

Die Wirkungen von Austrocknung und Wiederbefeuchtung auf die Stickstoffauswaschung

Holger Rupp^{1*} und Ralph Meißner¹

Zusammenfassung

Infolge des globalen Klimawandels treten auch in Deutschland vermehrt Starkregenereignisse und Trockenperioden mit Folgewirkungen auf den Wasser- und Stoffhaushalt von Böden auf. Die Effekte des Klimawandels wurden anhand von 20 nicht wägbaren manuell befüllten Lysimetern der UFZ-Lysimeteranlage Falkenberg, die seit 1991 integriert bzw. ökologisch bewirtschaftet werden, untersucht. Basierend auf einem 29-jährigen Datensatz (Niederschlag, Evaporation und Sickerwassermenge und -qualität) wurden die Lysimeterjahre 1995/96 und 2018/19 als extrem trocken identifiziert. Unter den klimatischen Bedingungen in Nordostdeutschland kam die Sickerwasserbildung in Trockenjahren zum Erliegen. Die erneute Abflussbildung war mit außerordentlich hohen Nitratkonzentrationen verbunden, die die geltenden Trinkwassergrenzwerte um ein Vielfaches überstiegen, woraus ein erhebliches Risiko für die Grundwasserqualität resultieren kann.

Schlagwörter: Klimawandel, Lysimeter, Trockenjahre, klimatische Wasserbilanz, Nitrat

Summary

As a result of global climate change, heavy rainfall events and dry periods are increasingly occurring in Germany, with consequences for the water and solute balance of soils to be expected. The effects of climate change were investigated using 20 non-weighable manually filled lysimeters of the UFZ lysimeter facility Falkenberg, which have been managed since 1991 according to the principles of integrated and organic farming. Based on a 29-year dataset (precipitation, evaporation, leachate, nitrate concentrations), the lysimeter years 1995/96 and 2018/19 were identified as extremely dry years. Under the climatic conditions in northeastern Germany, seepage fluxes came to a standstill in these dry years. The reoccurrence of seepage was associated with exceptionally high nitrate concentrations, which exceeded the current drinking water limits by many times, which may result in a significant risk to groundwater quality.

Keywords: climate change, lysimeter, dry years, climatic water balance, nitrate

Einleitung

Die Auswirkungen des globalen Klimawandels wurden in der jüngsten Vergangenheit immer deutlicher. So führte der beobachtete Anstieg der Niederschlagsvariabilität nach Schwinning et al. (2005) zu einer Zunahme der Häufigkeit von extremen Niederschlags- und Dürreereignissen. Auch Deutschland gehört zu den Ländern, die in jüngster Vergangenheit stark von extremen Witterungsereignissen betroffen waren. In den Jahren 2002 und 2013 verursachten ergiebige Niederschlagsereignisse im Einzugsgebiet der Elbe erheblich Hochwasserschäden. Die Jahre 2003, 2018 und 2019 waren dagegen

¹ Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung GmbH - UFZ, Department Bodensystemforschung, Dorfstraße 55, D-39615 Altmärkische Wische

* Ansprechpartner: Dr. Holger Rupp, email: holger.rupp@ufz.de

von außerordentlich hohen Temperaturen und Niederschlagsarmut geprägt. Wie bereits vom IPCC (2013) prognostiziert, führte eine erhöhte Verdunstung in Kombination mit geringeren Sommerniederschlägen zu niedrigeren Grundwasserspiegeln. Nach Porporato et al. (2004) und Senevirante et al. (2012) beeinflussen extreme Witterungsereignisse den Bodenwasserhaushalt und die sickerwassergebundenen Stoffflüsse im Boden. Detaillierte Kenntnisse des Wasser- und Stoffhaushalts von Böden unter sich ändernden klimatischen Bedingungen werden nach Rippel (2002) als Entscheidungsgrundlage für zentrale Fragen einer möglichst nachhaltigen Landwirtschaft dringend benötigt. Die Quantifizierung der zu erwartenden Effekte des globalen Klimawandels auf den Bodenwasser- und Stoffhaushalt ist daher für die Beurteilung der Resilienz landwirtschaftlich genutzter Böden gegenüber extremen Witterungsereignissen von besonderer Bedeutung.

Wasser- und Stoffflüsse in Böden können mit Hilfe von Lysimetern bei definierten Randbedingungen untersucht werden (Gee et al. 2009 und Meissner et al. 2010). Für Untersuchungen zu den von klimatischen Veränderungen verursachten Effekten werden möglichst langjährige Messreihen bei vergleichbaren Randbedingungen benötigt. Die Lysimeteranlage des Helmholtz-Zentrums für Umweltforschung - UFZ in Falkenberg (Nordostdeutschland) bietet hierfür günstige Voraussetzungen, da dort seit 1991 Versuchsvarianten geprüft werden, die sowohl konventionell nach den Prinzipien des integrierten Landbaus als auch ökologisch bewirtschaftet werden.

Eine 30-jährige Reihe von Daten der UFZ-Lysimeteranlage Falkenberg wurde ausgewertet, um (i) Versuchsjahre mit extrem trockener Witterung (Trockenjahre) zu identifizieren, (ii) den Einfluss von extremer Austrocknung auf die Abflussbildung zu charakterisieren und (iii) um die damit im Zusammenhang stehenden Effekte auf die gemessenen Stickstoff(N)-Konzentrationen im Sickerwasser und deren Gefährdungspotenziale bezüglich der Gewässerqualität aufzuzeigen.

Material und Methoden

Die UFZ- Lysimeterstation wurde 1981 in Falkenberg (52.85920 N; 11.81230 O) errichtet. Folgende Klimaparameter wurden vom Deutschen Wetterdienst für diesen Standort der Grundlage der Zeitreihe 1981 - 2010 bestimmt. Die langjährige mittlere Lufttemperatur und der langjährige mittlere Jahresniederschlag betragen 9,2 °C bzw. 562 mm.

Für den Standort Falkenberg liegen für den gesamten Untersuchungszeitraum Messwerte des Niederschlags auf Erdbodenniveau vor (Standardniederschlagsmesser). Darüber hinaus wird vor Ort in den Monaten April bis Oktober die Evaporation mit Hilfe eines Standardverdunstungskessels (Durchmesser 1,95 m, Wassertiefe 0,55 cm) gemessen. Zur Errechnung von Jahreswerten der Evaporation wurde ein pauschalisierter Zuschlag von 61 mm für die Evaporation in den Monaten ohne direkte Messung (November, Dezember, Januar, Februar und März) berücksichtigt (DWD, 2015).

Die in Falkenberg verwendeten Lysimeter haben eine quadratische Oberfläche (1 m²) und eine Gesamttiefe von 1,25 m. Alle Gefäße sind nicht wägbare und wurden mit einer 25 cm mächtigen Filterschicht (Sand über Kies über Schotter) versehen. In der tiefsten Filterschicht (Schotter) wurde zur Sickerwassersammlung ein Drainagerohr verlegt, das mit dem Lysimeterkeller verbunden ist. Detaillierte Informationen zum Aufbau der Lysimeter sind Meissner et al. (2010) und Bednorz et al. (2016) zu entnehmen.

Die Lysimetergefäße wurden 1981 manuell mit gestörtem Bodenmaterial gefüllt, das zuvor am Gewinnungsstandort in zwei Schichten getrennt nach Oberboden (0–30 cm) und Unterboden (31–100 cm) von einem landwirtschaftlichen Schlag bei Bretsch (52.84291 N; 11.63165 O) entnommen wurde. Der Boden wurde anschließend zur Lysimeterstation Falkenberg transportiert und dort lagenweise bei manueller Verdichtung wieder eingebaut. Wesentliche bodenphysikalische und bodenchemische Kennwerte des Lysimeterbodens sind *Tabelle 1* zu entnehmen.

Bodentextur Schicht	Sandiger Lehm (SL)	
	Oberboden	Unterboden
Sand (%)	73,6	75,2
Schluff (%)	14,3	17,4
Ton (%)	12,1	7,4
ζd (g cm ⁻³)	1,48	1,84
KS (cm d ⁻¹)	21	43
pH _{KCl} ²⁾	4,8	5,6
TOC (%)	1,13	0,17

Tabelle 1: Wesentliche bodenphysikalische-chemische Kennwerte der Lysimeterböden.

Landbewirtschaftung	Versuchsdesign	Lysimeter Anzahl	Bodenart	Fruchtfolge	Mineralische N-Düngung (kg ha ⁻¹)	Organische N-Düngung (kg ha ⁻¹)
Ackernutzung Landbau (ÖB)	Ökologischer	10	LS	W. Weizen & Zwfr.	0	80 ¹⁾
				Erbsen & Zwfr.	0	-
				W. Weizen & Zwfr.	0	80 ¹⁾
				Hafer & Untersaat	0	-
				Kleegrass	0	-
				Kartoffeln	0	300 ²⁾
				Ackernutzung Landbau (IL)	Integrierter	10
Kartoffeln	120	300 ²⁾				
W. Gerste & Zwfr.	145	-				
Mais	180	-				
Zuckerrüben	120	250 ²⁾				

Tabelle 2: Versuchsvarianten und Bewirtschaftung der Lysimeter (W. - Winter).

¹⁾ 2 x Jauche 40 kg N ha⁻¹, ²⁾ Stalldung in dt/ha

Im Jahr 1991 wurden auf den Lysimetern jeweils eine konventionell nach den Prinzipien des integrierten Landbaus (IL) gemanagte Versuchsvariante und eine weitere ökologisch bewirtschaftete Variante (ÖB) etabliert (Tabelle 2).

Die anfallende Sickerwassermenge wurde monatlich durch Wägung der Sickerwasserauffangbehälter bestimmt. Das Sickerwasser wurde monatlich aliquot beprobt und anschließend im Labor der Lysimeterstation Falkenberg analysiert.

Die Nährstoffe Nitrit, Nitrat (NO₃-N) und Ammonium (NH₄-N) wurden nach deutschen Industriestandards (DIN 38405-38406) unter Verwendung photometrischer Techniken (Libra S11, Biochrom, Holliston, USA) analysiert.

Anhand der Sickerwasseranalysen und der gemessenen Sickerwassermengen wurden gewichtete Mittelwerte der N-Konzentrationen errechnet. Die weitere Interpretation erfolgte auf dieser Grundlage.

Box-Whisker-Plots wurden mit dem Softwarepaket OrginPro berechnet. Anhand der vorliegenden Datenreihen von Niederschlag, Evaporation und der daraus resultierenden klimatischen Wasserbilanz (kWB) wurden Ausreißer (Versuchsjahre, die entscheidend vom Trend der Datenreihe abweichen) identifiziert. Versuchsjahre wurden dementsprechend als extrem trocken angesehen, wenn die kWB den Interquartilbereich (IQR) unterschritt.

Ergebnisse und Diskussion

Abbildung 1 gibt die in den Jahren 1991 bis 2020 für den Standort Falkenberg berechnete kWB wider. Die Berechnung der kWB stellt neben anderen Indizes nach Döring et al. (2011) ein geeignetes Verfahren zur Quantifizierung von Jahren mit extremer Trockenheit dar. Die Lysimeterjahre 1993/94, 2007/08 und 2017/18 waren bei Jahresniederschlägen von 927,3 mm, 993,6 mm und 753,3 mm durch einen deutlichen Bilanzüberschuss gekennzeichnet. Dagegen wies die kWB in 18 von 29 betrachteten Lysimeterjahren ein Defizit auf. Im Box-Plot der kWB wurden die Versuchsjahre 1995/96 und 2018/19 als Trockenjahre identifiziert, da bei ihnen die kWB den Wert von -250,7 mm (1 IQR) unterschritt (Abbildung 2).

In den Trockenjahren 1995/96 und 2018/19 kam die Abflussbildung in den Lysimetern der Bewirtschaftungsvarianten IL und ÖB trotz der zur Ertrags- bzw. Bestandssicherung verabreichten Zusatzwasserversorgung (1995/96: IL 123 mm und ÖB 45mm; 2018/19: IL 75 mm und ÖB 87 mm) weitgehend zum Erliegen (Abbildung 3). Auch im Folgejahr 1996/97 trat kaum eine Abflussbildung auf, da die kWB ein Defizit aufwies, das durch die Niederschläge (und durch die Zusatzwassergaben) nicht ausgeglichen werden konnte.

Infolge der eingetretenen Austrocknung des Bodenprofils und des Fehlens von freiem Bodenwasser fanden in den Trockenjahren keine sickerwassergebundenen Stofftransportprozesse statt. Es ist daher davon auszugehen, dass vorhandene Nährstoffüberhänge infolge der Bewirtschaftungsmaßnahmen zunächst im Bodenspeicher verblieben und erst nach einsetzender Wiederbefeuchtung mobilisiert werden konnten. Aus eigenen Untersuchungen mit konservativen Tracern (Cl, Br, ^{15}N oder Deuterium), ergibt sich bei einer mittleren jährlichen Sickerwasserbildung von 100 mm eine Verlagerungstiefe von ca. 50 cm (Aust et al. 2009). Eine Nähr- oder Schadstofffront benötigt damit ca. 2 Jahre für das Durchfließen des Lysimeterbodens mit 1 m Mächtigkeit (bei Piston-Flow). Zahlreiche Autoren weisen auf die große Bedeutung präferenziellen Fließprozessen für den raschen Stofftransport in den Böden hin (Zhang et al. 2016). Daher waren anhand der Nährstoffkonzentrationen des Sickerwassers messbare Folgewirkungen einer Nährstoffakkumulation im Bodenprofil des Lysimeters infolge einer Austrocknung erst im Folgejahr oder mit einer zeitlichen Verzögerung von 2 Jahren zu erwarten.

Ein Box-Plot der mittleren N-Konzentrationen (Abbildung 4) weist mit 111,6 mg/l deutlich erhöhte mittlere N-Konzentrationen (Ausreißer) bei der Versuchsvariante IL im Versuchsjahr 2019/20 aus. Diese erhöhten N-Konzentrationen traten als unmittel-

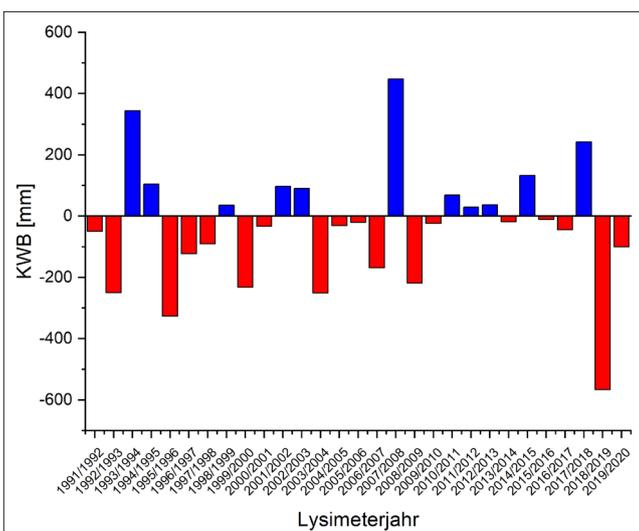


Abbildung 1: Klimatische Wasserbilanz (KWB) in den Lysimeterjahren 1991/92 – 2019/20.

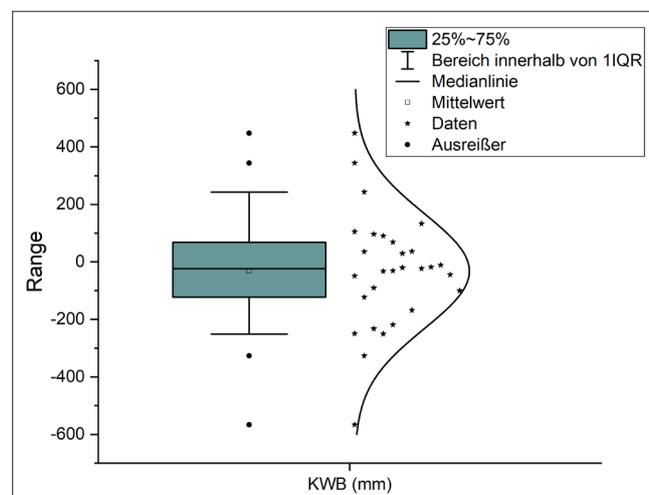


Abbildung 2: Box-Plot der kWB für den Zeitraum 1991 -2020.

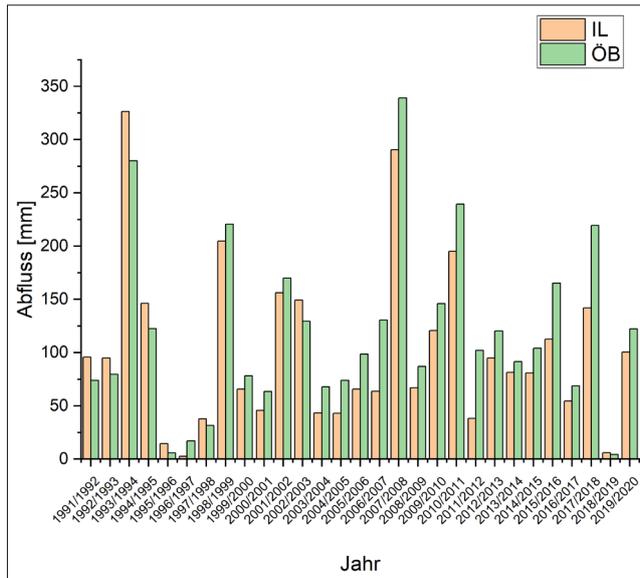


Abbildung 3: Mittlere Raten der jährlichen Sickerwasserbildung der Bewirtschaftungsvarianten IL und ÖB im Zeitraum 1991 -2020.

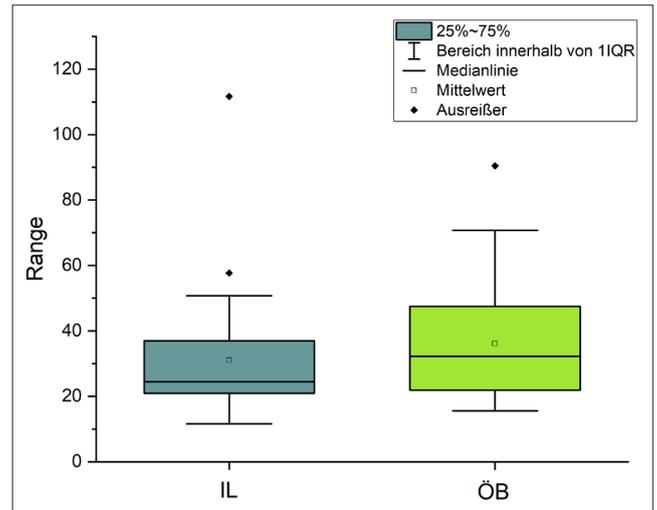


Abbildung 4: Box-Plot der mittleren jährlichen N-Konzentration 1991 – 2020.

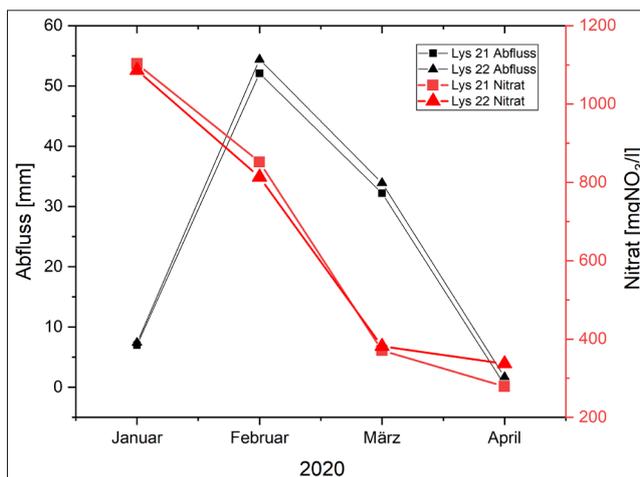


Abbildung 5: Nitratkonzentration und Abfluss der Lysimeter 21 und 22 (IL) im Zeitraum Januar – April 2020.

bare Folge des Trockenjahres 2018/19 mit einer negativen kWB von 566,6 mm auf. Im Lysimeterjahr 2012/13 wurde mit 57,7 mg/l die zweithöchste mittlere N-Konzentration gemessen. Hier trat eine intensive Stickstoffverlagerung aufgrund von vergleichsweise hohen Niederschlägen im Lysimeterjahr 2010/11 (705 mm) auf. Bei ÖB war unmittelbar nach der Versuchsumstellung im Lysimeterjahr 1991/92 mit 86,6 mg/l die höchste N-Konzentration zu verzeichnen, die den IQR überschritt und damit als Ausreißer zu charakterisieren war. Insgesamt fällt aber das deutlich höhere Niveau der mittleren N-Konzentrationen bei ÖB im Vergleich zu IB auf. Mit hoher Wahrscheinlichkeit war aufgrund der geringeren Nährstoffversorgung bei ÖB der Nährstoffentzug durch die angebauten Kulturpflanzen reduziert. Daraus resultierten Stickstoffüberhänge, die bei schlechten (lückigen) Pflanzenbeständen zur Auswaschung gelangten. Insgesamt war das Niveau der mittleren N-Konzentrationen in beiden Bewirtschaftungsvarianten vergleichsweise hoch. Der Trinkwassergrenzwert für Nitrat von 50 mg NO₃ pro Liter (11,3 mgN/l) wurde häufig überschritten.

In *Abbildung 5* sind exemplarisch die nach dem Wiedereinsetzen der Abflussbildung im Sickerwasser von Lysimeter 21 und 22 ab Januar bis April 2020 gemessenen Nitratkonzentrationen dargestellt. Besonders auffällig waren im Januar 2020 mit > 1000

mg/l sehr hohe Nitratkonzentrationen. Das Maximum wurde mit den ersten Abflüssen erreicht. In den Folgemonaten wiesen die Konzentrationen einen rückläufigen Trend auf. Die höchste Abflussbildung war im Februar 2020 zu verzeichnen. Zwischen den Maxima der Nitratkonzentration und des Abflusses bestand damit eine zeitliche Verschiebung von einem Monat.

Schlussfolgerungen

Für die Identifikation von extremen Trockenjahren unter den Klimabedingungen des nord-ostdeutschen Tieflands stellte die Berechnung der kWB mit anschließender statistischer Prüfung auf Ausreißer einen geeigneten Ansatz dar. Jahre mit extremer Witterung wurden dabei als Ausreißer einer 30-jährigen Reihe gekennzeichnet. In den Versuchsjahren mit extremer Witterung (Trockenheit) kam die Abflussbildung in den Lysimetern unabhängig von der Form der Landbewirtschaftung nahezu vollständig zum Erliegen. Kommt es im Anschluss an eine Trockenphase durch Wiederauffüllung des Bodenwasserspeichers zu einer erneuten Abflussbildung, so muss mit außerordentlich hohen Nitratkonzentrationen gerechnet werden. Die nach dem Trockenjahr 2018/19 gemessenen mittleren abflussgewichteten Konzentrationen überschritten den zulässigen Nitratgehalt des Trinkwassers um ein Vielfaches. Dem Grundwasser im Anschluss an Trockenjahre zufließendes Sickerwasser besitzt damit ein Gefährdungspotenzial für die Qualität dieser Ressourcen.

Literatur

Bohner A., Habeler H., Starlinger F., Suanjak M. (2010) Avalanches keep habitats open and species rich in the montane and subalpine belt. *eco.mont* Vol 2, 53-57.

Aust M.-O., Thiele-Bruhn S., Seeger J., Godlinski F., Meissner R., Leinweber P. (2009) Sulfonamides Leach from Sandy Loam Soils Under Common Agricultural Practice. *Water, Air, & Soil Pollution* 211(1-4), 143-156.

Bednorz D., Tauchnitz N., Christen O., Rupp H., Meissner R. (2016) Evaluating the transferability of measurements from simple constructed non weighable gravitation lysimeters to predict the water regime on field scale-a case study. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science* 179(6), 809-820.

Döring S., Döring J., Borg H., Böttcher F. (2011) Vergleich von Trockenheitsindizes zur Nutzung in der Landwirtschaft unter den klimatischen Bedingungen Mitteldeutschlands. *Hercynia* 44, 145-168.

Gee G.W., Newman B.D., Green S.R., Meissner R., Rupp H., Zhang Z.F., Keller J.M., Waugh W.J., van der Velde M., Salazar J. (2009) Passive wick fluxmeters: Design considerations and field applications. *Water Resources Research* 45, 1-18.

IPCC (2014) *Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Retrieved from Geneva, Switzerland.

Meissner R., Rupp H., Seeger J., Ollesch G., Gee G.W. (2010) A comparison of water flux measurements: passive wick-samplers versus drainage lysimeters. *European Journal of Soil Science* 61(4), 609-621. doi:10.1111/j.1365-2389.2010.01255.x

Porporato A., Daly E., Rodriguez-Iturbe I. (2004) Soil Water Balance and Ecosystem Response to Climate Change. *The American Naturalist* 165(5), 625-632.

Rippel R., Brandhuber R., Schwamm D. (2002) Bodenwasserhaushalt unterfränkischer Ackerstandorte 1980-2000: Soil water balance of arable locations in Lower Frankonia (Bavaria) 1980-2000. Bayerische Landesanst. für Bodenkultur und Pflanzenbau (LBP).

Schwinning S., Starr B.I., Ehleringer J.R. (2005) Summer and winter drought in a cold desert ecosystem (Colorado Plateau) part I: effects on soil water and plant water uptake. *Journal of Arid Environments* 60(4), 547-566.

Seneviratne S.I., Lehner I., Gurtz J., Teuling A.J., Lang H., Moser U., Grebner D., Menzel L., Schrott K., Vitvar T., Zappa M. (2012) Swiss prealpine Rietholzbach research catchment and lysimeter: 32 year time series and 2003 drought event. *Water Resources Research* 48.

Zhang Y., Zhang M., Niu J., Zheng H. (2016) The preferential flow of soil: A widespread phenomenon in pedological perspectives. *Eurasian Soil Science* 49(6), 661-672.

