

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

Herausgeber: Schweizerischer Forstverein

Band: 162 (2011)

Heft: 2

Artikel: Modelle zur Biomasse- und Holzvolumenschätzung im Schweizer Gebüschwald

Autor: Duggelin, Christoph / Abegg, Meinrad

DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-1097700>

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>

Modelle zur Biomasse- und Holzvolumenschätzung im Schweizer Gebüschwald

Christoph Düggelein
Meinrad Abegg

Eidgenössische Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft (CH)*
Eidgenössische Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft (CH)

Modelling of biomass and wood volume in Swiss shrub forest

The results of the third National Forest Inventory indicate that shrub forest accounts for 5% of the total forest area in Switzerland. It grows almost exclusively in the subalpine zone and is dominated by the woody species *Alnus viridis* and *Pinus mugo prostrata*. As a consequence of global warming and the increasing demand for sustainable energy, there is a national and international interest to quantify wood volume and biomass in shrub forests. Therefore representative coppice shoots were measured in detail to establish allometric volume and biomass functions for *Alnus viridis*, *Pinus mugo prostrata* and *Salix* sp. For each coppice shoot the wood volume, the wet weight, the dry weight and the carbon mass was determined as a function of the base diameter. In the next step all coppice shoots of 49 sample plot areas were measured. A regression analysis shows the relationship between the degree of cover and wood volume, and hence the biomass, in a shrub forest stand. Shrub forest stands which consist of *Alnus viridis* and which have a degree of cover of 100% contain on average 74 m³/ha of aboveground wood volume. More than twice of that volume, namely 166 m³/ha, is contained in corresponding *Pinus mugo prostrata* shrub forest stands. In Swiss shrub forests, the average aboveground wood volume amounts to 66 m³/ha, corresponding to around 2 million tons of biomass. Based on the presented volume functions it will be possible to estimate the aboveground wood volume and biomass of shrub forest stands dominated by *Alnus viridis* and *Pinus mugo prostrata* with good results. Input variable is the degree of cover of the present woody species, which can be determined efficiently on aerial photography by image interpretation.

Keywords: shrub forest, biomass, volume, *Alnus viridis*, *Pinus mugo prostrata*, Swiss National Forest Inventory
doi: 10.3188/szf.2011.0032

* Zürcherstrasse 111, CH-8903 Birmensdorf, E-Mail christoph.dueggelin@wsl.ch

Im schweizerischen Landesforstinventar (LFI) wird der Gesamtwald in die Kategorien Wald und Gebüschwald unterteilt (Brändli 2010). Gebüschwälder sind gemäss LFI-Definition Wälder, deren Bestockung zu mehr als zwei Dritteln aus Sträuchern besteht. Die genauen Eigenschaften sind in der Anleitung zu den Feldaufnahmen (Keller 2005) formuliert. Auch beim weltweiten Forest Resources Assessment (FRA) und beim europäischen Reporting zur nachhaltigen Waldbewirtschaftung zählen Gebüschwälder nicht zum Wald im engeren Sinne, sondern zu «other wooded land» (FAO 2006, MCPFE 2007).

In der Schweiz werden die Gebüschwälder von der Alpenerle (*Alnus viridis*) und der Legföhre (*Pinus mugo prostrata*) dominiert (Cioldi et al 2010). Bezüglich Nutzungsformen gibt die Literatur einzig Hinweise, dass bis anhin die Gebüschwälder gelegentlich auf Alpen als Brennholzquelle dienten (Rubli 1974, Stebler 1903). Hingegen wird auf landwirtschaftlich genutzten Flächen die Ausbreitung des Gebüschwaldes oft bekämpft, die Gehölze werden

mit verschiedenen Methoden geschwendet (Frödin 1940, persönliche Beobachtung des Autors). Aufgrund der fehlenden holzwirtschaftlichen Relevanz sind Angaben zu Holzvolumen und Biomasse im Gebüschwald kaum vorhanden. Erste diesbezügliche Untersuchungen (Fattorini et al 2004, Wiedmer & Senn-Irlet 2006) lassen sich nicht breitflächig anwenden. Demzufolge konnten auch für das Schweizerische Treibhausgasinventar (Bafu 2009), welches die Grundlage zur Beurteilung der Zielerreichung im Rahmen der Klimakonvention und des Kyoto-Protokolls bildet, im Gebüschwald nur unsichere Schätzungen der Biomasse gemacht werden. Für den Wald hingegen existieren bereits gute Modelle für die Berechnung der Biomasse (Thürig & Schmid 2008).

Das nationale und internationale Bestreben, den Kohlenstoffkreislauf gesamthaft zu erfassen und genauer zu beziffern, sowie das steigende Interesse an umweltschonenden Energiequellen gaben Anlass, vertiefte Biomasseuntersuchungen im Gebüschwald durchzuführen. Das Ziel der vorliegenden Arbeit war



Abb 1 Alpennerlenwälder (graugrün) und Legföhrenwälder (dunkelgrün) in der Nähe des Flüelapasses (GR).

es, gute Schätzungen für das oberirdische Holzvolumen im Gebüschwald und die darin enthaltene Bio- und Kohlenstoffmasse herzuleiten sowie die dafür benötigten Funktionsgleichungen zu entwickeln.

Als Grundlage für die vorliegende Untersuchung dienen die terrestrisch erhobenen Gebüschwalddaten des dritten Landesforstinventars (LFI3). Die in den Jahren 2004 bis 2006 durchgeführte Erhebung ergab, dass der Gebüschwaldanteil am Gesamtwald 5.2% beträgt und somit rund 1.6% (659 km²) der Landesfläche bedeckt. In den elf Jahren zwischen dem zweiten (LFI2) und dritten Landesforstinventar hat die Gebüschwaldfläche um 86.45 km² zugenommen und ist somit für knapp 15% der Zunahme der Gesamtwaldfläche während dieser Zeitperiode verantwortlich. Mehr als 80% der Gebüschwälder befinden sich in Höhenlagen über 1600 m ü. M. (Cioldi et al 2010). Der durchschnittliche Deckungsgrad im Gebüschwald (ohne Alpen-

rosen und Zwergwacholder) beträgt 63%. Dabei nehmen die beiden Gehölzarten Alpennerle und Legföhre zusammen einen Anteil von 81% am Gehölzdeckungsgrad ein. Auf gar 90% der Gebüschwaldflächen ist die Alpennerle oder die Legföhre die Hauptgehölzart (Tabelle 1, Cioldi et al 2010). Ein typisches Beispiel eines von Alpennerlen und Legföhren dominierten Gebüschwaldes ist in Abbildung 1 ersichtlich.

Material und Methoden

In der ersten Phase (Abbildung 2) wurden Volumen- und Biomassefunktionen für die im Gebüschwald dominanten Gehölzarten ausgearbeitet. Üblicherweise dient bei den im LFI verwendeten Volumenfunktionen der Brusthöhendurchmesser (BHD) als Eingangsgrösse (Kaufmann 2001). Bei der Vollkluppierung im Gebüschwald erwies sich aber die Erfassung des Brusthöhendurchmessers um ein Vielfaches zeitaufwendiger und fehleranfälliger als die Messung der Fusssdurchmesser. Aus diesem Grund wurde der Fusssdurchmesser als Eingangsgrösse für die Volumen- und Biomassefunktionen gewählt. Der Fusssdurchmesser ist an der Stelle definiert, an welcher die Lode aus dem Boden tritt und keine Wurzeln mehr aufweist. Der Begriff Lode steht für einen einzelnen Stamm einer basiton wachsenden Gehölzpflanze. In den Abbildungen 3 und 4 sind die einzelnen Loden eines Alpennerlen- und eines Legföhrenbestandes ersichtlich. Wie in West (2004) vorgeschlagen, wurden für die im Gebüschwald dominanten Gehölzarten Alpennerle und Legföhre mindestens 50 Loden untersucht, um ausreichend abge-

	Anteil am Gehölzdeckungsgrad	Anteil der Gebüschwaldprobeflächen, wo die Gehölzart den höchsten Deckungsgradanteil bildet
<i>Alnus viridis</i> (Alpennerle)	65%	70%
<i>Pinus mugo prostrata</i> (Legföhre)	16%	20%
<i>Corylus avellana</i> (Hasel)	5%	4%
<i>Salix</i> sp. (Weiden)	4%	3%
Andere Gehölzarten	10%	3%

Tab 1 Anteil der Hauptgehölzarten am Deckungsgrad im schweizerischen Gebüschwald (LFI3, Cioldi et al 2010; gemäss Artenliste, Spalte B [Keller 2005], aber ohne Berücksichtigung von Alpenrosen [*Rhododendron* sp.] und Zwergwacholder [*Juniperus communis alpina*]).

PHASE 1 Entwicklung von Volumen- und Massefunktionen

Zusammenhang von:
Lodenvolumen – Fusssdurchmesser
Lodenbiomasse – Fusssdurchmesser

PHASE 2 Vollkluppierung auf Stichprobeflächen

Zusammenhang von:
Hektarvolumen – Gehölzdeckungsgrad

PHASE 3 Verknüpfung mit LFI3-Daten

Hochrechnung der Zielgrößen:
Holzvolumen, Biomasse und Kohlenstoffmasse
im schweizerischen Gebüschwald

Abb 2 Die Untersuchungsphasen im Überblick.



Abb 3 Loden eines Alpenerlenbestandes vor dem Blattaustrieb.



Abb 4 Loden eines Legföhrenbestandes.

stützte Funktionen herzuleiten. Die untersuchten Loden wurden innerhalb verschiedener Fusssdurchmesserstufen zufällig auf den für die zweite Phase beschriebenen Stichprobeflächen ausgewählt. Zuerst wurden bei allen untersuchten Loden die Fusssdurchmesser und die Feuchtgewichte bestimmt. Danach wurde bei etwa der Hälfte dieser Loden jeweils ein 15 cm langes Teilstück des Stammansfangs, der Stammmitte, des Stammendes sowie von jedem Ast herausgeschnitten. Von der Summe aller herausgeschnittenen Teilstücke einer Lode wurden anschliessend das Volumen, das Feuchtgewicht und das Trockengewicht bestimmt. Für die Volumenbestimmung wurden die Teilstücke in einen mit Wasser gefüllten Messzylinder getaucht. Die Darrtrocknung der Teilstücke erfolgte im Ofen bei einer Temperatur von 103 °C während 48 Stunden. Das Feuchtgewicht korrelierte sehr stark mit dem Trockengewicht und dem Volumen (nicht dargestellt). Zur Komplettierung des Datensatzes wurde demzufolge für die nicht auf Trockengewicht und Volumen beprobten Loden das mittlere Verhältnis der beprobten Loden eingesetzt. Wie bei biologischen Wuchsbeziehungen oft verwendet (Kramer 1988), ergab anschliessend die Berechnung von allometrischen Funktionen die Zusammenhänge zwischen dem Lodenfusssdurchmesser und dem Lodenvolumen beziehungsweise der Lodenbiomasse. Weiter konnten anhand der mittleren Verhältnisse der beprobten Loden die Raumdichten der verschiedenen Gehölzarten ermittelt werden.

In der zweiten Phase wurde auf 49 zwei Aren grossen Stichprobeflächen eine Vollkluppierung der lebenden Gehölze mit einem Fusssdurchmesser von mindestens einem Zentimeter durchgeführt. Anhand der in der ersten Phase erarbeiteten Volumen- und Massefunktionen konnten somit auf diesen Flächen das Holzvolumen und dessen Biomasse bestimmt werden. Aus der Biomasse wiederum konnte die Kohlenstoffmasse abgeleitet werden. In Anlehnung an Penman et al (2003) wurde angenommen, dass die Biomasse zu 50% aus Kohlenstoff besteht. Die Biomasse und das Holzvolumen beziehen sich in der vorliegenden Arbeit stets auf die oberirdischen Pflanzenteile der lebenden Gehölze, ohne die im Winter abfallenden Blätter. Hingegen wurden die ganzjährig an den Gehölzen verbleibenden Nadeln in die Volumen- und Biomasseberechnungen einbezogen. Abgestorbene Loden und liegendes Totholz wurden nicht erhoben.

Auf den vollkluppierten Stichprobeflächen wurde, analog zu den LFI3-Feldaufnahmen, der Deckungsgrad der verschiedenen Gehölzarten geschätzt (maximale Summe der Deckungsgrade einer Stichprobenfläche = 100%). Zudem wurden weitere, potenziell das Volumen erklärende Merkmale (Geländeneigung, Höhenlage und Bestandeshöhe) erfasst. Anhand verschiedener Regressionsverfahren wurde anschliessend der Zusammenhang zwischen

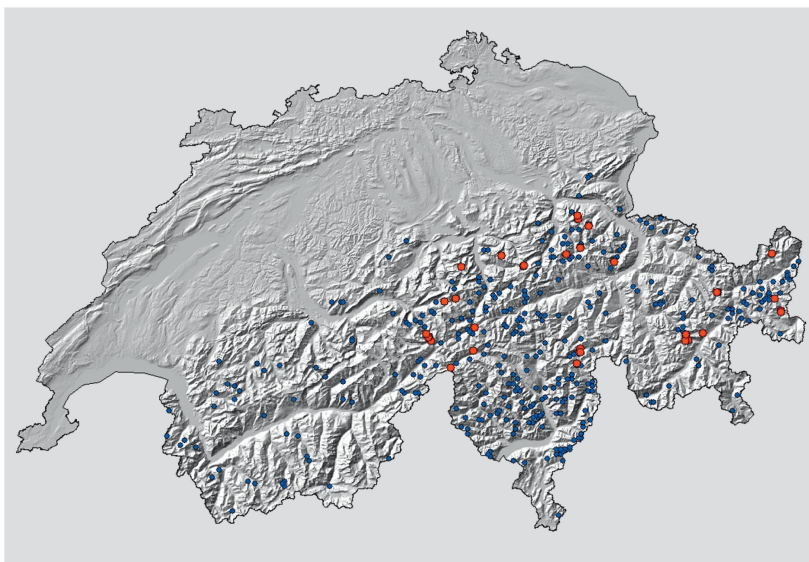


Abb 5 Verteilung der 336 LFI3-Gebüschwaldflächen in der Schweiz (blau, teilweise überlappt) und Lage der 49 Stichprobeflächen der vorliegenden Arbeit (rot, teilweise überlappt). © BFS GEOSTAT

der Zielgrösse (oberirdisches Holzvolumen/ha) und den erklärenden Merkmalen hergeleitet.

Die untersuchten Gebüschwaldbestände wurden nach den folgenden Kriterien für die Vollklappung ausgewählt:

- Es sollen möglichst viele verschiedene, häufige Gebüschwaldausprägungen (Gehölzart, Deckungsgrad, Bestandeshöhe, Exposition usw.) mit einbezogen werden.
- Die Gebüschwaldbestände müssen ohne lange An- und Rückmarschwege erreichbar und ohne Gefahr begehbar sein.

Innerhalb der ausgewählten Gebüschwaldbestände wurden die 49 zwei Aren grossen Stichprobeflächen (Abbildung 5) zufällig bestimmt.

In der dritten Phase wurden schliesslich die in der zweiten Phase hergeleiteten Funktionen für Alpenerle, Legföhre und Weide mit den im LFI3 terrestrisch erhobenen Gehölzdeckungsgraden verknüpft. Die Umrechnung der Holzvolumen in Biomasse erfolgte anhand der ermittelten Raumdichten. Für andere Nadelholzarten wurde die Legföhrenfunktion und für andere Laubholzarten jene der Weide verwendet. Für Gehölze mit BHD ≥ 12 cm wurden die üblichen im LFI3 verwendeten Volumen- und Massefunktionen (Kaufmann 2001, Perruchoud et al 1999, Assmann 1961) eingesetzt. Somit konnten gesamtschweizerische Hochrechnungen für das oberirdische Holzvolumen, die Bio- und die Kohlenstoffmasse im Gebüschwald vorgenommen werden.

Die als Vergleich dienenden Biomassewerte des Waldes stammen für Bäume mit einem BHD ≥ 12 cm aus Cioldi et al (2010). Für die grobe Schätzung der Biomasse von Bäumen mit 0–11.9 cm BHD wurden die im LFI3 erhobenen Jungwaldstammzahlen mit der in der ersten Phase für die Alpenerle erarbeiteten Massefunktion verwendet. Für die Umrechnung des

BHD in Fussdurchmesser wurde angenommen, dass der BHD 1 cm kleiner ist als der Fussdurchmesser. Die Biomasse der Bäume mit geringeren Wuchshöhen als 130 cm und die Sträucher im Wald sind in den berechneten Vergleichswerten nicht enthalten.

Resultate

Sämtliche Berechnungen erfolgten mit dem Programm R. Bei den Resultaten ist zu beachten, dass die Nadelgehölze mit der Benadelung, die Laubgehölze aber ohne Belaubung untersucht wurden. Die Holzvolumen und Biomassen schliessen die Rinde mit ein.

Zusammenhang zwischen Lodenvolumen/ Lodенbiomasse und Fussdurchmesser

Der Zusammenhang zwischen dem Lodenvolumen und dem Fussdurchmesser sowie der Zusammenhang zwischen der Lodенbiomasse und dem Fussdurchmesser werden durch allometrische Funktionen beschrieben (Tabelle 2, Abbildung 6).

Bei solchen Funktionen ist es nicht möglich, die Güte direkt über das Bestimmtheitsmass (R^2) auszudrücken. Hier wird die Güte über einen Vergleich mit der linearen Regression aufgezeigt. Da die Modellkurven der allometrischen Funktion und der angepassten quadratischen Funktion mittels linearer Regression fast deckungsgleich sind und sich auch die Summen der quadrierten Abweichungen zwischen Modellkurve und gemessenen Werten kaum unterscheiden, können die Bestimmtheitsmasse der linearen Regression auch einen Hinweis darauf geben, wie gut das allometrische Modell passt. So weisen die quadratischen Funktionen der Beziehung zwischen Fussdurchmesser und Lodенbiomasse hohe Bestimmtheitsmasse von 0.90 für *Alnus viridis*, 0.90 für *Pinus mugo prostrata* und 0.89 für *Salix* sp. auf (nicht dargestellt).

Die Loden der Legföhre erreichten mit Werten bis zu 24 cm Fussdurchmesser und 88 kg Biomasse deutlich grössere Dimensionen als die Loden der Alpenerle. Die schwerste untersuchte Alpenerlenlode wies eine Biomasse von 11 kg bei einem Fussdurchmesser von 9 cm auf. Auch bei vergleichbaren Fussdurchmessern sind die Loden der Legföhre schwerer als die Loden der Alpenerle. Bei einem Fussdurchmesser von beispielsweise 6 cm weist die Legföhrenlode durchschnittlich eine Biomasse von 4.51 kg auf, während die Alpenerlenlode durchschnittlich eine solche von 3.00 kg zeigt. Die Biomassewerte der Weiden sind etwas geringer als diejenigen der Alpenerle. Bei den Weiden gilt es aber zu beachten, dass die allometrischen Funktionen auf lediglich neun Wertepaaren mit kleinen Fussdurchmessern basieren und somit weniger breit abgestützt sind als die Funktionen für die Alpenerle und die Legföhre.

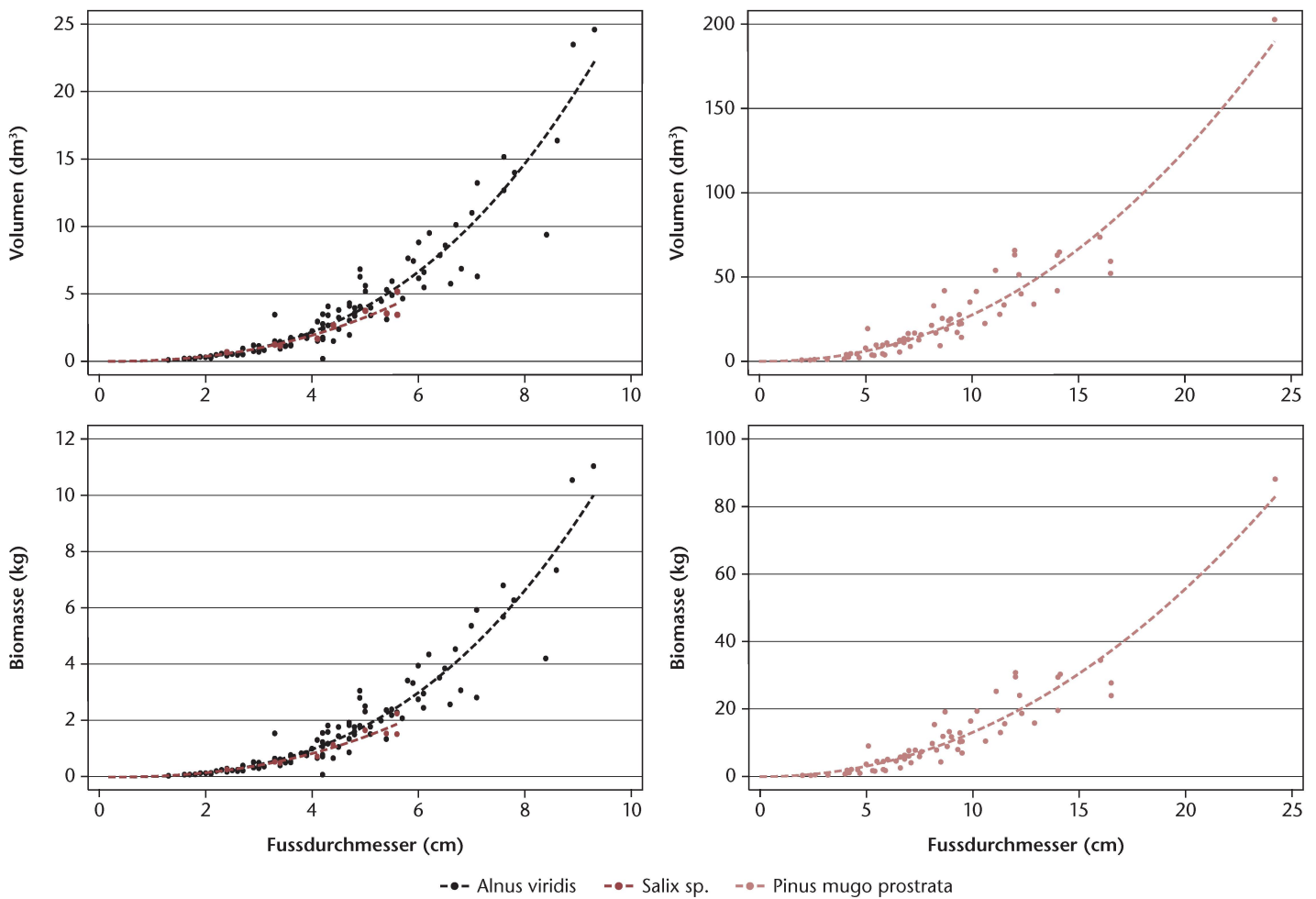


Abb 6 Zusammenhang zwischen Lodenvolumen (y [dm^3]) respektive Lodenbiomasse (z [kg]) und Fussdurchmesser (x [cm]) der Gehölze *Alnus viridis*, *Pinus mugo prostrata* und *Salix sp.*

Art	Lodenvolumen	Lodenbiomasse	N
<i>Alnus viridis</i>	$y = 0.0482 \times x^{2.75}$	$z = 0.0218 \times x^{2.75}$	103
<i>Pinus mugo prostrata</i>	$y = 0.180 \times x^{2.18}$	$z = 0.107 \times x^{2.09}$	64
<i>Salix sp.</i>	$y = 0.0723 \times x^{2.37}$	$z = 0.0298 \times x^{2.41}$	9

Tab 2 Zusammenhang zwischen Lodenvolumen (y [dm^3]) respektive Lodenbiomasse (z [kg]) und Fussdurchmesser (x [cm]) der Gehölze *Alnus viridis*, *Pinus mugo prostrata* und *Salix sp.* N: Anzahl Wertepaare.

Zusammenhang zwischen Holzvolumen und Deckungsgrad

Lineare Regressionen ergaben eine relativ enge Beziehung zwischen dem oberirdischen Holzvolumen und dem Deckungsgrad einer Gehölzart. Führt man eine lineare Regression ohne Intercept (Achsenabschnitt) durch, so ist das Bestimmtheitsmass unter der Nullhypothese «Steigung und Intercept = 0» nicht sinnvoll interpretierbar. Da die Regressionsgeraden der Modelle mit und ohne Intercept praktisch identisch sind und sich die Summen der quadrierten Abweichungen zwischen Modellwerten und gemessenen Werten kaum unterscheiden, kann ein normal berechnetes Bestimmtheitsmass Auskunft über die Güte des Modells geben. So weisen die berechneten Regressionsgleichungen ohne Intercept für die untersuchten Gehölzarten «normal» berechnete Be-

stimmtheitsmasse von 0.70 bis 0.81 (Tabelle 3) auf. Das Holzvolumen kann somit anhand des Deckungsgrades gut geschätzt werden. Hierzu zwei Beispiele (Abbildung 7): Eine Fläche, welche zu 60% mit Alpenlerle bestockt ist, hat ein oberirdisches Holzvolumen von 44 m^3/ha . Flächen mit 80% Legföhre und 20% strauchförmigen Weiden haben ein oberirdisches Holzvolumen von 139 m^3/ha (133 m^3/ha + 6 m^3/ha).

Die Holzvolumenwerte der drei untersuchten Gehölzarten sind sehr unterschiedlich. Bei gleichem Deckungsgrad ist das Holzvolumen von Legföhrenbeständen mehr als doppelt so gross wie jenes von Alpenlerlenbeständen. Ein strauchförmiger Weidenbestand besitzt nur etwa ein Sechstel des Holzvolumens eines Legföhrenbestandes. Bei der Regression für die Weiden gilt es allerdings zu beachten, dass diese nur auf 15 Wertepaaren mit Deckungsgradwerten unter 50% basiert. Die Funktion ist somit weniger breit abgestützt als die Funktionen der Alpenlerle und der Legföhre.

Zusätzliche Eingangsvariablen wie Geländeneigung, Bestandeshöhe (Vertikaldistanz Bestandesdach–Boden) und Höhenlage verbessern die Regressionsmodelle wenig. Der Einbezug der Bestandeshöhe verbessert einzig die Regressionsgleichung der Alpenlerle. Die Höhenlage ist nur bei strauchförmigen

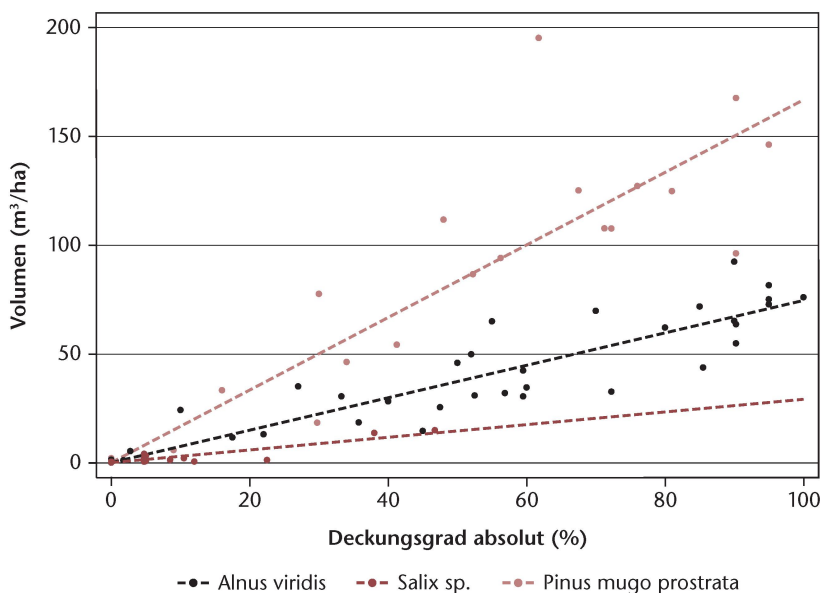


Abb 7 Korrelation von Holzvolumen (y [m^3/ha]) und Deckungsgrad (x [%]) der Gehölze *Alnus viridis*, *Pinus mugo prostrata* und *Salix sp.*

Art	Regressionsgleichung	N	R ²
<i>Alnus viridis</i>	$y = 0.741x$	36	0.81
<i>Pinus mugo prostrata</i>	$y = 1.66x$	19	0.70
<i>Salix sp.</i>	$y = 0.290x$	15	0.80

Tab 3 Korrelationsanalyse von Holzvolumen (y [m^3/ha]) und Deckungsgrad (x [%]) der Gehölze *Alnus viridis*, *Pinus mugo prostrata* und *Salix sp.* N: Anzahl Wertepaare, R²: Bestimmtheitsmass (Nullhypothese: Steigung gleich 0, Intercept zulässig).

Weiden relevant. Die Geländeneigung scheint keinen Einfluss auf die Holzvolumenwerte der drei Gehölze zu haben. Vergleicht man nun die einfachen linearen Modelle mit Intercept (nicht dargestellt) mit den multiplen Modellen (Tabelle 4), ergibt der F-Test zum Vergleich von Modellen, dass nur das multiple Modell von *Alnus viridis* signifikant besser ist.

Berechnungen für den schweizerischen Gebüschwald

Da die Feldaufnahme des LFI3 die Bestandeshöhe nicht beurteilte, wurden die in Tabelle 3 dargestellten Regressionsgleichungen auf die 336 im LFI3 terrestrisch aufgenommenen Gebüschwaldflächen angewendet (Tabelle 5, Abbildung 5). Im Durchschnitt haben die Gebüschwaldbestände ein oberirdisches Holzvolumen von 56.4 m³/ha. Bezieht man die im Gebüschwald vorkommenden Einzelbäume

mit einem BHD ≥ 12 cm mit ein, sind es 65.9 m³/ha. Hochgerechnet auf den gesamten Gebüschwald ergibt dies 4.3 Mio. m³ Holz, was einer Biomasse von 2.0 Megatonnen entspricht. Diese 2.0 Megatonnen bilden knapp 1% der oberirdischen Biomasse im Gesamtwald. Die Umwandlung der Holzvolumen in Biomasse erfolgte anhand der berechneten Raumdichten für die Alpenerle (450 kg/fm), die Legföhre (468 kg/fm) und die Weiden (438 kg/fm).

Diskussion und Schlussfolgerungen

Ergebnisse für die Schweiz

Das Ziel der vorliegenden Untersuchung, eine gute Schätzung für die oberirdische Gehölzbiomasse und das oberirdische Holzvolumen im schweizerischen Gebüschwald herzuleiten, wurde erreicht. Im schweizerischen Gebüschwald stehen durchschnittlich 30.8 t/ha Biomasse (Tabelle 5), was rund 16% des Durchschnittes des Waldes entspricht. Eine erste grobe Schätzung für das Schweizerische Treibhausgasinventar (Bafu 2009) ergab eine oberirdische Gehölzbiomasse von 19.0 t/ha. Der Wert der vorliegenden Untersuchung liegt somit um 62% höher. Anhand der erarbeiteten Schätzfunktionen können in Zukunft wesentlich genauere Schätzungen des Holzvolumens und der Biomasse im Gebüschwald angestellt werden. Um auch die unterirdische Gehölzbiomasse im Gebüschwald grob abzuschätzen, könnte man die in Cioldi et al (2010) für Höhen über 1200 m ü. M. beschriebenen Wurzel-Spross-Verhältnisse verwenden (0.26 bei Laubholz, 0.40 bei Nadelholz). So erhielte man für die 30.8 t/ha oberirdische Biomasse zusätzlich eine unterirdische Biomasse von 10.1 t/ha.

Vergleich mit bisherigen Untersuchungen

Die artspezifischen Holzvolumenwerte für Gebüschwälder mit 100% Deckungsgrad (Alpenerle 74 m³/ha [95%-Vertrauensintervall: 68.4, 80.4], Legföhre 166 m³/ha [95%-Vertrauensintervall: 144.5, 188.3] und strauchförmige Weiden 29 m³/ha [95%-Vertrauensintervall: 23.0, 35.1]) erscheinen relativ hoch (Abbildung 7). Beachtet man aber, dass auf einer zwei Aren grossen Fläche über 500 Alpen-erlenloden stehen können oder der Fussedurchmesser einer älteren Legföhrenlode über 20 cm betragen

	Holzvolumen (m^3/ha) =							
	$a + b \times \text{Deckungsgrad (\%)} + c \times \text{Geländeneigung (\%)} + d \times \text{Bestandeshöhe (cm)} + e \times \text{Höhenlage (m)}$							
	N	R ²	p	a	b	c	d	e
<i>Alnus viridis</i>	36	0.83	< 0.0001	-10.3	0.667	-	0.0422	-
<i>Pinus mugo prostrata</i>	19	0.70	< 0.0001	6.05	1.57	-	-	-
<i>Salix sp.</i>	15	0.86	< 0.0001	8.68	0.252	-	-	-0.00482

Tab 4 Eingangswerte und Korrelationsparameter für die Holzvolumenformeln der Gehölze *Alnus viridis*, *Pinus mugo prostrata* und *Salix sp.* N: Anzahl Wertepaare, R²: Bestimmtheitsmass, p: Überschreitungswahrscheinlichkeit.

	Holzvolumen (m ³ /ha)	Gesamtvolumen (Mio. m ³)	Biomasse (t/ha)	Gesamtbiomasse (Mio. t)	Kohlenstoff (t/ha)	Gesamtkohlenstoff (Mio. t)	Holzvolumen der Laubgehölze (m ³ /ha)	Biomasse der Laubgehölze (t/ha)	Kohlenstoff der Laubgehölze (t/ha)	Holzvolumen der Nadelgehölze (m ³ /ha)	Biomasse der Nadelgehölze (t/ha)	Kohlenstoff der Nadelgehölze (t/ha)
Gebüschwald (ohne Bäume ≥ 12 cm BHD)	56.4	3.7	25.7	1.7	12.9	0.85	33.8	15.2	7.6	22.5	10.5	5.3
Gebüschwald (inkl. Bäume ≥ 12 cm BHD)	65.9	4.3	30.8	2.0	15.4	1.0	35.0	15.8	7.9	30.8	15.0	7.5
Wald (Bäume ab 0 cm BHD)			189.3	221.9	94.7	111.0						

Tab 5 Oberirdisches Holzvolumen sowie oberirdische Biomasse und Kohlenstoffmasse im schweizerischen Gebüschwald (LF13). Für die Berechnung der Werte der Kategorie «Wald» (zugänglicher Wald gemäss LFI) gilt Folgendes: Bäume BHD ≥ 12 cm (Cioldi et al 2010), Bäume BHD 0–11.9 cm (Anwendung der *Alnus-viridis*-Funktionen der Abbildungen 4 und 5, berechnet aus Jungwald Daten des LF13). Bäume mit weniger als 130 cm Höhe und Sträucher mit weniger als 12 cm BHD wurden nicht berücksichtigt.

kann, so sind diese Werte durchaus plausibel. Eine frühere, weniger breit abgestützte Untersuchung in einem alten, dichten Alpenerlenbestand im Schächental (Wiedmer & Senn-Irlet 2006) ergab gar eine oberirdische Gehölzbiomasse von 83.5 t/ha, was einem Gehölzvolumenwert von 177 m³/ha entspricht. Auch Fattorini et al (2004) zeigen in ihrer Voruntersuchung (Trentino) in Alpenerlenbeständen ein oberirdisches Gehölzvolumen von durchschnittlich 146.5 m³/ha, wobei der Maximalwert sogar bei 242 m³/ha lag.

Die von Wiedmer & Senn-Irlet (2006) und Fattorini et al (2004) berechneten oberirdischen Gehölzbiomassen in Alpenerlenbeständen sind relativ hoch. In der vorliegenden Untersuchung wurde bei keiner der 36 Probeflächen mit Alpenerlenbestockung ein Wert von mehr als 100 m³/ha Holzvolumen ermittelt. Eine Ursache für die Unterschiede zu den beiden genannten Untersuchungen könnte deren Stichprobendesign sein. Bezogen auf die kleinen Stichprobeflächen (2 m² und 9 m²) war die Anzahl der untersuchten Flächen sehr gering (25 und 12). Zudem wurden bei den Untersuchungen von Fattorini et al (2004) die Probeflächen subjektiv ausgewählt, und die Autoren betonen deshalb, dass der Bericht als Voruntersuchung aufgefasst werden soll.

Die Untersuchungen von Fattorini et al (2004) ergaben für Legföhrenbestände bei 100% Deckungsgrad ein durchschnittliches oberirdisches Gehölzvolumen von 141 m³/ha. Dieser Wert weicht knapp 20% von dem in dieser Studie berechneten Wert (166 m³/ha) ab.

Aufgrund der sehr kleinen Probeflächenanzahl ist der Wert für die strauchförmigen Weidenbestände (29 m³/ha bei 100% Deckungsgrad) wenig zuverlässig. Zudem waren in den Stichproben kaum ältere Weidenloden vertreten.

Art spezifische Unterschiede

Obwohl in Alpenerlenbeständen die Loden dichter stehen als in Legföhrenbeständen, ist das oberirdische Holzvolumen bei gleichem Deckungs-

grad in Legföhrenbeständen mehr als doppelt so hoch (Abbildung 7). Der Hauptgrund hierfür liegt bei dem viel grösseren Fussdurchmesser der Legföhrenloden (Abbildung 6). Während auf den vollklupierten Flächen der durchschnittliche Fussdurchmesser der Alpenerlen bei 3.1 cm lag, betrug dieser bei der Legföhre 6.9 cm. Zudem weisen Legföhren bei gleichem Fussdurchmesser ein grösseres Holzvolumen als Alpenerlen auf (Abbildung 6). Ein Grund für die grösseren Dimensionen der Legföhrenloden könnte sein, dass diese deutlich älter werden als die Alpenerlenloden. Die in der ersten Phase untersuchten Alpenerlenloden wiesen ein mittleres Alter von 24 Jahren auf, und keine war älter als 55 Jahre. Das maximale Alter der Legföhre lag hingegen bei 130 Jahren, das Durchschnittsalter bei 62 Jahren (nicht dargestellt).

Qualität der Volumen- und Massefunktionen

Bei den Straucharten Alpenerle und Legföhre sowie bei strauchförmigen Weiden gibt es einen starken Zusammenhang zwischen dem Fussdurchmesser und dem Lodenvolumen wie auch der Lodenbiomasse (Abbildung 6). Ein Grund für den starken Zusammenhang ist vermutlich, dass bei den untersuchten Gehölzarten die Lode unterhalb des Fussdurchmessers nur allmählich ins Wurzelwerk übergeht und dadurch die Ausformung an dieser Stelle weniger variabel ist als bei anderen (baumförmigen) Gehölzarten. Obwohl hier nicht untersucht, dürfte auch der üblicherweise bei Volumenfunktionen im LFI verwendete BHD stark mit den oben genannten Zielgrössen zusammenhängen. Dass die Schaftlänge in Kombination mit dem Fussdurchmesser kaum eine Korrelationsverbesserung erbringt (nicht dargestellt), deutet darauf hin, dass innerhalb der Art die Loden eine weitgehend ähnliche Wuchsform aufweisen. Der Fussdurchmesser allein ist somit für die Berechnung von oberirdischem Holzvolumen und Biomasse der Alpenerle und Legföhre geeignet.

Die errechneten Raumdichten für die Alpen-erle (450 kg/fm) und die Legföhre (468 kg/fm) sind leicht höher als die in Trendelenburg 1939 angegebenen mittleren Raumdichten für Erlen (430 kg/fm) und Kiefern (420 kg/fm). Der Autor der erwähnten Arbeit zeigt auf, dass Astholz aufgrund der unterschiedlichen mechanischen Beanspruchung im Allgemeinen eine grössere Raumdichte als Stammholz besitzt. Dass die Gebüschwaldloden oft ein astförmiges Erscheinungsbild haben, könnte somit eine Erklärung für die leicht höheren Raumdichten sein.

Im schweizerischen Gebüschwald besteht ein starker Zusammenhang zwischen dem Gehölzdeckungsgrad und dem oberirdischen Holzvolumen. Wie in Tabelle 3 dargestellt, ergeben sich für die Regressionen Bestimmtheitsmasse von 0.70 bis 0.81. Die Berechnung der multiplen Regressionen (Tabelle 4) zeigt auf, dass der Gehölzdeckungsgrad die zentrale Eingangsvariable ist. Der zusätzliche Einbezug von Geländeneigung, Höhenlage und Bestandeshöhe verbessert die Regressionen wenig oder gar nicht.

Verwendung des Luftbildes

Die hergeleiteten Funktionen verwenden Eingangsgrössen, die auch auf dem Luftbild erfasst werden können. Die im LF13 terrestrisch erfassten Deckungsgrade und Gehölzarten wurden mit den entsprechenden Luftbildauswertungen verglichen. Die 176 diesbezüglich beurteilten Gebüschwaldflächen wiesen aufgrund der Luftbildinterpretation einen mittleren Deckungsgrad von 70.8% ($\pm 1.9\%$) auf, terrestrisch wurde ein mittlerer Deckungsgrad von 68.4% ($\pm 1.7\%$) ermittelt. Der Gehölzdeckungsgrad kann demnach zuverlässig mit Luftbilddaten geschätzt werden. Während die Legföhre im Luftbild leicht erkennbar ist, lassen sich die verschiedenen Laubstraucharten nur schlecht unterscheiden. Für die Hochrechnung des Vorrates mit Luftbildern müssen deshalb neben der Legföhrenfunktion für alle Laubgehölze die Funktionen für die Alpen-erle verwendet werden. Allerdings werden damit die Holzvolumen im Vergleich mit den terrestrisch ermittelten Werten um 15% überschätzt. Holzvolumen- und somit auch Biomasseschätzungen über das Luftbild liefern gute Schätzwerte, insbesondere wenn die (Laub-)Strauchart bekannt ist.

Wirtschaftliche Bedeutung

Trotz dem für den schweizerischen Gebüschwald errechneten oberirdischen Holzvolumen von 65.9 m³/ha (Tabelle 5) wäre für die meist kleinen und krummen Gebüschwaldloden einzig eine Nutzung als Energieholz denkbar. Übernimmt man die von Wiedmer & Senn-Irlet (2006) errechneten Faktoren für die Biomasseproduktion eines dichten Alpen-erlenbestandes, so ergibt sich als vage Schätzung ein jährlicher Holzvolumenzuwachs von 1.9 m³/ha.

Dieser geringe Zuwachs und der geringe Vorrat von Gebüschwäldern erschweren eine effiziente Nutzung. Primär sind es aber die Umstände, dass die Gebüschwälder kaum erschlossen sind und infolge der oft hohen Geländeneigung vorwiegend motormanuell beerntet werden müssten, die eine wirtschaftliche Nutzung weitgehend verunmöglichen. Einzig für den lokalen Eigenbedarf können die Gebüschwälder (weiterhin) als Brennholzquelle dienen.

Ausblick

Anhand der erarbeiteten Funktionen können in Zukunft mit geringem Aufwand für beliebige Gebiete brauchbare Holzvolumen- und Biomasseschätzungen für die Gebüschwälder vorgenommen werden, sofern sie von der Alpen-erle oder der Legföhre dominiert sind. Als zentrale Eingangsgrössen dienen hierbei die Gebüschwaldfläche sowie der Deckungsgrad der verschiedenen Gehölzarten. Diese können am effizientesten über das Luftbild bestimmt werden. Die Artbestimmung von Laubgehölzen sollte aber terrestrisch überprüft werden.

Im LF14 für die Jahre 2009 bis 2017 wird neu bei allen terrestrisch besuchten Gebüschwaldflächen auf einer Fläche von wenigen Quadratmetern eine Vollkluppierung durchgeführt. Anhand dieser Angaben und der in dieser Arbeit bestimmten Funktionen können die gesamtschweizerischen Volumen- und Masseberechnungen mit einer repräsentativen Stichprobenauswahl überprüft werden. ■

Eingereicht: 2. April 2010, akzeptiert (mit Review): 1. September 2010

Literatur

- ASSMANN E (1961) Waldertragskunde. München: BLV. 490 p.
- BAFU (2009) Switzerland's greenhouse gas inventory 1990–2007. National Inventory Report 2009. Berne: Federal Office for the Environment. 364 p. www.bafu.admin.ch/climatereporting/00545/07651/index.html?lang=en (16.12.2009)
- BRÄNDLI UB, EDITOR (2010) Schweizerisches Landesforstinventar. Ergebnisse der dritten Aufnahme 2004–2006. Birmensdorf: Eidgenöss. Forsch.anstalt Wald Schnee Landschaft. 312 p.
- CIOLDI ET AL (2010) Waldressourcen. In: Brändli UB, editor. Schweizerisches Landesforstinventar. Ergebnisse der dritten Aufnahme 2004–2006. Birmensdorf: Eidgenöss. Forsch.anstalt Wald Schnee Landschaft. pp. 31–113.
- FAO (2006) Global forest resources assessment 2005. Progress towards sustainable forest management. Rome: Food Agriculture Organisation, Forestry Paper 147. 320 p.
- FATTORINI L, GASPARINI P, NOCETTI M, TABACCHI G, TOSI V (2004) Above-ground tree phytomass prediction and preliminary shrub phytomass assessment in the forest stands of Trentino. *Studi Trent Sci Nat, Acta Biol* 81 (Suppl 1): 75–121.
- FRÖDIN J (1940) Zentraleuropas Alpwirtschaft, Band 1. Oslo: Aschehoug. 411 p.

- KAUFMANN E (2001) Estimation of standing timber, growth and cut. In: Brassel P, Lischke H, editors. Swiss national forest inventory: Methods and models of the second assessment. Birmensdorf: Swiss Federal Research Institute WSL. pp. 162–196.
- KELLER M, EDITOR (2005) Schweizerisches Landesforstinventar. Anleitung für die Feldaufnahmen der Erhebung 2004–2007. Birmensdorf: Eidgenöss. Forschungsanstalt Wald Schnee Landschaft. 393 p.
- KRAMER H (1988) Waldwachstumslehre. Hamburg: Paul Parey. 374 p.
- MCPFE (2007) State of Europe's forests 2007. The MCPFE report on sustainable forest management in Europe. Warsaw: MCPFE Liaison Unit. 247 p.
- PENMAN J ET AL (2003) Good practice guidance for land use, land use-change and forestry. Hayama: Institute Global Environmental Strategies. www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/gpplucf/gpplucf.htm (13.10.2010)
- PERRUCHOUD D, KIENAST F, KAUFMANN E, BRÄKER OU (1999) 20th century carbon budget of forest soils in the Alps. *Ecosystems* 2: 320–337.
- RUBLI D (1974) Waldbauliche Untersuchungen in Grünerlenbeständen. Zürich: ETH Zürich, Dissertationen. 82 p.
- STEBLER F (1903) Alp- und Weidewirtschaft. Berlin: Paul Parey. 471 p.
- 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
- TRENDELENBURG R (1939) Das Holz als Rohstoff. München: Hanser. 541 p.
- WEST PW (2004) Tree and forest measurement. Berlin: Springer. 167 p.
- WIEDMER E, SENN-IRLET B (2006) Biomass and primary productivity of an *Alnus viridis* stand – a case study from the Schächental valley, Switzerland. *Bot Helv* 116: 55–64.

Modelle zur Biomasse- und Holzvolumenschätzung im Schweizer Gebüschwald

Die Ergebnisse des dritten schweizerischen Landesforstinventars zeigen, dass der Gebüschwald gut 5% der Gesamtwaldfläche ausmacht. Er wächst fast ausschliesslich in der subalpinen Stufe und wird von den beiden Gehölzarten Alpenerle und Legföhre dominiert. Infolge der Klimaerwärmung und des steigenden Bedürfnisses nach nachhaltigen Energien besteht ein nationales und internationales Interesse, das Holzvolumen und die Biomasse im Gebüschwald zu beziffern.

Demzufolge wurden zuerst repräsentative Loden vermessen, um für die Gehölze Alpenerle (*Alnus viridis*), Legföhre (*Pinus mugo prostrata*) und Weiden (*Salix sp.*) allometrische Volumen- und Massenfunktionen herzuleiten. Abhängig vom Fussdurchmesser konnten für jede Strauchlode das Holzvolumen, das Feuchtgewicht, das Trockengewicht und die Kohlenstoffmasse bestimmt werden. Eine Vollkluppierung von 49 Stichprobeflächen ermöglichte anschliessend, mittels Regressionsanalyse die Beziehung zwischen dem Gehölzdeckungsgrad und dem Holzvolumen, und somit auch der Biomasse, eines Bestandes aufzuzeigen. Bei einem Deckungsgrad von 100% weist der Alpenerlenbestand im Durchschnitt ein oberirdisches Holzvolumen von 74 m³/ha auf. Bei dem Legföhrenbestand ist es mit 166 m³/ha mehr als doppelt so hoch. Mit einem durchschnittlichen oberirdischen Holzvolumenwert von 66 m³/ha sind im schweizerischen Gebüschwald rund 2.0 Megatonnen Biomasse gespeichert.

Anhand der erarbeiteten Funktionen können in Zukunft für alpenerlen- und legföhrendominierte Gebüschwälder gute Schätzungen des oberirdischen Holzvolumens und der oberirdischen Biomasse gemacht werden. Als Eingangsgrösse dient hierfür der Deckungsgrad der vorhandenen Gehölzarten, welcher über das Luftbild effizient bestimmt werden kann.

Modélisation de la biomasse et du volume de bois pour la forêt buissonnante suisse

Les résultats du troisième Inventaire forestier national suisse indiquent que la forêt buissonnante représente 5% de la surface forestière totale. Elle pousse presque exclusivement à l'étage subalpin et est dominée par deux espèces ligneuses, l'aulne vert et le pin rampant. Sur fond de réchauffement climatique et de besoin croissant en énergies durables, quantifier les volumes de bois et la biomasse dans la forêt buissonnante présente un intérêt national et international.

C'est la raison pour laquelle on mesura tout d'abord des rejets représentatifs afin d'en déduire des relations allométriques en volume et en masse pour l'aulne vert (*Alnus viridis*), le pin rampant (*Pinus mugo prostrata*) et le saule (*Salix sp.*). En fonction du diamètre au pied de l'arbuste, il fut ainsi possible, pour chaque rejet, de déterminer le volume de bois, le poids humide, le poids sec et la masse carbone. Un inventaire pied par pied de 49 placettes d'échantillonnage permit par la suite, au moyen d'une analyse de régression, de montrer la relation entre le degré de recouvrement ligneux et le volume de bois, et d'évaluer par là même la biomasse d'un peuplement. A un degré de recouvrement de 100%, le peuplement d'aulnes verts présente en moyenne un volume de bois aérien de 74 m³/ha. Celui-ci est deux fois plus élevé dans le peuplement de pins rampants, où il atteint 166 m³/ha. Or, à un volume moyen de bois aérien de 66 m³/ha correspondent environ 2.0 mégatonnes de biomasse stockées dans la forêt buissonnante suisse.

Grâce aux fonctions élaborées, des évaluations fiables du volume de bois aérien et de la biomasse aérienne pourront être effectuées à l'avenir dans les peuplements buissonnants dominés par l'aulne vert et le pin rampant. La valeur initiale est alors le degré de recouvrement des espèces ligneuses présentes, une valeur qui peut être efficacement déterminée au moyen de la photo aérienne.