

Ermittlung der Kohlenstoffspeicherung von Bäumen im Siedlungsgebiet am Beispiel der Stadt Bern

Oliver Gardi
Guillaume Schaller
Matthias Neuner
Sophia Mack

Hochschule für Agrar-, Forst- und Lebensmittelwissenschaften (CH)*
Hochschule für Agrar-, Forst- und Lebensmittelwissenschaften (CH)
Hochschule für Agrar-, Forst- und Lebensmittelwissenschaften (CH)
Hochschule für Agrar-, Forst- und Lebensmittelwissenschaften (CH)

Ermittlung der Kohlenstoffspeicherung von Bäumen im Siedlungsgebiet am Beispiel der Stadt Bern

Während in der Schweiz viel Wissen vorhanden ist zur Kohlenstoffspeicherung von Bäumen im Wald, bestehen im Siedlungsraum diesbezüglich grosse Unsicherheiten. Im Rahmen des Projektes «Urban Green and Climate» wurde die oberirdische Biomasse von 21 Bäumen in der Stadt Bern gewogen und mit verschiedenen existierenden Biomassefunktionen verglichen. Es zeigt sich, dass klassische forstwirtschaftliche Funktionen, für welche nur der Brusthöhendurchmesser erfasst werden muss, nur beschränkt in der Lage sind, die oberirdische Biomasse von freistehenden Bäumen abzubilden. Gute Schätzungen werden hingegen mit einer Biomassefunktion erreicht, welche zusätzlich die Baumhöhe miteinbezieht ($R^2 = 0.96$). Diese Funktion wurde verwendet, um die oberirdische Baumbiomasse und den darin gespeicherten Kohlenstoff auf 179 Probeflächen in der Stadt Bern zu ermitteln. Mit den auf den Probeflächen gefundenen Kohlenstoffvorräten (t C/ha) wurde ein Modell zur Abschätzung des in oberirdischer Biomasse gespeicherten Kohlenstoffes urbaner Baumbestände auf Basis von LiDAR-Daten kalibriert ($R^2 = 0.84$). Für das Siedlungsgebiet der Stadt Bern (d.h. ohne Gewässer, Wald und Landwirtschaftsland) resultiert ein Wert von 14.9 ± 0.5 t C/ha. Mit dem entwickelten Ansatz und den schweizweit verfügbaren LiDAR-Daten liesse sich der in der oberirdischen Baumbiomasse ausserhalb des Waldes gespeicherte Kohlenstoff für die ganze Schweiz mit grosser Genauigkeit ermitteln.

Keywords: urban forests, biomass models, carbon storage, LiDAR
doi: 10.3188/szf.2016.0090

* Fachgruppe Internationale Waldwissenschaften und Klimawandel, Länggasse 85, CH-3052 Zollikofen, E-Mail oliver.gardi@bfh.ch

Bäume im Siedlungsraum erbringen eine Vielzahl an Umweltdienstleistungen: Sie regulieren das Mikroklima, reinigen die Luft, tragen zur Versickerung des Regenwassers bei, bieten Lebensgrundlagen für die Artenvielfalt in der Stadt, verschönern das Stadtbild und tragen zur Erholung deren Bewohner bei (siehe z.B. Bolund & Hunhammar 1999). Des Weiteren entziehen sie der Atmosphäre Kohlendioxid (CO_2) und speichern den Kohlenstoff in ihrer Biomasse (z.B. Lal & Augustin 2012).

Gemäss der Schweizerischen Arealstatistik (BFS 2013) ist die Siedlungsfläche in den letzten drei Jahrzehnten um 1% pro Jahr gewachsen und bedeckt heute 7.5% der Landesfläche. Im selben Zeitraum hat die Baumdichte im Siedlungsraum um jährlich 0.4% abgenommen. Heute sind knapp 8% der Schweizer Siedlungsfläche mit Bäumen bestockt.

Mit der Ratifizierung der UN-Klimarahmenkonvention (UNFCCC) hat sich die Schweiz verpflichtet, jährlich eine Treibhausgasbilanz zu er-

stellen, inklusive der Veränderungen des in der Vegetation und im Boden gespeicherten Kohlenstoffes (BAFU 2015). Während die Schweiz mit den Landesforstinventaren über eine ausgezeichnete Datenbasis verfügt, um die Entwicklung der Kohlenstoffspeicherung im Wald zu ermitteln, sind die Grundlagen zur Abschätzung der Kohlenstoffspeicherung von Baumbeständen ausserhalb des Waldes (Abbildung 1) lückenhaft. Insbesondere fehlen spezifische, d.h. auf Schweizer Verhältnisse abgestimmte Biomassefunktionen (Mathys & Thürig 2010).

Das Ziel der vorliegenden Studie ist es, 1) an Schweizer Verhältnisse angepasste Modelle zur Abschätzung der oberirdischen Biomasse von Einzelbäumen im Siedlungsgebiet zu identifizieren und 2) Kohlenstoffmodelle auf Basis von LiDAR-Daten zu entwickeln, die es erlauben, den im Siedlungsgebiet in der oberirdischen Baumbiomasse gespeicherten Kohlenstoff mit grosser Genauigkeit abzuschätzen.



Abb 1 Bäume im Stadtpark Biel als Beispiel für die Vielfalt urbaner Baumformen.

Allometrische Funktionen und Tarife aus der Forstwirtschaft

In der Schweiz werden seit den 1960er-Jahren Volumenfunktionen entwickelt, welche das Schaftholzvolumen eines Waldbaumes mithilfe des Brusthöhendurchmessers (BHD), des Durchmessers in sieben Metern Höhe und der Baumhöhe ermitteln. Auf dieser Basis wurden für den Schweizer Wald repräsentative Tariffunktionen für verschiedene Baumarten und Standorte entwickelt, welche lediglich den BHD als Eingangsgrösse zur Abschätzung des Schaftholzvolumens benötigen (Kaufmann 2001). Mittels Holzdicke und entsprechenden Biomasse-Expansionsfaktoren lässt sich daraus die gesamte oberirdische Baumbiomasse abschätzen.

Auf internationaler Ebene wurden in den vergangenen drei Jahrzehnten vermehrt allometrische Funktionen zur direkten Ableitung der oberirdischen Biomasse verschiedener Baumarten aus einfach zu erhebenden Grössen wie dem BHD entwickelt (z.B. Muukkonen 2007, Zianis et al 2005, Jenkins et al 2004). Meist sind die Funktionen spezifisch für eine Art und/oder eine Region und daher von eingeschränkter Anwendbarkeit. Neuere Untersuchungen in tropischen Wäldern fanden jedoch einen generischen Zusammenhang zwischen BHD und Biomasse, unabhängig von Art, Bestockungstyp und Standort, sofern nebst dem BHD auch die Holzdicke und die Baumhöhe als Eingangsgrössen mitberücksichtigt werden (Chave et al 2014).

Inventuren urbaner Baumbiomasse

Erste Studien zur Baumbiomasse in Städten wurden Anfang der 1990er-Jahre in den USA durchgeführt. Dabei wurde die oberirdische Biomasse der untersuchten Bäume mittels artspezifischer Biomassefunktionen aus der Forstwirtschaft geschätzt, unter Berücksichtigung eines Korrekturfaktors von 0.8 für freistehende Stadtbäume (Nowak 1994). Dieser Ansatz wurde vom US Forest Service für sein Modell «Urban Forest Effects» (UFORE)¹ übernommen. Wie McHale et al (2009) zeigten, weichen die mit diesem Modell geschätzten oberirdischen Biomassen von Stadtbäumen teils sehr stark von den realen Werten ab. Die Autoren machen zudem darauf aufmerksam, dass der auf Basis von lediglich 30 Strassenbäumen ermittelte Korrekturfaktor nicht generalisierbar sei. Sie erwägen daher die Entwicklung von allometrischen Funktionen spezifisch für Stadtbäume.

Im schweizerischen Treibhausgasinventar (BAFU 2015) liegt der Abschätzung des in oberirdischer Baumbiomasse ausserhalb des Waldes gespeicherten Kohlenstoffes ein Faktor von 58 t C/ha_{Kro-}nenfläche zugrunde (Mathys & Thürig 2010). Er basiert auf Standardfaktoren des Weltklimarates (Jenkins et al 2006), und zwar auf einer in zehn Städten der USA mit dem UFORE-Modell ermittelten jährlichen

¹ Heute iTREE-eco, www.itreetools.org/eco/index.php (26.1.2016).

Kohlenstoffakkumulation von 2.9 t C/ha_{Kronenfläche} (Nowak & Crane 2002) während 20 Jahren.

Material und Methoden

Im Rahmen der vorliegenden Studie wurde die oberirdische Biomasse von Einzelbäumen in der Stadt Bern gemessen und mit den Schätzungen publizierter Biomassefunktionen verglichen. Auf Stichprobenflächen in der Stadt wurde, unter Verwendung der besten Biomassefunktion, der in der oberirdischen Baumbiomasse gespeicherte Kohlenstoff ermittelt. Mit diesen Daten wurde ein Modell zur Abschätzung des in oberirdischer Biomasse gespeicherten Kohlenstoffes von Baumbeständen im Siedlungsgebiet der Stadt Bern auf Basis von LiDAR-Daten kalibriert.

Biomassemessungen an Einzelbäumen

Für die Bewertung existierender Biomassefunktionen standen 21 Bäume aus der Stadt Bern zur Verfügung, welche im Rahmen regulärer Fällaktionen von Stadtgrün Bern gefällt wurden. Dabei handelte es sich um freistehende Bäume der Arten *Aesculus hippocastanum* (7), *Quercus robur* (7), *Acer platanoides* (3), *Fagus sylvatica* (3) und *Castanea sativa* (1).

Von jedem Baum wurde die Art, der BHD und die Baumhöhe bestimmt sowie die gesamte oberirdische Frischbiomasse gewogen. Die Ermittlung des Trockengewichts erfolgte über das Verhältnis von Trocken- zu Frischgewicht von Mischproben aus Stamm- und Astmaterial. Zusätzlich wurde die Holzdichte der Proben bestimmt (Verhältnis des Trockengewichts zum Volumen der vollständig gequollenen Probe).

Identifizierung geeigneter Biomassefunktionen

Mithilfe der folgenden Biomassefunktionen wurde die oberirdische Biomasse der Bäume abgeschätzt und mit den ermittelten Trockengewichten verglichen (Modelldefinitionen und Resultate in Tabelle 1):

- **Schweizer Waldtariffunktion:** Dieser Ansatz orientiert sich an der zur Bestimmung der Biomasse im Schweizer Waldareal verwendeten Methode und folgt einem dreistufigen Verfahren: 1) Abschätzung des Schaftholzvolumens mittels artspezifischer Tarife, basierend auf BHD und diversen Standortfaktoren (Kaufmann 2001), 2) Berechnung der Schaftholzmasse mit den ermittelten Holzdichten und 3) Anwendung eines Biomasse-Expansionsfaktors zur Bestimmung des Trockengewichtes der oberirdischen Baumbiomasse (Brändli 2010).
- **Funktion nach UFORE/IPCC:** Da für Waldbäume entwickelte Biomasse-Expansionsfaktoren nicht a priori auf Stadtbäume anwendbar sind, empfiehlt der Weltklimarat die Verwendung allometrischer

Funktionen, welche die oberirdische Biomasse von Bäumen direkt auf Basis des BHD abschätzen, angepasst mit einem Korrekturfaktor für freistehende Bäume (Jenkins et al 2006). Wir verwendeten die allometrische Funktion von Jenkins et al (2004), die für verschiedene Hart- und Weichholzgattungen in Nordamerika entwickelt wurde, sowie den von Nowak (1994) postulierten Korrekturfaktor von 0.8 für freistehende Stadtbäume.

- **Generische Funktion mit Einbezug der Baumhöhe (Funktion von Chave et al 2014):** Gemäss einem neueren Modell, kalibriert mit Daten von 4004 tropischen Bäumen aus verschiedenen Regionen (Chave et al 2014), wird die oberirdische Biomasse von Bäumen massgeblich durch die drei Faktoren BHD, Baumhöhe und Holzdichte bestimmt, unabhängig von Baumart, Bestockungstyp und Standort.
- **Mit den in Bern ermittelten Trockengewichten kalibrierte Funktion von Chave et al (2014):** Mittels linearer Regression wurde das Modell von Chave et al (2014) zusätzlich mit den in Bern ermittelten oberirdischen Baumbiomassen kalibriert, um zu testen, ob ein auf Stadtbäume angepasstes Modell bessere Schätzungen erzielt als das entsprechende generische Modell.

Stichprobeninventur des städtischen Baumbestandes

Auf 179 Probeflächen von 25 × 25 m wurden im Sommer 2014 Art, BHD und Höhe aller Bäume mit BHD ≥ 7 cm aufgenommen. Die Flächenzentren wurden zufällig aus den 2320 Probepunkten der Arealstatistik (BFS 2013) ausgewählt, welche dem Siedlungsraum der Gemeinde Bern zugeordnet sind (d.h. ohne Gewässer, Wald- und Landwirtschaftsflächen). Die Stratifizierung erfolgte nach den im schweizerischen Treibhausgasinventar für den Siedlungsraum verwendeten Klassen: versiegelte Flächen, Grasflächen, Strauchflächen und Baumflächen (BAFU 2015).

Die oberirdische Biomasse der 1289 erhobenen Bäume wurde mit der allometrischen Funktion von Chave et al (2014) abgeschätzt. Dazu wurden Holzdichten aus der Literatur verwendet (Zanne et al 2009, Crivellaro & Schweingruber 2013). Anschliessend wurden die oberirdischen Biomassen der Bäume für jede Probefläche aufsummiert und mit einem Faktor von 0.47 t C pro Tonne Biomasse (Aalde et al 2006) in Kohlenstoff umgerechnet.

Flächendeckende Auswertung mit LiDAR-Daten

Mithilfe von LiDAR-Daten des Kantons Bern vom März/April 2012² wurden der Kronendeckungsgrad und die mittlere Vegetationshöhe auf den

² Klassierte Punktwolke von LiDAR-Rohdaten (Sensor Leica ALS70, mind. 4 Punkte/m²). Nachführung 18.8.2012.

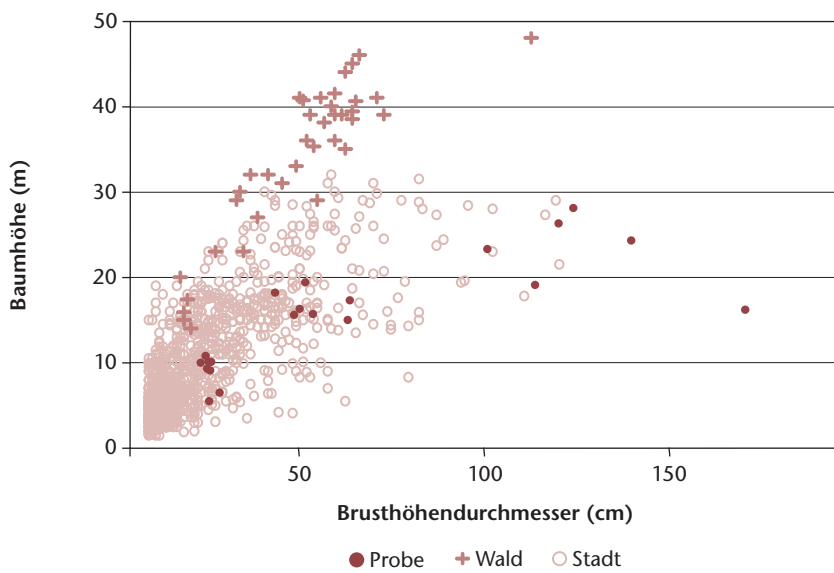


Abb 2 Brusthöhendurchmesser und Höhe der gewogenen Bäume (Probe, n=21) im Vergleich zu den in der Inventur erfassten Stadtbäumen (Stadt, n=1344) und Waldbäumen auf dem Berner Gemeindegebiet (Wald, n=38; Daten aus dem 3. und 4. Schweizerischen Landesforstinventar, Spezialabfrage von Bronwyn Price/WSL vom 30.4.2015).

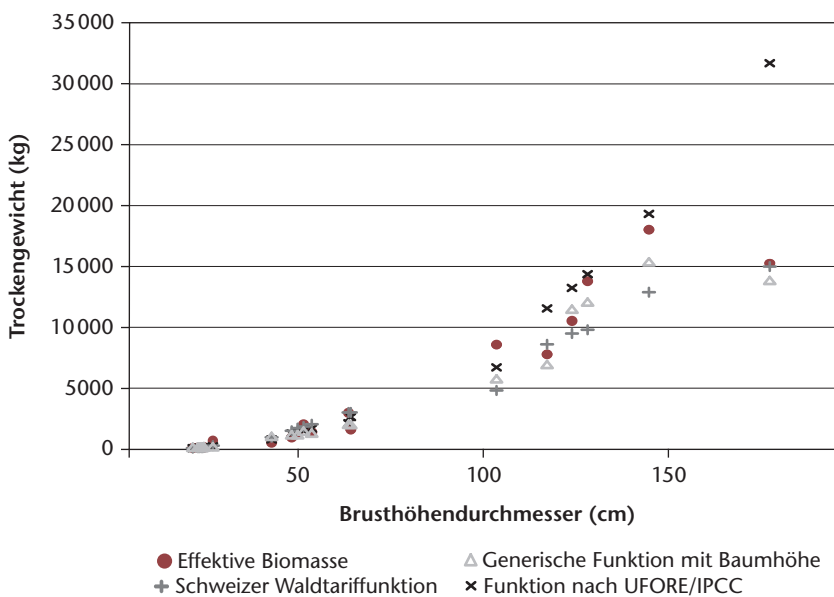


Abb 3 Effektive Biomasse der gewogenen Einzelbäume sowie die entsprechenden Schätzwerte der getesteten Biomassefunktionen in Abhängigkeit des Brusthöhendurchmessers.

179 Probeflächen der Inventur ermittelt. Der Kronendeckungsgrad wurde dabei definiert als der Anteil der LiDAR-Impulse, welcher auf Vegetation höher als 3 m trifft, die mittlere Vegetationshöhe als die mittlere Höhe aller Vegetationspunkte, die mehr als 3 m über Grund liegen.

Mittels linearer Regression wurden zwei Modelle kalibriert, welche den auf den Probeflächen in oberirdischer Biomasse gespeicherten Kohlenstoff mit den aus den LiDAR-Daten abgeleiteten Parametern Kronendeckungsgrad respektive Grünvolumen (Produkt aus Kronendeckungsgrad und mittlerer Vegetationshöhe) zu erklären versuchen. Die Prüfung der Modelle erfolgte mittels Kreuzvalidierung ($\frac{2}{3}$ der Proben für Kalibrierung, $\frac{1}{3}$ für Validierung,

1000 Repetitionen). Zur flächendeckenden Ermittlung des in oberirdischer Biomasse gespeicherten Kohlenstoffes wurde das LiDAR-Modell, welches das Grünvolumen als Prädiktor verwendet, auf das Hektarraster der Arealstatistik im Siedlungsgebiet der Stadt Bern angewendet.

Resultate

Biomasse von Einzelbäumen

Die 21 im Rahmen dieser Studie untersuchten Einzelbäume hatten oberirdische Baumbiomassen von 111 kg bis 18049 kg. Sie wichen in ihrer Wuchsform deutlich von Waldbäumen ab, waren aber, wie der Vergleich mit den in der Inventur erfassten Bäumen zeigt, nicht untypisch für Bäume im Siedlungsraum (Abbildung 2). Einzig vielleicht eine Eiche mit einem BHD von 177 cm und einer Höhe von lediglich 16.2 m muss selbst in urbanen Verhältnissen als Extremfall bezeichnet werden.

Sämtliche getesteten Biomassefunktionen erbrachten gute Schätzwerte für Bäume mit BHD <70 cm (Abbildung 3). Grössere Abweichungen zeigten sich jedoch bei den Bäumen mit BHD >100 cm. Die Schweizer Waldtariffunktion neigt dazu, die oberirdische Biomasse von Bäumen mit starken Durchmessern zu unterschätzen. Dass die Kennzahlen in Tabelle 1 dennoch relativ gut ausfallen, ist der guten Schätzung der Eiche mit extremer Wuchsform zu verdanken. Diese muss jedoch, da die Waldtariffunktion nur den BHD, nicht aber die Höhe des jeweiligen Baumes in den Parametern berücksichtigt, als zufällig betrachtet werden. Die Funktion nach UFORE/IPCC, d.h. die Kombination der einzig auf BHD basierten allometrischen Funktion von Jenkins et al (2004) mit einem Korrekturfaktor von 0.8 für Stadtbäume, tendiert hingegen dazu, die oberirdische Biomasse von Bäumen mit starken Durchmessern zu überschätzen, insbesondere jene der Eiche mit extremer Wuchsform.

Von den getesteten Modellen erlaubt die generische Biomassefunktion von Chave et al (2014), welche nebst dem BHD auch die Baumhöhe als Parameter enthält, die beste Abbildung und auch die genaueste Schätzung der oberirdischen Baumbiomassen ($R^2 = 0.96$ und $RMSE = 692.3$ kg), selbst dann, wenn die Eiche mit extremer Wuchsform aus dem Datensatz entfernt wird. Die Kalibrierung des Modells mit den erhobenen Daten bringt keine deutliche Verbesserung.

Kohlenstoffspeicherung städtischer Baumbestände

Die auf den 179 Probeflächen der Grösse 25×25 m mittels Inventur und allometrischer Funktion von Chave et al (2014) erhobenen Werte des in oberirdischer Baumbiomasse gespeicherten Kohlen-

Biomassefunktion	R ²	RMSE	Bias
Schweizer Waldtariffunktion (Kaufmann 2001 und Brändli 2010)			
TG = e ^{β₀ + β₁ln(BHD) + β₂ln(BHD)⁴ + Σβ_i × SF × ρ × BEF × 1000 mit art- und standortspezifischen β_i, Standortfaktoren SF und BEF = 1.31 für Laubbäume}	0.91	916.6	-489.5
Funktion nach UFORE/IPCC (Jenkins et al 2004 und Nowak 1994)			
TG = e ^{β₀ + β₁ln(BHD)} × k	0.55	1459.8	1101.9
mit artspezifischen β _i und Korrekturfaktor k = 0.8			
Generische Funktion mit Baumhöhe (Chave et al 2014)			
TG = β ₀ × (ρ × BHD ² × H) ^{β₁}	0.96	692.3	-531.8
mit β ₀ = 0.0673 und β ₁ = 0.976			
Funktion mit Baumhöhe (Chave et al 2014), kalibriert mit den erhobenen Daten			
TG = β ₀ × (ρ × BHD ² × H) ^{β₁}	0.97	587.6	-256.7
mit β ₀ = 0.1772 und β ₁ = 0.901			
Nach Kreuzvalidierung (2/3 der Daten für Kalibrierung, 1/3 für Validierung, 1000 Repetitionen)	0.94	686.2	-306.8

Tab 1 Die getesteten Funktionen zur Bestimmung der oberirdischen Baumbiomasse (Trockengewicht; in kg), deren Bestimmtheitsmass R², Standardfehler RMSE und Bias der Schätzung (beide in kg). Verwendete Modellparameter: Brusthöhendurchmesser BHD, Baumhöhe H, ermittelte Holzdicke ρ, Biomasse-Expansionsfaktor BEF und Modellkoeffizienten β_i.

LiDAR-Kohlenstoffmodelle (Faktor ± Standardfehler)	R ²	RMSE	Bias
LiDAR-Modell Kronendeckungsgrad			
COB = 106.257 ± 4.6939 × KDG _{LiDAR}	0.73	14.9	1.4
LiDAR-Modell Grünvolumen			
COB = 10.1698 ± 0.3187 × (KDG _{LiDAR} × ØVH _{LiDAR})	0.84	11.4	0.5

Tab 2 Vergleich der Modelle zur Abschätzung des in oberirdischer Biomasse städtischer Baumbestände gespeicherten Kohlenstoffes (COB, in t C/ha) auf Basis des mittels LiDAR-Daten ermittelten Kronendeckungsgrades (KDG_{LiDAR}, mit Werten von 0 bis 1) und Grünvolumens (Produkt aus KDG_{LiDAR} und der durchschnittlichen Vegetationshöhe ØVH_{LiDAR}, in m). Angegeben sind das Bestimmtheitsmass R² der Modelle, der Standardfehler RMSE und der Bias der Schätzungen (beide in t C/ha).

stoffes variieren zwischen 0 und 133.4 t C/ha. Der mittels LiDAR-Daten ermittelte Kronendeckungsgrad erklärt 73% der auf den Probestellen gefundenen Varianz (Tabelle 2). Der entsprechende Faktor beträgt 106.3 ± 4.7 t C/ha_{Kronenfläche}. Das Grünvolumen, d.h. das Produkt aus Kronendeckungsgrad und mittlerer

Vegetationshöhe, erklärt hingegen 84% der gefundenen Varianz, und auch der Standardfehler der Schätzung (RMSE) ist mit 11.4 t C/ha um 23% kleiner als beim einzig auf dem Kronendeckungsgrad basierten Modell. Der resultierende Faktor für das Grünvolumen beträgt 10.17 ± 0.32 t C/(ha_{Kronenfläche} × m_{Vegetationshöhe}) beziehungsweise 1.017 ± 0.032 kg C/m³_{Grünvolumen}.

Die über das Grünvolumen abgeschätzten Werte des in der oberirdischen Baumbiomasse gespeicherten Kohlenstoffes für die 2320 Hektarflächen der Arealstatistik im Siedlungsgebiet der Stadt Bern variieren zwischen 0 und 137.8 t C/ha, mit einem durchschnittlichen Wert von 14.9 ± 0.5 t C/ha (Tabelle 3).

Diskussion

Biomassefunktionen – zentraler Faktor Baumhöhe

Die genaue Schätzung der Biomasse von Baumbeständen bedingt insbesondere auch eine genaue Schätzung der Biomasse grosser Bäume. Die allometrische Funktion von Jenkins et al (2004) ohne Einbezug der Baumhöhe, kombiniert mit einem Biomasse-Korrekturfaktor für freistehende Stadtbäume, führt zu einer allgemeinen Überschätzung der Biomasse von Bäumen mit starken Durchmessern (BHD > 120 cm). Die Abschätzung derselben Bäume auf Basis der Schweizer Waldtariffunktion führt hingegen aufgrund eines definierten Wendepunktes im Kurvenverlauf zu einer systematischen Unterschätzung deren Biomasse. Beide Funktionen eignen sich daher nur bedingt zur Abschätzung der Biomasse grosser Einzelbäume und von Baumbeständen ausserhalb des Waldes.

Gemäss unseren Resultaten erbringt die generische allometrische Funktion von Chave et al (2014), welche die Baumhöhe explizit als Eingangsparame-

Kategorie	Fläche (ha)	Auswertung Bern mit/nach					
		LiDAR-Modell Grünvolumen			Treibhausgasinventar Schweiz (Mathys & Thürig 2010)		
		KDG _{LiDAR} (%)	ØVH _{LiDAR} (m)	COB (t C/ha)	KDG _{Luftbild} (%)	COB (t C/ha)	Abweichung COB (%)
Versiegelte Flächen	1444	11.6	10.9	12.9 ± 0.4	15.1	8.7	-32.6
Grasflächen	506	12.6	10.7	13.8 ± 0.4	16.4	9.5	-31.2
Strauchflächen	10	14.2	14.6	21.0 ± 0.7	26.6	15.4	-26.7
Baumflächen	360	20.1	12.1	24.7 ± 0.8	35.7	20.7	-16.2
Insgesamt	2320	13.1	11.2	14.9 ± 0.5	18.6	10.8	-27.5

Tab 3 In der oberirdischen Baumbiomasse gespeicherter Kohlenstoff (COB) im Siedlungsgebiet der Gemeinde Bern nach Siedlungsgebietskategorie (Einteilung gemäss Treibhausgasinventar), ermittelt mit dem entwickelten LiDAR-Modell Grünvolumen (Mittelwert ± Standardfehler) und den entsprechenden, im schweizerischen Treibhausgasinventar verwendeten Werten (Mathys & Thürig 2010). Flächen der verschiedenen Kategorien der Gemeinde Bern gemäss Arealstatistik (2013). Dargestellt sind zudem der in Bern ermittelte Kronendeckungsgrad (KDG_{LiDAR}) und die mittlere Vegetationshöhe (ØVH_{LiDAR}) für das LiDAR-Modell Grünvolumen, der dem Treibhausgasinventar für die verschiedenen Kategorien zugrunde liegende KDG_{Luftbild} (Mathys & Thürig 2010) und die relative Abweichung der im Treibhausgasinventar ausgewiesenen zu der mit dem LiDAR-Modell Grünvolumen ermittelten COB.

ter mitberücksichtigt, die genauesten Schätzungen, insbesondere für grosse Bäume mit spezieller Wuchsform. Eine Kalibrierung desselben Modells auf Basis der vermessenen Stadtbäume bringt keine deutliche Verbesserung. Die Entwicklung spezifischer allometrischer Funktionen zur genauen Abschätzung der Biomasse von Stadtbäumen, wie von McHale et al (2009) in Betracht gezogen, scheint daher nicht notwendig.

Die Validierung des Modells von Chave et al (2014) basiert auf 21 vermessenen Laubbäumen von fünf verschiedenen Arten in der Stadt Bern, die einen BHD von 21.8 bis 177.0 cm aufwiesen. Da es sich um ein generisches Modell handelt, das zwar auf Basis tropischer Waldbäume entwickelt wurde, aber die oberirdische Baumbiomasse unabhängig von Art, Bestockungstyp und Standort beschreibt, kann davon ausgegangen werden, dass es sich in vergleichbar guter Weise für andere Laubbaumarten und Nichtwaldgebiete in der Schweiz eignet. Hingegen können keine Aussagen über die Prognosegenauigkeit des Modells für die Biomasse von Nadelbäumen gemacht werden. Weiter gehende Untersuchungen in diese Richtung wären angebracht.

Kohlenstofffaktoren – Kronendeckungsgrad und Vegetationshöhe

Zur Abschätzung des in oberirdischer Baumbiomasse ausserhalb des Waldes gespeicherten Kohlenstoffes in nationalen Treibhausgasinventaren empfiehlt der Weltklimarat die Verwendung von Kohlenstofffaktoren auf Basis der Kronenfläche (Jenkins et al 2006). Der in Bern gefundene Faktor von $106.3 \pm 4.7 \text{ t C/ha}_{\text{Kronenfläche}}$ liegt deutlich höher als der aus Standardfaktoren abgeleitete und dem schweizerischen Treibhausgasinventar zugrunde liegende Wert von $58 \text{ t C/ha}_{\text{Kronenfläche}}$. Der Unterschied dürfte zu einem grossen Teil methodisch bedingt sein: Während die Bestimmung der Kronenfläche oft über die äussere Begrenzung der einzelnen Baumkronen erfolgt, berücksichtigt die mittels LiDAR ermittelte effektive Kronenfläche auch Lücken in der Krone. Die so ermittelten Kronendeckungsgrade sind von daher tiefer als jene, die über die Kronenbegrenzung bestimmt wurden (vgl. Tabelle 3), und die zugehörigen Kohlenstofffaktoren entsprechend höher.

Auf der anderen Seite dürfte die dem Standardfaktor von $58 \text{ t C/ha}_{\text{Kronenfläche}}$ zugrunde liegende Annahme, dass der Biomassezuwachs eines städtischen Baumbestandes bereits im Alter von 20 Jahren durch Pflege und Mortalität ausgeglichen wird, in vielen Fällen zu einer Unterschätzung der Biomasse städtischer Baumbestände führen. So wurde in Leipzig ein Faktor von $68.2 \text{ t C/ha}_{\text{Kronenfläche}}$ gefunden (Strohbach & Haase 2012), und Nowak et al (2013) fanden in 28 Städten der USA einen mittleren Faktor von $76.9 \pm 13.6 \text{ t C/ha}_{\text{Kronenfläche}}$, mit einer Standardabweichung von $22.6 \text{ t C/ha}_{\text{Kronenfläche}}$.

Die grosse Varianz der in den USA mittels einheitlicher Methode gefundenen Kohlenstofffaktoren macht deutlich, dass Faktoren, die einzig auf der Kronenfläche basieren, stark standortspezifisch sind und deren Verwendung mit entsprechenden Unsicherheiten verbunden ist. In unserem Fall reduziert der lokal ermittelte Kohlenstofffaktor die Unsicherheit auf einen Standardfehler von $\pm 4.4\%$ (Tabelle 2). Weiter zeigen unsere Untersuchungen in Bern, dass sich die Varianz des oberirdisch in Baumbeständen gespeicherten Kohlenstoffes deutlich besser erklären lässt, wenn nebst der Kronenfläche auch die Vegetationshöhe mitberücksichtigt wird. Der auf Basis des Grünvolumens ermittelte Kohlenstofffaktor von $1.017 \pm 0.032 \text{ kg C/m}^3_{\text{Grünvolumen}}$ führt zu einer weiteren Reduktion der Unsicherheit (Standardfehler von $\pm 3.1\%$).

Da das auf dem Grünvolumen basierende Modell die Kronenfläche und die mittlere Vegetationshöhe als Eingangsparameter berücksichtigt, trifft es lediglich eine Annahme zur Dichte des oberirdischen Grünvolumens. Diese Dichte wird hauptsächlich von der Struktur des Bestandes und dessen Zusammensetzung bestimmt. So dürfte das Modell auch für andere Nichtwaldareale der Schweiz mit ähnlicher Struktur und Zusammensetzung anwendbar sein, sofern vergleichbare LiDAR-Daten zur Verfügung stehen.

Kohlenstoffspeicherung von Bäumen im Berner Siedlungsgebiet

Der im Siedlungsgebiet von Bern gefundene mittlere Vorrat des in oberirdischer Baumbiomasse gespeicherten Kohlenstoffes von $14.9 \pm 0.5 \text{ t C/ha}$ ist rund 25% höher als entsprechende Werte in anderen Städten der Region (11.8 t C/ha in Leipzig, 12.8 t C/ha in Karlsruhe, 11.2 t C/ha in Barcelona, zusammengestellt in Strohbach & Haase 2012), liegt aber im Bereich der in 28 Städten der USA gefundenen Vorräte von 5.0 bis 37.7 t C/ha (Nowak et al 2013). Ausschlaggebend für die mittlere Kohlenstoffspeicherung in oberirdischer Biomasse ist der Anteil der von Bäumen bestockten Fläche im Siedlungsgebiet. Dieser liegt in Bern mit einem Baumflächenanteil von 15.5% deutlich über dem Durchschnitt des schweizerischen Siedlungsgebiets von 7.9% (BFS 2013).

Im schweizerischen Treibhausgasinventar wird der in oberirdischer Baumbiomasse gespeicherte Kohlenstoff auf Basis von Landnutzungskategorien der Arealstatistik ermittelt. Die dazu von Mathys & Thürig (2010) auf Basis von Kronendeckungsgraden aus dem LFI3-Luftbildnetz und dem Standardfaktor von $58 \text{ t C/ha}_{\text{Kronenfläche}}$ entwickelten Faktoren liegen deutlich tiefer als die von uns in Bern ermittelten Werte (Tabelle 3). Auf das Siedlungsgebiet der Gemeinde Bern angewendet, resultiert daraus ein mittlerer Vorrat des in oberirdischer Baumbiomasse ge-

speicherten Kohlenstoffes von 10.8 t C/ha, was den von uns ermittelten Wert um 28% unterschätzt.

Es ist zu erwarten, dass die Unterschätzung des in oberirdischer Baumbiomasse gespeicherten Kohlenstoffes durch die im schweizerischen Treibhausgasinventar angewendete Methode für Bern besonders deutlich ausfällt. So dürfte die hohe Dichte an Bäumen im Siedlungsgebiet der Stadt Bern nicht nur einen überdurchschnittlichen Anteil an Flächen, die als Baumflächen klassiert sind, zur Folge haben, sondern auch eine höhere Dichte an Bäumen in anderweitig klassierten Flächen. Das würde erklären, wieso gerade die Nichtbaumflächen von den im Treibhausgasinventar angewendeten Faktoren derart deutlich unterschätzt werden (Tabelle 3). Nimmt man die Abweichung der Faktoren für Baumflächen als Referenz, wären rund 16% der Unterschätzung auf die Verwendung des Standardfaktors von 58 t C/ha_{Kronenfläche} zurückzuführen.

Schlussfolgerungen und Ausblick

Die Schweiz hat sich im Rahmen der UN-Klimarahmenkonvention verpflichtet, über die Kohlenstoffspeicherung im Siedlungsraum und deren Veränderung Bericht zu erstatten. Der aktuell im Treibhausgasinventar angewendete, auf Standardfaktoren basierende Ansatz zur Abschätzung des in der oberirdischen Biomasse gespeicherten Kohlenstoffes ist mit grossen Unsicherheiten verbunden und dürfte zu einer systematischen Unterschätzung führen. Die vorliegende Arbeit zeigt am Beispiel der Stadt Bern, wie es auf Basis verfügbarer LiDAR-Daten mit bescheidenem Aufwand möglich ist, spezifische Kohlenstofffaktoren zu entwickeln, welche in der Lage sind, den in der oberirdischen Baumbiomasse gespeicherten Kohlenstoff mit grosser Genauigkeit flächendeckend abzubilden. Das für Bern kalibrierte LiDAR-Modell, welches den in oberirdischer Baumbiomasse gespeicherten Kohlenstoff über das Grünvolumen ermittelt, dürfte auch für andere Siedlungsgebiete mit vergleichbaren Baumbeständen genaue Resultate liefern. Um dies zu verifizieren und um repräsentative Kohlenstofffaktoren für verschiedene Kategorien des Schweizer Nichtwaldareals zu erhalten, bedarf es weiterer Bauminventuren in anderen Regionen und Landnutzungsklassen. ■

Eingereicht: 24. August 2015, akzeptiert (mit Review): 2. Februar 2016

Dank

Die Studie wurde innerhalb des Projektes «Urban Green and Climate» realisiert, ein Projekt im Rahmen des Pilotprogramms «Anpassung an den Klimawandel», gefördert durch das Bundesamt für Umwelt (BAFU). Sie basiert auf drei an der Hoch-

schule für Agrar-, Forst- und Lebensmittelwissenschaften der Berner Fachhochschule realisierten Bachelor- und Masterarbeiten. Stadtgrün Bern unterstützte uns bei der Vermessung gefällter Einzelbäume. Die LiDAR-Daten wurden vom Amt für Geoinformation des Kantons Bern zur Verfügung gestellt, die Daten der Arealstatistik vom BAFU. Wertvolle Kommentare zur Verbesserung des Manuskripts erhielten wir von Dr. Andreas Schellenberger (BAFU), Dr. Lukas Mathys (Nategra GmbH) und Dr. Esther Thürig (WSL) sowie den Reviewern des Artikels Dr. Markus Didion und Dr. Gerald Kändler.

Literatur

- AALDE H, GONZALEZ P, GYTARSKY M, KRUG T, KURZ WA ET AL (2006) Forest land. In: Eggleston S, Buendia L, Miwa K, Ngara T, Tanabe K. 2006 IPCC Guidelines for national greenhouse gas inventories. Volume 4: Agriculture, Forestry and other land use. Hayama: Intergovernmental Panel on Climate Change. pp. 4.1–4.83.
- BAFU (2015) Switzerland's greenhouse gas inventory 1990–2013. Bern: Bundesamt Umwelt. 596 p.
- BFS (2013) Die Bodennutzung in der Schweiz. Resultate der Arealstatistik. Neuenburg: Bundesamt Statistik. 24 p.
- BOLUND P, HUNHAMMAR S (1999) Ecosystem services in urban areas. *Ecol Econ* 29: 293–301.
- BRÄNDLI UB, EDITOR (2010) Schweizerisches Landesforstinventar. Ergebnisse der dritten Erhebung 2004–2006. Birmensdorf: Eidgenöss. Forsch. anstalt WSL. 312 p.
- CHAVE J, RÉJOU-MÉCHAIN M, BÚRQUEZ A, CHIDUMAYO E, COLGAN MS ET AL (2014) Improved allometric models to estimate the aboveground biomass of tropical trees. *Glob Chang Biol* 20: 3177–3190.
- CRIVELLARO A, SCHWEINGRUBER FH (2013) Atlas of wood, bark and pith anatomy of eastern mediterranean trees and shrubs: With a special focus on Cyprus. Berlin: Springer. 583 p.
- JENKINS JC, CHOJNACKY DC, HEATH LS, BIRDSEY RA (2004) Comprehensive database of diameter-based biomass regressions for North American tree species. Durham: US Dep Agriculture, Forest Service, General Technical Report NE-319. 48 p.
- JENKINS JC, GINZO HD, OGLE SM, VERCHOT LV (2006) Settlements. In: Eggleston S, Buendia L, Miwa K, Ngara T, Tanabe K. 2006 IPCC Guidelines for national greenhouse gas inventories. Volume 4: Agriculture, Forestry and other land use. Hayama: Intergovernmental Panel on Climate Change. pp. 8.1–8.29.
- 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. pp. 162–196.
- LAL R, AUGUSTIN B (2012) Carbon sequestration in urban ecosystems. New York: Springer. 385 p.
- MATHYS L, THÜRIG E (2010) Baumbiomasse in der Landschaft. Bern: Bundesamt Umwelt. 77 p.
- MCHALE MR, BURKE IC, LEFSKY MA, PEPPER PJ, MCPHERSON EG (2009) Urban forest biomass estimates: is it important to use allometric relationships developed specifically for urban trees? *Urban Ecosyst* 12: 95–113.
- MUUKKONEN P (2007) Generalized allometric volume and biomass equations for some tree species in Europe. *Eur J For Res* 126: 157–166.

NOWAK DJ (1994) Atmospheric carbon dioxide reduction by Chicago's urban forest. In: McPherson EG, Nowak DJ, Rowntree RA, editors. Chicago's urban forest ecosystem: results of the Chicago Urban Forest Climate Project. Durham: US Dep Agriculture, Forest Service, General Technical Report NE-186. pp. 83–94.

NOWAK DJ, CRANE DE (2002) Carbon storage and sequestration by urban trees in the USA. *Environ Poll* 116: 381–389.

NOWAK DJ, GREENFIELD EJ, HOEHN RE, LAPOINT E (2013) Carbon storage and sequestration by trees in urban and community areas of the United States. *Environ Poll* 178: 229–236.

STROHBACH MW, HAASE D (2012) Above-ground carbon storage by urban trees in Leipzig, Germany: Analysis of patterns in a European city. *Landsc Urban Plan* 104: 95–104.

ZANNE AE, LOPEZ-GONZALEZ G, COOMES DA, ILIC J, JANSEN S ET AL (2009) Global wood density database. Dryad. Identifier: <http://hdl.handle.net/10255/dryad.235> (27.1.2016)

ZIANIS D, MUUKKONEN P, MÄKIPÄÄ R, MENCUCCINI M (2005) Biomass and stem volume equations for tree species in Europe. *Silva Fenn Monographs* 4. 63 p.

Déterminer le stockage de carbone par les arbres en zone urbaine de la ville de Berne

Si l'on dispose en Suisse de beaucoup de connaissances sur la séquestration du carbone par les peuplements forestiers, il existe nombre d'incertitudes quant à cette capacité en milieu urbain. Dans le cadre du projet «Urban Green and Climate», la biomasse aérienne de 21 arbres de la ville de Berne a été mesurée et comparée avec divers modèles de biomasse existants. Les modèles sylvicoles classiques, basés sur le diamètre à hauteur de poitrine et ne prenant pas directement en compte la hauteur de l'arbre, ne représentent que de manière limitée la biomasse aérienne des arbres solitaires. Un modèle de biomasse qui inclut la hauteur d'arbre ($R^2 = 0.96$) a par contre permis d'obtenir de bonnes estimations. Ce modèle a été appliqué sur 179 placettes d'échantillonnage pour déterminer la biomasse aérienne des arbres de la ville de Berne et le carbone qui y est stocké. Avec les données carbonées (t C/ha) obtenues sur les placettes, un modèle a été calibré pour estimer la densité de carbone aérien des arbres urbains ($R^2 = 0.84$). Il en résulte une valeur de 14.9 ± 0.5 t C/ha pour la zone bâtie de Berne (c. à d. sans les étendues d'eau, les forêts ou les surfaces agricoles). Grâce à cette approche et aux données LiDAR disponibles, le carbone contenu dans la biomasse aérienne des arbres hors forêt pourrait être calculé avec une grande précision pour l'ensemble du territoire national.

Determining the carbon storage of trees in urban areas of the city of Bern

While the amount carbon stored in tree biomass within Swiss forests is well studied, many uncertainties remain for estimating the carbon stored by trees in settlements. As a part of the project «Urban Green and Climate», various existing biomass models were compared with the measured aboveground biomass of 21 trees within the city of Bern. Traditional forestry models that estimate the biomass based on the diameter at breast height only have a limited capacity to accurately predict the biomass of single urban trees. Good predictions are however achieved by using a biomass model that additionally includes tree height ($R^2 = 0.96$). This model was then used to determine the aboveground tree biomass at 179 sample plots in Bern. The carbon densities (t C/ha) of the plots were used to calibrate a model predicting the carbon storage in the aboveground biomass for urban tree populations based on LiDAR data ($R^2 = 0.84$). A value of 14.9 ± 0.5 t C/ha was obtained for the developed area of Bern (i.e. areas without water, forest and agricultural land). With this model and available LiDAR data, the carbon stored in the aboveground biomass of trees outside forests and its change over time could be determined with high accuracy for all of Switzerland.