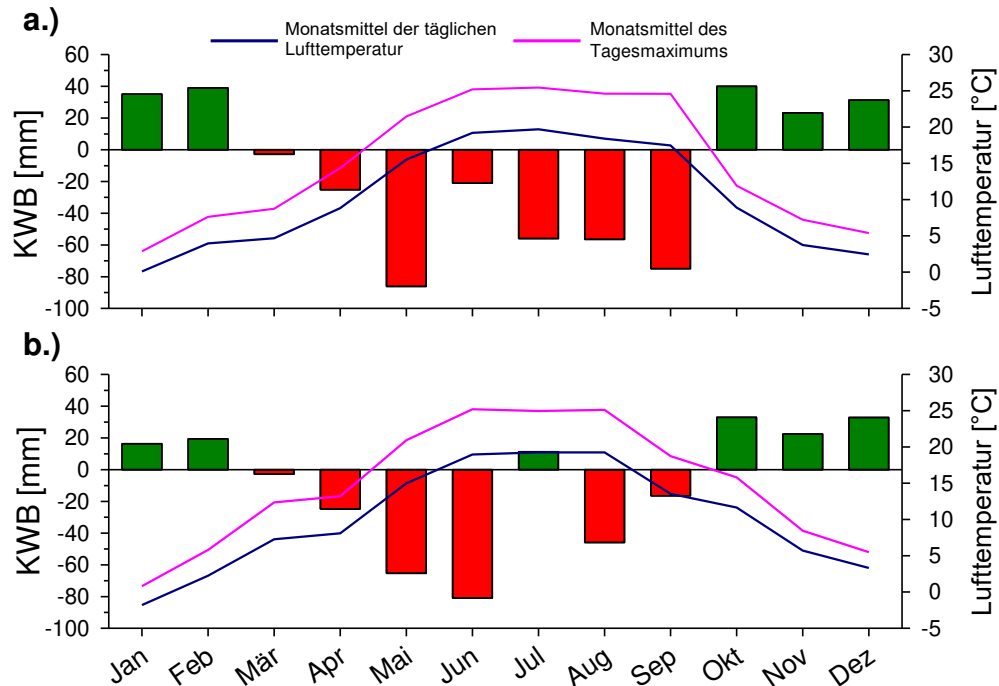


Abbildung 3: Klimatische Wasserbilanz der beiden Untersuchungsjahre a.) 2016 und b.) 2017. Die Niederschlags-, Lufttemperatur-, Dampfdruck- und Luftfeuchtedaten stammen von der DWD-Wetterstation in Cottbus. Die potentielle Evapotranspiration über Grassland (ET_p) nach Penman wurde mit Cropwat 8.0 auf Grundlage dieser Daten berechnet.

3.2 Mikroklimatische Quantifizierung der potentiellen Verdunstung

In Abbildung 4 sind die Ergebnisse der kleinräumigen Verdunstungsmessung auf dem untersuchten SRACS sowie auf der angrenzenden Freifläche bei Neu Sacro an drei zusammenhängenden Julitagen mit Winterweizen sowie einem Tag im August nach der Weizenernte für das Untersuchungsjahr 2016 zusammengetragen. An allen Messpositionen im SRACS wurde eine signifikant geringere Menge an Wasser im Vergleich zur Freifläche verdunstet. Unter Berücksichtigung aller Messtermine und der gesamten Ackerstreifenbreite auf dem SRACS (inkl. der interpolierten Zwischenabstände 12, 18 und 21 m lee- und luvseitig) ergab sich eine im Durchschnitt etwa 24 bis 32 % geringere potentielle Evaporation im Vergleich zur analog bewirtschafteten Freifläche.

An drei von vier Messterminen wurde an den Randbereichen des Ackerstreifens im ACS, jeweils lee- und luvseitig (W3 und O3) zum Pappelstreifen, weniger Wasser verdunstet als auf den übrigen Positionen. Zur Ackermittle hin, aber hauptsächlich leeseitig, stieg die verdunstete Wassermenge oft sprunghaft an. Speziell der erste Untersuchungstermin war durch eine vergleichsweise geringe Globalstrahlungssumme und durchschnittliche Lufttemperatur, aber eine hohe Luftfeuchtigkeit gekennzeichnet. Unter diesen klimatischen Bedingungen wurden auf der Position W3 etwa 58% der Wassermenge des Freiflächenniveaus evaporiert, während ein klarer Anstieg der verdunsteten Wassermenge auf dem ACS von West nach Ost festgestellt wurde (Abb. 4a).

Der Folgetermin zeichnete sich durch eine hohe durchschnittliche Lufttemperatur und Globalstrahlungssumme sowie geringe Windgeschwindigkeiten aus. Auf den Positionen W3 und O3 wurden durchschnittlich etwa 34 und 39 % weniger Wasser als auf der Freifläche verdunstet, während diese Differenz auf den übrigen Positionen zwischen 18 (M) und 23 % (O9) betrug (Abb. 4b).

Die vergleichsweise und positionsübergreifend höchsten Wassermengen vor der Ernte des Winterweizens wurden am dritten Untersuchungstermin verdunstet, welcher sich durch eine hohe Lufttemperatur und geringe Luftfeuchtigkeit auszeichnete (Abb. 4c.). Hier wurde an beiden Randpositionen 3W und 3O mit 34 bzw. 39 % signifikant weniger Wasser als auf der Freifläche und signifikant geringere Wassermengen als auf den übrigen Positionen verdunstet.

Unmittelbar nach der Ernte des Winterweizens am Folgetermin herrschte eine vergleichsweise geringe Lufttemperatur und relative Luftfeuchte mit einer moderaten Windgeschwindigkeit. Unter diesen Bedingungen wurden die jeweils höchsten Verdunstungsmengen positionsübergreifend festgestellt, wobei an den Randbereichen W3 und O3 mit etwa 62 und 63 % der Freilandverdunstungsmenge etwa eine vergleichbare Verdunstungsminderung erzielt wurde (Abb. 4d). Die verdunstete Wassermenge im SRACS stieg lee- und luvseitig zur Ackermitte hin an, an welcher etwa 27 % und somit signifikant weniger Wasser als auf der Freifläche evaporiert wurde.

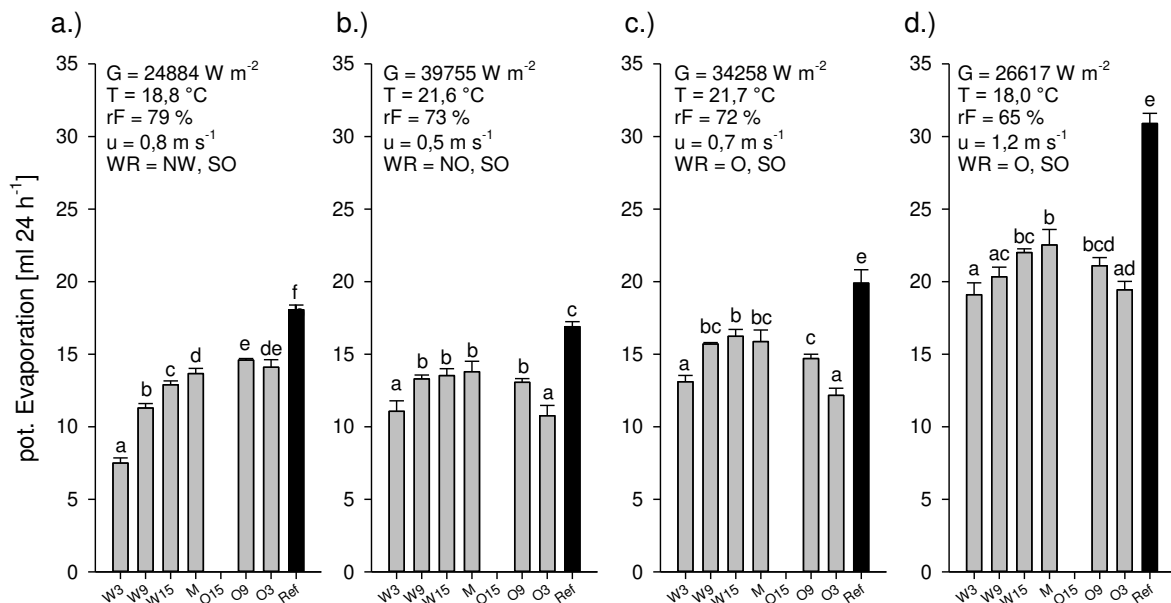


Abbildung 4: Ergebnisse der Evaporationsmessungen nach Piché aus dem Jahr 2016 am a.) 18. b.) 19. c.) 20. Juli sowie am d.) 31. August. Links oben sind die Summe der Globalstrahlung (G) und die Mittelwerte der Lufttemperatur (T), relativen Luftfeuchtigkeit (rF), der Windgeschwindigkeiten (u) sowie die Hauptwindrichtung(en) (WR) für die jeweiligen Messstage auf der Freifläche angegeben. Unterschiedliche Buchstaben zwischen den Messpositionen stehen für statistisch signifikante Unterschiede ($p \leq 0.05$, Einfaktorielle Varianzanalyse mit post-hoc Test). W = leeseitig bzw. westlich, O = luvseitig bzw. östlich von der Ackermitte (M) aus gesehen, Ref = Freifläche

Die überwiegende Anzahl der Messungen an den Einzelpositionen des ACS im Untersuchungsjahr 2017 wiesen gegenüber der Freifläche signifikant geringere Mengen an verdunstetem Wasser auf, was sich auch mit den Ergebnissen aus dem zurückliegenden Untersuchungsjahr deckt. Eine Ausnahme von diesem Trend bildet der erste Messtermin am 23. Mai (Abb. 5a). Hier herrschten neben einer vergleichsweise hohen Luftfeuchtigkeit auch sehr geringe Windgeschwindigkeiten. Insgesamt war die Evaporation über alle Messpositionen hinweg vergleichsweise gering (< 15 ml) und es konnten keine eindeutigen räumlich gerichteten Zusammenhänge abgeleitet werden. Über den kompletten Ackerstreifen des ACS hinweg wurde im Vergleich zur Freifläche dennoch im Mittel etwa 20 % weniger Wasser evaporiert. Allerdings wies die leeseitige W3-Position gegenüber der Freifläche hier sogar eine etwa 11 % höhere, wenn auch nicht signifikant abweichende Verdunstung auf. Dies könnte mit temporär in Gehölzstreifennähe auftretenden Wärmestauwirkungen zusammenhängen, wobei anhand der vorliegenden Daten keine zweifelsfreie Klärung dieses Phänomens möglich ist.



Die zweite Messung erfolgte Anfang Juni und war durch eine vergleichsweise hohe Globalstrahlungssumme und moderate Windgeschwindigkeiten geprägt. Im Schnitt wurde im SRACS-Ackerstreifen gegenüber der Freifläche etwa 40 % weniger Wasser evaporiert, wobei im Unterschied zum Vorjahr auf den gehölznahen Positionen lee- und luvseitig mit jeweils etwa 72 % der Freiflächeevaporation tendenziell die höchste Evaporation im Ackerstreifen aufwiesen. Demgegenüber betrug die Evaporation an den beiden leeseitig gelegenen Positionen W9 und W15 unter 50 % des Freiflächenlevels (Abb. 5b).

Am dritten Messtermin waren die Lufttemperatur und die Luftfeuchtigkeit höher als bei den vorangegangenen Messtagen (Abb. 5c). Die Evaporation an den leeseitigen Positionen fiel tendenziell geringer als auf der Luv-Seite aus, im Durchschnitt wurden über den gesamten ACS-Streifen gegenüber der Freifläche etwa 32 % weniger Wasser evaporiert.

Die letzte Messung fand gegen Ende Juni statt und zeichnete sich durch moderate Windgeschwindigkeiten und eine hohe Lufttemperatur aus (Abb. 5d). Die räumliche Verteilung der evaporierten Wassermenge im Ackerstreifen glich etwa der vorhergehenden Messung, wobei im Mittel über die gesamte Ackerstreifenbreite etwa 35 % weniger Wasser im Vergleich zur Referenzfläche verdunstet wurde. Unter Berücksichtigung aller Messtermine im Jahr 2017 konnte der starke Gradient der Evaporation von den Randbereichen hin zur Ackermitte aus dem Vorjahr nicht bestätigt werden. Die gegenüber der Freifläche theoretisch nicht von der Evaporation betroffene Wassermenge fiel dagegen im Vergleich zum Vorjahr, wo die Messungen im Hochsommer stattfanden, überwiegend höher aus. Ob diese Differenzen generell einem saisonalen Muster unterliegen sollte in künftigen Untersuchungen beleuchtet werden.

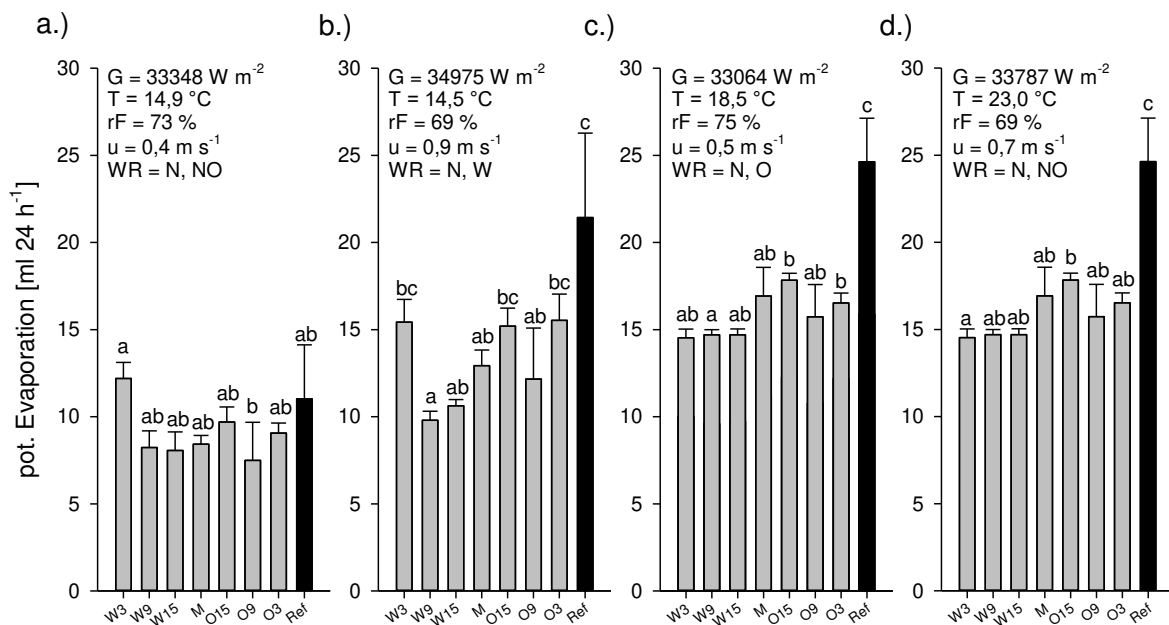


Abbildung 5: Ergebnisse der Evaporationsmessungen nach Piché aus dem Jahr 2017 am a.) 23.05 b.) 02. c.) 11. und d.) 20. Juni. Links oben sind die Summe der Globalstrahlung (G) und die Mittelwerte der Lufttemperatur (T), relativen Luftfeuchtigkeit (rF), der Windgeschwindigkeiten (u) sowie die Hauptwindrichtung(en) (WR) für die jeweiligen Messtage auf der Freifläche angegeben. Unterschiedliche Buchstaben zwischen den Messpositionen stehen für statistisch signifikante Unterschiede ($p \leq 0.05$, Einfaktorische Varianzanalyse mit post-hoc Test). W = leeseitig bzw. westlich, O = luvseitig bzw. östlich von der Ackermitte (M) aus gesehen, Ref = Freifläche

3.3 Zusammenhang zwischen der potentiellen Verdunstung und anderen meteorologischen Parametern

Abbildung 6 verdeutlicht die statistisch signifikante ($p < 0,01$) lineare Beziehung zwischen der potentiellen Evaporation auf der einen Seite und der Windgeschwindigkeit (Abb. 6a) sowie dem Wasserdampfdruckdefizit (WDD, Abb. 6b) auf der anderen Seite im Untersuchungsjahr 2016. Dabei war der Einfluss der Windgeschwindigkeit vor allem an bewölkten Tagen hoch, währenddessen an Tagen mit einer hohen Sonneneinstrahlungsintensität und Lufttemperatur eher das WDD mit der potentiellen Verdunstung korrelierte.

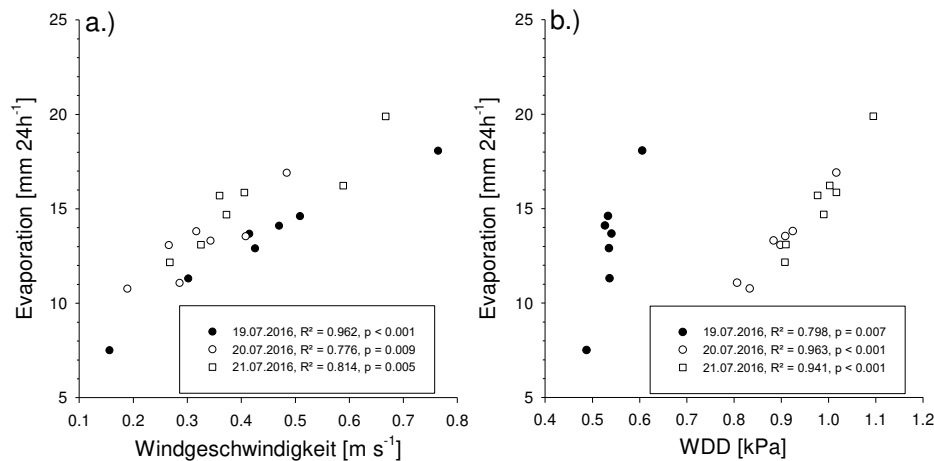


Abbildung 6: Zusammenhang zwischen der durchschnittlichen potentiellen Evaporation nach Piché mit a.) den durchschnittlichen Windgeschwindigkeiten und b.) dem durchschnittlichen Wasserdampfdruckdefizit während der drei Untersuchungstermine mit Winterweizen im Jahr 2016.

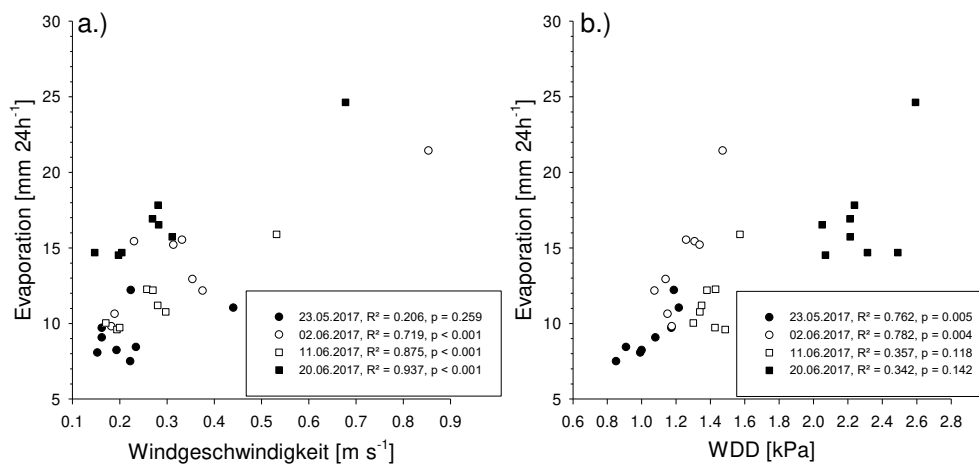


Abbildung 7: Zusammenhang zwischen der durchschnittlichen potentiellen Evaporation nach Piché mit a.) den durchschnittlichen Windgeschwindigkeiten und b.) dem Wasserdampfdruckdefizit während der vier Untersuchungstermine im Jahr 2017.

Nicht ganz so eindeutig sind die Messreihen aus dem Folgejahr 2017. Zwar konnten hier auch stark signifikante lineare Beziehungen ($R^2 > 0,7$) zwischen der potentiellen Evaporation mit der Windgeschwindigkeit bzw. dem WDD an drei von vier Messtagen nachgewiesen werden (Abb. 7a.). Allerdings bestanden an Tagen mit einer vergleichsweise hohen Lufttemperatur und einer moderaten Windgeschwindigkeit stärkere Zusammenhänge zwischen der potentiellen Evaporation und der Windgeschwindigkeit als mit dem WDD (Abb. 7b). Hierfür könnte die Hauptwindrichtung, die im

genannten Untersuchungszeitraum N bzw. NO war, verantwortlich sein, da diese Winde weitestgehend unbeeinflusst von den vorhandenen Heckenstrukturen bleiben. Umgekehrt war die Situation am zweiten Untersuchungstermin, hier waren die Zusammenhänge zwischen der potentiellen Evaporation und dem WDD trotz hoher Windgeschwindigkeiten und vergleichsweise niedriger Lufttemperatur stärker ausgeprägt. Die durch die Hecke abgemilderte Windgeschwindigkeit der Westwinde könnte für diese Entwicklung maßgeblich verantwortlich zeichnen. Insgesamt wird deutlich, dass je nach Witterung die potentielle Verdunstung stark sensitiv auf die Windgeschwindigkeit bzw. das WDD reagierte.

4 SCHLUSSFOLGERUNGEN

Für die Landwirtschaft in Brandenburg wird im Bundesvergleich auch künftig eine besonders hohe Belastung durch Zunahme von Extremwetterereignissen sowie einer für den Pflanzenbau ungünstigen Niederschlagsverteilung als direkte Folge des Klimawandels prognostiziert. Folglich ergibt sich eine besonders dringende Notwendigkeit, Anpassungsmaßnahmen zur Steigerung der Wasserverfügbarkeit auf landwirtschaftlichen Nutzflächen umzusetzen und so eine möglichst hohe Ertragsstabilität zu erreichen. Im Kontext der vorliegenden Studie konnte an insgesamt acht klimatisch differenzierten Messtagen gezeigt werden, dass sich über die Integration von Gehölzstrukturen auf einer landwirtschaftlichen Nutzfläche in Form eines im Kurzumtrieb bewirtschafteten Alley-Cropping-Systems (SRACS) ein effektiver Verdunstungsschutz für die angrenzenden Ackerkulturen schaffen lässt. So wurden auf dem durch die Pappelhecken begrenzten Ackerstreifen maßgeblich durch die Reduktion der Windgeschwindigkeit im Mittel zwischen 20 und 40 % weniger Wasser evaporiert als auf der als Referenz dienenden konventionell bewirtschafteten Freifläche. Den im SRACS aufwachsenden Getreidepflanzen stand somit potentiell mehr Wasser zur Verfügung, was sich in den trockenen Früh- und Sommermonaten der Untersuchungsregion künftig als entscheidender Faktor für die Ertragsentwicklung bzw. Vitalität der angebauten Kulturen herausstellen könnte. In diversen, parallel zu dieser Studie durchgeführten Ertragserhebungen auf dem Standort Neu Sacro zeichneten sich bereits positive Effekte ab. So konnten beispielsweise Kanzler et al. (2019) und Böhm et al. (2020) auf dieser Agroforst-Demonstrationsfläche höhere Ackerfruchterträge als auf der benachbarten Freifläche feststellen. Allerdings sind für stärker generalisierbare Aussagen weiterführende Untersuchungen, auch auf anderen Agroforstflächen, sowie unter Berücksichtigung weiterer Kulturpflanzen, Witterungsbedingungen und Einflüsse von Heckenabständen und Pflanzdichten dringend erforderlich.

LITERATUR

- Amt für Statistik Berlin-Brandenburg (2020): Statistisches Jahrbuch Brandenburg 2017. Hektarerträge ausgewählter landwirtschaftlicher Feldfrüchte 2016 nach Verwaltungsbezirken. S. 371. Letzter Zugriff 20.04.2020. Online verfügbar unter https://www.statistik-berlin-brandenburg.de/produkte/Jahrbuch/jb2017/JB_201710_BB.pdf.
- Böhm C., Kanzler M., Freese D. (2014): Wind speed reductions as influenced by woody hedgerows grown for biomass in short rotation alley cropping systems in Germany. *Agroforestry Systems* 88, 579-591 DOI: 10.1007/s10457-014-9700-y
- Böhm,C., Kanzler M., Tsonkova P. (2020): Untersuchungen von Ertragsleistungen (Land Equivalent Ratio) von Agroforstsystemen. Loseblatt # 35 der Innovationsgruppe AUFWERTEN
- Brenner A.J., Jarvis P.G., van den Beldt, R.J. (1995): Windbreak-crop interactions in the Sahel. 1. Dependence of shelter on field conditions. *Agricultural and Forest Meteorology* 75, 215-234 DOI: 10.1016/0168-1923(94)02217-8

- Ciais P., Reichstein M., Viovy N., Granier A., Ogee J., Allard V. et al. (2005): Europe-wide reduction in primary productivity caused by the heat and drought in 2003. *Nature* 437, 529-533 DOI: 10.1038/nature03972
- Cleugh H.A. (1998): Effects of windbreaks on airflow, microclimates and crop yields. In: *Agroforest Syst* 41, 55-84 DOI: 10.1023/A:1006019805109
- Dinesh D., Bonilla-Findji O., Meryl R. (2017): 10 best bet innovations for adaptation in agriculture: A supplement to the UNFCCC NAP Technical Guidelines.
- European Environment Agency (2017): Climate change, impacts and vulnerability in Europe 2016. An indicator-based report. Luxembourg: Publications Office of the European Union (EEA report, no 2017,1). Online verfügbar unter http://www.eea.europa.eu/publications/climate-change-impacts-and-vulnerability-2016/at_download/file
- Everson C., Ghezehei S., Everson T., Annandale J. (2012): Agroforestry systems for improved productivity through the efficient use of water. Water Research Commission (WRC). Pretoria, RSA. WRC Report No. 1480/1/12. ISBN: 978-1-4312-0261-4
- Fink A.H., Brücher T., Krüger A., Leckebusch G.C., Pinto J.G., Ulbrich U. (2004): The 2003 European summer heatwaves and drought -synoptic diagnosis and impacts. *Weather* 59, 209-216 DOI: 10.1256/wea.73.04
- Gigon A., Marti R., Scheiwiller T. (2004): Kurzpraktikum terrestrische Ökologie. 2., überarb. Aufl. Zürich: vdf Hochsch.-Verl. an der ETH (vdf-Praktikum Ökologie).
- Hawke M., Wedderburn M. (1994): Microclimate changes under pinus radiata agroforestry regimes in New Zealand. *Agricultural and Forest Meteorology* 71, 133-145 DOI: 10.1016/0168-1923(94)90104-X
- Inurreta-Aguirre H.D., Lauri P.-É.; Dupraz C.; Gosme M. (2018): Yield components and phenology of durum wheat in a Mediterranean alley-cropping system. *Agroforestry Systems* 92, 961-974 DOI: 10.1007/s10457-018-0201-2
- Kanzler M., Böhm C., Mirck J., Freese D. (2015): Variabilität des Mikroklimas im Einflussbereich der Gehölzstreifen eines Agroforstsystems: Multifunktionale Agrarlandschaften – Pflanzenbaulicher Anspruch, Biodiversität, Ökosystemdienstleistungen, 58. Jahrestagung der Gesellschaft für Pflanzenbauwissenschaften e.V., 22. bis 24. September 2015, Braunschweig, 77-78
- Kanzler M., Böhm C., Mirck J., Schmitt D., Veste M. (2019): Microclimate effects on evaporation and winter wheat (*Triticum aestivum* L.) yield within a temperate agroforestry system. *Agroforestry Systems* 93, 1821-1841 DOI: 10.1007/s10457-018-0289-4
- Karki U., Goodman M.S. (2015): Microclimatic differences between mature loblolly-pine silvopasture and open-pasture. *Agroforestry Systems* 89, 319-325 DOI: 10.1007/s10457-014-9768-4
- Kurz P., Machatschek M., Iglhauser B. (2011): Hecken: Geschichte und Ökologie; Anlage, Erhaltung & Nutzung, 2. Aufl. Stocker. Graz, Stuttgart, ISBN: 978-3702009120
- McNaughton K.G. (1988): 1. Effects of windbreaks on turbulent transport and microclimate. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 22-23, 17-39 DOI: 10.1016/0167-8809(88)90006-0
- MLUL (2017): Klimawandel im Land Brandenburg. Was Unternehmen tun können. Online verfügbar unter https://mluk.brandenburg.de/cms/media.php/lbm1.a.3310.de/klimawandel_bb_2018.pdf, zuletzt geprüft am 16.01.2020.
- Nuberg I., George B.H., Reid R. (2009): Agroforestry for natural resource management. CSIRO Pub, Clayton. Online verfügbar unter <https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=1&cad=rja&uact=8&ved=2ahUKEwjFu7u41ofnAhWfaFAKHbBaCOUQFjAAegQIBRAB&url=http%3A%2F%2Flibrary.uniteddiversity.coop%2FPermaculture>

%2FAgroforestry%2FAgroforestry_for_Natural_Resource_Management.pdf&usg=AOvVa
w0RU6e_rJDjXWN7BWB12Y-w, zuletzt geprüft am 16.01.2020

Reidsma P., Ewert F., Lansink A.O., Leemans R. (2010): Adaptation to climate change and climate variability in European agriculture: The importance of farm level responses. *European Journal of Agronomy* 32, 91-102. DOI: 10.1016/j.eja.2009.06.003