

# Die Ökohydrologie eines trockenheitsanfälligen Graslandökosystems

R. T. Hirl

Technische Universität München, Lehrstuhl für Grünlandlehre, 85354 Freising  
[regina.hirl@tum.de](mailto:regina.hirl@tum.de)

## Einleitung und Problemstellung

Die vorliegende Studie befasst sich mit der Ökohydrologie eines beweideten Graslandökosystems und nutzt dafür das stabile Sauerstoffisotop  $^{18}\text{O}$  in verschiedenen Wasserkompartimenten des Systems: im Bodenwasser zweier Tiefen, im Stängelwasser und Blattwasser (Hirl *et al.*, 2019). Die Sauerstoffisotopensignatur der verschiedenen Wasserkompartimente wird gemäß internationaler Konvention als  $\delta^{18}\text{O}$ -Signatur dargestellt.

Entlang des Weges vom Niederschlag über das Boden- und Xylem- bzw. Stängelwasser bis hin zum Blattwasser wird die  $\delta^{18}\text{O}$ -Signatur durch Mischungs- und  $^{18}\text{O}$ -Isotopenfraktionierungsprozesse modifiziert. Sofern die Fraktionierungsprozesse hinreichend bekannt sind, kann die  $\delta^{18}\text{O}$ -Signatur eines gegebenen Wasserpools Aufschluss über relevante hydrologische Prozesse und deren Beeinflussung geben. Zunächst kann der Vergleich von  $\delta^{18}\text{O}$  im Bodenwasser und im pflanzlichen Xylemwasser Rückschlüsse auf die Wasseraufnahmetiefe der Pflanzen ermöglichen. Die  $\delta^{18}\text{O}$ -Signatur des Blattwassers ist schließlich eine Funktion des  $\delta^{18}\text{O}$  des aufgenommenen Wassers, der Witterungsbedingungen, sowie der morpho-physiologischen Eigenschaften der Pflanze, und sie bestimmt wesentlich das  $\delta^{18}\text{O}$ -Signal in biologischen Archiven wie Heu, Milch oder Rinderhaaren. Die Blattwasseranreicherung ( $\Delta^{18}\text{O}_{\text{Blattwasser}} = \delta^{18}\text{O}_{\text{Blattwasser}} - \delta^{18}\text{O}_{\text{Stängelwasser}}$ ) wird wesentlich von der relativen Luftfeuchte und von dessen Isotopensignatur bestimmt (z. B. Farquhar *et al.*, 2007). Inwieweit Bodentrockenheit die Reaktion von  $\Delta^{18}\text{O}_{\text{Blatt}}$  auf die Luftfeuchte modifiziert ist bisher nicht bekannt.

In terrestrischen Ökosystemen übt die Vegetation durch Wasseraufnahme und -abgabe einen Einfluss auf die hydrologischen Prozesse aus, und zugleich werden physiologische Prozesse unmittelbar von der Verfügbarkeit von Wasser bestimmt. Einblicke in solche Interaktionen können durch die Anwendung prozessbasierter Ökosystemmodelle gewonnen werden.

In der vorliegenden Arbeit wurden die  $\delta^{18}\text{O}$ -Signaturen von Boden-, Stängel- und Blattwasser im Grasland mit Hilfe des mechanistischen,  $^{18}\text{O}$ -befähigten Ökosystemmodells MuSICA nachgebildet. Die Proben stammen von einer trockenheitsgefährdeten Kurzrasenweide und wurden in den Vegetationsperioden der Jahre 2006 bis 2012 genommen.

Es wurden folgende Fragen untersucht: (1) Führt Bodentrockenheit zu einer Verschiebung der Wasseraufnahmetiefe der Graslandvegetation? (2) Beeinflusst Bodentrockenheit die  $^{18}\text{O}$ -Anreicherung des Blattwassers? (3) Welchen Effekt haben morpho-physiologische Eigenschaften der Pflanze auf das  $\delta^{18}\text{O}$ -Signal im Blatt-, Stängel- und Bodenwasser?

## Material und Methoden

Die Probenahme erfolgte auf intensiv beweidetem *Lolio-Cynosuretum* Grasland der Versuchsstation Grünschwaige (nahe Freising, Deutschland; Schnyder *et al.*, 2006) während der Vegetationsperioden der Jahre 2006 bis 2012. Es wurden Bodenproben in zwei Tiefen (7 und 20 cm), Stängel- und Blattproben sowie Luftfeuchteproben genommen. Die Blattproben waren Mischproben der co-dominanten Arten *Lolium perenne*, *Poa pratensis*, *Dactylis glomera-*

ta, *Phleum pratense*, *Taraxacum officinale* und *Trifolium repens*. Zusätzlich wurde Regenwasser gesammelt. Die  $\delta^{18}\text{O}$ -Signatur der Wasserkompartimente wurde mittels Cavity Ring-Down Spectroscopy bestimmt (Picarro Inc., Sunnyvale, Ca, USA).

Das mechanistische Boden-Pflanze-Atmosphäre Modell MuSICA (Ogée *et al.*, 2003, 2009) wurde mit Wetterdaten und den  $\delta^{18}\text{O}$ -Messwerten des Niederschlags und der Luftfeuchte angetrieben und auf der Grundlage lokaler Messungen an Boden und Vegetation parametrisiert. Fehlende Parameterwerte wurden mit Literaturwerten aus vergleichbaren Systemen ergänzt. Die Modellprognosen wurden mit Hilfe von Eddy-Flux-Daten evaluiert. Darüber hinaus wurde geprüft, wie sensitiv das  $\delta^{18}\text{O}$  der einzelnen Wasserkompartimente auf die Änderung morphologischer oder physiologischer Parametern im Modell reagierte (photosynthetische Kapazität; Blattflächenindex; Reaktivität der stomatären Leitfähigkeit sowie Basisleitfähigkeit (Miner *et al.*, 2017)). In dieser Sensitivitätsanalyse wurde jeweils ein Inputparameter geändert, während alle anderen Parameter unverändert blieben (Hirl *et al.*, 2019).

### Ergebnisse und Diskussion

Das  $\delta^{18}\text{O}$  des Stängelwassers korrelierte eng mit dem  $\delta^{18}\text{O}$  des Bodenwassers in 7 cm, war jedoch generell angereicherter als das Bodenwasser in 20 cm (Abb. 1). Dies deutet darauf hin, dass die Wasseraufnahme hauptsächlich aus der obersten Bodenschicht (oberhalb von 20 cm) erfolgte. Auch das MuSICA-Modell prognostizierte für 90% der Probenahmetage eine mittlere (mengengewichtete) Aufnahmetiefe oberhalb von 15 cm. Weder die modellierten noch die gemessenen Daten deuteten darauf hin, dass sich die Wasseraufnahme in den tieferen Teil des Oberbodens verlagerte, wenn die oberste Bodenschicht austrocknete.

Die Beschränkung der Wasseraufnahme auf die oberste Schicht war vermutlich zum einen eine Folge des hohen Beweidungsdrucks, welcher einherging mit einem hohen Blatt- (Schleip *et al.*, 2013) und Wurzeltturnover, sowie mit einem hohen Bedarf an Assimilaten für die Regeneration oberirdischer Biomasse. Die Modellprognosen deuteten darüber hinaus darauf hin, dass an diesem trockenheitsanfälligen Standort während der Vegetationsperiode häufig nur die oberste Bodenschicht durch Regen befeuchtet wurde, während der untere Teil des Oberbodens trocken blieb (Hirl *et al.*, 2019).

Die  $^{18}\text{O}$ -Anreicherung im Blattwasser ( $\Delta^{18}\text{O}_{\text{Blattwasser}}$ ) korrelierte negativ mit der relativen Luftfeuchte. Neben der Luftfeuchte hatte auch der Bodenwassergehalt in 7 cm Tiefe einen signifikant negativen Effekt auf  $\Delta^{18}\text{O}_{\text{Blattwasser}}$ . Dieser Effekt war bei niedriger Luftfeuchte besonders ausgeprägt (Abb. 2a). Diese Zusammenhänge wurden auch durch die Modellprognosen bestätigt (Abb. 2b), ein Hinweis dafür, dass das Modell die bio- und isotopenphysikalischen Gegebenheiten am Standort wirklichkeitsgetreu darstellen konnte. Aus den Vorhersagen des Modells ließ sich außerdem folgern, dass die erhöhte Blattwasseranreicherung bei trockenem Boden durch eine trockenheitsbedingte Abnahme der stomatären Leitfähigkeit entstand, welche einherging mit einem Rückgang der Transpirationsraten (Abb. 2c).

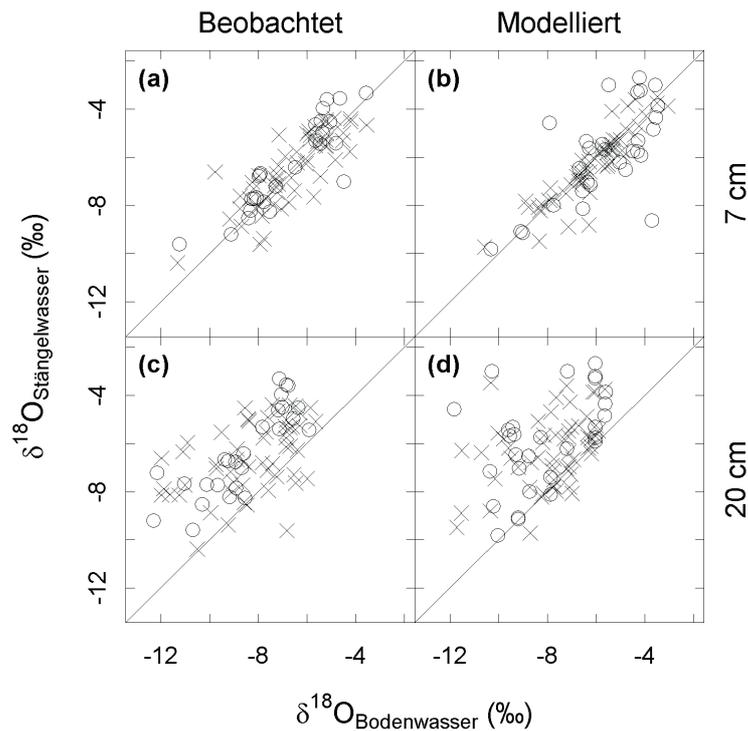


Abb. 1: Zusammenhang zwischen der  $\delta^{18}\text{O}$ -Signatur von Stängelwasser und Bodenwasser in 7 cm (beobachtet, (a) und modelliert, (b)) und in 20 cm (beobachtet, (c) und modelliert, (d)). Trockene Bodenbedingungen (Volumetrischer Wassergehalt in 7 cm Tiefe  $<0.25$ ) sind durch Kreuze angegeben, und feuchte Bedingungen (Volumetrischer Wassergehalt in 7 cm Tiefe  $\geq 0.25$ ) durch Kreise. Die Gerade repräsentiert die 1:1-Beziehung. Verändert nach Hirl *et al.* (2019).

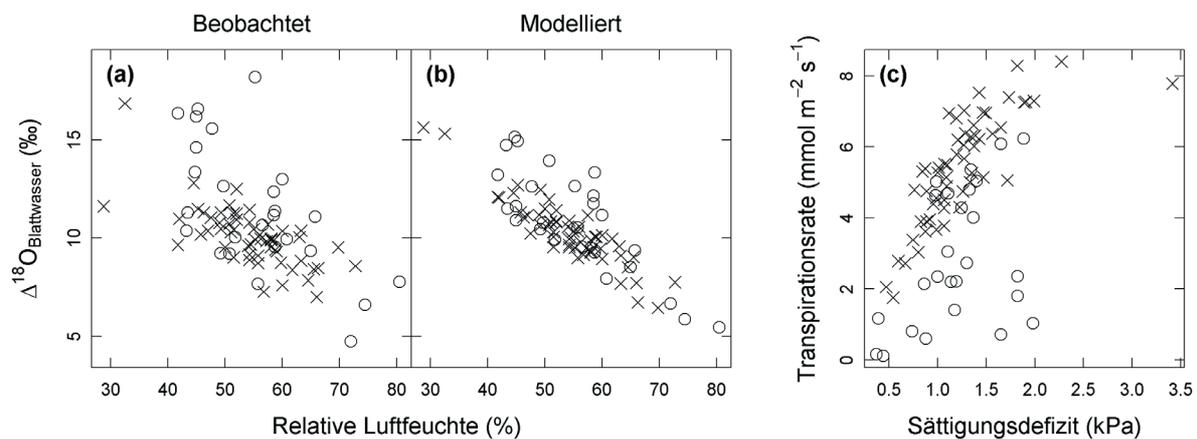


Abb. 2: Zusammenhang zwischen relativer Luftfeuchte und beobachteter (a) und modellierter (b)  $^{18}\text{O}$ -Anreicherung im Blattwasser ( $\Delta^{18}\text{O}_{\text{Blattwasser}}$ ), sowie zwischen modellierter Transpirationsrate und dem Wasserdampfsättigungsdefizit der Luft (c). Trockene Bodenbedingungen (Volumetrischer Wassergehalt in 7 cm Tiefe  $<0.25$ ) sind durch Kreuze angegeben, und feuchte Bedingungen (Volumetrischer Wassergehalt in 7 cm Tiefe  $\geq 0.25$ ) durch Kreise. Verändert nach Hirl *et al.* (2019).

In Sensitivitätsanalysen wurden weiterhin Effekte morpho-physiologischer Parameter auf die  $\delta^{18}\text{O}$ -Signatur im Blatt-, Stängel- und Bodenwasser untersucht. Eine Erhöhung bzw. Verminderung des Wertes für den stomatären Sensitivitätsparameter, die basalen stomatären Leitfä-

higkeit, den Blattflächenindex sowie für die photosynthetische Kapazität führte zu einer Verminderung bzw. Erhöhung der prognostizierten  $\delta^{18}\text{O}$ -Signaturen. Die Effekte der morpho-physiologischen Parameter beschränkten sich nicht nur auf die Blattwassersignatur, sondern waren in ähnlichem Maße auch für das  $\delta^{18}\text{O}$  des Bodenwassers in 20 cm Tiefe zu beobachten. Die Modellprognosen deuteten darauf hin, dass der Effekt dieser Parameter auf das  $\delta^{18}\text{O}$  von Bodenwasser in 20 cm durch eine Änderung der integrierten Bestandesleitfähigkeit und eine damit einhergehende Änderung der Transpirationsraten bedingt war. Dies wirkte sich auf die raum-zeitliche Entleerungs- und Befüllungsdynamik des Bodenwasserpools aus. Diese bestimmt wiederum, in welche Bodentiefen der während der Vegetationsperiode auftretende Regen vordringt und an welcher Stelle dessen  $\delta^{18}\text{O}$ -Signatur auftritt. Mit Hilfe des mechanistischen Modells konnten somit Rückschlüsse auf Wassergehalte im Boden und deren Dynamik getroffen werden.

### Schlussfolgerungen

Die Wasseraufnahme der Graslandvegetation erfolgte sowohl unter trockenen als auch unter feuchten Bodenbedingungen aus der obersten Bodenschicht. Bodentrockenheit beeinflusste dagegen die  $^{18}\text{O}$ -Anreicherung des Blattwassers, vermutlich aufgrund von trockenheitsbedingtem Stomatenschluss. Die Modellprognosen zeigten darüber hinaus, dass morpho-physiologische Eigenschaften der Pflanzen einen Effekt auf die  $\delta^{18}\text{O}$ -Signatur besonders von Blattwasser sowie von Bodenwasser unterhalb der Aufnahmetiefe ausübten.

### Literatur

- Farquhar, G.D., Cernusak, L.A., Barnes, B. (2007): Heavy water fractionation during transpiration. *Plant Physiology* 143, 11–18.
- Hirl R.T., Schnyder H., Ostler U., Schäufele R., Schleip I., Vetter S.H., Auerswald K., Baca Cabrera J.C., Wingate L., Barbour M.M., Ogée J. (2019): The  $^{18}\text{O}$  ecohydrology of a grassland ecosystem – predictions and observations. *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 23, 2581–2600, <https://doi.org/10.5194/hess-23-2581-2019>.
- Miner, G.L., Bauerle, W.L., and Baldocchi, D.D. (2017): Estimating the sensitivity of stomatal conductance to photosynthesis: a review. *Plant, Cell & Environment* 40, 1214–1238.
- Ogée, J., Brunet, Y., Loustau, D., Berbigier, P., Delzon, S. (2003): *MuSICA*, a  $\text{CO}_2$ , water and energy multilayer, multileaf pine forest model: evaluation from hourly to yearly time scales and sensitivity analysis. *Global Change Biology* 9, 697–717.
- Ogée, J., Barbour, M.M., Wingate, L., Bert, D., Bosc, A., Stievenard, M., Lambrot, C., Pierre, M., Bariac, T., Loustau, D., Dewar, R.C. (2009): A single-substrate model to interpret intra-annual stable isotope signals in tree-ring cellulose. *Plant, Cell & Environment* 32, 1071–1090.
- Schleip, I., Lattanzi, F.A., Schnyder, H. (2013): Common leaf life span of co-dominant species in a continuously grazed temperate pasture. *Basic and Applied Ecology* 14, 54–63.
- Schnyder, H., Schwertl, M., Auerswald, K., Schäufele, R. (2006): Hair of grazing cattle provides an integrated measure of the effects of site conditions and interannual weather variability on  $\delta^{13}\text{C}$  of temperate humid grassland. *Global Change Biology* 12, 1315–1329.