

# Präzise Bestimmung von Niederschlags- und Verdunstungsereignissen aus Lysimetermessungen mit Hilfe eines verbesserten Datenfilters

Andre Peters<sup>1\*</sup> und Wolfgang Durner<sup>1</sup>

## Zusammenfassung

Moderne wägbare Lysimeter mit hoher Auflösung der Gewichtsmessung bieten ideale Informationen für eine präzise Quantifizierung von Evapotranspirations- (ET) und Niederschlagsraten (P). In der Praxis bestehen allerdings Schwierigkeiten bei Interpretation der Wägesignale, da die durch N und ET hervorgerufenen Gewichtsänderungen durch Störungen (z.B. durch Wind induziert) überlagert werden. Da sowohl die Signale als auch das Rauschen stark variabel in der Zeit sein können, ist es eine Herausforderung, sie möglichst gut voneinander zu trennen.

In diesem Beitrag stellen wir die AWAT3.0-Software (Adaptive Window and Adaptive Threshold) vor, die mit dem Ziel erstellt wurde, eine Auswertung mit maximaler Präzision bei gleichzeitiger Vermeidung von systematischen Fehlern (Bias) zu erlangen. Signale werden in vier Schritten von Rauschen getrennt: (i) Glättung der Daten durch einen gleitenden Mittelwert mit adaptivem Mittelungsfenster, (ii) Einführung eines adaptiven Schwellenwertes, als Maß für die Messungenauigkeit, der signifikante von nicht signifikanten Masseänderungen trennt, (iii) Anwendung der sogenannten „Snap-Routine“ um systematische Unterschätzungen der Flüsse bei jedem Wechsel in der Fließrichtung (von P zu ET oder ET zu P) als Folge der Schwellenwertberechnung zu vermeiden und (iv) eine Interpolation der so gewonnenen Daten, um einen stufenförmigen Verlauf der berechneten Flüsse nach der Schwellenwertberechnung zu vermeiden. Anhand synthetischer und realer Messdaten wird die Leistung der Routine gezeigt.

## Summary

Modern weighable lysimeters with high resolution of the weight measurement provide ideal information for a precise quantification of evapotranspiration (ET) and precipitation rates (P). In practice, however, there are difficulties in interpreting the weighing signals because the weight changes caused by N and ET are superimposed by disturbances (e.g., induced by wind). Since both the signals and the noise can be highly variable in time, it is a challenge to separate them with minimum error.

In this paper, we introduce the AWAT3.0 (Adaptive Window and Adaptive Threshold) software, which was created with the goal of obtaining maximum precision in the data evaluation while avoiding systematic bias. Signals are separated from noise in four steps: (i) smoothing the data through a moving average with adaptive window width, (ii) introducing an adaptive threshold, as measure of noise-induced measurement inaccuracy, separating significant from non-significant mass changes, (iii) applying the so-called „snap-routine“ to avoid systematic underestimation of the flows at each change in the flow direction (from P to ET or ET to P) if changes are smaller than the threshold value, and (iv) an interpolation of the data to obtain smoothly changing N and ET data. The performance of the AWAT 3.0 filter is shown for synthetic and real data and is compared to the previous versions of the filter.

## Einleitung

Eine möglichst genaue Quantifizierung der Wasserflüsse zwischen dem System Boden-Pflanze und der Atmosphäre ist für viele Fragen hinsichtlich des Wasser- Energie- und Stofftransportes von großer Bedeutung. Alle Wasserflüsse in Richtung Boden werden als Niederschläge (N [cm d<sup>-1</sup>]) zusammengefasst, alle Flüsse zur Atmosphäre als Evapotranspiration (ET [cm d<sup>-1</sup>]). Die klassischen Messungen der Niederschläge haben teilweise große systematische Fehler (Michelson 2004, Hoffmann et al. 2016). Die potenzielle ET wird häufig basierend auf meteorologische Daten berechnet (Allen et al. 1998). Die reale ET kann nur durch vereinfachte Rechenverfahren (ungenau) oder über die numerische Simulation des Wasserhaushaltes im System-Boden-Pflanze-Atmosphäre (aufwändig) abgeschätzt werden.

Durch ihre ebenerdige Lage und eine identische Beschaffenheit der Oberflächen der Lysimeter und ihrer Umgebung

lassen sich die geringsten systematischen Fehler bei den Messungen dieser Größen durch moderne wägbare Lysimeter erzielen (von Unold und Fank 2008). Jede Zunahme der Gesamtmasse von Lysimeter und Abflussbehälter wird als Niederschlag, jede Abnahme als Evapotranspiration interpretiert. Allerdings sind diese Messungen oft überlagert von Rauschen, verursacht z.B. durch Erschütterungen oder Wind (Nolz et al. 2013). In den letzten Dekaden wurde die Messauflösung der Waagen immer genauer, so dass der Einfluss des Rauschens immer deutlicher wurde. Um die wirklichen Signale vom Rauschen zu trennen, müssen die Messdaten gefiltert werden.

Gemessen werden Zeitreihen von Massen ( $M(t)$ ), die Zielgrößen sind dagegen die Flüsse ( $F(t)$ ), also die erste Ableitung dieser Zeitreihen ( $F(t) = \Delta M / \Delta t$ ). Jede Fluktuation in  $M(t)$  wird im Resultat somit als Fluss interpretiert. Einfache Glättungs-Filter, wie z.B. der gleitende Mittelwert oder der

<sup>1</sup> Technische Universität Braunschweig, Institut für Geoökologie, Langer Kamp 19c, D-38106 BRAUNSCHWEIG

\* Ansprechpartner: Dr. Andre Peters, a.peters@tu-braunschweig.de



Savitzky-Golay-Filter (Savitzky und Golay 1964) sind zur Elimination des Rauschens nicht ausreichend, da auch nach der Mittelung immer noch kleine Fluktuationen auftreten, die den realen N oder ET-Verlauf nicht widerspiegeln.

Fank (2013) schlug deshalb vor, die Filterung der Daten in zwei Schritten durchzuführen: (i) Glättung der Daten (z.B. gleitender Mittelwert) mit einem bestimmten Mittelungsfenster  $w$  [min] und (ii) Einführung eines Schwellenwertes  $\delta$  [mm] als Maß für die Messgenauigkeit, der signifikante von nicht signifikanten Masseänderungen trennt. Eine Analyse von Schrader et al. (2013) mit synthetischen Daten zeigte, dass für eine Zeitreihe mit unterschiedlich starkem Rauschen (z.B. durch Wind) keine konstanten Werte für  $w$  und  $\delta$  existieren, die für jedes Ereignis optimal wären. So wird für ein starkes Signal (schnelle, starke Veränderung der Masse  $M$ ) ein kleiner Wert für  $w$  benötigt, während für ein schwaches Signal ein größerer Wert für  $w$  erforderlich sein kann. Analog sollte bei geringem Rauschen (z.B. Schwachwindphase) der Schwellenwert  $\delta$  klein sein, während er bei starkem Rauschen größer sein muss.

Peters et al. (2014, 2015) entwickelten daraufhin den AWAT1.0 (Adaptive Window Adaptiv Threshold)-Filter. Diese Routine errechnet mithilfe eines gleitenden Polynoms Maße für Signalstärke ( $B$ ) und Rauschen ( $s$ ) und passt  $w$  und  $\delta$  in Abhängigkeit von  $B$  und  $s$  an. Peters et al. (2016) und Peters et al. (2017) entwickelten diese Routine weiter, um einen stufenförmigen Verlauf der berechneten Flüsse nach der Schwellenwertberechnung zu glätten (AWAT2.0) und systematische Unterschätzungen der Flüsse bei jedem Wechsel in der Fließrichtung (von P zu ET oder ET zu P) als Folge der Schwellenwertberechnung zu vermeiden (AWAT3.0). Eine schematische Übersicht der Routine ist in *Abbildung 1* gegeben. Eine genaue Beschreibung der mathematischen Implementierung des Filters ist den Originalpublikationen von Peters et al. (2014, 2016, 2017) gegeben.

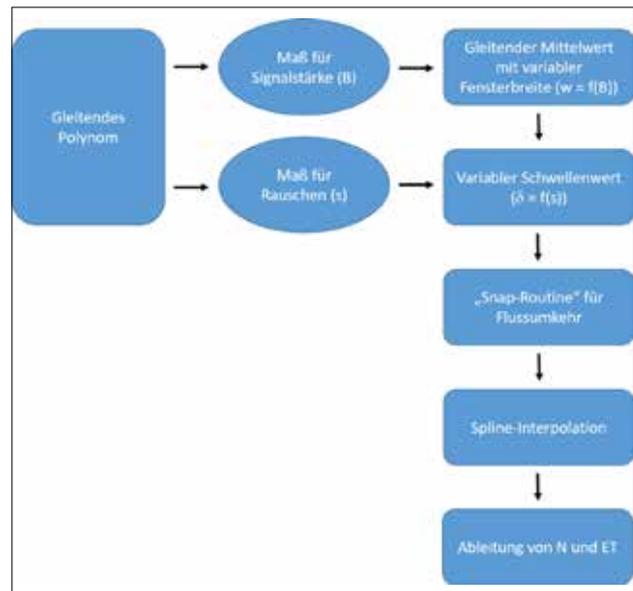
Ziel dieses Beitrags ist die AWAT3.0-Routine auf synthetische und reale Messdaten anzuwenden, und die Ergebnisse mit der ursprünglichen Version (Peters et al. 2015) zu vergleichen.

## Material und Methoden

Die Softwareroutinen AWAT1.0 bis AWAT3.0 wurden an drei Datensätzen getestet und verglichen:

- Daten eines Grasreferenz-Lysimeters in Berlin Marienfelde (nähere Erläuterungen finden sich in Peters et al. 2016),
- Synthetische Daten mit zeitlich variablem Messrauschen aus Schrader et al. (2013) und modifiziert in Peters et al. (2017),
- Daten eines Großlysimeters aus Rollesbroich (Eifel) als Teil des TERENO-Netzwerkes (Terrestrial Environmental Observatories, Zacharias et al. 2011).

Bei synthetischen Daten sind, anders als bei realen Daten, die wahren Flüsse bekannt. Sie eignen sich deshalb besonders gut um zu testen ob der Filter in der Lage ist das Messrauschen vom Signal zu trennen. Reale Messdaten hingegen enthalten Messrauschen von fast beliebiger Komplexität. Die wahren Flüsse sind dabei naturgemäß unbekannt, aber ein visueller Vergleich der Glättung der Routine mit den Rohdaten erlaubt in der Regel eine gute Beurteilung, ob



*Abbildung 1: Schematische Darstellung der AWAT3.0-Routine zur Berechnung von Niederschlägen (N) und Evapotranspiration (ET) aus Lysimeterdaten.*

die Charakteristik des Grundsignals gut erfasst wurde und somit die abgeleiteten Flüsse realistisch sind.

Bei den Tests sollte untersucht werden ob der Filter in der Lage ist Daten ohne systematische Über- oder Unterschätzungen der daraus errechneten Flüsse zu filtern. In diesem Beitrag liegt der Fokus auf (i) sehr kleinen Signalen, die durch moderate Verdunstungsereignisse und Taufall hervorgerufen werden, und (ii) auf schnell aufeinander folgenden Flussumkehrungen, wie sie an einem Tag mit multipen kleinen Schauern auftreten.

## Ergebnisse und Diskussion

### *Vergleich AWAT1.0 und AWAT2.0 (Interpolation)*

In *Abbildung 2* (oben) sind mit dem Grasreferenzlysimeter aus Berlin Marienfelde gemessene Rohdaten für zwei unterschiedliche Evapotranspirationsereignisse ohne Niederschlag und die mit AWAT1.0 und AWAT2.0 errechneten Verläufe zu sehen. Mit der ursprünglichen Version wird die Routine nach der Schwellenwertberechnung beendet (steps). Daraus lassen sich durch einfache Differenzbildung die Flüsse für bestimmte Zeitintervalle berechnen. Bei einer zeitlichen Auflösung von 1 d ergeben sich sinnvolle Werte (*Abbildung 2*, unten). Oft werden die Flüsse aber in höherer zeitlicher Auflösung benötigt (z.B. stündlich oder 10-minütlich). Dann können die resultierenden Flüsse sehr unrealistisch sein: Immer wenn in einem Zeitintervall eine oder mehrere Stufen durch den Filter errechnet wurde ergibt sich ein Fluss, sonst wird kein Fluss errechnet. Dieser Verlauf von Flüssen ist unrealistisch. Weiterhin ist die Größe eines solchen Flusses abhängig von der zeitlichen Auflösung (siehe *Abbildung 2*, unten). AWAT2.0 behebt dieses Problem indem an den Punkten mit signifikanten Änderungen ein Ankerpunkt gesetzt wird (*Abbildung 2*, oben). Zwischen diesen Ankerpunkten wird im Anschluss durch hermitesche Splines

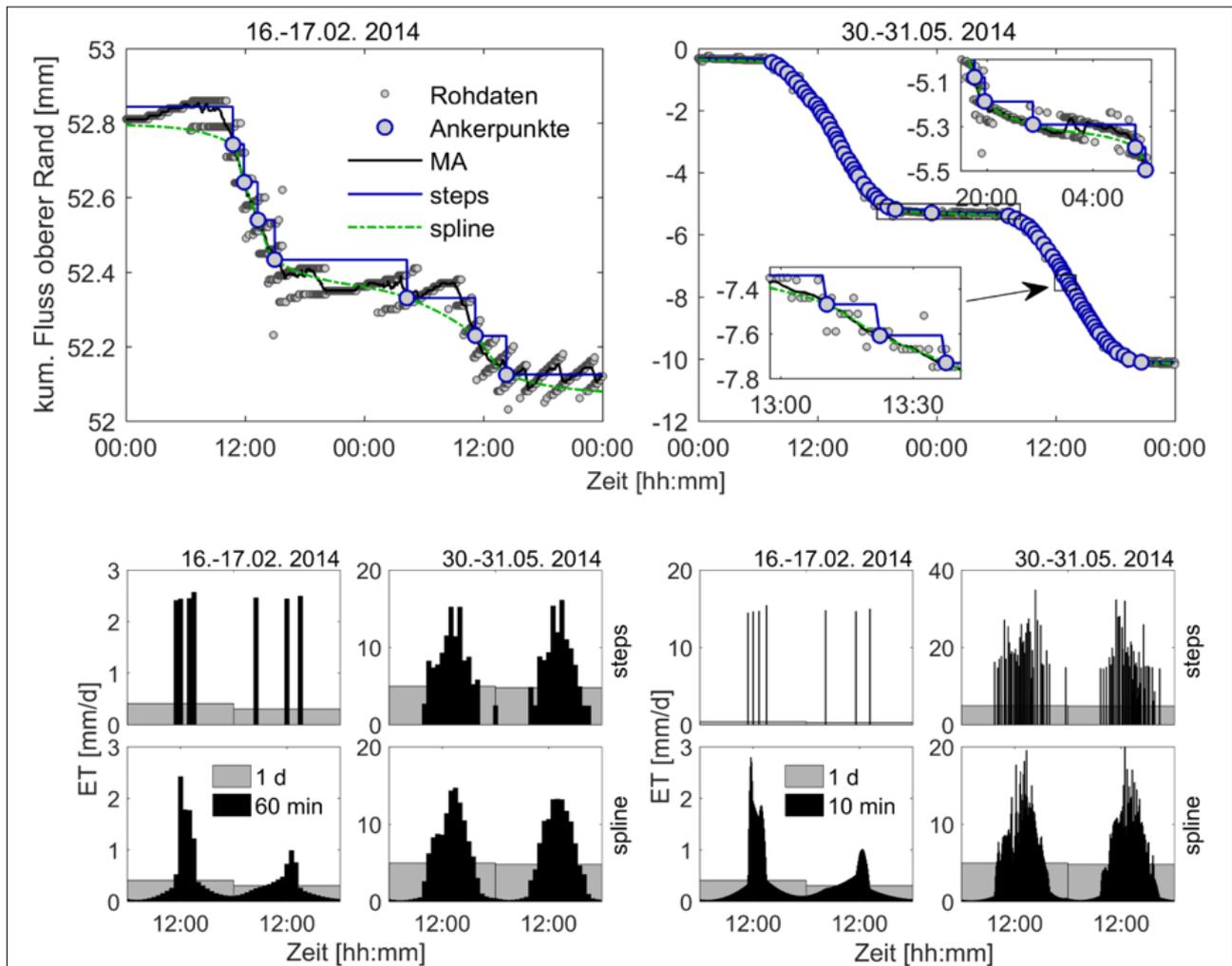


Abbildung 2: Daten und Auswertungsergebnisse eines Grasreferenzlysimeters aus Berlin Marienfelde für jeweils zwei Tage im Februar und Mai 2014. Oben: Gemessene Rohdaten und gefilterte Verläufe. MA: gleitender Mittelwert; steps: gefiltert mit AWAT1.0; Ankerpunkte: Punkte an denen eine Schwellenwertüberschreitung stattfand und deshalb die gefilterte Kurve wieder auf den MA fällt; spline: Spline-Interpolation mit AWAT2.0. Unten: Abgeleitete Flussdichten in täglicher (graue Balken) und stündlicher (links) bzw. 10-minütlicher (rechts) Auflösung für ET anhand der unterschiedlichen Interpolationen. AWAT2.0 bildet die Tagesdynamik plausibel ab.

interpoliert und aus diesen Werten werden schließlich die Flüsse berechnet (Abbildung 2, unten). Die Flüsse können damit in beliebiger Auflösung realistisch berechnet und z.B. für Simulationen von Wasser-, Energie- und Stoffflüssen im System Boden-Pflanze-Atmosphäre genutzt werden.

### Vergleich von AWAT2.0 und AWAT3.0

#### („Snap-Routine“)

Untersuchungen an Realdaten zeigen, dass der AWAT2.0-Filter („nosc“) teilweise nicht in der Lage ist, bei relativ starkem Rauschen sehr kleine Signal korrekt zu quantifizieren. In Abbildung 3 (oben) ist ein synthetisches Taufallerereignis mit unterschiedlich starken Störungen zu sehen. Der „wahre“ Taufall (grüne gestrichelte Linie) betrug in Summe 0.1 mm. Bei jeder Umkehr der Fließrichtung kommt es zu einer leichten Unterschätzung der Flüsse, die bei größerer Auflösung der Waage naturgemäß gravierender ausfällt. Bei der größten Störung (Abbildung 3, rechts) ergab sich eine Unterschätzung von fast 20%. Mit dem AWAT3.0-Filter

(„snap“) werden diese systematischen Unterschätzungen durch Anwendung der Snap-Routine weitgehend vermieden. Der Fehler für die dargestellten synthetischen Daten beträgt nur noch 1%, d.h. das Tau-Ereignis ist mit einer absoluten Genauigkeit von 0.001 mm quantifiziert. In Abbildung 3 (unten) sind die Residuen zwischen den wahren und errechneten Verläufen aufgetragen.

In Abbildung 4 sind drei unterschiedliche mit dem TERE-NO-Großlysimeter gemessene reale Tauereignisse zu sehen. Die Intensität des Taufalls nimmt von links nach rechts zu. Mit AWAT3.0 (snap) wird das Rauschen plausibel von den Grunddaten entfernt.

Da jede Umkehr des Wasserflusses (ET zu N und umgekehrt) aufgrund der Glättung der Daten potenziell zu einer Unterschätzung der Flüsse führen kann, summiert sich dieser Fehler mit der Häufigkeit der Flussumkehrungen auf. Abbildung 5 zeigt, wiederum für reale Messdaten des TERE-NO-Großlysimeters, Rohdaten sowie die mit AWAT2.0 (nosc) und AWAT 3.0 (snap) errechneten Verläufe für einen

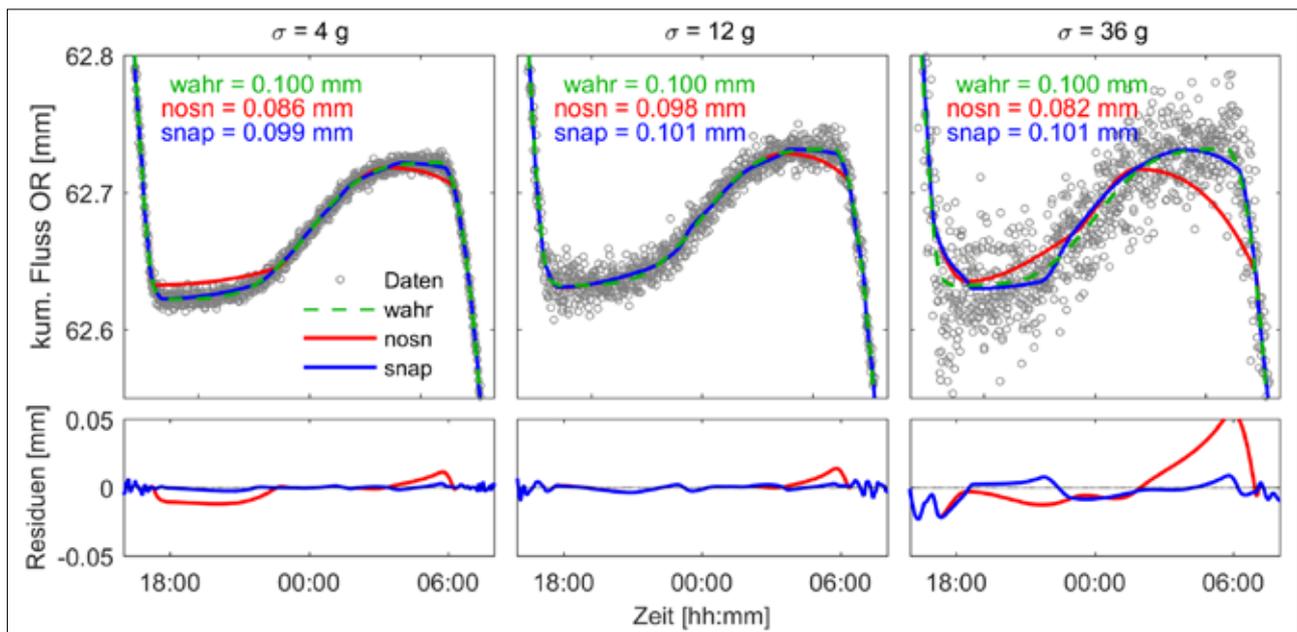


Abbildung 3: Oben: synthetische Daten für ein bestimmtes Taufallereignis mit unterschiedlich starkem Rauschen in den Daten und durch AWAT gefilterte Verläufe. True: Wahre Verläufe; nosn: mit AWAT2.0 ermittelte Werte; snap: mit AWAT3.0 mit „snap-Routine“ ermittelte Verläufe. Unten: Residuen zwischen den wahren und errechneten Verläufen.

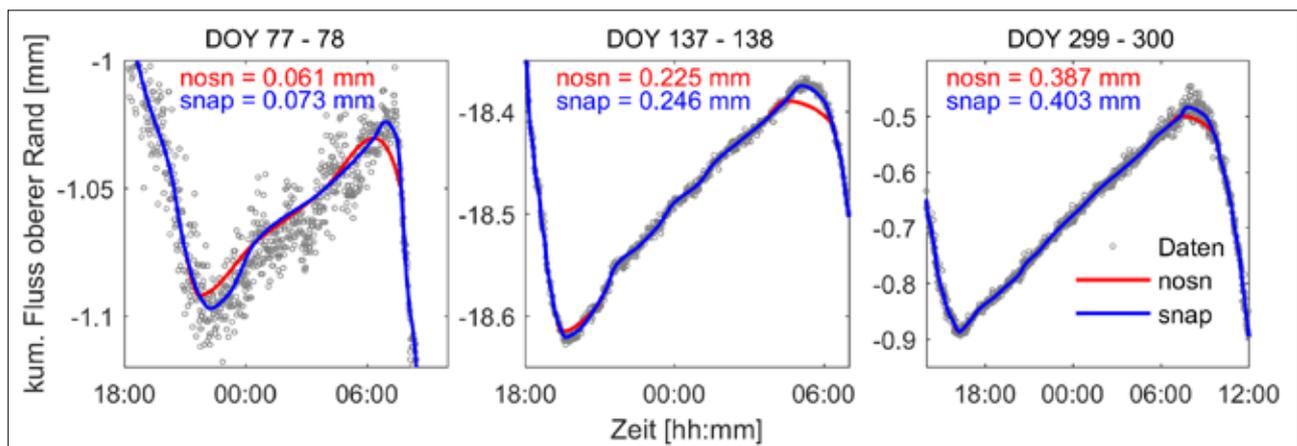


Abbildung 4: Drei unterschiedliche Tauereignisse aus dem Jahr 2014 gemessen mit dem TERENO-Großlysimeter und durch AWAT2.0 (nosn) und AWAT 3.0 (snap) ermittelte Verläufe.

wechselhaften Tag, der geprägt war durch häufige Wechsel von leichten Regenschauern und Evapotranspiration. Es ist zu erkennen, dass jede Flussumkehr zu einer systematischen Abweichung zwischen Daten und errechneten Verlauf führt. Diese wird durch Verwendung der Snap-Routine weitgehend vermieden, die ET und N-Berechnungen erscheinen realistisch. Eine Quantifizierung des eventuell noch verbleibenden Fehlers kann für real gemessene Daten allerdings nicht vorgenommen werden, da kein alternatives Messsystem mit vergleichbarer Präzision existiert.

## Fazit

Reale Wasserflüsse am oberen Rand von Lysimetern können sehr starke (z.B. kurzer Starkregen) oder sehr kleine (z.B. Evapotranspiration oder Taufall) Signale in Form von Massenänderungen hervorrufen. Diese Signale sind grundsätzlich von Störungen (Rauschen) überlagert, die aufgrund unter-

schiedlichster Gegebenheiten sowohl groß als auch sehr klein sein können. Um aus verrauschten Daten ohne Verfälschung die „wahren“ Signale zu filtern bedarf es eines mehrstufigen Verfahrens. Mit dem ursprünglichen AWAT-Filter (Peters et al. 2014) lassen sich Ereignisse mit sehr unterschiedlicher Signalcharakteristik vom Rauschen trennen. Allerdings gab es Probleme durch die Schwellenwertberechnung mit dem stufenförmigen zeitlichen Verlauf der Lysimetermassen und daraus resultierenden Berechnungen von N und ET. Mit AWAT2.0 wurde dieses Problem erfolgreich gelöst. Ein weiteres Problem lag darin, dass die Schwellenwertberechnung bei Umkehr der Fließrichtung zu einer kleinen aber systematischen Unterschätzung der Flüsse führt. Dieser systematische Fehler kann bei kleinen Ereignissen (z.B. Taufall) und häufigem Fließrichtungswechsel (Tag mit mehreren kleinen Schauern) zu erheblichen Unterschätzungen der aufaddierten ET und N führen. Dieses Problem wurde mit der Snap-Routine (AWAT3.0) behoben, sodass eine Quan-

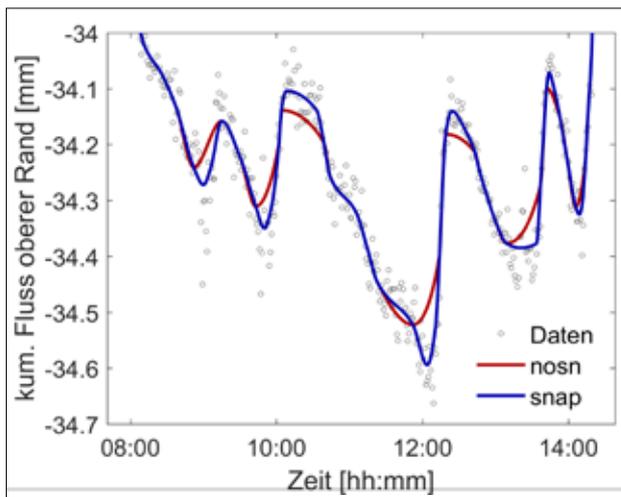


Abbildung 5: Reale Messungen mit dem TERENO-Großlysimeter an einem wechselhaften Tag mit häufigem Wechsel der Flussrichtung und durch AWAT2.0 (nosn) und AWAT 3.0 (snap) ermittelte Verläufe.

tifizierung der Wasserflüsse am oberen Rand der Lysimeter nun ohne systematische Fehler und in herausragender Auflösung vorgenommen werden kann. Wägbare Großlysimeter sind damit die präzisen Messgeräte für die Messung von Flüssen zwischen Boden und Atmosphäre. Eine Herausforderung für die Übertragbarkeit in die Fläche liegt darin, dass Evapotranspirationsflüsse vom Lysimeter zur Atmosphäre identisch zur Umgebung sein müssen, Lysimeter also genau die Eigenschaften sowie die hydrologischen und thermischen Verhältnisse des Freilandbodens reflektieren müssen.

## Literatur

- Allen R.G., Pereira L.S., Raes D., Smith M. (1998) Crop evapotranspiration: Guidelines for computing crop water requirements. FAO Irrigation and Drainage Paper 56, 300 pp.
- Fank J. (2013) Wasserbilanzauswertung aus Präzisionslysimeterdaten. In: 15. Gumpensteiner Lysimetertagung 2013, Lehr- und Forschungszentrum für Landwirtschaft Raumberg-Gumpenstein, Irnding, Österreich, 85-92.
- Hoffmann M., Schwartengraber R., Wessolek G., Peters A. (2016) Comparison of simple rain gauge measurements with precision lysimeter data. Atmos. Res. 174-175, 120-123.
- Michelson D.B. (2004) Systematic correction of precipitation gauge observations using analyzed meteorological variables. J. Hydrol., 290, 161-177.
- Nolz R., Kammerer G., Cepuder P. (2013) Interpretation of lysimeter weighing data affected by wind. Journal of Plant Nutrition and Soil Science 176, 200-208.
- 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, 1189-1198.
- Peters A., Nehls T., Schonsky H., Wessolek G. (2015) Ein neuer Filter zur Trennung von Niederschlägen, Evapotranspiration und Messrauschen aus Lysimetermessungen. In: 16. Gumpensteiner Lysimetertagung 2015, Lehr- und Forschungszentrum für Landwirtschaft Raumberg-Gumpenstein, Irnding, Österreich, 101-106.
- Peters A., Nehls T., Wessolek G. (2016) Technical note: improving the AWAT filter with interpolation schemes for advanced processing of high resolution data. Hydrol. Earth Syst. Sci. 20, 2309-2315.
- Peters A., Groh J., Schrader F., Durner W., Vereecken H., Pütz T. (2017) Towards an unbiased filter routine to determine precipitation and evapotranspiration from high precision lysimeter measurements. J. Hydrol. 549, 731-740.
- Savitzky A., Golay M. (1964) Smoothing and Differentiation of Data by Simplified Least Squares Procedures. Analytical Chemistry 36, 1627-1639.
- Schrader F., Durner W., Fank J., Gebler S., Pütz T., Hannes M., Wollschläger U. (2013) Estimating precipitation and actual evapotranspiration from precision lysimeter measurements. In: Four Decades of Progress in Monitoring and Modeling of Processes in the Soil-Plant-Atmosphere System: Applications and Challenges, editiert von: Romano, N., D'Urso, G., Severino, G., Chirico, G., und Palladino, M., Procedia Environmental Sciences, 543-552.
- Von Unold G., Fank J. (2008) Modular design of field lysimeters for specific application needs. Water, Air, & Soil Pollution: Focus 8, 233-242.
- Zacharias S., Bogena H., Samaniego L., Mauder M., Fuss R., Putz T., Frenzel M., Schwank M., Baessler C., Butterbach-Bahl K., Bens O., Borg E., Brauer A., Dietrich P., Hajnsek I., Helle G., Kiese R., Kunstmann H., Klotz S., Munch J.C., Papen H., Priesack E., Schmid H.P., Steinbrecher R., Rosenbaum U., Teutsch G., Vereecken H. (2011) A Network of terrestrial environmental observatories in Germany. Vadose Zone J. 10, 955-973.

