

Erfassung und erste Analysen von räumlichen Mustern der Bodenfeuchte auf Waldstandorten

Detection and first analyses of spatial patterns of soil moisture at forest sites

Yvonne Morgenstern, Heike Puhmann & Klaus von Wilpert

Abstract

The measuring concept of randomised moving plots (RMP) is applied in four forest areas in Baden-Württemberg (southern Germany) to quantify the temporal and spatial variability of soil moisture and the parameters that influence it. Our investigations aim at (i) collecting data for the evaluation of a physically based, distributed water transport model, (ii) identifying influencing parameters and (iii) developing a transfer model which describes soil moisture as a function of time-constant but spatially variable site parameters on the one hand (e. g., terrain attributes, soil texture, forest stand structure) and time-dependent but spatially invariant global variables (e. g., air temperature, catchment runoff) on the other. The spatio-temporal variability of soil moisture (0–20 cm mineral soil depth) was measured simultaneously at 31 positions over a period of 14 days. Measuring positions were changed randomly every 14 days. The global variables were continuously measured at one or two positions within each investigation area. The site parameters were measured or described for each of the measuring positions. Using multivariate statistics methods, such as cluster analysis or classification and regression trees, the site parameters which influence the soil moisture dynamics were identified. This paper presents first results and discusses one landscape section in more detail.

Keywords: *spatial variability, soil water, multivariate analysis, forest management*

Zusammenfassung

In vier unterschiedlich strukturierten Waldregionen Baden-Württembergs wurde das Messkonzept der „zufällig wandernden Messplots“ angewendet, um mehr Informationen über die räumliche und zeitliche Variabilität der Bodenfeuchte und ihrer Einflussgrößen zu erhalten. Ziel ist es: (i) räumliche Daten für die Validierung eines physikalisch basierten Wasserhaushaltsmodells zu erhalten, (ii) Einflussparameter zu quantifizieren und (iii) ein Transfermodell zu entwickeln, welches die Bodenfeuchte einerseits als zeitunabhängige Funktion der räumlichen auftretenden Standortparameter (z. B. Reliefeigenschaften, Bodentextur, Waldstruktur) und andererseits als zeitabhängige Funktion der räumlich invarianten Globalvariablen (z. B. Klima- und Abflussparameter) beschreibt. Die räumliche Variabilität der Bodenfeuchte (Mineralbodentiefe 0–20 cm) wurde gleichzeitig an 31 Sondenstandorten über eine Periode von 14 Tagen gemessen und anschließend auf den nächsten zufällig gewählten Messplot versetzt. Die Globalvariablen werden kontinuierlich an ein bis zwei Standorten pro Untersuchungsgebiet gemessen. Des Weiteren wurden an allen

Sondenmesspunkten Standortseigenschaften aufgenommen. Mit der Anwendung multivariater Statistikmethoden, wie der Clusteranalyse sowie den Klassifikations- und Regressionsbäumen, ist es nun möglich, Standortsfaktoren zur Erklärung der räumlichen Variabilität der Bodenfeuchte zu identifizieren. Anhand eines Landschaftsausschnittes werden erste Ergebnisse dieser Analysemethoden vorgestellt und diskutiert.

Schlüsselwörter: Räumliche Variabilität, Bodenwasser, Multivariate Statistik, Waldbewirtschaftung

1 Einleitung

Im Rahmen der Klimafolgenforschung werden Wasserhaushaltsinformationen benötigt, um die Auswirkung des sich ändernden Trockenstressrisikos auf Baumwachstum und -vitalität abschätzen zu können. Diese sollten sowohl die zeitliche Dynamik als auch die räumliche Verteilung von Bodenwassergehalten widerspiegeln können.

Die mit dem Klimawandel prognostizierten Änderungen führen zu einer Temperaturerhöhung und einer veränderten Niederschlagsverteilung (trockenere Sommer und mildere Winter) in Baden-Württemberg (KLIWA 2006). Längere Vegetationsperioden und trockenere Sommer verändern den Wasserhaushalt der Wälder und führen zur Erhöhung des Trockenstressrisikos an einigen Standorten. Die Forstwirtschaft ist daher daran interessiert zu wissen, welche Baumarten für welche Standorte in Zukunft noch geeignet sind. Im Gegensatz zu langjährigen Klimamessreihen des Deutschen Wetterdienstes gibt es für Waldstandorte nur wenige Dauerbeobachtungsstationen und vergleichsweise kurze Messreihen der Bodenfeuchte (seit Mitte der 90er Jahre), um Prognosen für die Zukunft abzuleiten. Es ist daher notwendig, sowohl die Wechselwirkungen zwischen Bodenwasserhaushalt und Reaktion im Wachstum der Bäume (zeitliche Variabilität) zu untersuchen, als auch die räumliche Verteilung der Bodenfeuchte und ihre Einflussgrößen zu erfassen. So finden gegenwärtig umfangreiche Messkampagnen und Untersuchungen statt, die es ermöglichen sollen, ein Modell zum kleinräumigen Trockenstressrisiko auf drei Integrationsebenen (Bodenprofil, Bestand, Landschaft) zu erstellen und Einflussfaktoren zu quantifizieren (PUHLMANN et al. 2008). Auf lokaler und kleinräumiger Ebene (Bodenprofil bzw. Bestand) wird die Wasserverfügbarkeit mit einem forsthydrologischen Wasserhaushaltsmodell berechnet, um die Wahrscheinlichkeit des Auftretens von Wassermangel (Anzahl und Dauer von Wasserdefizitphasen) zu quantifizieren.

Bei der Wasserhaushaltsmodellierung auf Bestandsebene besteht in der Regel das Problem, Daten zum zeitlichen Verlauf der relevanten Bodenwasserkenngößen sowie deren räumliche Verteilung für die Eichung des Modells zu gewinnen.

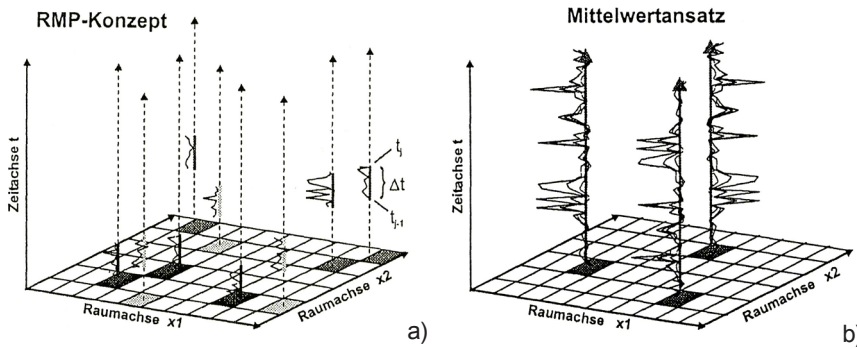


Abb. 1: Messdesign des RMP-Konzeptes (a) im Vergleich zu herkömmlicher Messmethode und (b) mit drei permanent messenden Messstationen (WÖHRLE 2006).

Fig. 1: Measurement design of the RMP concept (a) in comparison with conventional measuring methods and (b) with three continuous-measurement stations (WÖHRLE 2006).

Aufgrund des hohen instrumentellen Aufwandes werden in der Regel Zeitreihen an wenigen stationären Messpunkten erhoben, welche die räumliche Heterogenität der Waldbestände nicht ausreichend berücksichtigen.

1.1 Räumliche und zeitliche Erfassung der Bodenfeuchte

Aufgrund der strukturellen Eigenschaften der Böden, dem Einfluss des Steingehaltes, der Wurzelverteilung, der Kronenstruktur und den biologischen Aktivitäten im Boden ist die räumliche Variabilität der Bodenfeuchte gerade im Wald sehr hoch.

Dies zeigen Arbeiten von WESTERN et al. (1998), BROCCA et al. (2007) und CHIFFLARD (2006), die die räumliche als auch zeitliche Variabilität der Bodenwassergehalte und ihre Einflussgrößen untersucht haben. Die Bodenvorfeuchte spielt besonders bei Analysen von Abflussprozessen eine große Rolle, da diese entscheidet, welcher Anteil des Niederschlages infiltriert oder zum Direktabfluss kommt. Es sind daher Untersuchungen zu räumlichen Bodenfeuchtemustern und die Erfassung möglicher Einflussparameter notwendig und eine Übertragung auf unbeobachtete Gebiete vorzunehmen und andererseits Niederschlags-Abflussprozesse besser quantifizieren zu können (CHIFFLARD et al. 2008).

Herkömmliche Messmethoden zur Erfassung der räumlichen Verteilung der Bodenfeuchte werden meist als Terminmessungen entlang eines Transektes, eines Rasters oder an zufällig gewählten Messpunkten durchgeführt. Vorteil dieser Messmethoden ist, dass nur wenige Messsonden benötigt werden und dies eine kostengünstige Beprobung darstellt. Von Nachteil ist, dass die zeitliche Variabilität in Form von kontinuierlichen Zeitreihen nicht erfasst wird und Einbaufehler bei Wiederholungsmessungen entstehen können.

Diese Einbaufehler werden bei Messmethoden mit permanent messenden Sonden verringert. Zudem kann die zeitliche Veränderung der Bodenfeuchte in verschiedenen Messtiefen hochauflösend erfasst werden. Die räumliche Variabilität hingegen kann nur mit einem hohen Aufwand an Messgeräten realisiert werden. Eine Alternative dazu bietet das von WÖHRLE (2006) entwickelte Messkonzept der „zufällig wandernden Messplots“ (RMP-Konzept), das im Folgenden vorgestellt wird.

Aufgrund der immer besseren Auflösung digitaler Höhenmodelle liegt es nahe, dass viele Einflussparameter der Bodenfeuchte direkt aus diesen flächenhaft vorliegenden Daten abgeleitet und zur Vorhersage genutzt werden können. CHIFFLARD et al. (2006) fanden Einflussparameter, wie Hangneigung, relative Höhe und relative Hanglänge, die gut mit den gemessenen Bodenfeuchten korrelierten. Es zeigte sich aber auch, dass

die zeitliche Variabilität (Witterungsverhältnisse) wiederum die räumliche Variabilität beeinflusste. Ähnliche Erkenntnisse fanden BROCCA et al. (2007) in ihren Untersuchungsgebieten, wobei hier die Hangneigung, das spezifische Einzugsgebiet und die Geländehöhe als dominierende Einflussgrößen in geneigten Flächen bestimmt wurden.

Das Ziel der Untersuchungen ist es, sowohl die zeitliche als auch die räumliche Variabilität der Bodenfeuchte und ihrer Einflussgrößen zu erfassen und Verfahren zu entwickeln, die eine Übertragung auf unbeobachtete Standorte im Mittelgebirgsraum erlauben (Regionalisierung).

1.2 Randomised Moving Plots

Das RMP-Konzept verwendete WÖHRLE (2006), um den räumlichen Einfluss von Lufttemperatur, Bestandsniederschlag und Bodensaugspannung auf Kenngrößen des Stoffhaushalts von Kalkbuchenwäldern bzgl. unterschiedlicher Waldbaumaßnahmen zu untersuchen.

Dieses Messkonzept setzt voraus, dass zahlreiche Kenngrößen des Stoff- und Wasserhaushalts einem großräumigen saisonalen Muster folgen. Es ist daher nicht notwendig, das zeitliche Muster an allen Messpunkten vollständig zu erfassen. Dieses kann mithilfe von ortsunabhängigen „Globalvariablen“, die für die betrachtete Fläche einheitlich wirksam sind (z. B. Strahlungsbilanz oder Freilandniederschlag), erklärt werden. Die dadurch freiwerdenden Messkapazitäten können in die Erfassung der kleinräumlich variierenden Kenngrößen investiert werden. An vielen verschiedenen Einzelpunkten werden jeweils nur kurze Zeitreihen gemessen, um anschließend die Messgeräte wiederholt auf andere Plätze umzusetzen (Abbildung 1). Damit liegen für eine größere Bandbreite von Standorten Daten vor, welche so zu differenzierten und genaueren Aussagen von Modellrechnungen führen können.

Das Ziel ist es, ein vollständiges, fein aufgelöstes Raum-Zeit-Modell einer Untersuchungsvariablen für die untersuchten Flächen zu konstruieren. Das Raum-Zeit-Modell für einen Standort mit den Koordinaten x_1 und x_2 sowie dem Zeitpunkt t setzt sich für den Bodenwassergehalt aus drei Teilen zusammen:

$$\theta(t, x_1, x_2) = \theta(t) + \theta_{\text{Raum}}(x_1, x_2) + \varepsilon_{\theta}(x_1, x_2, t) \quad (\text{Gl. 1})$$

$\theta(t)$ spiegelt die zeitliche Variabilität der Bodenfeuchte wider, die von den Globalvariablen abhängig ist. $\theta(x_1, x_2)$ repräsentiert den Einfluss der räumlich wirkenden Faktoren und $\varepsilon_{\theta}(t, x_1, x_2)$ die Reststreuung, die weder von den räumlich invarianten Globalvariablen noch von den räumlichen Faktoren erklärt werden kann.

1.3 Erste Anwendung des RMP-Konzeptes auf die Bodenfeuchte

Eine Übertragung des RMP-Konzeptes auf den Parameter „Bodenfeuchte“ wurde zunächst von ARNSTADT (2009) auf einer 20 x 20 m großen Fläche im Conventwald (Südschwarzwald) getestet, bevor eine Anwendung auf die vier Waldregionen in Baden-Württemberg erfolgte.

Im Abstand von 14 Tagen wurden 10 TDR-Sonden an zufällig gewählten Positionen versetzt, um die räumliche Verteilung der Bodenfeuchte zu erfassen. Insgesamt konnten an 80 Punkten 80 kurze Zeitreihen der Bodenfeuchte bis 20 cm Tiefe gemessen werden. Des Weiteren standen langjährige Messreihen (2001–2007) der Klimagrößen und Abflussdaten sowie Bodenwassergehalte in verschiedenen Bodentiefen zur Entwicklung eines Globalmodells zur Verfügung. Die mittlere zeitliche Entwicklung der Bodenfeuchte konnte somit über Regressionsmodelle berechnet werden. Es zeigte sich, dass die Qualität der Modellgüte in Abhängigkeit der Anzahl der Globalvariablen steigt. Gleichung 2 repräsentiert ein Regressionsmodell für den Zeitraum der Messungen 08–12/2007, welches die Bodenfeuchte als Funktion der global wirkenden Einflussgrößen Niederschlagssumme P der letzten 48 Stunden und Mittelwert der Luftfeuchte U der letzten 30 Stunden beinhaltet. Die Übereinstimmung zwischen gemessenen Bodenfeuchten und den Schätzungen des Globalmodells wird mit einem R^2 von 0,462 und einen RMSE von 1,036 angegeben. Bei allen Modellen zeigte sich, dass der mittlere Verlauf der Bodenwassergehalte relativ gut wiedergegeben werden konnte, aber Austrocknungsperioden überschätzt und Spitzen unterschätzt wurden. Insgesamt betrug der Fehler zwischen Modell und permanent messender FDR-Sonde maximal 5 Vol.-% (Abbildung 2).

$$\theta(t) = 0,073 * \sum_{i=1}^{48} P(t-i-1) + 0,016 * \frac{\sum_{i=1}^{30} U(t-i-1)}{30} + 26,294 \quad (\text{Gl. 2})$$

Mithilfe geostatistischer Verfahren (Kriging) konnte der räumliche Effekt aus den Residuen der 80 kurzen Messreihen in die Fläche übertragen werden. Die Residuen ergaben sich für jeden Messpunkt aus dem Mittelwert der Bodenwassergehalte der 14-Tag-Periode abzüglich des zeitlichen Trends. Der zeitliche Trend einer 14-Tages-Periode kann entweder über den Mittelwert der Bodenwassergehalte einer kontinuierlichen Messstation oder mit der Anwendung eines Globalmodells (Gleichung 2) bestimmt werden. Nach dem Kriging wurden dem räumlichen Effekt der mittlere zeitliche Trend einer Messperiode wieder dazu addiert (Abbildung 3a). Die Karte spiegelt den Verlauf des Baches und die Feuchteverhältnisse aufgrund des Reliefs gut wider. Die Anwendung des Globalmodells konnte ähnliche Ergebnisse liefern, wie die Verwendung einer kontinuierlichen Messreihe. Die Differenz betrug maximal 4 Vol.-% (Abbildung 3b). Diese Vorgehensweise führt allerdings nur zur Darstellung der mittleren Feuchteverhältnisse einer Messperiode und weist daher noch keinen Vorteil des RMP-Konzeptes gegenüber Terminmessungen auf. Daher müssen im nächsten Schritt die räumlichen Faktoren analysiert werden, die einen Zusammenhang zwischen der Dynamik der Bodenfeuchte und ihrer räumlichen Verteilung aufweisen. Erst dann kann eine dynamische Karte der Bodenfeuchte im Tageszeitschritt erzeugt werden.

Inwiefern ein Globalmodell die Dynamik der Bodenwassergehalte (Austrocknung und Bodenfeuchtespitzen) wirklich abbilden kann ist fraglich, da viele Prozesse im Boden unberücksichtigt bleiben. Alternativ könnte die Anwendung eines physikalisch basierten 1-D Wasserhaushaltsmodells sein.

Fazit der ersten Testphase:

1. Das RMP-Konzept lässt sich auf die Bodenfeuchte übertragen.
2. Die zeitliche Modellierung muss noch verbessert werden.
3. Es wird eine Transferfunktion benötigt, die es ermöglicht, die Bodenfeuchte für jeden Ort und jeden Zeitpunkt vorherzusagen. Dafür sind sowohl die Globalvariablen als auch Vegetations-, Boden- und morphologischer Parameter notwendig.

2 Material und Methoden

2.1 Untersuchungsgebiete

An vier Standorten Baden-Württembergs wurde das RMP-Konzept auf Bestandesebene durchgeführt (Abbildung 4). 2008/2009 im Conventwald und in Ochsenhausen und 2009/2010 in Esslingen und Heidelberg.

2.1.1 Permanentmessungen am Profilstandort

Die vier gewählten Untersuchungsgebiete repräsentieren sehr unterschiedliche Klima- und Landschaftsregionen Baden-Württembergs (Tabelle 1) und sind bereits seit Mitte der 90er Jahre in das EU-weite Programm zum Monitoring von Waldökosystemen (Level II-Standorte) integriert. Alle Standorte sind von einem Mittelgebirgscharakter und einem ausgeprägten Geländereief, allerdings auf unterschiedlichem Skalenniveau, geprägt. Diese bisherigen Dauerbeobachtungsstationen befanden sich überwiegend in Fichtenbeständen, so dass im Rahmen dieser Untersuchungen im Frühjahr/Sommer 2008 weitere Messstationen unter Buche eingerichtet wurden. Pro Gebiet werden so kontinuierliche Messungen der Klimagrößen (Niederschlag, Lufttemperatur, Globalstrahlung, Windgeschwindigkeit, relative Luftfeuchte) sowie Bodenwasserhaushaltsgrößen (Wassergehalt und Saugspannung in 30 und 60 cm Bodentiefe) und Baumwachstumsreaktionen (Dendrometer) an jeweils zwei Permanentstationen in je drei unterschiedlichen Kronensituationen (Kronenmitte, -rand, und -lücke) erfasst.

Durch den Ein- bzw. Umbau von pF-Metern (Fa. ECOTEC) statt Tensiometern können Informationen zur Saugspannung im Boden auch bei extremer Austrocknung ($> pF3$) des Bodens gewonnen werden. Dies war bisher auf den Level II-Flächen nicht möglich. Mit der Neuausstattung der Flächen mit Dendrometern ist es nun auch möglich, Wachstumsreaktionen der zwei Hauptbaumarten auf Änderungen im Bodenwasserhaushalt zu untersuchen. Die bisher vorliegenden Daten der Level II-Standorte können sowohl direkt für die Wasserhaushaltsmodellierung an den Standorten, als auch zur Erstellung der Globalmodelle, verwendet werden.

2.1.2 Messtransect auf Bestandesebene

In jedem dieser Untersuchungsgebiete wurde ein Messtransect (ca. 80 x 1.000 m großer Geländestreifen) mit je 12 Messplots eingerichtet. Diese wurden so gewählt, dass

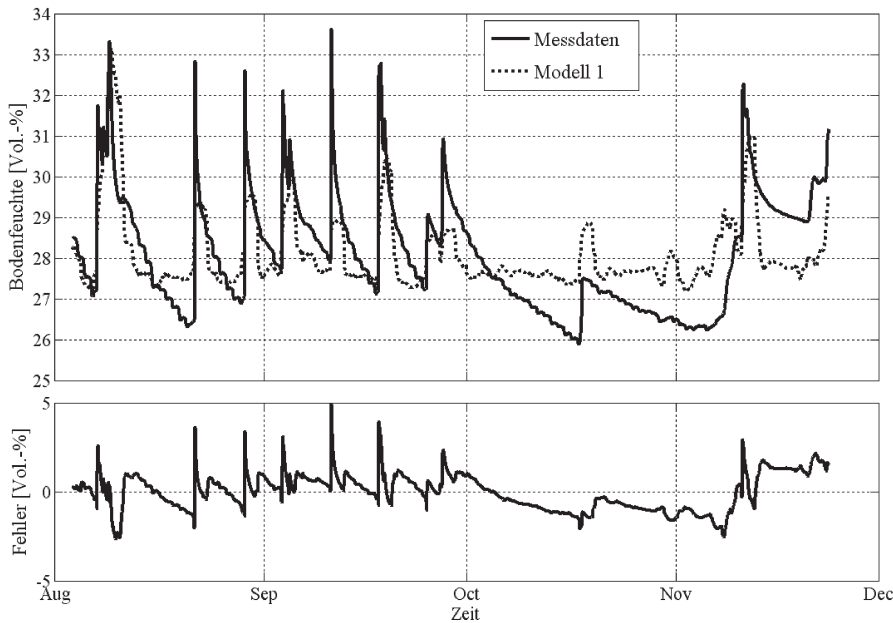


Abb. 2: Oben: Vergleich der Vorhersage der Bodenfeuchte aus dem Globalmodell (Punktlinie) mit den Messwerten der permanent messenden FDR-Sonde in 15 cm Tiefe (Linie); unten: Abweichung aus der Modellierung (ARNSTADT 2008).

Fig. 2: Top: Comparison of the soil moisture predicted by the global model (dotted line) and the readings of the continuous-measurement FDR probe in 15 cm depth (line); bottom: model residuals (ARNSTADT 2008).

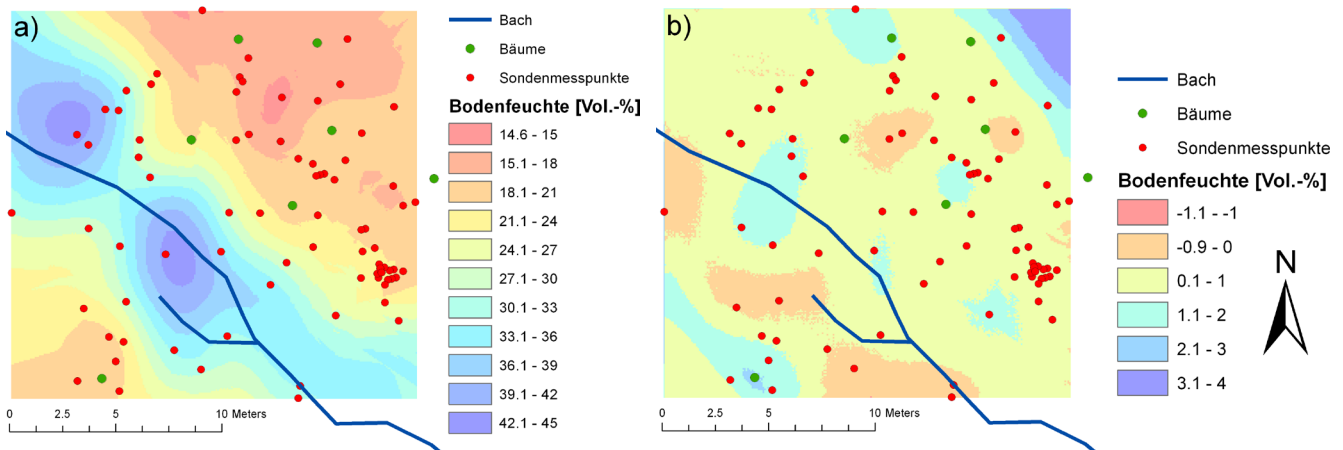


Abb. 3: a) Räumliches Muster der mittleren Bodenfeuchte einer Messperiode bei Anwendung des Globalmodells; b) Abweichung zwischen Globalmodell und einer kontinuierlichen Messstation im Conventwald zur Bestimmung der zeitlichen Variabilität (ARNSTADT 2008 verändert).

Fig. 3: a) Spatial pattern of the mean soil moisture for one measuring period derived from the global model. b) Difference between the global model and data from a continuous-measurement station at Conventwald to determine the temporal variability (ARNSTADT 2008 modified).

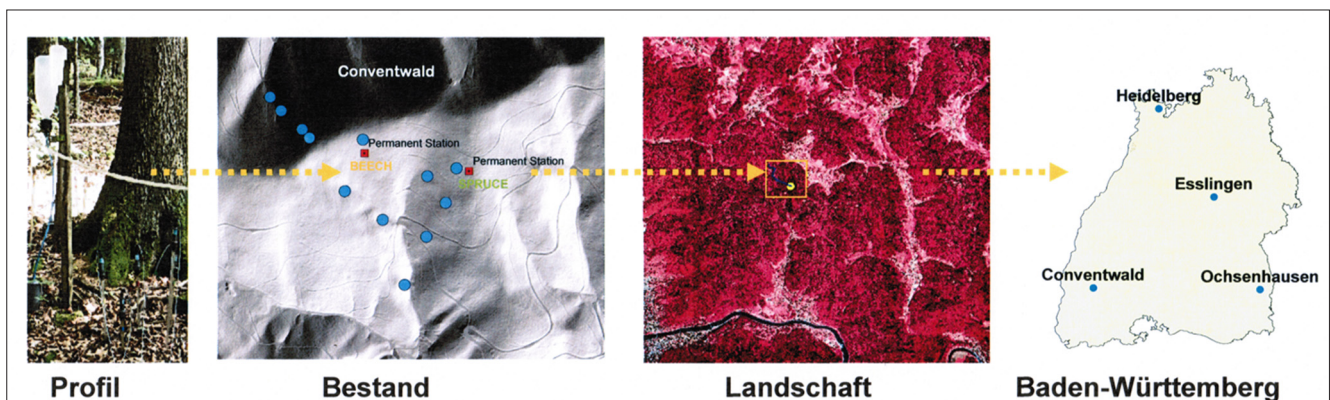


Abb. 4: Skalenübergreifendes Messkonzept (Profil – Bestand – Landschaft) zur Abschätzung des Trockenstressrisikos in Baden-Württemberg.

Fig. 4: Multi-scale measurement concept (site – forest stand – landscape) for predicting drought risk in Baden-Württemberg.

Tab. 1: Naturräumliche Einordnung und mittlere Kenngrößen der vier Untersuchungsgebiete (BMELF 1997).

Tab. 1: *Geographic classification of natural landscape and mean parameters of the four investigation areas (BMELF 1997).*

	Conventwald	Esslingen	Heidelberg	Ochsenhausen
Wuchsgebiet	Schwarzwald	Neckarland	Odenwald	SW-deutsches Alpenvorland
Geologie	Hangschutt aus dunklen Paragneisen	Stubensandstein	Hangschutt aus Sandsteinen	Grundmoräne der Rißeiszeit
Bodentyp	Braunerde	podsolige Braunerde, Pelosol-Pseudogley	Podsol-Braunerde	Pseudogley-Parabraunerde
Geländehöhe	816 m ü. NN	345 m ü. NN	515 m ü. NN	678 m ü. NN
Hangneigung	19,0°	7,5°	5,2°	1,6°
Jahresmitteltemperatur ¹⁾	6,8 °C/a	6,3 °C/a	7,5 °C/a	7,5 °C/a
Niederschlags-summe ¹⁾	1749 mm/a	857 mm/a	965 mm/a	878 mm/a

¹⁾ mittlere Kennwerte bezogen auf den Zeitraum 1960–1990 (DWD)

Tab. 2: Aufnahme und Ableitung potentieller Einflussparameter an allen Sondenstandorten.

Tab. 2: *Potentially significant parameters assessed at all sites.*

Vegetationsparameter ¹⁾	Bodenparameter ¹⁾	Reliefparameter ²⁾
Hauptbaumart	Bodenart	Hangneigung
Baumartenmischung	Gefügeform	Hangausrichtung
Mischungsform	Höhe und Art der Auflage	Geländehöhe
Natürliche Altersklasse	Anzahl der Feinwurzeln	TOPEX - Exponiertheit
Schlussgrad	Humusanteil	Hangwölbung
Bestandesstruktur	Lagerungsdichte	Hanggliederung
Kronenhöhe	Hydromorphiemerkmale	Länge des Fließweges
Auftreten, Höhe u. Bedeckungsgrad der Bodenvegetation	Entfernung zum nächsten Baum	Spezif. Einzugsgebiet am Punkt
	mittlerer Skelettgehalt in 20 bis 70 cm	Topographic Wetness Index
	Bodentiefe	Stahlungsparameter
	Fein-, Mittel-, Grobskelettanteil in 0–20 cm	Streampowerindex
		Slope-Length-Faktor

¹⁾ Feldaufnahmen ²⁾ Beispiele der berechneten digitalen Reliefattribute (ca. 100) aus dem digitalen Geländemodell 1m liegen als Rasterdaten (1 x 1 m) vor.

sie möglichst viele unterschiedliche Kleinstandorte mit unterschiedlichen Expositionen, Hangneigungen, Feuchteverhältnissen und Bestandessituationen abdecken. Abbildung 5 zeigt exemplarisch die Untersuchungsfläche im Conventwald mit dem gewählten Transekt, den 12 Messplots (RMP 1-12) sowie beispielhaft einem Messplot (Radius = 40 m) mit 2 x 31 Sondenstandorten. An allen Messplots werden Bodenfeuchtemessungen nach dem gleichen Versuchsdesign durchgeführt. Über einen Zeitraum von 14 Tagen messen 31 zufällig verteilte TDR-Sonden (MiniTrase mit 20 cm langen Dreistabsonden, maximale Kabellänge 40 m) alle 30 Minuten die Bodenwassergehalte bis 20 cm Bodentiefe. Danach werden die Sonden auf einen der anderen Messplots umgesetzt und die Messungen wieder 14 Tage lang durchgeführt. Auch

die Abfolge der Messplots aufeinander ist zufällig. Dieses Verfahren wird ca. ein Jahr lang wiederholt, sodass in jedem Untersuchungsgebiet im Optimalfall 24 x 31 kurze Zeitreihen der Bodenwassergehalte zur Verfügung stehen. Auf jedem der 12 Plots finden demnach zwei Messkampagnen zu unterschiedlichen Zeitpunkten statt. Des Weiteren wurden an den Sondenstandorten erklärende Einflussgrößen (Tabelle 2) aufgenommen, die eine Übertragung der Messwerte auf unbeobachtete Standorte ermöglichen sollen. Dafür mussten alle Sondenmesspunkte eingemessen werden. An den Mittelpunkt der RMP-Messplots wurden ausführliche Profilsprachen vorgenommen sowie Bodenproben zur Bestimmung der Korngrößenverteilung, der Lagerungsdichte, des organischen Kohlenstoffgehalts, des Wasserrückhaltevermögens

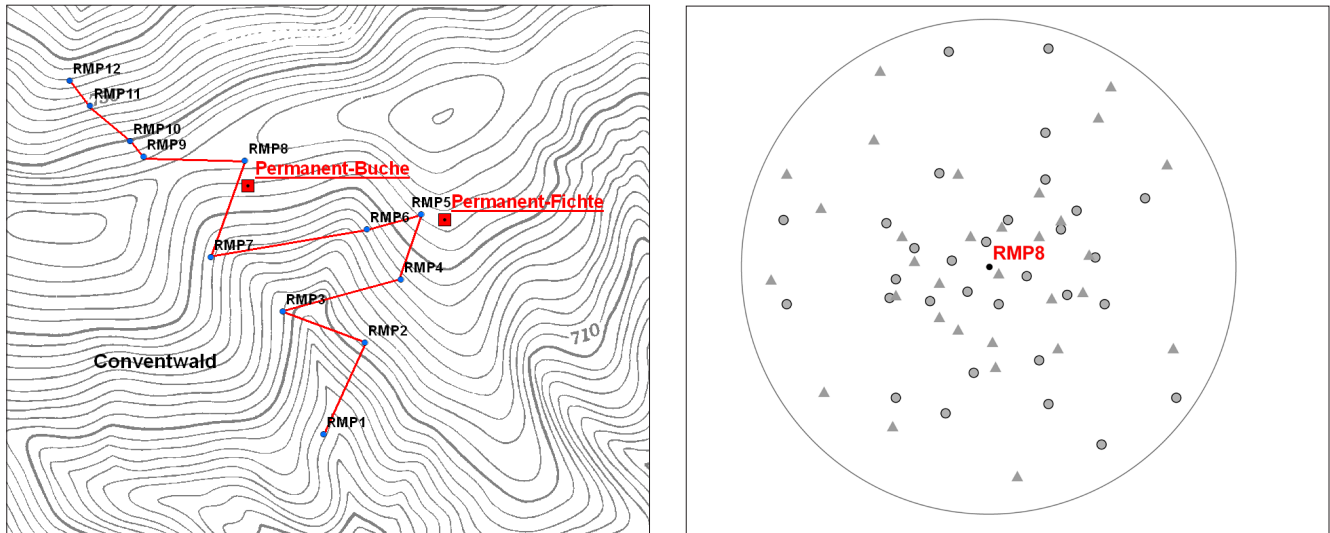


Abb. 5: Links: Transekt mit 12 Messplots (RMP1-RMP12) und 2 permanenten Dauerbeobachtungsstationen; rechts: standardisierter Sondensteckplan am Beispiel des Messplots RMP8 mit 2 Messperioden = 2x31 Sondenmessstandorte (Kreise = 1. Periode, Dreiecke = 2. Periode).

Fig. 5: Left: transect with 12 measurement plots (RMP1-RMP12) and 2 continuous-measurement stations; right: standardized installation plan for probes, using the example of measuring plot RMP8 with two measuring periods = 2x31 measuring probe sites (circles = 1st period, triangles = 2nd period).

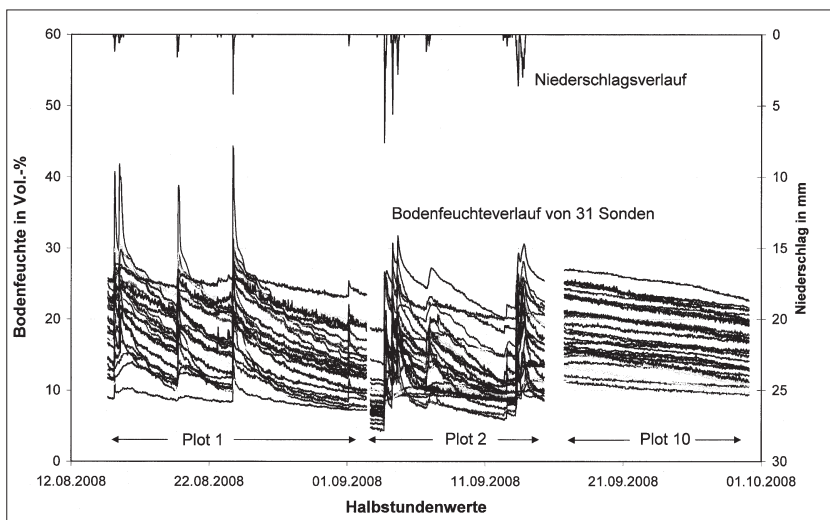


Abb. 6: Verlauf der Bodenfeuchte und des Niederschlags an den drei Messplots RMP1, 2 und 10 der Periode1 im Conventwald.

Fig. 6: Time series of soil moisture and precipitation at measuring plots RMP1, 2 and 10 for period 1 at Conventwald.

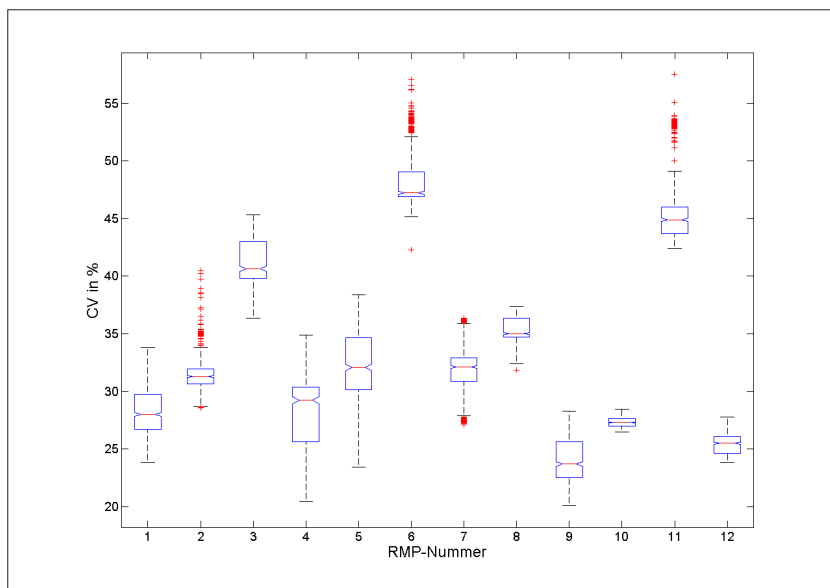


Abb. 7: Boxplots der CV-Werte der Bodenwassergehalte für jede Messfläche (alle 31 Sonden), bezogen auf jeden Messzeitpunkt (Halbstundenwert).

Fig. 7: Box plots of CV values of soil water content for each of the 12 measurement plots (all 31 probes) in relation to each measuring interval (half-hour value).

und der hydraulischen Leitfähigkeit in 10 und 30 cm Tiefe entnommen.

2.1.3 Landschaftsebene

Die auf den Untersuchungsflächen erstellten Raum-Zeit-Modelle sollen im nächsten Schritt auf größere Landschaftsausschnitte der Untersuchungsflächen übertragen werden. Für diese Landschaftsausschnitte (100 bis 200 km²) liegen vollflächige Color-Infrarot-Luftbilder aus dem Sommer 2004 vor. Die aus den Luftbildern identifizierten Trockenschäden können mit den räumlichen Mustern aus dem Raum-Zeit-Modell des RMP-Konzeptes verglichen werden und stellen somit eine Validierungsmöglichkeit für die Bodenwassermodellierung dar. DE & PUHLMANN (2009) untersuchten mit verschiedenen statistischen Verfahren, inwieweit Gebiets- und Bestandseigenschaften die Unterschiede im Schädigungsgrad der verschiedenen Untersuchungsgebiete sowie die räumlichen Verbreitungsmuster der Schäden innerhalb eines Überfliegungsgebietes erklären können. Es zeigte sich, dass geländemorphologische Größen offenbar nicht ausreichen, um die räumliche Verteilung von Kronenschäden vollständig zu erklären. Es ist daher zu vermuten, dass ein Teil der nicht erklärten Varianz durch andere Gebietsmerkmale, wie Bestandseigenschaften und Kenngrößen des Bodenwasserhaushalts, beschrieben werden kann.

2.2 Multivariate Statistik

Für die Identifizierung der Einflussfaktoren (Standortseigenschaften) auf das räumliche Muster der Bodenfeuchteverteilung wurden folgende multivariat-statistische Analysen ausgewählt:

1. Hierarchische agglomerative Clusteranalyse – Gruppierung der Messreihen der Bodenwassergehalte – Bildung von ähnlichen Bodenfeuchteklassen bezüglich Niveau und Dynamik der Bodenfeuchte.
2. Wilcoxon Rangsummentest – Auswahl von Standortseigenschaften, deren Mediane sich in den Clustergruppen signifikant unterscheiden.
3. Korrelationsanalyse zwischen den signifikanten Standortseigenschaften – Ausschluss von Parametern die stark korreliert zueinander sind.
4. CART-Analysen (Klassifikations- und Regressionsbäume) zwischen Clustergruppen und signifikanten Standortseigenschaften – Ermittlung der Standortseigenschaften und ihrer Wertegrenzen, die zur Vorhersage der Clustergruppen führen.

Die Clusteranalyse ist ein Standardverfahren zur Bildung von Gruppen oder Clustern ähnlicher Objekte. Die Ähnlichkeit von Objekten wird anhand ihres Abstandes bzw. ihrer Distanz in einem Parameterraum definiert (BACKHAUS et al. 2008). Mit der Clusteranalyse können die 14-Tagesmessreihen der Bodenwassergehalte in Gruppen mit ähnlichem Feuchteniveau untergliedert werden, in dem als Abstandsmaß der euklidische Abstand verwendet wird. Eine Unterscheidung der Messreihen nach ihrem dynamischen Verhalten lässt sich mit dem kreuzkorrelierten Abstandsmaß durchführen. Die Anwendung der Clusteranalyse erfolgte mit dem Softwarepaket Matlab (Version R2007b).

Mit dem Wilcoxon Rangsummentest (Mann-Whitney U-Test) kann eine erste Auswahl von Standortfaktoren erfolgen, indem

überprüft wird, inwiefern sich in den Clustern die Mediane der Einflussparameter signifikant unterscheiden (FAHRMEIR et al. 2007). Dieser Rangsummentest ist ein parameterfreier statistischer Test, der die Gleichheit der Mediane zweier unabhängiger Verteilungen überprüft. Mithilfe von Boxplots kann der Parameterbereich in den gefundenen Clustern anschaulich dargestellt werden. Der Test ist nur auf metrische Parameter (Messwerte) anwendbar. Standortparameter, wie Baumart, müssen über Kreuztabellen erfasst werden, indem die Häufigkeit eines Parameterwertes pro Cluster analysiert wird. Für alle potentiellen Einflussparameter, welche sich bezüglich ihrer Clusterzugehörigkeit signifikant unterscheiden, sollte eine bivariate Korrelationsanalyse zwischen den Standortparametern durchgeführt werden. Viele abgeleitete Parameter aus dem digitalen Geländemodell (DGM) sind miteinander hoch korreliert. Bei einer Verwendung aller signifikanten Parameter zur Erstellung der CARTs wären untereinander hoch korrelierte Parameter gegeneinander ersetzbar.

Die CART-Analyse zeichnet sich durch das Erzeugen eines binären Entscheidungsbaumes aus, d. h. es wird ein Schwellenwert eines Attributes (Einflussgröße) identifiziert, der eine optimale Trennung bezüglich der vorgegebenen Klassifikation der Daten (z. B. Gruppen unterschiedlicher Bodenfeuchte) vornimmt. Je einflussreicher ein Parameter ist, desto weiter oben steht er im Entscheidungsbaum. Mit der CART-Analyse können somit Regeln aufgestellt werden, die eine automatische Klassifizierung aus den identifizierten Attributen und ihren Schwellenwerten vornehmen (SPSS 18).

3 Erste Ergebnisse

3.1 Deskriptive Statistik

Am Beispiel des Untersuchungsgebietes Conventwald werden erste Ergebnisse der statistischen Analysen vorgestellt. Abbildung 6 zeigt beispielhaft den Verlauf der Bodenfeuchtemessreihen an drei aufeinander folgenden Messplots (Plot 1, 2 und 10), die eine hohe räumliche Variabilität der Bodenfeuchte innerhalb der 0,5 ha großen Messplots aufweisen. Für den gesamten Datensatz Conventwald mit 12 Messplots und je einer Messperiode lag die Spannweite des Variationskoeffizienten (CV) zwischen 24–46 % und die Standardabweichung zwischen 4–9 Vol.-% (Tabelle 3).

Die Boxplots in Abbildung 7 spiegeln die unterschiedliche Variabilität der Messungen der Bodenwassergehalte auf den einzelnen Messplots wider. Die Variabilität der Messungen wird einerseits von der zeitlichen Variabilität beeinflusst, wie dem Auftreten von extremen Niederschlagsereignissen oder Austrocknungsphasen, andererseits spielt der Einfluss des Reliefs, des Bodens (Textur- und Steingehalt) und der Vegetationsstruktur eine entscheidende Rolle. Die Niederschlagsverteilung hat einen Einfluss auf die Verteilungsfunktion des CV. So sind die CV-Werte bei geringen Niederschlagssummen (< 10 mm) tendenziell gering (RMP 3, 8, 10 und 12) als bei sehr starken Niederschlagsereignissen (> 35 mm), wie es bei RMP 2, 7 und 11 der Fall ist. Eine hohe Varianz ist vor allem im RMP 6 festzustellen, obwohl hier kein starkes Niederschlagsereignis ausschlaggebend war, sondern vermutlich der extrem hohe Steingehalt. Ein ähnlicher Steingehalt war auch am RMP12 vorzufinden. Hier weisen der Median und die Standardabweichung relativ geringe Werte auf. Einen pauschalen univariaten Zusammenhang zwischen der Variabilität der Bodenwassergehalte und einzelnen Einflussparametern ist nicht zu finden. Daher ist die Anwendung von multivariat-statistischen Analysen unerlässlich, um Muster und Strukturen aufzudecken.

Tab. 3: Deskriptive Statistik der 14-Tage-Messreihen der Bodenwassergehalte in Vol.-% pro Plot.**Tab. 3:** Descriptive statistics of the 14-day time series of soil water content (% vol) for each plot.

Plot	Max ¹⁾	Mean. ¹⁾	Min ¹⁾	Range ¹⁾	Median ²⁾	s ²⁾	CV	P	M	n
RMP 1	44,1	17,1	7,2	36,9	16.91	4,8	28,2	22,0	8	29
RMP 2	31,7	13,8	4,2	27,5	13.25	4,3	31,5	103,0	9	30
RMP 3	39,4	20,6	3,2	36,2	19.38	8,5	41,2	7,6	4	24
RMP 4	33,3	18,6	5,2	28,1	20.09	5,8	27,9	33,4	11	26
RMP 5	53,0	16,4	5,2	47,8	17.64	5,2	32,3	24,4	3	28
RMP 6	31,7	12,4	3,2	28,5	10.43	5,8	45,7	21,6	10	26
RMP 7	33,6	18,0	4,5	29,1	18.57	6,0	32,0	73,6	10	30
RMP 8	35,3	15,2	6,3	29,0	15.53	5,4	35,4	4,2	8	29
RMP 9	37,9	20,1	8,1	29,8	20.29	4,8	24,0	28,8	7	28
RMP 10	27,1	16,7	8,3	18,8	16.40	4,6	27,4	0,0	9	30
RMP 11	50,4	15,4	6,3	44,1	14.66	7,0	45,7	32,8	5	30
RMP 12	28,7	18,2	8,0	20,7	17.77	4,6	25,4	7,0	4	25

¹⁾ ermittelt aus allen Werten der Periode ²⁾ ermittelt zu jedem Zeitpunkt aus den Sonden und anschließend über die Periode gemittelt. Range = Spannweite, s = Standardabweichung, CV = Variationskoeffizient [%], P = Niederschlagssumme der Periode [mm], M = Monat in dem die Messperiode lag, n = Anzahl der verwendeten Messreihen

Tab. 4: Charakterisierung der Messplots im Conventwald.**Tab. 4:** Characterization of the measurement plots in the Conventwald area.

Plotnr.	Höhe m ü. NN	Hangausrichtung	Hangneigung[°]	Baumart ¹⁾	Steingehalt bis 20 cm Vol.-%	Bodenart ²⁾	Bodentyp ²⁾
RMP 1	659	O	35,9	Ta /Bu/Fi	15	Lt2	BB
RMP 2	704	SW	24,4	Bu /Ta	50	Lt2	BB
RMP 3	717	NO	28,8	Bu /Ta/Fi	60	Ls3	GGn-BB
RMP 4	768	SW	30,3	Fi /Bu/Ta/Dgl	35–45	Ls3	BB
RMP 5	817	SW	24,1	Ta /Dgl/Bu/Ki	25–35	Sl4	BB
RMP 6	729	SW	30,3	Fi /Lär/Ta	75	Sl4	BB-PP
RMP 7	775	NO	27,0	Ta /Bu/Ah	35	Sl4	GGg
RMP 8	829	S	14,7	Bu /Ta	25–35	Ls2	BB
RMP 9	825	N	25,1	Ta /Bu	35–45	Lt2	BB
RMP 10	806	N	30,4	Ta /Bu	28–45	Sl4	BB
RMP 11	748	NW	33,6	Fi /Ta/Bu	20	Sl4	SS-BB
RMP 12	713	N	26,9	Ta /Bu/Ah	45–80	Ls4	BB

¹⁾ Hauptbaumart fett gedruckt, Ta = Tanne, Bu = Buche, Fi = Fichte, Dgl = Douglasie, Ki = Kiefer, Ah = Ahorn, Lär = Lärche ²⁾ Bodenart und Bodentyp nach KA5 (AD-Hoc-AG Boden 2005)

Aufgrund des langen Winters 2009 und messtechnischer Ausfälle konnte jeder Plot im Conventwald nur einmal gemessen werden, statt wie geplant zweimal. Für die Datenauswertung standen aufgrund von Fehlmessungen (Wildverbiss, Einbaufehler) selten alle 31 Messreihen für die Auswertung zur Verfügung. So konnten im Beispiel des RMP1 nur 29 Messreihen in die Auswertung mit einbezogen werden.

Gravimetrische Vergleichsmessungen zur Abschätzung der Fehler bei der Messung der Bodenwassergehalte mit TDR-Sonden wurden im Rahmen dieses Projektes nicht durchgeführt, da bereits von WILPERT et al. (1998) umfangreiche Labor- und Feldmessungen mit gleichem Sondentyp (Trase System der Fa. Soil Moisture) durchgeführt haben. Es konnte festgestellt werden, dass die TDR-Messungen im Gelände immer unterschätzt (2–5 Vol.-%) wurden. Besonders

Tab. 5: Vergleich des mittleren CV-Werte der RMP-Messungen und des Steingehaltes [Vol.-%] in 0–20 cm Bodentiefe bzgl. der Untersuchungsgebiete.

Tab. 5: Comparison of mean CV value of RMP measurements and stone content [% vol] for the 0–20 cm soil depth for each investigation area.

	Esslingen	Heidelberg	Conventwald	Ochsenhausen
Maximum	58.5	84.0	56.5	39.2
Minimum	10.5	11.4	24.0	11.4
Mittelwert	25.7	31.6	34.5	25.5
Median	21.6	26.3	31.7	26.9
Mittlerer Steingehalt	8	17	41	3

ein hoher Steingehalt, Wurzeln und ein unterschiedlicher Anteil organischer Substanz führte zu einer Verzerrung der Messwerte. An homogenisierten, steinfreien Bodenkörpern war der Messfehler stets kleiner als 1 Vol.-%. Vom Hersteller wird für die verwendeten TDR-Sonden eine Genauigkeit von $\pm 2\%$ angegeben. Der Messbereich der Sonden liegt zwischen 0 und 100 % Bodenfeuchte. Durch das Versetzen der Sonden kann es zu Einbaufehlern kommen, die in stark steinigen Gebieten (Conventwald) zu größeren Ungenauigkeiten bei der Messung führen können. Ein Vergleich zu den relativ gering steinhaltigen Gebieten (Ochsenhausen und Esslingen) zeigt, dass der mittlere CV über alle RMP-Messungen in dem Untersuchungsgebiet Conventwald um ca. 5–10 % höher liegt (Tabelle 5).

3.2 Untersuchungen zur kleinräumigen Variabilität

Die 14-tägigen Messreihen der Bodenwassergehalte wurden zunächst für jeden Messplot einzeln ausgewertet, um die kleinräumige Variabilität innerhalb einer Fläche zu analysieren. Mithilfe der Clusteranalyse konnten die Messreihen einerseits nach ihrem Bodenfeuchteniveau und andererseits nach ihrem dynamischen Verhalten in jeweils drei Clustergruppen zugeordnet werden (Abbildung 8). Im Beispiel vom RMP1 entspricht Cluster 1 (blau) trockenen, Cluster 2 (grün) mittleren und Cluster 3 (rot) feuchten Standorten. Bei Unterteilung der Messreihen nach ihrer Dynamik, zeigt Cluster 1 (rosa) ein starkes, Cluster 2 (hellblau) ein mäßiges und Cluster 3 (schwarz) ein geringes dynamisches Verhalten.

Welche Standortsfaktoren diese unterschiedlichen Bodenfeuchtemuster beeinflussen, wurde mittels CART-Analyse untersucht. Hierfür gingen die an jedem Sondenstandpunkt aufgenommen Vegetations-, Boden- und morphologischen Eigenschaften als unabhängige Parameter und die zugewiesenen Clusternummern (1–3) aus der Clusteranalyse als abhängige Größe in die CART-Analyse ein. Abbildung 9 zeigt exemplarisch für den Plot „RMP1“ die Ergebnisse der CART-Analyse. Für die Gruppierung der Messreihen nach ihrem Feuchteniveau waren Wurzelentfernung (Entfernung zum nächsten Baum), Humusform, spezifisches Einzugsgebiet am Messpunkt (Größe der potentiellen Zuflussfläche) und Exposition ausschlaggebend. Es konnte eine Vorhersagegenauigkeit von 82,8 % erzielt werden, d. h. von 29 verwendeten Sondenpunkten konnten 24 den drei Clustergruppen richtig zugeordnet werden. Messpunkte aus dem Cluster 2 wurden nicht eindeutig bzw. bei anderen Clustergruppen zugeordnet.

Die Cluster werden demnach wie folgt klassifiziert:

- Cluster 1: Standorte mit geringen Wassergehalten befinden sich in einem Baumabstand größer 60 cm und haben bei der Humusform MUO (F-Mull) eine Hangausrichtung kleiner 114° . Liegt die Humusform MUT (Mull), MOM (Mullartiger Moder), MOA (feinhumusarmer Moder) vor, muss das spezifische Einzugsgebiet kleiner als $9,9 \text{ m}^2$ sein.
- Cluster 2: Standorte mit mittleren Wassergehalten befinden sich in einem Baumabstand größer 60 cm mit einer Humusform MUO und einer Hangausrichtung größer 114°
- Cluster 3: Standorte mit höheren Wassergehalten befinden sich entweder in einen Baumabstand kleiner 60 cm oder bei einem Baumabstand größer 60 cm müssen außerdem die Humusform MUT, MOM, MOA vorliegen und das spezifische Einzugsgebiet größer als $9,9 \text{ m}^2$ sein.

Plausibel erscheint der Parameter „spezifische Einzugsgebiet“, der das potentielle Einzugsgebiet an jedem Punkt definiert und damit den möglichen Wasserzufluss reguliert. So haben feuchtere Standorte ein größeres spezifisches Einzugsgebiet als trockenere Standorte. Der Baumabstand könnte Hinweis geben, dass feuchtere Standorte durch Stammabfluss (baumartenabhängig) beeinflusst werden, aber auch vor Sonneneinstrahlung besser geschützt sind (weniger Bodenverdunstung). Hangausrichtung und Humusform sind in diesem Fall sehr spezifisch und führen zu keiner allgemeingültigen Aussage.

Bei der Clusterung nach der Dynamik der Messkurven (Abbildung 10) sind die erklärenden Parameter: Höhe der Of-Auflage, Kronensituation (x = Kronenmitte, y = Kronenrand oder z = Kronenlücke), Wurzelentfernung (Entfernung zum nächsten Baum), und Vegetationsdichte (Bedeckungsgrad der Bodenvegetation).

Bei diesem CART konnten 26 von 29 Messkurven eindeutig den Clustergruppen zugeordnet werden (89,6 %). Zwei Messpunkte aus Cluster 2 und ein Messpunkt aus Cluster 3 konnten nicht richtig zugeordnet werden (Fehlklassifikation).

Die Cluster werden demnach wie folgt klassifiziert:

- Cluster 1: Standorte mit starker Dynamik der Wassergehalte haben entweder eine geringe Of-Auflage

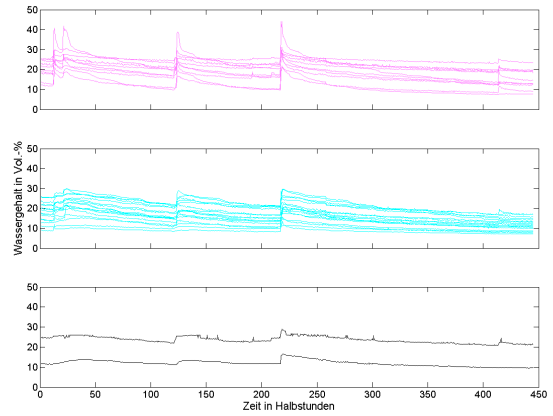
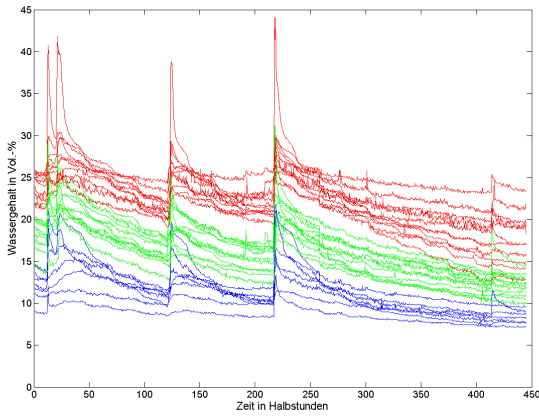


Abb. 8: Gruppierung der Zeitreihen der Bodenfeuchte einer Messperiode (14 Tage, Halbstundenwerte) am Beispiel des RMP1; links: euklidisches Abstandsmaß, rechts: kreuzkorreliertes Abstandsmaß.

Fig. 8: Clusters of time series of the soil moisture for one measuring period (14 days, half-hour values) for plot RMP 1; left: Euclidean distance, right: cross-correlation distance.

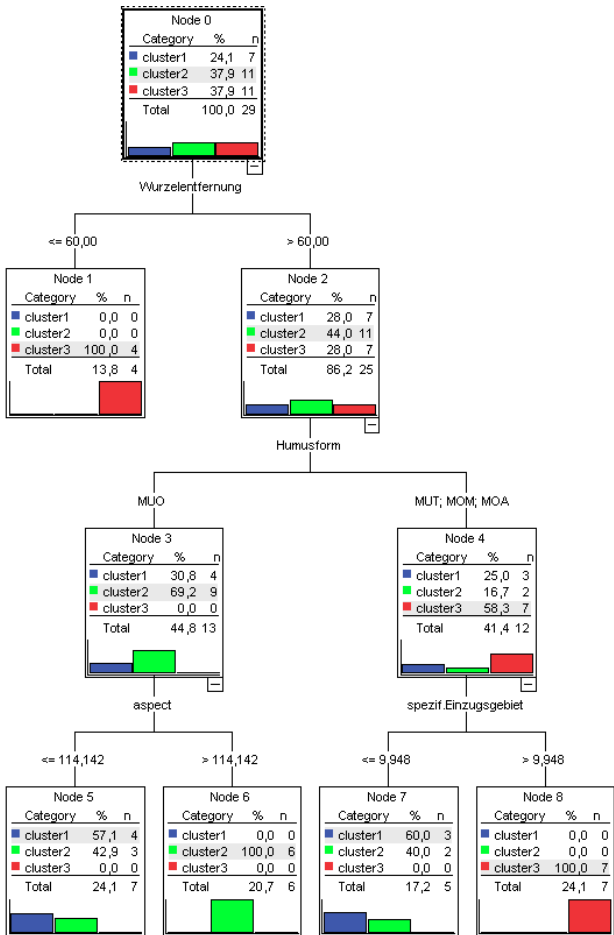


Abb. 9: CART-Analyse für RMP1 für die Clustervariante bzgl. des Feuchteniveaus mit 29 Messreihen, Cluster 1 = trockene Standorte, Cluster 2 = mittel feuchte Standorte, Cluster 3 = feuchte Standorte.

Fig. 9: CART analysis of RMP1 for cluster variant in relation to soil moisture levels of the 29 time series. Cluster 1 = dry sites, cluster 2 = moderately wet sites, cluster 3 = wet sites.

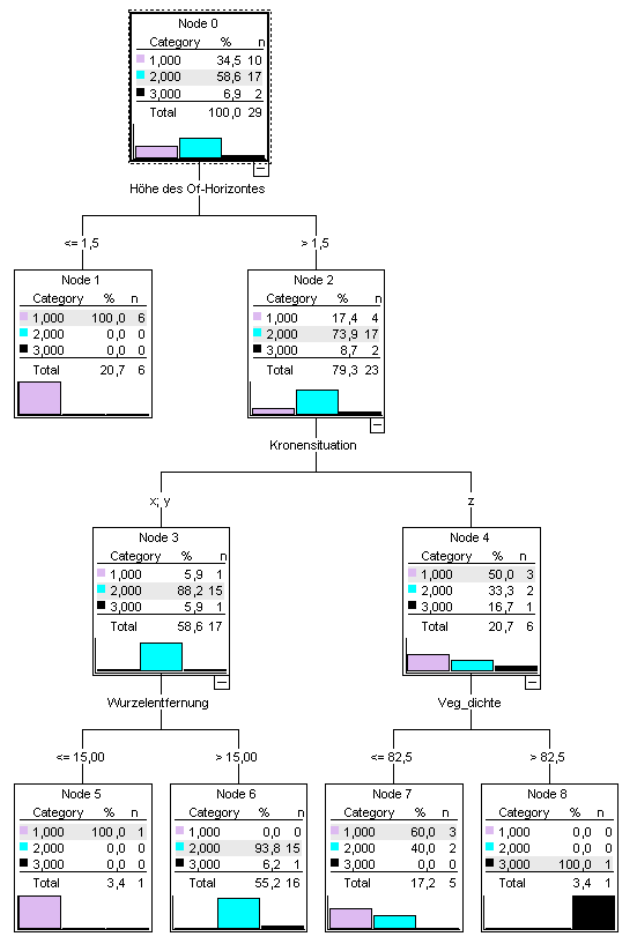


Abb. 10: CART-Analyse für RMP1 für die Clustervariante bzgl. der Dynamik mit 29 Messreihen, Cluster 1 = stark dynamische Standorte, Cluster 2 = mäßig dynamische Standorte, Cluster 3 = wenig dynamische Standorte.

Fig. 10: CART analysis of RMP1 for cluster variants in relation to the dynamics of the 29 time series. Cluster 1 = highly dynamic sites, cluster 2 = moderately dynamic sites, cluster 3 = less dynamic sites.

Tab. 6: Anzahl der Messreihen pro Cluster bzgl. Bodenfeuchteniveau bzw. Dynamik.

Tab. 6: Number of time series per cluster for each soil moisture level and dynamics level.

Anzahl der Messreihen pro Cluster	RMP1	RMP2	RMP3	RMP4	RMP5	RMP6	RMP7	RMP8	RMP9	RMP10	RMP11	RMP12	Summe
1 - trocken	7	13	11	13	8	14	7	11	10	6	9	6	115
2 - mittel	11	7	8	7	12	7	17	6	4	11	13	9	112
3 - feucht	11	9	4	6	7	5	5	11	13	13	7	8	99
Summe pro RMP	29	29	23	26	27	28	29	28	27	30	29	23	326
1 - stark dynamisch	10	18	18	21	1	4	28	5	26	28	22	19	200
2 - mäßig dynamisch	17	10	1	1	26	10	1	22	1	1	6	5	101
3 - gering dynamisch	2	2	1	1	1	13	1	2	1	1	1	1	27
Summe pro RMP	29	30	20	23	28	27	30	29	28	30	29	25	328

(< 1,5 cm) oder eine hohe Of-Auflage (> 1,5 cm) und liegen in einer Kronenlücke (z) und mit geringer Vegetationsdichte (< 82,5 %) oder eine hohe Of-Auflage (> 1,5 cm), befinden sich am Kronenrand (y) oder in der Kronenmitte (x) mit einem Baumabstand kleiner 15 cm.

Cluster 2: Standorte mit mäßiger Dynamik der Wassergehalte haben eine hohe Of-Auflage (> 1,5 cm) und befinden sich am Kronenrand (y) oder in der Kronenmitte (x) mit einem Baumabstand größer 15 cm.

Cluster 3: Standorte mit wenig Dynamik der Wassergehalte haben eine hohe Of-Auflage (> 1,5 cm) und befinden sich in einer Kronenlücke (z) mit hoher Vegetationsdichte (> 82,5 %).

Die hier gefundenen Standorteigenschaften spiegeln die dynamischen Prozesse wider. Die Höhe der Of-Auflage ist entscheidend, ob der Niederschlag abgepuffert wird, lateral abfließt oder zügig in den Boden infiltriert. Auch Kronenstruktur, Baumabstand und Bedeckungsgrad der Bodenvegetation

haben auf diese Prozesse großen Einfluss. Der Anteil der wenig dynamischen Standorte (Cluster 3) ist in der Mehrzahl der Messflächen (RMPs) sehr gering (Tabelle 6). Die Aussagekraft der gefundenen Einflussparameter ist daher nicht repräsentativ.

Mit dieser Vorgehensweise können nun für alle Plots die Einflussgrößen ermittelt und statistisch ausgewertet werden. Bei allen RMPs betrug die Vorhersagegenauigkeit zwischen 80–100 %, da durch die detaillierte Felddaufnahme immer ausreichend viele Erklärungsparameter zur Verfügung standen, um die Clusterstrukturen gut zu beschreiben. Eine einheitliche Parameterkombination konnte jedoch nicht gefunden werden, die bei allen RMPs gleichermaßen zu einer hohen Erklärungsgüte führte. Lediglich einige Parameter, wie spezifische Einzugsgebietsgröße, Baumentfernung und Höhe der Humusauflage, konnten in mehreren RMPs identifiziert werden.

Abbildung 11 zeigt, dass die in den einzelnen Plots definierten Clustergruppen (Tabelle 6) sehr gut die gewählten Gruppeneigenschaften widerspiegeln. Die Definitionen bzgl. der Einteilung nach Bodenfeuchteniveau in trockene, mittel feuchte und feuchte Standorte können signifikant gegeneinander

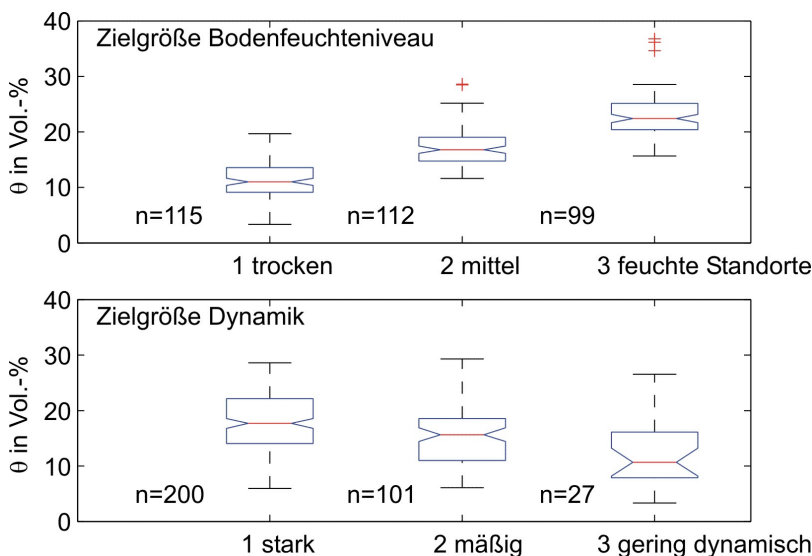


Abb. 11: Definition von Bodenfeuchteklassen durch Zuordnung der Messreihen (Mittelwert θ der Wassergehalte pro Sonde über die Messperiode) zu den definierten Clustergruppen pro RMP bzgl. des Bodenfeuchteniveaus (oben) und der Dynamik (unten); alle Gruppen unterscheiden sich signifikant mit $\alpha = 0.01$.

Fig. 11: Delineation of soil moisture classes through classification of time series (mean θ of water content per probe over the measuring period) into the defined cluster groups for each RMP in terms of soil moisture level (top) and dynamics level (bottom); all differences between the groups are significant with $\alpha = 0.01$.

abgegrenzt werden. Die Anzahl der Stichproben pro Gruppierung lag in ähnlicher Größenordnung vor. Bei der Einteilung der Messreihen bzgl. ihres dynamischen Verlaufs ist die Abgrenzung der einzelnen Gruppen nicht so deutlich, dennoch signifikant. Die Gruppe der wenig dynamischen Standorte ist stark unterrepräsentiert. Dies deutet darauf hin, dass die meisten Sondenstandorte auf Niederschlagsereignisse reagieren.

3.3 Untersuchungen zu großräumigen Trends

Für die Untersuchung großräumiger Trends mussten alle gemessenen Kurven und ihre Parameter gemeinsam einer Cluster- und CART-Analyse unterzogen werden, um daraus verallgemeinerte Parameterkombinationen für Bodenfeuchteklassen bzw. Reaktionsmuster zu finden. Für den Conventwald standen für diese Auswertung insgesamt 305 Messreihen mit je 565 Messwerten zur Verfügung. Die Gruppierung unter Verwendung aller gemessenen Bodenfeuchteverläufe erfolgte nach einer Transformierung der Messreihen in Residuen. Diese ergaben sich aus den Messwerten der einzelnen kurzen Messreihen abzüglich der aktuellen Messwerte der kontinuierlich messenden Sonde der Permanentstation Buche, da von der Permanentstation Fichte die Messreihen unvollständig waren. Somit konnte der zeitliche Trend eliminiert werden. Die Teilung erfolgte auch hier wieder in drei Clustergruppen, um eine möglichst gleichmäßige Anzahl in den Clustergruppen zu erhalten (Cluster 1 (trocken) mit 69 Standorten, Cluster 2 (mittel feucht) mit 141 Standorten und Cluster 3 (feucht) mit 95 Standorten). In die CART-Analyse gingen zunächst nur Reliefparameter ein, da diese fein diskretisiert und flächenhaft vorliegen und eine automatische Klassifizierung auf un beobachtete Flächen ermöglichen. Die Hauptparameter waren Hangausrichtung, Fließlänge und Topographische Feuchteindex. Die Vorhersagegenauigkeit betrug 62 %, d. h. ein Drittel der Messpunkte konnte nicht der richtigen Bodenfeuchtekategorie zugeordnet werden.

Die Gruppierung bzgl. des Bodenfeuchteniveaus wird wie folgt klassifiziert:

- Cluster 1: 41 Standorte mit geringen Wassergehalten liegen auf der Südseite (125° – 230°) und haben Fließlängen kleiner 1,2 m.
- Cluster 2: 65 % der Standorte mit mittleren Wassergehalten liegen auf der Nordseite ($< 125^{\circ}$ und $> 230^{\circ}$) und haben Fließlängen kleiner 1,05 m.

35 % der Standorte mit mittleren Wassergehalten liegen auf der Südseite (125° – 230°) und haben Fließlängen größer 1,2 m sowie einen TWI-Wert kleiner 4,8.
- Cluster 3: Standorte mit höheren Wassergehalten liegen zu 80 % auf der Nordseite ($< 125^{\circ}$ und $> 230^{\circ}$) und weisen einen TWI-Wert von größer 5,8 auf.

Um ähnlich reagierende Standorte bezüglich ihrer Dynamik während oder nach einem Niederschlagsereignis zu untersuchen, müssen die Messdaten bzgl. der Höhe der Niederschlagsereignisse und der Bodenvorfeuchte extrahiert werden, so dass nur Zeiträume während eines Niederschlagsereignisses oder einer Austrocknungsphase in die Cluster- und CART-Analyse eingehen. Diese Vorgehensweise wird in den aktuellen Untersuchungen noch getestet.

4 Diskussion und Ausblick

Die ersten Auswertungen der Messkampagne im Conventwald haben gezeigt, dass die räumliche Variabilität der Bodenwassergehalte oberflächennah sehr groß ist. Sie wird einerseits durch die zeitliche Variabilität (Einfluss des Klimas) und andererseits durch die räumliche Variabilität der Reliefeigenschaften, der Bodenheterogenität als auch der Baumstruktur beeinflusst. Mit dem RMP-Konzept war es möglich, in relativ kurzer Zeit einen großen Datensatz von kurzen Zeitreihen der Bodenfeuchte und ihren Einflussfaktoren aufzunehmen. Den Verlust der kontinuierlichen zeitlichen Erfassung der Bodenwassergehalte auf den Plots konnte durch die zwei Permanentstationen kompensiert werden. Die Erstellung eines einfachen Globalmodells zur Ableitung der zeitlichen Variabilität der mittleren Bodenfeuchte ist bisher nicht gelungen, da sowohl Niederschlagsereignisse als auch Austrocknungsperioden nur unzureichend wiedergegeben werden konnte. Alternativ könnte daher die Anwendung eines physikalisch basierten Wasserhaushaltsmodells an RMP-Mittelpunkten möglich sein, welches die Kopplung zwischen Atmosphäre, Pflanze und Boden berücksichtigt.

Die Anwendung des RMP-Konzeptes war sehr arbeitsaufwendig, da zunächst alle Punkte eingemessen sowie ausführliche Boden- und Vegetationsanalysen durchgeführt wurden. Der Einsatz der Messmethode war bei Schneelage und Bodenfrost nicht möglich, sodass sich der Messzeitraum verkürzte. Hinzu kamen technische Defekte und Wildverbiss. Im Conventwald konnte daher nur eine Messperiode pro Plot durchgeführt werden. In den anderen Gebieten dagegen war eine Wiederholung der Messungen möglich. Aufgrund des Zeitplans sind dort die Auswertungen erst zum Teil ausgewertet. Analysen aus Ochsenhausen zeigen jedoch, dass die identifizierten Einflussparameter zwischen zwei Perioden unterschiedlich sein können, da sich einerseits die Lage der Punkte sowie die äußeren Randbedingungen unterscheiden.

Die kurzen Messreihen der Plots konnten sowohl nach ihrem Verlauf innerhalb der 14 Tage ausgewertet werden, als auch nach ihrem Bodenfeuchteniveau. Dies ist bei Stichtagsmessungen nicht möglich, da nur eine Momentaufnahme der Fläche erfasst wird. Mithilfe der Cluster- und der CART-Analyse konnten zumindest die kleinräumigen Einflussparameter gut quantifiziert werden. Auch wenn bislang keine allgemeingültigen Parameter identifiziert wurden, so können über die Auswertung der anderen Untersuchungsgebiete häufig auftretende Parameter abgeleitet werden. Die Anwendung der entstandenen Entscheidungsbäume zur Ausweisung der Bodenfeuchteklassen ist nur dann auf unbekannte Standorte möglich, wenn alle Einflussparameter flächenhaft vorliegen. Das ist im Fall der detailliert aufgenommenen Boden- und Vegetationsparameter nur selten der Fall. Um auch diese wichtigen Einflussgrößen bei der Betrachtung großräumiger Trends zu berücksichtigen, müssen die Parameter aggregiert und mit Parametern der flächig vorliegenden Kartenwerke (Forsteinrichtungskarten, CORINE-Landnutzungskarten, Laserscannerdaten) abgestimmt werden.

Im Weiteren werden die Messungen der anderen Untersuchungsgebiete analysiert. Hierfür muss der Algorithmus der Cluster- und CART-Analyse noch verbessert werden, um eindeutige Standortfaktoren zur Erfassung der räumlichen Variabilität zu erhalten. Beispielsweise könnten die gemessenen Bodenwassergehalte standardisiert werden, um einen relativen Bezug zum Sättigungswassergehalt zu erhalten. Die Anwendung der Cluster- und CART-Analysen

sind als explorative Ansätze zur Mustererkennung geeignet. Die quantifizierten Parameter können für weitere statistische Auswertungen, wie z. B. multiplen Regressionsansätzen, verwendet werden, um die räumliche Variabilität als Faktor in das Raum-Zeit-Modell zu integrieren.

Literatur

- AD-HOC-AG BODEN (2005): Bodenkundliche Kartieranleitung, 5. Auflage, Hannover: 438 S.
- ARNSTADT, T. (2008): Erfassung der Dynamik von Sättigungsflächen mit Hilfe zufällig wandernder Messfelder und Bau einer Einstab-TDR-Sonde. Diplomarbeit, Internationales Hochschulinstitut Zittau. (Letzter Zugriff am 20.2.2011) [www: http://www.ut-arnstadt.de/diplomarbeit.php](http://www.ut-arnstadt.de/diplomarbeit.php).
- ARNSTADT, T. (2009): Validierungsdaten für Wasserhaushaltsmodelle – Bodenfeuchtemessung mit zufällig wandernden Messfeldern. In: v. WILPERT, K. (ed.): Bedeutung des Klimawandels für Bodenprozesse. Freiburger Forstliche Forschung **82**: 95-110.
- BACKHAUS, K., ERICHSON, B., PLINKE, W., WEIBER, R. (2008): Multivariate Analysemethoden. 12. Aufl. Berlin.
- BROCCA, L., MORBIDELLI, R., MELONE, F., MORAMA, T. (2007): Soil Moisture spatial variability in experimental areas of central Italy. J. Hydrol. Jg. **333** (2–4): 356-373.
- BUNDESMINISTERIUM FÜR ERNÄHRUNG, LANDWIRTSCHAFT UND FORSTEN (BMELF) (1997): Dauerbeobachtungsstationen zur Umweltkontrolle im Wald Level II, Erste Ergebnisse, Bonn.
- CHIFFLARD, P., ZEPP, H. (2008): Erfassung der zeitlichen Variabilität der Abflussbereitschaft eines Einzugsgebietes auf Grundlage von Bodenfeuchtemessungen. Hydrologie und Wasserbewirtschaftung **3**: 98-109.
- CHIFFLARD, P., GALL, S., ZEPP H. (2006): Untersuchungen zur räumlichen Variabilität der Oberbodenfeuchte in Abhängigkeit von Relief und Boden. – Berichtsband zum Workshop 2003 „Innovative Feuchtemessung in Forschung und Praxis“ **1**: 283-306.
- DE, D., PUHLMANN, H. (2009): Luftbilddauswertung zum Einfluss der Geländemorphologie auf Trockenschäden im Kronenraum. Berichte Freiburger Forstliche Forschung, Heft **82**: 3-12.
- FAHRMEIR, L., KÜNSTLER, R., PIGEOT, I., TUTZ, G. (2007): Statistik – Der Weg zur Datenanalyse. 6. Aufl., Springer Verlag.
- KLIWA (2006): Regionale Klimaszenarien für Süddeutschland, Abschätzung und Auswirkung für den Wasserhaushalt. HEFT **9**: 1-100.
- PUHLMANN, H., MORGENSTERN, Y., VON WILPERT, K. (2008): Trockenstressrisiko für Waldbestände in Baden-Württemberg. FVA-Einblick, Forstliche Versuchs- und Forschungsanstalt Baden-Württemberg **1**: 28-35.
- SPSS VERSION 18 (2010): Statistiksoftware.
- VON WILPERT, K., NELL, U., LUKES, M., SCHACK-KIRCHNER, H. (1998): Genauigkeit von Bodenfeuchtemessungen mit „Time Domain-Reflektometrie“ und Frequency Domain-Sensoren in heterogenen Waldböden. In Z. Pflanzenernähr. Boden., **161**: 179-185.
- WESTERN, A. W., BLÖSCHEL, G., RODGER, B.G. (1998): Geostatistical characterisation of soil moisture patterns in the Tarrawarra catchment. J. Hydrol. Jg. **205** (2-4): 20-37.
- WÖHRLE, N. (2006): Randomisiert wandernde Messplots. Raum-Zeit-Modellierung von Parametern des Stoffhaushaltes in heterogenen Kalkbuchenwäldern. Freiburg, Dissertation, Freiburger Bodenkundl. Abhandlungen **44**: 145 S.

submitted: 16.11.10

reviewed: 21.12.10

accepted: 10.04.11

Autorenanschrift:

Dr. Yvonne Morgenstern, Dr. Klaus von Wilpert
FVA Baden-Württemberg
Abteilung Boden und Umwelt
Wonnhaldestraße 4, 79100 Freiburg
Telefon: +49 761 4018-376
E-Mail: yvonne.morgenstern@forst.bwl.de
E-Mail: klaus.wilpert@forst.bwl.de

Dr. Heike Puhlmann
Albert-Ludwigs-Universität Freiburg
Institut für Hydrologie
Fahnenbergplatz, 79098 Freiburg
Telefon: +49 761 203-9277
E-Mail: heike.puhlmann@hydrology.uni-freiburg.de