

# Modellierung des Sickerwasserabflusses in einem zusammenhängenden Waldgebiet des nordostdeutschen Tieflands

J. MÜLLER, A. BOLTE, W. BECK, S. ANDERS und P. SCHARFEN

## Abstract

The water regime components evaporation and seepage need to be quantified to evaluate the interactions between weather conditions and water distribution and consumption of forest stands. There are still methodical problems to capture data for the research of forest structure and water distribution processes within the stand. Separate measurements of actual evaporation in different vegetation layers and recordings of the seepage water are restricted by the great requirement of time and money. Because of this, the water regime model „VERMO WALD“ was further developed and modules were integrated that take the correlation between the individual structure of the tree, shrub and forest floor vegetation layer and water distribution processes into account.

This model was applied in the forest district Kahlenberg in north-eastern part of Brandenburg, Germany, with an extension of 674 hectares. Based on the real site conditions three different forest vegetation covers were simulated: Pure beech forest, pure pine forest and mixed beech-pine forest.

The modelled seepage under pure beech forest with approx.  $900.000 \text{ m}^3/\text{a}$  ( $=141 \text{ mm/a}$ ) exceed three times the value under pure pine forest. The mixed forest shows a model results in between with a seepage of  $400.000 \text{ m}^3/\text{a}$ .

## Zusammenfassung

Die Quantifizierung der Wasserhaushaltskomponenten Verdunstung und Grundwasserneubildung ist eine notwendige Voraussetzung für die Bewertung der Wechselwirkungen zwischen der Witterung und den Prozessen der Wasserumverteilung und des Wasserverbrauches der Waldbestände. Dabei sind Umverteilung und Verbrauch Funktionen bestandesbezogener Strukturparameter und des Wachstums der Bestände. Für die Ermittlung des Stoffaustrages in 2 bis 3 m Tiefe und die Stoffhaushaltsbilanz

der Wechselbeziehungen zwischen Wald und Wasser erweist sich noch immer als ein methodisch schwierig zu lösendes Problem, da die direkte Messung der realen Verdunstung einzelner Vegetationsschichten des Waldes und der Tiefensickerung nicht bzw. nur mit großem Aufwand möglich ist. In das von uns weiterentwickelte Modell VERMO-WALD wurden zusätzliche Modellteile eingearbeitet, die die in den Untersuchungsbeständen quantifizierten Struktur-Prozessbeziehungen berücksichtigen. Als Modellobjekt wird das Forstrevier Kahlenberg im Nordosten des Bundeslandes Brandenburg mit einer Gesamtgröße von 674 ha ausgewählt. Der Modellierung wurden bei gegebener Standortverteilung drei unterschiedliche Bewaldungsszenarien zugrunde gelegt (Buchenwald, Kiefernforst und Buchenwald/Kiefernforst).

Die potentielle Grundwasserspense unter Buche beträgt mit ca.  $900.000 \text{ m}^3$  pro Jahr ( $= 141 \text{ mm/a}$ ) das Dreifache der Kiefer. Die Variante mit Kiefer und Buche ordnet sich mit rund  $400.000 \text{ m}^3$  ( $= 63 \text{ mm/a}$ ) möglicher Grundwasserspense zwischen der Kiefern- und Buchenvariante ein.

## 1. Einleitung

Die Quantifizierung der Wasserhaushaltskomponenten Verdunstung und Grundwasserneubildung ist eine notwendige Voraussetzung für die Bewertung der Wechselwirkungen zwischen der Witterung und den Prozessen der Wasserumverteilung und des Wasserverbrauches der Waldbestände. Dabei sind Umverteilung und Verbrauch Funktionen bestandesbezogener Strukturparameter und des Wachstums der Bestände. Für die Ermittlung des Stoffaustrages in 2 bis 3 m Tiefe und die Stoffhaushaltsbilanz

zung der Wald- und Forstökosysteme ist die Berechnung der Tiefensickerung unverzichtbar. Als Teil der Grundwasserneubildung wird sie unterhalb der Hauptwurzelzone erfasst, sie kann mit dieser aber nicht gleichgesetzt werden, weil bis zum Grundwasser noch Wasserverbrauch durch Wurzelaufnahme und Wasserspeicherung im Boden stattfindet.

Die Erforschung der Wechselbeziehungen zwischen Wald und Wasser erweist sich noch immer als ein methodisch schwierig zu lösendes Problem, da die direkte Messung der realen Verdunstung einzelner Vegetationsschichten des Waldes und der Tiefensickerung nicht bzw. nur mit großem Aufwand möglich ist. Besonders unter den niederschlagsarmen Bedingungen des Untersuchungsgebietes kommt der Bewertung des Wasserumsatzes in den Waldbeständen eine entscheidende Bedeutung zu (MÜLLER 1996). Hier bestehen noch erhebliche Kenntnislücken. Dabei hat die Bedeutung gerade der Waldareale als Wasserlieferanten wesentlich zugenommen, weil das Grundwasser unter Wäldern in der Regel noch immer großflächig sehr rein, vor allem nitratarm ist.

## 2. Methode

Der Versuch, zur Berechnung von Verdunstung und Grundwasserneubildung in Wäldern vorhandene Wasserhaushaltsmodelle zu nutzen, zeigte, dass diese die Besonderheiten der Waldbestände nicht ausreichend reflektieren. Entscheidender Mangel ist, dass die in den einzelnen Vegetationsschichten (Baum, Strauch- und Feldschicht) stattfindende Umverteilung und Verdunstung des Niederschlages nicht ausreichend berücksichtigt wird. Die Wälder weisen nämlich im Vergleich zu anderen terrestrischen Ökosystemen strukturelle Be-

**Autoren:** Dr. Jürgen MÜLLER, Dr. Andreas BOLTE, Dr. Wolfgang BECK, Dr. habil. Siegfried ANDERS, Dipl.-Ing. (FH) Petra SCHARFEN, Bundesforschungsanstalt für Forst- und Holzwirtschaft Hamburg, Institut für Forstökologie und Walderfassung, A.-Möller-Straße 1, D-16225 EBERSWALDE

sonderheiten der verdunstenden Oberflächen auf. Diese sind:

- die besondere Raumerfüllung (Höhe und Oberfläche des Waldbestandes) mit ausgeprägter vertikaler Bestandesstruktur (Baum-, Strauch- und Feldschicht)

- die räumliche Ausdehnung und Verteilung der Wälder in der Landschaft

Die Folge ist, dass sich zwischen den Strukturparametern der Vegetation und den Prozessen des Wasserhaushaltes Beziehungen herausbilden. Gelingt deren Aufklärung, können bei Kenntnis entscheidender Strukturparameter wesentliche Wasserhaushaltsgrößen abgeleitet werden. Im Bemühen, diesem Ziel näher zu kommen, wird ein von GLUGLA und KÖNIG (1989) entwickeltes Speichermodell (VERMO) zur Berechnung des Bodenwasserflusses von Lokkergesteinsstandorten mit ausschließlich vertikaler Wasserbewegung verwendet. Es geht von einer Zweiteilung des Bodenprofils in den verdunstungsbeeinflussten oberen Bodenblock sowie den verbleibenden unteren Bodenblock bis zur Grundwasseroberfläche aus. Der für die jeweilige Bodenschicht räumliche und für den Berechnungsschritt  $\delta t$  zeitliche Mittelwert des Bodenwasservorrats ist die bestimmende Größe sowohl für die Verdunstungs- als auch für die Sickerwasserberechnung. Die Kopplung beider Modellteile (Verdunstung und Sickerung) erfolgt für die Bodenblöcke über die Wasserhaushaltsgleichung. Die besonderen strukturellen Bedingungen des Waldes werden im Modell nicht berücksichtigt. Deshalb wurden in das von uns weiterentwickelte Modell VERMOWALD zusätzliche Modellteile eingearbeitet, die die in den Untersuchungsbeständen quantifizierten Struktur-Prozessbeziehungen berücksichtigen. Dazu gehören:

- die Interzeptionsverdunstung, getrennt für Baum-, Strauch- und Feldschicht
- die Aufteilung des Bestandesniederschlags in Kronendurchlass und Stammabfluss bei Baumarten mit Stammabfluss und die Berechnung der stammnahen Tiefensickerung bei glattrindigen Baumarten, hier besonders bei Buche
- die Evapotranspiration von Bodenpflanzendecken

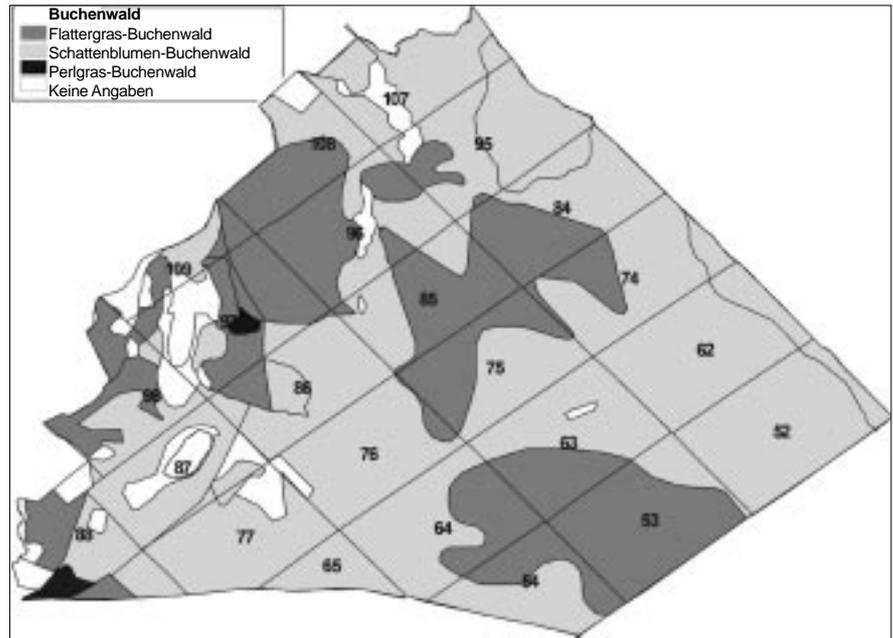


Abbildung 1: Potentiell-natürliche Buchenwälder im Revier Kahlenberg [Szenario S1]

- die Mehrteilung des Bodenprofils bis zur Grundwasseroberfläche
- die im Jahresgang zeitlich variable Ausschöpfungstiefe des Bodenwassers in Abhängigkeit von der aktuellen Bodenwasserverfügbarkeit

Das Modell umfasst damit die Gesamtheit aller wesentlichen, das Ökosystem Wald speisenden und von ihm zehrenden Wasserströme und die Umverteilung der Wassermengen in den einzelnen Bestandes- und Bodenschichten auf der Grundlage der Wasserhaushaltsglei-

chung. Die einzelnen Wasserhaushaltsgrößen werden für jeden Berechnungsschritt (im allgemeinen der Tag), beginnend mit der verdunstungsbeeinflussten Bodenschicht nacheinander für alle Bodenschichten berechnet. Die Sickerung ist an Bodenfeuchte  $\geq$  Feldkapazität gebunden. Bei den Eingangsdaten wird zwischen den zeitlich konstanten Daten, die nur einmal je Vegetationsspeicher bzw. Bodenblock vorgegeben werden und den zeitlich variablen Daten unterschieden.

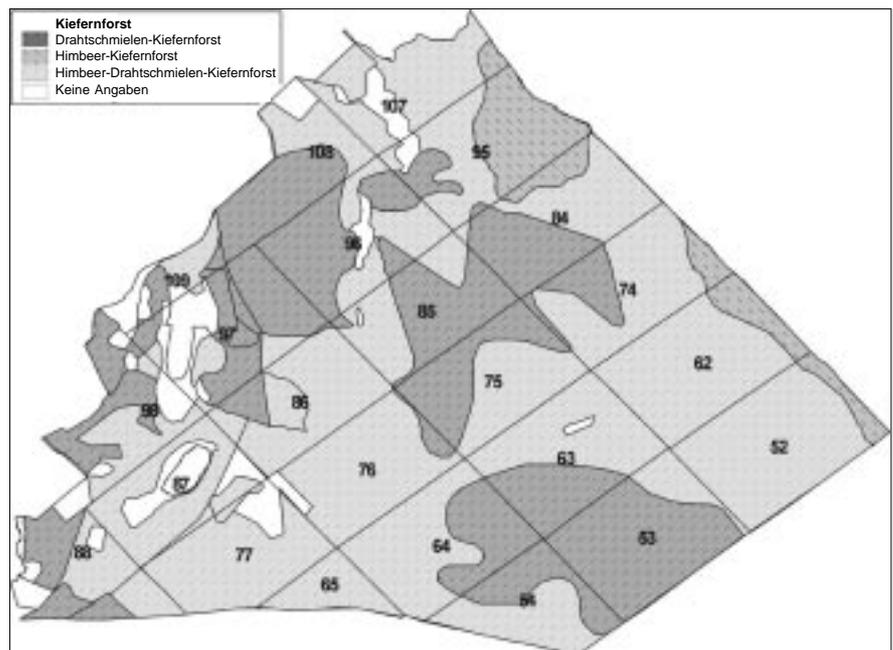


Abbildung 2: Kiefernforsten (Ersatzvegetation) im Revier Kahlenberg [Szenario S2]

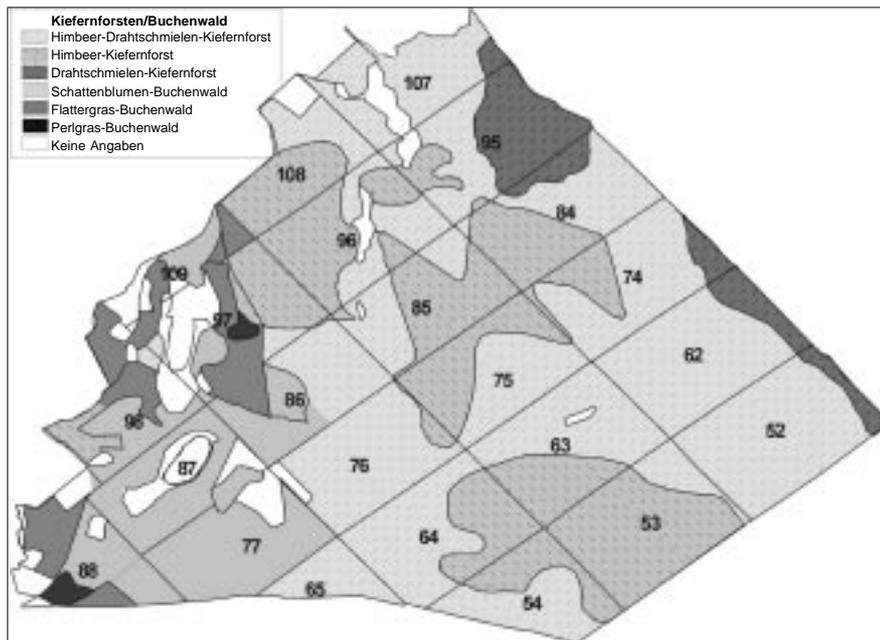


Abbildung 3: Kiefernforsten und Buchenwälder (Flächenmischung) im Revier Kahlenberg [Szenario S3]

### 2.1 Modellobjekt

Als Modellobjekt wird das Forstrevier Kahlenberg nördlich des Oder-Havel-Kanals im Amt für Forstwirtschaft Eberswalde mit einer Gesamtgröße von 674 ha ausgewählt, wovon 638 ha bewaldet und standortkundlich erfasst sind.

Das Revier liegt im schwächer maritim beeinflussten Neubrandenburger Klima ( $\beta$ ) mit 540 bis 600 mm Jahresniederschlag im langjährigen Mittel. Die Jahresmitteltemperatur liegt zwischen 8,0 und 8,5°C.

Das Bodensubstrat sind vorwiegend sandige bis kiesige pleistozäne Lockersedimente, die als Sander südwestlich des Choriner Endmoränenbogens angelagert wurden (Mönchsheider Sander). Im südwestlichen Teil wird die Neuhütter Hügelmoräne (Grundmoräne) mit lehmig-sandigen Substraten berührt (LANG-

GUTH et al. 1969, LIEDTKE und MARCINEK 1995). Bei den Bodentypen überwiegen Braunerden, die zum Teil podsoliert sind. Auf Lehm-Sand-Substraten haben sich Parabraunerden (Lehm bzw. Tieflehm-Fahlerden) gebildet. Die Spanne der Stammnährkraft nach KOPP und SCHWANECKE (1994) reicht von ziemlich arm/mäßig bis reich, wobei die meisten Standorte eine mittlere Nährkraft und mäßige Bodenfeuchte aufweisen (Stammstandortsform M2). Das Gebiet stellt standörtlich ein typisches Waldrevier im nördlichen Brandenburg dar.

Als potentiell natürliche Vegetation ist mit Buchenwäldern zu rechnen, wobei auf mittleren Standorten Schattenblumen-Buchenwälder und auf den besseren Flattergras- und Perlgras-Buchenwälder anzutreffen wären (PASSARGE und HOFMANN 1968).

Tabelle 1: Übersicht über die Lokalbodenformen und deren Feldkapazität im Revier Kahlenberg

Lokalbodenform	Kurzzeichen	Feldkapazität (mm)
Jabeler Sand-Braunerde	JaS	234
Bodenseichner Sand-Braunerde	BoS	234
Kahlenberger Grand-Braunerde	KbS	189
Jabeler Sand-Braunerde/Tieflehm unterlagert	JaS/L	514
Bodenseichner Sand-Braunerde/ Tieflehm unterlagert	BoS/L	514
Johannisberger Tieflehm - Fahlerde	JhL	517
Sonnenburger Bändersand-Braunerde	SoS	336
Darguner Lehm- Fahlerde	DgL	585
Finowtaler Sand-Braunerde	FiS	227
Schönebecker Sandrost- Podsol	SkS	225

Aktuell ist der von Sandstandorten geprägte östliche und nördliche Gebiets teil meist mit Kiefernforsten, Kiefern-Buchen-Halbförsten und vereinzelt (Rot)-Eichenforsten bestockt. Im südwestlichen Teil stocken vorwiegend naturnahe Buchenbestände. In Zukunft ist über den verstärkten Voranbau von Buche unter Kiefer mit einer langfristigen Umwandlung annähernd des gesamten Revierteils in Buchenbestände zu rechnen.

### 2.2 Bewaldungsszenarien

Das Sickerwassermodell wurde für Reinbestände der Baumarten Kiefer, Buche und Eiche erstellt. Entsprechende Aussagen zu Mischbeständen werden erst im Rahmen eines soeben anlaufenden BMBF-Projektes zum Waldbau erarbeitet. Mischbestände nehmen bereits heute einen erheblichen Teil des Reviers ein, so dass die Berechnung des Sickerwasserabflusses anhand der tatsächlichen Bestockungsverhältnisse noch nicht möglich ist.

Da das Standortspektrum aber typisch für den Nordbrandenburger Raum ist, wurde die Sickermodellierung anhand von Bewaldungsszenarien vorgenommen. Die Verarbeitung und Verschneidung unterschiedlicher Flächeninformationen erfolgte mit Hilfe geographischer Informationssysteme (PC ARC VIEW und ARC INFO).

Der Modellierung wurden bei gegebener Standortverteilung drei unterschiedliche Bewaldungsszenarien zugrunde gelegt:

#### Buchenwald (natürliche Baumartenzusammensetzung) [S1]

Unter Verwendung der Standortkarte und von Vegetationsaufnahmen naturnaher Bestände wurde die potentiell-natürliche Waldvegetation, differenziert nach Buchen-Waldökosystemtypen, im gesamten Gebiet kartiert (Abbildung 1). Eine Bewirtschaftung wurde durch die Berücksichtigung einer annähernd gleichmäßigen Altersklassenverteilung (I bis VII) über eine 140-jährige Umtriebszeit im Sinne eines Normalwaldmodells und systematische Verteilung über die Untersuchungsfläche simuliert. Dabei wurde je Abteilung von durchschnittlich 30-35 ha Größe immer von zwei Altersklassen ausgegangen. Dieses Szenario entspricht quantitativ bezogen auf

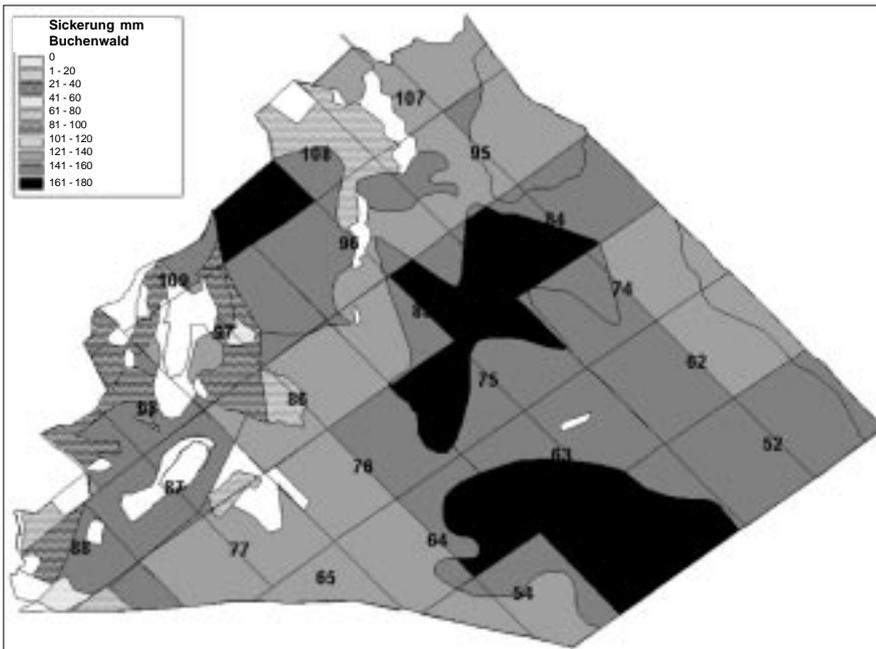


Abbildung 4: Jährliche Tiefenversickerungsraten (mm) im Revier Kahlenberg - Natürlicher Buchenwälder [Szenario S1]

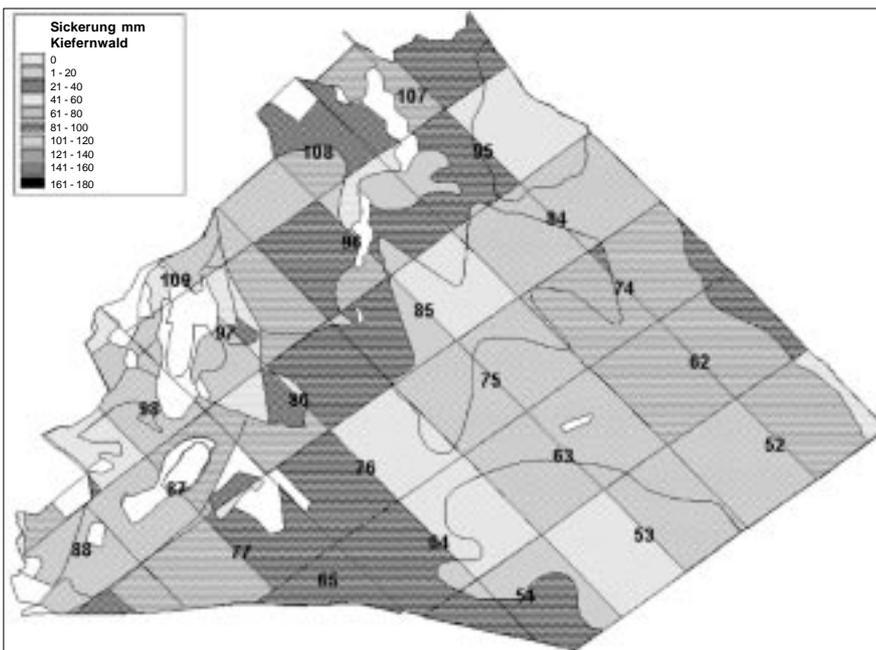


Abbildung 5: Jährliche Tiefenversickerungsraten (mm) im Revier Kahlenberg - Kiefernforsten [Szenario S2]

das Revier in etwa der Zielbestockung, die über den Waldumbau erreicht werden soll.

### Kiefernforst (Ersatzvegetation) [S2]

Ebenfalls unter Verwendung der Standortkarte und von Vegetationsaufnahmen in Kiefernforsten wurde das gesamte Gebiet, differenziert nach Kiefern-Forst-Ökosystemtypen, kartiert (Abbildung 2). Für die Bewirtschaftung wurden die gleichen Bedingungen wie beim Buchen-

wald unterstellt. Dieses Szenario stellt die Bestockungsverhältnisse der Vergangenheit bis etwa zur Hälfte des 20. Jahrhunderts dar (SCAMONI 1975).

### Buchenwald/Kiefernforst (Flächenmischung) [S3]

Unter Berücksichtigung der tatsächlichen Baumartenverteilung nach einer Wirtschaftskarte des Reviers (Stand 1.1.1988) wurde den Lehmstandorten im Südwesten eine Buchenbestockung und

den Sandstandorten im Norden und Osten eine Kiefernbestockung zugeordnet (Abbildung 3). Danach stocken Kiefernforsten auf 520 ha und Buchenwälder auf 118 ha. Lässt man die bereits vorhandenen Mischbestände unberücksichtigt, kalkuliert also am konkreten Punkt mit Reinbeständen von Buche bzw. Kiefer, dann kommt dieses Szenario den heutigen Bewaldungsverhältnissen am nächsten. Auch hier wurde eine Bewirtschaftung nach dem Muster der beiden anderen Szenarien unterstellt.

Für die drei Szenarien erfolgte die Verschneidung der Flächeninformationen: Lokalbodenformen (Stammstandortstufen) - Flächenmischung Buchenwälder/Kiefernforsten - Altersklassenverteilung (Modell).

## 3. Ergebnisse der Modellrechnungen

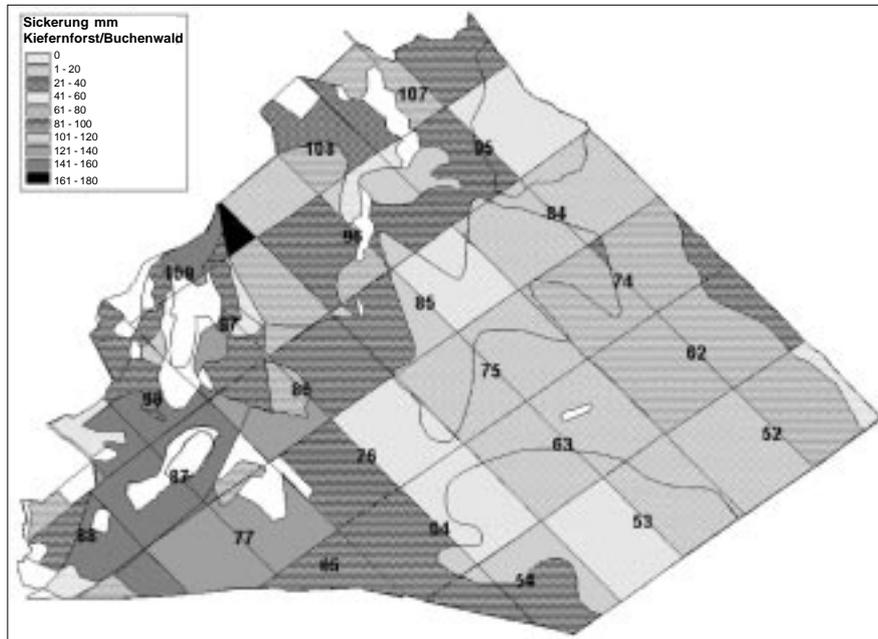
Für die im Revier vorkommenden Lokalbodenformen wurde die Feldkapazität (Tabelle 1) berechnet. Sie liegt in Abhängigkeit von Körnungszusammensetzung, Humusgehalt und Lagerungsdichte zwischen 189 mm (Kahlenberger Grandbraunerde) und 585 mm (Darguner Lehm-Fahlerde) und hat direkten Einfluss auf die Höhe der Tiefensickerung.

Die im Modell verwendeten Witterungsdaten (Niederschlag, Lufttemperatur, relative Luftfeuchte und Sonnenscheindauer) entsprechen im Jahresverlauf den langfristigen Mittelwerten dieser Region. Für den Jahresniederschlag sind dies 620 mm und für die Jahresmitteltemperatur 8,2°C.

Die Tiefenversickerung wurde nun für die ausgewählten Bewaldungsszenarien mit den gegebenen Differenzierungen von Vegetations- und Bodenstruktur berechnet. Die flächenbezogenen Ergebnisse sind in den Abbildungen 4 bis 6 grafisch dargestellt. Es zeigen sich deutliche Unterschiede zwischen der Buchen- und der Kiefernbestockung. Bei der Buchenbestockung liegen die jährlichen Sickerungsraten auf über 85 % der Fläche zwischen 100 und 180 mm (Abbildung 1) während bei standortgleicher Kiefernbestockung nur auf ca. 5 % der Fläche jährliche Sickerungsraten von 100 bis 120 mm erreicht werden. Auf dem überwiegenden Teil der Fläche liegen die Sickerungsraten zwischen 0 und

**Tabelle 2: Tiefensickerung für drei Bewaldungsszenarien des Revieres Kahlenberg (620 mm Jahresniederschlag)**

Szenario	Sickerung		
	m³/a	mm/a	% vom Freilandniederschlag
Kiefernforsten	298.762	47	7
Buchenwälder	898.752	141	23
Kiefernforsten und Buchenwälder	399.328	63	10



**Abbildung 6: Tiefenversickerungsraten (mm) im Revier Kahlenberg - Kiefernforsten/Buchenwälder in Flächenmischung [Szenario S3]**

75 mm/a (Abbildung 2). In der Variante mit Kiefernforsten und Buchenwäldern dominiert die Kiefer mit 520 ha, die Buche stockt auf 118 ha nährstoffreicheren bindigeren Böden. Durch die Flächendominanz der Kiefernforsten und die Beschränkung der Buchenbestockung auf Standorte mit höherer Wasserspeicherung (hohe Feldkapazität) tendiert die Fläche im Sickerungsverhalten in Richtung Kiefernscenario (Abbildung 3).

Die Ergebnisse der Sickerwasserberechnungen der drei Anbauszenarien sind in der Tabelle 2 zusammengefasst. Danach

beträgt die potentielle Grundwasserspende unter Buche mit ca. 900.000 m³ pro Jahr (= 141 mm/a) das Dreifache der Kiefer. Die Variante mit Kiefer und Buche ordnet sich mit rund 400.000 m³ (= 63 mm/a) möglicher Grundwasserspende zwischen der Kiefern- und Buchenvariante ein.

Bei einem täglichen Wasserverbrauch von 78 Litern pro Einwohner und Tag im Landkreis Barnim (mündliche Mitteilung des Zweckverbandes für Wasserversorgung und Abwasserentsorgung Eberswalde) werden von den Einwoh-

nern der Stadt Eberswalde (ca. 48.000) rund 1,2 Mio. m³ Wasser im Jahr verbraucht. Durch entsprechende Waldumbaustrategien von den naturfernen Kiefernforsten zu naturnahen Laubholzbeständen bzw. Mischbeständen kann neben der Erhöhung der Stabilität der Bestände auch ein bedeutender Beitrag zur Erhöhung der wasserwirtschaftlichen Leistung der Wälder im Landschaftswasserhaushalt geleistet werden. So erhöht sich die potentielle Grundwasserneubildung beim Übergang von den Kiefernforsten zu den potentiell natürlichen Buchenwäldern im Beispielsgebiet um das Dreifache. Damit könnte die Stadt Eberswalde ihren Jahresbedarf an Trinkwasser zu zwei Dritteln mit „sauberm Wasser“ aus dem Beispielswaldgebiet decken.

#### 4. Literatur

GLUGLA, G. und B. KÖNIG, 1989: VERMO - Ein Modell für die Berechnung des Jahresgangs der Evaporation, Versickerung und Grundwasserneubildung. Tagungsbericht 275. Akademie der Landwirtschaftswissenschaften der DDR. Berlin, S. 85-91.

KOPP, D. und W. SCHWANECKE, 1994: Standortliche-naturräumliche Grundlagen ökologischer Forstwirtschaft. DLV, Berlin.

LANGGUTH, H., D. KOPP, und D. HEINERT, 1969: Ergebnisse der forstlichen Standortskartierung im staatlichen Forstwirtschaftsbetrieb Eberswalde, Frankfurt/Oder.

LIEDTKE, H. und J. MARCINEK, (ed.), 1995: Physische Geographie Deutschlands. 2. Aufl. Gotha: Justus Perthes Verlag.

MÜLLER, J., 1996: Beziehungen zwischen Vegetationsstrukturen und Wasserhaushalt in Kiefern- und Buchenökosystemen. In: Wald im Wandel. 9. Hamburger Forst- und Holztagung, 06.-09. Mai 1996, Hamburg: Max Wiedebusch Kommiss. Verl., S. 112-128. = Mitt. Bundesforschungsanst. Forst- Holzwirtschaft, Nr. 185.

PASSARGE, H. und G. HOFMANN, 1968: Pflanzengesellschaften des nordostdeutschen Flachlandes II. Jena: G. Fischer, Pflanzensoziol. Bd. 16.

SCAMONI, A., 1975: Die Wälder um Chorin, Potsdam, Frankfurt/Oder.

