

Ein neuer Filter zur Trennung von Niederschlägen, Evapotranspiration und Messrauschen aus Lysimetermessungen

Andre Peters^{1*}, Thomas Nels¹, Horst Schonsky¹ und Gerd Wessolek¹

Zusammenfassung

Moderne wägbare Lysimeter bieten die präziseste Information für Evapotranspiration (ET) und Niederschlag (P). Da die wirklichen Signale durch Messrauschen (z.B. durch Wind) überlagert werden, müssen die Daten vor der Interpretation gefiltert werden.

Eine Herausforderung liegt darin, sowohl schwache Signale mit wenig Rauschen (kontinuierliche Evapotranspiration) als auch starke Signale (Starkniederschläge) oder starkes Rauschen (starker Wind) zu verarbeiten. Übliche Filter mit statischen Filtereinstellungen können nicht alle Ereignisse gleich gut behandeln. Es wird entweder zu stark oder zu schwach gefiltert, so dass vorhandene Information zum Systemverhalten verloren geht.

Wir stellen einen neuen Filter vor, der für alle Ereignisse eine sehr gute Filterung erreicht. Die neue Routine wendet adaptive Filtereinstellungen in Abhängigkeit von Signalstärke und Rauschen an (AWAT – Adaptive Window and Adaptive Threshold Filter). Der AWAT Filter und zwei andere häufig verwendete Filter wurden an einer realen Datenreihe mit sehr unterschiedlichen Ereignissen getestet. Nur der AWAT Filter konnte alle Ereignisse gut abbilden.

Summary

Modern weighable lysimeters yield the most precise and realistic measures for evapotranspiration (ET) and precipitation (P). As the real signals are overlain by noise (e.g. due to wind), they have to be filtered previous to interpretation.

Filter routines must deal with very different events, ranging from events with low signals and noise (continuous evaporation), to events with strong signals (heavy precipitation) or high noise (strong wind).

Filters with static filter parameters cannot handle all events equally well. They filter either too strong or too weak so that available information is lost.

We introduce a new filter, which is applicable to any event. The new routine uses adaptive filter parameters dependent on signal strength and noise (AWAT – Adaptive Window and Adaptive Threshold Filter). The AWAT filter and two other filters with static parameters have been tested with a real data set containing very different events. Only the AWAT filter could filter all data reasonably well.

Einleitung

Eine genaue Quantifizierung von Wasserflüssen zwischen dem Boden-Pflanzen-System und der Atmosphäre ist für viele Fragen hinsichtlich des Wasser-, Stoff- und Energiehaushalts im System Boden-Pflanze-Atmosphäre von großer Bedeutung. Der Fluss zum System Boden-Pflanze in einem bestimmten Zeitintervall wird als Niederschlag (P [mm]) bezeichnet, wobei zwischen Regen, Schnee und Tau unterschieden werden kann. Die Flüsse zur Atmosphäre sind Evaporation (E [mm]) und Transpiration (T [mm]), die oft als Evapotranspiration (ET [mm]) zusammengefasst werden.

Niederschläge werden häufig mit Standardmessgeräten 1 m über der Bodenoberfläche gemessen. Durch ihre Geometrie und der Lage über dem Boden unterliegen diese Messgeräte einer Vielzahl systematischer Fehler (MICHELSON 2004). Die Referenzevapotranspiration (ET_0 [mm]) kann mit der sogenannten Class-A-Pan gemessen werden. Auch diese Messungen unterliegen systematischen Fehlern durch Insel-effekte und unterschiedlicher Albedo zwischen Pflanzen und Wasser (IRMARK et al. 2002, GUNDEKAR et al. 2008).

Moderne wägbare Lysimeter bieten die präziseste Information für ET und P, da sie die oben genannten systematischen Fehler weitgehend ausschalten. Durch ihre relativ große Oberfläche sind auch zufällige Fehler gering. Dabei wird ein Ansteigen der Gesamtmasse (Lysimetermasse + Masse des Ausflusses am unteren Rand) als P und ein Abfallen als ET interpretiert. Eine Schwierigkeit bei dieser Interpretation besteht darin, dass die realen Signale durch Messrauschen (z.B. durch Wind) überlagert werden. Da die Messauflösung in den letzten Jahren immer besser geworden ist (MEISSNER et al. 2007, von UNOLD und FANK 2008), wird der Einfluss von Messrauschen in den Daten immer größer (RAMIER et al. 2004, NOLZ et al. 2013).

Wirkliche Signale können in zwei Schritten von Rauschen getrennt werden (FANK 2013, SCHRADER et al. 2013): (i) Glättung der Daten (z.B. gleitender Mittelwert) mit einem bestimmten Mittelungsfenster w [min]; (ii) Einführung eines Schwellenwertes, δ [mm], als Maß für die Messungenauigkeit, der signifikante von nicht signifikanten Masseänderungen trennt. Es werden also zwei Filterparameter, w und δ benötigt. Die Herausforderung liegt in der Wahl dieser

¹ Technische Universität Berlin, Institut für Ökologie, Standortkunde & Bodenschutz, Ernst-Reuter Platz 1, D-10587 BERLIN

* Ansprechpartner: Dr. Andre Peters, a.peters@mailbox.tu-berlin.de



beiden Parameter, da sowohl schwache Signale mit wenig Rauschen (kontinuierliche Evapotranspiration) als auch starke Signale (Starkniederschläge) oder starkes Rauschen (starker Wind) auftreten können. Wenn w oder δ zu klein sind, kann Rauschen als Signal gedeutet werden. Sind sie hingegen zu groß, werden kleine, tatsächliche Signale in kleinen Zeitintervallen nicht als solche erkannt. Starkregenereignisse (starke Signale), zum Beispiel, brauchen kleine w , während Ereignisse mit kleinen Signalen (Evaporation, Wind) große w brauchen. Ähnliches gilt für δ . Die Wahl von konstanten w und δ führt somit entweder zu einem Verlust an Genauigkeit oder zu teilweise gestörten Daten.

In diesem Beitrag soll eine neue Filterroutine vorgestellt werden, die diese Probleme löst und für alle Ereignisse anwendbar ist. Die neue Routine passt w und δ in Abhängigkeit von Signalstärke und Rauschen an (AWAT - Adaptive Window and Adaptive Threshold Filter). Der AWAT Filter und zwei andere Filter, die mit konstanten w und δ arbeiten, werden an einer realen Datenreihe mit sehr unterschiedlichen Ereignissen getestet.

Material und Methoden

Lysimeterdaten

Die Messungen wurden in der Lysimeterstation Marienfelde, Berlin durchgeführt. Das Lysimeter war 1.5 m tief und hatte eine Oberfläche von 1 m². Die Masse des Lysimeters wurde mit einer Balkenwaage in Kombination mit einer Laborwaage (Auflösung 0.01 g) aufgezeichnet. Die Auflösung für die Lysimeterwaage war 80 g, was bei einer Oberfläche von 1 m² und einer Dichte des Wassers von $\approx 1000 \text{ kg m}^{-3}$ einer Auflösung von 0.08 mm entspricht. Der untere Rand des Lysimeters war freidrähend. Das ausfließende Wasser am unteren Rand wurde direkt mit einer Waage mit 5 g Auflösung gemessen.

Das Lysimeter war mit einem teilweise hydrophoben Material einer Podsol-Braunerde aus Niederlehme, Brandenburg befüllt. Der Boden wurde vegetationsfrei gehalten, so dass die Evapotranspiration zur Evaporation reduziert war. Die Daten für diese Studie wurden vom 25. Mai bis zum 6. Oktober 2012 mit einer zeitlichen Auflösung von 1 min aufgenommen.

Datenaufbereitung

Die Gesamtmasse des Systems M [kg] ist die Summe der Lysimetermasse M_{lys} [kg] und des Ausflusses M_{out} [kg]: $M = M_{\text{lys}} + M_{\text{out}}$. Beginnend mit dem Zeitpunkt t_0 mit der Anfangsmasse M_0 [kg] kann der kumulative Fluss am oberen Rand des Lysimeters mit $F(t) = M(t) - M_0$ beschrieben werden. Mit den oben genannten Angaben zur Geometrie des Lysimeters und der Dichte des Wassers ist der kumulierte Fluss in kg gleich dem kumulierten Fluss in mm.

Um den neuen Filter zu testen wurden drei Referenzereignisse mit sehr unterschiedlichen Bedingungen ausgewählt: a) gleichmäßige Evaporation (6. July), b) Starkregen (21. August) und c) starker Wind mit wenig Evaporation (23. September). Der gesamte Verlauf und die drei Ereignisse sind in *Abbildung 1* dargestellt.

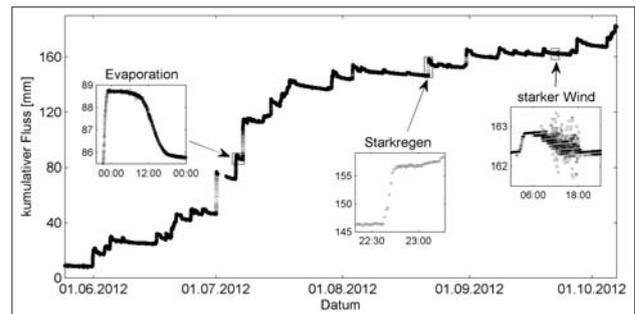


Abbildung 1: Rohdaten zu kumulativen Flüssen am oberen Rand des Lysimeters für den Zeitraum vom 25. Mai bis zum 6. Oktober 2012 mit den drei Referenzereignissen. Verändert aus PETERS et al. (2014).

Theorie

Berechnung von ET und P aus kumulierten Fluss

Eine Grundannahme bei der Bestimmung von ET und aus Lysimetermessungen ist, dass in einem kurzen Zeitintervall entweder Niederschlag oder Evapotranspiration, aber nicht beides stattfindet. Mit dieser Annahme und bei perfekten Daten wird jede Massenänderung als ET oder als P interpretiert (SCHRADER et al. 2013):

$$P = \begin{cases} \Delta M & \text{wenn } \Delta M > 0 \\ 0 & \text{wenn } \Delta M \leq 0 \end{cases} \quad \text{Gl [1]}$$

$$ET = \begin{cases} \Delta M & \text{wenn } \Delta M < 0 \\ 0 & \text{wenn } \Delta M \geq 0 \end{cases}$$

Wobei ΔM [kg] die Massenänderung des Systems in einem bestimmten Zeitintervall ist. Da Lysimetermessungen immer mit Messrauschen verbunden sind, kann ΔM auch Rauschen sein. Daher gilt Gl. [1] nur, wenn zuvor das Messrauschen aus den Daten gefiltert wurde. Dabei ist es wichtig nicht zu stark zu filtern, weil sonst tatsächliche Signale nicht erkannt werden und somit sowohl P als auch ET unterschätzt werden, aber auch nicht zu wenig zu filtern, weil sonst P und ET überschätzt werden.

Trennung P und ET von Messrauschen – genereller Ansatz

Für Lysimeterstudien hat es sich als praktisch erwiesen, die Signale in zwei Schritten vom Rauschen zu trennen (FANK 2013, SCHRADER et al. 2013): Im ersten Schritt wird eine Glättung der Daten, z.B. durch einen simplen gleitenden Mittelwert (GM) oder den Savitzky-Golay (SG) Filter (SAVITZKY und GOLAY 1964), durchgeführt. Dabei wird eine bestimmte Fensterbreite w [min] gewählt. Für jeden einzelnen Zeitpunkt wird eine Mittelung der Daten innerhalb dieses Intervalls w errechnet. Beim GM ist dies der arithmetische Mittelwert, während es beim SG eine gewichtete Mittelung ist.

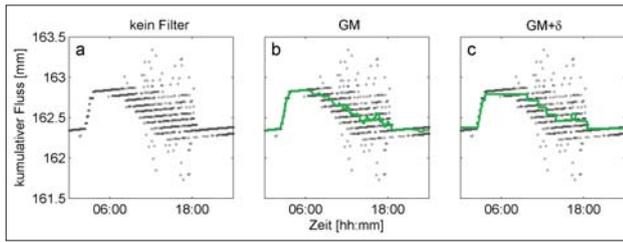


Abbildung 2: Gemessener kumulativer Fluss am oberen Rand für den 23. September 2013 mit gleitendem Mittelwert (Mitte) und zusätzlichem Grenzwert (rechts). Fensterbreite, w war 31 min und Grenzwert δ war 0.081 mm. Verändert aus PETERS et al. (2014).

Im zweiten Schritt wird dann ein Grenzwert δ [mm] eingeführt, der überschritten werden muss, damit eine Änderung ΔM als Signal angenommen wird. Dadurch werden signifikante von nichtsignifikanten Änderungen getrennt. Diese Vorgehensweise ist schematisch in *Abbildung 2* für das Ereignis mit dem starken Wind dargestellt.

Ein Problem dieser Vorgehensweise ist, dass im ersten Schritt die gleitende Mittelung mit einem starren Mittelungsfenster w errechnet werden muss, obwohl bei sehr langsamen Änderungen (kleines Signal) große w und bei sehr schnellen Änderungen (starkes Signal – z.B. Starkregen) kleine w vorteilhaft wären. Dasselbe gilt für den Grenzwert δ : Bei geringem Rauschen sollte δ klein sein, während er bei starkem Rauschen (starker Wind) groß sein sollte.

Neuer Filter – AWAT

Wir schlagen einen neuen adaptiven Filter (**A**daptive **W**indow **A**daptive **T**hreshold Filter - AWAT) vor (PETERS et al. 2014), der in drei Schritten arbeitet (*Abbildung 3*). Im ersten Schritt wird eine maximale Fensterbreite w_{\max} [min]

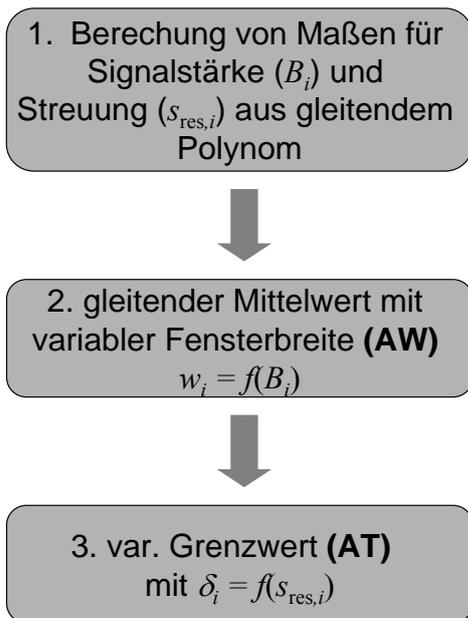


Abbildung 3: Schema des Adaptive Window and Adaptive Threshold Filters (AWAT). Verändert aus PETERS et al. (2014).

definiert. Innerhalb dieses Fensters werden Informationen für Signalstärke und Rauschen für jeden Zeitpunkt ermittelt. Dies wird erreicht, indem innerhalb von w_{\max} ein Polynom n -ter Ordnung an die Daten angepasst wird und im Anschluss Maße für Signalstärke (B [-]) und für Rauschen (s_{res} [mm]) abgeleitet werden. Das Maß für Rauschen, s_{res} ist dabei die Streuung der Daten um das Polynom:

$$s_{\text{res},i} = \sqrt{\frac{1}{r} \sum_{j=1}^r (y_i - \hat{y}_i)^2} \quad \text{GI [2]}$$

wobei r die Anzahl der Daten in dem Zeitfenster ist und y_i und \hat{y}_i die gemessenen Daten, bzw. die mit dem Polynom geschätzten Werte sind. Das Maß für die Signalstärke ergibt sich aus

$$B_i = \frac{s_{\text{res},i}}{s_{\text{dat},i}} \quad \text{GI [3]}$$

Wobei s_{dat} [mm] die Streuung der Daten in dem Zeitfenster ist:

$$s_{\text{dat},i} = \sqrt{\frac{1}{r} \sum_{j=1}^r (y_i - \bar{y}_i)^2} \quad \text{GI [4]}$$

mit \bar{y}_i als Mittelwert der gemessenen Werte. B_i lässt sich aus

$$B_i = \sqrt{1 - R^2}$$

berechnen, wobei R^2 das Bestimmtheitsmaß ist.

Im zweiten Schritt wird ein gleitendes arithmetisches Mittel mit variabler Fensterbreite berechnet, wobei die Fensterbreite, w_i für jeden Datenpunkt i direkt vom Maß für die Signalstärke B_i abhängt:

$$w_i = \max(1; B_i w_{\max}) \quad \text{GI [5]}$$

Die Fensterbreite ist also mindestens 1 (wenn B_i nahe 0 ist) und maximal so groß wie das Fenster in dem das Polynom berechnet wurde. Das heißt bei großer Signalstärke wird kaum oder gar nicht und bei geringer Signalstärke wird maximal geglättet.

Im dritten Schritt wird ein variabler Grenzwert δ_i als Funktion von s_{res} definiert:

$$\delta_i = \begin{cases} \delta_{\max} & \text{wenn } s_{\text{res},i} \cdot t_{97.5,r} \geq \delta_{\max} \\ \delta_{\max} & \text{wenn } \delta_{\min} < s_{\text{res},i} \cdot t_{97.5,r} < \delta_{\max} \\ \delta_{\min} & \text{wenn } s_{\text{res},i} \cdot t_{97.5,r} \leq \delta_{\min} \end{cases} \quad \text{GI [6]}$$

wobei δ_{\min} und δ_{\max} der minimale und maximale Grenzwert sind und $t_{97.5,r}$ der t -Wert für das 95% Konfidenzintervall ist. Der minimale Grenzwert ist gegeben durch die Auflösung der Waagen (0.08 mm). Für große Werte für s_{res} (starkes Rauschen) ist δ damit groß und für kleine Werte für s_{res} ist δ klein. Eine genauere Beschreibung des AWAT-Filters ist in PETERS et al. (2014) gegeben.

Ergebnisse

Um den AWAT-Filter zu testen wurde er mit zwei anderen Filtern verglichen. Zum einen wurde ein simple gleitender Mittelwert (GM) und zum anderen der Savitzky-Golay

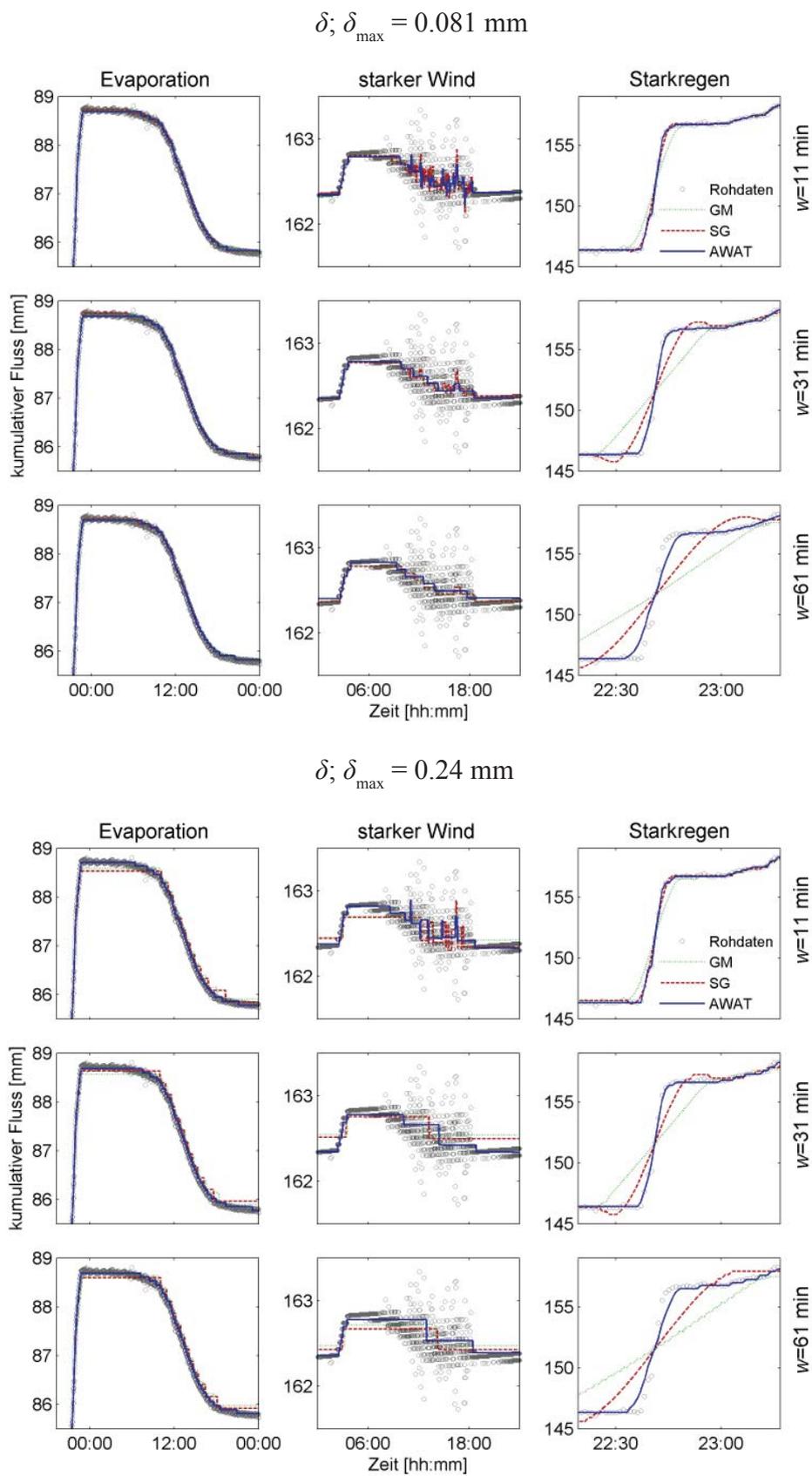


Abbildung 4: Daten der drei Referenzereignisse mit den Filtervarianten. Oben: δ , bzw. $\delta_{\max} = 0.081 \text{ mm}$; unten: δ , bzw. $\delta_{\max} = 0.24 \text{ mm}$. Verändert aus PETERS et al. (2014).

Filter (SG) mit konstanter Fensterbreite w und konstantem Grenzwert δ auf die Daten angewendet. Für alle drei Filter wurden drei Fensterbreiten ($w = 11, 31$ und 61 min) und 2 Grenzwerte ($\delta = 0.081$ und 0.24 mm) getestet. Die Fensterbreite w und der Grenzwert δ für GL und SG entsprechen w_{\max} und δ_{\max} beim AWAT-Filter. Somit arbeiten alle Filter mit der gleichen Anzahl an Filterparametern die vorab festgelegt werden müssen.

Abbildung 4 oben, zeigt die Daten der drei Referenzereignisse aus Abbildung 1 und die angewendeten Filter mit unterschiedlicher Fensterbreite und δ , bzw. $\delta_{\max} = 0.081$ mm. Mit einer Fensterbreite von 11 min kann sowohl das Starkregenereignis als auch das Evaporationsereignis mit GL oder SG sehr gut beschrieben werden. Allerdings ist das Ereignis mit starkem Wind ungenügend gefiltert. Hier würde eine starke Überschätzung sowohl von P als auch von E stattfinden. Bei Vergrößerung der Fensterbreite auf 31 oder 61 min werden die Daten des Windereignisses besser gefiltert, allerdings auf Kosten der Qualität beim Starkregenereignis, bei dem eine zu starke Glättung vorgenommen wird. Der SG-Filter neigt zusätzlich zur Oszillation bei Starkregenereignissen, was wiederum zur Überschätzung der Wasserflüsse führt. Auch eine Vergrößerung von δ führt nicht zu einer günstigeren Filterung bei allen Ereignissen (Abbildung 4 unten). Zwar wird das Rauschen der Daten beim Windereignis bei einer Fensterbreite von 31 min jetzt stärker gefiltert, allerdings auf Kosten der Genauigkeit beim Evaporationsereignis.

Bei $\delta_{\max} = 0.081$ mm ist der AWAT-Filter schon gut in der Lage Rauschen von Signal zu trennen (Abbildung 4 oben). Mit variablen w und δ kann der AWAT-Filter bei $w_{\max} = 31$ min und $\delta_{\max} = 0.24$ mm die Daten aller Ereignisse sehr gut filtern, da die Daten des Starkregenereignisses mit kleinem w und die des Windereignisses mit großem w geglättet wurden. Zusätzlich wurde δ beim Evaporationsereignis klein und beim Windereignis groß gewählt.

Abbildung 5 links zeigt die kumulativen Evaporationen und Niederschläge für den Messzeitraum, wie sie mit den drei

Filtervarianten (GM, SG und AWAT) bei Variation von d bzw. δ_{\max} berechnet wurden. Die Fensterbreite w , bzw. w_{\max} war in diesem Fall auf 31 min festgelegt. Für die GM- und SG-Filter werden bei größeren Werten für δ immer geringere kumulierte ET und P berechnet. Beim AWAT-Filter hingegen spielt die Größe für δ_{\max} keine Rolle, wenn sie nicht zu gering (z.B. 0.08 mm) gewählt wird. Das heißt, dass, im Gegensatz zu den GM- und SG-Filtern, bei dem AWAT-Filter die Ergebnisse nicht sensitiv auf den Filterparameter δ_{\max} sind. Die Wahl von w , bzw. w_{\max} hat bei allen drei Filtern einen großen Einfluss auf die Ergebnisse.

Schlussfolgerungen

Für die unterschiedlichen Referenzereignisse waren sowohl der gleitende Mittelwert als auch der Savitsky-Golay-Filter mit konstanter Fensterbreite und konstantem Grenzwert nicht in der Lage ET und P von Messrauschen adäquat zu trennen. Der neue AWAT-Filter mit der gleichen Anzahl an Filterparametern wie die beiden anderen war hingegen sehr gut in der Lage die Daten zu beschreiben.

Bei dem AWAT-Filter muss der Grenzwertparameter nicht vom Nutzer festgelegt werden, wenn er groß genug gewählt wird. Damit muss der Nutzer nur die maximale Fensterbreite festlegen.

Literatur

- FANK, J., 2013: Wasserbilanzauswertung aus Präzisionslysimeterdaten. In: 15. Gumpensteiner Lysimetertagung 2013, Lehr- und Forschungszentrum für Landwirtschaft Raumberg-Gumpenstein, Irnding, Österreich, 85-92.
- GUNDEKAR, H.G., U.M. KHODKE, S. SARKAR and R.K. RAI, 2008: Evaluation of pan coefficient for reference crop evapotranspiration for semi-arid region. Irrigation Science 26, 169-175.
- IRMARK, S., D.Z. HAMAN and J.W. JONES, 2007: Evaluation of Class A pan coefficients for estimating reference evapotranspiration in humid location. Journal of Irrigation and Drainage Engineering 128, 153-159.
- MEISSNER, R., J. SEEGER, H. RUPP, M. SEYFARTH and H. Borg, 2007: Measurement of dew, fog, and rime with a high-precision gravitation lysimeter. Journal of Plant Nutrition and Soil Science 170, 335-344.

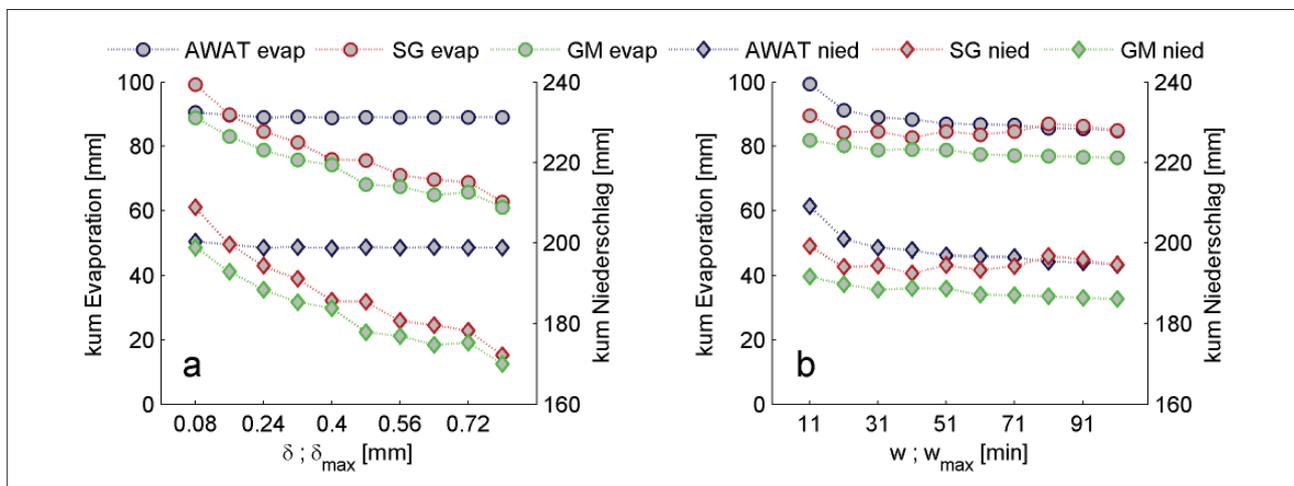


Abbildung 5: Berechnete kumulative Evaporation und Niederschlag für gesamten Messzeitraum. Links: δ (GM und SG), bzw. δ_{\max} (AWAT) wurde variiert; rechts: w (GM und SG), bzw. w_{\max} (AWAT) wurde variiert. Verändert aus PETERS et al. (2014).

- MICHELSON, D.B., 2004: Systematic correction of precipitation gauge observations using analyzed meteorological variables. *Journal of Hydrology* 290, 161-177.
- NOLZ, R., G. KAMMERER and P. CEPUDER, 2013: Interpretation of lysimeter weighing data affected by wind. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science* 176, 200-208.
- PETERS, A., T. NEHLS, H. SCHONSKY and G. Wessolek, 2014: Separating precipitation and evapotranspiration from noise – a new filter routine for high-resolution lysimeter data. *Hydrology and Earth System Sciences* 18, 1189-1198.
- RAMIER, D., E. BERTHIER and H. Andrieu, 2004: An urban lysimeter to assess runoff losses on asphalt concrete plates. *Physics and Chemistry of the Earth* 29, 839-847.
- SAVITZKY, A. and M. GOLAY, 1964: Smoothing and Differentiation of Data by Simplified Least Squares Procedures. *Analytical Chemistry* 36, 1627-1639.
- SCHRADER, F., W. DURNER, J. FANK, S. GEBLER, T. PÜTZ, M. HANNES and U. WOLLSCHLÄGER, 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. and Palladino, M., *Procedia Environmental Sciences*, 543-552.
- VON UNOLD, G. and J. FANK, 2008: Modular design of field lysimeters for specific application needs. *Water, Air, & Soil Pollution: Focus* 8, 233-242.