

## Fuzzy-Inference-Systeme zur Regionalisierung des Standortwasserhaushaltes von Wäldern

### *Regionalization of the site water balance in forests using fuzzy inference systems*

Ronny Peters, Kai Schwärzel & Karl-Heinz Feger

#### Abstract

*Relief-dependent variations in micro-climatic parameters control evaporation and soil water conditions of forests. Therefore, mapping of soil water conditions in mountainous terrain requires that model computations have a high spatial resolution. Unfortunately, highly sophisticated, physically based modeling in combination with a large number of model runs leads to demanding computation costs. To overcome these shortcomings, a physically and physiologically based water balance model was combined with fuzzy inference systems. Grid-point-specific factors representing the systematic alteration of the station data due to the topography are the basis for the parameterization of the antecedent side of the fuzzy system. Model outputs of the water balance model BROOK90 were used directly as parameters of the consequents of the fuzzy rules. Thus, the parameterization of the fuzzy inference system is model-based and objective, and parameter training is not required. The validation of the method shows only small differences between fuzzy system outputs and BROOK90 results.*

**Keywords:** *fuzzy inference system, regionalization, soil water modeling, water balance modeling*

#### Zusammenfassung

Um bei der flächenhaften Modellierung des Wasserhaushaltes aus dem Relief resultierende Variabilitäten der meteorologischen Eingangsgrößen zu berücksichtigen, ist eine hohe räumliche Auflösung erforderlich. Das führt zu hohen Rechenzeiten. Die Kombination physikalisch und physiologisch begründeter Modellierung mit Fuzzy-Inference-Systemen (FIS) zeigt einen Weg aus diesem Dilemma. Rasterpunktspezifische Korrekturfaktoren widerspiegeln das Verhältnis zwischen den meteorologischen Bedingungen am Standort zu den Messwerten an der Klimastation. Diese Korrekturfaktoren werden direkt zur Parametrisierung der Bedingungen der Fuzzyregeln verwendet. Als Parameter der Folgerung werden direkt Modellergebnisse des forsthydrologischen Modells BROOK90 eingesetzt. Damit erfolgt eine objektive modellgestützte Parametrisierung des FIS. Ein Training wird nicht ausgeführt. Die Validierung der Methode zeigt nur geringe Abweichungen zwischen den Modellergebnissen und den FIS-Outputs.

**Schlüsselwörter:** Fuzzy-System, Regionalisierung, Wasserhaushaltsmodellierung, Bodenwasser

## 1 Einleitung

Im Allgemeinen werden die Wasserflüsse in hydrologischen Modellsystemen eindimensional vertikal betrachtet. Eine

zwei- oder dreidimensionale Modellierung des Bodenwasserhaushaltes ist zeitlich aufwendig und daher auf spezielle Anwendungen beschränkt (siehe den Review von KÖHNE et al. 2009). Daher werden für die flächenhafte Berechnung des Wasserhaushaltes auf der Landschaftsskala meist nur eindimensionale Ansätze verwendet. Einzugsgebietsmodelle wie WaSim-ETH (SCHULLA & JASPER 1999) oder AKWA-M (MÜNCH 2004) berechnen die Wasserhaushaltskomponenten raster- oder hydrotopbasiert. Der Abfluss zum Pegel oder Gebietsauslass erfolgt dabei durch externe Routingvorschriften wie die Anwendung von Flächenlaufzeitfunktionen.

Für die modellgestützte Klassifikation des Wasserhaushaltes von Waldstandorten wurde das eindimensionale Standortwasserhaushaltsmodell BROOK90 (FEDERER 1995) mit einem Geoinformationssystem kombiniert (SCHWÄRZEL et al. 2009). Das Modellsystem erlaubt die Berechnung des Wasserhaushaltes in Abhängigkeit von Relief, Boden und Standort. Eine flächenhafte Visualisierung der Ergebnisse in Form neuer Standortskarten bildet die Grundlage für die modellgestützte Bewertung des Wasserhaushaltes von Wäldern (SCHWÄRZEL et al. 2011). Die Anwendung der Methodik auf der Landschaftsskala in Verbindung mit einer hohen räumlichen Auflösung zur adäquaten Berücksichtigung der kleinräumigen Variabilität in Relief, Boden und Bestockung führt dabei zu einem enormen Rechenzeiten. Die Berechnung der vertikalen Wasserflüsse für eine Zeitreihe von 39 Jahren unter Berücksichtigung der relevanten physikalischen und physiologischen Prozesse nahm zwischen 20 und 30 Minuten in Anspruch (PETERS et al. 2011a). Das Testgebiet mit einer Fläche von nur 4 km<sup>2</sup> (SCHWÄRZEL et al. 2009, 2011) erfordert bei einer räumlichen Auflösung von 25 Metern (6.400 Rasterpunkte) eine Rechenzeit von annähernd 3 Monaten. Für Klimaszenarienrechnungen oder die Betrachtung alternativer Bestockungen (PETERS et al. 2011a) ist dieser Rechenaufwand inakzeptabel.

## 2 Ansätze künstlicher Intelligenz in der Hydrologie

Um auch auf der Landschaftsskala bei der exakten physikalisch basierten Modellierung eine akzeptable Rechenzeit zu erreichen, werden in der Hydrologie zunehmend Methoden der künstlichen Intelligenz (AI, Artificial Intelligence) genutzt (SCHÜTZE 2005). Dabei werden vorwiegend künstliche neuronale Netze (ANN) angewandt, da sich diese hervorragend eignen, beliebige funktionale Zusammenhänge wiederzugeben (PETERS 2008). SOLOMATINE & AVILA TORRES (1996) trainierten ANN, um die Bewirtschaftung von Talsperren zu optimieren. Dabei wurde das ANN anstatt des ursprünglich verwendeten hydrodynamischen Moduls in das Bewirtschaftungsmodell integriert. PETERS (2008) verwendet künstliche neuronale Netze für die operative Hochwasservorhersage, um ein kombiniertes Modellsystem aus dem Niederschlags-Abfluss-Modell

WaSim-ETH und dem hydrodynamisch-numerischen Modell HEC-RAS zu ersetzen.

Neuerdings haben Fuzzy Inference Systems (FIS, in der Literatur auch Fuzzy-Inference-Systeme) Eingang in die hydrologische Modellierung gefunden. Ein grundsätzlicher Unterschied aus praktischer Sicht beruht auf der Transparenz des Modells: Neuronale Netze sind reine Black-Box-Modelle. Mit einer Datenbasis für das Training der ANN, die alle denkbaren Konstellationen umfaßt, kann ein zuverlässiges Modell erstellt werden. FIS haben gegenüber ANN den Nachteil, dass der Rechenaufwand mit zunehmender Zahl an Eingangsgrößen überproportional steigt. Jedoch sind die Parameter eines FIS im Gegensatz zu ANN physikalisch interpretierbar. Daher ist die Bezeichnung ‚grey box‘ (im Gegensatz zur ‚black box‘) geläufig.

Arbeiten von BERND et al. (1999), STÜBNER & GEMMAR (1997) oder ALVISI et al. (2006) zeigen, dass sich sowohl ANN als auch FIS zur hydrologischen Modellerstellung eignen. Dabei kann bei der Modellerstellung auch Expertenwissen berücksichtigt werden. Folgerichtig finden FIS in die Modellierung als konzeptionelle Modellbausteine oder Modelle Eingang (z. B. HUNDECHA, BARDOSSY & THEISEN 2001 oder in ZEKÂI ŞEN 2010)

Bei der Erstellung eines FIS als rein datengetriebenen Ansatz oder eines ANN wird generell wie folgt vorgegangen:

- Erstellen aller denkbaren Inputszenarien
- Berechnung der dazugehörigen Systemantworten mit den Prozessmodellen
- Identifizierung der relevanten Eingangsgrößen
- Auswahl und Training des AI-Tools

Die Erfordernisse der reliefabhängigen Wasserhaushaltsmodellierung unterscheiden sich insofern deutlich von den oben genannten Beispielen, da

- eine Erstellung einer Datenbank aller denkbaren Boden- und Pflanzenparameter und deren Kombinationen äußerst aufwendig und wenig sinnvoll wäre und
- eine größere Anzahl von Zielvariablen (Transpiration, Evapotranspiration, Stressindikatoren, langjährige Mittel oder Einzeljahre) existiert.

Daher wurde basierend auf Fuzzy-Inference-Systemen eine Methode entwickelt, die mit Hilfe weniger Modellläufe und für beliebige Modellergebnisse parametrisiert werden kann und trotzdem die physikalischen und physiologischen Charakteristika des verwendeten Modells beibehält. Den Autoren sind keine Beispiele für die Verwendung von FIS als Metamodelle in hydrologische Fragestellungen bekannt.

### 3 Fuzzy Inference Systems zur Optimierung des Rechenaufwandes

Die Abbildung der räumlichen Variabilität der Wasserhaushaltskomponenten als Folge der reliefbedingten Schwankungen der meteorologischen Eingangsgrößen wurde durch die Implementierung einer GIS-Schnittstelle im BROOK90 gelöst. Mithilfe von GIS-Routinen wurden für die Eingangsgrößen digitale Karten für Korrekturfaktoren der meteorologischen Größen bezogen auf die Messwerte an der Klimastation erstellt (SCHWÄRZEL et al. 2009, 2011). Diese Korrekturfaktoren wurden

für jedes Datum im Jahr berechnet. In BROOK90 wurden die einzelnen Gridpunkte nacheinander prozessiert, wobei für jeden Gridpunkt die jeweiligen Korrekturfaktoren eingelesen und mit den Stationsdaten die aktuellen standortspezifischen Eingangsgrößen ermittelt wurden.

Um den kleinskaligen, reliefbedingten Schwankungen gerecht zu werden, ist eine hohe räumliche Auflösung vonnöten. Wie bereits weiter oben erwähnt, unterteilt sich beispielsweise die vier Quadratkilometer große Testfläche bei einer Gridweite von 25 Metern in 6.400 Gridpunkte. Für den gesamten Tharandter Wald wären dann bereits mehr als 200.000 Rechenläufe erforderlich.

Die nachfolgend vorgestellte Methode ermöglicht mit Hilfe weniger Modellläufe und für eine beliebige Bilanzgröße bzw. einen beliebigen Stressindikator ein FIS zu parametrisieren und damit die physikalischen und physiologischen Charakteristika des Modells beizubehalten. Der Gültigkeitsbereich einer Parametrisierung des Fuzzy-System soll sich auf alle Ausprägungen der reliefbedingten Variabilität der meteorologischen Größen für eine bestimmte Bodenart und Bestockung erstrecken.

Eine kompakte, theoretische Einführung zu FIS findet sich unter MATHWORKS (2010). Hier wurden FIS des Mamdani-Typs verwendet. Die Realisierung erfolgte mit der GNU-GPL-Software R (R DEVELOPMENT CORE TEAM 2010) und dem Package ‚sets‘ (MEYER & HORNIK 2010).

FIS sind Grey-Box-Modelle, das heißt, die Berechnung erfolgt durch eine Input-Output-Beziehung ohne Implementierung prozessbeschreibender Ansätze. Allerdings ist eine Interpretation der im Folgenden beschriebenen Fuzzyregeln möglich, damit kann auch Expertenwissen bei der Parametrisierung berücksichtigt werden. Die Fuzzy-Logik basiert auf unscharf abgegrenzten Klassen (fuzzy sets). Die Zugehörigkeit eines Elements zu einem Fuzzyset wird durch eine Zugehörigkeitsfunktion (membership function) geregelt. Diese kann alle reellen Werte zwischen 0 (nicht zugehörig) bis 1 (zugehörig) annehmen (Abb. 1).

Für die relevanten meteorologischen Größen Niederschlag (Abb. 1), Temperatur (kalt-warm) und Globalstrahlung (niedrig-mittel-hoch) werden Zugehörigkeitsfunktionen erstellt. Die Anzahl der Fuzzysets je Eingangsgröße richtet sich nach ihrer Relevanz für die Zielgröße. Da sich die Windgeschwindigkeit

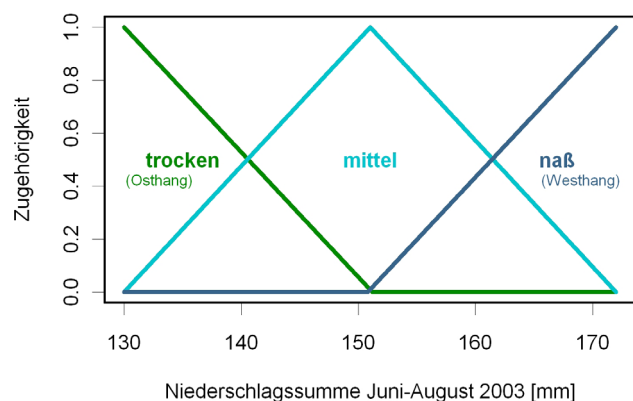


Abb. 1: Zugehörigkeitsfunktionen für Niederschlag (trocken-mittel-naß).

Fig. 1: Membership functions of precipitation (dry-medium-wet).

als wenig sensitiv erwiesen hat, wurde darauf verzichtet, Zugehörigkeitsfunktionen abzuleiten. Der Einfluss von Niederschlag und Globalstrahlung ist größer als der der Tagesmaximaltemperatur. Daher wurden für diese beiden Größen je drei Zugehörigkeitsfunktionen gewählt und für die Temperatur nur zwei. Im ersten Schritt werden die Eingangsgrößen „fuzzifiziert“, d.h., die Zugehörigkeit des konkreten Wertes zu den Fuzzysets ermittelt. Nach Abb. 1 wäre beispielsweise ein Niederschlag in der Vegetationszeit von 145 Millimetern „trocken“ mit einem Wahrheitswert von 0,25, „mittel“ mit 0,75 und „nass“ mit 0 (Falsch).

Ein FIS ist ein System von Fuzzyregeln, welches für die Berechnung der Transpiration beispielsweise lautet: "WENN es 'trocken' UND 'kalt' ist UND 'hohe' Einstrahlung vorliegt, DANN beträgt die Transpiration n Millimeter." Da die Bedingungen nicht nur Wahrheitswerte von 0 und 1 annehmen können, ist der UND-Operator mit einer bestimmten Operation – hier dem Produkt der Bedingungen – verbunden. Die Konklusion dieser Regeln, in diesem Falle die Höhe der Transpiration, ist wiederum jeweils ein Fuzzyset. Dabei wird hier nicht die dreiecksförmige, lineare Zugehörigkeitsfunktion verwendet, wie sie sich für die Eingangsgrößen als geeignet zeigt, sondern Gauß-Kurven. Der Grund dafür ist die Lage der Zentren (Zugehörigkeitswert = 1), die hier nicht zwangsläufig die gleichen Abstände aufweisen. Damit wird garantiert, daß sich die Zugehörigkeitsfunktionen überschneiden.

Die Parametrisierung des FIS besteht in der Festlegung der Zugehörigkeitsfunktionen. Für die Eingangsgrößen werden die Eckpunkte der Dreiecksfunktionen durch die jeweilige Spanne von reliefabhängiger Niederschlags-, Globalstrahlungs-, bzw. Temperaturkorrektur festgelegt. Die Mittelwerte der Funktionen für die Konklusionen werden für die konkreten Fälle mit dem Wasserhaushaltsmodell berechnet. Die Regeln werden also nicht angelernt, sondern direkt mit den Modellergebnissen parametrisiert. Hier ergeben sich aus den je 3 Varianten für Niederschlag und Globalstrahlung und 2 Varianten für Temperatur  $3 \times 3 \times 2 = 18$  Regeln. Damit muss – unabhängig von der Anzahl der zu modellierenden Gridpunkte – das Wasserhaushaltsmodell für nur 18 Varianten je Bodenart und Bestockung betrieben werden. Zusammengefasst ergeben sich folgende

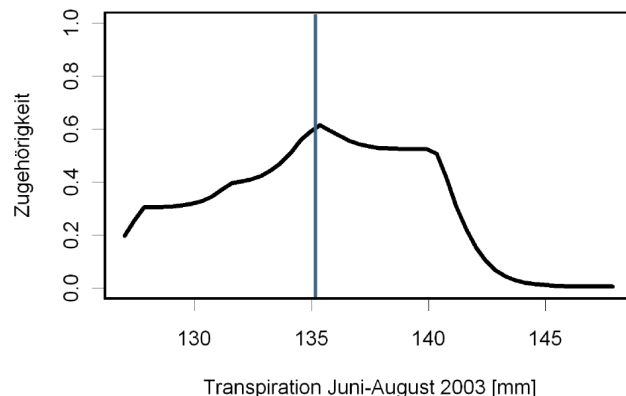


Abb. 2: Defuzzifizierung des Outputs mit der Schwerpunkt-methode.

Fig. 2: Defuzzification of the output with the centroid method.

Schritte zur Erstellung des FIS:

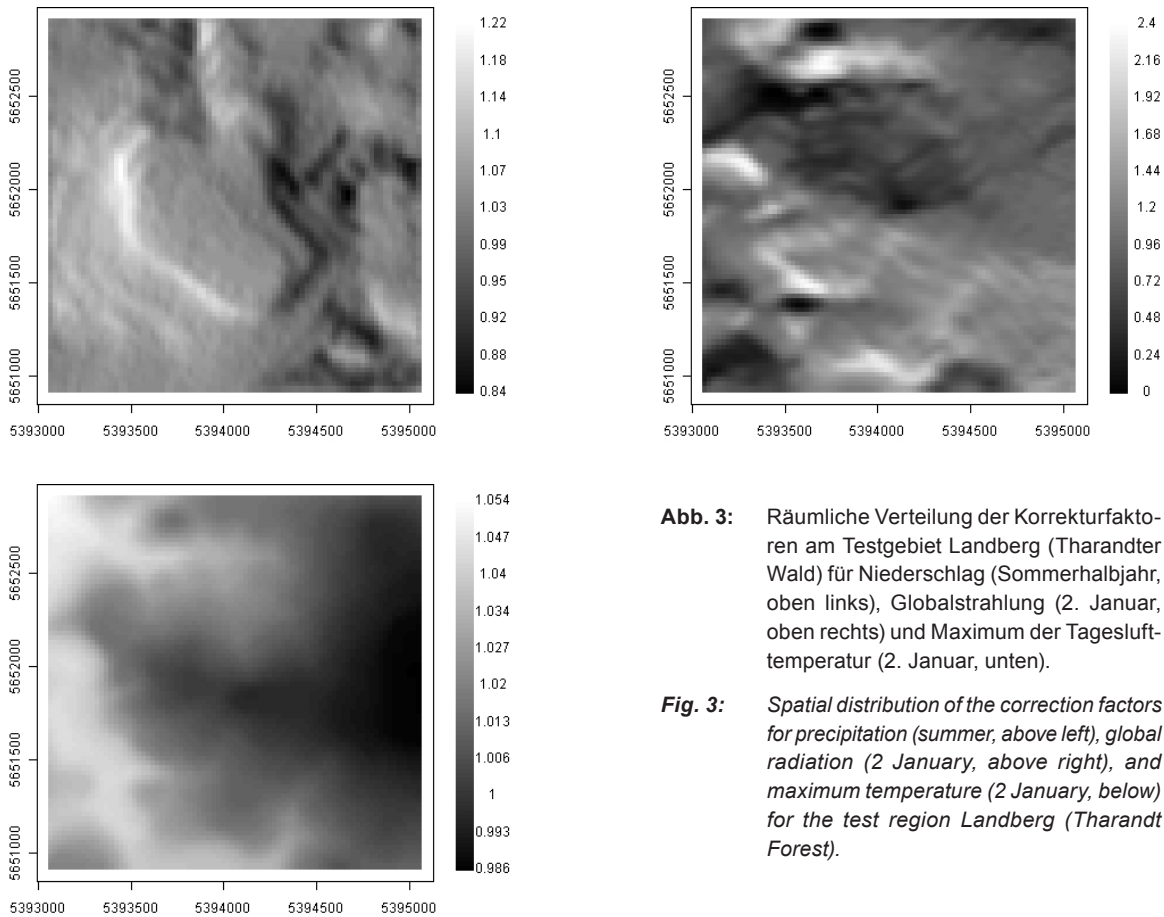
1. Definition der dreieckigen Zugehörigkeitsfunktionen für topographieabhängige Niederschlags-, Temperatur- und Globalstrahlungsverteilung (3, 2 und 3 Klassen).
2. Erstellen des kompletten Regelsatzes (18 Regeln aus  $3 \times 2 \times 3 = 18$  Kombinationen).
3. Berechnung der exakten Resultate der 18 Kombinationen für Zugehörigkeitswerte = 1.
4. Direkte Übertragung der Modellergebnisse (Bilanzgröße/Stressfaktor) auf die Konklusionen der Regeln.

Die Berechnung der entsprechenden Wasserhaushaltsgröße bzw. eines Stressfaktors eines beliebigen Gridpunktes erfolgt anschließend mithilfe des parametrisierten FIS: Jede Regel kommt zur Anwendung, die Konklusion einer Regel beeinflusst das Ergebnis umso stärker, je „wahrer“ die Bedingung ist. Die Ausgabe ist wiederum ein Fuzzy-Set. Die Umwandlung eines

Tab. 1: Zusammenfassung der Methodik zum kombinierten Betrieb des Wasserhaushaltsmodells und des FIS.

Tab. 1: Summary of the methodology for a combined operation of a physically based water balance model and FIS.

Schritt	topographieabhängige Parametrisierung der Bedingungen	
1	Fuzzifizierung	Spanne der im Gebiet auftretenden Korrekturfaktoren zur Parametrisierung der Zugehörigkeitsfunktionen
2	Fuzzyregeln/Bedingungen	Regeln für alle möglichen Kombinationen aus den Klassen der drei Korrekturfaktoren
<b>modellgestützte Parametrisierung der Konklusionen</b>		
3	Modellrechnung BROOK90	Berechnung der Wasserhaushaltsgrößen/Stressparameter für eine Kombination Boden-Bestockung für alle Kombinationen aus Niederschlags-, Globalstrahlungs- und Temperaturklassen (Zugehörigkeitsgrad = 1)
4	Fuzzyregeln/Konklusionen	Parametrisierung der Konklusion der Regeln mit Modellergebnissen der jeweiligen Kombinationen der Korrekturfaktoren.
<b>Anwendung</b>		
5	Kombination der Regeln	Berechnung des Output-Fuzzy-Sets für jeden Gridpunkt
6	Defuzzifizierung	Umwandlung des Output-Fuzzy-Sets in konkreten Wert, Schwerpunkt-methode



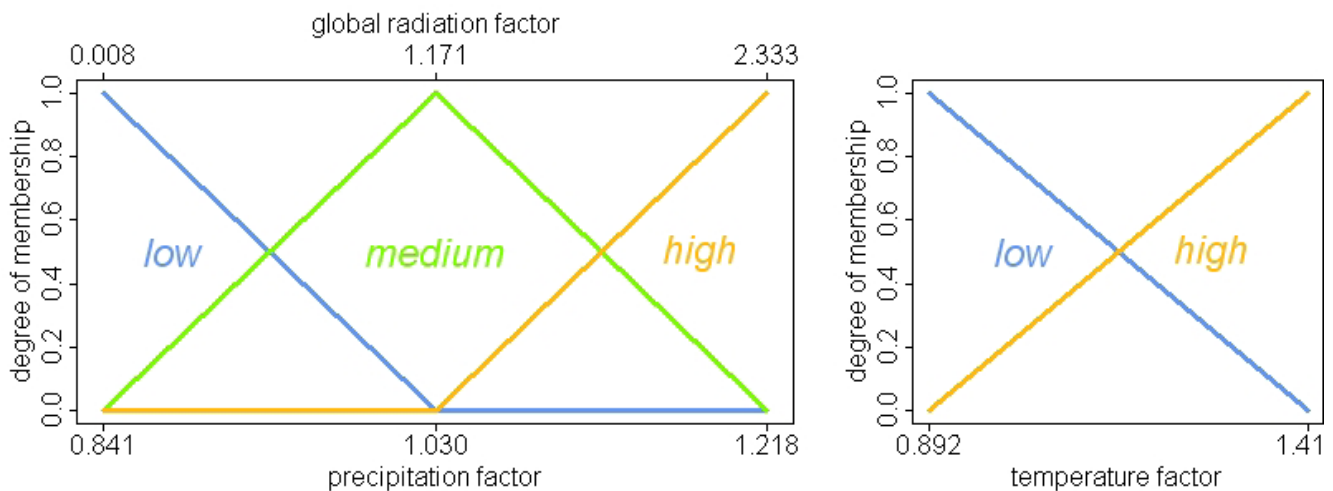
**Abb. 3:** Räumliche Verteilung der Korrekturfaktoren am Testgebiet Landberg (Tharandter Wald) für Niederschlag (Sommerhalbjahr, oben links), Globalstrahlung (2. Januar, oben rechts) und Maximum der Tageslufttemperatur (2. Januar, unten).

**Fig. 3:** Spatial distribution of the correction factors for precipitation (summer, above left), global radiation (2 January, above right), and maximum temperature (2 January, below) for the test region Landberg (Tharandt Forest).

Fuzzysets in einen konkreten Wert wird analog zur ‚Fuzzifizierung‘ der Eingangsgrößen ‚Defuzzifizierung‘ genannt. Hier wurde dazu die Schwerpunktmethode angewandt (siehe z. B. MATHWORKS 2010). Abb. 2 zeigt ein Beispiel, wie mit der Schwerpunktmethode aus einem Output-Fuzzy-Set der konkrete Wert (135 mm) für die Transpiration ermittelt wird.

Da sich diese Methode nur auf die meteorologischen Eingangsgrößen anwenden lässt, muss ein solches FIS für jede gewünschte Kombination aus Boden und Bestockung erstellt

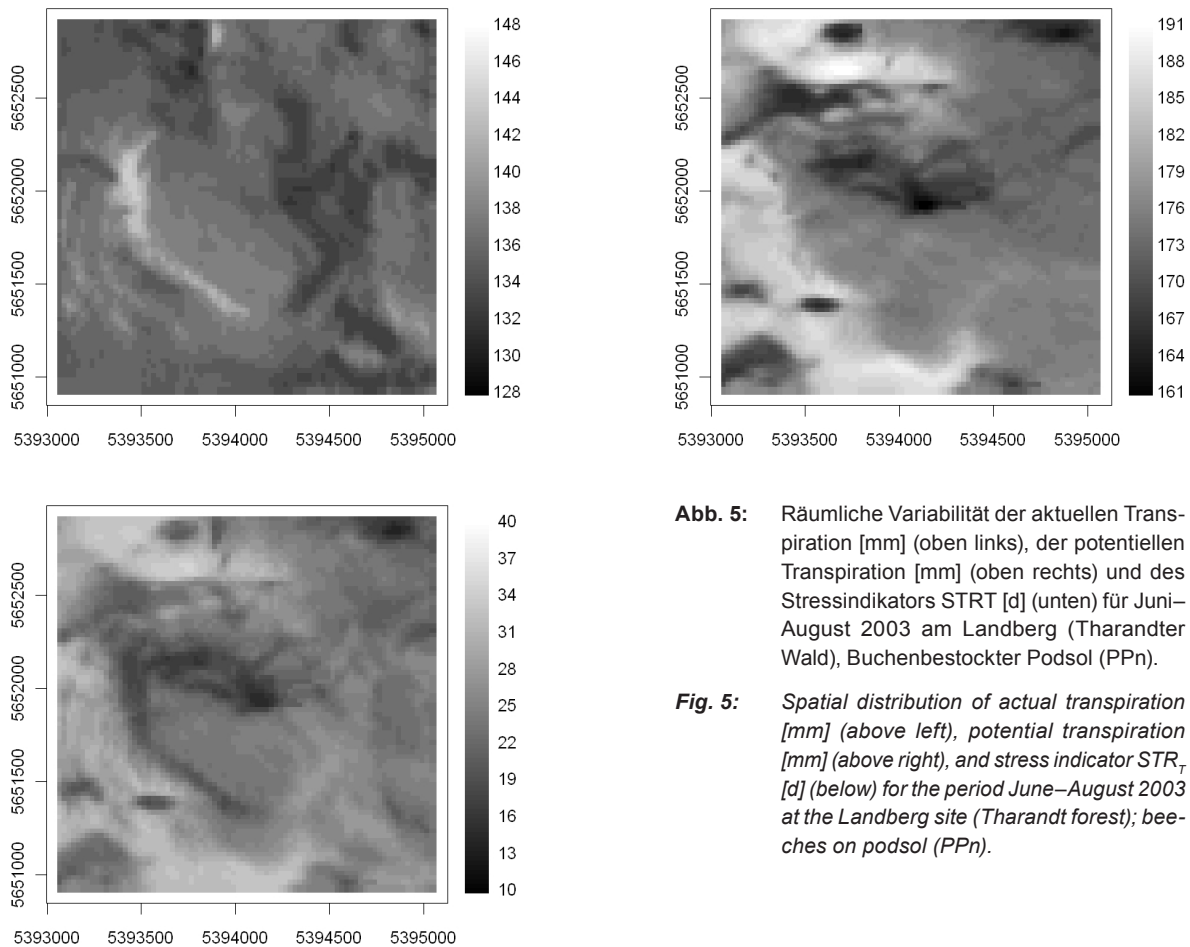
werden. Für unser Testgebiet Landberg im Tharandter Wald (SCHWÄRZEL et al. 2011) reduziert sich jedoch der Rechenaufwand je Bestockungsszenario von 6.400 Gridpunkten auf 18 x 9 Böden = 162 Vertikalprofile. Die Rechenzeit für den Betrieb des FIS ist vernachlässigbar. Da ein aufwendiges Training des Fuzzysystems mit dieser Methode nicht nötig ist, ist die Erstellung mehrerer FIS mithilfe weniger Modellläufe ohne weiteres realisierbar. Da die Bedingungen sich auf die gleichen Eingangsgrößen mit ausschließlich topographieabhängigen Wertebereichen beziehen, bleiben die Bedingungen für alle



**Abb. 4:** Parameter für die Zugehörigkeitsfunktionen für die Eingangsgrößen (topographieabhängige Korrekturfaktoren, links: Niederschlag und Globalstrahlung, rechts: Temperatur).

**Fig. 4:** Parameters of the membership functions for the FIS inputs (topography-dependent correction factors; left: precipitation and global radiation, right: temperature).





**Abb. 5:** Räumliche Variabilität der aktuellen Transpiration [mm] (oben links), der potentiellen Transpiration [mm] (oben rechts) und des Stressindikators  $STR_T$  [d] (unten) für Juni–August 2003 am Landberg (Tharandter Wald), Buchenbestockter Podsol (PPn).

**Fig. 5:** Spatial distribution of actual transpiration [mm] (above left), potential transpiration [mm] (above right), and stress indicator  $STR_T$  [d] (below) for the period June–August 2003 at the Landberg site (Tharandt forest); beeches on podsol (PPn).

FIS für das jeweilige Gebiet gleich.

Zusammenfassend ist die Methodik in Tabelle 1 dargestellt. Für die Berechnung einer anderen Bilanzgröße oder eines anderen Stressparameters müssen die Schritte 4–6 wiederholt werden, für eine andere Boden-Bestockungs-Variante für das gleiche Gebiet die Schritte 3–6.

#### 4 Anwendung der Methode

Anhand des Trockenjahres 2003 soll das Prinzip verdeutlicht werden. Betrachtet werden hier die Summen der aktuellen und der potentiellen Transpiration in der Vegetationsperiode sowie der Indikator für den Transpirationsstress  $STR_T$  (Anzahl der Tage in der Vegetationsperiode, an denen die aktuelle Transpiration 70 Prozent der potentiellen unterschreitet).

Die räumlichen Verteilungen der Korrekturfaktoren für die Eingangsparameter Globalstrahlung und Maximum der Tageslufttemperatur (jeweils den 2. Januar) sowie Niederschlag für das Sommerhalbjahr sind in Abb. 3 dargestellt. Da die Korrekturfaktoren dem gleichen Jahresgang unterliegen und sich für die Rasterpunkte nur in der Amplitude unterscheiden, würden sich die Abbildungen für andere Tage im Jahr nur durch die Skalenbeschriftung von Abb. 3 unterscheiden. Die Gridpunkte sind durch den Faktor für einen Tag für das FIS folglich ausreichend charakterisiert. Aus den in Abbildung 3 jeweils auftretenden Minima und Maxima ergeben sich die Parameter für die Zugehörigkeitsfunktionen in Abbildung 4. Diese Eingangsparameter gelten nun für das Untersuchungsgebiet unabhängig von Zielgröße oder Bilanzzeitraum. Aus je 3 Klassen für die Korrekturfaktoren für Globalstrahlung und Niederschlag und den 2 Klassen für die Temperatur ergeben

sich 18 Kombinationen und daher 18 Fuzzy-Regeln. Das parametrisierte Wasserhaushaltsmodell BROOK90 wird nun für alle 18 Kombinationen aus diesen Werten in Abbildung 4 gerechnet, wobei die Korrekturfaktoren für die Zugehörigkeitsgrade von 1 verwendet werden.

Aus den Modellergebnissen werden anschließend die gewünschten Ausgabegrößen extrahiert. Die 18 Varianten können nun den Konklusionen der Fuzzyregeln zugeordnet werden. Treten verschiedene Böden oder Bestockungen auf, müssen diese einzeln berechnet werden.

Zur Demonstration der Methode beschränken wir uns hier auf einen mit Buchen bestockten Podsol (Normpodsol PPn, siehe PETERS et al. 2011a). Für das Trockenjahr 2003 ergeben sich nach Anwendung des FIS die räumlichen Verteilungen von aktueller und potentieller Transpiration, wie in Abb. 5 dargestellt.

#### 5 Validierung

Die Modellgüte des FIS soll anhand der Ergebnisse des Wasserhaushaltsmodells BROOK90 bewertet werden. Zur Validierung wurde jeder zehnte der 6.400 Gridpunkte mit dem Wasserhaushaltsmodell nachgerechnet. In Tab. 2 sind die Wertebereiche für die betrachteten Größen und die Standardfehler (Wurzel aus mittleren quadratischem Fehler) dargestellt. Der Standardfehler bewegt sich jeweils unterhalb 2 Millimetern bzw. Stresstagen in der Sommerperiode.

Abb. 6 stellt die Ergebnisse des FIS-Outputs der Validierungsrechnung mit BROOK90 direkt gegenüber. Die Transpiration und die potentielle Transpiration werden mit dem FIS tendenziell

**Tab. 2:** Aktuelle und potentielle Transpiration von Juni bis August 2003, Stressindikator STR<sub>T</sub>, berechnet mit dem Modell BROOK90 und Fuzzy-Inference-System (in Klammern), Minimum, Maximum und Standardfehler.

**Tab. 2:** Actual transpiration and potential transpiration [mm] for the period June–August 2003, and stress indicator STR<sub>T</sub> [d], estimated with the water balance model BROOK90 and FIS (in brackets). Minimum, maximum, and root mean squared error are shown.

	T <sub>akt</sub> [mm]	T <sub>pot</sub> [mm]	STR <sub>T</sub> [d]
Minimum	127 (130)	164 (165)	17 (18)
Maximum	144 (143)	192 (188)	38 (35)
Standardfehler	1.38	1.32	1.65

etwas unterschätzt, i. d. R. allerdings nur ein bis 2 Millimeter für die Gesamtbilanz der 3 Monate. Generell wird das Wasserhaushaltsmodell mit dem FIS gut approximiert.

### 6 Schlussfolgerungen

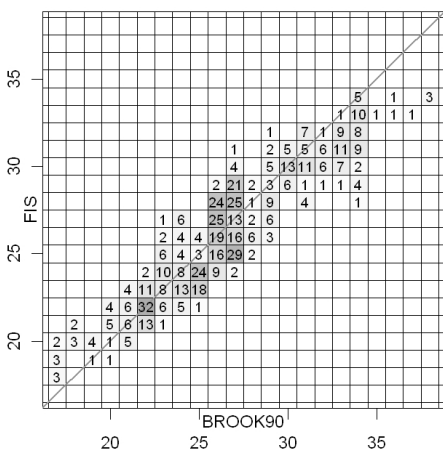
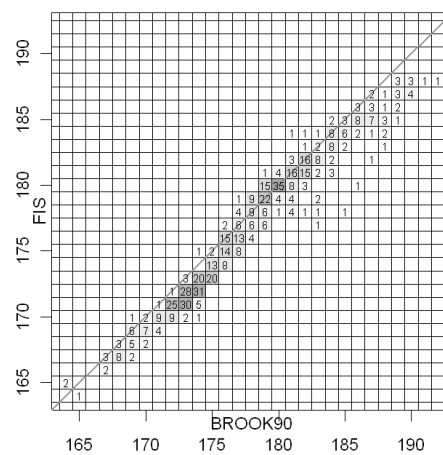
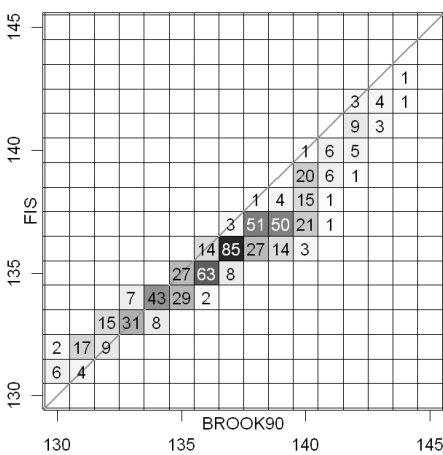
Der Einsatz von Fuzzy-Inference-Systemen (FIS) zur Regionalisierung des Wasserhaushaltes von Waldstandorten des Mittelgebirges ermöglicht auf eine elegante und einfache Weise eine signifikante Reduktion des Rechenaufwandes. In dem hier vorgestellten Beispiel konnte die Berechnung von 6.400 Gridpunkten in Tagesschritten auf 18 reduziert werden. Für die tatsächlichen Gegebenheiten am Landberg wurden 9 Böden ausgegrenzt (SCHWÄRZEL et al. 2011). Der Rechenaufwand dafür erhöht sich damit auf 9 x 18 = 162 Vertikalprofile. Durch

die Verwendung der NSF kann der Rechenaufwand von ca. 3 Monaten für eine 39-jährige Klimareihe auf einen Bruchteil reduziert werden. Erst dadurch werden Szenarienrechnungen für beispielsweise alternative Bestockungen oder Klimaprojektionen ermöglicht.

Da alle denkbaren reliefbasierten Abweichungen der meteorologischen Eingangsgrößen damit erfasst werden und die Berechnung mit dem Wasserhaushaltsmodell nur für weitere Bodenformen oder Bestockungen zu erfolgen hat, ist die Methode überall dort gewinnbringend einsetzbar, wo eine hohe räumliche Auflösung für die Wasserhaushaltsberechnung gefordert ist. Die hier präsentierte Methode hat ein großes Potential, um auch auf der Landschaftsskala physikalisch basiert mit vertretbarem Rechenaufwand Modellergebnisse zum Wasserhaushalt zu erzeugen. Die Methode kann flexibel auf sowohl potentielle als auch reale Verdunstung und davon abgeleitete Stressparameter angewandt werden. Dabei wird das FIS direkt mit Eingangsparametern des Modells und den Modellergebnissen parametrisiert. Es erfolgt keine Kalibrierung. Durch diese direkte Kopplung an das Wasserhaushaltsmodell ergibt sich eine physikalisch sinnvolle Berechnung.

### Danksagung

Wir danken der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) für die finanzielle Förderung unseres Verbundprojektes (Kennzeichen FE 504/2-1 und -2).



**Abb. 6:** Auftretshäufigkeiten von Ergebnispaaren BROOK90 versus FIS, Transpiration [mm] (oben links), potentielle Transpiration [mm] (oben rechts) und Verdunstungsstressindikator STR<sub>T</sub> [d] (unten).

**Fig. 6:** Frequencies of resulting combinations for the BROOK90 and FIS calculations; actual transpiration [mm] (above left), potential transpiration [mm] (above right), and stress indicator STR<sub>T</sub> [d] (below) for the period June–August 2003.

## Literatur

- ALVISI, S., MASCELLANI, G., FRANCHINI, M., BÁRDOSSY, A. (2006): Water level forecasting through fuzzy logic and artificial neural network approaches., *Hydrology and Earth System Sciences* **10**: 1-17.
- BERND, T., KLEUTGES, M., KROLL, A. (1999): Nonlinear Black Box Modelling – Fuzzy Networks versus Neural Networks. *Neural Computing and Applications* **8**: 151-162
- FEDERER, C.A. (1995): BROOK90: A simulation model for evaporation, soil water and stream flow, Version 3.1 Computer Freeware and Documentation. USDA Forest Service, PO Box 640, Durham NH 03825, USA.
- HUNDECHA, Y., BARDOSSY, A., THEISEN, H.-W. (2001): Development of a fuzzy logic-based rainfall-runoff model. *Hydrological Sciences* **46** (3): 363-376.
- KÖHNE, J.A., KÖHNE, S., ŠIMŮNEK, J. (2009): A review of model applications for structured soils: a) Water flow and tracer transport. *Journal of Contaminant Hydrology* **104**: 4-35.
- MATHWORKS (2010): Fuzzy Logic Toolbox™ 2, User's Guide. [www.mathworks.com](http://www.mathworks.com)
- MEYER, D., HORNIK, K. (2010): Sets, Generalized Sets, Customizable Sets and Intervals, Version 1.0-7. URL <http://cran.r-project.org>
- MÜNCH, A. (2004): AKWA-M – Teilflächen basiertes Wasserhaushalts und Hochwassermodell, Dr. Dittrich & Partner, Hydro-Consult GmbH, Bannewitz.
- PETERS, R. (2008): Künstliche Neuronale Netze zur Beschreibung der hydrodynamischen Prozesse für den Hochwasserfall unter Berücksichtigung der Niederschlags-Abfluss-Prozesse. *Dresdner Schriften zur Hydrologie* Heft **7**.
- PETERS, R., SCHWÄRZEL, K., CLAUSNITZER, F., BERNHOFER, CH., FEGER, K.H. (2011): Einfluss Boden und Bestockung auf den Standortwasserhaushalt. *Waldökologie, Landschaftsforschung und Naturschutz* **12**: 99-107.
- R DEVELOPMENT CORE TEAM (2010): R: A language and environment for statistical computing, reference index version 2.11.1. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. URL <http://www.R-project.org>
- SCHULLA, J., JASPER, K. (1999): Model description WaSim-ETH., Institute of Geography, ETH, Zürich.
- SCHWÄRZEL, K., FEGER, K.H., HÄNTZSCHEL, J., MENZER, A., SPANK, U., CLAUSNITZER, F., KÖSTNER, B., BERNHOFER, CH. (2009): A novel approach in model-based mapping of soil water conditions at forest sites. *Forest Ecology and Management* **258**: 2163-2174.
- SCHWÄRZEL, K., PETERS, R., PETZOLD, R., HÄNTZSCHEL, J., MENZER, A., CLAUSNITZER, F., SPANK, U., KÖSTNER, B., BERNHOFER, CH., FEGER, K.H. (2011): Räumlich-differenzierte Berechnung und Bewertung des Standortwasserhaushaltes von Wäldern des Mittelgebirges. *Waldökologie, Landschaftsforschung und Naturschutz* **12**: 119-126.
- SCHÜTZE, N. (2005): Neue Methoden zur Steuerung der Wassergabe mit Neuronalen Netzen in der Bewässerungslandwirtschaft. *Dresdner Schriften zur Hydrologie*, Heft **3**.
- STÜBNER, M., GEMMAR, P. (1997): An Approach for Data Analysis and Forecasting with Neuro-Fuzzy-Systems-demonstrated on Flood Events at River Mosel., Reprints: International Conference on Computational Intelligence, 5<sup>th</sup> Fuzzy days, Dortmund.
- ZEKÂİ ŞEN (2010): Fuzzy logic and hydrological modeling. CRC Press, 1st edition. ISBN: 1439809399, 348 pages.

submitted: 13.01.2011  
 reviewed: 15.02.2011  
 accepted: 08.04.2011

### Autorenanschrift:

Dr. Ronny Peters, Dr. Kai Schwärzel,  
 Prof. Dr. Karl-Heinz Feger  
 Technische Universität Dresden  
 Institut für Bodenkunde und Standortslehre  
 Piener Straße 19, 01737 Tharandt  
 E-Mail: [ronny.peters@forst.tu-dresden.de](mailto:ronny.peters@forst.tu-dresden.de)  
 E-Mail: [kai.schwaerzel@forst.tu-dresden.de](mailto:kai.schwaerzel@forst.tu-dresden.de)  
 E-Mail: [fegerkh@forst.tu-dresden.de](mailto:fegerkh@forst.tu-dresden.de)