

Tau - ein bedeutsamer Bestandteil des Wasserhaushaltes eines Grünlandstandortes - Eine lysimeterbasierte Studie

Max Brunke¹, Jannis Groh^{1,2}, Jan Vanderborcht¹, Harry Vereecken¹ und Thomas Pütz^{1*}

Zusammenfassung

Im Rahmen einer Lysimeterstudie mit 9 Lysimetern mit 1m² Oberfläche und 1,5 m Tiefe befüllt auf einem Grünlandstandort des Mittelgebirges Eifel wurden während der Jahre 2015 – 2017 Untersuchungen zur Taubildung durchgeführt. Hierbei wurden sechs Lysimeter am Originalstandort Rollesbroich (511m über N.N. / 11 °C / 754 mm) untersucht und drei Lysimeter zum 30 km entfernten Standort Selhausen (104 m über N.N. / 8 °C / 1127 mm) versetzt. Ein jährlicher Vergleich der Häufigkeit der Tauereignisse pro Jahr zeigte nur geringfügige Unterschiede zwischen den Lysimetern der Standorte Selhausen und Rollesbroich. Die Tauverteilung lässt an beiden Standorten eine deutliche Saisonalität erkennen. In den Jahren 2015 bis 2017 waren die Tausummen in den Wintermonaten am Höchsten und in den Sommermonaten am Niedrigsten. Die jährlichen Tau-Monatssummen betragen in Rollesbroich 7,2 mm (2015), 6,8 mm (2016) und 13,4 mm (2017). In Selhausen lagen diese bei 5,6 mm (2015), 5,5 mm (2016) und 6,4 mm (2017). Ursächlich dafür war auch die Dauer der Tauereignisse, die in Rollesbroich durchschnittlich länger dauerten als in Selhausen.

Schlagwörter: Lysimeter, Tau, Taubildungsrate, Saisonalität

Summary

Within the framework of a lysimeter study with 9 lysimeters with a surface area of 1m² and a depth of 1.5 m filled on a grassland site of the Eifel low mountain range, dew formation investigations were carried out during the years 2015 - 2017. Six lysimeters were investigated at the original site Rollesbroich (511m above sea level / 11 °C / 754 mm) and three lysimeters were transferred to the site Selhausen 30 km away (104 m above sea level / 8 °C / 1127 mm). An annual comparison of the frequency of dew events per year showed only minor differences between the lysimeters of the sites Selhausen and Rollesbroich. The distribution of dew showed a clear seasonality at both sites. In the years 2015 to 2017 the dew sums were highest in the winter months and lowest in the summer months. The annual dew monthly amounts in Rollesbroich were 7.2 mm (2015), 6.8 mm (2016) and 13.4 mm (2017). In Selhausen these were 5.6 mm (2015), 5.5 mm (2016) and 6.4 mm (2017). This was also due to the duration of the dew events, which lasted on average longer in Rollesbroich than in Selhausen.

Keywords: Lysimeter, dew, dewfall rate, seasonality

Tau – Definition und ökologische Relevanz

Die Klimaveränderung verlangt nach einer vollständigen Betrachtung der Süßwasserressourcen zur Sicherung des Trinkwassers und auch der landwirtschaftlichen Erträge (Tomaszkiewicz et al. 2016, XU et al. 2015). Besonders in semi-ariden und ariden Regionen besitzt Tau eine hohe ökologische Relevanz und die jährlichen Tauerträge haben dort einen erheblichen Anteil am Jahresniederschlag (Hanisch et al. 2015). In den Wasserbilanzen der nördlich-humiden Klimazonen wird Tau aufgrund seines geringen Gesamtanteils, sowie seiner aufwändigen Quantifizierbarkeit oft vernachlässigt (Jacobs et al. 2006). Aktuelle wissenschaftliche Erkenntnisse zeigen aber welche hohe ökologische Relevanz Tauwasser auch in humiden Regionen besitzt (Groh et al. 2018, Tomaszkiwicz et al. 2016, XIAO et al. 2009).

Lauer & Bendix (2006) definieren Hydrometeore, wie Regen, Schnee, Hagel, Graupel etc. als „fallenden Niederschlag“ und grenzen von Niederschlagstypen ab, die sich erst an Oberflächen bilden. Abgesetzte Niederschläge

entstehen, wenn die Oberflächentemperatur von z.B. Boden, Blätter etc. soweit absinkt, dass der Sättigungsdampfdruck an der Grenzfläche zur Atmosphäre überschritten wird. Niederschlag, der als Kondensat auf Oberflächen gebildet wird, wird je nach Oberflächentemperatur als Tau ($T_{\text{surface}} > 0^{\circ}\text{C}$) oder als Raureif ($T_{\text{surface}} < 0^{\circ}\text{C}$) bezeichnet (Agam & Berliner 2006, Groh et al. 2018, Meissner et al. 2007). Die Klassifizierung von Niederschlägen in „fallende“ oder „abgesetzte“ Formen ist nicht ausreichend, da diese Niederschlagstypen, wie Nebel, Wasserdampfadsorption im Boden nicht berücksichtigt.

Das Tauwasser hat eine Bedeutung als „Puffer“, um den Wasserverlust durch Evapotranspiration zu verringern (Tomaszkiewicz et al. 2015). Besonders der Wasserverlust durch die stomatären Pflanzenöffnungen (Transpiration) wird durch die Verfügbarkeit von Interzeptionswasser reguliert (Gerlein-Safdi et al. 2018, Larsson 1981). Dieses wird der Pflanze unter anderem durch die Taubildung zur Verfügung gestellt, die eine regelrechte „transpiration sup-

¹ Institut für Bio- und Geowissenschaften IBG-3: Agrosphäre, Forschungszentrum Jülich GmbH, D-52425 JÜLICH

² Programmbereich 1 „Landschaftsprozesse“, Arbeitsgruppe „Hydropedologie“, Leibniz-Zentrum für Agrarlandschaftsforschung (ZALF) e.V.

* Ansprechpartner: Dr. Thomas Pütz, t.puetz@fz-juelich.de



pression“ bewirken kann und die Photosyntheseleistung verbessert (Gerlein-Safdi et al. 2018, Tomaszkiwicz et al. 2015). Ben-Asher et al. (2010) sprechen von einer Erhöhung der Wassernutzungseffizienz von Pflanzen im Mittelmeer-raum unter Taueinfluss.

Diese pflanzenökologischen Tauereffekte bei landwirtschaftlichen Nutzpflanzen bewirken einen ertragssteigernden Effekt (Agam & Berliner 2006). Dem gegenüber steht das erhöhte Risiko von Pflanzenkrankheiten und die geringere Effizienz applizierter Pflanzenschutzmittel, die durch eine erhöhte Blattfeuchtedauer begünstigt werden (Groh et al. 2018, Abi Saab et al. 2017, Tomaszkiwicz et al. 2015).

Die Taubildung hängt stark von dem Temperaturabfall natürlicher Oberflächen ab. Die Luft- wie auch Oberflächentemperatur ist im Tagesverlauf meist zwischen Sonnenuntergang und -aufgang minimal.

Die Dauer von Tauereignissen wird durch die Blattfeuchtedauer erfasst und kann schon mit geringem Aufwand gemessen werden (Agam & Berliner 2006), z.B. mit elektrischen Impedanzgittern (Pedro & Gillespie 1981) oder durch kommerzielle elektrische Blattfeuchtesensoren (Scherer & van Bruggen 1993).

Tauwassermengen

Die Erfassung der Tauwassermenge ist im Vergleich zur Messung der Dauer komplizierter und meistens mit einem höheren Aufwand verbunden. Eine der ersten Methoden wurde von Duvdevani (1947) vorgestellt, der die optische Auswertung seiner Duvdevani-Taumesser und deren Vergleich mit Referenzfotografien vorschlug. Auf einem speziell behandelten Holzblock kann Tau kondensieren und lässt sich in seinem Erscheinungsbild nach Intensität klassifizieren sowie von Regenereignissen unterscheiden. Da die Taubildung allerdings stark von den physikalischen Eigenschaften der Holzblöcke abhängt, ist nur der relative Vergleich von Standorten möglich, nicht jedoch die Erfassung absoluter Tauwassermengen (Agam & Berliner 2006). Kidron (1999) stellte eine optimierte Methode zur Bestimmung der Tauwassermengen vor, welche die Verwendung hoch adsorptiver synthetischer Textilien beinhaltet. Diese ermöglichen, positioniert zwischen zwei Glasplatten, die Aufnahme hoher Mengen an Tauwasser. Auf diese Weise können absolute Tauwassermengen pro Nacht, aber keine Informationen über Dauer und Taubildungsraten bestimmt werden (Agam & Berliner 2006).

Wägbare Präzisionslysimeter können die Tauwassermengen kontinuierlich erfassen, haben eine höhere Messgenauigkeit und ermitteln zusätzlich die Dauer von Tauereignissen. Durch die hohe Präzision und die zeitliche Auflösung der Wägedaten können vermeintlich kleine Bestandteile der Wasserbilanz – wie Tau – erfasst werden (Groh et al. 2018). Ein weiterer Vorteil ergibt sich aus der Verwendung eines Bodenmonoliths samt Vegetation, der realitätsnahe Feldbe-

dingungen garantiert. Auf diese Weise können auch weitere Formen des atmosphärischen Wassereintrags berücksichtigt werden, wie etwa die direkte Adsorption von Wasserdampf im Oberboden (Agam & Berliner 2006, Groh et al. 2018).

Die Erfassung von Tauereignissen mit Lysimetern ist die wohl aufwändigste und kostenintensivste Form der Taumesung. Des Weiteren sind Lysimeter wegen ihrer sehr hohen Messgenauigkeit von 10 g (entspricht ca. 0,01 mm) anfällig für Störfaktoren wie etwa Wind, sodass eine zeitintensive Datenprozessierung obligatorisch ist (Pütz et al. 2016).

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wurde die Quantifizierung von Tauereignissen und –mengen für die Jahre 2015 bis 2017 durchgeführt. Unsere Arbeitshypothesen lauteten:

- Unter den wärmeren und trockeneren Klimabedingungen in Selhausen sind geringere Taumengen zu erwarten, als unter den kühleren und feuchteren Klimabedingungen in Rollesbroich.
- Die Unterschiede in Häufigkeit und Menge der Tauereignisse der beiden Standorte sind charakteristisch und lassen sich in allen drei untersuchten Jahren erkennen.

Material und Methoden

Im Rahmen von TERENO wurde das SOILCan-Lysimeternetzwerk mit insgesamt 126 Lysimetern an 13 verschiedenen Standorten aufgebaut. Die SOILCan-Lysimeter wurden innerhalb und außerhalb der einzelnen TERENO-Observatorien nach dem „Space-for-time“-Prinzip versetzt, welches eine Imitierung des prognostizierten Klimawandels ermöglichte (Pütz 2013, Pütz et al. 2016, Pütz et al. 2011). Die runden, monolithisch befüllten Lysimeter mit 1,0 m² Oberfläche und einer Tiefe von 1,5 m sind um einen zentralen Wartungsschacht angeordnet. Die Lysimetersohle ist mit einem Saugkerzenrechen ausgestattet, der das Sickerwasser des Lysimeters in einem separaten Tank im Wartungsschacht sammelt. Sowohl die Wassertanks als auch die Lysimeter sind mit Präzisionswaagen ausgestattet. Die Lysimetergewichte wurden mit 10 g Genauigkeit und die Tankgewichte mit 1 g Genauigkeit erfasst (Pütz et al. 2016). An den Lysimeterstandorten wurde eine Wetterstation WXT510 [Vaisala Oyj, Helsinki, Finnland] betrieben, die Lufttemperatur, relative Luftfeuchtigkeit und Windgeschwindigkeit erfasste. Selhausen (50°52'9.89"N / 6°27'1.66"E) und Rollesbroich (50°37'20.45"N / 6°18'21.70"E) liegen ca. 30 km voneinander entfernt im TERENO-Observatorium Eifel/Niederrheinische Bucht. *Tabelle 1* fasst weitere relevante Standortfaktoren der Untersuchungsgebiete zusammen. In Rollesbroich befinden sich sechs Lysimeter (RO_11 bis RO_16) und in Selhausen drei versetzte Lysimeter (SE_021, SE_25, SE_26) des Standortes Rollesbroich. Alle Lysimeter wurden entsprechend dem Grünlandstandort Rollesbroich bewirtschaftet. Die Bodenmonolithen sind als pseudovergleyte Braunerden („stagnic cambisol“ nach FAO) klassifiziert und zeichnen sich durch einen geringmächtigen, humosen Oberboden aus (Ah 0 – 9 cm; Pütz et al. 2016).

Tabelle 1: Standortfaktoren Selhausen und Rollesbroich.

Untersuchungsstandort	Anzahl der Lysimeter	Durchschnittswerte Lufttemperatur / Niederschlag			Höhe über N.N.
		2015	2016	2017	
Selhausen (SE)	3	11 °C / 754 mm	11 °C / 705 mm	11 °C / 643 mm	104 m
Rollesbroich (RO)	6	8 °C / 1127 mm	8 °C / 1070 mm	8 °C / 1091mm	511 m

Die vereinfachte Wasserbilanz für die Lysimeter lautet:

$$\Delta W = P - ET - S - SC \quad \text{Gl.1}$$

- ΔW = Änderung des Wasserspeichers
- P = Gesamtniederschlag
- ET = Evapotranspiration
- S = Sickerwasser
- SC = Saugkerzenproben

Für die Zeit vom 01.01.2015 bis 31.12.2017 wurden Messungen von neun Lysimetern in Selhausen und Rollesbroich zur Quantifizierung von Tauereignissen verwendet. Nach abgeschlossener Qualifizierung der Gewichtsdaten erfolgte eine Rauschreduzierung mit dem AWAT-Filter (Peters et al. 2014). Abschließend wurden die minutlichen Niederschlags- und Evapotranspirationsmengen nach Gleichung 2 bestimmt (Schrader et al. 2013):

$$\Delta W = \Delta W_{\text{lys}} + \Delta W_{\text{drain}}$$

$$\Delta P = \begin{cases} \Delta W, & \Delta W > 0 \\ 0, & \Delta W \leq 0 \end{cases} \quad \text{Gl.2}$$

$$\Delta ET = \begin{cases} 0, & \Delta W \geq 0 \\ \Delta W, & \Delta W < 0 \end{cases}$$

Aus der Gewichtsänderung des Lysimeters (ΔW_{lys}) und des Lysimetertanks (ΔW_{drain}) ergibt sich abzüglich S und SC die Änderung des Wasserspeichers (ΔW) durch Niederschlagsereignisse (ΔP für $\Delta W > 0$), bzw. durch Evapotranspiration (ΔET für $\Delta W < 0$). Um zwischen Tau und weiteren Niederschlagstypen zu differenzieren, wurden

Referenzniederschlagsmessungen berücksichtigt (Nolz et al. 2014). Es wurde angenommen, dass Niederschlag und Evapotranspiration innerhalb 1-minütiger Zeitintervalle nicht gleichzeitig auftraten bzw. man ist mit dem Set-up nur in der Lage die Nettoänderung zu bestimmen. Eine nächtliche bzw. morgendliche Zunahme des Lysimetergewichtes wurde als Tauereignis angesprochen, wenn andere Ursachen der Gewichtszunahme ausgeschlossen werden konnten. Ombrometer (OTT Pluvio, OTT HydroMet GmbH, Kempten) an den Standorten Selhausen und Rollesbroich wurden als Referenzen verwendet. Es wurden nur die Niederschlagsdaten der Lysimeter für die Zeit zwischen Sonnenuntergang und Sonnenaufgang als Tauwasser klassifiziert, wenn während eines Tauereignisses $P_{\text{rain}} = 0$ mm war. Für die Bestimmung des täglichen Sonnenauf- und Sonnenunterganges wurden die Funktionen „sunrise“ und „crepscule“ des R-Softwarepakets „mappro“ V0.9-4 verwendet (Bivand & Lewin-Koch 2018). Die Saugkerzenwasserproben mit einem Anteil an der Gesamtwasserbilanz von $< 0.5\%$ waren vernachlässigbar. Monteith & Unsworth (2013) geben $0,07 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ als physikalisches Maximum der nächtlichen Taubildung an. Stundenwerte, die die maximale Taubildungsrate in klaren Nächten von $0,07 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ überschritten, wurden auf diesen Wert reduziert. Potentielle Tauerträge wurden mit der FAO56 Penman-Monteith-Gleichung nach Allen et al. (1998) kalkuliert.

Um die Intensität von Tauereignissen unabhängig von der Nachtlänge bewerten zu können, wurden durchschnittliche nächtliche Taubildungsraten ($\text{mm} \cdot \text{h}^{-1}$) bestimmt. Um den Einfluss der Nebelbildung auf die Gesamtmenge abgesetzter Niederschläge bewerten zu können und mögliche

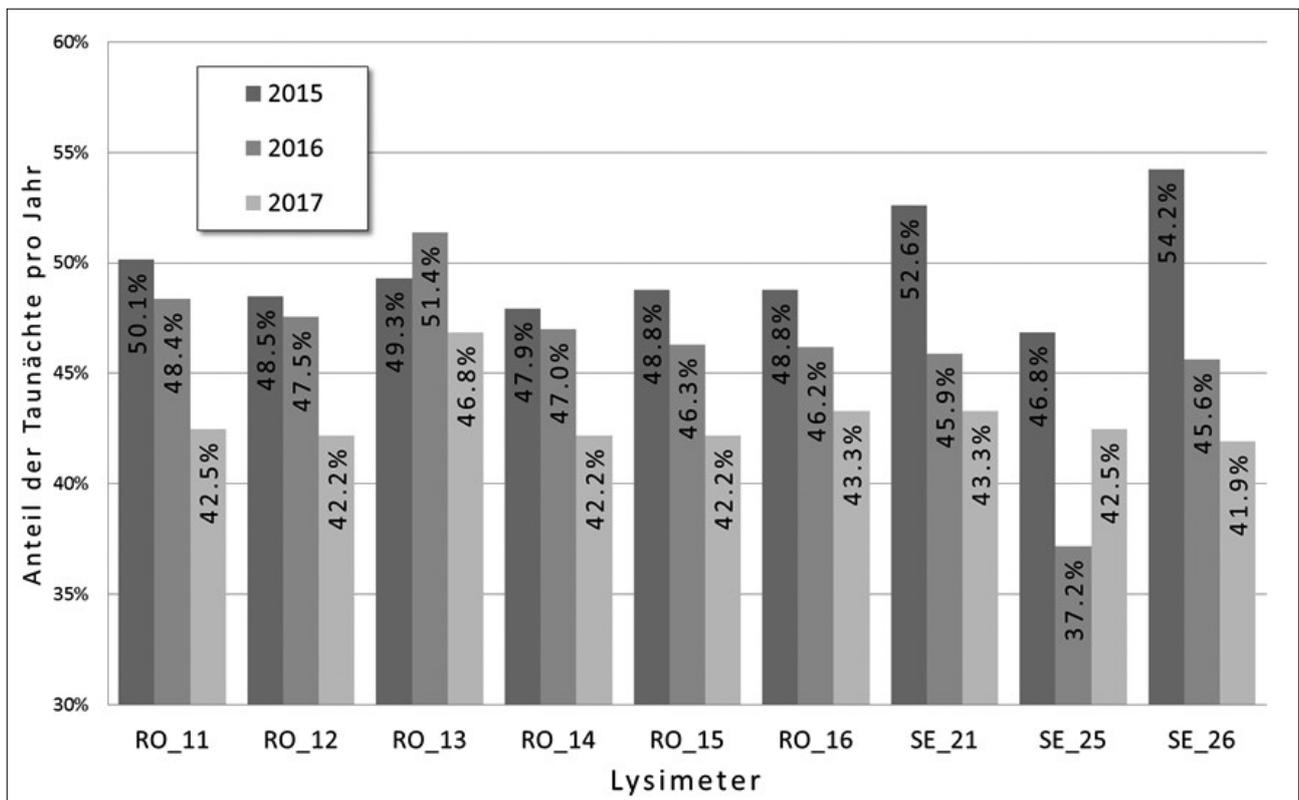


Abbildung 1: Häufigkeit von Tauereignissen in Rollesbroich und Selhausen in den Jahren 2015 bis 2017 (% - Anteil der Nächte eines Jahres).

standortsspezifische Unterschiede festzustellen, wurden an beiden Standorten Bilder der Überwachungskameras ausgewertet. Die Klassifizierung der Kamerabilder orientiert sich an der Studie von Pavlic et al. (2013). Nebelereignisse mit einer deutlich erkennbaren Sichtweitenreduzierung (< 100 m) wurden als nässender Nebel eingeordnet. Anhand der Kamerabilder wurde außerdem die Anzahl der Schneetage in Selhausen bestimmt. In Rollesbroich wurden zu diesem Zweck Daten einer nahegelegenen, privaten Wetterstation genutzt (Holz 2018).

Darstellung der Ergebnisse

Häufigkeit von Tauereignissen

Der Anteil der Taunächte am gesamten Jahr bildet eine Maßzahl zur Bewertung der jährlichen Tauhäufigkeit (*Abbildung 1*).

Ein jährlicher Vergleich der Häufigkeit von Tauereignissen pro Jahr, zeigt das es nur geringfügige Unterschiede zwischen den Lysimetern der Standorte Selhausen und Rollesbroich gibt. Im Jahr 2015 wurden die größten Tauhäufigkeiten mit 54 % und 53 % bei Lysimeter SE_26 bzw. SE_21 gemessen. Die Lysimeter in Rollesbroich erreichten alle Tauhäufigkeiten von 48 - 50 %. Im Jahr 2016 war kein Unterschied zwischen den Lysimetern in Selhausen und Rollesbroich erkennbar. Die Lysimeter in Rollesbroich RO_11 bis RO_16 erreichten im Schnitt 48 %. Lediglich RO_13

erreichte mit 51 % einen höheren Wert. Die Tauhäufigkeiten für SE_21 und SE_26 lagen im selben Jahr bei 46 %. SE_25 erreichte mit 37 % die niedrigste Tauhäufigkeit, die während des gesamten Beobachtungszeitraums für eines der neun Lysimeter ermittelt wurde. Im Jahr 2017 lagen die Tauhäufigkeiten der Lysimeter in Selhausen und Rollesbroich erneut nah beieinander. Die Tauhäufigkeiten der Lysimeter in Selhausen und in Rollesbroich lagen durchschnittlich bei 43 %. Nur Lysimeter RO_13 wies mit 47 % eine höhere Tauhäufigkeit auf, als die fünf angrenzenden Lysimeter.

Die Tauhäufigkeiten zeigten über die Jahre 2015, 2016 und 2017 für fast alle neun Lysimeter einen deutlichen Rückgang. Lediglich die Lysimeter RO_13, sowie SE_25 wichen im Jahr 2016 von diesem Trend ab. SE_26 erreichte die höchste Differenz der Tauhäufigkeiten von 2015 bis 2017.

Tauwassermengen

Anhand der Tauwassermengen, die aus den Lysimetergewichten berechnet und durch die nach Penman-Monteith modellierten potentiellen Tauwassermengen ergänzt wurden, wurden monatliche und jährliche Bilanzen erstellt. Die Lysimeter in Selhausen wiesen mit ca. 2 % einen geringen Anteil fehlender Daten auf. Dieser Anteil war mit durchschnittlich 7 % in Rollesbroich etwas höher. Der höhere Anteil fehlender Lysimeterdaten in Rollesbroich ist bedingt durch die längeren Phasen mit einer geschlossenen Schneedecke, die zur Brückenbildung am Lysimeterrand

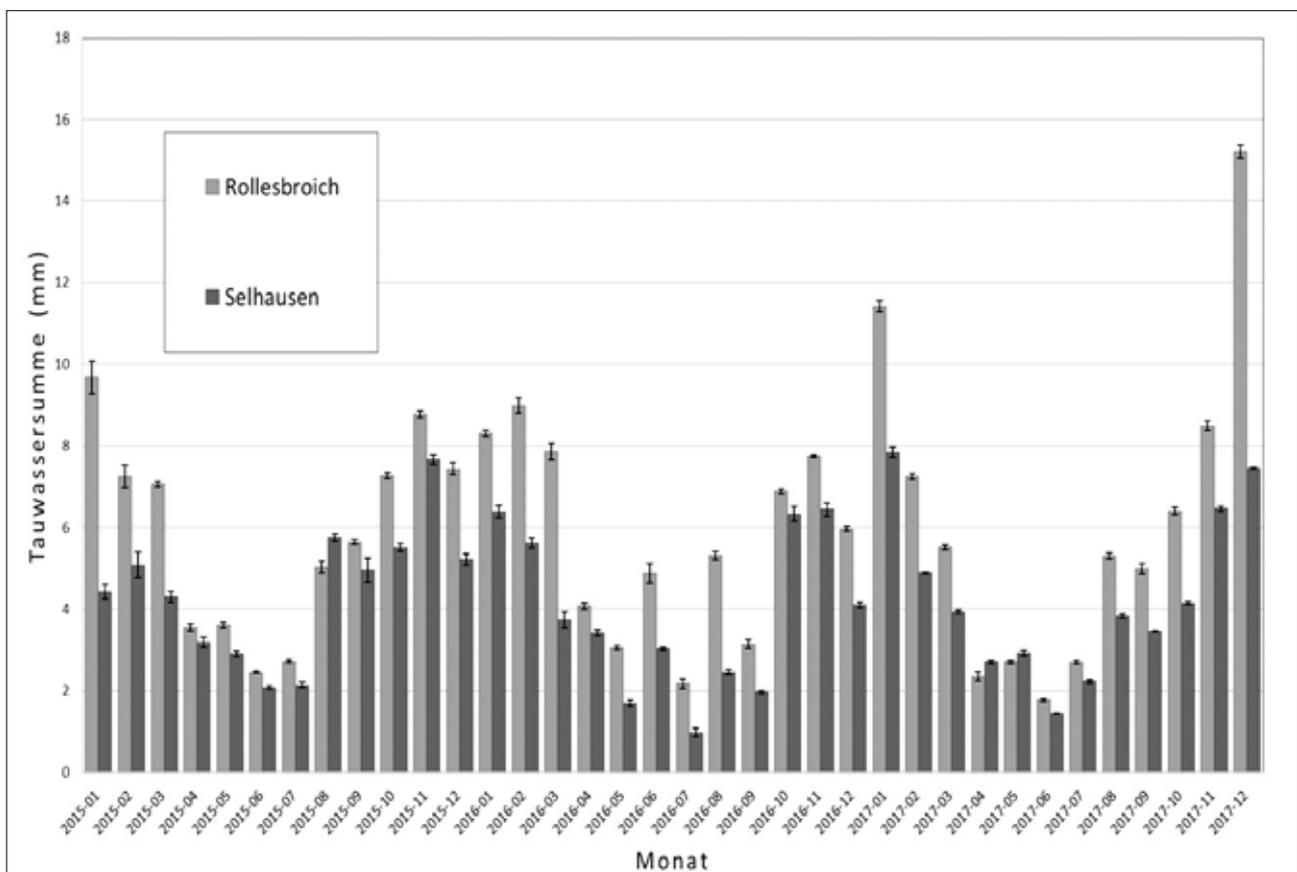


Abbildung 2: Verteilung der monatlichen Tauwassermengen in Selhausen und Rollesbroich über die Jahre 2015 bis 2017 inklusive Standardabweichung der Lysimeter.

Tabelle 2: Die monatlichen Tauwassermengen und der Gesamtniederschlag für die Standorte Rollesbroich und Selhausen.

Zeit	Niederschlag		Tau		SE Standardabweichung (mm)	RO Anteil Niederschlag (%)	SE	RO
	SE in mm	RO in mm	SE Durchschnitt (mm)	RO				
Jan. 15	84.92	128.17	4.42	9.67	0.70	1.56	5.20	7.55
Feb. 15	42.62	60.86	5.08	7.25	1.24	1.06	11.91	11.91
Mrz. 15	49.16	93.56	4.30	7.06	0.47	0.25	8.74	7.55
Apr. 15	43.10	63.05	3.18	3.55	0.49	0.36	7.38	5.62
Mai 15	34.98	48.45	2.90	3.60	0.26	0.29	8.28	7.43
Jun. 15	38.92	81.02	2.08	2.45	0.16	0.10	5.33	3.02
Jul. 15	82.09	102.03	2.13	2.72	0.22	0.13	2.60	2.66
Aug. 15	109.05	89.34	5.74	5.04	0.34	0.57	5.26	5.64
Sep. 15	92.71	140.24	4.96	5.64	1.20	0.22	5.35	4.02
Okt. 15	42.91	39.76	5.50	7.28	0.37	0.29	12.82	18.30
Nov. 15	78.02	174.66	7.66	8.76	0.45	0.35	9.82	5.02
Dez. 15	55.08	105.88	5.22	7.44	0.53	0.55	9.48	7.03
Σ Jahr 2015	753.57	1127.02	53.16	70.45	6.45	5.74	7.05	6.25
Jan. 16	69.64	113.91	6.39	8.31	0.59	0.33	9.17	7.30
Feb. 16	90.08	143.25	5.61	8.99	0.49	0.77	6.23	6.27
Mrz. 16	42.60	103,77	3.73	7.85	0.78	0.79	8.77	7.57
Apr. 16	45.87	73.99	3.41	4.08	0.29	0.30	7.43	5.51
Mai 16	59.30	103.14	1.69	3.06	0.29	0.20	2.86	2.96
Jun 16	138.09	192.36	3.03	4.88	0.16	0.96	2.19	2.54
Jul. 16	27.23	50.22	0.98	2.17	0.42	0.44	3.59	4.33
Aug. 16	37.84	58.48	2.45	5.31	0.22	0.37	6.46	9.08
Sep. 16	40.27	19.07	1.97	3.14	0.15	0.39	4.89	16.48
Okt. 16	73.94	81.81	6.33	6.88	0.72	0.21	8.57	8.41
Nov. 16	63.18	97.61	6.43	7.74	0.65	0.12	10.19	7.93
Dez. 16	16.59	32.55	4.10	5.96	0.28	0.23	24.72	18.32
Σ Jahr 2016	704.62	1070.16	46.13	68.38	5.04	5.10	6.55	6.39
Jan. 17	35.06	37.23	7.83	11.42	0.51	0.55	22.34	30.67
Feb. 17	37.86	94.12	4.89	7.26	0.05	0.27	12.91	7.71
Mrz. 17	65.67	119.51	3.93	5.51	0.15	0.23	5.99	4.61
Apr. 17	27.73	33.78	2.71	2.34	0.14	0.42	9.76	6.93
Mai 17	57.78	66.94	2.93	2.70	0.26	0.16	5.07	4.04
Jun. 17	30.06	50.74	1.43	1.78	0.07	0.16	4.76	3.51
Jul. 17	84.03	156.71	2.22	2.70	0.16	0.14	2.65	1.72
Aug. 17	68.40	106.39	3.83	5.30	0.17	0.25	5.60	4.99
Sep. 17	65.39	102.32	3.44	4.99	0.06	0.51	5.27	4.87
Okt. 17	36.81	101.17	4.15	6.40	0.15	0.36	11.26	6.33
Nov. 17	65.89	118.86	6.46	8.49	0.24	0.44	9.80	7.14
Dez. 17	68.38	103.66	7.45	15.21	0.07	0.65	10.89	14.67
Σ Jahr 2017	643.04	1091,42	51.27	74.10	2.05	4.16	7.97	6.79

und somit zu Fehlmessungen führte. Während des gesamten Untersuchungszeitraums bildete sich in Selhausen an 16 Tagen eine geschlossene Schneedecke, in Rollesbroich hingegen an 88 Tagen.

Die Verteilung der Monatssummen lässt an beiden Standorten eine deutliche Saisonalität erkennen (*Abbildung 2*). In den Jahren 2015 bis 2017 nahmen die Tausummen in den Wintermonaten maximale Werte an und waren in den Sommermonaten am niedrigsten. Somit liegen die jährlichen Spannweiten der Monatssummen in Rollesbroich bei 7,2 mm (2015), 6,8 mm (2016) und 13,4 mm (2017). In Selhausen lagen diese bei 5,6 mm (2015), 5,5 mm (2016) und 6,4 mm (2017, *Tabelle 2*).

In nahezu allen Monaten überstiegen die Taumengen in Rollesbroich jene in Selhausen. Vor allem in den Wintermonaten lagen die Werte in Rollesbroich deutlich über den Werten in Selhausen (*Abbildung 2* vgl. Jan. 2015; vgl. Dez. 2017). In den Sommermonaten hingegen, wenn sich an beiden Standorten wenig Tau bildete, fiel die Differenz geringer aus (*Abbildung 2* vgl. Jun. 2015; vgl. Jun. 2017).

Die höchste Differenz wurde im Dezember 2017 beobachtet (7,5 mm in Selhausen, 15,2 mm in Rollesbroich). August 2015, April 2017 und Mai 2017 waren die einzigen Monate im Untersuchungszeitraum, in denen sich in Selhausen geringfügig mehr Tau (ca. 1 mm) bildete als in Rollesbroich.

Erhöhte Standardabweichungen traten vorwiegend in Monaten mit mittlerer bis hoher Taubildung auf. Im Jahr 2015 traten sowohl in Selhausen, als auch in Rollesbroich die höchsten Standardabweichungen auf. Auch beim Vergleich der jährlichen Tausummen der Jahre 2015, 2016 und 2017 wird ein Standortunterschied in der Taubildung deutlich. Es bildeten sich in allen Jahren ca. 20 mm mehr Tau in Rollesbroich als in Selhausen.

Werden die Tausummen an beiden Standorten in Relation zum Gesamtniederschlag gesetzt, ergibt sich ein gänzlich anderes Verteilungsmuster. In allen Jahren entsprach die Tauwassermenge in Selhausen einem größeren Anteil am Gesamtniederschlag als in Rollesbroich. Besonders in den Wintermonaten bildete sich in Rollesbroich zwar mehr Tauwasser als in Selhausen, jedoch fiel dort in jenen Mo-

naten auch deutlich mehr Niederschlag. Die Taumengen in Selhausen hatten in mehreren Monaten einen höheren Anteil am Gesamtniederschlag, als in Rollesbroich. Mit 24,7 % war der Tauanteil im Dezember 2016 in Selhausen am höchsten, während er mit 30,7 % im Januar 2017 in Rollesbroich am höchsten war. In den Sommermonaten lag der Tauanteil an beiden Standorten häufig unter 5 %.

Zusammenhang von Tauwassermenge und Taudauer

Zur Prüfung inwiefern der Ertrag der Tauereignisse von ihrer Länge abhängt, wurden beide Faktoren miteinander verglichen. Auf Grund der teils hohen Variabilität einzelner Tauereignisse, wurden monatliche Tausummen sowie die durchschnittliche Taudauer eines jeden Monats berechnet und gegeneinander geplottet. Auf Basis einer einfachen linearen Regression wurden zudem für beide Standorte Regressionsgeraden bestimmt (Abbildung 3). Hierbei wurden sowohl die Taumenge, als auch die Taudauer ausschließlich anhand der Lysimeterdaten bestimmt. Für die Bilanzierung der Tauwassermengen hingegen wurden zusätzlich die nach Penman-Monteith modellierten potentiellen Tauerträge berücksichtigt. Die in *Abbildung 3* dargestellten monatlichen Taumengen sind daher niedriger als in *Tabelle 1* angegeben.

Die Wertepaare zeigen für Rollesbroich ebenso wie für Selhausen einen positiven Zusammenhang. Dieser wird am besten durch eine lineare Regression vom Typ $f(x) = mx + b$ abgebildet, mit x als durchschnittliche Taudauer (h) und $f(x)$ als monatliche Taumenge (mm). Mit $m = 0.99$ und $b = -0.27$ erreichte Rollesbroich ein Bestimmtheitsmaß von 0.53, während Selhausen mit $m = 0.7$ und $b = 0.82$ ein Bestimmtheitsmaß von 0.47 erreichte. Da die Streuung der Wertepaare besonders mit höherer Taudauer und -menge zunimmt und dennoch keine erheblichen Abweichungen auftreten, können die Bestimmtheitsmaße als akzeptabel angenommen werden.

Die Tauereignisse in Rollesbroich dauerten durchschnittlich länger als in Selhausen. So wurde in Rollesbroich in mehreren Monaten eine durchschnittliche Taudauer von über acht Stunden erreicht. Eine besonders große Taumenge bildete sich im Dezember 2017 in Rollesbroich. Die durchschnittliche Dauer eines einzelnen Tauereignisses lag in diesem Monat bei ca. acht Stunden. In Monaten mit wenig Tau war die durchschnittliche Dauer einzelner Tauereignisse hingegen deutlich niedriger und lag teilweise unter drei Stunden. Die durchschnittliche nächtliche Taumenge lag in Selhausen bei 0,10 mm und in Rollesbroich bei 0,12 mm. Die beobachteten nächtlichen Taumengen lagen sowohl in Selhausen als auch in Rollesbroich stets unter 0.5 mm.

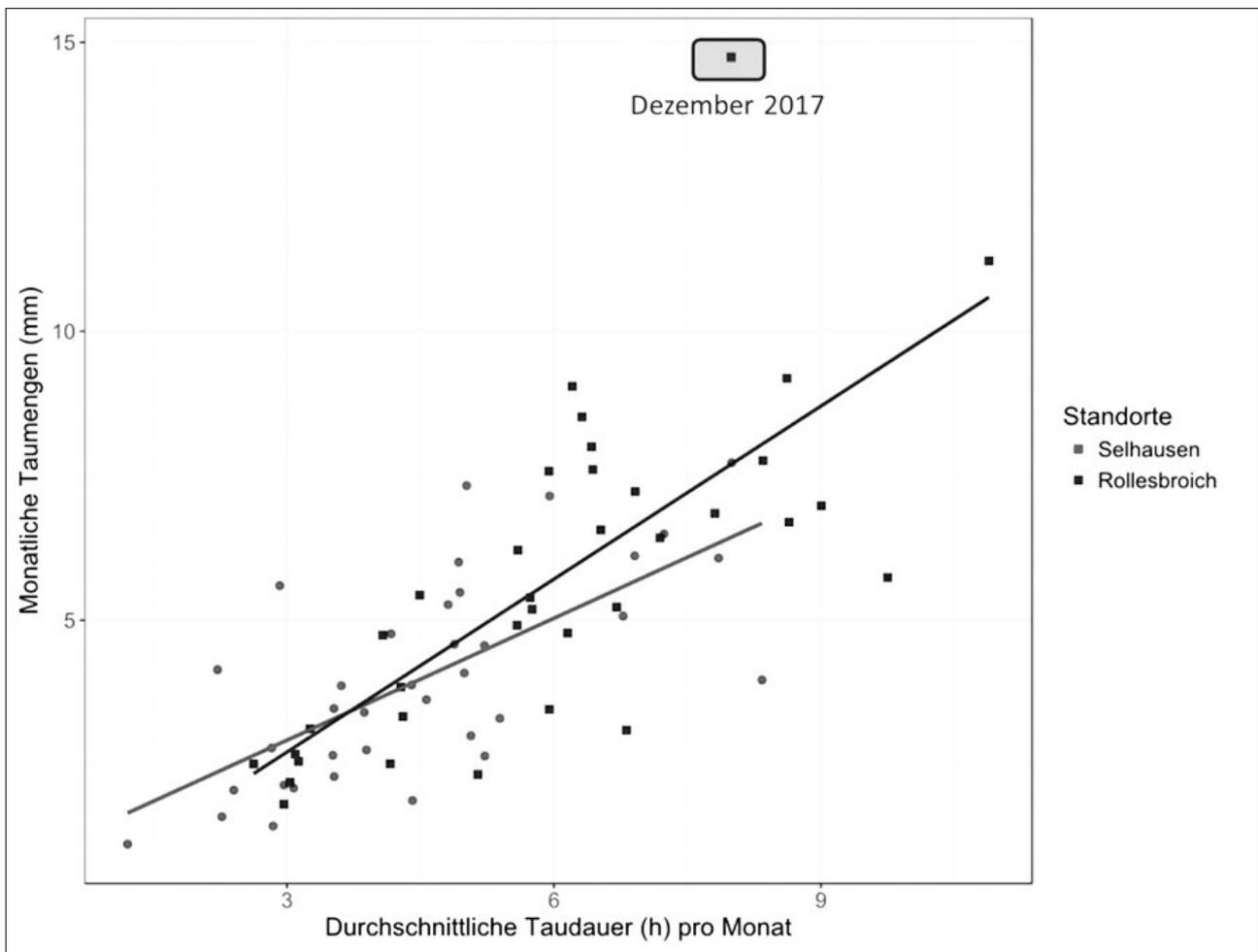


Abbildung 3: Korrelation von monatlichen Taumengen (mm) und durchschnittlicher monatlicher Taudauer (h) basierend auf Lysimeterdaten von 2015 bis 2017.

Einfluss durch Nebel

Die Auswertung der Kamerabilder hinsichtlich der Nebelbildung beschränkte sich wegen Defekten und Wartungsarbeiten an den Kameras auf die Jahre 2016 und 2017. Im Jahr 2016 wurden in Rollesbroich 39 Nebelereignisse gezählt. Davon wurden 18 mit einer Sichtweite von unter 100 m als dichter Nebel klassifiziert. In Selhausen wurden in demselben Jahr 23 Nebelereignisse gezählt, wovon 11 als dichter Nebel klassifiziert wurden. Im Jahr 2017 wurde in Rollesbroich 26 Mal Nebel beobachtet und dieser 8 Mal als dicht klassifiziert. In Selhausen wurden im selben Jahr 20 Nebelereignisse gezählt, davon sechs mit dichtem Nebel. Nebel trat an beiden Standorten ganzjährig auf und ließ keine deutliche Saisonalität erkennen.

In Selhausen lieferte die Überwachungskamera über den gesamten Zeitraum zuverlässige Daten. Es gilt folglich in jedem Fall als sicher, dass sich in Selhausen 2016 wie auch 2017 weniger Nebel bildete als in Rollesbroich.

Diskussion

Über die beobachteten Jahre 2015 bis 2017 lag der durchschnittliche Anteil der Taunächte am gesamten Jahr (Tauhäufigkeit) zwischen 43 % und 51 % in Selhausen sowie zwischen 43 % und 49 % in Rollesbroich. Die jährlichen Tauwassermengen entsprachen einem Anteil am Jahresniederschlag von 7,1 % (2015), 6,6 % (2016) und 8,0 % (2017) in Selhausen sowie 6,3 %, 6,4 % und 6,8 % in Rollesbroich. Damit zeigen die Ergebnisse der Lysimeterstudie eine hohe Übereinstimmung mit vergleichbaren, aktuellen Studien. Heusinger & Weber (2015) untersuchten die Taubildung auf begrünten Dachflächen im städtischen wie auch ländlichen Raum in Niedersachsen. Der durchschnittliche Anteil des Taus am Jahresniederschlag lag bei 4,1 % auf begrünten Dachflächen im städtischen Raum und bei 9,3 % im ländlichen Raum. Xiao et al. (2009) quantifizierten Tau ebenfalls anhand von Lysimetern auf der Station Falkenberg. Auf Grasland-Lysimetern wurden in den Jahren 2004 und 2005 Taumengen von durchschnittlich 31,8 mm und 29,9 mm beobachtet, entsprechend einem Anteil von 6,9 % (2004) und 5,7 % (2005) am gesamten Jahresniederschlag. 43-53 % der Nächte wurden pro Jahr als Taunächte klassifiziert. Auch Jacobs et al. (2006) und Groh et al. (2018) beobachteten vergleichbare durchschnittliche Anteile der Tauwassermengen am gesamten Jahresniederschlag.

Zeitliche und räumliche Variabilität von Tau

Die unterschiedlichen klimatischen Bedingungen der beiden Standorte können als Erklärungsansatz für die beobachtete Differenz der Taumenge herangezogen werden. Mit durchschnittlich 400 mm weniger Niederschlag und 3°C höheren Temperaturen im Jahr waren die Lysimeter in Selhausen wärmeren und trockeneren Klimabedingungen ausgesetzt als in Rollesbroich (vgl. *Tabelle 1*).

Neben der Abkühlung von Boden- und Pflanzenoberflächen entscheidet die Menge an verfügbarem atmosphärischem Wasserdampf darüber, ob der spezifische Taupunkt erreicht wird und wie viel Tau sich bilden kann. Die beiden Standorte liegen relativ nah beieinander und erfahren daher (ca.) die gleichen Großwetterlagen und Luftmassenbewegungen. Allerdings führt die Höhenlage von Rollesbroich (511 m

über N.N.) dazu, dass Luftmassen stärker angehoben werden, als in Selhausen (104 m über N.N.) und intensivere orographische Niederschläge in Erscheinung treten.

Im Gegensatz zur Tauwassermenge zeigte die Tauhäufigkeit keine signifikanten Unterschiede der beiden Standorte. Ausgehend von ca. gleich vielen Tauereignissen in Selhausen und Rollesbroich haben sich diese in ihrer Intensität (= Taubildungsrate in $\text{mm} \cdot \text{h}^{-1}$) und/oder Dauer unterschieden. Sowohl die durchschnittliche Dauer als auch die Bildungsrate der Tauereignisse war in Rollesbroich höher als in Selhausen. Für die Dauer der Studie (2015-2017) lag die durchschnittliche Taubildungsrate in Rollesbroich bei ca. $0.015 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ und in Selhausen bei ca. $0.011 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$. Tauereignisse dauerten in Selhausen durchschnittlich ca. 4,5 Stunden und in Rollesbroich ca. sechs Stunden.

Wenn die höhere Luftfeuchtigkeit in Rollesbroich die primäre Ursache für höhere Tauwassermengen war, ist allerdings unklar, warum der Taupunkt nicht häufiger erreicht wurde und mehr Tauereignisse beobachtet werden konnten. Ein systematischer Fehler der Referenzniederschlagsmesser könnte ursächlich dafür sein. Da die Auflösung der verwendeten Niederschlagskippswaagen auf 0,1 mm beschränkt war, könnten sehr kleine Niederschlagsmengen von unter 0,1 mm fälschlicherweise als Tau interpretiert worden sein. Dieser Fall ist jedoch als unwahrscheinlich anzunehmen, da Referenzniederschläge über die gesamte Nacht summiert wurden und alle Ergebnisse eine hohe Übereinstimmung mit vergleichbaren Studien zeigten. Vielmehr lassen die Tauhäufigkeiten in Selhausen und Rollesbroich vermuten, dass der klimatische Standortunterschied die Intensität sowie die Dauer von Tauereignissen beeinflusste, jedoch – aufgrund der zu geringen Entfernung der Standorte – nicht stark genug war, um Unterschiede in der Tauhäufigkeit zu bewirken.

Sowohl in Selhausen als auch in Rollesbroich zeigten die Tauhäufigkeiten einen abnehmenden Trend von 2015 bis 2017, der von insgesamt sieben Lysimetern abgebildet wurde. Zwei Lysimeter (RO_13 und SE_25) zeigten Abweichungen im Jahr 2015. Im Jahr 2016 bildete sich an beiden Standorten weniger Tau als im vorangegangenen Jahr, was den besagten Trend zunächst bestätigt (vgl. *Tabelle 3*). Während die Tauhäufigkeiten im Jahr 2017 weiter abfielen, stieg die Tauwassermenge jedoch an beiden Standorten wieder an.

Der gewählte Untersuchungszeitraum von drei Jahren ist nicht ausreichend lang, um Aussagen über den Einfluss möglicher Klimaveränderungen zuzulassen.

Nebel

Wenngleich die Datenverfügbarkeit der Überwachungskameras in Selhausen und Rollesbroich eingeschränkt war, konnte gezeigt werden, dass sich in Rollesbroich häufiger Nebel bildete als in Selhausen. Dies erscheint vor dem Hintergrund der bereits angesprochenen unterschiedlichen Klimabedingungen der Standorte als plausibel, da die Bildung von Nebel ähnliche Bildungskriterien voraussetzt wie Tau (hohe Luftfeuchtigkeit, Erreichen des Taupunkts).

Mehrere Studien verweisen auf den positiven Einfluss von Nebel auf die Gesamtmenge abgesetzter Niederschläge durch die Deposition von Nebeltropfen an der Pflanzen- bzw. Bodenoberfläche (Meissner et al. 2007, Price & Clark 2014). Dieser Effekt konnte sowohl in Rollesbroich als

auch in Selhausen beobachtet werden, da Nebelereignisse meist mit vergleichsweise hohen beobachteten Taumengen einhergingen. An beiden Standorten wurden erhöhte Tauwassermengen (meist über 0.1 mm) an Tagen mit Nebel beobachtet. Wenngleich keine genaue Quantifizierung des Wassereintrags durch Nebeltropfen möglich war, könnten häufigere Nebelereignisse in Rollesbroich mitverantwortlich sein für die höheren Tauwassermengen im Vergleich zu Selhausen.

Taudauer

Die Regressionsanalyse der monatlichen Tauwassermengen und der durchschnittlichen monatlichen Taudauer ließ als einzige einen deutlichen positiven Zusammenhang erkennen. Demnach spielt die Dauer von Tauereignissen eine zentrale Rolle für die Tauwassermenge. Ritter et al. (2018) nutzten Radiometer, um die Tauhäufigkeiten in den USA zu untersuchen und konnten ebenfalls einen positiven Zusammenhang zwischen Taudauer und Taumenge feststellen. Der steilere Verlauf der Regressionsgrade für Rollesbroich suggeriert höhere durchschnittliche Tauraten in Rollesbroich als in Selhausen (*Abbildung 3*). Die berechneten Tauraten bestätigten diese Annahme.

Die durchschnittlich höhere Dauer der Tauereignisse in Rollesbroich deckte sich mit den beobachteten höheren Taumengen. In den Monaten Januar 2017 und Dezember 2017 wurden in Rollesbroich die höchsten beobachteten monatlichen Taumengen dokumentiert (*Tabelle 2*). In diesen zwei Monaten lag die durchschnittliche Taudauer über 7.5 Stunden und damit deutlich über dem Durchschnitt.

Saisonalität der Taubildung

Die jährliche Verteilung der Nebelereignisse ließ keine Saisonalität erkennen und kann daher nicht als Erklärung für das saisonale Verteilungsmuster der Tauwassermengen herhalten.

Die Regressionsanalyse von Vegetationshöhen und Taubildungsraten konnte keinen deutlichen Zusammenhang abbilden. Des Weiteren war der Jahresgang der Vegetationshöhe durch mehrere Grasschnitte bestimmt und wies daher keine charakteristischen Höhen für Sommer- und Winterperioden auf (Ergebnisse hier nicht berichtet).

Es konnte gezeigt werden, dass die Tauwassermenge stark abhängig von der Dauer eines Tauereignisses ist. Die Dauer von Tauereignissen wiederum ist eine Funktion aus strahlungsbedingter Abkühlung und günstigen Witterungsbedingungen, sodass längere Nächte generell mit höheren Taumengen korrelieren (Tomaszkiewicz et al. 2015). Folglich ließe sich das charakteristische Verteilungsmuster der Taumengen als Resultat variabler Nachtlängen erklären. Während der Winterperioden führten die längeren Nächte von teils über 15 Stunden dazu, dass Tauereignisse bei günstigen Bedingungen länger dauern konnten als in Monaten mit kürzeren Nächten. Der Jahresverlauf der monatlichen Taumengen zeigte über den gesamten Untersuchungszeitraum an beiden Standorten eine hohe Übereinstimmung mit der variablen Nachtlänge.

Fazit und Aussicht

Die Ergebnisse dieser Lysimeterstudie stimmen im hohen Maße mit vergleichbaren Taustudien überein. Es wurde über den gesamten Untersuchungszeitraum von 2015 bis 2017 ein deutlicher Standortunterschied in der Tauwassermenge beobachtet. Die Differenz ließ sich vor dem Hintergrund unterschiedlicher Klima- und Höhenbedingungen der beiden Standorte anhand verschiedener meteorologischer Faktoren – z.B. der relativen Luftfeuchtigkeit – gut erklären. Sowohl in Selhausen, als auch in Rollesbroich wurde ein charakteristisches Verteilungsmuster der Taumengen beobachtet. So waren die monatlichen Taumengen während Winterperioden am höchsten und erreichten in den Sommermonaten minimale Werte. Beide Standorte ließen einen abnehmenden Trend der Tauhäufigkeiten über den Untersuchungszeitraum erkennen. Die Dauer der Studie über drei Jahre wurde jedoch als zu kurz erachtet, um Aussagen über langzeitige Klimatrends zuzulassen.

Weiterführende Studien über mögliche transpirationsmindernde Effekte von Tauwasser auf verschiedene Pflanzenarten könnten helfen die tatsächliche ökologische Relevanz von Tau besser zu bewerten. Außerdem sind weitere Untersuchungen der Pflanzeigenschaften (z.B. Vegetationshöhe und LAI) mit einer möglichst hohen zeitlichen Auflösung nötig, um deren Einfluss auf die Taubildung näher zu erfassen.

Die Lysimeterstudie ließ keine Klassifizierung der gemessenen abgesetzten Niederschläge zu, die daher als Tau verallgemeinert wurden. Somit gilt es zu berücksichtigen, dass alle gemessenen Taumengen (zumindest anteilig) auch das Resultat von Nebel und direkter Wasserdampfadsorption darstellen können. Diese Einschränkung erscheint akzeptabel, da Lysimeter grundsätzlich nur abgesetzte Niederschläge messen. Umverteilungen von Wasser innerhalb des Systems – wie etwa Guttation oder „dewrise“ – wurden nicht abgebildet, sodass die Ergebnisse der Lysimeterstudie wichtige Informationen über den atmosphärischen Wasser-eintrag durch abgesetzte Niederschläge liefern konnten.

Danksagungen

Wir bedanken uns für die Förderung von TERENO und SOILCan bei der Helmholtz-Gemeinschaft (HGF) und dem Bundesministerium für Bildung und Forschung.

Literatur

- Abi Saab O.J.G., Griesang F., Alves K.A., Higashibara L.R., Genta W. (2017) Pesticides deposition in vineyards on different conditions of leaf wetness. *Engenharia Agricola* 37, 286-291.
- Agam N., Berliner P.R. (2006) Dew formation and water vapor adsorption in semi-arid environments – a review. *Journal of Arid Environments*, 65 (4), 572-590. doi: 10.1016/j.jaridenv.2005.09.004.
- Allen R.G., Pruitt W.O., Wright J.L., Howell T.A., Ventura F., Snyder R., Itenfisu D., Steduto P., Berengena J., Yrisarry J.B., Smith M., Pereira L.S., Raes D., Perrier A., Alves I., Walter I., Elliott R. (2006) A recommendation on standardized surface resistance for hourly calculation of reference ETo by the FAO56 Penman-Monteith method. *Agric. Water Manage.* 81 (1–2), 1–22. <http://dx.doi.org/10.1016/j.agwat.2005.03.007>.

- Ben-Asher J., Alpert P., Ben-Zvi A. (2010) Dew is a major factor affecting vegetation water use efficiency rather than a source of water in the eastern Mediterranean area. *Water Resources Research*, 46 (10). doi: 10.1029/2008wr007484.
- Beysens D. (1996) The formation of dew. *Atmospheric Research*, 39 (1), 215-238.
- Bivand R., Lewin-Koch N. (2018) Maptools: Tools for Reading and Handling Spatial Objects. R package version 0.9-4. <https://CRAN.R-project.org/package=maptools>, 2018-11-06.
- Duvdevani S. (1947) An optical method of dew estimation. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 73 (317-318), 282-296.
- Gerlein-Safdi C., Gauthier P.P.G., Caylor K.K. (2018) Dew-induced transpiration suppression impacts the water and isotope balances of *Colocasia* leaves. *bioRxiv*, 1-24. doi: 10.1101/178293.
- Groh J., Slawitsch V., Herndl M., Graf A., Vereecken H., Pütz T. (2018) Determining dew and hoar frost formation for a low mountain range and alpine grassland site by weighable lysimeter. *Journal of Hydrology*, 563, 372-381.
- Hanisch S., Lohrey C., Buerkert A. (2015) Dewfall and its ecological significance in semi-arid coastal south-western Madagascar. *Journal of Arid Environments*, 121, 24-31. doi: 10.1016/j.jaridenv.2015.05.007.
- Holz A. (2018) Hürtgenwaldwetter. <https://www.huertgenwaldwetter.de>, 2018-11-09.
- Jacobs A.F.G., Heusinkveld B.G., Wichink Kruit R.J., Berkowicz S.M. (2006) Contribution of dew to the water budget of a grassland area in the Netherlands. *Water Resources Research*, 42 (3). doi: 10.1029/2005WR004055.
- Kidron G.J. (1999) Altitude dependent dew and fog in the Negev Desert, Israel. *Agricultural and Forest Meteorology*, 96 (1), 1-8. doi: 10.1016/S0168-1923(99)00043-X.
- Klose B. (2016) *Meteorologie: eine interdisziplinäre Einführung in die Physik der Atmosphäre*. Springer, Luxemburg.
- Küpper W., Groh L., Fürst L., Meulendick P., Vereecken H., Pütz T. (2017) TERENO-SOILCan - Management eines deutschlandweiten Lysimeternetzwerkes. 17. Gumpensteiner Lysimetertagung, Lehr- und Forschungszentrum für Landwirtschaft Raumberg-Gumpenstein, 175-180.
- Larsson S. (1981) Influence of intercepted water on transpiration and evaporation of *Salix*. *Agricultural Meteorology*, 23, 331-338. doi: 10.1016/0002-1571(81)90118-7.
- Lauer W., Bendix J. (2006) *Klimatologie*. 2. Auflage Bildungshaus Schulbuchverlag, Braunschweig, ISBN 978-3-14-160284-5.
- Meissner R., Seeger J., Rupp H., Seyfarth M., Borg H. (2007) Measurement of dew, fog, and rime with a high-precision gravitation lysimeter. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 170 (3), 335-344. doi: 10.1002/jpln.200625002.
- Monteith J.L., Unsworth M.H. (2013) Chapter 13 - Steady-State Heat Balance: (i) Water Surfaces, Soil, and Vegetation. *Principles of Environmental Physics*, 217-247. Academic Press, Boston.
- Nolz R., Cepuder P., Kammerer G. (2014) Determining soil water-balance components using an irrigated grass lysimeter in NE Austria. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 177 (2), 237-244.
- Pavlic M., Rigoll G., Ilic S. (2013) Classification of images in fog and fog-free scenes for use in vehicles. *Intelligent Vehicles Symposium (IV)*, 2013 IEEE.
- Pedro M.J., Gillespie T.J. (1981) Estimating dew duration. I. Utilizing micrometeorological data. *Agricultural Meteorology*, 25, 283-296. doi: 10.1016/0002-1571(81)90081-9.
- Peters A., Nehls T., Schonsky H., Wessolek G. (2014) Separating precipitation and evapotranspiration from noise – a new filter routine for high-resolution lysimeter data. *Hydrology and Earth System Sciences*, 18 (3), 1189-1198.
- Price J., Clark R. (2014) On the measurement of dewfall and fog-droplet deposition. *Boundary-Layer Meteorology*, 152 (3), 367-393.
- Pütz T. (2013) TERENO-SOILCan - Ein Lysimeternetzwerk zur Untersuchung des Klimawandels. 15. Gumpensteiner Lysimetertagung, Lehr- und Forschungszentrum für Landwirtschaft Raumberg-Gumpenstein, 57-62.
- Pütz T., Kiese R., Wollschläger U., Groh J., Rupp H., Zacharias S., Priesack E., Gerke H.H., Gasche R., Bens O., Borg E., Baessler C., Kaiser K., Herbrich M., Munch J.C., Sommer M., Vogel J.H., Vanderborght J., Vereecken H. (2016) TERENO-SOILCan: a lysimeter-network in Germany observing soil processes and plant diversity influenced by climate change. *Environmental Earth Sciences*, 75 (18), 1241-1244. doi: 10.1007/s12665-016-6031-5.
- Pütz T., Kiese R., Zacharias S., Bogena H., Priesack E., Wollschläger U., Schwank M., Papen H., Unold G., Vereecken H. (2011) TERENO-SOILCan – Ein Lysimeter Netzwerk in Deutschland. 14. Gumpensteiner Lysimetertagung, Lehr- und Forschungszentrum für Landwirtschaft Raumberg-Gumpenstein, 5-9.
- Ritter F., Berkelhammer M., Beysens D. (2018) Dew frequency across the US from a network of in situ radiometers. *Hydrology and Earth System Sciences Discussions*, 2018, 1-35. doi: 10.5194/hess-2018-450.
- RStudio Team (2015) RStudio: Integrated Development for R. <http://www.rstudio.com/>, 2018-11-09.
- Scherm H., Van Bruggen A. (1993) Sensitivity of simulated dew duration to meteorological variations in different climatic regions of California. *Agricultural and Forest Meteorology*, 66 (3-4), 229-245.
- Schrader F., Durner W., Fank J., Gebler S., Pütz T., Hannes M., Wollschläger U. (2013) Estimating Precipitation and Actual Evapotranspiration from Precision Lysimeter Measurements. *Procedia Environmental Sciences*, 19, 543-552. doi: 10.1016/j.proenv.2013.06.06.
- Tomaszkiewicz M., Abou Najm M., Beysens D., Alameddine I., Bou Zeid E., El Fadel M. (2016) Projected climate change impacts upon dew yield in the Mediterranean basin. *Science of the Total Environment*, 566-567, 1339-1348. doi: 10.1016/j.scitotenv.2016.05.195.
- Tomaszkiewicz M., Abou Najm M., Beysens D., Alameddine I., El-Fadel M. (2015) Dew as a sustainable non-conventional water resource: a critical review. *Environmental Reviews*, 23 (4), 425-442.
- Xiao H., Meissner R., Seeger J., Rupp H., Borg H. (2009) Effect of vegetation type and growth stage on dewfall, determined with high precision weighing lysimeters at a site in northern Germany. *Journal of Hydrology*, 377 (1-2), 43-49. doi: 10.1016/j.jhydrol.2009.08.006.
- Xu Y.Y., Yan B.X., Tang J. (2015) The Effect of Climate Change on Variations in Dew Amount in a Paddy Ecosystem of the Sanjiang Plain, China. *Advances in Meteorology*. doi: 10.1155/2015/793107.

