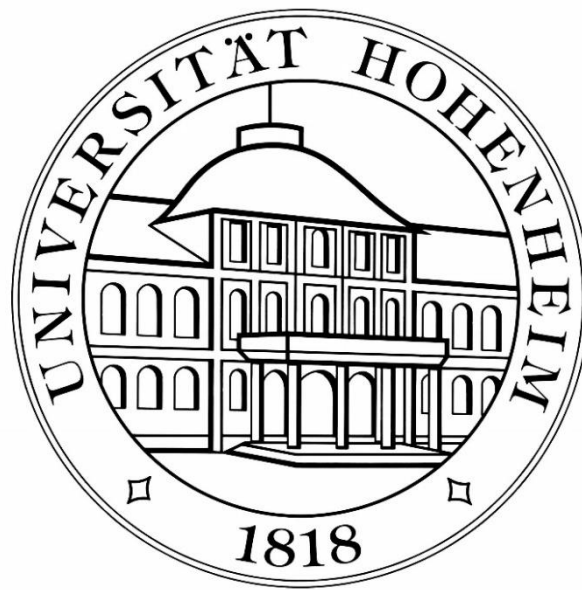


Universität Hohenheim

Fakultät Agrarwissenschaften

Institut für Pflanzenproduktion und Agrarökologie in den Tropen und
Subtropen

Fachgebiet Wasserstress-Management bei Kulturpflanzen in den Tropen
und Subtropen



Diurnale Effekte von VPD und Wind auf die Transpiration von Reis

Bachelorarbeit

Studiengang Agrarbiologie

Eliana Häfele

Matrikelnummer: 646095

Eingereicht am: 20.09.2018

Prüfer: Prof. Dr. Folkard Asch

Zusammenfassung

Reis (*Oryza sativa* L.) ist weltweit eine der wichtigsten Getreidearten. Wasserstress kann kritisch für das Wachstum und die Produktion von Reis sein. Eine Veränderung verschiedener abiotischer Umweltfaktoren hat multiple Effekte auf Pflanzen. In der vorliegenden Arbeit sollen die diurnalen Effekte von VPD und Wind auf die Transpirationsrate von Reis untersucht werden. Die zwei Nassreissorten IR31 und IR46 wurden in einem Gewächshaus über 6 Wochen aus Samen angezogen. Für die Ernährung der Pflanzen wurde ein hydroponisches System gewählt. Die Transpirationsrate der beiden Reissorten wurde in einer VPD-Kammer, in der verschiedene VPD-Stufen simuliert werden konnten, gemessen. Dabei wurden zwei verschiedene Abfolgen der VPD-Stufen mit jeweils 4 VPD-Stufen untersucht. Ein signifikanter Anstieg der Transpirationsrate konnte bei beiden Reissorten mit steigendem VPD tagsüber (ca. 1,0–3,0 kPa) und nachts (ca. 0,65–2,5 kPa) bei beiden VPD-Abfolgen festgestellt werden. Die stomatäre Leitfähigkeit nahm bei beiden Reissorten tagsüber und nachts bei beiden VPD-Abfolgen mit steigendem VPD signifikant ab. Es konnten keine Unterschiede in der Transpirationsrate und stomatären Leitfähigkeit zwischen den beiden Reissorten bei den jeweiligen VPD-Stufen festgestellt werden. Bei einer zweifaktoriellen Varianzanalyse wurden tagsüber jedoch signifikante Unterschiede in der Transpirationsrate und stomatären Leitfähigkeit zwischen den beiden Reissorten bei der VPD-Abfolge (+/-/+) festgestellt. IR46 wies dabei eine leicht niedrigere Transpirationsrate und stomatäre Leitfähigkeit bei hohem VPD auf als IR31. Die Effekte von Wind (1,0–1,2 m/s) auf die Transpirationsrate und die stomatäre Leitfähigkeit wurden in der VPD-Kammer bei zwei VPD-Stufen (niedriges und hohes VPD) und zwei VPD-Abfolgen tagsüber und nachts untersucht. Dabei wurde eine leichte Erhöhung der Transpirationsrate und stomatären Leitfähigkeit tagsüber und nachts während dem Windereignis gegenüber vor und nach dem Windereignis bei IR31 und IR46 beobachtet. Beim Vergleich der Transpirationsrate vor und nach dem Windereignis konnten keine signifikanten Unterschiede bei beiden Reissorten tagsüber und nachts festgestellt werden. Nachts wurde ein ähnlicher relativer Anstieg der Transpirationsrate während dem Windereignis gegenüber vor und nach dem Windereignis beobachtet wie tagsüber. Bei hohem VPD zu Beginn einer VPD-Abfolge wurde eine niedrigere Transpirationsrate gemessen als wenn die VPD-Abfolge mit niedrigem VPD begonnen wurde.

Summary

Rice (*Oryza sativa* L.) is one of the most important crop species in the world. Water stress can be critical for the growth and production of rice. Changes in environmental factors may have multiple effects on plants. In the present study diurnal effects of VPD and wind on the transpiration rate of rice were analysed. Two rice species IR31 and IR46 were cultivated in a greenhouse over a period of 6 weeks. The plants were grown under hydroponic conditions. The transpiration rate of the two rice species was measured in a VPD chamber in which different VPD levels were simulated. Two different VPD sequences each with four VPD levels were investigated. A significant increase in the daytime and night-time transpiration rate was found in both species with increasing VPD during the day (ca. 1,0–3,0 kPa) and during the night (ca. 0,65–2,5 kPa) in both VPD sequences. The stomatal conductance of both species decreased significantly during the day and during the night in both VPD sequences. Concerning the transpiration rate and stomatal conductance no difference could be found between the two rice species for each VPD level. Significant differences between the two rice species in the transpiration rate and stomatal conductance were detected for the VPD sequence (+/-/+). The transpiration rate of IR46 was slightly lower at high VPD than the transpiration rate of IR31. The effects of wind (1,0–1,2 m/s) on the transpiration rate and stomatal conductance were also measured in the VPD chamber. Two VPD levels (high and low VPD) and two different VPD sequences were simulated. A slightly increased transpiration rate and stomatal conductance in both species was found during the wind event both during day and night. No significant difference could be detected between the daytime transpiration rate and stomatal conductance before the wind event and after the wind event. By day and night the relative increase in the transpiration rate during the wind event was similar. When there were dry atmospheric conditions at the beginning of one VPD sequence the transpiration rate was lower than when the VPD sequence was started with more humid atmospheric conditions.

Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung	I
Summary	II
Abbildungsverzeichnis	V
Tabellenverzeichnis	VI
Abkürzungsverzeichnis	VI
1. Einleitung	1
1.1 Hintergrund zur Arbeit	1
1.2 Zielsetzung dieser Arbeit	1
1.3 Aktueller Wissensstand	2
2. Material und Methoden	7
2.1 Versuchsort und Pflanzenmaterial	7
2.2 Versuchsaufbau und Pflanzenanzucht	7
2.3 Aufbau der Transpirationskammer	9
2.4 Transpirationssmessung VPD (-/+/-) und VPD (+/-/+) tagsüber und nachts ...	10
2.5 Windeffekte auf die Transpiration VPD niedrig und VPD hoch tagsüber und nachts	12
2.6 Bestimmung der Blattfläche und des Trockengewichts	13
2.7 Datenauswertung	13
3. Ergebnisse	15
3.1 Transpirationsrate und stomatäre Leitfähigkeit tagsüber in Abhängigkeit vom atmosphärischen Dampfdruckdefizit (VPD)	15
3.2 Transpirationsrate und stomatäre Leitfähigkeit nachts in Abhängigkeit vom atmosphärischen Dampfdruckdefizit (VPD)	17
3.3 Effekte von Wind auf die Transpirationsrate tagsüber	19
3.3.1 Vergleich der Auswirkungen von zwei VPD-Abfolgen auf die Transpirationsrate tagsüber unter Windeinfluss	20
3.4 Effekte von Wind auf die stomatäre Leitfähigkeit tagsüber	21
3.4.1 Vergleich der Auswirkungen von zwei VPD-Abfolgen auf die stomatäre Leitfähigkeit tagsüber unter Windeinfluss	22
3.5 Effekte von Wind auf die Transpirationsrate nachts	23
3.5.1 Vergleich der Auswirkungen von zwei VPD-Abfolgen auf die Transpirationsrate nachts unter Windeinfluss	24

3.6 Effekte von Wind auf die stomatäre Leitfähigkeit nachts	25
3.6.1 Vergleich der Auswirkungen von zwei VPD-Abfolgen auf die stomatäre Leitfähigkeit nachts unter Windeinfluss	26
3.7 Blattfläche und Trockengewicht.....	27
4. Diskussion	28
4.1 Transpirationsrate und stomatäre Leitfähigkeit tagsüber in Abhängigkeit vom atmosphärischen Dampfdruckdefizit (VPD).....	28
4.2 Transpirationsrate und stomatäre Leitfähigkeit nachts in Abhängigkeit vom atmosphärischen Dampfdruckdefizit (VPD).....	30
4.3 Effekte von Wind auf die Transpiration und stomatäre Leitfähigkeit tagsüber .	32
4.4 Effekte von Wind auf die Transpiration und stomatäre Leitfähigkeit nachts	34
4.5 Fehlerdiskussion	37
5. Literaturverzeichnis.....	40
6. Anhang	42
6.1 Tabellen.....	42
6.2 Danksagung	43
6.3 Eidesstattliche Erklärung	44

Abbildungsverzeichnis

Abb. 1 Schema des Wassertransports durch ein Blatt.....	2
Abb. 2 Einfluss von Wind auf den Grenzflächenwiderstand und die Transpirationsrate in Abhängigkeit vom stomatären Öffnungsgrad	6
Abb. 3 Reispflanzen in Sand	8
Abb. 4 Reispflanzen in Nährlösung	8
Abb. 5 Temperatur (T), relative Luftfeuchtigkeit (rF) und VPD im Verlauf einer Messung VPD (+/-/+) tagsüber, Wdh.1.....	11
Abb. 6 Anordnung der Pflanzen in der VPD-Kammer	12
Abb. 7 Auswahl eines zehnmütigen Intervalls mit konstanter Transpirationsrate bei zwei VPD-Stufen	14
Abb. 8 Transpirationsrate und stomatäre Leitfähigkeit der zwei Reissorten IR31 und IR46 tagsüber in Abhängigkeit vom atmosphärischen Dampfdruckdefizit (VPD).....	15
Abb. 9 Transpirationsrate und stomatäre Leitfähigkeit der zwei Reissorten IR31 und IR46 nachts in Abhängigkeit vom atmosphärischen Dampfdruckdefizit (VPD)	17
Abb. 10 Effekte von Wind auf die Transpirationsrate tagsüber bei niedrigem und hohem VPD.....	19
Abb. 11 Vergleich der Auswirkungen von zwei VPD-Abfolgen auf die Transpirationsrate tagsüber unter Windeinfluss.....	20
Abb. 12 Effekte von Wind auf die stomatäre Leitfähigkeit tagsüber bei niedrigem und hohem VPD	21
Abb. 13 Vergleich der Auswirkungen von zwei VPD-Abfolgen auf die stomatäre Leitfähigkeit tagsüber unter Windeinfluss	22
Abb. 14 Effekte von Wind auf die Transpirationsrate nachts bei niedrigem und hohem VPD	23
Abb. 15 Vergleich der Auswirkungen von zwei VPD-Abfolgen auf die Transpirationsrate nachts unter Windeinfluss	24
Abb. 16 Effekte von Wind auf die stomatäre Leitfähigkeit nachts bei niedrigem und hohem VPD	25
Abb. 17 Vergleich der Auswirkungen von zwei VPD-Abfolgen auf die stomatäre Leitfähigkeit nachts unter Windeinfluss	26
Abb. 18 Trockengewicht von Wurzeln, Stängeln, Blättern, abgestorbenen Blättern; Anzahl der Bestockungstriebe und Blattfläche der Reissorten IR31 und IR46 über 3 Wdh.....	27
Abb. 19 Temperatur (T), relative Luftfeuchtigkeit (rF) und VPD im Verlauf einer Messung VPD (+/-/+) nachts; Wdh.1	37

Tabellenverzeichnis

Tab. 1 Yoshida-Nährlösung	8
Tab. 2 Transpirationsrate (E) und stomatäre Leitfähigkeit (g_s) tagsüber über 4 VPD-Stufen, VPD-Abfolge (-/+/-), p-Wert einfaktorielle Varianzanalyse ...	16
Tab. 3 Transpirationsrate (E) und stomatäre Leitfähigkeit (g_s) tagsüber über 4 VPD-Stufen, VPD-Abfolge (+/-/+), p-Wert einfaktorielle Varianzanalyse ...	16
Tab. 4 Transpirationsrate (E) und stomatäre Leitfähigkeit (g_s) nachts über 4 VPD-Stufen, VPD-Abfolge (-/+/-), p-Wert einfaktorielle Varianzanalyse ...	18
Tab. 5 Transpirationsrate (E) und stomatäre Leitfähigkeit (g_s) nachts über 4 VPD-Stufen, VPD-Abfolge (+/-/+), p-Wert einfaktorielle Varianzanalyse ...	18
Tab. 6 Relativer Vergleich der Transpirationsrate und stomatären Leitfähigkeit unter Windeinfluss tagsüber	42
Tab. 7 Relativer Vergleich der Transpirationsrate und stomatären Leitfähigkeit unter Windeinfluss nachts	42

Abkürzungsverzeichnis

°C	Grad Celsius
Abb.	Abbildung
ca.	Circa
cm ²	Quadratcentimeter
E	Transpirationsrate
G	Gramm
g_s	Stomatäre Leitfähigkeit
kPa	Kilopascal
L	Liter
M	Meter
m ²	Quadratmeter
ml	Milliliter
mmol	Millimol
R ²	Bestimmtheitsmaß der Regressionsgerade
rF	Relative Luftfeuchtigkeit
S	Sekunde
T	Temperatur
Tab.	Tabelle
TG	Trockengewicht
V	Volt
VPD	„Vapour pressure deficit“ - Wasserdampfsättigungsdefizit
W	Watt
Wdh.	Wiederholung

1. Einleitung

1.1 Hintergrund zur Arbeit

Reis (*Oryza sativa* L.) ist weltweit eine der wichtigsten Getreidearten und stellt für mehr als die Hälfte der Weltbevölkerung ein Grundnahrungsmittel dar. Etwa 3 Milliarden Menschen konsumieren über 100 kg Reis pro Jahr. Derzeit findet ca. 90 % der Weltreisproduktion und des Weltreiskonsums in Asien statt (Nguyen and Ferrero, 2006). Reis wird nicht nur unter humiden Klimabedingungen wie in den asiatischen Monsun-Regionen angebaut, sondern auch unter ariden Klimabedingungen wie zum Beispiel in Kalifornien (USA), New South Wales (Australien), Punjab (Indien) oder in Ägypten. Die Pflanzen verbrauchen in diesen Regionen aufgrund des hohen atmosphärischen Wasserdampfsättigungsdefizits (VPD – „vapour pressure deficit“) sehr viel Wasser. Der daraus resultierende Wasserstress kann kritisch für das Wachstum und die Produktion von Reis sein (Kuwagata et al., 2012). Auch bei Reispflanzen, die durch Bewässerung keinem Wassermangel ausgesetzt sind, führt eine niedrige Luftfeuchtigkeit zu einer geringeren Photosyntheserate und somit zu einer niedrigeren Biomasseproduktivität (Ohsumi et al., 2008).

Die Untersuchung von Reaktionen in Pflanzen, bei denen verschiedene abiotische Umweltfaktoren wie zum Beispiel Wasserverfügbarkeit, Wind, Luftfeuchtigkeit, Temperatur oder Lichtintensität verändert werden, ist kompliziert, da die Faktoren multiple Effekte auf die Pflanzen haben. Die relative Stärke des Umweltfaktors und potentiell wechselwirkende Effekte zwischen den Umweltfaktoren bestimmen dabei das Ausmaß der Reaktionen in den Pflanzen (Anten et al., 2010). Die Fähigkeit genaue Vorhersagen treffen zu können, wie Pflanzen ihren Wasserhaushalt unter verschiedenen Umwelteinflüssen regulieren, kann hilfreich dabei sein, Klimamodelle anzufertigen, Bewässerungsanlagen besser zu planen und Vorhersagen zu treffen, wie Pflanzen in Zukunft auf Klimaveränderungen reagieren (Bunce, 1997) .

1.2. Zielsetzung dieser Arbeit

In dieser Arbeit werden die Effekte von VPD und Wind auf die Transpiration und stomatäre Leitfähigkeit von zwei Nassreissorten IR31 und IR46 untersucht. Es soll festgestellt werden, ob es Unterschiede zwischen den beiden Reissorten gibt. Die Messungen werden sowohl tagsüber als auch nachts (von 20–24 Uhr) durchgeführt. Außerdem werden die Auswirkungen von zwei unterschiedlichen VPD-Abfolgen auf die Transpirationsrate und stomatäre Leitfähigkeit der beiden Sorten untersucht.

1.3 Aktueller Wissensstand

Transpiration allgemein

Die treibende Kraft des Wassertransports durch die Pflanze ist das Potentialgefälle im Kontinuum Boden-Pflanze-Atmosphäre (SPAC – „soil-plant-atmosphere-continuum“). Im Inneren der Pflanze verdunstet Wasser von der Oberfläche der Zellen, die an Interzellularräume grenzen. Das Wasser geht dort von der flüssigen in die Dampfphase über, dann entweicht der Wasserdampf durch die Spaltapparate ins Freie (stomatäre Transpiration). Von der Körperoberfläche der Pflanzen diffundiert der Wasserdampf in die anliegende Luftschicht (laminare Grenzschicht) und in den freien Luftraum (Larcher, 2001) (Abb. 1).

Die Transpiration erfüllt in einer Pflanze verschiedene Funktionen wie zum Beispiel das Abkühlen der Blätter und den Transport von Wasser und Nährstoffen in der Pflanze (Lösch, 2001). Dabei wird die Transpirationsrate maßgeblich durch den Unterschied in der Wasserdampf-Konzentration zwischen den Interzellularräumen der Blätter und der Atmosphäre im Umfeld der Spaltöffnungen sowie den Diffusionswiderstand der bei der Transpiration zurückzulegenden Wegstrecke bestimmt. Der Diffusionswiderstand wird durch zwei Komponenten beeinflusst. Den stomatären Widerstand (r_s) und den Grenzflächen-Widerstand (r_b) der unbewegten Luftschicht (laminare Grenzschicht) über der Blattoberfläche (Taiz et al., 2010). Die Öffnungsweite der Stomata wird jedoch nicht nur durch das Wasserdampfdruckdefizit zwischen Blatt und Luft beeinflusst, sondern auch durch andere Umweltfaktoren wie Lichtintensität, CO_2 -Konzentration oder Blatttemperatur (Pallardy and Kozlowski, 1979).

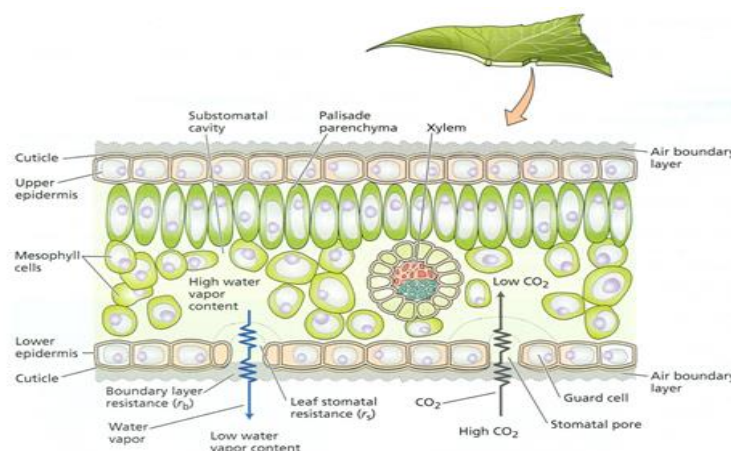


Abb. 1 Schema des Wassertransports durch ein Blatt

Quelle: Taiz L et al. (2010) *Plant Physiology and Development*

Einfluss von VPD auf die Transpiration

Als VPD bezeichnet man das Wasserdampfsättigungsdefizit der Luft. Es beschreibt die Wasseraufnahmefähigkeit der Luft und wird von den Parametern Temperatur und relative Luftfeuchtigkeit beeinflusst. Ein hohes Dampfdruckdefizit zwischen Blatt und Luft kann die Transpirationsrate einer Pflanze beträchtlich erhöhen (Lösch, 2001). Als Reaktion auf ein steigendes atmosphärisches Wasserdampfsättigungsdefizit wird in den meisten Arten ein Schließen der Stomata und damit eine Erhöhung des Diffusionswiderstandes in den Blättern beobachtet (Turner, 1984). Die Veränderung der Transpirationsrate aufgrund einer Veränderung des VPD unterscheidet sich sowohl zwischen, als auch innerhalb verschiedener Pflanzenarten (Fletcher et al., 2007). Der Anstieg der Transpirationsrate hat ein Maximum, welches bei vielen Arten bei einem VPD von ca. 2,0 kPa erreicht wird (Gollan et al., 1985). In Reis führte eine niedrige Luftfeuchtigkeit zu einer signifikant höheren Transpirationsrate als bei einer hohen Luftfeuchtigkeit (Kuwagata et al., 2012). Experimente von Ohsumi et al. mit neun verschiedenen Reissorten ergaben eine Abnahme der stomatären Leitfähigkeit bei einem VPD Anstieg von 1,0 auf 2,3 kPa. Dabei wurden Unterschiede in der Veränderung der stomatären Leitfähigkeit zwischen den Reissorten und verschiedenen Entwicklungsstadien als Reaktion auf ein steigendes VPD festgestellt (Ohsumi et al., 2008).

VPD wird als einer der Haupteinflussfaktoren der stomatären Leitfähigkeit angesehen (Grantz, 1990; Bunce, 1997). Wie VPD die stomatäre Öffnungsweite beeinflusst, ist nicht vollständig geklärt. Monteith geht davon aus, dass eine abnehmende stomatäre Leitfähigkeit bei ansteigendem VPD zwischen Blatt und Umgebungsluft durch eine erhöhte Transpirationsrate der Blätter verursacht wird („feedback response“) (Monteith, 1995). Eine hohe Transpiration könnte laut Stewart und Dwyer dazu führen, dass der Wasserpotentialgradient zwischen Schließzellen und Epidermiszellen ansteigt und das Blattwasserpotential sinkt, was beides zu einem Absinken des Turgordrucks in den Schließzellen führt (Stewart and Dwyer, 1983). Farquhar hingegen geht von einem direkten Regelprozess („feedforward response“) aus. Seine Theorie sieht er darin bestätigt, dass die Transpirationsrate mit steigendem VPD zwischen Blatt und Luft abnimmt (Farquhar, 1978). Mott und Parkhurst sehen eine Erklärung für die Abnahme der Transpirationsrate mit steigendem VPD darin, dass ein heterogenes Schließen der Stomata stattfindet (Mott and Parkhurst, 1991).

Transpiration nachts

„... there is much contradictory evidence as to whether or not the stomata of the majority of plants close at night.” (Francis Darwin, 1898)

Es wird generell angenommen, dass C₃ und C₄ Pflanzen ihre Stomata nachts im Dunkeln schließen, um Transpirationsverluste zu minimieren (Snyder et al., 2003). Das VPD und die Transpirationsrate von Pflanzen verändern sich im Tagesgang stark. Die niedrigsten Werte werden generell bei Sonnenaufgang beobachtet, ein Maximum um die Mittagszeit (15 Uhr) (Fletcher et al., 2007). Eine Reihe von Studien ergab eine Veränderung der Ionenkonzentration (vor allem von K⁺ und Cl⁻) und der Abscisinsäurekonzentration in den Schließzellen zwischen Tag und Nacht (Dawson et al., 2007). Schon vor über 100 Jahren äußerte Francis Darwin jedoch Zweifel daran, dass Pflanzen ihre Stomata nachts im Dunkeln vollständig schließen. Er ging davon aus, dass 87 % der Landpflanzen und 100 % der Feucht- und Wasserpflanzen ihre Stomata nachts geöffnet haben (Francis Darwin, 1898). Ein Öffnen der Stomata während der Nacht wird nicht erwartet, da kein Kohlenstoffgewinn stattfinden kann und ein Abkühlen der Blätter kaum notwendig ist (Caird et al., 2007).

Über verschiedene Messmethoden und Betrachtungsebenen hinweg gibt es Beweise dafür, dass die Stomata vieler Arten nachts teilweise geöffnet bleiben (Rawson and Clarke, 1988; Snyder et al., 2003; Dawson et al., 2007). Arten, bei welchen dies beobachtet wurde, umfassen eine Vielzahl an Gattungen und Lebensformen. Auch bei Getreidearten wie zum Beispiel Weizen findet eine nächtliche Transpiration statt (Rawson and Clarke, 1988). Das Ausmaß des nächtlichen Wasserverlustes hängt von der stomatären Leitfähigkeit und dem Wasserdampfsättigungsdefizit zwischen Blättern und umgebender Luft ab. Das VPD ist nachts generell sehr viel geringer als das VPD tagsüber. Dies führt zu einer nächtlichen Transpirationsrate, die typischerweise 5 % bis 15 % der Transpirationsrate am Tag ausmacht (Caird et al., 2007). Es gibt viele Hinweise darauf, dass die stomatäre Leitfähigkeit nachts auf ähnliche Art und Weise reguliert wird wie tagsüber. In natürlichen Systemen wurde beobachtet, dass ein steigendes VPD nachts mit einer höheren Transpirationsrate korreliert. Eine abnehmende stomatäre Leitfähigkeit mit steigendem VPD wurde bei einigen Arten festgestellt, auch wenn manche Daten auf keine Reaktion hindeuten (Caird et al., 2007). Weitere Faktoren, die vermutlich einen Einfluss auf die nächtliche Transpirationsrate haben, sind die Lichtintensität am Tag, die Länge der Photoperiode

und die Wasser- und Nährstoffverfügbarkeit. Untersuchungen weisen darauf hin, dass die stomatäre Leitfähigkeit während der Nacht nicht konstant ist und insbesondere eine verstärkte Öffnung der Stomata vor Tagesanbruch stattfindet (Caird et al., 2007).

Die Vorteile und Nachteile einer nächtlichen Transpiration sind noch größtenteils unbekannt. Mögliche Vorteile könnten eine erhöhte Kohlenstofffixierung in den frühen Morgenstunden sein, sobald Licht vorhanden ist. Außerdem könnte eine Transpiration während der Nacht zu einer besseren Nährstoffversorgung führen und den Sauerstofftransport in der Pflanze fördern. Eine nächtliche Transpiration könnte jedoch auch auftreten, weil ein vollständiges Schließen der Stomata beispielsweise durch asymmetrische Schließzellen verhindert wird (Caird et al., 2007). Auch wenn die Wasserverluste während der Nacht im Vergleich zu den Wasserverlusten am Tag weitaus geringer sind, sind sie nicht ohne Bedeutung für gestresste Pflanzen. Vor allem in ariden Gebieten und unter Windeinfluss können hohe nächtliche Transpirationsraten auftreten (Rawson and Clarke, 1988; Green et al., 1989).

Effekte von Wind

Wind ist ein weiterer äußerst komplizierter abiotischer Umweltfaktor, der verschiedene Effekte auf Pflanzen hat (Grace, 1974). Außerhalb des Blattes prägt die atmosphärische Luftbewegung in beträchtlichem Ausmaß die Menge und die Transportweise der die Pflanze verlassenden Wasserdampfmoleküle (Lösch, 2001). Je nach Blatteigenschaften (anatomische und morphologische Merkmale) und Windgeschwindigkeit führt Wind in Pflanzen zu einer Reduktion der laminaren Grenzschicht. Folgen dieser Reduktion sind eine Verringerung des Grenzflächenwiderstands, eine Erhöhung der Transpirationsrate und eine Zunahme der stomatären Leitfähigkeit. Außerdem führt Wind zu einem Herabsinken der Blatttemperatur und zu einer erhöhten Wärmeaustauschrate (Woolley, 1961). Mechanische Schäden an Cuticula und Stomata können einen erhöhten Wasserverlust zur Folge haben (Grace, 1974; Anten et al., 2010).

Bei Windstille kann der Grenzflächen-Widerstand der primäre Faktor sein, welcher der Transpiration entgegenwirkt. Eine Veränderung der stomatären Öffnungsweite hat unter diesen Bedingungen nur einen geringen Effekt auf die Transpirationsrate. Bei hohen Windgeschwindigkeiten wird die Transpiration dagegen vor allem durch den stomatären Öffnungsgrad bestimmt (Taiz et al., 2010) (Abb. 2).

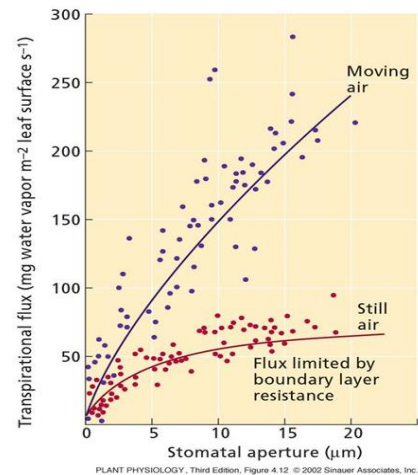


Abb. 2 Einfluss von Wind auf den Grenzflächenwiderstand und die Transpirationsrate in Abhängigkeit vom stomatären Öffnungsgrad

Bei einer Reduktion des Blattwassergehalts sollte man erwarten können, dass Pflanzen die Öffnungsweite ihrer Stomata verringern, um hohe Wasserverluste zu vermeiden. Untersuchungen ergaben, dass eine Zunahme der Windgeschwindigkeit die Transpirationsrate entweder erhöht (Grace, 1974; Grace and Russell, 1982; Martin and Clements), bei hohen Windgeschwindigkeiten reduziert (Caldwell, 1970; Martin and Clements) oder gar kein Effekt zu erkennen ist. Ein Grund für die Zunahme der Transpirationsrate in Gräsern bei hohen Windgeschwindigkeiten könnten laut Grace und Russell Schäden an der Blattoberfläche sein (Grace and Russell, 1982). Darwin und Pertz beobachteten, dass ein plötzlicher hoher Verlust an Wasser zu einer Öffnung der Stomata führte (Francis Darwin, 1898). Nach der Penman-Monteith Formel führt Wind jedoch zu einer Verringerung der Transpirationsrate (Monteith, 1995).

Effekte von Wind nachts

Bei Sonnenblumen (*Helianthus annuus* L.) wurde eine Verringerung der stomatären Öffnungsweite bei Windgeschwindigkeiten von über 1 m/s innerhalb von weniger als 30 Minuten festgestellt. Bei Abnahme der Windgeschwindigkeit öffneten sich die Stomata innerhalb von wenigen Stunden wieder. Wenn der Wind die ganze Nacht hindurch aufrechterhalten wurde, erreichte die Öffnungsweite der Stomata am nächsten Morgen nur die Hälfte der maximalen stomatären Öffnungsweite am Tag (Martin and Clements). Mehrere Untersuchungen der Effekte von Wind auf die nächtliche Transpirationsrate ergaben, dass insbesondere nachts die Transpirationsrate unter Windeinfluss stark zunimmt (Grace and Russell, 1982; Green et al., 1989; Dawson et al., 2007; Karpul and West, 2016; Martin and Clements). In Bezug auf die durchgeführten Experimente mit verschiedenen VPD-Stufen tagsüber

und nachts ist zu beachten, dass Wind in einem natürlichen Umfeld zu einer Herabsenkung des VPD führt (Dixon and Grace, 1984).

2. Material und Methoden

2.1 Versuchsort und Pflanzenmaterial

Der Versuch wurde von Ende März bis Anfang Juni 2018 in einem Gewächshaus und in einer VPD-Kammer des „Instituts für Pflanzenproduktion und Agrarökologie in den Tropen und Subtropen“ der Universität Hohenheim durchgeführt. Gegenstand der Untersuchungen waren die zwei Nassreissorten IR31785-58-1-2-3-3 (IR31) und IR4630-22-2 (IR46). Der Effekt von VPD und Wind auf die Transpirationsrate der zwei Nassreissorten wurde in einer VPD-Kammer tagsüber und nachts (ohne Licht von 20–24 Uhr) untersucht.

2.2 Versuchsaufbau und Pflanzenanzucht

Der Versuch wurde in einem vollständig randomisierten Design mit drei Wiederholungen angelegt. Für die Ernährung der Pflanzen wurde ein hydroponisches System gewählt (Tab. 1).

Pflanzenanzucht:

Die Samen der zwei Reissorten wurden in einer Plastikbox auf feuchtem Filterpapier ausgelegt und für ca. 72–96 Stunden in einem dunklen Schrank aufbewahrt. Bei der 2. und 3. Wiederholung der Anzucht wurden die Samen der Reissorte IR46 einen Tag früher als die von IR31 ausgelegt, da das verwendete Saatgut weniger gut keimte. Die vorgekeimten Samen wurden in mit Sand befüllte zusammenhängende Plastiktöpfe gesetzt. Diese wurden in eine Wanne platziert, die zu Beginn zur Hälfte mit Wasser befüllt wurde. 14 Tage nach Vorkeimen der Samen wurde die Wanne zur Hälfte mit 50%iger Yoshida-Nährlösung aufgefüllt (Abb. 3).

Weitere Anzucht:

18 Tage nach dem Vorkeimen der Samen wurden die Pflanzen in mit 1 Liter 50%iger Yoshida-Nährlösung befüllte Plastiktöpfe umgesetzt. Die Töpfe waren mit Aluminiumfolie umwickelt. Die Pflanzen fixierte ich mit Schaumstoff und positionierte sie so, dass die Wurzeln vollständig in der Nährlösung hingen (Abb. 4). Vor dem Umsetzen der Pflanzen wurden die Töpfe mit Nummern versehen. Für jede

Wiederholung wurde eine vollständige Randomisierung durchgeführt. In der ersten Woche nach Umsetzen wurden die Pflanzen in 50%ige Yoshida-Nährlösung gesetzt, um Salzstress zu vermeiden. Nach einer Woche wurde die gesamte Nährlösung ausgetauscht und dabei 100%ige Yoshida-Nährlösung verwendet. Im weiteren Verlauf des Versuchs wurde die Nährlösung jede Woche mit 100%iger Yoshida-Nährlösung erneuert. Sechs Wochen nach Versuchsbeginn begannen die Messungen in der VPD-Kammer. Für jede Messung wurden jeweils zwei Pflanzen von jeder Sorte ausgewählt, da in der VPD-Kammer zur selben Zeit Messungen bei vier Pflanzen durchgeführt werden konnten. Die Messungen wurden bei jeder Wiederholung innerhalb von 11 Tagen durchgeführt. Vor jeder Messung tagsüber wurden die ausgewählten Töpfe am Abend zuvor mit 100%iger Yoshida-Nährlösung vollständig aufgefüllt. Vor jeder Messung nachts geschah dies am Tag der Messung zur Mittagszeit.



Abb. 3 Reispflanzen in Sand



Abb. 4 Reispflanzen in Nährlösung

Tab. 1 Yoshida-Nährlösung

Element	Chemikalie	Stammlösung [g/l]	Stammlösung pro Liter [ml/l]	Konzentration Nährlösung [ppm]
N	NH_4NO_3	114,29	1	114290
P	$\text{NaH}_2\text{PO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	50,37	1	50370
K	K_2SO_4	89,14	1	89140
Ca	$\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	146,73	1	146720
Mg	$\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$	405,65	1	405650
Fe	FeNa - EDTA	15,08	1	15080
Mn	$\text{MnCl}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$	1,8750	1	1875
Zn	$\text{ZnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$	0,0440		44
Cu	$\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$	0,0393		39,3
Mo	$(\text{NH}_4)_6\text{Mo}_7\text{O}_{24} \cdot 4\text{H}_2\text{O}$	0,0920		92
B	H_3BO_3	1,1675		1167,5

2.3 Aufbau der Transpirationskammer

Die Messkammer zur Messung der Transpirationsrate von Reispflanzen bei unterschiedlichen VPD-Stufen und unter Windeinfluss befand sich im Keller des „Instituts für Agrarökologie und Pflanzenproduktion in den Tropen und Subtropen“ der Universität Hohenheim. In der Kammer können verschiedene VPD-Stufen simuliert werden und mithilfe der Messung des Gewichtsverlusts der Töpfe kann die Transpirationsrate der untersuchten Pflanzen bestimmt werden.

Die Kammer bestand aus zwei separaten Kammern: der Mischkammer, in der die gewünschte Atmosphäre vorgemischt wurde und der eigentlichen Messkammer, in der sich die Reispflanzen befanden. Beide Kammern waren ungefähr gleich groß, mit Maßen von 100 cm x 68 cm x 80 cm. Das Gerüst der Kammer bestand aus Holzplatten und die Wände aus durchsichtigem Plexiglas. Als Außenverkleidung der Mischkammer dienten Kunststoffplatten. In einer Aussparung an der Vorderseite fungierte eine Plexiglasplatte als Schiebefenster, um einen Zugriff auf das Innere der Mischkammer zu ermöglichen. Ein trockener oder feuchter Luftstrom wurde mit Hilfe eines Absorptionstrockners (Firma DST Seibu Girken, Modell Consorb DC-10, Seibu Girken) erzeugt und über Plastikrohre in ein 60 l Kunststofffass geleitet. Durch eingebaute Klappventile in den Plastikrohren konnten die Luftströme separat gesteuert werden. Am Boden des Fasses stehend, befanden sich im Wasser zwei Ultraschallluftbefeuchter (Firma Seliger GmbH, Modell Fogstar 300). Durch die Schwingungen von drei Glasmembranen der Luftbefeuchter entstand ein Ultraschall, der das Wasser fein verstäubte. Ein zweiter Plastikschlauch führte aus dem Fass heraus und in die Mischkammer hinein. Ein 80 mm PC-Lüfter, der sich zwischen Schlauch und Mischkammer befand, saugte die vorgetrocknete bzw. vorbefeuchtete Luft in die Mischkammer. Für die Temperaturregulierung wurden zwei 12 V-Keramikheizelemente genutzt, die sich in der Mischkammer befanden. Die Lüfter, die Heizung und die Ultraschallluftbefeuchter waren an einen Mikrocontroller (Firma Atmel Corporation, Modell ATMEGA.132) angeschlossen und wurden durch diesen gesteuert. Am Lufteinlass und Luftauslass der Kammer war jeweils eine Sensorträgerplatte angebracht. Die Informationen, die von der Sensorträgerplatte aufgezeichnet wurden, wurden von dem Mikrocontroller verarbeitet. Mischkammer und Messkammer waren über einen Plastikschlauch miteinander verbunden. Die Luft wurde aus der Mischkammer mithilfe eines PC-Lüfters in die Messkammer gesaugt. An der Decke der Messkammer befanden sich drei 80 mm PC-Lüfter, die mit

einem Labornetzteil verbunden waren. Die Drehzahl der Lüfter konnte über ein Netzteil manuell reguliert werden. Die Umluft diente zum einen der Luftumwälzung und Zirkulation der Luft, zum anderen konnten Unterschiede der Luftfeuchtigkeit und laminare Grenzschichteffekte, die bei Windstille die Transpiration einschränken, minimiert werden. Als Lichtquelle in der Messkammer diente tagsüber ein 360 W LED-Panel. Die Messkammer war an den Außenseiten mit Plexiglas verkleidet. Durch eine Schiebetür wurden die Pflanzen in die Kammer gestellt. Am Boden der Kammer befanden sich vier Feinwaagen (Firma Kern & Sohn GmbH Modell KB 2400-2N d = 0,01 g, max. Gewicht: 2400 g). Die Gewichtsänderung der Töpfe konnte in regelmäßigen Intervallen von einer Minute mit Hilfe der GrasLog-Software abgelesen und gespeichert werden. Über die Steuerungssoftware HTerm (<http://www.der-hammer.info/terminal/>) wurde die gewünschte Atmosphäre verändert und überwacht. Mit Hilfe einer vorgefertigten Matrice konnte aus der relativen Luftfeuchtigkeit in % (rF%) und der Temperatur in °C das Wasserdampfsättigungsdefizit der Luft (VPD) in der Messkammer für jede Minute berechnet werden.

2.4 Transpirationsmessung VPD (-/+/-) und VPD (+/-/+) tagsüber und nachts

Tagsüber und nachts (20–24 Uhr ohne Licht) wurde die Transpirationsrate bei jeweils vier VPD-Stufen gemessen. Dabei wurden zwei verschiedene Abfolgen der VPD-Stufen untersucht: die Abfolge VPD niedrig – VPD hoch – VPD niedrig (VPD -/+/-) und die Abfolge VPD hoch – VPD niedrig – VPD hoch (VPD +/-/+). Eine starke atmosphärische Dürre könnte in der Pflanze eine Reaktion hervorrufen, welche die spätere Transpirationsraten bei hoher Luftfeuchtigkeit beeinflusst. Die beiden Messreihen können deshalb zu unterschiedlichen Ergebnissen in der Transpirationsrate führen.

Bei jeder Messung wurden vier Pflanzen in der Messkammer platziert. Jeweils zwei Pflanzen der Reissorte IR31 und zwei Pflanzen der Sorte IR46. Vor Messbeginn musste in der Kammer zunächst ein konstanter Wert für die jeweilige VPD-Stufe durch Festlegung der Parameter Temperatur und relative Luftfeuchtigkeit erreicht werden. Danach wurden die Pflanzen auf die vier Waagen verteilt. Der Gewichtsverlust der Töpfe wurde jede Minute automatisch über die GrasLog-Software registriert. Nach Messung der Blattfläche der einzelnen Pflanzen konnte mithilfe des Gewichtsverlusts

in g pro Minute die jeweilige transpierte Wassermenge in mmol (H₂O) /m²/s errechnet werden.

Das Ziel war es für jede VPD-Stufe einen konstanten Transpirationswert bzw. Gewichtsverlust zu erreichen. Dies dauerte bei jeder VPD-Stufe ca. 30 Minuten, sodass ein Messdurchgang insgesamt ca. 4 Stunden in Anspruch nahm. Die erreichten Werte von relativer Luftfeuchtigkeit, Temperatur und VPD während eines Messdurchgangs sind in Abb. 5 exemplarisch für die Abfolge VPD (+/-/+) tagsüber bei Wdh.1 dargestellt. Tagsüber wurde in der Messkammer eine Temperatur von 28°C festgelegt, nachts eine Temperatur von 22°C. Ein Anstieg der Temperatur in der Messkammer von 22°C auf ca. 27°C, verursacht durch den Trocknungsvorgang, hatte zur Folge, dass für die VPD-Stufen nachts keine konstanten Werte erreicht werden konnten (Abb. 19). Um diesem Problem entgegenzuwirken wurde bei der 3.Wdh. nachts die Temperatur auf 26°C festgelegt.

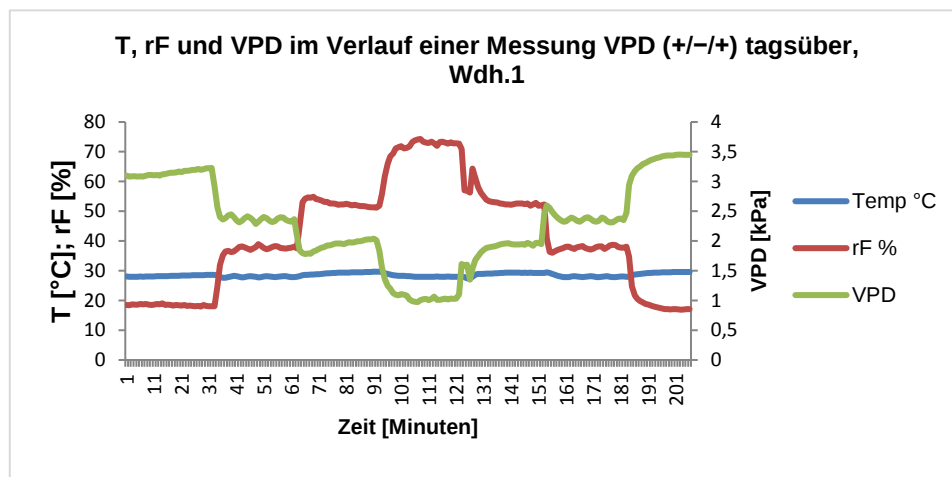


Abb. 3 Temperatur (T), relative Luftfeuchtigkeit (rF) und VPD im Verlauf einer Messung VPD (+/-/+) tagsüber, Wdh.1

2.5 Windeffekte auf die Transpiration VPD niedrig und VPD hoch tagsüber und nachts

Um Windeffekte auf die Transpiration der zwei Reissorten zu untersuchen, wurde ein Ventilator zwischen die vier Waagen platziert (Abb. 6). Außerdem wurde die Drehzahl der drei Lüfter an der Decke der Kammer maximiert. Mit Hilfe eines Heißdraht-Anemometers (OMEGA Engineering, HHF2005HW, Deckenpfronn, Deutschland) wurde die Windgeschwindigkeit auf der gleichen Höhe über den vier Waagen bestimmt. Auf der zum Ventilator zugewandten Seite betrug die Windgeschwindigkeit 1,0–1,2 m/s. „Ohne“ Wind betrug die Windgeschwindigkeit in der Kammer ca. 0,6–0,7 m/s.



Abb. 4 Anordnung der Pflanzen in der VPD-Kammer

Der Effekt der Windgeschwindigkeit auf die Transpiration bzw. stomatäre Leitfähigkeit wurde bei niedrigem VPD (VPD –) und hohem VPD (VPD +) tagsüber und nachts gemessen. Dabei wurde bei jeder Wiederholung die Transpiration bei zwei VPD-Abfolgen VPD niedrig – VPD hoch (VPD –/+) und VPD hoch – VPD niedrig (VPD +/–) gemessen. Nachts konnte wiederum die Temperatur von 22°C nicht konstant gehalten werden, sodass bei der 3. Wdh. die Temperatur auf 26°C festgelegt wurde.

Ein Messdurchgang hatte folgenden Ablauf. Zunächst musste in der Kammer ein konstanter Wert für die jeweilige VPD-Stufe erreicht werden. Danach wurden die Pflanzen auf die vier Waagen verteilt. Nach Erreichen eines stabilen Transpirationswertes (nach ca. 30 Minuten) wurde der Ventilator eingeschaltet und die Drehzahl der PC-Lüfter auf das Maximum erhöht, indem die Spannung des Netzteils von zunächst 5 V auf 15,5 V erhöht wurde. Nach 30 Minuten wurde der Ventilator ausgeschaltet und die Drehzahl der PC-Lüfter auf den Ursprungswert reduziert. Die Transpiration nach dem Windereignis wurde für weitere 30 Minuten gemessen. Danach wurde die relative Luftfeuchtigkeit in der Kammer je nach VPD-Abfolge erhöht oder reduziert.

2.6 Bestimmung der Blattfläche und des Trockengewichts

Die Blattfläche der Reispflanzen wurde nach jeder durchgeführten Transpirationssmessung bestimmt. Zunächst wurden die vertrockneten Blätter entfernt und in beschriftete Papiertüten verpackt. Außerdem wurde die Anzahl an Bestockungstrieben bestimmt. Für die Messung der Blattfläche wurde das Gerät „Portable Area Meter LI-3000C“ der Firma Licor eingesetzt. Die Blätter wurden auf einem Plastikband mit Hilfe von zwei Rollwalzen über einen Sensor geführt, der die Blattfläche scannte.

Für die Bestimmung der Trockenmasse wurden die Wurzeln vom Stängel abgetrennt und die Schaumstofffixierung vorsichtig von Wurzel und Stängel entfernt. Blätter, Stängel und Wurzeln wurden in beschriftete Papiertüten verpackt und bei 72°C in einem Ofen getrocknet bis nach 2–3 Tagen eine Gewichtskonstanz erreicht wurde. Das jeweilige Trockengewicht wurde mit einer Feinwaage bestimmt.

2.7 Datenauswertung

Statistische Auswertung

Die Bearbeitung der Rohdaten, Erstellung von Tabellen und Diagrammen und die statistische Auswertung erfolgte mit Hilfe von Excel 2010. Es wurde das Add-In „Analyse-Funktion“ genutzt. Genutzte Funktionen waren die einfaktorielle Varianzanalyse und die zweifaktorielle Varianzanalyse mit Messwiederholung. Außerdem wurde auf der Website <http://vassarstats.net/vsancova.html> eine Kovarianzanalyse (One-Way Ancova) durchgeführt, um die Transpirationsrate und stomatäre Leitfähigkeit der beiden Sorten zu vergleichen.

Berechnung Transpirationsrate VPD-Stufen und Windexperiment

Die Gewichtsänderung der Töpfe wurde für ein einminütiges Intervall aus den aufgezeichneten Gewichtswerten der Waagen bestimmt. Nach Messung der Blattfläche konnte über den Gewichtsverlust in g pro Minute die jeweilige transpierte Wassermenge in mmol (H₂O) /m²/s errechnet werden. Für jede VPD-Stufe wurde ein zehnminütiges Intervall ausgewählt, in dem die Transpirationsrate einen konstanten Wert annahm (Abb. 7). Danach wurden für das ausgewählte Intervall die Mittelwerte für VPD und Transpirationsrate gebildet und die Standardabweichungen vom jeweiligen Mittelwert berechnet. Da die Werte für die einzelnen VPD-Stufen über die drei Wiederholungen nicht konstant waren, wurden für die Darstellung in Diagrammen

vier VPD-Klassen gebildet und die Standardabweichung der VPD-Stufen und der Transpirationsrate für jede Klasse berechnet (Tab. 2, 3, 4, 5).

Beim Windexperiment wurde die Transpirationsrate für ein zehnminütiges Intervall vor Windeinfluss bestimmt. Für die Berechnung der Transpirationsrate unter Windeinfluss wurde das gesamte 30-minütige Intervall ausgewählt. Um mögliche Reaktionen der Stomata auf den Windeinfluss zu ermitteln, wurde für die ersten 10 Minuten nach Windeinfluss die Transpirationsrate bestimmt.

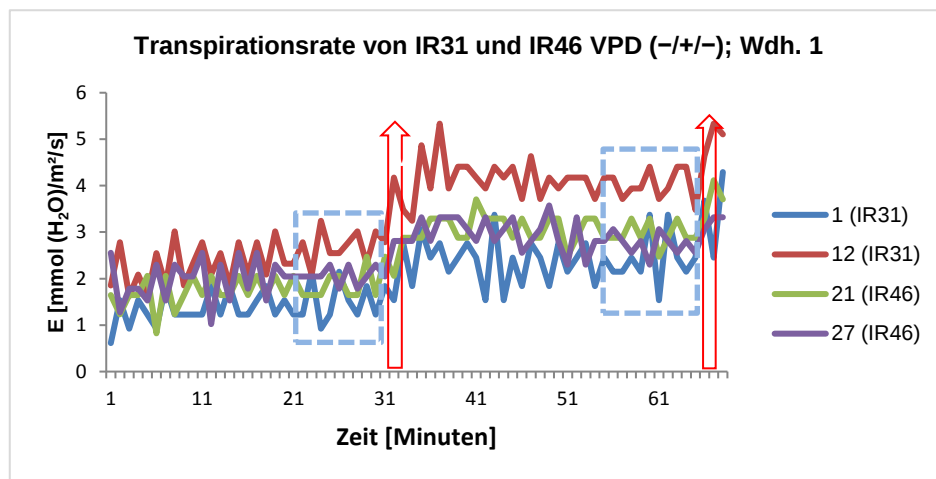


Abb. 5 Auswahl eines zehnminütigen Intervalls mit konstanter Transpirationsrate bei zwei VPD-Stufen

Berechnung der stomatären Leitfähigkeit

Die stomatäre Leitfähigkeit ist ein Maß für den Öffnungsgrad der Stomata. Die Formel leitet sich aus dem ersten Fick'schen Gesetz ab (Flussrate = Gradient/Widerstand). Für die Berechnung der stomatären Leitfähigkeit bildet man den Quotienten aus Transpirationsrate und dem Wasserdampfdruckdefizit zwischen Blatt und Luft (VPD). Die treibende Kraft VPD wird in Defizit pro Gesamtdruck in der Messkammer ausgedrückt, um einen dimensionslosen Wert zu erhalten.

$$\text{Stomatäre Leitfähigkeit} = \frac{\text{Transpiration} \left[\frac{\text{mmol}}{\text{m}^2 \text{s}} \right]}{\frac{\text{VPD} [\text{Pa}]}{\text{Druck in der Messkammer} [\text{Pa}]}}$$

3. Ergebnisse

3.1 Transpirationsrate und stomatäre Leitfähigkeit tagsüber in Abhängigkeit vom atmosphärischen Dampfdruckdefizit (VPD)

Die vier Datenpunkte in Abb. 8 repräsentieren die Mittelwerte der Transpirationsrate und stomatären Leitfähigkeit der beiden Reissorten tagsüber bei jeweils 4 VPD-Stufen. Die Mittelwerte der VPD-Stufen, Transpirationsrate, stomatären Leitfähigkeit und die jeweiligen p-Werte der einfaktoriellen Varianzanalyse über die 4 VPD-Stufen sind Tab. 2 (VPD-Abfolge -/+/-) und Tab. 3 (VPD-Abfolge +/-+) zu entnehmen.

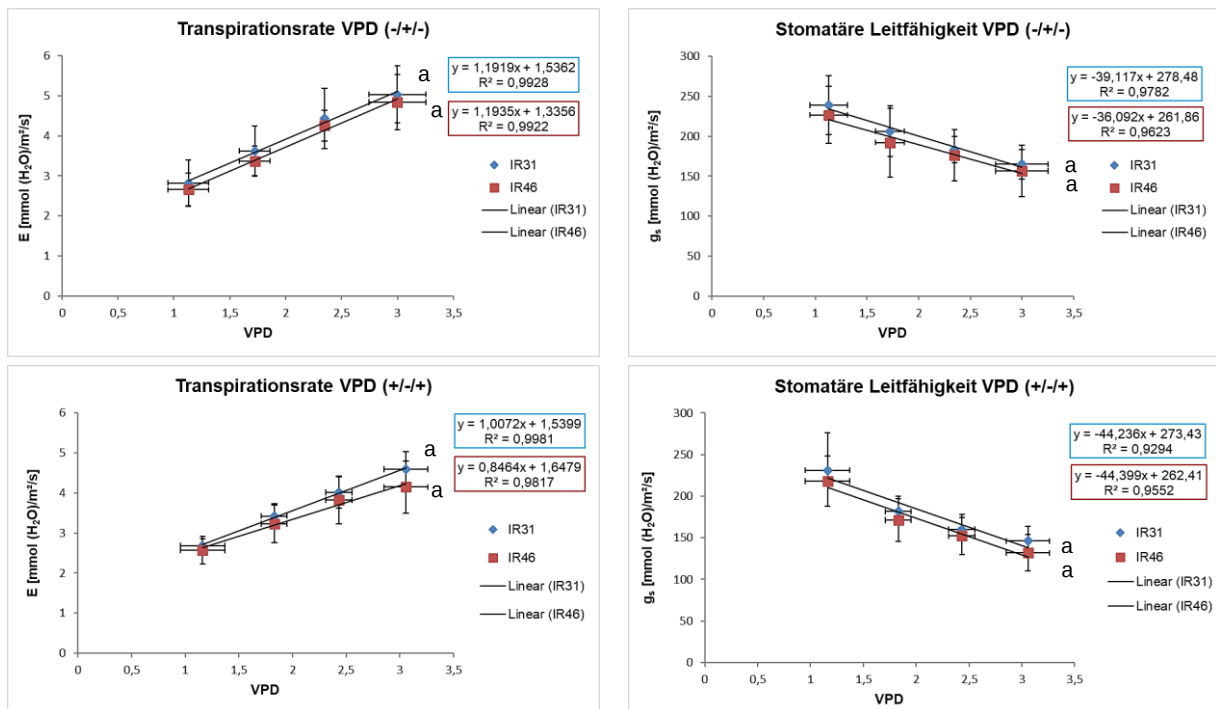


Abb. 6 Transpirationsrate und stomatäre Leitfähigkeit der zwei Reissorten IR31 und IR46 tagsüber in Abhängigkeit vom atmosphärischen Dampfdruckdefizit (VPD)

Die Kleinbuchstaben weisen auf vorhandene/ nicht vorhandene signifikante Unterschiede zwischen den Regressionsgeraden hin ($p \leq 0,05$).

VPD (-/+/-): VPD-Abfolge niedrig-hoch-niedrig; VPD (+/-+): VPD-Abfolge hoch-niedrig-hoch

Die Transpirationsrate tagsüber nimmt sowohl bei IR31 als auch bei IR46 mit steigendem VPD zu. Die stomatäre Leitfähigkeit sinkt bei beiden Sorten mit zunehmendem VPD. Es wurde eine lineare Regressionsgerade an die Datenpunkte angepasst. Bei beiden VPD-Abfolgen weist IR46 eine etwas niedrigere Transpirationsrate und stomatäre Leitfähigkeit auf als IR31. Um festzustellen, ob die Transpirationsrate und stomatäre Leitfähigkeit bei der jeweiligen Sorte bei einer Erhöhung des VPD signifikant zu- oder abnimmt, wurde eine einfaktorielle Varianzanalyse für jede VPD-Stufe durchgeführt. Die Transpirationsrate der zwei Reissorten steigt bei beiden VPD-Abfolgen mit zunehmender VPD-Stufe (1–4) signifikant an ($p < 0,001$). Die stomatäre Leitfähigkeit der beiden Reissorten sinkt

signifikant ($p < 0,001$) bei beiden VPD-Abfolgen mit zunehmender VPD-Stufe (1–4). Um die Transpirationsrate und stomatäre Leitfähigkeit der beiden Sorten auf signifikante Unterschiede zu überprüfen, wurde eine einfaktorielle Varianzanalyse für jede Stufe und eine zweifaktorielle Varianzanalyse mit Messwiederholungen durchgeführt. Die einfaktorielle Varianzanalyse für jede VPD-Stufe ergab für beide VPD-Abfolgen keine signifikanten Unterschiede zwischen den Sorten ($p > 0,05$). Die zweifaktorielle Varianzanalyse erfasste für die Abfolge VPD (+/-/+) signifikante Unterschiede in der Transpirationsrate und stomatären Leitfähigkeit zwischen den Reissorten ($p < 0,05$). Die angepassten Regressionsgeraden der Sorten wurden über eine Kovarianzanalyse auf signifikante Unterschiede untersucht. Für beide VPD-Abfolgen ergaben sich keine signifikanten Unterschiede zwischen den Regressionsgeraden der beiden Sorten ($p > 0,05$). Die Abfolge der VPD-Stufen hat einen Einfluss auf die Höhe der Transpirationsrate und stomatären Leitfähigkeit. Eine zweifaktorielle Varianzanalyse mit den Faktoren VPD-Abfolge und VPD-Stufe ergab für beide Sorten signifikant niedrigere Werte ($p < 0,001$) bei der VPD-Abfolge VPD (+/-/+) als bei der VPD-Abfolge VPD (-/+/-).

Tab. 2 Transpirationsrate (E) und stomatäre Leitfähigkeit (g_s) tagsüber über 4 VPD-Stufen, VPD-Abfolge (-/+/-), p-Wert einfaktorielle Varianzanalyse

VPD [kPa]	E (IR31) [mmol (H ₂ O)/m ² /s]	E (IR46) [mmol (H ₂ O)/m ² /s]	p-Wert	g_s (IR31) [mmol (H ₂ O)/m ² /s]	g_s (IR46) [mmol (H ₂ O)/m ² /s]	p-Wert
1,13 ± 0,18	2,83 ± 0,57	2,65 ± 0,42	0,43	238,68 ± 35,51	226,62 ± 36,73	0,44
1,72 ± 0,14	3,62 ± 0,63	3,37 ± 0,38	0,27	206,21 ± 43,21	192,02 ± 31,97	0,39
2,35 ± 0,01	4,43 ± 0,76	4,26 ± 0,38	0,51	183,47 ± 32,27	176,16 ± 16,43	0,51
3,0 ± 0,26	5,04 ± 0,72	4,84 ± 0,69	0,67	164,78 ± 32,16	156,68 ± 18,73	0,63

Tab. 3 Transpirationsrate (E) und stomatäre Leitfähigkeit (g_s) tagsüber über 4 VPD-Stufen, VPD-Abfolge (+/-/+), p-Wert einfaktorielle Varianzanalyse

VPD [kPa]	E (IR31) [mmol (H ₂ O)/m ² /s]	E (IR46) [mmol (H ₂ O)/m ² /s]	p-Wert	g_s (IR31) [mmol (H ₂ O)/m ² /s]	g_s (IR46) [mmol (H ₂ O)/m ² /s]	p-Wert
1,16 ± 0,21	2,68 ± 0,18	2,57 ± 0,34	0,55	231,00 ± 45,40	218,02 ± 30,33	0,61
1,83 ± 0,12	3,42 ± 0,31	3,23 ± 0,47	0,27	181,54 ± 18,42	171,16 ± 25,53	0,29
2,43 ± 0,13	4,01 ± 0,40	3,82 ± 0,60	0,4	160,04 ± 17,77	152,11 ± 22,03	0,36
3,06 ± 0,2	4,59 ± 0,44	4,14 ± 0,65	0,07	145,99 ± 17,62	131,79 ± 21,95	0,11

3.2 Transpirationsrate und stomatäre Leitfähigkeit nachts in Abhängigkeit vom atmosphärischen Dampfdruckdefizit (VPD)

Die vier Datenpunkte in Abb. 9 repräsentieren die Mittelwerte der Transpirationsrate und stomatären Leitfähigkeit der beiden Reissorten nachts bei jeweils 4 VPD-Stufen. Die Mittelwerte der VPD-Stufen, Transpirationsrate, stomatäre Leitfähigkeit und die jeweiligen p-Werte der einfaktoriellen Varianzanalyse über die 4 VPD-Stufen sind Tab. 4 (VPD-Abfolge -/+/-) und Tab. 5 (VPD-Abfolge +/-/+) zu entnehmen.

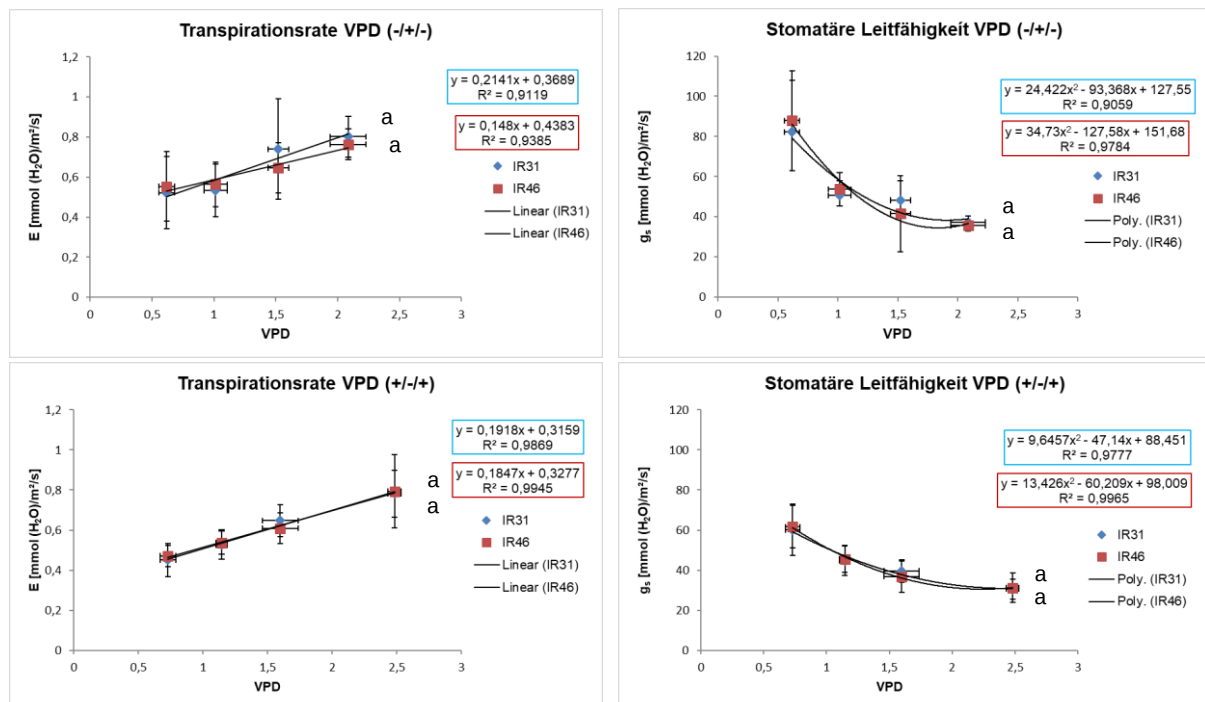


Abb. 7 Transpirationsrate und stomatäre Leitfähigkeit der zwei Reissorten IR31 und IR46 nachts in Abhängigkeit vom atmosphärischen Dampfdruckdefizit (VPD)

Die jeweils unterschiedlichen/ gleichen Kleinbuchstaben weisen auf vorhandene/nicht vorhandene signifikante Unterschiede zwischen den angepassten Regressionen hin ($p \leq 0,05$).

VPD (-/+/-): VPD-Abfolge niedrig-hoch-niedrig; VPD (+/-/+): VPD-Abfolge hoch-niedrig-hoch

Die Transpirationsrate nachts nimmt sowohl für IR31 als auch für IR46 mit steigendem VPD zu. Es wurde eine lineare Regressionsgerade an die Datenpunkte angepasst. Die stomatäre Leitfähigkeit nimmt für die zwei Reissorten mit steigendem VPD ab und nähert sich bei beiden VPD-Abfolgen bei einem VPD-Wert über 2,5 kPa einem Minimum an. An die Datenpunkte wurde ein Polynom 2. Grades angepasst. Bei der VPD-Abfolge (-/+/-) weist IR46 bei niedrigen VPD-Werten eine leicht höhere Transpirationsrate und stomatäre Leitfähigkeit auf als IR31. Bei einer Erhöhung des VPD-Wertes über 1,0 kPa weist IR31 höhere Werte auf als IR46. Bei der VPD-Abfolge (+/-/+) unterscheiden sich die beiden Reissorten in ihrer Transpirationsrate und stomatären Leitfähigkeit in Abhängigkeit des VPD kaum. Um festzustellen, ob die Transpirationsrate und stomatäre Leitfähigkeit bei der jeweiligen

Sorte bei einer Erhöhung des VPD signifikant zu- oder abnimmt, wurde eine einfaktorielle Varianzanalyse für jede VPD-Stufe durchgeführt. Die Transpirationsrate der zwei Reissorten steigt bei beiden VPD-Abfolgen mit zunehmender VPD-Stufe (1–4) signifikant an ($p < 0,05$). Die stomatäre Leitfähigkeit der beiden Reissorten sinkt bei beiden VPD-Abfolgen mit zunehmender VPD-Stufe (1–4) signifikant ($p < 0,01$). Um die Transpirationsrate und stomatäre Leitfähigkeit der beiden Sorten auf signifikante Unterschiede zu überprüfen, wurde wiederum eine einfaktorielle Varianzanalyse für jede VPD-Stufe und eine zweifaktorielle Varianzanalyse mit Messwiederholungen durchgeführt. Die einfaktorielle Varianzanalyse für jede VPD-Stufe ergab bei beiden VPD-Abfolgen keine signifikanten Unterschiede zwischen den Sorten ($p > 0,05$). Auch die zweifaktorielle Varianzanalyse erfasste bei beiden VPD-Abfolgen keine signifikanten Unterschiede in der Transpirationsrate und stomatären Leitfähigkeit der beiden Sorten ($p < 0,05$). Die angepassten Regressionen in den Diagrammen wurden über eine Kovarianzanalyse auf signifikante Unterschiede untersucht. Für beide VPD-Abfolgen ergaben sich keine signifikanten Unterschiede zwischen den angepassten Regressionen ($p > 0,05$). Die Abfolge der VPD-Stufen hat keinen Einfluss auf die Höhe der Transpirationsrate. Eine zweifaktorielle Varianzanalyse ergab bei beiden Reissorten bei der VPD-Abfolge (+/-/+) signifikant niedrigere Werte der stomatären Leitfähigkeit als bei der VPD-Abfolge (-/+/-).

Tab. 4 Transpirationsrate (E) und stomatäre Leitfähigkeit (g_s) nachts über 4 VPD-Stufen, VPD-Abfolge (-/+/-), p-Wert einfaktorielle Varianzanalyse

VPD [kPa]	E (IR31) [mmol (H ₂ O)/m ² /s]	E (IR46) [mmol (H ₂ O)/m ² /s]	p-Wert	g_s (IR31) [mmol (H ₂ O)/m ² /s]	g_s (IR46) [mmol (H ₂ O)/m ² /s]	p-Wert
0,63 ± 0,07	0,53 ± 0,17	0,55 ± 0,17	0,63	82,15 ± 22,74	87,59 ± 23,58	0,59
1,01 ± 0,09	0,57 ± 0,16	0,56 ± 0,11	0,7	50,59 ± 8,22	53,74 ± 7,34	0,87
1,52 ± 0,08	0,74 ± 0,25	0,65 ± 0,13	0,31	48,20 ± 18,89	41,53 ± 9,85	0,59
2,09 ± 0,14	0,80 ± 0,10	0,76 ± 0,08	0,63	37,26 ± 2,65	35,62 ± 3,04	0,51

Tab. 5 Transpirationsrate (E) und stomatäre Leitfähigkeit (g_s) nachts über 4 VPD-Stufen, VPD-Abfolge (+/-/+), p-Wert einfaktorielle Varianzanalyse

VPD [kPa]	E (IR31) [mmol (H ₂ O)/m ² /s]	E (IR46) [mmol (H ₂ O)/m ² /s]	p-Wert	g_s (IR31) [mmol (H ₂ O)/m ² /s]	g_s (IR46) [mmol (H ₂ O)/m ² /s]	p-Wert
0,73 ± 0,06	0,45 ± 0,08	0,47 ± 0,05	0,9	60,14 ± 12,75	61,61 ± 10,60	0,86
1,15 ± 0,04	0,53 ± 0,07	0,54 ± 0,06	0,82	44,65 ± 7,29	45,62 ± 6,85	0,82
1,60 ± 0,14	0,65 ± 0,08	0,61 ± 0,08	0,34	39,52 ± 5,64	36,82 ± 7,78	0,43
2,48 ± 0,05	0,78 ± 0,12	0,79 ± 0,18	0,91	30,57 ± 5,03	31,16 ± 7,38	0,89

3.3 Effekte von Wind auf die Transpirationsrate tagsüber

Die Säulen in den jeweiligen Diagrammen repräsentieren die Transpirationsrate der beiden Reissorten IR31 und IR46 tagsüber, vor dem Windereignis (vor Wind), während dem Windereignis (Wind) und nach dem Windereignis (nach Wind) bei einem VPD von ca. 1,0 kPa (VPD niedrig) und einem VPD von ca. 2,7 kPa (VPD hoch).

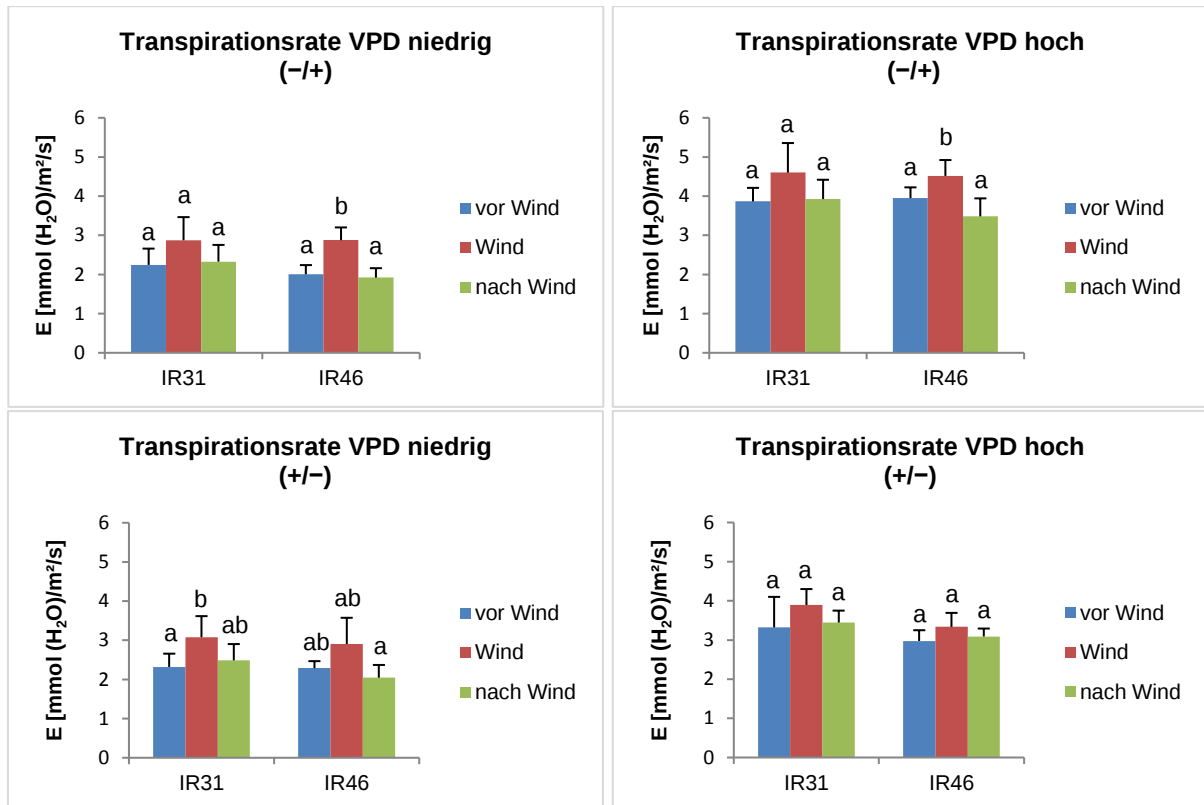


Abb. 8 Effekte von Wind auf die Transpirationsrate tagsüber bei niedrigem und hohem VPD

Die jeweils unterschiedlichen/ gleichen Kleinbuchstaben weisen auf vorhandene/nicht vorhandene signifikante Unterschiede zwischen den Behandlungen hin ($p \leq 0,05$).

VPD (-/+): VPD-Abfolge niedrig-hoch; VPD (+/-): VPD-Abfolge hoch-niedrig

Um Unterschiede in der Transpirationsrate zwischen den Behandlungen festzustellen, wurde eine einfaktorielle Varianzanalyse durchgeführt. Sowohl bei hohem als auch bei niedrigem VPD konnten bei beiden Reissorten keine Unterschiede zwischen der Transpirationsrate vor und nach dem Windereignis festgestellt werden ($p > 0,05$). Die Transpirationsrate erhöhte sich bei beiden Sorten und bei beiden VPD-Stufen während dem Windereignis. Eine signifikant höhere Transpirationsrate während dem Windereignis als vor und nach dem Windereignis ist bei IR46 bei niedrigem und hohem VPD bei der VPD-Abfolge (-/+) festzustellen ($p < 0,001$), eine signifikant höhere Transpirationsrate von IR46 während dem Windereignis als nach dem Windereignis ($p < 0,05$) bei niedrigem VPD bei der VPD-Abfolge (+/-). Die Transpirationsrate von IR31 erhöht sich während dem Windereignis gegenüber vor dem Windereignis signifikant ($p < 0,05$) bei niedrigem VPD bei der VPD-Abfolge (+/-). Keine

Unterschiede zwischen den Behandlungen wurden für IR31 bei niedrigem und hohem VPD bei der VPD-Abfolge (-/+) festgestellt ($p > 0,05$). Bei hohem VPD weisen beide Reissorten bei der VPD-Abfolge (+/-) keine Unterschiede zwischen den Behandlungen auf.

3.3.1 Vergleich der Auswirkungen von zwei VPD-Abfolgen auf die Transpirationsrate tagsüber unter Windeinfluss

Um festzustellen welchen Effekt die VPD-Abfolge auf die Transpirationsrate vor, während und nach dem Windereignis hat, wurde eine einfaktorielle Varianzanalyse durchgeführt. Beide Reissorten weisen bei hohem VPD bei der VPD-Abfolge (-/+) höhere Transpirationsraten auf als bei der Abfolge VPD (+/-). Bei den Messungen vor dem Windereignis und während dem Windereignis ergab sich eine signifikant höhere Transpirationsrate ($p < 0,001$) für IR46 bei der VPD-Abfolge (-/+) als bei der VPD-Abfolge (+/-) bei hohem VPD.

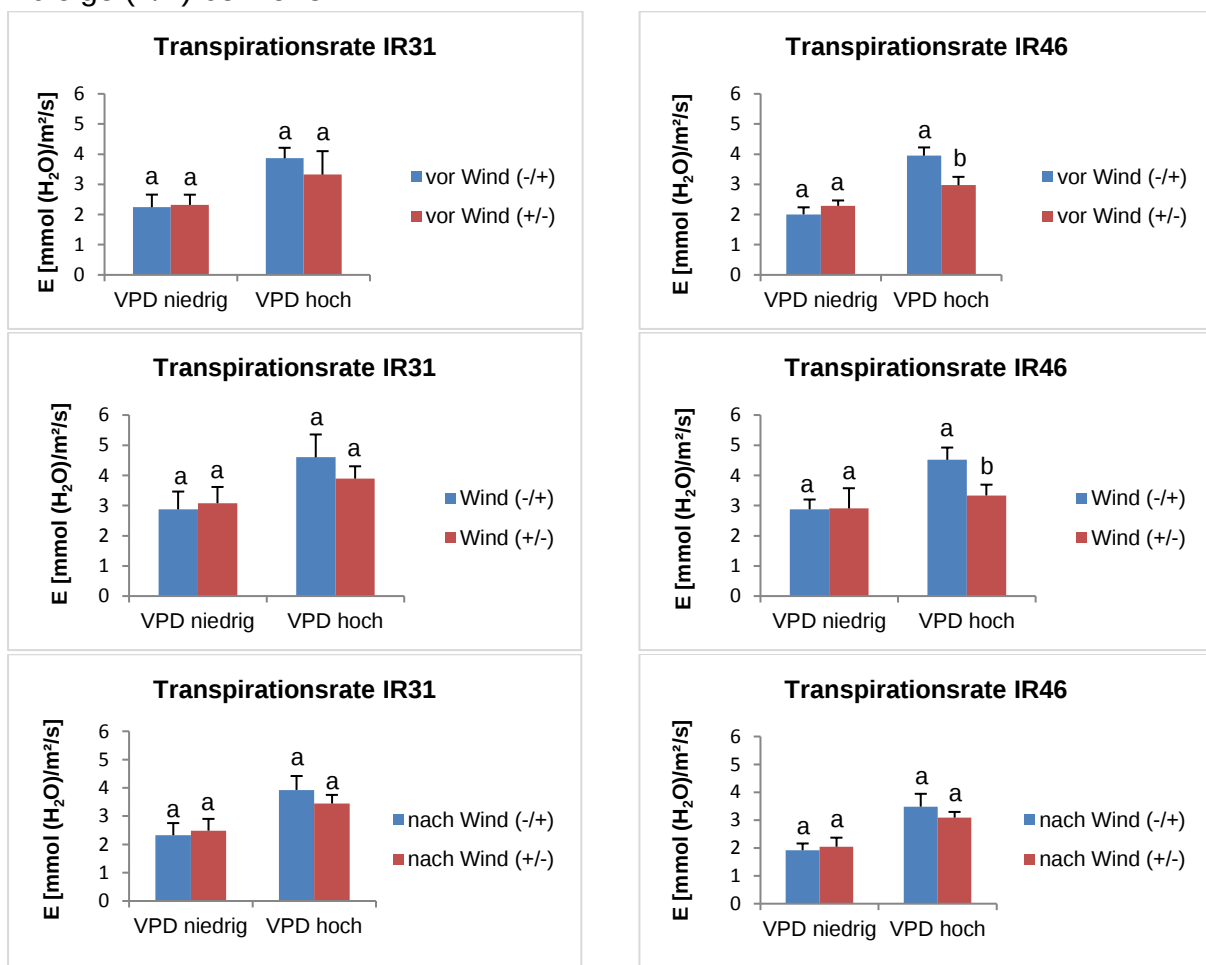


Abb. 9 Vergleich der Auswirkungen von zwei VPD-Abfolgen auf die Transpirationsrate tagsüber unter Windeinfluss

Die jeweils unterschiedlichen/ gleichen Kleinbuchstaben weisen auf vorhandene/nicht vorhandene signifikante Unterschiede zwischen den VPD-Abfolgen hin ($p \leq 0,05$).

(-/+): VPD-Abfolge niedrig-hoch; (+/-): VPD-Abfolge hoch-niedrig

3.4 Effekte von Wind auf die stomatäre Leitfähigkeit tagsüber

Die Säulen in den jeweiligen Diagrammen repräsentieren die stomatäre Leitfähigkeit der beiden Reissorten IR31 und IR46 tagsüber, vor dem Windereignis (vor Wind), während dem Windereignis (Wind) und nach dem Windereignis (nach Wind) bei einem VPD von ca. 1,0 kPa (VPD niedrig) und einem VPD von ca. 2,7 kPa (VPD hoch).

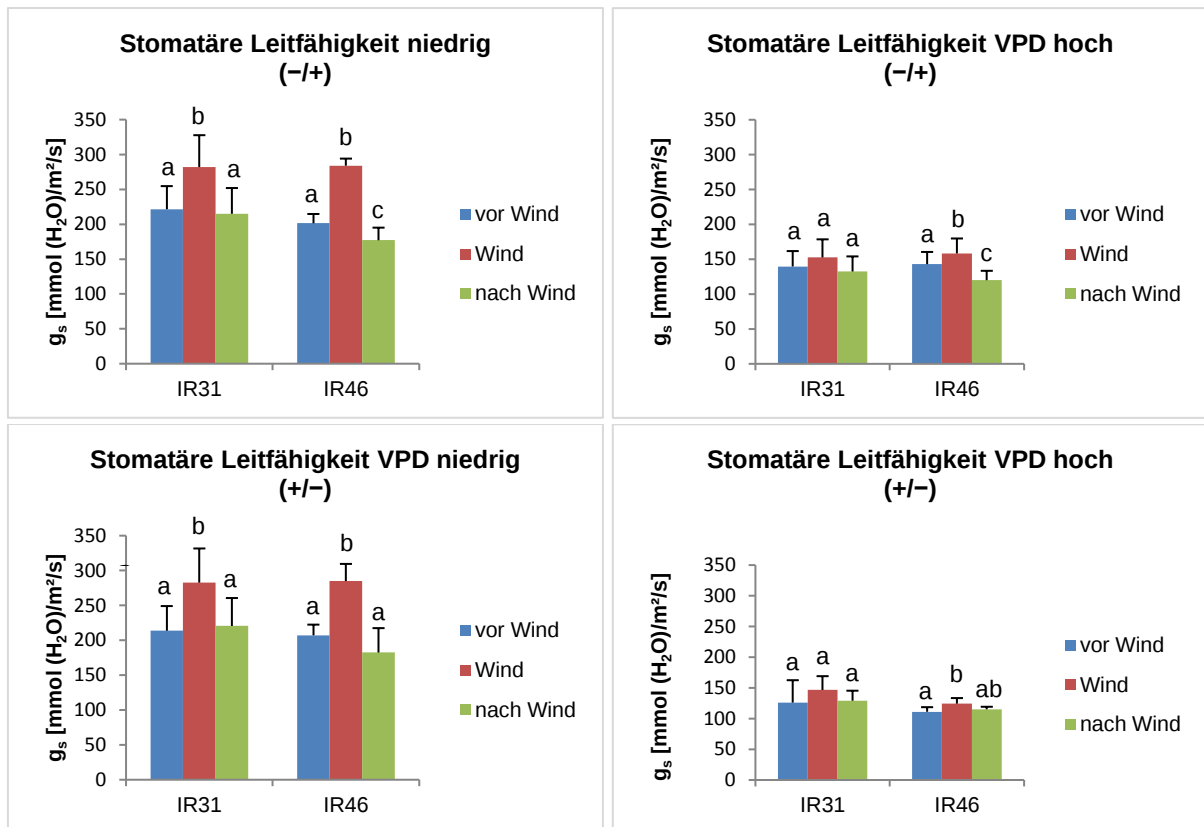


Abb. 10 Effekte von Wind auf die stomatäre Leitfähigkeit tagsüber bei niedrigem und hohem VPD

Die jeweils unterschiedlichen/ gleichen Kleinbuchstaben weisen auf vorhandene/nicht vorhandene signifikante Unterschiede zwischen den Behandlungen hin ($p \leq 0,05$).

VPD (-/+): VPD-Abfolge niedrig-hoch; VPD (+/-): VPD-Abfolge hoch-niedrig

Um Unterschiede in der stomatären Leitfähigkeit zwischen den Behandlungen festzustellen, wurde eine einfaktorielle Varianzanalyse durchgeführt. Eine signifikant niedrigere stomatäre Leitfähigkeit ($p < 0,05$) nach dem Windereignis als vor dem Windereignis konnte bei IR46 bei niedrigem und hohem VPD bei der VPD-Abfolge (-/+) festgestellt werden. Die stomatäre Leitfähigkeit der zwei Reissorten ist bei beiden VPD-Stufen und VPD-Abfolgen während dem Windereignis höher als vor und nach dem Windereignis. Eine signifikant höhere stomatäre Leitfähigkeit während dem Windereignis ($p < 0,05$) konnte bei IR31 bei niedrigem VPD bei beiden VPD-Abfolgen festgestellt werden. Die stomatäre Leitfähigkeit während dem Windereignis erhöhte sich bei IR46 signifikant ($p < 0,05$) gegenüber vor dem Windereignis sowohl bei

niedrigem und hohem VPD bei beiden VPD-Abfolgen. Keine Unterschiede in der stomatären Leitfähigkeit konnten für IR31 bei hohem VPD festgestellt werden.

3.4.1 Vergleich der Auswirkungen von zwei VPD-Abfolgen auf die stomatäre Leitfähigkeit tagsüber unter Windeinfluss

Es wurde eine einfaktorielle Varianzanalyse durchgeführt, um festzustellen, ob die unterschiedlichen VPD-Abfolgen einen Effekt auf die stomatäre Leitfähigkeit der zwei Reissorten, vor, während und nach dem Windereignis haben. Vor dem Windereignis und während dem Windereignis wurde eine signifikant höhere stomatäre Leitfähigkeit ($p < 0,01$) bei der Reissorte IR46 bei der VPD-Abfolge (-/+) als bei der VPD-Abfolge (+/-) bei hohem VPD festgestellt.

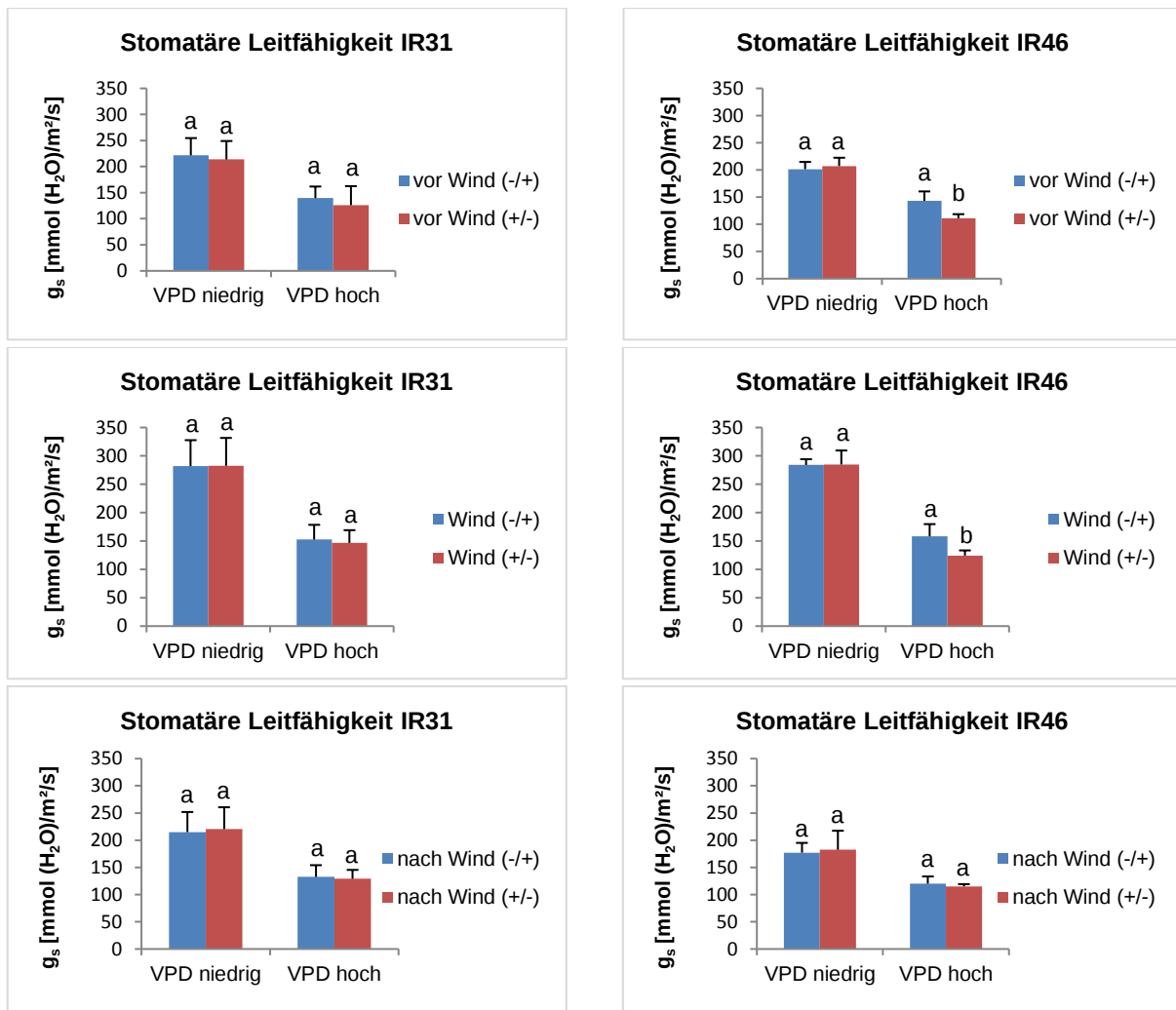


Abb. 11 Vergleich der Auswirkungen von zwei VPD-Abfolgen auf die stomatäre Leitfähigkeit tagsüber unter Windeinfluss

Die jeweils unterschiedlichen/ gleichen Kleinbuchstaben weisen auf vorhandene/nicht vorhandene signifikante Unterschiede zwischen den VPD-Abfolgen hin ($p \leq 0,05$).

(-/+) : VPD-Abfolge niedrig-hoch; (+/-) : VPD-Abfolge hoch-niedrig

3.5 Effekte von Wind auf die Transpirationsrate nachts

Die Säulen in den jeweiligen Diagrammen repräsentieren die nächtliche Transpirationsrate der beiden Reissorten IR31 und IR46 vor dem Windereignis (vor Wind), während dem Windereignis (Wind) und nach dem Windereignis (nach Wind) bei einem VPD von ca. 0,65 kPa (VPD niedrig) und einem VPD von ca. 2,3 kPa (VPD hoch).

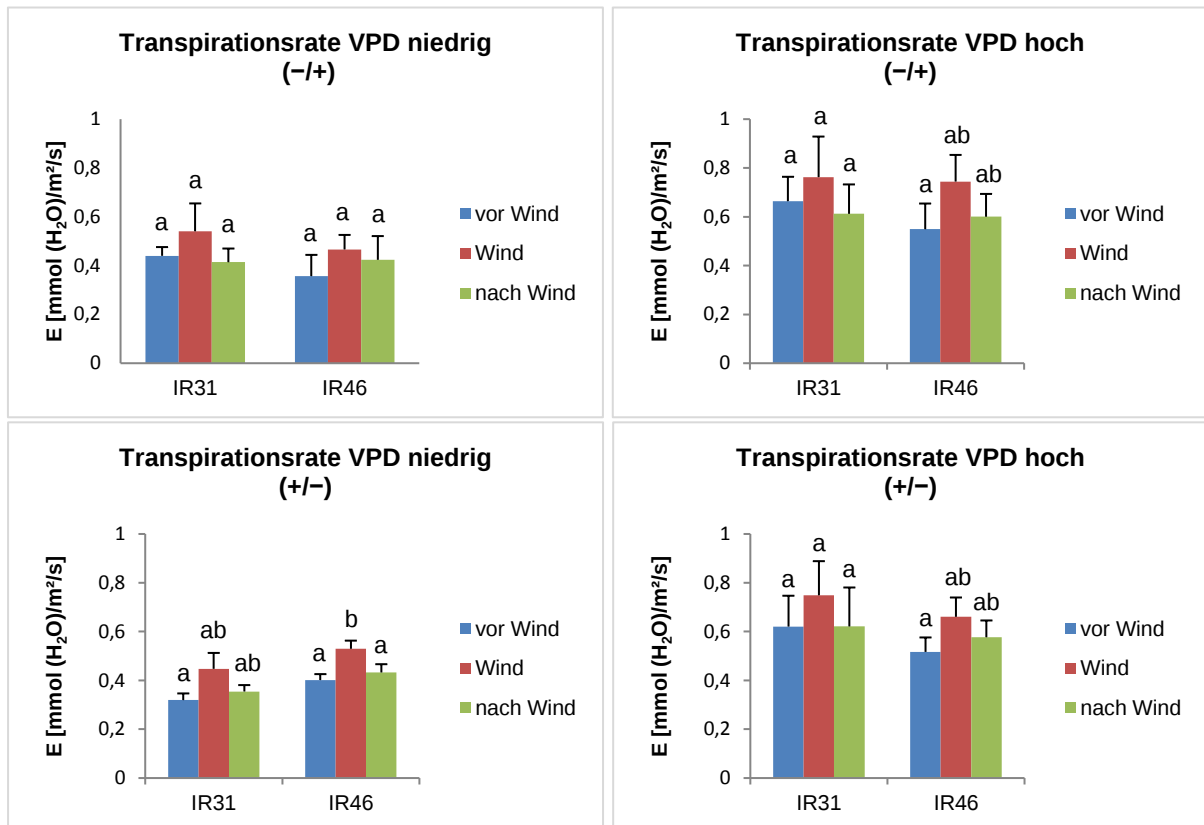


Abb. 12 Effekte von Wind auf die Transpirationsrate nachts bei niedrigem und hohem VPD

Die jeweils unterschiedlichen/ gleichen Kleinbuchstaben weisen auf vorhandene/nicht vorhandene signifikante Unterschiede zwischen den Behandlungen hin ($p \leq 0,05$).

VPD (-/+): VPD-Abfolge niedrig-hoch; VPD (+/-): VPD-Abfolge hoch-niedrig

Es wurde eine einfaktorielle Varianzanalyse durchgeführt, um Unterschiede in der Transpirationsrate zwischen den Behandlungen festzustellen. Während dem Windereignis findet sowohl bei niedrigem VPD als auch bei hohem VPD eine Erhöhung der Transpirationsrate bei beiden Reissorten statt. Für die Reissorte IR31 wurde eine signifikant höhere Transpirationsrate ($p < 0,05$) während dem Windereignis als vor dem Windereignis bei niedrigem VPD bei der VPD-Abfolge (+/-) festgestellt. Eine signifikant höhere Transpirationsrate ($p < 0,05$) während dem Windereignis als vor und nach dem Windereignis wurde bei IR46 bei niedrigem VPD bei der VPD-Abfolge (+/-) festgestellt. Bei hohem VPD wies IR46 für beide VPD-Abfolgen während dem Windereignis eine signifikant höhere Transpirationsrate ($p < 0,05$) auf als vor dem

Windereignis. Keine Unterschiede in der Transpirationsrate zwischen den Behandlungen konnten für beide Reissorten bei niedrigem VPD bei der VPD-Abfolge (-/+) festgestellt werden und bei hohem VPD für IR31 bei beiden VPD-Abfolgen.

3.5.1 Vergleich der Auswirkungen von zwei VPD-Abfolgen auf die Transpirationsrate nachts unter Windeinfluss

Um die Effekte der zwei verschiedenen VPD-Abfolgen auf die Transpirationsrate der zwei Reissorten vor, während und nach dem Windereignis zu untersuchen, wurde eine einfaktorielle Varianzanalyse durchgeführt. Tendenziell konnten höhere Transpirationsraten bei der VPD-Abfolge (-/+) als bei der VPD-Abfolge (+/-) festgestellt werden. Eine signifikant höhere Transpirationsrate ($p < 0,05$) bei IR31 wurde vor dem Windereignis bei der VPD-Abfolge (-/+) bei niedrigem VPD festgestellt.

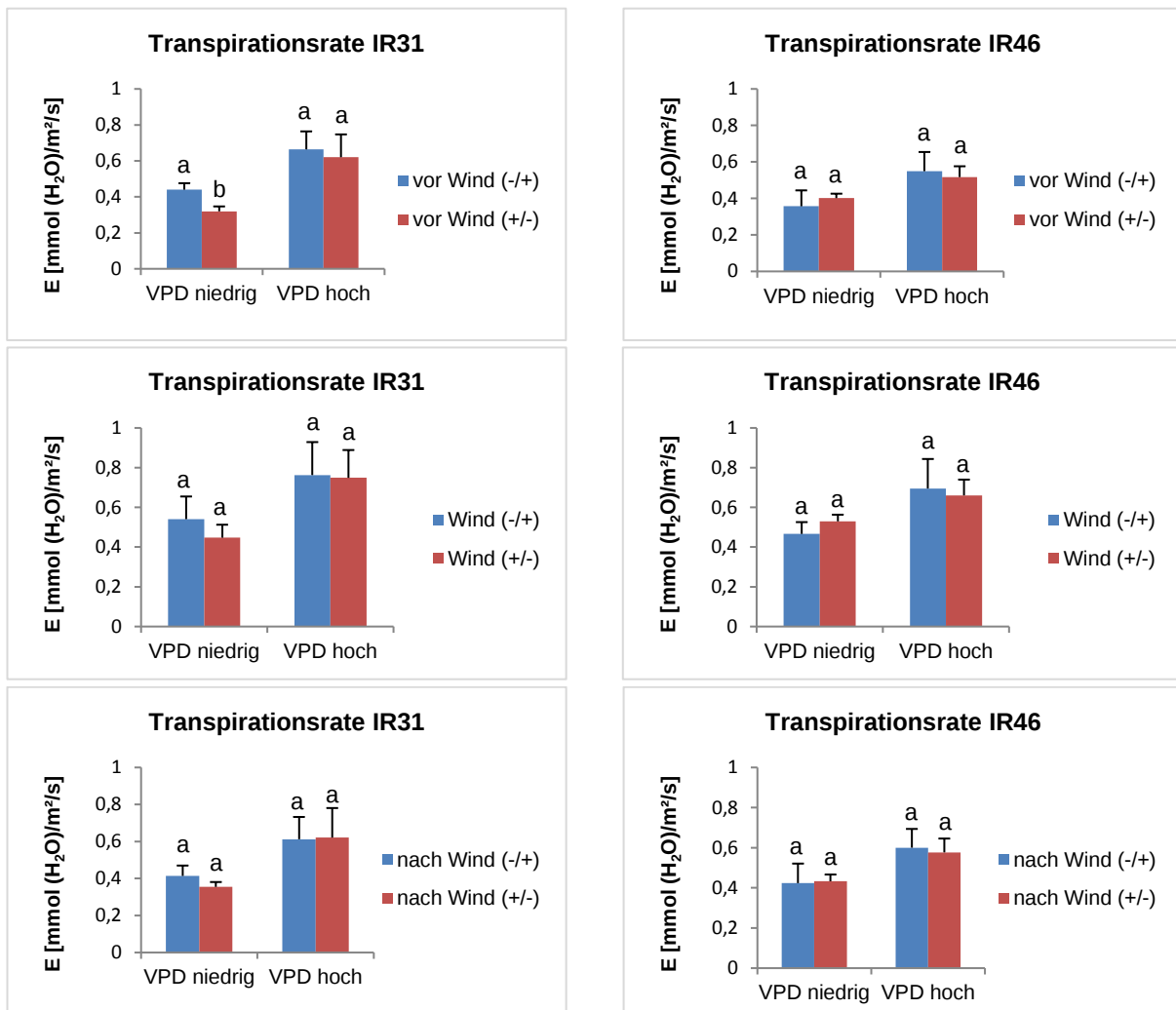


Abb. 13 Vergleich der Auswirkungen von zwei VPD-Abfolgen auf die Transpirationsrate nachts unter Windeinfluss

Die jeweils unterschiedlichen/ gleichen Kleinbuchstaben weisen auf vorhandene/nicht vorhandene signifikante Unterschiede zwischen den VPD-Abfolgen hin ($p \leq 0,05$).

(-/+): VPD-Abfolge niedrig-hoch; (+/-): VPD-Abfolge hoch-niedrig

3.6 Effekte von Wind auf die stomatäre Leitfähigkeit nachts

Die Säulen in den jeweiligen Diagrammen repräsentieren die stomatäre Leitfähigkeit der beiden Reissorten IR31 und IR46 bei Nacht, vor dem Windereignis (vor Wind), während dem Windereignis (Wind) und nach dem Windereignis (nach Wind) bei einem VPD von ca. 0,65 kPa (VPD niedrig) und einem VPD von ca. 2,3 kPa (VPD hoch).

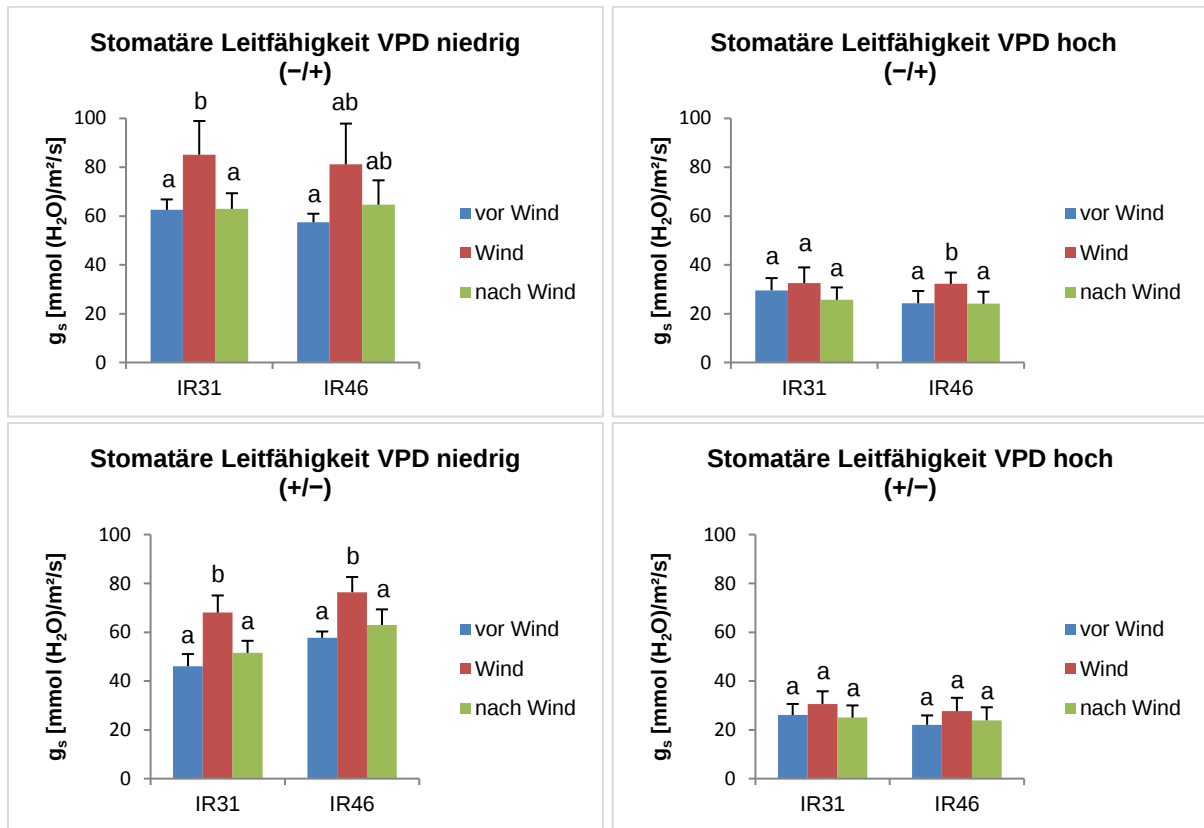


Abb. 14 Effekte von Wind auf die stomatäre Leitfähigkeit nachts bei niedrigem und hohem VPD

Die jeweils unterschiedlichen/ gleichen Kleinbuchstaben weisen auf vorhandene/nicht vorhandene signifikante Unterschiede zwischen den Behandlungen hin ($p \leq 0,05$).

VPD (-/+): VPD-Abfolge niedrig-hoch; VPD (+/-): VPD-Abfolge hoch-niedrig

Es wurde eine einfaktorielle Varianzanalyse durchgeführt, um den Effekt von Wind auf die stomatäre Leitfähigkeit zu untersuchen. Bei beiden Reissorten und sowohl bei niedrigem VPD als auch bei hohem VPD ist zu erkennen, dass die stomatäre Leitfähigkeit während dem Windereignis im Vergleich zu vor und nach dem Windereignis zunimmt. Für die Reissorten IR31 wurde eine signifikante Erhöhung der stomatären Leitfähigkeit ($p < 0,05$) bei niedrigem VPD während dem Windereignis gegenüber vor und nach dem Windereignis bei beiden VPD-Abfolgen festgestellt. Bei hohem VPD konnte keine signifikante Erhöhung der stomatären Leitfähigkeit ($p > 0,05$) von IR31 während dem Windereignis festgestellt werden. Für die Reissorte IR46 wurde eine signifikante Erhöhung der stomatären Leitfähigkeit ($p < 0,05$) während dem Windereignis gegenüber vor und nach dem Windereignis bei niedrigem VPD (VPD-

Abfolge +/-) und hohem VPD (VPD-Abfolge -/+) festgestellt. Eine signifikante Erhöhung der stomatären Leitfähigkeit ($p < 0.05$) von IR46 während dem Windereignis gegenüber vor dem Windereignis fand bei niedrigem VPD für die Abfolge VPD (-/+) statt. Keine signifikanten Unterschiede in der stomatären Leitfähigkeit von IR46 konnten bei hohem VPD für die VPD-Abfolge (+/-) festgestellt werden.

3.6.1 Vergleich der Auswirkungen von zwei VPD-Abfolgen auf die stomatäre Leitfähigkeit nachts unter Windeinfluss

Es wurde eine einfaktorielle Varianzanalyse durchgeführt, um festzustellen, ob die zwei unterschiedlichen VPD-Abfolgen einen Effekt auf die stomatäre Leitfähigkeit der zwei Reissorten, vor, während und nach dem Windereignis haben. Tendenziell konnte eine höhere stomatäre Leitfähigkeit bei der VPD-Abfolge (-/+) festgestellt werden. Eine signifikant höhere stomatäre Leitfähigkeit ($p < 0,05$) bei IR31 wurde vor dem Windereignis bei niedrigem VPD für die VPD-Abfolge (-/+) festgestellt.

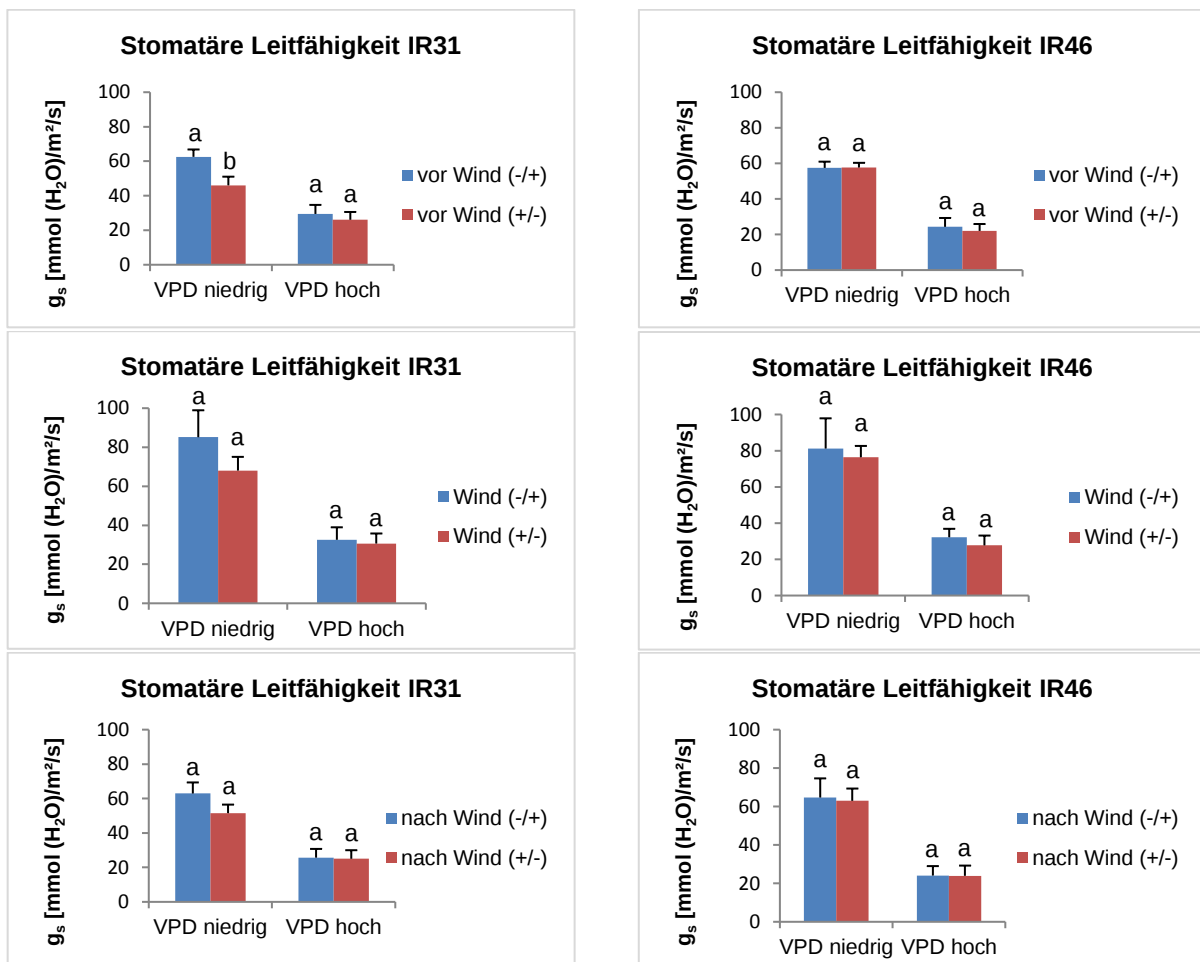


Abb. 15 Vergleich der Auswirkungen von zwei VPD-Abfolgen auf die stomatäre Leitfähigkeit nachts unter Windeinfluss

Die jeweils unterschiedlichen/ gleichen Kleinbuchstaben weisen auf vorhandene/nicht vorhandene signifikante Unterschiede zwischen den VPD-Abfolgen hin ($p \leq 0,05$).

(-/+): VPD-Abfolge niedrig-hoch; (+/-): VPD-Abfolge hoch-niedrig

Im Anhang ist die relative Erhöhung der Transpirationsrate und stomatären Leitfähigkeit tagsüber (Tab. 6) und nachts (Tab. 7) unter Windeinfluss dargestellt.

3.7 Blattfläche und Trockengewicht

Die Säulen in den jeweiligen Diagrammen repräsentieren das Trockengewicht der Wurzeln, Stängel, Blätter, abgestorbenen Blätter, die Anzahl der Bestockungstriebe und die Blattfläche der beiden Reissorten IR31 und IR46 für die jeweilige Wiederholung. Es wurde eine einfaktorielle Varianzanalyse durchgeführt, um Unterschiede zwischen den Sorten festzustellen. Dabei wurde ein signifikant höheres Trockengewicht der Wurzeln von IR31 bei Wdh.1 festgestellt. Außerdem war das Trockengewicht der abgestorbenen Blätter von IR31 bei Wdh.1 signifikant höher ($p < 0,001$) als das von IR46. Für das Trockengewicht der Stängel, Blätter, die Anzahl der Bestockungstriebe und die Blattfläche konnten keine signifikanten Unterschiede zwischen den Sorten innerhalb der jeweiligen Wiederholung festgestellt werden.

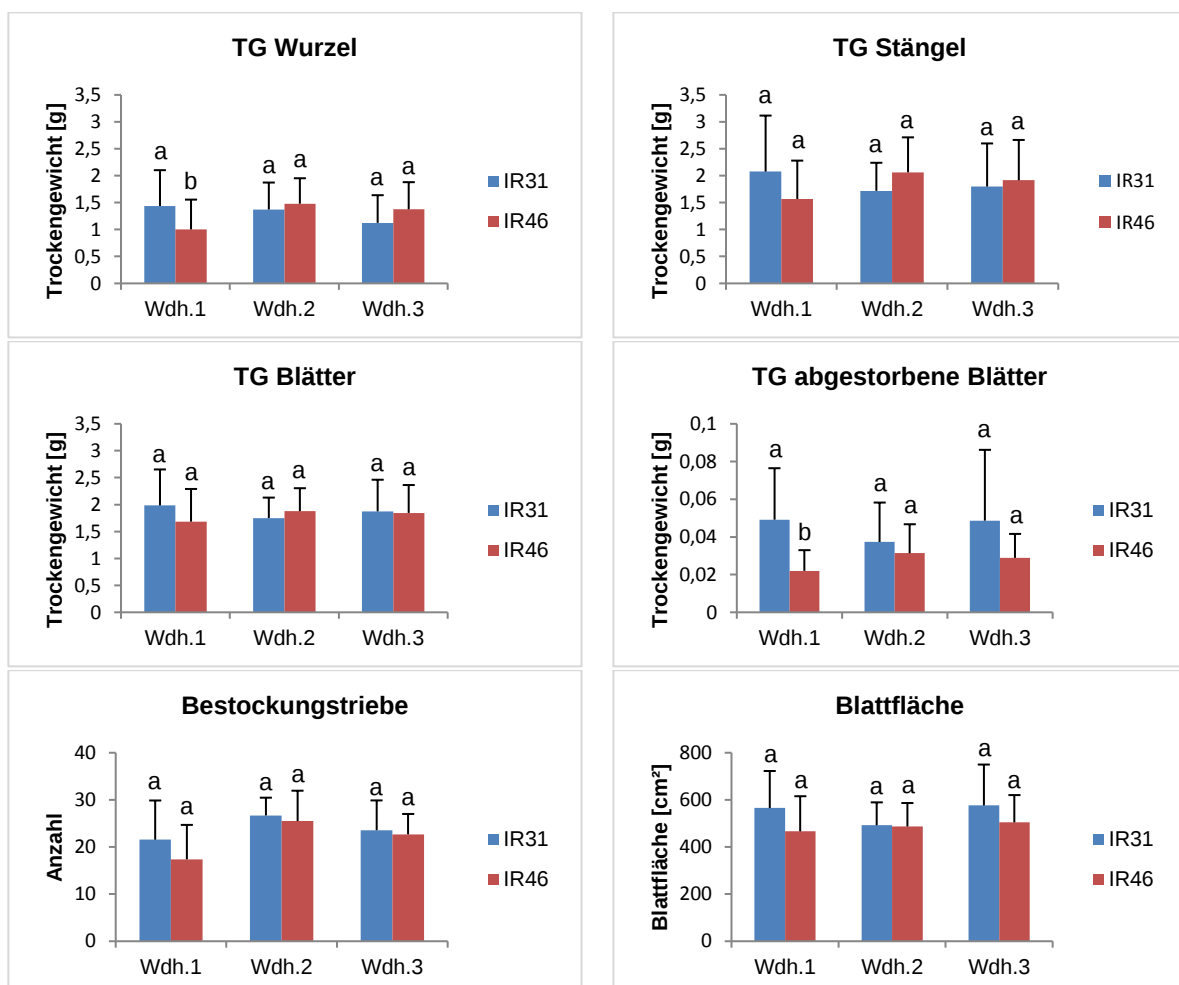


Abb. 16 Trockengewicht von Wurzeln, Stängeln, Blättern, abgestorbenen Blättern; Anzahl der Bestockungstriebe und Blattfläche der Reissorten IR31 und IR46 über 3 Wdh.

Die jeweils unterschiedlichen/ gleichen Kleinbuchstaben weisen auf vorhandene/nicht vorhandene signifikante Unterschiede zwischen den Reissorten in der jeweiligen Wiederholung hin ($p \leq 0,05$).

4. Diskussion

4.1 Transpirationsrate und stomatäre Leitfähigkeit tagsüber in Abhängigkeit vom atmosphärischen Dampfdruckdefizit (VPD)

Transpirationsrate

Sowohl bei IR31 als auch bei IR46 erhöht sich die Transpirationsrate tagsüber linear mit steigendem VPD (ca. 1,0–3,0 kPa) bei beiden VPD-Abfolgen. Dies stimmt mit Beobachtungen von Rawson et al. überein, welche die Transpirationsrate verschiedener Pflanzenarten in Abhängigkeit von der relativen Luftfeuchtigkeit untersuchten (Rawson et al., 1977). Bei hohem VPD wird erwartet, dass Pflanzen aufgrund der hohen Wasserverluste ihre Transpirationsrate einschränken und als Folge dessen der Anstieg der Transpirationsrate ab einem bestimmten VPD stagniert (Monteith, 1995; Larcher, 2001). Laut Gollan et al. wird dieses Maximum bei vielen Arten bei einem VPD von ca. 2,0 kPa erreicht (Gollan et al., 1985). Auf die Transpirationsrate der Reissorten IR31 und IR46 trifft diese Aussage nicht zu. Die Transpirationsrate von den einzeln untersuchten Reispflanzen lässt vermuten, dass der Anstieg der Transpirationsrate tagsüber bei beiden Reissorten bei einem VPD von über 3,0 kPa stagniert. Bei Untersuchungen von Gollan et al. an neun verschiedenen krautigen und holzigen Pflanzen wurden große Unterschiede in der Transpirationsrate, Photosyntheserate und Blattleitfähigkeit zwischen den Pflanzen in Abhängigkeit des VPD festgestellt (Gollan et al., 1985). IR46 weist für alle VPD-Stufen eine niedrigere Transpirationsrate auf als IR31. Die Vermutung, dass IR46 bei hohem VPD die Transpirationsrate stärker einschränkt als IR31, konnte nicht bestätigt werden. Jedoch ist bei der VPD-Abfolge (+/-/+) zu erkennen, dass sich der Unterschied in der Höhe der Transpirationsrate zwischen den beiden Reissorten mit steigendem VPD erhöht. Untersuchungen der Transpirationsrate bei einem VPD von über 3,0 kPa sind nötig, um mögliche Unterschiede zwischen den Sorten festzustellen. Eine Einschränkung der Transpirationsrate bei hohem VPD könnte besonders wichtig für die Pflanzenproduktion ohne Bewässerung sein (Fletcher et al., 2007). Laut Pallardy und Kozlowski konnte bei dürremeidenden Gemüsearten eine stärkere Reaktion der Stomata auf VPD als bei dürretolerierenden Gemüsearten festgestellt werden. Eine starke Reaktion in der Pflanze auf VPD sei möglicherweise eine adaptive Anpassung von Pflanzen mit einer großen Blattfläche und einem großen Wachstumspotential (Pallardy and Kozlowski, 1979).

Stomatäre Leitfähigkeit

Die stomatäre Leitfähigkeit der beiden Reissorten IR31 und IR46 nahm bei einer Erhöhung des VPD von ca. 1,0 auf ca. 3,0 kPa linear ab. Ohsumi et al. untersuchten die stomatäre Leitfähigkeit von neun verschiedenen Reissorten bei jeweils drei Entwicklungsstadien (Ohsumi et al., 2008). Die Ergebnisse stimmen mit der Beobachtung überein, dass die beiden untersuchten Reispflanzen ihre stomatäre Leitfähigkeit als Reaktion auf eine steigende Transpirationsrate reduzieren. Ohsumi et al. fanden außerdem heraus, dass die neun untersuchten Reissorten mit unterschiedlichem genetischen Hintergrund ihre stomatäre Leitfähigkeit als Reaktion auf ein steigendes VPD unterschiedlich stark einschränkten (Ohsumi et al., 2008). Die stomatäre Leitfähigkeit der beiden Reissorten IR31 und IR46 in Abhängigkeit vom atmosphärischen Dampfdruckdefizit unterscheidet sich jedoch nicht signifikant. Weitere Untersuchungen bei höherem VPD sind nötig, um mögliche Unterschiede in der stomatären Leitfähigkeit der beiden Reissorten festzustellen. Verschiedene Studien belegen, dass eine eingeschränkte stomatäre Leitfähigkeit bei niedriger Luftfeuchtigkeit die Photosyntheserate limitiert (Grantz, 1990). Erkenntnisse darüber wie unterschiedliche Reisgenotypen ihre stomatäre Leitfähigkeit und Transpirationsrate als Reaktion auf ein steigendes VPD verändern, können hilfreich dabei sein, dürreresistente Reispflanzen und Pflanzen mit einer hohen täglichen Biomasseproduktivität ausfindig zu machen (Ohsumi et al., 2008; Kuwagata et al., 2012).

VPD-Abfolge

Bei der VPD-Abfolge (+/-/+) wurde bei beiden Reissorten eine signifikant niedrigere Transpirationsrate und stomatäre Leitfähigkeit als bei der VPD-Abfolge (-/+/-) festgestellt. Eine starke atmosphärische Dürre ruft in der Pflanze vermutlich eine Reaktion hervor, welche die Transpirationsrate und stomatäre Leitfähigkeit im weiteren Verlauf der Messung beeinflusst.

4.2 Transpirationsrate und stomatäre Leitfähigkeit nachts in Abhängigkeit vom atmosphärischen Dampfdruckdefizit (VPD)

Transpirationsrate

Die Transpirationsrate nachts nimmt sowohl bei IR31 als auch bei IR46 bei beiden VPD-Abfolgen mit steigendem VPD linear zu. Dieses Ergebnis stimmt überein mit den Ergebnissen von mehreren Studien, welche die nächtliche Transpirationsrate bei mehreren Pflanzenarten in verschiedenen Ökosystemen in Abhängigkeit des atmosphärischen Dampfdruckdefizits untersucht haben (Rawson and Clarke, 1988; Green et al., 1989; Snyder et al., 2003; Dawson et al., 2007). Laut Dawson et al. sind die wichtigsten Einflussfaktoren auf die nächtliche Transpirationsrate das VPD und die Bodenwasserverfügbarkeit. Ein hohes VPD, ausreichende Bodenwassergehalte und Arten, die relativ geringe stomatäre Reaktionen auf ein sich veränderndes VPD zeigen, seien die Bedingungen, unter denen hohe Transpirationsraten in Pflanzen während der Nacht auftreten können (Dawson et al., 2007). Die Pflanzenanzucht der Reissorten in einem hydroponischen System, in dem eine ausreichende Wasser- und Nährstoffverfügbarkeit zu jeder Zeit gewährleistet wurde, könnte somit Auswirkungen auf die Höhe der beobachteten nächtlichen Transpirationsrate haben. Die nächtliche Transpirationsrate macht laut Caird et al. 5 % bis 15 %, manchmal auch bis zu 30 % der Transpirationsrate am Tag aus (Caird et al., 2007). Der Versuchsaufbau in meinem Experiment ermöglicht es mir nicht den gesamten Wasserverlust am Tag und während der Nacht zu bestimmen. Ein Vergleich der Transpirationsrate tagsüber und nachts bei zwei VPD-Stufen ergab, dass die nächtliche Transpirationsrate bei beiden Reissorten ca. 20 % der Transpirationsrate am Tag ausmacht. Bei den untersuchten Reissorten konnten keine Unterschiede in der Höhe der Transpirationsrate festgestellt werden. Jedoch weist IR46 bei der VPD-Abfolge (-/+/-) bei hohem VPD eine geringere Transpirationsrate auf als IR31. Während eines Messvorgangs konnten aufgrund einer Erhöhung der Temperatur keine stabilen Werte für alle VPD-Stufen erreicht werden. Deshalb liegen für die jeweiligen VPD-Stufen weniger Daten vor als geplant. Außerdem unterscheiden sich die VPD-Stufen zwischen den VPD-Abfolgen. Um aussagekräftigere Daten über die Transpirationsrate der zwei Reissorten während der Nacht zu gewinnen, sollten Messungen mit konstanten VPD-Stufen und höheren VPD-Werten durchgeführt werden. Außerdem sollte bedacht werden, dass ein hohes VPD während der Nacht in den Hauptanbaugebieten von Reis relativ unwahrscheinlich ist.

Stomatäre Leitfähigkeit

Die stomatäre Leitfähigkeit sinkt bei beiden Reissorten mit steigendem VPD und nähert sich bei hohem VPD (ca. 2,5 kPa) einem Wert von ca. 30–35 mmol (H₂O) /m²/s an. Es wird generell angenommen, dass C₃ und C₄ Pflanzen ihre Stomata nachts schließen, um Wasserverluste zu minimieren (Snyder et al., 2003). Jedoch weisen viele Untersuchungen darauf hin, dass eine Vielzahl an verschiedenen Pflanzengattungen aus unterschiedlichen Ökosystemen ihre Stomata nachts nicht vollständig schließen (Caird et al., 2007; Dawson et al., 2007). Untersuchungen von Dawson et al. an holzigen Pflanzen aus unterschiedlichen Ökosystem ergaben eine nächtliche stomatäre Leitfähigkeit, die 5 % bis 9 % der maximalen stomatären Leitfähigkeit am Tag ausmachte. In trockenen Nächten erreichte sie bis zu 25 % der durchschnittlichen stomatären Leitfähigkeit am Tag (Dawson et al., 2007). Der Versuchsaufbau in meinem Experiment ermöglicht es mir nicht die durchschnittliche stomatäre Leitfähigkeit am Tag und während der Nacht zu bestimmen. Ein Vergleich der stomatären Leitfähigkeit tagsüber und nachts bei zwei VPD-Stufen ergab, dass die nächtliche stomatäre Leitfähigkeit bei beiden Sorten ca. 20 % der stomatären Leitfähigkeit am Tag ausmacht. Bei Untersuchungen der nächtlichen stomatären Leitfähigkeit verschiedener C₃ und C₄ Pflanzen stellten Caird et al. erhebliche Unterschiede im Maximum der stomatären Leitfähigkeit zwischen eng verwandten Arten fest. Jedoch stellten sich die nachgewiesenen Unterschiede als zu gering heraus um eine biologische Bedeutung zu haben (Caird et al., 2007). Bei den untersuchten Reispflanzen IR31 und IR46 konnten keine signifikanten Unterschiede in der Höhe der stomatären Leitfähigkeit in Abhängigkeit von VPD nachgewiesen werden. Bei der VPD-Abfolge (-/+/-) wurde für IR46 bei hohem VPD eine etwas niedrigere stomatäre Leitfähigkeit als für IR31 festgestellt. Es stellt sich die Frage welche Vor- und Nachteile ein Wasserverlust während der Nacht für die Pflanzen hat. Wenn das VPD während der Nacht keine Werte annimmt, welche eine erhebliche Transpiration fördert und die Wasserverfügbarkeit für die Pflanzen hoch ist, sollte eine nicht vollständige Schließung der Stomata geringe „Kosten“ für die Pflanze verursachen. Bei der Interpretation der Daten sollte bedacht werden, dass ein geringer Anteil an Wasser in Pflanzen über die Cuticula verloren geht. Generell betragen die Schätzungen für die cuticuläre Leitfähigkeit 4 bis 20 mmol (H₂O) /m²/s (Caird et al., 2007). Diese Werte sind jedoch weitaus niedriger als die beobachteten Werte der nächtlichen stomatären Leitfähigkeit von IR31 und IR46 bei den vier VPD-Stufen. Um aussagekräftigere Daten für die

stomatären Leitfähigkeit der zwei Reissorten während der Nacht zu gewinnen, sollten Messungen mit konstanten VPD-Stufen und höheren VPD-Werten durchgeführt werden.

VPD-Abfolge

Bei der VPD-Abfolge (+/-/+) wurde bei beiden Reissorten eine signifikant niedrigere stomatäre Leitfähigkeit als bei der VPD-Abfolge (-/+/-) festgestellt. Eine starke atmosphärische Dürre ruft in der Pflanze vermutlich eine Reaktion hervor, welche die stomatäre Leitfähigkeit im weiteren Verlauf der Messung beeinflusst.

4.3 Effekte von Wind auf die Transpiration und stomatäre Leitfähigkeit tagsüber

Transpirationsrate

Die Transpirationsrate der Reissorten IR31 und IR46 stieg sowohl bei niedrigem als auch hohem VPD bei beiden VPD-Abfolgen während dem Windereignis (1,0–1,2 m/s) gegenüber vor und nach dem Windereignis an. Die Erhöhung der Transpirationsrate erwies sich bei der statistischen Analyse nur teilweise als signifikant. Generell konnte ein prozentual höherer Anstieg der Transpirationsrate bei niedrigem VPD (VPD 1,0 kPa) beobachtet werden als bei hohem VPD (VPD ca. 2,7 kPa). Grund dafür könnten Einschränkungen des stomatären Öffnungsgrades bei hohem VPD sein. Untersuchungen der Transpirationsrate unter Windeinfluss bei Sonnenblumen ergaben, dass die Transpirationsrate in Abhängigkeit von der Höhe der Windgeschwindigkeit anstieg. Für niedrige Windgeschwindigkeiten von bis zu ca. 0,9 m/s stieg die Transpirationsrate während dem Windereignis um ca. 20–30 % gegenüber der Kontrolle (ohne Wind) an. Bei höheren Windgeschwindigkeiten von bis zu 7,0 m/s stieg die Transpirationsrate während dem Windereignis um bis zu 50 % gegenüber der Kontrolle an (Martin and Clements). Die Analyse der relativen Steigerung der Transpirationsrate gegenüber vor und nach dem Windereignis (Tab. 6) von IR31 ergab bei niedrigem VPD eine Steigerung von ca. 23–33 %, bei hohem VPD von ca. 13–19 %. Bei IR46 stieg die Transpirationsrate während dem Windereignis gegenüber vor und nach dem Windereignis bei niedrigem VPD um ca. 27–50 % an, bei hohem VPD um ca. 8–30 %. Die relative Steigerung der Transpirationsrate umfasst einen relativ großen Wertebereich aufgrund der Unterschiede in der Transpirationsrate zwischen den zwei verschiedenen VPD-Abfolgen (VPD -/+ und VPD +/-). Die

maximale Erhöhung der Transpirationsrate ist bei der Reissorte IR46 sowohl bei niedrigem als auch bei hohem VPD höher als bei der Reissorte IR31.

Bei hohen Windgeschwindigkeiten wurde in verschiedenen Studien beobachtet, dass Stomata auf die hohen Wasserverluste der Pflanze reagieren und die Öffnungsweite eingeschränkt wird, was eine niedrigere Photosyntheserate und Transpirationsrate zur Folge hat (Caldwell, 1970; Martin and Clements). Der Vergleich der Transpirationsrate von IR31 und IR46 vor dem Windereignis und nach dem Windereignis ergab keine signifikanten Unterschiede. Es konnte sowohl eine leichte Zunahme in der Transpirationsrate als auch eine leichte Abnahme in der Transpirationsrate nach dem Windereignis im Vergleich zu vor dem Windereignis bei beiden VPD-Stufen und für beide Reissorten beobachtet werden. Eine Erklärung für dieses Ergebnis könnte zum einen sein, dass die Windgeschwindigkeit und die daraus resultierenden erhöhten Wasserverluste nicht hoch genug waren, um eine Reaktion in der Pflanze auszulösen. Ein weiterer Grund könnte die Dauer des Windereignisses sein. Außerdem können mehrere Fehler während eines Messvorgangs dazu geführt haben, dass die Transpirationsraten vor und nach dem Windereignis nicht ohne Einschränkung miteinander verglichen werden können. Diese Fehler sollen in der Fehlerdiskussion näher beleuchtet werden. Der Anstieg der Transpirationsrate während des Windereignisses ist wahrscheinlich auf eine Reduktion der laminaren Grenzschicht und einer verbesserten Leitfähigkeit von Wasserdampf zurückzuführen. Mechanische Schäden an Blättern können bei unserem Experiment als Ursache für erhöhte Wasserverluste ausgeschlossen werden.

Stomatäre Leitfähigkeit

Die stomatäre Leitfähigkeit der Reissorten IR31 und IR46 erhöhte sich während dem Windereignis gegenüber vor und nach dem Windereignis bei niedrigem und hohem VPD bei beiden VPD-Abfolgen. Diese Erhöhung erwies sich bei der statistischen Analyse als signifikant bei niedrigem VPD für beide Reissorten, bei hohem VPD für IR46. Der Diffusionswiderstand in einem Blatt wird beeinflusst durch den stomatären Widerstand (r_s) und den Grenzflächenwiderstand (r_b) (Taiz et al., 2010). Eine erhöhte stomatäre Leitfähigkeit während dem Windereignis kann durch die Reduktion des Grenzflächenwiderstandes erklärt werden. Der Vergleich der stomatären Leitfähigkeit vor und nach dem Windereignis lässt keine eindeutigen Schlussfolgerungen darüber zu, ob das Windereignis eine Erhöhung des stomatären Widerstandes zur Folge hat.

Eine signifikant niedrigere stomatäre Leitfähigkeit nach dem Windereignis als vor dem Windereignis ist jedoch für IR46 bei niedrigem und hohem VPD bei der VPD-Abfolge (-/+) festzustellen. Die eventuellen Fehler während eines Messdurchgangs sollten jedoch auch für die Analyse der stomatären Leitfähigkeit unter Windeinfluss berücksichtigt werden. Die maximale relative Erhöhung der stomatären Leitfähigkeit während dem Windereignis gegenüber vor und nach dem Windereignis war sowohl bei hohem als auch bei niedrigem VPD bei der Reissorte IR46 höher als bei der Reissorte IR31. Bei niedrigem VPD betrug die Erhöhung bei IR31 ca. 27–32 %, bei IR46 ca. 38–60 %. Bei hohem VPD betrug die Erhöhung bei IR31 9–16 %, bei IR46 8–32 % (Tab. 6).

VPD-Abfolge

Eine hohe atmosphärische Dürre zu Beginn eines Messdurchgangs beeinflusste die Transpirationsrate und stomatäre Leitfähigkeit insbesondere bei hohem VPD bei IR46. Für die VPD-Abfolge (+/-) konnte eine geringere Transpirationsrate bei hohem VPD festgestellt werden als bei der VPD-Abfolge (-/+).

4.4 Effekte von Wind auf die Transpiration und stomatäre Leitfähigkeit nachts

Transpirationsrate

Bei den Reissorten IR31 und IR46 konnte während dem Windereignis nachts eine erhöhte Transpirationsrate gegenüber vor und nach dem Windereignis bei niedrigem VPD (ca. 0,65 kPa) und hohem VPD (ca. 2,3 kPa) bei beiden VPD-Abfolgen festgestellt werden. Bei der einfaktoriellen Varianzanalyse erwies sich diese Erhöhung jedoch nicht immer als signifikant. Die Transpirationsrate vor und nach dem Windereignis unterschied sich bei beiden Reissorten nicht signifikant. Mehrere Studien haben ergeben, dass Wind während der Nacht einen relativ größeren Einfluss auf die Transpirationsrate hat als am Tag (Grace, 1974; Rawson and Clarke, 1988; Green et al., 1989; Martin and Clements). Die Studien umfassen Untersuchungen an Gräsern, Weizen, Kiwibäumen und Sonnenblumen. Karpul und West untersuchten an der Kapprovinz Südafrikas Bestände von *Leucospermum conocarpodendron* L., um mögliche Auswirkungen einer Abnahme der Windgeschwindigkeit in dieser Region auf die Transpirationsrate der Pflanzen am Tag und während der Nacht zu untersuchen. Sie kamen zu dem Ergebnis, dass tagsüber Sonneneinstrahlung und VPD die zwei

Haupteinflussfaktoren der Transpirationsrate waren und nachts vor allem Wind die Transpirationsrate beeinflusste (Karpul and West, 2016). Die relative Erhöhung der nächtlichen Transpirationsrate während dem Windereignis gegenüber vor und nach dem Windereignis unterscheidet sich bei IR31 und IR46 nur geringfügig von der relativen Erhöhung der Transpirationsrate unter Windeinfluss am Tag (Tab. 6, 7). Die absolute Erhöhung der Transpirationsrate ist nachts jedoch weitaus geringer als tagsüber. Martin und Clements beobachteten bei Untersuchungen der Transpirationsrate von Sonnenblumen in Abhängigkeit von unterschiedlichen Windgeschwindigkeiten nachts ebenfalls eine ähnlich hohe relative Erhöhung der Transpirationsrate unter Windeinfluss wie tagsüber (Martin and Clements). Beim Vergleich der Daten muss berücksichtigt werden, dass die VPD-Stufen bei niedrigem und hohem VPD sich zwischen Tag und Nacht unterscheiden. Mehrere Unregelmäßigkeiten bei den einzelnen Messvorgängen können außerdem zu einem verzerrten Ergebnis der nächtlichen Transpirationsrate geführt haben. Diese werden in der Fehlerdiskussion näher beschrieben.

Die Erhöhung der Transpirationsrate bei niedrigem VPD während dem Windereignis gegenüber vor und nach dem Windereignis betrug bei IR31 ca. 23–40 % und bei IR46 ca. 10–32 %. Bei hohem VPD betrug sie bei IR31 15–25 % und bei IR46 14–36 % (Tab. 7). Der Anstieg der Transpirationsrate während dem Windereignis ist vermutlich auf eine Reduktion der laminaren Grenzschicht zurückzuführen (Taiz et al., 2010). Die vorherigen Untersuchungen der Transpirationsrate von IR31 und IR46 in Abhängigkeit vom VPD lassen vermuten, dass beide Sorten ihre Stomata nachts nicht vollständig schließen. Da sich die Transpirationsrate von IR31 und IR46 vor und nach dem Windereignis nicht signifikant unterscheidet, können keine Aussagen darüber getroffen werden, ob eine stomatäre Reaktion als Folge auf die erhöhten Wasserverluste während dem Windereignis stattfand. Martin und Clements setzten ihre Pflanzen eine gesamte Nacht hohen Windgeschwindigkeiten aus und konnten am nächsten Morgen eine Verringerung der stomatären Öffnungsweite um die Hälfte beobachten. Außerdem konnten sie feststellen, dass geringe Windgeschwindigkeiten nachts geringere Einflüsse und hohe Windgeschwindigkeiten nachts größere Einflüsse auf die Transpirationsrate hatten als tagsüber (Martin and Clements). Bei der Interpretation der Transpirationsrate von IR31 und IR46 unter Windeinfluss sollte deshalb bedacht werden, dass die Windgeschwindigkeit von (1,0–1,2 m/s) relativ niedrig und die Dauer des Windereignisses von 30 Minuten relativ kurz war.

Stomatäre Leitfähigkeit

Die stomatäre Leitfähigkeit erhöht sich sowohl bei IR31 als auch bei IR46 während dem Windereignis gegenüber vor und nach dem Windereignis bei niedrigem und hohem VPD bei beiden VPD-Abfolgen. Diese Erhöhung erwies sich bei niedrigem VPD bei beiden VPD-Abfolgen sowohl bei IR31 als auch bei IR46 als signifikant. Bei hohem VPD wurde nur für IR46 bei der VPD-Abfolge (-/+) eine signifikante Erhöhung festgestellt. Eine erhöhte stomatäre Leitfähigkeit während dem Windereignis kann durch die Reduktion des Grenzschichtwiderstandes erklärt werden (Taiz et al., 2010). Bei beiden Reissorten konnte keine Veränderung der stomatären Leitfähigkeit nach dem Windereignis gegenüber vor dem Windereignis festgestellt werden. Es wurde sowohl eine leichte Zunahme als auch eine leichte Abnahme beobachtet. Mehrere Fehler während eines Messdurchgangs, die einen Einfluss auf die Werte der stomatären Leitfähigkeit haben könnten, werden in der Fehlerdiskussion näher beschrieben. Der relative Anstieg der stomatären Leitfähigkeit während dem Windereignis gegenüber vor und nach dem Windereignis betrug bei niedrigem VPD für IR31 ca. 32–48 %, für IR46 ca. 21–41 %. Bei hohem VPD betrug sie für IR31 ca. 10–27 %, für IR46 ca. 16–34 % (Tab. 7). Die relative Erhöhung der stomatären Leitfähigkeit unterscheidet sich nur geringfügig von der relativen Erhöhung am Tag. Eine Erklärung für die stärkere Erhöhung der stomatären Leitfähigkeit bei niedrigem VPD als bei hohem VPD könnte eine Veränderung der stomatären Öffnungsweite als Reaktion auf ein erhöhtes VPD sein.

VPD-Abfolge

Die VPD-Abfolge hatte auch nachts einen Einfluss auf die Transpirationsrate und stomatäre Öffnungsweite der beiden Reissorten. Insbesondere bei IR31 konnten bei niedrigem VPD niedrigere Werte bei der VPD-Abfolge (+/-) als bei der VPD-Abfolge (-/+) festgestellt werden.

4.5 Fehlerdiskussion

VPD-Stufen tagsüber/nachts

Bei den Messungen der Transpirationsrate in der VPD-Kammer in Abhängigkeit von verschiedenen VPD-Stufen konnten über die drei Wiederholungen hinweg nicht exakt dieselben Werte für die vier VPD-Stufen erreicht werden. Gründe für die voneinander abweichenden VPD-Stufen tagsüber könnten die relativ warmen Wetterbedingungen während der Messdurchgänge und eine unzureichende Wassermenge im 60 l Kunststofffass bei der 3. Wdh. gewesen sein. Größere Unterschiede in der Höhe des erreichten VPD sind bei niedriger Luftfeuchtigkeit entstanden. Aufgrund der unzureichenden Wassermenge gab es während der 3. Wdh. Unregelmäßigkeiten bei hoher Luftfeuchtigkeit. Bei den Messungen der Transpirationsrate nachts in Abhängigkeit von verschiedenen VPD-Stufen haben Schwierigkeiten beim Aufrechterhalten der Temperatur in der Messkammer dazu geführt, dass die einzelnen VPD-Stufen innerhalb eines Messdurchgangs nicht erreicht werden konnten. Um eine trockene relative Luftfeuchtigkeit in der Messkammer zu simulieren, wurde der Absorptionstrockner mit trockenem Luftstrom hinzugeschaltet. Dies verursachte ein Ansteigen der Temperatur innerhalb der Messkammer von 22°C auf bis zu 27°C. Ein Messdurchgang, in dem die einzelnen VPD-Stufen aufgrund einer Erhöhung der Temperatur nicht erreicht werden konnten, ist exemplarisch in Abb. 19 dargestellt.

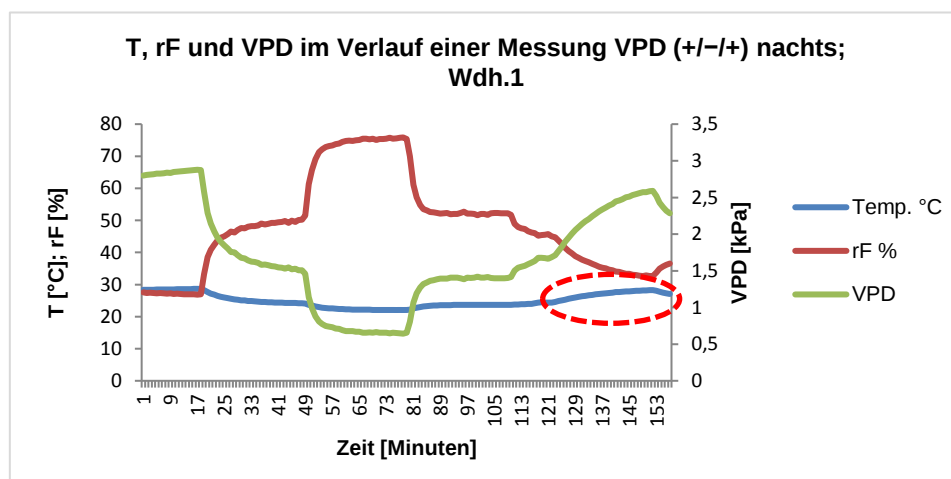


Abb. 17 Temperatur (T), relative Luftfeuchtigkeit (rF) und VPD im Verlauf einer Messung VPD (+/-/+) nachts; Wdh.1

Um einem Anstieg der Temperatur entgegenzuwirken, wurden bei der 2. und 3. Wiederholung niedrigere VPD-Werte simuliert. Außerdem wurde versucht mit einem zusätzlichem Kühlgerät, welches an die Plastikschräuche, die in das Fass führten, angeschlossen wurde, die niedrige Temperatur aufrechtzuerhalten. Da das Kühlgerät

sich immer wieder automatisch abschaltete, war dies jedoch nicht erfolgreich, sodass letztlich die Temperatur in der Messkammer bei der 3. Wiederholung auf 26°C eingestellt wurde. Die gewonnenen Daten der Transpirationsrate nachts sind aufgrund dieser Unregelmäßigkeiten nur eingeschränkt interpretierbar.

Windexperiment tagsüber/nachts

Bei den Messungen der Transpirationsrate unter Windeinfluss sind ähnliche Schwierigkeiten beim Aufrechterhalten des VPD im Verlauf eines Messdurchgangs aufgetreten wie bei den Messungen in Abhängigkeit des VPD. Der niedrige VPD-Wert tagsüber (ca. 1,0 kPa) konnte bei allen Wiederholungen relativ konstant gehalten werden. Geringfügige Abweichungen traten bei Wdh.2 aufgrund der zu niedrigen Wassermenge im Fass auf. Größere Schwierigkeiten traten dabei auf, einen konstant hohen VPD-Wert über die drei Wiederholungen hinweg aufrechtzuerhalten. Die gewonnenen Daten bei hohem VPD sind deshalb nur eingeschränkt interpretierbar. Außerdem können während eines Messablaufes Fehler bei der Bestimmung der Transpirationsrate vor dem Windereignis tagsüber sowie nachts aufgetreten sein. Die Transpirationsrate muss einen konstanten Wert annehmen, dies beansprucht jedoch immer eine gewisse Zeit. Insbesondere bei Erhöhung oder Erniedrigung der Luftfeuchtigkeit könnte das Zeitintervall, in dem die Transpirationsrate vor dem Windereignis aufgezeichnet wurde, zu kurz gewesen sein, um die genaue Transpirationsrate der beiden Reissorten zu bestimmen. Bei den Messungen der Transpirationsrate nachts führte wiederum eine Erhöhung der Temperatur in der Messkammer bei hohem VPD zu Schwierigkeiten. Auch hier wurde in der 3.Wdh. die Temperatur auf 26°C festgelegt. Bei niedrigen VPD wurden die Messungen der 2.Wdh. verworfen, da sich das VPD zu stark vom VPD während der anderen zwei Wiederholungen unterschied. Bei hohem VPD stieg das VPD bei Wdh.1 und 2 auch innerhalb eines Messdurchgangs aufgrund der Erhöhung der Temperatur relativ stark an, sodass die Transpirationsraten vor, während und nach dem Windereignis nur eingeschränkt miteinander zu vergleichen sind.

Bei einer Wiederholung der Messungen sollte insbesondere das Problem des Anstiegs der Temperatur durch Zuschaltung eines zusätzlichen Kühlgeräts, welches ordnungsgemäß funktioniert, behoben werden. Außerdem könnte man bei der Untersuchung der Transpirationsrate unter Windeinfluss ein abgeändertes Versuchsdesign verwenden. Eine Möglichkeit um die Transpirationsrate mit und ohne

Wind besser vergleichen zu können wäre es, jeweils zwei Pflanzen zur selben Zeit in der Kammer keinem Wind und Wind auszusetzen. Aufgrund des geringen Platzes in der Messkammer ist dies aber schwer umzusetzen. Außerdem wäre eine höhere Windgeschwindigkeit und ein längeres Intervall, in dem die Pflanzen Wind ausgesetzt sind, anzustreben, um eventuell größere Unterschiede in der Transpirationsrate ohne Wind und unter Windeinfluss festzustellen.

5. Literaturverzeichnis

- Anten NPR, Alcalá-Herrera R, Schieving F, Onoda Y** (2010) Wind and mechanical stimuli differentially affect leaf traits in *Plantago major*. *New Phytol* **188**: 554–564
- Bunce JA** (1997) Does transpiration control stomatal responses to water vapour pressure deficit? *Plant Cell Environ* **20**: 131–135
- Caird MA, Richards JH, Donovan LA** (2007) Nighttime Stomatal Conductance and Transpiration in C3 and C4 Plants. *Plant Physiol* **143**: 4–10
- Caldwell MM** (1970) Plant Gas Exchange at High Wind Speeds. *PLANT Physiol* **46**: 535–537
- Dawson TE, Burgess SSO, Tu KP, Oliveira RS, Santiago LS, Fisher JB, Simonin KA, Ambrose AR** (2007) Nighttime transpiration in woody plants from contrasting ecosystems. *Tree Physiol* **27**: 561–575
- Dixon M, Grace J** (1984) Effect of Wind on the Transpiration of Young Trees. *Ann Bot* **53**: 811–819
- Farquhar GD** (1978) Feedforward Responses of Stomata to Humidity. *Funct Plant Biol* **5**: 787–800
- Fletcher AL, Sinclair TR, Allen LH** (2007) Transpiration responses to vapor pressure deficit in well watered 'slow-wilting' and commercial soybean. *Environ Exp Bot* **61**: 145–151
- Francis Darwin** (1898) Observations on Stomata. [Abstract]. *Proc R Soc Lond* **6**: 413–417
- Gollan T, Turner NC, Schulze E-D** (1985) The responses of stomata and leaf gas exchange to vapour pressure deficits and soil water content. *Oecologia* **65**: 356–362
- Grace J** (1974) The Effect of Wind on Grasses1. CUTICULAR AND STOMATAL TRANSPIRATION. *J Exp Bot* **25**: 542–551
- Grace J, Russell G** (1982) The Effect of Wind and a Reduced Supply of Water on the Growth and Water Relations of *Festuca arundinacea* Schreb. *Ann Bot* **49**: 217–225
- Grantz DA** (1990) Plant response to atmospheric humidity. *Plant Cell Environ* **13**: 667–679
- Green SR, McNaughton KG, Clothier BE** (1989) Observations of night-time water use in kiwifruit vines and apple trees. *Agric For Meteorol* **48**: 251–261
- Karpul RH, West AG** (2016) Wind drives nocturnal, but not diurnal, transpiration in *Leucospermum conocarpodendron* trees: implications for stilling on the Cape Peninsula. *Tree Physiol* **36**: 954–966

- Kuwagata T, Ishikawa-Sakurai J, Hayashi H, Nagasuga K, Fukushi K, Ahamed A, Takasugi K, Katsuhara M, Murai-Hatano M** (2012) Influence of Low Air Humidity and Low Root Temperature on Water Uptake, Growth and Aquaporin Expression in Rice Plants. *Plant Cell Physiol* **53**: 1418–1431
- Larcher W** (2001) *Ökophysiologie der Pflanzen*, 6.Aufl. Ulmer, Stuttgart
- Lösch R** (2001) *Wasserhaushalt der Pflanzen*, 1.Aufl. Quelle und Meyer, Wiebelsheim
- Martin EV, Clements FE** Studies of the effect of artificial wind on growth and transpiration in *Helianthus Annuus*. *Plant Physiol* **24**
- Monteith JL** (1995) A reinterpretation of stomatal responses to humidity. *Plant Cell Environ* **18**: 357–364
- Mott KA, Parkhurst DF** (1991) Stomatal responses to humidity in air and helox. *Plant Cell Environ* **14**: 509–515
- Nguyen NV, Ferrero A** (2006) Meeting the challenges of global rice production. *Paddy Water Environ* **4**: 1–9
- Ohsumi A, Hamasaki A, Nakagawa H, Homma K, Horie T, Shiraiwa T** (2008) Response of Leaf Photosynthesis to Vapor Pressure Difference in Rice (*Oryza sativa* L) Varieties in Relation to Stomatal and Leaf Internal Conductance. *Plant Prod Sci* **11**: 184–191
- Pallardy SG, Kozlowski TT** (1979) Relationships of leaf diffusion resistance of *Populus* clones to leaf water potential and environment. *Oecologia* **40**: 371–380
- Rawson H, Clarke J** (1988) Nocturnal Transpiration in Wheat. *Aust J Plant Physiol* **15**: 397
- Rawson HM, Begg JE, Woodward RG** (1977) The effect of atmospheric humidity on photosynthesis, transpiration and water use efficiency of leaves of several plant species. *Planta* **134**: 5–10
- Snyder KA, Richards JH, Donovan LA** (2003) Night-time conductance in C3 and C4 species: do plants lose water at night? *J Exp Bot* **54**: 861–865
- Steduto P, Food and Agriculture Organization of the United Nations, eds** (2012) Crop yield response to water. Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome
- Stewart DW, Dwyer LM** (1983) Stomatal response to plant water deficits. *J Theor Biol* **104**: 655–666
- Taiz L, Zeiger E, Møller IM, Murphy A** (2010) *Plant Physiology and Development*, 5.Aufl. Sinauer, Sunderland, Mass.
- Woolley JT** (1961) Mechanisms by which wind influences transpiration. *PLANT Physiol* **36**: 112–114

6.Anhang

6.1 Tabellen

Tab. 6 Relativer Vergleich der Transpirationsrate und stomatären Leitfähigkeit unter Windeinfluss tagsüber

Sorte	VPD niedrig (-/+)	Wind / vor Wind	Wind / nach Wind	vor Wind / nach Wind
IR31	E	1,28	1,23	0,96
IR46		1,43	1,50	1,04
IR31	g _s	1,27	1,31	1,03
IR46		1,41	1,60	1,14
	VPD niedrig (+/-)			
IR31	E	1,33	1,24	0,93
IR46		1,27	1,42	1,12
IR31	g _s	1,32	1,28	0,97
IR46		1,38	1,56	1,14
	VPD hoch (-/+)			
IR31	E	1,19	1,17	0,98
IR46		1,14	1,30	1,13
IR31	g _s	1,09	1,15	1,05
IR46		1,11	1,32	1,19
	VPD hoch (+/-)			
IR31	E	1,17	1,13	0,96
IR46		1,12	1,08	0,96
IR31	g _s	1,16	1,13	0,98
IR46		1,12	1,08	0,96

Tab. 7 Relativer Vergleich der Transpirationsrate und stomatären Leitfähigkeit unter Windeinfluss nachts

Sorte	VPD niedrig (-/+)	Wind / vor Wind	Wind / nach Wind	vor Wind /nach Wind
IR31	E	1,23	1,31	1,06
IR46		1,31	1,10	0,84
IR31	g _s	1,36	1,35	0,99
IR46		1,41	1,26	0,89
	VPD niedrig (+/-)			
IR31	E	1,40	1,26	0,90
IR46		1,32	1,22	0,93
IR31	g _s	1,48	1,32	0,89
IR46		1,32	1,21	0,92
	VPD hoch (-/+)			
IR31	E	1,15	1,25	1,08
IR46		1,36	1,24	0,92
IR31	g _s	1,10	1,27	1,15
IR46		1,32	1,34	1,01
	VPD hoch (+/-)			
IR31	E	1,21	1,21	1,00
IR46		1,28	1,14	0,90
IR31	g _s	1,17	1,22	1,04
IR46		1,26	1,16	0,92

6.2 Danksagung

An dieser Stelle möchte ich allen Personen danken, die mich bei meiner Bachelorarbeit unterstützt haben.

Bedanken möchte ich bei Julia Hartmann für die Unterstützung im Labor und bei der Pflanzenanzucht im Gewächshaus.

Außerdem bedanke ich mich bei Marc Schmierer für die Hilfe bei den Messungen in der VPD-Kammer.

Des Weiteren möchte ich mich bei Frau Dr. Sabine Stürz für die Hilfe bei der statistischen Auswertung der Daten bedanken.

Herrn Prof. Dr. Folkard Asch danke ich für die guten Ratschläge, sowie für die Möglichkeit am Institut für Pflanzenproduktion und Agrarökologie in den Tropen und Subtropen meine Bachelorarbeit anzufertigen.

6.3 Eidesstattliche Erklärung

Hiermit erkläre ich,

Eliana Häfele

geboren am 27.02.1995

Matrikelnummer: 646095

6. Semester Agrarbiologie

dass die vorliegende Bachelor-Arbeit selbständig und ausschließlich unter Zuhilfenahme der im Literaturverzeichnis genannten Quellen angefertigt wurde und noch an keiner anderen Stelle vorgelegt wurde. Alle Stellen der Arbeit, die wörtlich oder sinngemäß aus Veröffentlichungen oder aus anderen fremden Mitteilungen entnommen wurden, sind als solche einzeln kenntlich gemacht.

Betreuender Professor: Prof. Dr. Folkard Asch

Thema: Diurnale Effekte von VPD und Wind auf die Transpiration von Reis

Ich erkläre weiterhin, dass der betreuende Professor ein unverschlüsseltes digitales Textdokument (in einem der Formate doc, docx, odt, pdf, rtf) der Arbeit übermittelt wurde, das in Inhalt und Wortlaut ausnahmslos der gedruckten Ausfertigung entspricht. Mir ist bekannt, dass diese digitale Version anhand einer Analyse-Software auf Plagiate überprüft werden kann.

Ort, Datum

Unterschrift