

Zeitschrift: Schweizerische Zeitschrift für Forstwesen = Swiss forestry journal = Journal forestier suisse

Herausgeber: Schweizerischer Forstverein

Band: 151 (2000)

Heft: 5

Artikel: Wuchssimulation und Bestandesvisualisierung als Mittel zur Reduktion von brennbarem Material : ein Beispiel aus den westlichen USA

Autor: Kurt, Hollenstein

DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-1098350>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. [Mehr erfahren](#)

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. [En savoir plus](#)

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. [Find out more](#)

Download PDF: 01.05.2026

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>

Wuchssimulation und Bestandesvisualisierung als Mittel zur Reduktion von brennbarem Material: ein Beispiel aus den westlichen USA¹

HOLLENSTEIN KURT

Keywords: Fuel treatment; simulation; uneven-aged management; thinning; Sierra Nevada; Rocky Mountain Front Range; USA. FDK 181.43 : 228 : 43 : 53 : UDK 519.876.5 : (73)

Abstract: The present study demonstrates examples of the western US representing interventions which can reduce the risk of fire with the assistance of the US Forest Service's Forest Vegetation Simulator (FVS) for fuel treatment planning. The treatments are based on the uneven-aged DBQ approach. It is shown that too restrictive management prescriptions can lead to a decline in fire resilience in the long term and thus threaten other forest functions. The simulated stand development can be illustrated using the Stand Visualization System (SVS).

Abstract: Mit der vorliegenden Studie soll an Beispielen aus dem Westen der USA gezeigt werden, mit welchen Eingriffen, die mit Hilfe des Forest Vegetation Simulators (FVS) zur Reduktion von brennbarem Material im Wald geplant werden, die Brandanfälligkeit reduziert werden kann. Als Ansatz wird eine ungleichaltrige Struktur des Zielbestandes, ein sogenanntes DBQ-Modell gewählt. Es wird gezeigt, wie sich zu restriktive Vorschriften zur Bewirtschaftung langfristig kontraproduktiv auf die Brandsicherheit und andere Waldfunktionen auswirken können. Die simulierte Bestandesentwicklung kann mit dem Stand Visualization System (SVS) bildlich dargestellt werden.

Einleitung

Vor der Besiedelung durch Euroamerikaner war ein grosser Teil der Wälder im Bereich des Rocky Mountain Front Range (Bundesstaaten Colorado und New Mexico) und in der Sierra Nevada (Kalifornien) häufigen Bränden niedriger Intensität unterworfen (SNEP 1996). Diese Feuer waren teils natürlichen Ursprungs, teilweise aber auch durch die indigene Bevölkerung gelegt, um zusätzliche Flächen zur Bewirtschaftung zu gewinnen. Das Resultat der Brände waren offene Bestände aus einzelnen, mehr oder weniger freistehenden Starkholzbäumen, zwischen welchen sich kein dauernder Nebenbestand etablieren konnte.

Die massive euroamerikanische Einwanderung beendete dieses naturnahe Feuerregime. Mit den Siedlern kam die Forstindustrie in den Westen, und die Waldnutzungsmuster, aber auch die Einstellung gegenüber Bränden änderten sich. Seit Beginn des 20. Jahrhunderts, besonders aber nach den katastrophalen Feuern von 1910, war rigorose Brandbekämpfung zur Maxime geworden (GUTH 1989). Unter anderem kam dies in der sogenannten «ten o'clock policy» des US Forest Service zum Ausdruck, wonach jeder Waldbrand um zehn Uhr morgens des nächsten Tages unter Kontrolle sein musste. Als Folge dieser Veränderungen weisen viele dieser ehemals offenen, einschichtigen Bestände heute eine sehr dichte und wenig vitale Unterschicht aus schwachen Bäumen auf. Im Falle von Feuern wirken diese unterdrückten Bäume als «ladder fuels», welche für die vertikale Brandausbreitung von entscheidender Bedeutung sind. Bodenfeuer erreichen über sie die Kronenschicht, wo sie wesentlich schwieriger zu kontrollieren sind und viel grössere Schäden verursachen. Grossfeuer wie jene im Jahr 1988 im Yellowstone National Park haben denn auch die Grenzen der Brandbekämpfung deutlich aufgezeigt (GUTH 1989). Ein Blick auf die Feuerflächenstatistik (Tabelle 1) zeigt deutlich, dass es trotz immer besseren technischen Mitteln zur Brandbekämpfung zunehmend schwieriger wird, eigentliche Brandkatastrophen langfristig zu verhindern. Ein Ansatz zur Entschärfung des Problems ist die Gestaltung von Bestandesstrukturen mit verbesserter Feuersicherheit. Dabei muss aber dem Ausmass des Problems Rechnung getragen werden. In der kalifornischen

Sierra Nevada alleine rechnet die Quincy Library Group (QLG, siehe <http://www.qlg.org/>) heute mit einer Fläche von über einer Million ha, die einer Behandlung bedürfen. Gesucht sind daher Lösungsansätze auf Landschaftsebene, welche mit den verfügbaren Mitteln eine möglichst grosse Wirkung erzielen.

Tabelle 1: Brandstatistik für die Sierra Nevada. Beim Vergleich der beiden Perioden fällt die Verschiebung der Brandursache hin zu Blitzschlag deutlich auf. Nach WEATHERSPOON *et al.* 1996.

Periode	Gesamtbrandfläche pro Jahr (ha)		Maximalgrösse eines Feuers (ha)		Anzahl Feuer/Jahr	
	1910-51	1952-93	1910-51	1952-93	1910-51	1952-93
Alle Feuer > 40 ha						
Minimum	828	44	283	44	5	1
1. Quartil	3990	1178	1260	526	12	6
Median	13856	4537	3654	2107	18	9
3. Quartil	20110	12125	8880	6144	34	13
Maximum	95126	81887	21234	53011	82	23
Total für Periode	730131	454861			1039	403
Durch Menschen verursachte Feuer > 40 ha						
Minimum	828	0	283	0	5	0
1. Quartil	3732	1120	1022	481	11	4
Median	13585	3108	3654	1099	17	7
3. Quartil	19585	6993	8880	4434	32	9
Maximum	93588	39402	21234	18100	65	20
Total für Periode	692170	267879			934	306
Durch Blitzschlag verursachte Feuer > 40 ha						
Minimum	0	0	0	0	0	0
1. Quartil	12	44	12	44	0	1
Median	324	347	175	272	2	1
3. Quartil	902	2625	550	1960	3	4
Maximum	9738	80704	5748	53011	18	13
Total für Periode	37960	186982			105	97

Methodik

Branddynamik und Ziel der Eingriffe zur Reduktion von brennbarem Material

Bodenfeuer niedriger Intensität erfüllen wichtige ökologische Funktionen in den Wäldern des amerikanischen Südwestens. Unter anderem erlauben sie die Verjüngung von Baumarten, welche sich in der Abwesenheit von Feuern nicht oder nur sehr

¹ Diese Arbeit wurde durch das US Department of Energy unterstützt.

beschränkt verjüngen. Die natürlich dominierenden Baumarten, unter denen *Pinus ponderosa* eine besonders wichtige Stellung einnimmt, können solche Feuer dank der niedrigen Temperaturen (meist unter den für Kambialgewebe letalen 60 °C) und Flammenlänge, der beschränkten Wärmeleistung im Bereich von 100 bis 200 kWm⁻¹ (HIRSCH *et al.* 1998) und der guten Isolation durch eine dicke Borke mehr oder weniger unbeschadet überstehen (FEENEY *et al.* 1998). Diese Toleranz ist aber auf Bodenfeuer beschränkt. Ein Vollbrand in der oberen Kronenschicht entwickelt extreme Wärmeleistungen von bis zu 100 MWm⁻¹ (ALEXANDER 1982) und führt in der Regel zu Baum- und Bestandesmortalität.

Auf Grund der grossen Fläche wird es nicht möglich sein, alle Problembestände innerhalb einer mittelfristigen Planungsperiode (etwa 40 Jahre) in einen feuersicheren Zustand zu überführen, d.h. dass eine mehrphasige Lösung gesucht werden muss. Ein möglicher Ansatz für die erste Phase ist die Kompartimentierung des Waldes, so dass eine unkontrollierte Ausbreitung von Kronenfeuern über riesige Flächen unwahrscheinlich wird. Dazu werden grosse zusammenhängende Waldareale planerisch in Zellen aufgeteilt, die durch Streifen mit geringer Neigung zur Verbreitung von Kronenfeuern voneinander getrennt sind. Diese Streifen sollen zudem der Feuerwehr bessere Chancen einräumen, Brände zu stoppen, und sie werden entsprechend als Defensible Fuel Profile Zones (DFPZ) bezeichnet (WEATHERSPOON *et al.* 1996). Das hier vorgestellte Planungskonzept zielt auf eine Bewirtschaftungsvorschrift ab, die die Bedingungen einer DFPZ erfüllt.

Welche Bestandesstrukturen sind nun aber hinreichend sicher vor Kronenfeuern? Für eine Brandausbreitung in der Kronenschicht sind zwei Voraussetzungen nötig. Erstens muss eine Zündquelle in Form einer offenen Flamme vorhanden sein, und zweitens muss der horizontale Wärmefluss genügend hoch sein. Letzteres kann mit der «Wald auf dem Förderband»-Analogie in *Abbildung 1* illustriert werden (AGEE 1996).

Die Analogie geht von einer stationären Flammenfront X aus, die der Wald auf dem Förderband passiert. An X wird der Wärmefluss

$$F_X = v * \delta_C * E_0 \quad [1]$$

freigesetzt, wobei F_X = Wärmefluss (Wm⁻²), v = Geschwindigkeit des Förderbandes (ms⁻¹), δ_C = Brennstoffdichte in der Kronenschicht (kgm⁻³), E_0 = Energiegehalt des Brennstoffes (kJkg⁻¹).

Der Energiegehalt des brandwirksamen Kronenmaterials (Nadeln und dünne Zweige) kann als konstant angenommen

werden, d.h. der minimal erforderliche Wärmefluss kann durch einen minimalen Massenfluss M_X substituiert werden. Wenn diese Grösse und die maximale Geschwindigkeit der Brandausbreitung bekannt sind, lässt sich daraus eine Obergrenze für die sichere Brennstoffdichte berechnen.

Auf Grund empirischer Untersuchungen ist bekannt, dass das Minimum für M_X bei etwa 0,05 kgm⁻²s⁻¹ liegt. Ferner ist bekannt, dass sich Feuer in der Baumschicht auch bei ungünstigen Bedingungen nicht schneller als etwa 1,35 ms⁻¹ ausbreiten (VAN WAGNER 1977; AGEE 1996), die z.T. beobachteten wesentlich höheren Geschwindigkeiten (ROTHERMEL 1998) gelten für andere Brennstoffprofile, welche hier nicht relevant sind (trockenes Gras).

Kombiniert man nun diese Werte, so ergibt sich daraus eine maximale Brennstoffdichte von 0,037 kgm⁻³ für feuersichere Bestandesstrukturen. In den wenigsten Fällen liegen aber Informationen über diese Variable vor. Messungen zeigen aber, dass die Brennstoffdichte hinreichend genau durch den Deckungsgrad substituiert werden kann, und dieser lässt sich relativ einfach erheben (BROWN 1978; GHOLZ *et al.* 1979; AGEE 1996). Empfehlungen für die Errichtung von DFPZ geben 40% Kronenschluss in der Oberschicht als Maximum an (OLSON 1997, in AGEE *et al.* 1998). Brandausbreitungs-Simulationen mit dem Modell FARSITE (VAN WAGTENDONK 1996) zeigen, dass sich unter diesen Bedingungen ein Brand nicht in der oberen Kronenschicht ausbreiten kann. Darüber hinaus wird auch die Ausbreitungsgeschwindigkeit eines immer noch möglichen Bodenfeuers stark reduziert, so dass eine aktive Brandbekämpfung durch die Feuerwehr möglich ist. Eine Reduktion des Deckungsgrades in der Oberschicht auf den Wert von 40% und langfristig die Erhaltung dieses Zustandes sind damit vorrangige Ziele des Eingriffskonzeptes.

In der Praxis werden Eingriffe zur Reduktion von brennbarem Material als Durchforstungen oder «prescribed burns» durchgeführt. Letztere können die ökologischen Funktionen natürlicher Feuer übernehmen, was grundsätzlich wünschenswert ist. Sie sind aber zeitlich und räumlich nur sehr beschränkt einsetzbar (Problem der Kontrollierbarkeit der Feuer und der Luftbelastung) und steuerbar, eine gezielte Beeinflussung der Bestandesstruktur nach dem Eingriff ist schwierig, und die Kosten sind mit rund \$1000 pro ha hoch (RIDEOUT *et al.* 1995). Durchforstungen haben den Nachteil, dass sie Nährstoffe exportieren und nur wenig Mineralboden freilegen (Keimbett). Ihr Vorteil ist dagegen die grosse Flexibilität und Steuerbarkeit, und es ist anzunehmen, dass der Anteil an Durchforstungen zur Reduktion von brennbarem Material längerfristig zunehmen wird, zumal durch die Reduktion konventioneller Kahlschlagnutzungen in den National Forests grosse Kapazitäten im Holzerntebereich frei werden. Zudem sind die Kosten mit \$500 bis \$750 pro ha tiefer als bei «prescribed burns». Im Folgenden wird deshalb ausschliesslich auf Durchforstungen als Eingriffstyp eingegangen.

Generell verfolgt eine Durchforstung zur Brennstoffreduktion drei Ziele:

- Reduktion der Brennstoffdichte im Kronenraum durch Reduktion des Deckungsgrades;
- Verbesserung der Vitalität des verbleibenden Bestandes durch Reduktion der Konkurrenz;
- Regulierung der Baumartenmischung.

Die Art der Durchforstung hängt vom betrachteten Stratum und im Einzelfall auch von den bestehenden Bestandesstrukturen ab.

In der obersten Kronenschicht, d.h. bei den Bäumen mit den grössten Durchmesser und Höhen, sind alle drei Ziele mehr oder weniger gleichwertig. Die Intensität kann auf Grund des Deckungsgrades (dieser Schicht und des Gesamtbe-

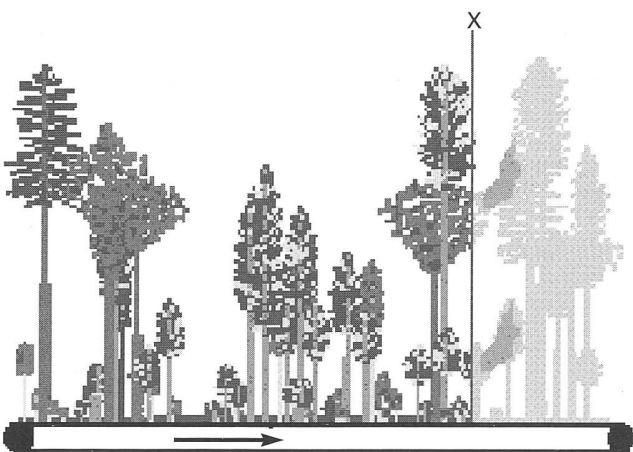


Abbildung 1: Wald auf dem Förderband. Der Wärmefluss an der stationären Flammenfront X ist eine Funktion der Geschwindigkeit des Förderbandes, der Brennstoffdichte in der Kronenschicht und des Energiegehaltes pro Masseneinheit Brennstoff. Nach AGEE 1996.

standes) bestimmt werden, die Entnahmepriorität auf Grund aller drei Ziele.

Im Segment der unterständigen (kodominanten und unterdrückten) Bäume hat die Reduktion der Brennstoffdichte klar Vorrang. Prioritär sind jene Bäume zu entfernen, welche als «ladder fuels» Bodenfeuer in die Kronenschicht weiterleiten – welche also in unmittelbarer Nachbarschaft zu verbleibenden Oberschichtbäumen stehen. Da alle Baumarten und Bäume unterschiedlicher Vitalität zur Brandausbreitung beitragen, sind die Ziele Vitalität und Mischungsregulierung sekundär.

In der bodennahen Schicht, wo sich bei genügend geöffnetem Kronendach Verjüngung einstellt, ist die Regulierung der Mischung vorrangig, da diese einen wesentlichen Einfluss auf das Brandverhalten des zukünftigen Bestandes hat. Die Verbesserung der Vitalität und die Reduktion der Brennstoffdichte sind dagegen sekundär. Die weitgehend offene Kronenschicht führt dazu, dass sich bodennah fast immer eine dichte Vegetation mit hoher Konkurrenz einstellt (Kraut-, Strauch- oder Baumvegetation), welche brandanfällig ist. Eine dauerhafte Elimination des Brennstoffpools in dieser Schicht ist nicht möglich.

Waldbauliches Konzept

Traditionell wurden die Wälder im amerikanischen Westen im Kahlschlagbetrieb mit gleichaltrigen Sekundärbeständen bewirtschaftet. Auf Grund des starken politischen Druckes ist aber eine Abkehr von diesem Regime zu beobachten, und es ist zu erwarten, dass künftig grosse Flächen einem System ungleichaltriger und stufiger Bestände (ähnlich einer Einzelbaum- oder Gruppenplenterung) unterstellt werden. Diese Betriebsart basiert auf einer Stammzahlabnahmekurve (sog. DBQ distribution, ALEXANDER und EDMINSTER 1977) der Form

$$N_d = a \cdot \exp(-d) \quad [2]$$

mit N_d = Anzahl Bäume mit BHD = d , a = Konstante, d = Durchmesser. Für praktische Belange wird die Verteilung durch einen maximalen Zieldurchmesser d_{max} , die Anzahl Bäume mit $d = d_{max}$ sowie dem Wert Q (Verhältnis der Stammzahl in Durchmesserklasse i /Durchmesserklasse $i+1$) definiert. Als d_{max} wird dabei oft der grösste in einem Bestand tatsächlich vorkommende BHD gewählt, und die Verteilung wird nach unten mit einem minimalen BHD d_{min} (oft 5 cm/2") abgegrenzt.

Für die Modellierung wird angenommen, dass ein Bestand kronenfeuersicher ist, wenn im DBQ-Durchmesserbereich ($d_{min} \leq d \leq d_{max}$) der Deckungsgrad der Bäume 40% nicht überschreitet. Dieser Ansatz funktioniert gut, wenn d_{max} relativ klein ist (< 76 cm/30"), was im Fall der Bestände im Front Range realistisch ist. In der Sierra Nevada erreichen die Bäume aber ohne weiteres einen BHD von 1 m und mehr. Eine DBQ-Verteilung, welche bei einem oberen Durchmesser $d_{max} = 1$ m (40") einen Deckungsgrad $< 40\%$ erzeugt, erfordert aber, dass entweder $N_{d_{max}} \approx 0$ oder dass $Q \approx 1$ ist, was waldbaulich schwer umzusetzen ist. Zusätzlich bestehen in der Sierra Nevada einschneidende Beschränkungen betreffend Behandlung von Bäumen mit > 76 cm BHD. Um dem Rechnung zu tragen, wird deshalb für die Simulation dieser Bestände das DBQ-Modell nur für den Durchmesserbereich $d_{min} = 5$ cm (2")/ $d_{max} = 76$ cm (30") angewandt, und für die Bäume mit BHD > 76 cm werden verschiedene Entnahmeintensitäten untersucht. Für die Beurteilung der Feuersicherheit müssen bei diesem Ansatz drei verschiedene Deckungsgrade berücksichtigt werden: jener für Bäume mit $d_{min} \leq d \leq d_{max}$, jener für $d_{max} \leq d$ und jener für $d_{min} \leq d$.

Eine ebenfalls untersuchte Alternative zur durchmesserbasierten Stratifikation ist die Ausscheidung vertikaler Bestandesschichten. Bei diesem Ansatz werden drei Strata unterschieden. Zuunterst ist die Bodenschicht, welche Kraut- und Strauchvegetation sowie die Verjüngung umfasst. In dieser Schicht breiten sich Bodenfeuer aus, welche in der Regel nur geringe Intensitäten erreichen und damit nicht bestandeszerstörend sind. Die obere Grenze der Bodenschicht H_{grd} wird wie folgt festgelegt:

$$H_{grd} = \max(H_{dom}/3; c) \quad [3]$$

mit H_{dom} = Oberhöhe, c = Konstante (abhängig vom Waldtyp). Damit wird eine Stratifizierung in unrealistisch dünne Schichten vermieden. Unmittelbar über der Bodenschicht folgt ein Höhensegment mit $H_{grd} < h < 2H_{dom}/3$, welches die «ladder fuels» umfasst (Nebenbestand, unterdrückte Bäume). Darüber liegt die Kronenschicht der dominanten Bäume mit $h > 2H_{dom}/3$, auf welche die Brennstoffbewirtschaftung primär abzielt.

Im Hinblick auf die Modellierung des Brandverhaltens wäre eine solche höhenbasierte Stratifikation vorzuziehen, weil es einfacher ist, die kritischen «ladder fuels» auszuschneiden. Auf Grund der Art der Bewirtschaftung (Vergabe ab Stock) und der begrenzten waldbaulichen Ausbildung der Unternehmer wird es aber in den meisten Fällen nicht möglich sein, diese relativ komplexen Eingriffe in der Praxis auch zu realisieren.

Simulation des Bestandeswachstums und Modellierung von Eingriffen

Das Bestandeswachstum wird in dieser Studie mit dem Software-Paket «Forest Vegetation Simulator» (FVS) (TECK *et al.* 1998; FMSC 1999) des US Forest Service simuliert. FVS ist eine Weiterentwicklung der «Stand Prognosis System»-Software (SPS) (WYKOFF *et al.* 1982) und integriert unter anderem auch Funktionalitäten der «Event Monitors»-Applikation (CROOKSTON 1990). Die ganze Serie dieser Programme sind Fortran-basiert und laufen auf IBM-AIX- und 32bit-Windows-Plattformen. Seit einiger Zeit existiert mit Suppose eine graphische Benutzerschnittstelle zu FVS, die eine interaktive Simulation ermöglicht (CROOKSTON 1997). Die Programme werden seit den siebziger Jahren kontinuierlich weiterentwickelt und stehen nicht nur dem US Forest Service, sondern auch interes-

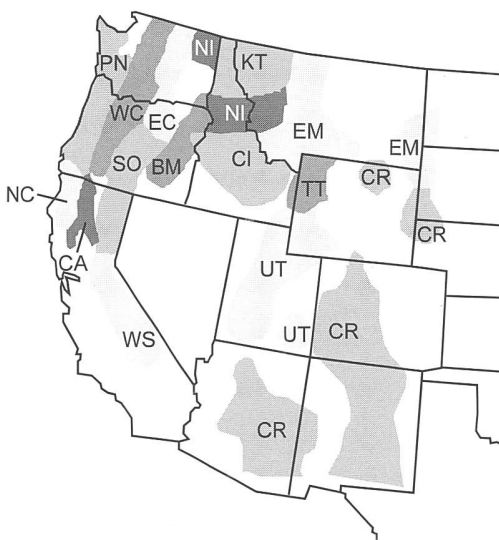


Abbildung 2: Geographische Lokalvarianten des Wachstumsmodells in FVS für die westlichen Staaten der USA. Für die Simulationen sind die Varianten WS (Western Sierra Nevada) und CR (Central Rocky Mountains) relevant.

sierten Dritten zur Verfügung. Informationen zu den aktuellsten Versionen sind verfügbar unter <http://www.fs.fed.us/fmasc/>; von dort kann die Software auch bezogen werden.

Um der geographischen und ökologischen Bandbreite der Wälder in den USA Rechnung zu tragen, existieren Lokalvarianten des eigentlichen Wachstumsmodells in FVS. *Abbildung 2* zeigt die räumliche Deckung der Varianten für die westlichen USA. Auf Grund von Dateien mit Bestandsdeskriptoren wählt FVS automatisch das richtige Wachstumsmodell.

FVS ist ein distanzunabhängiges Einzelbaummodell, d.h. die Bestandesentwicklung wird nicht als Kollektiv simuliert, sondern als Aggregat aus der Entwicklung einzelner Bäume, deren genaue Position nicht bekannt sein muss. Untersuchungen zeigen, dass diese Art von Modellen jenen auf Bestandesebene mindestens ebenbürtig, meist aber überlegen ist (RITCHIE 1997). Neben den Bestandsdeskriptordaten benötigt FVS noch eine Liste mit Daten zu den einzelnen Bäumen, die es zu simulieren gilt. Normalerweise handelt es sich dabei um Daten von Stichprobenpunkten oder um Vollinventurdaten auf Bestandesebene.

FVS erlaubt, sowohl interaktiv (via Suppose) als auch in einem Batch-Modus (mittels sogenannten Keyword-Files) Variablen zur Bestandesentwicklung zu berechnen und verschiedene Eingriffe in den Bestand zu simulieren. Dies macht den Einsatz von FVS als Werkzeug zur Planung von Eingriffen zur Brennstoffbewirtschaftung erst möglich. In einem ersten Schritt muss eine Bewirtschaftungsvorschrift entwickelt werden, die überbestockte und damit feuergefährdete Bestände in einen feuersicheren Zustand überführt, wobei der Deckungsgrad (als Substitut für die Brennstoffrohddichte) die Zielgrösse für die Planung der Eingriffe ist. Dieser kann von FVS für beliebige Baumarten, Durchmesser- und Höhensegmente berechnet werden, was eine rechnerische Stratifizierung des (simulierten) Bestandes erlaubt; dies ist im Hinblick auf die Eingriffsplanung von Bedeutung.

FVS bietet verschiedene Ansätze zur Dichteregulierung von Beständen. Neben Endnutzungseingriffen (Shelterwood- und Seedtree-Cuts) kann eine ganze Reihe von Durchforstungen simuliert werden. Mögliche Zielparameter von Eingriffen sind verbleibende Stammzahl, verbleibende Basalfläche und Entnahmeprozent. Die Durchforstungen können als Nieder- oder Hochdurchforstungen modelliert werden und auf spezifische Durchmesser- und Höhensegmente beschränkt sein.

Für das Betriebsmodell mit ungleichaltrigen Beständen wird der Eingriff rechnerisch aufgeteilt in eine Serie von Durchforstungen für die einzelnen Durchmesserklassen. Innerhalb einer solchen Klasse wird die Stammzahl auf den Wert gemäss DBQ-Verteilung reduziert (falls notwendig). Das folgende Codesegment aus einem FVS-Keyword-File illustriert dieses Vorgehen:

```
...
ThinDBH      0      Parns (2,4,1.0,0,64.0,0)
ThinDBH      0      Parns (4,6,1.0,0,32.0,0)
ThinDBH      0      Parns (6,8,1.0,0,16.0,0)
ThinDBH      0      Parns (8,10,1.0,0,8.0,0)
ThinDBH      0      Parns (10,12,1.0,0,4.0,0)
ThinDBH      0      Parns (12,14,1.0,0,2.0,0)
ThinDBH      0      Parns (14,16,1.0,0,1.0,0)
...
```

ThinDBH ruft die FVS-Prozedur für die Durchforstung eines bestimmten BHD-Segments auf. Die ersten beiden Parameter in den Klammern sind die untere und obere BHD-Grenze (in Zoll), der zweitletzte Parameter die Zielstammzahl (pro acre = 0,4 ha).

Wenn eine grosse Zahl verschiedener DBQ-Verteilungen untersucht werden soll, ist es sehr aufwendig, die Durchforstungssequenz jedesmal manuell zu codieren. Aus diesem Grunde hat der Autor ein Tcl-Script entwickelt, welches auf Grund der Verteilungsparameter direkt das Keyword-File erzeugt.

FVS verarbeitet das Keyword-File als eine Reihe von voneinander unabhängigen Eingriffen. Dies entspricht natürlich nicht der Realität, spielt aber für das Ergebnis keine Rolle, da es sich um ein Einzelbaummodell handelt, welches den Bestand nach jedem Zyklus neu generiert.

Das unmittelbare Resultat einer Simulation ist ein FVS-Output-File, welches Informationen über die Bestandesentwicklung wie Artenszusammensetzung, Stammzahl, Durchmesser- und Sortimentsverteilung enthält. Diese Datei ist recht gross (im Beispiel rund 130 kB), teilweise schwierig zu interpretieren und enthält weit mehr Angaben als für die meisten Anwendungen nötig sind. Es ist deshalb sinnvoll, mit Hilfe von Suppose die relevanten Informationen in einem Report (Textdatei) zu extrahieren und als Tabelle weiterzubearbeiten. Es besteht auch die Möglichkeit, unmittelbar in Suppose Graphiken zu erstellen, welche aber nur sehr beschränkt weiter verwendbar sind.

Modellierung der Verjüngung

Eines der Hauptprobleme bei der Modellierung feuerrelevanter Grössen mit FVS ist die Verjüngung. Keine der beiden relevanten Lokalvarianten (WS für die Sierra Nevada und CR für den Front Range, vgl. *Abbildung 2*) ist in der Lage, natürliche Verjüngung zu simulieren; lediglich die vegetative Vermehrung (Stockausschläge) wird automatisch berechnet. Sowohl für die zukünftige Bestandesentwicklung als auch für das Brandverhalten ist es aber notwendig, Verjüngung ins Modell einzubauen – ansonsten kann ein Bestand rein rechnerisch mit einem einzigen Eingriff feuersicher gemacht werden, weil keine neuen «ladder fuels» mehr von unten nachwachsen können.

Eine Naturverjüngung ist nur in vier von 19 FVS-Varianten (FERGUSON 1997) direkt eingebaut, in allen anderen muss sie durch eine Modellerweiterung speziell generiert werden. Ein denkbarer Ansatz wäre die Verwendung einer «ökologisch ähnlichen» Variante mit Verjüngung, z.B. aus Idaho, anstelle der Sierra-Nevada-/Rocky-Mountain-Variante, wobei Unterschiede im Wuchsverhalten der älteren Bäume mit FVS-internen Kalibrierungsparametern kompensiert werden. Versuche zeigen aber, dass es nicht möglich ist, eine solche Substitution vorzunehmen, welche zeitlich stabil ist. Selbst wenn dies gelingen würde, ist es immer noch nicht zulässig, von einer vergleichbaren Wuchsdynamik des Bestandes auf eine gleiche Verjüngungsdynamik zu schliessen.

Als Lösung bleibt damit nur eine «deterministische» Verjüngung mit Hilfe der FVS-Erweiterung, wobei Art, Individuenzahl, Mortalität, Alter, Grösse und Lichtbedarf (primär unter Schirm/im Freiland) der sich installierenden Bäume explizit angegeben werden. Angesichts der Vielzahl von Faktoren, welche den Erfolg einer Verjüngung beeinflussen, ist klar, dass es sich dabei bestenfalls um ein wahrscheinliches Szenario, nicht aber um die tatsächliche Entwicklung eines Bestandes handelt. Erschwerend kommt hinzu, dass nur sehr spärliche Informationen über die natürliche Verjüngung der Wälder im amerikanischen Westen vorliegen. Oft ist nicht einmal annähernd bekannt, in welcher Bandbreite sich die Individuenzahlen bewegen. Somit ist die Modellierung der Verjüngung höchstens ein «educated guess».

Hier kommt nun ein wesentlicher Vorteil des DBQ-Ansatzes für die Simulation zum Tragen: es ist gar nicht notwendig, genaue Angaben zur Verjüngung zu haben. Solange gewährleistet ist, dass genügend junge Bäume nachwachsen, um die kleinste Durchmesserklasse ausreichend zu bestücken, funktioniert das Modell. Diese Bedingung ist einfach zu erfüllen, da feuersichere Bestände niedrige Basalflächen und Stammzahlen haben. In allen Simulationen ist die notwendige

Stammzahl für die kleinste Durchmesserstufe deutlich unter 1000 Bäumen pro ha. Beim DBQ-Ansatz wird deshalb angenommen, dass immer genügend Verjüngung vorhanden ist. In der Praxis kann allenfalls mangelnde Naturverjüngung durch Pflanzung ergänzt werden.

Neben zu wenig ist auch zu viel Verjüngung ein Problem, da sich daraus neue Brennstoffpools entwickeln können. Die Bewirtschaftungsvorschrift muss in der Lage sein, dies zu verhindern, indem die Dichte (ausgedrückt über Basalfläche oder Stammzahl) der Verjüngung entsprechend reduziert wird, sobald die nachwachsenden Bäume relevant für das Brandverhalten des Gesamtbestandes werden. Dies ist der Fall, wenn sich das Brandverhalten der Verjüngung von jenem der Bodenvegetation (Kraut-, Strauchschicht) unterscheidet – in der Regel ab einer gewissen Baumhöhe. Sowohl das durchmesserbasierte DBQ- als auch das Höhen-schichtmodell sind in der Lage, diese kritische Grösse zu modellieren, indirekt als minimaler BHD oder direkt als minimale Baumhöhe. Alles unter diesem Schwellenwert wird nicht besonders betrachtet, sondern (im Hinblick auf die Branddynamik) gleich behandelt wie die übrige Bodenvegetation.

Visualisierung der Resultate

Graphiken und Tabellen, wie sie FVS liefert, können für Experten genügend aussagekräftig sein. Gerade in Diskussionen mit Laien ist aber eine Grösse wie die Basalfläche oft verwirrend. Mit dem Stand Visualization System (SVS) des US Forest Service (McGAUGHEY 1998) steht ein sehr leistungsfähiges Werkzeug zur Verfügung, um den Resultaten von FVS eine allgemein verständliche Bedeutung zu geben. Dazu wird neben dem normalen FVS-Output-File eine sogenannte «Treelist» erzeugt, die dann mit einem Zusatzprogramm in eine SVS-Treelist umgewandelt wird.

SVS selbst ist eine CAD-basierte Anwendung, welche unter DOS und Windows läuft. Dank der Möglichkeit, alle Zeichenobjekte (in erster Linie natürlich Bäume) zu definieren, können sehr realistische Darstellungen erzeugt werden.

Fallbeispiele

In der Sierra Nevada wurden gut 300 Bestandessimulationen auf der Basis des DBQ-Ansatzes über einen Zeitraum von 150 Jahren oder mehr durchgeführt, welche ein breites Spektrum von Bestandestypen, Beständen, Bonitäten und Behandlungsregimes abdecken. Für die Rocky Mountains war die Zahl der Simulationen auf Grund der vorhandenen Inventurdaten auf 72 beschränkt.

Sierra Nevada

Abbildungen 3 bis 6 zeigen einen Ausschnitt aus den Resultaten von sieben Simulationen für einen Bestand im Plumas National Forest (nördliche Sierra Nevada) über eine Periode von 150 Jahren. Beim modellierten Bestand handelt es sich um ein von *Pinus ponderosa* dominiertes Altholz mit hoher Anfangsdichte (Basalfläche $30 \text{ m}^2 \text{ ha}^{-1}$) im Jahr 1993. Alle sieben Simulationen basieren auf der gleichen DBQ-Verteilung für den BHD-Bereich von 5 bis 76 cm (2 bis 30"); sie unterscheiden sich durch die Eingriffsintensität im BHD-Bereich > 76 cm. Je nach Simulation werden bei jedem Eingriff 0%, 10%, 20%, 40%, 60%, 80% oder 100% aller Bäume mit BHD > d_{max} entfernt (Large Tree Removal Intensity [LTRI]). Eingriffe finden alle zwanzig Jahre statt. Abbildung 7 zeigt die Bestandesstruktur für LTRI 0% und LTRI 40% am Ende der Simulationsperiode.

Rocky Mountain Front Range

Für die Bestände in den Rocky Mountains wird ebenfalls ein DBQ-Modell angewandt, wobei die obere Grenze des Durchmesserbereiches $d_{\text{max}} = 56 \text{ cm}$ (22") festgelegt wird, um den unterschiedlichen Wuchsbedingungen Rechnung zu tragen. Die gesonderte Behandlung der Bäume mit einem BHD > d_{max} fällt weg (d.h. LTRI = 0%). Die Simulationsperiode beträgt 150 Jahre. Auf Grund der ausladenderen Kronen der Bäume in diesem eher kontinental-ariden Gebiet muss die Bestandesdichte (gemessen als Basalfläche) gegenüber der Sierra Nevada weiter verringert werden, um einen Deckungsgrad von 40% zu erzielen. Abbildung 8 zeigt die Entwicklung des Deckungsgrades für zwei DBQ-Verteilungen, die sich hinsichtlich der Parameter N_{dmax} und Q unterscheiden. Eine Verteilung favorisiert eine hohe, die andere eine tiefe Stammzahl. Abbildung 9 visualisiert den Bestand am Ende der Simulationsperiode für die beiden Szenarien.

Diskussion und Interpretation

Sierra Nevada

Die Entwicklung des Vorrates (Abbildung 3) hängt stark von der Behandlung des Starkholzes mit BDH > 76 cm ab. Eine grosse Variabilität ergibt sich besonders im Bereich der Entnahmeintensitäten (LTRI-Werte) bis 40%, während noch stärkere Eingriffe keine wesentlichen Veränderungen mehr bewirken. In allen Fällen stellt sich schliesslich eine Stabilisierung des Vorrates ein, wobei der Eintritt des stabilen Zustandes durch stärkere Eingriffe beschleunigt werden kann.

Die Erntevolumen (Abbildung 4) sind anfänglich sehr hoch, weil die vorhandene Bestockungsdichte weit über dem feuersicheren Zustand liegt, was einen Vorratsabbau erfordert. Danach bleibt der Holzfluss mehr oder weniger konstant, wobei dessen Höhe wiederum von der Eingriffsintensität abhängt. Zusammen mit der Stabilisierung des Volumens deutet dieser konstante Fluss auf ein nachhaltiges Nutzungsmodell hin. Wenn überhaupt nicht im Starkholz eingegriffen wird (LTRI 0%), so geht das Erntevolumen über lange Zeit kontinuierlich zurück und eine Stabilisierung des Holzflusses tritt erst sehr spät und auf tiefem Niveau ein.

Die Entwicklung der Mortalität (Abbildung 5) zeigt sehr deutlich die Folgen einer zu hohen Vorratshaltung, wenn nämlich überhaupt nicht im Starkholz eingegriffen wird. Wenn eine kritische Bestandesdichte nicht überschritten wird, ist die Mortalität vernachlässigbar gegenüber der Entnahme bei den Eingriffen. Wird jedoch die kritische Dichte überschritten, so steigt die Mortalität steil an und entsprechend geht das nutzbare Erntevolumen zurück.

Die Eingriffsintensität hat auch einen kritischen Einfluss auf den Deckungsgrad (Abbildung 6). Das in der Simulation avisierte Ziel eines Deckungsgrades unter 40% kann nur erreicht werden, wenn auch im Starkholz eingegriffen wird.

Die Resultate zeigen, dass in der Sierra Nevada das Behandlungsregime für den Durchmesserbereich $d > d_{\text{max}}$ einen sehr grossen Einfluss auf die Bestandesentwicklung hat. Dieses Muster ist nicht eine Eigenheit des gewählten Beispielbestandes oder des DBQ-Modells, welches der Simulation zugrunde liegt, sondern ein allgemeingültiger Zusammenhang, der bei allen Simulationen in diesem Untersuchungsgebiet feststellbar ist. Im Hinblick auf die Planung von Eingriffen zur Reduktion von brennbarem Material ergeben sich daraus folgende Schlüsse:

- Es ist möglich, mittels Durchforstungen Bestände so zu gestalten, dass sie hinreichend sicher gegen die Ausbreitung von Kronenfeuern sind (Deckungsgrad $\leq 40\%$). Dieser feuersichere Zustand kann durch eine kontinuierliche Bewirtschaftung nachhaltig sichergestellt werden.

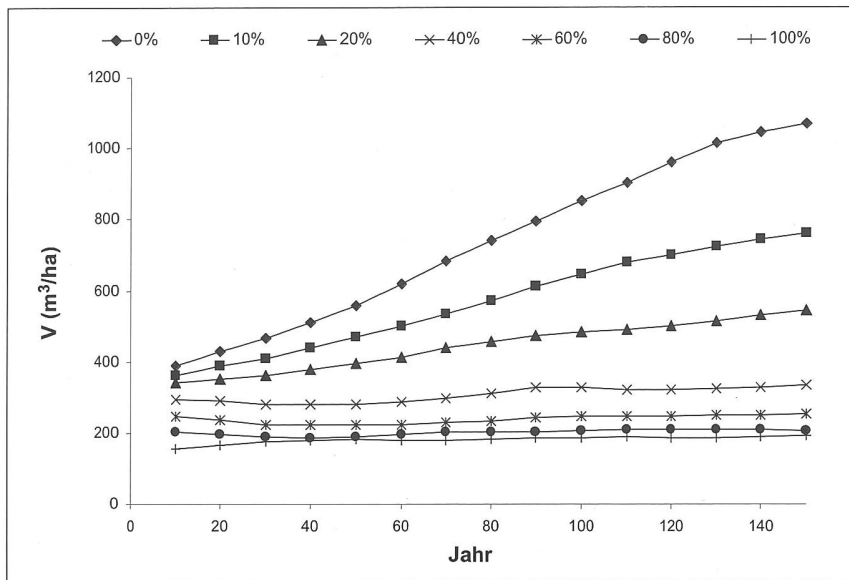


Abbildung 3: Vorratsentwicklung im Fall einer ungleichaltrigen DBQ-Bewirtschaftung. Die verschiedenen Datenreihen zeigen den Anteil der Bäume mit BHD > 76 cm, welche bei jedem Eingriff entfernt werden (Large Tree Removal Intensity [LTRI]).

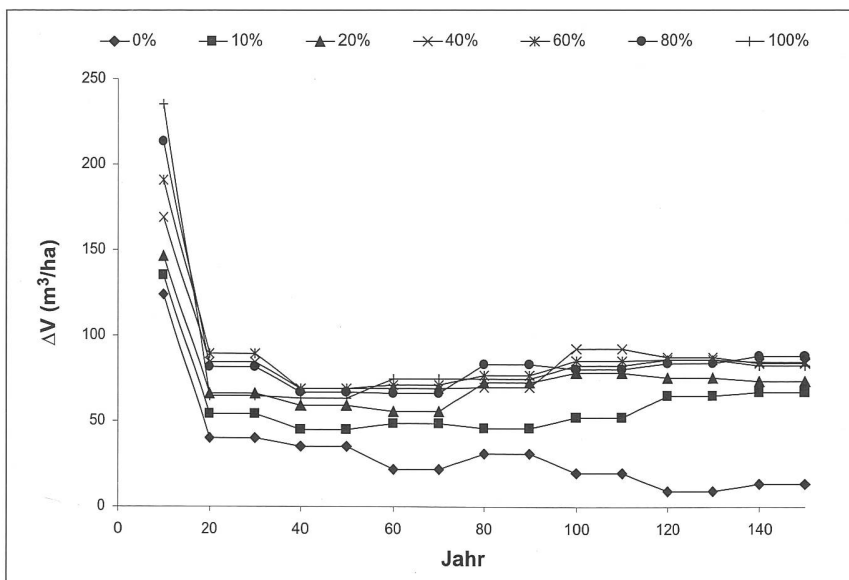


Abbildung 4: Entwicklung des Erntevolumens im Fall einer ungleichaltrigen DBQ-Bewirtschaftung für unterschiedliche LTRI-Behandlungsszenarien. Die Werte sind gleitende Mittel für 10-Jahres-Perioden, die Eingriffe selbst finden im 20-Jahres-Turnus statt.

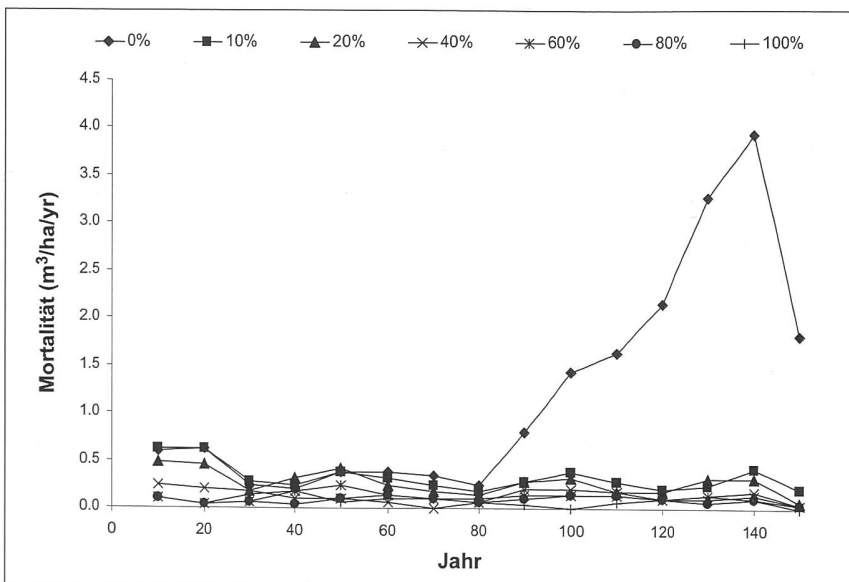


Abbildung 5: Entwicklung der Mortalität für unterschiedliche LTRI-Behandlungsszenarien.

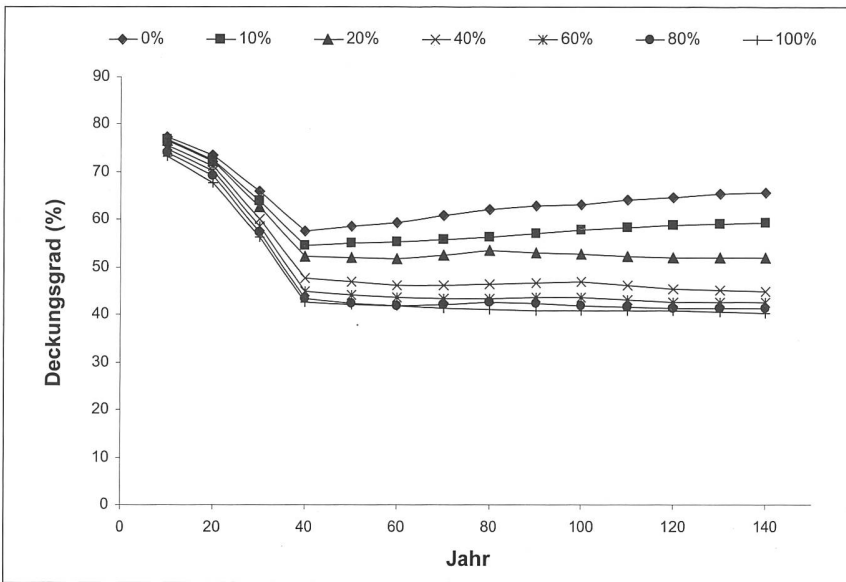


Abbildung 6: Kronendeckungsgrad für unterschiedliche LTRI-Behandlungsszenarien. Bestände mit einem Deckungsgrad > 40% sind durch Kronenfeuer bedroht.

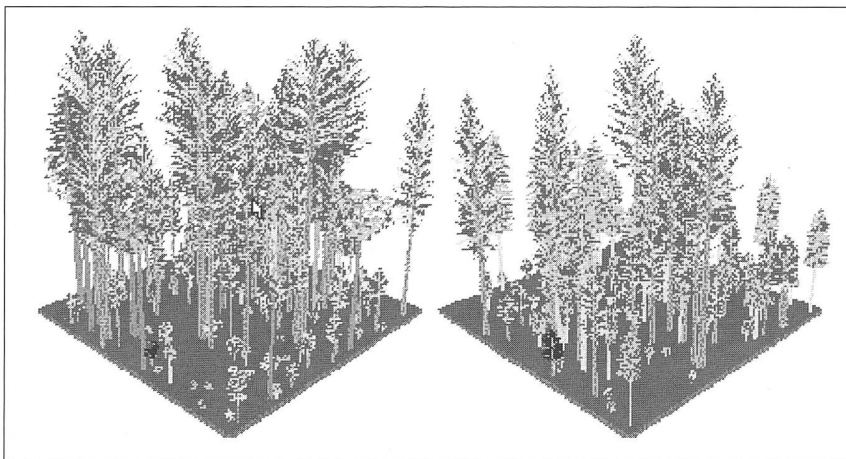


Abbildung 7: Visualisierung eines Bestandes im Plumas National Forest (Sierra Nevada, California) am Ende der Simulationsperiode von 150 Jahren. Linkes Bild: ohne Entnahme von Bäumen > 76 cm BHD (LTRI 0%). Rechtes Bild: mit Entnahme von 40% der Bäume > 76 cm BHD alle 20 Jahre.

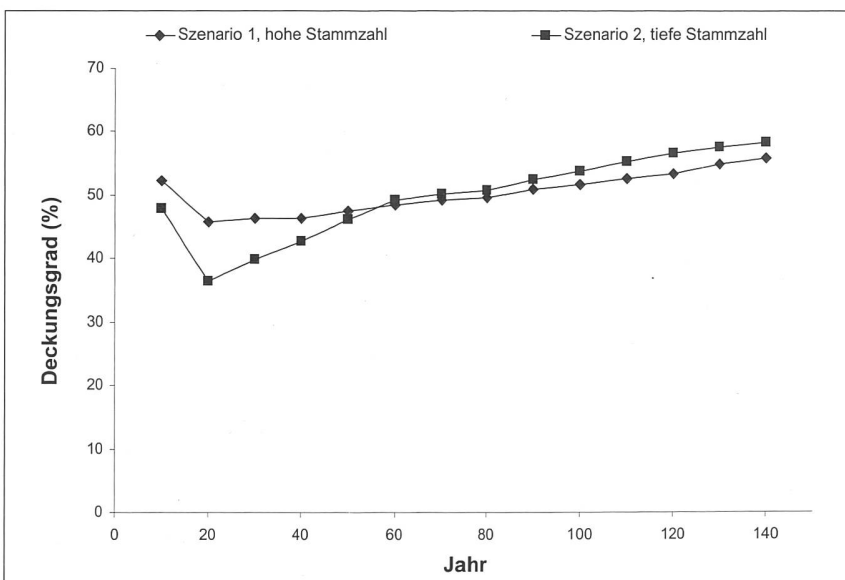


Abbildung 8: Kronendeckungsgrad im Manitou Experimental Forest (Colorado) für zwei Szenarien mit ungleichaltrigem Bewirtschaftungsregime. Szenario 1 favorisiert eine tiefe, Szenario 2 eine hohe Stammzahl.

- Ein Betriebsmodell mit ungleichaltrigen Beständen (vergleichbar mit Einzel- oder Gruppenplenterung) ist als Basis für die Brennstoffbewirtschaftung besonders gut geeignet, weil es die Schaffung der gewünschten Diskontinuitäten im oberen Kronendach begünstigt. Unklar ist jedoch, ob sich ein solches Betriebsmodell in der Praxis auch überall implementieren lässt.
- Die notwendigen Hilfsmittel zur Planung der Durchforstungseingriffe sind verfügbar und mit wenigen Ausnahmen allgemein zugänglich.
- Es ist nicht immer möglich, das mathematische DBQ-Stammzahlabnahmehmodell über das ganze Durchmesserpektrum anzuwenden, 1) weil zu tiefe Q-Werte erforderlich würden (ergibt extrem flache Abnahmekurve), oder 2) weil Beschränkungen in der Bewirtschaftung bestehen (z. B. zum Schutz von Habitaten). In solchen Fällen muss der Langzeitentwicklung des Gesamtbestandes besonderes Augenmerk geschenkt werden.
- Ein generelles Verbot der Entnahme von Starkholzbäumen (> 76 cm BDH), wie es z. B. oft zum Schutz von Habitaten gefordert wird, führt längerfristig zur Ausbildung einer Kronenschicht mit hinreichender Dichte, um Kronenfeuer zu propagieren. Solche Brände haben vollständige Mortalität und damit potentiell den Verlust der Habitatsfunktion zur Folge.
- Durchforstungseingriffe nach dem hier vorgestellten Konzept können erhebliche Mengen handelbarer Holzprodukte (Sägerundholz, Papierholz) generieren, deren Absatz die Kosten der Eingriffe in vielen Fällen decken werden. Solche Erlöse fallen weg, wenn andere Methoden zur Brennstoffreduktion verwendet werden.

Die wichtigste Folgerung aus den Simulationsresultaten der Sierra Nevada ist aber keineswegs neu. Einmal mehr zeigt sich, dass ein erheblicher Unterschied zwischen dynamischer und statischer Betrachtung von Waldbeständen besteht. Die wichtigsten Ziele einer bestimmten statisch motivierten Bewirtschaftungsvorschrift können längerfristig durch dieselbe Vorschrift kompromittiert werden, wenn der Waldentwicklungsdynamik nicht genügend Rechnung getragen wird.

Rocky Mountain Front Range

Die Entwicklung des Deckungsgrades (Abbildung 8) zeigt die anfängliche Vorratsreduktion sehr deutlich, und es gelingt, den Bestand in einen feuersicheren Zustand zu überführen. Nach dieser Anfangsphase steigt aber die Bestandesdichte im oberen Kronenraum wieder kontinuierlich, und es findet im Verlaufe der Simulationsperiode keine Stabilisierung statt. Es ist sogar so, dass das Szenario mit dem anfänglich tieferen Deckungsgrad im Verlaufe der Zeit zum dichteren Bestand führt. Mit dem simulierten Eingriffskonzept kann also keine nachhaltige Feuersicherheit gewährleistet werden.

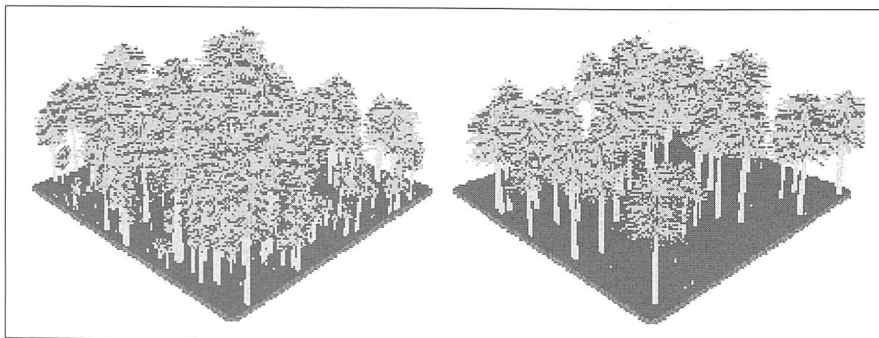


Abbildung 9: Visualisierung eines Bestandes im Manitou Experimental Forest (Rocky Mountain Front Range, Colorado) am Ende der Simulationsperiode von 150 Jahren. Linkes Bild: Szenario 1, hohe Zielstammzahl. Rechtes Bild: Szenario 2, tiefe Zielstammzahl.

In den Rocky Mountains sind die maximalen Durchmesser wesentlich tiefer als in der Sierra Nevada (meist < 60 cm), und es ist möglich, das DBQ-Modell über das ganze Durchmesserpektrum des aktuellen Bestandes anzuwenden. Dass die Simulationsresultate trotzdem keine Stabilisierung zeigen, kann verschiedene Ursachen haben:

- Die Ausgangsbestände sind weit von einer idealen Durchmesserverteilung entfernt. In einigen Durchmesserklassen bestehen grosse Stammzahlüberhänge, während in anderen Defizite vorhanden sind. Besonders ausgeprägte Lücken können sich über sehr lange Zeit bemerkbar machen, und ein potentielles Gleichgewicht (in der Abwesenheit von Störungen wie Schneedruck, Insektenkalamitäten oder Stürmen) stellt sich erst später ein.
- Die verwendete FVS-Variante hat im Vergleich zur Sierra Nevada eine wesentlich ausgeprägtere Zufallskomponente, welche die Mortalität und das Aufkommen von Verjüngung beeinflusst.
- Das reine DBQ-Modell ist auch im Falle des Front Range nicht in der Lage, einen stabilen Zustand zu erzeugen, wenn keine Bäume entfernt werden, deren BHD > d_{max} ist.

Sollte eine ungünstige Ausgangsverteilung die Hauptursache für die Instabilität sein, so müsste sich auf Grund der regelmässigen stabilisierenden Eingriffe zumindest ein Trend zur Konvergenz des Deckungsgrades feststellen lassen. Dies ist nicht der Fall. Läge dagegen der Grund beim zufälligeren Verhalten des Wuchsmodelles, so müsste sich dies in einem Rauschen in der Zeitreihe niederschlagen. Somit bleibt als Erklärung nur, dass auch in den Rocky Mountains die Bäume mit $BHD \geq d_{max}$ längerfristig zu Problemen führen. Zusätzliche, aus Platzgründen hier nicht dargestellte Simulationen, bei denen (wie im Fall der Sierra Nevada) ein Teil der Starkholzbäume entfernt wurde, zeigen denn auch eine Stabilisierung der Bestandesgrössen wie Vorrat oder Erntevolumen. Somit besteht auch hier die Tendenz zur Entwicklung überdichter Bestandesstrukturen, wenn im Starkholz nicht eingegriffen wird. Offensichtlich ist also im ganzen amerikanischen Westen neben dem Problem der «ladder fuels» auch die Behandlung der stärksten Bäume kritisch für die Entwicklung der Brandsicherheit von Waldbeständen, und Bewirtschaftungskonzepte zur Reduktion von brennbarem Material müssen diesen Aspekt berücksichtigen.

Kombination mit weiteren Planungsfaktoren

Das Waldbrandrisiko ist in den beiden Untersuchungsgebieten sicher eine der wichtigsten Planungsgrössen, aber auch die Auswirkungen auf das Wasserregime, die Habitatsfunktion, den Erholungswert und die Holzproduktion müssen bei der Bewirtschaftungsplanung mitberücksichtigt werden. Daneben gilt es, den einzelnen Eingriff nach wirtschaftlichen, technologischen und ökologischen Kriterien zu charakterisieren.

Ein Ziel der vorliegenden Studie war, eine Methodik zur Planung von Eingriffen zur Reduktion von brennbarem Material zu entwickeln, welche sich sinnvoll mit andern Planungen kombinieren lässt. Die Verwendung der Standardapplikation FVS erlaubt eine weitgehend nahtlose Einbindung in einen Planungszyklus. FVS gene-

riert z.B. direkt Angaben über die Arten- und Sortimentsverteilung der Durchforstungsprodukte und kann damit für die Arbeits- und Absatzplanung eingesetzt werden. Die Kosten von Durchforstungen in *Pinus-ponderosa*-Beständen können mit einem seit kurzem verfügbaren Programm abgeschätzt werden, womit auch eine Finanzplanung möglich ist. Sofern es möglich ist, andere Aspekte wie die Eignung als Habitat auf Grund der Bestandesstruktur und -zusammensetzung zu evaluieren, kann FVS hierzu ebenfalls eingesetzt werden.

Offene Fragen

Das hier vorgestellte Vorgehen basiert weitgehend auf einer relativ abstrakten Formulierung der Dynamik von Waldbränden. Es ist sicher nötig, die Zusammenhänge zwischen Bestandesstruktur und Brandverhalten eingehender zu untersuchen, vor allem auch im Hinblick auf die ökologischen Auswirkungen von Feuern auf verschiedene Baumarten und den Wald als Ganzes.

Erheblicher Forschungsbedarf besteht ferner bei der Verjüngung von Waldbeständen. Hier muss primär die Dynamik einer ungestörten Naturverjüngung besser geklärt werden. Daneben ist aber auch von Interesse, wie externe Faktoren (z.B. Weidegang) die Bestandesstruktur im Hinblick auf das Brandverhalten beeinflussen.

Schliesslich sind die Auswirkungen der Bewirtschaftungseingriffe von brennbarem Material auf andere Waldfunktionen und die gesamte Bewirtschaftungsstrategie zu untersuchen. In erster Linie geht es dabei darum, die negativen Effekte zu minimieren und gleichzeitig das Verhältnis von Ertrag zu Aufwand möglichst optimal zu gestalten. Dazu sind Untersuchungen über die Produktivität verschiedener Technologiesysteme für die Eingriffe nötig.

Zusammenfassung

Brandbekämpfung und ungeeignete Bewirtschaftung haben in vielen Wäldern des amerikanischen Westens zu sehr dichten, brandanfälligen Bestandesstrukturen geführt. Mit Hilfe von Massnahmen zur Reduktion von brennbarem Material soll versucht werden, dieses Risiko zu reduzieren und langfristig tief zu halten. Die vorliegende Studie zeigt, wie solche Eingriffe mit Hilfe des Forest Vegetation Simulators (FVS), einer Standardapplikation des US Forest Service, geplant werden können. Als Ansatz wird eine ungleichaltrige Struktur des Zielbestandes, ein sogenanntes DBQ-Modell gewählt. Es wird gezeigt, wie sich zu restriktive Vorschriften zur Bewirtschaftung langfristig kontraproduktiv auf die Brandsicherheit und andere Waldfunktionen auswirken können. Die simulierte Bestandesentwicklung kann mit dem Stand Visualization System (SVS) bildlich dargestellt werden.

Résumé

Simulation de l'accroissement et visualisation des peuplements en vue de réduire le matériel inflammable: un exemple de l'Ouest des Etats-Unis

La lutte contre les incendies et une exploitation impropre ont créé des peuplements denses et sensibles aux incendies dans de nombreuses forêts de l'Ouest des Etats-Unis. La réduction du matériel inflammable vise à diminuer ce risque. L'article présente une méthode pour la planification de ces interventions à l'aide du Forest Vegetation Simulator (FVS) de l'US Forest Service. Les interventions sont basées sur un régime inéquienne

(modèle DBQ). Une exploitation trop restrictive mène à long terme à une augmentation du risque des incendies et met de ce fait les autres fonctions de la forêt en danger. Le développement des peuplements peut être visualisé à l'aide du Stand Visualization System (SVS).

Summary

Growth Simulation and Stand Visualization as Tools for Fuel Treatment Planning: a Case Study from the Western US

Fire fighting and inappropriate management led to stands with high density and sensitivity to fire in many forests of the American West. Fuel treatments aim at reducing this risk and maintaining it on a low level. The present study shows how fuel treatments can be planned using the US Forest Service's Forest Vegetation Simulator (FVS). The treatments are based on the uneven-aged DBQ approach. It is shown that restrictive management prescriptions can lead to a decline in fire resilience in the long term and thus threaten other forest functions. The simulated stand development can be illustrated using the Stand Visualization System (SVS).

Literaturverzeichnis

- AGEE, J.K. (1996): The influence of forest structure on fire behavior. In: Proceedings of the 17th Annual Forest Vegetation Management Conference: 52-68.
- AGEE, J.K. et al. (1998): The use of fuelbreaks in landscape fire management. Draft. Nicht veröffentlicht.
- ALEXANDER, M.E. (1982): Calculating and interpreting forest fire intensities. Canadian Journal of Botany 60: 349-357.
- ALEXANDER, R.R. und EDMISTER, C.B. (1977): Regulation and control of cut under uneven-aged management. Res. Pap. RM-182. Ft. Collins, CO. USDA Forest Service Rocky Mountain Research Station.
- BROWN, J.K. (1978): Weight and density of crowns of Rocky Mountain conifers. USDA Forest Service Research Paper INT-197. Ogden, UT: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Intermountain Research Station.
- CROOKSTON, N.L. (1990): User's guide to the event monitor: part of prognosis model version 6. USDA Forest Service General Technical Report INT-275.
- CROOKSTON, N.L. (1997): Suppose: An Interface to the Forest Vegetation Simulator. In: TECK, R.; MOEUR, M.; ADAMS, J. (1997): Proceeding: Forest vegetation simulator conference. 1997 February 3-7, Fort Collins, Co. Gen. Tech. Rep. INT-GTR-373. Ogden, UT: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Intermountain Research Station.
- FEENEY, S.R. et al. (1998) Influence of thinning and burning restoration treatments on presettlement ponderosa pines at the Gus Pearson Natural Area. Canadian Journal of Forest Research 28: 1295-1306.
- FERGUSON, D.E. (1997): Regeneration models for FVS variants. In: TECK, R.; MOEUR, M.; ADAMS, J. (1997): Proceeding: Forest vegetation simulator conference. 1997 February 3-7, Fort Collins, Co. Gen. Tech. Rep. INT-GTR-373. Ogden, UT: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Intermountain Research Station.
- FMSC (1999): FVS Model structure and execution. <http://www.fs.fed.us/fmscfvstructure.html>.
- HOLZ, H.A. et al. (1979): Equations for estimating biomass and leaf area of plants in the Pacific Northwest. Forest Research Lab Research Paper 41. Oregon State University. Corvallis, OR.
- GUTH, A.R. (1989): Red skies of '88: the 1988 forest fire season in the Northern Rockies, the Northern Great Plains and the greater Yellowstone area. Pictorial Histories Pub. Co, Missoula, MT.
- HIRSCH, K.G. et al. (1998): Using expert judgment to model initial attack fire crew effectiveness. Forest Science 44 (4): 539-549.
- MCGAUGHEY, R.J. (1998): Stand visualization system. USDA Forest Service Pacific Northwest Research Station General Technical Report. Electronic distribution version February 17, 1998.

- OLSON, R. (1997): Appraising a forest fuel treatment: The DFPZ concept. Lassen National Forest. Nicht veröffentlicht.
- RIDEOUT, D.B.; OMI, P.N. (1995): Estimating the cost of fuels treatment. *Forest Science* 41: 664–674.
- RITCHIE, M.W.; HANN, D.W. (1997): Evaluation of individual-tree and disaggregative prediction methods for Douglas-fir stands in western Oregon. *Canadian Journal of Forest Research* 27: 207–216
- ROTHERMEL, R.C. (1998): Mann Gulch fire: a race that couldn't be won. <http://www.fs.fed.us/intro/mangulch/rothdem2.html>
- SNEP (1996): Fire and fuels. In: Sierra Nevada ecosystem project. Final report to Congress, p. 61–71. UC Davis. Davis, CA.
- TECK, R. *et al.* (1998): The forest vegetation simulator: A decision-support tool for integrating resource science. <http://www.fs.fed.us/fmssc/fvsdesc.htm>.
- VAN WAGNER, C.E. (1977): Conditions for the start and spread of crown fire. *Canadian Journal of Forest Research* 7: 23–34.
- VAN WAGTENDONK, J.W. (1996): Use of a deterministic fire growth model to test fuel treatments. Sierra Nevada ecosystem project final report to Congress Vol. II: 1155–1165.
- WEATHERSPOON, C.P., SKINNER, C.N. (1996): Landscape-level strategies for forest fuel management. Sierra Nevada ecosystem project final report to Congress Vol. II: 1471–1492. UC Davis. Davis, CA.
- WYKOFF, W.R. *et al.* (1982): User's guide to the stand prognosis model. USDA Forest Service General Technical Report INT-133. Ogden, UT: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Intermountain Research Station.

Verfasser:

Dr. KURT HOLLENSTEIN, dipl. Forst-Ing. ETH, Professur Forstliches Ingenieurwesen, ETH Zentrum, 8092 Zürich.