

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

Herausgeber: Schweizerischer Forstverein

Band: 162 (2011)

Heft: 9

Artikel: Kombination von Landesforstinventar- und Fernerkundungsdaten für Kleingebietsschätzungen

Autor: Steinmann, Katharina / Ginzler, Christian / Lanz, Adrian

DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-1097733>

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>

Kombination von Landesforstinventar- und Fernerkundungsdaten für Kleingebietsschätzungen

Katharina Steinmann Eidgenössische Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft (CH)*
Christian Ginzler Eidgenössische Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft (CH)
Adrian Lanz Eidgenössische Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft (CH)

Combining data from the Swiss National Forest Inventory and from remote sensing for small-area estimations in forestry

A design-unbiased small estimator was tested in this study. This estimator combines terrestrial data from the Swiss National Forest Inventory (LFI) with ancillary data from stereo aerial images and airborne laser scanner (ALS) data. The estimator was tested for the two target variables: the percentage of forest and the timber volume. The efficiency of the estimator depends on the model precision of the target variable obtained with remote sensing data and other ancillary spatial data, which can potentially explain the spatial variation of the target variable. Canopy heights derived from stereo aerial images (ADS40) and ALS data were used as ancillary data. Regression models for the timber volume and the forest/non-forest decision of the LFI samples were calibrated within the cantons Appenzell Inner Rhodes and Appenzell Outer Rhodes and provided a coefficient of determination of roughly 60%. Adding the forest/non-forest decision from the aerial photo interpretation of the LFI as an explanatory variable slightly improved the models and allowed to gain a coefficient of determination of 65% for the timber volume and 85% for the forest/non-forest decision. Within the forest area, the canopy height models explained nearly 40% (ALS data) and 20% (ADS40 data) of the observed timber volume variability. This case study shows that using remote sensing data can increase the precision (in terms of the standard error) of the timber volume estimation in canton Appenzell Inner Rhodes by roughly 30%. The same is valid for the estimation of the percentage of forest. A reduction in the standard error of about 10% for the latter estimation was obtained by using the aerial images and nearly 25% using the ALS data.

Keywords: small-area estimation, regression estimator, standing volume, remote sensing
doi: 10.3188/szf.2011.0290

* Zürcherstrasse 111, CH-8903 Birmensdorf, E-Mail katharina.steinmann@wsl.ch

Für die Forstwirtschaft und die Umweltpolitik ist eine genaue Kenntnis des Zustandes der Waldressourcen unabdingbar (Grundmann 2009, Werland 2009). Ohne genaue Kenntnisse des momentanen Zustandes und der Veränderungen des Schweizer Waldes wäre beispielsweise das für das Kyoto-Protokoll notwendige Treibhausgasinventar nicht möglich (Thürig & Schmid 2008, FOEN 2010) und es fehlten wichtige Grundlagen für die schweizerische Waldpolitik (Projektleitung WAP-CH, BHP Brugger 2004, Buwal & WSL 2005). Aus wiederholten Waldinventuren können nicht nur der momentane Zustand und rückblickend Veränderungen hergeleitet, sondern auch die zukünftige Entwicklung der Waldressourcen abgeschätzt werden (Thürig & Kaufmann 2008). Terrestrische Inventuren sind kostenintensiv. Ein grosses Potenzial, die Inventurkosten

zu senken, haben Fernerkundungsdaten (Eid et al 2004, McRoberts et al 2006, Næsset et al 2004, McRoberts 2006, Tomppo et al 2008). Diese können für die Schätzung verschiedener Populationsparameter und die Modellierung unterschiedlicher Variablen eingesetzt werden, zum Beispiel auf der Einzelbaumbene für die Baumhöhe (Næsset 1997a, Magnussen et al 1999), Basalfläche (Franklin 1986, Wolter et al 2008) oder die Kronengrösse (Wu & Strahler 1994, Song et al 2010). Auf der Bestandesebene können Fernerkundungsdaten verwendet werden, um den Kronenschluss, die Artenzusammensetzung (Waser et al 2010a, 2010b), die Stammzahl-dichte (Hudak et al 2006, McRoberts 2008) sowie das Bestandesalter zu schätzen. Zusätzlich ermöglichen Hilfsvariablen aus Luftbildern, Laser- oder Satellitendaten die Schätzung von Populations-

parametern in kleinen Gebieten, in welchen nur wenige terrestrische Probeflächen vorhanden sind (Fay & Herriot 1979, Tomppo et al 2008).

Von Kleingebietsschätzungen wird gesprochen, wenn aus den Daten einer Inventur, welche in ihrem Umfang und Design für ein grosses Gebiet optimiert ist (z.B. eine nationale Waldinventur), Schätzungen für ein kleines Gebiet (z.B. einen Forstkreis oder einen kleinen Kanton) gemacht werden sollen. Bei der Kleingebietsschätzung geht es also darum, trotz der an sich ungenügenden Datenlage (zu kleine Stichprobe) doch noch zu akzeptablen Ergebnissen zu kommen (Lanz et al 2009). Eine Möglichkeit besteht darin, Hilfsvariablen einzusetzen (z.B. Fernerkundungsdaten), welche mit der zu untersuchenden Zielgrösse gut korrelieren und für das Kleingebiet flächendeckend (allenfalls in einer grossen Stichprobe) zur Verfügung stehen. Mit den Hilfsvariablen wird die Zielvariable modelliert, wobei das Modell oft in einem grösseren Gebiet kalibriert wird. Dabei stehen verschiedene parametrische und nicht-parametrische Regressionsmodelle (generalisierte lineare Regressionsmodelle, kNN-Regressionen etc.) wie auch geostatistische Verfahren zur Auswahl (Janzen et al 2002, Mandallaz 2008, Tomppo et al 2008, Lanz et al 2009, Nothdurft et al 2009). Eine erste Möglichkeit besteht darin, den gesuchten Populationsparameter aus den (fast) flächendeckend vorhandenen Modellvorhersagen im Kleingebiet zu schätzen. Die statistischen Eigenschaften dieser synthetischen Schätzung (Mandallaz 2008, Rao 2003) hängen wesentlich davon ab, ob das Kleingebiet ähnliche Charakteristiken wie das grössere Gebiet aufweist, in welchem das Modell kalibriert wurde. Die Schätzung ist modellabhängig und damit nicht ob-

jektiv, leicht anfechtbar und wenig akzeptiert. Falls das Kleingebiet doch so gross ist, dass einige Stichprobenpunkte in diesem liegen, kann die synthetische Schätzung mit dem Differenzschätzer korrigiert und in ihrer Genauigkeit überprüft werden (Särndal et al 1992, Rao 2003, Mandallaz 2008, Lanz et al 2009). Diese Schätzung berücksichtigt die Modellabweichungen im Kleingebiet. Sie ist objektiv (Design-unverzerrt) und dadurch allgemein akzeptiert (nicht anfechtbar).

Vom ökonomischen Standpunkt aus sind die Waldfläche, das Holzvolumen und die daraus abgeleitete Biomasse von besonderem Interesse. Weil sowohl die Unterscheidung zwischen Wald- und Nichtwaldareal wie auch der Holzvorrat im Waldareal mit der Kronenhöhe gut korrelieren, ist ein digitales Oberflächenmodell eine häufig verwendete Hilfsinformation. Für die Berechnung des Modells gibt es grundsätzlich zwei Techniken: die Benutzung von Lidardaten (LiDAR: Light detection and ranging systems) sowie photogrammetrische Verfahren (Kovats 1997, Katsch & Stocker 2000, Latifi et al 2010, Hildebrandt 2010). In der vorliegenden Studie benutzen wir sowohl aus Stereoluftbildern wie auch aus Lidardaten abgeleitete Hilfsvariablen, welche wir in einfachen Regressionsmodellen zu den auf den Probeflächen der terrestrischen Inventur des Landesforstinventars (LFI) beobachteten Holzvorräten und Wald-Nichtwald-Entscheidungen in Beziehung setzten. Ziel der Studie war es, herauszufinden, welche Hilfsinformationen und statistischen Methoden für die Kleingebietsschätzung bezüglich des Holzvorrats und des Waldanteils am effizientesten sind respektive inwieweit sich die verschiedenen Ansätze unterscheiden.

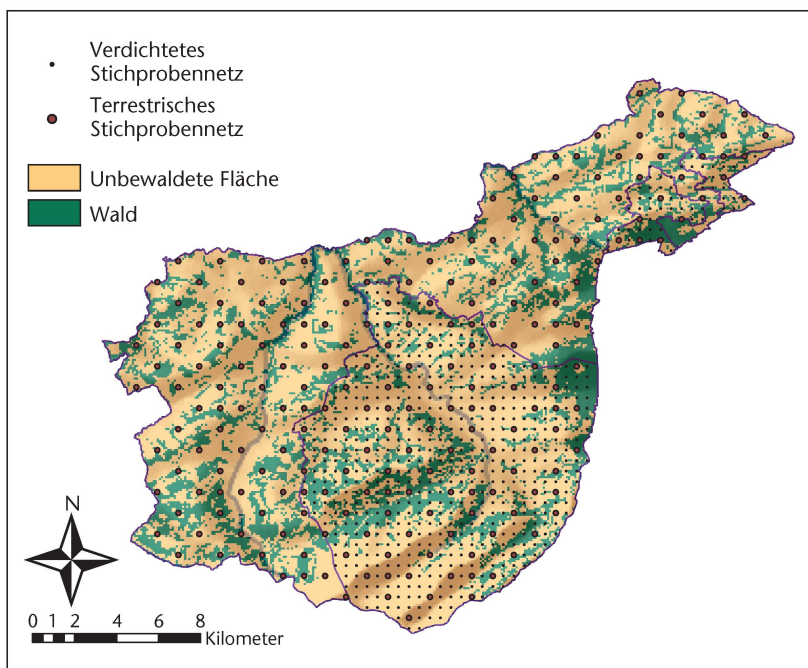


Abb 1 Anordnung der Stichproben im Testgebiet der Kantone Appenzell Innerrhoden und Ausserrhoden.

Material und Methoden

Als Testgebiet verwendeten wir das Gebiet der beiden Kantone Appenzell Innerrhoden und Ausserrhoden, welche zusammen eine Fläche von insgesamt 416 km² aufweisen. Dabei betrachteten wir den Kanton Appenzell Innerrhoden als Kleingebiet, in welchem wir auf einem verdichteten Stichprobenetz von 500 m × 500 m die Hilfsvariablen herleiteten. Die Anordnung der Stichproben ist in Abbildung 1 wiedergegeben. Die Stichprobenumfänge sind aus der Tabelle 1 ersichtlich. Als Zielvariablen benutzten wir das von den Probeflächen repräsentierte Holzvolumen (Hektardichte der lebenden Bäume) sowie den Wald-Nichtwald-Entscheid (vgl. Keller 2005). Die Daten stammen aus dem dritten Schweizerischen Landesforstinventar (LFI3), für welches die terrestrische Erhebungen in den Jahren 2004 bis 2006 erfolgten (Brändli 2010). Das terrestrische Grundnetz des LFI3 besteht aus einem Netz mit einer Maschengrösse von 1.414 km und einem

	Appenzell Innerrhoden	Appenzell Ausserrhoden	Gesamt
Fläche (ha)	17 252	24 283	41 535
Probeflächen in der Luftbildstichprobe (500 m × 500 m; n ₁)	692	972	1664
Probeflächen in der terrestrischen Stichprobe (1.4 km × 1.4 km; n ₂)	97	135	232
Davon Waldprobenflächen	35	50	85

Tab 1 Fläche des Untersuchungsgebiets und Stichprobengrößen.

Zusatznetz mit Maschengröße 4 km, welches diagonal zum Grundnetz liegt (Abbildung 1, für Details siehe Brändli 2010). Die einzelne Probefläche erfasst die Bäume auf zwei konzentrischen Kreisen. Im kleineren Kreis von 2 Aren Größe wurden Bäume mit einem Brusthöhendurchmesser von mindestens 12 cm, im grösseren Kreis solche mit einem Brusthöhendurchmesser von mindestens 36 cm aufgenommen.

Im LFI gilt eine Probefläche nur dann als Waldprobefläche, wenn das Zentrum im Wald liegt. Auf Nichtwaldprobeflächen werden per Definition keine Bäume gemessen (Vorrat ist 0). Der Wald-Nichtwald-Entscheid ist als binomiale Grösse (1=Wald, 0=Nichtwald) definiert. Das Holzvolumen auf der Waldprobefläche ist die repräsentierte (lokale) Hektardichte (m³/ha). Details zur Herleitung dieser zwei Zielgrößen sind in Kaufmann (1999) gegeben. Diese Untersuchung bezieht sich auf das Waldareal ohne Gebüschwald.

Hilfsvariablen

Die Luftbilder wurden von einem flugzeuggetragenen digitalen Sensor (Leica ADS40) am 9. Mai beziehungsweise am 7. und 28. Juli 2008 aufgenommen. Mittels Bildkorrelation (unter der Verwendung der Software SocetSet 5.4.1, BAE) wurde aus den stereoskopischen Bildstreifen ein Oberflächenmodell mit einer Auflösung (Pixelgrösse) von 1 m × 1 m erstellt.

Das digitale Geländemodell wurde aus den Lidardaten der Mai- und Oktober-Befliegungen des Jahres 2005 interpoliert. Die mittlere Punktdichte im Untersuchungsgebiet betrug 0.85 Punkte pro Pixel. Die Höhengenaugigkeit (Standardabweichung) wird von Swisstopo mit 0.5 bis 1.5 m angegeben. Wie in Abbildung 2 gezeigt, kann das Kronenhöhenmodell aus der Differenz des digitalen Oberflächenmodells und des Geländemodells berechnet werden.

Weil die Präzision von Schätzungen nicht nur vom Modelltyp, sondern auch von der Qualität der Daten abhängt, verwendeten wir verschiedene Methoden zur Aufbereitung der Daten (Abbildung 2). Eine Herausforderung liegt in der Koregistrierung der terrestrischen Daten mit den Fernerkundungsdaten. So können sich bei der Einmessung der Probeflächenzentren der terrestrischen Daten im Feld Abweichungen von der Sollkoordinate ergeben, die im Bereich von über 10 m liegen können. Bei Aufnahmeflächen mit einem Radius in derselben Größenordnung ist es also möglich, dass eine Luftbildprobefläche nur zur Hälfte die dazugehörige terrestrische

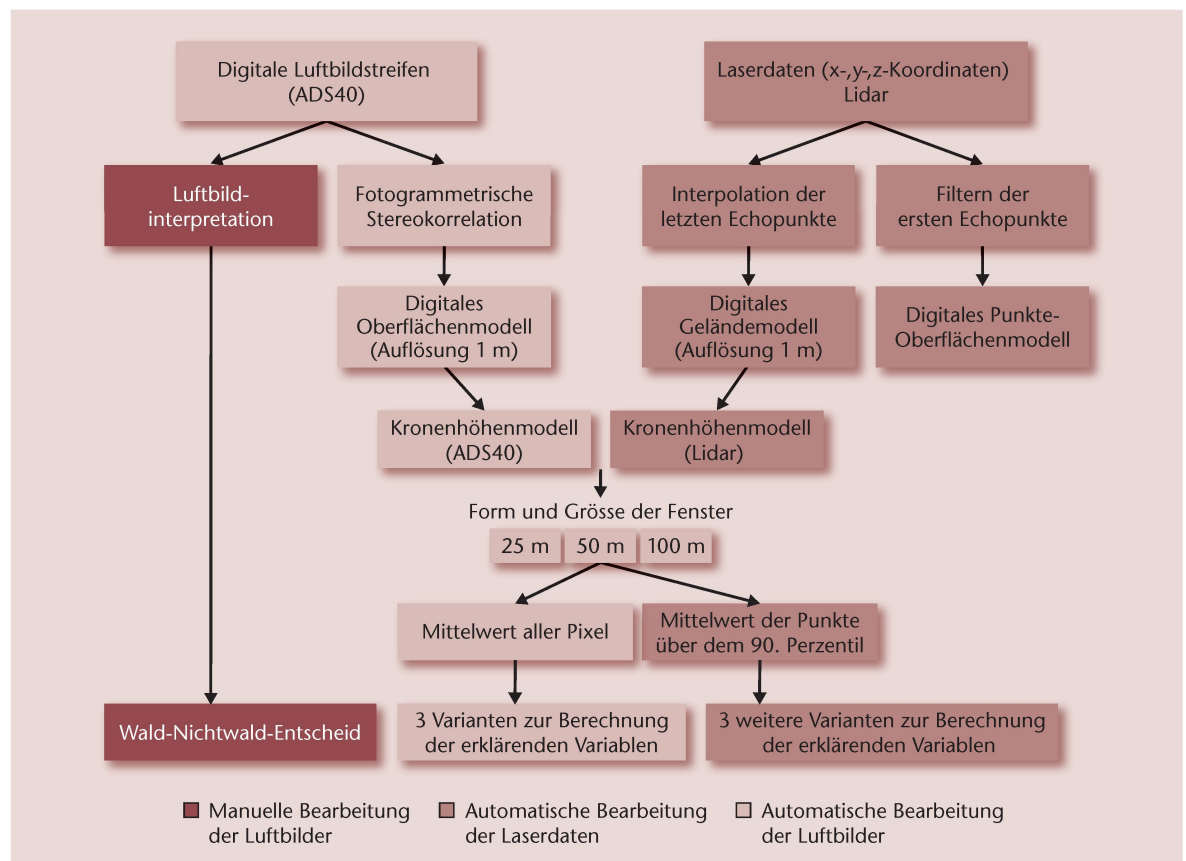


Abb 2 Aufbereitung der Hilfsvariablen aus den Fernerkundungsdaten.

Probefläche überdeckt. Liegt das Zentrum der terrestrischen Aufnahme fläche in der Nähe eines Waldrandes, so kann die Schätzung des Holzvorrates durch einen um 10 m verschobenen Luftbildauschnitt, welcher vollumfänglich auf ein Gebiet ausserhalb des Waldes fällt, zusätzlich mit grossen Fehlern behaftet sein. Um den Effekt dieser Fehlerquelle zu testen, verwendeten wir verschieden grosse quadratische Flächen um die Probeflächenzentren, für die die Hilfsvariablen berechnet wurden. So wurden die Hilfsgrössen innerhalb von Quadraten mit Seitenlängen von 25 m, 50 m und 100 m berechnet. Die Mittelwerte aller Pixel innerhalb dieser Quadrate wurden aus den Luftbilddaten berechnet und als Kronenhöhe verwendet. Im Falle der Laserdaten wurde die Kronenhöhe über den Mittelwert aller Punkte, die in ein Quadrat fielen und über dem 90. Perzentil lagen, berechnet. Für Stichprobepunkte, bei denen die Kronenhöhe negativ ausfiel, wurde eine Kronenhöhe von null gesetzt. Überstieg die Kronenhöhe den Wert von 50 m, wurde 50 m angenommen.

Neben den Kronenhöhenmodellen aus Luftbild- und Lidardaten wurde in einigen Modellen auch der Wald-Nichtwald-Entscheid aus der Luftbildinterpretation des LFI verwendet. Dieser wurde von den Luftbildinterpretierten für jeden Stichprobepunkt im 500-m×500-m-Netz unabhängig vom Wald-Nichtwald-Entscheid aus der terrestrischen Inventur gefällt (für Details siehe Ginzler et al 2005).

In einem weiteren Ansatz wurde der Wald-Nichtwald-Entscheid auf dem 500-m×500-m-Netz wiederum aus den Oberflächenmodellen modelliert (modellierter Waldentscheid). Mit einer logistischen Regression wurde aufgrund der Baumhöhendaten die Wahrscheinlichkeit für das Vorhandensein von Wald vorhergesagt. Stichprobepunkte, für die eine Wahrscheinlichkeit für die Präsenz von Wald von 50% oder mehr vorhergesagt wurde, wurden als Waldprobepunkte definiert, die übrigen Punkte wurden als Nichtwaldproben betrachtet.

Schätzprozeduren und Modelle

Für die Schätzung der mittleren räumlichen Dichte der Zielgrösse im Kleingebiet steht zunächst als Referenz die direkte, einphasige Schätzung

$$\hat{Y}_{dir,k} = \frac{1}{n_{2,k}} \sum_{x \in S_{2,k}} Y(x) \quad (1)$$

mit geschätzter Varianz

$$\hat{V}(\hat{Y}_{dir,k}) = \frac{1}{n_{2,k}} \hat{V}(Y(x)_k) \quad (2)$$

zur Verfügung, wobei

$$\hat{V}(Y(x)_k) = \frac{1}{n_{2,k} - 1} \sum_{x \in S_{2,k}} (Y(x) - \bar{Y}_{2,k})^2 \quad (3)$$

die empirische (beobachtete) Varianz der Zielgrösse im Kleingebiet bezeichnet.

Es sind:

$s_{2,k}$: die terrestrische Stichprobe im Kleingebiet k mit einem Umfang von $n_{2,k}$ Probeflächen

$Y(x)$: beobachtete Hektardichte der Zielgrösse auf der x -ten Probefläche (Holzvorrat pro ha bzw. Wald-Nichtwald-Entscheid)

$\bar{Y}_{2,k}$: arithmetischer Mittelwert der Hektardichten in der Stichprobe $s_{2,k}$

Für jeden Schnittpunkt im verdichteten Stichprobennetz ($s_{1,k}$) ist eine Modellvorhersage der Hektardichte der Zielgrösse vorhanden, wobei diese grundsätzlich aus einem beliebigen (externen) Modell stammen darf. Der Schätzer

$$\hat{Y}_{syn,k} = \frac{1}{n_{1,k}} \sum_{x \in S_{1,k}} \hat{Y}(x) \quad (4)$$

liefert eine synthetische Schätzung der mittleren räumlichen Dichte der Zielgrösse im Kleingebiet, wobei

$s_{1,k}$: die verdichtete Stichprobe im Kleingebiet k mit einem Umfang von $n_{1,k}$ Probepunkten

$\hat{Y}(x)$: modellierte Hektardichte der Zielgrösse auf der x -ten Probefläche

Die dazugehörige Varianz ist gegeben durch

$$\hat{V}(\hat{Y}_{syn,k}) = \frac{1}{n_{1,k}} \hat{V}(\hat{Y}(x)_k) \quad (5)$$

Weil bei der synthetischen Schätzung die Modellvorhersagen aus einem externen Modell stammen, d.h. Informationen von ausserhalb des Kleingebiets verwendet werden, wird der wahre, unbekannte Wert des gesuchten Populationsparameters in der Regel in einem nicht bekannten Ausmass über- oder unterschätzt. Ein Ausweg bietet der folgende Design-unverzerrte, erwartungstreue Schätzer

$$\hat{Y}_{diff,k} = \hat{Y}_{syn,k} + \frac{1}{n_{2,k}} \sum_{x \in S_{2,k}} R(x) \quad (6)$$

wobei

$R(x) = Y(x) - \hat{Y}(x)$: Residuum zwischen beobachteter und modellierter Hektardichte der Zielgrösse auf der x -ten Probefläche

Ein Design-unverzerrter Schätzer für die Varianz von $\hat{Y}_{diff,k}$ ist

$$\hat{V}(\hat{Y}_{diff,k}) = \frac{1}{n_{2,k}} \hat{V}(R(x)) + \frac{1}{n_{1,k}} \hat{V}(Y(x)) - \frac{1}{n_{1,k}} \hat{V}(R(x)) \quad (7)$$

wobei $\hat{V}(R(x))$ in Analogie zu $\hat{V}(Y(x))$ (Formel 3) gemäss

$$\hat{V}(R(x)) = \frac{1}{n_{2,k} - 1} \sum_{x \in S_{2,k}} (R(x) - \bar{R}_{2,k})^2$$

auf den $n_{2,k}$ Probeflächen der terrestrischen Stichprobe im Kleingebiet k geschätzt wird.

Hilfsvariable	Erklärte Varianz der Zielvariablen in der terrestrischen Stichprobe							
	Vorrat				Waldanteil			
	ADS40		Lidar		ADS40		Lidar	
Terrestrische Stichprobe								
Kronenhöhe 25 (+ LBE)	0.61	(0.65)	0.63	(0.66)	0.63	(0.84)	0.60	(0.84)
Kronenhöhe 50 (+ LBE)	0.56	(0.63)	0.56	(0.63)	0.62	(0.84)	0.57	(0.84)
Kronenhöhe 100 (+ LBE)	0.46	(0.59)	0.45	(0.60)	0.57	(0.83)	0.44	(0.83)
Nur Waldproben								
Kronenhöhe 25	0.21		0.37					
Kronenhöhe 50	0.16		0.30					
Kronenhöhe 100	0.05		0.21					

Tab 2 Erklärungsgrad der Modelle, die für die Schätzung der Holzvorräte und der Waldanteile über das Gebiet der Kantone Appenzell Ausserrhoden und Appenzell Innerrhoden verwendet wurden. ADS40: Luftbilddaten; Lidar: Lidardaten; LBE: Luftbildentscheid. Der Index der Kronenhöhe gibt die Seitenlänge (in m) der Stichprobenflächen zur Berechnung der Hilfsvariablen an. Die Werte in Klammern geben die Resultate der Modelle an, in denen der Luftbildentscheid als erklärende Variable integriert wurde.

Wir nennen diesen Schätzer in Anlehnung an Särndal et al (1992) Differenzschätzer, hier im Rahmen eines zweiphasigen Stichprobendesigns. Mandallaz (2009) verzichtet auf eine besondere Namensgebung für diesen Schätzer. In seinem Buch ist erschlicht der Standardschätzer unter einem zweiphasigen Stichprobendesign mit Hilfsinformationen in der ersten Phase, welche aus einem externen Modell stammen.

Eine Erweiterung des Differenzschätzers ergibt sich bei flächendeckend vorhandenen Hilfsinformationen, beispielsweise in Form von GIS-Layer. Die synthetische Schätzung kann formal als Integral geschrieben werden:

$$\hat{Y}_{syn,k} = \frac{1}{\lambda(G_k)} \int_{x \in G_k} \hat{Y}(x) dx \quad (8)$$

wobei $\lambda(G_k)$ die Fläche des Kleingebiets bezeichnet. Der Differenzschätzer für die mittlere Hektardichte der Zielgrösse im Kleingebiet behält die gleiche Form wie unter dem zweiphasigen Design (Formel 5), und

$$\hat{V}(\hat{Y}_{diff,k}) = \frac{1}{n_{2,k}} V(R(x)) \quad (9)$$

ist in diesem Fall ein Design-unverzerrter Schätzer für die Varianz von $\hat{Y}_{diff,k}$. Die Herleitung aus dem Varianzschätzer (7) ist intuitiv verständlich ($n_{1,k} \rightarrow \infty$). Dieser Schätzer wird von Mandallaz (2009) als Kleingebietsschätzer und von Särndal et al (1992) als Differenzschätzer unter einem einphasigen Design bezeichnet.

In der vorliegenden Studie wurden für die Differenzschätzer lineare, parametrische Modelle verwendet. Für die Schätzung des Holzvorrates wurden klassische Regressionsmodelle benutzt. Der Wald-Nichtwald-Entscheid wurde über eine logistische Regression modelliert.

Als Mass für die Genauigkeit der Schätzungen wurde der Standardfehler verwendet: $(SF(\hat{Y}) = \sqrt{\hat{V}(\hat{Y})})$.

Um den relativen Gewinn der Differenzschätzung gegenüber der direkten Schätzung anzugeben, wurde die relative Effizienz berechnet: $(RE = \hat{V}(\hat{Y}_{diff})/\hat{V}(\hat{Y}_{dir}))$.

Alle statistischen Formeln wurden in der Softwareumgebung R implementiert.¹ Für die GIS-Prozeduren wurden die rgdal-, sp- und raster- Bibliotheken von R verwendet.²

Resultate

Modellgüte

Wenn alle terrestrischen Probeflächen in den Kantonen Appenzell Innerrhoden und Ausserrhoden innerhalb und ausserhalb des Waldareals berücksichtigt werden, wenn also Nichtwaldgebieten eine Kronenhöhe von null zugewiesen wird, erklärt die Kronenhöhe bis zu 63% der Varianz der Variable Vorrat auf den Probeflächen (Tabelle 2). Wenn die Modelle nur über die Waldprobeflächen erstellt werden, kann die Kronenhöhe noch knapp 40% der Varianz der Variable Vorrat erklären. Die Modelle, für welche die Hilfsvariablen aus Quadraten mit Seitenlängen von 25 m extrahiert wurden, zeigen stets den besten Erklärungsgrad. Wenn der Holzvorrat über die ganze Fläche modelliert wird, resultieren aus den Luftbilddaten ähnlich gute Modelle wie aus den Lidardaten. Bei der Modellierung des Holzvorrates im Wald allein zeigen die Lidardaten einen im Vergleich

1 R DEVELOPMENT CORE TEAM (2009) R: A language and environment for statistical computing. Vienna: R Foundation for Statistical Computing. www.R-project.org (27.4.2011)

2 KEITT HT, BIVAND R, PEBESMA E, ROWLINGSON B (2010) Package 'rgdal': Bindings for the geospatial data abstraction library. Version: 0.6-28. sourceforge.net/projects/rgdal/ (27.4.2011)
PEBESMA E, BIVAND ROGER (2010) Package 'sp': Classes and methods for spatial data. Version 0.9-72. <http://r-spatial.sourceforge.net/> (27.4.2011)
HIJMANS RJ, VAN ETEN J (2010) Package 'raster': Geographic analysis and modeling with raster data. Version 1.5-16. <http://raster.r-forge.r-project.org/> (27.4.2011)

zu den Luftbildern um 15 Prozentpunkte höheren Erklärungsgrad. Die Hinzunahme des Wald-Nichtwald-Entscheid aus der Luftbildinterpretation in die Modelle für den Holzvorrat verbessert diese nur geringfügig. Einzig bei den Modellen, deren Hilfsinformationen aus den Quadraten mit der Seitenlänge von 100 m extrahiert wurden, bringt der Wald-Nichtwald-Entscheid aus der Luftbildinterpretation eine Verbesserung von mehr als 10%.

Die Modelle für den Wald-Nichtwald-Entscheid erreichen einen Erklärungsgrad von rund 60% (siehe Tabelle 2), wobei die Modelle, welche auf den Luftbilddaten basieren, für diese Zielgrösse leicht besser sind als die Modelle mit den Lidardaten. Bei Hinzunahme des Waldentscheid aus der Luftbildinterpretation als erklärende Variable verbessert sich der Erklärungsgrad der Modelle um rund 20 Prozentpunkte.

Direkte Schätzungen

Der aus der terrestrischen Inventur direkt geschätzte, mittlere Holzvorrat pro Hektar Kantonsfläche liegt im Kanton Appenzell Ausserrhoden bei 234 m³/ha (Standardfehler [SF]=32.02), im Kanton

Appenzell Innerrhoden bei 184 m³/ha (SF=30.79). Der geschätzte mittlere Holzvorrat pro Hektar Wald beträgt 631 m³ (SF=49.79) im Kanton Ausserrhoden beziehungsweise 510 m³ (SF=50.28) im Kanton Appenzell Innerrhoden (Tabelle 3).

Der direkt aus den terrestrischen Daten geschätzte Waldanteil im Kanton Appenzell Innerrhoden liegt bei 36%, mit einem Standardfehler von 4.9 Prozentpunkten. Im Kanton Appenzell Ausserrhoden liegt der Waldanteil bei 37%, mit einem Standardfehler von 4.2 Prozentpunkten (Tabelle 3).

Kleingebietsschätzungen

Weil die Modelle, für die die Hilfsinformationen in Quadraten der Seitenlänge 25 m berechnet wurden, stets die besten Ergebnisse zeigen, werden im Folgenden auch nur Resultate basierend auf diesen Daten dargestellt (die Ergebnisse für Quadrate mit Seitenlänge 50 m und 100 m weisen jedoch ähnliche Muster auf).

Die Schätzgenauigkeiten der Differenzschätzer auf dem 500-m×500-m-Netz unterscheiden sich nur gering von den Schätzgenauigkeiten, die bei flächendeckenden Modellvorhersagen erreicht werden könnten (Tabelle 4 zeigt Differenzen der Standardfehler beider Schätzer von weniger als 2 m³/ha). Somit bewegt sich auch die Reduktion der Varianz der beiden Schätzer gegenüber der direkt aus den terrestrischen Beobachtungen geschätzten Varianz in derselben Grössenordnung (siehe relative Effizienz der beiden Schätzer in Tabelle 4).

Mittlerer Holzvorrat über das ganze Kantonsgebiet

Für diese Modelle zeigen die Differenzschätzungen eine maximale Abweichung von 33 m³/ha von der direkten Schätzung (Tabelle 4, Modell ADS40).

		Gesamt	Appenzell Ausserrhoden	Appenzell Innerrhoden
Holzvorrat auf der Gesamtfläche (m ³ /ha)	Mittelwert	212	234	184
	Standardfehler	23	32	31
Holzvorrat im Wald (m ³ /ha)	Mittelwert	581	631	510
	Standardfehler	36	50	50
Waldanteil (%)	Mittelwert	0.37	0.37	0.36
	Standardfehler	0.032	0.042	0.049

Tab 3 Direkte Schätzung für das Holzvolumen und den Waldanteil über das Gebiet der Kantone Appenzell Ausserrhoden und Innerrhoden.

Erklärende Variablen	Direkte Schätzung		Synthetische Schätzung		Differenzschätzung				
	Mittelwert	Standardfehler	Mittelwert	Standardfehler	Mittelwert	500 m × 500 m		Flächendeckend	
						Standardfehler	Relative Effizienz	Standardfehler	Relative Effizienz
Holzvorrat (m³/ha)									
ADS40	184	31	213	9.45	151	23	0.56	22	0.50
ADS40 + LBE	184	31	190	9.57	157	22	0.49	20	0.42
Lidar	184	31	174	8.98	172	21	0.47	20	0.40
Lidar + LBE	184	31	176	9.25	164	20	0.44	19	0.36
Holzvorrat im Wald (m³/ha)									
Waldentscheid aufgrund der Luftbildinterpretation									
ADS40	510	50	540	9.50	492	45	0.80	44	0.77
Lidar	510	50	541	12.58	524	39	0.62	38	0.56
Waldentscheid aufgrund des Modells									
ADS40	510	50	584	8.13	535	45	0.81	44	0.77
Lidar	510	50	591	7.86	573	39	0.61	38	0.56

Tab 4 Vergleich verschiedener Methoden zur Schätzung des Holzvorrates in Appenzell Innerrhoden. Dargestellt sind die Resultate der Modelle, für die die Kronenhöhe innerhalb von Quadraten mit einer Seitenlänge von 25 m abgeleitet wurde. Unter «relativer Effizienz» der verglichenen Schätzverfahren ist das Verhältnis der Varianz des betreffenden Modells zur beobachteten Varianz zu verstehen. ADS40: Luftbilddaten, Lidar: Lidardaten, LBE: Luftbildentscheid.

Die auf Lidardaten basierenden Differenzschätzungen liegen in der Regel näher bei der direkten Schätzung. Während die synthetischen Schätzungen mit Luftbilddaten über der direkten Schätzung liegen, liefern die Lidardaten synthetische Schätzungen, die unter den direkten Schätzungen liegen. Die Differenzschätzer korrigieren jedoch alle synthetischen Schätzungen so weit nach unten, dass sie im Vergleich mit der direkten Schätzung ein tieferes mittleres Holzvolumen vorhersagen. Der direkte Schätzer liegt jedoch stets innerhalb des 95%-Vertrauensintervalls der Differenzschätzer. Dies gilt auch für die synthetischen Schätzer. Die Differenzschätzer der Modelle, welche auf den Lidardaten beruhen, liegen im Vergleich zu den Modellen, die auf den Luftbilddaten basieren, etwas näher beim direkt geschätzten Holzvolumen.

Je nach Modelltyp kann die Varianz um mehr als die Hälfte reduziert werden. Die höchste Schätzpräzision liefern die Laserdaten aus den Probenflächen mit Seitenlänge 25 m. Die relative Effizienz im Vergleich mit der direkten Schätzung liegt, wie beim Wald-Nichtwald-Entscheid, bei 0.44 (Tabelle 4, Lidar + LBE). Generell führen die Laserdaten im Vergleich zu den Luftbilddaten zu etwas präziseren Schätzungen des Holzvorrates.

Mittlerer Holzvorrat im Wald

Die Differenzschätzungen zeigen Abweichungen von unter 20 m³/ha von der direkten Schätzung, sofern der Waldentscheid des verdichteten Stichprobennetzes auf der Luftbildinterpretation basiert (Tabelle 4). Wird der Waldentscheid jedoch mittels Kronenhöhen modelliert, zeigen die Differenzschätzungen eine Abweichung von bis zu 63 m³/ha von der direkten Schätzung. Bei allen Modellen liegt der synthetische Schätzer über dem direkt geschätzten Holzvolumen. Auch in diesem Fall werden die synthetischen Schätzer nach unten korrigiert. Allerdings liegen die auf den Lidardaten basierenden Differenzschätzer über dem direkt geschätzten Holzvolumen. Dies gilt auch für den Differenzschätzer, der aus den ADS40-Daten hervorgeht, sofern der Waldentscheid aus den Luftbildern stammt. Für alle Modelle im

Waldareal gilt, dass der direkte Schätzer wie auch die synthetischen Schätzer innerhalb des 95%-Vertrauensintervalls der Differenzschätzer liegen. Allerdings ist bei dem Modell, welches auf dem modellierten Waldentscheid beruht, die Differenz zwischen dem Differenzschätzer und dem direkten Schätzer im Fall der Lidardaten mit einem Wert von 63 m³/ha relativ gross.

Mit den Lidardaten kann die Varianz der Schätzung um knapp die Hälfte reduziert werden (Tabelle 4: relative Effizienz von 0.56). Modelle, die auf den Luftbilddaten basieren, können die Varianz um knapp einen Viertel reduzieren (Tabelle 4: relative Effizienz von 0.77).

Unabhängig davon, ob der Wald-Nichtwald-Entscheid anhand der Luftbildinterpretation getroffen oder modelliert wird, ergibt sich für das geschätzte Holzvolumen dieselbe Schätzgenauigkeit.

Waldanteil im Kanton

Der Waldanteil wird mit Unterstützung durch Luftbilddaten etwas genauer geschätzt als mithilfe von Lidardaten (Tabelle 5). Die relative Effizienz liegt bei etwa 0.3 bis 0.4, bei Verwendung von Lidardaten rund 0.1 Punkte höher. Sobald jedoch der Wald-Nichtwald-Entscheid aus der Luftbildinterpretation des LFI in die Modelle integriert wird, führen Luftbild- und Lidardaten zu gleichen Schätzgenauigkeiten. Dieselben Schätzgenauigkeiten werden jedoch mit dem Wald-Nichtwald-Entscheid aus der Luftbildinterpretation alleine ebenfalls erreicht (Tabelle 5). Die beiden letzten Spalten in der Tabelle geben an, wie gross der Gewinn wäre, falls die Hilfsvariablen flächendeckend statt nur im 500-m×500-m-Netzgeniert würden.

Diskussion

Die Design-unverzerrten Differenzschätzungen korrigieren die direkten Schätzungen für den Holzvorrat und den Waldanteil im Kanton Appenzell Innerrhoden deutlich, aber innerhalb der Ver-

Erklärende Variablen	Direkte Schätzung		Synthetische Schätzung		Differenzschätzung				
	Mittelwert	Standardfehler	Mittelwert	Standardfehler	Mittelwert	500 m × 500 m		Flächendeckend	
						Standardfehler	Relative Effizienz	Standardfehler	Relative Effizienz
ADS40	0.37	0.049	0.32	0.013	0.31	0.031	0.40	0.028	0.32
ADS40 + LBE	0.37	0.049	0.32	0.001	0.31	0.024	0.24	0.018	0.14
Lidar	0.37	0.049	0.32	0.013	0.34	0.034	0.48	0.031	0.41
Lidar + LBE	0.37	0.049	0.32	0.001	0.32	0.024	0.24	0.018	0.13
LBE	0.37	0.049	0.38	0.015	0.37	0.024	0.23	0.018	0.13

Tab 5 Vergleich verschiedener Methoden zur Schätzung des Waldanteils in Appenzell Innerrhoden (Angaben in %). Dargestellt sind die Resultate der Modelle, für die die Kronenhöhe innerhalb von Quadraten mit einer Seitenlänge von 25 m abgeleitet wurde. Unter «relativer Effizienz» der verglichenen Schätzverfahren ist das Verhältnis der Varianz des betreffenden Modells zur beobachteten Varianz zu verstehen. ADS40: Luftbilddaten, Lidar: Lidardaten, LBE: Luftbildentscheid.

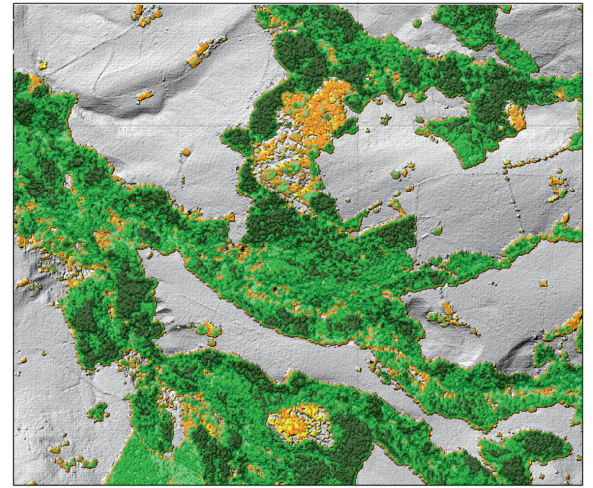
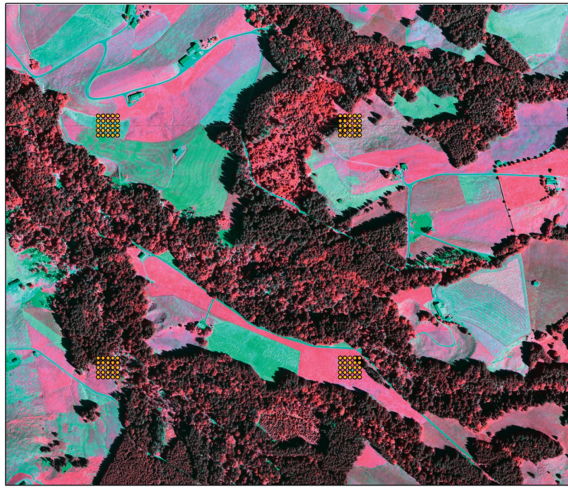


Abb 3 Beispiel der verwendeten Fernerkundungsdaten. Links: Farbinfrarotbild mit den Rasterpunkten der verdichteten Probeflächen aus der Luftbildinterpretation. Rechts: Kronenhöhen, welche aus den Stereoluftbildern und Lidardaten berechnet wurden; gelb 3–5 m, orange 5–10 m, hellgrün 10–15 m, grün 15–20 m, dunkelgrün > 20 m. Kartendaten: DTM-AV DOM-AV © 2011 Swisstopo (5704 000 000). Reproduziert mit Bewilligung von Swisstopo (JA100118).

trauensbereiche, nach unten, woraus geschlossen werden kann, dass die terrestrische Stichprobe mit ihrer zufälligen Lage der Stichprobenpunkte eher etwas zu viele Waldproben mit etwas zu hohem Vorrat aufweist (Abbildung 3).

Die räumliche Variabilität der Verteilung des Holzvolumens über das Kantonsgebiet Appenzell Innerrhoden kann mit den Oberflächenmodellen aus den Luftbildern beziehungsweise aus den Lidardaten annähernd gleich gut erklärt werden. Beide Modelle liefern Vorhersagen der lokalen Kronenhöhen, welche bis zu 60% der Variabilität der beobachteten Hektarvorräte auf den terrestrischen Probeflächen erklären. Werden nur die Probeflächen im Wald betrachtet, kann mit den Lidardaten der Holzvorrat deutlich besser modelliert werden als mit den Luftbildinformationen. Allerdings erklären auch die Lidardaten kaum mehr als einen Drittel der Variabilität der Probeflächenwerte im Wald. Im Vergleich zu skandinavischen Studien, bei denen Lidardaten circa 80% der Varianz des Holzvolumens erklären können (Holmgren 2004, Næsset 2002), sind die hier untersuchten Modelle eher schwach. Ein Grund dafür liegt sicher in der höheren Baumartenvielfalt und der generell komplexeren Waldstruktur und Topografie im Testgebiet verglichen mit den borealen Wäldern der erwähnten Studien. Das geschätzte Holzvolumen ist nicht nur von der Kronenhöhe, sondern auch von den Baumarten abhängig. So zeigten beispielsweise Næsset et al (2004), dass Modelle für Koniferen verzerrte Schätzungen für Mischwälder liefern. Dabei stieg der Schätzfehler mit steigendem Anteil laubabwerfender Arten (Næsset 2004). Næsset (1997b) zeigte auch, dass die Baumhöhen und das Stammvolumen nicht für alle Arten gleich gut korrelieren. Des Weiteren ist bekannt, dass Schätzungen in sowohl dichten wie inhomogenen Wäldern mit einem hohen Anteil von Laubbäumen im Ver-

gleich zu Schätzungen in weniger dichten und homogenen Beständen mit Nadelbäumen weniger genau sind (Brandtberg et al 2003).

Obwohl der Erklärungsgrad der Modelle eher bescheiden ist, kann der Schätzfehler für das Holzvolumen zum Teil erheblich reduziert werden. Die Varianz der Schätzung des mittleren Holzvorrats über die gesamte Fläche des Kantons Appenzell Innerrhoden kann um mehr als die Hälfte reduziert werden. Das bedeutet, dass unter Verwendung von Luftbild- oder Lidardaten mit einer Halbierung der Anzahl terrestrischer Probeflächen dieselbe Schätzgenauigkeit erreicht werden kann wie mit der direkten Schätzung. Es bedeutet aber auch, dass mit den Hilfsinformationen der Schätzfehler (Standardfehler) gegenüber der direkten Schätzung um rund einen Drittel reduziert werden kann. Der Vergleich der in der Untersuchung erzielten Schätzfehler mit im 500-m×500-m-Netz generierten Hilfsvariablen mit den erwarteten Schätzfehlern, welche mit flächendeckend generierten Hilfsvariablen erzielt werden könnten, zeigt, dass die gewählte Dichte der Hilfsvariablen im 500-m×500-m-Netz für die meisten Anwendungen in der Praxis genügt. Mit flächendeckend generierten Hilfsvariablen könnten die Schätzfehler um maximal 5% reduziert werden. Die Effizienz der Differenzschätzung für die mittlere Dichte des Holzvolumens im Wald (Vorrat pro ha Wald) hängt davon ab, mit welcher Genauigkeit bekannt ist, wo sich der Wald befindet. Idealerweise müsste eine Waldmaske zur Verfügung stehen. Unsere Modelle zeigen, dass sich der Waldanteil mit den Kronenhöhenmodellen gut schätzen lässt. Der Schätzfehler im Kanton Appenzell Innerrhoden ist kleiner als 3 Prozentpunkte.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass die Schätzgenauigkeit für den Holzvorrat mit Lidardaten wie mit den Luftbilddaten deutlich erhöht wer-

den kann (Reduktion der Varianz um die Hälfte). Dabei sind die Lidardaten für die Schätzung des Holzvorrates im Waldareal leicht besser geeignet, während für die Schätzung des Waldanteiles (und die Prognose einer Waldmaske) Luftbilddaten möglicherweise besser sind.

Der Holzvorrat im Wald kann auch über das Verhältnis des geschätzten Holzvolumens im Gesamtgebiet zum geschätzten Waldanteil im Gesamtgebiet geschätzt werden. In einem nächsten Schritt gilt es zu prüfen, welche Schätzgenauigkeit mit einem solchen Quotientenschätzer erreicht werden kann. Der Quotientenschätzer hätte den Vorteil, dass Luftbilddaten alleine genügen würden. Dies, weil in der vorliegenden Studie der mittlere Holzvorrat für das Gesamtgebiet mit Luftbildern gleich gut geschätzt wurde wie mit Lidardaten. In Anbetracht der Tatsache, dass flächendeckende Lidarbefliegungen durch die Swisstopo in naher Zukunft unwahrscheinlich sind, während die Luftbilder nachgeführt werden, ist dieses Resultat für die Anwendung in der Praxis bedeutend. ■

Eingereicht: 12. November 2010, akzeptiert (mit Review): 15. April 2011

Literatur

- BRANDTBERG T, WARNER TA, LANDENBERGER RE, MCGRAW JB (2003)** Detection and analysis of individual leaf-off tree crowns in small footprint, high sampling density lidar data from the eastern deciduous forest in North America. *Remote Sens Environ* 85: 290–303.
- BRÄNDLI UB, EDITOR (2010)** Schweizerisches Landesforstinventar: Ergebnisse der dritten Erhebung 2004–2006. Birmensdorf: Eidgenöss Forsch.anstalt Wald Schnee Landschaft. 312 p.
- BUWAL, WSL (2005)** Waldbericht 2005 – Zahlen und Fakten zum Zustand des Schweizer Waldes. Bern: Bundesamt Umwelt Wald Landschaft. 152 p.
- EID T, GOBAKKEN T, NÆSSET E (2004)** Comparing stand inventories for large areas based on photo-interpretation and laser scanning by means of cost-plus-loss analyses. *Scand J Forest Res* 19: 512–523.
- FAY RE, HERRIOT RA (1979)** Estimates of income for small places: An application of James-Stein procedures to census data. *J Am Statistical Ass* 74: 269–277.
- FRANKLIN J, (1986)** Thematic mapper analysis of coniferous forest structure and composition. *Int J Remote Sens* 7: 1287–1301.
- GINZLER C ET AL (2005)** Luftbildinterpretation LFI3: Interpretationsanleitung zum dritten Landesforstinventar. Birmensdorf: Eidgenöss Forsch.anstalt Wald Schnee Landschaft. 85 p.
- FOEN (2010)** Switzerland's greenhouse gas inventory 1990–2008. National Inventory Report 2010. Berne: Federal Office Environment. 233–273 p.
- GRUNDMANN R (2009)** The role of expertise in governance processes. *Forest Policy Econ* 11: 398–03.
- HILDEBRANDT G (2010)** The beginnings of aerial photogrammetry and interpretation in German forestry after 1945. *Photogramm Fernerkund Geoinf* 4: 235–242.
- HOLMGREN J (2004)** Prediction of tree height, basal area and stem volume in forest stands using airborne laser scanning. *Scand J Forest Res* 19: 543–553.
- HUDAK AT ET AL (2006)** Regression modeling and mapping of coniferous forest basal area and tree density from discrete-return lidar and multispectral satellite data. *Can J Remote Sens* 32: 126–138.
- JANSEN M, JUDAS M, SABOROWSKI J (2002)** Spatial modelling in forest ecology and management – a case study. Berlin: Springer. 225 p.
- KATSCH C, STOCKER M (2000)** Automatic determination of stand heights from aerial photography using digital photogrammetric systems. *Allg Forst Jagdztg* 171: 74–80.
- KAUFMANN E (1999)** Vorrat, Zuwachs, Nutzung. In: Brassel P, Lischke H. Schweizerisches Landesforstinventar – Methoden und Modelle der Zweitaufnahme 1993–1995. Birmensdorf: Eidgenöss Forsch.anstalt Wald Schnee Landschaft. Kap. 3.2.
- KELLER M, EDITOR (2005)** Schweizerisches Landesforstinventar. Anleitung für die Feldaufnahmen der Erhebung 2004–2007. Birmensdorf: Eidgenöss Forsch.anstalt Wald Schnee Landschaft. 393 p.
- KOVATS M (1997)** A large-scale aerial photographic technique for measuring tree heights on long-term forest installations. *Photogramm Eng Rem S* 63: 741–747.
- LANZ A, BIERER D, FRINGELI G, MANDALLAZ D (2009)** Neue Ansätze für die Waldinventur in der Schweiz. In: Thees O, Lemm R, editors. Management zukunftsfähige Waldnutzung. Grundlagen, Methoden und Instrumente. Zürich: VDF. 804 p.
- LATIFI H, NOTHDURFT A, KOCH B (2010)** Non-parametric prediction and mapping of standing timber volume and biomass in a temperate forest: application of multiple optical/LiDAR-derived predictors. *Forestry* 83: 395–407.
- MAGNUSSEN S, EGGERMONT P, LARICCIA VN (1999)** Recovering tree heights from airborne laser scanner data. *Forest Sci* 46: 407–422.
- MANDALLAZ D (2008)** Sampling techniques for forest inventories. Boca Raton: Chapman & Hall. 256 p.
- MCROBERTS RE, HOLDEN GR, NELSON MD, LIKNES GC, GORMANSON DD (2006)** Using satellite imagery as ancillary data for increasing the precision of estimates for the Forest Inventory and Analysis program of the USDA Forest Service. *Can J Forest Res* 36: 2968–2980.
- MCROBERTS RE (2008)** Using satellite imagery and the k-nearest neighbors technique as a bridge between strategic and management forest inventories. *Remote Sens Environ* 112: 2212–2221.
- NÆSSET E (1997A)** Determination of mean tree height of forest stands using airborne laser scanner data. *ISPRS J Photogramm* 52: 49–56.
- NÆSSET E (1997B)** Estimating timber volume of forest stands using airborne laser scanner data. *Remote Sens Environ* 61: 246–253.
- NÆSSET E (2002)** Predicting forest stand characteristics with airborne scanning laser using a practical two-stage procedure and field data. *Remote Sens Environ* 80: 88–99.
- NÆSSET E ET AL (2004)** Laser scanning of forest resources: the nordic experience. *Scand J Forest Res* 19: 482–499.
- NÆSSET E (2004)** Practical large-scale forest stand inventory using small-footprint airborne scanning laser. *Scand J Forest Res* 19: 164–179.
- NOTHDURFT A, SABOROWSKI J, BREIDENBACH J (2009)** Spatial prediction of forest stand variables. *Eur J Forest Res* 128: 241–251.

- PROJEKTLEITUNG WAP-CH, BHP BRUGGER & PARTNER (2004) Waldprogramm Schweiz (WAP-CH). Bern: Bundesamt Umwelt Wald Landschaft, Schriftenreihe Umwelt 363. 117 p.
- RAO JNK (2003) Small area estimation. Hoboken: Wiley. 313 p.
- SÄRNDAL CE, SWENSSON B, WRETMAN J (1992) Model assisted survey sampling. Berlin: Springer. 964 p.
- SONG C, DICKINSON B, SU L, ZHANG S, YAUSSEY D (2010) Estimating average tree crown size using spatial information from Ikonos and QuickBird images: Across-sensor and across-site comparisons. *Remote Sens Environ* 114: 1099–1107.
- THÜRIG E, KAUFMANN E (2008) Waldbewirtschaftung zur Senkenerhöhung? Mögliche Konfliktfelder und Synergien. *Schweiz Z Forstwes* 159: 281–287. doi: 10.3188/szf.2008.0281
- THÜRIG E, SCHMID S (2008) Jährliche CO₂-Flüsse im Wald: Berechnungsmethode für das Treibhausgasinventar. *Schweiz Z Forstwes* 159: 31–38. doi: 10.3188/szf.2008.0031
- TOMPO E, HAAKANA M, KATILA M, PERÄSAARI J (2008) Multi-source national forest inventory – methods and applications. Dordrecht: Springer. 373 p.
- WASER LT, KLONUS S, EHLERS M, KUCHLER M, JUNG A (2010A) Potential of digital sensors for land cover and tree species classifications – a case study in the framework of the DGPF-Project. *Photogramm Fernerkund Geoinf* 2: 141–156.
- WASER LT, GINZLER C, KÜCHLER M (2010B) Semi-automatische Baumartendifferenzierung auf der Grundlage von ADS40-Digitalkamera-Luftbildern. *Forstl Forsch.ber München*. 209: 30–37.
- WERLAND S (2009) Global forest governance – bringing forestry science (back) in. *Forest Policy Econ* 11: 446–451.
- WOLTER PT, TOWNSEND PA, STURTEVANT BR, KINGDON CC (2008) Remote sensing of the distribution and abundance of host species for spruce budworm in Northern Minnesota and Ontario. *Remote Sens Environ* 112: 3971–3982.
- WU Y, STRAHLER A (1994) Remote estimation of crown size, stand density, and biomass on the Oregon Transect. *Ecol Appl* 4: 299–312.

Kombination von Landesforstinventar- und Fernerkundungsdaten für Kleingebietsschätzungen

In der vorliegenden Untersuchung wurde ein Design-unverzerrter Kleingebietsschätzer getestet, welcher terrestrische Daten aus dem Schweizerischen Landesforstinventar (LFI) mit Hilfsinformationen aus Stereoluftbildern und Lidardaten kombiniert. Zielgrösse waren der Waldanteil und der Holzvorrat. Die Effizienz des Schätzers hängt im Wesentlichen davon ab, mit welcher Genauigkeit der Wert der Zielgrösse auf den einzelnen Probeflächen der terrestrischen Inventur mit aus Fernerkundungs- und möglicherweise weiteren Raumdaten hergeleiteten Hilfsgrössen modelliert werden kann. Als Hilfsvariablen wurden zunächst Kronenhöhen verwendet, welche aus Stereoluftbildern (ADS40) und Lidardaten abgeleitet wurden. Die Regressionsmodelle wurden für den Holzvorrat und den Wald-Nichtwald-Entscheid der LFI-Probeflächen der Kantone Appenzell Innerrhoden und Appenzell Ausserrhoden kalibriert und lieferten ein Bestimmtheitsmass (r^2) von rund 60%. Wenn als erklärende Variable der Wald-Nichtwald-Entscheid aus der Luftbildinterpretation des LFI verwendet wird, werden die Modelle noch etwas besser und liefern Bestimmtheitsmasse in der Grössenordnung von rund 65% für den Holzvorrat respektive 85% für den Wald-Nichtwald-Entscheid. Für den nur innerhalb des Waldareals vorhergesagten Holzvorrat ergeben sich aus den Kronenhöhenmodellen Bestimmtheitsmasse von knapp 40% (Lidardaten) respektive 20% (Stereoluftbilddaten). In der Fallstudie zeigte sich, dass die Genauigkeit (Standardfehler) der Holzvorratsschätzung im Kanton Appenzell Innerrhoden und ebenso diejenige der Waldanteilschätzung mit den Fernerkundungsdaten um etwa 30% erhöht werden kann. Für die Schätzung des Holzvorrats im Waldareal allein resultiert eine Reduktion des Standardfehlers um gut 10% mit Luftbilddaten respektive knapp 25% mit Lidardaten.

Combinaison des données de l'Inventaire forestier national et de télédétection pour l'estimation de petits domaines

Un estimateur sans biais pour petits domaines a été testé dans cette étude. Ce modèle combine des données terrestres de l'Inventaire forestier national suisse (IFN) avec des informations auxiliaires extraites de photographies aériennes stéréoscopiques et de données Lidar. Les valeurs cibles portaient sur la part de forêt et le volume sur pied. L'efficacité de l'estimateur dépend principalement de la précision avec laquelle la valeur cible obtenue sur les placettes de l'inventaire terrestre peut être prédite par des variables explicatives auxiliaires basées sur des données de télédétection et éventuellement d'autres données spatiales. Comme variables explicatives nous avons d'abord utilisé les hauteurs de houppiers estimées sur la base de photos aériennes stéréoscopiques (ADS40) et de données Lidar. Les modèles de régression multiple ont été calibrés pour estimer le volume sur pied et définir la variable indicatrice IF d'appartenance à la forêt des placettes IFN des cantons d'Appenzell Rhodes-Intérieures et d'Appenzell Rhodes-Extérieures. Ces modèles ont permis d'obtenir un coefficient de détermination de 60%. L'ajustement devrait être meilleur en définissant la variable indicatrice IF par l'interprétation des photos aériennes de l'IFN. Il sera alors possible d'obtenir un coefficient de détermination de 65% pour le volume sur pied et de 85% pour la variable IF. A l'intérieur de l'aire forestière (IF=1), l'utilisation de la hauteur prédite des houppiers donne un coefficient de détermination de près de 40% (données Lidar), respectivement de 20% (données des photos aériennes stéréos) pour le volume sur pied mesuré sur les placettes terrestres. L'étude de cas montre que les données de télédétection permettent d'améliorer de quelque 30% la précision (erreur standard) de l'estimation tant du volume sur pied, dans le canton d'Appenzell Rhodes-Intérieures, que de la proportion de la surface de l'aire forestière. Pour la seule estimation du volume sur pied dans l'aire forestière, il en résulte une réduction de l'erreur standard d'au moins 10% avec les données de photos aériennes et d'environ 25% avec les données Lidar.