

Wasserbilanzparameter im Gebirgsökosystem Stoderzinken

Veronika FORSTNER¹, Matevz VREMEC², Steffen BIRK², Markus HERNDL³

Mit 4 Abbildungen und 2 Tabellen

Angenommen am 07. November 2024

Summary: Water balance parameters in the Stoderzinken mountain ecosystem – The Northern Calcareous Alps, characterized by karstic rocks and high precipitation, play a crucial role in the replenishment of groundwater resources. To quantify the water balance components in this area, data from a lysimeter station at an alpine ecosystem for the hydrological years 2009 to 2020 were used. The results showed that the annual precipitation reached up to 1966 mm and grass-reference evapotranspiration up to 538 mm. Half of the yearly seepage occurred mainly during snow melt. A low precipitation period in summer led to a stronger reduction of seepage compared to such a period in autumn.

Thus, the snow cover thickness, snowmelt-spring temperatures, and the timing of drier periods are crucial for groundwater recharge. Because of climate change, a reduction of groundwater recharge could also occur at this humid site, particularly due to lower snow cover thickness and more frequent occurrence of dry periods in summer.

Zusammenfassung: Die Nördlichen Kalkalpen sind aufgrund ihrer verkarstungsfähigen Gesteine und der hohen Niederschläge wichtig für die Neubildung von Grundwasserressourcen. Um die Wasserbilanzkomponenten in diesem Gebiet zu quantifizieren, wurden Daten einer Lysimeterstation im Gebirgsökosystem Stoderzinken (Steiermark, Österreich) aus den hydrologischen Jahren 2009 bis 2020 herangezogen. Die Ergebnisse zeigten, dass die jährlichen Niederschläge bis zu 1966 mm und die Gras-Referenzverdunstung bis zu 538 mm betragen. Die Hälfte des jährlichen Sickerwassers wurde überwiegend in Zeiten der Schneeschmelze gebildet. Eine niederschlagsarme Periode im Hochsommer zeigte verglichen mit einer solchen Periode im Herbst eine geringere Sickerwasserbildung. Demnach beeinflussen die Schneedeckenmächtigkeit, Schneeschmelze-Frühjahrstemperaturen, und die Jahreszeit, in der trockene Phasen auftreten, wesentlich die Grundwasserneubildung. Aufgrund des Klimawandels könnte es auch an diesem humiden Standort zu einer Abnahme der Grundwasserneubildung führen, vor allem aufgrund der geringeren Schneedeckenmächtigkeit und der häufiger auftretenden Trockenperioden im Sommer.

1. Einleitung

Etwa 45 % der Wasserversorgung Österreichs wird aus Quellwässern gedeckt (BMLRT 2021). Zumeist handelt es sich dabei um Karstquellen. Insbesondere die

1 Veronika FORSTNER (corresponding author), Raumberg-Gumpenstein Research & Development, Altrindning 11, A-8952 Irdning-Donnersbachtal, Österreich;
E-Mail: veronika.forstner@raumberg-gumpenstein.at

2 Matevz VREMEC und Steffen Birk, Universität Graz, Institut für Erdwissenschaften, NAWI Graz Geozentrum, Heinrichstraße 26, 8010 Graz, Österreich;
E-Mails: matevz.vremec@uni-graz.at; steffen.birk@uni-graz.at
Alma Mater Europaea University, Slovenska 17, Maribor, Slowenien;
E-Mail: matevz.vremec@almamater.si

3 Markus Herndl, Höhere Bundeslehr- und Forschungsanstalt Raumberg-Gumpenstein, Institut für Pflanzenbau und Kulturlandschaftsforschung, Raumberg 38, 8952 Irdning-Donnersbachtal, Österreich; E-Mail: markus.herndl@raumberg-gumpenstein.at

Nördlichen Kalkalpen mit ihren karbonathaltigen und verkarstungsfähigen Gesteinen (OBERHAUSER & BAUER 1980) tragen zur regionalen und überregionalen Trinkwasserversorgung bei. Daher ist die Kenntnis der Wasserbilanzgrößen und der Grundwasserneubildungsdynamik gerade in dieser alpinen Region mit hohen jährlichen Niederschlagsmengen, jedoch niedrigen durchschnittlichen jährlichen Lufttemperaturen (GEOSPHERE 2021) (Abb. 1) von großer Bedeutung. Langzeituntersuchungen über den Wasserhaushalt in Gebirgsökosystemen sind daher von ökologischer und ökonomischer Bedeutung und insbesondere wichtig, um mögliche Änderungen der Grundwasserneubildung für die regionale Trinkwasserversorgung aufzuzeigen (BOHNER et al. 2007).

Der voranschreitende Klimawandel wird zu Änderungen in der Grundwasserneubildung führen und demnach auch Auswirkungen auf die Grundwasservorräte haben (IPCC 2023). Im Alpenraum haben sich die Lufttemperaturen seit dem 19. Jahrhundert doppelt so schnell erhöht wie im globalen Durchschnitt (AUER et al. 2007). An einem montanen Grünlandstandort konnte experimentell gezeigt werden, dass erhöhte

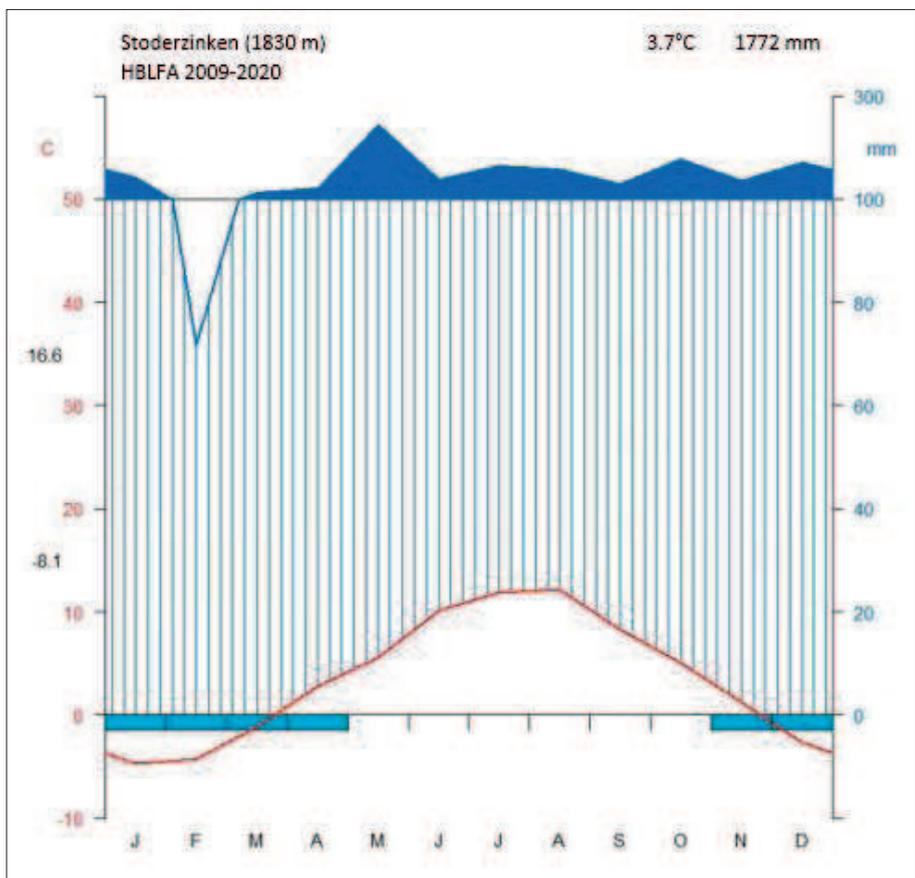


Abb. 1: Walter-Lieth-Diagramm (Durchschnittliche Niederschlagsmengen sowie mittlere Lufttemperaturen am Gebirgsstandort Stoderzinken von November 2009 bis Oktober 2020).

Fig. 1: Walter-Lieth-diagram (average precipitation amounts and average air temperatures at the Stoderzinken mountain location from November 2009 to October 2020).

Lufttemperaturen einen Einfluss auf den Bodenwasserhaushalt haben und zu erhöhter Evapotranspiration und geringerer Sickerwasserbildung führen (FORSTNER et al. 2021). Dabei zeigte sich, dass Erwärmung in Kombination mit geringeren Niederschlägen zu einer Änderung von energie-limitierten zu wasser-limitierten Bedingungen führen kann (FORSTNER et al. 2021, FORSTNER et al. 2023). Zudem könnten durch erhöhte Temperaturen und eine zunehmende Variabilität des Niederschlags die Häufigkeit von Dürreperioden in den Alpen zunehmen (FRENCK et al. 2018). Möglicherweise können auch an höher gelegenen, niederschlagsreichen Almflächen extreme Trockenperioden die Wasserverfügbarkeit vorübergehend einschränken, obwohl Wasser generell an diesen Standorten kein limitierender Faktor ist (HERNDL 2021).

Daher ist das Ziel dieser Arbeit, an einem Gebirgsstandort in einem Karstgebiet die Wasserbilanzkomponenten Niederschlag, Evapotranspiration und Sickerwasser über einen Zeitraum von 11 Jahren zu quantifizieren. Weiters werden die Auswirkungen unterschiedlicher Witterungsbedingungen auf die Bodenfeuchte und Sickerwasserbildung und damit letztlich die Grundwasserneubildung ermittelt. Eine Gebirgslsylimeterstation am Stoderzinken in den Nördlichen Kalkalpen auf 1830 m Seehöhe ermöglichen dort die Quantifizierung von Wasserhaushaltsgrößen (Niederschlag, Evapotranspiration, Sickerwasser, etc.), welche in weiterer Folge für die Kalibrierung und Validierung von Modellen in alpinen Regionen genutzt werden können.

2. Standort Stoderzinken

Im Jahre 2005 wurde in den Nördlichen Kalkalpen, auf der Westseite des Stoderzinkens (Obersteiermark, Österreich) in einer Höhe von 1830 m Seehöhe eine Forschungsstation, bestehend aus einer Gebirgslsylimeter-, Niederschlags-, sowie Wetterstation, von der Höheren Bundeslehr- und Forschungsanstalt Raumberg-Gumpenstein und des hydrographischen Dienstes Steiermark, errichtet (Abb. 2). Der Standort Stoderzinken ist durch ein humides Klima mit hohen jährlichen Niederschlagssummen (> 1100 mm) und niedrigen Temperaturen gekennzeichnet (HERNDL et al. 2015) (Abb. 1).

Der Stoderzinken (2048 m.ü.A) ist ein vorwiegend aus verkarstem Dachsteinkalk aufgebauter isolierter Bergstock (BOHNER et al. 2007, FLÜGEL & NEUBAUER 1984). Die Almfläche, auf der die Forschungsstation errichtet wurde, befindet sich auf einer Unterhang-Verebnung. Die Bodenart am Stationsstandort ist lehmiger Schluff. Der Gebirgsboden ist nährstoffarm, die Almvegetation entspricht einer feuchten Ausbildung der Milchkrautweide (*Crepido aureae – Festucetum commutatae*) (BOHNER et al. 2007). Vor der Errichtung der Station wurde die Fläche almwirtschaftlich genutzt, danach wurde die Fläche eingezäunt und als Ersatz für die fehlende Beweidung einmal pro Jahr im Herbst gemäht. Der Versuchsstandort ist repräsentativ für ein Almgebiet in den Nördlichen Kalkalpen.

Die Lsylimeterstation besteht aus einem wägbaren monolithischen Lsylimeter mit einer kreisförmigen Oberfläche von 1 m² und einer Tiefe von 1 m. Das Lsylimetergewicht wird mit einer Genauigkeit von 100 g, das Sickerwasservolumen über eine Kippwaage in 100 ml Auflösung minütlich erfasst. Zusätzlich wurden im Lsylimeter Sonden für die Messung des volumetrischen Bodenwassergehaltes (Vol. %) in 5 cm, 30 cm, 60 cm und 90 cm Tiefe installiert (10-Minuten Auflösung).

Die Niederschlagsmessstation besteht aus vier Niederschlagstotalisatoren, einem laser-optischen Distrometer (OTT Parsivel) und (seit 2009) einer Niederschlagswaage (OTT Pluvio). Mithilfe des Niederschlagsmesssystems Parsivel werden Niederschlagsmenge und Niederschlagsart anhand eines laser-optischen Sensors 3 m oberhalb der Erdoberfläche erfasst (BOHNER et al. 2007). Die Niederschlagswaage Pluvio dient zur

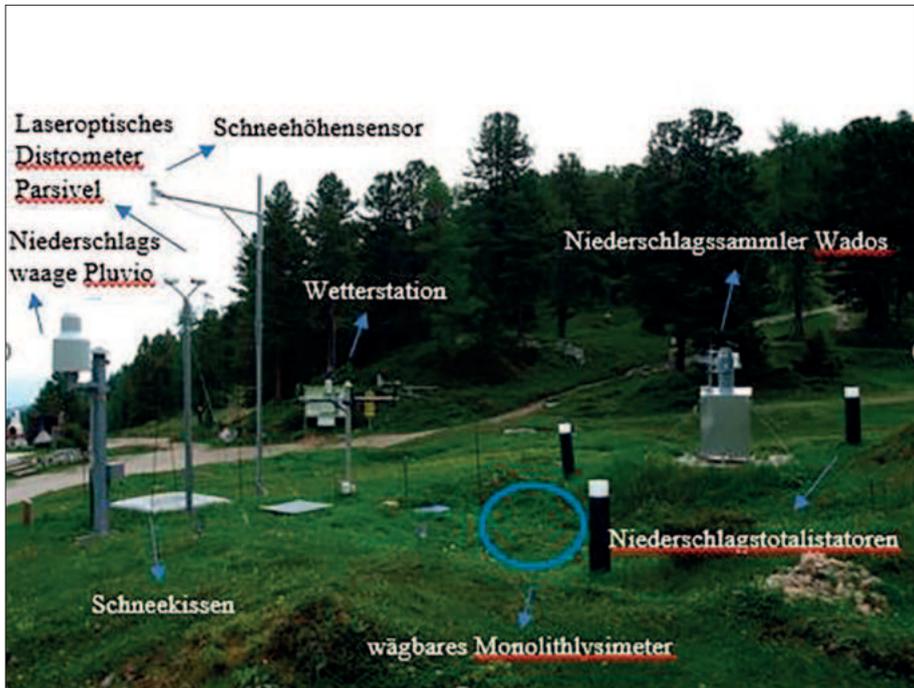


Abb. 2: Messstation am Stoderzinken in den Nördlichen Kalkalpen (Steiermark, Österreich) (AREC Raumberg-Gumpenstein).

Fig. 2: Measuring station on the Stoderzinken in the Northern Calcareous Alps (Styria, Austria) (AREC Raumberg-Gumpenstein).

Erfassung des flüssigen, festen und gemischten Niederschlages nach dem Wägeprinzip und befindet sich in 2.5 m Höhe. Ebenfalls kann Niederschlag auch bei Schneefall erfasst werden. Dabei wird der feste Niederschlag über eine Auffangringheizung zum Wasseräquivalent geschmolzen und anschließend gemessen. Die Niederschlagswerte von Parsivel und Pluvio werden in mm pro Minute aufgezeichnet. Zusätzlich wird an der Forschungsstation die Schneehöhe von Hand und mittels eines Schneehöhensensors bestimmt.

Die Wetterstation liefert Messwerte der Bodentemperatur ($^{\circ}\text{C}$) in 5 cm Tiefe, Lufttemperatur ($^{\circ}\text{C}$) in 5 cm, 20 cm und 2 m Höhe, Globalstrahlung (W/m^2) in 2 m Höhe, relative Luftfeuchtigkeit (%) in 2 m Höhe, Windgeschwindigkeit und Windspitze (m/s) in 2 m Höhe sowie Windrichtung (Grad) in 2 m Höhe (Auflösung 10 Minuten).

3. Datenanalyse

Die Niederschlagshöhe wurde anhand unterschiedlicher Niederschlagsmesssysteme (Lysimeter, laser-optisches Distrometer, Niederschlagswaage Pluvio) auf Tagesbasis ermittelt. Im Winterhalbjahr lieferten die Lysimetermessungen aufgrund keiner möglichen Trennung der Schneebedeckung über dem Lysimeter keine zuverlässigen Niederschlagsdaten. Daher wurden im Winterhalbjahr von November bis Mai die Nie-

derschläge (N) aus den Systemen Parsivel und Pluvio (abhängig je nach Schneehöhe) bestimmt. In den Sommermonaten von Juni bis Oktober wurde aufgrund der schneefreien Periode und der geringen Beeinflussung durch Winddeformation (BIJELIC et al. 2019), das Lysimeter als Referenzsystem herangezogen. Dabei errechnete sich der Lysimeterniederschlag (N_{Lys}) sowie die Lysimeterverdunstung (aktuelle Evapotranspiration ET_a) aus den Lysimetergewichtsmessungen, wobei die Messdaten mit dem AWAT-Filter nach PETERS et al. (2017) geglättet wurden. Im Fall von Datenlücken wurden die Lysimeterniederschläge mit dem laser-optischen Distrometer bzw. der Niederschlagswaage Pluvio gefüllt, sofern plausible Werte vorlagen. Fehlende Lysimeterverdunstungen wurden mit Gras-Referenzverdunstungswerten ersetzt.

Die Gras-Referenzverdunstung (ET_0) wurde mittels der Penman-Monteith-Gleichung (ALLEN et al. 2006) für die gesamte Beobachtungsperiode anhand des Python-Pakets PyET (VREMEC et al. 2024) berechnet und mit der Lysimeterverdunstung (im Sommerhalbjahr) verglichen. Fehlende ET_0 Werte wurden mit dem Hargreaves-Verfahren berechnet (HARGREAVES & SAMANI 1982), wobei ausschließlich Temperaturdaten aus dem Spartacus-Datensatz verwendet wurden (HIEBL et al. 2016, GEOSPHERE 2024). Zusätzlich wurde für ET_0 sowie ET_a ein Grenzwert von 8 mm/Tag angenommen.

Die Sickerwasserbildung (SW_{Lys}) wurde anhand der Lysimetergewichtsmessungen berechnet. Fehlende Lysimetergewichtsmessungen und demzufolge fehlende Sickerwassermengen wurden mit Werten der Kippwaage ersetzt. Jedoch waren meistens SW_{Lys} -Lücken ident mit jenen der Kippwaage. Zusätzlich wurde daher zum Vergleich des Referenzsystems (SW_{Lys}) bzw. zur Lückenfüllung die klimatische Wasserbilanz (SW_{KWB}) ermittelt, indem die tägliche Differenz von Niederschlag (ermittelt aus N_{Lys} bzw. N) und Gras-Referenzverdunstung (ET_0) gebildet wurde:

$$SW_{KWB} = N - ET_0 \quad \text{Formel 1}$$

Das Lysimeter könnte speziell in der Schneeschmelze tendenziell zu einer Überschätzung der Sickerwassermengen führen, da sich das Lysimeter in einer Muldenlage befindet und daher zusätzlich Schmelzwasser lateral zufließen könnte.

Die Bodenfeuchtebedingungen wurden anhand der volumetrischen Bodenwassergehalte (BWG) im Lysimeter bestimmt. Dabei wurde der Bodenfeuchteanomalie-Index (Soil moisture anomaly index, SMAI), welcher die Bodenfeuchte verglichen zu durchschnittlichen Bedingungen beschreibt (JIMENEZ-DONAIRE et al. 2020), ermittelt. Fehlende Werte der Bodenwassergehalte konnten mit anderen Werten nicht ersetzt werden. Der SMAI wurde für unterschiedliche Tiefen (5 cm, 30 cm, 60 cm und 90 cm) anhand der Differenz der Bodenwassergehalte (BWG) sowie der durchschnittlichen Bodenwassergehalte (BWG_{μ}) dividiert durch die Standardabweichung (BWG_{σ}) berechnet:

$$SMAI = \frac{BWG - BWG_{\mu}}{BWG_{\sigma}} \quad \text{Formel 2}$$

SMAI Werte > 0 zeigen feuchte Bedingungen, SMAI Werte < 0 trockene Bedingungen an. Der SMAI wurde verwendet um die Dynamik verschiedener Tiefenstufen in unterschiedlichen Perioden vergleichen zu können.

Die Wasserbilanzgrößen Niederschlag, aktuelle Evapotranspiration / Gras-Referenzverdunstung und Sickerwasser wurden über die hydrologischen Jahre von November 2009 bis Oktober 2020 auf Tagesbasis ausgewertet. Zusätzlich wurden die Auswirkungen unterschiedlicher Witterungsbedingungen auf die Sickerwasserbildung zusammen mit den Bodenfeuchtebedingungen (SMAI) für vier ausgewählte hydrologische Jahre (2009/2010, 2012/2013, 2017/2018 und 2019/2020) betrachtet.

4. Ergebnisse der Wasserbilanzgrößen und der Bodenfeuchte

4.1 Wasserbilanzgrößen in den hydrologischen Jahren von 2010 bis 2020

Die mit den unterschiedlichen Messsystemen in den hydrologischen Jahren von 2009 bis 2020 ermittelten **Niederschläge (N)** lagen zwischen 1314 mm und 1966 mm (Tab. 1). Dabei wurden die geringsten Jahresniederschläge im Jahr 2010/2011 ermittelt, ebenfalls zeigte auch das Jahr 2009/2010 deutlich geringere Niederschläge als all die anderen betrachteten Perioden. Die höchsten Jahresniederschläge wurden im Jahr 2012/2013 mit 1966 mm quantifiziert.

Die jährliche Gras-Referenzverdunstung (ET_0) zeigte über alle betrachteten hydrologischen Jahre plausible Werte (beispielsweise im Vergleich mit Werten aus dem WASSERVERSORGUNGSPLAN STEIERMARK 2015). Die ET_0 lag zwischen 429 mm und 538 mm (Tab. 1). Die ET_0 machte an diesem Gebirgsstandort im Durchschnitt über alle hydrologische Beobachtungsjahre (2009 – 2020) 27 % des Niederschlags aus. Verglichen mit 64 % des Niederschlags am montan gelegenen Talstandort Raumberg-Gumpenstein (Beobachtungsperiode von 2015 bis 2020) (FORSTNER et al. 2021, FORSTNER et al. 2023) ist dies ein sehr geringer Wert.

Die aktuelle Evapotranspiration (ET_a), welche nur für Sommermonate errechnet wurde, zeigte geringere Verdunstungsmengen (-21 %) im Vergleich zu ET_0 . Im Mittel betrug die tägliche ET_a 1,5 (± 1.3) mm, die ET_0 1,9 (± 1.1) mm.

Die jährlichen **Sickerwassermengen des Lysimeters (SW_{Lys})** lagen über alle Beobachtungsperioden hinweg zwischen 991 mm und 2929 mm (Tab. 1). Aus der klimatischen Wasserbilanz (SW_{KWB}) berechnet, ergaben sich meist geringere Mengen zwischen 781 mm und 1528 mm. Die Sickerwassermessungen des Lysimeters und jene aus der klimatischen Wasserbilanz lagen in 6 von 11 Beobachtungsperioden in einer Bandbreite von < 25 %. Dabei kam es in 5 von 11 Beobachtungsperioden zu höheren Abweichungen von SW_{Lys} und SW_{KWB} mit sehr hohen SW_{Lys} Mengen von > 2000 mm/Jahr. Speziell im Frühjahr 2017 und 2018 zur Schneeschmelzperiode wurden hohe Sickerwassermengen des Lysimeters gemessen. Im Mai 2017 und 2018 wurde eine hohe Temperatur von 6°C bzw. 8°C ermittelt, welche zu einem starken Schneeschmelzereignis führte. Aufgrund der Muldenlage des Lysimeters könnte möglicherweise zusätzlich Schneeschmelzwasser in die Senke bzw. in den Einflussbereich des Lysimeters fließen (FRUHWIRTH, 2011). Anders zeigte sich im Frühjahr 2019, nach den starken Schneefällen speziell im Jänner 2019, eine langsame jedoch langanhaltende Schneeschmelzperiode bis in den Juni. Im Mai 2019 lag die durchschnittliche Lufttemperatur bei nur 1.7°C. Die mittlere monatliche SW_{Lys} lag im April bei 147 mm, im Mai bei 778 mm und im Juni bei 901 mm verglichen zu einer monatlichen SW_{Lys} beim stärkeren Schneeschmelzereignis im Frühjahr 2017 von 838 mm (April), 1370 mm (Mai) und 71 mm (Juni).

Aufgrund der unterschiedlichen Sickerwassermengen war ersichtlich, dass die Witterungsperiode bei der Schneeschmelze im Frühjahr die Sickerwasserbildung und damit die Grundwasserneubildung erheblich beeinflusst. Weiters wurde auch von WIESER et al. (2008) beschrieben, dass bei zunehmendem Niederschlag mit der Seehöhe, die Verdunstung verglichen zum Abfluss eine sekundäre Wichtigkeit hat.

Tab. 1: Summe von Niederschlag (N), Gras-Referenzverdunstung (ET_0) und Sickerwasser gemessen aus dem Lysimeter (SW_{Lys}) in den hydrologischen Jahren von November 2009 bis Oktober 2020.

Tab. 1: Sum of precipitation (N), grass reference evaporation (ET_0) and seepage water measured from the lysimeter (SW_{Lys}) in the hydrological years from November 2009 to October 2020.

Hydrologisches Jahr	N (mm)	ET_0 (mm)	SW_{Lys} (mm)
Nov. 2009 – Okt. 2010	1523	523	1062
Nov. 2010 – Okt. 2011	1314	533	991
Nov. 2011 – Okt. 2012	1755	538	2324
Nov. 2012 – Okt. 2013	1966	438	2341
Nov. 2013 – Okt. 2014	1789	429	1085
Nov. 2014 – Okt. 2015	1941	461	1615
Nov. 2015 – Okt. 2016	1878	480	1809
Nov. 2016 – Okt. 2017	1722	454	2929
Nov. 2017 – Okt. 2018	1844	454	2598
Nov. 2018 – Okt. 2019	1796	455	2215
Nov. 2019 – Okt. 2020	1957	481	1352

4.2 Einfluss unterschiedlicher Witterung auf die Sickerwasserbildung und Bodenfeuchte

Der Einfluss unterschiedlicher Witterungsbedingungen (feuchtere / trockenere hydrologische Jahre) auf die Sickerwasserbildung und die Bodenfeuchte wurde anhand vier ausgewählter hydrologischer Jahre analysiert (zwei feuchtere / zwei trockenere Jahre) (Tab. 2, Abb. 3, Abb. 4). Dabei ist ersichtlich, dass im Winterhalbjahr 2009/2010 eine niederschlagsärmere Periode auftrat. Hier wurde von November bis Mai ein N von 763 mm und eine SW_{Lys} von 529 mm ermittelt (Tab. 2). Dabei fiel in der Zeit der Schneeschmelze von April bis Mai 2010 42 % des Gesamtjahressickerwassers an. Im Sommerhalbjahr 2010 wurde keine längere Trockenperiode beobachtet, jedoch kam es zu schnellen kurzfristigen Schwankungen von feuchteren zu trockenere Bedingungen (Abb. 4).

Ebenfalls wurde in den Wintermonaten 2019/2020 ein $N < 1000$ mm gemessen. Ähnlich wie in den Vorjahren zeigte der SMAI im Winter 2019/2020 normale bis leicht trockene Bedingungen (Abb. 4).

Die SW_{Lys} lag mit 718 mm verglichen zu 2009/2010 höher (Tab. 2). Von April bis Mai 2020 fiel 37 % des Gesamtjahressickerwassers an. Das Sommerhalbjahr 2020 zeigte mit > 1000 mm N die niederschlagsreichste Periode in diesen vier ausgewählten Zeiträumen an. Ebenfalls wurden auch in diesen Sommermonaten hohe Sickerwassermengen gemessen (Abb. 3). Es wurde auch im Sommer 2020 keine längere Trockenperiode beobachtet. Die vielen Niederschläge im August 2020 zeigten am Gebirgsstandort feuchte Bedingungen nur in den oberen Bodenschichten an, hingegen lag im Herbst die Bodenfeuchteanomalie in allen Tiefenstufen bei $> 0,5$ (Abb. 4).

Das niederschlagsreichste und auch schneereichste Winterhalbjahr innerhalb dieser vier ausgewählten Beobachtungsperioden war das Jahr 2017/2018 mit 1194 mm N. Ebenfalls wurden auch hohe Sickerwassermengen von > 2000 mm in dieser Periode

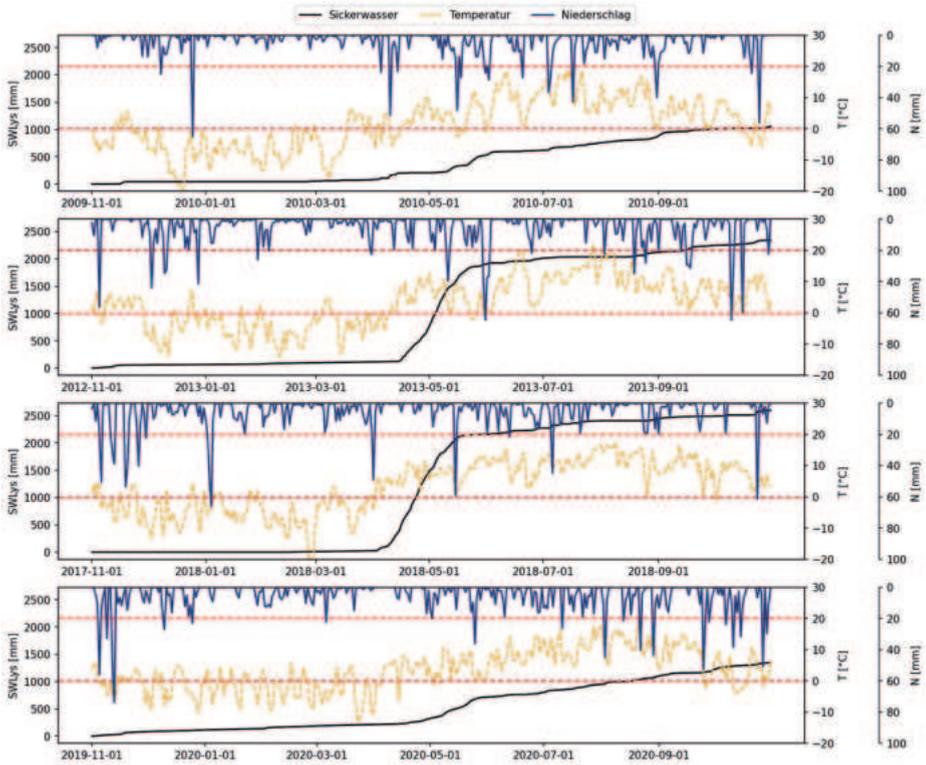


Abb. 3: Kumulative Sickerwassermengen (mm) gemessen vom Lysimeter (SW_{Lys}), durchschnittliche Lufttemperaturen (T) ($^{\circ}C$) und Niederschläge (N) (mm) von November bis Oktober für die Jahre 2009 / 2010, 2012 / 2013, 2017 / 2018 und 2019 / 2020.

Fig. 3: Cumulative seepage water amounts (mm) measured by the lysimeter (SW_{Lys}), average air temperatures (T) ($^{\circ}C$) and precipitation (N) (mm) from November to October for the years 2009 / 2010, 2012 / 2013, 2017 / 2018 and 2019 / 2020.

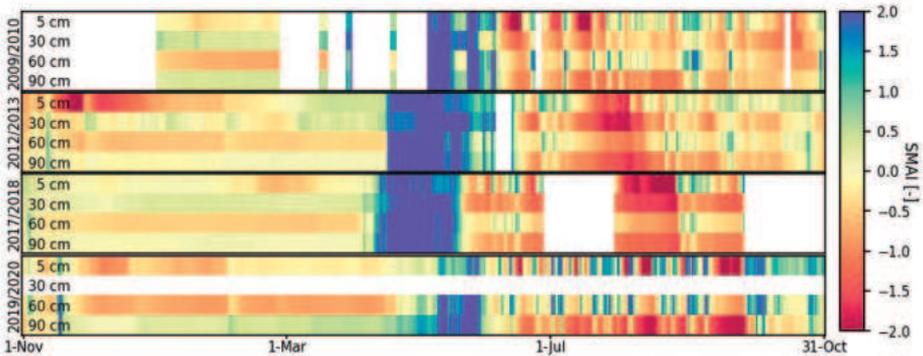


Abb. 4: Bodenfeuchteanomalie-Index von November bis Oktober für die Jahre 2009 / 2010, 2012 / 2013, 2017 / 2018 und 2019 / 2020.

Fig. 4: Soil moisture anomaly index from November to October for the years 2009 / 2010, 2012 / 2013, 2017 / 2018 and 2019 / 2020.

gemessen. Das Sommerhalbjahr 2018 hingegen war niederschlagsärmer mit geringeren berechneten Sickerwassermengen (Tab. 2). Das Jahr 2018 wurde nördlich der Alpen durch sehr heiße und trockene Wetterbedingungen jedoch vergleichsweise kühle und feuchte Bedingungen über weite Teile des Mediterranen Raumes charakterisiert (BURAS et al. 2020). Am Gebirgsstandort Stoderzinken wurden die trockeneren Monate im August und September beobachtet. Die ET_a betrug in diesem Zeitraum 41 % vom N, demnach wurde im Herbst Sickerwasser gebildet. Hingegen wurden an einem montanen Grünlandstandort im obersteirischen Ennstal Abnahmen des Bodenwasserspeichers und demnach geringere Sickerwassermengen im Sommer 2018 beobachtet (FORSTNER et al. 2021, FORSTNER et al. 2023).

Tab. 2: Summe von Niederschlag (N), Gras-Referenzverdunstung (ET_0), aktuelle Evapotranspiration (ET_a) und Sickerwasser gemessen aus dem Lysimeter (SW_{Lys}) sowie maximale Schneehöhe (SH) von November bis Mai sowie von Juni bis Oktober für die Jahre 2009 / 2010, 2012 / 2013, 2017 / 2018 und 2019 / 2020.

Tab. 2: Sum of precipitation (N), grass reference evaporation (ET_0), actual evapotranspiration (ET_a) and seepage water measured from the lysimeter (SW_{Lys}) as well as maximum snow depth (SH) from November to May and from June to October for the years 2009 / 2010, 2012 / 2013, 2017 / 2018 and 2019 / 2020

Jahr	Periode	N (mm)	ET_0 (mm)	ET_a (mm)	SW_{KWB} (mm)	SW_{Lys} (mm)	SH (mm)
2009 / 2010	Nov. – Mai	763	217	-	546	529	1888
	Jun. – Okt.	761	306	156	455	533	91
2012 / 2013	Nov. – Mai	1120	160	-	960	1904	2785
	Jun. – Okt.	846	279	262	567	437	30
2017 / 2018	Nov. – Mai	1194	175	-	1019	2157	3494
	Jun. – Okt.	649	279	231	370	441	17
2019 / 2020	Nov. – Mai	955	187	-	768	718	2494
	Jun. – Okt.	1002	295	224	707	634	17

Ebenfalls hohe Niederschlags- und Sickerwassermengen wurden in den Wintermonaten 2012/2013 gemessen (Tab. 2). Mehr als die Hälfte der Sickerwasserbildung erfolgte wie auch im Jahr 2017/2018 in den Monaten April und Mai (> 2000 mm). Die feuchtesten Bedingungen sind dabei in der Zeit der Schneeschmelze ersichtlich. Hierbei wurden von 5 cm bis 90 cm Bodentiefe SMAI Werte von > 1.0 ermittelt (Abb. 4). Auch die Beobachtungen von Herndl et al. (2009) bestätigen, dass in Zeiten der Schneeschmelze (März bis Mai) die Sickerwasserbildung oft 50 % der Jahresmenge beträgt. Im Frühsommer 2013 lagen bis in den Juni hinein feuchte Bedingungen vor. Hingegen zeigte speziell der Juli 2013 auch trockenere Bedingungen in allen Tiefenschichten. Im Juni und Juli 2013 betrug die ET_a dabei 62 % vom N. Demnach könnte im Sommer 2013 eine zeitweise eingeschränkte Wasserverfügbarkeit auch an solch einem humiden Standort vorgelegen haben. Weiters zeigten Starkregenereignisse im September und Oktober 2013 vermutlich aufgrund der trockeneren Periode im Hochsommer keinen großen Einfluss auf die Bodenfeuchte (Abb. 4).

Anhand dieser vier ausgewählten hydrologischen Jahre zeigte sich, dass schneeärmere Perioden zu einer Reduktion der Sickerwasserbildung und damit der Grundwasserneubildung führen. An einem solchen Gebirgsstandort sind also vor allem die Schneemengen und die Witterungsbedingungen im Frühjahr für die Grundwasserneu-

bildung entscheidend. Eine zeitlich hohe Schwankung der Sickerwasserbildung wurde über zwei Untersuchungsjahre auch von HERNDL et al. (2009) beobachtet.

Ebenfalls konnte auch beobachtet werden, dass der Zeitpunkt von niederschlagsarmen Phasen eine entscheidende Rolle für Evapotranspiration, Sickerwasserbildung und Bodenfeuchte im hier untersuchten Gebirgsökosystem spielt.

5. Zusammenfassung

Die Grundwasserneubildung ist insbesondere in Österreich wichtig für die Sicherung der Wasserversorgung. Das österreichische Trinkwasser stammt fast vollständig aus Grundwasser. Die Hälfte davon wird aus den Porengrundwasservorkommen der Tal- und Beckenlagen, die andere Hälfte aus den Karst- und Kluftgrundwasserquellen der Gebirgszüge gewonnen (UMWELTBUNDESAMT 2024). Für den Schutz des Grundwassers und die nachhaltige Nutzung dieser Ressource ist die Quantifizierung der Grundwasserneubildung speziell in Zeiten des Klimawandels auch in humiden, nichtwasser limitierten Ökosystemen von großer Bedeutung. Daher wurden über 11 hydrologische Jahre die Bodenwasserhaushaltsgrößen Niederschlag, Evapotranspiration sowie Sickerwasser (Grundwasserneubildung) an einer Gebirgslismetermessstation in den Nördlichen Kalkalpen (Stoderzinken, Österreich) quantifiziert.

Die Ergebnisse zeigten, dass die ermittelten Niederschläge in den hydrologischen Jahren 2009 bis 2020 zwischen 1314 mm und 1966 mm lagen, während die Verdunstung zwischen 429 mm und 538 mm schwankte. Dabei wurden im Mittel 23 % des Niederschlages verdunstet. Weiters wurde an diesem (verkarsteten) humiden Gebirgsstandort in Jahren mit hoher Schneedeckenmächtigkeit mehr als 50 % der Jahressickerwasser-summe in Zeiten der Schneeschmelze gebildet. In den Sommermonaten kam es speziell bei trockenen Bodenfeuchtebedingungen im Hochsommer zu einer Sickerwasserreduktion und einer Zunahme der Evapotranspiration. Hingegen hatten niederschlagsarme Phasen im Herbst weniger Einfluss auf die Evapotranspiration, Bodenfeuchte und damit Sickerwasserbildung.

Die Beobachtungen zeigten demnach, dass in humiden alpinen Karstgebieten die Schneeschmelze einen entscheidenden Einfluss auf die Grundwasserneubildung hat. Daher könnte es in Zeiten mit geringeren Schneehöhen zu einer Reduktion der Grundwasserneubildung kommen. In den Sommermonaten spielt vor allem der Zeitpunkt von niederschlagsarmen Perioden eine wesentliche Rolle für den Bodenwasserhaushalt. Demnach könnte sich auch an humiden Standorten die Grundwasserneubildung aufgrund geringerer Schneedecken als auch des vermehrten Auftretens von Trockenperioden verringern.

6. Dank

Wir danken für die finanzielle Unterstützung bei der Errichtung der Forschungsstation am Stoderzinken durch FA 19a Wasserwirtschaft Land Steiermark sowie für die technische Errichtung und Betreuung der Forschungsstation am Stoderzinken durch (vormals) UMS GmbH.

Weiters danken wir für die finanzielle Unterstützung der Dafne Projekte (Dafne Nr. 100525, GwStoder; Dafne Nr. 100566, GwSchnee; Dafne Nr. 100810, GruDynStoder; Dafne Nr. 101434, WaBiStoder) durch das BML.

7. Literatur

- 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 ET_o by the FAO56 Penman-Monteith method. – *Agricultural Water Management* 81: 1–22. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2005.03.007>
- AUER I., BÖHM R., JURKOVIC A., LIPA W., ORLIK A., POTZMANN R. et al. 2007: HISTALP—historical instrumental climatological surface time series of the Greater Alpine Region. – *International Journal of Climatology* 27: 17–46. <https://doi.org/10.1002/joc.1377>
- BIJELIC A., BIRK S., SLAWITSCH V. & HERNDL M. 2019: Vergleich unterschiedlicher Niederschlags-Messsysteme am Gebirgsstandort Stoderzinken. 18. – Gumpensteiner Lysimetertagung 2019, 125–128.
- BMLRT (2021). https://info.bml.gv.at/dam/jcr:75a703dd-9c25-452a-ac06-5240abbd118a/Bericht_Wasserschatz.pdf
Zugegriffen: 19. April 2024
- BOHNER A., SCHINK M. & EDER, G. 2007: Eine Gebirgs-Lysimeterstation am Stoderzinken (Österreich, Steirisches Ennstal) in 1830 m Seehöhe – Messeinrichtung und Forschungsziele. 12. – Gumpensteiner Lysimetertagung 2007, 173–175.
- BURAS A., RAMMIG A., ZANG C.S. 2020: Quantifying impacts of the 2018 drought on European ecosystems in comparison to 2003. – *Biogeosciences* 17:1655 – 1672. <https://doi.org/10.5194/bg-17-1655-2020>
- FLÜGEL H.W. & NEUBAUER F. 1984: Geologie der Österreichischen Bundesländer in kurzgefassten Einzeldarstellungen Steiermark. 127 S.; Wien.
- FORSTNER V., GROH J., VREMEC M., HERNDL M., VEREECKEN H., GERKE H. H., BIRK S. & PÜTZ T. 2021: Response of water balance components to climate change in permanent grassland soil ecosystems. – *Hydrology and Earth System Sciences* 25: 6087-6106. <https://doi.org/10.5194/hess-25-6087-2021>
- FORSTNER V., VREMEC M., HERNDL M. & BIRK S. 2023: Effects of dry spells on soil moisture and yield anomalies at a montane managed grassland site – a lysimeter climate experiment. – *Ecohydrology* 16(3): e2518. <https://doi.org/10.1002/eco.2518>
- FRENCH G., LEITINGER G., OBOJES N., HOFMANN M., NEWSELY C., DEUTSCHMANN M., TAPPEINER U. & TASSER, E. 2018: Community-specific hydraulic conductance potential of soil water decomposed for two Alpine grasslands by small-scale lysimetry. – *Biogeosciences* 15: 1065–1078. <https://doi.org/10.5194/bg-15-1065-2018>
- FRUHWIRTH, G.P. 2011: Untersuchungen und Modellierung der Schneedecke am Stoderzinken (Österreich). – Bachelorarbeit, Institut für Geographie und Raumforschung, Universität Graz.
- GEOSPHERE (2021). <https://www.zamg.ac.at/cms/de/aktuell/schon-gewusst/wetterlexikon/wetterlexikon-stauwetterlagen-auch-beim-wetter-gibt-es-stau>. Zugegriffen: 23. April 2024
- HARGREAVES G. H. & SAMAN, Z. A. 1982: Estimating potential evapotranspiration. – *Journal of the Irrigation and Drainage Division-ASCE* 108: 225–230.
- HERNDL M., BOHNER A. & KANDOLF M. 2009: Gebirgs-Lysimeterstation am Stoderzinken - Erste Ergebnisse. – Gumpensteiner Lysimetertagung 2009, 111–116.
- HERNDL M., SCHINK M., BOHNER A., GESSLBAUER A. & KANDOLF M. 2015: Wasser- und Nährstoffflüsse in einem Grünlandökosystem am Almstandort Stoderzinken. – Gumpensteiner Lysimetertagung 2015, 39–44.
- HERNDL, M. 2021: Wasserbilanz im Almökosystem Stoderzinken: Analyse der Einflussfaktoren und deren Auswirkungen auf Boden, Wasser und Pflanze. HBLFA Raumberg – Gumpenstein.
- HIEBL J. & FREI C. 2016: Daily temperature grids for Austria since 1961 – concept, creation and applicability. – *Theoretical and Applied Climatology* 124: 161–178. <https://doi.org/10.1007/s00704-015-1411-4>
- IPCC 2023: Summary for Policymakers. In: *Climate Change 2023: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on*

- Climate Change [Core Writing Team, H. Lee and J. Romero (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland, pp. 1-34, doi: 10.59327/IPCC/AR6-9789291691647.001. Zugegriffen: 19. April 2024
- JIMÉNEZ-DONAIRE M. del P., TARQUIS A. & GIRÁLDEZ J. V. 2020: Evaluation of a combined drought Indicator and its potential for agricultural drought prediction in southern Spain. – *Natural Hazards & Earth System Sciences* 20: 21–33. <https://doi.org/10.5194/nhess-20-21-2020>
- GEOSPHERE 2024: Data Hub, <https://data.hub.zamg.ac.at/> (letzter Zugriff: 5. August 2024).
- OBERHAUSER R. & BAUER F.K. 1980: *Der geologische Aufbau Österreichs*. Springer Verlag, Wien.
- PETERS A., GROH J., SCHRADER F., DURNER W., VERECKEN H. & PÜTZ T. 2017: Towards an unbiased filter routine to determine precipitation and evapotranspiration from high precision lysimeter measurements. – *Journal of Hydrology* 549: 731–740. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2017.04.015>
- UMWELTBUNDESAMT 2024: <https://www.umweltbundesamt.at/umweltthemen/wasser/trinkwasser>. Zugegriffen: 24. Mai 2024.
- VREMEC M., COLLENTUR R. A. & BIRK S. 2024: PyEt v1.3.1: a Python package for the estimation of potential evapotranspiration. – *Geoscientific Model Development* 17: 7083–7103. <https://doi.org/10.5194/gmd-17-7083-2024>
- WASSERVERSORGUNGSPLAN STEIERMARK 2015: Ein Leitfaden für die öffentliche Wasserversorgung. Amt der Steiermärkischen Landesregierung, Abteilung 14 – Wasserwirtschaft, Graz. https://www.wasserwirtschaft.steiermark.at/cms/dokumente/10188852_4660005/d9ec8c61/WVPL.2015.TeilA.Kap.3.Niederschlag.pdf. Zugegriffen: 23. April 2024
- WIESER G., HAMMERLE A. & WOHLFAHRT G. 2008: The Water Balance of Grassland Ecosystems in the Austrian Alps. – *Arctic, Antarctic and Alpine Research* 40(2): 439–445. [https://doi.org/10.1657/1523-0430\(07-039\)\[WIESER\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1657/1523-0430(07-039)[WIESER]2.0.CO;2)

ZOBODAT - www.zobodat.at

Zoologisch-Botanische Datenbank/Zoological-Botanical Database

Digitale Literatur/Digital Literature

Zeitschrift/Journal: [Mitteilungen des naturwissenschaftlichen Vereins für Steiermark](#)

Jahr/Year: 2025

Band/Volume: [154](#)

Autor(en)/Author(s): Forstner Veronika, Vremec Matevz, Birk Steffen, Herndl Markus

Artikel/Article: [Wasserbilanzparameter im Gebirgsökosystem Stoderzinken 33-44](#)