

---

# Klima, Grundwassernutzung oder Waldbewirtschaftung? Ursachen tendenziell fallender Grundwasserstände am Beispiel Südwest-Usedoms

Heiko Hennig [Greifswald], Frauke Kachholz [Rostock]

---

## Kurzfassung

Tendenziell fallende Grundwasserstände können vielfältige Ursachen haben, z.B. die Änderung der klimatischen Bedingungen, Modifikationen der Landnutzung oder die Entnahme von Grundwasser. Am Beispiel Südwest-Usedoms wird dargestellt, wie mögliche Einflussfaktoren analysiert und quantifiziert werden können. Für das Untersuchungsgebiet zeigte sich, dass die über Jahrzehnte gesunkenen Grundwasserstände überwiegend aus der Kahlschlagbewirtschaftung des Waldes resultieren und damit weniger einen Trend als eine überjährliche Schwankung aufweisen.

There can be several possible reasons for decreasing groundwater levels, such as changes in climatic conditions, modifications in land use or the extraction of groundwater. Using the example of south-western part of Usedom the methods of analysis and quantifications are presented in this paper. It became evident that sinking groundwater levels within the area of investigation are predominantly associated with clear-cut forest management. Consequently, the decreasing groundwater levels indicate rather a multiannual oscillation than a trend.

## Suchbegriffe

*Wald, Landschaftswasserhaushalt, Grundwasser, Trend, Grundwasserneubildung, Sickerwasser, Grundwasserentnahme, Grundwasserströmungsmodellierung, geohydraulisches Modell, Forest, Landscape water regime, Groundwater, Trend, Groundwater recharge, percolate water, Groundwater extraction, Groundwater modelling, Geohydraulic model*

## 1 Einleitung

Trenduntersuchungen des Landesamtes für Umwelt, Naturschutz und Geologie zeigen, dass 15 der 57 Grundwasserkörper Mecklenburg-Vorpommerns durch sinkende Wasserstände gekennzeichnet sind. Bei einem fallenden Trend befindet sich das System nicht mehr im Gleichgewicht zwischen Grundwasserneubildung und Grundwasserentlastung bzw. -entnahme, so dass sich der Grundwasservorrat mit der Zeit verringert. Damit ist entsprechend der Verordnung zum Schutz des Grundwassers (GRWV 2010) der „gute mengenmäßige Zustand“ gefährdet und es müssen gegebenenfalls Maßnahmen zur Verbesserung der Situation ergriffen werden. Eine Handlungsoption ist z.B. die Einschränkung von Wasserrechten, damit die Grundwasserentnahme das nutzbare Grundwasserdargebot nicht übersteigt. Vor der Einleitung von Maßnahmen müssen die Ursachen für die fallenden Trends geprüft werden. Eine solche detaillierte Analyse wird am Beispiel eines Grundwasserleiters im Süden Usedoms vorgestellt.

## 2 Problemstellung

An langjährig beobachteten Grundwassermessstellen im Süden Usedoms waren über drei Jahrzehnte tendenziell sinkende Grundwasserstände zu verzeichnen. In den letzten Jahren stiegen die Wasserspiegel wieder leicht an, was vor allem auf die sehr feuchten Jahre 2010 und 2011 zurückzuführen ist. Die Jahresmittelwerte lagen im Jahr 2010 bis zu 2 m unter den Anfang der 1980er Jahre beobachteten Wasserständen (Abbildung 1). Grundsätzlich sind folgende Ursachen für den fallenden Trend denkbar:

- Änderung der klimatischen Bedingungen
- Grundwasserentnahme oberhalb der Erneuerungsrate
- landnutzungsbedingte Verminderung der Grundwasserneubildung
- künstliche Grundwasserabsenkung durch Melioration

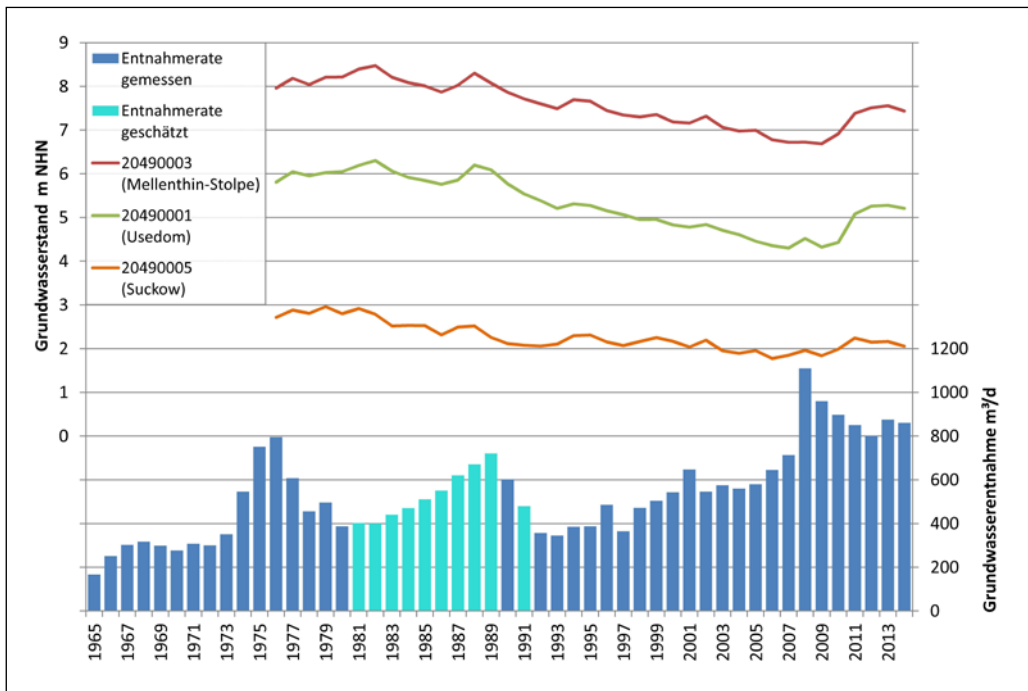


Abb. 1: Grundwasserganglinien und Grundwasserentnahme.

Im benachbarten Bundesland Brandenburg gilt die Klimaänderung als eine der wichtigsten Ursachen für sinkende Grundwasserstände und Seewasserspiegel (z.B. LANDGRAF & KRONE 2002, NATKHIN et al. 2010, NATKHIN et al. 2012, WICHERN et al. 2010). Da aber weder in anderen Teilen Usedoms noch auf dem benachbarten Festland ein fallender Trend zu beobachten ist, sind großräumige klimatische Veränderungen als Hauptursache unwahrscheinlich. Die Gründe waren daher eher auf lokaler Ebene zu suchen.

So ist seit ca. 50 Jahren eine Wasserfassung in der Nähe der Stadt Usedom in Betrieb, die Grundwasser aus einer tiefen Schmelzwasserrinne fördert. In der Abbildung 1 sind die Entnah-

meraten dargestellt. Tendenziell ist eine Erhöhung der Grundwasserentnahme zu verzeichnen, so dass ein Zusammenhang mit den fallenden Grundwasserständen zu vermuten ist.

Auch die Landnutzung kann für die beobachteten Grundwasserstandsänderungen verantwortlich sein. Im Gebiet dominieren sandige Böden, die forstwirtschaftlich genutzt werden. In Abhängigkeit von den Baumarten, der Bodenvegetation und dem Baumalter variieren die Waldverdunstung und daraus resultierend die verbleibenden Versickerungsraten stark (MÜLLER 2011), was ebenfalls überjährige Grundwasserstandsschwankungen zur Folge haben kann. So führen NATKHIN et al. (2012) die verminderte Grundwasserneubildung in einem ca. 100 km<sup>2</sup> großen Untersuchungsgebiet nordöstlich von Berlin zu 47 % auf Änderungen der Waldstruktur zurück (53 % auf den Klimaeinfluss).

Eine Grundwasserabsenkung infolge meliorativer Eingriffe kann hingegen weitgehend ausgeschlossen werden, da die Bewirtschaftung der wenigen Meliorationsanlagen seit den 1960er Jahren nicht geändert wurde.

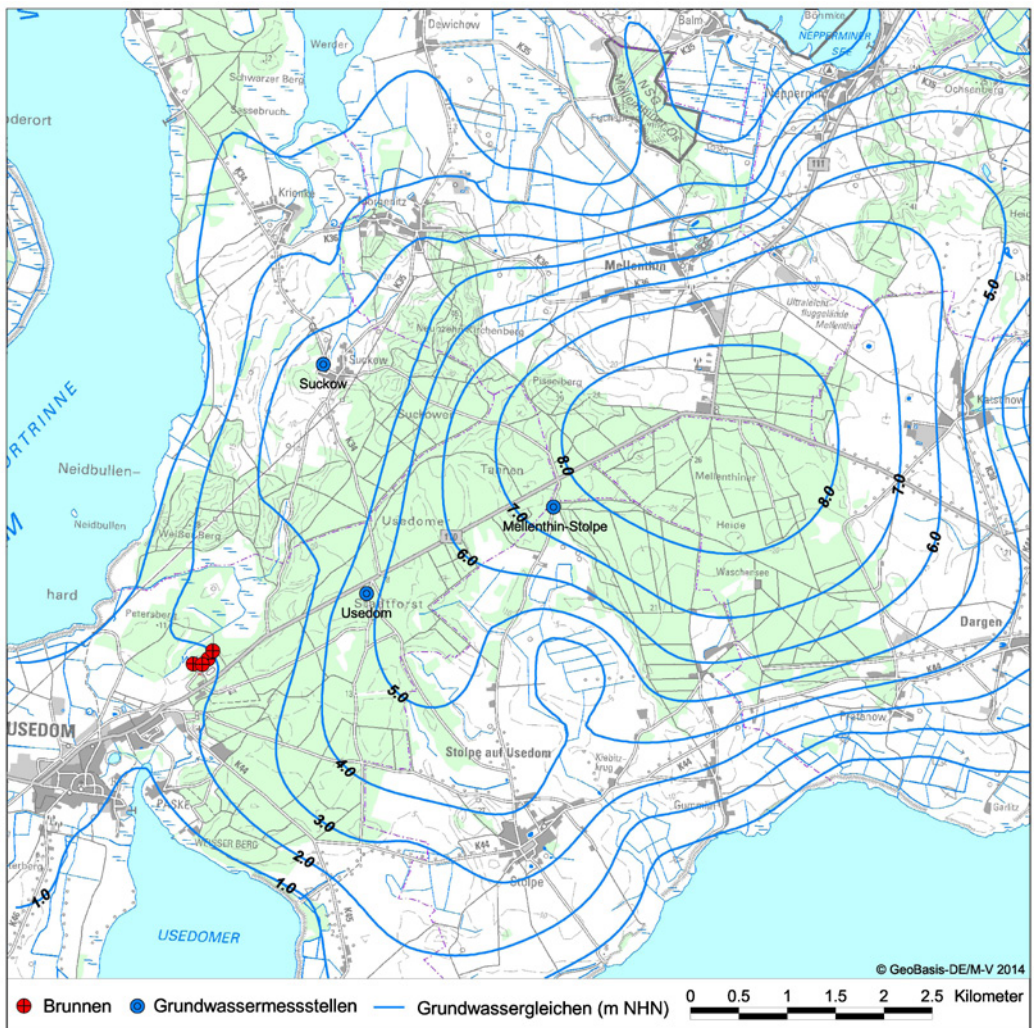


Abb. 2: Untersuchungsgebiet, Grundwassermessstellen und Grundwassergleichen.

Das Ziel der hier vorgestellten Arbeiten war es, den Einfluss der möglichen Ursachen zu quantifizieren. Dafür wurden zunächst Daten

1. zum Klima,
2. zu den hydrogeologischen Verhältnissen und zur Grundwassernutzung sowie
3. zur Waldstruktur und zur Grundwasserneubildung

erfasst und ausgewertet. In einem zweiten Schritt sind die Auswirkungen auf die Entwicklung des Grundwasserstandes mit Hilfe einer geohydraulischen Modellierung geprüft worden.

### 3 Untersuchungsgebiet und Datengrundlagen

Der fallende Trend des Grundwasserstandes wurde im Südwesten der Insel Usedom beobachtet. In der Abbildung 2 sind der Untersuchungsraum, die Lage der Grundwassermessstellen und die Grundwassergleichen dargestellt..

#### 3.1 Klimatische Verhältnisse

Auf der Ostseeinsel Usedom herrscht ein Küstenklima mit einer Durchschnittstemperatur von etwa 9°C, einem mittleren Jahresniederschlag von ca. 620 mm/a und einer durchschnittlichen Grasreferenzverdunstung von ca. 600 mm/a.

Jährliche Niederschlagsdaten wurden vom Deutschen Wetterdienst für die im Untersuchungsgebiet gelegenen Stationen Usedom (1951 bis 2001) und Mellenthin (1969 bis 2005) sowie die knapp 20 km südlich gelegene Station Ueckermünde (1951 bis 2011) zur Verfügung gestellt. Über Regressionsrechnungen konnten die Reihen Usedom und Mellenthin auf den Zeitraum 1960 bis 2011 verlängert werden. Beide Messreihen sind eng korreliert und auch die Niederschlagshöhen unterscheiden sich wenig. Der Gebietsniederschlag wurde als arithmetisches Mittel beider Reihen berechnet.

Verdunstungsdaten sind ebenfalls vom Deutschen Wetterdienst für die Station Ueckermünde bereitgestellt worden. Angesichts der im Vergleich zum Niederschlag deutlich geringeren räumlichen Variabilität wurden die Verdunstungsraten direkt auf den Untersuchungsraum übertragen.

In der Abbildung 3 sind die Ganglinien des Niederschlags und der Grasreferenzverdunstung dargestellt. Ferner enthält sie die klimatische Wasserbilanz, die sich als Differenz aus Nieder-

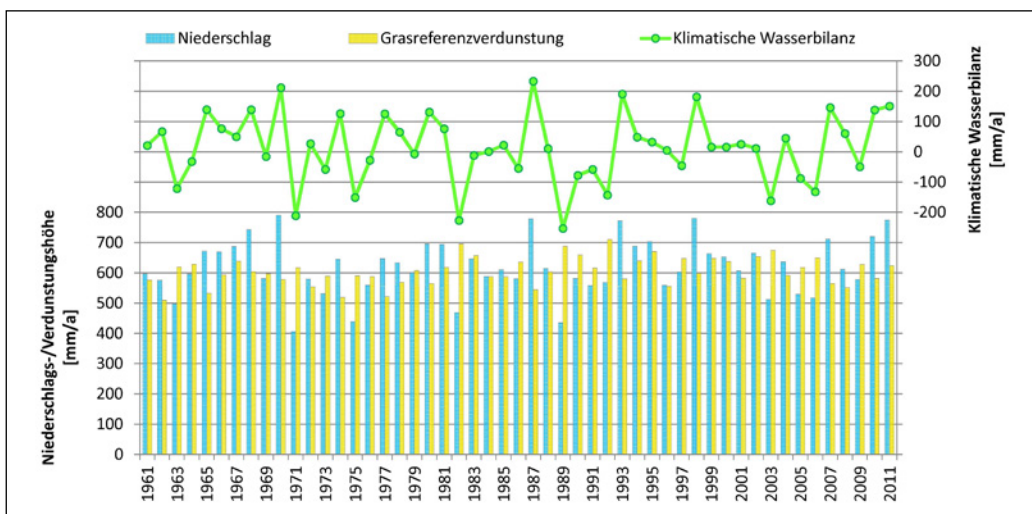


Abb. 3: Ganglinien klimatischer Größen.



schlag und Grasreferenzverdunstung ergibt und als Maß für den Klimaeinfluss auf die Grundwasserneubildung dient. Die statistische Analyse zeigte, dass die Klimadaten keinen signifikanten Trend aufweisen.

### 3.2 Hydrogeologische Verhältnisse und Grundwassernutzung

Geohydraulisch kann man den Untergrund im Untersuchungsgebiet durch drei Schichten approximieren: einen oberen und einen unteren Grundwasserleiter, die durch einen ca. 5 m mächtigen Zwischenstauer getrennt sind. Die Verhältnisse sind im hydrogeologischen Schnitt (Abbildung 4) veranschaulicht.

Im oberen Grundwasserleiter dominieren schluffige Feinsande (Weichsel-Nachschütsande). Ihre durchflossene Mächtigkeit variiert je nach Grundwasserstand zwischen 1 m und 8 m.

Der untere Grundwasserleiter setzt sich aus Fein- und Mittelsanden (Saale-Nachschütsande und Weichsel-Vorschütsande) zusammen und weist eine Mächtigkeit um 10 m auf. Entlang einer Linie zwischen den Ortslagen Usedom und Suckow verläuft eine ehemalige Schmelzwasserrinne. Hier wurde der im Liegenden des Hauptgrundwasserleiters folgende saalezeitliche Geschiebemergel fast bis an die Pleistozänbasis ausgeräumt und mit Mittel- und Grobsanden aufgefüllt. Für die Interpolation des Rinnenverlaufes stand neben den Bohrungen auch eine geoelektrische Erkundung aus den 1980er Jahren zur Verfügung. Die Abbildung 5, in der die interpolierte Basis des unteren Grundwasserleiters dargestellt ist, verdeutlicht den Verlauf der Schmelzwasserrinne. Hier erreicht der untere Grundwasserleiter Maximalmächtigkeiten von bis zu 50 m.

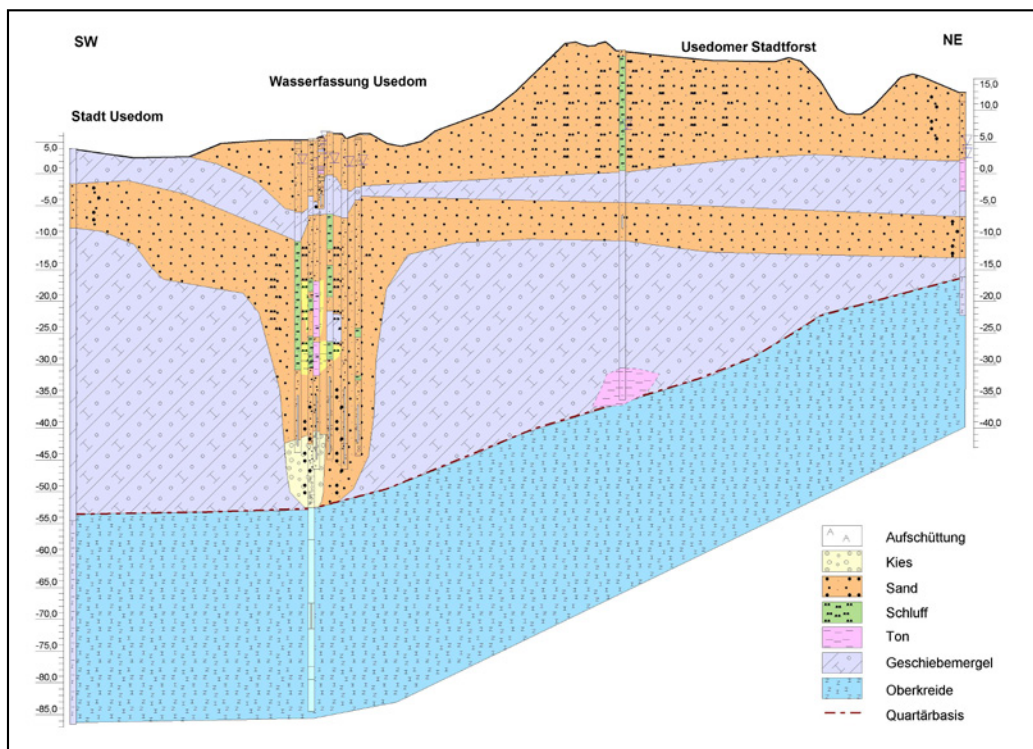


Abb. 4: Hydrogeologischer Schnitt durch das Untersuchungsgebiet.

In der Abbildung 2 sind die Grundwassergleichen dargestellt. Das Grundwasser strömt vom Zentrum des Inselteiles, wo Wasserstände von über 8 m erreicht werden, den umgebenden Vorflutern zu. Östlich der Ortslage Usedom befindet sich die Wasserfassung, deren Brunnen in den mächtigen, gut durchlässigen Sanden der ehemaligen Schmelzwasserinne verfiltert sind. Aus der großen Aquifermächtigkeit resultiert neben den guten Zuflussbedingungen auch eine hohe Speicherkapazität, so dass sich Entnahmen erst verzögert auf das weitere Umfeld auswirken. Entnahmebedingte Schwankungen werden gedämpft, und eine Grundwasserentnahme, die die Erneuerungsrate überschreitet, könnte sich in entfernteren Messstellen als fallender Trend bemerkbar machen.

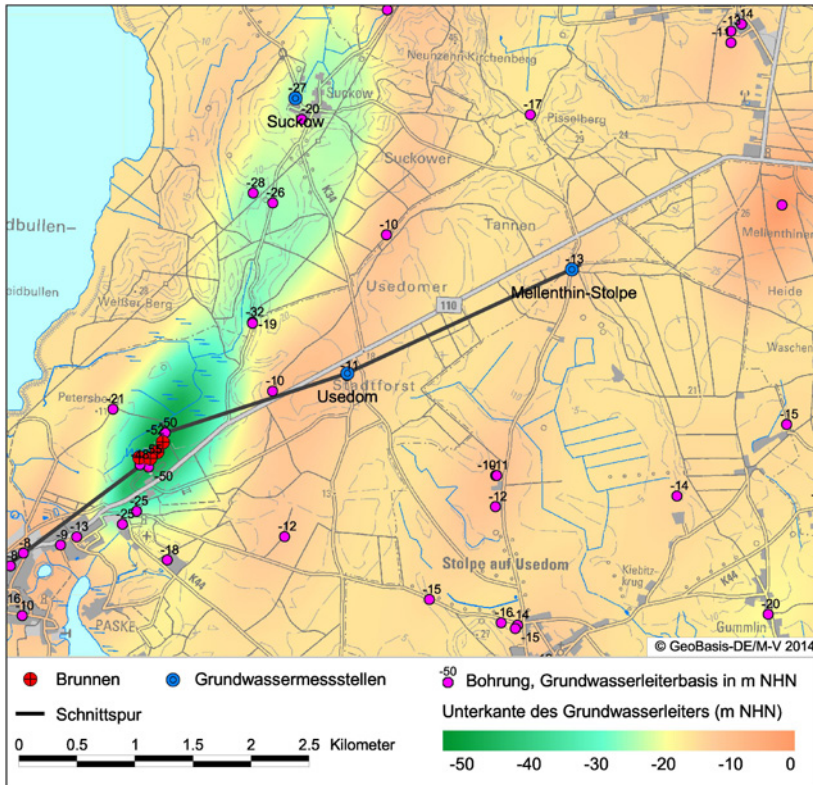


Abb. 5: Unterseite des Hauptgrundwasserleiters.

### 3.3 Grundwasserneubildung

#### 3.3.1 Berechnungsansatz

Infolge der hohen Versickerungsfähigkeit des Oberbodens sind im Untersuchungsgebiet keine nennenswerten Direktabflüsse nach Niederschlagsereignissen zu erwarten. Damit kann die mittlere Grundwasserneubildung als Differenz aus dem Niederschlag und der Verdunstung berechnet werden. Zur Verdunstungsberechnung kam das BAGROV-GLUGLA-Verfahren zur Anwendung, dessen aktuelle Version unter der Bezeichnung BAGLUVA im Regelwerk ATV-DVWK-M 504 dokumentiert ist. Das Verfahren diente unter anderem zur Bestimmung der mittleren jährlichen Verdunstungs- und Abflusshöhe im Hydrologischen Atlas von Deutschland (HAD 2000–2003) und bildete die Basis für die landesweite Wasserbilanzierung in Mecklenburg-Vorpommern (HENNIG & HILGERT 2007). Es liefert langjährige Mittelwerte der Verdunstung in Abhängigkeit von der Landnutzung, dem Boden und dem Grundwasserflurabstand. In der

Abbildung 6 sind die Verteilung der Hydrotope im Untersuchungsgebiet und die berechneten langjährigen Grundwasserneubildungsraten dokumentiert. Es dominieren Sandböden, die vorwiegend forstwirtschaftlich genutzt werden und die die Grundwasserneubildung im Zentrum des Inselteils prägen.

Während die übrigen Hydrotope überjährlich relativ konstante Neubildungsbedingungen aufweisen, ist die Struktur der bewirtschafteten Wälder zyklischen Veränderungen unterworfen. Die Neubildungsbedingungen der Waldstandorte werden daher im Weiteren diskutiert.

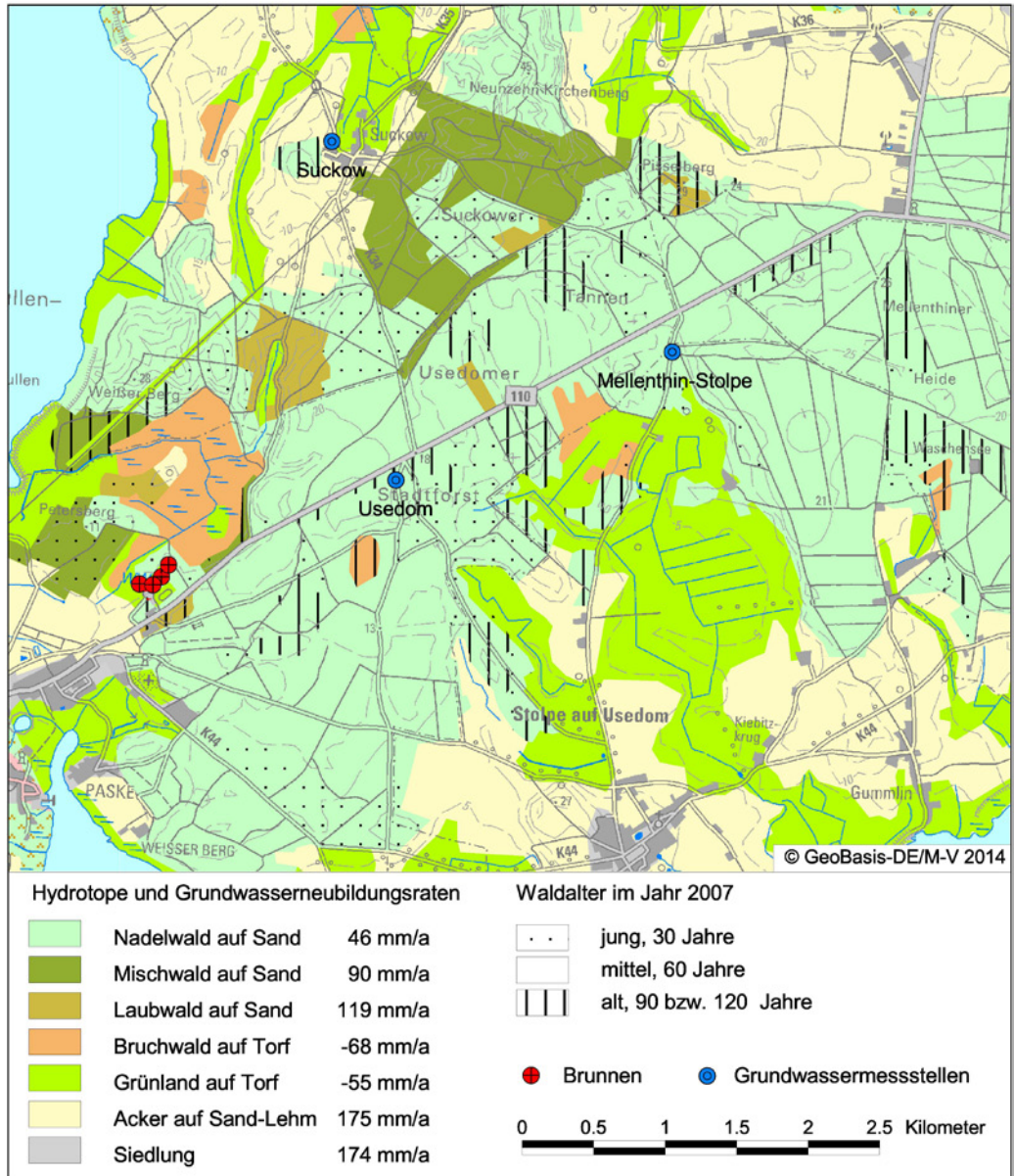


Abb. 6: Hydrotope der Grundwasserneubildung.



### 3.3.2 Grundwasserneubildung unter Waldstandorten

Wälder verdunsten durchschnittlich ca. 10 % bis 20 % mehr als Grasbestände unter vergleichbaren Witterungs- und Bodenbedingungen (MÜLLER et al. 2007). Das liegt u. a. an der ausgeprägten vertikalen Bestandsstruktur mit Kraut-, Strauch- und Baumschicht, an der großen Blattoberfläche und am tiefreichenden Wurzelraum. Außerdem hat ein Waldbestand aufgrund seiner Höhe und seiner relativ großen Oberflächenrauigkeit eine weitaus bessere Anbindung an die freie Atmosphäre, was den Verdunstungsvorgang erleichtert. Vor dem Hintergrund des Waldumbaus und des Klimawandels wurden vor allem auch im Raum des nordostdeutschen Tieflandes Forschungsarbeiten zum Wasserhaushalt des Ökosystems Wald initiiert, deren wesentliche Erkenntnisse im Folgenden aufgegriffen werden.

Die Grundwasserneubildung hängt in entscheidendem Maße von der dominierenden Baumart des Waldes ab (MÜLLER et al. 2007, MÜLLER 2011, GOLDBERG & BERNHOFER 2011). So wird grundsätzlich bei vergleichbaren Witterungsverhältnissen unter einem Nadelwald weniger Grundwasser neu gebildet als unter einem Laubwald der gleichen Altersklasse. MÜLLER (2011) stellt vor allem Vergleiche zwischen Kiefern und Buchen an und sieht den Hauptgrund für die baumartenspezifischen Sickerungsunterschiede in der höheren Interzeptionsverdunstung der Kiefer. Verantwortlich hierfür sind die immergrünen Nadeln, die das ganze Jahr über interzeptionswirksam sind, die sperrige Krone und die raue Borke, die kaum Stammabfluss des Niederschlagswassers zulässt. Anders verhält es sich mit der Buche. Sie trägt im Winter kein Laub, hat eine glatte Rinde und Zweige, die bei einem Niederschlagsereignis das Wasser trichterförmig zum Stamm leiten und somit den Bodenwassergehalt mehren.

Die Höhe der Grundwasserneubildung nimmt von der Aufforstung bis zum schwachen Stangenholzstadium (20...40 Jahre) stetig ab, da anfänglich der Biomassezuwachs und der Kronenschlussgrad und folglich auch die Gesamtverdunstung rasch zunehmen. In einem Kiefernforst kann die Gesamtverdunstung im schwachen Stangenholzstadium 100 % der jährlichen Niederschlagsmenge betragen (MÜLLER 2011), folglich geht die Tiefensickerung gegen null. Danach steigt sie aufgrund natürlicher Baumzahlreduzierungen und planmäßiger Abholzung wieder leicht an. In der Abbildung 7 ist die Grundwasserneubildung in Abhängigkeit vom Bestandsalter dargestellt, die im Untersuchungsgebiet bei Ansatz mittlerer klimatischer Verhältnisse zu erwarten wäre. Die Berechnung erfolgte unter Nutzung der Parameter des BfG-Forschungsberichtes Nr. 1342 (Bfg-1342).

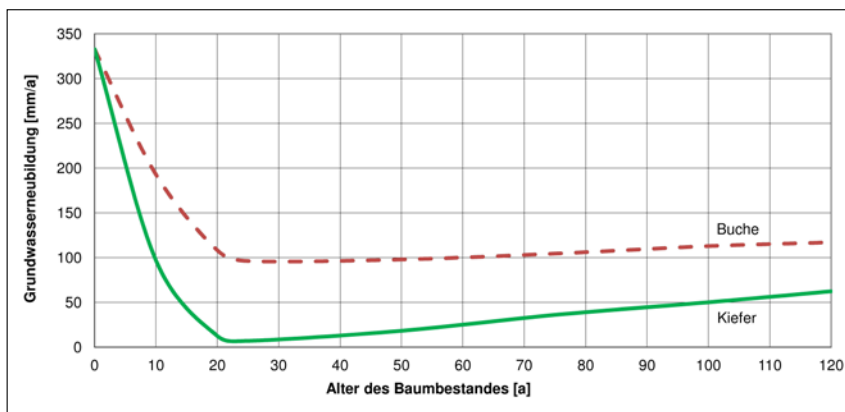


Abb. 7: Grundwasserneubildung in Abhängigkeit vom Bestandsalter [nach BfG-1342].



HOFMANN (1995) zeigte, dass sich in nordostdeutschen Kiefernwäldern seit Ende der 1970er Jahre ein Wandel von Bodenvegetationstypen vollzieht, der durch Stickstoffansammlungen im Boden ausgelöst wurde. Die Zunahme der Stickstoffverbindungen resultierte aus damals steigenden Emissionen der Industrie, der immer intensiver betriebenen Landwirtschaft und des expandierenden Verkehrs (HEINSDORF 2007). War in der ersten Hälfte des 20. Jahrhunderts die Bodenvegetation auf großen Flächen noch geprägt durch das Auftreten von spärlichen Flechten-, Heide- und Moostypen, so wandelten sie sich aufgrund der verbesserten Nährstoffzusammensetzung des Bodens hin zu vitalen Grasdecken oder dichten Strauchbeständen (HEINSDORF 2007) mit dementsprechend größerem Wasserverbrauch und geringerer Tiefensickerung. Der Einfluss der Bodenvegetation verliert im Laubwald mit dem Einsetzen des Kronenschlusses in der Dickungsphase aufgrund der zunehmenden Ausdunkelung an Bedeutung. Hingegen kann die Grundwasserneubildung in einem Kiefernwald auch im Baumholzstadium (> 60 Jahre) stark beeinflusst werden, da das Kronendach durch Baumzahlreduzierungen stärker auflichtet.

### 3.3.3 Waldstruktur im Untersuchungsgebiet

Der Usedomer Stadtforst ist ein Altersklassenwald und wird im Kahlschlagbetrieb bewirtschaftet, d.h., bei Erreichen der Hiebreeife werden alle Bäume eines Schlages gefällt und anschließend wird die Fläche wieder aufgeforstet.

Für etwa die Hälfte der Waldfläche (47 % Usedomer Stadtforst und 5 % Landesforst) lagen Daten zur Waldstruktur vor. Die Basis bildete eine Erfassung für den Usedomer Stadtforst aus dem Jahr 2007, die die einzelnen Waldparzellen in drei Altersklassen und acht Baumartengruppen aufteilt. Die Baumartengruppen umfassen Kiefern-, Fichten-, Lärchen-, Douglasien-, Buchen-, Eichen-, Birken- und Erlengehölze, wobei die Kiefer mit insgesamt 76 % deutlich dominiert.

Für die Grundwasserneubildungsberechnung wurden die Baumarten in Nadelwald, Laubwald und Mischwald (60 % Nadelholz, 40 % Laubholz) unterschieden. Die drei Altersklassen wurden übernommen. Sie umfassen die Altersspannen 0 bis 40 Jahre („junger Bestand“), 41 bis 80 Jahre („mittelalter Bestand“) und 81 bis 180 Jahre („alter Bestand“). Den Altersklassen wurden mittlere Bestandsalter zugeordnet: ein junger Bestand erhielt den Wert 30 Jahre, ein mittelalter Bestand den Wert 60 Jahre, und für die älteste Klasse wurde das Umtriebsalter angesetzt. So ergaben sich neun Waldklassen.

Die Waldflächen, für die keine Bestandsdaten vorlagen, wurden anhand von Orthofotos den neun Waldklassen zugeordnet. Dabei konnten Altersunterschiede über die Bestandsdichte und über den Kronendurchmesser beurteilt werden, während für den Waldtyp die Farbe des Kronendachs einen wichtigen Indikator darstellte.

In Tabelle 1 sowie in der Abbildung 6 ist die Struktur des Waldes dokumentiert. Die Waldfläche im Untersuchungsgebiet setzt sich zu ca. 83 % aus Nadelholz zusammen und die mittlere Altersklasse (41...80 Jahre) ist bei allen Waldtypen am stärksten vertreten.

Tabelle 1: Struktur der Waldfläche.

	Waldalter			gesamt
	jung 0...40 a	mittel 41...80 a	alt >81 a	
<b>Nadelwald</b>	16 %	56 %	11 %	83 %
<b>Laubwald</b>	1 %	7 %	1 %	9 %
<b>Mischwald</b>	1 %	6 %	1 %	8 %

### 3.3.4 Grundwasserneubildungsberechnung für die Waldflächen

Ausgehend vom Jahr 2007, in dem die Alterserfassung erfolgte, wurde das Bestandsalter ab dem Jahr 1961 in Jahresschritten rekonstruiert. Dabei ist von einem Umtriebsalter von 90 Jahren bei Nadel- und Mischwald und von 120 Jahren bei Laubwald ausgegangen worden.

Das BAGLUVA-Verfahren wurde zur Berechnung langjähriger Mittelwerte entwickelt, so dass Bodenspeicheränderungen vernachlässigbar sind. Um den Einfluss des Bestandsalters berücksichtigen zu können, sind hingegen kurze Zeitschritte erforderlich. Im Forschungsbericht zum BAGLUVA-Verfahren (BfG-1342) wird das Dreijahresmittel als geeigneter Kompromiss zwischen den beiden genannten Anforderungen angesehen. Dieser Empfehlung folgend gingen die Klimadaten als gleitendes Dreijahresmittel in die Grundwasserneubildungsberechnung ein. Der BAGROV-Parameter, der den Einfluss von Landnutzung und Boden beschreibt, wurde entsprechend den Empfehlungen des genannten Forschungsberichtes angesetzt. Die Abbildung 8 zeigt die für Nadelwald berechneten Grundwasserneubildungsraten für die drei Altersklassen. Sie schwanken in Abhängigkeit vom Waldalter und den klimatischen Bedingungen. Nach der Rodung betragen die Maxima etwa 350 mm, im jungen Stangenholzstadium gehen die Sickerungsraten in einigen Jahren gegen null.

Um zu berücksichtigen, dass der Kahlschlag aller Bäume einer Altersklasse nicht innerhalb eines Jahres erfolgt, sind die berechneten Grundwasserneubildungsraten über die Bildung des gleitenden Fünfjahresmittels geglättet worden. Die nachfolgenden geohydraulischen Modellrechnungen zeigten, dass so der Trend des Grundwasserstandes gut wiedergegeben werden kann, ohne dass zu große Sprünge beim Wechsel der Altersklasse auftreten. In der Abbildung 8 ist auch die Grundwasserneubildungsganglinie unter Wald als flächengewichtetes Mittel für

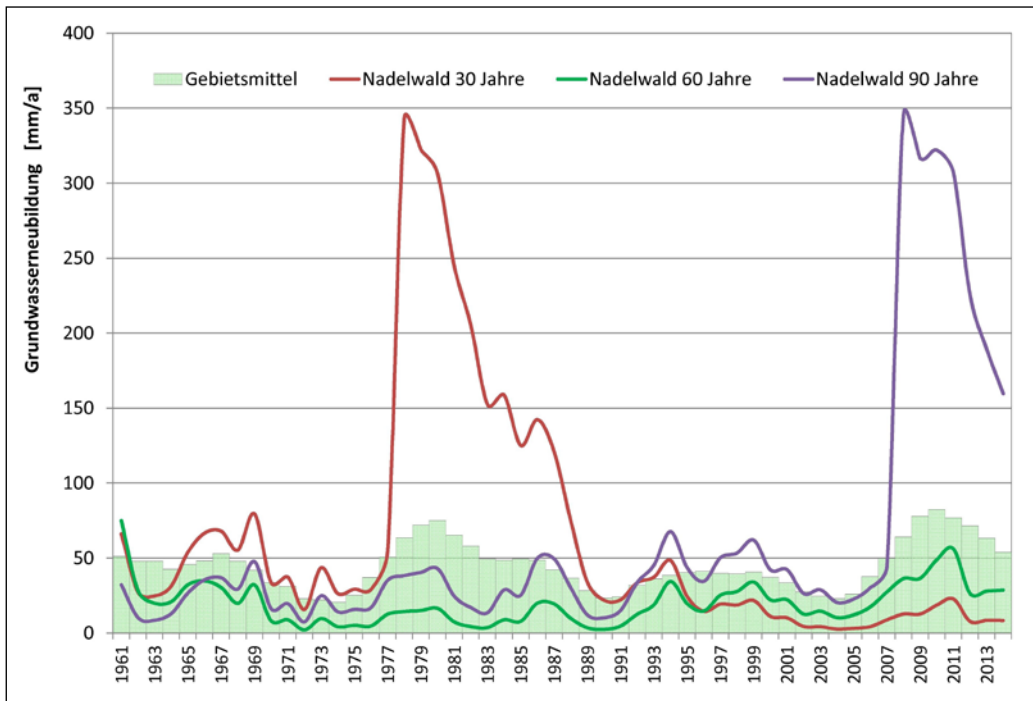


Abb. 8: Grundwasserneubildungsganglinien der Nadelwaldklassen (Bezugsjahr 2007) und Gebietsmittel.

das gesamte Untersuchungsgebiet dargestellt. Das Gebietsmittel der Grundwasserneubildung ist relativ gering, da die mittlere Baumaltersklasse (41...80 a), bei der im Untersuchungszeitraum kein Kahlschlag erfolgte, flächenmäßig dominiert. Die Gebietsneubildungsrate schwankt zwischen 20 mm/a und 80 mm/a, der Mittelwert über die gesamte Reihe beträgt 45 mm/a. Es zeigt sich eine deutliche Zyklizität, die keine Übereinstimmung mit den Ganglinien der Klimagrößen (Abbildung 3) aufweist.

Über die in Nordostdeutschland beobachtete Zunahme der Bodenvegetation (HOFMANN 1995) lagen für das Untersuchungsgebiet keine Angaben vor, so dass dieser Aspekt nicht quantifiziert werden konnte. Eine Berücksichtigung würde vermutlich einen leicht fallenden Trend der Grundwasserneubildungsraten bewirken.

#### 4 Das Grundwasserströmungsmodell

Die Analyse der Einflussfaktoren zeigte, dass sowohl die Grundwasserentnahme als auch die schwankende Grundwasserneubildung geeignet sind, überjährige (ggf. auch trendbehaftete) Grundwasserstandsänderungen auszulösen. Um die möglichen Ursachen überprüfen und quantifizieren zu können, wurde ein Grundwasserströmungsmodell aufgebaut. Die Modellierung ermöglicht es, die Auswirkungen der einzelnen Einflussfaktoren auf den Grundwasserstand zeitlich und örtlich zu quantifizieren. Das Ziel der Modellierung war nicht primär, die gemessenen Grundwasserstände genau wiederzugeben, sondern die beobachteten Tendenzen abzubilden, um nachfolgend die Einzelwirkungen separieren zu können. Die Berechnungen erfolgten für Jahresmittelwerte der Grundwasserneubildung und Grundwasserentnahme, innerjährliche Schwankungen wurden daher nicht abgebildet. Zur Anwendung kam die Finite-Elemente-Software FEFLOW.

Die hydrogeologischen Verhältnisse wurden durch drei Modellschichten approximiert: den oberen, gering mächtigen Grundwasserleiter, den Zwischenstauer und den unteren Hauptgrundwasserleiter. Der Abstrom in die Oberflächengewässer ging als Randbedingung 3. Art in das Modell ein, die östliche Berandung bildete eine durch die hydraulische Hochlage verlaufende Randstromlinie.

Zunächst erfolgte eine Sensitivitätsanalyse. Dabei werden die einzelnen Modellparameter innerhalb plausibler Grenzen variiert, um deren Einfluss auf das Rechenergebnis zu ermitteln. Sie gibt wichtige Hinweise für die nachfolgende Kalibrierung und ist die Voraussetzung dafür, die Vertrauenswürdigkeit der späteren Modellierungsergebnisse beurteilen zu können. In der Tabelle 2 sind die Ergebnisse der durchgeführten Sensitivitätsanalyse für die wichtigsten Parameter zusammengefasst.

Tabelle 2: Sensitivitätsanalyse.

Parameter	Sensitivität		Beschreibung
	stationär	instat.	
Durchlässigkeitskoeffizient der Grundwasserleiter [ $k_f$ -GWL]	hoch	hoch	steuert das Grundwassergefälle; positive Korrelation mit GWN
Durchlässigkeitskoeffizient des Zwischenstauers [ $k_f$ -GWS]	mittel	mittel	steuert Druckdifferenz zwischen den GWL; negative Korrelation mit $k_f$ -GWL
Grundwasserneubildung [GWN]	mittel	mittel	positive Korrelation mit $k_f$ -GWL im Bereich der Hochflächen
entwässerbare Porosität [ $n_e$ ]	keine	hoch	steuert Stärke der Grundwasser-schwankungen [Speicherverhalten]

Eine Kalibrierung dient der Anpassung der Modellparameter, so dass die Abweichungen zwischen gemessenen und berechneten Werten minimiert werden. Entsprechend den Ergebnissen der Sensitivitätsanalyse lag der Schwerpunkt der Kalibrierung auf der Anpassung der Durchlässigkeitskoeffizienten der Grundwasserleiter und der entwässerbaren Porosität des ungespannten Grundwasserleiters.

Für eine grobe stationäre Modellkalibrierung standen zwölf asynchrone Wasserstandsangaben zur Verfügung. Sie stammen vorwiegend aus den 1970er Jahren (1959–1981) und repräsentieren einen Zeitraum vor dem einsetzenden Trend. Gekoppelt mit der stationären Kalibrierung erfolgte eine instationäre Modellanpassung anhand der Zeitreihen der langjährig beobachteten Messstellen (1976–2011). Für die Abschätzung des Durchlässigkeitskoeffizienten im Bereich der Schmelzwasserrinne konnte darüber hinaus auf die Ergebnisse von Pumpversuchen an der Wasserfassung Usedom zurückgegriffen werden.

Die identifizierten Durchlässigkeitskoeffizienten der Grundwasserleiter liegen zwischen  $5 \times 10^{-4}$  m/s in der Schmelzwasserrinne und lokal  $1 \times 10^{-5}$  m/s im Umfeld der hydraulischen Hochlage. Im unteren Grundwasserleiter dominiert ein Durchlässigkeitskoeffizient von  $1 \times 10^{-4}$  m/s, in den oberen Sanden ist die Durchlässigkeit mit verbreitet  $5 \times 10^{-5}$  m/s etwas schlechter. Bei einer Durchlässigkeit des Zwischenstauers von  $4 \times 10^{-8}$  m/s wurden die beobachteten Druckdifferenzen von ca. 10 cm zwischen den Grundwasserleitern gut wiedergegeben. Die anhand des überjährlichen Schwankungsverhaltens abgeleitete entwässerbare Porosität beträgt 0,16. Damit liegen alle Parameter innerhalb der Größenordnungen, die anhand von Literaturangaben für die entsprechenden Sedimente zu erwarten waren.

Mit dem beschriebenen Parametersatz konnte sowohl bei der stationären (Abbildung 9) als auch bei der instationären (Abbildung 10) Kalibrierung eine gute Anpassung an die Beobachtungswerte erzielt werden. Vor allem an den Messstellen Mellenthin-Stolpe und Suckow ist der

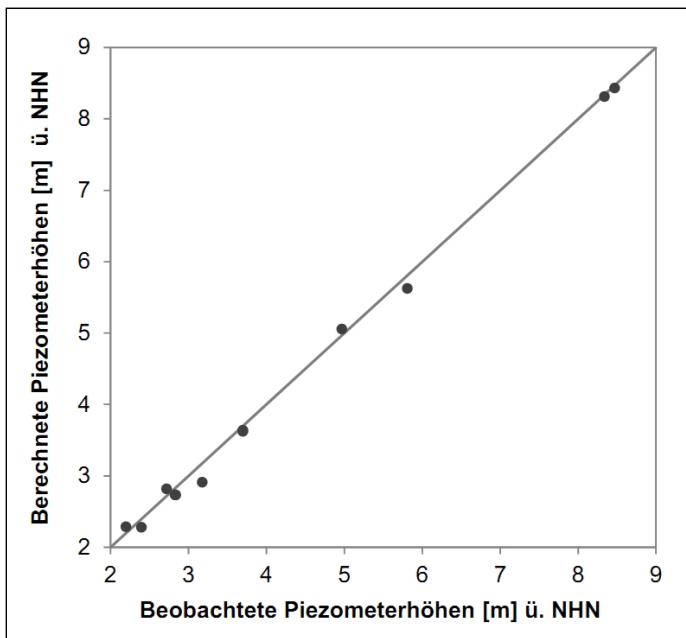


Abb. 9: Streudiagramm der stationären Kalibrierung.



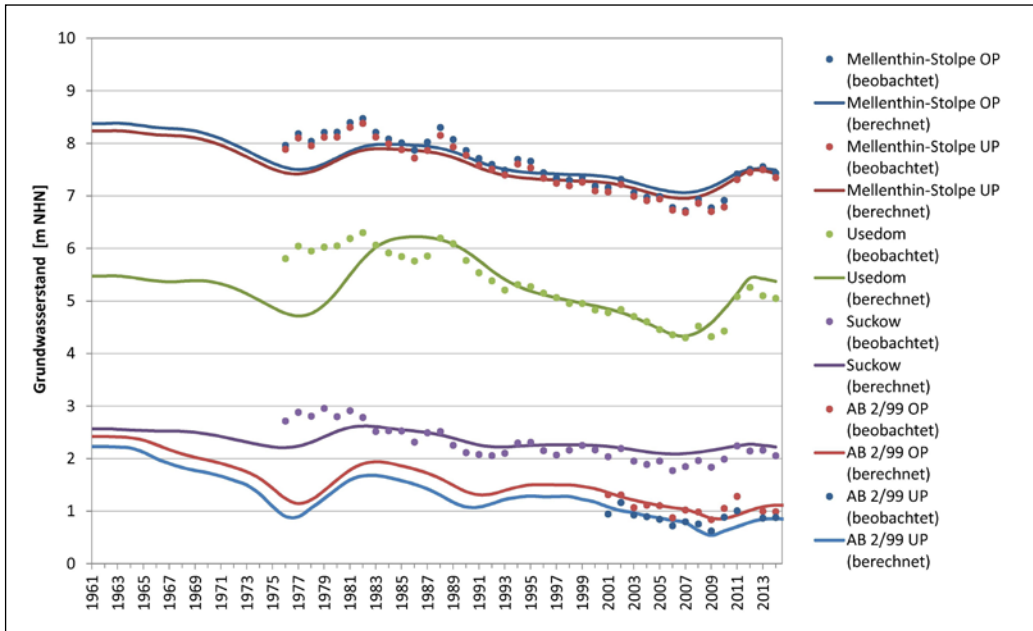


Abb. 10: Ganglinien der instationären Kalibrierung und Validierung.

tatsächliche Grundwasserrückgang zwischen 1980 und 2007 aber etwas stärker als berechnet. Unter Umständen wäre durch die Berücksichtigung einer Zunahme der Bodenvegetation eine noch bessere Wiedergabe des Grundwasserrückgangs möglich; aufgrund der fehlenden Informationen wurde dieser Einfluss aber nicht weiter betrachtet.

Zur Überprüfung (Validierung) des Grundwassermodells wurden Grundwasserganglinien nachgerechnet, die bei der Kalibrierung nicht verwendet worden sind. Die drei Mehrfachmessstellen befinden sich im Umfeld der Wasserfassung und werden seit 2001 regelmäßig beobachtet. Das Grundwasserströmungsmodell bildet sowohl das Schwankungsverhalten als auch die Druckdifferenzen zwischen den Grundwasserleitern zufriedenstellend ab; Validierungsganglinien an der Messstelle AB 2/99 sind beispielhaft in der Abbildung 10 dargestellt.

## 5 Szenariorechnungen und Ergebnisse

Die Kalibrierung und die Validierung des Grundwasserströmungsmodells zeigten, dass die beobachteten Grundwasserverläufe, die aus dem Zusammenwirken der Einzelfaktoren (Klima, Grundwasserentnahme, Waldstruktur) resultieren, richtig wiedergegeben werden. Damit war es möglich, über instationäre Szenariorechnungen die einzelnen Einflussfaktoren zu separieren. Dafür wurden, ausgehend vom Kalibrierungszustand, die Wirkfaktoren sukzessiv entfernt. In der Tabelle 3 ist dokumentiert, welche zeitabhängigen Einflussfaktoren in die einzelnen Szenariorechnungen eingingen.

Tabelle 3: Szenariorechnungen.

Szenario		berücksichtigte Einflussfaktoren		
		Klima	Waldentwicklung	Grundwasserentnahme
[0]	Kalibrierung	X	X	X
[1]	ohne Grundwasserentnahme	X	X	
[2]	gleichbleibende Waldstruktur [Zustand von 1961]	X		
[3]	ohne Klimaschwankungen [stationäre Verhältnisse]			

Durch den Vergleich der berechneten Ganglinien konnte anschließend die Intensität der Einflussfaktoren bewertet werden.

In den Abbildungen 11 bis 13 sind die Berechnungsergebnisse visualisiert. Die dicke schwarze Linie ist das Kalibrierungsergebnis, bei dem alle Einflüsse beachtet wurden (Szenario 0); die gestrichelte schwarze Linie spiegelt stationäre Verhältnisse wider (keine Änderung mit der Zeit, Szenario 3). Der für die Szenarien (1) und (2) berechnete Grundwassergang ist durch die dünnen grauen Linien dargestellt. Die Abstände zwischen den berechneten Grundwasserganglinien verdeutlichen die Stärke der Einflussfaktoren Grundwasserentnahme (blau) und Waldentwicklung (grün).

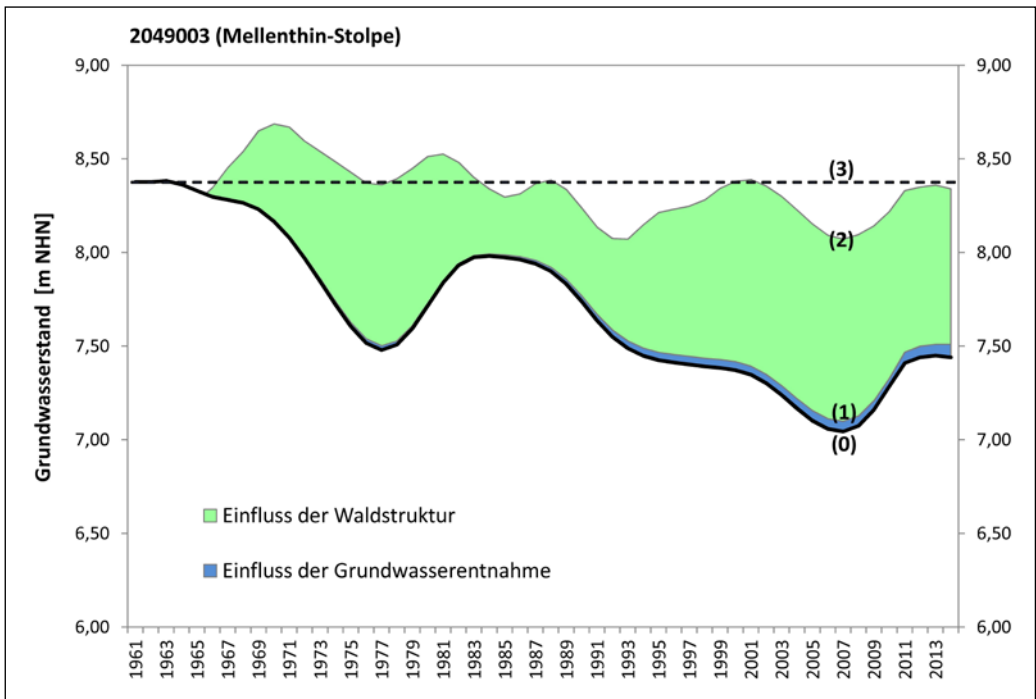


Abb. 11: Szenariorechnung – Messstelle Mellenthin-Stolpe.

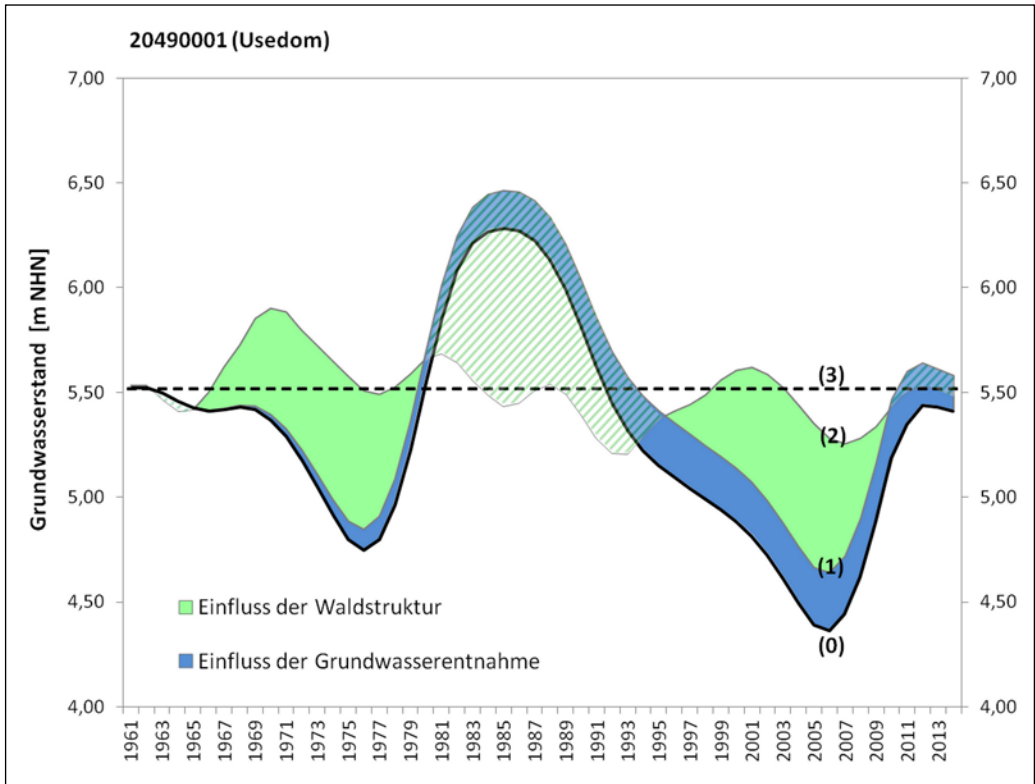


Abb. 12: Szenariorechnung – Messstelle Usedom.

Die Grundwasserstände des Szenarios (2), das allein die Variabilität der klimatischen Einflüsse berücksichtigt, schwanken an allen drei Messstellen um einen mittleren Wert, der etwa den Verhältnissen von 1961 entspricht. Ein Trend ist nicht erkennbar.

Im Bereich der hydraulischen Hochlage (Messstelle Mellenthin-Stolpe, Abbildung 11) ist der Einfluss der ca. 4 km entfernten Wasserfassung sehr gering. Die durch die Wassergewinnung verursachte Absenkung beträgt max. 5 cm. Der starke Rückgang des Grundwasserstandes um etwa 1 m ist nahezu vollständig auf die sich ändernde Waldstruktur zurückzuführen. In der Umgebung der Messstelle befindet sich Nadelwald, der Ende der 1960er Jahre etwa 20 Jahre alt war und damit nur sehr geringe Sickerwasserraten unter 20 mm/a zuließ (vgl. Abbildung 7 und Abbildung 8). Das hatte sinkende Grundwasserstände zur Folge. Ein temporärer Anstieg der Grundwasserneubildung und in der Folge des Grundwasserstandes um 1980 resultierte aus der Rodung von Waldflächen nördlich der Messstelle, danach fiel der Grundwasserstand weiter. In den kommenden Jahren ist ein langsamer Wiederanstieg zu erwarten, da die Waldflächen auflichten und damit höhere Sickerwasserraten zulassen. Mit einem starken Anstieg des Grundwasserstandes ist um 2040 zu rechnen, wenn große Teile des Waldes das Umtriebsalter erreichen und gerodet werden.

Die Messstelle Usedom (Abbildung 12) liegt im Abstrom von Waldflächen, die um 1980 gerodet und wieder aufgeforstet wurden. Dadurch wurde in dieser Zeit ein sehr hohes Niveau des Grundwasserstandes erreicht. In der Abbildung wird durch die grüne Schraffur der grundwassererhöhende Einfluss der Waldrodung verdeutlicht, der bis zu 1 m beträgt. Trotz der Intensivierung der Grundwasserentnahme an der ca. 2 km entfernten Wasserfassung wurden maximale

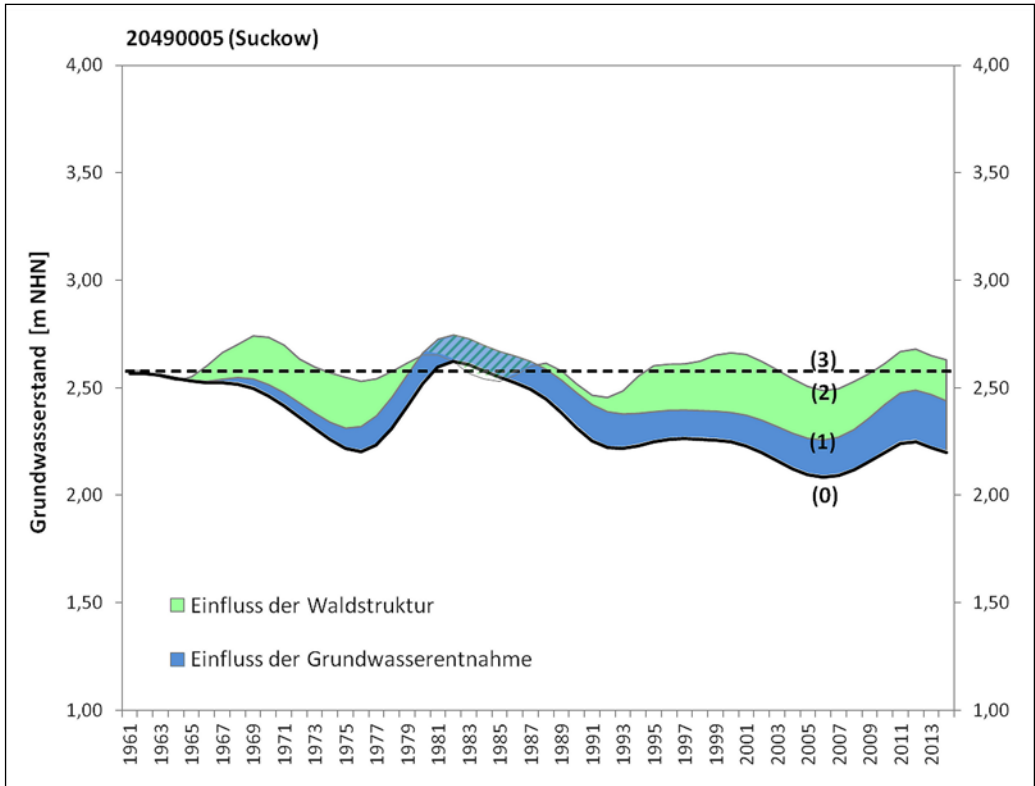


Abb. 13: Szenariorechnung – Messstelle Suckow.

Grundwasserstände erreicht. In den folgenden 20 Jahren sanken die Grundwasserstände um etwa 2 m ab, da sich die Grundwasserneubildung mit dem Aufwachsen des Waldes verringerte. Ferner wirkte sich die Grundwasserentnahme verstärkt aus, ihr Anteil an der Absenkung beträgt aktuell ca. 30 cm. Der Wiederanstieg in den letzten Jahren ist auf die Rodung von Waldflächen im unmittelbaren Umfeld der Messstelle zurückzuführen und wurde durch die Witterungsverhältnisse verstärkt.

An der Messstelle Suckow (Abbildung 13) ist der Waldeinfluss weniger stark ausgeprägt, da sie nicht direkt im Wald liegt und das benachbarte Waldgebiet kein reiner Nadelwald ist, so dass die Sickerungsraten im jungen Stangenholzstadium nicht bis nahe null absinken (vgl. Abbildung 7). Die Waldentwicklung und die Grundwasserentnahme haben einen ähnlich großen Anteil von jeweils ca. 20 cm an den gesunkenen Grundwasserständen.

## 6 Diskussion

Über Betrachtungen zur zeitlichen Variabilität der Grundwasserneubildung und mit Hilfe einer geohydraulischen Modellierung konnten die Ursachen für tendenziell sinkende Grundwasserstände im Südwesten Usedoms ermittelt und quantifiziert werden. Es zeigte sich,

- dass ein klimatisch bedingter Grundwasserrückgang wie in Brandenburg (z.B. NATKIN et al. 2012) ausgeschlossen werden kann,
- die Grundwassergewinnung ein langsames Absinken der Grundwasserstände verursachte, das sich an den 2 km bis 4 km entfernten Messstellen mit 5 cm bis 30 cm auswirkte,



- die aus der Waldbewirtschaftung resultierenden Neubildungsschwankungen die Hauptursache für die beobachteten Tendenzen darstellen und überjährige Grundwasseränderungen von mehr als 1,5 m bewirken können.

Dabei sind die auf die Waldentwicklung zurückzuführenden Änderungen nicht als Trend, sondern als zyklische Schwankungen anzusehen. Ein Zyklus entspricht dem Umtriebsalter des Waldes und umfasst die Zeitspanne von der Neupflanzung bis zum Kahlschlag. Im Untersuchungsgebiet dominiert Nadelwald mit einem Umtriebsalter von ungefähr 90 Jahren.

Der scheinbar stark fallende Trend der Grundwasserstände resultierte aus der Tatsache, dass mit der kontinuierlichen Grundwasserbeobachtung begonnen wurde, als ca. 70 % der Waldfläche ein Alter von durchschnittlich 30 Jahren hatte. Damit folgte auf eine Phase sehr hoher Grundwasserneubildungsraten nach dem Kahlschlag und während des Jungwuchses eine lange Phase sehr geringer Sickerungsraten während des Stangenholzstadiums. Diese Änderung der Neubildungsraten spiegelte sich in tendenziell sinkenden Grundwasserständen wider. Wenn die betreffenden Waldflächen die Hieb reife erreichen und geschlagen werden, ist ein starker Anstieg des Grundwassers zu erwarten.

Bei langfristiger Betrachtung hat die Kahlschlagwirtschaft keine nachteiligen Auswirkungen auf das Grundwasserdargebot, sie verursacht aber starke zyklische Schwankungen. Eine Vergleichmäßigung des Landschaftswasserhaushaltes ließe sich durch eine einzelbaumbezogene Waldwirtschaft und den Umbau zu einem stufigen, ungleichaltrigen Mischwald erzielen.

Die in der Literatur auch beschriebene Abnahme der Grundwasserneubildung infolge einer seit Ende der 1970er Jahre dichter werdende Bodenbedeckung wurde in der vorliegenden Arbeit nicht untersucht, kann aber nicht ausgeschlossen werden. So wurde an den Messstellen Mellenthin-Stolpe und Suckow ein ca. 50 cm stärkerer Grundwasserrückgang beobachtet als mit dem Modellansatz berechnet. Möglicherweise ist diese Abweichung zum Teil auf die Änderung der Bodenvegetationstypen zurückzuführen. Eine solche Entwicklung wäre als Trend und nicht als zyklische Schwankung anzusehen. NATKIN et al. (2012) untersuchten ein Gebiet in Brandenburg und maßen der Entwicklung der Bodenvegetation mit 29 % einen größeren Einfluss auf verringerte Neubildungsraten zu als der Entwicklung der Altersstruktur mit 18 % (53 % klimatische Effekte). Durch einen Umbau des Waldes zu einem Mischbestand könnte die Grundwasserneubildung flächenhaft erhöht und damit auch der Einfluss der zunehmenden Bodenvegetation kompensiert werden.

Im Vergleich zu den aus der Waldbewirtschaftung resultierenden Grundwasserschwankungen ist die Wirkung der Grundwasserentnahme gering. Bilanzbetrachtungen auf der Basis der geohydraulischen Modellierung ergaben ein nutzbares Grundwasserdargebot von 800 m<sup>3</sup>/d bis 1.000 m<sup>3</sup>/d, was ungefähr der derzeitigen Entnahme entspricht.

## Literatur

- BfG-1342 (2003): BAGLUVA – Wasserhaushaltsverfahren zur Berechnung vieljähriger Mittelwerte der tatsächlichen Verdunstung und des Gesamtabflusses. – BfG-Bericht 1342, Bundesanstalt für Gewässerkunde, 2003: 103 S.
- GOLDBERG, V. & BERNHOFER, C. (2011): Wasserhaushalt bewaldeter Einzugsgebiete. – In: LOZÁN, J.L., GRASSL, H., KARBE, L., HUPFER, P. & SCHÖNWIESE, C.-D. (Hrsg.): Warnsignal Klima – Genug Wasser für alle? – URL [http://www.climate-service-center.de/012389/index\\_0012389.html](http://www.climate-service-center.de/012389/index_0012389.html), zugegriffen am 10.05.2012.
- GRwV (2010): Grundwasserverordnung vom 9. November 2010. – BGBl. I, S. 1513.

- HAD (2000–2003): Hydrologischer Atlas von Deutschland. – BUNDESMINISTERIUM FÜR UMWELT, NATURSCHUTZ UND REAKTORSICHERHEIT (Hrsg.), Bonn/Berlin, 2000 (1. Lieferung), 2001 (2. Lieferung), 2003 (3. Lieferung).
- HEINSDORF, D. (2007): Zur Stickstoffproblematik der Kiefernwälder im nordostdeutschen Tiefland. – In: Die Kiefer im nordostdeutschen Tiefland – Ökologie und Bewirtschaftung. – Eberswalder Forstliche Schriftenreihe XXXII: 167–181.
- HENNIG, H. & HILGERT, T. (2007): Dränabflüsse – Der Schlüssel zur Wasserbilanzierung im nordostdeutschen Tiefland. – Hydrologie und Wasserbewirtschaftung 51, 6, 248–257.
- HOFMANN, G. (1995): Zur Wirkung von Stickstoffeinträgen auf die Vegetation nordost-deutscher Kiefernwaldungen. – In: UBA-Texte 28/1995: 131–140.
- LANDGRAF, L. & KRONE, A. (2002): Wege zur Verbesserung des Landschaftswasserhaushaltes in Brandenburg. – GWF Wasser-Abwasser 143, 5: 435–444.
- MÜLLER, J., LÜTTSCHWAGER, D. & RUST, S. (2007): Zum Wasserhaushalt in Kiefernbeständen auf grundwasserfernen Sandstandorten des Nordostdeutschen Tieflandes. – In: LANDESFORSTANSTALT EBERSWALDE (Hrsg.): Die Kiefer im Nordostdeutschen Tiefland – Ökologie und Bewirtschaftung. – Eberswalder Forstliche Schriftenreihe XXXII: 78–107.
- MÜLLER, J. (2011): Die Anwendung von Lysimetern zur Ermittlung des Wasserhaushaltes in Wäldern des nordostdeutschen Tieflandes. – Waldökologie, Landschaftsforschung und Naturschutz, 12: 37–46.
- NATKHIN, M., STEIDL, J., DIETRICH, O., DANNOWSKI, R. & LISCHIED, G. (2010): Modellgestützte Analyse der Einflüsse von Veränderungen der Waldwirtschaft und des Klimas auf den Wasserhaushalt von Seen. – In: KAISER et al. (Hrsg.): Aktuelle Probleme im Wasserhaushalt von Nordostdeutschland: Trends, Ursachen, Lösungen. – Scientific Technical Report 10/10 - Deutsches GeoForschungsZentrum, Potsdam: 167–172.
- NATKHIN, M., STEIDL, J., DIETRICH, O., DANNOWSKI, R. & LISCHIED, G. (2012): Differentiating between climate effects and forest growth dynamics effects on decreasing groundwater recharge in a lowland region in Northeast Germany. – Journal of Hydrology 07, Volume 448: 245–254.
- WICHERN, J., BIEMELT, D. & GRÜNEWALD, U. (2010): Analyse und Bewertung von Einflüssen auf den Wasserhaushalt von Seen auf eiszeitlichen Hochflächen des Ostbrandenburger Heide- und Seengebietes. – In: KAISER et al. (Hrsg.): Aktuelle Probleme im Wasserhaushalt von Nordostdeutschland: Trends, Ursachen, Lösungen. – Scientific Technical Report 10/10. – Deutsches GeoForschungsZentrum, Potsdam: 223–228.

### **Anschriften der Verfasser**

HEIKO HENNIG, UmweltPlan GmbH Stralsund, Außenstelle Greifswald, Bahnhofstraße 43, 17489 Greifswald. E-Mail: hh@umweltplan.de

FRAUKE KACHHOLZ, Wismarsche Str. 59, 18057 Rostock. E-Mail: Frauke.ka@gmx.de