

Veränderungen des Blattflächenindex als Kronenreaktion nach Durchforstungen: methodische Aspekte und Beispiel eines Kastanienwaldes im Tessin

Patrick Schleppe¹, Marco Conedera², Fulvio Giudici³, Andreas Zingg¹

¹ Eidgenössische Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft (WSL), CH-8903 Birmensdorf

² Istituto federale di ricerca per la foresta, la neve e il paesaggio (WSL), CH-6500 Bellinzona

³ Federlegno Ticino, CH-6802 Rivera

Einleitung

In der Südschweiz ist die Edelkastanie (*Castanea sativa* Mill.) eine sehr verbreitete Baumart, die auch reine Bestände bildet. Viele davon sind frühere Niederwälder, die verlassen wurden, weil die Produktion von Sortimenten kleiner Dimensionen nicht mehr rentiert (GIUDICI *et al.* 2000). Die Produktion von Wertholz aus solchen Wäldern wäre ökonomisch interessant, muss aber zwei wichtige Herausforderungen bewältigen. Erstens tendiert das Kastanienholz zur Ringschäligkeit (Zerfall entlang der Jahrringe), was dessen Verwendung bei mittleren bis grossen Sortimenten stark beeinträchtigen kann (BOURGEOIS 1992). Zweitens wachsen nach einem Schlag viele Stockausschläge, und daraus können sich starke Bäume nur dann entwickeln, wenn konsequent durchforstet wird. Mehrmalige Durchforstungen wären üblich, können aber Wachstumsschübe hervorrufen, die zu mechanischen Spannungen im Holz und damit zur Ringschäligkeit führen. Ein konstant starkes Wachstum ist also wünschenswert, weil es mechanische Spannungen im Holz vermindert (FONTI *et al.* 2002). Entsprechende waldbauliche Techniken werden gegenwärtig entwickelt, unter anderem in der hier aufgeführten Studie.

Allgemein besteht das Hauptziel einer Durchforstung darin, das Wachstumspotential eines Bestandes auf weniger Bäume zu konzentrieren. Damit das Potential selber nicht übermässig darunter leidet, sollte der Bestand sich schnell wieder schliessen, und die Blattfläche wieder einen optimalen Wert für die Photosynthese erreichen. Um diese Prozesse zu quantifizieren, bietet sich die Ermittlung des Blattflächen-Indexes aus hemisphärischen Bildern an. Mit der breiten Verfügbarkeit von digitalen Fotoapparaten erfuhr diese Technik in den letzten Jahren eine markante Ausbreitung.

Der Blattflächenindex (BFI, oder LAI für "leaf area index") entspricht der einseitigen Blätterfläche pro Einheit Bodenoberfläche. Er ist ein wichtiger Parameter einer Bestandesstruktur, da er die aktive Schnittstelle zwischen der Atmosphäre und dem Ökosystem darstellt, welche die Prozesse der Photosynthese, Niederschlagsinterzeption, Evapotranspiration und Deposition von Luftschadstoffen kontrollieren. Deshalb wird der BFI als Eingangsgrösse in den meisten Modellen von Ökosystemprozessen benötigt, die Kohlenstoff- und Wasserkreisläufe auf Bestandes- oder regionalen Ebene simulieren (e.g. RUNNING & COUGHLAN 1988).

Das BFI kann durch direkte oder indirekte Messmethoden ermittelt werden (siehe Übersichtarbeit durch BRÉDA 2003). Alle Blätter des Bestands für eine direkte Messung vom BFI zu sammeln, ist eine destruktive Methode, die normalerweise für Acker-Kulturen und für Grünland angewendet wird. Sie ist jedoch sehr zeitaufwendig und wird deshalb in Waldbeständen kaum gebraucht. In Laubwäldern wird die Sammlung der abfallenden Streu im Allgemeinen als eine genaue Methode erachtet, die jedoch auch sehr arbeitsaufwendig ist. Deshalb wurden Techniken entwickelt, um den BFI von Beständen indirekt aus der Lichttransmission durch die Kronen zu schätzen (ANDERSON 1971; ROSS 1981). Bei diesen Techniken wird aus einzelnen Punkten unterhalb der Kronen die Transmission von Streulicht aus dem Himmel über einem gewissen Blickfeld gemessen. Solche Messungen werden mit einem spezifischen Sensor wie der LAI-2000 (plant canopy analyser, Licor, Lincoln, NE, USA) oder durch die Analyse von Bildern, die mit einer Fischaugen-Linse aufgenommen wurden, durchgeführt. In beiden Fällen wird das gegen oben gerichtete Blickfeld in Ringe aufgeteilt und analysiert. Jeder Ring entspricht einem Winkel-Bereich um den Zenith. Der Zenithwinkel θ wird bei den Berechnungen zweimal gebraucht, da er sowohl die Durchgangsdistanz des Lichtes durch die Kronen als auch den Winkel der Blätter relativ zur Sicht-Richtung beeinflusst. Im ersten Fall ist θ nur auf flachem Grund bestimmend. An einem Hang muss der Einfallswinkel gebraucht werden, d.h. der Winkel zu einer rechtwinkligen (normalen) Linie zum Boden. Dieser Einfallswinkel wird nachfolgend als γ bezeichnet.

Weltweit wachsen 27 % der Wälder in Berggebieten (KÖRNER & OHSAWA 2006). Kastanienwälder in der Südschweiz wachsen z. B. auch meistens in Hanglagen. Trotz dieser Tatsache wurde das Problem der Hangneigung für die indirekte Messung vom BFI in Wäldern erst vor wenigen Jahren untersucht, sei es für hemisphärische Sensoren (WALTER & TORQUEBLAU 2000; SCHLEPPE *et al.* 2007) oder für Geräte, die die Interzeption des Sonnenlichts messen, so genannten Ceptomatern (DUURSMA *et al.* 2003). Mit einem Messgerät wie dem LAI-2000 ist es möglich, den Sensor für die Messungen entweder horizontal oder parallel zum Boden zu halten. Es ist jedoch nicht möglich, die Lichttransmission als Funktion von beiden Winkeln θ und γ gleichzeitig zu messen. In hemisphärischen Bildern hingegen wird die gesamte sichtbare Kronenstruktur aufgenommen, so dass für jede Sicht-Richtung sowohl θ wie auch γ feststehen. Solche Bilder enthalten also die nötige Information, um den BFI trotz Hangneigung erwartungstreu zu schätzen.

Das Ziel dieses Beitrages ist, die Anwendung einer neuen Methode darzustellen, die die Schätzung des BFI aus hemisphärischen Bildern bei Hanglagen ermöglicht. Daraus soll die Wirkung einer Durchforstung auf die

Blattfläche eines Kastanienwaldes dokumentiert und im Hinblick auf die Produktion von Wertholz diskutiert werden.

Theorie

Flaches Gelände

Die Lichttransmission durch eine ideale Krone wird im Allgemeinen als Funktion des Zenithwinkels θ beschrieben (NILSON 1971):

$$G(\theta) L = K(\theta) = -\ln T(\theta) \cos \theta, \quad \theta < \frac{\pi}{2} \quad (1)$$

L ist der (einseitige) Blattflächen-Index. $G(\theta)$ ist die durchschnittliche Projektionsrate der Blätter im Zenithwinkel θ , welche eine Funktion der statistischen Aufteilung der Blattneigungswinkel ist. $T(\theta)$ ist die Transmission beim Zenithwinkel θ . $K(\theta)$ wird Kontaktzahl genannt und stellt die mittlere Kontaktzahl dar, die das Licht beim Durchdringen durch die Krone beim Zenithwinkel θ bezogen auf die Kronenmächtigkeit vollziehen würde (die Anzahl der Kontakte für den Durchgang durch den gesamten Bestand wäre $K(\theta) / \cos \theta$).

Auf hemisphärischen Bildern, die in Richtung des Zeniths aufgenommen werden, kann θ als Funktion der Distanz von einem Pixel zum Zentrum des Bildes berechnet werden:

$$\theta = f\left(\frac{r}{R}\right) \frac{\pi}{2} \quad (2)$$

r ist die Distanz zum Zentrum und R ist der Radius des Kronenbildes, d.h. die Distanz vom Zenith zum Horizont. f ist eine monoton wachsende Funktion, welche die durch die Fischaugen-Linse produzierte Geometrie der Bilder mit $f(0)=0$ and $f(1)=1$ beschreibt.

Die Lichttransmission würde in diesem Modell (Gleichung 1) eine stetige Funktion von θ sein. In Wirklichkeit aber besteht sie auf diskreten Messungen, an die die Modell-Parameter so gut als möglich angepasst werden müssen. K wird deshalb zuerst für jeden Ring geschätzt, d.h. für bestimmte Bereiche von Zenithwinkeln. Ein Messgerät wie der LAI-2000 misst zum Beispiel über 5 Ringe von je ungefähr 15° . Ringe von verschiedenen Breiten können auch als Berechnungsbasis für hemisphärische Bilder gebraucht werden. In diesem Falle wird das Bild als Matrix von schwarzen und weissen Pixel analysiert. Dabei muss beachtet werden, dass jeder Ring gross genug sein muss, um das Fehlen von weissen Pixel zu vermeiden, was zu $T(\theta)=0$ führt und demzufolge ein undefiniertes $K(\theta)$ ergeben würde. Sind einmal die $K(\theta)$ -Werte berechnet, können sie eingesetzt werden, um normalerweise in einem iterativen Prozess L und die Parameter der Blattwinkel-Verteilung $G(\theta)$ gemeinsam zu schätzen. Entsprechende Modelle und Methoden wurden in verschiedenen kürzlich erschienenen Publikationen beschrieben und verglichen (Bréda, 2003; Weiss *et al.*, 2004).

Hanglage

Gleichung 1 ist nur gültig für Bestände in der Ebene. Im Gelände mit einem Neigungswinkel v , wenn der Sensor horizontal gehalten wird, geht das Licht talwärts im Vergleich zu bergwärts einen kürzeren Weg durch die Krone. Demzufolge erscheint die Krone talwärts blickend heller, jedoch in Richtung Berg dunkler und wenn der Boden erreicht ist, findet keine Lichttransmission mehr statt (Abb. 1). Der Zenithwinkel θ in Gleichung 1 muss somit auf der rechten Seite durch den Einfallswinkel γ ersetzt werden. Dies ergibt folgende Gleichung:

$$G(\theta) L = K(\theta) = -\ln T(\theta, \gamma) \cos \gamma, \quad \theta < \frac{\pi}{2}, \quad \gamma < \frac{\pi}{2} \quad (3)$$

Der Winkel γ kann durch 3-dimensionale Trigonometrie aus Azimut- und Zenithwinkel sowie aus der Orientierung und dem Neigungswinkel berechnet werden (Walter & Torquebiau 2000) (Abb. 2):

$$\gamma = \arccos(\cos \theta \cos v + \sin \theta \cos(\varepsilon - \varphi) \sin v) \quad (4)$$

v ist der Neigungswinkel, ε ist das Azimut vom analysierten Punkt (dem entsprechenden Pixel auf dem Bild) und φ ist die Exposition, d.h. das Azimut in Fallrichtung.

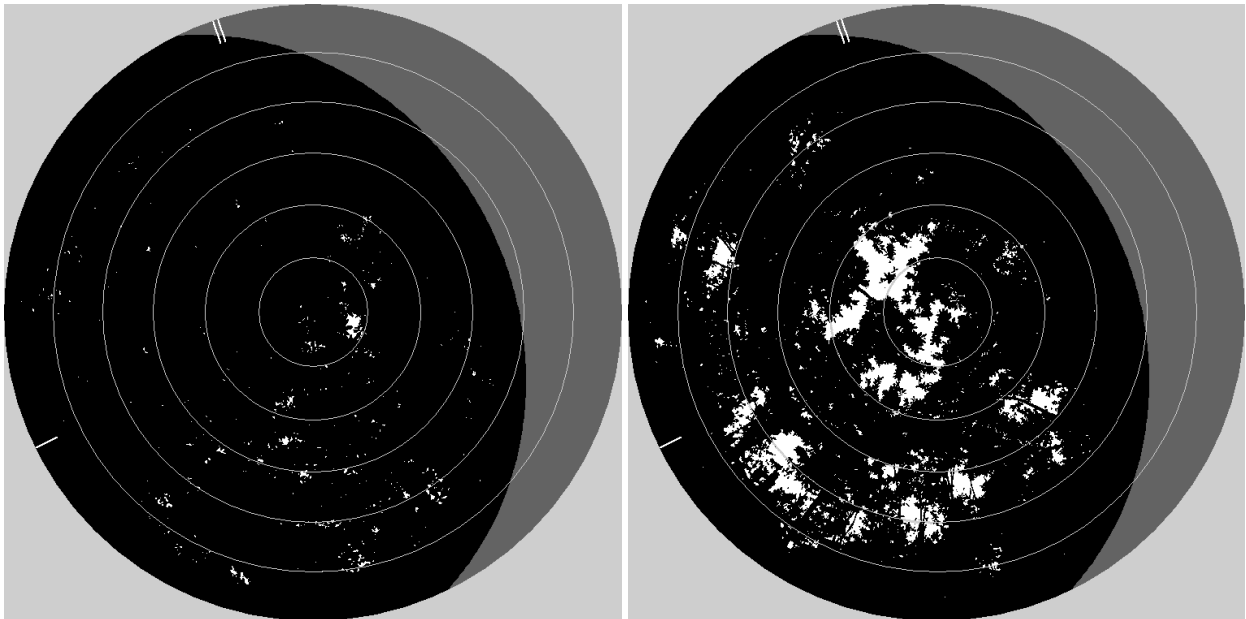


Abbildung 1: Beispiele hemisphärischer Photographien aus Bedano mit einer Hangneigung von 34° . Die Striche oben links zeigen den Norden (magnetisch and geographisch). Der Boden wird Halbmondförmig grau dargestellt; demgegenüber zeigt ein Strich die Exposition (Ost = bergab). Unter Betrachtung der Neigung ergibt die linke Photographie (Kontrolle) einen BFI von 6,36 und einen mittleren Blattwinkel von 50° , sonst aber nur 4,81 bzw. 16° . Beim Bild rechts (Durchforstung A, "Einzelbaum") betragen diese Werte 3,26 und 50° , bzw. nur 2,86 und 24° , wenn die Hangneigung vernachlässigt wird.

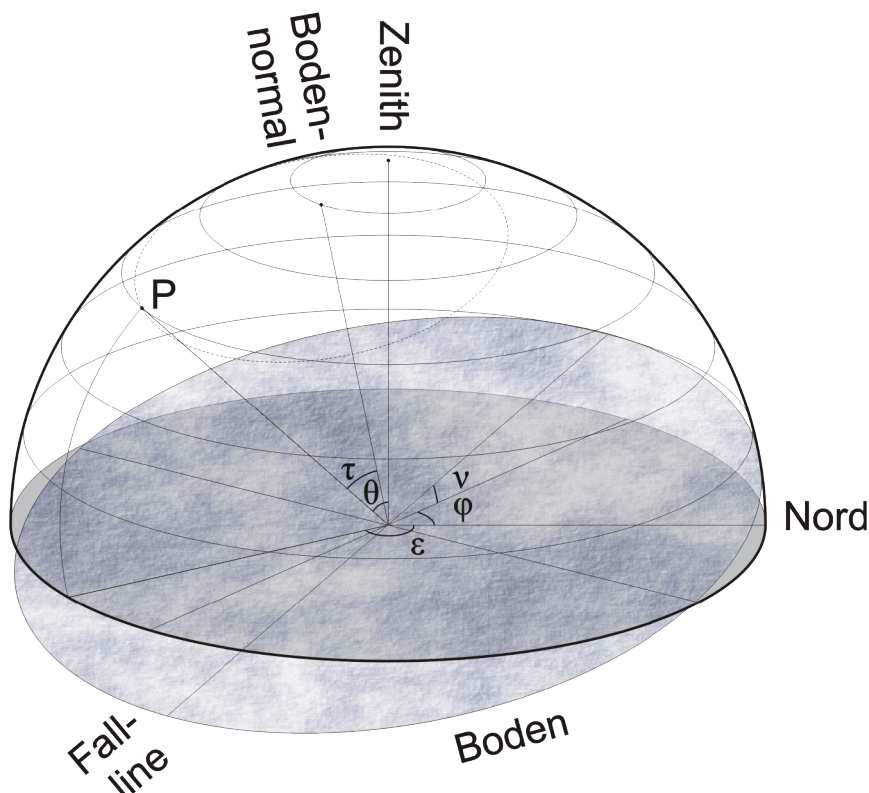


Abbildung 2: Geometrie der hemisphärischen Photographie in einem Hang. Der Punkt P zeigt eine beliebige Richtung über den Photoapparat (und über dem Boden). Die Winkel werden wie folgt gekennzeichnet: v = Hangneigung, φ = Exposition, ε = Azimut von P, θ = Zenithwinkel von P, γ = Einfallswinkel von P

Durch die Gleichungen 3 und 4 wird jedes Pixel auf dem Bild einer Kombination von θ und γ Winkel zugeordnet. Schwarze und weisse Pixel können demnach entsprechend als zwei-dimensionale Matrizen nach θ and γ gezählt werden. Theoretisch wäre es möglich, eine Kontaktzahl K für jede Matrixzelle zu berechnen und danach ein gewichtetes Mittel über die θ -Ringe zu berechnen. Die Doppelklassifizierung nach θ and γ kann aber Sektoren mit

sehr wenigen Pixeln erzeugen. Dies erhöht die Wahrscheinlichkeit stark, dass einige dieser Sektoren vollständig schwarz sind, was die Berechnung der Transmission und der Kontaktzahl unmöglich macht. Dies ist eine ähnliche Einschränkung wie wir sie beim Aufteilen von Zenithringen in Azimutsektoren (WALTER & TORQUEBLAU 2000; WALTER *et al.*, 2003) vorfinden.

Da die Grösse $\ln T(\theta, \gamma)$ in Gleichung 3 oft unmöglich zu berechnen ist, suchten wir eine Möglichkeit um $K(\theta)$ dafür, einen ganzen Ring zu erhalten, ohne die einzelnen $\ln T(\theta, \gamma)$ Werte zu benötigen (Schleppi *et al.*, 2007). Bei einem ersten Ansatz kann das Problem umgedreht werden, in dem man die Transmission der ganzen Ringe als Funktion von $K(\theta)$ rechnet:

$$T(\theta) = \frac{\sum_{\gamma} A(\theta, \gamma) e^{-K(\theta) / \cos \gamma}}{\sum_{\gamma} A(\theta, \gamma)} \quad (5)$$

$A(\theta, \gamma)$ ist der Raumwinkel der Überschneidung zwischen einem normalen (γ) und einem Zenith (θ) Ring. Da wir für diese Aufsummierung innerhalb eines θ -Ringes bleiben, kann der Effekt der Linsen-Geometrie (Gleichung 2) ignoriert werden und die Anzahl der Pixel gibt eine gute Schätzung von $A(\theta, \gamma)$.

Beginnend bei der Transmission eines ganzen Ringes $T(\theta)$ ist es möglich, eine erste Schätzung von $K'(\theta)$ zu machen, indem Gleichung 1 angewendet wird, um danach die erwartete Transmission $T'(\theta)$ gemäss Gleichung 5 zu berechnen. Die Nicht-Linearität im Verhältnis zwischen Transmission und Kontaktzahl verursacht, dass $T'(\theta) \neq T(\theta)$. Das Verhältnis der Logarithmen wird benutzt, um eine bessere Schätzung zu berechnen:

$$K''(\theta) = K'(\theta) \frac{\ln T(\theta)}{\ln T'(\theta)} \quad (6)$$

Der nächste iterative Schritt besteht aus dem erneuten Gebrauch von K'' in Gleichung 5 und vom entsprechenden T'' in Gleichung 6. Dieses iterative Verfahren ermöglicht bereits nach wenigen Schleifen ein geschätztes $K(\theta)$ zu erhalten, welches mit genügender Genauigkeit dem gemessenen $T(\theta)$ entspricht.

Die beschriebene Methode korrigiert grundsätzlich die nicht-lineare Beziehung zwischen Transmission und Kontaktzahl innerhalb der Zenithringe. Diese Nicht-Linearität existiert aber auch in der Ebene. Ihr Effekt kann bei engen Ringen und generell bei den Innenringen unbeachtet bleiben (dort, wo $1/\cos\theta$ wenig variiert). Bei den Aussenringen nimmt jedoch der Effekt der Nicht-Linearität mit $K(\theta)$ zu, was bei Nichtbeachtung zu beachtlichen Fehlschätzungen führen kann. Für einen Ring z.B. von 60 bis 75° wird ein BFI von 5 um 6% und ein BFI von 8 um 10% unterschätzt. Ein effektiver Weg um diese systematische Abweichung zu korrigieren, ist die θ -Ringe in konzentrische aber engere γ Ringe aufzuteilen und den gleichen Algorithmus wie oben anzuwenden. Im Vergleich zu einer direkten Berechnung basierend auf engen Ringen, reduziert diese Methode die Wahrscheinlichkeit von undefinierten Transmissionen (Ringe ohne weisse Pixel).

Die hier beschriebene Methode wurde auf künstlichen Bildern von vordefiniertem BFI getestet und die so geschätzte Werte erwiesen sich als erwartungstreu, also ohne systematische Fehler (SCHLEPPI *et al.*, 2007).

Material und Methoden

Standort

Ein Kastanienwald bei Bedano (Kanton Tessin; 8,912°E; 46,417°N) wurde für einen Durchforstungs-Versuch ausgewählt. Er befindet sich auf der rechten Talseite Vedeggio-Tals auf einer Höhe von 550 m ü.M. und ist mit 34° Neigung gegen Osten exponiert. Das Gebiet gehört zu den insubrischen Alpen und besteht aus Gneis und Orthogneis. Die Böden sind mittel- bis flachgründig und werden als saurer Rohboden (dystric Regosol) oder humusreiche Braunerden (humic Cambisol) klassifiziert. Die durchschnittliche Temperatur beträgt 11,6°C und der jährliche Niederschlag 1550 mm, mit Mai, Juni und August als Monate mit den höchsten Werten. Auf diesem Standort beträgt der jährliche Holzzuwachs 8-10 m³/ha und die Bonität von Buche im Alter 50 erreicht 17-19 m.

Vorgeschichte und Behandlung

Der Vorbestand war im 19. Jahrhundert wahrscheinlich eine Kastanienselve. Er wurde mehrmals kahl geschlagen, die letzte Male 1942-1945 und 1998 (Fonti & Giudici 2001). Nach dem Kahlschlag 1998 wurde die Ausschlagfähigkeit erfasst (Giudici & Zingg 2005). 2005 erfolgte eine erste Messung von Durchmesser und Höhen, dann eine erste Durchforstung. Dabei werden drei Methoden verglichen: (A) "Einzelbaum-Durchforstung", bei der die Kandidaten (bis 100/ha) schon früh ausgewählt und von Konkurrenz freigestellt werden, sowohl innerhalb des Stockes wie gegenüber benachbarten Stöcken; (B) "Bestandes-Durchforstung" als negative Auslese mittlerer Intensität, die eine spätere Durchforstung mit positiver Auslese voraussetzt; (C) Kontrolle ohne Eingriff (Niederwald in natürlicher Entwicklung). Der Versuch wird in dreifacher Wiederholung auf 1000 bis 1300 m² grossen Parzellen durchgeführt.

Hemisphärische Photographie

Der Blattflächen-Index jeder Parzelle wurde aus je neun hemisphärischen Photos ermittelt. Die Lage der neun Punkte wurde als Raster in den die Parzellen gemessen und dauerhaft markiert. Die Lage dieser Punkte ist unabhängig von derjenigen der Bäume. Eine erste Reihe von Photos wurde Anfang August 2005, vor der Durchforstung genommen. Weitere Reihen erfolgten in den folgenden Jahren, jeweils auch Ende Juli oder Anfangs August.

Eine Digitalkamera (Coolpix 4500, Nikon, Tokyo) mit einer Fischaugen-Linse (Nikon FC-E8) wurde mittels einer selbst-nivellierende Aufhängung (SLM2, Delta-T, Cambridge, UK) auf einem Stativ aufgesetzt. Der Kompass der Aufhängung wurde benutzt, um die Himmelsrichtung der Bilder zu bestimmen. Alle Bilder wurden mit verzögerter Auslösung gemacht, um Erschütterungen der Kamera zu vermeiden. Sie wurden als hochqualitative JPEG-Files gespeichert, die einer Auflösung von 2272 x 1704 und einem Durchmesser des Horizont-Kreises von 1540 Pixeln entspricht. Die Belichtung wurde manuell nach Messungen mit einem Spot-Meter (Asahi Pentax V, Asahi, Tokyo) durchgeführt. Dafür wurde das Himmelslicht durch Bestandeslücken nahe am Zenith gemessen, dann wurden die Bilder demgegenüber zwischen 1 und 2 Blende-Öffnungszeiten überbelichtet (d.h. mit einem Faktor von 2 bis 4). Diese Methode macht die Belichtung unabhängig vom Anteil sichtbaren Himmels und somit auch vom BFI. Sie wird angewendet, um den Empfindlichkeitsbereichs der Kamera zu optimieren, ohne eine Überbelichtung des Himmels in den Bestandeslücken zu erzeugen. Dies kommt unter dichten Kronen mit einer automatischen Belichtung vor (LEBLANC *et al.* 2005) und verursacht eine Unterschätzung vom BFI (ZHANG *et al.* 2005). Diese Überbelichtung entsteht wegen der Lichtsättigung von Pixeln, welche sich durch Elektronen-Sprünge auf die benachbarte Pixel ausbreitet, so dass die Bestandeslücken zu gross erscheinen (Nikon, Tokyo, persönliche Mitteilung; THIMONIER *et al.* 2009). Alle Bilder wurden mit dem Programm Hemisfer 1.4 (als Shareware erhältlich unter <http://www.wsl.ch/dienstleistungen/hemisfer>) analysiert. Fünf Zenithringe von 15° wurden dafür verwendet. Um den Kontrast zwischen Vegetation und Himmel zu verbessern, wurden die Analysen nur im Kanal der blauen Farbe durchgeführt. Die Grenzwerte wurden automatisch gemäss der Methode von NOBIS & HUNZIKER (2005) bestimmt. Der γ -Faktor dafür wurde gemäss der Empfindlichkeitskurve der Kamera auf 2.2 festgelegt. Ein Korrekturfaktor Ω für Verklumpungen des Bestandes wurde im Weiteren durch das Programm gemäss der (an hemisphärischen Bildern angepassten) Methode von CHEN & CIHLAR (1995) berechnet. Diese Berechnung erlaubt es, die Lichttransmission in zwei Kategorien einzuteilen: (1) kleinere Lücken zwischen Blättern innerhalb der Kronen und (2) grössere Lücken zwischen den Kronen. Die Unterscheidung wird iterativ aufgrund der statistischen Verteilung der Lückengrössen vorgenommen.

Ergebnisse

Vor dem Versuch betrug die Stammdichte 4100 bis 4900 ha⁻¹ und die Grundfläche 15 bis 20 m² ha⁻¹ (Tab. 1). Durch die Durchforstung wurde die Grundfläche um 45% bei der Variante A ("Einzelbaum") und um 40% bei der Variante B ("Bestand") verringert.

Tabelle 1: Stammzahl auf den Versuchspartellen vor und nach der Durchforstung (2005)

Versuchsvariante	Stammzahl (ha ⁻¹) vor Durchforstung	Stammzahl (ha ⁻¹) nach Durchforstung
A ("Einzelbaum")	4930	3060
B ("Bestand")	4640	2330
C ("Kontrolle")	4230	4230

Trotz des geringen Alters des Niederwaldes von nur 7 Jahren war der Bestand vor dem Eingriff 2005 weitgehend geschlossen. Die Lichttransmission betrug etwa 1% und war nur in den Kontroll-Parzellen etwas höher (2,6%) (Abb. 3), wo etwa die Hälfte davon (1,4%) auf grössere Lücken entfiel (Abb. 4). Es wurden Blattflächen-Indizes von 6,5 bis 6,9 gemessen (Abb. 5). Mit der Durchforstung nahm 2006 der Blattflächen-Index in der Variante A ("Einzelbaum") um 51% und in der Variante B ("Bestand") um 57% ab. Die Lücken betrugten dann 8 bzw. 6% und die gesamte Transmission etwa 15%. Die Art der Durchforstung verursachte keinen signifikanten Unterschied auf den BFI oder auf die Summe der Lücken, aber die Variante A ("Einzelbaum") produzierte tendenziell grössere Lücken und mehr Unterschiede zwischen den Wiederholungen des Versuchs.

Schon zwei Jahre später war der Bestand wieder annähernd soweit geschlossen wie bei der Kontrolle, so dass die Transmission nur noch etwa 2% betrug. Der Blattflächen-Index hatte sich auf 6,5 bzw. 5,9 erholt, oder 92% bzw. 83% im Vergleich zur Kontrolle.

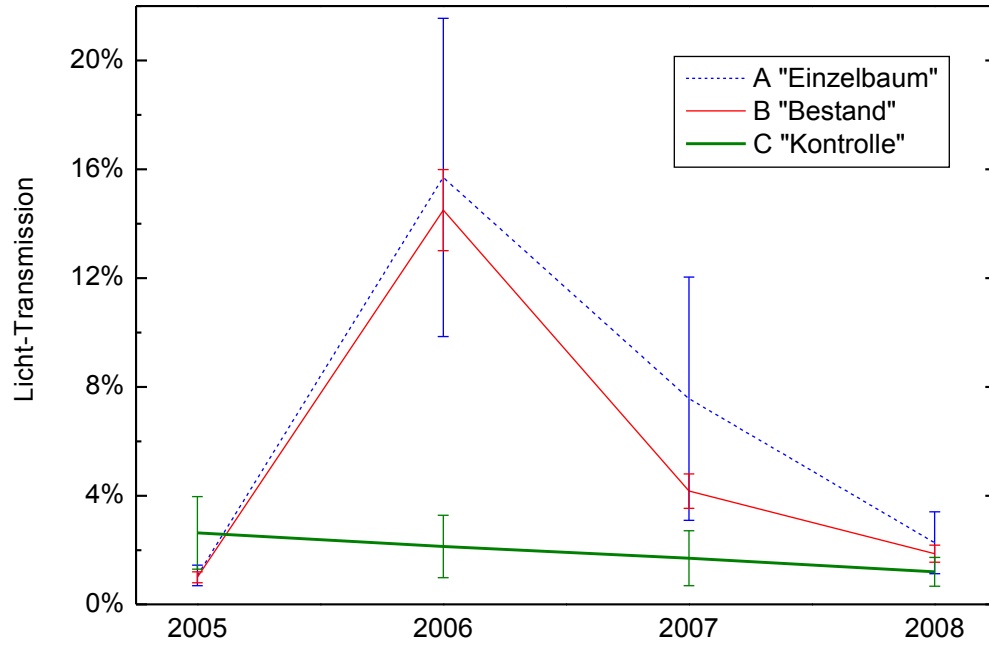


Abbildung 3: Gesamte Licht-Transmission (Zenith-Winkel 0 - 75°) nach Durchforstungsart und Jahr. Mittelwerte und mittlere Fehler.

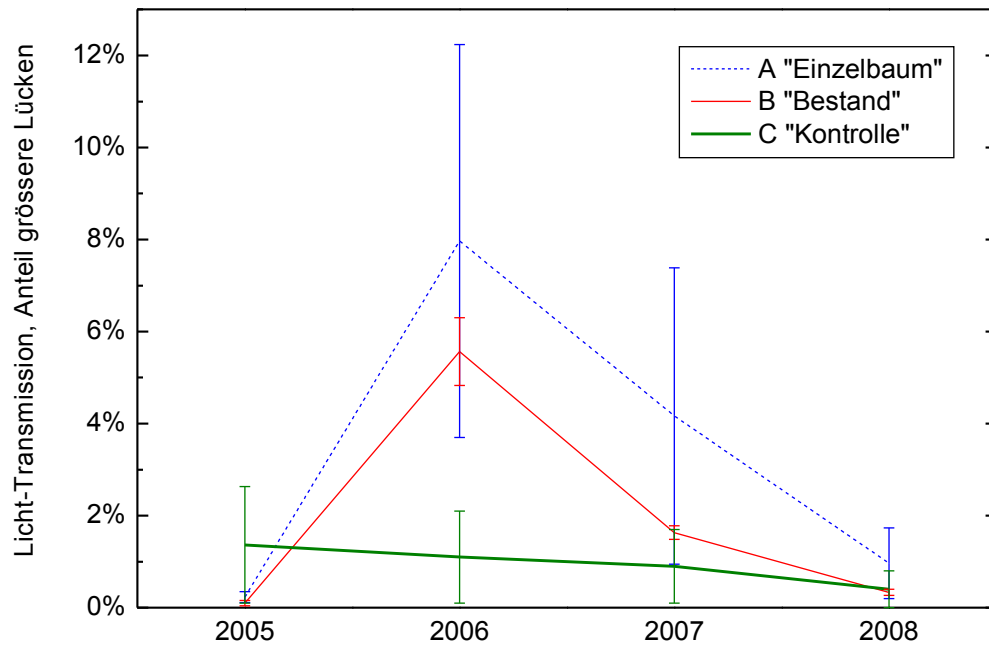


Abbildung 4: Licht-Transmission durch grössere Lücken (Zenith-Winkel 0 - 75°) nach Durchforstungsart und Jahr. Mittelwerte und mittlere Fehler.

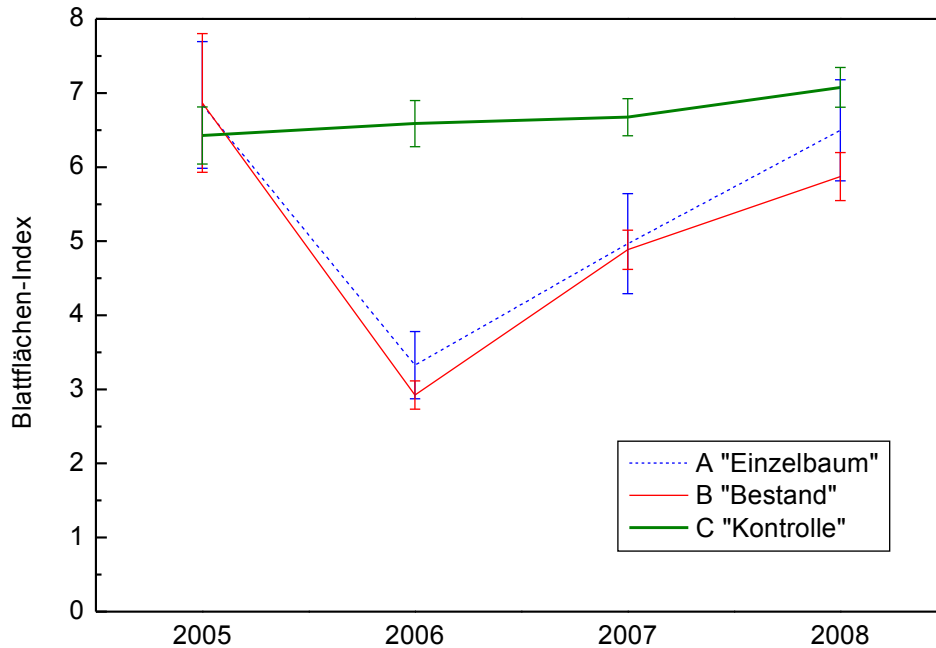


Abbildung 5: Blattflächen-Index nach Durchforstungsart und Jahr. Mittelwerte und mittlere Fehler.

Diskussion

Methodisch hat unsere Studie gezeigt, dass die hemisphärische Photographie dafür geeignet ist, die Wirkung einer Durchforstung und die nachträgliche Erholung des Bestandes quantitativ zu dokumentieren und zu beurteilen. Diese Schlussfolgerung gilt auch für Hanglagen, wenn die Berechnung des Blattflächen-Indexes wie beschrieben angepasst wird.

In Kastanien-Niederwäldern in Frankreich fand RULLIER-BRÉVAL (1985), dass der BFI sich mit der Konkurrenz zwischen den Bäumen auf 5 bis 6 einpendelt. In Italien (CUTINI 2001) wurden in einem älteren Bestand (35 Jahre) ähnliche Werte gefunden, in einem 11-jährigen Bestand aber leicht höhere zwischen 6 und 7. Wir finden ähnliche Werte im 7-jährigen Niederwald von Bedano. Auch was die Licht-Transmission betrifft, sind unsere Befunde mit denjenigen von CUTINI (2001) vergleichbar. Der BFI des untersuchten Kastanien-Bestandes wurde bei der Durchforstung um gut die Hälfte reduziert, also eher etwas mehr als die Reduktion der Grundfläche. Dies lässt sich wahrscheinlich damit erklären, dass Unterschiede zwischen kräftigen und schwächeren Bäumen sich besonders im Stammwachstum ausdrücken, und weniger in der Blattfläche. Es werden also schmale aber durchaus gut belaubte Bäume entfernt. Wie aufgrund des Lambert-Beersches Gesetzes der Licht-Absorption zu erwarten war, wirkte die Halbierung der Blattfläche viel weniger als proportional auf die Absorption ($= 1 - \text{Transmission}$). Die intensive Durchforstung eines dichten Bestandes verursacht deshalb nur einen begrenzten Verlust am Potential der Photosynthese. Dies gilt mindestens solange die ausgelesenen Bäume so verteilt sind, dass wenig grössere Lücken entstehen. Nur in dieser Hinsicht scheint in unserem Fall die Art der Durchforstung eine gewisse Rolle zu spielen, wo die Variante A ("Einzelbaum") tendenziell etwas weniger Licht nützen kann, obwohl die Abnahme der Blattfläche eher das Gegenteil vermuten lässt. Ansonsten waren beide Varianten sehr ähnlich. Sie entwickelten sich schnell weiter, und die Bestände waren drei Jahre nach dem Eingriff wieder praktisch geschlossen. Diese grosse Reaktionsfähigkeit der Kastanie wurde auch nach einer weniger intensiven Durchforstung von CUTINI (2001) beobachtet, wobei ein älterer Bestand doch 1-2 Jahre mehr brauchte als ein jüngerer, bis die Lücken sich wieder schlossen. Dank der schnellen Reaktion der jungen Bäumen sind die allgemeine Ziele der Durchforstung in unserem Versuch erreicht: weniger Bäume, aber nur ein kleiner und zeitlich begrenzter Verlust an Photosynthesepotential. Obwohl die Durchforstung intensiv war, konkurrenzieren sich die Bäume nach drei Jahren wieder beträchtlich. Es stellt sich deshalb die Frage, ob in der als definitiv vorgesehenen Variante A ("Einzelbaum") nicht doch bald ein weiterer Eingriff nötig sein wird, um den Kandidaten etwas mehr Raum zu schaffen. Dies soll aber unter Einbezug des Höhenwachstums relativ zur Konkurrenz entschieden werden, was sich nicht aus den hier dargestellten Methoden ableiten lässt. Ob die spezifischen Ziele für die Holzqualität der Kastanie auch erreichbar sind, wird sich erst durch den weiteren Verlauf der Untersuchungen in den nächsten 20 bis 30 Jahren klären lassen.

Literaturverzeichnis

- BOURGOIS, C.: Le châtaignier: un arbre, un bois. IDF, Paris, 367 S., 1992
- ANDERSON, M. C.: Radiation and crop structure. *In*: Šesták, Z., Catsky, J., Jarvis, P.G. (eds.), Plant photosynthetic production: manual of methods. Junk, Den Haag, S. 412-466, 1971
- BRÉDA, N. J. J.: Ground-based measurements of leaf area index: a review of methods, instruments and current controversies, *Journal of Experimental Botany*, 54, 2403-2417, 2003
- CHEN, J.M., CIHLAR, J.: Quantifying the effect of canopy architecture on optical measurements of leaf area index using two gap size analysis methods, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 33, 777-787, 1995
- CUTINI, A.: New management options in chestnut coppices: an evaluation on ecological bases, *Forest Ecology and Management*, 141, 165-174, 2001
- DUURSMA, R.A., MARSHALL, J.D., ROBINSON, A.P.: Leaf area index inferred from solar beam transmission in mixed conifer forests on complex terrain, *Agricultural and Forest Meteorology*, 118, 221-236, 2003
- FONTI, P., GIUDICI, F.: Quantità e qualità della massa legnosa ottenibile da un ceduo di castagno invecchiato, *Schweizerische Zeitschrift für Forstwesen*, 152, 417-424, 2001
- FONTI, P., GIUDICI, F., CONEDERA, M.: La cipollatura nel legno di castagno: un problema centrale per il rilancio della castanicoltura da legno di qualità, *Schweizerische Zeitschrift für Forstwesen*, 153, 430-436, 2002
- GIUDICI, F., AMORINI, E., MANETTI, M.C., CHATZIPHILIPPIDIS, G., PIVIDORI, M., SEVRIN, E., ZINGG, A.: Sustainable management of sweet chestnut (*Castanea sativa* Mill.) coppice forests by means of the production of quality timber, *Ecol. Mediter.* 26, 8-14, 2000
- GIUDICI, F., ZINGG, A.: Sprouting ability and mortality of chestnut (*Castanea sativa* Mill.) after coppicing. A case study. *Annals of Forest Science* 62, 513-523, 2005
- KÖRNER, C., OHSAWA, M.: Mountain systems. *In*: Hassan, R., Scholes, R., Ash, N. (eds.), *Ecosystems and human well-being: current state and trends*, volume 1. Island press, Washington, S. 681-716, 2006
- LEBLANC, S. G., CHEN, J. M., FERNANDES, R., DEERING, D. W., CONLEY, A.: Methodology comparison for canopy structure parameters extraction from digital hemispherical photography in boreal forests, *Agricultural and Forest Meteorology*, 129, 187-207, 2005
- NILSON, T.: A theoretical analysis of the frequency of gaps in plant stands, *Agricultural Meteorology*, 8, 25-38, 1971
- NOBIS, M., HUNZIKER, U.: Automatic thresholding for hemispherical canopy-photographs based on edge detection, *Agricultural and Forest Meteorology*, 128, 243-250, 2005
- ROSS, J.: The radiation regime and architecture of plant stands. Junk, Den Haag, 391 S., 1981
- RULLIER-BRÉVAL B.: Croissance d'un taillis de châtaignier après coupe. Thèse de doctorat, Université Paris XI, 142 S., 1985
- RUNNING, S.W., COUGHLAN, J.C.: A general model of forest ecosystem processes for regional applications. 1. Hydrologic balance, canopy gas-exchange and primary production processes, *Ecological Modelling*, 42, 125-154, 1988
- THIMONIER, A., SEDIVY, I., SCHLEPPI, P.: A comparison of methods for estimating leaf area index in mature forest stands of Switzerland. *European Journal of Forest Research*, submitted, 2009
- WALTER, J.-M.N., FOURNIER, R.A., SOUDANI, K., MEYER, E.: Integrating clumping effects in forest canopy structure: an assessment through hemispherical photographs, *Canadian Journal of Remote Sensing* 29, 388-410, 2003
- WALTER, J.-M.N., TORQUEBLAU, E.F., 2000. The computation of forest leaf area index on slope using fisheye sensors, *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences, Série III, Sciences de la Vie* 323, 801-813.
- WEISS, M., BARET, F., SMITH, G.J., JONCKHEERE, I., COPPIN, P.: Review of methods for in situ leaf area index (LAI) determination. Part II. Estimation of LAI, errors and sampling, *Agricultural and Forest Meteorology*, 121, 37-53, 2004
- ZHANG, Y., CHEN, J.M., MILLER, J.R.: Determining digital hemispherical photograph exposure for leaf area index estimation, *Agricultural and Forest Meteorology*, 133, 166-181, 2005