

Auswirkung von Störungen auf den Wasser- und Stoffhaushalt eines bewaldeten Einzugsgebietes: Monitoring und Modellierung

Klöcking, B.¹, Beudert, B.², Lasch, P.³, Suckow, F.³, Schwarze, R.⁴

¹Büro für Angewandte Hydrologie München

²Nationalparkverwaltung Bayerischer Wald

³Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung

⁴Institut für Hydrologie und Meteorologie, TU Dresden

Zusammenfassung. Im Einzugsgebiet der Großen Ohe (Nationalpark Bayerischer Wald) wurde mittels eines umfangreichen Messprogramms, tracerhydrologischen Analysen sowie flächendifferenzierenden ökohydrologischen Simulationen der Einfluss der Borkenkäferkatastrophe auf die Bestandesdynamik und damit verbunden auf den Wasser- und Stoffhaushalt des Gebiets untersucht. Der Zusammenbruch der Fichtenbestände hat zu einer signifikanten Erhöhung der Abflussbeiwerte und der Nitratfrachten im Bach- und im Grundwasser geführt. Mit der einsetzenden Naturverjüngung auf den Totholzarealen setzt langsam eine Beruhigung der Situation ein. Die Stickstofffrachten sind auf das Ursprungsniveau zurückgegangen.

Einleitung

Neben den derzeit im Zentrum der breiten Aufmerksamkeit stehenden unmittelbaren Auswirkungen von Klimaveränderungen auf den Wasserhaushalt wie z.B. die Jahrhundertfluten und Dürreperioden der letzten Jahre, rücken zunehmend auch Sekundärwirkungen des Globalen Wandels in das öffentliche Interesse. Ein Beispiel dafür ist das Zusammenbrechen ganzer Forstbestände durch das massenhafte Auftreten von Schadinsekten vor allem in Monokulturen. Wie sich dieses auf den Wasser- und Stoffhaushalt von bewaldeten Gewässereinzugsgebieten auswirkt, wurde exemplarisch an mehreren unterschiedlich stark betroffenen Gebieten im Nationalpark Bayerischer Wald untersucht.

Aufbauend auf langfristige Untersuchungsprogramme im Nationalparkgebiet ([7], [4]) sollte durch die Verknüpfung neuester experimenteller und modelltechnischer Methoden einerseits eine Bewertung der Situation vor Ort erfolgen, andererseits aber auch die einzelnen Verfahren hinsichtlich ihrer Anwendbarkeit überprüft werden. In enger institutioneller Kooperation erfolgten isotopehydrologische und hydrochemische Analysen von Abflusskomponenten, Herkunftsräumen und Verweildauer der Boden- und Grundwässer, gekoppelt mit einer bilanzgestützten Ganglinienanalyse [8], sowie flächendifferenzierende Simulationen mit dem ökohydrologischen Einzugsgebietsmodell ArcEGMO-PSCN.

Finanziert wurden die Untersuchungen durch die High-Tech-Offensive Bayern (HTO-Projekt 33-7, 2002-2005) und das Umweltbundesamt. Beispielhaft werden hier neueste Ergebnisse für den Forellenbach vorgestellt. Ein ausführlicher Bericht über alle untersuchten Einzugsgebiete im Nationalpark Bayerischer Wald wird in [5] gegeben.

Das Untersuchungsgebiet

Der Nationalpark Bayerischer Wald (242 km²) stellt zusammen mit dem benachbarten Sumava-Nationalpark in Tschechien das größte zusammenhängende Waldschutzgebiet in Mitteleuropa dar. Seit Anfang der 1990er Jahre ist dieses von einem großflächigen Absterben von Fichten durch Borkenkäferbefall (*Ips typographus* L.) betroffen. Er trat zunächst in den klimatisch bedingt fast reinen Fichtenbeständen der Hochlagen (> 1150 m ü. NN) auf und ergriff dann auch tiefer gelegene Bestände. Entsprechend den rechtlichen Regelungen finden in der Kernzone des Nationalparks keine forstlichen Eingriffe statt, was zur Ausbildung einer fast lückenlosen Totholzzone in den Hochlagen geführt hat. Klimatisch befindet sich das Gebiet an der Grenze zwischen maritimem und kontinentalem Klima. Kontinentale Hochdruckgebiete führen im Winter zu tiefen Temperaturen, von Westen auflaufende Fronten maritimer Prägung zu hohen Niederschlägen, im Winter vor allem als Schnee. Der Untergrund besteht aus kristallinen Gesteinen (Biotitgranit und Cordierit-Gneise) und deren sandig-grusigen Verwitterungsprodukten. Dominierende Bodenformen sind Braunerden mit unterschiedlich stark ausgeprägten Podsolierungsmerkmalen, die in den Hochlagen und erodierten Oberhanglagen mit Rankern (Syrosem) und Podsolen vergesellschaftet sind.

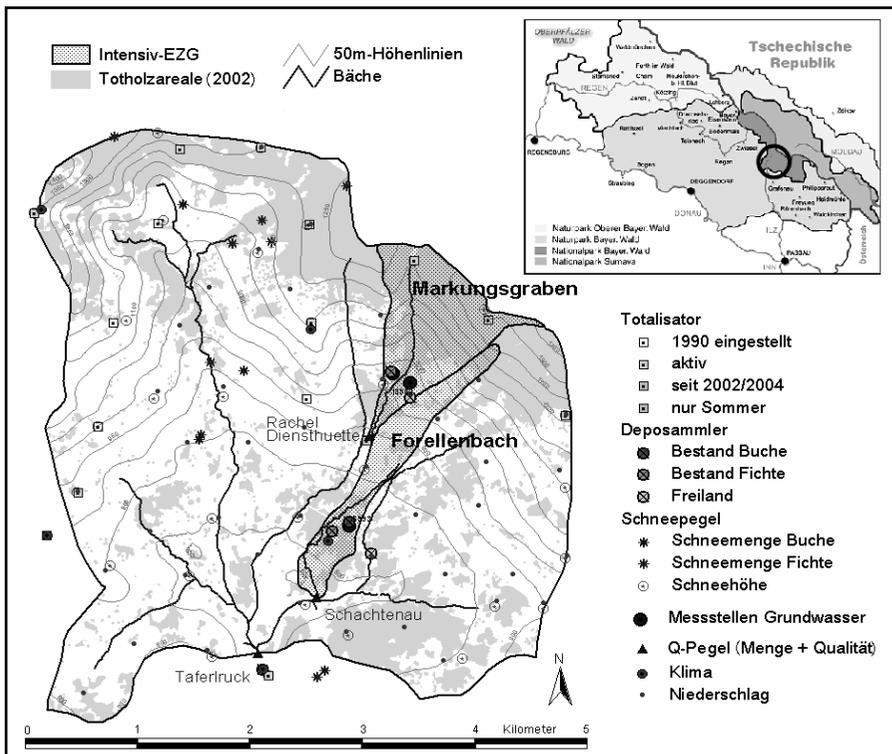


Abb. 1: Das Quellgebiet der Großen Ohe im Nationalpark Bayerischer Wald

In den Hanglagen entwickelten sie sich wie die Lockerbraunerden auf solifluidal verlagertem Lockermaterial der Ausgangsgesteine und tertiärem Bodenmaterial. Moore und mineralische Naßböden sind bachbegleitend und in den Talungen verbreitet.

Im Kernbereich des Nationalparks erstreckt sich über einen Höhenbereich von 770 bis 1435 m ü. NN das Quellgebiet der Großen Ohe (19,1 km², Abb. 1) im Flussgebiet Ilz-Donau. Dieses voll bewaldete Gebiet repräsentiert die Höhengliederung des Nationalparks in Talaue-Fichtenwald, Bergmischwald und Hochlagen-Fichtenwald. Tab. 1 gibt einen Überblick über die Eigenschaften des Einzugsgebietes der Großen Ohe und der Teileinzugsgebiete Markungsgraben und Forellenbach.

Tab. 1: Naturräumliche Charakterisierung des Einzugsgebietes der Großen Ohe und der Teileinzugsgebiete des Markungsgrabens und des Forellenbachs.

| Einzugsgebiet | Große Ohe | Markungsgraben | Forellenbach |
|---------------------------------------|------------------|-----------------------|---------------------|
| Q-Pegel | Taferlruck | Rachel-Diensthütte | Schachtenau |
| Größe [km ²] | 19,1 | 1,1 | 0,7 |
| Geländehöhe [m ü. NN] | 982 (770 - 1435) | 1128 (890 - 1355) | 894 (787 - 1293) |
| mittlere Hangneigung [°] | 11,1 | 16,1 | 8,4 |
| Einzugsgebietslänge [km] | 4,8 | 1,7 | 2,8 |
| Fließgewässerslänge [km] | 47,5 | 1,7 | 2,2 |
| Lufttemperatur [°C] | 5,5 | 5,3 | 6,2 |
| Niederschlag [mm/a] | 1670 | 1800 | 1630 |
| Mittlerer Abfluss [m ³ /s] | 0,605 | 0,046 | 0,022 |
| Abflussbeiwert (1989-2004) | 0,61 | 0,73 | 0,62 (ab 1991) |
| Nadel-/Laubwald [%] | 71 / 29 | 84 / 16 | 69 / 31 |

Monitoringprogramm

Das Quellgebiet der Großen Ohe wird seit 1979 in einem Forschungsverbund aus Nationalparkverwaltung (NPV), Landesanstalt für Wald und Forstwirtschaft (LWF), Bayerischem Landesamt für Umwelt (LfU) und TU München intensiv untersucht. Das kontinuierliche Messprogramm zur Niederschlagserfassung (Monatstotalisatoren, Hellman-Sammler, Waagen), Klima- und Abflussbeobachtung wurde durch hydrologische Messkampagnen ergänzt, die in der Schriftenreihe „Wasserhaushalt und Stoffbilanzen im naturnahen Einzugsgebiet der Großen Ohe“ dokumentiert sind. Das LfU betreibt im Rahmen des „Messnetzes Stoffeintrag-Grundwasser“ seit 1987 im Markungsgrabengebiet mehrere Intensivmessflächen zum Boden-, Quell-, Bach- und Grundwasser [1].

Das benachbarte Teileinzugsgebiet des Forellenbachs wird seit 1990 im Rahmen des „UN/ECE Integrated Monitoring Programme of Air Pollution Effects on Ecosystems (ICP IM)“ im Auftrag des Umweltbundesamtes intensiv hydrologisch, hydrochemisch und biometrisch

untersucht [4]. Ziel dieses Programms ist die Erfassung des Zustands und der Zustandsänderungen von Ökosystemen infolge anthropogener Belastungen wie auch als Folge von Änderungen dieser Belastungen. Die Umsetzung dieses integrierten Ansatzes erfolgt in Anwendung international abgestimmter Feld- und Labormethoden („Manual on Integrated Monitoring“, [10]).

Für die Hauptbaumarten wurden im Bereich der unteren Hanglagen des Forellenbachgebietes die Intensivmessflächen B1 (Buche, 100 Jahre alt) und F1 (Fichte, 110 Jahre alt) eingerichtet. Dort werden Komponenten des wassergebundenen Stoffhaushalts (Bestandesniederschlag, Bodensickerwasser) und des biomassegebundenen Stoffhaushalts (Blattnährstoffe, Streufall, Streuzersetzung) erfasst. Im Buchenbestand B1 wurde eine Messanlage mit TDR-Sonden (Time Domain Reflectometry) installiert, die seit 2002 Messwerte der Bodenfeuchte in 5 Tiefen (10, 30, 55, 85 und 115 cm) an fünf Messplätzen in halbstündiger Auflösung liefert. Dort werden auch Grundwasserstandsänderungen (GW 221) in halbstündiger Auflösung (Druckdose) erfasst. Abflussmessungen des Vorfluters erfolgen am Pegel Schachtenau, meteorologische Messungen (Temperatur, Luftfeuchte, Globalstrahlung, Wind) am Stahlgerüsturm (51 m über Grund).

Bis 2004 waren Fichten im Einzugsgebiet Markungsgraben auf 84 % der Gebietsfläche abgestorben, im Einzugsgebiet Forellenbach (und Große Ohe) auf 39 %. Dieses flächige Absterben bewirkte deutliche Veränderungen im Abflussregime. Nach Überschreitung eines Totholzflächenanteils von ca. 20 % stieg der Abflussbeiwert des Forellenbachs von durchschnittlich 0,60 (1992-1998) auf 0,70 (1999-2004) an, der Abflussbeiwert des stark betroffenen Markungsgrabens von 0,70 (Mittel 1992-1996) auf deutlich über 0,80.

Auf den Intensivmessflächen des Markungsgrabengebiets (Oberhanglage, [1]) und des Forellenbachgebiets (Unterhanglage, [4]) wurden deutliche Auswirkungen des Borkenkäferbefalls auf den Sickerwasserchemismus beobachtet. Zwischen Juni 1996 und Herbst 1997 starb der 110-jährige Fichtenbestand auf der Intensivmessfläche F1 vollständig ab. Die Nitratkonzentration des Bodensickerwassers, die im ungestörten Zustand unter 10 mg/l lagen, stiegen innerhalb von zwei Jahren auf Maximalwerte von 200 mg/l in 40 cm Tiefe an, unterhalb der Wurzelzone in 100 cm Tiefe auf 130 mg/l (**Abb. 2**). Bereits im Winter 1998/1999 hatte die Entwicklung der Nitratkonzentrationen ihren Höhepunkt überschritten. Seit Sommer 2001 liegen die Werte durchgehend wieder auf dem Niveau der Jahre vor dem Borkenkäferbefall (< 10 mg/l). Die Nitratkonzentrationen im Oberboden (40 cm Tiefe) erreichten bereits Ende 2000 das vorherige Niveau, so dass mit hoher Wahrscheinlichkeit angenommen werden kann, dass der mikrobiell leicht abbaubare organisch gebundene Stickstoff der Bestandesbiomasse und des Bodenumus aufgezehrt ist. Der Stoffhaushalt dieses Standorts dürfte sich nun im Fließgleichgewicht mit dem sich entwickelnden Mischbestand aus den ehemals unterständigen Buchen und der üppigen Fichtenverjüngung befinden.

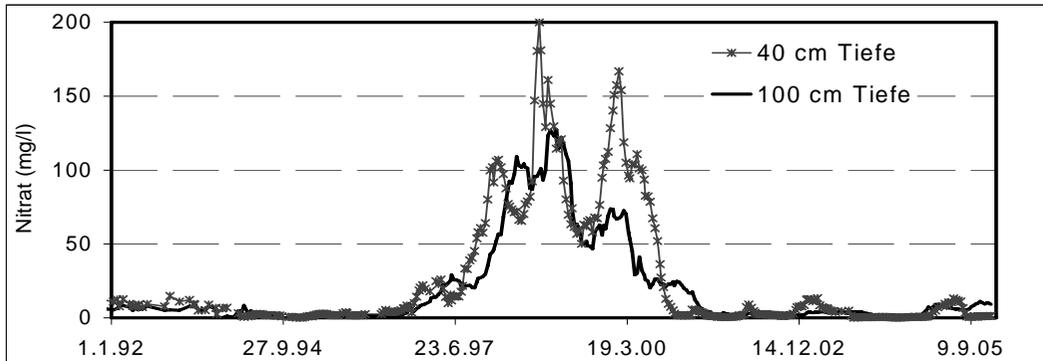


Abb. 2: Nitratkonzentration im Bodensickerwasser unter Fichte in 40 und 100 cm Tiefe auf der Intensivmessfläche F1 des Forellenbachgebietes ([4])

Das Grundwasser ist deutlich geringer belastet als das Sickerwasser [2], da zum einen in der Regel nicht der gesamte Zustrombereich betroffen ist, zum anderen ein Rückgang der Stoffbelastung auf der Fließstrecke stattfindet. An der Messstelle im Einzugsgebiet Markungsgraben wird eine Nitratkonzentration von 10 mg/l trotz der flächenhaften Borkenkäferschäden kaum überschritten. Hier bewirkt hangparalleler Abfluss auf dem dichteren Grundschutt, dass erhebliche Nitratmengen auf kurzen Fließwegen das Fließgewässer erreichen und nicht das tiefere Grundwasser befrachten. Im oberflächennahem Grundwasser der Messstelle Forellenbach (GW-Pegel 221, 820 m ü. NN) und einer Quelle am Markungsgraben (1010 m ü. NN) haben die Deckschichten geringere Schutzwirkung. Hier wurden Nitratkonzentrationen bis über 25 mg/l beobachtet.

Das Einzugsgebietsmodell

Das Modell ArcEGMO-PSCN dient der kontinuierlichen Simulation der Abflussbildungs- und Abflusskonzentrationsprozesse (Wasserdynamik) sowie des Kohlenstoff/Stickstoffhaushalts im Einzugsgebietsmaßstab. Es entstand durch die Kopplung des GIS-gekoppelten hydrologischen Modells ArcEGMO ([8], [3]) mit komplexen Wachstumsmodellen für land- und forstwirtschaftliche Flächen und einem detaillierten Bodenmodell.

Die Modellierung erfolgte in Tagesschrittweite auf Hydrotopenebene. Jedes Hydrotop ist in sich homogen hinsichtlich Vegetation, Bodentyp, Morphologie und Hydrogeologie und hat einen festen Raumbezug innerhalb des Untersuchungsgebietes. Die Dynamik der Waldbestände wurde mit dem integrierten Waldwachstumsmodell 4C [6], alle übrigen Landnutzungsformen mittels eines statischen Ansatzes simuliert. Eine ausführliche Modellbeschreibung findet sich in [5]. Die Modellierung der Konzentration des Oberflächenabflusses und des Abflusses in den oberirdischen Gewässern sowie der Grundwasserdynamik erfolgt durch einen kinemati-

schen Wellenansatz bzw. Einzellinearspeicheransätze auf Teileinzugsgebietsbasis. Eine Beschreibung aller Teilmodelle gibt [8].

Als Eingangsdaten dienen ATKIS-Landnutzung (1:25.000), Digitales Höhenmodell 1:50.000, Forstliche Standortkartierung, meteorologische Messreihen des DWD, der LWF, des LfU und der NPV (Lufttemperatur, Niederschlag, Luftfeuchte, Globalstrahlung). Der Anfangszustand der Bestände wurde aus Daten der Forstinventuren von 1991 (200x200 m-Raster) definiert. Die räumliche Ausweisung der durch Borkenkäferbefall abgestorbenen Fichtenbestände erfolgte anhand jährlicher Luftbildaufnahmen.

Modellvalidierung

Die Validierung erfolgte sowohl anhand der Messreihen der drei Durchflusspegel als auch durch die Überprüfung von Teilergebnissen. Die Waldwachstumssimulation wurde auf den Intensivmessflächen an den Messwerten der Baumbestände geprüft (Abb. 3); auf allen übrigen Flächen wurden die simulierten Stammzahlen und Derbholumina mit den entsprechenden Werten an den Inventurpunkten verglichen. Zudem wurden die Ergebnisse der Schneedecken- [5] und Bodenfeuchtesimulation an Messwerten überprüft.

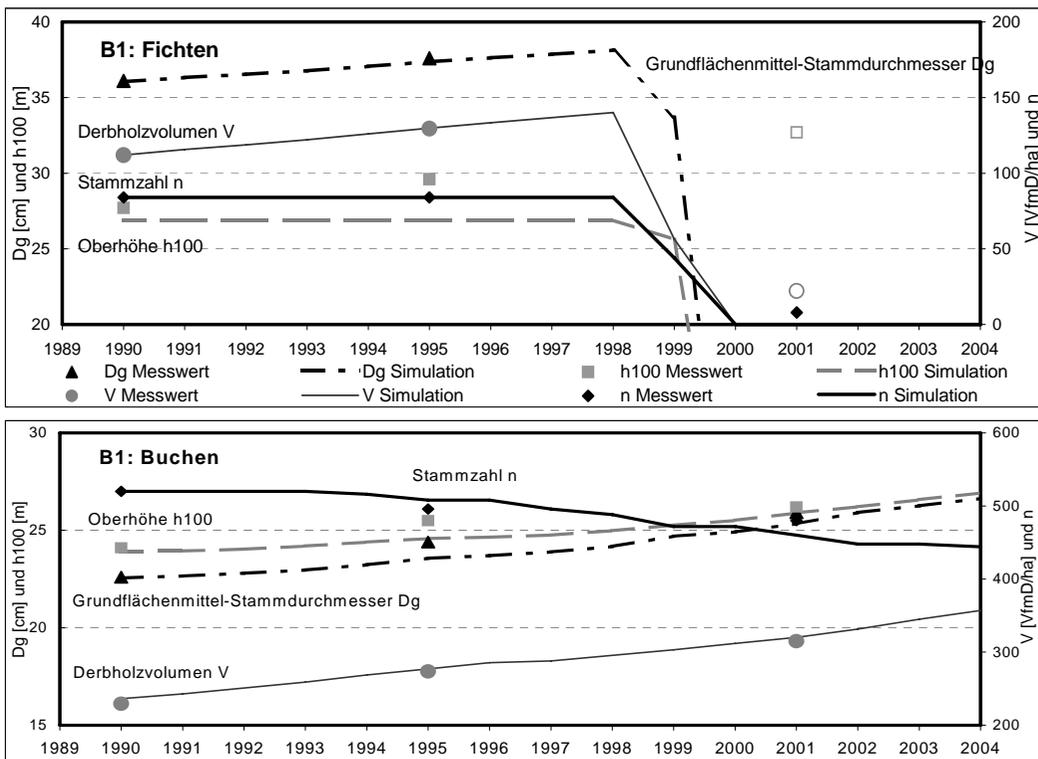


Abb. 3: Simulierte und gemessene waldwachstumskundliche Kenngrößen des Bestandes B1, getrennt nach Fichte (oben) und Buche (unten)

Chlorid-Bilanzen für die Intensivmessflächen B1 (1992-2004) und F1 (1992-1996) auf der Basis von simulierten monatlichen Sickerwasserraten und gemessenen Chlorid-Konzentrationen im Sickerwasser lassen eine geringe Überschätzung der Sickerwasserraten vermuten, bestätigen aber die grundsätzlich sehr gute Abbildung des zeitlichen Verlaufs der Sickerwasserbildung im Modell. Für die Braunerde des Buchenbestandes B1 ist in Abb. 4 exemplarisch der Verlauf der Bodenfeuchte in 55 cm Tiefe dargestellt. Deutlich sind die Auffüllungsphasen von Oktober bis April und die Ausschöpfungsperioden im Sommer zu sehen. Niveau und Dynamik der gemessenen Bodenfeuchten werden in allen Messtiefen insgesamt gut wiedergegeben. Diese zufriedenstellende Abbildung des Bodenwasserhaushaltes des Buchenstandortes B1 wird auch durch den Vergleich der simulierten Sickerwasserraten aus der Wurzelzone (145 cm) mit dem beobachteten Grundwassergang gestützt (Abb. 5).

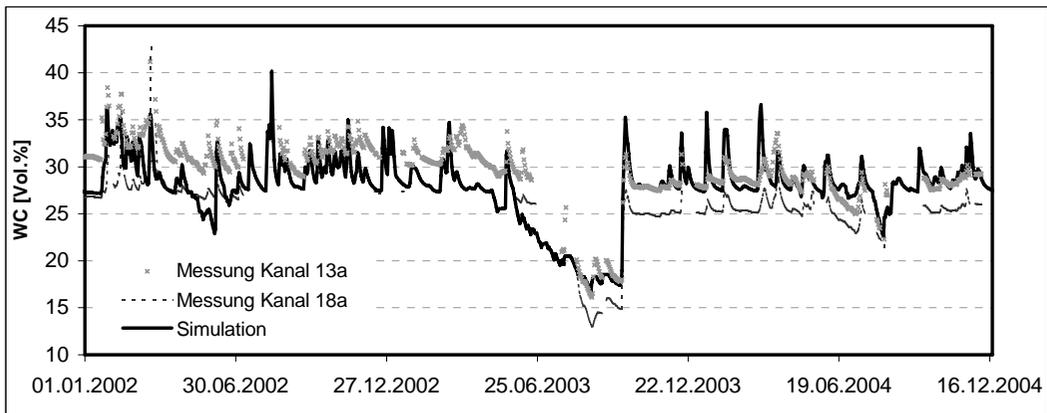


Abb. 4: Simulierte und gemessene Bodenfeuchte (Vol. %) in 55 cm Tiefe unter dem Buchenbestand B1

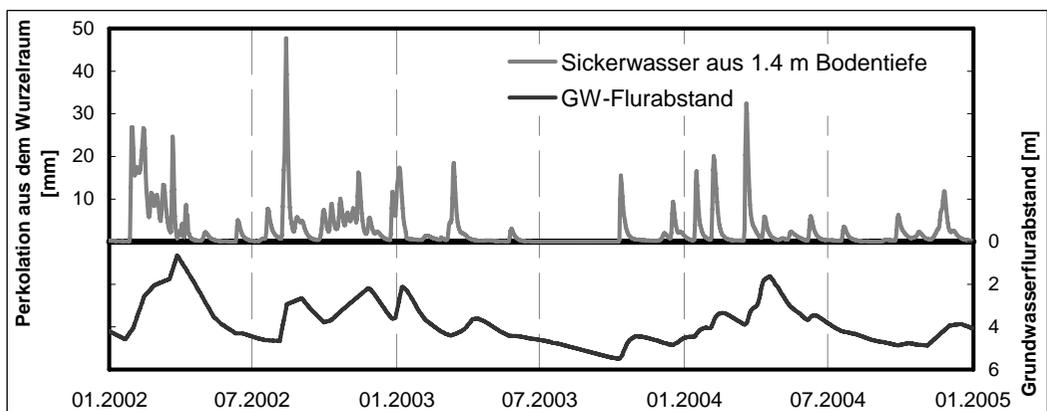


Abb. 5: Simulierte Sickerwassermengen aus dem Wurzelraum (1.45 m Tiefe) und gemessene Grundwasserflurabstände am Grundwasser-Pegel 221

Die Übereinstimmung der simulierten mit den beobachteten Durchflussganglinien an den drei Pegeln im Quellgebiet der Großen Ohe (Rachel-Diensthütte, Schachtenau und Taferlruck) ist ebenfalls zufriedenstellend. In Abb. 6 sind die simulierten Abflusskomponenten im Vergleich mit dem beobachteten Durchfluss am Pegel Schachtenau dargestellt.

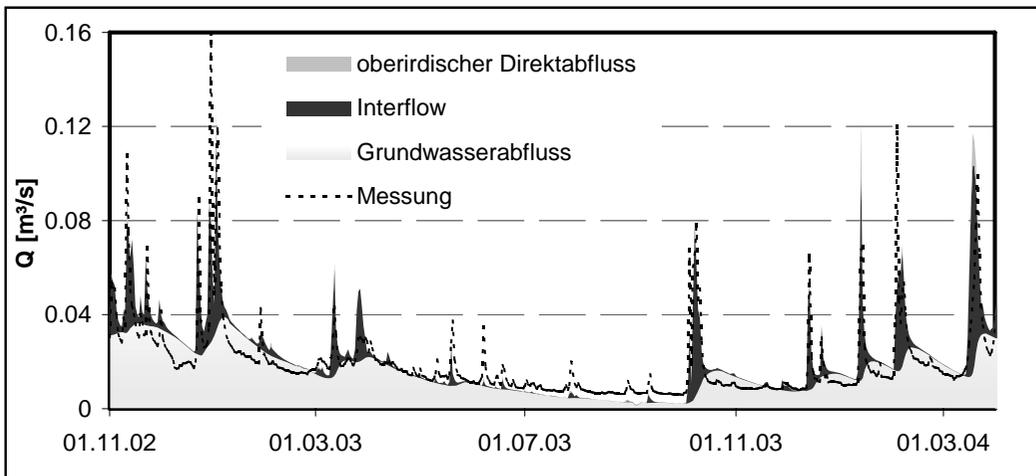


Abb. 6: Simulierte Abflusskomponenten am Pegel Schachtenau (Forellenbach)

Im Mittel wird für das Forellenbachgebiet durch die Simulation eine Unterteilung des Abflusses in 1,7 % oberirdischen Direktabfluss, 25,4 % Interflow aus dem Wurzelraum und 72,9 % Grundwasserabfluss ausgewiesen. Auf eine weitere Untergliederung des Grundwasserabflusses nach Herkunftsräumen (vgl. [3], [5]) und der unterirdischen Fließeigenschaften wurde verzichtet, weil das vorhandene Wissen über die Gebietseigenschaften hierfür nicht ausreicht. Hier kann nur die Anwendung eines gekoppelten Wasserhaushalts-/Grundwasserströmungsmodell in Verbindung mit weiteren Prozessanalysen Aufklärung über die unterirdischen Fließwege bringen. Das beinhaltet neben der genaueren geologischen Erkundung des Gebietes auch die Fortführung der Traceranalysen [8], um sowohl die offensichtlich existierenden schnell reagierenden unterirdischen Abflussbahnen als auch die Retentionsräume und ihre Wechselbeziehungen definieren zu können.

Szenarien

Nach der Modellvalidierung wurden Simulationsexperimente zur Untersuchung des Einflusses des Borkenkäferbefalls auf den Gebietswasser- und Stoffhaushalt durchgeführt. Die validierten Simulationen des Ist-Zustandes, der durch Folgewirkungen des Fichtensterbens geprägt ist, dienen als Referenzszenario. Diesem wurde ein Szenario ohne Borkenkäfermassenentwicklung, aber ansonsten identischen Standortbedingungen gegenübergestellt (KB-Szenario).

Die Unterschiede zwischen Referenz- und KB-Szenario werden als primär durch den Borkenkäferbefall verursachte Veränderungen interpretiert.

Vor Beginn der Untersuchungen auf Einzugsgebietsebene erfolgte die Anwendung des Simulationsexperimentes auf die beiden Dauerbeobachtungsflächen B1 und F1. Entsprechend des Schädigungsgrades und der Bestandeszusammensetzung ist die Wirkung des Borkenkäferbefalls unterschiedlich. Auf beiden Flächen wird übereinstimmend eine Abnahme der Verdunstung und eine Zunahme der Abflüsse simuliert. Die Veränderungen sind jedoch auf der Buchen-Fichten-Fläche B1 nicht gravierend. Hier reagieren die gutwüchsigen Buchen schnell mit gesteigerten Wuchs- und Transpirationsleistungen auf den wegfallenden Konkurrenzdruck der Fichten, so dass die Veränderungen der Wasserhaushaltskomponenten moderat bleiben. Im Fichtenbestand kommt es dagegen zu einer Erhöhung des Abflusses um bis zu 65 mm/Monat.

Dieses Phänomen spiegelt sich auch im Einzugsgebiet wider. Mit Beginn des Borkenkäferbefalls wird eine sofortige Abnahme der Interzeptionsverdunstung simuliert (Abb. 7).

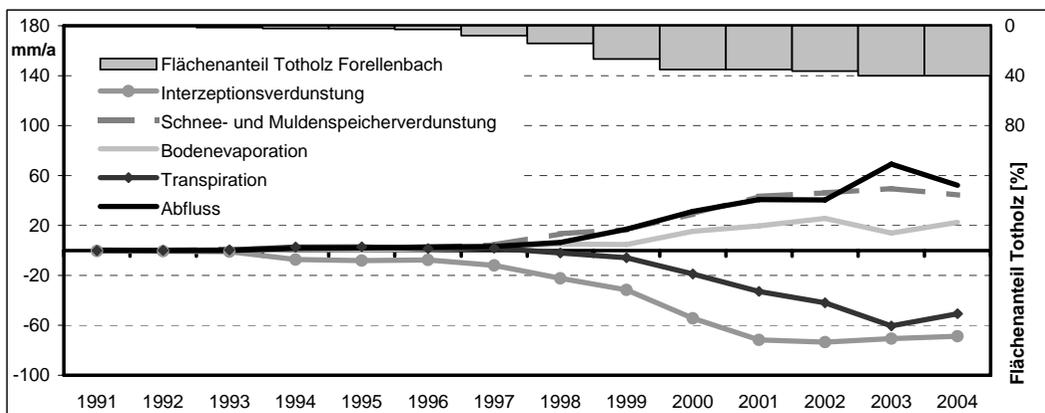


Abb. 7: Veränderungen der wichtigsten Wasserhaushaltsgrößen im Forellenbachgebiet (Differenz der Jahressummen berechnet mit Referenzsimulation und KB-Szenario).

Diese hat jedoch noch keine Auswirkungen auf den Gebietswasserhaushalt, da gleichzeitig alle übrigen Verdunstungskomponenten geringfügig ansteigen. Wie im Bestand B1, kommt es zunächst zu einem Anstieg der Transpiration. Erst nach Erreichen eines Totholzflächenanteils von 20% wird ein Rückgang der Evapotranspiration und ein Anstieg des Gebietsabflusses simuliert. Nach einer steilen Phase der Abnahme von Transpiration und Interzeptionsverdunstung stellt sich mit abnehmendem Flächenzuwachs der Totholzareale eine Beruhigung ein. Dies erscheint durch die mittlerweile beginnende Sukzession und den beobachteten Vegetationszuwachs an den verbliebenen Bäumen plausibel. Der beobachteten Entwicklung entsprechend, wird eine Stabilisierung der Abflüsse sowie der Wasserhaushaltskomponenten Interflow und Perkolation aus der Bodensäule auf dem erhöhten Niveau simuliert.

Eine weitere Auswirkung der Borkenkäferkalamität ist die Veränderung der Abflussdynamik. Ursache hierfür sind insbesondere die veränderte Schneedeckendynamik durch andere Strahlungsverhältnisse an der Bodenoberfläche und höhere Bestandesniederschläge. So wird das Auftreten von schmelzwasserinduzierten Hochwasserspitzen ca. 9 Tage eher als unter ungestörten Beständen simuliert. Große Unterschiede in der Schneemenge werden dagegen nicht simuliert. Analog zur Veränderung der Wasserhaushaltsgrößen ist auch bei den simulierten Stickstoffausträgen aus der Bodenzone ein vom Borkenkäfer induzierter Anstieg ab 1998 festzustellen (Abb. 8).

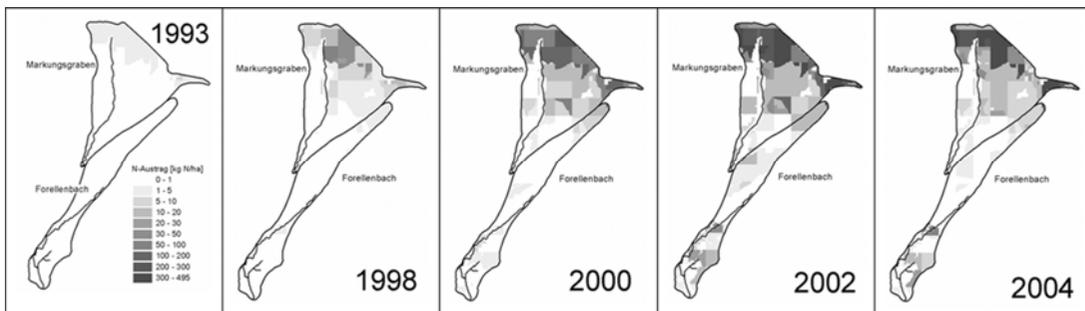


Abb. 8: Jährliche Stickstoffauswaschung aus der Bodenzone ($\text{NO}_3 + \text{NH}_4\text{-N}$) in den Einzugsgebieten von Markungsgraben und Forellenbach.

Obwohl auf den meisten Flächen im Markungsgrabengebiet die jährlich ausgewaschenen Frachten langsam wieder zurückgehen, wird insgesamt noch keine Beruhigung der Situation simuliert. Dieses Simulationsergebnis wird durch die gemessenen Nitratkonzentrationen im Grundwasser [2] bestätigt. Jedoch zeigen die Messwerte, dass fast zeitgleich mit dem Einsetzen der Stickstoffauswaschung aus der Bodenzone des Einzugsgebiets Markungsgraben auch ein Anstieg der Nitratkonzentrationen an der Grundwassermessstelle im Forellenbachgebiet stattfindet. Die Stickstoffauswaschung aus der Bodenzone des Einzugsgebiets Forellenbach setzt aber dem Verlauf des Borkenkäferbefalls entsprechend erst ab 2000 in größerem Umfang ein und erreicht auch dank der Bestandeszusammensetzung und des insgesamt mächtigeren Bodenspeichers nicht annähernd so hohe Werte wie im Markungsgrabengebiet. Hier müssen zusätzliche laterale Fließwege existieren, die bislang nicht berücksichtigt wurden.

Fazit

Die beobachteten Veränderungen des hydrologische Regime und der Stickstoffflüsse im Einzugsgebiet der Großen Ohe konnten durch Szenariosimulationen eindeutig auf den Borkenkäferbefall zurückgeführt werden. Mit der Überschreitung eines Mindestanteils an Schadflächen (ca. 20% in zusammenhängenden Arealen) sind signifikante Änderungen nachweis-

bar. Dabei haben Bestandeszusammensetzung und Standorteigenschaften großen Einfluss auf die absoluten Veränderungen sowohl der Wasserhaushaltskomponenten, als auch der einsetzenden Stickstoffflüsse. Die Hochwasser-Schutzfunktion wird gemindert, da die Gesamtverdunstung durch den Verlust der Fichtenbestände herabgesetzt und der Boden schneller mit Wasser gesättigt ist. Es ist allerdings zu beachten, dass der Hochwasserschutz durch Wälder primär durch die Infiltrationseigenschaften des Bodens bestimmt wird, die durch den Borkenkäferbefall nicht verändert werden und diese Schutzwirkung bei extremen Niederschlagsereignissen ohnehin begrenzt ist. Synchron zur sukzessiven Entwicklung der Vegetation ist von einer wieder steigenden Wirkung der hochwassermindernden Prozesse auszugehen. Die Messdaten der langfristigen Monitoringprogramme im Einzugsgebiet Große Ohe haben sich als solide Basis für die Überprüfung und Weiterentwicklung komplexer öko-hydrologischer Einzugsgebietsmodelle wie ArcEGMO-PSCN erwiesen, die eine immer größere Rolle bei der Abschätzung des Einflusses des Globalen Wandels auf den regionalen Wasser- und Stoffhaushalt spielen.

Literatur

- [1] Bayerisches Landesamt f. Wasserwirtschaft, 15 Jahre Integriertes Messnetz Stoffeintrag – Grundwasser, Methoden u. Ergebnisse, Bericht 2/2004, ISBN 3-937911-00-6, 2004.
- [2] Bayerisches Landesamt für Wasserwirtschaft, Bayerische Landesanstalt für Wald und Forstwirtschaft, Nationalpark Bayerischer Wald: Wasserwirtschaftliches Gutachten für den Nationalpark Bayerischer Wald, Mai 2004
- [3] Becker, A.; Klöcking, B.; Lahmer, W.; Pfützner, B.: The hydrological modelling system ARC/EGMO. In: Singh, V.P. & Frevert, D.K. (eds.) Mathematical Models of Large Watershed Hydrology. Water Resources Public., Littleton/Colorado, 2002, 321-384.
- [4] Beudert, B., Breit, W., Zwölf Jahre Integrated Monitoring-Programm an der Messstelle Forellenbach im Nationalpark Bayerischer Wald, Fkz. 351 01 012; Nationalparkverwaltung Bayerischer Wald, 307 S., 2004.
- [5] Klöcking, B., Schwarze, R., Beudert, B., Suckow, F., Lasch, P., Badeck, F., Pfützner, B.: Auswirkungen des Borkenkäferbefalls auf den Wasser- u. Stoffhaushalt zweier Gewässer-einzugsgebiete im Nationalpark Bayerischer Wald, Reihe „Wasserhaushalt u. Stoffbilanzen im naturnahen Einzugsgebiet der Großen Ohe“, Bd. 8, ISSN 0937-0056, 2005.
- [6] Lasch, P., F. W. Badeck, F. Suckow, M. Lindner, Mohr, P.: "Model-based analysis of management alternatives at stand and regional level in Brandenburg (Germany)." Forest Ecology And Management 207(1-2): 59-74, 2005.
- [7] Nationalpark Bayerischer Wald, Bayerische Landesanstalt für Wald und Forstwirtschaft, Bayerisches Landesamt für Wasserwirtschaft, TU München (Hrsg.), Einzugsgebiet Große Ohe – 20 Jahre hydrologische Forschung im Nationalpark Bayerischer Wald. Symposium am 11.05.1999, Wasserhaushalt und Stoffbilanzen im naturnahen Einzugsgebiet Große Ohe 7, 162 S., ISSN 0937-0056, 1999.
- [8] Pfützner, B. (Ed.), Modelldokumentation ArcEGMO. <http://www.arcegmo.de>, ISBN 3-00-011190-5, 2003.
- [9] Schwarze, R., Beudert, B.: Auswirkung von Störungen auf den Wasser- und Stoffhaushalt eines bewaldeten Einzugsgebietes - Prozessanalyse (dieser Band), 2006.
- [10] Finnish Environment Institute (ed.): Manual for Integrated Monitoring, 2004 <http://www.environment.fi/default.asp?node=6329&lan=en>