

Simulation des Bodenwasserhaushaltes an ausgewählten Standorten in Fläming

Thomas Kriese^{1*}, Gundula Paul², Frido Reinstorf¹ und Ralph Meißner³

Zusammenfassung

Die quantitative Beschreibung von bodenphysikalischen Prozessen nimmt in der Bodenkunde eine zentrale Rolle ein. Neben experimentellen Untersuchungen sind numerische Modelle von großer Bedeutung, da mit ihnen die oft sehr komplexen hydrologischen Vorgänge im Boden berechnet und vereinfacht dargestellt werden können. Ziel war es, in einem Teilgebiet des Flämings (Bundesland Sachsen-Anhalt) einen skalierten Ansatz zur Erfassung des Wasserhaushaltes zu testen. Es wurde untersucht, ob die im Einzugsgebiet durchgeführten Punktmessungen an bodenhydrologischen Messstationen repräsentativ für das gesamte Untersuchungsgebiet sind. Speziell wurde der Bodenwasserhaushalt von sechs Standorten mit dem Modell HYDRUS-1D simuliert und mit gemessenen Saugspannungswerten verglichen. Die Anwendbarkeit des Regionalisierungsansatzes wurde nach dem Hydrotop-Konzept untersucht. Die Funktionalität dieser Methode und die Repräsentativität der Messstandorte konnte für zwei Beispielgebiete bestätigt werden. Ergänzend wurden die mit HYDRUS-1D simulierten Sickerwasserraten mit denen des für größere Gebietseinheiten ausgelegten TUB-BGR-Verfahrens verglichen und diskutiert.

Schlagwörter: Hydrotop-Konzept, HYDRUS-1D, Modellierung, TUB-BGR-Verfahren

Summary

Quantitative descriptions of soil-physical processes are very important in soil science. In addition to experimental studies numerical models play an important role because of their possibility to calculate and illustrate complex hydrological processes. The aim of the work was to test a scaled approach for detecting the water balance in a subcatchment of the Flaeming region (Federal State Saxony-Anhalt). Therefore, it was tested if measuring data from hydrological monitoring stations are representative for the entire study area. In detail the soil water balance from six sites was calculated with the HYDRUS-1D model and compared with measured soil water tension values. Additionally, the applicability of a regionalisation approach by using the hydrotop concept was tested. Anyway, the functionality of this method and the representativeness of the measuring sites were confirmed for two exemplary areas. Additionally, percolation rates simulated with HYDRUS-1D and the TUB-BGR-method were compared and discussed.

Keywords: hydrotop concept, HYDRUS-1D, modeling, TUB-BGR-method

Einleitung

Der Bodenwasserhaushalt eines Standortes wird in entscheidender Weise durch die Landnutzung, Bodeneigenschaften und Grundwasserbedingungen bestimmt. Um Kenntnisse über Veränderungen des Bodenwasserhaushaltes zu erhalten, die z. B. wichtig für die Verlagerung von Nähr- und Schadstoffen mit dem Sickerwasser sind, können in Feldexperimenten Messsensoren eingesetzt werden. Da aus Zeit- und Kostengründen eine flächenhafte Erfassung der Bodenfeuchte mit Sensoren nicht möglich ist, wird häufig auf numerische Modelle zurückgegriffen. Diese bilden die oft sehr komplexen hydrologischen Vorgänge im Boden ab und können Veränderungen des Bodenwasserhaushaltes zeitlich hoch aufgelöst berechnen.

Für die Simulation des Standortwasserhaushaltes werden verschiedene Modelle angewendet, wobei das Modell

HYDRUS 1D (ŠIMŮNEK et al. 2013) weit verbreitet ist. Beispielsweise zeigten BETHGE-STEFFENS (2008) und MEURER et al. (2013), dass das Modell für die Simulation des Bodenwasserhaushaltes von Acker- und Grünlandstandorten geeignet ist. Werden in einem Gebiet flächendeckend jährliche Werte, z. B. Sickerwasserraten, benötigt, kann auf einfachere Ansätze zurückgegriffen werden, die weniger Inputdaten benötigen. Eine Möglichkeit ist die Anwendung des Hydrotop-Konzeptes, welches in verschiedenen Studien erfolgreich angewandt wurde (z. B. DIEKKRÜGER 1992, FLÜGEL 1995, GEROLD et al. 1998). Eine andere Möglichkeit stellt das TUB BGR Verfahren (WESSOLEK et al. 2008) dar, welches für den Hydrologischen Atlas von Deutschland (BMU 2003) flächendeckend angewandt wurde.

In dieser Arbeit wurde der Bodenwasserhaushalt an sechs Standorten im Fläming (östliches Sachsen-Anhalt, Deutsch-

¹ Hochschule Magdeburg-Stendal, Fachbereich Wasser- und Kreislaufwirtschaft, Breitscheidstraße 2, D-39114 MAGDEBURG

² Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung - UFZ, Department Bodenphysik, Brückstraße 3a, D-39114 MAGDEBURG

³ Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung - UFZ, Department Bodenphysik, Lysimeterstation Falkenberg 55, D-39615 ALTMÄRKISCHE WISCHE

* Ansprechpartner: Thomas Kriese, thomas.kriese88@gmail.com



Tabelle 1: Messstandorte im Fläming. *grundwassernahe Standorte. Verändert nach PAUL et al. (2014).

ID	Standort	Fruchtfolge bzw. Landnutzung	Einbautiefe der Watermark-Sensoren [cm] (Anzahl)
AS 1	Kerchauer Äcker	Winterraps, Winterroggen, Winterroggen	30 (3), 60 (2), 90 (2)
AS 2*	Degradiertes Niedermoor	Silomais, Winterroggen, Winterraps	20 (2), 50 (2), 70 (1)
WS 1*	Waldstandort Paradies	Kiefern	20 (3), 60 (3), 80 (1), 85 (1)
WS 2	Kiefernreinbestand	Kiefern	10 (4), 50 (2), 105 (1)
WS 3	Buchenvoranbau	Rotbuchenjungwuchs unter Kiefern	10 (4), 50 (4)
WS 4*	Eichenmischwald	Eichen, Rotbuchen	20 (3), 65 (3), 100 (1), 120 (1)

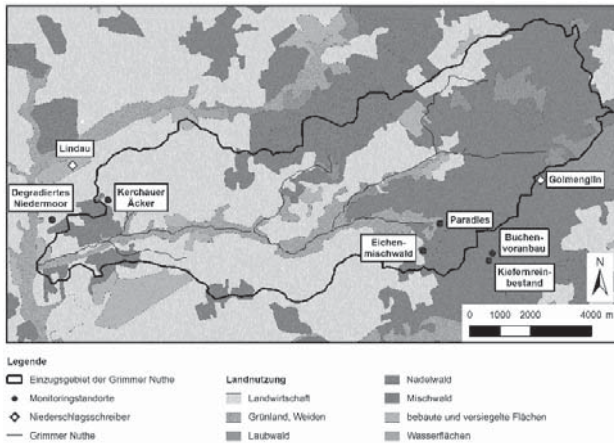


Abbildung 1: Lage der Messstandorte im Fläming. Datengrundlage: Corine Landcover (CLC 2006), Federal Environment Agency, DLR-DFD (2009); © GeoBasis-DE/BKG (2011).

land) mit dem Modell HYDRUS-1D berechnet; speziell wurden dabei die simulierten Saugspannungswerte mit entsprechenden Messwerten aus bodenhydrologischen Stationen verglichen. Des Weiteren werden die mit HYDRUS 1D ermittelten Sickerwasserraten bzw. Wasserbilanzen mit den Werten des Hydrotop-Konzeptes und des TUB-BGR-Verfahrens verglichen. Es wird untersucht, ob die Mess- und Modelldaten der Messplätze repräsentativ für ein größeres Gebiet sind. Ziel dieser Arbeit ist es, einen skalierten Ansatz zur Erfassung des Wasserhaushaltes für ein Teileinzugsgebiet im Fläming zu testen.

Material und Methoden

Für die Untersuchung der Bodenwasserdynamik wurden im Fläming sechs Messplätze aufgebaut (Tabelle 1, Abbildung 1), an denen alle 15 Minuten die Saugspannungswerte gemessen wurden. Eingesetzt wurden Watermark Soil Moisture Sensors Model 200SS (IRROMETER COMPANY 2010), welche die Saugspannungen über den elektrischen Widerstand zwischen zwei Elektroden ermitteln.

Um den Standortwasserhaushalt dieser sechs Messstandorte zu simulieren, wurde das Modell HYDRUS 1D eingesetzt, welches ein eindimensional arbeitendes Modell ist. Mit ihm kann der Wasserfluss im Boden simuliert werden, indem die Richards-Gleichung numerisch gelöst wird (ŠIMŮNEK et al. 2013). Für die Übertragung der Simulationsergebnisse der Messstandorte in die Fläche wurden für zwei Beispielgebiete innerhalb des Flämings Hydrotope gebildet. Dies sind Gebiete, die sich hydrologisch einheitlich verhalten

(DYCK und PESCHKE 1995). Bei der Hydrotopbildung wurden v. a. die Landnutzung und die Grundwasserstände berücksichtigt. Zudem wurden für den gesamten Fläming die jährlichen Sickerwasserraten mit dem TUB-BGR-Verfahren in einer räumlichen Auflösung 25 m x 25 m berechnet. Dieses Verfahren basiert auf landnutzungsabhängigen, nicht-linearen, multiplen Regressionsgleichungen, welche den Niederschlag (Jahr, Sommerhalbjahr), die jährliche FAO-Grasreferenzverdunstung, die Wasserverfügbarkeit in der Vegetationsperiode und den kapillaren Aufstieg aus dem Grundwasser berücksichtigt (WESSOLEK et al. 2008).

Die Untersuchungen fanden vom 1. Januar 2011 bis 31. Dezember 2012 statt. Weitere Details zum Untersuchungsgebiet sind z. B. bei LUCKNER et al. (2002) zu finden.

Ergebnisse und Diskussion

Vergleich der mit HYDRUS 1D simulierten und der gemessenen Saugspannungswerte

Mit Hilfe des NASH-SUTCLIFFE-efficiency-Koeffizienten (NSE) (NASH und SUTCLIFFE 1970) wird die Güte der Übereinstimmung zwischen Modell und Messung bestimmt. Der NSE nimmt Werte zwischen $-\infty$ und 1 an, wobei ein Wert von 1 einer perfekten Übereinstimmung zwischen Mess- und Modellwerten entspricht. Ein NSE von 0 bedeutet, dass die Vorhersage durch das Modell genauso gut wieder der Mittelwert der Messwerte ist.

In Abbildung 2 sind die berechneten NSE aller Standorte für die jeweiligen Messtiefen dargestellt. Gute Übereinstimmungen zwischen gemessenen und modellierten Saugspannungswerten konnten insbesondere bei dem grundwasserfernen Ackerstandort (AS 1) verzeichnet werden. Hier war es nach Anpassung einzelner van Genuchten Parameter möglich, die gemessenen Saugspannungen mit HYDRUS 1D zu simulieren. Unterschiede traten v. a. während der Austrocknungs- und Wiederbefeuchtungsphasen im Frühjahr und Sommer auf. Bei den grundwassernahen Standorten lagen größere Abweichungen zwischen gemessenen und modellierten Werten vor, sodass die NSE meist Werte kleiner 0 annahm. Dies liegt insbesondere daran, dass Grundwasserspiegelhöhen – aufgrund fehlender Messungen – geschätzt werden mussten. Die niedrigen NSE der Waldstandorte sind einerseits darauf zurückzuführen, dass HYDRUS 1D v. a. für landwirtschaftlich genutzte Standorte entwickelt worden ist. Andererseits hat sich gezeigt, dass das implementierte Verfahren zur Berechnung der Evapotranspiration nach PENMAN-MONTEITH nicht für Waldgebiete geeignet ist (GLUGLA et al. 2003), da die

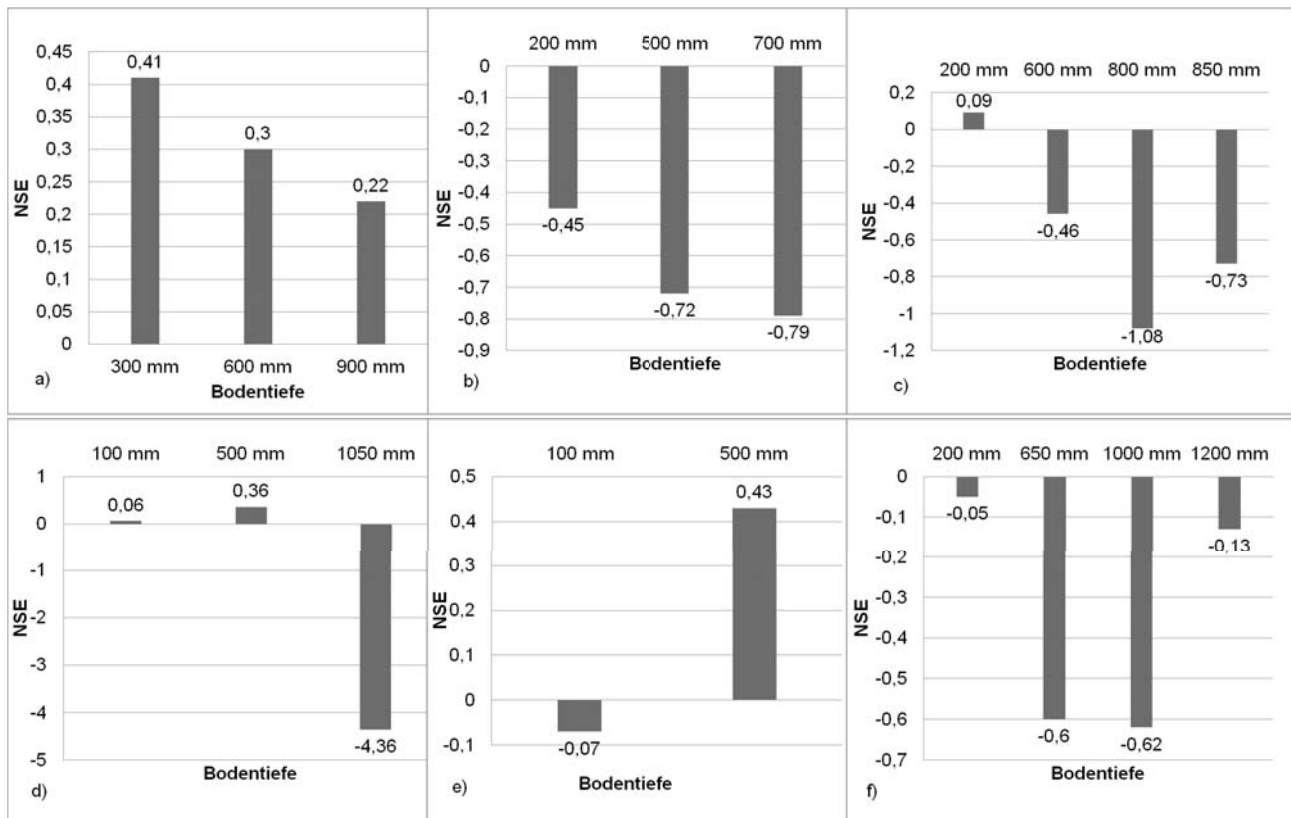


Abbildung 2: NASH-SUTCLIFFE-efficiency in den jeweiligen Bodentiefen für die Standorte AS 1 (a), AS 2 (b), WS 1 (c), WS 2 (d), WS 3 (e) und WS 4 (f).

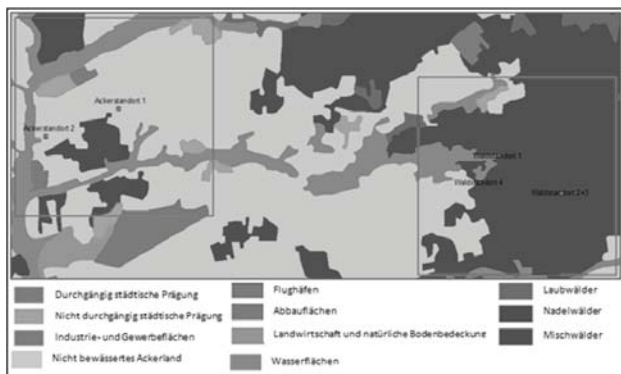


Abbildung 3: Gebietsausschnitte für die Hydrotopbildung mit Flächennutzung. Datengrundlage: Corine Landcover (CLC 2006), Federal Environment Agency, DLR-DFD (2009).

Werte der Evapotranspiration deutlich überschätzt werden (KRIESE 2014).

Hydrotop-Konzept

Das Hydrotop-Konzept wurde für zwei Gebietsausschnitte mit einer Fläche von je 3249 ha getestet, von denen einer die Ackerstandorte und der andere die Waldstandorte einschließt (Abbildung 3). Um die Anzahl der Hydrotop Typen möglichst gering zu halten, wurden bei der Hydrotopbildung, wie bereits zuvor erwähnt, nur die Parameter Grundwasserbeeinflussung und Flächennutzung berücksichtigt.

Mit Hilfe eines GIS wurden Flächen mit den entsprechenden Eigenschaften verschritten und selektiert, sodass folgende Hydrotop Typen entstanden:

- Acker, grundwassernah (A, gn); (= AS 2)
- Acker, grundwasserfern (A, gf); (= AS 1)
- Nadelwald, grundwassernah (NW, gn); (= WS 1)
- Nadelwald, grundwasserfern (NW, gf); (= WS 2 + WS 3)
- Mischwald, grundwassernah (MW, gn); (= WS 4)
- Mischwald, grundwasserfern (MW, gf)
- Wiesen, grundwassernah (Wi, gn)
- Wiesen, grundwasserfern (Wi, gf)
- Laubwald, grundwassernah (LW, gn)
- Laubwald, grundwasserfern (LW, gf)

Wie Abbildung 4 zeigt, machen die Hydrotop Typen, in denen die Messplätze liegen, über 75 % der betrachteten Gesamtfläche aus. Dies zeigt, dass bei der Wahl der Messplätze repräsentative Standorte ausgewählt wurden.

Vergleich der Ergebnisse von HYDRUS-1D, Hydrotop-Konzept und TUB-BGR-Verfahren

Während mit HYDRUS 1D der Wasserhaushalt an einem konkreten Messplatz simuliert wurde, ist dieser beim TUB-BGR-Verfahren Werte für einzelne Zellen mit einer Größe von 25 m x 25 m berechnet worden. Abbildung 5 zeigt den Vergleich der Wasserbilanzen (= Niederschlag

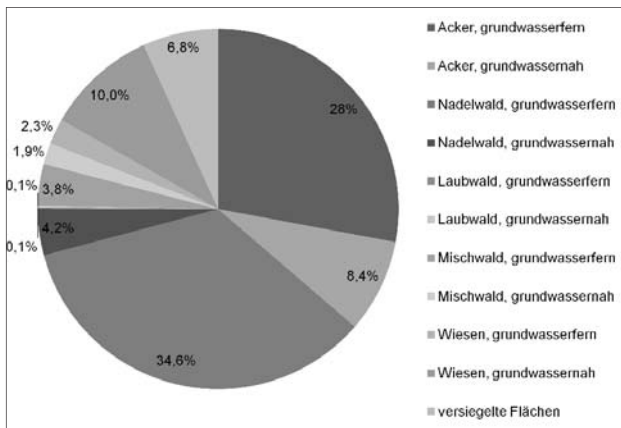


Abbildung 4: Anteil der Hydrotoptypflächen an der Gesamtfläche beider Gebietsausschnitte (6498 ha).

– Evapotranspiration) für die Messstandorte (HYDRUS 1D), die Mittelwerte der einzelnen Hydrotoptypen sowie die Zellenwerte des TUB-BGR-Verfahrens, in denen die Messplätze liegen. Dabei wurde festgestellt, dass die Mittelwerte der Hydrotoptypen eine gute Übereinstimmung mit den Zellenwerten der dazugehörigen Standorte aufweisen. Größere Abweichungen zu den Werten von HYDRUS 1D ergaben sich hingegen v. a. bei den Waldstandorten. Ursache hierfür ist eine Überschätzung der Evapotranspiration wie KRIESE (2014) nachweisen konnte. Auch im Jahr 2012 zeigte sich ein ähnliches Bild. Folglich lieferte die Simulation mit HYDRUS 1D für die Waldstandorte keine realistischen Ergebnisse.

Es ist zu beachten, dass negative Wasserbilanzen beim TUB-BGR-Verfahren nicht die tatsächliche Höhe der Zehrung angeben, sondern nur darauf hinweisen, dass keine Sickerwasserbildung stattfindet.

Schlussfolgerungen

Es wurde nachgewiesen, dass die Gliederung eines Einzugsgebietes nach dem Hydrotopkonzept eine geeignete Methode ist, um kleinere Einzelflächen zu regionalisieren.

Nach Anpassung der bodenphysikalischen Parameter konnten bei den mit HYDRUS-1D simulierten Saugspannungen im Vergleich zu den Messwerten meist zufriedenstellende Übereinstimmungen erzielt werden, insbesondere bei dem grundwasserfernen Ackerstandort 1. Bei den grundwassernahen Standorten ist die Übereinstimmung der gemessenen mit den modellierten Werten insgesamt geringer. Ursache hierfür ist, dass die tatsächliche Schwankung des Grundwassers nicht bekannt ist und somit eine potentielle Fehlerquelle bei der Simulation darstellt.

Es konnte gezeigt werden, dass die Simulation mit HYDRUS 1D für die untersuchten Waldstandorte keine realistischen Ergebnisse liefert, da der hier implementierte Ansatz für die Berechnung der Evapotranspiration ungeeignet ist.

Danksagungen

Das diesem Beitrag zugrunde liegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Bildung und Forschung (BMBF) mit dem Förderkennzeichen 033L029J gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autoren. Wir danken Peter Gottschalk, Hans-Joachim Wuttig und Toren Reis für die Bereitstellung von Flächen sowie ihre Unterstützung bei der Auswahl geeigneter Messplätze.

Literatur

BETHGE-STEFFENS, D., 2008: Der Bodenwasserhaushalt von zwei repräsentativen Flussaueenstandorten der Mittelelbe. Dissertation. Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung, Leipzig.

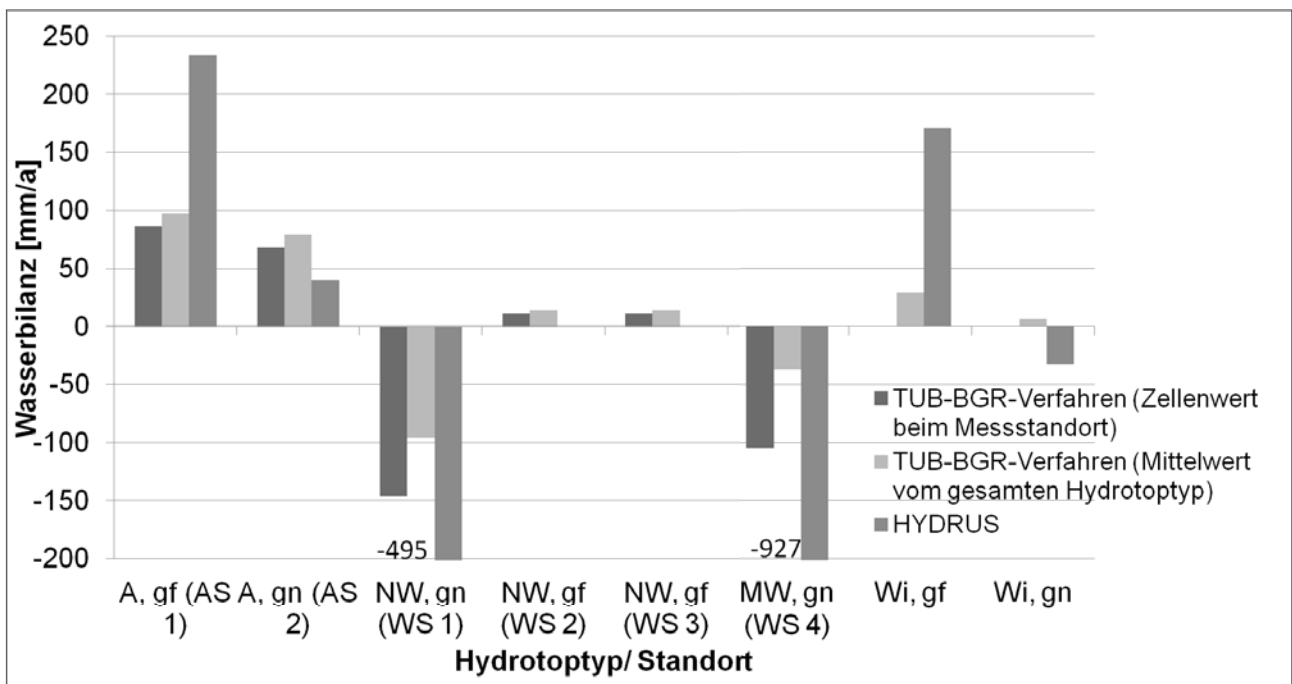


Abbildung 5: Vergleich der Wasserbilanzen für die einzelnen Messplätze im Jahr 2011.

- BMU (Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit) (Hrsg.), 2003: Hydrologischer Atlas von Deutschland. Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit, Bonn.
- DIEKKRÜGER, B., 1992: Standort- und Gebietsmodelle zur Simulation der Wasserbewegung in Agrarökosystemen. Landschaftsökologie und Umweltforschung, Heft 19. Braunschweig.
- DYCK, S. und G. PESCHKE, 1995: Grundlagen der Hydrologie. Verlag für Bauwesen, Berlin.
- FLÜGEL, W.A., 1995: Delineating hydrological response units by geographical information system analyses for regional hydrological modelling using PRMS/MMS in the drainage basin of the river Bröl, Germany. *Hydrological Processes* 9, 423-436.
- GEROLD, G., B. CYFFKA, J. SUTMÖLLER, J.P. KRÜGER und G. BUSCH, 1998: Regionalisierung der Abflußbildung über die Aggregation homogener Flächen unter Verwendung des Geographischen Informationssystems ARC/INFO und der 'Digitalen Reliefanalyse' (Programm SARA). Deutsche Forschungsgemeinschaft, Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Geographisches Institut, Georg-August-Universität Göttingen.
- GLUGLA, G., P. JANKIEWICZ, C. RACHIMOW, K. LOJEK, K. RICHTER, G. FÜRTIG und P. KRAHE, 2003: Wasserhaushaltsverfahren zur Berechnung vieljähriger Mittelwerte der tatsächlichen Verdunstung und des Gesamtabflusses. BfG-Bericht Nr. 1342. Bundesanstalt für Gewässerkunde, Koblenz.
- IRROMETER COMPANY (Ed.), 2010: Watermark soil moisture sensor – Model 200SS. <http://www.irrometer.com>
- KRIESE, Th., 2014: Simulation des Bodenwasserhaushaltes an ausgewählten Standorten im Fläming mit HYDRUS 1D und Vergleich mit den Ergebnissen des TUB BGR Verfahrens. Masterarbeit. Hochschule Magdeburg-Stendal, Fachbereich Wasser- und Kreislaufwirtschaft, Magdeburg.
- LUCKNER, L., F. BÖRNER, K. TIEMER und C. BEYER, 2002: Grundwasserressourcen im Westfläming. Langfristige Nutzung des Wasserdargebots im Westfläming. Gutachten. Dresdener Grundwasserforschungszentrum (DGFZ), Dresden.
- MEURER, K.H.E., V. PRASUHN, S.C. IDEN und W. DURNER, 2013: Inverse Modellierung des Wassertransports in Großlysimetern der Forschungsstation Zürich-Reckenholz. 15. Gumpensteiner Lysimertagung, 16.-17. April 2013, Irdning, Österreich, 79-84.
- NASH, J.E. and J.V. SUTCLIFFE, 1970: River flow forecasting through conceptual models: Part 1. A discussion of principles. *Journal of Hydrology* 10(3), 282-290.
- PAUL, G., R. MEISSNER und G. OLLESCH, 2014: Abschätzung von Auswirkungen des Klimawandels auf den Landschaftswasserhaushalt im Fläming. *WasserWirtschaft* 104(10), 23-28.
- ŠIMŮNEK, J., M. ŠEJNA, H. SAITO, M. SAKAI and Th. van GENUCHTEN, 2013: The HYDRUS-1D Software Package for Simulating the One-Dimensional Movement of Water, Heat, and Multiple Solutes in Variably-Saturated Media. Version 4.16, Department of Environmental Sciences, University of California Riverside, Riverside, California.
- WESSOLEK, G., W.H.M. DUIJNISVELD and S. TRINKS, 2008: Hydro-pedotransfer functions (HPTFs) for predicting annual percolation rate on a regional scale. *Journal of Hydrology* 356(1-2), 17-27.