FORSCHEN FÜR DIE UMWELT / 4. AUSGABE

BORKENKÄFER, FICHTEN UND COMPUTER

Lorenz Fahse und Marco Heurich

BORKENKÄFER, FICHTEN UND COMPUTER

Lorenz Fahse und Marco Heurich

Seit ungefähr 15 Jahren findet im Nationalpark Bayerischer Wald ein großflächiges Absterben der Fichtenwälder statt. Grund dafür ist der Buchdrucker, eine sich massenhaft vermehrende Borkenkäferart.

Soll man diesen »Schädling« in einem Nationalpark, der sich durch besondere Naturnähe auszeichnen soll, aktiv bekämpfen, oder soll in die natürliche Dynamik möglichst nicht eingegriffen werden? Die Interessen von Anwohnern, Privatwaldbesitzern, Touristen und Naturschützern kommen hier miteinander in einen ernsten Konflikt. Entscheidungshilfe könnte ein Computermodell geben, das von Wissenschaftlern und Praktikern gemeinsam entwickelt wurde.

Autoren:

Lorenz Fahse, Dr. rer. nat., ist Mitarbeiter der Sektion Ökosystemanalyse am UFZ in Leipzig. Marco Heurich ist Mitarbeiter der Nationalparkverwaltung Bayerischer Wald in Grafenau.

***Dieses Projekt wurde unter anderem freundlich unterstützt von** Herrn Prof. Dr. Schopf, TU München-Wissenschaftszentrum Weihenstephan, und Herrn Prof. Dr. Skatulla, Bayerische Landesanstalt für Wald und Forstwirtschaft.*

ZUR BIOLOGIE DES BUCHDRUCKERS

Der Buchdrucker (Ips typographus; Großer Achtzähniger Fichtenborkenkäfer) ist nur zirka 4-5,5 Millimeter groß und von rot- bis schwarzbrauner Farbe. Die Männchen bohren sich in die Rinde von Fichten ein und locken mit Duftstoffen (Pheromonen) Artgenossen an, um gemeinsam den Abwehrmechanismus der Fichte zu überwinden. Anschließend legen sie unter der Rinde die so genannte Rammelkammer an, in der sich ein Männchen mit 1-3 Weibchen paart. Nach der Befruchtung legen die Weibchen die Eier entlang der von ihnen gebohrten Muttergänge ab. Die nach ein bis zwei Wochen ausschlüpfenden Larven fressen sich ihrerseits senkrecht zu den Muttergängen durch die Rinde, so dass ein charakteristisches Brutbild entsteht. Je nach Witterung verlassen nach weiteren vier bis sechs Wochen die Jungkäfer den Brutbaum. Da jedes Weibchen zirka 30-60 Eier legt, können schon ein paar Dutzend erfolgreich eingebohrte Käfer zu Tausenden von Nachkommen führen. Dieses immense Reproduktionspotenzial führt bei günstigen Bedingungen zu einem explosionsartigen Anstieg einer Population. Für die Fichte verläuft die Brut allerdings meist tötlich, denn durch den Käferfraß wird der Nährstofftransport von den Wurzeln unterbrochen. Die Nadeln können nicht mehr ausreichend versorgt werden und fallen ab. Gesunde Fichten können normalerweise einen Angriff von Buchdruckern bis zu einem gewissen Grad durch Harzausfluss abwehren. Geschwächte Bäume, die zum Beispiel durch Sturmschäden oder Trockenheit keine ausreichende Wasserversorgung mehr besitzen, können dagegen vom Buchdrucker relativ leicht besiedelt werden.

Wenn es in Deutschland um den Wald geht, dann sind häufig Emotionen im Spiel. Kein Wunder, dass die Wogen hochschlagen, wenn ein Fichtenwald nicht mehr grün die Höhen eines Mittelgebirges umsäumt, sondern statt dessen auf einer Fläche von zirka 3.600 Hektar graue Baumgerippe stehen – so jedenfalls der aktuelle Zustand in den Hochlagen des Nationalparks Bayerischer Wald. Schuld daran ist in erster Linie der »Buchdrucker«, ein nur zirka 5 Millimeter großer Borkenkäfer, der sich zur Fortpflanzung in die Fichten einbohrt und ihnen dabei den Garaus macht. Wie könnten geeignete Gegenmaßnahmen aussehen, die der Konzeption eines Nationalparks angemessen sind? Eine heikle Frage, denn vielschichtige Interessengruppen prallen dabei auf-

Bild 1: Käferlöcher in den Hochlagen des Bayerischen Waldes (Quelle: Hartmut Strunz, Nationalparkverwaltung Bayerischer Wald, Grafenau)

einander: Privatwaldbesitzer, die um ihre Erträge fürchten, Puristen und Antagonisten eines konsequenten Naturschutzkonzeptes, Tourismusverbände und nicht zuletzt die Anwohner, denen vermeintlich ein Stück ihrer Heimat verloren geht. Wissenschaftler des Umweltforschungszentrums in Leipzig entwickelten nun ein Modell, das die Ausbreitung von Borkenkäfern in Fichtenwäldern simuliert und das vor allem zwei Ziele verfolgt: Zum einen Wissen zusammenzutragen und die Dynamik des Systems zu verstehen, und zum anderen mögliche Szenarien einer Bekämpfung theoretisch durchzuspielen und in Hinblick auf verschiedene Bewertungskriterien zu vergleichen. Das grundsätzliche Dilemma, ob und wie man in eine natürliche Landschaftsdynamik eingreifen soll, wird damit nicht gelöst. Doch mithilfe des Modells können Sachverhalte veranschaulicht und neue Diskussionsgrundlagen geschaffen werden. Auf diese Weise ist die Modellierung der Borkenkäferausbreitung ein wichtiger Beitrag zur Versachlichung der mitunter hitzig geführten Diskussionen.

Bild 2: Ips typographus, *der Buchdrucker (Quelle: Joseph Eder, Grafenau)*

»Natur Natur sein lassen«, ...

lautet das Motto des Nationalparks Bayerischer Wald. Leitbild für das Management des Nationalparks ist der so genannte Prozessschutz. Der Natur soll innerhalb des Parks so weit wie möglich Gelegenheit gegeben werden, sich selbst in allen Facetten zu entwickeln. Seit 1970 ist auf diese Weise ein Lebensraum entstanden, der vielen Pflanzen und Tieren ein Refugium bietet, das sie woanders kaum noch finden. Doch starke Stürme führten insbesondere Mitte der 80er, aber auch Anfang der 90er Jahre zu zahlreichen Windwürfen in den Wäldern des Nationalparks. Damit waren schlagartig günstige Habitate für die Borkenkäfer entstanden. In der Erwartung, es werde höchstens vorübergehend zu Schäden durch Käferfraß kommen, entschied man sich, die Sturmwürfe getreu des Nationalparkmottos nicht aufzuarbeiten. Doch diese Hoffnungen trügten: Im Laufe der Gradationsphase, das heißt, während der Massenvermehrung der Käfer, wurde der Angriffsdruck der Käfer infolge des reichlichen Brutraumangebotes so groß, dass die Käfer selbst gesunde Fichten erfolgreich besiedeln konnten. Dieser Effekt wird in der Fachsprache als »Stehendbefall« bezeichnet. In der Folge weiteten sich die isolierten Käfer-

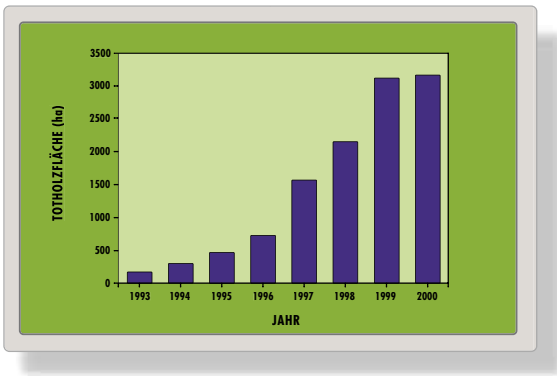

Bild 3: Entwicklung der Totholzflächen zwischen 1993 und 2000 im Nationalpark Bayerischer Wald (Rachel-Lusen-Gebiet)

löcher aus und wuchsen zu Fronten zusammen. Bild 3 illustriert den Verlauf des dadurch bedingten Totholzanfalls in der Zeitspanne 1993 bis 2000.

... doch möglichst nur innerhalb des Nationalparks.

Das Gebiet des Nationalparks ist in unterschiedliche Zonen eingeteilt. Innerhalb der Naturzone, die zirka 10.000 Hektar des alten Nationalparkgebietes umfasst, wird die Dynamik des Befalls weitgehend sich selbst überlassen; in der mindestens 500 Meter breiten Randzone dagegen soll der Käfer bekämpft werden, um ein Übergreifen der Gradation auf angrenzende wirtschaftlich genutzte (Privat-) Wälder zu verhindern. Die praktisch einzig mögliche Bekämpfungsmethode besteht darin, befallene Bäume rechtzeitig zu fällen und die Stämme abzutransportieren oder zumindest vor Ort zu entrinden, bevor die Jungkäfer ausgereift sind. Die Diskussion, ob sich solche massiven Eingriffe mit dem Nationalparkkonzept vertragen, wurde auf allen Ebenen – auch in den Medien – geführt.

Herausforderungen der Modellierung: Wissen kombinieren, ...

Mit der Biologie des Buchdruckers ist man in vielen Details vertraut. Man kennt beispielsweise seine Habitatansprüche, sein Schwärmverhalten, seine Reproduktionseigenschaften sowie mögliche Antagonisten. Offen ist, wie sich einzelne Prozesse und Faktoren im Zusammenspiel miteinander auswirken. Welche Systemkomponenten sind für das raum-zeitliche Muster der Käferausbreitung letztlich verantwortlich? Wo kann man gegebenenfalls am effektivsten den Hebel für Gegenmaßnahmen ansetzen? Diese Fragen zu beantworten motivierte Wissenschaftler des UFZ

Bild 4: Ein Fraßbild des Borkenkäfers – künstlerisch vollkommen, jedoch tödlich für die Fichte. (Quelle: Archiv Nationalparkverwaltung Bayerischer Wald, Grafenau)

und Mitarbeiter der Nationalparkverwaltung Bayerischer Wald gemeinsam ein Simulationsmodell zu erstellen. Dabei liegt die Herausforderung zunächst in der Aufgabe, die vorhandene Expertise in logisch konsistenter Weise zu kombinieren. Dies allein kann schon zu überaus fruchtbaren Diskussionen und Einblicken in ein System führen.

... Strukturen abbilden, ...

Ein Modell muss aus eindeutigen Regeln bestehen, die entweder mathematisch formuliert werden können oder sich in wenn-dann-Aussagen manifestieren: *Wenn* verschiedene Bedingungen erfüllt sind, *dann* tritt ein bestimmter Sachverhalt ein. In dem Buchdruckermodell lautet beispielsweise eine solche Modellregel: Wenn mehr als 200 Buchdrucker gleichzeitig eine gesunde Fichte anfliegen, dann können sie die Abwehrmechanismen des Baumes überwinden und mit der Reproduktion beginnen, wobei die Fichte innerhalb von drei Monaten abstirbt. Die Implementierung dieser Regeln in ein lauffähiges Computerprogramm ist letztlich »nur« eine – bisweilen recht aufwändige – Übertragung in eine andere Sprache, die es aber ermöglicht, das Modellverhalten systematisch quantitativ auszuwerten und zu testen.
Das Simulationsmodell zur Ausbreitung des Buchdruckers in Fichtenwäldern ist räumlich explizit; das heißt, es arbeitet auf einem Gitter, das aus 128 mal 128 Zellen besteht (gitterbasiertes Modell). Jede Gitterzelle repräsentiert eine Fichte und besitzt bestimmte Eigenschaften, wie zum Beispiel den aktuellen Zustand der Fichte, die Anzahl der sich dort befindenden Buchdrucker und so fort. Diese Eigenschaften werden gemäß der Modellregeln pro Zeitschritt aktualisiert. Da das Modell in verschiedenen Bereichen mit *Wahrscheinlichkeiten* arbeitet (beispielsweise bei den Mortalitäten und bei der Bewegungsrichtung der Käfer im Raum), verläuft jeder Simulationslauf anders, auch wenn die benutzten Parameter dieselben sind. Man kann also keine deterministische Aussage treffen, wie sich das System in Zukunft verhalten wird. Doch durch Mittelwertbildung über viele Simulationsläufe erhält man ein Maß für die Wahrscheinlichkeit (oder für das Risiko), dass ein bestimmter Effekt (zum Beispiel ein Ausbruch) eintritt.

... Systeme verstehen, ...

Im Folgenden werden exemplarisch zwei Aspekte der Modell-Auswertung vorgestellt:
1. Wie groß ist bei einer bestimmten Käferdichte die Wahrscheinlichkeit, dass es zu einem flächenhaften Befall kommt?
2. Ist eine Randzone von 450 Metern Breite ausreichend, um den Käferbefall räumlich einzudämmen?

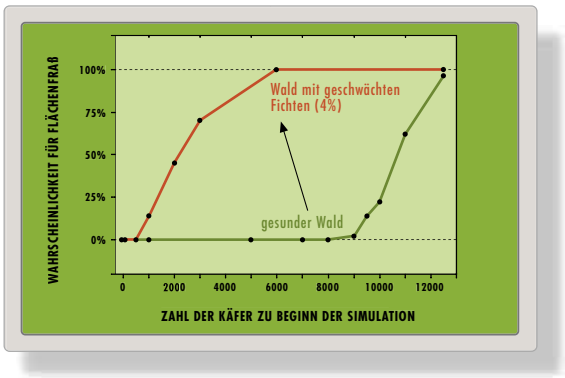

Bild 5: Das Risiko eines Flächenfraßes in Abhängigkeit von der Anfangszahl der Borkenkäfer im Modell. Grüne Kurve: gesunder Fichtenwald (alle Bäume können bis zu einem bestimmten Grad angreifende Käfer abwehren). Rote Kurve: Fichtenwald mit 4 Prozent geschwächten Bäumen (diese können nur wenige Käfer abwehren; zum Beispiel Sturmwürfe). Bereits dieser kleine Anteil an geschwächten Bäumen erhöht drastisch das Risiko zum Flächenfraß.

Um ein Verständnis zu erlangen, ab welcher kritischen Dichte der Käfer es zu einem flächenhaften Stehendbefall kommen kann, wird im Simulationsmodell eine bestimmte Anzahl an Buchdruckern mitten in einem Modell-Fichtenwald ausgesetzt. Gemäß der implementierten Modellregeln versuchen die Käfer, Fichten zu besiedeln und zur Fortpflanzung zu gelangen. Unter Umständen kommt der Ausbruch innerhalb kurzer Zeit zum Erliegen, weil sich beispielsweise die Käfer zufällig derart im Raum verteilt haben, dass die lokale Dichte an einer gesunden Fichte nicht mehr für eine erfolgreiche Besiedelung ausreicht. Oder es kommt andernfalls zu dem gefürchteten Flächenfraß, weil es den Käfern gelingt, die Mortalität durch erfolgreiche Reproduktion mehr als auszugleichen. Mithilfe des Modells kann man bestimmen, wie groß bei einer gegebenen Anfangszahl der Käfer das Risiko ist, dass ein flächenhafter Befall entsteht, der den Wald auf größerer Fläche vernichtet. In Bild 5 sind die Ergebnisse dargestellt: Man erkennt, dass in einem gesunden Wald (grüne Kurve) eine Gefährdung oberhalb von anfangs zirka 9.000 Käfern eintritt. Doch wie ändert sich dieses Risiko, wenn ein Teil der Bäume geschwächt ist? Unter »geschwächt« versteht man im allgemeinen Sturm geworfene oder anders geschädigte Bäume, die keine oder nur verminderte Kraft zur Abwehr angreifender Käfer haben. Es wurde im Modell konkret untersucht, wie sich die Ausbruchswahrscheinlichkeit verändert, wenn sich ein kleiner Anteil von gerade einmal 4 Prozent an geschwächten Bäumen im Wald befindet und diese Bäume zufällig im Raum verteilt sind. Die rote Kurve in Bild 5 zeigt eindrucksvoll, wie anfällig ein solcher Wald gegenüber Käferbefall ist. Im Gegensatz zum gesunden Wald ist jetzt schon eine relativ kleine Zahl an Buchdruckern zu Beginn ausreichend, um eine Massenvermehrung herbeizuführen und den

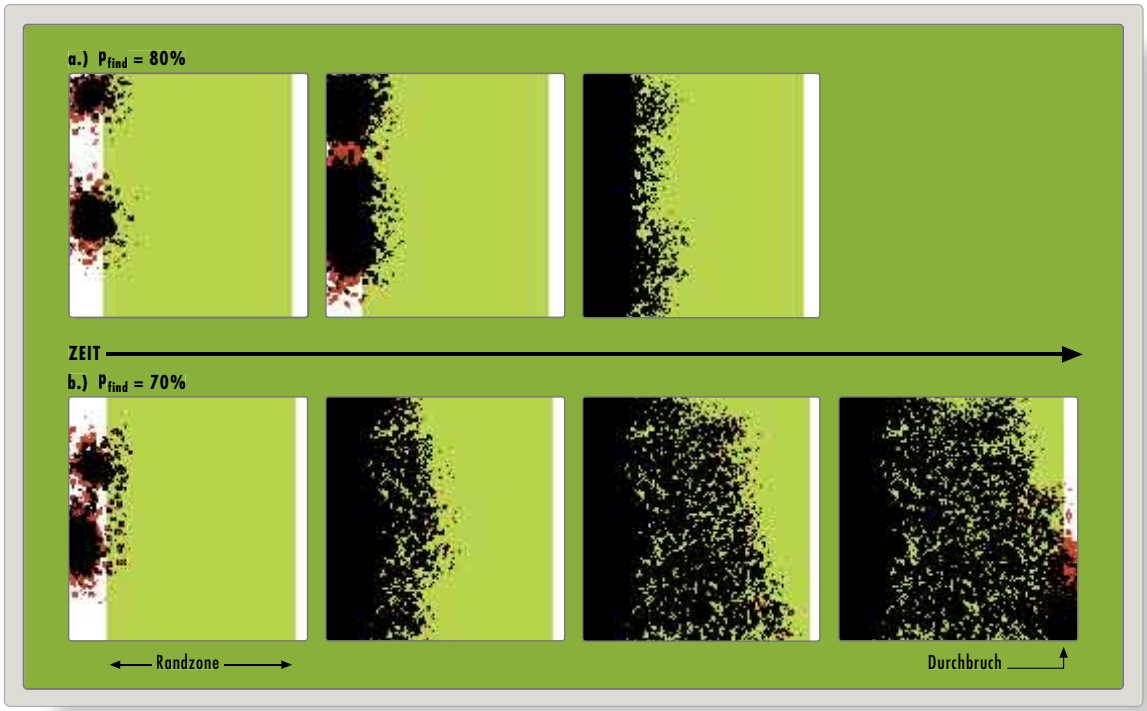

Bild 6: Beispiele zur Simulation der Bekämpfung in der Randzone. Im linken Teil des Modellwaldes wird zunächst ein (unbekämpfter) Flächenfraß initiiert (weißer Bereich). Dieser trifft auf die Randzone (grüner Bereich; ihre Breite entspricht in der Realität zirka 450 Meter). Innerhalb dieser Zone werden vom Buchdrucker befallene Bäume mit einer Wahrscheinlichkeit p_{find} ausgeräumt, bevor die Jungkäfer ausfliegen. (a) Bei p_{find} = 80 Prozent ist die Randzone ausreichend breit; (b) bei p_{find} = 70 Prozent dagegen kommt es zu einem Durchbruch in die angrenzenden Wälder. Durch zahlreiche Wiederholungen solcher Simulationen erhält man die in Bild 7 eingetragenen Werte für das Durchbruch-Risiko.

Wald zu vernichten. Die Simulationen bestätigen die forstliche Praxis in Wirtschaftswäldern, den Anfängen zu wehren und brauchbares Material sofort zu räumen. Doch was, wenn – wie im Nationalpark – dieses Material in den Wäldern verbleibt und die Gradation schon weit fortgeschritten ist? Kann die Käferfront mit der eingerichteten Randzone, in der der Buchdrucker bekämpft wird, erfolgreich aufgehalten werden?

... Entscheidungen unterstützen.

Zur Untersuchung dieser Frage wurde im Modellwald im linken Raumbereich eine Gradation initiiert, die bei ihrer Ausbreitung nach rechts auf einen bekämpften Randbereich trifft (siehe Bild 6). Doch das rein praktische (und finanzielle) Problem besteht darin, befallene Bäume als solche zu erkennen und dann auch noch rechtzeitig abzutransportieren. Denn in der Praxis ist es nicht möglich, alle Befallsherde sofort zu entdecken und rechtzeitig zu entfernen. Dieser Sachverhalt kann ebenfalls mit dem Modell nachgestellt werden: Dazu wird angenommen, dass in der Randzone (grüner Bereich in Bild 6) jede befallene Fichte nicht grundsätzlich, sondern nur mit einer bestimmten Wahrscheinlichkeit p_{find} aus dem System genommen wird. Ein Wert von p_{find} nahe Eins beschreibt eine sehr effektive Bekämpfung, ein kleiner Wert dagegen eine nachlässige. Variiert man diese Größe, kann man mit dem Simulationsmodell die Wahrscheinlichkeit bestimmen, ob sich eine Käferfront durch die gesamte Randzone hindurch frisst oder ob sie zum Stillstand gebracht werden kann. Als Ergebnis findet man überraschenderweise ein sehr ausgeprägtes Schwellenverhalten des Systems (Bild 7): Oberhalb einer Räumwahrscheinlichkeit von p_{find} = 80 Prozent, das heißt, wenn im Schnitt mindestens 8 von 10 befallenen Fichten in der Randzone rechtzeitig entfernt werden können, ist die Randzone ein Erfolg. Unter p_{find} = 70 Prozent dagegen erscheint sie völlig wertlos. Die Modellergebnisse legen also nahe, dass die forstlichen Anstrengungen unbedingt einen kritischen Wert von mindestens 75 Prozent für p_{find} realisieren müssen – und dass darin nicht nachgelassen werden darf, weil das System knapp unterhalb dieses Wertes schnell »umkippt«.

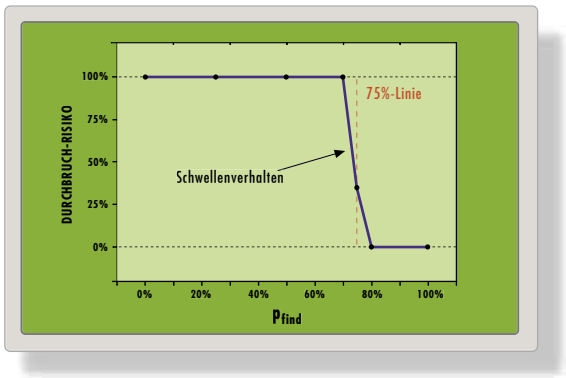

Bild 7: Erfolg und Misserfolg der Randzone. Ob eine 450 Meter breite Randzone von einer Käferfront durchbrochen wird oder nicht (vergleiche Bild 6), hängt entscheidend von der Effektivität der in ihr praktizierten Buchdrucker-Bekämpfung ab. Diese Effektivität wird im Modell durch die Größe p_{find} vorgegeben. Sie ist die Wahrscheinlichkeit, innerhalb der Randzone eine befallene Fichte rechtzeitig zu räumen. Auffällig ist das ausgeprägte Schwellenverhalten des Systems bei der 75 Prozent-Linie.

Modelle sind flexible Werkzeuge

Doch die Anwendung dieses Modells ist nicht nur auf die Verhältnisse im Bayerischen Wald beschränkt. Eine interessante Zusammenarbeit und zahlreiche Diskussionen ergaben sich auch mit der »Sächsischen Landesanstalt für Forsten« bei Pirna für Anwendungen im Nationalpark Sächsische Schweiz und im Erzgebirge. Dort geht es nicht primär um die Eindämmung einer Gradation, sondern um die Frage, wie ein finanziell möglichst günstiges Beobachtungsprogramm aussehen könnte, das drohende Gefahren rechtzeitig erkennt. Auch an der Eidgenössischen Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft (WSL) bei

Bild 8: Simulation eines Buchdrucker-Ausbruchs im Modell. Weiße Zellen: gesunde Fichten; rote Zellen: vom Buchdrucker besiedelte Fichten; schwarze Zellen: bereits abgestorbene Fichten

Bild 9: Durch Windwürfe und Borkenkäferbefall entstehen günstige Startbedingungen für eine neue Baumgeneration (Quelle: Hans Jehl, Nationalparkverwaltung Bayerischer Wald, Grafenau)

Zürich wurde das Modell mit Interesse zur Kenntnis genommen. Dort hat der Gebirgswald vor allem eine Schutzfunktion gegen Steinschlag und Schneelawinen und ist zum Teil äußerst unzugänglich.

Modelle wie diese sind Beispiele, wie man in der modernen Umweltforschung neue Wege beschreiten kann. Gerade in ökologischen Systemen entziehen sich manche Hypothesen der experimentellen Überprüfung, da die benötigten Daten nicht direkt erfassbar sind oder zum Beispiel ein Misserfolg einer Maßnahme zu irreversiblen Änderungen eines Ökosystems führen würde. Aber Modelle sind keinesfalls 1:1-Abbilder der Realität. Sie geben – unter Berücksichtigung der betrachteten Fragestellung – nur bestimmte Aspekte der Wirklichkeit wieder. Modelle sind letztlich recht flexible Denkhilfen, mit denen ein System untersucht werden kann. Ihre Ergebnisse sind Ausgangspunkte neuer Fragestellungen und somit wiederum Stimulans für neue empirische Untersuchungen im komplexen Bereich der angewandten Umweltforschung.

DER NATIONALPARK BAYERISCHER WALD

Der Nationalpark Bayerischer Wald wurde 1970 als erster Nationalpark in Deutschland eröffnet. Nach einer Erweiterung im Jahr 1997 umfasst der Nationalpark über 24.000 Hektar. Auf 98 Prozent der Fläche des Nationalparks erstrecken sich ausgedehnte Wälder (Bergfichtenwälder in den Hochlagen ab 1.200 Meter Seehöhe, Bergmischwälder aus Buchen, Fichten und Tannen in den Hanglagen, Aufichtenwälder in den nassen Talmulden), Hochmoore, Bergbäche, Eiszeitsee sowie nacheiszeitliche Blockfelder. Der Park beinhaltet ein typisches Tierartenspektrum mitteleuropäischer Bergwälder wie Rothirsch, Reh, Wildschwein, Fuchs, Dachs, Baummarder und auch Fischotter; über 50 Waldvogelarten, darunter seltene wie Auerhuhn, Haselhuhn, Schwarzspecht, Weißrückenspecht, Dreizehenspecht, Rauhfußkauz, Sperlingskauz, Habichtskauz, Hohltaube; sowie zahlreiche, auch seltene Insektenarten, insbesondere auf Totholz lebende Käfer. Natürlicherweise zurückgekehrt sind Luchs (wurde in Tschechien wiederangesiedelt), Wanderfalke und Schwarzstorch. In der Folge des Borkenkäferbefalls in den Hochlagen beobachtet man nun die einsetzende Verjüngung der Fichtenbestände. Die Buchdruckermassenvermehrung ist eigentlich nur ein – wenn auch ziemlich imposantes – Durchgangsstadium eines Ökosystems, in dem das Konzept des Prozessschutzes so weit wie möglich umgesetzt wird.

Nationalpark Bayerischer Wald