

# Wasserhaushaltsmodellierung an verschiedenen Lysimeterstandorten mit Hilfe eines konzeptuellen, modularen Bilanzmodells

Hubert Holzmann<sup>1\*</sup> und Klara Stangl<sup>1</sup>

## Zusammenfassung

Die Wasserhaushaltsbilanzierung im Rahmen hydrologischer Fragestellungen erfolgt vorwiegend mit Hilfe konzeptueller Modellansätze. Darin wird die Bodenkomponente oft als Einzel- oder Mehrfachspeicher mit linearen oder nichtlinearen Abflussanteilen beschrieben, welche zwischen raschen und langsamen Abflusskomponenten unterscheiden. Im Rahmen eines Forschungsprojektes wurde ein modulares Abflussmodell entwickelt, welches die Bodenkomponente und die Interaktion mit Oberflächenprozessen in unterschiedlichen Komplexitätsgraden widerspiegelt. Die Überprüfung erfolgte an verschiedenen Skalenbereichen, u.a. auch auf dem Plotmaßstab anhand von Lysimeterbeobachtungen (Lysimeter Castricum, Holland). Aus fünf verschiedenen Modellstrukturen konnte ein Modell als das am besten geeignete identifiziert werden mit einem Effizienzmaß nach Nash-Sutcliffe von 0,75. Diese Struktur wurde auch an einem unabhängigen Standort (Lysimeteranlage Wagna) validiert. Als wesentlich zeigte sich die Festlegung einer raschen und langsamen Abflusskomponente und die Berücksichtigung eines Verzögerungsmoduls, um die Speicherkapazität des Großlysimeters zu berücksichtigen.

*Schlagwörter:* Hydrologische Modellierung, Modellarchitektur, Modellvalidierung

## Summary

In the frame of hydrological modelling conceptual model types are frequently applied. Herein the physical processes of water transport along the boundary layer of soil, vegetation and atmosphere are often simplified by a sequence of linear or non-linear storages, which enable a distinction between quick and slow runoff response. In a research project a modular, conceptual model was tested and validated for different spatial scales. The domain of the plot scale was represented by lysimeter observations, where the drainage water was considered as the hydrological variable of interest. Different degrees of model complexity were compared and interrelated. The Nash-Sutcliffe efficiency could be increased by the stepwise model adaption process and reached values of 0,75 (calibration) and 0.58 (validation). Best results could be gained by integrating quick and slow runoff components (linear storages) and a delay function to consider storage effects along the lysimeter domain.

*Keywords:* hydrological modelling, model design, model validation

## Einleitung und Standortsbeschreibung

Die hydrologische Modellierung hat zum Ziel, Wasserhaushaltsgrößen in verschiedenen Skalenbereichen zu beschreiben und zu quantifizieren. Dabei ist unter anderem die Modellierung der Interaktion hydrologischer Subprozesse, insbesondere der dominanten Prozesse, von großer Bedeutung. Die Auflösung der Detailprozesse hängt vom gewählten Komplexitätsgrad des jeweiligen Modells ab. Einfache Modellansätze haben den Vorzug der geringeren Parameteranzahl, sind daher leichter und eindeutiger kalibrierbar. Komplexere Modellstrukturen vermögen die Subprozesse differenzierter darzustellen. Im Zuge eines Forschungsprojektes (HOLZMANN et al. 2013) wurde die Möglichkeit einer modularen Wasserbilanzmodellierung geprüft, in der unterschiedliche Modellstrukturen getestet wurden. Dies erfolgte an abgestuften Maßstabsbereichen, im Speziellen für Kleineinzugsgebiete, Hangskale und den Plotmaßstab. Für den Plotbereich wurden Lysimeterstandorte verglichen. Es handelte sich dabei um den Großlysimeterstandort Castricum in den Niederlanden (vgl. HOEVEN 2011). Diese

Anlage beinhaltet Großlysimeter u.a. mit Baumvegetation. Zur Validierung der daraus gewonnenen Modellgeometrie wurden Daten der Lysimeteranlage Wagna vom Joanneum Research (FANK und UNOLD 2007) verwendet.

Die Lysimeteranlage Castricum wurde von der Wasserversorgungsgesellschaft Provincial Watersupply Company Northholland (PWN) errichtet. Ziel der Anlage war die Erforschung der Wasserspeicherung und Abgabe des Quellgebietes für die Sicherung der Wasserversorgung. Die Anlage besteht aus 4 Lysimetern mit unterschiedlicher Vegetationsbedeckung (vgl. *Abbildung 1*).

- Lysimeter 1 – ohne Bewuchs
- Lysimeter 2 – natürliche Dünenvegetation (büschiger Bewuchs)
- Lysimeter 3 – Laubwald mit Hauptanteil Eichen
- Lysimeter 4 – Pinienwald (*Pinus Nigra Austriaca*)

Die Becken bestanden aus Betonbecken mit einer Fläche von 25x25 Metern und 2.50m Tiefe. Der Abfluss erfolgt durch einen Drainagebrunnen. Bis zum Ende der Anlage

<sup>1</sup> Institut für Wasserwirtschaft, Hydrologie und konstruktiven Wasserbau, Universität für Bodenkultur Wien, Muthgasse 18, A-1190 WIEN

\* Ansprechpartner: ao.Univ.-Prof. DI Dr. Hubert Holzmann



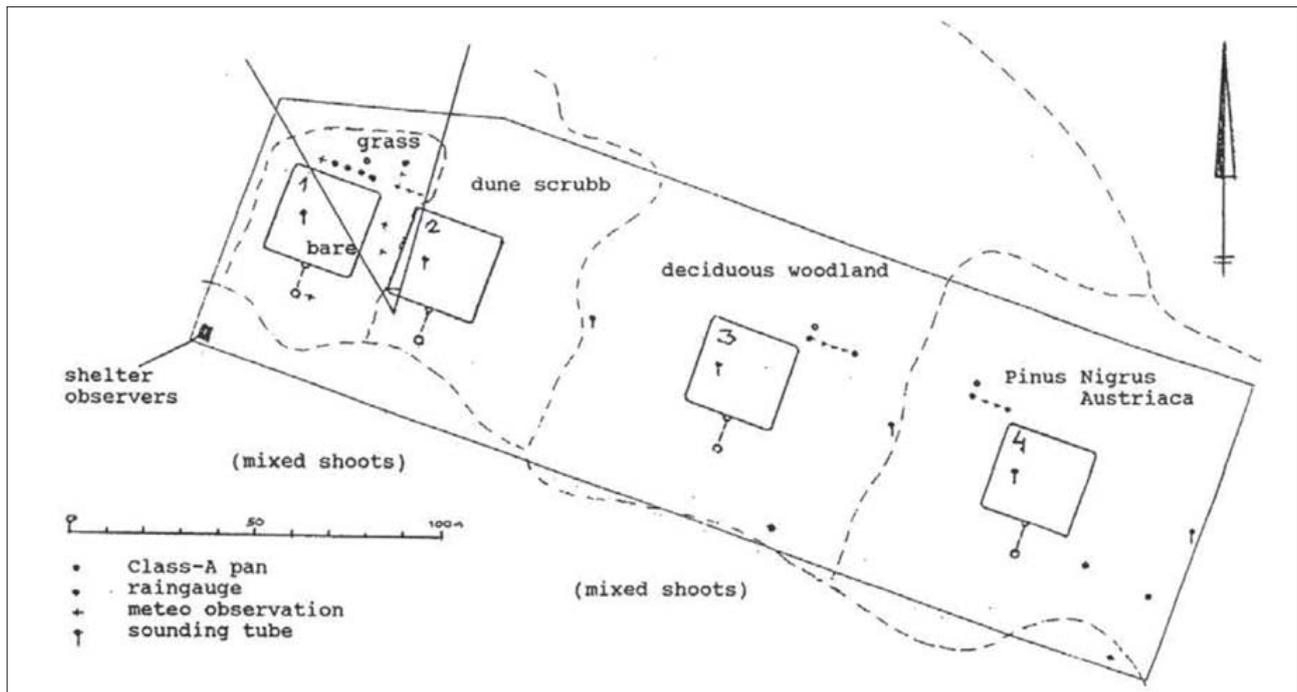


Abbildung 1: Lageplan der Lysimeteranlage Castricum.

war sie die größte seiner Art auf der Welt. Die verfügbaren Messungen reichen über 30 Jahre von Juni 1941 bis Jänner 1972. Der Abfluss aus den Lysimeter wurde einmal täglich um 8 Uhr gemessen.

## Methodik

Bei der konzepthaften Betrachtung der Abflussbildung bzw. des Wassertransportes können folgende Schlüsselprozesse identifiziert werden: (1) Speicherprozesse (Interzeption, Boden), (2) Translationsprozesse (Routing, Verlagerung) und (3) Schwellenwertprozesse (Perkolation, Sättigungsabfluss) und (4) Aufteilungsprozesse (Infiltration versus Oberflächenabfluss). Im modularen Modell BOKUMod gibt es dazu folgende Komponenten:

- Schmelze (Schnee / Gletscher)
- Interzeption (Vegetation / Streu)
- Einfacher Linearspeicher
- Vorregenindex API
- Verzweigungsfunktion
- Wurzelspeicher
- Speicher mobiles Bodenwasser
- Grundwasserspeicher
- Speicherkaskade
- Verzögerungsfunktion.

Diese Komponenten können in beliebiger Abfolge angeordnet und kombiniert werden. In *Abbildung 2* sind zwei Varianten zur Beschreibung des Wassertransportes in einem Lysimeter beispielhaft angeführt. Sie entsprechen den untersuchten Modellstrukturen der Varianten 1 und 4 (vgl. auch *Abbildung 3*). Primäres Ziel war die Festlegung einer optimalen Modellkonfiguration, welche eine bestmögliche Wiedergabe der

Sickerraten ermöglicht. Die Vorgangsweise beinhaltete folgende Bearbeitungssequenzen: (1) Festlegung einer primären Modellstruktur, (2) automatisierte Kalibrierung der Modellparameter, (3) Herleitung und Interpretation von Defiziten aus der Ganglinienanalyse, (4) Adaptierung / Ergänzung der Modellgeometrie und (5) Prüfung des Verbesserungspotentials anhand eines Effizienzkriteriums. Diese Schritte wurden anhand von fünf Modellrealisationen durchlaufen. Die generierten Modellvarianten sind im nachfolgenden Kapitel dargestellt. Jede Modellstruktur wurde an allen 4 Lysimetern angewendet. Der Parametersatz wurde mittels einer globalen Optimierung ermittelt wobei als Gütemaß das Kriterium nach NASH und SUTCLIFFE (1970) unter Zugrundelegung der beobachteten und simulierten Sickerwasserraten herangezogen wurde.

Die Kalibrierungsphase dauert 10 Jahre von Anfang 1952 bis Ende 1961, wobei das erste Jahr 1952 als Aufwärmphase gewählt und für die Optimierung nicht verwendet wurde. Die Validierungsphase dauerte von Anfang 1962 bis Ende 1968. Die Parameter wurden automatisch mittels einer globalen Optimierung optimiert. Als Programm wurde die Software PEST (Version 12.3, Watermark Numerical Computing) verwendet. Der Algorithmus basiert auf dem Konzept der „shuffled complex evolution (SCE), wie er von DUAN et al. (1992) beschrieben wurde.

Die Berechnung der Evapotranspiration erfolgte mithilfe der von der FAO empfohlenen Formel nach Penman-Monteith wie bei ALLEN et al. (1998) beschrieben. Mithilfe dieser Formel wird die Evapotranspiration für eine hypothetische Referenzgrasoberfläche berechnet. Zur Berücksichtigung der unterschiedlichen Eigenschaften verschiedener Vegetationsdecken, wird optional ein „Crop Factor“ eingeführt. Dieser Wert mit der Referenzevaporation multipliziert, ergibt die potentielle Verdunstung der jeweiligen Vegeta-

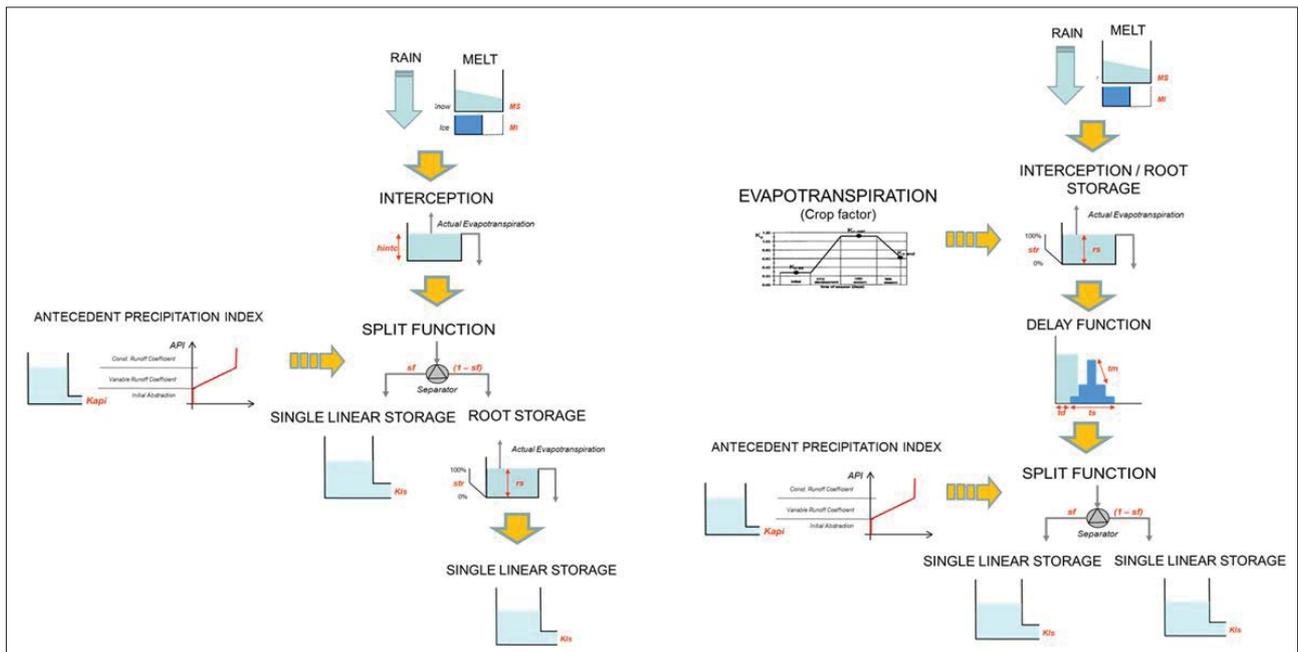


Abbildung 2: Modulare Abfolge der Teilprozesse in einer Lysimeteranlage. Variante 1 (links), Variante 4 (rechts).

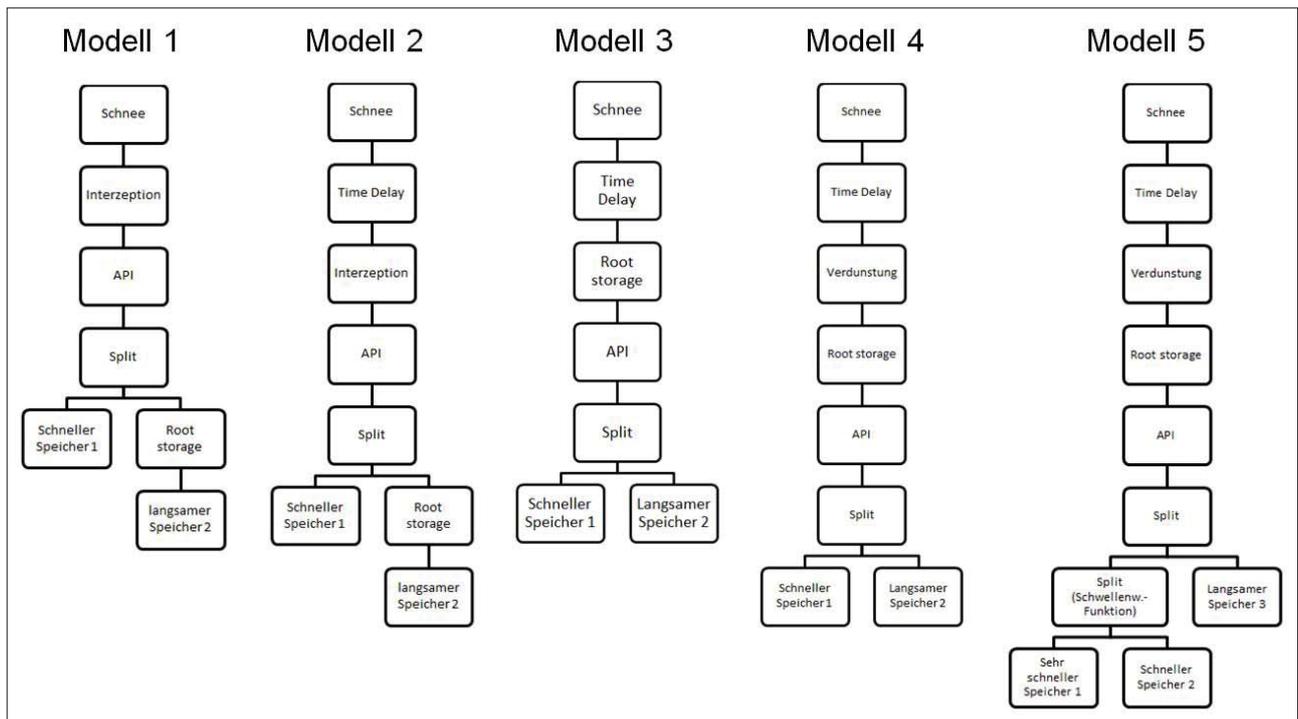


Abbildung 3: Untersuchte Modellstrukturen (Varianten 1 bis 5).

tion bzw. Feldfrucht (Crop). Tabellarisierte Crop Faktoren reichen von 0.4 – 1.2. Da die Formel vor allem für die Landwirtschaft und hier vor allem für die Bewässerung entwickelt wurde, gibt es nur wenige tabellarisierte Werte für natürliche Pflanzendecken.

## Ergebnisse

Mit Hilfe der verschiedenen Module wurde ausgehend vom „subjektiven“ Verständnis eine erste Modelstruktur entwi-

ckelt und erprobt. Als Leitbild galt, die Struktur solle „so einfach wie möglich und so komplex wie notwendig“ sein. In *Abbildung 3* sind die Entwicklungsstufen der einzelnen Modellrealisationen aufgezeichnet. Unterschiede ergaben sich vor allem in der separaten oder zusammengefassten Modellierung des Interzeption- und Wurzelspeichers, der Einführung eines Translationsterms (Time Delay) und der Aufteilung in langsamen und beschleunigten Abflussanteil sowie die optionale Verwendung eines Crop Faktors.

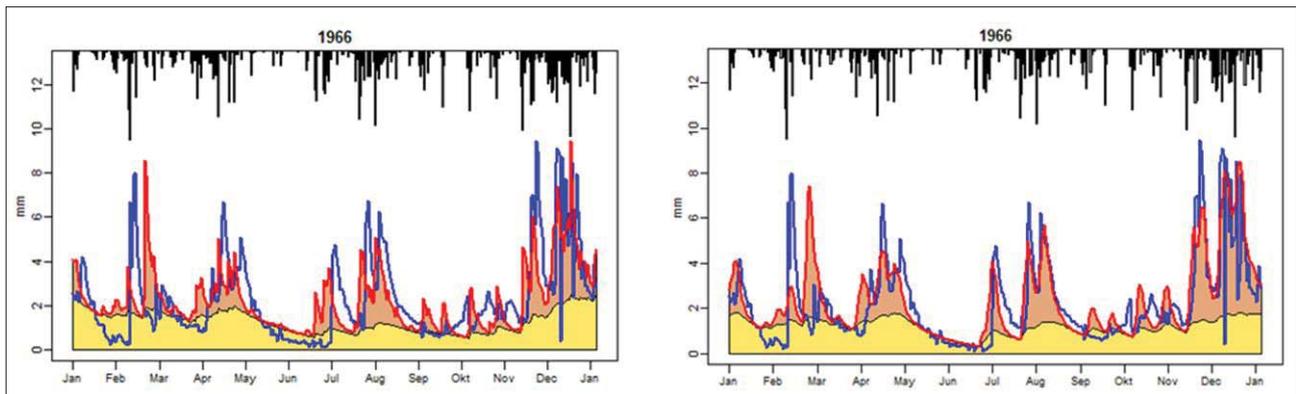


Abbildung 4: Niederschlag und Sickeraten in mm/Tag am unbewachsenen Lysimeter 1 für das Validierungsjahr 1966. Beobachtete (schwarze Linie) und simulierte (grau hinterlegt) Sickeraten. Modell 1 (links) und Modell 3 (rechts).

Tabelle 1: Effizienzmaße nach Nash-Sutcliffe der 5 Modellstrukturen an den vier Lysimeterstandorten differenziert nach Kalibrierungs- (Kal) und Validierungsphase (Val).

	Modell 1 (n=13)		Modell 2 (n=14)		Modell 3 (n=11)		Modell 4 (n=15)		Modell 5 (n=17)	
	Kal	Val								
Lysimeter 1	0.22	0.29	0.55	0.48	0.53	0.54	0.57	0.57	0.50	0.54
Lysimeter 2	0.38	0.31	0.61	0.48	0.73	0.52	0.75	0.57	0.73	0.56
Lysimeter 3	0.39	0.23	0.67	0.45	0.70	0.44	0.71	0.58	0.74	0.54
Lysimeter 4	0.55	0.38	0.70	0.40	0.72	0.42	0.74	0.50	0.75	0.51

Beispielhaft ist in *Abbildung 4* der Entwicklungsschritt von Modell 1 zu Modell 3 anhand der Sickerwassermengen dargestellt. Durch Hinzunahme eines Translationsterms (Time Delay) und der Zusammenfassung von Interzeptions- und Wurzelspeicher wurden vor allem die Sickerwasserspitzen Juli/August und November/Dezember, die in der Variante 1 zu früh modelliert wurden, deutlich besser getroffen. Generell wurde dadurch das NS-Effizienzmaß von 0,29 auf 0,54 erhöht.

Die Ergebnisse der Kalibrierung zeigen für die Modellstrukturen 3 bis 5 annähernd gleiche Gütemaße (vgl. *Tabelle 1*), die Validierung weist jedoch Modell 4 als das Beste aus (siehe *Abbildung 5*). *Tabelle 1* zeigt auch die Anzahl der Parameter der einzelnen Modellrealisationen. Modell 3 hat mit 11 Parametern die geringste, Modell 5 mit 17 Parametern die höchste Parameteranzahl.

Die optimale Modellkonfiguration (Variante 4) wurde auch an der Lysimeteranlage Wagna überprüft, wobei das Referenzlysimeter mit Grasbewuchs herangezogen wurde. Auch hier waren die Ergebnisse zufriedenstellend (vgl. *Abbildung 6*).

Es wurde mit Tagessummen modelliert. Die Parameter wurden wieder automatisch kalibriert. Die Kalibrierung erfolgte von 1. Juni 2006 bis 31. Dezember 2008. Als Aufwärmphase wurde die Zeit bis zum 1. Jänner 2007 nicht gewertet. Die Validierung erfolgte für das Jahr 2009. Die Kalibrierung lieferte ein NS-Effizienz von 0,58, die Validierung von 0,28. Gut wurde dabei die Abfolge von Trocken- und Feuchtphasen modelliert, d.h. die Pausen zwischen den Versickerungsperioden und das darauffolgende „Anspringen“ des Sickerwasserzuflusses sind gut wiedergegeben. Dies deutet auf eine korrekte Festlegung der Verdunstungs- und Bodenspeicherkapazitäten hin. Die Sickerwasserspitzen im

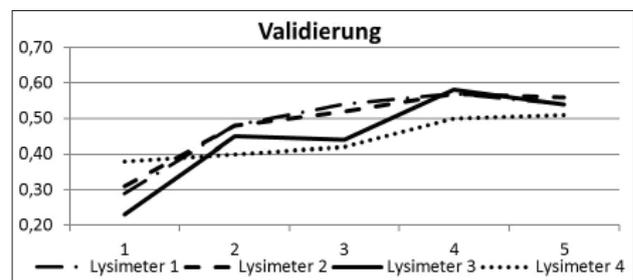


Abbildung 5: Effizienzmaße nach Nash-Sutcliffe der 5 Modellstrukturen an den vier Lysimeterstandorten.

März und April 2007 wurden unterschätzt, der abklingende Verlauf der Sickerwasserereignisse wurde im Modell überschätzt. Hier könnte durch Nachjustierung der Aufteilungsfunktion (Split-Funktion) zwischen raschen und langsamen Linearspeichern eine Verbesserung erzielt werden.

## Diskussion und Schlussfolgerung

Es hat sich gezeigt, dass Lysimeteranlagen neben der konventionellen Anwendung zur Messung der Stoffflüsse auch gut geeignet sind um hydrologische Prozesse an der Grenzschicht Boden-Atmosphäre zu prüfen und deren modellhafte Beschreibung zu unterstützen. Besonders nutzbringend ist dabei die Verfügbarkeit von zeitlich hochaufgelösten Zeitreihendaten bezüglich der Speicherwirkung des Bodens und der oftmals nichtlinearen Systemzusammenhänge von Infiltration, Speicherinhalt (Bodenwassergehalt) und Sickerwasserabfluss. Dies ermöglichte für die gegenständliche Fragestellung die Optimierung der Modellarchitektur eines konzeptuellen Wasserbilanzmodells unter der konzepthaften Einbeziehung bodenhydrologischer Funktionalitäten.

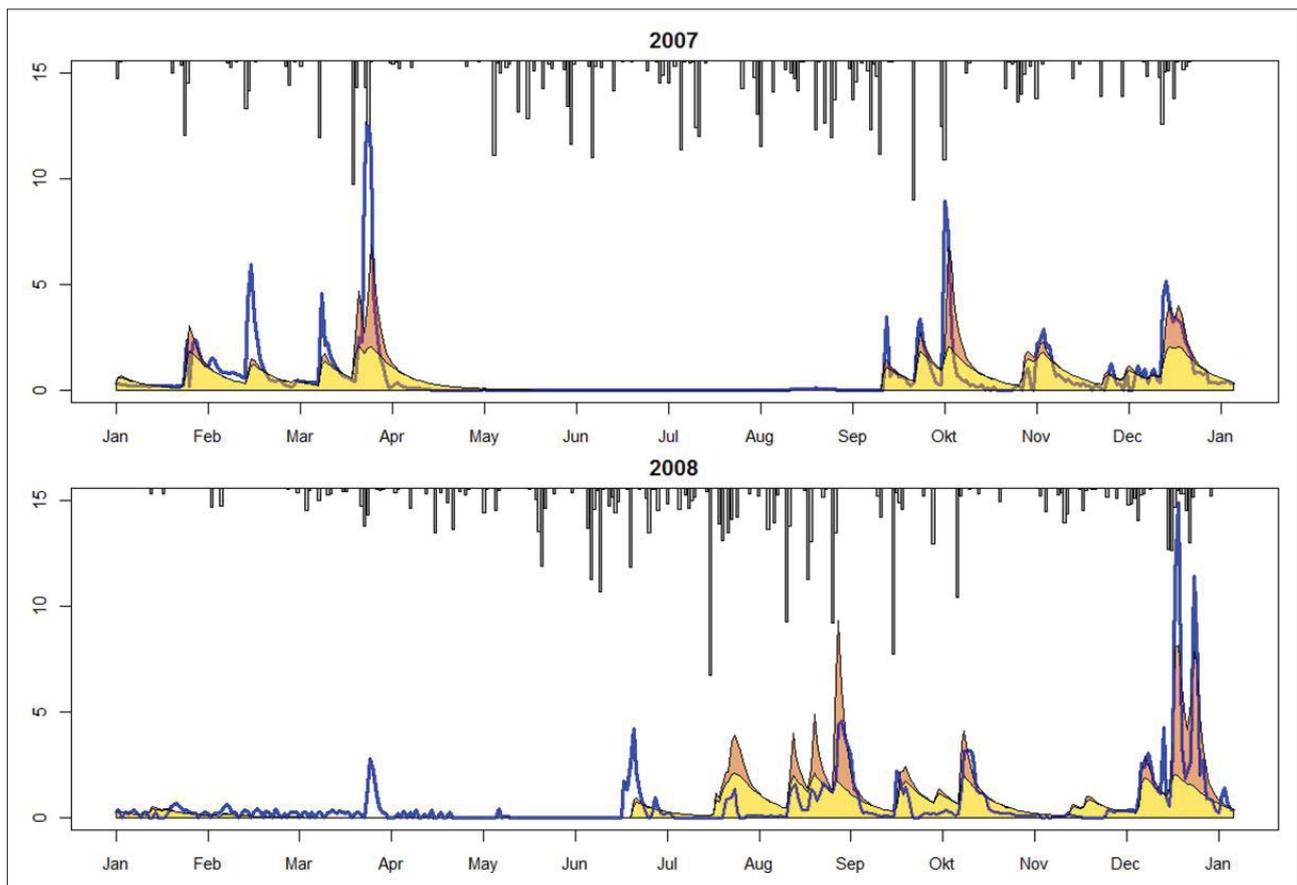


Abbildung 6: Niederschlag und Sickeraten in mm/Tag am Referenz-Lysimeter Wagna für die Jahre 2007 und 2008. Beobachtete (schwarze Linie) und simulierte (grau hinterlegt) Sickeraten mittels Modellstruktur 4.

Neben den bislang angewandten Modellanalysen ergeben sich durch die Verwendung von Lysimeterdaten weitere interessante Fragestellungen, die für die Entwicklung und Anwendung hydrologischer Modelle interessant sein können, so z.B.

- Parametrisierung von Speicherkenngrößen als Funktion der Bodenart,
- Analyse zeitvariabler Infiltrationsraten,
- Identifikation von Schwellenwertprozessen (z.B. Sickerwasser versus Niederschlag, Vorgeuchte, Bodenwasser-gehalt)
- Zeitvariable Parametrisierung (z.B. Crop Coefficient) während der Wachstumsphase von Baumvegetation,
- Differenzierung von langsamer und rascher Abflusssdynamik (Matrix- versus Makroporenfluss) etc.

Die Domäne hydrologischer Konzeptmodelle liegt üblicherweise im Einzugsgebietsmaßstab. Wassertransportprozesse auf der Plotskala (Lysimeter, Hangmaßstab) werden sinnvollerweise mit Hilfe physikalisch basierter Modelle (z.B. 1D oder 2D Richards Modelle) beschrieben. Die vorliegende Untersuchung hat allerdings gezeigt, dass auch konzeptuelle Modellansätze geeignet sind, die generellen Wasserbilanzkomponenten Infiltration, Bodenspeicherung und Versickerung darzustellen. Dies kann auch ohne der detaillierten Kenntnis von bodenphysikalischen Grundlagen gelingen. Allerdings können damit nicht die systeminternen

Prozesse der Bodenwasserzone wie z.B. Feuchteverlagerung, Potentialgradienten, Wurzeinfluss, bevorzugte Fließwege etc. beschrieben werden. Auch die Beschreibung von Transportprozessen gelöster Stoffe bleibt physikalisch basierten Modellen vorbehalten.

## Literatur

- ALLEN, R.G. and Food and Agriculture Organization of the United Nations, 1998: Crop evapotranspiration: guidelines for computing crop water requirements. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations.
- DUAN, Q., S. SOROOSHIAN and V. GUPTA, 1992: Effective and efficient global optimization for conceptual rainfall-runoff models. *Water Resources Research*, 28(4), 1944-1973. doi: 10.1029/91WR02985.
- FANK, J. and G. von UNOLD, 2007: High-precision weighable field Lysimeter - a tool to measure water and solute balance parameters. *International Water and Irrigation*, 27/3, 28-32.
- HOEVEN, P.C.T. v. d., 2011: Lysimeters Castricum - Summary and datafiles Alterra-rapport. Wageningen: Alterra, onderdeel van Wageningen UR.
- HOLZMANN, H., C. MASSMANN and K. Stangl, 2014: DOMINA\_HYPRO - Development and testing of a modular conceptual hydrological model to identify dominating hydrological processes. Endbericht und die ÖAW.
- NASH, J.E. and J.V. SUTCLIFFE, 1970: River flow forecasting through conceptual models part I - A discussion of principles. *Journal of Hydrology*, 10(3), 282-290.