

# Erfassung von Waldlücken mittels Laserscanning *(reviewed paper)*

LUKAS MATHYS

Keywords: Tree canopy gaps; resource management; laserscanning; Canton Geneva, Switzerland. FDK 53 : 568 : 585 : (494)

**Abstract:** Woodland gaps are structural landscape elements that affect most forest functions. The article describes two conceptually and methodologically complementary approaches to map woodland gaps using laserscanning. Resulting maps on structural properties of the Canton Geneva indicate that laserscanning enables the consistent monitoring of forest and landscape structure for resource management.

**Abstract:** Waldlücken sind als landschaftliche Strukturelemente für die meisten Waldfunktionen bestimmend. Der Aufsatz beschreibt zwei konzeptionell und methodisch komplementäre Ansätze zur Erfassung von Waldlücken mittels Laserscanning. Die resultierenden Strukturkarten für den Kanton Genf zeigen, dass Laserscanning Wald- und Landschaftsstrukturen für die Ressourcenbewirtschaftung konsistent erfasst.

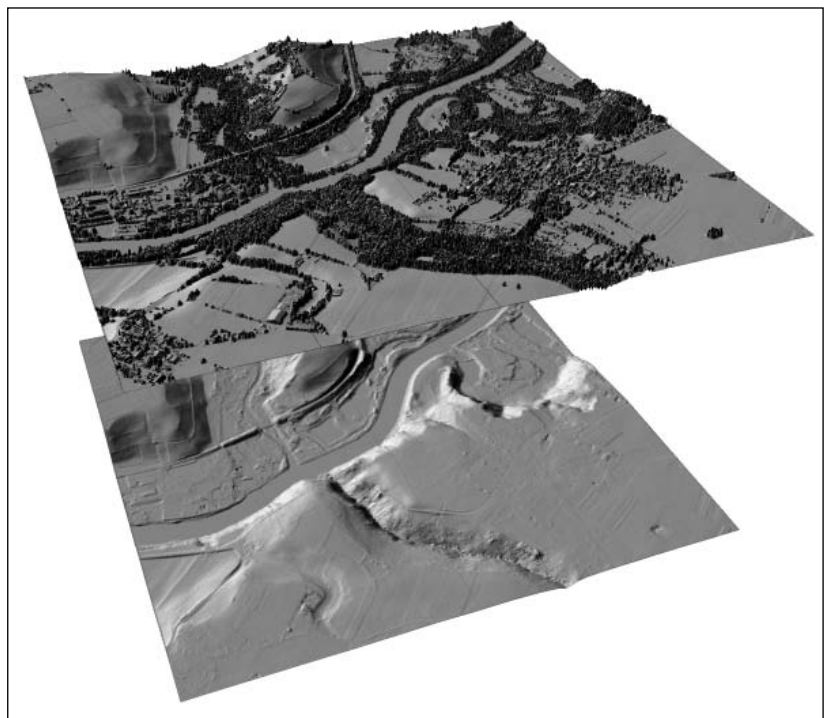
## 1. Einleitung: Multifunktionelle Waldlücken

Lücken im Kronendach des Waldes beeinflussen den strukturellen Aufbau des Bestandes und damit auch die abiotischen Faktoren eines Waldökosystems in verschiedenster Art und Weise. Die erhöhte Lichtverfügbarkeit und die daraus resultierenden höheren Temperaturen in Bodennähe fördern die natürliche Verjüngung und beeinflussen die Artenzusammensetzung (WHITMORE 1975; DENLOW 1980; POULSON & PLATT 1989; HUBBELL *et al.* 1999; YAMAMOTO 2000). Die erhöhte Lichtintensität und die wärmeren Bedingungen beeinflussen nicht nur Pflanzen, sondern begünstigen auch verschiedene Insektengruppen (BOUGET & DUELLI 2004). Bei Vögeln beobachtete FACCIO (2003), dass sich die gesamte Artenvielfalt durch die von einem Eissturm gebildeten Waldlücken erhöhte, die Häufigkeit der funktionellen Gruppen sich aber von Wald- zu Offenlandarten verschob. Eine Erhöhung der Artenvielfalt auf der räumlichen Skala der Landschaft mit sich verschiebenden Häufigkeiten der Artengruppen stellten auch GREENBERG & LANHAM (2001) in Lücken nach einem Hurrikan fest. Unterschiedlich gerichtete Funktionen haben Waldlücken aber auch für den Menschen. Während Lücken im Kronendach und die damit kreierte Randstrukturen für den Erholungssuchenden eine strukturelle Bereicherung im Wald (JACSMAN 1998; HUNZIKER & KIENAST 1999) ebenso wie im urbanen Raum (WILD-ECK 2003) darstellen, sind sie für die Bewohner in steileren Gebieten als mögliche Lawinenanrissstellen (MEYER-GRASS & SCHNEEBELI 1992) eine Bedrohung. Für den Waldbesitzer verbessern Waldlücken die natürliche Verjüngung, stellen je nach Grösse aber auch Ertragseinbussen dar.

Waldlücken sind ein integrativer Bestandteil des Waldökosystems und decken für verschiedene Nutzergruppen eine grosse Spannweite von positiv und negativ gerichteten Funktionen ab. Um diese Funktionen planen, koordinieren und schliesslich im Wald umsetzen zu können, sind Informationen über die räumliche Verteilung und Struktur von Waldlücken auf der Landschaftsebene mit der räumlichen Auflösung einer Bestandeserfassung entscheidend.

Charakteristische Eigenschaften von Waldlücken beziehen sich in der Regel auf Strukturmerkmale des Waldökosystems, d.h. auf Kro-

nendeckungsgrad, Randlinienlänge, Randverlauf usw. Obwohl Waldlücken damit über strukturelle und geometrische Variablen definiert sind, werden sie dennoch meistens auf Luftbildern über spektrale Eigenschaften kartiert. Je nach Vegetation in der Waldlücke und daran angrenzendem Bestandesaufbau können aber die spektralen Unterschiede gering oder irreführend sein und damit eine konsistente Kartierung verunmöglichen (KOUKOULAS & BLACKBURN 2004). Laserscanning, auch Lidar (Light Detection and Ranging) genannt, ist hingegen eine Fernerkundungsmethode, die ihre Stärke in der strukturellen Erfassung der Landschaft hat. Laserscanning basiert auf einem aktiven Sensorsystem, mit welchem aus einem Flugzeug oder Helikopter die Höhe des Geländes oder der Objektflächen (Bäume, Häuser usw.) über Messpunkte flächenhaft gemessen werden kann. Die Dichte kann je nach Fluggeschwindigkeit und Sensor mehrere Punkte pro Quadratmeter betragen. Für jeden gemessenen Punkt ist schliesslich seine x-, y-, sowie z-Koordinate, nicht aber *a priori* eine Bodenbedeckungskategorie, bekannt. In der Regel resultieren da-



**Abbildung 1:** Ausschnitt aus dem verwendeten Laserscanning-Oberflächen- (oben) und Geländemodell (unten) des Kantons Genf mit einer räumlichen Auflösung von 1 m. DHM, DOM © 2005 SITG.

Figure 1: Section of the laserscanned surface (above) and terrain (below) model used from the Canton Geneva with a spatial resolution of 1 m.

bei zwei Punktdatensätze; einer für das Gelände und einer für die Objektoberflächen. In flachem Gelände (Strassen, Offenflächen usw.) sollten diese beiden Datensätze die gleiche Höhe haben. Mögliche Analysen basieren auf den Punktmessungen oder den interpolierten Gelände- bzw. Oberflächenmodellen (Abbildung 1).

Laserscanning wurde bereits erfolgreich eingesetzt zur Erfassung von Baum- (PERSSON 2002; MORSDORF *et al.* 2004) und Bestandesattributen (LEFSKY *et al.* 2002; NÆSSET 2002; RIAÑO *et al.* 2003; ZIMBLE *et al.* 2003). Die beschriebenen Untersuchungen beziehen sich auf die Bäume oder den Bestand. Für Waldlücken ist aber die Erfassung des Zwischenraums unter Einbezug des umgebenden Waldbestandes entscheidend. KOUKOULAS & BLACKBURN (2004) beschreiben eine spezifische Methode, welche sie in einem halbnatürlichen Laubwaldbestand im südlichen England untersuchten. Auch ST-ONGE & VEPAKOMMA (2004) beschreiben eine Methode auf Bestandesebene. Doch eine integrale Bewirtschaftung von Waldökosystemen kann sich nicht nur auf den einzelnen Bestand beschränken, sondern hat ganze Waldkomplexe einzubeziehen. Das Ziel der Studie war es deshalb, eine möglichst grossflächige Erfassung von Waldlücken oder strukturähnlichen Gebieten in einer Gesamtlandschaft basierend auf Laserscanning-Daten zu untersuchen.

## 2. Material und Methoden

### 2.1 Untersuchungsgebiet Kanton Genf

Die Methode zur Erfassung von Waldlücken mittels Laserscanning ist im Kanton Genf mit einer Gesamtfläche von 282 km<sup>2</sup> entwickelt und umgesetzt worden. Der Kanton weist grosse strukturelle und nutzungsbedingte Gradienten auf, so dass eine Vielfalt von Waldlückentypen und -grössen analysiert werden konnten. Denn für die Untersuchung war es wichtig, das ganze strukturelle Spektrum einzubeziehen. Obwohl es sich dabei um Einzelbaum- und Bestandeslücken bis hin zu Kahlfächen handelte, wird im vorliegenden Aufsatz der allgemeine Begriff «Waldlücke» verwendet.

Der eher urbane Kanton besteht gemäss Landeskarte (Vector25 des Bundesamtes für Landestopografie) zu 11% aus Wald und 25% Siedlungsgebiet. In der Untersuchung wurde Vector25 auch als Referenzdatensatz für die Wald- und Landschaftsklassierung verwendet und die gesamte Erfassung der Waldlücken im geografischen Informationssystem ArcInfo 8.3 umgesetzt.<sup>1</sup>

### 2.2 Waldlücken als diskrete Einheiten abgrenzen

Waldlücken decken einen breiten Bereich von Funktionen in einem gesamten Waldökosystem ab. Je nach Forschungsansatz (Lücken-/Walddynamik, natürliche Verjüngung, Habitat usw.) sind Lücken und damit deren Definition anders ausgestaltet (YAMAMOTO 2000). Das Ziel dieser Untersuchung ist es, die Lücken im Kronendach fernerkundungsbasiert, also von oben aus der Luft, zu erfassen. Waldlücken sind darum über die Flächen zwischen den Baumkronenprojektionen definiert und stellen räumlich betrachtet die Täler in einem Relief von Baumkronenvolumina dar. Gemäss diesem Ansatz wurden zuerst das Relief der Baumkronen mittels Laserscanning erfasst und anschliessend die Waldlücken als Depressionen darin deliniert. Die relevante Höhe für die Delinierung entlang der Kronenprojektion lag, in Anlehnung an die Luftbildinterpretation des Schweizerischen Landesforstinventars, bei 3 m über Boden (MAHRER 1980).

Die Laserscanning-Rohdaten für die Lückenerfassung standen aus einem vom Kanton Genf zur Verfügung gestell-

ten Gelände- und Oberflächenmodell mit einer räumlichen Auflösung von 1 m (Rasterzellenbreite) aus dem Jahre 2000. Die ursprünglichen Laserscanning-Messpunkte hatten eine Lagegenauigkeit von 10 bis 15 cm mit einer Standardabweichung der Höhe von 20 cm. Aus Überlagerungsgründen mit anderen Geodaten wurden die beiden Modelle auf eine räumliche Rasterauflösung von 2,5 m umgerechnet. Das Baumkronenrelief wurde aus der Differenz der beiden Modelle (Oberfläche minus Geländemodell) generiert. Dabei hatte eine Baumrasterzelle gemäss Definition eine Höhendifferenz grösser als 3 m. Das resultierende normalisierte Oberflächenrelief stellte aber nur die normalisierte Höhe dar. Da es im Kanton Genf auch andere Nichtbaum-Objekte mit einer Höhe von über 3 m gibt, sind diese mit zusätzlichen digitalen Informationen überlagert und schliesslich ausgeschlossen worden: Häuser mit einer digitalen Häuserkarte des Kantons Genf, sonstige Bauobjekte mit einer manuell abgeleiteten Karte von Vector25. Die resultierende flächendeckende Baumrasterkarte des Kantons mit einer räumlichen Auflösung von 2,5 m wurde mit einem unabhängigen Datensatz, im Luftbild manuell klassierte Baumstichprobepunkte des dritten Landesforstinventars, evaluiert (n = 1105). Die Richtigklassierung der Baum-/Nichtbaumzellen beträgt 93,4%, mit einem Kappa (COHEN 1960) von 0,78.

Die eigentlichen Waldlücken wurden durch die 3-m-Konturlinien des Baumkronenreliefs deliniert (Funktion contour im Modul Grid) und über die Baumrasterkarte für den ganzen Kanton Genf nach den vier Grössenklassen 0,01 bis 0,5 ha, 0,5 bis 1 ha, 1 bis 1,5 ha sowie 1,5 bis 2 ha extrahiert. Dabei entspricht die minimale Lückengrösse der Kronenausdehnung eines einzelnen ausgewachsenen Laubbaumes. Die maximale Ausdehnung am anderen Ende des Lückengrössenspektrums ist in Bezug zu möglichen Schadenflächen nach grösseren Wind- oder Lawinenereignissen (z.B. Vivian, Lothar) gewählt worden. Das Resultat der Delinierung war schliesslich je ein Polygondatensatz der Waldlücken inner- und ausserhalb des Waldes für jede der erwähnten Grössenklassen.

### 2.3 Lückenstrukturen kontinuierlich erfassen

Waldlücken sind gut erkennbar in geschlossenen oder nur leicht aufgelösten Beständen. Doch je lichter der Wald ist, desto schwieriger wird es die Lücke zu definieren. Was im ersten Fall als klar umrandete Offenfläche in einem Baumbestand erkannt werden kann, ist im zweiten eine räumlich vielfältige Kombination aus Offenflächen und Baumgruppen. Waldlücken in Juraweiden, Gebirgswäldern oder Kulturlandschaften als konsistente Einheiten zu erfassen wird schwierig. Dennoch leisten solche Flächen einen entscheidenden Beitrag für das Waldökosystem und dessen Bewirtschaftung und sollten daher auch erfasst werden.

Der Kronendeckungsgrad ist deshalb für jede Hektare des Kantons Genf auch als kontinuierliche Variable erfasst worden. Dazu ist die Summe der Baumzellen des gerechneten Baumreliefs (2,5 m) im Verhältnis zu allen möglichen Rasterzellen innerhalb eines quadratischen über den Kanton laufenden Analysefensters (Fläche = 1 ha  $\cong$  40 x 40 Zellen) ermittelt worden.

Die vertikale Struktur ist neben dem horizontalen Kronendeckungsgrad eine zweite wichtige, kontinuierliche Variable der Lücke im gesamtlandschaftlichen Kontext. Die Höhenvariabilität wurde daher zusätzlich über die Standardabweichung der Baumzellen-Höhen auch wieder für jede Hektare des Kan-

<sup>1</sup> Datengrundlagen für die gesamte Untersuchung: Laserscanning-DHM, -DOM, Luftbild, Geodata © 2005 SITG. Vector25 © 2005 swisstopo DV 033594. Stichprobeninformation der Luftbildinterpretation LFI3 © 2005 WSL.

tons abgeleitet. Die Karten mit einer räumlichen Auflösung von einer Hektare zum Kronendeckungsgrad und zur vertikalen Strukturvielfalt wurden wie bei den Lücken für den ganzen Kanton inner- und ausserhalb des Waldes gerechnet.

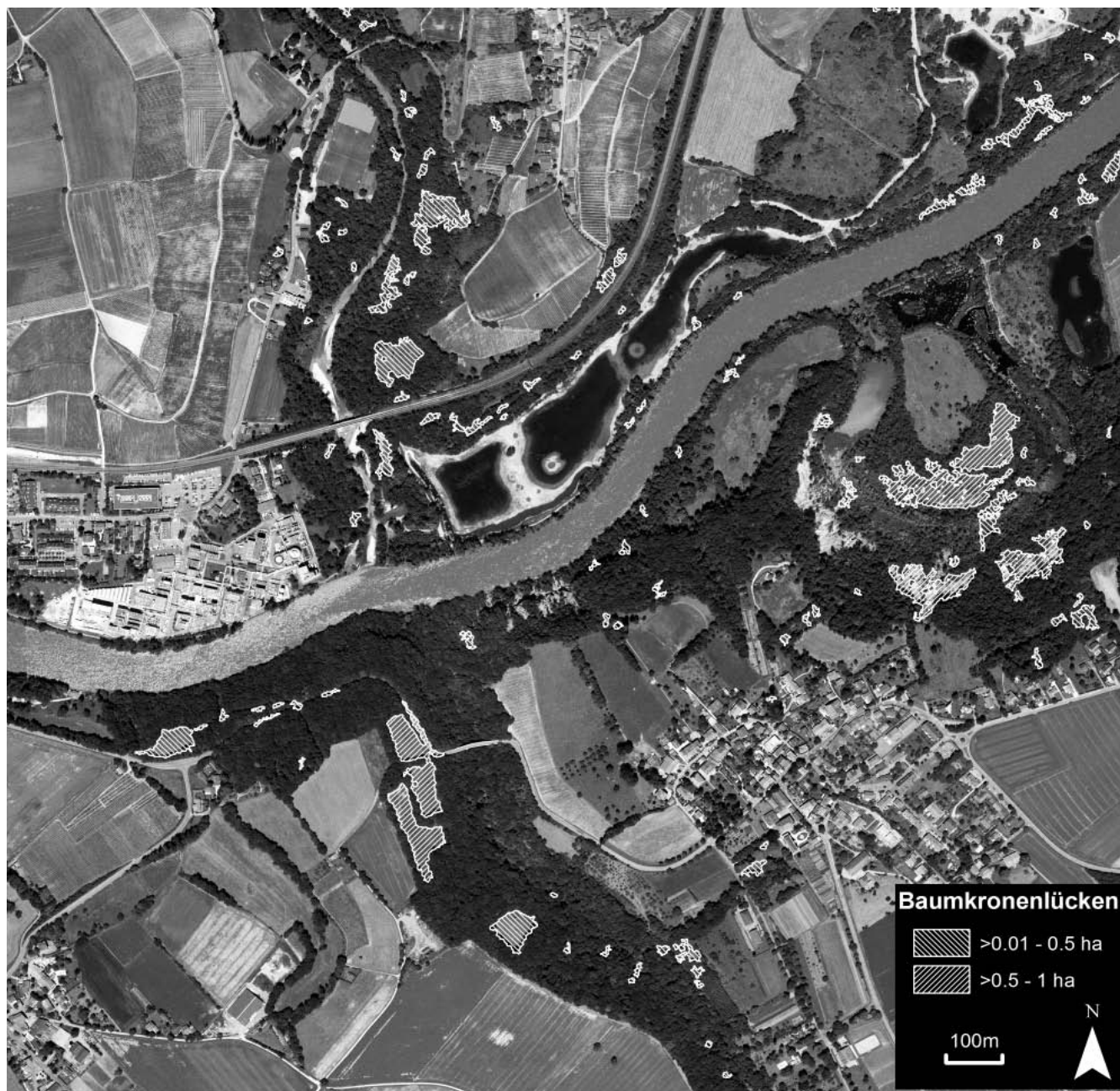
### 3. Resultate

#### 3.1 Diskrete Waldlückenkarten

Waldlücken sind für den Kanton Genf in vier Grössenklassen deliniert und ausgeschieden worden und haben unterschiedliche Häufigkeiten:

Waldlückengrösse [ha]	Anzahl
> 0,01–0,5	2995
> 0,5–1	54
> 1,0–1,5	15
> 1,5–2	11

Lücken sind also ein häufiges und damit zu beachtendes Strukturelement des Waldes. Aus der *Abbildung 2* ist ersichtlich, dass Lücken im Baumkronendach auch im Nichtwaldareal vorkommen können. Ihre möglichen Funktionen hängen aber von der Bodenbedeckung in der Lücke (z.B. Wiese, Sträucher oder versiegelte Flächen), um die Lücke (z.B. ausgedehnter Waldbestand oder schmale Baumreihe) sowie von der räumlichen Ausprägung ab. In der *Abbildung 2* haben die grossen Lücken unten links einen geradlinigen Rand, ihr Verhältnis Randlinienlänge zur Fläche liegt um  $0,1 \text{ m/m}^2$ . Die etwa gleich grossen Lücken rechts haben mit einem grösseren Verhältnis von bis  $0,2 \text{ m/m}^2$  eine komplexere Randstruktur und damit einen grösseren struktureicheren Übergangsraum Baumvegetation/Offenland. Lücken sind damit über ihre flächige Ausdehnung (Fläche) und räumliche Ausprägung (Umfang/Fläche) beschrieben. Diese Lückenkarten können nachträglich mit einer digitalen Waldkarte oder sonstigen Landschaftsklassifikation überlagert und damit auf die Lücken im jeweiligen Stratum reduziert werden.



**Abbildung 2:** Lückenpolygonkarten (weiss schraffiert) überlagert auf ein Luftbild des gleichen Landschaftsausschnittes wie *Abbildung 1*. Dargestellt sind die beiden kleineren der vier resultierenden Lückengrössenklassen. Luftbild © 2005 SITG.

*Figure 2:* Polygonal maps of tree canopy gaps (hatched areas) overlaid on an aerial photo of the same section as figure 1. The figure shows the two smallest of the four gap size classes that were analysed. Aerial photo © 2005 SITG.

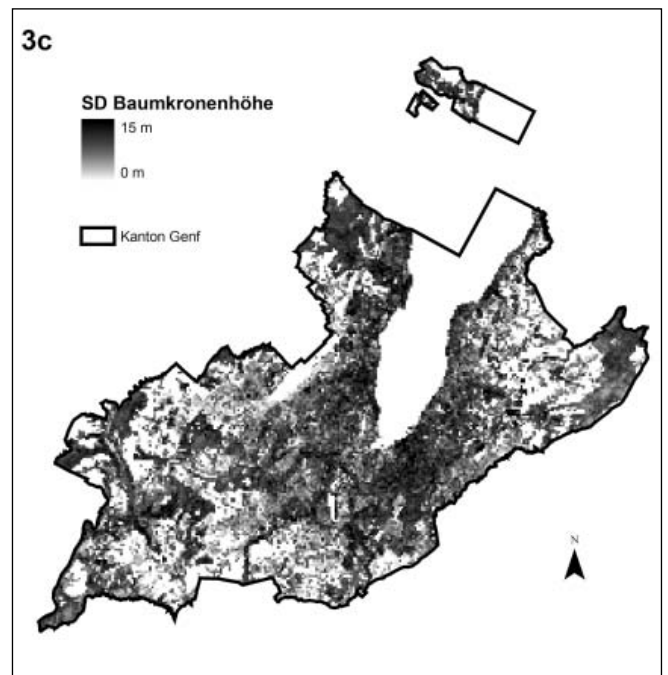
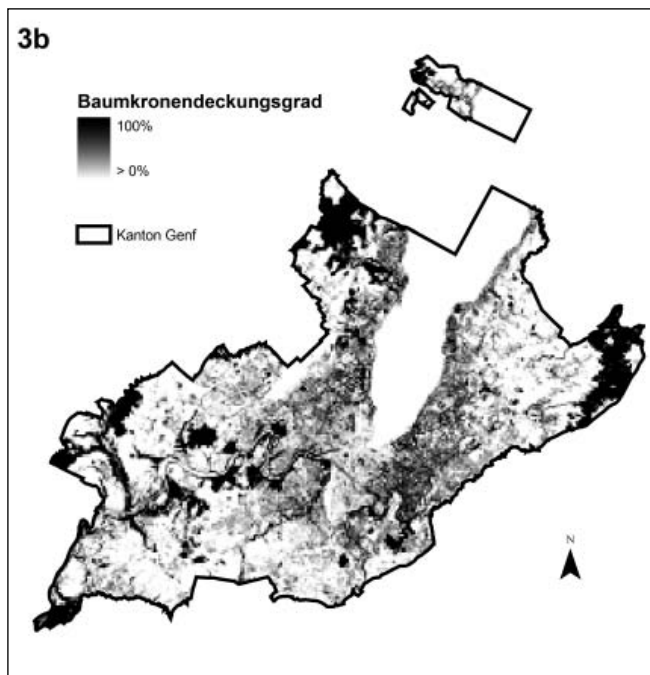
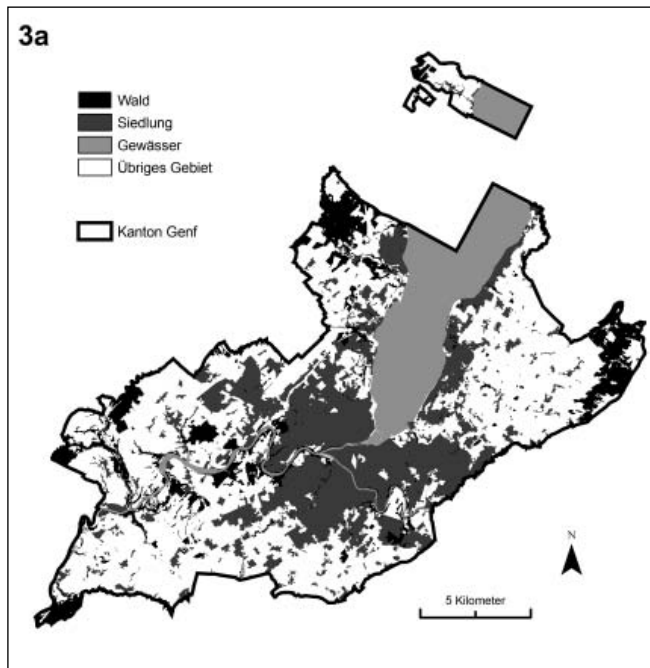
### 3.2 Kontinuierliche Strukturkarten

Die flächige Erfassung des Kronendeckungsgrades stellt die Landschaft über Gradienten dar, während delinierte Waldlücken einen klassierten und damit diskreten Landschaftsschnitt beschreiben. Damit ist die Landschaft nicht auf zwei Typen reduziert, Waldlücke oder übrige Landschaft, sondern der ganze Kronendeckungsgrad-Gradient bleibt für Analysen und Bewirtschaftungsplanungen erhalten.

Die höchsten Deckungsgrade liegen im Kanton Genf erwartungsgemäss im Wald (Abbildungen 3a, 3b). Dabei sind die grösseren Waldstücke eher geschlossen und haben nur in bestimmten Regionen lückenartige Strukturen. Mittlere, lückenähnliche Kronendeckungsverhältnisse befinden sich aber zahl-

reich in der übrigen Landschaft. Gerade der suburbane Raum weist teilweise hohe Baumanteile auf. Immerhin bedeckt im Kanton Genf 26% der gesamten Baumvegetation das Siedlungsgebiet, 53% den Wald und 21% das übrige Gebiet. Vom Waldareal bedecken Baumkronen 89%. Die restlichen Waldflächen sind die oben als Lücken beschriebenen Offenflächen.

Die vertikale Strukturvielfalt (Abbildung 3c) verfeinert die Erkenntnisse vom horizontalen Kronendeckungsgrad (Abbildung 3b). Die ausgedehnten Waldflächen haben eine geringere Höhenvariabilität, mittelgrosse bis kleinere Waldstücke eine verstärkte. Strukturell vielfältige Baumvegetation findet man gerade auch in den suburbanen Bereichen um das Kerngebiet der Stadt. Immerhin sind gemäss den Resultaten aus diesen Laserscanning-Modellen 20% der Siedlungsfläche von Bäumen überschirmt. Solche Baumgruppen übernehmen nicht unbedingt die gleichen Funktionen wie eine klassische Waldlücke. Doch für viele der momentan diskutierten Wohlfahrts- und Schutzfunktionen zeigen gerade solche Baumgebiete grosse Potenziale und sollten in eine Landschafts- oder Ressourcenplanung einbezogen werden.



**Abbildung 3:** Waldverteilung des Kantons Genf gemäss der Landschaftsklassierung von Vector25 (3a). Karten zur kontinuierlichen Baumkronendeckung (3b) und vertikalen Strukturvielfalt als Standardabweichung der Baumkronenhöhen (3c) zeigen ein differenzierteres Bild der Baumstruktur im Wald und in der übrigen Landschaft.

Reproduziert mit Bewilligung des Bundesamtes für Landestopografie (swisstopo) DV 033594. Vector25 © 2005.

*Figure 3: Distribution of discrete forest areas in the canton of Geneva based on the classification of Vector25 (3a). Maps of continuous tree canopy cover (3b) and vertical structural diversity as the standard deviation of tree canopy height (3c) provide more differentiated information on the spatial heterogeneity of the landscape. Vector25 © 2005 swisstopo DV 033594.*

welchem die Baumsterberate kurzfristig und über grosse Flächen erhöht wird. Gerade für solche Fälle hat Laserscanning das Potenzial, die Schäden effizient und flächig kartieren sowie quantifizieren zu können. Da die resultierenden Lückenkarten die räumliche Auflösung und Genauigkeit von Bestandeskarten haben, können sie mit diesen in einem geografischen Informationssystem überlagert und zur konkreten Massnahmenplanung weiterverwendet werden.

Die thematische und datenmässige Einbindung der Waldlücken in den gesamten Wald- bzw. Landschaftskontext wird gerade in einem solchen Ausnahmefall noch wichtiger. Die kontinuierlichen Baumstrukturkarten erlauben es, den einzelnen Bestand in seiner Umgebung räumlich und thematisch zu analysieren und zu planen. Dabei geben die Karten den ganzen möglichen Gradient der Variable (Kronendeckungsgrad, Höhenvariabilität) wieder und reduzieren die Landschaft nicht auf einzelne Landschaftstypen. Basierend auf diesen Rohdaten können schliesslich verschiedene Such- und damit Klassifikationsstrategien umgesetzt werden. Waldlücken, welche mittlere Kronendeckungsgradverhältnisse darstellen, sind eine mögliche Klassifikation. Doch können die Daten auch nach anderen Kriterien der Nutz-, Schutz- und Wohlfahrtsfunktionen klassiert werden. Dabei beschränken sich solche ressourcenorientierte Suchstrategien nicht auf das Waldareal und können damit neue Potenziale in der übrigen Landschaft zum Vorschein bringen. So zeigen die Strukturdaten für den Kanton Genf einige potenzielle Gebiete im suburbanen Raum mit hohen Kronendeckungsgraden und Strukturvielfalt auf. Die auf Laserscanning basierenden Strukturgradienten erlauben damit eine nachhaltige Analyse und Planung der Waldressourcen in einem gesamtlandschaftlichen Ressourcenkontext. Kontinuierliche Strukturgradienten ermöglichen es zudem, Veränderungen entlang des ganzen Variablenpektrums zu erfassen. Im Gegensatz dazu werden Veränderungen in einer diskreten Klassifikation erst erfasst, sobald ein definitionsbedingter Schwellenwert überschritten wird. Je nach Zielfunktion kann dies für ein nachhaltiges Ressourcenmanagement bereits zu spät sein. Um diese Veränderungen aber beobachten zu können, müssten Laserscanning-Daten für weitere Zeitstände in geeigneter räumlicher und zeitlicher Auflösung vorhanden sein.

## Zusammenfassung

Waldlücken sind ein entscheidendes Strukturelement in der raum-zeitlichen Walddynamik. Dieser Aufsatz beschreibt und quantifiziert für den Kanton Genf zwei methodische Ansätze zur flächendeckenden und automatischen Lückenerfassung mittels Laserscanning. Im ersten Ansatz werden Waldlücken als diskrete Polygone deliniert. Waldlücken sind damit über ihre Fläche und Randstruktur beschrieben. Aufgelöste Bestände lassen sich aber nur schwierig mit einer diskreten Klassifikation delinieren. Deshalb ist in einem zweiten Ansatz der Kronendeckungsgrad und die vertikale Strukturvielfalt als kontinuierliche Variable erfasst worden. Resultierende Lücken im Baumkronendach sind ein häufiges und bereicherndes Wald-, aber auch Landschaftsstrukturelement.

## Résumé

### Recensement des clairières par scannage laser

Les clairières constituent un élément structurel déterminant pour la dynamique spatio-temporelle des forêts. Cet article décrit et quantifie, pour le canton de Genève, deux méthodes

permettant de recenser intégralement et automatiquement les clairières au moyen d'un scannage laser. La première méthode permet de délinéer les espaces vides sous forme de polygones discrets. Les clairières sont ainsi décrites en fonction de leur surface et de la structure de leur lisière. Il est cependant difficile de délinéer les peuplements clairsemés à l'aide d'une classification discrète. C'est pourquoi la deuxième méthode permet de recenser le degré de recouvrement et la diversité structurelle verticale sous forme de variable continue. Les trouées dans le couvert constituent un élément fréquent et enrichissant pour la structure des forêts et du paysage.

Traduction: CLAUDE GASSMANN

## Summary

### Mapping of Woodland Gaps through Laserscanning

Woodland gaps are relevant to the spatiotemporal dynamics of forest ecosystems. Two methods for woodland gap detection based on laserscanning data are described and applied to the entire Canton Geneva, Switzerland. In the first approach, gaps are delineated as discrete polygons. A woodland gap is therefore characterised by its area and border structure. A discrete gap, however, is a difficult concept in scattered tree stands. In a second approach, therefore, tree canopy cover and height variability were mapped as continuous variables. Resulting gaps in the tree canopy are frequent elements that enrich the structure of the forest and general landscape.

## Literatur

- BOUGET, C.; DUELLI, P. 2004: The effects of windthrow on forest insect communities: a literature review. *Biol. Conserv.* 118: 281–299.
- COHEN, J. 1960: A coefficient of agreement for nominal scales. *Educational and Psychological Measurement* 20: 37–46.
- DENSLON, J.S. 1980: Gap partitioning among tropical rain forest trees. *Biotropica* 12, Suppl.: 47–55.
- FACCIO, S.D. 2003: Effects of ice storm-created gaps on forest breeding bird communities in central Vermont. *For. Ecol. Manage.* 186: 133–145.
- GREENBERG, C.H.; LANHAM, J.D. 2001: Breeding bird assemblages of hurricane-created gaps and adjacent closed canopy forest in the southern Appalachians. *For. Ecol. Manage.* 154: 251–260.
- HUBBELL, S.P.; FOSTER, R.B.; O'BRIEN, S.T.; HARMS, K.E.; CONDIT, R.; WECHSLER, B.; WRIGHT, S.J.; LOO DE LAO, S. 1999: Light-gap disturbances, recruitment limitation, and tree diversity in a neotropical forest. *Science* 283: 554–557.
- HUNZIKER, M.; KIENAST, F. 1999: Potential impacts of changing agricultural activities on scenic beauty – a prototypical technique for automated rapid assessment. *Landsc. Ecol.* 14: 161–176.
- JACSMAN, J. 1998: Konsequenzen der intensiven Erholungsnutzung für die Wälder im städtischen Raum. *Schweiz. Z. Forstwes.*, 149, 6: 423–439.
- KOUKOULAS, S.; BLACKBURN, G.A. 2004: Quantifying the spatial properties of forest canopy gaps using Lidar imagery and GIS. *Int. J. Remote Sensing* 25, 15: 3049–3071.
- KWIT, C.; PLATT, W. 2003: Disturbance history influences regeneration of non-pioneer understory trees. *Ecology* 84, 10: 2575–2581.
- LEFSKY, M.A.; COHEN, W.B.; PARKER, G.G.; HARDING, D.J. 2002: Lidar remote sensing for ecosystem studies. *BioScience* 52, 1: 19–30.
- MAHRER, F. 1980: Application of aerial photography in the Swiss National Forest Inventory (NFI). *International archives of photogrammetry* 23: 589–600.
- MEYER-GRASS, M.; SCHNEEBELI, M. 1992: Die Abhängigkeit der Waldlawinen von Standorts-, Bestandes- und Schneeverhältnissen. In: *Internationales Symposium Interpraevent*, Bern, Tagungspublikation, Bd. 2: 443–455.
- MORSBORG, F.; MEIER, E.; KÖTZ, B.; ITTEN, K.I.; DOBBERTIN, M.; ALLGÖWER, B. 2004: Lidar-based geometric reconstruction of boreal type forest stands at single tree level for forest and wildland fire management. *Remote Sens. Environ.* 92, 3: 353–362.

- NÆSSET, E. 2002: Predicting forest stand characteristics with airborne scanning laser using a practical two-stage procedure and field data. *Remote Sens. Environ.* 80, 1: 88–99.
- PERSOON, Å.; HOLMGREN, J.; SÖDERMANN, U. 2002: Detecting and measuring individual trees using an airborne laser scanner. *Photogramm. Eng. Remote Sens.* 68, 9: 925–932.
- POULSON, T.L.; PLATT, W.J. 1989: Gap light regimes influence canopy tree diversity. *Ecology* 70, 3: 553–555.
- RIAÑO, D.; MEIER, E.; ALLGÖWER, B.; CHUVIECO, E.; USTIN, S. 2003: Modeling airborne laser scanning data for the spatial generation of critical forest parameters in fire behavior modeling. *Remote Sens. Environ.* 86, 2: 177–186.
- SCHÖNENBERGER, W.; FISCHER, A.; INNES J.L. (Eds.) 2002: Vivian's legacy in Switzerland – impact of windthrow on forest dynamics. *For. Snow Landsc. Res.* 77, 1/2: 1–224.
- ST-ONGE, B.; VEPAKOMMA, U. 2004: Assessing forest gap dynamics and growth using multi-temporal laser-scanner data. *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens.*, Vol. XXXVI-8/W2: 173–178.
- WHITMORE, T.C. 1975: *Tropical rain forest of the far east*. Clarendon, Oxford, 282 S.
- WILD-ECK, S. 2003: Wahrnehmung von städtischen Grünräumen und Lebensqualität. *Schweiz. Z. Forstwes.* 154, 10: 405–409.
- YAMAMOTO, S.-I. 2000: Forest gap dynamics and tree regeneration. *J. For. Res.* 5: 223–229.
- ZIMBLE, D.A.; EVANS, D.L.; CARLSON, G.C.; PARKER, R.C.; GRADO, S. C.; GERARD, P.D. 2003: Characterizing vertical forest structure using small-footprint airborne Lidar. *Remote Sens. Environ.* 87, 2–3: 171–182.

#### *Dank*

Der GIS-Stelle des Kantons Genf danke ich für die Zurverfügungstellung der Laserscanning-Gelände- und -Oberflächenmodelle, Luftbilder sowie die weiteren Geodaten. U. Ulmer, P. Duc, N.E. Zimmermann sowie zwei anonyme Reviewer gaben wertvolle Anregungen zu früheren Versionen des Aufsatzes.

#### *Autor*

LUKAS MATHYS, Biologe M. Sc., Eidg. Forschungsanstalt WSL, Zürcherstrasse 111, CH-8903 Birmensdorf. E-Mail: lukas.mathys@wsl.ch.