

Baumbiomasse in der Landschaft

Schlussbericht



September 2010

Impressum

Auftraggeber: Bundesamt für Umwelt (A. Schellenberger)

Autoren: L. Mathys (Sigmaplan),
E. Thürig (Eidg. Forschungsanstalt WSL)

Version	Datum	Autoren
1.0	13.08.2010	LM, ET
2.0	09.09.2010	LM, ET

Baumbiomasse in der Landschaft

Inhaltsverzeichnis

1	Zusammenfassung	1
2	Ausgangslage	2
3	Ziel	6
4	Methode	8
4.1	Untersuchungsgebiet.....	8
4.2	Daten	9
4.3	Analysen	16
4.4	Werkzeuge.....	26
5	Resultate	27
5.1	Erhöhte Repräsentativität	27
5.2	Flächendeckende Kartierung.....	41
5.3	Spezifische Biomasseschätzung.....	48
6	Diskussion	61
6.1	Erhöhte Repräsentativität	61
6.2	Flächendeckende Kartierung.....	61
6.3	Spezifische Biomasseschätzung.....	63
7	Synthese	65
8	Dank	68

Beilagen

Digitale Schlussdaten

Anhang

Extended Summary

Abbildungsverzeichnis

Abb. 1	Bisherige landesweite Biomasseschätzung basierend auf Stichproben im Kanton Genf	4
Abb. 2	Übersicht zur Untersuchung für verbesserte Baumbiomasseschätzung im Nichtwaldareal	6
Abb. 3	Untersuchungsschritte mit den jeweiligen Tabellen und Geodaten als Zielprodukte	7
Abb. 4	Die Untersuchungsgebiete für erhöhte Repräsentativität (grob schraffiert), flächige Erfassung (dicht schraffiert) und spezifischere Biomasseschätzung (graue Hintergrundsfläche) (Massstab 1:3 Mio)...	8
Abb. 5	Räumliche Verteilung der AREA Stichproben (graue Flächen) mit LFI Produktionsregionen (schwarze Perimeterlinien) als räumliche Referenz (Massstab 1:3 Mio)	9
Abb. 6	Schematischer Ausschnitt aus den überlagerten Stichprobennetze AREA (Ringe), LFI3 Luftbild (Quadrate) und LFI3 Terrestrisch (Rhomben)	10
Abb. 7	Räumliche Verteilung der LFI3 Luftbildstichproben (graue Flächen) mit LFI Produktionsregionen (schwarze Perimeterlinien) als räumliche Referenz (Massstab 1:3 Mio)	11
Abb. 8	Räumliche Verteilung der terrestrischen LFI Stichproben (graue Flächen) mit LFI Produktionsregionen (schwarze Perimeterlinien) als räumliche Referenz (Massstab 1:3 Mio)	12
Abb. 9	Räumliche Abdeckung der LFI Produktionsregionen (Massstab 1:3 Mio)	13
Abb. 10	Räumliche Verteilung des Laserscanning DTM und DOM (graue Fläche) mit LFI Produktionsregionen (schwarze Perimeterlinien) als räumliche Referenz (Massstab 1:3 Mio)	14
Abb. 11	Räumliche Verteilung des TLM (graue Fläche) mit LFI Produktionsregionen (schwarze Perimeterlinien) als räumliche Referenz (Massstab 1:3 Mio)	15
Abb. 12	Räumliche Abdeckung der Untersuchungsstichproben als Schnittmenge von AREA und LFI (graue Fläche) innerhalb LFI Produktionsregionen (Massstab 1:3 Mio)	17
Abb. 13	Schattierter Ausschnitt Zürich Nord aus dem digitalen Terrainmodell (Massstab 1:50'000, reproduziert mit Bewilligung von swisstopo JA100001)	19
Abb. 14	Schattierter Ausschnitt Zürich Nord, wie Abb. 13, aus dem digitalen Oberflächenmodell (Massstab 1:50'000, reproduziert mit Bewilligung von swisstopo JA100001)	20
Abb. 15	Schattierter Ausschnitt Zürich Nord, wie Abb. 13 und Abb. 14, aus dem digitalen Höhenmodell als Differenz zwischen digitalen Oberflächen- und Terrainmodell (Massstab 1:50'000, reproduziert mit Bewilligung von swisstopo JA100001)	20
Abb. 16	Streuung des Baumdeckungsgrades nach Kyoto Klassen.....	33
Abb. 17	Streuung der nach Strata Treibhausgasinventar (Produktionsregion, Höhenklasse) geschätzten Baumbiomassen pro Kyoto Klasse.....	40

Abb. 18	Schattierter Ausschnitt Zürich Hauptbahnhof aus dem digitalen Oberflächenmodells überlagert mit Gebäuden (schraffiert) und den zusätzlichen 3 m und 6 m Puffern (Massstab 1:5'000, reproduziert mit Bewilligung von swisstopo JA100001)	41
Abb. 19	Schattierter Ausschnitt Zürich Nord aus dem digitalen Oberflächenmodell mit überlagerter Baum-/Nichtbaummaske in 2 m Auflösung (Massstab 1:50'000, reproduziert mit Bewilligung von swisstopo JA100001)	42
Abb. 20	Zusammenhang Baumdeckungsgrad Laserscanning und LFI3 (Bautenpuffer = 0 m, Helligkeit Rasterzellen entspricht Punktpaarhäufigkeit, dunkelgraue Linie entspricht lineare Modellgerade, hellgraue Linie entspricht Diagonale)	43
Abb. 21	Abweichung Baumdeckungsgrad Laserscanning gegenüber LFI3 (Bautenpuffer = 0 m, graue Vertikallinien entsprechen Mittelwert und Standardabweichung).....	43
Abb. 22	Zusammenhang Baumdeckungsgrad Laserscanning und LFI3 (Bautenpuffer = 3 m, Helligkeit Rasterzellen entspricht Punktpaarhäufigkeit, dunkelgraue Linie entspricht lineare Modellgerade, hellgraue Linie entspricht Diagonale)	44
Abb. 23	Abweichung Baumdeckungsgrad Laserscanning gegenüber LFI3 (Bautenpuffer = 3 m, graue Vertikallinien entsprechen Mittelwert und Standardabweichung).....	44
Abb. 24	Zusammenhang Baumdeckungsgrad Laserscanning und LFI3 (Bautenpuffer = 6 m, Helligkeit Rasterzellen entspricht Punktpaarhäufigkeit, dunkelgraue Linie entspricht lineare Modellgerade, hellgraue Linie entspricht Diagonale)	45
Abb. 25	Abweichung Baumdeckungsgrad Laserscanning gegenüber LFI3 (Bautenpuffer = 6 m, graue Vertikallinien entsprechen Mittelwert und Standardabweichung).....	45
Abb. 26	Schattierter Ausschnitt Zürich Umgebung aus dem DOM mit überlagerter Baumbiomasse im Wald- und Nichtwaldareal (Massstab 1:200'000, reproduziert mit Bewilligung von swisstopo JA100001)	46
Abb. 27	Schattierter Ausschnitt Zürich Nord aus dem DOM mit überlagerter Baumbiomasse im Wald- und Nichtwaldareal (Massstab 1:50'000, reproduziert mit Bewilligung von swisstopo JA100001)	47
Abb. 28	Deckungsgrade aller Bäume ≥ 3 m im Nichtwald, aufgeteilt nach Vegetationshöhenstufe und Nadel / Laub (Daten aus Luftbildstichproben LFI3)	48
Abb. 29	Kolline Laubbestände. Grafische Darstellung der einfachen Regressionsanalyse und der Residuenanalyse. a) Schwarze Linie: Regressionsgerade; gestrichelt: Vertrauensintervall; gepunktet: Vorhersageintervall; hellblaue Linie: nicht-parametrische Glättungsfunktion zur Visualisierung der Abhängigkeitsfunktion.	52
Abb. 30	Kolline Nadelbestände. Grafische Darstellung der einfachen Regressionsanalyse und der Residuenanalyse. a) Schwarze Linie: Regressionsgerade; gestrichelt: Vertrauensintervall; gepunktet: Vorhersageintervall; hellblaue Linie: nicht-parametrische Glättungsfunktion zur Visualisierung der Abhängigkeitsfunktion.	53

- Abb. 31 Montane Laubbestände. Grafische Darstellung der einfachen Regressionsanalyse und der Residuenanalyse. a) Schwarze Linie: Regressionsgerade; gestrichelt: Vertrauensintervall; gepunktet: Vorhersageintervall; hellblaue Linie: nicht-parametrische Glättungsfunktion zur Visualisierung der Abhängigkeitsfunktion. 54
- Abb. 32 Montane Nadelbestände. Grafische Darstellung der einfachen Regressionsanalyse und der Residuenanalyse. a) Schwarze Linie: Regressionsgerade; gestrichelt: Vertrauensintervall; gepunktet: Vorhersageintervall; hellblaue Linie: nicht-parametrische Glättungsfunktion zur Visualisierung der Abhängigkeitsfunktion. 55
- Abb. 33 Subalpine Nadelbestände. Grafische Darstellung der polynomischen Regressionsanalyse und der Residuenanalyse. a) Schwarze Linie: Regressionsgerade; gestrichelt: Vertrauensintervall; gepunktet: Vorhersageintervall; hellblaue Linie: nicht-parametrische Glättungsfunktion zur Visualisierung der Abhängigkeitsfunktion. 56
- Abb. 34 Schweizerische Laubbestände. Grafische Darstellung der einfachen Regressionsanalyse und der Residuenanalyse. a) Schwarze Linie: Regressionsgerade; gestrichelt: Vertrauensintervall; gepunktet: Vorhersageintervall; hellblaue Linie: nicht-parametrische Glättungsfunktion zur Visualisierung der Abhängigkeitsfunktion. 57
- Abb. 35 Schweizerische Nadelbestände. Grafische Darstellung der einfachen Regressionsanalyse und der Residuenanalyse. a) Schwarze Linie: Regressionsgerade; gestrichelt: Vertrauensintervall; gepunktet: Vorhersageintervall; hellblaue Linie: nicht-parametrische Glättungsfunktion zur Visualisierung der Abhängigkeitsfunktion. 58
- Abb. 36 Kolline Bestände. Validierung der Regressionsmodelle mit unabhängigen Daten von Wyrsh und Camin²³. Grüne und blaue Linien sind zwei verschiedene Methoden, Biomasse aus gemessenen Felddaten zu bestimmen; schwarze Linie: Regressionsgerade; gestrichelt: Vertrauensintervall; gepunktet: Vorhersageintervall; hellblaue Linie: nicht-parametrische Glättungsfunktion zur Visualisierung der Linearität. 60
- Abb. 37 Montane Bestände. Validierung der Regressionsmodelle mit unabhängigen Daten von Wyrsh und Camin^{Fehler! Textmarke nicht definiert.}. Grüne und blaue Linien sind zwei verschiedene Methoden, Biomasse aus gemessenen Felddaten zu bestimmen; schwarze Linie: Regressionsgerade; gestrichelt: Vertrauensintervall; gepunktet: Vorhersageintervall; hellblaue Linie: nicht-parametrische Glättungsfunktion zur Visualisierung der Linearität. 60
- Abb. 38 Umsetzungsschritte mit den jeweiligen Tabellen und Geodaten als Produkte..... 65
- Abb. 39 Konzeptvorschlag einer flächendeckenden aktualisierten Baumbiomassenerfassung für die ganze Landschaft 67

Tabellenverzeichnis

Tab. 1	Zielgrösse Biomasse und alle erklärende Grössen (grau hinterlegt), welche in die Erstellung der multiplen Regressionsmodelle einflussen	23
Tab. 2	Verteilung AREA Kyoto Klassen innerhalb Untersuchungsgebiet nach Inventur	27
Tab. 3	Verteilung der LFI3 Bodenbedeckungsanteile auf die AREA09 Kyoto Klassen	29
Tab. 4	Verteilung der LFI3 Bodenbedeckungsanteile auf die AREA09 Land Use Klassen	30
Tab. 5	Verteilung der LFI3 Bodenbedeckungsanteile auf die AREA09 Land Cover Klassen	31
Tab. 6	Anteil, Durchschnitt (AVG) und Standardabweichung (STD) des Baumdeckungsgrades an den Kyoto09 Klassen. Die Grundgesamtheit umfasst alle Stichproben mit Bäumen, also 30.9 % des Untersuchungsgebietes	32
Tab. 7	Baumbiomasse nach Kyotoklasse gemäss Good Practice Guidance ⁸ (Tier 1a)	34
Tab. 8	Baumbiomasse nach Kyotoklasse, LFI Höhenstufe, LFI Produktionsregion gemäss Good Practice Guidance ⁸ (Tier 1a).....	35
Tab. 9	Multiple Regressionsmodelle zur Abschätzung der Biomasse aus den erklärenden Grössen Z25, LBRASTERDG25, SUM_TREE_3M , MEAN_TREEHEIGHT und STDV_TREEHEIGHT	49
Tab. 10	Einfache, respektive polynomische Regressionsmodelle mit Biomasse als Zielgrösse und SUM_TREE_3M als erklärende Grösse. Nicht signifikante Achsenabschnitte werden gleich 0 gesetzt, weil theoretisch eine Baumhöhe von 0 auch eine Biomasse von 0 hat	51

1 Zusammenfassung

Die Schweiz hat sich gegenüber der UNFCCC verpflichtet, die Quellen und Senken von CO₂ im Bereich Landnutzung und Landnutzungsänderungen zu quantifizieren und in einem Treibhausgasinventar zu rapportieren. Diese Information ist dank der Arealstatistik und dem Schweizerischen Landesforstinventar für das Waldareal vorhanden. Im Nichtwaldareal jedoch besteht eine markante Informationslücke hinsichtlich der Baumbiomassen.

Dieses Forschungsprojekt untersuchte Lösungen zum schrittweisen Schliessen dieser Informationslücke zur Baumbiomasse im Nichtwaldareal. Die Untersuchungsergebnisse zeigen ein Verbesserungspotenzial in drei Schritten.

Kurzfristig können Baumbiomassen schon jetzt im Nichtwaldareal stichprobenbasiert nach Kyotostraten generell über den Baumdeckungsgrad geschätzt werden.

Mittelfristig sollte es möglich sein, Baumbiomassen im Nichtwaldareal flächendeckend nach Kyotostraten generell über den Baumdeckungsgrad zu erfassen.

Langfristig besteht grosses Potenzial, Baumbiomassen im Nichtwaldareal flächendeckend nach Kyotostraten spezifisch über Baumtypenschätzer zu erfassen.

Damit können die Anforderungen an das Treibhausgasinventar, aber auch an ein aktives Landmanagement befriedigt werden.

2 Ausgangslage

Die Schweiz unterzeichnete 1993 die „UN Framework Convention on Climate Change“ und 2003 das „Kyoto Protokoll“. Die beiden Dokumente verpflichten die Schweiz, ein Berichtssystem zu den klimarelevanten Treibhausgasen einzurichten, was mit dem „Swiss National Inventory System“, insbesondere dem „Schweizer Treibhausgasinventar“ (THGI), auch operationell geschehen ist (siehe www.climatereporting.ch).

Landnutzung, Landnutzungsänderungen und Forstwirtschaft („Land Use, Land-Use Change and Forestry“ - LULUCF) stellt einen wichtigen Sektor des Berichtsystems dar (Kapitel 7 in FOEN 2010¹). Das dabei mit Abstand relevanteste Treibhausgas der LULUCF Subsektoren ist Kohlenstoffdioxid (CO₂).

Die atmosphärische CO₂-Konzentration hat in den letzten Jahrzehnten gerade auch auf Grund von Nutzungsänderungen und -intensivierungen im LULUCF Sektor zugenommen (IPCC 2007²). Als Folge davon sind negative Auswirkungen auf das Klima und die natürlichen Ressourcen zu erwarten. Die atmosphärische CO₂-Konzentration kann aber auch reduziert werden über sogenannte Senken. Bäume sind momentan die wichtigsten natürlichen Senken, weil sie freies CO₂ in Biomasse einbauen, damit der Atmosphäre entziehen und für einen befristeten Zeitraum speichern. Entsprechend müssen im Treibhausgasinventar nicht nur die CO₂-Quellen, sondern auch die CO₂-Senken quantifiziert werden. Die Erfassung von Bäumen und deren Biomasse über die Zeit ist also entscheidend für die Quantifizierung von Zuständen und Veränderungen im LULUCF Sektor des Schweizerischen Treibhausgasinventars. Entsprechend ist im Folgenden, wenn nicht anders erwähnt, mit dem Begriff Biomasse nur die oberirdische Baumbiomasse gemeint.

Biomassen können im Waldareal dank der fundierten Datengrundlage aus dem Schweizerischen Landesforstinventar (LFI) detailliert ausgewiesen werden (Cioldi et al. 2010³). Das Waldareal deckt aber nur 31% der Schweizer Landesfläche ab (BFS 2005⁴). Für die übrigen Landnutzungsflächen von 69% gibt es momentan keine vergleichbare Information. Dies ist problematisch, weil diese Areale eine beachtliche Anzahl Bäume und Biomassenwerte haben können (Nowak, Crane 2002⁵; Ginzler, Mathys, Thürig *in prep*⁶) und eine hohe Landschaftsdynamik

¹ Federal Office for the Environment, 2010. Switzerland's Greenhouse Gas Inventory 1990-2008: National Inventory Report 2010.

² IPCC, (2007). Climate Change 2007: Fourth Assessment Report.

³ Cioldi, F., Baltensweiler, A., Brändli, U.-B., Duc, P., Ginzler, C., Herold Bonardi, A., Thürig, E., Ulmer, U., 2010. Waldressourcen. In: Brändli, U.-B. (Red.) Schweizerisches Landesforstinventar. Ergebnisse der dritten Erhebung 2004-2006. Birmensdorf, Eidgenössische Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft WSL. Bern, Bundesamt für Umwelt, BAFU. S. 31-113.

⁴ BFS, 2005. Arealstatistik Schweiz: Zahlen - Fakten - Analysen.

⁵ Nowak, D.J., Crane, D.E., 2002. Carbon storage and sequestration by urban trees in the USA. *Environmental Pollution*, 116: 381-389.

⁶ Ginzler, C., Mathys, L., Thürig, E., *in prep*. Die Bäume der Schweiz. Schweizerische Zeitschrift für Forstwesen.

aufweisen (BFS 2005⁴). Vor allem werden entsprechende Werte für das Treibhausgasinventar gefordert (FOEN 2010¹).

Im aktuellen Schweizerischen Treibhausgasinventar musste die Baumbiomasse deshalb für das gesamte Schweizer Siedlungsgebiet mittels einer Studie aus dem Kanton Genf geschätzt werden (FOEN 2010¹). In dieser Methodenstudie (Mathys 2005⁷) konnte der Baumdeckungsgrad für den ganzen Kanton flächendeckend erfasst werden basierend auf Gelände- und Oberflächenmodellen aus Laserscanningdaten sowie einem Gebäudekataster des Kantons Genf. Auf Grund der so erfassten Baumdeckungsgrade wurden die entsprechenden Biomassen für das Treibhausgasinventar geschätzt. Die Resultate der Methodenstudie zeigten bereits, dass Biomasse flächendeckend und nicht nur im Wald zu erfassen ist. Denn im Kanton Genf findet man nur 53% der Bäume im Waldareal, dafür 26% im Siedlungsgebiet und 21% im übrigen Gebiet. Praktisch die Hälfte der Baumvegetation liegt somit ausserhalb des Waldareals. Diese Biomasseverteilung ist kein Spezialfall für unsere Breitengrade, wie Nowak und Crane (2002⁵) zeigen.

Dieser bisherige methodische Ansatz im Treibhausgasinventar entspricht zwar grundsätzlich den Vorgaben des „Good practice Guidance for Land Use, Land-Use Change and Forestry“ (IPCC 2003⁸), welcher eine Schätzung der Biomasseänderungen als Differenz zwischen Zuwachs und Abgang sowie eine Berechnung mittels Baumdeckungsgrad vorschlägt. Jedoch sind die so ausgewiesenen Biomassen mit erheblichen Unsicherheiten behaftet.

⁷ Mathys, L. 2005. Erfassung von Waldlücken mittels Laserscanning. Schweizerische Zeitschrift für Forstwesen, 156: 372-377.

⁸ IPCC, 2003. Good Practice Guidance for Land use, Land-Use Change and Forestry. Institute for Global Environmental Strategies, Hayama, Japan.

Die Unsicherheiten in der Quantifizierung der Biomasse sind auf drei Hauptgründe zurückzuführen (vgl. Abb. 1).

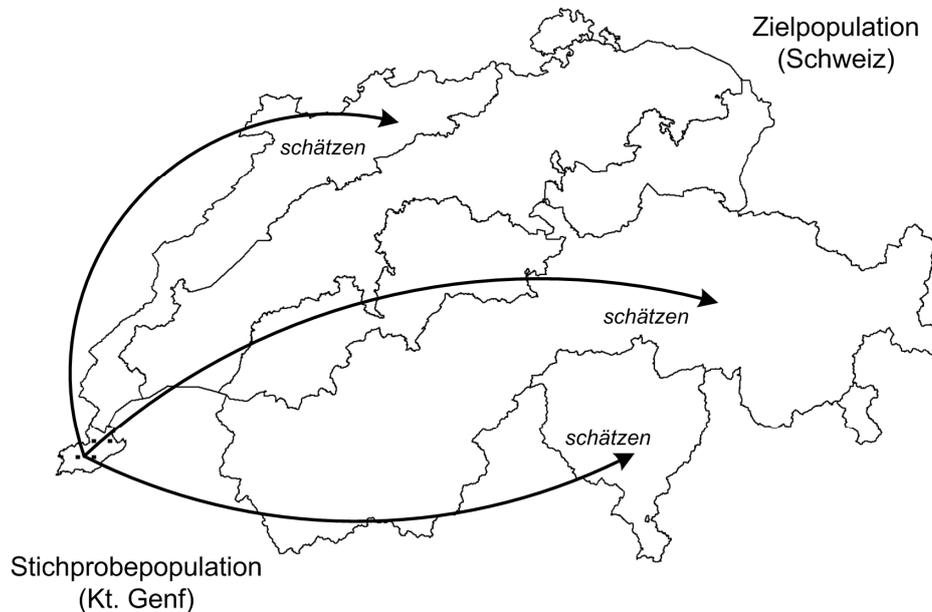


Abb. 1 Bisherige landesweite Biomasseschätzung basierend auf Stichproben im Kanton Genf

1. Fehlende Repräsentativität: Die bisherige Stichprobepopulation umfasste den Kanton Genf. Die Zielpopulation für die Aussagen im THGI war aber die ganze Schweiz und nicht der Kanton Genf. Entsprechend basierten bisherige Aussagen für die ganze Schweiz auf Daten und Verhältnissen des Kantons Genf. Doch der Kanton Genf repräsentiert landschaftlich nicht die ganze Schweiz. Damit repräsentiert die Stichprobepopulation auch nicht die Zielpopulation. Ein statistischer Bias muss darum angenommen werden in der bisherigen landesweiten Biomasseschätzung im Nichtwaldareal.
2. Nichtflächige Grundlagedaten: Die bisherige Erfassung der Baumdeckungsgrade geschah mittels Laserscanningdaten im Kanton Genf. Eine schweizweite Umsetzung dieser Erfassungsmethode war bis vor kurzem nicht möglich. Darum waren einzig die Resultate aus dem Kanton Genf (Mathys 2005⁷) verfügbar, welche auf die übrigen Gebiete extrapoliert werden mussten. Einerseits waren die entsprechenden Laserscanningdaten nicht flächendeckend verfügbar. Andererseits fehlten Zusatzdaten, um schweizweit automatisch Bauten von Bäumen zu unterscheiden und aus dem digitalen Kronenhöhenmodell zu extrahieren. Eine Verdichtung der Stichproben mittels flächendeckend vorhandenen Laserscanningdaten war bislang nicht möglich.

3. Unspezifische Biomasseschätzung: Die bisherige Methode schätzt Biomasse über den Baumdeckungsgrad und einen Umrechnungsfaktor für die ganze Schweiz. Diese Methode schätzt also nicht direkt Biomasse, sondern rechnet sie über einen Faktor aus der Literatur und eine Korrelation mit dem Baumdeckungsgrad für alle Baumarten und -typen gleich hoch. Dieses Vorgehen ist unspezifisch und damit sind die entsprechenden Biomasseschätzungen mit erheblichen Unsicherheiten versehen. Der „Good practice Guidance for Land Use, Land-Use Change and Forestry“ (IPCC 2003⁸) schlägt vor, speziell in diesem Bereich Verbesserungen vorzunehmen, also die Biomasseschätzungen räumlich spezifischer zu gestalten.

Das aktuelle Schweizer Treibhausgasinventar weist zwar Baumbiomasse-schätzungen im Nichtwaldareal aus, doch sind diese Schätzungen wohl mit erheblichen Unsicherheiten und Bias behaftet. Die Schweiz ist im Rahmen ihrer internationalen Verpflichtungen dazu angehalten, die Berichterstattung in den relevanten Sektoren (*key categories*) auf einen guten Stand zu bringen beziehungsweise laufend zu verbessern. Das vorliegende Forschungsprojekt zielt genau auf diese schrittweise Verbesserung hin, indem es die drei kritischen Verbesserungsschritte separat untersucht, nämlich (1) die Erhöhung der Stichproberepräsentativität, (2) die flächige Erfassung des Baumdeckungsgrades und (3) die spezifische Biomasseschätzung.

3 Ziel

Hauptziel dieser Forschungsarbeit ist die Untersuchung des schrittweisen Verbesserns der Biomasseschätzung im Nichtwaldareal für den LULUCF Sektor des Schweizerischen Treibhausgasinventars. Dieses Hauptziel beinhaltet drei Unterziele und eine Synthese (Abb. 2):

1. Erhöhte Repräsentativität: Berechnung spezifischer Schätzer für die jeweiligen Aussageeinheiten des Sektors LULUCF basierend auf der Tier 1a Methode.
2. Flächendeckende Erfassung: Untersuchung einer operationellen Methode zur flächendeckenden Erfassung des Baumdeckungsgrades und damit flächendeckende Schätzung nach der Tier 1a Methode.
3. Spezifische Schätzung: Untersuchung der Möglichkeit einer direkten Biomasseschätzung für das Nichtwaldareal.
4. Synthese: Zusammenfassung der Untersuchungsergebnisse aus den Schritten 1 - 3 zu einem Umsetzungskonzept.

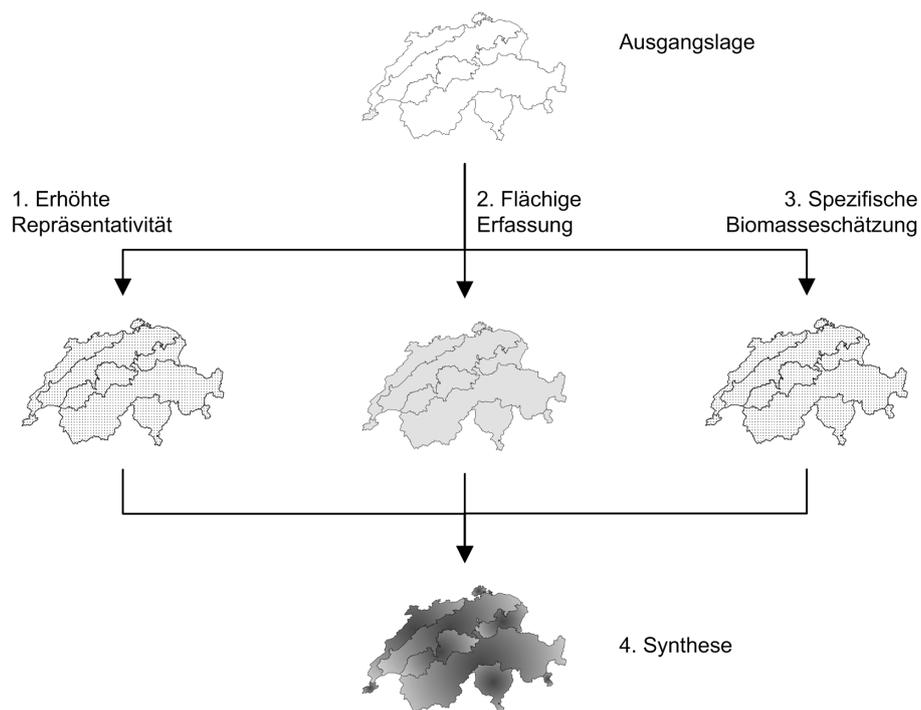


Abb. 2 Übersicht zur Untersuchung für verbesserte Baumbiomasseschätzung im Nichtwaldareal

Die Forschungsarbeit soll damit jene Lücken im LULUCF Sektor schliessen, welche im vorangehenden Kapitel aufgezeigt und im Kapitel 7.7.6 „Source-Specific Planned Improvement“ des aktuellen Treibhausgasinventars (FOEN 2010¹) ausgewiesen wurden. Konkret sollen die Verbesserungsschritte von der Pilotfläche Kanton Genf zur schweizweiten spezifischen Datengrundlage untersucht werden.

Die untersuchten Produkte gliedern sich entsprechend den drei Untersuchungsschritten aneinander an (Abb. 3).

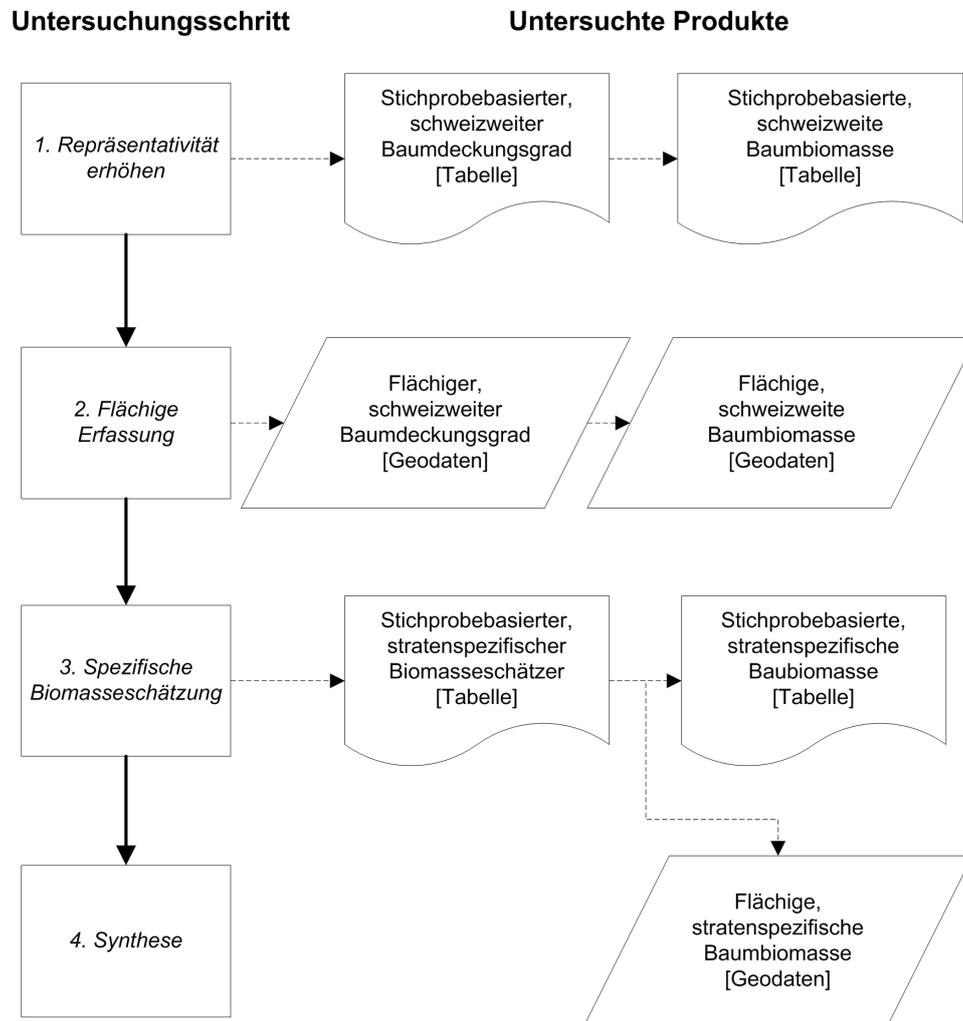


Abb. 3 Untersuchungsschritte mit den jeweiligen Tabellen und Geodaten als Zielprodukte

4 Methode

4.1 Untersuchungsgebiet

Das Untersuchungsgebiet umfasste grundsätzlich das Areal der Schweiz, da im Treibhausgasinventar für dieses Areal Aussagen gemacht werden müssen. Entsprechend verwendeten wir nur Datensätze, welche auch schweizweit erhoben werden. Nicht alle dieser Datensätze waren jedoch schon zum Untersuchungszeitpunkt schweizweit verfügbar. Daher mussten wir für die drei Untersuchungsschritte drei unterschiedliche Untersuchungsgebiete verwenden (Abb. 4). Diese Untersuchungsgebiete genügen also einzig den Anforderungen des Untersuchungszieles mit der entsprechenden Datenverfügbarkeit und richten sich weder nach administrativen noch naturräumlichen Kriterien.

Die Erhöhung der Stichproberepräsentativität wurde im nordwestlichen Teil der Schweiz untersucht, was etwas über 50 % der Landesfläche entspricht.

Die flächige Erfassung mittels Laserscanningdaten wurde im quadratischen Untersuchungsgebiet nördlich von Zürich untersucht, was ca. 3 % der Landesfläche entspricht.

Die spezifische Biomasseschätzung konnte für die ganze Schweiz untersucht werden.

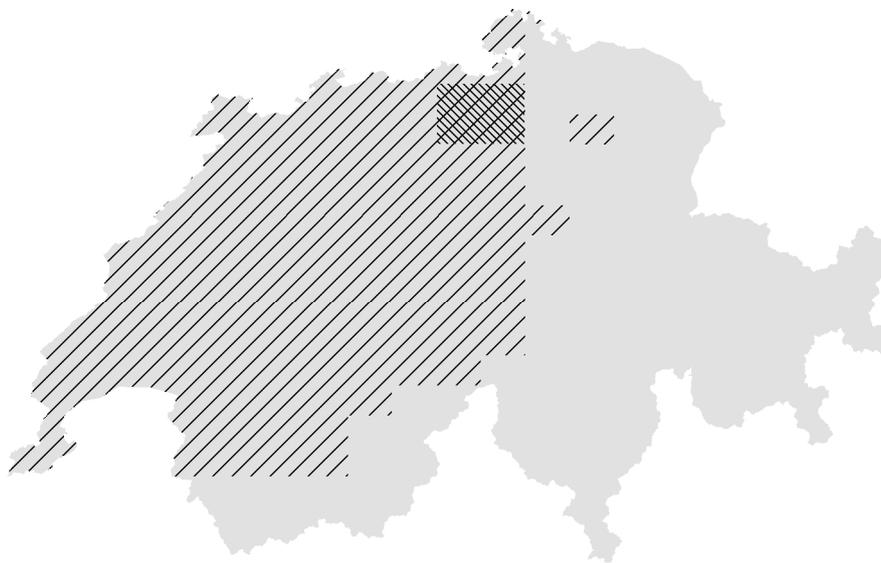


Abb. 4 Die Untersuchungsgebiete für erhöhte Repräsentativität (grob schraffiert), flächige Erfassung (dicht schraffiert) und spezifischere Biomasseschätzung (graue Hintergrundsfläche) (Massstab 1:3 Mio)

4.2 Daten

4.2.1 Arealstatistik

Die Arealstatistik (AREA) ist ein Stichprobendatensatz des Bundesamtes für Statistik (BFS), welcher die Bodennutzung und Landbedeckung innerhalb des Areals Schweiz im regelmässigen 100 m Netz erfasst (BFS 2005⁹).

Der momentan verfügbare und in dieser Studie verwendete AREA Untersuchungsdatensatz deckte den nordwestlichen Teil der Schweiz ab (Abb. 5) und umfasste 2'210'713 Stichproben, da AREA im Aufbau ist. Jeder Stichprobepunkt beinhaltet Angaben zur Landnutzungs- und Bodenbedeckungsklasse für die drei Inventuren 1985, 1997 und 2009 (AREA85, AREA97, AREA09). Zusätzlich dazu war aus der Kombination von Bodennutzungs- und Landbedeckungsklassen für jeden Stichprobepunkt bereits auch die entsprechende Kyotokategorie abgeleitet (Kyoto85, Kyoto97, Kyoto09). Diese Kategorien werden für das Treibhausgasinventar verwendet und dienen somit auch in dieser Untersuchung als hauptsächliches Stratifizierungsmerkmal.

Verwendet wurden die AREA Stichproben für die räumliche Stratifizierung gemäss Treibhausgasinventar (FOEN 2010¹).

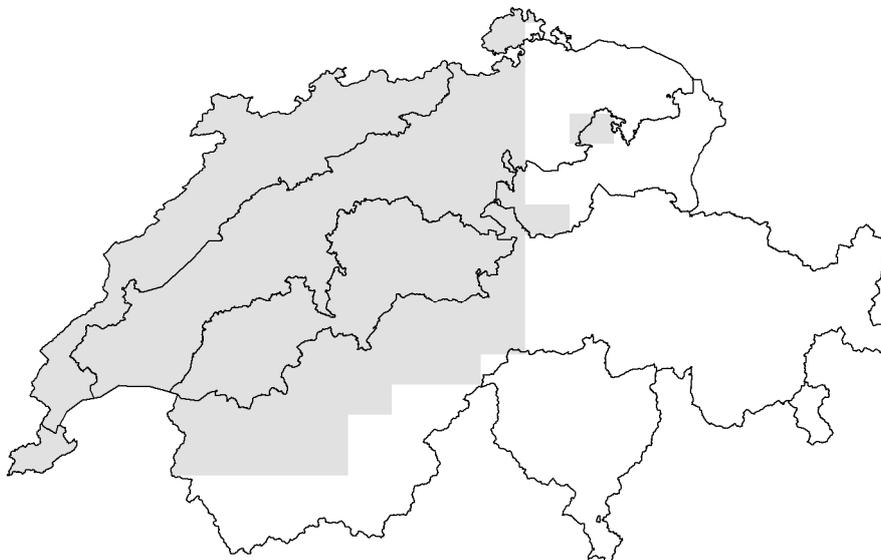


Abb. 5 Räumliche Verteilung der AREA Stichproben (graue Flächen) mit LFI Produktionsregionen (schwarze Perimeterlinien) als räumliche Referenz (Massstab 1:3 Mio)

⁹ BFS, 2005. Arealstatistik Schweiz: Zahlen - Fakten - Analysen. Bundesamt für Statistik.

4.2.2 LFI3 - Luftbildnetz

Der Luftbilddatensatz des dritten Schweizerischen Landesforstinventars (LFI3, 2004-2006) ist ein Stichprobendatensatz der Eidg. Forschungsanstalt WSL welcher die Bodenbedeckung und spezifische Gehölzmerkmale innerhalb des Areal Schweiz im regelmässigen 500 m Netz erfasst (Ginzler et al. 2005¹⁰). Das Luftbildstichprobenetz ist also ein räumliches Teilnetz des Arealstatistiknetzes (siehe Abb. 6).

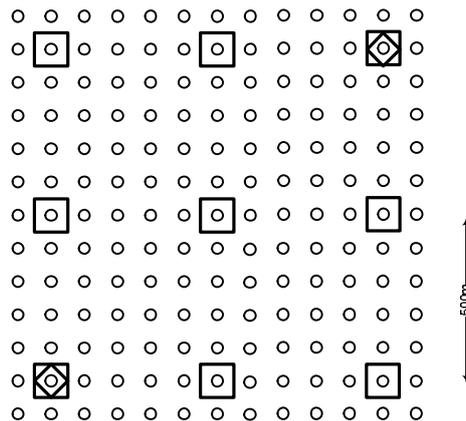


Abb. 6 Schematischer Ausschnitt aus den überlagerten Stichprobennetzen AREA (Ringe), LFI3 Luftbild (Quadrate) und LFI3 Terrestrisch (Rhomben)

Der LFI3 Untersuchungsdatensatz aus dem Luftbild deckte die ganze Schweiz ab (Abb. 7) und umfasste 165'153 Stichproben. Jeder Stichprobepunkt beinhaltete die Angaben zum Bodenbedeckungsgradient (d.h. Bodenbedeckung als Flächenanteile von Laub-, Nadelbaum, Lärche, Strauch, Kraut-/Grasvegetation, Felsen, Sand/Gestein/Offenerde, befestigte Fläche, Bauobjekt, Gewässer, Gletscher/Firn), zur Waldzugehörigkeit und zu spezifischen Gehölzmerkmalen (Höhen, Kronenvolumina etc.). Im Gegensatz zu den beiden vorangehenden Inventuren (LFI1 und LFI2) sind nun die Bodenbedeckungsgradienten schweizweit auf allen Stichproben erhoben und nicht nur im Waldareal (Mathys et al. 2006¹¹). Entsprechend können kontinuierliche Bodenbedeckungsanteile für das gesamte 500 m Netz ausgewertet werden.

Verwendet wurde der Luftbilddatensatz des LFI3 für die Quantifizierung von Bodenbedeckungsanteilen und Baummerkmalen.

¹⁰Ginzler, C. et al., (2005). Luftbildinterpretation LFI3 - Interpretationsanleitung zum dritten Landesforstinventar. Birmensdorf, Eidg. Forschungsanstalt WSL.

¹¹Mathys, L., Ginzler, C., Zimmermann, N.E., Brassel, P., Wildi, O., 2006. Sensitivity assessment on continuous landscape variables to classify a discrete forest area. *Forest Ecology and Management*, 229: 111-119.

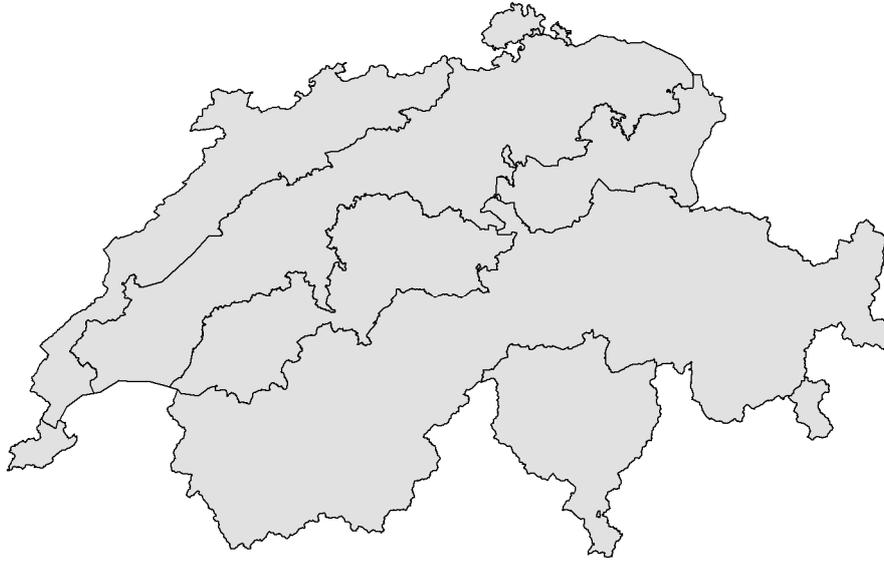


Abb. 7 Räumliche Verteilung der LFI3 Luftbildstichproben (graue Flächen) mit LFI Produktionsregionen (schwarze Perimeterlinien) als räumliche Referenz (Massstab 1:3 Mio)

4.2.3 LFI3 - Terrestrisches Netz

Der terrestrische Datensatz des LFI3 ist ein Stichprobedatensatz der Eidg. Forschungsanstalt WSL, welcher eine Vielzahl von Gehölz- und Landschaftsmerkmale innerhalb des Waldareals der Schweiz im regelmässigen $\sqrt{2}$ km Netz erfasst (Keller 2005¹²). Das terrestrische Netz ist also ein räumliches Teilnetz des LFI Luftbildstichprobenetzes und damit des Arealstatistiknetzes (Abb. 6).

Der LFI3 Untersuchungsdatensatz der terrestrischen Felddaten deckte die ganze Schweiz ab (Abb. 8) und umfasste 6'608 Waldstichproben. Jeder Stichprobepunkt beinhaltete neben einer grossen Anzahl verschiedener Baum- und Landschaftsmerkmale auch die Baumbiomasse.

Verwendet wurde der terrestrische Datensatz des LFI3 für die Herleitung spezifischer Biomasseschätzer.



Abb. 8 Räumliche Verteilung der terrestrischen LFI Stichproben (graue Flächen) mit LFI Produktionsregionen (schwarze Perimeterlinien) als räumliche Referenz (Massstab 1:3 Mio)

¹²Keller, M., (Red.) 2005. Schweizerisches Landesforstinventar. Anleitung für die Felddaten der Erhebung 2004-2007. Eidg. Forschungsanstalt WSL.

4.2.4 Produktionsregionen und Höhenstufen

Die Produktionsregionen (PRODREG) des LFI sind ein Polygondatensatz der WSL, welcher das Areal der Schweiz in fünf Regionen mit gleichen Holzwuchs- und Produktionsbedingungen einteilt (Abb. 9).

Der PRODREG Untersuchungsdatensatz deckte die ganze Schweiz ab (Abb. 9). Die Schweiz wird dabei in die fünf Produktionsregionen Jura, Mittelland, Voralpen, Alpen und Alpensüdseite eingeteilt (Brändli 2010¹³).

Die Höhenstufen des LFI ist eine Höheneinteilung in drei Klassen, Kollin (≤ 600 m ü. M.), Montan ($> 600 - \leq 1'200$ m ü. M.) und Subalpin ($> 1'200$ m ü. M.). Die Höheneinteilung wurde auf die jeweiligen Stichproben mit Höheninformation angewendet.

Verwendet wurden der PRODREG Datensatz und die Höhenstufen zur Stratifizierung der Auswertungen.



Abb. 9 Räumliche Abdeckung der LFI Produktionsregionen (Massstab 1:3 Mio)

¹³Brändli, U.-B. (Red.) 2010. Schweizerisches Landesforstinventar. Ergebnisse der dritten Erhebung 2004-2006. Birmensdorf, Eidgenössische Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft WSL. Bern, Bundesamt für Umwelt, BAFU.

4.2.5 Digitales Gelände- und Oberflächenmodell

Das digitale Terrainmodell (DTM) und digitale Oberflächenmodell (DOM) sind zwei Rasterdatensätze des Bundesamtes für Landestopografie (Quelle: Bundesamt für Landestopografie swisstopo), welche die Höhe über Meer des Geländes (DTM) und der Objekte (DOM) innerhalb des Areals Schweiz bis ca. 2'000 m.ü.M. im regelmässigen Raster von 2 m erfassen.

Der DTM und der DOM Untersuchungsdatensatz deckten ein rechteckiges Gebiet von 831 km² Fläche nördlich von Zürich ab (Abb. 10). Dieses Untersuchungsgebiet war gegeben durch die Verfügbarkeit der Referenzdaten, d.h. TLM (Kapitel 4.2.6). Jede Rasterzelle beinhaltet die jeweilige Höhe über Meer.

Verwendet wurden das DTM und DOM von swisstopo für die flächige Quantifizierung der Baummerkmale.

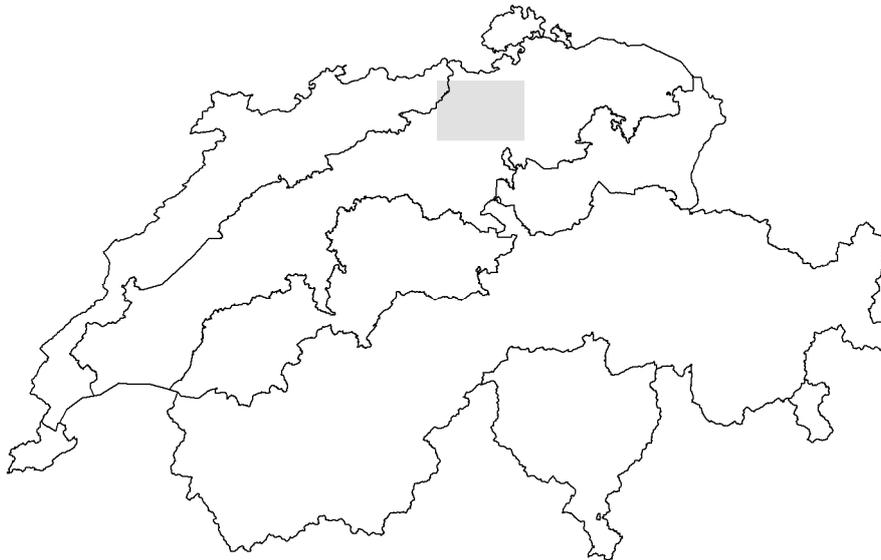


Abb. 10 Räumliche Verteilung des Laserscanning DTM und DOM (graue Fläche) mit LFI Produktionsregionen (schwarze Perimeterlinien) als räumliche Referenz (Massstab 1:3 Mio)

4.2.6 Topografisches Landschaftsmodell

Das topografische Landschaftsmodell (TLM) besteht aus Vektordatensätzen des Bundesamtes für Landestopografie (Quelle: Bundesamt für Landestopografie swisstopo), welche die Landschaft als georeferenziertes Modell erfassen. Das TLM löst die Vektordatensätze des VECTOR25 ab, welche auf der Landeskarte im Massstab 1:25'000 basieren.

Der TLM Untersuchungsdatensatz deckt ein rechteckiges Gebiet von 831 km² Fläche nordöstlich von Zürich ab (Abb. 11). Das TLM ist noch im Aufbau. Das TLM beinhaltet eine Vielzahl an Landschaftsgeodatensätzen, von welchen wir diejenigen zu Bauten einbezogen.

Verwendet wurde das TLM für die flächige Extraktion von Bauten aus dem digitalen Höhenmodell.

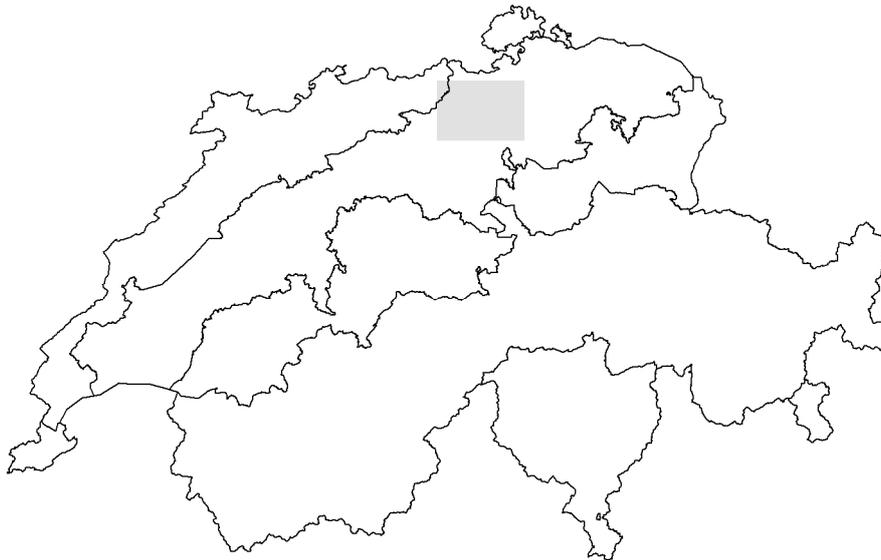


Abb. 11 Räumliche Verteilung des TLM (graue Fläche) mit LFI Produktionsregionen (schwarze Perimeterlinien) als räumliche Referenz (Massstab 1:3 Mio)

4.3 Analysen

4.3.1 Erhöhen der Repräsentativität

Die Rohdaten zur Untersuchung einer Erhöhung der Stichproberepräsentativität bestanden aus den AREA Stichproben, den LFI Luftbildstichproben und den LFI Produktionsregionen. Die AREA Stichproben und LFI Produktionsregionen dienen zur Stratifizierung analog der Berichterstattung im Treibhausgasinventar. Eine Stratifizierung nach organischen und mineralischen Böden wie im THGI ist aufgrund der betroffenen Stichprobengrösse nicht einbezogen worden. Die LFI Stichproben beinhalten die Baumdeckungsgrade im Wald- und im Nichtwaldareal. Im Vergleich zur bisherigen Methode waren also die Baumdeckungsgrade neu für einen Grossteil der Schweiz (nach Abschluss Datenerhebung AREA85 - AREA09 die ganze Schweiz) und nicht nur für den Kanton Genf verfügbar. Im Unterschied zur bisherigen Methode wurden die Baumdeckungsgrade in diesem Untersuchungsschritt nicht über Laserscanning sondern über vorhandene Luftbilddauswertungen aus dem LFI3 erfasst.

Das Untersuchungsgebiet basierte auf der räumlichen Schnittmenge (siehe Abb. 6) zwischen AREA (2'210'713 Stichproben im 100 m Netz) und LFI3 Luftbild (165'153 Stichproben im 500 m Netz). Die resultierende Schnittmenge der beiden Netze umfasste damit 88'398 Stichproben und deckte den westlichen Teil der Schweiz im regelmässigen 500 m Netz ab (Abb. 12). 549 Stichproben des LFI Luftbild waren von den LFI-Datenproduzenten als nicht interpretierbar deklariert worden und wurden aufgrund ihrer räumlich zufälligen Verteilung nicht in die Untersuchung einbezogen. Die Auswertungen beziehen sich daher auf das gemeinsam interpretierte und verfügbare Netz mit einer Stichprobepopulation von 87'849 Stichproben.

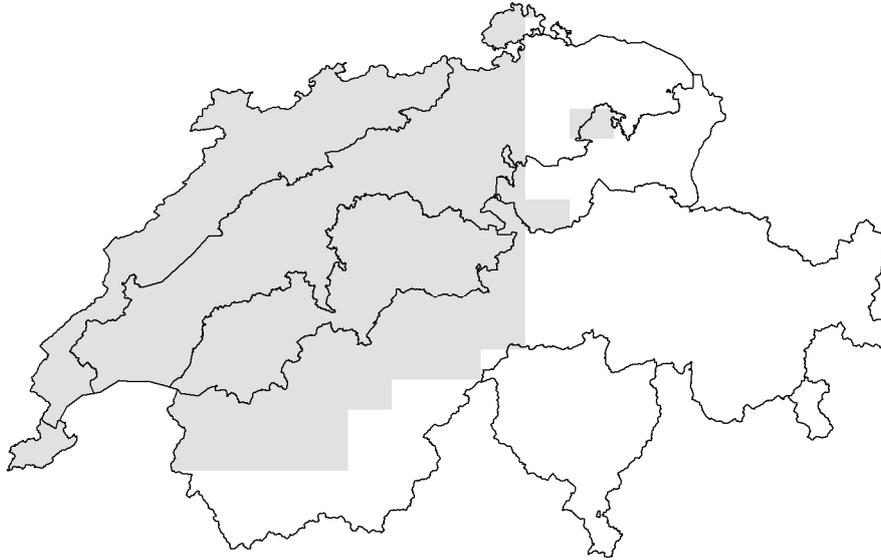


Abb. 12 Räumliche Abdeckung der Untersuchungsstichproben als Schnittmenge von AREA und LFI (graue Fläche) innerhalb LFI Produktionsregionen (Massstab 1:3 Mio)

Die relativen Fehler der Anteilsschätzungen von AREA Klassen am Untersuchungsgebiet wurden nach BFS (1992¹⁴) berechnet (Formel 1). Die Anteilsschätzungen der LFI Bodenbedeckungen an den AREA und Kyoto Klassen wurden nach der Klumpenstichprobe (*clustered sampling design*; Cochran 1977¹⁵) durchgeführt. Denn jede LFI Luftbildstichprobe bestand aus 25 regelmässigen geklumpten Rasterpunkten, wobei in diesem Fall die Rasterpunkte und nicht LFI Luftstichproben ausgewertet wurden.

Formel 1 Relatives Vertrauensintervall (p=95%)

$$rel.Fehler_{p=95\%} \% = 1.96 / \sqrt{n} * 100$$

n = Anzahl Stichproben
p = Konfidenzintervall

¹⁴Bundesamt für Statistik, 1992. Arealstatistik 1979/85. Resultate nach Gemeinden. Bern.

¹⁵Cochran, W.G., 1977. Sampling Techniques. J. Wiley & Sons, New York.

Die Baumbiomasseschätzung basiert auf der Korrelation mit dem Baumdeckungsgrad und stammt aus den Vorgaben des Good Practice Guidance⁸ (Appendix 3a.4). Dieser methodische Ansatz ist so bereits im aktuellen Treibhausgasinventar angewendet worden (nur für den Kanton Genf). Dementsprechend kann der Biomassezuwachs über den Baumdeckungsgrad und eine Zuwachsrate geschätzt werden (Formel 2). Die Baumbiomasse lässt sich anschliessend aus dem Zuwachs über zwanzig Jahre ableiten, was auch eine im aktuellen Treibhausgasinventar umgesetzte Annahme aus dem Good Practice Guidance⁸ ist.

Formel 2 Jährlicher Biomassezuwachs nach Good Practice Guidance⁸ (Tier 1a)

$$\Delta B_z = (DG_{\text{Baumkrone}} * CRW)$$

ΔB_z = jährlicher Baumbiomassezuwachs [$tC \cdot \text{Jahr}^{-1}$]

$DG_{\text{Baumkrone}}$ = gesamter Baumkronendeckungsgrad [ha]

CRW = deckungsgradbasierte Zuwachsrate [$tC \cdot (\text{ha}_{\text{Kronendeckungsgrad}})^{-1} \cdot \text{Jahr}^{-1}$]

$2.9 tC \cdot (\text{ha}_{\text{Kronendeckungsgrad}})^{-1} \cdot \text{Jahr}^{-1}$ nach Nowak, Crane 2002⁵

Ausgewiesenen Werte wurden auf die entsprechende Nachkommazahl gerundet. Sehr kleine Werte, die gerundet 0 ergeben, wurden aus Konsistenzgründen so belassen.

Die untersuchten Schlussprodukte gemäss Abb. 3 waren ein stichprobenebasierte, schweizweite Baumdeckungsgradschätzung und damit eine stichprobenebasierte, schweizweite Baumbiomasseschätzung.

4.3.2 Flächendeckende Kartierung

Die Rohdaten zur Untersuchung einer flächendeckenden Kartierung bestanden aus dem DTM (Abb. 13), DOM (Abb. 14) und TLM, sowie den LFI Produktionsregionen. Aus der Differenz zwischen DOM und DTM wurde das digitale Höhenmodell DHM (Abb. 15) abgeleitet. Die Produktionsregionen und Geländehöhen dienten zur Stratifizierung der Resultate, die übrigen Datensätze zur Erfassung des Baumdeckungsgrades. Im Vergleich zur bisherigen Methode waren die Baumdeckungsgrade neu basierend auf einem zukünftig schweizweiten Datensatz und nicht nur für den Kanton Genf verfügbar. Im Unterschied zur bisherigen Methode wurde die Baumextraktion aus dem DHM nicht mit einem kantonalen Gebäudekataster, sondern mit dem zukünftig schweizweit zur Verfügung stehenden TLM durchgeführt.



Abb. 13 Schattierter Ausschnitt Zürich Nord aus dem digitalen Terrainmodell (Massstab 1:50'000, reproduziert mit Bewilligung von swisstopo JA100001)



Abb. 14 Schattierter Ausschnitt Zürich Nord, wie Abb. 13, aus dem digitalen Oberflächenmodell (Massstab 1:50'000, reproduziert mit Bewilligung von swisstopo JA100001)



Abb. 15 Schattierter Ausschnitt Zürich Nord, wie Abb. 13 und Abb. 14, aus dem digitalen Höhenmodell als Differenz zwischen digitalen Oberflächen- und Terrainmodell (Massstab 1:50'000, reproduziert mit Bewilligung von swisstopo JA100001)

Das Untersuchungsgebiet ist definiert durch die Verfügbarkeit der TLM Daten und deckte eine Fläche von 831 km² nordöstlich von Zürich ab (Abb. 11).

Die Auswertungen umfassten zuerst die Erstellung des digitalen Höhenmodells DHM als Differenz von DOM und DTM. Anschliessend wurden alle potenziellen Baumrasterkandidaten mit einem Höhenunterschied von DHM \geq 3 m ausmaskiert. Dies entspricht der Mindesthöhe für Bäume gemäss der Baumdefinition des LFI3 (Ginzler 2005¹⁰). Der resultierende Datensatz enthielt also nur noch Bäume und Bauten.

Die Extraktion von Bauten aus dem klassierten DHM wurde untersucht mit den Polygondatensätzen aus dem Topic Bauten des TLM mit einem Puffer 0 m, 3 m und 6 m. Diese Pufferdistanzen entsprechen der gerundeten Distanz keiner, einer und zweier 2 m Rasterzellen. Ziel des Puffers war Ungenauigkeiten im Gebäuderandbereich zu umgehen. Das Resultat dieser Extraktion von Bauten war ein 2 m Raster klassiert nach Baum und Nichtbaum. Aus diesem 2 m Baumraster wurden dann der Baumanteil, respektive Baumhöhen und -verteilungen im 50 m Raster aggregiert.

Evaluiert wurde die Erfassungsmethode mit den Stichproben des LFI3 Luftbild, welche eine quadratische Interpretationsfläche von 50 m Seitenlänge aufweisen. Aus diesem Grund wurde der Baumdeckungsgrad auch als Flächenanteil der Baumvegetation am 50 m x 50 m Raster untersucht, um Flächenkongruenz mit der LFI3 Interpretationsfläche zu erhalten.

Die untersuchten Schlussprodukte gemäss Abb. 3 waren eine flächige, schweizweite Baumdeckungsgradschätzung und damit eine flächige, schweizweite Baumbiomasseerfassung. Die Methode zur Baumbiomasseschätzung entspricht der Methode basierend auf den LFI3 Luftbildstichproben (Kapitel 4.3.1). Hingegen stammt der Baumdeckungsgrad nun nicht mehr aus einer Stichprobenschätzung, sondern einer flächigen Erfassung über Laserscanning.

4.3.3 Spezifische Biomasseschätzung

Die Biomasseschätzung auf Grund des Baumdeckungsgrades wurde im bisherigen THGI mit einem Standardschätzer aus den IPCC Guidelines (IPCC 2003⁸) durchgeführt. Aus Daten des Schweizerischen Landesforstinventars wurden nun Modelle kalibriert, welche mittels Regressionsfunktionen spezifische Schätzer für Schweizer Verhältnisse im Wald herleiteten und im Nichtwaldareal anwendeten. Diese Modelle leiten Biomasse als Regressionsfunktionen von Baumvariablen im Wald her, welche für die übrige ganze Schweiz flächendeckend verfügbar sind.

Biomasseschätzung im Wald aus BHD

Die gesamte Biomasse lebender Bäume setzt sich aus den Baumteilen «Wurzeln, Schaftholz, Astderbholz, Reisig, und Nadeln/Blätter» zusammen. Da sich diese Baumteile nicht an jedem einzelnen Baum messen lassen, werden sie mittels allometrischer Funktionen aus dem bei allen Bäumen gemessenen Brusthöhendurchmessers (BHD) für den Einzelbaum geschätzt. Für Schaftholz, Astderbholz und Reisig werden Formeln von Kaufmann (2001¹⁶) verwendet. Die aus diesen Funktionen resultierenden Baumvolumen werden durch Multiplikation mit spezifischen Baumdichten in «Masse» umgerechnet (Assmann 1961¹⁷). Für Nadeln und Blätter werden Formeln von Perruchoud et al. (1999¹⁸) verwendet. Für Wurzeln werden Formeln von Wirth et al. (2004¹⁹) verwendet für Nadelholz und Wutzler et al. (2008²⁰) für Laubholz. Diese Funktionen liefern direkt die Biomasse. Obwohl mittels neuester Literatur berechnet, weisen die Wurzeln auf Grund der geringen Datengrundlage die grössten Unsicherheiten auf. Da Biomasse zu ungefähr 50% aus Kohlenstoff besteht, lässt sie sich direkt in Kohlenstoff umrechnen (IPCC 2003⁸). Kohlenstoff multipliziert mit 3.67 ergibt dann CO₂. Dieser Umrechnungsfaktor ergibt sich aus dem Verhältnis zwischen den molekularen Massen von Kohlenstoff und CO₂ (3.667).

¹⁶Kaufmann, E., 2001. Estimation of standing timber, growth and cut. In: P. Brassel and H. Lischke (Editor), Swiss National Forest Inventory: Methods and Models of the Second Assessment. Swiss Federal Research Institute WSL, Birmensdorf, S. 162-196.

¹⁷Assmann, E., 1961. Waldertragskunde - Organische Produktion, Struktur, Zuwachs und Ertrag von Waldbeständen. BLV Verlagsgesellschaft, München Bonn Wien.

¹⁸Perruchoud, D., Kienast, F., Kaufmann, E. and Bräker, O.U., 1999. 20th century carbon budget of forest soils in the Alps. *Ecosystems*, 2: 320-337.

¹⁹Wirth, C., Schumacher, J. and Schulze, E.-D., 2004. Generic biomass functions for Norway spruce in Central Europe - a meta-analysis approach toward prediction and uncertainty estimation. *Tree Physiology*, 24: 121-139.

²⁰Wutzler, T., Wirth, C. and Schumacher, J., 2008. Generic biomass functions for Common beech (*Fagus sylvatica*) in Central Europe: predictions and components of uncertainty. *Can. J. For. Res.*, 38: 1661-1675.

Schweizweit verfügbare Baumvariablen

Alle erklärenden Grössen, welche in den Regressionsmodellen zur Schätzung der Biomasse verwendet wurden, sind Tab. 1 aufgelistet.

Tab. 1 Zielgrösse Biomasse und alle erklärende Grössen (grau hinterlegt), welche in die Erstellung der multiplen Regressionsmodelle einfließen

Variable	Beschreibung	Herkunft
CLNR	Identifikationsnummer	Schlüsselvariable
BIOMASSE	Biomasse in $t\ ha^{-1}$ Nichtwald = nicht definiert Wald ≥ 0	Terrestrische Daten LF13
LBRASTERDG25	Erklärende Grösse, 0-100% Deckungsgrad des 25 Punkterasters unabhängig von der Waldbegrenzungslinie	Luftbildstichproben LF13
SUM_TREE_3M	Summe aller getroffenen Kronenhöhen der 25 Punkteraster aller Bäume $\geq 3\ m$ in m	Luftbildstichproben LF13
MEAN_TREEHEIGHT	Mittelwert der Kronenhöhen aller Bäume $\geq 3\ m$ in m	Luftbildstichproben LF13
STDV_TREEHEIGHT	Standardabweichung der mittleren Kronenhöhe aller Bäume $\geq 3\ m$	Luftbildstichproben LF13

Bei homogenen Beständen unterscheiden sich die beiden Grössen SUM_TREE_3M und MEAN_TREEHEIGHT nur durch den Faktor 25. Je heterogener die Bestände in der vertikalen Höhenverteilung, desto stärker unterscheiden sich jedoch die beiden Grössen.

Einschränkung der Waldbestände

Für die Bildung der Modelle ist entscheidend, welche Waldbestände in die Modellkalibration einfließen. Werden alle Bestände der Schweiz verwendet zur Kalibrierung eines Modells, ist die Heterogenität zu gross für ein aussagekräftiges Modell. Aus diesem Grund reduzierten wir die Waldstichproben auf Proben ohne Wald- oder Bestandesgrenzen und auf reine, gleichförmige Bestände.

Lagefehler

Terrestrische Stichproben können einen Lagefehler von bis 10 m aufweisen. Ein Waldrandpunkt kann damit auf dem Luftbild in einer baumlosen Landschaft liegen, auf der terrestrischen Probefläche aber im Extremfall einen 100 % Baumdeckungsgrad aufweisen. Damit erhöht sich die nicht erklärbare Streuung und die Modellgüte sinkt. Aus diesem Grund wurden alle terrestrischen Stichproben mit Waldgrenzen oder Bestandesgrenzen von den Analysen ausgeschlossen.

Reine, gleichförmige Bestände

Zudem wurden die Modelle separat gerechnet für Nadelholz und Laubholz. Die Modelle wurden aus so genannten gleichförmigen Reinbeständen berechnet. Das sind Bestände, bei denen über 90 % der Stammfläche auf der Höhe 1.3 m (= Basalfläche, berechnet aus BHD) entweder Nadelholz oder Laubholz ist und die im LFI3 als „gleichförmig“ eingestuft werden. Da über 1200 m. ü. M. nur noch wenige reine Laubbaumbestände zur Verfügung stehen, konnte für dieses Stratum nur ein Modell für Nadelbäume gerechnet werden.

Modellentwicklung

Zuerst wurden die erklärenden Grössen einzeln gegen die Zielgrösse aufgezeichnet, um die Abhängigkeiten aufzuzeigen und allfällig nötige Transformationen zur Linearisierung sichtbar zu machen. Als optische Hilfe wurde eine glättende Gerade, respektive Kurve in die Daten des Scatterplots gelegt. Dann wurde mit allen erklärenden Grössen aus Tab. 1 ein volles Modell zur Schätzung der Biomasse gerechnet. Es wurde ein additives Modell (Hollaus et al. 2009²¹) gewählt. Mittels des statistischen Verfahrens *Stepwise Backward Multiple Regression Analysis* wurde die Anzahl der erklärenden Grössen reduziert. Als Kriterium zur schrittweisen Ausscheidung der erklärenden Variablen wurde *Akaike's information criterion* (AIC) ausgewählt. Die Modelle wurden einerseits für verschiedene Höhenstufen separat gerechnet und andererseits als gemeinsames Modell für die ganze Schweiz. Stets getrennt gerechnet wurden die Nadel- und Laubholzbestände. Zum Testen der statistischen Voraussetzungen (*independent identical distribution*, iid) wurde eine visuelle Residuenanalyse gemacht. Für die einfachen Regressionen wurde zudem Vertrauensintervall und Vorhersageintervall berechnet und grafisch dargestellt.

Modell Auswahl

Zur Auswahl des geeignetsten Modells wurden folgende Kriterien ausgewählt.

- Einfachheit, Interpretierbarkeit: je kleiner die Zahl der erklärenden Grössen, desto einfacher ist die Interpretierbarkeit.
- R^2 : Je grösser, desto besser.
- Root mean square error RMSE, RMSE%: je kleiner, desto genauer ist das Modell.
- Q-Wert: Test, ob das Modell nicht überangepasst ist (Holmgren et al. 2003²²). Je näher die Zahl bei 1 ist, desto besser.

²¹Hollaus, M., Wagner, W., Schadauer, K., Maier, B. and Gabler, K., 2009. Growing stock estimation for alpine forests in Austria: a robust lidar-based approach. *Can. J. For. Res.*, 39: 1387-1400.

²²Holmgren, J., Nilsson, M. and Olsson, H., 2003. Estimation of tree height and stem volume on plots using airborne laser scanning. *Forest Science*, 49: 419-428.

Der quadratische mittlere Fehler (Root mean square error, RMSE) wird berechnet als:

Formel 3 Quadratischer mittlerer Fehler

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (E_i - O_i)^2}{n - 2}}$$

wobei E_i der geschätzte Wert ist, O_i der beobachtete Wert und n die Anzahl Stichproben. Der RMSE dient dabei nebst dem R^2 und dem AIC der Untersuchung der Modellgüte. Zur besseren Beurteilung der Grösse von RMSE wird er oft auch in % der mittleren Schätzgrösse angegeben.

Die Prognosefehler der Modelle wurden mittels *leave-one-out* Kreuzvalidation ermittelt. Dabei wurde der Reihe nach immer ein Stichprobenpunkt ausgelassen. Mit den übrigen Punkten wurde das jeweilige Modell kalibriert. Die kalibrierten Parameter wurden dann benutzt, um die Biomasse für den ausgelassenen Punkt zu schätzen. Diese Schätzung wurde mit dem gemessenen Wert der Biomasse aus dem LFI verglichen (Differenz). Dieses Verfahren wurde für alle Punkte wiederholt und der Mittelwert aller quadrierten Differenzen berechnet (Formel 4).

Formel 4 Schätzer für Prognosefehler

$$PE_{cv}^{\wedge} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - y_i^{\wedge -k(i)})^2$$

wobei PE_{cv}^{\wedge} der geschätzte Prognosefehler via Kreuzvalidierung ist, n die Anzahl

Beobachtungen, y_i die i -te gemessene Zielgrösse und $y_i^{\wedge -k(i)}$ die i -te geschätzte Zielgrösse aus dem Datensatz ohne Messwert i . Der so berechnete Prognosefehler ist stets grösser als der Schätzer der Residualvarianz (Formel 5).

Formel 5 Schätzer für Residualvarianz

$$\sigma^{\wedge 2} = \frac{1}{n - p} \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2$$

wobei p die Anzahl der erklärenden Variablen bezeichnet.

Ist der Prognosefehler viel grösser als die Residualvarianz, könnte das Modell überangepasst sein und somit die Anwendung auf unabhängige Datensätze eingeschränkt. Als Mass hierfür wurde der Q-Wert berechnet als Wurzel aus dem Quotient des Prognosefehlers und der Residualvarianz (Holmgren et al. 2003²²).

Modell Evaluation

Zur Evaluation wurden die Modelle mit unabhängigen gemessenen Daten aus einer Biomasse-Studie im Nichtwaldareal von Wyrsh und Camin verglichen (Wyrsh und Camin, unpublizierte Studie²³).

4.4 Werkzeuge

Die Datenhaltung und -prozessierung basierten auf Oracle und SQL Server 2008. Für räumliche Prozessierungen und Analysen verwendeten wir ESRI ArcGIS 9.3.1. Die statistischen Auswertungen und Darstellungen wurden in R 2.10.0 und R 2.11.0 durchgeführt.

²³Wyrsh, A. and Camin, P., *unpub.* Gehölze ausserhalb des Waldareals. Terrestrische Erfassung von Gehölzen ausserhalb des Waldareals zur Prüfung der Korrelation mit der Luftbildinterpretation.S. 42.

5 Resultate

5.1 Erhöhte Repräsentativität

Ziel dieses Untersuchungsschrittes war die Quantifizierung der Baumverteilung und der stratifizierten Baumbiomasse im Nichtwaldareal. Die Untersuchung basierte daher auf den Bodenbedeckungsanteilen aus den LFI3 Luftbildstichproben und Stratifizierungen über AREA Klassen und LFI Produktionsregionen.

Das Untersuchungsgebiet bestand zu 29.5 % aus Wald (Kyoto09 = 12) und 70.5 % aus Nichtwald (Tab. 2). Im Nichtwaldareal machten die landwirtschaftlichen Flächen wie Grassländer mit 23.5 % (Kyoto09 = 31) und Ackerländer mit 15.5 % (Kyoto09 = 21) den grössten Anteil aus. Alle übrigen Nichtwaldklassen hatten einen Anteil am Untersuchungsgebiet von unter 10 %.

Veränderungen in den Klassenanteilen über die drei AREA Inventurenperioden waren erheblich im bewirtschafteten Wald (Kyoto09 = 12), im Gebüsch (Kyoto09 = 34) und Gebäudeareal (Kyoto09 = 51).

Tab. 2 Verteilung AREA Kyoto Klassen innerhalb Untersuchungsgebiet nach Inventur

Kyoto Nummer	Kyoto Klasse	Kyoto Inventur	Stichproben Anzahl	Anteil %	Rel. Stichprobefehler %
11	Afforestations	1985	128	0.1	17.3
11	Afforestations	1997	92	0.1	20.4
11	Afforestations	2009	23	0	40.9
12	Managed forest	1985	25485	29	1.2
12	Managed forest	1997	25777	29.3	1.2
12	Managed forest	2009	25902	29.5	1.2
13	Unproductive forest	1985	995	1.1	6.2
13	Unproductive forest	1997	1088	1.2	5.9
13	Unproductive forest	2009	1145	1.3	5.8
21	Cropland	1985	14549	16.6	1.6
21	Cropland	1997	14268	16.2	1.6
21	Cropland	2009	13610	15.5	1.7
31	Permanent grassland	1985	20803	23.7	1.4
31	Permanent grassland	1997	20380	23.2	1.4
31	Permanent grassland	2009	20655	23.5	1.4
32	Shrub vegetation	1985	1404	1.6	5.2
32	Shrub vegetation	1997	1352	1.5	5.3
32	Shrub vegetation	2009	1316	1.5	5.4
33	Vineyards, low-stem orchards, tree nurseries	1985	741	0.8	7.2
33	Vineyards, low-stem orchards, tree nurseries	1997	787	0.9	7

33	Vineyards, low-stem orchards, tree nurseries	2009	750	0.9	7.2
34	Copse	1985	2721	3.1	3.8
34	Copse	1997	2325	2.6	4.1
34	Copse	2009	1971	2.2	4.4
35	Orchards	1985	54	0.1	26.7
35	Orchards	1997	28	0	37
35	Orchards	2009	21	0	42.8
36	Stony grassland	1985	1427	1.6	5.2
36	Stony grassland	1997	1373	1.6	5.3
36	Stony grassland	2009	1378	1.6	5.3
37	Unproductive grassland	1985	788	0.9	7
37	Unproductive grassland	1997	776	0.9	7
37	Unproductive grassland	2009	764	0.9	7.1
41	Surface waters	1985	4162	4.7	3
41	Surface waters	1997	4153	4.7	3
41	Surface waters	2009	4166	4.7	3
42	Unproductive wetland	1985	596	0.7	8
42	Unproductive wetland	1997	602	0.7	8
42	Unproductive wetland	2009	600	0.7	8
51	Buildings and construction	1985	4415	5	2.9
51	Buildings and construction	1997	5034	5.7	2.8
51	Buildings and construction	2009	5544	6.3	2.6
52	Herbaceous biomass in settlements	1985	1868	2.1	4.5
52	Herbaceous biomass in settlements	1997	2002	2.3	4.4
52	Herbaceous biomass in settlements	2009	2286	2.6	4.1
53	Shrubs in settlements	1985	75	0.1	22.6
53	Shrubs in settlements	1997	87	0.1	21
53	Shrubs in settlements	2009	95	0.1	20.1
54	Trees in settlements	1985	558	0.6	8.3
54	Trees in settlements	1997	707	0.8	7.4
54	Trees in settlements	2009	640	0.7	7.7
61	Other land	1985	7080	8.1	2.3
61	Other land	1997	7018	8	2.3
61	Other land	2009	6983	7.9	2.3

Baumvegetation befand sich gemäss Kyoto09 auf 30.9 % des Untersuchungsgebietes. Nach der Kraut- und Grasvegetation mit 48.2 % ist Baumvegetation damit die zweithäufigste Bodenbedeckung im Untersuchungsgebiet. Den höchsten Anteil an Baumvegetation hatte definitionsgemäss der Wald mit 83.6 % der Fläche (Kyoto09 = 12). Immerhin 7 der 16 Kyotoklassen hatten einen Baumanteil von über 25 % (Tab. 3).

Tab. 3 Verteilung der LFI3 Bodenbedeckungsanteile auf die AREA09 Kyoto Klassen

Kyoto09 Nummer	Kyoto09 Klasse	Bäume Anteil %	Kl. Bäume Anteil %	Kraut-, Grasvegetation Anteil %	Fels Anteil %	Sand, Gestein, Offenerde Anteil %	Befestigte Flächen Anteil %	Bauobjekte Anteil %	Gewässer Anteil %	Gletscher, Firn Anteil %	Bodenbedeckung Summe %
11	Afforestations	37.6	9.4	40	0	6.1	7	0	0	0	100
12	Managed forest	83.6	2	12.7	0.2	0.7	0.7	0	0.1	0	100
13	Unproductive forest	45	9.6	41.4	0.7	2.7	0.5	0	0.1	0	100
21	Cropland	2.5	0.3	94.6	0	0.1	2.1	0.3	0	0	100
31	Permanent grassland	9.1	0.7	86.3	0.1	1	2.1	0.7	0.1	0	100
32	Shrub vegetation	15.4	6.3	66.6	2.3	7.9	0.8	0.1	0.5	0.1	100
33	Vineyards, low-stem orchards, tree nurseries	12.7	45.9	30	0.1	4.9	5.3	1.1	0	0	100
34	Copse	32.1	3	56.7	0.6	1.8	3.2	1.8	0.9	0	100
35	Orchards	29.7	6.5	62.7	0	0	1.1	0	0	0	100
36	Stony grassland	2.6	1.2	54.3	13.3	27.7	0.3	0.1	0.2	0.3	100
37	Unproductive grassland	6.8	1.7	70.9	5.8	12.3	1.4	0.4	0.8	0	100
41	Surface waters	2.6	0.3	2.2	0.1	0.8	0.4	0.1	93.5	0.1	100
42	Unproductive wetland	11.2	1.3	84	0	1.1	0.8	0.1	1.4	0	100
51	Buildings and construction	15.1	2.8	34.5	0.1	2.5	26.8	18	0.3	0	100
52	Herbaceous biomass in settlements	16.4	3.7	47.1	0	1.3	18	13.2	0.3	0	100
53	Shrubs in settlements	26.6	6.4	38.4	0.1	8.5	16.5	2.3	1.2	0	100
54	Trees in settlements	35.7	4.4	31.8	0	0.6	15.2	11.7	0.6	0	100
61	Other land	1.7	0.5	9.1	26	37.3	0.1	0	0.2	25.1	100

Die AREA Kyoto Klassen sind eine spezifisch für das Treibhausgasinventar generierte Kombination aus AREA Bodenbedeckung (Land Cover, LC) und AREA Landnutzung (Land Use, LU). Die Kyoto Kategorien enthalten damit Aspekte der Bodenbedeckung und der Landnutzung. Um die Verteilung der Baum- und Bodenbedeckungsanteile des LFI3, und damit auch Baumbiomasse, spezifischer untersuchen zu können, werteten wir auch die Bodenbedeckungsverteilung bezüglich der AREA Landnutzung (Tab. 4) und der AREA Bodenbedeckung (Tab. 5) aus.

Tab. 4 Verteilung der LFI3 Bodenbedeckungsanteile auf die AREA09 Land Use Klassen

LU09 Nummer	LU09 Klasse	Bäume Anteil %	Kl. Bäume Anteil %	Kraut-, Grasvegetation Anteil %	Fels Anteil %	Sand, Gestein, Offenerde Anteil %	Befestigte Flächen Anteil %	Bauobjekte Anteil %	Gewässer Anteil %	Gletscher, Firn Anteil %	Bodenbedeckung Summe %
101	Industrie- und Gewerbeareal > 1 ha	6.4	1.4	16.2	0	3.3	38.4	34.1	0.1	0	100
102	Industrie- und Gewerbeareal < 1 ha	11.9	2.3	21.8	0	1.2	34.2	27.8	0.8	0	100
103	Ein- und Zweifamilienhausareal	21.1	5	39.1	0	0.6	16.9	16.9	0.3	0	100
104	Reihen- und Terrassenhausareal	16.9	5.2	32.7	0	0.5	20.2	24	0.5	0	100
105	Mehrfamilienhausareal	17.9	3.7	30.6	0	0.4	22.8	24.4	0.2	0	100
106	Öffentliches Gebäudeareal	17.4	2.6	24.8	0	0.5	27.6	26.8	0.3	0	100
107	Landwirtschaftliches Gebäudeareal	11.2	1.9	44.9	0	1.1	18.2	22.5	0.1	0	100
108	Nicht spezifiziertes Gebäudeareal	15.9	3.4	23.2	0.1	0.6	28.4	28.2	0.2	0	100
121	Autobahnareal	18.8	3.2	25.8	0	0.8	49.3	1.9	0.2	0	100
122	Strassenareal	20.1	2.9	46.2	0.1	0.9	22.6	6.9	0.4	0	100
123	Parkplatzareal	14.6	2.6	21.4	0	1.5	46.5	13.2	0.2	0	100
124	Bahnareal	14.7	3.3	34.2	0.1	1.1	40.4	5.9	0.3	0	100
125	Flugplatzareal	0.7	0	56.8	0	3.1	33.9	5.5	0	0	100
141	Energieversorgungsanlagen	13.2	2.8	29.9	0.4	1.7	29.3	20.7	2	0	100
142	Abwasserreinigungsanlagen	23.2	1.3	20	0.3	1.3	36.8	13.3	3.7	0	100
143	Übrige Ver- und Entsorgungsanlagen	21.6	1.7	39.1	0	6.1	24.1	7.4	0	0	100
144	Deponien	15.1	3.5	42.7	0.2	29.8	8.2	0.2	0.3	0	100
145	Abbau	19.6	3.4	21.8	0.5	44.9	7.9	1.2	0.5	0	100
146	Baustellen	9.6	1.9	57.9	0	7	15.3	8.3	0	0	100
147	Bau- und Siedlungsbrachen	13.9	2.6	49.9	0.2	7	16.8	9.4	0.2	0	100
161	Öffentliche Parkanlagen	32	2.5	37.6	0	0.7	17	6.6	3.7	0	100
162	Sportanlagen	13	1.4	57.9	0	2.2	17.7	7.4	0.4	0	100
163	Golfplätze	11.1	0.6	81.2	0	1.9	3.2	0.4	1.6	0	100
164	Campingplätze	30.2	2.8	35.2	0	0.5	16.9	13.8	0.6	0	100
165	Schrebergärten	13.5	6.9	61.6	0	0.5	9.8	7.5	0.2	0	100
166	Friedhöfe	29.5	4.3	34.3	0	1	25.7	5.2	0	0	100
201	Obstbau	18.3	8.5	64.6	0	0.6	4.7	3.3	0	0	100
202	Rebbau	10.5	57.2	18.8	0.1	6.5	5.8	1	0	0	100
203	Gartenbau	13.2	7.1	46.6	0	2.1	11.2	19.8	0	0	100
221	Ackerland i.w.S.	2.6	0.3	94.6	0	0.1	2.1	0.2	0	0	100
222	Naturwiesen i.w.S.	9.8	0.7	85.7	0	0.2	2.7	0.8	0.1	0	100
223	Heimweiden i.w.S.	13.5	1	81.2	0	0.3	2.7	1.1	0.1	0	100
241	Alpwiesen i.w.S.	13.8	0.9	82.9	0	0.6	1.1	0.8	0	0	100
242	Alp- und Juraweiden i.w.S.	11.9	1	82.9	0.3	2.8	0.9	0.1	0.1	0.1	100
243	Schafalpen i.w.S.	4.2	0.8	83.9	2.6	8.2	0.1	0	0	0.1	100
301	Waldbestände	85.4	2.2	10.7	0.2	0.7	0.6	0	0.1	0	100
302	Aufforstungen	37.6	9.4	40	0	6.1	7	0	0	0	100

303	Holzschläge	72.3	4.4	20.6	0	1.1	1.4	0	0.2	0	100
304	Waldschadenflächen	58.4	3.4	34.9	0.2	2.1	0.9	0	0	0	100
401	Seen	0.6	0.1	1.2	0	0.2	0.1	0.1	97.7	0.1	100
402	Flüsse, Bäche	27.9	2.8	28.8	0.9	7.5	4	1	27.2	0	100
403	Hochwasserverbauungen	42	4.6	25.5	0.1	10.6	6.5	0.7	10	0	100
421	Keine Nutzung	4.2	1.3	23.5	21.2	31.5	0.2	0	0.1	18	100
422	Lawinen- und Steinschlagverbauungen	13.7	3.7	57.2	3.3	15.7	0.8	5.7	0	0	100
423	Alpine Sportinfrastruktur	12.8	0.4	47.8	1.9	28.6	5.5	0.2	0	2.7	100
424	Landschaftseingriffe	13.7	2.3	72.6	0	6.9	4.4	0.2	0	0	100

Tab. 5 Verteilung der LFI3 Bodenbedeckungsanteile auf die AREA09 Land Cover Klassen

LC09 Nummer	LC09 Klasse	Bäume Anteil %	Kl. Bäume Anteil %	Kraut-, Grasvegetation Anteil %	Fels Anteil %	Sand, Gestein, Offenerde Anteil %	Befestigte Flächen Anteil %	Bauobjekte Anteil %	Gewässer Anteil %	Gletscher, Firn Anteil %	Bodenbedeckung Summe %
11	Befestigte Flächen	16	2.8	36.4	0.1	1.5	29.1	13.8	0.4	0	100
12	Gebäude	12.9	2.9	28.1	0	0.7	23.2	32	0.2	0	100
13	Treibhäuser	4.8	2.5	27.3	0	0.4	12.8	52.1	0	0	100
14	Beetstrukturen	13.2	4.6	49.7	0	0.5	16.5	15.3	0.2	0	100
15	Rasen	16	3.7	47.1	0	0.8	16.9	15.2	0.3	0	100
16	Bäume auf künstlich angelegten Flächen	33	4.9	31	0	0.3	15.1	15.2	0.6	0	100
17	Gemischte Kleinstrukturen	20.4	5.1	35.3	0	0.5	19.4	19.1	0.1	0	100
21	Gras-, Krautvegetation	6.7	0.6	88.6	0.2	0.9	2.3	0.5	0.1	0	100
31	Gebüsch	44.4	6.1	42.5	1.1	4	1.6	0.1	0.3	0	100
32	Verbuschte Flächen	20.5	4.7	63.9	1.5	7	1.6	0.3	0.4	0.1	100
33	Niederstammobst	17	24.2	51.9	0	1.5	4.3	1.1	0	0	100
34	Reben	10.3	57.6	18.7	0.1	6.5	5.8	1.1	0	0	100
35	Gärtnerische Dauerkulturen	24.3	12.6	55	0	2	5.2	0.9	0	0	100
41	Geschlossene Baumbestände	87.9	1.7	9	0.1	0.5	0.6	0	0.1	0	100
42	Waldecken	51.8	2.4	40.1	0.4	1.3	3.1	0.5	0.4	0	100
43	Waldstreifen	68.8	1.8	25.5	0.2	1.1	1.5	0.3	0.8	0	100
44	Aufgelöste Baumbestände	59.6	3.5	32.8	0.6	2.4	0.9	0	0.1	0	100
45	Gebüschwaldbestände	54.5	17.2	22.9	1.4	3.6	0.3	0	0.1	0	100
46	Lineare Baumbestände	41.2	2.6	47.8	0.1	1	4.6	1.1	1.7	0	100
47	Baumgruppen	34.3	3	55.7	0.5	1.9	2.7	1.8	0.2	0	100
51	Anstehender Fels	1.8	0.6	10.2	59.7	23.4	0.1	0	0.1	4.3	100
52	Lockergestein	4	0.9	17	6.3	67.4	1.2	0.3	0.5	2.5	100
53	Versteinte Flächen	4	1.3	53.7	12.7	27.1	0.6	0.2	0.2	0.2	100
61	Wasser	2.6	0.3	2.2	0.1	0.8	0.4	0.1	93.5	0.1	100
62	Gletscher, Firn	0	0	0.3	4.1	10.3	0	0	0.1	85.3	100
63	Nassstandorte	10.7	1.2	85.4	0	1.3	0.8	0.1	0.5	0	100
64	Schiffbestände	14.9	1.6	73.4	0	0.1	1	0.1	8.8	0	100

Die anteilmässige Verteilung der Baumvegetation auf die einzelnen Kyotoklassen ist einerseits stark geklumpt, indem sich 79.7 % der Baumvegetation im Waldareal (Kyoto₁₂) befinden (Tab. 6 und Abb. 16). Andererseits verteilen sich die übrigen 20.3 % der Baumvegetation über die meisten der übrigen Kyotoklassen.

Die Eigenschaften der Baumvegetation unterscheiden sich zwischen den Kyotoklassen. Die höchsten Baumdeckungsgrade fanden sich definitionsgemäss im Wald (Kyoto09 = 12) mit einem durchschnittlichen Deckungsgrad von 83.6 %. Geschlossener Baumvegetation findet sich aber auch in unproduktiven Wäldern (Kyoto09 = 13), Gebüsch (Kyoto09 = 34), Obstanlagen (Kyoto09 = 35) und Bäumen im Siedlungsgebiet (Kyoto09 = 54), alle mit einem durchschnittlichen Deckungsgrad von über 30 % (Aufforstungen haben zwar höheren Deckungsgrad, sind aber nur marginal verteilt).

Tab. 6 Anteil, Durchschnitt (AVG) und Standardabweichung (STD) des Baumdeckungsgrades an den Kyoto09 Klassen. Die Grundgesamtheit umfasst alle Stichproben mit Bäumen, also 30.9 % des Untersuchungsgebietes

Kyoto09 Nummer	Kyoto09 Klasse	Bäume Verteilung %	Bäume AVG Deckungsgrad %	Bäume STD Deckungsgrad %
11	Afforestations	0	37.6	22.6
12	Managed forest	79.7	83.6	20
13	Unproductive forest	1.9	45	25.1
21	Cropland	1.3	2.5	7.8
31	Permanent grassland	6.9	9.1	14.4
32	Shrub vegetation	0.7	15.4	18.9
33	Vineyards, low-stem orchards, tree nurseries	0.4	12.7	18.9
34	Copse	2.3	32.1	18.6
35	Orchards	0	29.7	17
36	Stony grassland	0.1	2.6	8.8
37	Unproductive grassland	0.2	6.8	14.5
41	Surface waters	0.4	2.6	10.6
42	Unproductive wetland	0.2	11.2	16.2
51	Buildings and construction	3.1	15.1	18.1
52	Herbaceous biomass in settlements	1.4	16.4	16.1
53	Shrubs in settlements	0.1	26.6	25.7
54	Trees in settlements	0.8	35.7	18.2
61	Other land	0.4	1.7	8.4

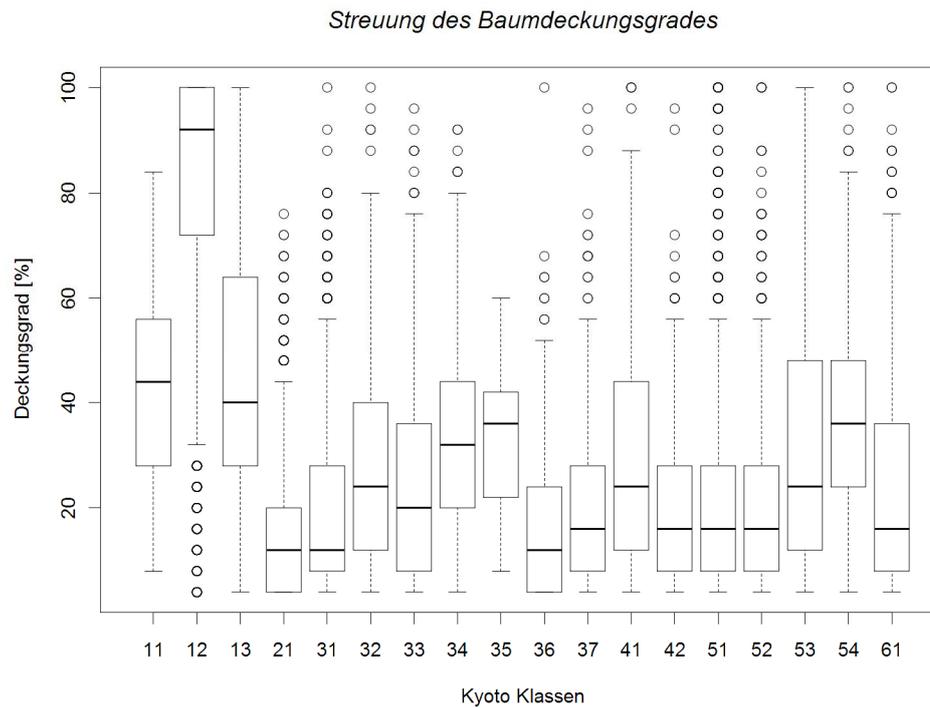


Abb. 16 Streuung des Baumdeckungsgrades nach Kyoto Klassen

Baumbiomasse kann nun abgeleitet werden, da durchschnittliche Baumdeckungsgrade für Kyoto Klassen (Tab. 6) und Strata des Treibhausgasinventars geschätzt werden können. Baumbiomasse ist deshalb einmal pro Kyotokategorie geschätzt worden (Tab. 7), um die Schätzungen mit den bisherigen Werten aus dem Treibhausgasinventar vergleichen zu können. Baumbiomasse ist aber auch pro Stratum des Treibhausgasinventars geschätzt worden (Tab. 8), um zukünftig stichprobenebasiert nach Kyotostrata quantifizieren zu können.

Tab. 7 Baumbiomasse nach Kyotoklasse gemäss Good Practice Guidance⁸ (Tier 1a)

Kyoto09 Nummer	Kyoto09 Klasse	Bäume AVG Deckungsgrad %	Fläche ha	CRW tC*ha ⁻¹ *jahr ⁻¹	Biomassenzuwachsrates tC*ha ⁻¹ *jahr ⁻¹	Biomasse tC*ha ⁻¹	Gesamtbiomasse tC
11	Afforestations	37.6	575	2.9	1.09	21.79	12527.99
12	Managed forest	83.6	647550	2.9	2.42	48.5	31404301
13	Unproductive forest	45	28625	2.9	1.3	26.08	746415.2
21	Cropland	2.5	340250	2.9	0.07	1.47	501690.46
31	Permanent grassland	9.1	516375	2.9	0.26	5.25	2711830.06
32	Shrub vegetation	15.4	32900	2.9	0.45	8.95	294440.98
33	Vineyards, low-stem orchards, tree nurseries	12.7	18750	2.9	0.37	7.36	137923.28
34	Copse	32.1	49275	2.9	0.93	18.6	916398.81
35	Orchards	29.7	525	2.9	0.86	17.23	9047.97
36	Stony grassland	2.6	34450	2.9	0.08	1.52	52372.2
37	Unproductive grassland	6.8	19100	2.9	0.2	3.92	74819.7
41	Surface waters	2.6	104150	2.9	0.07	1.5	156152.1
42	Unproductive wetland	11.2	15000	2.9	0.33	6.5	97555.71
51	Buildings and construction	15.1	138600	2.9	0.44	8.74	1211672.25
52	Herbaceous biomass in settlements	16.4	57150	2.9	0.48	9.54	545254.89
53	Shrubs in settlements	26.6	2375	2.9	0.77	15.43	36655.96
54	Trees in settlements	35.7	16000	2.9	1.04	20.72	331469.54
61	Other land	1.7	174575	2.9	0.05	0.98	171776.56

Tab. 8 Baumbiomasse nach Kyotoklasse, LFI Höhenstufe, LFI Produktionsregion gemäss Good Practice Guidance⁶ (Tier 1a)

Produktionsregion Klasse	Höhe Klasse	Kyoto09 Nummer	Kyoto09 Klasse	Bäume AVG Deckungsgrad %	Fläche ha	CRW tC*ha ⁻¹ *jahr ⁻¹	Biomassenzuwachsrate tC*ha ⁻¹ *jahr ⁻¹	Biomasse tC*ha ⁻¹	Gesamtbiomasse tC
Alps	Kollin	11	Afforestations	24	25	2.9	0.7	13.92	348
Alps	Kollin	12	Managed forest	84.6	4925	2.9	2.45	49.07	241685.89
Alps	Kollin	21	Cropland	1.7	6300	2.9	0.05	1.01	6379.88
Alps	Kollin	31	Permanent grassland	9.3	5050	2.9	0.27	5.38	27143.92
Alps	Kollin	32	Shrub vegetation	25.7	350	2.9	0.75	14.91	5219.98
Alps	Kollin	33	Vineyards, low-stem orchards, tree nurseries	10.6	4625	2.9	0.31	6.12	28303.86
Alps	Kollin	34	Copse	35.7	875	2.9	1.03	20.68	18095.98
Alps	Kollin	35	Orchards	10	50	2.9	0.29	5.8	290
Alps	Kollin	36	Stony grassland	8	50	2.9	0.23	4.64	232
Alps	Kollin	37	Unproductive grassland	11.6	225	2.9	0.34	6.7	1507.99
Alps	Kollin	41	Surface waters	2	10250	2.9	0.06	1.15	11773.48
Alps	Kollin	42	Unproductive wetland	24.8	375	2.9	0.72	14.38	5394
Alps	Kollin	51	Buildings and construction	13.2	6300	2.9	0.38	7.65	48197.72
Alps	Kollin	52	Herbaceous biomass in settlements	11.7	1850	2.9	0.34	6.77	12527.92
Alps	Kollin	53	Shrubs in settlements	24.4	275	2.9	0.71	14.13	3885.99
Alps	Kollin	54	Trees in settlements	32.8	925	2.9	0.95	19	17573.97
Alps	Kollin	61	Other land	12.9	350	2.9	0.37	7.46	2609.99
Alps	Montan	11	Afforestations	68	25	2.9	1.97	39.44	986
Alps	Montan	12	Managed forest	83.2	39750	2.9	2.41	48.28	1919160.45
Alps	Montan	13	Unproductive forest	71.2	375	2.9	2.06	41.3	15486
Alps	Montan	21	Cropland	7.4	350	2.9	0.22	4.31	1507.99
Alps	Montan	31	Permanent grassland	12.9	17125	2.9	0.38	7.51	128527.54
Alps	Montan	32	Shrub vegetation	26.8	975	2.9	0.78	15.53	15137.98
Alps	Montan	33	Vineyards, low-stem orchards, tree nurseries	17.2	2675	2.9	0.5	10	26737.93
Alps	Montan	34	Copse	39.7	2925	2.9	1.15	23.02	67337.99
Alps	Montan	35	Orchards	42	50	2.9	1.22	24.36	1218
Alps	Montan	36	Stony grassland	10.4	425	2.9	0.3	6	2551.99
Alps	Montan	37	Unproductive grassland	19.5	375	2.9	0.56	11.29	4233.99
Alps	Montan	41	Surface waters	46.4	550	2.9	1.34	26.89	14789.99
Alps	Montan	42	Unproductive wetland	40	50	2.9	1.16	23.2	1160
Alps	Montan	51	Buildings and construction	17.8	4375	2.9	0.52	10.31	45123.86
Alps	Montan	52	Herbaceous biomass in settlements	21.4	1475	2.9	0.62	12.43	18327.98
Alps	Montan	53	Shrubs in settlements	41.6	125	2.9	1.21	24.13	3016
Alps	Montan	54	Trees in settlements	24.9	225	2.9	0.72	14.44	3247.99
Alps	Montan	61	Other land	29	1500	2.9	0.84	16.83	25244.7

Alps	Subalpin	11	Afforestations	40	50	2.9	1.16	23.2	1160
Alps	Subalpin	12	Managed forest	70.5	68850	2.9	2.04	40.9	2815911.43
Alps	Subalpin	13	Unproductive forest	48.1	15725	2.9	1.4	27.92	439119.24
Alps	Subalpin	21	Cropland	0	25	2.9	0	0	0
Alps	Subalpin	31	Permanent grassland	4.9	80850	2.9	0.14	2.85	230605.71
Alps	Subalpin	32	Shrub vegetation	12.1	22175	2.9	0.35	7	155325.76
Alps	Subalpin	34	Copse	33	4825	2.9	0.96	19.12	92277.74
Alps	Subalpin	36	Stony grassland	1.8	27275	2.9	0.05	1.07	29172.74
Alps	Subalpin	37	Unproductive grassland	4.3	12050	2.9	0.12	2.48	29927.6
Alps	Subalpin	41	Surface waters	5.3	2950	2.9	0.15	3.05	8989.94
Alps	Subalpin	42	Unproductive wetland	4.1	1900	2.9	0.12	2.38	4523.93
Alps	Subalpin	51	Buildings and construction	20.5	3900	2.9	0.6	11.91	46457.86
Alps	Subalpin	52	Herbaceous biomass in settlements	17.1	1400	2.9	0.5	9.9	13861.98
Alps	Subalpin	53	Shrubs in settlements	12	125	2.9	0.35	6.96	870
Alps	Subalpin	54	Trees in settlements	32.5	400	2.9	0.94	18.85	7540
Alps	Subalpin	61	Other land	0.8	159800	2.9	0.02	0.47	74666.23
Central Plateau	Kollin	11	Afforestations	38	150	2.9	1.1	22.04	3306
Central Plateau	Kollin	12	Managed forest	88.7	100350	2.9	2.57	51.45	5162868.01
Central Plateau	Kollin	13	Unproductive forest	92	50	2.9	2.67	53.36	2668
Central Plateau	Kollin	21	Cropland	2.5	160825	2.9	0.07	1.44	231302.7
Central Plateau	Kollin	31	Permanent grassland	10.8	55850	2.9	0.31	6.29	351247.02
Central Plateau	Kollin	32	Shrub vegetation	34.6	700	2.9	1	20.05	14035.99
Central Plateau	Kollin	33	Vineyards, low-stem orchards, tree nurseries	10.7	6025	2.9	0.31	6.23	37525.69
Central Plateau	Kollin	34	Copse	30	10300	2.9	0.87	17.41	179277.95
Central Plateau	Kollin	35	Orchards	36	50	2.9	1.04	20.88	1044
Central Plateau	Kollin	36	Stony grassland	0.8	125	2.9	0.02	0.46	58
Central Plateau	Kollin	37	Unproductive grassland	12.8	1350	2.9	0.37	7.43	10033.99
Central Plateau	Kollin	41	Surface waters	1.8	46775	2.9	0.05	1.05	49210.2
Central Plateau	Kollin	42	Unproductive wetland	14.7	2700	2.9	0.43	8.55	23083.94
Central Plateau	Kollin	51	Buildings and construction	14.4	63075	2.9	0.42	8.34	525942.69
Central Plateau	Kollin	52	Herbaceous biomass in settlements	16.5	28225	2.9	0.48	9.59	270569.99
Central Plateau	Kollin	53	Shrubs in settlements	27.2	825	2.9	0.79	15.75	12991.99
Central Plateau	Kollin	54	Trees in settlements	36	8050	2.9	1.05	20.91	168315.58
Central Plateau	Kollin	61	Other land	7.3	300	2.9	0.21	4.25	1275.99
Central Plateau	Montan	11	Afforestations	22	100	2.9	0.64	12.76	1276
Central Plateau	Montan	12	Managed forest	87.3	75550	2.9	2.53	50.61	3823878.18
Central Plateau	Montan	13	Unproductive forest	60	150	2.9	1.74	34.8	5220

Central Plateau	Montan	21	Cropland	2.6	78650	2.9	0.07	1.49	117217.44
Central Plateau	Montan	31	Permanent grassland	8.9	51125	2.9	0.26	5.16	263607.76
Central Plateau	Montan	32	Shrub vegetation	27.2	125	2.9	0.79	15.78	1972
Central Plateau	Montan	33	Vineyards, low-stem orchards, tree nurseries	24.2	500	2.9	0.7	14.04	7018
Central Plateau	Montan	34	Copse	29.7	6350	2.9	0.86	17.24	109503.69
Central Plateau	Montan	35	Orchards	32.4	225	2.9	0.94	18.82	4233.99
Central Plateau	Montan	36	Stony grassland	27	100	2.9	0.78	15.66	1566
Central Plateau	Montan	37	Unproductive grassland	22.7	75	2.9	0.66	13.15	986
Central Plateau	Montan	41	Surface waters	15.3	400	2.9	0.44	8.85	3538
Central Plateau	Montan	42	Unproductive wetland	29.6	250	2.9	0.86	17.17	4292
Central Plateau	Montan	51	Buildings and construction	14.6	11500	2.9	0.42	8.49	97671.48
Central Plateau	Montan	52	Herbaceous biomass in settlements	15.5	4975	2.9	0.45	8.99	44717.75
Central Plateau	Montan	53	Shrubs in settlements	25.5	200	2.9	0.74	14.79	2958
Central Plateau	Montan	54	Trees in settlements	34.6	1325	2.9	1	20.05	26563.97
Central Plateau	Montan	61	Other land	21.5	200	2.9	0.62	12.47	2494
Central Plateau	Subalpin	11	Afforestations	44	25	2.9	1.28	25.52	638
Central Plateau	Subalpin	12	Managed forest	69.5	2550	2.9	2.01	40.28	102717.88
Central Plateau	Subalpin	13	Unproductive forest	18	50	2.9	0.52	10.44	522
Central Plateau	Subalpin	31	Permanent grassland	11.4	875	2.9	0.33	6.63	5799.96
Central Plateau	Subalpin	34	Copse	39	100	2.9	1.13	22.62	2262
Central Plateau	Subalpin	36	Stony grassland	0	25	2.9	0	0	0
Central Plateau	Subalpin	52	Herbaceous biomass in settlements	8	25	2.9	0.23	4.64	116
Jura	Kollin	11	Afforestations	56	25	2.9	1.62	32.48	812
Jura	Kollin	12	Managed forest	91.2	53400	2.9	2.64	52.87	2823147.36
Jura	Kollin	13	Unproductive forest	73.3	75	2.9	2.13	42.53	3190
Jura	Kollin	21	Cropland	2.8	51650	2.9	0.08	1.64	84736.37
Jura	Kollin	31	Permanent grassland	12.4	28350	2.9	0.36	7.2	204100.38
Jura	Kollin	32	Shrub vegetation	17.6	250	2.9	0.51	10.21	2552
Jura	Kollin	33	Vineyards, low-stem orchards, tree nurseries	12.5	4550	2.9	0.36	7.23	32885.9
Jura	Kollin	34	Copse	30.4	6200	2.9	0.88	17.62	109213.76
Jura	Kollin	35	Orchards	36	75	2.9	1.04	20.88	1566
Jura	Kollin	36	Stony grassland	32	50	2.9	0.93	18.56	928
Jura	Kollin	37	Unproductive grassland	14	450	2.9	0.41	8.12	3654
Jura	Kollin	41	Surface waters	1.6	22200	2.9	0.05	0.92	20496.02
Jura	Kollin	42	Unproductive wetland	26.9	175	2.9	0.78	15.58	2726
Jura	Kollin	51	Buildings and construction	15.4	21525	2.9	0.45	8.91	191863.04
Jura	Kollin	52	Herbaceous biomass in	17.6	9200	2.9	0.51	10.19	93727.91

			settlements						
Jura	Kollin	53	Shrubs in settlements	21.6	450	2.9	0.63	12.5	5625.99
Jura	Kollin	54	Trees in settlements	37.9	2975	2.9	1.1	21.99	65423.89
Jura	Kollin	61	Other land	41.3	75	2.9	1.2	23.97	1798
Jura	Montan	11	Afforestations	56	25	2.9	1.62	32.48	812
Jura	Montan	12	Managed forest	89.5	118525	2.9	2.6	51.91	6152405.89
Jura	Montan	13	Unproductive forest	38.9	3175	2.9	1.13	22.54	71571.92
Jura	Montan	21	Cropland	2.6	21125	2.9	0.07	1.49	31551.41
Jura	Montan	31	Permanent grassland	11	78675	2.9	0.32	6.36	500422.41
Jura	Montan	32	Shrub vegetation	29.3	400	2.9	0.85	16.97	6786
Jura	Montan	33	Vineyards, low-stem orchards, tree nurseries	24	125	2.9	0.7	13.92	1740
Jura	Montan	34	Copse	35	5125	2.9	1.01	20.28	103935.84
Jura	Montan	36	Stony grassland	28	50	2.9	0.81	16.24	812
Jura	Montan	37	Unproductive grassland	6.7	75	2.9	0.19	3.87	290
Jura	Montan	41	Surface waters	6	1525	2.9	0.17	3.46	5277.99
Jura	Montan	42	Unproductive wetland	12.1	900	2.9	0.35	7.02	6321.99
Jura	Montan	51	Buildings and construction	20.1	8075	2.9	0.58	11.64	93959.91
Jura	Montan	52	Herbaceous biomass in settlements	16.8	3425	2.9	0.49	9.74	33349.96
Jura	Montan	53	Shrubs in settlements	55.3	150	2.9	1.6	32.09	4814
Jura	Montan	54	Trees in settlements	39.9	800	2.9	1.16	23.13	18502
Jura	Montan	61	Other land	50.4	125	2.9	1.46	29.23	3654
Jura	Subalpin	12	Managed forest	76.3	23600	2.9	2.21	44.24	1044172.65
Jura	Subalpin	13	Unproductive forest	32.1	1850	2.9	0.93	18.62	34451.99
Jura	Subalpin	21	Cropland	16	25	2.9	0.46	9.28	232
Jura	Subalpin	31	Permanent grassland	10	15175	2.9	0.29	5.82	88275.52
Jura	Subalpin	32	Shrub vegetation	35.4	175	2.9	1.03	20.55	3595.99
Jura	Subalpin	34	Copse	40.2	450	2.9	1.17	23.33	10497.99
Jura	Subalpin	36	Stony grassland	6.3	175	2.9	0.18	3.65	638
Jura	Subalpin	37	Unproductive grassland	42	50	2.9	1.22	24.36	1218
Jura	Subalpin	42	Unproductive wetland	9.3	150	2.9	0.27	5.41	812
Jura	Subalpin	51	Buildings and construction	21.1	350	2.9	0.61	12.26	4291.99
Jura	Subalpin	52	Herbaceous biomass in settlements	28	50	2.9	0.81	16.24	812
Jura	Subalpin	61	Other land	33.3	75	2.9	0.97	19.33	1450
Pre-Alps	Kollin	11	Afforestations	0	25	2.9	0	0	0
Pre-Alps	Kollin	12	Managed forest	85.9	4500	2.9	2.49	49.83	224227.97
Pre-Alps	Kollin	21	Cropland	2.4	2400	2.9	0.07	1.38	3306
Pre-Alps	Kollin	31	Permanent grassland	7.1	9625	2.9	0.2	4.1	39439.8
Pre-Alps	Kollin	33	Vineyards, low-stem orchards, tree nurseries	24.5	200	2.9	0.71	14.21	2842
Pre-Alps	Kollin	34	Copse	27.9	850	2.9	0.81	16.17	13745.97
Pre-Alps	Kollin	35	Orchards	16	50	2.9	0.46	9.28	464
Pre-Alps	Kollin	37	Unproductive grassland	40	50	2.9	1.16	23.2	1160
Pre-Alps	Kollin	41	Surface waters	1.1	16275	2.9	0.03	0.64	10439.14
Pre-Alps	Kollin	42	Unproductive wetland	8.4	250	2.9	0.24	4.87	1218
Pre-Alps	Kollin	51	Buildings and construction	12.8	6150	2.9	0.37	7.45	45819.9
Pre-Alps	Kollin	52	Herbaceous biomass in settlements	17.1	2050	2.9	0.5	9.93	20357.94
Pre-Alps	Kollin	53	Shrubs in settlements	4	25	2.9	0.12	2.32	58
Pre-Alps	Kollin	54	Trees in settlements	35.8	500	2.9	1.04	20.76	10382

Pre-Alps	Kollin	61	Other land	24	100	2.9	0.7	13.92	1392
Pre-Alps	Montan	11	Afforestations	44	75	2.9	1.28	25.52	1914
Pre-Alps	Montan	12	Managed forest	84.7	97425	2.9	2.46	49.15	4788417.32
Pre-Alps	Montan	13	Unproductive forest	44.7	675	2.9	1.3	25.95	17515.98
Pre-Alps	Montan	21	Cropland	2.3	18875	2.9	0.07	1.35	25461.7
Pre-Alps	Montan	31	Permanent grassland	9.8	114275	2.9	0.28	5.67	648438.86
Pre-Alps	Montan	32	Shrub vegetation	35	1075	2.9	1.01	20.29	21807.97
Pre-Alps	Montan	33	Vineyards, low-stem orchards, tree nurseries	30	50	2.9	0.87	17.4	870
Pre-Alps	Montan	34	Copse	32.2	8150	2.9	0.93	18.67	152133.77
Pre-Alps	Montan	35	Orchards	16	25	2.9	0.46	9.28	232
Pre-Alps	Montan	36	Stony grassland	8	150	2.9	0.23	4.64	696
Pre-Alps	Montan	37	Unproductive grassland	20	200	2.9	0.58	11.6	2320
Pre-Alps	Montan	41	Surface waters	18.3	2775	2.9	0.53	10.64	29521.93
Pre-Alps	Montan	42	Unproductive wetland	12.4	2025	2.9	0.36	7.22	14615.95
Pre-Alps	Montan	51	Buildings and construction	14.2	12325	2.9	0.41	8.26	101789.64
Pre-Alps	Montan	52	Herbaceous biomass in settlements	14.1	4175	2.9	0.41	8.2	34219.91
Pre-Alps	Montan	53	Shrubs in settlements	21	200	2.9	0.61	12.18	2436
Pre-Alps	Montan	54	Trees in settlements	29.5	775	2.9	0.86	17.14	13281.96
Pre-Alps	Montan	61	Other land	42.5	1125	2.9	1.23	24.68	27760.87
Pre-Alps	Subalpin	11	Afforestations	44	50	2.9	1.28	25.52	1276
Pre-Alps	Subalpin	12	Managed forest	68.4	58125	2.9	1.98	39.66	2305098.93
Pre-Alps	Subalpin	13	Unproductive forest	41.6	6500	2.9	1.21	24.11	156715.88
Pre-Alps	Subalpin	21	Cropland	0	25	2.9	0	0	0
Pre-Alps	Subalpin	31	Permanent grassland	6.5	59050	2.9	0.19	3.8	224224.78
Pre-Alps	Subalpin	32	Shrub vegetation	17.5	6675	2.9	0.51	10.18	67940.18
Pre-Alps	Subalpin	34	Copse	32.1	3125	2.9	0.93	18.6	58116.91
Pre-Alps	Subalpin	36	Stony grassland	4.7	5775	2.9	0.14	2.72	15717.86
Pre-Alps	Subalpin	37	Unproductive grassland	8.3	4050	2.9	0.24	4.81	19487.77
Pre-Alps	Subalpin	41	Surface waters	9	400	2.9	0.26	5.22	2088
Pre-Alps	Subalpin	42	Unproductive wetland	9.3	6225	2.9	0.27	5.37	33407.96
Pre-Alps	Subalpin	51	Buildings and construction	17.8	1025	2.9	0.51	10.3	10555.94
Pre-Alps	Subalpin	52	Herbaceous biomass in settlements	16.7	275	2.9	0.49	9.7	2667.99
Pre-Alps	Subalpin	54	Trees in settlements	44	25	2.9	1.28	25.52	638
Pre-Alps	Subalpin	61	Other land	4.9	10600	2.9	0.14	2.87	30391.41
Southern Alps	Subalpin	31	Permanent grassland	0	350	2.9	0	0	0
Southern Alps	Subalpin	36	Stony grassland	0	250	2.9	0	0	0
Southern Alps	Subalpin	37	Unproductive grassland	0	150	2.9	0	0	0
Southern Alps	Subalpin	41	Surface waters	0	50	2.9	0	0	0
Southern Alps	Subalpin	52	Herbaceous biomass in settlements	0	25	2.9	0	0	0
Southern Alps	Subalpin	61	Other land	0	325	2.9	0	0	0

Vergleicht man die bisherigen Schätzungen aus dem Kanton Genf (Kapitel 7.7.4.1 aus FOEN 2010¹) mit den neuen Schätzungen aus dem viel grösseren und damit repräsentativeren Untersuchungsgebiet der vorliegenden Studie (Tab. 7), so resultieren Biomassewerte

- für die Klasse Krautvegetation im Siedlungsgebiet (Kyoto₅₂) bisher 11.4 tC*ha⁻¹ und neu 9.5 tC*ha⁻¹,
- für die Klasse Sträucher im Siedlungsgebiet (Kyoto₅₃) bisher 8.9 tC*ha⁻¹ und neu 15.4 tC*ha⁻¹, sowie
- für die Klasse Bäume im Siedlungsgebiet (Kyoto₅₄) bisher 18.6 tC*ha⁻¹ und neu 20.7 tC*ha⁻¹.

Baumbiomassewerte können neu also repräsentativer (soweit AREA Daten verfügbar) geschätzt werden. Im Weiteren können Baumbiomassen für alle Strata des THGI, ausser organisch/mineralische Böden (hier auf Grund der kleinen Stichprobenanzahl im 500 m Netz, welche in die teilweise kleinen Flächen fallen), spezifisch geschätzt werden (Tab. 8) und nicht nur für die Kyoto Klassen als Aggregate (Tab. 7). Die Verteilung der nach den THGI Strata resultierenden Baumbiomassen pro Kyoto Klasse zeigt, dass diese teilweise recht breit ist (Abb. 17) und ein durchschnittlicher Biomassewert nicht für alle Kyoto Klassen repräsentativ ist.

Streuung der Baumbiomasse

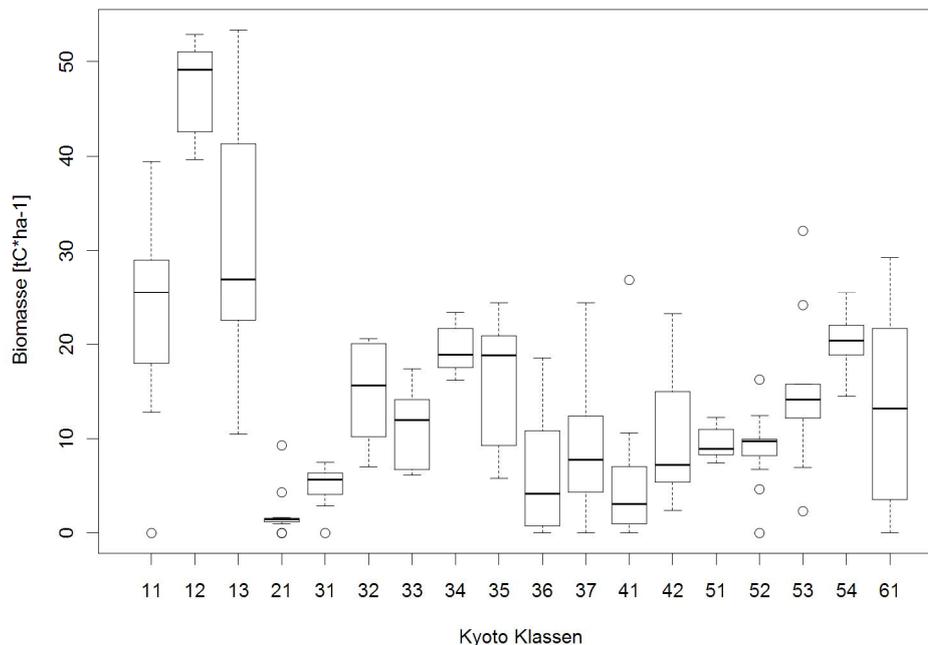


Abb. 17 Streuung der nach Strata Treibhausgasinventar (Produktionsregion, Höhenklasse) geschätzten Baumbiomassen pro Kyoto Klasse.

5.2 Flächendeckende Kartierung

Ziel dieses Untersuchungsschrittes war die flächige Erfassung des Baumdeckungsgrades, um damit analog zum vorangehenden Kapitel 5.1 die Baumbiomasse flächendeckend zu erfassen. Die Untersuchung basierte daher auf Laserscanning DTM und DOM sowie TLM.

Das Untersuchungsgebiet umfasste eine Fläche von 831 km² mit einem Höhenbereich des Geländes von 324 bis 929 m ü. M.

Der Baumdeckungsgrad wurde über das DHM (Höhendifferenz ≥ 3 m) und dem Ausschluss von Nichtbaumobjekten über die TLM Bauten erfasst. Drei Ansätze wurden dabei untersucht, nämlich die Verwendung der Bautenpolygone mit einem gerechneten Puffer von 0 m, 3 m und 6 m (Abb. 18).



Abb. 18 Schattierter Ausschnitt Zürich Hauptbahnhof aus dem digitalen Oberflächenmodell überlagert mit Gebäuden (schraffiert) und den zusätzlichen 3 m und 6 m Puffern (Massstab 1:5'000, reproduziert mit Bewilligung von swisstopo JA100001)

Die Extraktion von Bauten aus dem klassierten DHM führte schliesslich zu einem 2 m Raster mit den beiden Werten Baum und Nichtbaum (Abb. 19). Damit war eine binäre Baummaske verfügbar, mit welcher Baumflächen und Baumhöhen auf ein 50 m Raster aggregiert werden konnten.



Abb. 19 Schattierter Ausschnitt Zürich Nord aus dem digitalen Oberflächenmodell mit überlagerter Baum-/Nichtbaummaske in 2 m Auflösung (Massstab 1:50'000, reproduziert mit Bewilligung von swisstopo JA100001)

Die Evaluation der Baumdeckungsgraderfassung wurde mit den interpretierten LFI3 Luftbildstichproben durchgeführt (Abb. 20, Abb. 22, Abb. 24), da die Luftbildinterpretationsflächen mit den Rasterflächen kongruent sind. Der flächig erfasste Baumdeckungsgrad stimmt zu 94 % mit dem stichprobepbasierten Baumdeckungsgrad überein. Auf der aggregierten Ebene von 50 m Pixeln scheint die Extraktion von Bauten nicht sensibel zu sein bezüglich einer Pufferdistanz der Gebäude. Vergleicht man aber die Verteilung der Deckungsgradabweichungen (Abb. 21, Abb. 23, Abb. 25) und überprüft man insbesondere die Baummaske visuell auf dem 2 m Raster, so zeigt sich, dass ein Puffer von 6 m die robustesten, aber auch konservativsten Resultate ergibt.

Korrelation Baumdeckungsgrad Laserscanning und LFI (Bautenpuffer=0m)

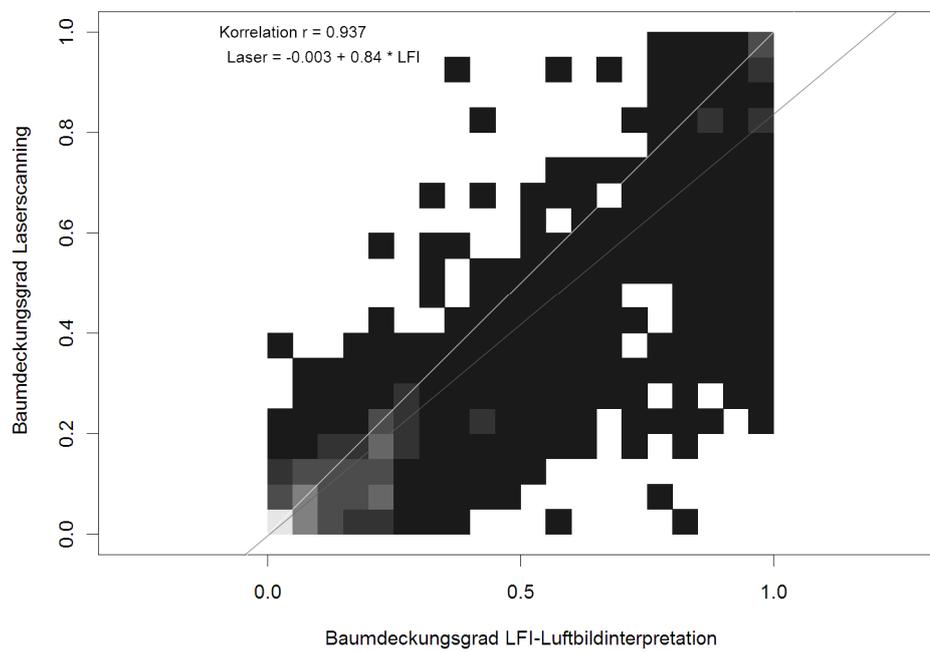


Abb. 20 Zusammenhang Baumdeckungsgrad Laserscanning und LFI3 (Bautenpuffer = 0 m, Helligkeit Rasterzellen entspricht Punktepaarhäufigkeit, dunkelgraue Linie entspricht lineare Modellgerade, hellgraue Linie entspricht Diagonale)

Histogramm Abweichung Baumdeckungsgrad (Bautenpuffer=0m)

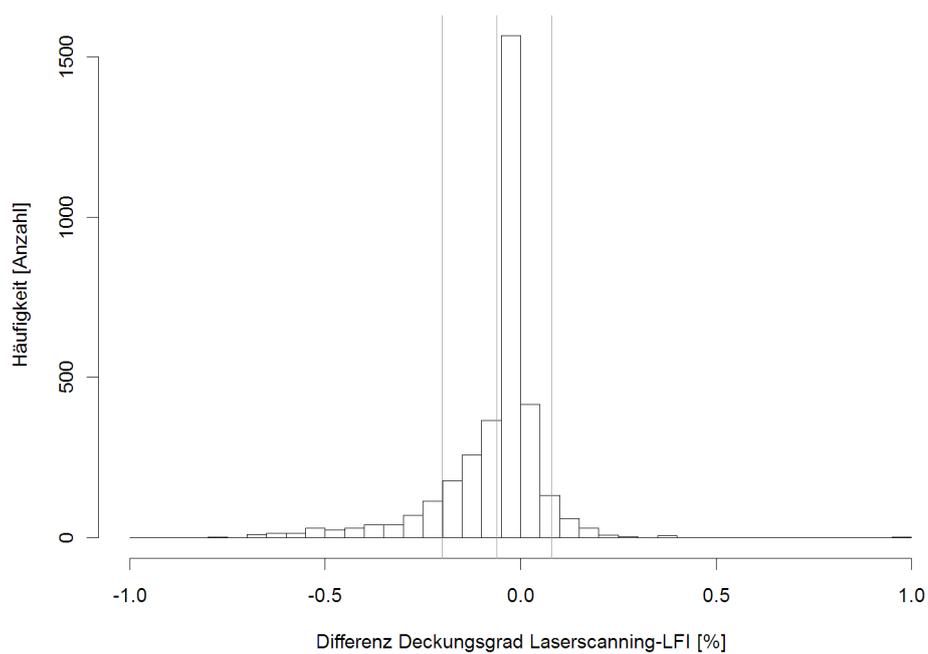


Abb. 21 Abweichung Baumdeckungsgrad Laserscanning gegenüber LFI3 (Bautenpuffer = 0 m, graue Vertikallinien entsprechen Mittelwert und Standardabweichung)

Korrelation Baumdeckungsgrad Laserscanning und LFI (Bautenpuffer=3m)

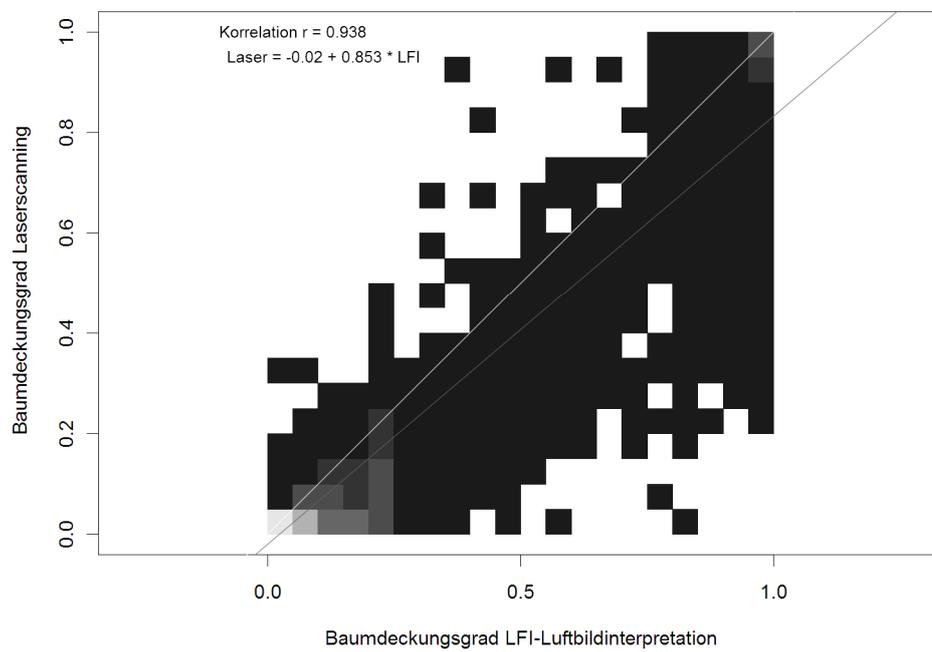


Abb. 22 Zusammenhang Baumdeckungsgrad Laserscanning und LFI3 (Bautenpuffer = 3 m, Helligkeit Rasterzellen entspricht Punktepaarhäufigkeit, dunkelgraue Linie entspricht lineare Modellgerade, hellgraue Linie entspricht Diagonale)

Histogramm Abweichung Baumdeckungsgrad (Bautenpuffer=3m)

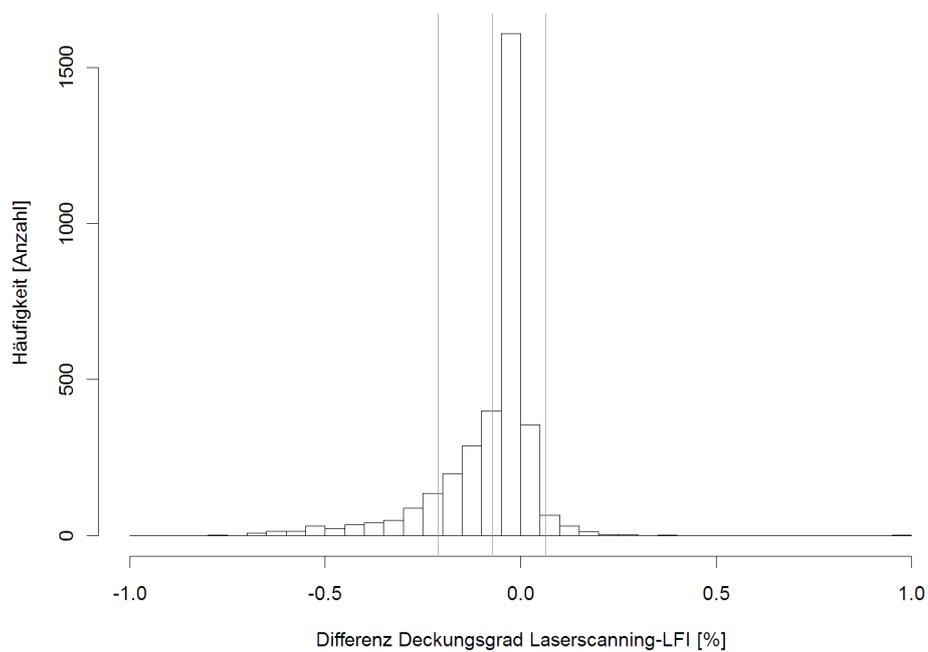


Abb. 23 Abweichung Baumdeckungsgrad Laserscanning gegenüber LFI3 (Bautenpuffer = 3 m, graue Vertikallinien entsprechen Mittelwert und Standardabweichung)

Korrelation Baumdeckungsgrad Laserscanning und LFI (Bautenpuffer=6m)

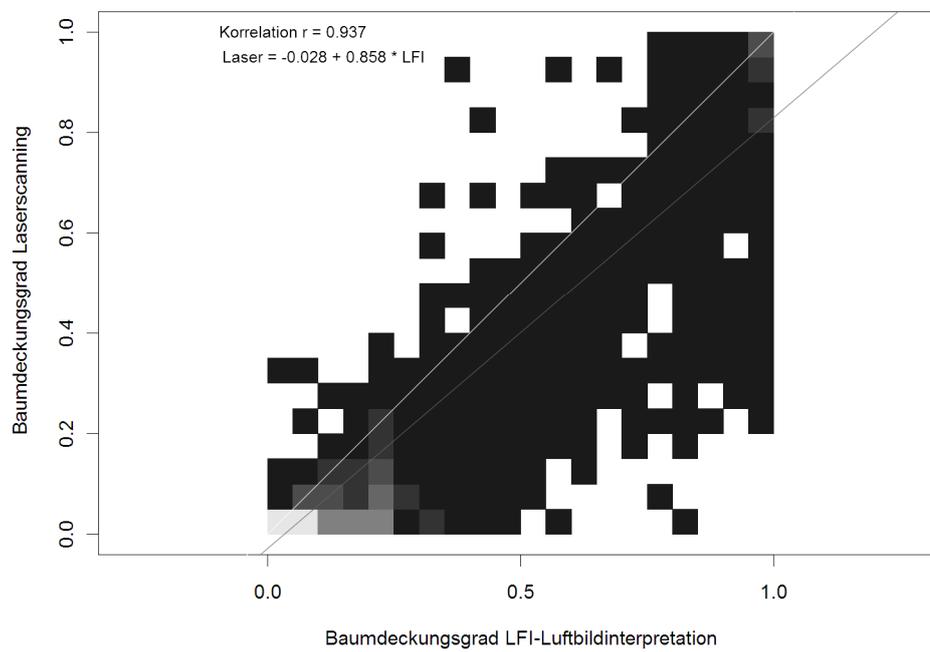


Abb. 24 Zusammenhang Baumdeckungsgrad Laserscanning und LFI3 (Bautenpuffer = 6 m, Helligkeit Rasterzellen entspricht Punktepaarhäufigkeit, dunkelgraue Linie entspricht lineare Modellgerade, hellgraue Linie entspricht Diagonale)

Histogramm Abweichung Baumdeckungsgrad (Bautenpuffer=6m)

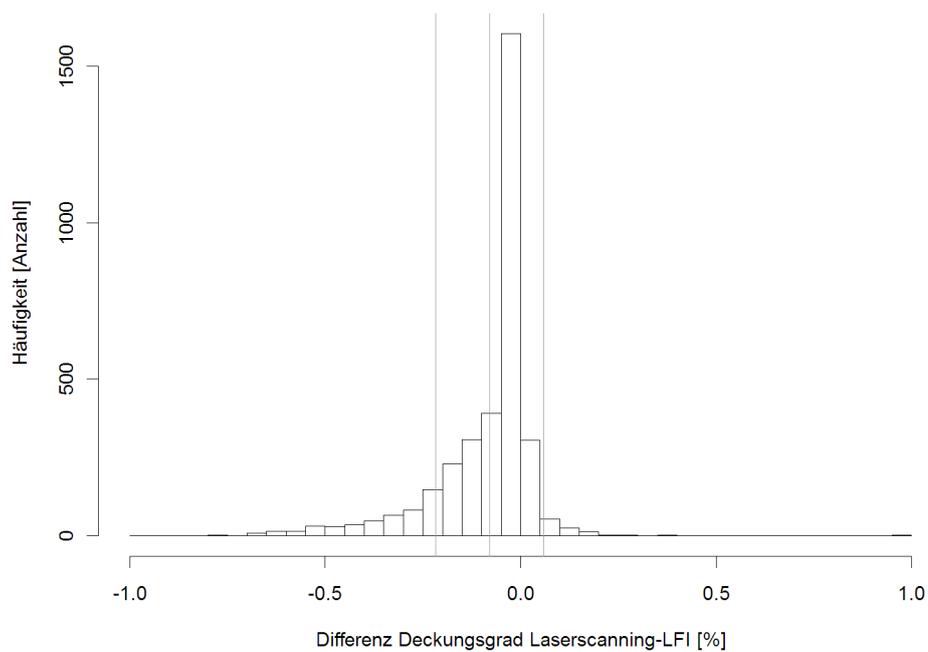


Abb. 25 Abweichung Baumdeckungsgrad Laserscanning gegenüber LFI3 (Bautenpuffer = 6 m, graue Vertikallinien entsprechen Mittelwert und Standardabweichung)

Die Baumbiomasse kann nun analog dem Stichprobenansatz (Kapitel 5.1), aber nun flächendeckend auf das Untersuchungsgebiet (Abb. 26) oder einen Ausschnitt davon (Abb. 27) übertragen werden. Summiert man die Baumbiomasse im ganzen Untersuchungsgebiet (Wald- und Nichtwaldareal), so erhält man ein Total von 1'420'660 tC auf einer Fläche von 831 km². Dies entspricht einer durchschnittlichen Biomasse von 17 tC/ha.

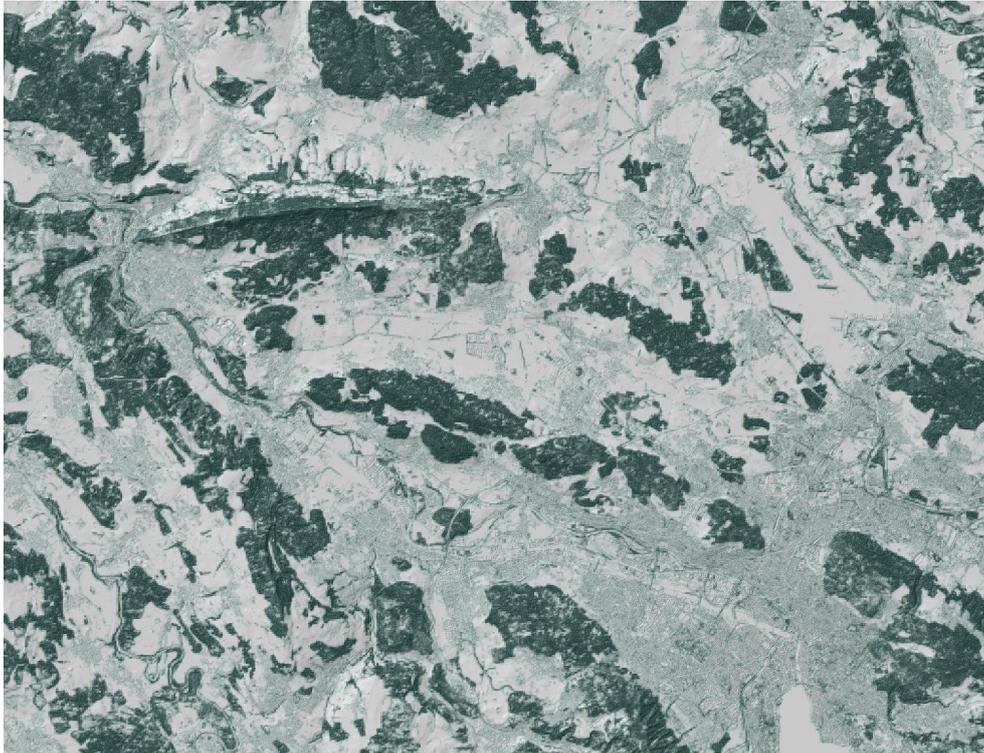


Abb. 26 Schattierter Ausschnitt Zürich Umgebung aus dem DOM mit überlagerter Baumbiomasse im Wald- und Nichtwaldareal (Massstab 1:200'000, reproduziert mit Bewilligung von swisstopo JA100001)

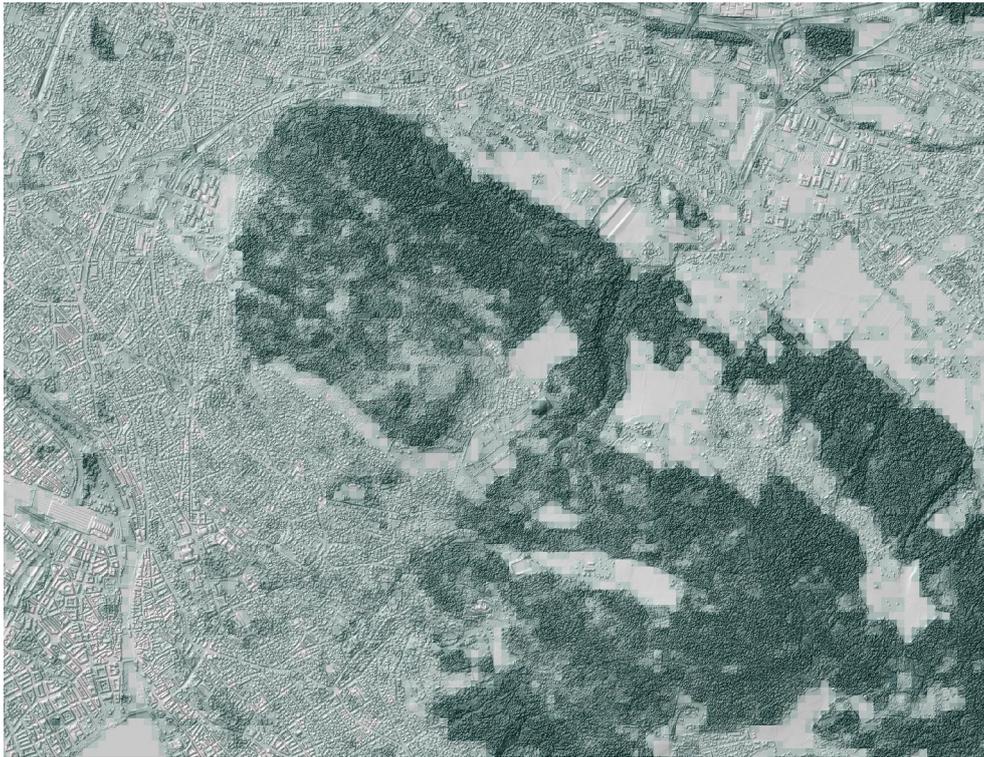


Abb. 27 Schattierter Ausschnitt Zürich Nord aus dem DOM mit überlagerter Baumbiomasse im Wald- und Nichtwaldareal (Massstab 1:50'000, reproduziert mit Bewilligung von swisstopo JA100001)

5.3 Spezifische Biomasseschätzung

5.3.1 Verteilung Nadelbäume / Laubbäume in der Landschaft

Die Modelle zur Schätzung der Biomasse wurden zwar im Wald kalibriert, aber in der Landschaft angewendet. Somit ist es entscheidend, welche Baumarten (Nadel- oder Laubbäume) in der Landschaft vorherrschen. Abb. 28 gibt einen Überblick stratifiziert nach Höhenlagen. In der untersten Höhenstufe (Kollin, 0-600 m.ü.M.) besteht die Baumvegetation ausserhalb des Waldes hauptsächlich aus Laubbäumen. In der mittleren Vegetationsstufe (Montan, 601-1200 m.ü.M.) sind Nadel- und Laubbäume ungefähr gleichermassen vertreten. In der subalpinen Stufe (> 1200 m.ü.M.) sind die Nadelbäume deutlich häufiger vertreten.

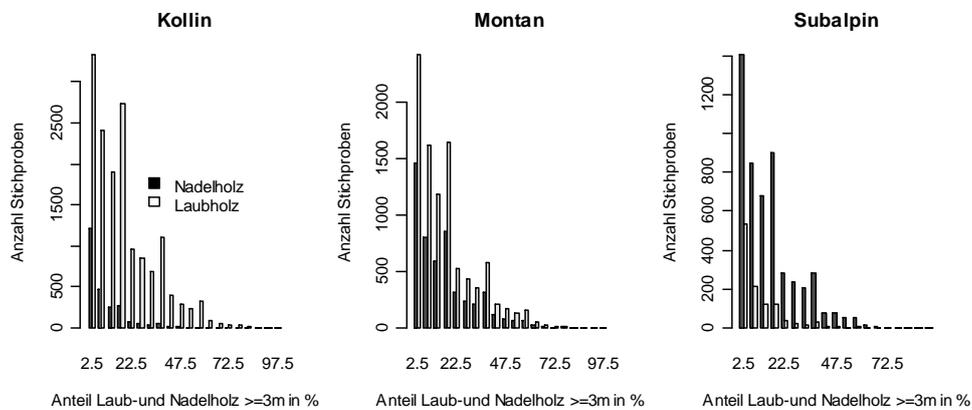


Abb. 28 Deckungsgrade aller Bäume ≥ 3 m im Nichtwald, aufgeteilt nach Vegetationshöhenstufe und Nadel / Laub (Daten aus Luftbildstichproben LF13)

5.3.2 Modell Auswahl

Multiple Regression

Tab. 9 enthält alle gerechneten multiplen Regressionsmodelle, die geschätzten Parameter, deren Standardfehler und zur Beurteilung der Modellgüte die Grössen R^2 , RMSE und RMSE in Prozent der mittleren geschätzten Biomasse. Einerseits wurden die Modelle für die Schweiz als Ganzes gerechnet, andererseits getrennt für die Vegetationshöhenstufen. Stets getrennt gerechnet wurden jedoch Laub- und Nadelbestände.

Tab. 9 Multiple Regressionsmodelle zur Abschätzung der Biomasse aus den erklärenden Grössen Z25, LBRASTERDG25, SUM_TREE_3M, MEAN_TREEHEIGHT und STDV_TREEHEIGHT

	Modell	Parameter ± Std. Fehler	Modellgüte
Kollin (0-600 m.ü.M.)			
Nadelbestände	BIOMASSE ~ $b_0 + b_1 \cdot \text{SUM_TREE_3M} + b_2 \cdot \text{STDV_TREEHEIGHT} + \epsilon$	$b_0: -49.72644 \pm 38.31$ $b_1: 0.64447 \pm 0.05$ *** $b_2: 10.03713 \pm 5.96$.	$R^2: 0.57$ RMSE: 119.42 RMSE%: 38%
Laubbestände	BIOMASSE ~ $b_0 + b \cdot \text{LBRASTERDG25} + b_2 \cdot \text{MEAN_TREEHEIGHT} + \epsilon$	$b_0: -136.3512 \pm 64.35$ * $b_1: 1.2148 \pm 0.75$ $b_2: 11.8245 \pm 1.13$ ***	$R^2: 0.35$ RMSE: 129.38 RMSE%: 53%
Montan (601-1200 m.ü.M.)			
Nadelbestände	BIOMASSE ~ $b_0 + b_1 \cdot \text{SUM_TREE_3M} + b_2 \cdot \text{MEAN_TREEHEIGHT} + \epsilon$	$b_0: 71.90762 \pm 19.87$ **** $b_1: 0.29014 \pm 0.08$ *** $b_2: 5.03104 \pm 2.28$ *	$R^2: 0.33$ RMSE: 128.32 RMSE%: 40%
Laubbestände	BIOMASSE ~ $b_0 + b_1 \cdot \text{SUM_TREE_3M} + \epsilon$	$b_0: -7.92424 \pm 16.89$ $b_1: 0.46778 \pm 0.03$ ***	$R^2: 0.43$ RMSE: 114.63 RMSE%: 55%
Subalpin (> 1200 m.ü.M.)			
Nadelbestände	BIOMASSE ~ $b_0 + b \cdot \text{LBRASTERDG25} + b_2 \cdot \text{MEAN_TREEHEIGHT} + b_3 \cdot \text{STDV_TREEHEIGHT} + \epsilon$	$b_0: -25.4376 \pm 26.52$ $b_1: 0.6683 \pm 0.32$ * $b_2: 12.1321 \pm 1.22$ *** $b_3: 6.2738 \pm 3.39$.	$R^2: 0.29$ RMSE: 126.43 RMSE%: 48%
Laubbestände	--	--	--
Schweiz			
Nadelbestände	BIOMASSE ~ $b_0 + b \cdot \text{Z25} + b_2 \cdot \text{SUM_TREE_3M} + b_3 \cdot \text{MEAN_TREEHEIGHT} + b_4 \cdot \text{STDV_TREEHEIGHT} + \epsilon$	$b_0: 10.43057 \pm 21.59$ $b_1: 0.01704 \pm 0.01$ $b_2: 0.24242 \pm 0.06$ *** $b_3: 7.21454 \pm 1.66$ **** $b_4: 3.94705 \pm 1.90$.	$R^2: 0.36$ RMSE: 127.30 RMSE%: 43%
Laubbestände	BIOMASSE ~ $b_0 + b_1 \cdot \text{SUM_TREE_3M} + b_2 \cdot \text{MEAN_TREEHEIGHT} + \epsilon$	$b_0: -20.84702 \pm 16.61$ $b_1: 0.32306 \pm 0.09$ *** $b_2: 4.03170 \pm 2.63$	$R^2: 0.40$ RMSE: 121.90 RMSE%: 54%

ϵ Residualfehler

. P-Wert < 0.1

* P-Wert < 0.05

** P-Wert < 0.01

*** P-Wert < 2.2e-16

-- Nicht ausreichend Datenpunkte zur Kalibrierung eines Modells

Bei homogenen Beständen sind sich die beiden Masszahlen SUM_TREE_3M und Mean_TREEHEIGHT sehr ähnlich und unterscheiden sich nur durch die Zahl der Baumstichproben. Die beiden Grössen sind damit stark korreliert und erklären den gleichen Teil der Varianz. Somit fällt bei einer multiplen Regression eine der beiden Grössen aus dem Modell. Dies ist bei fast allen nach Höhenstufen stratifizierten Modellen der Fall. Bei heterogenen Beständen hingegen variiert das Verhältnis der beiden Zahlen stark. Somit verbleiben bei den Modellen für die ganze Schweiz beide Grössen im Modell.

Einfache Regression

Die Analysen der einfachen Regressionsmodelle ergaben, dass in allen Fällen die erklärende Grösse SUM_TREE_3M den grössten Teil der Varianz erklären konnte. Tab. 10 enthält somit alle einfachen Regressionsmodelle mit SUM_TREE_3M als alleinige erklärende Grösse, die geschätzten Parameter, deren Standardfehler und zur Beurteilung der Modellgüte die Grössen R^2 , RMSE und RMSE in Prozent der mittleren geschätzten Biomasse. Zusätzlich zur Beurteilung des „model overfits“ wurde der Q-Wert berechnet (siehe Kapitel 4.3.3). Für die subalpine Region wurde ein polynomisches Modell angewendet, um der nicht-linearität der Biomasse gegenüber der erklärenden Grösse Rechnung zu tragen. Wiederum wurden die Modelle für die Schweiz als Ganzes gerechnet und getrennt für die Vegetationshöhenstufen. Stets getrennt gerechnet wurden Laub- und Nadelbestände.

Da sich die Modelle der einfachen Regression mit der erklärenden Grösse SUM_TREE_3M bezüglich R^2 und RMSE nur unwesentlich von den multiplen Modellen unterscheiden, fiel der Entscheid für die Anwendung aus Gründen der Interpretierbarkeit und der Einfachheit zugunsten der einfachen, respektive der polynomischen Regression aus.

Abb. 29 bis Abb. 34 und Abb. 35 zeigen eine grafische Darstellung der Regressionsfunktionen und deren Residuenanalyse aus Tab. 10. Abbildungen a) zeigen jeweils die grafische Abhängigkeit der Zielgrösse Biomasse von der erklärenden Grösse SUM_TREE_3M, sowie das Vertrauens- und Vorhersageintervall der Regressionsfunktion. Die hellblaue Linie ist eine nicht-parametrische Glättungsfunktion, welche durch lokal-gewichtete, polynomiale Regression berechnet wurde (R-Funktion *lowess*²⁴). Liegt die hellblaue Linie innerhalb des Vertrauensintervalls, erhöht sich die Plausibilität der gewählten Regressionsfunktion (Kutner et al. 2004²⁵). Abbildungen b), c) und d) dienen der grafischen Überprüfung der Verteilung der Residuen.

²⁴Cleveland, W. S. (1981). LOWESS: A program for smoothing scatterplots by robust locally weighted regression. *The American Statistician*, 35:54.

²⁵Kutner, M., C. Nachtsheim, et al. (2004). *Applied linear regression models*. 4th ed. Boston, McGraw-Hill.

Tab. 10 Einfache, respektive polynomische Regressionsmodelle mit Biomasse als Zielgrösse und SUM_TREE_3M als erklärende Grösse. Nicht signifikante Achsenabschnitte werden gleich 0 gesetzt, weil theoretisch eine Baumhöhe von 0 auch eine Biomasse von 0 hat

	Modell	Parameter \pm Std. Fehler	Modellgüte
Kollin (0-600 m.ü.M.)			
Nadelbestände	BIOMASSE \sim $b_0 + b_1 \cdot \text{SUM_TREE_3M} + \varepsilon$	b_0 : -8.95889 \pm 29.94 \rightarrow gleich 0 setzen! b_1: 0.65008 \pm 0.05 ***	R^2 : 0.56 RMSE: 121.01 RMSE%: 38% Q: 1.014
Laubbestände	BIOMASSE \sim $b_0 + b_1 \cdot \text{SUM_TREE_3M} + \varepsilon$	b_0 : -4.10348 \pm 21.57 \rightarrow gleich 0 setzen! b_1: 0.46261 \pm 0.04 ***	R^2 : 0.34 RMSE: 129.87 RMSE%: 53% Q: 1.005
Montan (601-1200 m.ü.M.)			
Nadelbestände	BIOMASSE \sim $b_0 + b_1 \cdot \text{SUM_TREE_3M} + \varepsilon$	b_0 : 99.23101 \pm 15.60 *** b_1 : 0.45942 \pm 0.03 ***	R^2 : 0.32 RMSE: 128.94 RMSE%: 40% Q: 1.003
Laubbestände	BIOMASSE \sim $b_0 + b_1 \cdot \text{SUM_TREE_3M} + \varepsilon$	b_0 : -7.92424 \pm 16.89 \rightarrow gleich 0 setzen! b_1: 0.46778 \pm 0.03 ***	R^2 : 0.43 RMSE: 114.63 RMSE%: 55% Q: 1.007
Subalpin (> 1200 m.ü.M.)			
Nadelbestände	BIOMASSE = $b_0 + b_1 \cdot \text{SUM_TREE_3M} + b_2 \cdot \text{SUM_TREE_3M}^2 + \varepsilon$	b_0 : 36.1561247 \pm 21.78 \rightarrow gleich 0 setzen! b_1: 0.9980489 \pm 0.13 *** b_2: -0.0007459 \pm 0.00 ***	R^2 : 0.27 RMSE: 128.38 RMSE%: 49% Q: 1.003
Laubbestände	--	--	--
Schweiz			
Nadelbestände	BIOMASSE \sim $b_0 + b_1 \cdot \text{SUM_TREE_3M} + \varepsilon$	b_0 : 101.81048 \pm 8.98 *** b_1 : 0.46653 \pm 0.02 ***	R^2 : 0.34 RMSE: 129.66 RMSE%: 44% Q: 1.001
Laubbestände	BIOMASSE \sim $b_0 + b_1 \cdot \text{SUM_TREE_3M} + \varepsilon$	b_0 : -4.91925 \pm 12.99 b_1 : 0.46377 \pm 0.02 ***	R^2 : 0.4 RMSE: 122.16 RMSE%: 56% Q: 1.003

ε : Residualfehler

. P-Wert < 0.1

* P-Wert < 0.05

** P-Wert < 0.01

*** P-Wert < 2.2e-16

-- Nicht ausreichend Datenpunkte zur Kalibrierung eines Modells

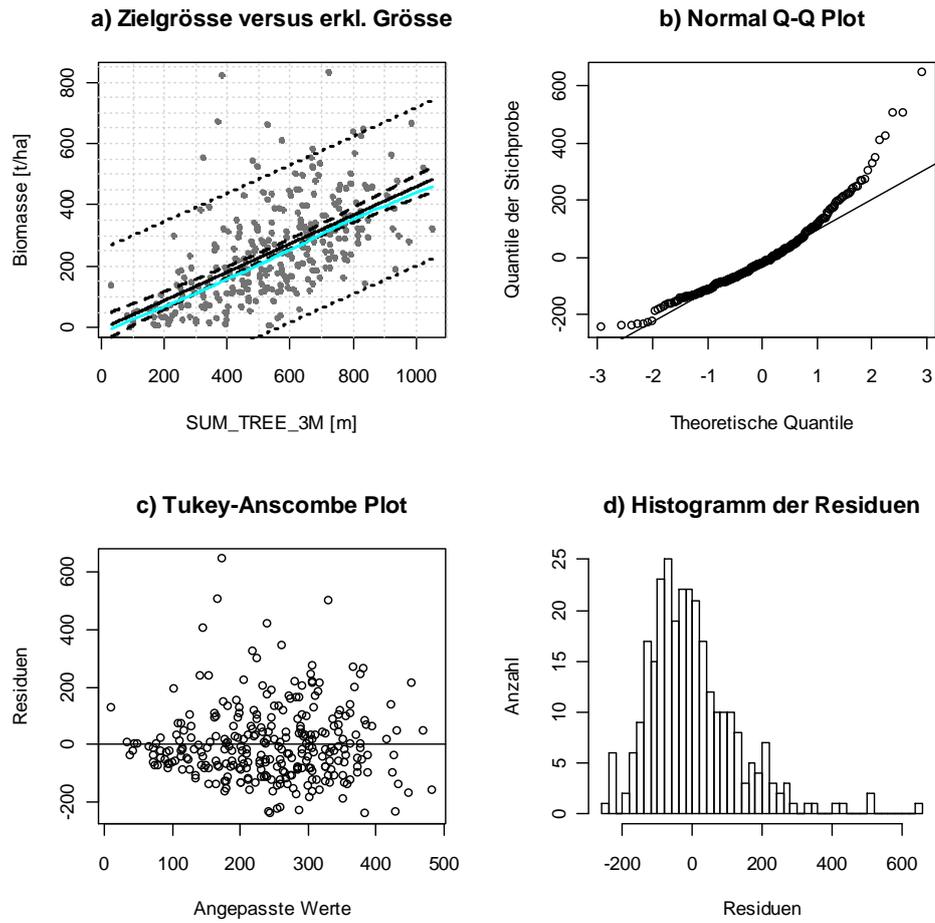


Abb. 29 Kolline Laubbestände. Grafische Darstellung der einfachen Regressionsanalyse und der Residuenanalyse. a) Schwarze Linie: Regressionsgerade; gestrichelt: Vertrauensintervall; gepunktet: Vorhersageintervall; hellblaue Linie: nicht-parametrische Glättungsfunktion zur Visualisierung der Abhängigkeitsfunktion.

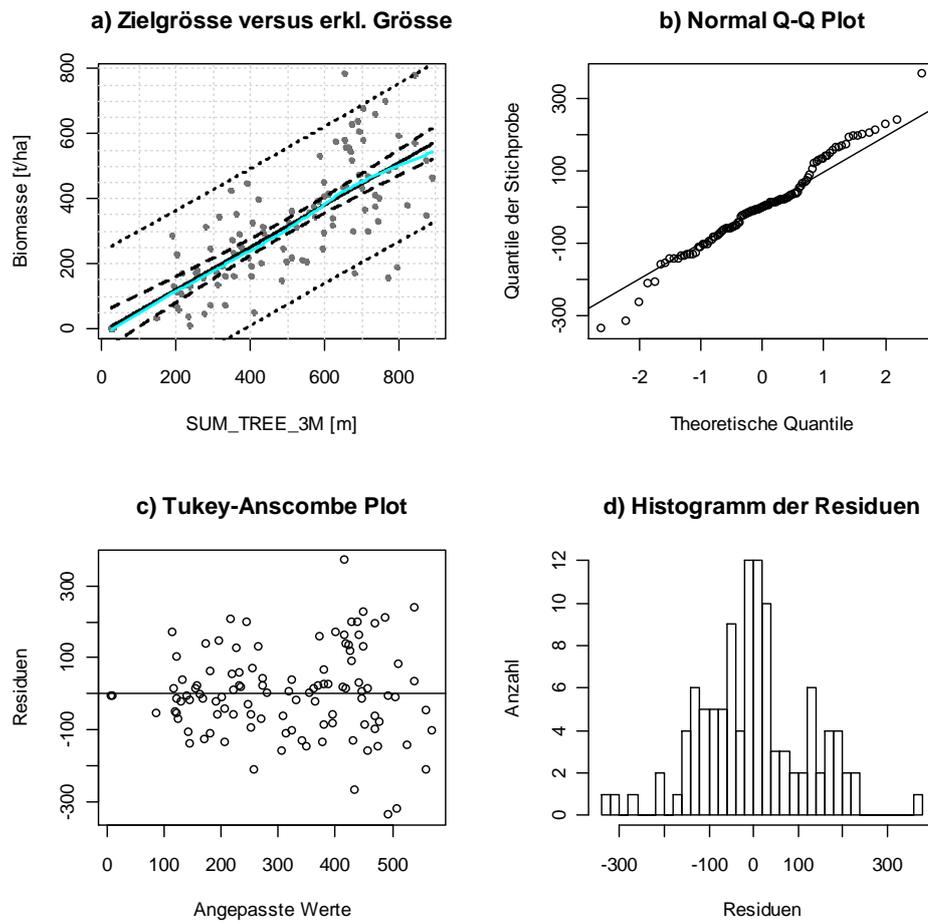


Abb. 30 Kolline Nadelbestände. Grafische Darstellung der einfachen Regressionsanalyse und der Residuenanalyse. a) Schwarze Linie: Regressionsgerade; gestrichelt: Vertrauensintervall; gepunktet: Vorhersageintervall; hellblaue Linie: nicht-parametrische Glättungsfunktion zur Visualisierung der Abhängigkeitsfunktion.

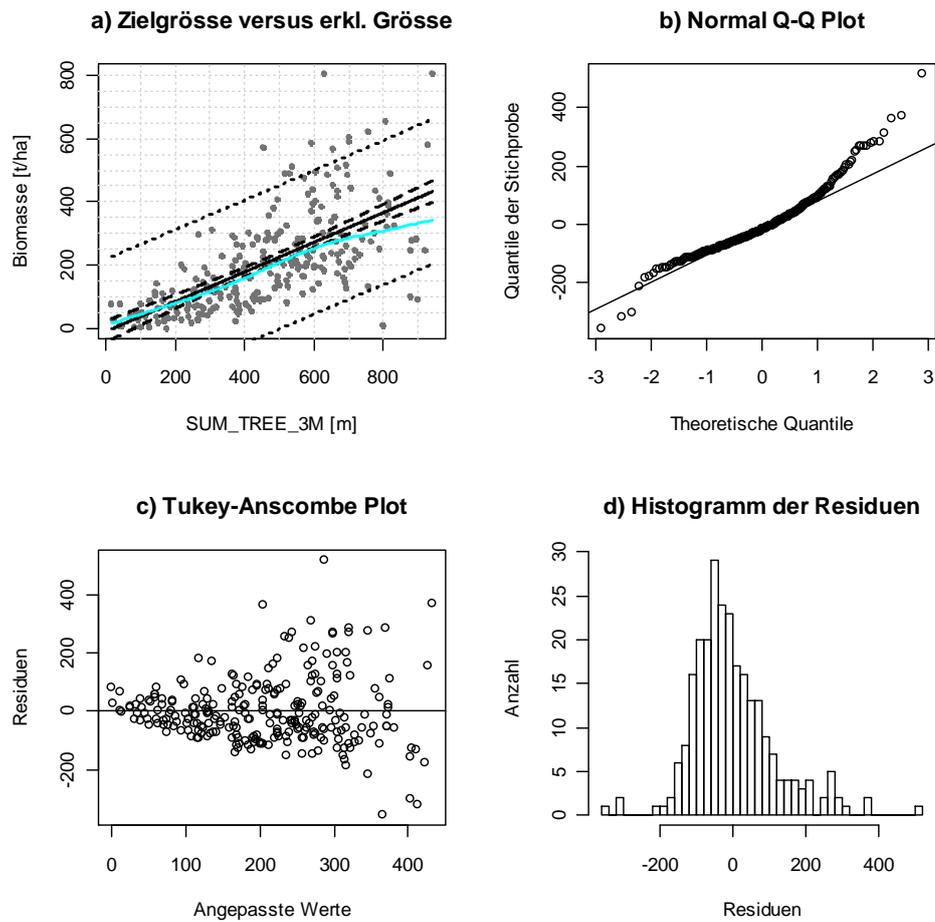


Abb. 31 Montane Laubbestände. Grafische Darstellung der einfachen Regressionsanalyse und der Residuenanalyse. a) Schwarze Linie: Regressionsgerade; gestrichelt: Vertrauensintervall; gepunktet: Vorhersageintervall; hellblaue Linie: nicht-parametrische Glättungsfunktion zur Visualisierung der Abhängigkeitsfunktion.

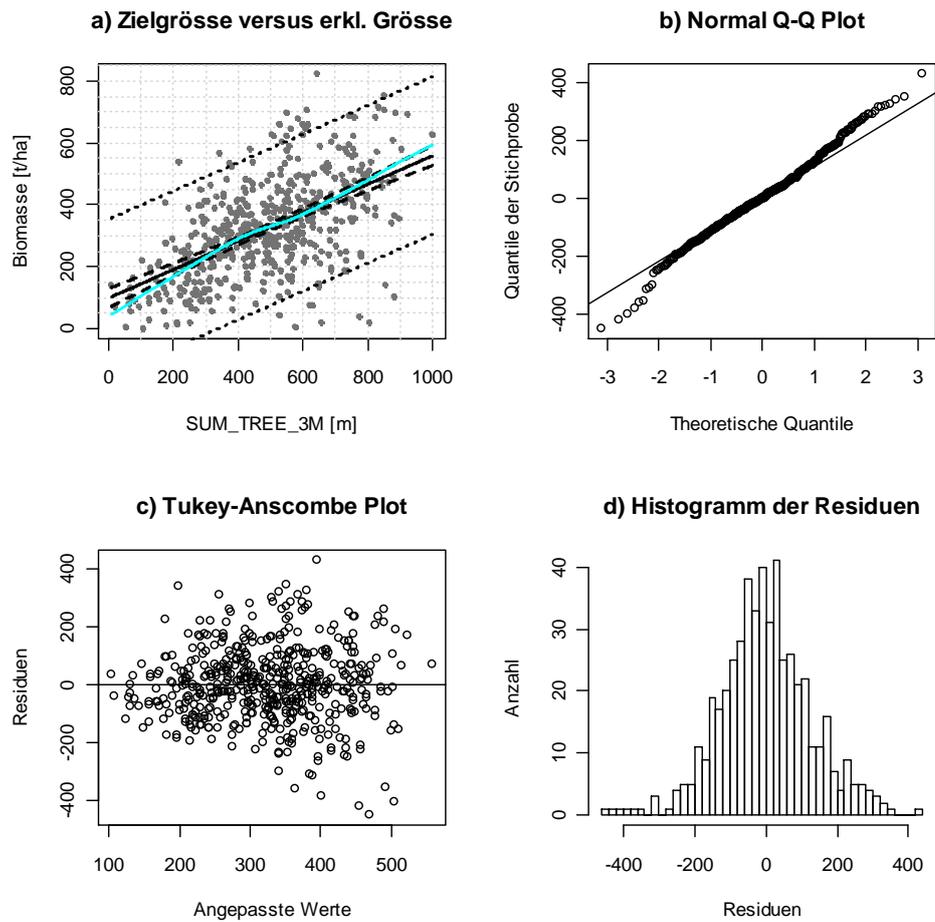


Abb. 32 Montane Nadelbestände. Grafische Darstellung der einfachen Regressionsanalyse und der Residuenanalyse. a) Schwarze Linie: Regressionsgerade; gestrichelt: Vertrauensintervall; gepunktet: Vorhersageintervall; hellblaue Linie: nicht-parametrische Glättungsfunktion zur Visualisierung der Abhängigkeitsfunktion.

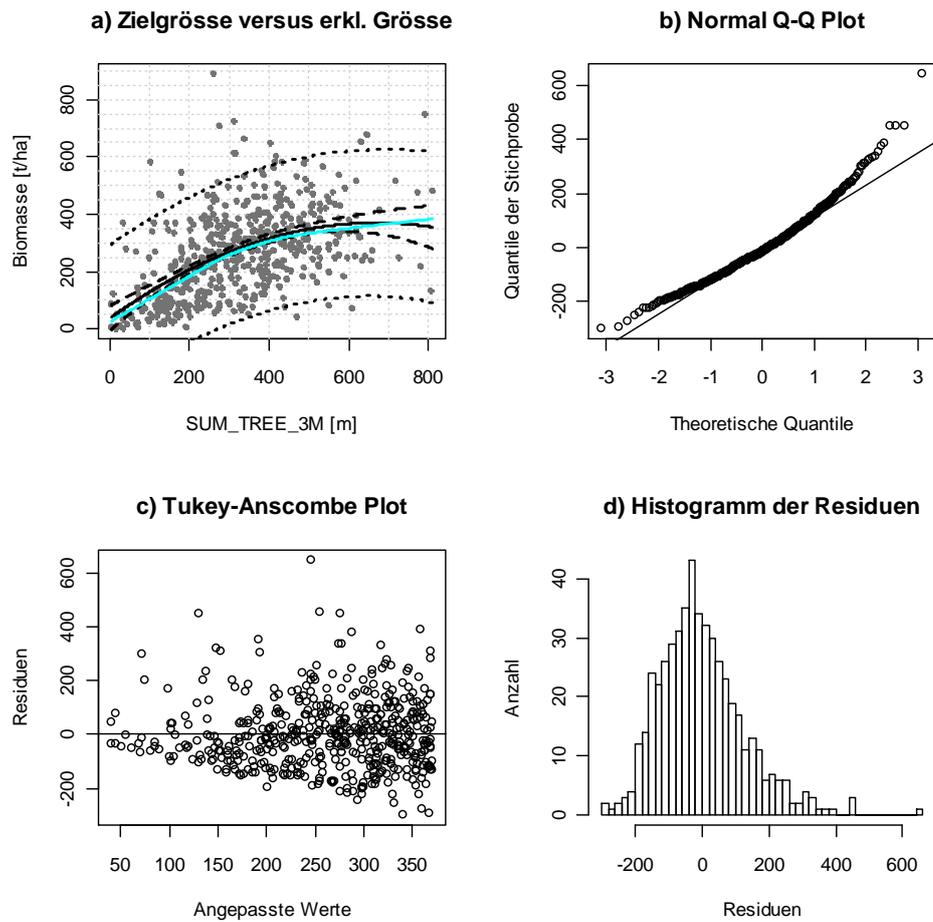


Abb. 33 Subalpine Nadelbestände. Grafische Darstellung der polynomischen Regressionsanalyse und der Residuenanalyse. a) Schwarze Linie: Regressionsgerade; gestrichelt: Vertrauensintervall; gepunktet: Vorhersageintervall; hellblaue Linie: nicht-parametrische Glättungsfunktion zur Visualisierung der Abhängigkeitsfunktion.

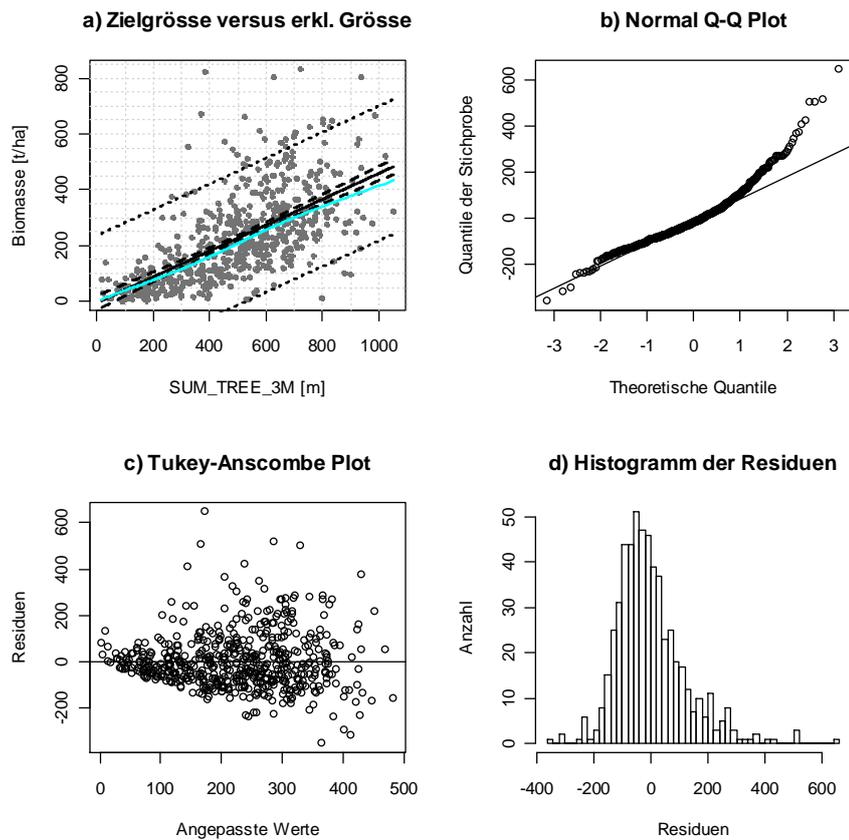


Abb. 34 Schweizerische Laubbestände. Grafische Darstellung der einfachen Regressionsanalyse und der Residuenanalyse. a) Schwarze Linie: Regressionsgerade; gestrichelt: Vertrauensintervall; gepunktet: Vorhersageintervall; hellblaue Linie: nicht-parametrische Glättungsfunktion zur Visualisierung der Abhängigkeitsfunktion.

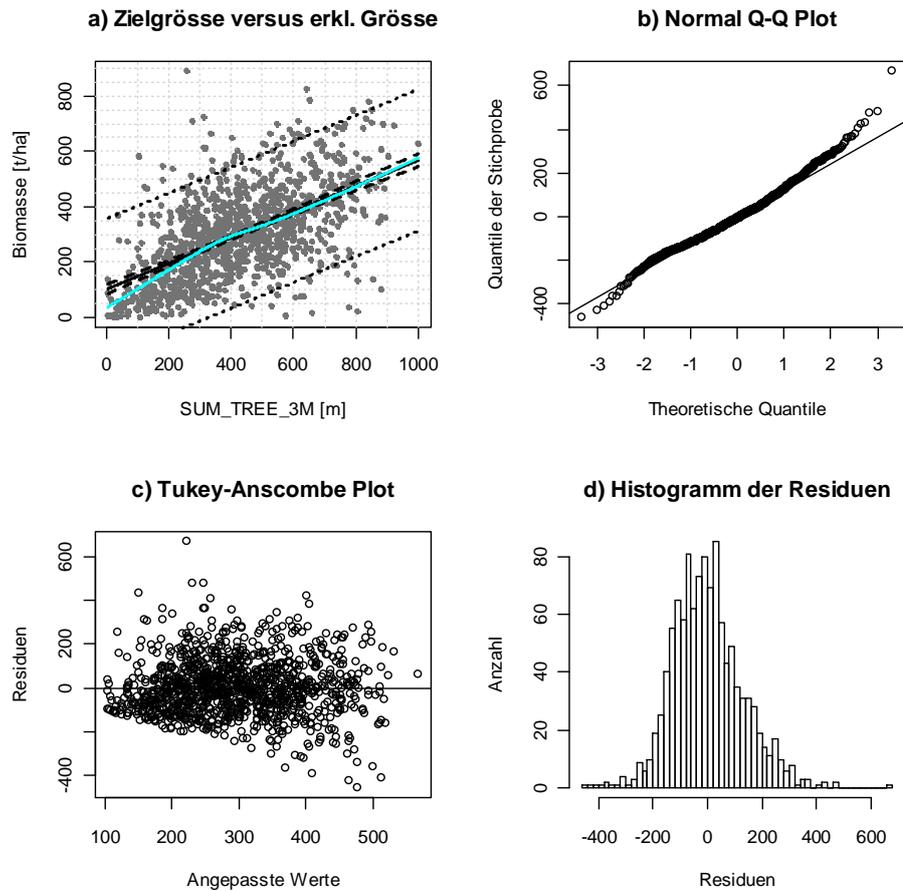


Abb. 35 Schweizerische Nadelbestände. Grafische Darstellung der einfachen Regressionsanalyse und der Residuenanalyse. a) Schwarze Linie: Regressionsgerade; gestrichelt: Vertrauensintervall; gepunktet: Vorhersageintervall; hellblaue Linie: nicht-parametrische Glättungsfunktion zur Visualisierung der Abhängigkeitsfunktion.

5.3.3 Modell Evaluation

Die Regressionsmodelle wurden zur Evaluation mit unabhängigen Daten aus einer noch unpublizierten Biomassestudie von Wyrsh und Camin verglichen²³. Die Daten zur Abschätzung der Biomasse ausserhalb des Waldes von Wyrsh und Camin wurden an 12 Orten in der Schweiz ausserhalb des Waldes erhoben. Die Biomasse wurde von Wyrsh und Camin auf Grund zwei verschiedener Methoden aus den von ihnen gemessenen Felddaten (hauptsächlich BHD) hochgerechnet. Die Vergleiche der Biomassenschätzungen dieser Studie mit den Resultaten von Wyrsh und Camin zeigen, dass die Resultate sich in einer ähnlichen Grössenordnung bewegen. Die maximale Abweichung ist $\pm 30\%$ der geschätzten Biomasse. Wyrsh. Der Vergleich zeigt aber auch die Schwierigkeiten auf, Biomasse im Feld zu messen, weil erstens die Tarife der Waldbäume für Nichtwaldbäume nur bedingt gelten (andere Wuchsform) und zweitens die Veränderungsrate im Nichtwaldareal viel grösser zu sein scheint als im Waldareal (nicht dargestellter Vergleich von Felderhebungen und älteren Luftbildern). Die beiden Geraden (blau und grün), welche die unterschiedlichen Methoden zur Berechnung der Biomasse darstellen, weichen mit zunehmender Biomasse voneinander ab. Nur eine mit grösserem Aufwand verbundene genauere Bestimmung der Biomasse ausserhalb des Waldes könnte Klarheit darüber geben, welche Berechnungsmethode näher an der Wirklichkeit liegt.

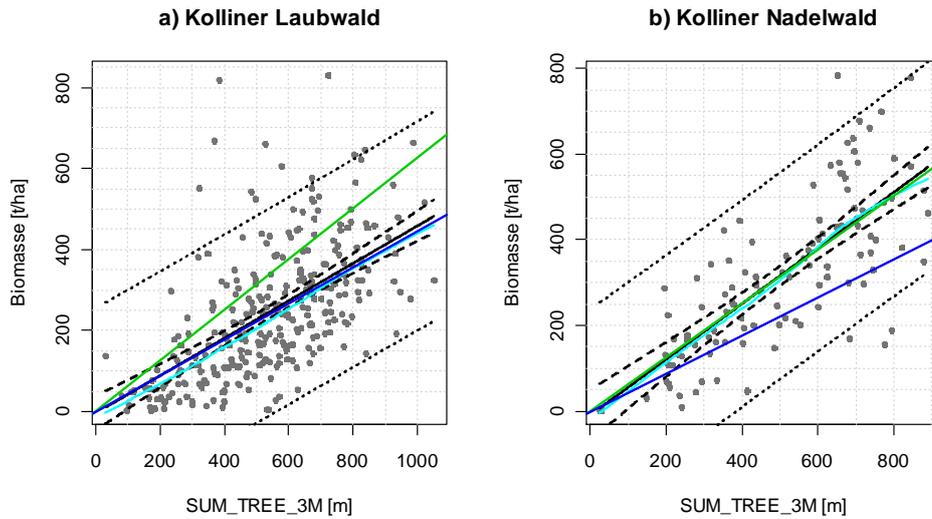


Abb. 36 Kolline Bestände. Validierung der Regressionsmodelle mit unabhängigen Daten von Wyrsh und Camin²³. Grüne und blaue Linien sind zwei verschiedene Methoden, Biomasse aus gemessenen Felddaten zu bestimmen; schwarze Linie: Regressionsgerade; gestrichelt: Vertrauensintervall; gepunktet: Vorhersageintervall; hellblaue Linie: nicht-parametrische Glättungsfunktion zur Visualisierung der Linearität.

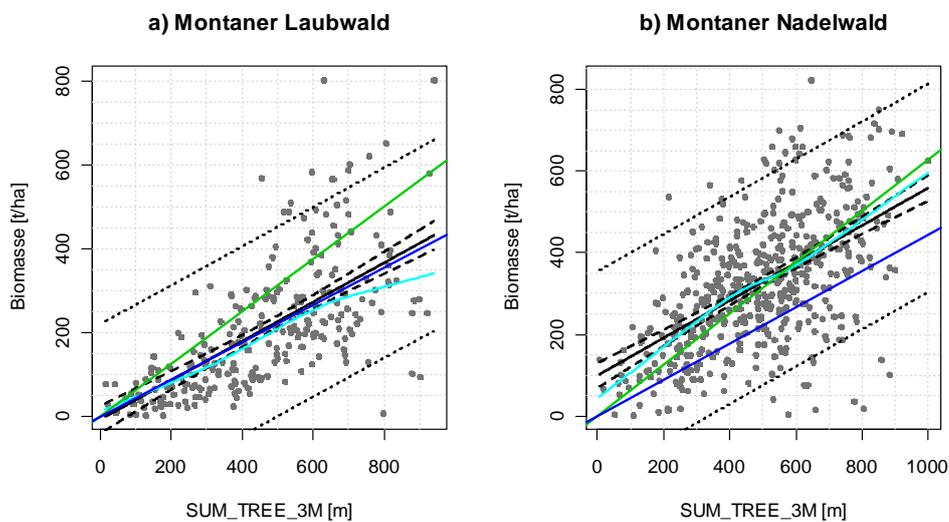


Abb. 37 Montane Bestände. Validierung der Regressionsmodelle mit unabhängigen Daten von Wyrsh und Camin^{Fehler! Textmarke nicht definiert.}. Grüne und blaue Linien sind zwei verschiedene Methoden, Biomasse aus gemessenen Felddaten zu bestimmen; schwarze Linie: Regressionsgerade; gestrichelt: Vertrauensintervall; gepunktet: Vorhersageintervall; hellblaue Linie: nicht-parametrische Glättungsfunktion zur Visualisierung der Linearität.

6 Diskussion

6.1 Erhöhte Repräsentativität

Bodenbedeckung beschreibt die physische Bedeckung der Erdoberfläche. Sie kann aus einem oder mehreren Landschaftselementen bestehen (Mathys et al. 2006¹¹). Oft sind mehrere Elemente als Mosaik präsent und nicht nur ein dominierendes Element, wie auch die Resultate aus dieser Untersuchung zeigen. Die Stichproben der LFI3 Luftbildinterpretation können diese Tatsache repräsentieren, indem sie nicht eine Hauptbodenbedeckungsklasse wie die AREA Stichproben beinhalten, sondern die kontinuierlichen Anteile der verschiedenen relevanten Bodenbedeckungen an der Stichprobe separat erfassen (engl. *fractional land cover*). Die LFI3 Luftbildstichproben sind deshalb auch geeignet, um den Baumdeckungsgrad (engl. *fractional tree cover*) für die Baumbiomassenschätzung innerhalb der verschiedenen Kyoto Klassen wiederzugeben.

Diese Methode ist repräsentativer, indem sie neu erlaubt Baumdeckungsgrade stratifiziert nach den Auswertungsstrata des THGI LULUCF Sektors auszuweisen und nicht nur basierend auf einem reduzierten Gebiet des Kantons Genf. Die praktische Umsetzung der Methode für das THGI ist kurzfristig möglich, da verbesserte stratifizierte Baumdeckungsgrade und Baumbiomasseschätzungen gemäss IPCC Guidelines Tier 1a (IPCC 2003⁸) vorliegen und in die entsprechenden Kategorien übernommen werden können. Im Sinne der Auswertungen für das Treibhausgasinventar ist es darum wichtig, dass die Stichprobendichte auch in der kontinuierlichen LFI Luftbildinventur genug hoch ist, um damit repräsentative Baumdeckungsgrade pro THGI Stratum schätzen zu können. Diese Methode basiert aber noch nicht auf einer flächendeckenden Datengrundlage und der Schätzer ist noch nicht spezifisch.

6.2 Flächendeckende Kartierung

Laserscanning ist eine flächenhafte Fernerkundungsmethode, welche ihre Stärken in der strukturellen Erfassung von Landschaftselementen hat (Hudak et al. 2009²⁶). Bäume und damit die Baumdeckungsgrade sind strukturgeprägte Landschaftselemente. Die Erfassung der Baumvegetation auf der Landschaftsebene ist daher gut möglich über Laserscanning, wie auch Resultate dieser Untersuchung bestätigen. Der kritische Schritt in der Baumerfassung ist die Unterscheidung von Bäumen und Nichtbäumen im digitalen Höhenmodell (DOM-DTM). Die Extraktion mittels TLM Bauten, d.h. vor allem Gebäude, Verkehrs- und Staubauten, ergab robuste Resultate. Dies war eigentlich erstaunlich, da in der jetzigen TLM-Version noch die meisten Geometrien aus VECTOR25 stammen. Gerade Gebäude haben dabei auf Grund der Landeskartenherkunft eine symbolische und damit vereinfachte Form. Bei einer räumlichen Rasterauflösung von 2 m ergibt dies oft

²⁶Hudak, A.T., Evans, J.S., Smith, A.M.S., 2009. LiDAR Utility for Natural Resource Managers. *Remote Sensing*, 1: 934-951.

einen Ring an Pixeln, welcher nicht von einer symbolhaften Gebäudefläche abgedeckt wird. Eine Erweiterung der Gebäudefläche um einen Puffer von 6 m gibt daher robustere, aber auch konservativere Resultate. Konservativ bedeutet, dass mit diesem Ansatz eher zuwenig als zuviele Bäume ausgewiesen werden, da der Puffer Bäume in Gebäudenähe wegmaskiert. Zukünftig wird es aber im TLM ein Gebäudedachdatensatz geben. Die räumliche Genauigkeit sollte es dann möglich machen, Gebäude direkt in der Prozessierungskette ohne weitere Pufferung zu maskieren und damit noch genauere Baumdeckungsgrade zu erzielen. In der Zwischenzeit gibt es die untersuchte Alternative, Nichtbaumobjekte über die Spektraleigenschaften zu extrahieren. Mathys (2010²⁷) zeigte, dass mit einem NDVI (engl. *normalized difference vegetation index*) gerechnet aus ADS40/80-Bildstreifen flächig gute Resultate erzielt werden können.

Bei der Evaluation der Erfassungsgenauigkeit sind die Eigenschaften der jeweiligen Datensätze miteinzubeziehen. Evaluiert wurde der basierend auf Laserscanning erfasste Baumdeckungsgrad mit den LFI3 Luftbildstichproben. Diese bestehen aus einer genesteten Stichprobe von 25 Punkten. Der Baumdeckungsgrad aus der LFI3 Luftbildstichprobe hat deshalb immer nur ein Vielfaches von 4 %. Im Gegensatz dazu basiert der Laserscanningdeckungsgrad auf 25 x 25 Rasterzellen, also quasi aus 625 genesteten Stichproben. Der Laserscanning basierte Baumdeckungsgrad ist darum viel repräsentativer und höher aufgelöst als der auf 25 Punkten basierte LFI3 Luftbildbaumdeckungsgrad.

Diese Methode ist repräsentativer und flächendeckend, indem sie neu erlaubt Baumdeckungsgrad automatisch flächendeckend und wie in Kapitel 6.1 stratifiziert nach den Auswertungsstrata des THGI LULUCF Sektors auszuweisen. Die praktische Umsetzung der Methode für das THGI ist stark abhängig von der zeitlichen Aktualisierung und räumlichen Kongruenz der digitalen Oberflächen- und Geländemodelle, respektive Spektral- und TLM-Daten. Bis jetzt gibt es je ein DTM und DOM bis 2'000 m. ü. M. Um Baumeigenschaften und Baumbiomasse über die Zeit flächig zu beobachten, ist eine regelmässige Aktualisierung der entsprechenden Modelle zwingend. Aus Sicht der Baum- und Biomassenerfassung wäre es zudem wünschenswert, wenn DTM, DOM, Spektraldaten und TLM mit der gleichen räumlichen und zeitlichen Auflösung vorhanden sind, also gleiche Aufnahmezeitpunkte haben. Nur dann können die Datensynergien genutzt und Bäume effektiv mit Hilfe von Spektral- oder TLM-Daten aus den Laserscanningmodellen extrahiert werden. Diese Methode verwendet aber noch nicht einen spezifische Schätzer.

²⁷Mathys, L., 2010. Erfassung Baummischungsgrad. Im Auftrag von swisstopo.

6.3 Spezifische Biomasseschätzung

Die aus den terrestrischen Aufnahmen des LFI3 abgeleiteten Baumbiomassen erlaubten es, spezifische Schätzer für eine schweizweite Biomasseschätzung im Nichtwaldareal herzuleiten. Dies weil die Kalibrierung der Modelle auf repräsentativen Schweizer Daten beruht und die Evaluierung mit unabhängigen Daten die richtige Grössenordnung aufzeigt. Dies ermöglicht eine spezifische Schätzung, im Gegensatz zu einem Schätzfaktor aus der Literatur (IPCC 2003⁸). Zudem kann mit dieser Schätzung überhaupt erst Biomasse ermittelt werden, denn der bisherige Ansatz basierte auf der Annahme, dass Biomasse dem 20-jährigen Wachstum eines Baumes entspricht, was eine sehr grobe Annahme ist.

Folgende Faktoren führten jedoch zu Unsicherheiten und sollten in einer weiterführenden Studie berücksichtigt werden.

Die in dieser Studie ermittelten Modelle, welche terrestrisch erhobene Biomassen auf Grund der Baumhöhen und Baumtypen (Laub- und Nadelbäume) aus dem Luftbild schätzten, weisen einen grossen Anteil an Unsicherheiten auf. Ein Teil der Unsicherheiten lässt sich mit Ungenauigkeiten der Daten erklären wie Fehler im DHM und Fehler der Interpreten. Zudem sind die Luftbilder fast immer um Jahre älter als die terrestrischen Erhebungen, was bei den beobachteten zeitlich schnellen Veränderung der Biomasse in der Landschaft zu erheblichen Unterschieden führen kann. Je grösser die Stichprobe ist, desto grösser ist diese Unsicherheit der Daten und desto kleiner wird im Schnitt auch das R^2 der Modelle. Der Vorteil von grossen Stichproben liegt aber ganz klar in der Vergrösserung der Repräsentativität. Die Gültigkeit eines empirischen Modelles kann verbessert werden durch eine repräsentative räumliche Abdeckung der Kalibrierdaten, welche diverse geographische Regionen abdecken (Lefsky et al. 2005²⁸).

Eine weitere Unsicherheit entsteht durch den Lagefehler der terrestrischen Stichproben. 460 terrestrische Proben von 2009 sind genau vermessen. 60 % sind besser als 5 m, 40 % sind schlechter als 5 m mit grossen Ausreissern (ca. 5 % bis 50 m). Wie in Hollaus et al. (2009²¹: Tabelle 4) beschrieben, vergrössert eine nicht exakte Übereinstimmung der Georeferenzierung die allgemeine Streuung und scheint somit das R^2 stark zu verkleinern. Dieses Problem wurde in dieser Studie durch das Weglassen aller Probeflächen mit Grenzstrukturen vermindert. Weiterführende Studien, zum Beispiel mit Laserdaten, könnten diesen Lagefehler vermeiden, indem sie die wahren Koordinaten der terrestrischen Daten berücksichtigen.

²⁸Lefsky, M.A., Hudak, A.T., Cohen, W.B. and Acker, S.A., 2005. Geographic variability in lidar predictions of forest stand structure in the Pacific Northwest. *Remote Sensing of Environment*, 95:532-548.

Formeln zur Schätzung des Schaftholzes anhand der BHD-Messung, welche im Wald kalibriert wurden (= Waldtarife), wurden für freistehende Gehölze verwendet, weil bisher keine anderen Grundlagen vorhanden sind. Dies ist aber bei freistehenden Gehölzen eine zu starke Vereinfachung und sollte durch die Schaffung von Nichtwald-Tarifen verbessert werden.

Eine weitere Unsicherheit ergibt sich durch die Kluppschwelle (= minimaler Brusthöhendurchmesser, den Bäume aufweisen müssen, damit sie bei der Messung erfasst werden) von 12 cm auf der Höhe von 1.3 m. Dadurch sind nicht alle Gehölze messbar (gestutzte, kleine Sträucher). Dieser Einfluss ist jedoch nur gering, das heisst, er macht nur ein kleiner Anteil am Holzvolumen aus. In der Studie von Wyrsh und Camin ⁽²³⁾ wurde eine Kluppschwelle von 5 cm untersucht. Laut deren Resultate machen die Bäume von 5 bis 12 cm rund 5 % der Biomasse aller Bäume über 5 cm aus. Mit einer Kluppschwelle von 12 cm entgehen der Messung also nicht viel mehr als 5 % der Biomasse.

7 Synthese

Baumbiomasse im Nichtwaldareal wurde bisher im Schweizer Treibhausgasinventar über eine Baumdeckungsgradstudie im Kanton Genf geschätzt.

Resultate aus der vorliegenden Untersuchung unterstützten die Haupthypothese, dass dieser methodische Ansatz nicht repräsentativ für gesamtschweizerische Verhältnisse ist und eine flächige, respektive spezifischere Baumbiomasse-schätzung möglich ist. Gleichzeitig zeigten die Resultate auch, dass mit den in der Schweiz landesweit verfügbaren Daten jetzt oder in naher Zukunft eine Verbesserung der Methode möglich ist (Abb. 38).

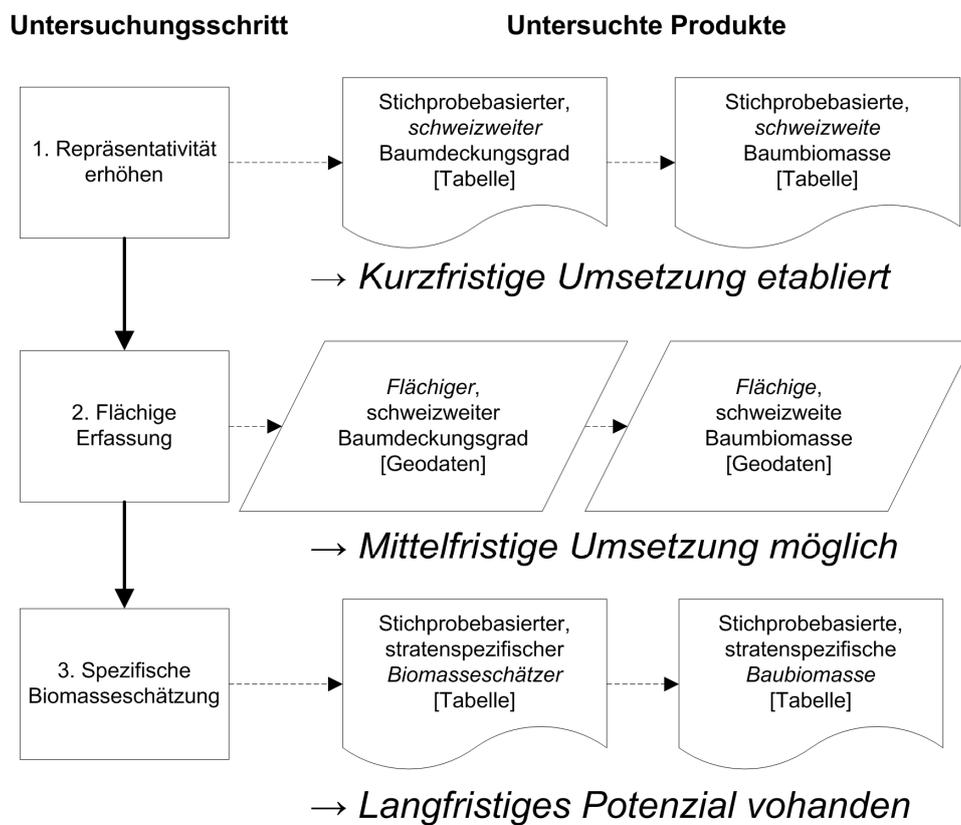


Abb. 38 Umsetzungsschritte mit den jeweiligen Tabellen und Geodaten als Produkte

Untersuchungen zu der LFI3 Bodenbedeckungsverteilung innerhalb von AREA Klassen zeigten, dass mit der LFI3 Luftbildinterpretation bereits jetzt ein adäquater Datensatz zur repräsentativen Baumdeckungsgradschätzung vorhanden ist. Baumdeckungsgrade können also für die relevanten Strata des Treibhausgasinventars geschätzt werden. Mit diesem Datensatz ist es aber noch nicht möglich, flächendeckend zu erfassen und spezifisch Biomasse herzuleiten.

Untersuchungen zu den Laserscanningdaten und TLM zeigen, dass diese Datenkombination den Baumdeckungsgrad effizient flächendeckend erfassen kann. Die Qualitätsmasse der Evaluation war hoch. Doch ist eine Verbesserung im Bereich des TLM möglich. Denn wir erhielten zwar ein TLM Datensatz. Dieser hatte aber noch die Geometrie und Inhaltstiefe von VECTOR25. Gerade bezüglich Hausdächern und Brücken lohnt es sich, das erste echte Release des neu aufgebauten TLMs abzuwarten. Der Baumdeckungsgrad und damit Biomasse kann flächendeckend geschätzt werden. Nur mit diesem Datensatz ist es aber noch nicht möglich, die Baumbiomasse spezifisch zu schätzen.

Untersuchungen zu einem spezifischeren Schätzer liegen in der richtigen Grössenordnung und böten eine Verbesserung gegenüber der momentan im THGI verwendeten Biomassewerte im Nichtwaldareal, weil man mit dem untersuchten Ansatz weg käme von der Annahme, dass sich Baumbiomasse alleinig aus dem Baumdeckungsgrad und einem Standardfaktor aus dem IPCC (2003⁸) herleiten lässt. Die Resultate zeigen aber auch die Limitation mit den jetzt verfügbaren Daten. Denn der Wald repräsentiert die Wuchsbedingungen von Bäumen im Siedlungsgebiet oder der Landwirtschaft nur bedingt. Um auch im Nichtwaldareal spezifische Baumbiomassen ausweisen zu können, wären Kalibrationsflächen oder sogenannte Weiserflächen im Nichtwaldareal unabdingbar. Denn im Waldareal gibt es dazu verschiedene Programme, welche die Wuchsleistung oder Wuchsbedingung von Bäumen beobachten. Entsprechende Programme fehlen aber im Nichtwaldareal. In Anbetracht der grossen Menge an Bäumen und Wuchsbedingungen ausserhalb des Waldes und dem damit verbundenen Senkenpotenzial wäre die Installation von Weiserflächen zur Kalibration wichtig.

Eine Umsetzung der verbesserten Biomassequantifizierung im Nichtwaldareal ist damit kurzfristig möglich nach der Methode mit LFI3 Bodenbedeckungsanteilen und AREA Landnutzungsklassen. Mittelfristig sollte es möglich sein, den stichprobepbasierten Baumdeckungsgrad durch einen flächendeckenden abzulösen, den methodischen Schätzansatz aber grundsätzlich noch zu behalten. Langfristig sollte aber eine spezifische Schätzung angestrebt werden (Abb. 39). Erst diese entspricht einer adequaten spezifischen Biomasseschätzung.

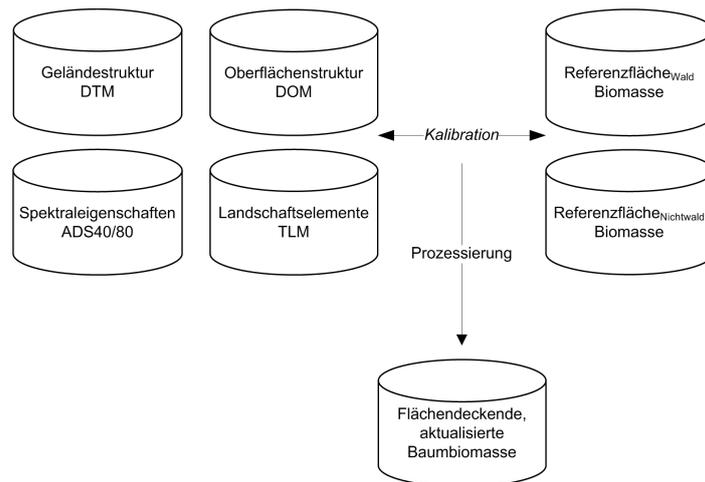


Abb. 39 Konzeptvorschlag einer flächendeckenden aktualisierten Baumbiomasseerfassung für die ganze Landschaft

8 Dank

Wir möchten uns bei Jürg Burkhalter vom Bundesamt für Statistik für die Spezialaufbereitung der AREA Daten und Christian Ginzler von der Eidg. Forschungsanstalt WSL für die Datenableitung der LFI3 Luftbilddaten bedanken. Zusätzlich sind wir dankbar für die kritischen Kommentare von Edgar Kaufmann, Christian Ginzler und Katharina Steinmann von der Eidg. Forschungsanstalt WSL, Christoph Könitzer von Sigmaphan und Andreas Schellenberger vom Bundesamt für Umwelt.

Anhang: Extended Summary

Switzerland is obligated to quantify CO₂ sources and sinks for predefined land use and land use change classes and report them in a greenhouse gas inventory. In forest areas, the Swiss National Forest Inventory can provide this information adequately. However, in non forest areas a significant lack of information exists.

This research project investigated strategies to overcome this lack of information in a stepwise manner. And results show that this goal can be achieved in three steps to enhance the spatial representation, provide area covering raw data and generate more specific estimates.

In short terms, tree biomass can already now be estimated for non forest areas in a more representative sample and stratified approach generally based on fractional tree cover. The photo interpretation of the Swiss National Forest Inventory does provide fractional tree cover data for the entire country, which can be overlaid with land use data to generate stratified tree cover estimates. Following the IPCC Guidelines Tier 1a (IPCC 2003⁸) tree biomass can then be estimated based on these tree cover estimates (see resulting table 7 and 8). This approach can be already now be implemented in the Swiss Greenhouse Gas Inventory.

In medium terms, tree biomass could be mapped area covering for non forest areas in an area and stratified approach generally based on fractional tree cover. Existing Laserscanning data cover a large proportion of Switzerland and were processed to generate robust and area covering fractional tree cover geodata. Following the IPCC Guidelines Tier 1a (IPCC 2003⁸) tree biomass can then be mapped area covering based on these tree cover geodata (see resulting figures 26 and 27). This approach can be implemented as soon as the input data for the processing chaing have been revised.

In long terms, there is great potential to quantify tree biomass for non forest areas in a stratified approach specifically based on tree type estimators. The terrestrial survey of the Swiss National Forest Inventory does provide tree biomass estimates for forest sample points, which were overlaid with the samples from the photo interpretation that cover forest and nonforest areas to calibrate specific regression models for deciduous and needle-leaved stands (see resulting models in table 10). This approach can be implemented best as soon as there are calibration areas for tree biomass available in nonforest areas.

Consecutively implementing these approaches will continuously improve the Swiss Greenhouse Gas Inventory and enable an active land management.