



# Entwicklung einer effizienten forstlichen Betriebsinventur

---

## Schlussbericht

**Kurztitel:** Entwicklung einer effizienten forstlichen Betriebsinventur

**Finanzierung:** Bundesamt für Umwelt BAFU, Fonds zur Förderung der Wald- und Holzforschung

**Projekt-Nr.:** 2015.01

**Referenz-Nr.:** REF-1011-85140

**Laufzeit:** 08/2015-12/2017

**Datum:** Mai 2018

**Autoren:** Bont, Leo Gallus; Bürgi, Anton; Hill, Andreas; Ene, Liviu Theodor; Pedolin, Dario; Thees, Oliver; Lemm, Renato; Lanz, Adrian

## **Impressum**

### **Kontakt:**

Dr. Leo Bont  
Eidg. Forschungsanstalt WSL  
Forstliche Produktionssysteme  
Zürcherstrasse 111  
CH-8903 Birmensdorf

### **Begleitgruppe:**

- Dr. Denise Lüthy, Christa Schmid (Amt für Landschaft und Natur, Kanton Zürich)
- Gerold Schwager (Kanton Thurgau)
- Robert Jenni (Kanton Freiburg)
- Raffael Bienz (Kanton Aargau)
- Christoph Hitz, Franziska Baumgartner (beide Basel)
- Dani von Büren (Kanton Solothurn)
- Dr. Christian Ginzler, Dr. Adrian Lanz, Dr. Renato Lemm, Dr. Oliver Thees (Eidg. Forschungsanstalt WSL)
- Dr. Christian Rosset (HAFL, Zollikofen)
- Werner Riegger (BAFU, , Fonds zur Förderung der Wald- und Holzforschung)

### **Zitierung:**

Bont, Leo Gallus; Bürgi, Anton; Hill, Andreas; Ene, Liviu Theodor; Pedolin, Dario; Thees, Oliver; Lemm, Renato; Lanz, Adrian, 2018: Entwicklung einer effizienten forstlichen Betriebsinventur. Schlussbericht an den Fonds zur Förderung der Wald- und Holzforschung. Birmensdorf, Eidg. Forschungsanstalt WSL. 138 S + Anhang.

### **Unser Dank gilt:**

- dem Bundesamt für Umwelt BAFU und dem Fonds zur Förderung der Wald- und Holzforschung für die finanzielle und ideelle Unterstützung dieses Projektes,
- den oben genannten Mitgliedern der Begleitgruppe für ihr Engagement und ihren wertvollen fachlichen Input,
- Dr. Christian Ginzler, Jonas Stillhard für die Aufarbeitung und Bereitstellung von Geodaten, die Beratung im Umgang mit Geodaten, sowie für die Vermessung der Stichprobenmittelpunkte mit DGPS

## Zusammenfassung

Die grösser werdenden Forstbetriebe, die steigenden Ansprüche an die Versorgung mit erneuerbaren Ressourcen, aber auch die zunehmenden gesellschaftlichen Ansprüche an den Wald als Ökosystem, Erholungsraum und Schutzwald stellen hohe Anforderungen an die forstliche Planung und das Controlling. Voraussetzung für deren Qualität und Zweckmässigkeit ist eine genügend genaue Erfassung und Bewertung der vorhandenen Ressourcen dort, wo die Bewirtschaftung tatsächlich stattfindet, nämlich auf der Bestandes- resp. Behandlungseinheitsebene.

Betriebsinventuren basieren in der Schweiz traditionell auf Kontrollstichproben (KSP). Diese werden aufgrund der hohen Kosten heute aber nur noch in wenigen Kantonen angewandt. Die Betriebsinventur ist in der Schweiz in den letzten 30 Jahren, im Gegensatz zu den nationalen und regionalen Inventuren, vernachlässigt worden. Abgesehen von ein paar wenigen, auf privater Basis lancierten Ansätzen sind weder die Methoden noch die IT-Mittel (Software) weiterentwickelt worden. Zugleich hat sich die Technik in den letzten Jahr rasant weiterentwickelt. Fernerkundungsdaten, insbesondere LiDAR (Laserscanning) Daten, Satellitenbilder oder auch flächendeckende Vegetationshöhenmodelle sind für viele Gegenden mittlerweile günstig, zum Teil sogar frei verfügbar. Auch hat sich die Software rasant weiterentwickelt, für räumliche statistische Auswertungen gibt es einige gute Lösungen, darunter auch Open-Source Tools.

Insbesondere die steigende Bedeutung erneuerbarer Ressourcen hat dazu geführt, dass Betriebsinventuren wieder eine grössere Bedeutung zukommt. Es liegt deshalb nahe, mit den bisherigen Inventurverfahren und den neuen zur Verfügung stehenden technischen Mitteln eine neue effiziente Methode zur Datenbeschaffung im Forstbetrieb zu entwickeln, als Grundlage für die Planung und das Controlling im Forstbetrieb. Um diesen Zweck zu erreichen, müssen die Daten bestandesweise und in einer sinnvollen Genauigkeit vorliegen, und sie müssen den Betriebsleitern in einer Form zur Verfügung gestellt werden, in der sie auch angewendet werden können.

Im vorliegenden Projekt „Entwicklung einer effizienten forstlichen Betriebsinventur“ wurden die methodischen Grundlagen für die Entwicklung einer praxisgerechten Lösung der betrieblichen Inventur erarbeitet. Das ganze Projekt wurde in mehrere Arbeitspakete aufgeteilt:

- A.) Definition und Festlegung der notwendigen und relevanten Entscheidungen und Merkmale
- B.) Sammlung bereits vorhandener Methoden, Tools, Systeme und Formate
- C./D.) Entwicklung von effizienten kombinierten Verfahren aus terrestrischer Inventur, Fernerkundung und weiteren Informationen, sowie Anwendung an Fallbeispielen
- E.) Entwicklung eines modularen Gesamtkonzeptes für eine zukünftige Betriebsinventur

In Teil A wurde auf möglichst objektive Weise hergeleitet, welche Ebenen der Informationsnachfrage existieren und welche Informationsbedürfnisse die verschiedenen Ebenen haben. Daraus wurde ein Katalog für Waldbau- und Waldnutzungsparameter abgeleitet. Es wurde angestrebt, den Katalog möglichst frei von subjektiven Einflüssen zu halten, was bei dieser Fragestellung jedoch aufgrund verschiedener Gründe nicht komplett möglich war. Trotzdem bietet der hergeleitete Parameterkatalog eine Hilfe für die Planung von Inventuren.

In Teil B ging es darum vorhandene Methoden, Tools, Systeme und Formate zu sammeln und zu analysieren. Um einen Überblick über existierende Systeme und Tools zu erhalten wurde eine Umfrage unter allen Waldplanungsspezialisten der Kantone durchgeführt. Das Fazit der Umfrage ist folgendes: Jeder Kanton hat seine eigene Lösung und es existieren keine einheitlichen Standards. Unter den Schnittstellen sind nur wenige proprietären Formate vorhanden, was grundsätzlich einen guten Datenaustausch und eine Einbindung in bestehende und künftige Systeme ermöglichen sollte. Im Weiteren wurden zukunftsweisende mitteleuropäische und nordische Inventurkonzepte, welche Fernerkundungsdaten mit terrestrischer Information verknüpfen, vorgestellt und diskutiert. Auch wurde ein Überblick über bereits vorhandene Tools für die Aufarbeitung von Fernerkundungsdaten und die Auswertung von kombinierten Inventuren (terrestrische Aufnahme und Fernerkundungsdaten) gegeben.

Im Teil C wurde ein kombiniertes Verfahren aus terrestrischen Stichproben, Fernerkundungsdaten und weiteren Informationen vorgestellt und an Fallbeispielen Glâne-Farzin (FR) und Bremgarten (AG) getestet. Das Vorgehensprinzip kann folgenderweise kurz zusammengefasst werden. Bei den terrestrischen Stichprobenkreisen werden Hilfsinformationen mit den Werten der Zielgrößen aus der terrestrischen Aufnahmen verglichen. Daraus wird ein Regressionsmodell abgeleitet, welches gebraucht wird um für weitere Stichprobenpolygone (ohne terrestrische Aufnahmen) Schätzungen der Zielgrösse abzuleiten. Diese Schätzung wird dann entweder in Kombination mit der terrestrischen Schätzung verwendet (Modellunterstützte Schätzung) oder allein als Schätzer verwendet (Modellbasierte Schätzung). Letzteres wird gebraucht um Karten, Bestandesschätzungen oder Kleingebiete mit nur sehr wenigen oder keinen Stichproben zu rechnen, ersteres um Schätzer für ganze Betriebe oder Kleingebiete mit ausreichend vielen Stichproben zu erhalten. Für die Zielgrößen Vorrat, Grundfläche und Stammzahl konnte durch die vorgestellten Verfahren die Effizienz der Inventur verbessert werden. Auch konnten zuverlässige Schätzungen für Bestände gemacht werden. Geht man davon aus, dass Fernerkundungsdaten günstig zu haben sind, einige Kantone stellen diese kostenlos zur Verfügung, und die Auswertung in Zukunft grösstenteils automatisiert werden kann, so macht es wirtschaftlich Sinn die beschriebenen Methoden zu implementieren.

Die Grundprinzipien einer Betriebsinventur wurden in Teil D vorgestellt. Die zentralen Punkte sind: [I] Fernerkundungsdaten verwenden, [II] Fernerkundungsdaten und terrestrische Informationen möglichst synchron aufnehmen, [III] Stichproben Aufnahmen mit der Methode der konzentrischen Kreise ausführen und [IV] Stichprobenmittelpunkte präzise vermessen. Zudem wurde ein Gesamtkonzept entworfen für eine benutzerfreundliche Umsetzung der durch Fernerkundungsdaten unterstützten Betriebsinventur. Da mit einer weitgehenden Automatisierung nicht ein Maximum an Präzision aus den Daten herausgeholt werden kann, ohne Automatisierung die Auswertung jedoch für einige Benutzer zu kompliziert sein dürfte, wurden 2 verschiedene Umsetzungen vorgeschlagen: Eine modulare und eine automatisierte Lösung. Die automatisierte Lösung basiert auf vordefinierten robusten Modellen, welche vertieft diskutiert wurden.

## Inhalt

Zusammenfassung.....	3
Teil A: Definition und Festlegung der notwendigen und relevanten Entscheidungen und Merkmale...	9
1 Problem .....	9
2 Ziele .....	9
3 Übersicht Informationsbedarf.....	9
3.1 Parameterkatalog.....	11
3.2 Informationsbedarf Controlling.....	12
3.2.1 International.....	14
3.2.2 Government .....	16
3.2.3 Betrieb .....	19
3.2.4 Nais - Nachhaltigkeit und Erfolgskontrolle im Schutzwald.....	22
3.2.5 Planung im Gebirgswald.....	23
3.3 Informationsbedarf Operationell .....	24
3.3.1 Betrieb.....	25
3.3.2 Management Tools.....	30
3.4 Runder Tisch .....	31
3.5 Synthese Parameterkatalog .....	32
4 Bedeutung der einzelnen Parameter .....	34
4.1 Ergebnisse .....	37
5 Anforderungen an die Parameter .....	40
5.1 Maximaler Fehler .....	40
5.1.1 Metrik .....	40
5.1.2 Maximal zulässiger Fehler .....	41
5.2 Tiefe der räumlichen Auflösung .....	41
5.2.1 Methodik .....	41
5.2.2 Wünschenswerte räumliche Auflösung der einzelnen Parameter .....	43
5.3 Aktualität .....	44
6 Diskussion.....	46
Teil B: Sammlung bereits vorhandener Tools, Systeme und Formate .....	47
1 Ziele .....	47
2 Umfrage an die Kantone .....	47

2.1	Fragen.....	47
2.2	Antworten .....	48
2.3	Feldaufnahmen .....	51
2.4	Fazit .....	51
3	Inventur Konzepte (Stichproben Design) .....	52
3.1	Globale Schätzmethoden .....	52
3.1.1	Einphasige Stichproben .....	52
3.1.2	Zweiphasige Stichproben .....	53
3.1.3	Dreiphasige Stichproben .....	53
3.2	Kleingebietsschätzungen.....	53
3.2.1	Direkte Kleingebietsschätzer (Direct Small-Area Estimators) .....	54
3.2.2	Modellunterstützte Kleingebietsschätzer (Model assisted).....	54
3.2.3	Synthetische Kleingebietsschätzer (Synthetic Small-Area Estimators / Model based). .....	54
4	Tools .....	55
4.1	Datenprozessierung .....	55
4.2	Datenauswertung.....	55
4.3	Weiterführende Tools für Entscheidungsprozesse (Relevante Management Tools der HAFL und der WSL) .....	56
4.4	Lizenzbedingungen und Kontaktadressen der Tools.....	59
5	Methoden / Beispiele .....	60
5.1	2 phasige Stichprobeninventur in Niedersachsen.....	60
5.2	Betriebsinventur in Baden-Württemberg .....	61
5.3	Skandinavien, insbesondere Norwegen.....	61
6	Schnittstellen.....	62
Teil C & D: Entwicklung von effizienten kombinierten Verfahren aus terrestrischer Inventur, Fernerkundung und weiteren Informationen & Fallbeispiele.....		63
1	Problem / Ziele .....	63
2	Konzept.....	63
3	Prozessieren der LiDAR Rohdaten.....	66
3.1	LiDAR: Grundlagen und Datenaufnahme .....	66
3.2	Normalisieren der LiDAR Rohdaten und Berechnen eines Vegetationshöhenmodells .....	68
3.3	Qualitätskontrolle.....	73
4	Polygone für die Hilfsvariablen .....	73
5	Berechnung der Hilfsvariablen .....	76

5.1	Hilfsvariablen aus dem Vegetationshöhenmodell .....	76
5.2	Kombinierte Hilfsvariablen aus dem Vegetationshöhenmodell und weiteren Rastern. ....	78
5.3	Hilfsvariablen aus den LiDAR-Rohdaten.....	79
5.4	Weitere Hilfsvariablen.....	83
6	Stichprobenaufnahmen.....	83
6.1	Lagegenauigkeit der Stichproben.....	83
6.2	Zeitliche Übereinstimmung der Hilfsvariablen mit den terrestrischen Stichproben .....	85
6.3	Stichprobendesign.....	85
7	Auswertung der terrestrischen Stichprobendaten und Standardisierung.....	85
7.1	Lokale Dichte .....	85
7.2	Struktur der Stichprobendaten .....	86
7.3	Standardisierung .....	88
7.4	Ausgabe .....	89
8	Modellbildung .....	90
8.1	Einfache lineare Regression .....	90
8.2	Multiple lineare Regression.....	91
8.3	Bewerten eines Modells.....	91
8.4	Diskussion einiger besonderer Aspekte der Modellierung .....	92
9	Schätzer (ein- und zweiphasige).....	94
10	Karten & Bestandesschätzungen.....	96
11	Fallbeispiele .....	98
11.1	Eigenschaften der Testgebiete und Rohdaten .....	98
11.2	Verwendete Modelle.....	103
11.3	2-Phasige Schätzung.....	106
11.4	Karten und Bestandesschätzungen .....	115
11.5	Fazit der Fallstudien .....	119
12	Diskussion.....	120
Teil E: Entwurf eines modularen Gesamtkonzeptes .....		121
1	Ziel .....	121
2	Grundprinzipien einer neuen Betriebsinventur .....	121
3	Konzept.....	121
4	Modulare Lösung.....	123
5	Automatisierte Lösung .....	125
5.1	Robuste Modelle .....	126

5.1.1	Methode .....	126
5.1.2	Resultate.....	127
5.1.3	Fazit .....	130
5.2	Parametrisierung der robusten Modelle.....	130
6	Implementation / Softwarelösung .....	131
7	Inventur ohne Stichproben .....	132
8	Diskussion.....	133
	Literaturverzeichnis.....	134
	Anhang .....	138



## Teil A: Definition und Festlegung der notwendigen und relevanten Entscheidungen und Merkmale

### 1 Problem

Die traditionelle Betriebsinventur basiert auf Informationen aus Luftbild, terrestrischen Stichproben und gutachtlicher Einschätzung. Neue Möglichkeiten der Fernerkundung haben in den letzten Jahren im Bereich Waldinventur Einzug gehalten: LiDAR oder Spektral- /Satellitendaten. Es stellt sich daher die Frage, wie man unter dem Einbezug der neuen Technologien die Inventur effizienter gestalten kann. Um diese Frage zu beantworten, müssen zuerst die Bedürfnisse auf verschiedenen Management-Stufen analysiert werden.

Es stellt sich dabei die Frage: Auf welcher Stufe werden welche Informationen in welcher Genauigkeit und in welcher räumlichen und zeitlichen Auflösung benötigt?

Um eine Inventur effizient durchzuführen, sollen Synergien ausgenutzt werden. D.h., für die Informationsbeschaffung auf einer Ebene ist zu prüfen, ob diese Informationen auf anderer Ebene ebenfalls nachgefragt werden und diese verwendet werden können. Es ist beispielsweise denkbar, dass Daten von Nationalen Inventuren als Grundlage für Betriebsinventuren verwendet werden können.

### 2 Ziele

In diesem Arbeitspaket geht es darum den Informationsbedarf an Waldbau und Waldnutzungs-Parametern aufgrund von objektiven Kriterien nachvollziehbar herzuleiten und zu gewichten. Dieses umfasst:

- Aufzeigen der verschiedenen Ebenen der Informationsnachfrage sowie der einzelnen Informationsnachfrager.
- Zeigen des Informationsbedürfnis der verschiedenen Informationsnachfrager, insbesondere der Betriebe.
- Erarbeiten eines Parameterkataloges an Waldbau- und Waldnutzungs-Parametern, der für jeden Parameter die Wichtigkeit, die geforderte räumliche Auflösung, den zulässigen Fehler sowie die nötige Aktualität aufzeigt.

### 3 Übersicht Informationsbedarf

#### Indikator oder Parameter?

Informationsbedürfnisse sind oft als Indikatoren formuliert. Die Bedeutung des Worts Indikator ist in der Literatur nicht eindeutig definiert. Am geläufigsten ist die Definition von Heink und Kowarik (2010): „Ein Indikator in Ökologie- und Umwelt-Planung ist eine Komponente oder eine Messung eines umweltrelevanten Phänomens, welches gebraucht wird um Zustände oder Veränderungen aufzuzeigen oder um Ziele zu definieren.“ In unserer Studie geht es darum aufzuzeigen, welche Größen in zukünftigen Inventuren zu erheben sind. Diese Größen passen dabei nicht in das Konzept eines Indikators. Zum Beispiel ist der Wert „Baumart“ an sich selbst kein Indikator, sondern ein

Parameter. Ein Indikator, der sich aus Baumart ableitet, wäre zum Beispiel der Anteil oder der Vorrat an Fichten. Wir sprechen daher in diesem Bericht von **Parametern**.

Der Informationsbedarf an Waldbau- und Nutzungs- Parametern und Kenngrößen kommt von verschiedenen Seiten. Die erste Unterscheidung wird gezogen nach dem Zweck der Information: für den **operationellen** Einsatz oder für das **Controlling**. Die Anforderungen an Informationen, welche für operationelle Zwecke verwendet werden sollen, unterscheiden sich von denen, die nur für das Controlling gebraucht werden. Abbildung 1 gibt einen Überblick über verschiedene Ebenen der Informationsnachfrager.

**Operationell:** Beim operationellen Prozess geht es um die Steuerung des Betriebes durch Budgetverwaltung und entsprechender operativer Feinplanung, bezogen auf das laufende Geschäftsjahr oder das Tagesgeschäft. Unter operationellem Informationsbedarf verstehen wir die Informationen, die für die Betriebsleitung / Betriebsführung gebraucht werden, also für das Geschäftsjahr oder das tägliche Geschäft. Diese Informationen sollten aktuell gehalten werden und benötigen in der Regel eine räumlich explizite Auflösung. Operationelle Informationen sollten in der Regel zuverlässige Aussagen auf Stufe des einzelnen Bestandes möglich machen.

**Controlling:** Unter Controlling verstehen wir das strategische Controlling des Betriebs und das Controlling von übergeordneten Stufen wie Bund, Kantone oder internationale Organisationen. Das strategische Controlling des Betriebs baut neue Potentiale für den Betrieb auf, dient als strategische Steuerung und hat hier auch eine Warnfunktion. Das Controlling aus übergeordneten Stufen (auch Monitoring genannt) umfasst die unmittelbare systematische Erfassung, Beobachtung oder Überwachung eines Vorgangs. Dabei ist die wiederholte regelmässige Durchführung ein zentrales Element, um anhand von Vergleichen Schlussfolgerungen ziehen zu können. Eine Funktion des Monitorings besteht darin, bei einem beobachteten Ablauf bzw. Prozess steuernd einzugreifen, sofern dieser nicht den gewünschten Verlauf nimmt bzw. bestimmte Schwellenwerte unter- bzw. überschritten werden. Controlling-Informationen müssen keine Aussagen auf Ebene Bestand zulassen, sondern Kennzahlen auf Stufe Betrieb oder übergeordnet liefern.

Nachfolgend ist ab und zu von **Bestand** die Rede. Als Bestand versteht man ein Baumkollektiv, das in Bezug auf Baumartenzusammensetzung, Alter und Aufbau  $\pm$  einheitlich ist. Dieses gilt in befahrbarem Gelände als Behandlungseinheit. Im Gebirge oder in stufig aufgebauten Wäldern spricht man nicht von Beständen, sondern nur von Behandlungseinheit, da hier auch bestandesübergreifend eingegriffen wird. Ist nachfolgend die Rede von Bestand, kann man dies auch durch Behandlungseinheit ersetzen.

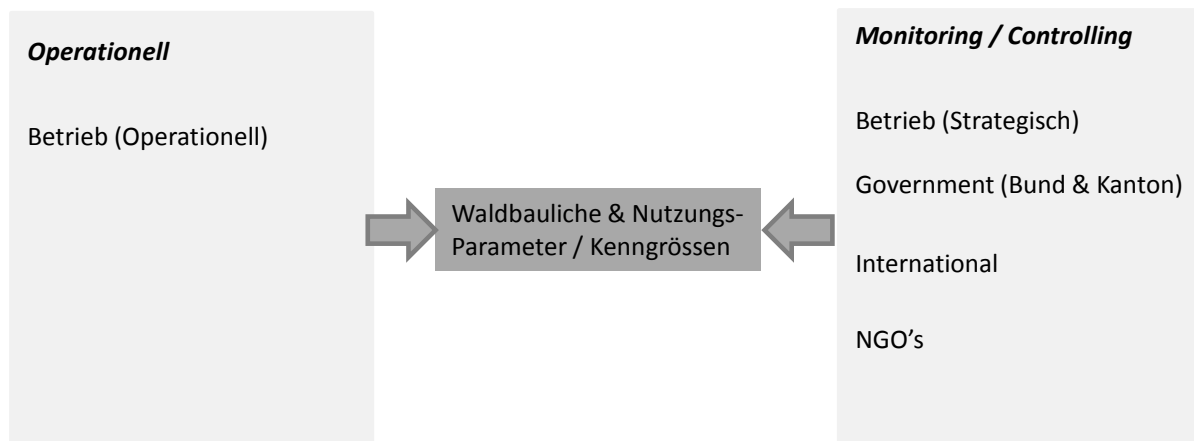


Abbildung 1: Ebenen der Informationsnachfrager für Waldbau- und Nutzungs- Parameter und Kenngrößen

Nachfolgend analysieren wir den Informationsbedarf für die Stufe Operationell, wie auch für die Stufe Controlling. Es wird im Einzelnen gezeigt, welche wichtigen Informationsquellen einfließen und welche Parameter diese umfassen. Als Synthese wird ein Parameterkatalog gebildet.

### 3.1 Parameterkatalog

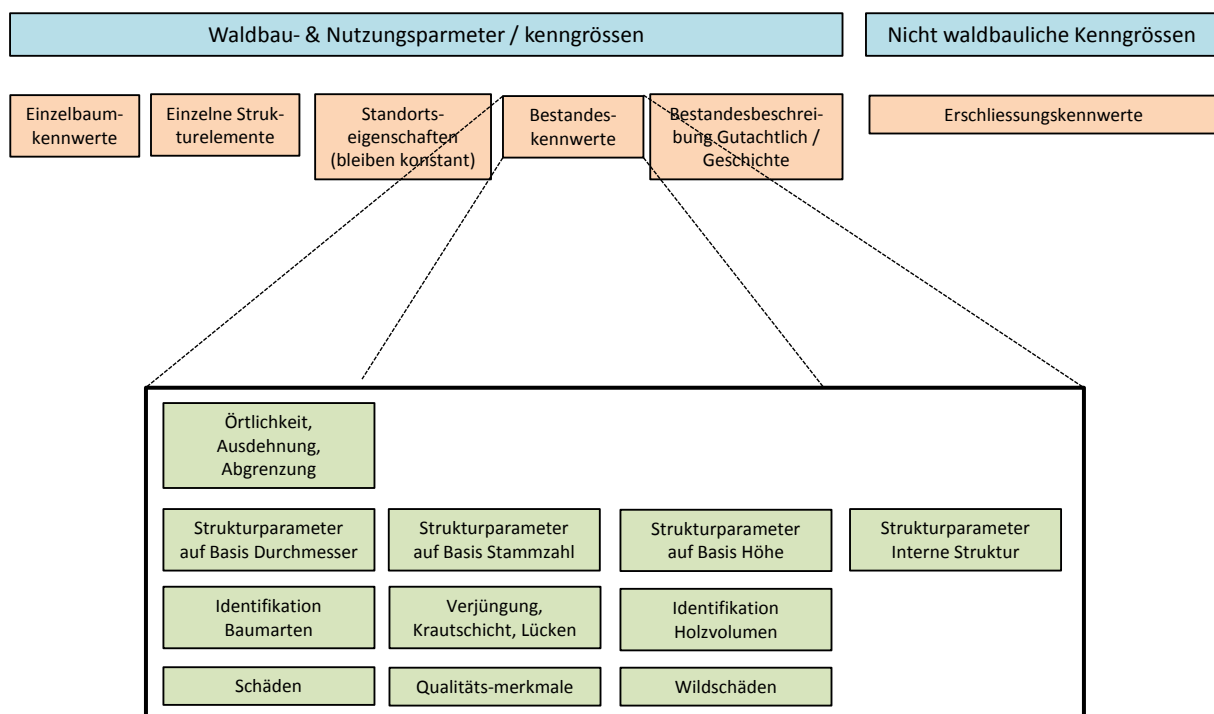


Abbildung 2: Struktur des Parameterkataloges

Der Parameterkatalog ist wie in Abbildung 2 dargestellt strukturiert. Eine erste Aufteilung erfolgt in Waldbau- und Nutzungsparameter / -kenngrößen (WaNu) sowie in nicht waldbauliche Kenngrößen, welche Kennwerte zur Erschliessung beinhalten. Das zentrale Element des WaNu - Parameterkataloges bilden die Bestandeskennwerte, diese sind aufgeteilt in 11 Unterkategorien. Weitere Elemente des WaNu-Parameterkataloges sind Einzelbaumkennwerte, einzelne Strukturelemente, Standortseigenschaften und „Bestandesbeschreibung gutachtlich / Geschichte“

Die einzelnen Kategorien des Parameterkataloges haben folgende Eigenschaften:

Entwicklung einer effizienten forstlichen Betriebsinventur

Kategorie	Terrestrisch, zerstörungsfrei messbar? [ja / nein]	Eigenschaften ändern sich laufend? [ja / nein]
Einzelbaumwerte	Ja	Ja
Einzelne Strukturelemente	Ja	Ja
Standortseigenschaften	Ja	Nein
Bestandeskennwerte	Ja	Ja
Bestandesbeschreibung Gutachtlich / Geschichte	Nein	Ja & Nein

Im Parameterkatalog sind alle Parameter der im vorherigen Abschnitt erwähnten Kategorien gesammelt, die in den Informationsquellen gefunden wurden. Es wurde darauf geachtet, dass die Parameter auch messbar sind. Allgemein formulierte oder nicht messbare Werte wurden nicht aufgenommen, wie z.B. „Nachhaltigkeit“, oder wurden zuerst konkretisiert. Ebenso wurden nur objektive Parameter aufgenommen, subjektive Grössen wie beispielsweise „Verjüngungsdringlichkeit“ oder „Durchforstungsanfall“ wurden nicht aufgenommen.

Es stellt sich hier die Frage, warum Bestandeskennwerte (Behandlungseinheit) im Parameterkatalog aufgenommen werden, wenn ebenso Einzelbaumwerte vorhanden sind und diese im Prinzip präzisere Aussagen machen. Bestandeskennwerte werden aus folgenden Gründen aufgenommen: In der waldbaulichen Tradition haben sich Bestandeskennwerte eingebürgert. Diese sind zwar zum Teil weniger präzise, als auf Einzelbaumdaten basierende Werte, genügend jedoch häufig für die waldbauliche Praxis und decken die Informationsnachfrage des Bewirtschafters ab. Der vollständige Parameterkatalog ist im Anhang beschrieben.

### 3.2 Informationsbedarf Controlling

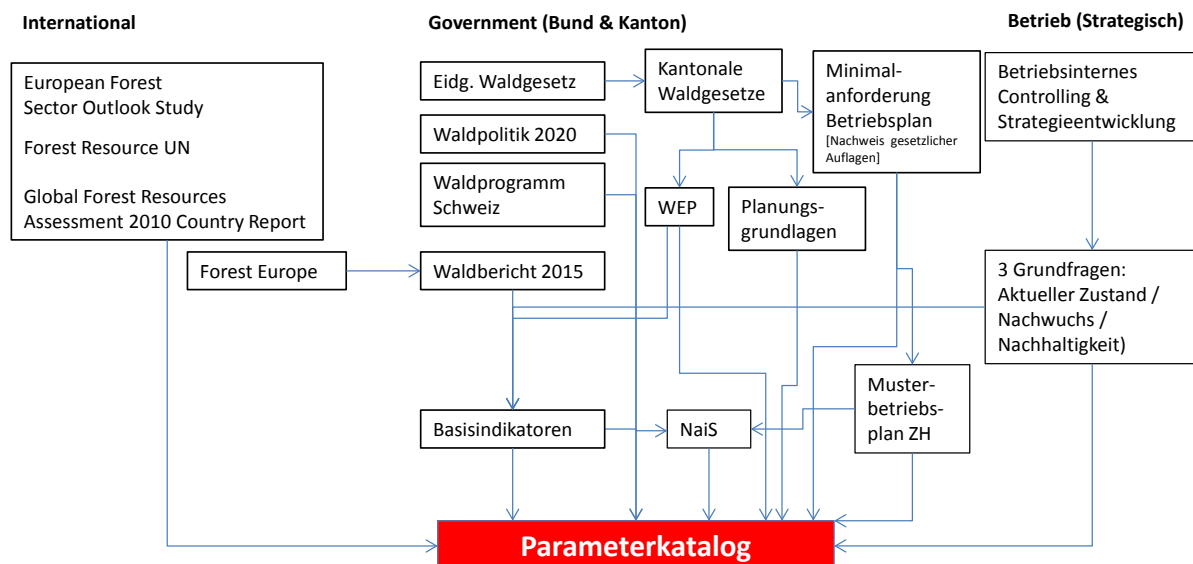


Abbildung 3: Überblick über die relevanten Informationsnachfrager auf Stufe Controlling, sowie die nachfolgenden Programme, die diese Informationen erheben. Die Grundlage des Parameter Kataloges auf Stufe Controlling bildet der Informationsbedarf auf den einzelnen Stufen „International“, „Government“ und „Betrieb“

Der Informationsbedarf auf Stufe Controlling setzt sich aus verschiedenen Stufen zusammen:

- International
- Government
- Betrieb

Abbildung 3 zeigt einen Überblick über die relevanten Informationsnachfrager, sowie die nachfolgenden Programme, die diese Informationen erheben. Beispielsweise wird von Forest Europe ein Informationsbedarf formuliert. Dieser Bedarf wird zugleich auch im Waldbericht postuliert und durch die vom Bund festgelegten 13 Basisindikatoren erhoben. Wir unterscheiden zwischen Informationsnachfrager, welche **Direkt** in den Parameterkatalog einfließen und solche, welche **Indirekt** einfließen. Alle Kästchen in Abbildung 3, welche durch Pfeile direkt mit dem Parameterkatalog verbunden sind, fließen in den Parameterkatalog ein. Diese sind in Tabelle 1 aufgelistet. In den nachfolgenden Kapiteln folgt eine Diskussion der verschiedenen Informationsnachfrager.

**Tabelle 1: Auflistung der direkt einflussenden Informationsquellen in den Parameterkatalog strukturiert nach Stufe (International, Government, Betrieb)**

#### International

*European Forest Sector Outlook Study*

*Forest Resource*

*Global Forest Resources Assessment 2010 Country Report*

*Basisindikatoren Bund & Kantone [Nr.]*

*Indikatoren NaiS / Basisindikator Naturgefahren*

#### Government

*Basisindikatoren Bund & Kantone [Nr.]*

*Indikatoren NaiS / Basisindikator Naturgefahren*

*Waldprogramm*

*Waldpolitik 2020*

*Kantonales Waldgesetz: Allg. Planungs GL*

*Kantonales Waldgesetz: WEP*

*Kantonales Waldgesetz: Betriebsplan*

*Musterbetriebsplan Zürich ohne Bestandeskarte*

#### Betrieb (Strategisch)

*Betrieb Strategisch, 3 Grundfragen*

*Basisindikatoren Bund & Kantone [Nr.]*

*Indikatoren NaiS / Basisindikator Naturgefahren*

### 3.2.1 International

Internationale Organisationen sind vor allem zum Zwecke der Berichterstattung an waldbaulichen Parametern und Kennwerten zur Nutzung interessiert. Dabei steht die Nachhaltigkeit im Zentrum. An der UNO Konferenz über Umwelt und Entwicklung in Rio (1992) verpflichtete sich die Schweiz zu einer nachhaltigen Waldbewirtschaftung und dazu, periodisch über Zustand und Entwicklung des Waldes zu berichten. Darauf folgten europäische Ministerkonferenzen, an denen sich die Schweiz verpflichtete, ihre Wälder nachhaltig zu bewirtschaften und über das Erreichte regelmässig zu berichten (MCPFE 2003, MCPFE = Ministerial Conference on the Protection of Forests in Europe)

MCPFE (kurz Forest Europe) hat den Rahmen für eine nachhaltige Waldbewirtschaftung umfassend beschrieben. Die darauf basierenden 6 Kriterien und 35 Indikatoren (vgl. Übersicht in Tabelle 2) stellen ein wichtiges walddpolitisches Instrument zur Beurteilung der nachhaltigen Waldbewirtschaftung auf nationaler Ebene und zur internationalen Waldberichterstattung dar. Aufgrund dieser Indikatoren berichtet das Bundesamt für Umwelt (BAFU) alle 4 Jahre für den europäischen Waldbericht; der letzte wurde im Juni 2011 an der Ministerkonferenz in Oslo publiziert (Forest Europe et al., 2011). Tabelle 2 gibt einen Überblick über die MCPFE-Indikatoren (Forest Europe, 2011).

**Tabelle 2: Die Indikatoren von Forest Europe (Forest Europe et al. 2011)**

<i>Nr.</i>	<i>Kriterien</i>	<i>Indikatoren</i>
(1)	Maintenance and Appropriate Enhancement of Forest Resources and their Contribution to Global Carbon Cycles	forest area (1.1); growing stock (1.2); Age structure and/or diameter distribution of forest (1.3); carbon stock (1.4).
(2)	Maintenance of forest ecosystem health and vitality	Deposition of air pollutants (2.1); soil condition (2.2); defoliation (2.3); forest damage (2.4).
(3)	Maintenance and encouragement of productive functions of forests (wood and non wood)	Increment and fellings (3.1); roundwood (3.2); non wood goods (3.3); services (3.4); forest under management plans (3.5).
(4)	Maintenance, Conservation and Appropriate Enhancement of Biological Diversity in Forest Ecosystems	Tree species composition (4.1); regeneration (4.2); naturalness (4.3); introduced tree species (4.4); deadwood (4.5); genetic resources (4.6); landscape pattern (4.7); threatened forest species (4.8); protected forests (4.9).
(5)	Maintenance and Appropriate Enhancement of Protective Functions in Forest Management (notably Soil and Water)	Protective forests – soil, water and other ecosystem functions (5.1); protective forests – infrastructure and managed natural resources (5.2).
(6)	Maintenance of Other Socio-Economic Functions and Conditions	Forest holdings (6.1); Contribution of forest sector to gross domestic product (6.2); net revenue (6.3); expenditures on services (6.4); the forest sector workforce (6.5); occupational safety and health (6.6); wood consumption (6.7); trade in wood (6.8); energy from wood resources (6.9); accessibility for recreation (6.10); cultural and spiritual values (6.11)

Die Indikatoren von Forest Europe (Forest Europe et al. 2011) bilden die Grundlage für den Waldbericht 2015. Im Waldbericht werden die 13 Basisindikatoren von Bund und Kantonen definiert (Tabelle 3). Als 14. Indikator ist die Verjüngung in Diskussion, welcher in Tabelle 3 jedoch noch fehlt.

**Tabelle 3: Basisindikatoren von Bund und Kantonen als Grundlage für den Waldbericht. Als 14er Indikator ist die Verjüngung in Diskussion, welcher in dieser Tabelle noch fehlt.**

Basisindikatoren von Bund und Kantonen		Indikatoren nach Forest Europe und entsprechende Kapitel im Waldbericht 2015
1	<b>Waldfläche:</b> Gesamtheit aller Flächen, die auf Bundesebene und in den Kantonen aufgrund eigener Festlegungen als Wald erfasst sind.	1.1 Waldfläche
2	<b>Holzvorrat:</b> Schaftholzvolumen in Rinde aller lebenden Bäume und Sträucher auf der Waldfläche.	1.2 Holzvorrat
3	<b>Waldaufbau:</b> Verteilung der Waldfläche nach Entwicklungsstufen und/oder Durchmesserklassen.	1.3 Altersaufbau und Bestandesstruktur
4	<b>Waldschäden:</b> Ausmass der Waldschäden unterteilt nach den wichtigsten Schadensarten oder Schadensgruppen sowie nach dem Jahr oder der Periode der Schadenentstehung.	2. Gesundheit und Vitalität (2.1 bis 2.4)
5	<b>Verhältnis Holznutzung/Nettozuwachs:</b> Verhältnis zwischen der Holznutzung und dem Nettozuwachs (Schaftholzvolumen in Rinde) über bestimmte Zeitabschnitte bezogen auf die Gesamtwaldfläche.	3.1 Holznutzung und Zuwachs
6	<b>Baumartenzusammensetzung:</b> Flächenanteil aller Hauptbaumarten gemessen an den lebenden Bäumen.	4.1 Artenvielfalt
7	<b>Naturnähe der Baumartenzusammensetzung:</b> Waldfläche nach Naturnähe der Baumartenzusammensetzung beurteilt anhand des Nadelholzanteils.	4.3 Naturnähe
8	<b>Totholz:</b> Volumen an stehendem und liegendem Totholz auf der Waldfläche.	4.5 Totholz
9	<b>Behandelte Schutzwaldfläche:</b> Anteile der ausgeschiedenen und der behandelten Schutzwaldfläche, nach Jahr des letzten Eingriffes und nach Art der Naturgefahr.	5.2 Schutz vor Naturgefahren
10	<b>Schutzwirkung des Schutzwaldes:</b> Flächenanteil der Schutzwälder, welche die minimalen Anforderungsprofile für Nachhaltigkeit im Schutzwald NaiS (Frehner et al. 2005) erfüllen.	5.2 Schutz vor Naturgefahren
11	<b>Ergebnis der Waldbewirtschaftung:</b> Gesamte Erlöse in der Waldbewirtschaftung minus gesamte Kosten nach Möglichkeit differenziert nach Vorrangfunktionen.	6.3 Wirtschaftliche Lage der Forstbetriebe
12	<b>Ergebnis der Holzernte:</b> Gesamte Erlöse aus der Holzernte minus gesamte Kosten der Holzernte bezogen auf die «produktive Waldfläche».	3.2 Rundholz
13	<b>Erholung im Wald:</b> Die Häufigkeit der Waldbesuche ist neben der Zufriedenheit der Erholungssuchenden oder der Besucherfrequenz eine von mehreren Möglichkeiten zur Beschreibung der Erholung im Wald.	6.10 Erholung im Wald

Neben Forest Europe liefert die Schweiz auch noch Informationen an Berichterstattungen der UN:

- Bericht „Forest Resource“, UNO
- Bericht “Global Forest Resources Assessment 2010 Country Report”
- Bericht “European Forest Sector Outlook Study”

Die Berichterstattung an die UN ist für die Schweiz nicht bindend, es werden jeweils nur die diejenigen Informationen geliefert, die ohnehin schon verfügbar sind. Der Katalog zeigt jedoch auf, welche Daten international noch von Interesse sind. Die vollständig aufgelisteten Indikatoren - Tabellen zu den Berichten der UN sind im Anhang zu finden.

### 3.2.2 Government

Die Stufe „Government“ umfasst die Kantone und den Bund. Da weder Bund noch Kantone operationell tätig sind, brauchen sie nur Informationen für das Controlling.

#### Bund

Betreffend waldbaulicher Planung besteht auf Bundesebene kein Informationsbedarf, der Bund fordert einzig die Standortverhältnisse und die Waldfunktionen festzuhalten. Planungs- und Bewirtschaftungsvorschriften werden auf Stufe Kantone delegiert (Art. 20 WaG Abs.2), hingegen wird gefordert, dass der Wald so bewirtschaftet werden muss, dass er seine Funktionen dauernd und uneingeschränkt erfüllen kann (Nachhaltigkeit). Daraus ergibt sich ein Informationsbedarf über die „nachhaltige Bewirtschaftung“. Der Bund hat in Zusammenarbeit mit den Kantonen 13 Basisindikatoren (Waldbericht 2015) formuliert, in denen ein Indikatorenset für eine Bewertung der Nachhaltigkeit im Wald präsentiert wird. Dieses ist in Tabelle 3 abgebildet. Die Basisindikatoren sind ebenfalls mit internationalen Indikatoren, wie jene von der UN oder von Forest Europe (Ministerial Conference on the Protection of Forests in Europe) abgestimmt.

Der Bund hat im weiteren für das Waldprogramm 2004 / 2015 und für die Waldpolitik 2020 (Waldpolitik 2020) ebenfalls einen Informationsbedarf formuliert, welcher in beiden Fällen durch Indikatoren hinterlegt ist. Diese Indikatoren sind grösstenteils, aber nicht vollständig durch die 13 Basisindikatoren abgedeckt. Der Waldbericht 2015, die Waldpolitik 2020 sowie das Waldprogramm 2004/2015 zeigen umfassend, welchen Informationsbedarf der Bund hat.

Im Anhang befindet sich eine genauere Beschreibung inkl. Indikatoren für das Waldprogramm 2004/2015 und die Waldpolitik 2020, sowie eine Gesamtübersicht über die Indikatoren auf Stufe Bund und deren Umsetzung im Parameterkatalog. [A3 bis A5]

#### Kantone

Die Kantone stehen in der Verantwortung Planungs- und Bewirtschaftungsvorschriften zu erlassen (Art. 20 WaG Abs.2). Die Kantone sind aus mehreren Gründen auf Informationen und Daten angewiesen. Einerseits fordern sie von den Waldeigentümern eine Betriebsplanung durchzuführen und sind deswegen verpflichtet Planungsgrundlagen zur Verfügung zu stellen, andererseits erarbeiten die Kantone selbst Waldentwicklungspläne und sind dazu auf Planungsgrundlagen sowie auf Informationen zur Messung der Zielerreichung angewiesen. Aufgrund des Bundesrechts besteht keine Pflicht der Kantone zur Nachhaltigkeitsberichterstattung. Sofern die Kantone aus eigener Motivation eine Nachhaltigkeitsberichterstattung vorsehen, werden diese vom Bund dazu animiert die 13 Basisindikatoren zu verwenden.

#### Kantonale Waldgesetze

Um zu analysieren, welche Informationsbedürfnisse aus der Gesetzgebung der Kantone gefordert werden, wurden alle kantonalen Waldgesetze und –verordnungen analysiert. Die Analyse zeigt, dass zahlreiche Informationsbedürfnisse bezüglich Waldbau und Nutzung gegeben sind. Wir unterteilen diese nach [I] allgemeinen Planungsgrundlagen, [II] Grundlagen und Information die der WEP aufweisen soll und [III] Informationen, die in einem Betriebsplan vorhanden sein sollen.

In nahezu allen Kantonen werden Informationen über den Standort (v.a. Pflanzensoziologie) gefordert, was nicht erstaunt, da diese Informationen von Seiten des Bundes gefordert wird. Die



restlichen Parameter sind Waldbau- oder Nutzungskennwerte, definiert in unterschiedlicher Tiefe. Einige der Parameter oder Kennwerte sind sehr allgemein formuliert, bspw. Waldzustand / Aufbau, Waldentwicklung, Bestandeskarte oder Nachhaltigkeit und lassen einen grossen Ermessensspielraum zu. Andere sind hingegen bereits als messbare Parameter definiert, so zum Beispiel Baumartenverteilung, Zuwachs oder Vorrat.

Die Verteilung der expliziten Nennungen der waldbaulichen Kennwerte und Parameter ist in Tabelle 4 dargestellt. Daraus geht hervor, dass Strukturparameter (Waldzustand/Aufbau, Waldentwicklung) sowie Informationen zu Zuwachs und Vorrat am gefragtsten sind.

**Tabelle 4: Anzahl explizite Nennungen der Informationsbedürfnisse in den kantonalen Waldgesetzen und –verordnungen. Mehrfachnennungen sind möglich**

	Anzahl explizite Nennungen	Total	Allgemeine Planungs- grundlage	WEP	Betriebsplan
1	Pflanzensoziologie (Standortskarte)	22	13	7	2
2	Bestandesparameter	79	26	16	37
	<i>davon</i>				
2.1	Waldzustand / Aufbau	21	6	5	10
2.2	Waldentwicklung	13	5	5	3
2.3	Bestandeskarte	3	3		
2.4	Waldflächen / Nutzungsfläche	3	1		2
2.5	Verjüngung	3			3
2.6	Baumartenverteilung	4			4
2.7	Nachhaltigkeit	5		5	
2.8	Zuwachs & Vorrat	22	7		15
	<i>davon</i>				
2.8.1	Vorrat / Zuwachs	7	2		5
2.8.2	Nutzung	1	1		
2.8.3	Inventar	4	4		
2.8.4	Hiebsatz	10			10
2.9	Waldgesundheit	5	4	1	
	<i>davon</i>				
2.9.1	Wald / Wild	3	2	1	
2.9.2	Waldgesundheit	2	2		

## Interpretation der allgemein formulierten Indikatoren

Wie bereits erläutert, sind einige Indikatoren in den Gesetzesgrundlagen allgemein formuliert und müssen konkretisiert werden, bevor diese in den Parameterkatalog aufgenommen werden können.

Wie genau der Handlungsspielraum interpretiert werden kann, wird am Beispiel von einigen ausgewählten Kantonen aufgezeigt. Der Kanton Aargau fordert vom WEP wie auch vom Betriebsplan Angaben über (a) den Zustand und die Entwicklung des Waldes, sowie (b) Ziele und Kontrollgrößen für eine nachhaltige Waldbewirtschaftung (§ 26 und §27 der Waldverordnung ). Umgesetzt wird dies, in dem folgende Informationen erhoben werden: [geforderte Genauigkeit in eckiger Klammer] (Auskunft Rafael Bienz)

- Hiebsatz (Grundlagen: Vorrat und Nutzung) [0.5 m<sup>3</sup>/ha/J]
- Verjüngungsflächen (in den nächsten 15 Jahren) [0.5 ha/Betrieb, räumlich aufgelöst]
- Eichenanteil (je nach Ziel) [10%]
- Anteil Nadel- und Laubholz [10%]
- Anteil Naturverjüngung [10%]

Im Kanton Zürich werden von der forstlichen Planung folgende waldbaulichen und Nutzungs-Informationen gefordert (§ 12.5 kantonales Waldgesetz, § 9.5 kantonale Waldverordnung): Kontrollgrößen Nachhaltigkeit, Standortverhältnisse und Wuchsbedingungen, Waldaufbau, Gesundheitszustand des Waldes und aktuelle Nutzung des Waldes. Diese Kenngrößen werden wie in Tabelle 5 dargestellt interpretiert und erhoben (Quelle Musterbetriebsplan Kanton Zürich):

**Tabelle 5: Vergleich der geforderten Kennwerte und deren Umsetzung als erhobene Parameter am Beispiel des Kantons Zürich**

Gesetzliche Forderungen	Erhobener Parameter (Quelle: Musterbetriebsplan Kanton Zürich )
Kontrollgrößen Nachhaltigkeit	Vorrat Zuwachs Hiebsatz (Vorratsnachhaltigkeit)
Standortverhältnisse und Wuchsbedingungen	Vegetationskarte (Pflanzensoziologische Kartierung)
Waldaufbau	Bestandeskarte mit <ul style="list-style-type: none"> <li>• Entwicklungsstufe</li> <li>• Baumartenanteil</li> </ul> Inventur mit <ul style="list-style-type: none"> <li>• BHD</li> <li>• Baumarten</li> <li>• Stammzahlen</li> <li>• Vertikal- &amp; Horizontalstrukturen</li> </ul>
Gesundheitszustand des Waldes	Der Gesundheitszustand ist nicht genauer beschrieben. Im Musterbetriebsplan werden einzig die Wildschäden erhoben
Aktuelle Nutzung des Waldes	Nutzung (Inventur & Anzeichnungsprotokoll)

Tabelle 6 zeigt auf wie wir die allgemein formulierten Indikatoren der Gesetzgebung den Parametern gemäss Parameterkatalog zuweisen. Die Zuweisung erfolgt gutachtlich, jedoch gestützt auf die Beispiele der Kantone Aargau und Zürich.

Tabelle 6: Zuweisung der einzelnen allgemeinen formulierten Indikatoren auf den Parameterkatalog

Nr.	Allgemein formulierte Indikatoren gemäss Gesetzgebung	Umsetzung im Parameterkatalog
1	Pflanzensoziologie (Standortskarte)	Waldgesellschaft
2.1	Waldzustand / Aufbau	Durchmesserverteilung, Entwicklungsstufe, Struktur (vertikale Bestandesstruktur), Hauptbaumarten, Stammzahl, Deckungsgrad gesicherte Verjüngung
2.2	Waldentwicklung	abgedeckt durch 2.1 Waldzustand / Aufbau
2.3	Bestandeskarte	abgedeckt durch 2.1 Waldzustand / Aufbau
2.4	Waldflächen / Nutzungsfläche	Waldfläche, Lage
2.5	Verjüngung	Deckungsgrad gesicherte Verjüngung , Baumartenmischung Verjüngung, Stadium Verjüngung
2.6	Baumartenverteilung	Hauptbaumarten
2.7	Nachhaltigkeit	13 Basisindikatoren von Bund und Kantonen
2.8.1	Vorrat / Zuwachs	Vorrat, Zuwachs
2.8.2	Nutzung	Nutzung Holzvolumen
2.8.3	Inventar	kein Parameter
2.8.4	Hiebsatz	Zuwachs, Vorrat
2.9.1	Wald / Wild	Wildschäden
2.9.2	Waldgesundheit	Schäden, Mechanische Widerstandskraft

### Musterbetriebsplan Kanton Zürich

Der Musterbetriebsplan des Kanton Zürich wurde bezüglich Indikatoren analysiert. Im Musterbetriebsplan sind die Minimalanforderungen des Kantons festgehalten. Darum ist diese Analyse im Teil Controlling / Kanton aufgelistet. Die Indikatoren des Musterbetriebsplans sowie deren Umsetzung in den Parameterkatalog sind im Anhang aufgelistet.

#### 3.2.3 Betrieb

Die Forstbetriebe sind einerseits zum Zweck des Controllings und andererseits für operationelle Zwecke auf Informationen angewiesen. In diesem Abschnitt fokussieren wir uns auf die Informationen, die für das Controlling nötig sind.

Hier ergeben sich 2 Hauptansprüche. Die meisten Kantone verpflichten die Eigentümer von Wäldern, die eine bestimmte Grösse haben (ab 15–50 ha), zu einer betrieblichen Planung. Damit verbunden ist einerseits der Bedarf nach Planungsgrundlagen und die Pflicht, gewisse Kennwerte (meistens im Zusammenhang mit der Nachhaltigkeit) an den Kanton als Kontrollinstanz zu liefern. Andererseits hat auch der Betrieb selbst ein Interesse, weitere Kennwerte oder Kontrollgrössen zu erheben, welche über das geforderte Minimum vom Kanton hinausgehen. Damit ergibt sich ein Überblick über die Ressourcen und eine detaillierteres Bild der Nachhaltigkeit eines Betriebes. Dies erleichtert es dem Betriebsleiter, eine zukunftsfähige Strategie für den Betrieb zu entwickeln.

Aus der Analyse der 26 kantonalen Waldgesetze und Verordnungen geht hervor, welche Indikatoren die Kantone von den betriebsplanpflichtigen Forstbetrieben bzw. Waldeigentümern fordern (Tabelle 4, Spalte „Betriebsplan“). Grundsätzlich handelt es sich um die gleichen Indikatoren, die auch die Kantone benötigen. Von zentraler Bedeutung sind hier wiederum Informationen zu Zuwachs, Vorrat

sowie zur Struktur des Waldes (Waldzustand/Aufbau). Die Angaben zur Struktur sind wiederum allgemein gehalten und erlauben einen gewissen Ermessensspielraum. Die Interpretation erfolgt wie in Tabelle 6 beschrieben. Der Kanton ist an Kennzahlen interessiert, die Aussagen auf Stufe Betrieb erlauben.

### **Grundfragen des Betriebsleiters**

Neben den Kennwerten, die der Betrieb dem Kanton vorzulegen hat, hat sich der Betriebsleiter auch im eigenen Interesse Fragen im Bereich Controlling, Strategie oder Nachhaltigkeit zu stellen. Wir gehen davon aus, dass ein Betriebsleiter (oder auch ein Waldbesitzer) grundsätzlich wissen will, was im Wald vorhanden ist und wie es um den Nachwuchs und die Nachhaltigkeit steht. Wir postulieren zuerst Fragen, die sich der Betriebsleiter stellt und leiten daraus den Informationsbedarf ab.

Was steht aktuell im Wald? Welche Produkte kann ich anbieten?

1. Rohstoff Holz: Dimensionen, Sortimente, Baumarten, Qualität, Vorrat, auf welchen Flächen?
2. Naturschutzprodukte: Totholz, Strukturelemente, seltene Waldgesellschaften?
3. Naturgefahrenprodukte: Wie sieht die Waldstruktur bezüglich der Anforderungen gemäss NaiS aus?
4. Erholungsprodukte (kein waldbaulicher Parameter, fliesst deswegen nicht ein)

Wie steht es um den Nachwuchs und die Verjüngung:

5. Was wächst nach? Zuwachs, Baumarten, Altersklassenverteilung (Normalwaldmodell, Flächenverteilung der Altersklassen)?
6. Zustand der Verjüngung: Wildschäden, Gesundheitszustand?
7. Nachhaltiger Aufbau von Dauer- und Plenterwäldern: Stammzahlverteilungskurve
8. Zustand des Nachwuchses: Waldschäden / Gesundheitszustand

Nachhaltigkeit:

Die Nachhaltigkeit der Bewirtschaftung ist immer auch im eigenen Interesse eines Forstbetriebs. Dazu werden die 13 Basisindikatoren als Grundlage herangezogen.

Tabelle 7 zeigt die Parameter auf, die zur Beantwortung der einzelnen Fragen erhoben werden müssen. Die Zuweisung der Fragen zu den Parametern wurde gutachtlich geschätzt. Die Parameter der Frage 3 (NaiS) werden separat in Tabelle 8 diskutiert. Bei den Erholungsprodukten (4) handelt es sich nicht um waldbauliche Parameter.

**Tabelle 7: Parameter, welche für die jeweiligen Grundfragen relevant sind. Die NaiS Kriterien wurden separat markiert mit „10“, da diese in der Endauswertung separat aufgelistet werden.**

1	2	5	6	7	8
Rohstoff Holz	Naturschutz-produkte	Was wächst nach?	Zustand der Verjüngung	Nachhaltiger Aufbau (Dauer- & Plenterwälder)	Zustand des Nachwuchs
	1				Liegendes Totholz
	1				Dürrständer
	1				Giganten / Monumente
	1				Waldgesellschaft
	1				Waldfläche
	1				Lage
1					Oberhöhe
		1			Überhälter
1		1			Stammzahl
1		1		1	Durchmesserverteilung
1		1			Entwicklungsstufe
1		1			Grundfläche
1		1			Vorrat
		1			Zuwachs
1					Biomasse oberirdisch
1					Schaftholz
1					Derbholz
	1				Vorrat Totholz stehend
	1				Vorrat Totholz liegend
1		1			Baumart
1		1			Seltene Baumarten
1		1			Hauptbaumarten
1		1			Laub- / Nadelholz
			1		Deckungsgrad gesicherte Verjüngung
			1		Verjüngung unter Schirm
			1		Baumartenmischung Verjüngung
			1		Lücken
1					Holzqualität
					1 Schäden / Vitalität
			1		1 Wildschäden

### 3.2.4 Nais - Nachhaltigkeit und Erfolgskontrolle im Schutzwald

Nais steht für **N**achhaltigkeit und Erfolgskontrolle im **S**chutzwald (Frehner et al. 2005). Grundsätzlich besteht bei der Schutzwaldpflege das Ziel, mit einem minimalen Aufwand einen Waldzustand zu schaffen, der den Mindestanforderungen für eine nachhaltige Erfüllung der Schutzwirkung genügt. Im Nais werden die Mindestanforderungen an den Schutzwald für jede Naturgefahr einzeln mit messbaren Parametern definiert. In Tabelle 8 werden die im Nais genannten Parameter je nach Naturgefahr aufgezeigt. Einige wenige genannte Indikatoren wurde im Nais allgemein formuliert, diese wurde wie in Tabelle 9 beschrieben interpretiert.

**Tabelle 8: Parameter zur Charakterisierung eines Anforderungsprofils des Waldes bezüglich Naturgefahren.**

Parameter der Anforderungsprofile	Anforderungsprofil des Waldes bezüglich...				Anforderungen aufgrund des Standortstyp
	[A] Lawinen	[B] Rutschungen, Erosion und Murgängen	[C] Steinschlag	[D] Wildbach & Hochwasser	
Waldgesellschaft	1	1	1	1	1
Mikrotopographie		1		1	
Lärche	1				
Immergrüne Nadelwälder	1				
Baumarten					1
Lücken	1	1	1		1
Stadium Verjüngung		1		1	1
Baumartenmischung Verjüngung		1		1	1
Deckungsgrad gesicherte Verjüngung		1		1	1
Bodenvegetation					1
Pionierbaumarten				1	
Moderholz		1		1	1
Qualität Verjüngung		1		1	
Stammzahl			1		
Grundfläche			1		
Durchmesserverteilung					1
Einzelbaum Volumen		1	1		
Einzelbäume Kronen / Kronenlänge		1	1	1	1
Einzelbäume Schiefstand		1	1	1	1
Einzelbäume Verankerung		1	1	1	1
Einzelbäume Schlankheitsgrad		1	1	1	1
Einzelbäume Kernwuchs					1
Stöcke			1		
Liegendes Totholz			1		
Kronendeckungsgrad	1	1		1	1
Struktur (vertikale Bestandesstruktur)					1
Schlussgrad					1
Oberhöhe					1
Wildschäden					1
Vorrat Totholz liegend					1

Tabelle 9: Interpretation allgemeiner Parameter im NaiS für den Parameterkatalog

Im NaiS genannte allgemeine Parameter	Interpretation der Parameter für den Parameterkatalog
Instabile und wurfgefährdete Bäume [bei B,C, D]	Kronenlänge, Schiefstand, Verankerung, Schlankheitsgrad
Schwere Bäume [B, C]	Volumen
Nachhaltige Verjüngung [B, C]	Baumartenmischung Verjüngung, Deckungsgrad gesicherte Verjüngung, Stadium (Keimbett, Anwuchs, Aufwuchs)
Fläche Verjüngungsgünstige Kleinstandorte [B, D]	Moderholz (Deckungsgrad) Mikrotopographie Lichteinfall --> Kronendeckungsgrad
Qualität Verjüngung [B, C]	Wildschäden <i>Pilzbefall (Nicht im Parameterkatalog)</i>

### 3.2.5 Planung im Gebirgswald

An der Försterschule in Maienfeld läuft zurzeit das Projekt „Planung im Gebirgswald“ (Kontaktperson: Samuel Zürcher). Die Fokussierung im Projekt erfolgt stark auf die Bedürfnisse eines konkreten Fallstudienbetriebs (Klosters), welcher selbst allerdings nur beschränkt Interesse an klaren Indikatoren hat. Die Autoren werden im Bericht erläutern, dass es aus Sicht der Theorie sinnvoll und wichtig ist, klare Indikatoren herzuleiten mit konkreten Zielwerten und Erhebungsmethoden. Für den Betrieb Klosters arbeiten sie für den waldbaulichen Teil primär mit zwei Zielgrößen:

1. Nutzung/Hiebsatz: Dieser ist auf die vorhandenen Informationen zu Vorrat und Zuwachs abgestützt.
2. Für eine nachhaltige Bewirtschaftung notwendige Pflegeflächen pro Jahr - um in den Bereich der angestrebten Wiederkehrdauer (Turnuszeit) zu kommen.

Beide Indikatoren werden nicht nur für den Gesamtbetrieb ausgewiesen, sondern für sogenannte "Rentabilitätsklassen" (Arbeitstitel): Dies soll sicherstellen, dass im Gebirgswald nicht die gut erschlossenen Waldflächen übernutzt werden und die abgelegenen vernachlässigt.

Die zentralen Parameter aus diesem Projekt sind also (Stand Februar 2016):

- Vorrat
- Zuwachs
- Nutzung Holzvolumen

Diese Parameter wurden bereits von anderen Informationsnachfragern genannt (NaiS, Betriebe) und dienen uns daher auch als Bestätigung unserer bisherigen Überlegungen. Zudem sind die Ergebnisse noch nicht definitiv. Wir verzichten daher auf eine Aufnahme dieser Informationsquelle. Wir nehmen jedoch mit, dass die Parameter Vorrat, Zuwachs und Nutzung Holzvolumen im Gebirgswald wichtige Parameter darstellen.

### 3.3 Informationsbedarf Operationell

Der operationelle Informationsbedarf setzt sich zusammen aus dem Bedarf des Betriebs und demjenigen von Management Tools (Entscheidungsunterstützungs - Tools). Der Bedarf des Betriebs begründet sich durch den Informationsbedarf, damit dieser geführt werden kann (operative Führung). Entscheidungsunterstützungs-Tools dienen u.a. der operativen Führung eines Betrieb. Im Bereich Waldbau und Nutzung sind dies Waldwachstumssimulatoren und Planungstools wie beispielsweise das WIS 2.

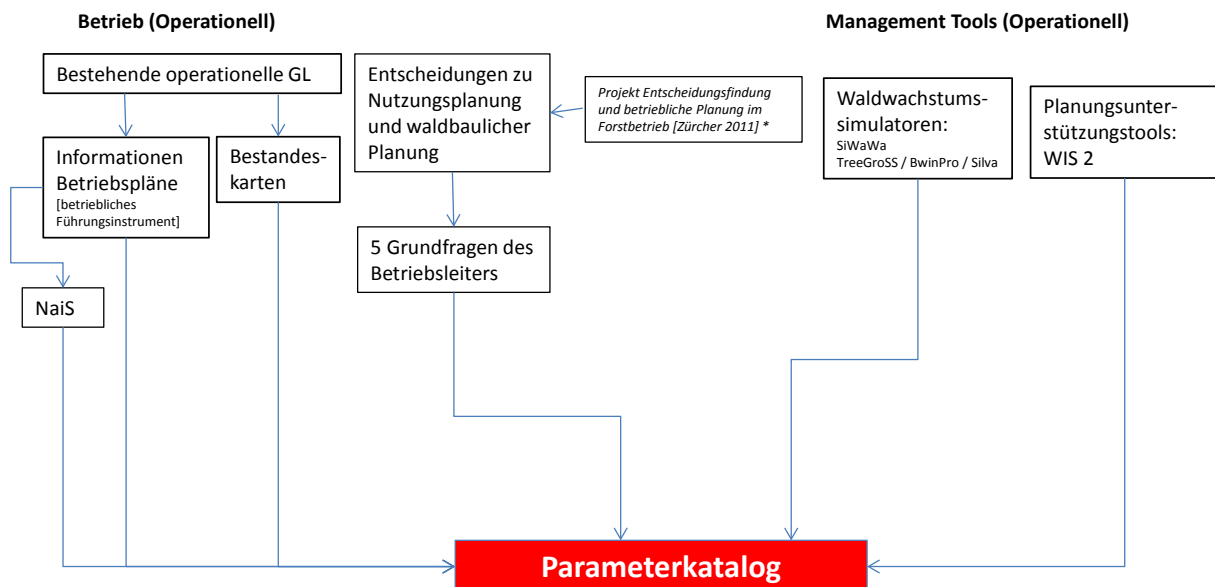


Abbildung 4: Die Grundlage des Parameter Kataloges auf Stufe Operationell bildet der Informationsbedarf auf den einzelnen Stufen „Betrieb“ und „Management Tools“

Abbildung 4 zeigt einen Überblick über die relevanten Informationsnachfrager, sowie die nachfolgenden Programme, die diese Informationen erheben.

Wir unterscheiden zwischen Informationsnachfrager, welche **Direkt** in den Parameterkatalog einfließen und solche, welche **Indirekt** einfließen. Alle Kästchen in Abbildung 4, welche durch Pfeile direkt mit dem Parameterkatalog verbunden sind, fließen in den Parameterkatalog ein. Diese sind in Tabelle 10 aufgelistet. In den nachfolgenden Kapiteln folgt ein Diskussion der verschiedenen Informationsnachfrager. Die Parameter von NaiS wurden bereits vorangehend diskutiert.

Tabelle 10: Auflistung der direkt einflussenden Informationsquellen in den Parameterkatalog strukturiert nach Stufe (Betrieb, Management Tools)

#### Betrieb (operationell)

Kantonales Waldgesetz: Betriebsplan  
 Musterbetriebsplan Zürich  
 Bestandeskarte Bremgarten  
 Betriebsplan Bremgarten  
 Betrieb operationell (Grundfragen), weniger wichtig  
 Betrieb operationell (Grundfragen), wichtig  
 Indikatoren NaiS / Basisindikator Naturgefahren

#### Management Tools

Planungsunterstützungstools WIS 2  
 Waldwachstumssimulatoren



### 3.3.1 Betrieb

Der Betriebsleiter hat im Jahresverlauf Entscheidungen zu Nutzungsplanung und waldbaulicher Planung zu fällen (operationelle Planung). Für die operationelle Planung ist der Betriebsleiter auf möglichst aktuelle und räumlich aufgelöste Daten angewiesen. In Zusammenarbeit mit einem Betriebsleiter (A. Bürgi, Forstbetrieb Bremgarten) wurden 5 Grundfragen / Entscheide postuliert, die der Betriebsleiter zur operationellen Führung seines Betriebes zu beantworten hat. Einige dieser Grundfragen wurden noch weiter unterteilt.

- Wieviel Holz darf / kann geerntet werden?
  - Der Hiebsatz ist die zentrale Grösse für die Leitung jedes Forstbetriebs
- Welche Flächen / Bäume ernten? Wir unterscheiden folgende Szenarien:
  - Nachfrage vom Markt
  - Keine Nachfrage vom Markt, Nutzung aus waldbaulicher Notwendigkeit (z.B. Einleitung Verjüngung)
  - Nutzung aufgrund Zwangsnutzung
- Wieviel Holz und welche Sortimente fallen bei der Holzernte an? Wir unterscheiden folgende Nutzungstypen:
  - Endnutzung (Hochwald / Femelschlag)
  - Durchforstung (Hochwald / Femelschlag)
  - Plenter- / Dauerwald (stufiger Wald)
- Planung der Holzernte? Dabei stellen sich folgende Teilfragen:
  - Welche Verfahren kommen zum Einsatz ?
  - Welches Arbeitsvolumen fällt an?
  - Wann fällt die Arbeit an?
- Welche weiteren waldbaulichen Massnahmen sind nötig? Wir unterscheiden dabei zwischen folgenden Massnahmen:
  - Pflege
  - Durchforstung
  - Phytosanitäre Nutzung

Auch andere Autoren haben sich in mit den Entscheiden eines Forstbetriebs beschäftigt. In Zürcher (2011) werden folgende Entscheide postuliert. Diese Entscheide wurden in Zusammenarbeit mit der Kerngruppe WaPlaMa ausgearbeitet:

- Festlegung Massnahmen und Eingriffsflächen
- Massnahmen Detailplanung / Anzeichnung
- Festlegung Holzernteverfahren
- Festlegung Jungwald Pflegemassnahmen
- Festlegung kurzfristige Planung

Tabelle 11 vergleicht die 5 Entscheide nach Zürcher und ordnet diese in unsere 5 formulierten Fragen ein. Die Entscheide und Fragen decken sich gegenseitig gut ab.

Tabelle 11: Abgleich der 5 Grundfragen mit den 5 wichtigsten Entscheiden nach Zürcher (2011)

		Entscheiden nach Studie Zürcher (2011)				
		Festlegung Massnahme und Eingriffsflächen	Massnahmen Detailplanung / Anzeichnung	Festlegung Holzernteverfahren	Festlegung Jungwald Pflegemassnahmen	Festlegung kurzfristige Planung
Grundfragen	Wieviel Holz darf / kann geerntet werden?					
	○ Festlegen des Hiebsatz	x				
	Welche Flächen / Bäume ernten? Wir unterscheiden folgende Szenarien:					
	○ Nachfrage vom Markt	x				
	○ Nutzung aus waldbaulicher Notwendigkeit	x				
	○ Aufgrund Zwangsnutzung	x				
	Wieviel Holz und welche Sortimente fallen bei der Holzernte an? Wir unterscheiden folgende Nutzungstypen:					
	○ Endnutzung		x			
	○ Durchforstung		x			
	○ Plenter- / Dauerwald		x			
	Planung der Holzernte? Dabei stellen sich folgende Teilfragen:					
	○ Welche Verfahren kommen zum Einsatz ?			x		
	○ Welches Arbeitsvolumen fällt an?			x		
	○ Wann fällt die Arbeit an?			x		
	Welche weiteren waldbaulichen Massnahmen sind nötig? Wir unterscheiden dabei zwischen folgenden Massnahmen:					
	○ Pflege				x	
	○ Durchforstung	x				
	○ Phytosanitäre Nutzung					x

Um herzuleiten, welche waldbaulichen und nutzungstechnischen Parameter für die Beantwortung dieser Entscheiden nötig sind, haben wir zuerst gutachtlich die Informationsbedürfnisse abgeleitet (Tabelle 12). Anschliessend haben wir den Informationen die relevanten Parameter zugeordnet. Die Parameter sind aufgeteilt in Parameter, die direkt aus der Inventur erhoben werden können (Bestandteil des Indikatorkatalogs) und aus abgeleiteten Parametern, welche nicht im Parameterkatalog aufgelistet sind, jedoch als Hilfsgrössen angesehen werden können. Beispielsweise für die Grundfrage „Welche Bäume sollen geerntet werden / Nachfrage vom Markt“ müssen folgende Informationen bekannt sein: Baumart, Qualität, Dimension, erntekostenfreier Erlös, Holzvolumen und Sortiment. Die ersten beiden Parameter Baumart und Qualität sind direkt waldbauliche Parameter, die anderen Informationen gelten als abgeleitete Parameter und müssen noch konkretisiert werden.

**Tabelle 12: Informationsbedürfnisse der verschiedenen Grundfragen. Die Informationsbedürfnisse wurden in 2 Kategorien unterteilt: In Grössen, welche als Parameter verwendet werden können (waldbauliche Parameter) (D) und Hilfsgrössen, die keine waldbaulichen Parameter darstellen, aber auch auf diesen aufbauen (H).**

[illegible]

Die abgeleiteten Parameter selbst können mit Parametern aus dem Parameterkatalog beschrieben werden, oder wiederum mittels anderer abgeleiteter Parameter. Den Informationsbedarf, auf welchen die abgeleiteten Grössen angewiesen sind, ist in Tabelle 13 aufgelistet. Eine abgeleitete Grösse wie „Sortiment“ setzt sich selbst aus Inventurgrössen wie Qualität oder Baumart zusammen, sowie aus der abgeleiteten Grösse Dimension.

**Tabelle 13: Informationsbedürfnisse der abgeleiteten Grössen.**

	Alter	Baumart	Baumhöhe	Bestandesgeschichte	Bodenvegetation	Durchmesserverteilung	Entwicklungsstufe	Erschliessung	Grundfläche	Mischungsform	Qualität	Schäden	Schlankheitsgrad	Stammzahl	Standort	Verjüngung	Vorrat	Waldfläche	Wildschäden	Bestand Erntereif	Dimension	Erntekostenfreier Erlös	Holzvolumen	Limitierungen Befahrbarkeit	Risiken	Sortiment	Verfahren	Vorratsabbau	Zuwachs
Bestand Erntereif		1					1							1			1												
Dimension			1			1	1		1					1															
Erntekostenfreier Erlös								1			1										1		1			1	1		
Holzvolumen							1										1												
Limitierungen Befahrbarkeit														1															
Risiken	1					1				1		1					1												
Sortiment		1									1		1								1								
Verfahren		1						1							1						1		1			1			
Vorratsabbau							1										1												
Zuwachs																1													

Um die Bedeutung der einzelnen Parameter zu quantifizieren wurde geprüft, wie häufig die einzelnen Parameter in den Informationsbedürfnissen vorkommen. Dabei wurden die abgeleiteten Parameter auch berücksichtigt. Das Resultat ist in Tabelle 14 dargestellt.

**Tabelle 14: Einordnung der Parameter aufgrund der Anzahl der Nennungen**

	Parameter	Parameter gem. Parameterkatalog (falls abweichend)	Anz. Nennungen
<b>Sehr wichtig</b>	Entwicklungsstufe		34
	Durchmesserverteilung		27
	Baumart		22
	Stammzahl		22
	Grundfläche		21
	Baumhöhe	Oberhöhe	19
	Vorrat		16
	Qualität	Holzqualität	12
<b>Weniger wichtig</b>	Standort	Waldgesellschaft	7
	Mischungsform		6
	Erschliessung		5
	Bestandesgeschichte	Bestandesgeschichte / Massnahmen	4
	Schäden	Schäden / Vitalität	4
	Schlankheitsgrad	Mechanische Stabilität	4
	Waldfläche		4
	Bodenvegetation		3
	Verjüngung	Deckungsgrad ges. Verjüngung	3
	Alter	Bestandesalter	2
	Wildschäden		2

Als sehr wichtig (mehr als 12 Nennungen) haben sich folgende Grössen herauskristallisiert: Entwicklungsstufe, Durchmesser-verteilung, Baumart, Stammzahl, Grundfläche, Baumhöhe, Vorrat und Qualität. Als weniger wichtig (weniger als 7 Nennungen) sind Standort, Mischungsform, Erschliessung, Bestandesgeschichte, Schäden, Schlankheitsgrad, Waldfläche, Bodenvegetation, Verjüngung, Alter und Wildschäden einzustufen.

### **Bestandeskarte und Betriebsplan Bremgarten**

Als Beispiel der heutigen Nachfrage an Waldbau und Nutzungskennwerten / Parameter ziehen wir die Bestandeskarte und den Betriebsplan von Bremgarten heran. Diese stehen stellvertretend für zahlreiche andere Forstbetriebe in der Schweiz. Die Liste der Parameter ist im Anhang aufgelistet.

### 3.3.2 Management Tools

Management oder Entscheidungsunterstützungs-Tools dienen der operativen Führung eines Betriebes. Im Bereich Waldbau und Nutzung sind dies vor allem Waldwachstumssimulatoren und Planungstools. Nachfolgend wird für eine Auswahl aufgezeigt, welche Parameter als Eingangsvariablen einfließen. Die Auswahl erhebt keinen Anspruch auf Vollständigkeit.

Tabelle 15: Management Tools

Name, Beschreibung		Autoren
Siwawa, Einfaches und zugleich aussagekräftiges IT-Tools für das Waldwachstum für die Praktiker.	Stammzahl Grundfläche Baumart Bonität oder Alter Oberhöhe bisherige Nutzung (→ Nutzung Holzvolumen) Ertragsniveau (→ Waldgesellschaft)	Rosset et al. 2013
WIS Waldinformationssystem, Tool zur Modellierung der Waldentwicklung unter verschiedenen Management Szenarien	<b>Bestandesdaten</b> <i>Entwicklungsstufe</i> <i>Laub / Nadelholz</i> <i>Schlussart (→ Pflanzengesellschaft)</i> <i>Oberdurchmesser</i> <i>Baumarten Mischung (→ Baumart)</i> <i>Seltene Baumarten</i> <i>Spezielle Sortimenten (→ Qualität)</i> <i>Alter</i> <i>Struktur (vertikale Bestandesstruktur)</i> <b>Waldgesellschaft</b> <b>Erschliessung (fakultativ)</b> <b>Relief (fakultativ)</b> <i>Hangneigung</i> <i>Exposition</i>	Rosset et al. 2009
TreeGroSS, Tree Growth Open Source Software (früher: BwinPro) Java basiertes Softwarepaket zur Waldwachstumsmodellierung.	<b>Einzelbaumdaten:</b> <i>BHD</i> <i>Alter</i> <i>Baumart</i> <i>Position Einzelbaum</i> <i>Höhe</i> <i>Höhe Kronenansatz (fakultativ)</i>	Nagel
Silva	<b>Einzelbaumdaten:</b> <i>Baumart</i> <i>BHD</i> <i>Höhe</i> <i>Höhe Kronenansatz</i> <i>Kronen Durchmesser</i> <i>Position Einzelbaum (x,y Koordinaten)</i>	Pretzsch et al. 2002

### 3.4 Runder Tisch

Am runden Tisch vom 11.4.2014 wurde unter anderem darüber diskutiert, welche Parameter in einer Betriebsinventur vorkommen müssen. Bei der Diskussion waren Teilnehmer von Ingenieurbüros, Forstbetrieben, kantonaler Verwaltung und Wissenschaft anwesend.

Untenstehend finden sich die Parameter, eingeteilt in diejenigen Grössen, die im Wesentlichen einmalig erhoben werden und jene, die einer periodischen Erhebung bedürfen, die aus Sicht der Teilnehmer bei einer Betriebsinventur erhoben werden müssen (Bürgi et al. 2014):

Einmalige Erhebung:

Diskutierte Parameter am runden Tisch	Parameter im Parameter katalog (PK)
Pflanzensoziologie: ist eine wichtige Grundlage, aber einmal erhoben steht sie zur Verfügung (und in den meisten Kantonen vorhanden)	Waldgesellschaft
Waldfunktion (Holzprod., Schutz, Nat.-Sch., Erh.): gehört einerseits zu den Zielsetzungen des Forstbetriebs, wird andererseits durch die übergeordnete Planung (Waldentwicklungsplanung) festgelegt und regelt somit auch einen Teil des Verhältnisses Kanton-Betrieb	Nicht im PK, (kein waldbaul. Parameter)
Bestandesform (Hoch-/Niederwald etc): gehört ebenfalls eher zur Zielsetzung des Forstbetriebs als zu den Merkmalen, die durch eine Inventur zu erheben wären.	Waldform
Standortsgüte (Bonität): aus Pflanzensoziologie ableitbar, wenig veränderliche Grösse	Standortsgüte / Bonität
Erschliessung (Strasse, Rückegasse): Grundlage für die Planung, mit Topografie abzubilden	Erschliessung

Periodisch für die Betriebsinventur zu erheben:

Fläche, Lage: ist eine wesentliche Grundlage, wird in der Regel als Bestandskarte erfasst, könnte sich aber auch auf Behandlungseinheiten beziehen. Muss als Teil einer rollenden Planung verstanden und à jour gehalten werden.	Waldfläche, Lage
Baumarten (in %): für die betriebliche Planung ist die Kenntnis der Baumartenzusammensetzung essentiell	Baumart, Hauptbaumart
Mischungsform (einzeln, Gruppen, ...): folgt aus der Bestandesbeschreibung, (wenn vorhanden), Angabe daraus ist genügend genau	Mischungsform
Struktur (ein-, mehrschichtig): folgt ebenfalls aus der Bestandesbeschreibung, (wenn vorhanden), Angabe daraus ist genügend genau	Struktur (vertikale Bestandesstruktur)
Entwicklungsstufe (JW, .. BH1 – 3): folgt ebenfalls aus der Bestandesbeschreibung, (wenn vorhanden), Angabe daraus ist genügend genau, ist unabdingbar für die Kontrolle der Flächennachhaltigkeit	Entwicklungsstufe
Stammzahl (Hauptbaumarten): wichtig zur Kontrolle der Nachhaltigkeit in strukturierten Wäldern (Plenter-, Dauerwälder)	Stammzahl
Grundfläche (Hauptbaumarten): Erhebung für Betriebsteile, entspr. bisheriger KSP	Grundfläche
Vorrat (Hauptbaumarten): dito	Vorrat
Zuwachs (Hauptbaumarten): dito	Zuwachs
Durchmesser-Verteilung: sehr interessant für Betrieb, insbes. im Schutzwald, Jahresplanung, Vor-/Nachkalkulation, Spezialsortimente, Planung und Kontrolle in strukturierten Beständen	Durchmesser-Verteilung
Oberhöhe: weniger wichtig, herleitbar aus Bonität/Pflanzensoz.	Oberhöhe
Holzqualität: schwierig zu erheben, wäre für Wertnachhaltigkeit aber unabdingbar	Holzqualität
Pflegedringlichkeit: aus Bestandesbeschreibung, Kenntnis der Bestandesgeschichte wäre hilfreich	Nicht im PK, (kein waldbaul. Parameter)
Verjüngungsdringlichkeit: aus Bestandesbeschreibung, Bestandesgeschichte könnte hilfreich sein	Nicht im PK, (kein waldbaul. Parameter)
Durchforstungsmasse: wichtig für Bestimmung des Potenzials, Schlagplanung	Nicht im PK, (kein

	waldbaul. Parameter)
Endnutzungsmasse: dito	Nicht im PK, (kein waldbaul. Parameter)

In der Diskussion ergänzte Parameter:

Risiken für den Bestand: klimatisch, biotisch, abiotisch, Klimawandel	Nicht im PK, (kein waldbaul. Parameter)
Bestandesgeschichte: wäre bei der Beurteilung des gegenwärtigen Zustandes und der zu erwartenden Entwicklung hilfreich	Bestandesgeschichte / Massnahmen
Giganten / Monumente / Biotopbäume	Giganten / Monumente, Dürrständer
Totholz	Liegendes Totholz; Vorrat Totholz liegend & stehend
Wildverbiss	Wildschäden
Verjüngung: genügend Verjüngung vorhanden? Verjüngung problematisch?	Deckungsgrad gesicherte Verjüngung, Baumartenmischung Verjüngung,

### 3.5 Synthese Parameterkatalog

Tabelle 16 zeigt einen Ausschnitt der Synthese des Parameterkataloges (nur Bestandeskennwerte), auf welchem gezeigt ist, welcher Parameter von welcher Informationsquelle nachgefragt wird. Die vollständige Synthese des Parameterkataloges ist im Anhang [A8] zu finden.



Tabelle 16: Synthese des Parameterkataloges

	Forest Resource	Global Forest Resources Assessment 2010 Country Report	Basis-indikatoren Bund & Kantone [Nr.]	Waldprogramm	Waldpolitik 2020	Indikatoren Nais / Basisindikator Naturgefahren	Kantonales Waldgesetz: Allg. Planungs GL	Kantonales Waldgesetz: WEP	Kantonales Waldgesetz: Betriebsplan	Musterbetriebsplan Zürich	Betrieb Strategisch, 3 Grundfragen	Bestandeskarte Brengarten	Betriebsplan Brengarten	Betrieb operationell, wichtig	Betrieb operationell, weniger wichtig	Planungsunterstützungstools WIS 2	Waldwachstumssimulatoren	Runder Tisch	Projektantrag Zusatz	Katalog Lfi 2 r = Rohdaten, a = abgeleitet
<b>Bestandes-, Behandlungseinheitskennwerte</b>																				
<b>Örtlichkeit, Ausdehnung, Abgrenzung</b>																				
Waldfläche	1	1	1	1	1	1		1	1	1	1	1	1	1	1			1	1	
Lage		1	1	1	1	1				1	1	1	1	1				1		
Bestandesgrenze																				1
Mikrotopographie						1	1													
<b>Strukturparameter auf Basis Höhe</b>																				
Oberhöhe					1	1					1						1	1	1	
Überhälter											1	1								
<b>Strukturparameter auf Basis Stammzahl</b>																				
Stammzahl				1	1	1	1	1	1	1	1	1					1	1		
Bestandesdichte											1		1							
<b>Strukturparameter auf Basis Durchmesser</b>																				
Durchmesserverteilung				1	1	1	1	1	1	1		1						1	1	
Oberdurchmesser																1				
Entwicklungsstufe				1	1		1	1	1	1	1	1	1	1		1		1		1
Grundfläche					1	1	1	1			1						1	1		
<b>Strukturparameter Interne Struktur</b>																				
Struktur (vertikale Bestandesstruktur)		1		1		1	1	1	1	1			1			1		1		1
Mischungsform															1			1		
Schlussgrad						1	1				1			1						
Kronendeckungsgrad						1	1				1			1						1
Waldrandstruktur					1															
Waldform		1											1					1		
<b>Identifikation Holzvolumen</b>																				
Vorrat	1	1	1	1	1	1		1		1	1	1		1				1	1	1
Zuwachs	1	1			1	1					1	1		1				1	1	
Biomasse oberirdisch		1	1			1	1					1								
Schaftholz			1								1	1								
Derbholz												1								
Vorrat Totholz stehend		1	1	1	1	1					1	1	1	1						
Vorrat Totholz liegend		1	1	1	1	1	1				1	1		1						
liegendes Holz			1																	
<b>Identifikation (Baum-)arten</b>																				
Baumart					1	1	1					1	1			1	1	1	1	1
Seltene Baumarten													1	1		1				
Hauptbaumarten		1	1	1	1	1		1	1	1	1	1		1						
Laub- / Nadelholz		1		1		1					1	1		1		1				1
Neophyten		1	1																	
Lärchen						1	1													
Immergrüne Nadelbäume						1	1													
Eibe											1									
Pionierbaumarten						1	1													
Eiche											1			1						
<b>Verjüngung, Krautschicht, Lücken</b>																				
Deckungsgrad gesicherte Verjüngung				1	1	1	1	1	1	1	1	1		1	1					
Verjüngung unter Schirm												1	1							
Baumartenmischung Verjüngung				1	1	1	1			1	1	1								
Beerensträucher																				1
Bodenvegetation						1	1								1					1
Lücken						1	1	1				1								
Moderholz							1													
Stadium Verjüngung						1	1	1		1										
<b>Qualitätsmerkmale</b>																				
Holzqualität												1				1		1	1	
Schäden / Gesundheitszustand																				
Schäden / Vitalität		1	1	1		1		1	1			1	1	1	1					
Waldbrand / Brandspuren		1																		
Kronenverlichtung		1																		
Wildschäden				1		1	1	1	1	1	1	1			1			1		1
Mechanische Widerstandskraft								1	1						1					1
<b>Bewirtschaftung/Qualitätssicherung</b>																				
Spuren von aktueller Holznutzung		1		1	1	1														
Bodenschäden						1	1													

## 4 Bedeutung der einzelnen Parameter

In diesem Kapitel wird beschrieben, welches Gewicht den einzelnen Parametern zufällt. Grundlage dazu bildet die Gewichtung der Informationsquellen. Wir unterscheiden dabei Controlling und Operationellen Informationsbedarf, sowie den Informationsbedarf spezifisch für einen Betrieb mit und ohne Wald mit Schutzfunktionen gegen Naturgefahren. Diese beiden Kategorien werden unabhängig voneinander betrachtet. Die nachfolgenden Ausführungen werden in Tabelle 17 (Operationell) dokumentiert.

### Gewichtung Controlling

Der Informationsbedarf für das Monitoring und Controlling setzt sich aus folgenden Ebenen zusammen: International, Government (Bund und Kanton) und Betrieb (Strategisch). Der Informationsbedarf der internationalen Organisationen hat nur zum Teil verpflichtende Wirkung. Wir gewichten daher den Informationsbedarf „International“ kleiner als jenen von „Betrieb“ und „Government“. Den Bedarf von Government sowie vom Betrieb erachten wir als ebenbürtig. Die Informationsansprüche von Seiten Government sind gesetzlich verankert und damit von der Öffentlichkeit legitimiert, die Informationsanforderungen vom Betrieb sind Voraussetzungen für den Betriebsleiter, um den Betrieb überhaupt führen zu können.

Innerhalb der Kategorie „International“ existieren sowohl die Berichte der UN (European Forest Sector Outlook Study, Forest Resource & Global Forest Resources Assessment 2010 Country Report), als auch die Berichterstattung für Forest Europe. Forest Europe hat dabei einen deutlich höheren Stellenwert, da auf diesen häufig verwiesen wird und auch nationale Nachhaltigkeitsberichte sich häufig nach diesem Bericht richten. Die drei UN Berichte erhalten zusammengekommen das gleiche Gewicht wie der Bericht von Forest Europe, welcher durch die Basisindikatoren inkl. NaiS repräsentiert wird.

Die Kategorie „Government“ lässt sich aufteilen auf Programme des Bundes (Basisindikatoren, Waldprogramm, Waldpolitik 2020) sowie die kantonale Waldgesetzgebung (Planungs GL, WEP, Betriebsplan). Diese werden je zu gleichen Teilen gewichtet (je 4 Pkte.). Innerhalb der Programme des Bundes erscheinen uns die Basisindikatoren als die wichtigste Informationsquelle (wird stark propagiert), weswegen wir hier die doppelte Punktzahl vergeben. Bei den kantonalen Waldgesetzen ist aus Sicht des Kantons der WEP das wichtigste Instrument, weswegen wir auch hier die doppelte Punktzahl im Vergleich zu den allg. Planungsgrundlagen und dem Betriebsplan vergeben.

Auf Stufe „Betrieb“ erscheinen uns die 3 Grundfragen des Betriebsleiters am wichtigsten, weswegen wir diese deutlich höher gewichten als die Basisindikatoren (Verhältnis 4:1).

Die Gewichtung basiert auf durchschnittlichen Verhältnissen wie wir sie in der Schweiz vorfinden und deckt sowohl die Verhältnisse für die Holzproduktion als auch für die Schutzwaldbewirtschaftung ab. Befinden wir uns im reinen Schutzwald, muss jedoch die Informationsquelle NaiS höher gewichtet werden.

### Gewichtung Operationell

Im operationellen Bereich setzt sich der Informationsbedarf aus folgenden Quellen zusammen: „Betrieb“ und „Management Tools“.

Auf Stufe Betrieb stellen die 5 Grundfragen des Betriebsleiters das zentrale Element des Informationsbedarfs dar, diese werden darum hoch gewichtet. Die weiteren Informationsquellen (Kantonale Waldgesetze, existierende Betriebspläne und Bestandeskarten) werden tiefer gewichtet, da hier eine Trennung zwischen operationellem und strategischem Informationsbedarf schwierig ist. Die Indikatoren aus dem NaiS erhalten hier ein kleines Gewicht. Für reine Schutzwaldverhältnisse müssten diese höher gewichtet werden.

Der Informationsbedarf für „Management Tools“ setzen sich aus dem Planungsunterstützungstool WIS 2 und Waldwachstumssimulatoren zusammen. Diese werden je zu gleichen Teilen gewichtet.

Insgesamt wird der Informationsbedarf für „Management Tools“ deutlich kleiner gewichtet als für den „Betrieb“ (Verhältnis 1:5). Die Management Tools stellen schlussendlich nur ein Hilfsmittel für die Modellierung des Bestandes dar.

Tabelle 17: Gewichtung der Informationsquellen

	Gewichtung Controlling	Gewichtung Operationell	Gewichtung Betrieb mit Natur- gefahren	Gewichtung Betrieb ohne Natur- gefahren	Anspruch an räum- liche Skala	Controlling / Operational
<b>International</b>						
European Forest Sector Outlook Study	2				5	C
Forest Resource	2				5	C
Global Forest Resources Assessment 2010					5	C
Country Report	2				5	C
Basisindikatoren Bund & Kantone [Nr.]	7				5	C
Indikatoren NaiS / Basisindikator					5	C
Naturgefahren	7					
<b>Government</b>						
Basisindikatoren Bund & Kantone [Nr.]	8				4	C
Indikatoren NaiS / Basisindikator					4	C
Naturgefahren	8					
Waldprogramm	4				4	C
Waldpolitik 2020	4				4	C
Kantonales Waldgesetz: Allg. Planungs GL	4				3	C
Kantonales Waldgesetz: WEP	8				3	C
Kantonales Waldgesetz: Betriebsplan	4				2	C
Musterbetriebsplan Zürich ohne					2	C
Bestandeskarte	2					
<b>Betrieb (Strategisch)</b>						
Betrieb Strategisch, 3 Grundfragen	27		19	21	3	C
Basisindikatoren Bund & Kantone [Nr.]	7		5	5	3	C
Indikatoren NaiS / Basisindikator					3	C
Naturgefahren	7		5			
<b>Betrieb (operationell)</b>						
Kantonales Waldgesetz: Betriebsplan					2	O
Musterbetriebsplan Zürich					2	O
Bestandeskarte Bremgarten		17	12	13	2	O
Betriebsplan Bremgarten		17	12	13	2	O
Betrieb operationell (Grundfragen), weniger wichtig		17	12	13	2	O
Betrieb operationell (Grundfragen), wichtig		42	30	33	2	O
Indikatoren NaiS / Basisindikator					2	O
Naturgefahren		8	6			
<b>Management Tools</b>						
Planungsunterstützungstools WIS 2					2	O
Waldwachstumssimulatoren					1	O

## 4.1 Ergebnisse

Ein wichtiges Ergebnis unserer Analyse ist die Angabe der Wichtigkeit eines Parameters. Die relative Wichtigkeit wird sowohl für das Szenario Operationell, wie auch für Controlling angegeben. Zusätzlich wird für jeden Parameter aufgelistet, ob dieser beim runden Tisch erwähnt wurde.

Die relative Wichtigkeit eines Parameters  $j$  unter gegebenem Szenario (z.B. Operationell, Controlling) wird wie folgt berechnet:

$$S_j = \sum_i RI_i * P_{i,j}$$

wobei

$S_j$  Punktzahl der relativen Wichtigkeit von Parameter  $j$

$RI_i$  Relative Gewichtung der Informationsquelle  $i$  unter gegebenen Szenario

$P_{i,j}$  =1 falls Parameter  $j$  in der Informationsquelle  $i$  vorkommt, sonst =0

Aufgrund der aufsummierten Punktzahl wurden die einzelnen Parameter in ihrer Wichtigkeit beurteilt (Tabelle 18). Um die Interpretierbarkeit zu vereinfachen wurde die Gewichtung anhand der Percentilwerte aufgelistet. Ein Percentilwert von 90% für Parameter  $j$  heisst beispielsweise, dass 90% der Parameter weniger Punkte erhalten haben als Parameter  $j$ . Die Ergebnisse sind in Tabelle 19 zu finden. Die vollständigen Tabellen finden sich im Anhang [A9] wieder.

**Tabelle 18: Zuweisen der Wichtigkeit eines Parameters aufgrund der Anzahl Punkte in der Bewertung**

Percentilwert [%]	Wichtigkeit
> 90	sehr wichtig (5)
> 75 - 90	wichtig (4)
> 50 - 75	mittel (3)
> 30 - 50	weniger wichtig (2)
0 - 30	unwichtig (1)

**Tabelle 19: Zusammenzug der wichtigsten Parameter aus „Controlling“, „Operationell“ und rundem Tisch. Sehr wichtige Parameter sind fett markiert**

	Nachfrage nach Parameter [1 = ja]						Runder Tisch [1= Erwähnt, 0= nicht erwähnt]	Wichtigkeit der Parameter für jedes Szenario [Percentiles: 1: < 25% 2: < 50% 3: < 75% 4: < 90% 5: < 100% ]			
	International	National	Sub National	Forest Management	Betrieb (strat.)	Betrieb (op.)		[1] Controlling	[2] Operationell	[3] Betrieb mit Naturgefahren	[4] Betrieb ohne Naturgefahren
<b>Strukturparameter auf Basis Höhe</b>											
Oberhöhe	0	0	0	1	1	1	1	3	4	4	3
Überhälter	0	0	0	1	1	1	0	3	3	3	3
<b>Strukturparameter auf Basis Stammzahl</b>											
Stammzahl	0	0	1	1	1	1	1	4	4	4	3
Bestandesdichte	0	0	1	1	0	1	0	1	3	2	2
<b>Strukturparameter auf Basis Durchmesser</b>											
Durchmesserverteilung	1	1	1	1	1	1	1	5	4	4	4
Entwicklungsstufe	1	1	1	1	1	1	1	4	5	5	5
Grundfläche	0	0	0	1	1	1	1	3	4	4	3
<b>Strukturparameter Interne Struktur</b>											
Struktur (vertikale Bestandesstruktur)	1	1	1	1	1	1	1	3	4	2	2
Mischungsform	0	0	0	1	0	1	1	1	4	3	3
Schlussgrad	0	0	1	1	1	1	0	2	4	2	2
Kronendeckungsgrad	0	0	1	1	1	1	0	2	4	2	2
Waldrandstruktur	0	0	1	0	0	0	0	1	1	1	1
Waldform	1	0	0	1	0	1	1	1	3	2	2
<b>Identifikation Holzvolumen</b>											
Vorrat	1	1	1	1	1	1	1	4	4	4	5
Zuwachs	1	1	1	1	1	1	1	4	3	3	4
Biomasse oberirdisch	1	1	0	1	1	0	0	3	1	2	3
Schaftholz	1	0	1	1	1	0	0	3	1	2	3
Derbholz	0	0	0	1	1	0	0	3	1	2	3
Vorrat Totholz stehend	1	1	1	1	1	1	1	4	3	3	4
Vorrat Totholz liegend	1	1	1	1	1	1	1	5	4	4	4
liegendes Holz	1	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1
<b>Identifikation (Baum-)arten</b>											
Baumart	1	1	0	1	1	1	1	3	4	5	4

Seltene Baumarten	1	0	0	1	1	1	0	3	3	3	3
Hauptbaumarten	1	1	1	1	1	1	1	5	3	3	4
Laub- / Nadelholz	1	1	1	1	1	1	0	4	3	3	4
Neophyten	1	1	1	1	1	0	0	2	1	1	2
Seltene Baumarten	0	0	1	1	1	1	0	2	3	2	2
<b>Verjüngung, Krautschicht, Lücken</b>											
Deckungsgrad gesicherte Verjüngung	0	1	1	1	1	1	1	5	5	5	5
Verjüngung unter Schirm	0	0	0	1	1	1	0	3	3	3	3
Baumartenmischung Verjüngung	0	1	1	1	1	1	1	5	2	3	3
Bodenvegetation	0	0	0	1	1	1	0	2	5	3	3
Lücken	0	1	0	1	1	1	0	3	2	3	3
Moderholz	0	0	0	1	1	1	0	2	2	2	1
Stadium Verjüngung	0	0	1	1	1	1	0	2	2	2	1
<b>Qualitätsmerkmale</b>											
Holzqualität	0	0	0	1	1	1	1	3	3	3	3
<b>Schäden / Gesundheitszustand</b>											
Schäden / Vitalität	1	1	1	1	1	1	0	4	5	5	5
Waldbrand / Brandspuren	1	1	1	1	1	0	0	2	1	1	2
Kronenverlichtung	1	1	1	1	1	0	0	2	1	1	2
Wildschäden	0	0	1	1	1	1	1	4	5	5	5
Mechanische Widerstandskraft	0	0	1	1	0	1	0	1	4	3	3
<b>Bewirtschaftung/Qualitätssicherung</b>											
Spuren von aktueller Holznutzung	1	1	1	1	1	0	0	2	1	1	2
mech. Bodenschäden	0	1	0	0	0	0	0	1	1	1	1

Die Parameter aus Tabelle 19, welche eine sehr wichtige Beurteilung bekommen haben (Klasse 5) sind die folgenden:

Waldfläche, Durchmesservertelung, Entwicklungsstufe, Vorrat, Vorrat Totholz liegend, Hauptbaumarten, Deckungsgrad gesicherte Verjüngung, Baumartenmischung Verjüngung, Bodenvegetation, Schäden / Vitalität, Wildschäden.

## 5 Anforderungen an die Parameter

Die Anforderungen an die Parameter lassen sich durch folgende Attribute charakterisieren:

- Maximaler Fehler
- Tiefe der räumlichen Auflösung
- Periodizität der Aufnahme

### 5.1 Maximaler Fehler

Für eine Messung oder Abschätzung muss immer der Fehler bekannt sein. Kennt man den Fehler nicht, ist auch die Messung nichts wert. Diese Aussage ist etwas provokativ formuliert, trifft jedoch zu. Vielfach werden Messungen oder Schätzungen einfach hingenommen und man macht sich keine Gedanken über den Fehler.

#### 5.1.1 Metrik

Zur Berechnung des Fehlers existieren u.a. folgende Metriken, welche wir mit folgendem Beispiel illustrieren: Eine Grösse  $\xi$  wird  $n$  mal gemessen, die  $n$  Messwerte (z.b. lokale Dichten)  $x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$  stellen eine Stichprobe im Umfang  $n$  dar.

Näherungswert für $\xi$ ist der <b>empirische Mittelwert</b> (sample mean)	$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i$
geschätzte <b>Varianz</b> der Einzelmessungen (beschreibt die Streuung)	$\hat{V}(x) = \frac{1}{(n-1)} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2$
Der mittlere Fehler der Einzelmessung ist die <b>empirische Standardabweichung</b> (68% aller Messwerte befinden sich im Bereich $\bar{x} \pm s$ )	$s = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}$
Schätzwert der <b>Varianz der Mittelwerte</b> (unbiased), (Variance of the sample mean)	$\hat{V}(\bar{x}) = \frac{1}{n(n-1)} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2$
Der Mittlere Fehler des Mittelwertes ( <b>Standardfehler</b> ). Wird bei zunehmender Stichprobenanzahl kleiner. Der Standardfehler gibt die theoretische Streubreite der Gruppenmittelwerte an (aus unendlich vielen Stichproben)	$s_{\bar{x}} = \frac{s}{\sqrt{n}} = \sqrt{\frac{1}{n(n-1)} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}$
Angabe des Resultates	$\xi = \bar{x} \pm s_{\bar{x}}$

Entstammen die  $n$  Messungen einer normalverteilten Grundgesamtheit, so wird der unbekannte Wert der Grösse  $\xi$  mit der Wahrscheinlichkeit  $K$  vom Vertrauensintervall  $[\bar{x} - c, \bar{x} + c]$  überdeckt. Ist  $n \geq 30$  so gilt:

c	K
$s_{\bar{x}}$	68%
$1.96 * s_{\bar{x}}$	95%
$2.58 * s_{\bar{x}}$	99%



In der Folge definieren wir also den Standardfehler als relevante Fehlermetrik für kontinuierliche Werte wie Vorrat, Zuwachs, BHD- Verteilung, etc.

### 5.1.2 Maximal zulässiger Fehler

Aus Sicht der Forstbetriebe und Kantone existieren keine definierten Grenzwerte. Die Kennwerte sollten möglichst genau sein. Der Kanton Aargau strebt einen maximalen Fehler (Standardfehler) von 10% an. International konnten keine festgelegten Grenzwerte für Fehler gefunden werden.

Man kann davon ausgehen, dass Messungen im Minimum so gut sein sollten, wie die Einschätzung eines erfahrenen Experten. Als Faustregel schätzt ein erfahrener Förster wichtige Kenngrößen wie z.B. Vorrat oder Stammzahl oder Baumartenverteilung auf 10% (Standardfehler) genau.

## 5.2 Tiefe der räumlichen Auflösung

### 5.2.1 Methodik

Unter der Tiefe der räumlichen Auflösung verstehen wir, auf welcher räumlichen Skala eine zuverlässige Aussage der Parameter möglich sein soll (Standardfehler < 10%). Wir arbeiten mit den Kategorien, welche in Tabelle 20 aufgelistet sind. Die Skala reicht vom Einzelbaum mit einer Fläche zwischen 1 und 100m<sup>2</sup> bis zu einem Land mit einer Fläche von mehr als 7000 km<sup>2</sup>. Die Grössenangaben sind dabei nicht als fixe Grenzen zu verstehen, sondern zeigen in etwa die Grössenordnungen auf und wurden von uns gutachtlich festgelegt.

**Tabelle 20: Mögliche räumliche Auflösungen und ungefähre Grössenangaben**

Skala	Einzelbaum	Bestand / Behandlungseinheit	Betrieb	Region / Kanton	Land
#Nr	1	2	3	4	5
Grösse	1 - 100 m <sup>2</sup>	5000 m <sup>2</sup> - 0.5 ha	5 km <sup>2</sup> - 50 km <sup>2</sup>	50 km <sup>2</sup> - 7000 km <sup>2</sup>	> 7000 km <sup>2</sup>

Die meisten Parameter werden auf mehreren Stufen nachgefragt. Beispielsweise besteht aus Sicht des Forstbetriebs ein grosses Interesse daran, den Vorrat auf Skala „Bestand“ und „Betrieb“ zu kennen. Der Bund oder der Kanton interessiert sich jedoch kaum für den Vorrat im „Bestand“, jedoch auf Stufe „Betrieb“, „Region“ oder „Land“. Darum macht es keinen Sinn nur eine Auflösungsklasse pro Parameter zu definieren. Vielmehr macht es Sinn aufzuzeigen, wie wichtig es ist, auf den einzelnen räumlichen Auflösungsstufen den entsprechenden Parameter zu kennen. Ein Beispiel ist in Abbildung 5 anhand des Parameters Vorrat dargestellt.

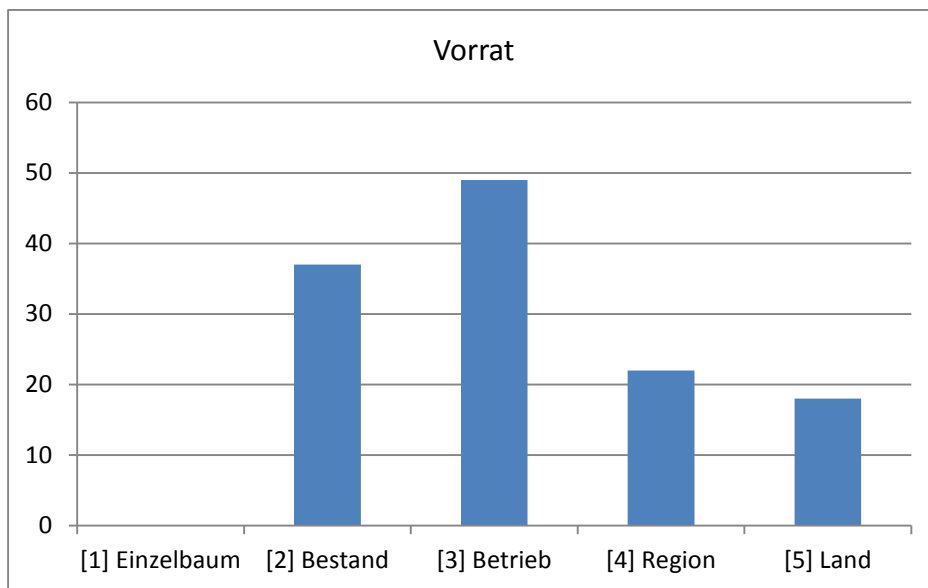


Abbildung 5: Wichtigkeit der Tiefe der räumlichen Auflösung anhand des Parameters „Vorrat“. Die x - Achse zeigt die räumliche Skala an und die y – Achse die jeweilige Wichtigkeit.

Die Wichtigkeit der einzelnen räumlichen Auflösungsskalen wird dabei wie folgt hergeleitet. Als erstes werden die einzelnen Informationsquellen gewichtet. Diese erfolgt analog wie im Kapitel „Bedeutung der einzelnen Parameter“ beschrieben und in Tabelle 17 im Einzelnen dargelegt.

Als zweiter Schritt werden die gewichteten Parameter einer räumlichen Skala zugeteilt. Hier wird definiert, auf welcher räumlichen Skala mit dem Parameter eine gesicherte Aussage mit einem Fehler von maximal 10% (Standardfehler) gemacht werden soll. Die Parameter nehmen vor allem Einzelbaum- und Bestandeskennwerte auf, trotzdem lässt sich daraus nicht folgern, dass auch die Genauigkeiten in diesem Bereich sein müssen. Beispielsweise werden im LFI zahlreiche Einzelbaumkennwerte (Stichproben) aufgenommen, gesicherte Aussagen lassen sich aber allenfalls auf Ebene Region / Kanton machen.

Bezüglich Anspruch an die Tiefe der räumlichen Skala nehmen wir folgendes an: Für internationale Berichte sind Aussagen auf Ebene des Landes nötig, darum genügt hier Stufe 5 („Land“). Der Informationsbedarf des „Government“ muss differenzierter angesehen werden. Der Bund möchte gerne Informationen, die Aussagen auf Ebene Kantone / Region zulassen. Betrachtet man beispielsweise den Vorrat von Wäldern, möchte man auch wissen in welchen Regionen oder Kantonen dieser zu hoch oder zu niedrig ist. Auch das LFI, welches den Informationsbedarf des Bundes erhebt, peilt eine Genauigkeit an, die es erlaubt auf Stufe Kantone / Regionen gesicherte Aussagen zu machen. Der Kanton möchte gerne Informationen, mit denen er auf Stufe Betrieb, teilweise auch auf Stufe Bestand Aussagen machen kann. Stellt der Kanton beispielsweise fest, dass zu viel Holz genutzt wird, möchte er auch wissen welcher Betrieb den Wald übernutzt. Informationen bis auf Stufe Bestand braucht der Kanton, da er teilweise verpflichtet ist (bzw. sich selbst verpflichtet hat), Planungsgrundlagen für die Betriebspläne der Forstbetriebe zur Verfügung zu stellen. Der Betrieb selbst braucht für den „strategischen“ Teil Informationen, die gesicherte Aussagen auf Ebene Betrieb zulassen, dies reicht in der Regel für die Strategientwicklung wie auch für das interne Controlling. Für den operationellen Bereich ist er jedoch auf gesicherte Informationen auf Stufe des

einzelnen Bestandes angewiesen. Die Management Tools brauchen verlässliche Informationen auf Stufe Bestand und Stufe Einzelbaum.

Jeder Parameter, der in einer Informationsquelle vorkommt, wird entsprechend der Informationsquelle gewichtet und der betreffenden räumlichen Skala zugeordnet. Beispiel: Der Parameter Vorrat, der u.a. im Bericht „Forest Resources“ vorkommt enthält das Gewicht 2 und wird der räumlichen Skala 5 zugeordnet. Die Auswertung aller Informationsquellen nach dem Parameter Vorrat und das Aufsummieren aller Gewichte in der entsprechenden räumlichen Skala ist die Grundlage zur Auswertung wie in Abbildung 5 dargestellt.

### 5.2.2 Wünschenswerte räumliche Auflösung der einzelnen Parameter

Tabelle 21 zeigt die Wichtigkeit der räumlichen Auflösung für jede Auflösungsstufe. Allgemein besteht die grösste Nachfrage für die Stufe [2] Bestand und [3] Betrieb.

**Tabelle 21: Parameterkatalog mit Gewichtung der einzelnen Parameter auseinandergeschlüsselt für jede räumliche Auflösungsklasse**

	relative Wichtigkeit (Punkte) für jede räumliche Skala					Parameter Typ [1=Controlling, 2=Operational, 3=Beides, 0=keines] Wachstums abhängiger Parameter [1=ja, 0=nein] Aufnahmehäufigkeit, Reguliär Aufnahmehäufigkeit, Ereignis			
	[1] Einzelbaum	[2] Bestand	[3] Betrieb	[4] Region	[5] Land				
<b>Bestandes-, Behandlungseinheitskennwerte</b>									
<b>Örtlichkeit, Ausdehnung, Abgrenzung</b>									
Waldfläche	0	69	46	11	13	3	1	10	1
Lage	0	23	27	0	4	3	1	10	1
Bestandesgrenze	0	0	0	0	0	0	1	n.l.	n.l.
Mikrotopographie	0	7	7	7	7	1	1	10	10
<b>Strukturparameter auf Basis Höhe</b>									
Oberhöhe	8	21	34	7	7	3	1	10	1
Überhälter	0	7	27	0	0	1	1	10	10
<b>Strukturparameter auf Basis Stammzahl</b>									
Stammzahl	8	41	46	7	7	3	1	10	1
Bestandesdichte	0	16	0	0	0	0	1	n.l.	n.l.
<b>Strukturparameter auf Basis Durchmesser</b>									
Durchmesserverteilung	0	32	53	14	14	3	1	10	1
Oberdurchmesser	0	8	0	0	0	0	1	n.l.	n.l.
Entwicklungsstufe	0	56	46	11	7	3	1	10	1
Grundfläche	8	21	34	7	7	3	1	10	1
<b>Strukturparameter Interne Struktur</b>									
Struktur (vertikale Bestandesstruktur)	0	33	19	11	9	3	1	10	1
Mischungsform	0	35	0	0	0	2	1	10	1
Schlussgrad	0	23	7	7	7	3	1	10	1
Kronendeckungsgrad	0	23	7	7	7	3	1	10	1
Waldrandstruktur	0	9	0	0	0	0	1	n.l.	n.l.
Waldform	0	7	0	0	2	0	1	n.l.	n.l.
<b>Identifikation Holzvolumen</b>									
Vorrat	0	41	38	11	13	3	1	10	1
Zuwachs	0	16	34	11	11	1	1	10	10
Biomasse oberirdisch	0	0	27	8	4	1	1	10	10

Schaftholz	0	9	27	0	2	1	1	10	10
Derbholz	0	0	27	0	0	1	1	10	10
Vorrat Totholz stehend	0	16	34	15	11	1	1	10	10
Vorrat Totholz liegend	0	23	41	18	18	3	1	10	1
liegendes Holz	0	0	0	0	2	0	1	n.l.	n.l.
<b>Identifikation (Baum-)arten</b>									
Baumart	8	36	34	11	7	3	1	10	1
Seltene Baumarten	0	15	27	0	0	1	1	10	10
Hauptbaumarten	0	27	46	15	11	1	1	10	10
Laub- / Nadelholz	0	24	34	11	9	1	1	10	10
Neophyten	0	0	7	7	11	1	1	10	10
Lärchen	0	7	7	7	7	1	1	10	10
Immergrüne Nadelbäume	0	7	7	7	7	1	1	10	10
Eibe	0	9	0	0	0	0	1	n.l.	n.l.
Pionierbaumarten	0	7	7	7	7	1	1	10	10
Eiche	0	16	0	0	0	0	1	n.l.	n.l.
<b>Verjüngung, Krautschicht, Lücken</b>									
Deckungsgrad gesicherte Verjüngung	0	69	53	22	14	3	1	10	1
Verjüngung unter Schirm	0	7	27	0	0	1	1	10	10
Baumartenmischung Verjüngung	0	27	41	22	14	1	1	10	10
Beerensträucher	0	0	0	0	0	0	1	n.l.	n.l.
Bodenvegetation	0	42	7	7	7	3	1	10	1
Lücken	0	7	34	11	7	1	1	10	10
Moderholz	0	7	7	7	7	1	1	10	10
Stadium Verjüngung	0	18	7	7	7	1	1	10	10
<b>Qualitätsmerkmale</b>									
Holzqualität	0	22	27	0	0	1	1	10	10
<b>Schäden / Gesundheitszustand</b>									
Schäden / Vitalität	0	49	46	11	11	3	1	10	1
Waldbrand / Brandspuren	0	0	7	7	9	1	1	10	10
Kronenverlichtung	0	0	7	7	9	1	1	10	10
Wildschäden	0	62	46	7	7	3	1	10	1
Mechanische Widerstandskraft	0	35	12	0	0	2	1	10	1
<b>Bewirtschaftung/Qualitätssicherung</b>									
Spuren von aktueller Holznutzung	0	0	7	7	9	1	1	10	10
mech. Bodenschäden	0	0	0	8	0	0	1	n.l.	n.l.

### 5.3 Aktualität

Unter Aktualität der Daten verstehen wir in dieser Studie den Turnus der Nachführung der Daten oder die Periodizität der Aufnahme. Wir unterscheiden folgende Perioden:

Jährlich / 10 Jährlich / 100 Jährlich / Ereignisabhängige Nachführung

Unter ereignisabhängiger Nachführung verstehen wir, dass nach einem ausserordentlichem Ereignis eine Nachführung nötig ist, zum Beispiel nach einem Sturmereignis, einer Durchforstung oder einem Holzschlag.

Der Turnus der Datennachführung wird durch 2 Faktoren beeinflusst: [1] Durch die Geschwindigkeit der Änderung der Parameter und [2] durch die Häufigkeit der Informationsnachfrage. Parameter die sich ändern, können so lange benutzt werden, wie sie noch den Zustand des Waldes in geforderter Genauigkeit wiedergeben. Wir gehen davon aus, dass dasjenige Kriterium massgebend ist, welches die längere Turnuszeit aufweist.

Beim Kriterium 1 „**Geschwindigkeit der Änderung der Parameter**“ legen wir folgende Klassen fest:

- Konstante Grössen, wie z.B. Standortseigenschaften, Waldgesellschaft, welche sich nur über sehr lange Zeiträume > 100 Jahre ändern
- Wachstums- und nutzungsabhängige Grössen, diese Grössen ändern sich im Verlauf des Wachstums des Waldes oder bei einer Nutzung. Die Zahlen bleiben während ca. 10 Jahren aktuell (bisheriger Aufnahmeturnus von vielen Inventuren). Nur nach Nutzungen oder nach einem ausserordentlichen Ereignis (z.B. Sturm) sind die Informationen nicht mehr aktuell und müssen im Idealfall sofort neu erhoben werden.

Beim Kriterium 2 „**Häufigkeit der Informationsnachfrage**“ unterscheiden wir nach dem Zweck der Information:

- Controlling: Bei Controlling-Daten gehen wir von 10 jährlichen Informationsnachfragen aus. So werden zum Beispiel die Berichte des Bundes alle 10 Jahre erhoben (Waldbericht), oder auch die Betriebspläne (Kanton / Betrieb) werden rund alle 10 Jahre erhoben.
- Die Operationelle Planung erfolgt in der Regel jedes Jahr, zum Teil auch in kürzeren Zeitabständen. Deshalb gehen wir hier von einer Informationsnachfrage von einem Jahr aus.

Wir fordern daher: damit ein Parameter für Controlling bzw. für Operationell zählt, muss dieser je mindestens die Wichtigkeit 3 aufweisen (siehe Tabelle 18).

Das schematische Vorgehen ist in Abbildung 6 beschrieben. Wir unterscheiden nach regulärem Aufnahmeturnus und Aufnahmeturnus nach einem Ereignis. Letztgenannter wird angewandt nach einer Nutzung oder einem ausserordentlichem Ereignis wie z.B. Sturm.

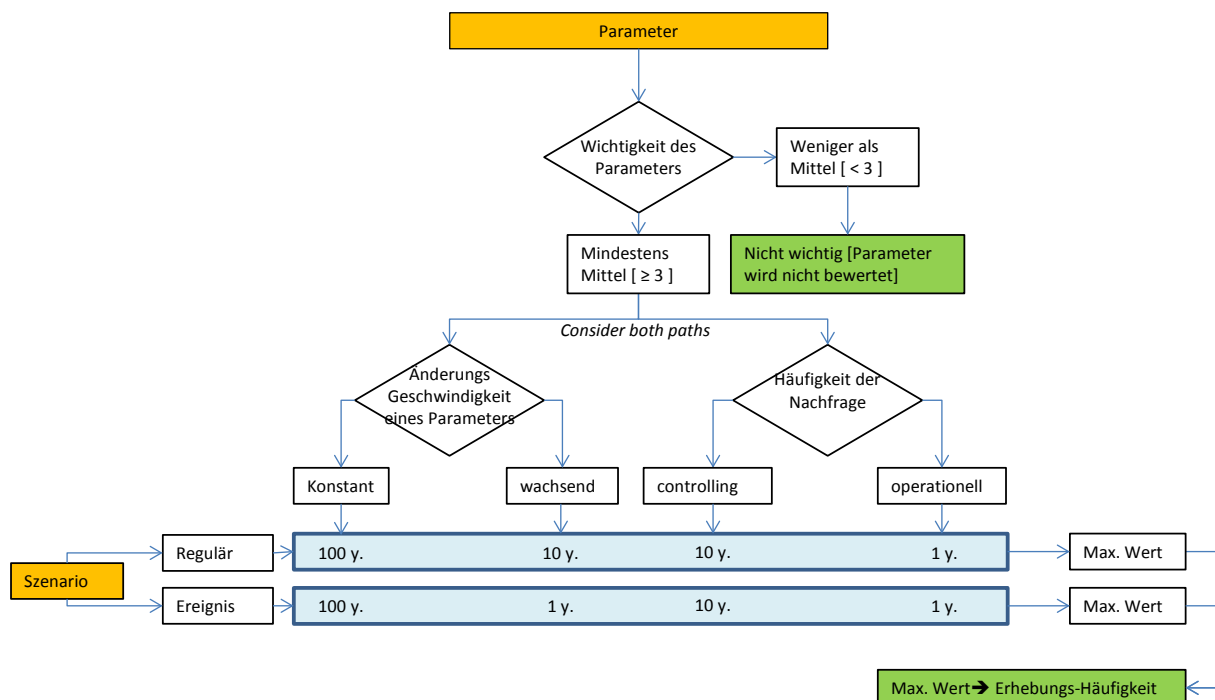


Abbildung 6: Vorgehen zur Ermittlung des regulären Aufnahmeturnus sowie des Aufnahmeturnus nach einem Ereignis.

Im Anhang [A 10] sind die Ergebnisse inkl. der Eingangsparameter angegeben.

## 6 Diskussion

In diesem Teil des Berichts wurde auf möglichst objektive Weise hergeleitet, welche Ebenen der Informationsnachfrage existieren und welche Informationsbedürfnisse die verschiedenen Ebenen haben. Daraus wurde ein Parameterkatalog für Waldbau- und Waldnutzungsparameter abgeleitet. Es ist aber immer noch ein grosser subjektiver Einfluss in der Bewertung vorhanden.

Das grundsätzliche Problem bei der Evaluation von Informationsbedürfnissen in der Forstwirtschaft ist, dass der Informationsbedarf auch abhängig von verfügbarer Information ist, Informationsbedürfnisse im Laufe der Zeit wechseln (z.B. im Rahmen des Klimawandels) und abhängig von den Aufgaben und Zielen des Nutzers sind.

Zusätzlich erschwerend ist, dass es bei Interviews mit Akteuren häufig zwei Antworten gegeben werden:

- Alles ist wichtig! Wir würden gerne alles wissen!
- „Huhn – Ei“ Problem: Sobald neue Information verfügbar ist, wollen die Nutzer auch über diese verfügen.

Trotz all dieser Schwierigkeiten bietet der hier vorgestellte Parameterkatalog doch eine gewisse Orientierung für die Planung von weiteren Inventuren.

Ein weiteres Ziel dieses Untersuchungsteils war es, mögliche Synergien zwischen nationaler Inventur und Betriebsinventur zu untersuchen. Es wurde gezeigt, dass in vielen Fällen Indikatoren und Parameter sowohl bei nationaler Inventur als auch in der Betriebsinventur auftreten. Da Betriebe in der Schweiz klein sind und sich daher in der Regel nur wenige LFI Stichproben in einem Betrieb befinden, bringt das Hinzufügen von LFI Stichproben zur Betriebsinventur nur einen sehr beschränkten Nutzen. Vielversprechender dürfte es sein, mithilfe der LFI Stichproben und Fernerkundungsdaten Modelle für Zielgrössen zu entwickeln und dann diese Modelle in den Betrieben anzuwenden.

## Teil B: Sammlung bereits vorhandener Tools, Systeme und Formate

### 1 Ziele

In diesem Kapitel geht es darum, bereits vorhandene Methoden Tools, Systeme und Formate zu sammeln und zu analysieren, insbesondere:

- Zusammentragen der GIS Systeme und EDV Tools, die gegenwärtig in den Kantonen eingesetzt werden. Definition der Schnittstellen, um Import und Export aus und in diese Systeme zu ermöglichen;
- Zusammentragen des Stands des Wissens der Herleitung der Parameter mit Fernerkundungsdaten;
- Zusammentragen von Tools (auch Prototypen), für die Auswertung der Fernerkundungsdaten;
- Zusammentragen von bestehenden Tools, die für die Entscheidungsprozesse hilfreich sein können;
- Auswahl geeigneter Verfahren und Teilen von Verfahren aus dem In- und Ausland, welche für die waldbauliche Planung und Nutzungsplanung verwendet werden können.

### 2 Umfrage an die Kantone

Um einen Überblick über existierende Systeme und Tools zu erhalten, wurde eine Umfrage unter allen Waldplanungsspezialisten der Kantone durchgeführt.

#### 2.1 Fragen

Im April 2016 wurde eine Umfrage an alle Waldplanungsspezialisten der Kantone versandt. Ziel war es zu evaluieren, was für GIS Systeme und EDV Tools (auch Prototypen) im Zusammenhang mit der Inventur und der Auswertung von Fernerkundungsdaten für Waldbau- und Nutzungsparameter eingesetzt werden. Folgende Fragen wurden gestellt:

- 1) Was wird eingesetzt bei ihnen im Kanton (oder in grösseren Forstbetrieben im Kanton)...
  - ... an GIS Systemen? (z.B. ArcGIS (ESRI), QGIS, Datenbanken, weitere)
  - ... an Software, Tools zur Aufnahme oder / und Auswertung von terrestrischen Stichproben? (z.B. Moti, KSP – Auswerteprogramme, Excel, R, Matlab, ...)
  - ... an Software oder Tools zur Auswertung von Fernerkundungsdaten (z.B. LASTools, Matlab Scripts, GIS Toolboxes, etc.)
  - ... an weiteren Entscheidungsunterstützungstools, welche Inventur- oder Fernerkundungsdaten als Grundlagen benötigen? (z.B. WIS 2, SiWaWa)  
*(Bitte bei der Softwarebeschreibung jeweils auch den Autor oder Hersteller der Software angeben)*

- 2) Was für Schnittstellen weisen die eingesetzten Tools auf? (z.B. in welchem Datenformat werden die Informationen ausgetauscht?)
- 3) Genügen die eingesetzten Tools oder wünschen sie von ihrer Sicht aus Anpassungen oder Weiterentwicklungen?

## 2.2 Antworten

Antworten kamen von 17 der 25 angeschriebenen Kantone (AG, AR, BE, BL, FR, GL, GR, LU, NW, SH, SZ, TI, UR, VD, VS, ZG, ZH). Von einem Kanton (SH) kam die Antwort, dass weder EDV Tools noch GIS Systeme im Zusammenhang mit der Inventur eingesetzt werden.

Bei den einzelnen Fragen kamen folgende Antworten:

### A.) Was wird an GIS Systemen eingesetzt?

Eingesetztes System	Anzahl Nennungen (Mehrfachnennungen möglich)
ArcGIS inkl. ArcMap, ArcCatalog, ArcScene, ArcGIS online	13
QGIS	8
Oracle	3
MS Access	3
SQL Server	2
PostGIS / PostgreSQL	2
Kantonales WEB GIS	2
ArcPad	1
Enterprise Architect	1
Python	1
FME	1
Waldportal	1
MapInfo / Engage 3D	1
Geonis, eigene Lösung	1
DigiTerra	1



**B.) Was wird an Software, Tools zur Aufnahme oder / und Auswertung von terrestrischen Stichproben eingesetzt?**

	<b>Anzahl Nennungen</b> <i>(Mehrfachnennungen möglich)</i>
MS Excel	5
Moti	5
InvDB (z.T. nicht mehr in Betrieb)	4
Access	4
Extern (WSL, Büros)	3
R	2
KSP Auswerteprogramme	2
sorvor wsl	2
KSP Plattform Guaraci	1
Eigenentwicklung Access, <a href="http://www.pitsch-ing.ch">www.pitsch-ing.ch</a> , Auswertung Bestandesaufnahmen	1
FBK (Forstliche Bestandeskartierung, <a href="http://www.silvadis.ch">www.silvadis.ch</a> )	1
QGIS	1
ArcGIS	1
GPS Trimble	1
Elektronische Kluppe	1

**C.) Was wird an Software oder Tools zur Auswertung von Fernerkundungsdaten eingesetzt?**

	<b>Anzahl Nennungen</b> <i>(Mehrfachnennungen möglich)</i>
Externe Auswertung	4
ArcGIS	3
keine	3
LASTools	2
QGIS (incl. GRASS)	2
Matlab	1
R	1
Excel	1
LIS (Laserdaten)	1
Saga GIS	1
PostgreSQL / Postgis	1
FME	1
E3D / Mapinfo	1
TYDAC, Bern, Pitney Bowes	1

**D.) Was wird an weiteren Entscheidungsunterstützungstools, welche Inventur oder Fernerkundungsdaten als Grundlagen benötigen eingesetzt?**

	<b>Anzahl Nennungen</b> (Mehrfachnennungen möglich)
Keine	8
WIS 2 Cockpit / WIS	3
WIS BE	1
Geomail	1
Waldportal softec	1
Eigenentwicklung Forest Map, basiert auf ArcGIS	1
Seilkran Pro	1
Steinschlag Tool (Fachstelle fuer Gebirgswaldpflege)	1
HeProMo	1
Eigenlösungen auf Excel Basis	1
Excel Dauerwaldmodell	1
finnische Produkte	1
SiWaWa	1

**E.) Was für Schnittstellen weisen die eingesetzten Tools auf? (z.b. in welchem Datenformat werden die Informationen ausgetauscht?)**

	<b>Anzahl Nennungen</b> (Mehrfachnennungen möglich)
xls / xlsx	7
shp	6
txt	3
File-Geodatabase / PGDB (ESRI)	3
access / mdb	3
FME	2
Rasterdaten allgemein	2
PostgreSQL / Postgis Datenbank	2
dbf	2
csv	2
tiff	1
las	1

**F.) Genügen die eingesetzten Tools oder wünschen sie von ihrer Sicht aus Anpassungen oder Weiterentwicklungen?**

	<b>Anzahl Nennungen</b> (Mehrfachnennungen möglich)
Eingesetzte Tools genügen	5
Volumenberechnung aus LIDAR (Baumhöhe, lokaler Tarif oder mit Moti)	3
Interesse an Neuentwicklungen generell	2
Zweiphasige Stichproben Auswertung	1
Bestandeskarte aufgrund VHM Modellierung	1
Online Abfragen im Wald (GIS, Datenbanken)	1
KSP Plattform, offline, weitere Auswertemöglichkeiten	1
INVDB weiterentwickeln, bzw. darauf aufbauen	1
Zusammenarbeit mit externen Stellen	1

## 2.3 Feldaufnahmen

Im Rahmen dieser Umfrage wurden vereinzelt vertiefte Interviews geführt. Bernhard Roth (Kanton SZ) hat neben den Kernpunkten des Projektes auf andere Optimierungsmöglichkeiten in der „Inventurkette“ aufmerksam gemacht, die in diesem Projekt nicht behandelt werden konnten, allerdings für weitere Entwicklungen in Betracht gezogen werden sollten.

Die Feldaufnahmen sind ein grosser Kostenpunkt bei der Inventur und dementsprechend gibt es auch hier Optimierungsmöglichkeiten; gemäss Meinung von B. Roth würde es Sinn machen, ein eigenes Modul der Datenaufnahme zu widmen.

- Entwicklung einer Feldaufnahme-Software (evtl. aufbauend auf LFI Software), welche folgende Optionen enthalten müsste:
  - o Anzeigen von Baumplots der letzten Inventur (durch Baumplots wird das schnelle Auffinden der Stichproben im Wald & Verifikation erleichtert)
  - o Automatische Fehlerüberprüfung bei Eingabe ( z.B. Berechnung, ob der Zuwachs bei einem Baum so möglich ist.)
- Tools für die Feldaufnahme
  - o effizientes Messgerät um im Bestand die Distanzen zu messen
  - o effiziente Positionsvermessung (GPS) im Bestand
- Mit dem Ausdünnen von Stichproben werden wohl die Kosten nicht entsprechend sinken, da die Stichprobenaufnahmen in vielen Fällen auch mit anderen waldbaulichen Controlling-Massnahmen verbunden sind.

## 2.4 Fazit

Die Umfrage zeigte, dass jeder Kanton seine eigene Lösung hat und keine einheitlichen Standards existieren. Unter den Schnittstellen sind grösstenteils keine proprietären Formate vorhanden (ausser File Geodatabase von ESRI), was grundsätzlich einen guten Datenaustausch und eine Einbindung in die bestehenden Systeme ermöglichen sollte.

### 3 Inventur Konzepte (Stichproben Design)

#### 3.1 Globale Schätzmethoden

Basierend auf der Stichproben-Theorie wurden verschiedene Konzepte für Inventuren entwickelt. Das Ziel des Stichproben Designs ist es, die geeignetste Stichproben Methode zu finden, welche die Bedürfnisse unter den gegebenen Bedingungen erfüllt (Köhl et al. 2006). Stichproben Designs können in zwei Hauptgruppen unterteilt werden:

- Stichproben-Design ohne Hilfsinformationen
- Stichproben-Design mit Hilfsinformationen

Bei Stichproben-Designs ohne Hilfsinformationen werden nur die Beobachtungen der Zielvariable im Feld (z.B. Vorrat) verwendet, um die Parameter (Schätzung, Varianz) herzuleiten. Werden Hilfsinformationen verwendet, handelt es sich häufig um Fernerkundungsdaten wie Luftbilder, Orthophotos, thematische Karten, Satellitenbilder oder LiDAR-Befliegungen. Als Faustregel kann man festhalten, dass Sampling-Designs mit Hilfsinformationen effizienter sind als solche ohne. (Köhl et al. 2006). Die häufigsten Stichproben Designs sind in Abbildung 7 festgehalten (Pelz and Cunia 1985).

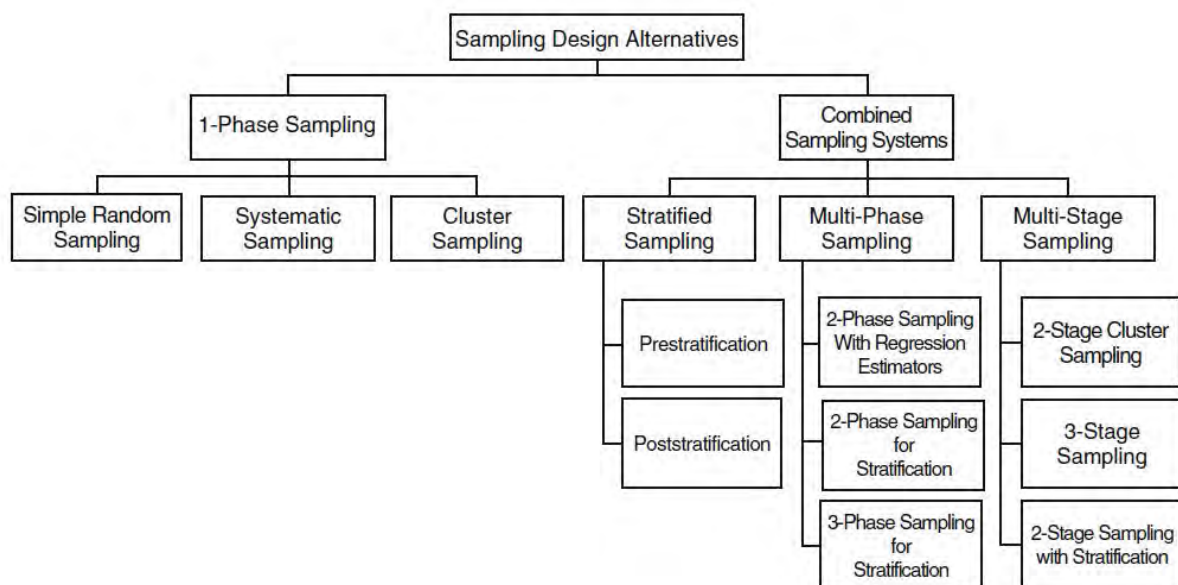


Abbildung 7: Häufigste Stichproben-Designs. Die Design-Methoden, welche in den Kästchen auf der rechten Seite beschrieben werden, enthalten Hilfsinformationen. (Pelz und Cunia 1985)

Nachfolgend werden jene Design-Methoden genauer erläutert, welche im In- oder Ausland bereits angewandt werden und für dieses Projekt von Relevanz sind.

##### 3.1.1 Einphasige Stichproben

Einphasige Stichproben bestehen nur aus einer Stichprobe (Phase), der terrestrischen Aufnahme. Hier gibt es zwei Konzepte: permanente und temporäre Stichproben. Für permanente Stichproben wird auch der Ausdruck Kontrollstichproben verwendet. Für Informationen über den aktuellen Zustand sind im Allgemeinen gemischte Stichproben mit temporären und permanenten Probeflächen optimal, für Zustandsveränderungen sind Stichproben mit ausschliesslich permanenten Probeflächen vorzuziehen, Zuwachs und Nutzungen sind praktisch nur mit permanenten Probeflächen zu erhalten (Schmid-Haas 2003). Die Berechnung der Mittelwerte und der Standardfehler der Merkmale ist

relativ einfach. Die Formeln sind in Schmid-Haas (2003) beschrieben. Während die Standardfehler für Merkmale des aktuellen Zustands (Vorrat, Baumartenanteile usw.) bei permanenten und temporären Stichproben genau gleich berechnet werden, ist die Berechnung für Zustandsveränderungen völlig verschieden (Schmid-Haas 2003). Da Zustandsveränderungen zentrale waldbauliche Steuerungsgrößen darstellen, sind in der Schweiz Kontrollstichproben sehr häufig zu finden.

Mit dem Aufkommen von Fernerkundungsdaten (Luftbilder) wurden die Kontrollstichproben anhand der Eigenschaften der Luftbilder ausgewählt (zweiphasige zweistufige Traktstichproben). Mandallaz (2003) hat Möglichkeiten zur Optimierung des Stichprobenlayouts hergeleitet und gezeigt, dass die Methoden, wie sie im LFI verwendet werden, dem Optimum sehr nahe kommen (2 Probekreise an den einzelnen Stichprobenpunkten).

### 3.1.2 Zweiphasige Stichproben

Zweiphasige Schätzer verwenden Bestandesinformationen aus zwei verschachtelten Stichproben, welche auch als Phasen bezeichnet werden. Die erste Phase umfasst erklärende Variablen, welche in grosser Menge innerhalb der Waldfläche verfügbar sind. Die erklärenden Variablen werden aus Hilfsvariablen gewonnen. Beispielsweise kann aus der durchschnittlichen Vegetationshöhe (Hilfsvariable) mittels eines Regressionsmodells der Vorrat (erklärende Variable) abgeleitet werden. Diese modellbasierte Vorratsschätzung fliesst als erklärende Variable in die Berechnung mit ein. Die zweite Phase besteht aus dem terrestrischen Inventar und hat nur für einen Teil der Punkte aus der ersten Phase Werte. Es liefert den Wert der Zielvariable, d.h. die lokale Dichte (z.B. das Holzvolumen pro Hektar). Die Grundidee dieses Konzepts besteht darin, die Erhöhung des Stichprobenumfangs durch Bereitstellung einer grossen Menge von weniger präzisen, aber dafür kostengünstigeren Modellvorhersagen der Zielvariable zu realisieren, und einen allfälligen systematischen Fehler (bias) mit den terrestrischen Stichproben zu korrigieren. Im Design-basierten Fall ist der zweiphasige Schätzer typischerweise unverzerrt, unabhängig davon, welches Modell zur Erstellung der Vorhersagen verwendet wird. Diese Eigenschaft kommt von der Annahme, dass die Stichprobe jeder Phase durch einfache Zufallsstichproben ausgewählt wurde (Hill et al. 2016).

### 3.1.3 Dreiphasige Stichproben

Dreiphasige Schätzer erweitern das Prinzip der zweiphasigen Stichprobenerhebung und nutzen Inventurinformationen aus drei verschachtelten Proben. Grundsätzlich stehen die aus den Hilfsinformationen berechneten erklärenden Variablen in zwei verschiedenen Häufigkeiten zur Verfügung. Die Phase 0 bietet eine große Anzahl von Hilfsvariablen, wogegen die Phase 1 zusätzliche Hilfsvariablen liefert, die aber nur für eine Teilmenge der Punkte von Phase 0 verfügbar sind. Die terrestrische Information wird dann bei einer weiteren Teilmenge der Stichproben gesammelt. Die Idee hinter der 3-phasigen Inventurmethode besteht darin, dass die zusätzliche Menge an Hilfsvariablen aus Phase 1 die Modellgüte der Regressionsmodelle deutlich verbessern kann und damit auch die Genauigkeit der gesamten Schätzung.

## 3.2 Kleingebietsschätzungen

Eine Waldinventur liefert im allgemeinen Schätzungen für die Zielgrößen für die gesamte Population oder eine Menge von definierten Straten. Nach Beendigung der Inventur kommt es häufig vor, dass Schätzungen aber auch in kleineren Teilgebieten gebraucht werden. Kleingebiete zeichnen sich dadurch aus, dass sie nur eine kleine Anzahl von Stichproben (oder gar keine Stichproben) aufweisen. Eine direkte Schätzung, welche nur auf Stichproben basiert, welche innerhalb des Kleingebiets aufgenommen wurde, würde in den meisten Fällen zu Schätzungen mit geringer Genauigkeit und mit

einem möglicherweise systematischen Fehler (Bias) führen. Für Kleingebiete wurde eine Vielzahl von Schätzmethoden entwickelt. Die Mehrheit ist modellbasiert („model based“) oder zumindest modellgestützt („model assisted“), also von Hilfsinformationen abhängig. Optimale Schätzmethoden für Kleingebiete sollten einen minimalen systematischen Fehler (Bias) und eine möglichst kleine Varianz aufweisen. Im Folgenden werden die wichtigsten Kleingebietsschätzer vorgestellt.

### 3.2.1 Direkte Kleingebietsschätzer (Direct Small-Area Estimators)

Direkte Kleingebietsschätzung bedeutet, dass nur terrestrische Stichproben innerhalb des Kleingebiets für die Schätzungen verwendet werden. (Keine Verwendung von Hilfsinformationen). Da in Kleingebieten meistens nur wenige Stichproben vorhanden sind, führt diese Methode potentiell zu systematischen Fehlern und breiten Vertrauensintervallen.

### 3.2.2 Modellunterstützte Kleingebietsschätzer (Model assisted)

Bei modellunterstützten Kleingebietsschätzern handelt es sich um eine mehrphasige Schätzung und kann angewandt werden, falls eine gewisse Mindestanzahl an terrestrischen Stichproben ( $\geq 4 - 6$ ) vorhanden sind. Bei dieser kleinen Anzahl an Stichproben macht es keinen Sinn ein eigenes Regressionsmodell herzuleiten, da die Schätzungen dann sehr grosse Vertrauensintervalle aufweisen würden. Die Idee geht dahin, dass man auch die Stichproben ausserhalb des Kleingebiets verwendet um ein Regressionsmodell zu entwickeln und dieses Modell dann im Kleingebiet anwendet. Der potentielle systematische Fehler (Bias), der bei Anwendung dieser Modelle auftauchen kann, wird durch die Modellresiduen (Abweichung der Modellvorhersage vom tatsächlichen Wert bei einer terrestrischen Stichprobe) im Kleingebiet korrigiert.

### 3.2.3 Synthetische Kleingebietsschätzer (Synthetic Small-Area Estimators / Model based)

Synthetische Schätzer werden angewandt, falls keine Stichproben im Kleingebiet vorhanden sind. In diesem Fall erfolgt die Schätzung aufgrund des globalen Regressionsmodells. Der Nachteil dieser Methode ist, dass potentielle systematische Fehler (Bias) auftauchen können. Trotz des möglichen systematischen Fehler ist es möglich die design basierte Varianz zu berechnen.

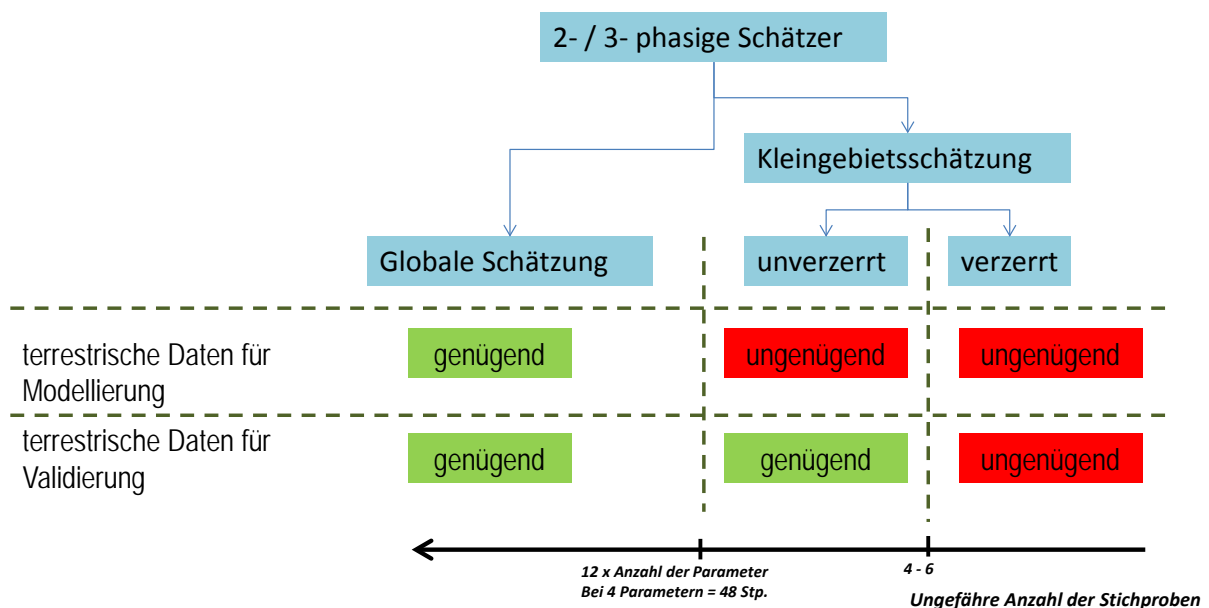


Abbildung 8: Möglichkeiten der 2 / 3 phasigen Schätzung

## 4 Tools

In diesem Kapitel geht es darum relevante Tools für die Inventur zu analysieren und aufzulisten. Wir betrachten den ganzen Arbeitsablauf (Datenprozessierung, Auswertung und weiterführende Tools).

### 4.1 Datenprozessierung

#### **LAStools [rapidlasso GmbH]**

LAStools (<https://rapidlasso.com/>) ist die häufigste verwendete Software zur Prozessierung von LiDAR-Rohdaten. Es bietet Funktionen für das Berechnen von Hilfsvariablen, von Gelände- und Vegetationshöhenmodellen aus den LiDAR-Rohdaten und vieles mehr. Die Benutzeroberfläche ist nicht sehr benutzerfreundlich, dafür ist die Software sehr rechenstark und speichereffizient (kann diesbezüglich als Benchmark angesehen werden). Die Software ist kommerziell und muss lizenziert werden.

#### **Fugro Viewer**

Der Fugro Viewer ist ein benutzerfreundliches und mächtiges Tool um LiDAR Punktwolken zu visualisieren. Er kann kostenlos heruntergeladen werden (<https://www.fugro.com/about-fugro/our-expertise/technology/fugroviewer>).

#### **R-Package „lidR“**

Das R-Paket „lidR“ bietet eine Vielzahl an Möglichkeiten, wie lesen von \*.las / \*.laz Dateien, berechnen von Hilfsvariablen, berechnen von Geländemodellen und Vegetationshöhenmodellen aus den LiDAR-Rohdaten, individuelle Baum-Identifikation und viele mehr. Dieses Package bietet sich als Open Source Alternative zu den LAStools an, ist jedoch weniger recheneffizient.

#### **Fusion**

Fusion wurde vom US Forest Service für die Verarbeitung und Auswertung von LiDAR-Rohdaten entwickelt. Von den Möglichkeiten her ist es mit LAStools vergleichbar. Die Software kann kostenlos vom US Forest Service bezogen werden.

### 4.2 Datenauswertung

Die häufigste verwendete Software für statistische Analyse ist R. R ist Open Source und es existieren unzählige Pakete für sehr viele statistische Anwendungen. Für die Auswertung von Waldinventuren wird R häufig eingesetzt, beispielsweise wird R von den deutschen Bundesländern Baden-Württemberg und Niedersachsen für die Auswertung von Waldinventuren verwendet. Grösstenteils sind die verwendeten Funktionen (Programmcode) Eigenentwicklungen und nicht für Dritte verfügbar.

#### **R-Package forestinventory**

An der ETH wurde eigens ein R-Paket für die Auswertung von 2- und 3-phasigen Inventuren entwickelt (Hill et al. 2016), welches auf den Schätzern von Mandallaz (2007) basiert. Das Paket forestinventory beinhaltet eine Fülle an Schätzmethoden für Waldinventuren. Der Fokus des Paketes liegt auf der Anwendung modellunterstützter Schätzverfahren, welche terrestrische Inventurdaten mit zusätzlichen Hilfsinformation (zum Beispiel Fernerkundungsdaten) durch die Anwendung von

Regressionsmodellen kombinieren. Wie die Statistiksoftware R ist auch das Paket forestinventory frei verfügbar und nutzbar. Es unterliegt dabei den Bestimmungen der GNU General Public License.

Obwohl es sich um ein mächtiges Tool handelt, weist es noch kleinere Schwächen auf. Beispielsweise ist keine Transformation der Zielvariable möglich (in der Statistik ist es üblich bei linearen Modellen die Variablen mit dem Logarithmus zu transformieren) und die Anwendung ist auf lineare Modelle beschränkt. Für praktische Anwendungen sind jedoch diese Punkte nicht von Relevanz.

Ein gut verständliches Tutorial zum R-Paket forestinventory ist auf der ETH Research Collection frei verfügbar: Breschan, J., Hill, A., Ginzler, C., & Gabriel, A. (2017). Kombination Forstinventur und Fernerkundungsdaten. *Methodenseminar*, 271.

### 4.3 Weiterführende Tools für Entscheidungsprozesse (Relevante Management Tools der HAFL und der WSL)

Die WSL und auch die HAFL (Fachhochschule Zollikofen) haben bereits einige Entscheidungs-Unterstützung-Systeme entwickelt. Von der HAFL sind diese für die Bereiche Waldinventur (TBk, MOTI), Waldwachstum (SiWaWa), Waldbau (martelage.sylvotheque.ch) und forstliche Planung (WIS.2 Cockpit) verfügbar. An der WSL laufen Arbeiten für das Projekt „Multikriterielles Entscheidungssystem“.

#### **MOTI ([www.moti.ch](http://www.moti.ch)):**

Die App MOTI nutzt die Vorteile des Smartphones, um den Waldzustand einfach zu erfassen. Mit MOTI lassen sich die Grundfläche wahlweise mit oder ohne Unterscheidung der Baumarten, die Stammzahl, die Baumhöhe und der Vorrat einfach, zuverlässig und mit geringem Zeitaufwand ermitteln. Möglich sind Einzelmessungen, kombiniert in einer Probefläche mit GPS-Koordinatenangabe oder Messungen auf Ebene einer Bestandesinventur mit automatischer Berechnung des Schätzfehlerbereichs. Dank der Möglichkeit Stichproben aufzunehmen, kann die Smartphone-Applikation auch im Rahmen von einfachen Betriebsinventuren eingesetzt werden (vgl. Rosset et al., 2017).

Dieses Tool eignet sich in erster Linie für die Ergänzung der Daten auf speziellen Flächen, wo zusätzliche Daten für die forstliche Planung erwünscht sind (z.B. zur Ergänzung der Bestandesbeschreibungen oder/und für die lokale Verdichtung des KSP-Netzes für einen höheren Detaillierungsgrad und bessere Genauigkeit).

#### **Digitale Bestandeskarte (TBk):**

Das Toolkit zur Erarbeitung von Bestandeskarten aus Fernerkundungsdaten (TBk) ist ein Programmcode, mit dem eine Bestandeskarte basierend auf allgemein zugänglichen Fernerkundungsdaten erzeugt werden kann. Die Abgrenzung der Bestände erfolgt aufgrund der räumlichen Verteilung der dominierenden Bäume bzw. aufgrund der maximalen Höhe pro Flächeneinheit (z.B. eine Are) eines Vegetationshöhenmodells (VHM Inputraster). Zudem wird für jeden Bestand die Oberhöhe (hdom), die maximale Höhe (hmax), der Deckungsgrad (DG) der Hauptschicht sowie der Nadelholzanteil ermittelt. Letzteres erfolgt mit Daten von Sentinel-2 Satelliten.

TBk kann eingesetzt werden, wenn keine aktuelle Bestandeskarte vorliegt und/oder eine systematische Erfassung der Oberhöhe und des Deckungsgrads erwünscht ist.



**SiWaWa ([www.siwawa.ch](http://www.siwawa.ch)):**

SiWaWa ist ein neuartiges Waldwachstumssimulationsmodell, welches durch seine Einfachheit besticht und somit prädestiniert ist für den Praktiker. Mit Hilfe von SiWaWa können die bisherigen Ertragstafeln der EAFV durch praxisnähere und realistischere Modelle für die betriebliche Planung ersetzt werden. SiWaWa braucht lediglich zwei Eingangsgrößen, nämlich die Stammzahl (N) und die Grundfläche pro ha (G) eines bestimmten Bestands, um dessen Stammzahlverteilungskurve nach BHD-Klassen unterteilt zu generieren. Mit einer zusätzlichen Eingabe - Bonität oder Oberhöhe - können alle wesentlichen ertragskundlichen Kenngrößen des Bestandes abgeleitet werden (Bestandesinventur). Die Simulation der Weiterentwicklung des Bestandes ohne und mit Eingriffen liefert wertvolle Angaben für die Bestimmung des Zeitpunkts der nächsten Durchforstungen und deren Eingriffsstärke (vgl. Schütz et al., 2016).

**WIS.2 Cockpit:**

WIS.2 ist ein gut ausgebautes Planungs- und Simulationstool für den Forstbetrieb (Rosset, 2005, Rosset et al., 2014) dessen Genauigkeit aber insbesondere auch von der Genauigkeit der Eingangsdaten abhängt. Je besser die aus der Inventur verfügbaren Daten sind, desto besser werden die Projektionen und Planungen.

WIS.2 Cockpit dient zur Überwachung und Steuerung der nachhaltigen Entwicklung eines Waldgebiets, den Anforderungen der Waldeigentümer und der Gesellschaft entsprechend. Benutzer und Benutzerinnen können mit WIS.2 eine betriebliche Strategie bis auf Bestandesebene konkretisieren, inkl. transparenter und nachvollziehbarer Hiebsatzberechnung sowie Herleitung einer Handlungsdringlichkeitskarte für die nächste Planungsperiode (z.B. 10 Jahren). Dabei kann die Umsetzbarkeit dieser Strategie aus waldbaulicher Sicht überprüft und ihre langfristigen Konsequenzen auf die Waldentwicklung dargestellt werden. Verschiedene Varianten zur effizienten Steuerung der Waldentwicklung können erarbeitet und verglichen werden. WIS.2 zeichnet sich durch eine schlanke Planung, fokussierend auf wenige Entscheidungen mit grosser Tragweite, aus (siehe Rosset et al. 2009).

**Multikriterielles Entscheidungssystem:**

In seiner Dissertation, die im Sommer 2018 abgeschlossen wird, hat Clemens Blattert ein multikriterielles Entscheidungssystem für die nachhaltige Bewirtschaftung der Schweizer Wälder entwickelt. Das Modell liegt vor. Es kann auf KSP- und auf Bestandesbasis betrieben werden. Die Ergebnisse liegen auf Bestandes- und Betriebsebene vor. Im Modell werden zuerst Bewirtschaftungsziele und verschiedene Behandlungsstrategien definiert. Dann wird die Entwicklung mit dem Waldwachstumssimulator BWIN simuliert, erntekostenfreie Erlöse mit SorSim und HeProMo ermittelt und die Ergebnisse unter ökonomischen, ökologischen und sozialen Aspekten, bewertet. Die derzeit wichtigen Ecosystem Services (ES) der Schweiz werden über 24 Indikatoren zu Schutz vor gravitationsbedingten Naturgefahren, Holzproduktion, Erholung (über visuelle Attraktivität der Waldbestände), Biodiversität und Kohlenstoffspeicherung erfasst. Anschliessend werden die Indikatoren über Nutzenwerte, welche die Resultate der Indikatoren für jede waldbauliche Behandlungsstrategie in einen Wert zwischen null und eins transformieren, bewertet. Dies erlaubt ein Urteil, wie gut sich verschiedene Behandlungsstrategien insgesamt oder für verschiedene ES eignen. Als Eingangsgrößen werden von der Inventur Baumarten (Laub, Nadel), BHD-Verteilung, Baumhöhen und insbesondere Baumpositionen verlangt. Wie diese Informationen mit dem neuen

kombinierten Verfahren bereitgestellt werden können, ist Gegenstand von weiteren Forschungsarbeiten.

### **Weitere Tools**

Neben diesen aufgelisteten Projekten existieren International zahlreiche weitere Entscheidungs-Unterstützungs-Tools. Eine ausführliche Übersicht ist in Borges et al. (2014) aufgelistet.

#### 4.4 Lizenzbedingungen und Kontaktadressen der Tools

Tabelle 22 gibt einen Überblick über die Lizenzbedingungen und Kontaktadressen der Tools (Stand Mai 2018)

Tabelle 22: Lizenzbedingungen und Kontaktadressen für die Tools

Tool	Lizenzbedingungen (a) = proprietäre Lizenz (b) = open source lizenz & spezifizierung	Wo ist das Tool erhältlich? (Website / Kontakt)
<b>LAStools</b>	(a) <a href="https://rapidlasso.com/pricing/">https://rapidlasso.com/pricing/</a>	rapidlasso GmbH Friedrichshafener Straße 1 82205 Gilching GERMANY <a href="https://rapidlasso.com/">https://rapidlasso.com/</a>
<b>Fugro Viewer</b>	(b), freeware	FUGRO AG (Schweizer Niederlassung) Route de Meyrin 49, Co. 252 1211 Geneva <a href="https://www.fugro.com/about-fugro/our-expertise/technology/fugroviewer">https://www.fugro.com/about-fugro/our-expertise/technology/fugroviewer</a>
<b>R-Package lidR</b>	(b), GPL-3	Jean-Romain Roussel, David Auty, Florian De Boissieu, Andrew Sánchez Meador <a href="https://cran.r-project.org/web/packages/lidR/index.html">https://cran.r-project.org/web/packages/lidR/index.html</a>
<b>R-Package forestinventory</b>	(b), GPL-2   GPL-3 [expanded from: GPL (≥ 2)]	Andreas Hill, Alexander Massey, Daniel Mandallaz <a href="https://cran.r-project.org/web/packages/forestinventory/index.html">https://cran.r-project.org/web/packages/forestinventory/index.html</a>
<b>Fusion</b>	(b) Freeware, keine Restriktionen bezüglich einer kommerziellen Anwendung: <a href="https://groups.google.com/forum/#!topic/lastools/UEJ1vpe6NFY">https://groups.google.com/forum/#!topic/lastools/UEJ1vpe6NFY</a>	Robert J. McGaughey United States Department of Agriculture, Forest Service, Pacific Northwest Research Station Download: <a href="http://forsys.cfr.washington.edu/fusion/fusionlatest.html">http://forsys.cfr.washington.edu/fusion/fusionlatest.html</a> Handbuch: <a href="http://forsys.cfr.washington.edu/fusion/FUSION_manual.pdf">http://forsys.cfr.washington.edu/fusion/FUSION_manual.pdf</a>
<b>Moti TBk Siwawa Wis.2</b>	Noch nicht festgelegt.	Prof. Dr. Christian Rosset christian.rosset@bfh.ch Tel. +41 (0)31 910 22 59  Siwawa: <a href="http://siwawa.org/wiki/index.php?title=Hauptseite">http://siwawa.org/wiki/index.php?title=Hauptseite</a> TBk: <a href="http://www.planfor.ch/de/content/tools/tbk">http://www.planfor.ch/de/content/tools/tbk</a> WIS.2 Cockpit <a href="http://www.planfor.ch/de/content/tools/wis2-cockpit">http://www.planfor.ch/de/content/tools/wis2-cockpit</a>
<b>Multikriterielles Entscheidungssystem</b>	(b), Existiert erst als Prototyp	Clemens Blattert Eidg. Forschungsanstalt WSL Zürcherstrasse 111 8903 Birmensdorf clemens.blattert@wsl.ch

## 5 Methoden / Beispiele

Nachfolgend werden ausgewählte innovative Ansätze von Betriebsinventuren vorgestellt und diskutiert. Wir beschränken uns dabei auf Beispiele, die auch für schweizerische Verhältnisse von Relevanz sind.

### 5.1 2 phasige Stichprobeninventur in Niedersachsen

Im Bundesland Niedersachsen wurde im Jahr 2000 ein neues Betriebsinventurkonzept eingeführt. Das seit 1950 angewandte Kontrollstichprobenverfahren sah eine systematische Verteilung der permanenten Stichprobenpunkte im Rechteckraster vor. Dieses entsprach annähernd einer flächenproportionalen Verteilung. Aufgrund des ungünstigen Altersklassenverhältnisses fiel hierdurch oftmals ein verhältnismässig grosser Anteil der Stichprobenpunkte in jüngere Bestände. Tendenziell nimmt jedoch die Variation der primären Zielvariable „Vorrat“ mit dem Bestandesalter zu. Das bisherige Verfahren der Kontrollstichprobe führte daher in den stärkeren Alters- und Durchmesserklassen oftmals nur zu einer unbefriedigenden Schätzgenauigkeit, während gleichzeitig die Stichprobenfehler in den schwächeren Alters- und Durchmesserklassen die Genauigkeitserfordernisse in vielen Fällen deutlich übererfüllten. Dies galt besonders dann, wenn das Hauptaugenmerk auf die realitätsnahe Erfassung des Vorrates in den stärkeren Durchmesserklassen gerichtet war. Daraus ergab sich die Notwendigkeit, die Stichprobenumfänge in älteren Beständen zu erhöhen (Böckmann 2016). Dazu bot sich ein zweiphasiges Stichprobenverfahren an (Saborowski et al. 2010). Bei der Betriebsinventur als zweiphasiger Stichprobeninventur werden in der ersten Phase Hilfsvariablen mit einem relativ hohen Stichprobenumfang erhoben, die dann dazu dienen, das Inventurgebiet in „sinnvolle“ Straten oder Teilgebiete aufzuteilen. Erst in einer zweiten Phase werden die Stichprobenpunkte ausgewählt, die dann terrestrisch aufgenommen werden. Dabei ist der Anteil der terrestrisch aufgenommenen Stichprobenpunkte ( $n$  Punkte Phase II/ $n$  Punkte Phase I) in den verschiedenen Straten unterschiedlich (Böckmann 2016).

Für die Aufnahmen wurde ein einheitliches Grundnetz von 100m x 100m definiert. Die Auswertung in Stratum 1 erfolgt aufgrund von Luftbildern und zwar für das gesamte Grundnetz im Abstand von 100m x 100 m. Den einzelnen Stichprobenkreisen werden zu den Straten die Attribute „Altersstufe“ und „Laub- oder Nadelbäume führend“ zugeordnet. In der terrestrischen Aufnahme (Phase 2) werden die vorher ausgewählten Stichprobenpunkte aufgenommen. In zwei konzentrischen Kreisen mit 6 m- und 13 m-Radius werden Einzelbaumparameter wie Position zum Mittelpunkt, BHD, Höhe, Schäden, Wert, Naturschutzfunktion (Höhlenbaum, Horstbaum) erfasst. Zusätzlich wird Totholz über 30 cm Durchmesser aufgenommen. Während im 6 m-Innenkreis alle Bäume über 7 cm BHD gemessen werden, beschränkt sich die Aufnahme im 13 m-Kreis auf Bäume mit einem BHD > 30 cm. In einem weiteren 2 m-Kreis wird die Verjüngung über Baumart, Anzahl, Höhenstufe, Schäden etc. erfasst (Böckmann 2016).

Nach der alten Methode der Kontrollstichproben wurde ein Stichprobenfehler von 5% über den gesamtbetrieblichen Vorrat angestrebt. Dieser Ansatz wurde modifiziert und die Stichprobenfehler je nach Stratum unterschiedlich definiert. Für den Vorrat des Alt- und Starkholzes wurde ein 5% Fehler akzeptiert, für Bestände zwischen 41 und 120 Jahren ein 15% Fehler und für Bestände unter 40 Jahren noch höhere Fehler. Durch diese Anpassung der Genauigkeitsanforderungen konnte der Stichprobenumfang je nach Forstamt um 26 – 38% gesenkt werden.

## 5.2 Betriebsinventur in Baden-Württemberg

In Baden-Württemberg werden bei Betriebsinventuren die terrestrisch zu erhebenden Stichproben grundsätzlich in einem regelmäßigen Raster von 100m x 200 m angelegt. Für grosse Forstbetriebe ist dies jedoch zu teuer. In solchen Betrieben kommen ebenfalls 2-phasige Stichprobeninventuren zum Einsatz (Nothdurft et al. 2009). In einem ersten Schritt werden hier die Genauigkeitsanforderungen definiert. Es wurde angestrebt, dass der Vorrat von stärkeren Bäumen in jedem Revier mit einem Stichprobenfehler in Höhe von 5 % des Mittelwerts geschätzt werden kann; den Schätzungen für das schwächere Holz wurde ein Fehler in Höhe von 10 % zugestanden. Es zeigte sich, dass diese Genauigkeitsforderungen nicht mit einem vertretbaren Erhebungsaufwand zu erzielen waren. Daraufhin legte die Betriebsleitung ein verfügbares Budget für die Inventurkosten fest. Die Betriebsinventur wurde dann derartig konzipiert, dass die Zielgrößen unter dieser Budgetbeschränkung mit höchstmöglicher Genauigkeit geschätzt werden können (Nothdurft et al. 2009). Die Inventur wurde nach der gleichen Methodik durchgeführt, wie die für Niedersachsen entwickelte (nach Böckmann 2016). Hinzu kam, dass zusätzlich noch präzise Daten über den Zuwachs erhoben werden sollten. Darum sollten möglichst viele terrestrische Aufnahmen der Vorinventur wiederum aufgenommen werden. Um die gleiche Genauigkeit zu erreichen, wären mit einer herkömmlichen Inventur 376 zusätzliche Stichproben nötig gewesen, oder um 18% höhere Kosten. Durch solche massgeschneiderte Inventuren lassen sich entweder die Schätzgenauigkeiten für bestimmte Straten maximieren oder die Gesamtkosten minimieren, wichtig ist jedoch, dass die relevanten Zielvariablen bereits festgelegt wurden.

Daneben sind auch Methoden basierend auf Fernerkundungsdaten im Einsatz, mit dem Ziel, Informationen für Bestände zu erhalten. Bei diesem Ansatz werden wiederum Regressionsmodelle aufgrund von terrestrischen Stichproben und Hilfsvariablen aus den Fernerkundungsdaten hergeleitet, nach der Methode welche in McRoberts (2006) und McRoberts et al. (2013) beschrieben ist. Die wichtigste Zielvariable ist der Vorrat. Daneben wird aus dem Vegetationshöhenmodell eine Bestandesausscheidung abgeleitet und mittels Bildklassifikation eine Nadel- und Laubholzunterscheidung vorgenommen. Somit kann für jeden Bestand eine Schätzung über Vorrat, Entwicklungsstufe und NdH / LbH-Anteil gemacht werden.

## 5.3 Skandinavien, insbesondere Norwegen

In Skandinavien werden schon seit längerer Zeit Fernerkundungsdaten in die Betriebsinventur miteinbezogen. Im Gegensatz zu Mitteleuropa werden in Skandinavien Informationen für die einzelnen Bestände bereitgestellt. Die ersten Experimente mit LiDAR für die Waldinventur wurden 1991 mit dem FLASH-System, einem vom schwedischen Militär entwickelten full-waveform-Experimentallaser, durchgeführt. In Finnland wurden mit dem HUTSCAT-Profilings-Radar gleichzeitig Erfahrungen gesammelt. Seit 1995 werden Daten von kommerziell betriebenen Laser-Scannern (z.B. TopEye, Optech ALTM und TopoSys) verwendet. Vor allem in Norwegen ging es darum, Methoden zu entwickeln, die direkt für die praktische Waldinventur auf Bestandesebene geeignet sind. Die mittlere Baumhöhe, der Vorrat und die Grundfläche waren die wichtigsten Zielgrößen der Inventur (Naesset et al. 2004). Weitere Zielvariablen sind „Lorey's Höhe“ (durchschnittliche Bestandeshöhe gewichtet mit der Grundfläche), Höhe der 100 stärksten Bäume pro Hektar (Hdom), durchschnittlicher Durchmesser pro Basalfläche (dg), Grundfläche (G), Stammzahl (N) und der Vorrat (V) (Naesset 2004). Grundsätzlich wird ein 2-phasiges Verfahren angewandt. Laserdaten wurden mit terrestrischen Stichproben mittels Regressionsmodellen in Beziehung gesetzt, und diese Modelle wurden verwendet, um entsprechende Eigenschaften in allen Waldbeständen in einem Gebiet

vorherzusagen. Erfahrungen aus Finnland, Norwegen und Schweden zeigen, dass die Schätzung des Vorrats und der mittleren Baumhöhe auf Bestandesebene aus LiDAR Daten ebenso gut oder besser funktioniert, als photogrammetrische Methoden und besser als andere Fernerkundungsmethoden. Das Laserscanning wird daher nun auch in großflächigen Waldinventuren operativ eingesetzt. In Finnland und Schweden wurden auch Untersuchungen zur Identifizierung von Einzelbäumen und zur Abschätzung von Einzelbaumeigenschaften wie Baumposition, Baumhöhe, Kronenbreite, Stammdurchmesser und Baumart durchgeführt. Im Nadelholz wurden bis zu 90% der Bäume, anhand von Modellen der Kronenhöhe korrekt identifiziert, und die Baumhöhe wurde mit einem mittleren quadratischen Fehler von etwa 0,6 m geschätzt. Fichte und Kiefer wurden auf Einzelbaumniveau mit einer Genauigkeit von 95% unterschieden. Die Anwendung von hochauflösenden LiDAR-Daten zur Erkennung von Veränderungen, wie z.B. Wachstum und Holzernte, wurde ebenfalls demonstriert (Naesset et al. 2004).

Aufgrund der einfachen Waldstrukturen in Skandinavien lassen sich mittels Regressionsmodellen gute Voraussagen machen. In einer Studie wurden aus 250 m<sup>2</sup> grossen Feldtrainingsflächen Regressionsmodelle geschätzt, die systematisch über die Waldgebiete verteilt waren. Für die Validierung wurden Testflächen mit einer Größe von 0.1 ha verwendet. Die Untersuchungen ergaben Standardabweichungen zwischen tatsächlichen und prognostizierten Werten von 0.58-0.85 m (3.4-5.6%) für mittlere und dominante Höhen, 2.62-2.87 m<sup>2</sup> ha<sup>-1</sup> (9.3-14.3%) für die Grundfläche und 18.7-25.1 m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup> (10.8-12.8%) für den Vorrat (Naesset 2007).

## 6 Schnittstellen

Die Definition der Schnittstellen ist zentral für eine allfällige Entwicklung eines Tools. Die zu entwickelnde Software muss kompatibel mit existierenden Tools sein, insbesondere mit dem R-package „forestinventory“ von Hill, Massey und Mandallaz (2016) und den Tools der WSL („Multikriterielle Entscheidungssysteme“ Blattter et al. 2017) und der HAFL (SiWaWa, WIS2). Namen und Datenaustauschformate der Attribute sollten mit diesen erwähnten Tools übereinstimmen. Um weiter einen möglichst einfachen Austausch mit weiteren Tools zu gewährleisten (z.B. GIS Systeme), sollten Schnittstellen (Datenaustausch-Format) nach folgenden Grundsätzen gestaltet werden: (1) Keine proprietären Formate (ESRI, Microsoft), (2) Geodaten werden in folgenden Formaten geliefert: ->Vektor: Shapefiles, -> Raster: Geotiff, und (3) Datentabellen weisen \*.dbf oder \*.csv Format auf.

## Teil C & D: Entwicklung von effizienten kombinierten Verfahren aus terrestrischer Inventur, Fernerkundung und weiteren Informationen & Fallbeispiele

### 1 Problem / Ziele

Wie bereits einleitend erwähnt wurde, kann durch den Einbezug von Fernerkundungsdaten die Effizienz von Inventuren erhöht werden. Es geht nun darum zu zeigen, wie genau die Inventur gestaltet werden soll und welche Prozesse in welcher Reihenfolge ablaufen sollen.

In diesem Kapitel werden folgende Ziele verfolgt:

- 1) Entwicklung von effizienten kombinierten Verfahren aus terrestrischer Inventur, Fernerkundung und weiteren Informationen
- 2) Definition der generischen Datenaufbereitung und Datenbereitstellung, Anwendung an Fallbeispielen

Zur Erreichung dieser Ziele wird möglichst mit vorhandenen Tools gearbeitet und diese in den Prozess miteinbezogen. Das ganze Vorgehen wird anhand eines Beispiels im Forstbetrieb Bremgarten AG und im Kanton Freiburg illustriert.

### 2 Konzept

Das konzeptionelle Vorgehen ist in Abbildung 1 dargestellt. Die einzelnen Arbeitsschritte sind in Module aufgeteilt, welche miteinander verknüpft sind. Wir verfolgen die Philosophie, dass wir möglichst auf bestehenden Tools aufbauen wollen. Für Prozessschritte, für welche bereits erprobte Tools existieren, werden diese verwendet, wo noch nichts existiert (oder nur schwerfällige Lösungen), wurden neue Tools entwickelt, in unserem Fall als Skript-Prototypen in den Sprachen R oder Python (Tabelle 1). Als Eingangsdaten sollen bereits verfügbare Geodaten als Grundlage herangezogen werden. Das Endergebnis ist eine Schätzung der Zielgrößen für das ganze Gebiet, Kleingebiete und Bestände, sowie eine Darstellung als Karte.

Wir beschränken uns auf die Zielgrößen Vorrat, Stammzahl und Grundfläche (evtl. Nadelholzanteil ?) da mit den vorhandenen Fernerkundungsdaten für diese Zielgrößen eine bessere Effizienz erreicht wird. Grundsätzlich können auch andere Zielgrößen mit dieser Methodik analysiert werden, sobald geeignete Grundlagendaten in brauchbarer Qualität vorhanden sind.

Tabelle 23: Prozessschritte für die Betriebsinventur mit terrestrischen Stichproben und Fernerkundungsdaten

Schritt (Prozesse / Modul)	Kurzbeschreibung	Verwendetes Tool
LDP (LiDAR Data Processing)	Prozessierung der LiDAR Rohdaten: Berechnung von normalisierten LiDAR Rohdaten und eines Vegetationshöhenmodells	LASTools
PD (Polygon Design)	Berechnen der Polygone, auf welchen die Hilfsvariablen berechnet werden sollen	Python Skript
Berechnung der Hilfsvariablen LiDAR	Berechnung der Hilfsvariablen aus den normalisierten LiDAR Rohdaten für definierte Polygone.	Python Skript
Berechnung der Hilfsvariablen CHM & Raster	Berechnung der Hilfsvariablen aus dem Vegetationshöhenmodell (CHM) und weiteren Daten (Raster oder Polygon-Vektordaten)	Python Skript
Standardisierung	Standardisierung der Attributnamen	Python Skript
Auswertung Stichproben	Berechnung der lokalen Dichte der Zielgrößen für die einzelnen Stichprobenpunkte.	Python Skript
Modell Bildung	Identifikation der Hilfsvariablen für ein Modell (lineares Regressionsmodell), welches eine möglichst gute Prognose für die Zielvariablen (z.B. Vorrat, Stammzahl oder Grundfläche) macht.	R Skript
2 Phasige Schätzung „forestinventory“	Berechnung der Schätzer für die Zielvariablen	R- Package „forestinventory“
Flächige Auswertung	Berechnen der Karten für die Zielvariablen	Python Skript



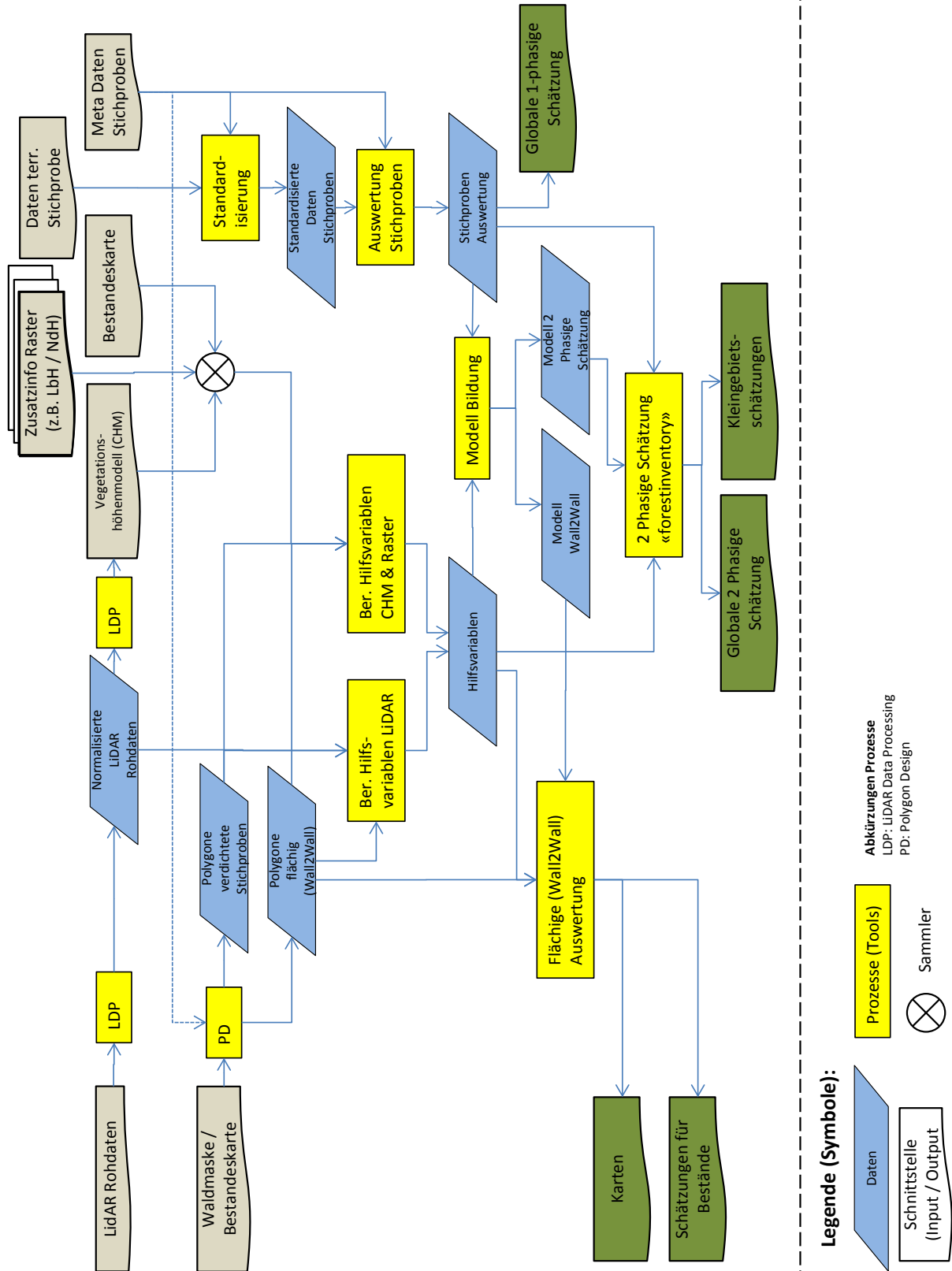


Abbildung 9: Konzeptionelles Modell

### 3 Prozessieren der LiDAR Rohdaten

#### 3.1 LiDAR: Grundlagen und Datenaufnahme

Airborne Laserscanning, auch bekannt unter dem Akronym LIDAR (Light Detection and Ranging), ist eine Fernerkundungstechnologie, die hochpräzise Messungen von Waldbedeckung und Bodenoberfläche ermöglicht. Ein LIDAR-Sensorsystem arbeitet im Wesentlichen nach dem Prinzip der Messung des Zeitintervalls zwischen Senden und Empfangen von Laserpulsen. Die Reichweitenmessung erfolgt durch Multiplikation dieses Zeitintervalls mit der Lichtgeschwindigkeit ( $R = c \times t/2$  (wobei R der Bereich ist, t der Zeitabstand zwischen Emission und Empfang des Impulses und c die Lichtgeschwindigkeit ist, eine bekannte Konstante:  $3 \times 10^8$  m/s)) (Shao und Reynolds 2006).

Die Anstiegsflanke des zurückkommenden Signals (Reflektion) ist kein klar definierter Punkt, daher wird die Zeit normalerweise für einen Punkt aufgezeichnet, an dem das Signal einen bestimmten Schwellenwert überschreitet, der normalerweise als konstanter Bruchteil der Signalspitze definiert ist (Baltsavias 1999). Ist die genaue Ausrichtung und Position des Lasers aus einer Trägheitsmesseinheit bzw. einem luftgestützten Differential-GPS-System bekannt, kann der jedem Laserpuls entsprechende 3D-Vektor rekonstruiert und jeder Reflexion eine 3D-Koordinate zugeordnet werden. Die "rohen" LIDAR-Daten werden dann typischerweise als ASCII- oder Binärdatei bereitgestellt, die die X,Y,Z-Werte entsprechend den Koordinaten jeder Laserreflexion enthält (Shao und Reynolds 2006).

Die vom Sensor empfangene Leistung hängt von den Eigenschaften des Messobjekts ab, einschließlich der physikalischen Eigenschaften des Messobjekts (d.h. diffuser vs. spiegelnder Reflektor (Reflexionsvermögen)). LIDAR-Systeme, die für topografische Kartierungsanwendungen eingesetzt werden, arbeiten in der Regel im nahen Infrarotbereich des elektromagnetischen Spektrums (800-1100 nm). Während die Spezifikationen von System zu System variieren, emittieren aktuelle LIDAR-Systeme 5.000-100.000 Impulse pro Sekunde und variieren den Abtastwinkel mit optisch-mechanischen Geräten wie z.B. Schwingungsspiegeln. Die meisten Systeme sind in der Lage, Mehrfachreflexionen von einem einzigen Laserpuls zu erfassen (d.h. bis zu 5 pro Puls). Beispielsweise kann in einem Waldgebiet ein bestimmter Puls von Zweigen oder Blättern innerhalb der Kronenschicht und des Bodens reflektiert werden (Abbildung 2). Da der Abtastwinkel in der Regel auf 15-20 Grad vom Nadir (Richtungsangabe für die Lotrichtung) begrenzt ist, erfasst dieses System Messungen entlang eines "Schwenkbereichs" unter dem Flugzeug (Abbildung 3) (Shao und Reynolds 2006).

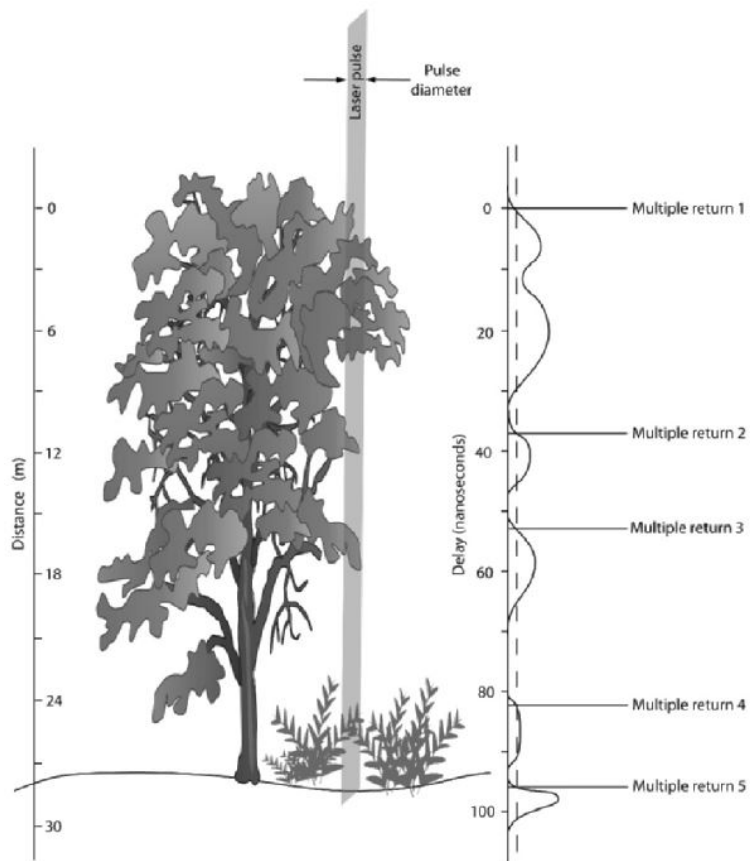


Abbildung 10: LIDAR Pulse der Vegetation. Wenn der Laserpuls durch die Baumkrone geht, werden mehrere Reflektionen an den Sensor zurückgegeben. Die Anstiegsflanken der Signalspitze (Peaks) im Rückgabesignal entsprechen den Reflektionen (Returns) (Shao und Reynolds 2006).

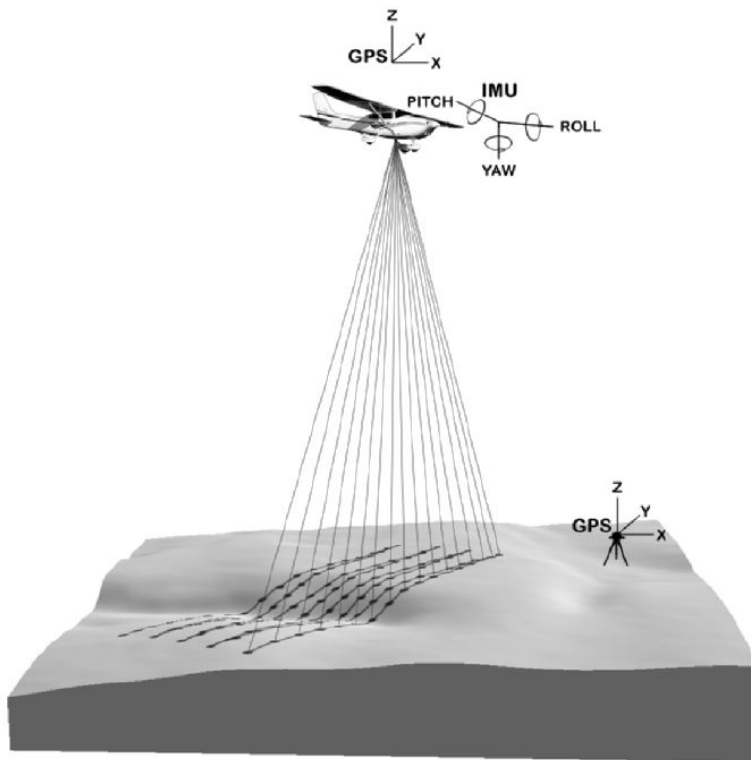


Abbildung 11: Illustration eines Airborne Laserscanners (Shao und Reynolds 2006)

### 3.2 Normalisieren der LiDAR Rohdaten und Berechnen eines Vegetationshöhenmodells

Das Prozessieren der LiDAR Rohdaten ist nötig, damit [I] Hilfsvariablen direkt aus den LiDAR Punktwolken berechnet werden können und [II] um Vegetationshöhenmodelle (Canopy Height Model CHM) zu berechnen. CHMs sind ebenfalls von zentraler Bedeutung für die Berechnung von Hilfsvariablen. In vielen Fällen sind zwar bereits CHMs vorhanden, es kann jedoch sein, dass diese CHMs nicht die gewünschte Qualität oder Auflösung aufweisen. In diesem Fall empfiehlt es sich, CHMs selbst aus den Rohdaten zu rechnen.

Infolge der Erfahrung aus den Projektgebieten empfehlen wir folgendes Vorgehen:

1. Visuelle Datensichtung: Sind die Punkte bereits klassifiziert? Welches sind die relevanten Punkte des Untergrunds („Ground“) und der Vegetation („Vegetation“). Gibt es Noise-Punkte, welche zuerst gefiltert werden müssen?
2. Reskalieren der Punktwolken auf eine Genauigkeit von 0.01m. Dadurch kann Speicherplatz eingespart werden.
3. Herstellen von nicht allzu grossen Kacheln (\*.las Format) und Hinzufügen eines Buffers. Sind die einzelnen Kacheln zu gross, dauert das Laden der Daten lange und es kann Probleme mit dem Speicher geben. Wir haben mit 500m x 500m Kacheln gearbeitet. Der Buffer sollte mindestens so gross sein, wie der halbe Radius einer Stichprobe. Damit soll verhindert werden, dass zur Auswertung eines Plots zwei Kacheln geladen werden müssen.
4. Identifizieren der „Ground“ – Punkte.
5. Normalisieren der Höhen (→ höhennormalisierte LiDAR-Punktwolke). Dies ist nichts anderes als den Punkten die Höhe über dem Grund zuzuordnen.
6. Berechnen des Vegetationshöhenmodells.

Für diese Schritte gibt es verschiedene Tools. Wir haben mehrheitlich mit den LAStools der Rapidlasso GmbH gearbeitet. (Tabelle 2)

**Tabelle 24: Verwendete Tools und Toolboxes für die LiDAR Daten Prozessierung im Inventur Projekt**

Schritt	Eingesetztes Tool	Verwendete Toolbox (Option)
Visuelle Datensichtung	FUGRO Viewer	-
Reskalieren	LAStools	laszip, Option:- rescale
Einteilung in Kacheln	LAStools	lastile
„Ground“ Identifikation	LAStools	lasground
Normalisieren der Höhen	LAStools	lasheight
Berechnen des Vegetationshöhenmodells	LAStools	las2dem, Option: - pitfree

Insbesondere der letzte Punkt, die Berechnung von Vegetationshöhenmodellen, ist nicht ganz trivial. Grundsätzlich werden Vegetationshöhenmodelle berechnet, indem das Digitale Oberflächenmodell (DOM) vom Digitalen Terrainmodell (DTM) subtrahiert wird. Für die Berechnung des DOMs, wie auch des DTMs gibt es verschiedene Methoden:

### **Vegetationshöhenmodell einfach**

Beim „einfachen“ CHM wird das Oberflächenmodell aus allen first returns berechnet. Ein first return ist die erste Reflektion eines Laserstrahls (Abbildung 4). Falls in einem Pixel dabei keine first returns vorkommen, tauchen im Datensatz leere Pixel auf. Es kann auch vorkommen, dass gewisse first returns innerhalb der Vegetationsschichten auftauchen. In diesem Fall tauchen sogenannte „spikes“ (Zacken) auf. Abbildung 5 illustriert diese Problematik. Abbildung 7 zeigt ein einfaches CHM für einen Teil in Bremgarten, Abbildung 8 zeigt den identischen Ausschnitt, welcher mit dem „pitfree“-Algorithmus berechnet wurde.

### Vegetationshöhenmodell „pitfree“

Das CHM „pitfree“ (Isenburg 2014, Khosravipour et al. 2014) wird mit einer Methode berechnet, welche Lücken („pits“) vermeidet. Zuerst werden partielle CHMs generiert, welche anschliessend zu einem einzigen CHM vereint werden. Dieser Algorithmus ist in LAsTools, aber auch im R-package „lidR“ (Roussel und Auty 2017) implementiert

### Vegetationshöhenmodell „spikefree“

Die Methode zur Berechnung des CHM „spikefree“ wurde ebenfalls von Khosravipour et al. (2016) entwickelt. Die zugrundeliegende Methode für die Berechnung des CHM basiert kurz zusammengefasst auf einer dreidimensionalen Triangulation der first returns. So werden nur die relevanten first returns berücksichtigt (Abbildung 6).

Das CHM „pitfree“ und „spikefree“ unterscheiden sich im Endergebnis nur wenig. Insbesondere falls das CHM für die Einzelbaumdetektion verwendet werden soll, führt nur das CHM „pitfree“ oder „spikefree“ zu einigermassen brauchbaren Resultaten (Küng 2017).

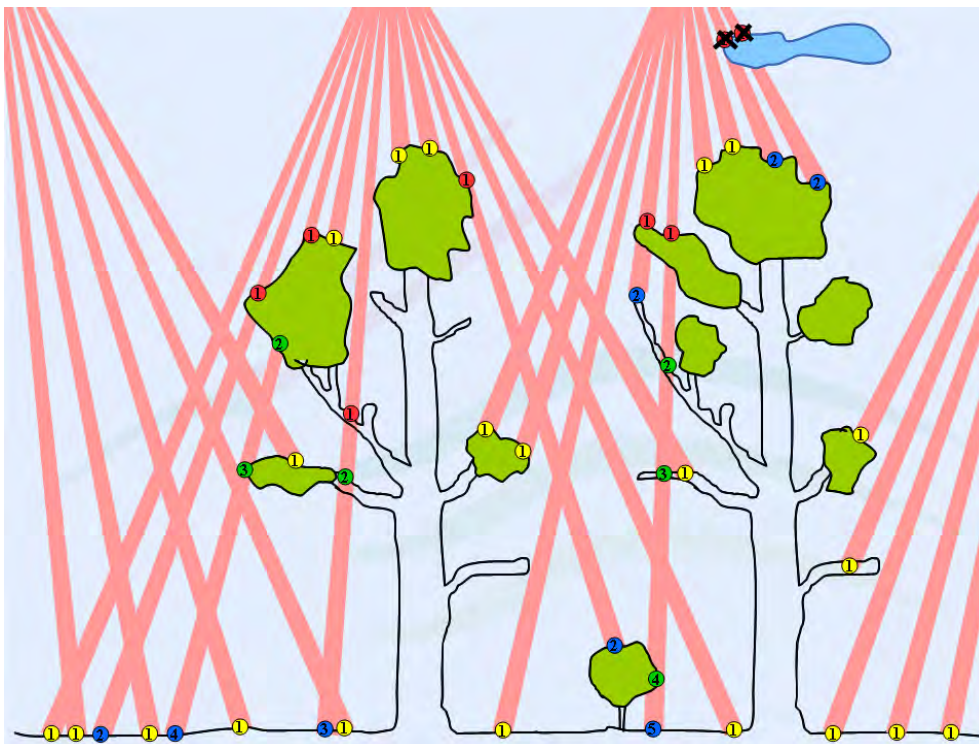


Abbildung 12: Laserstrahlen von 4 Fluglinien mit den LiDAR returns (Kreise mit Zahlen: Nummer des returns) [Isenburg 2016]

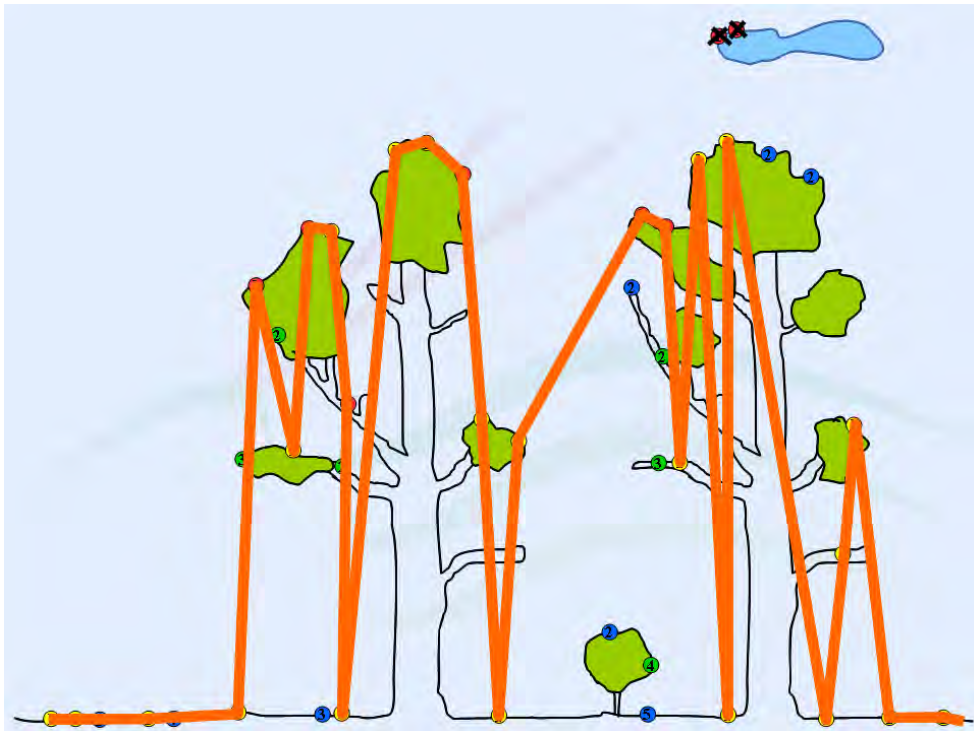


Abbildung 13: Prinzip der Berechnung des CHM „einfach“: Verwenden aller first returns. Dies führt wie hier abgebildet zu spikes (Zacken) [Isenburg 2016]

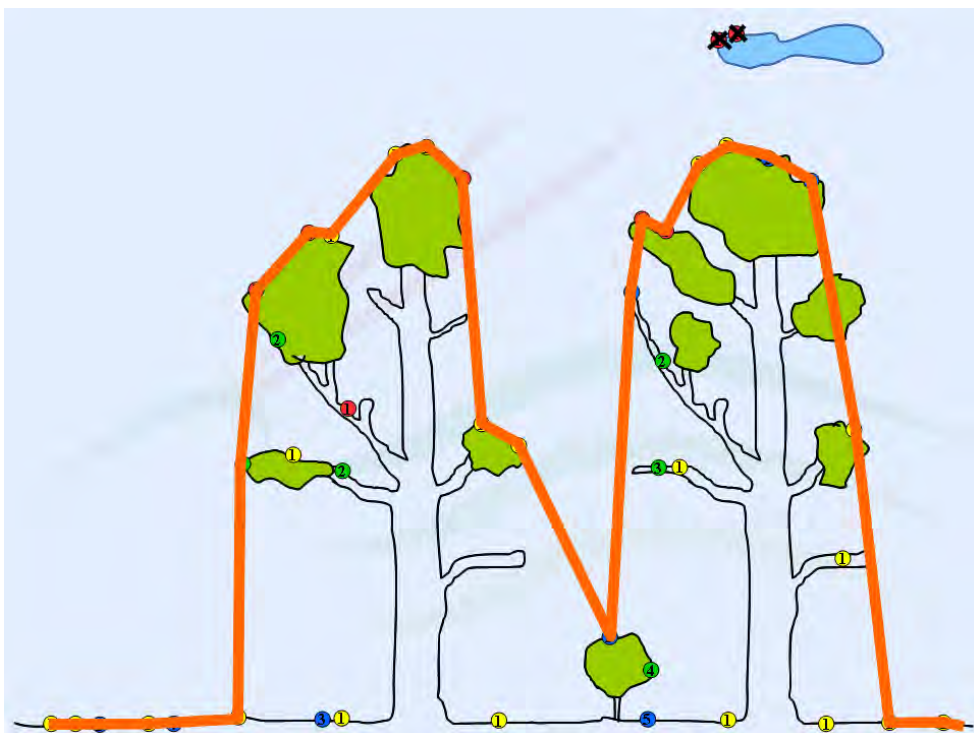


Abbildung 14: Prinzip der Berechnung des Vegetationshöhenmodells „spikefree“: Nur Verwenden der relevanten returns [Isenburg 2016]



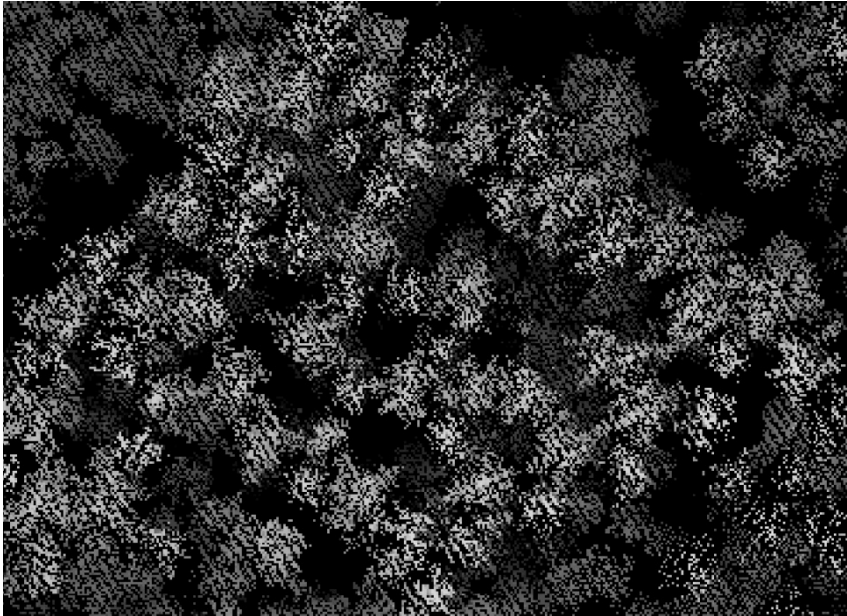


Abbildung 15: Vegetationshöhenmodell „einfach“ (Ausschnitt aus Bremgarten)

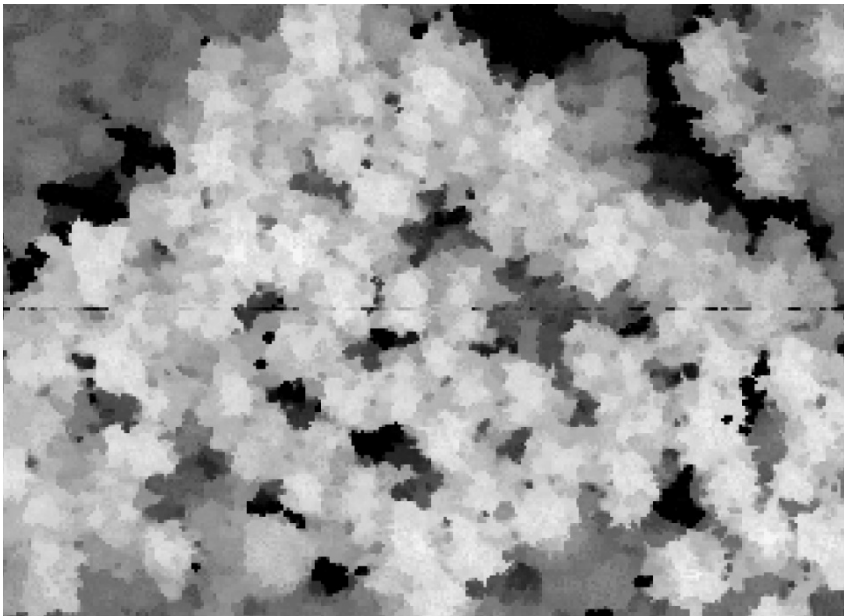


Abbildung 16: Vegetationshöhenmodell „pit-free“ (Ausschnitt aus Bremgarten)

Der Einfluss des Vegetationshöhenmodells (CHM „einfach“ gegenüber „pit-free“) auf die Modellgüte wurde von Wittwer (2016) untersucht. Sie kam zum Schluss, dass mit „pit-freien“ CHMs bessere Vorhersagen gemacht werden können als mit einem „einfachen“ CHM. Ben-Arie et al. (2009) bestätigen ebenfalls diesen Zusammenhang. Für den Nadelwald sind die Unterschiede nur gering, für den Laubwald werden diese jedoch grösser. Eine Ursache dafür könnte sein, dass Pits vor allem im Laubwald vorkommen, wenn im laublosen Zustand geflogen wird. Hat man nur ein „einfaches“ CHM zur Verfügung, kann man entweder das CHM aus den LiDAR Rohdaten nochmals neu rechnen oder nach der Methode von Ben-Arie et al. (2009) die Pits nachträglich entfernen. Ben-Arie et al. (2009) liefern dazu auch ein kostenloses Tool (<http://www.ucalgary.ca/f3gisci/software>). Im Testgebiet Glâne-Farzin (FR) fand die LiDAR Befliegung sowohl in belaubtem, als auch unbelaubtem Zustand statt. In diesem Fall ist es besonders wichtig, mit einem „pit-free“ CHM zu arbeiten, damit alle CHMs miteinander verglichen werden können.



### 3.3 Qualitätskontrolle

Nach der Herstellung eines CHM empfiehlt es sich, eine visuelle Qualitätskontrolle zu machen. Bei den LiDAR Rohdaten im Kanton Freiburg wurde das Rauschen teilweise fälschlicherweise als Vegetation klassifiziert (Abbildung 9). Als Ergebnis sind im CHM Streifen zu erkennen. In den Berechnungen hat sich gezeigt, dass trotz dieser Artefakte gute Modelle hergeleitet werden konnten. Trotzdem sollten solche Artefakte nicht vorkommen und die LiDAR Rohdaten gegebenenfalls beim Hersteller beanstandet werden.

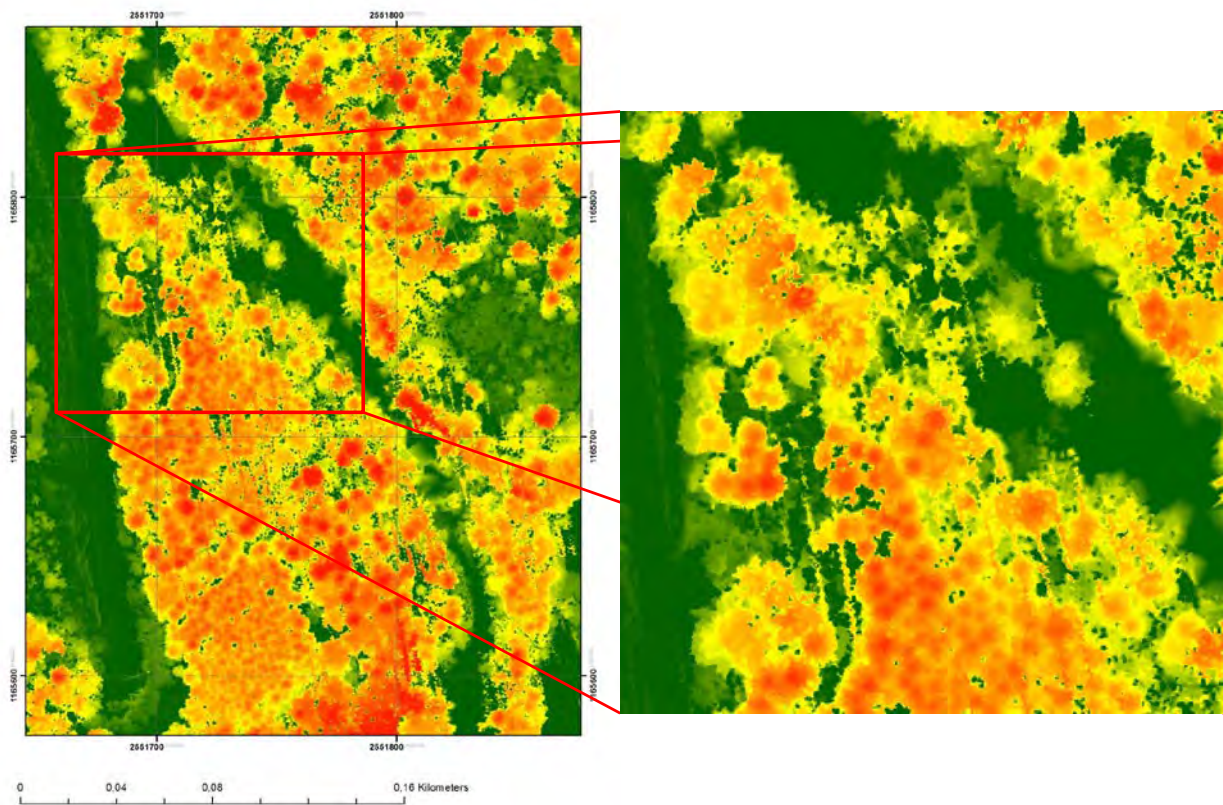


Abbildung 17: Streifen im CHM als Artefakte. In den LiDAR Rohdaten wurde Rauschen (Noise) fälschlicherweise als Vegetation markiert, was man im CHM in Form von Streifen sieht.

## 4 Polygone für die Hilfsvariablen

Die Polygone dienen als geographische Begrenzung für die Berechnung der Hilfsvariablen. Die grundsätzliche Idee ist, für jedes definierte Polygon die Hilfsvariablen zu berechnen (z.B. durchschnittliche Höhe aller Returns eines Laserpuls). Polygone, die mit einer terrestrischen Stichprobe identisch sind, können dazu verwendet werden ein Regressionsmodell herzuleiten, welches aus den Hilfsvariablen eine Zielgrösse voraussagt (z.B. Vorrat =  $f(\text{durchschn. Höhe der Laserpulse})$ ). Das Regressionsmodell kann dann angewandt werden, um für alle Polygone eine Schätzung der Zielgrösse zu erhalten.

Es werden 2 Typen von Polygonen berechnet:

- 1) Stichprobenpolygone mit verdichteten Plots: Dieser Typ wird für die Modellbildung, sowie für die Globale- und Kleingebiets- Schätzung verwendet (Abbildung 10). Die Polygone sind kreisförmig, mit einem Radius, der demjenigen der Stichprobe entspricht.
- 2) Flächendeckende quadratische Polygone: Dieser Typ wird für die Herstellung von Karten und Bestandes-Schätzungen verwendet (Abbildung 11). Denkbar wäre hier auch eine Repräsentation in einem 6-Eck Muster. Falls die Polygone für die Schätzung der Bestände verwendet werden sollen, werden diese an den Bestandesgrenzen unterteilt.

Alle Polygone werden am Waldrand abgeschnitten und je nach Verwendung an den Grenzen der Kleingebiete bzw. der Bestände unterteilt. Regressionsmodelle können nur anhand der Polygone vom Typ 1 hergeleitet werden. Daher müssen diese Polygone in jedem Fall berechnet werden. Bei den Polygonen vom Typ 2 ist darauf zu achten, dass diese in etwa die gleiche Fläche aufweisen, wie die terrestrischen Stichproben.

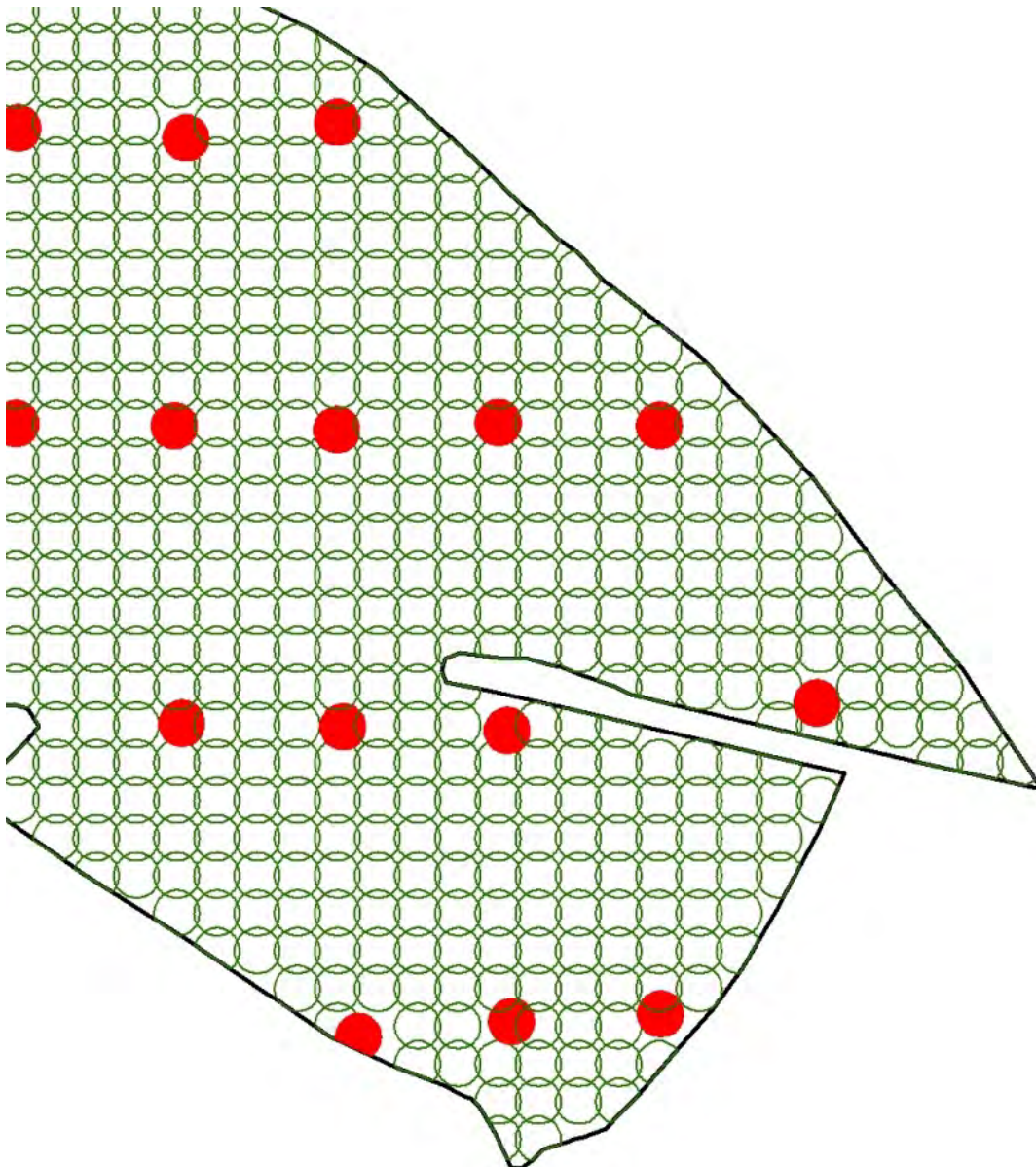
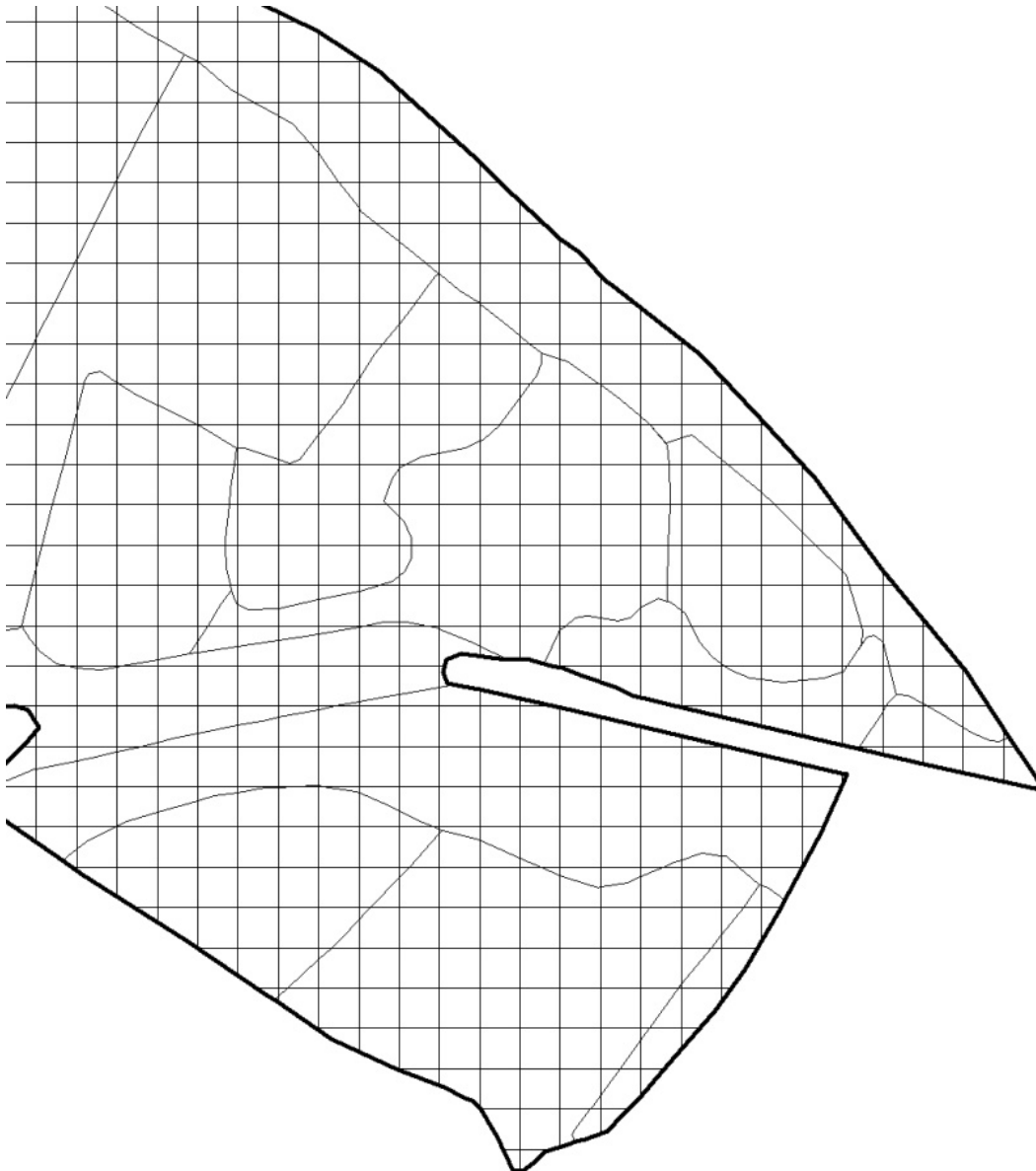


Abbildung 18: Polygone der Stichproben (rote ausgefüllte Kreise) mit verdichtetem Netz (grüne Umrandungen) (Ausschnitt in Bremgarten)



**Abbildung 19: Flächendeckende quadratische Polygone (Ausschnitt in Bremgarten).** Im abgebildeten Fall werden die Polygone für die Schätzung des Bestandes-Vorrats verwendet, darum sind die Polygone an den Bestandesgrenzen unterteilt.

Die Berechnungen sind in einem Python-Skript implementiert, welches Inputs gemäss Tabelle 3 benötigt. Als Output wird ein Shapefile mit den Polygonen ausgegeben.

**Tabelle 25: Inputs für das Modul „Polygone Hilfsvariablen“**

Variablenname	Beschreibung
plotdata_un_df	Informationen zu den Stichproben-Daten, enthält unter anderem die Probeflächennummer, die X und die Y- Koordinate der Probenfläche.
path_forest_bound_shp	Shapefile mit der Waldmaske, bzw. der Bestandeskarte.
Raster_Abst	(Raster_Abst_X, Raster_Abst_Y) enthalten die Abstände in X- und Y-Richtung der künftigen Mittelpunkte der Polygone.
Ref_Point	(Ref_Point_X, Ref_Point_Y) enthalten die X- und Y-Koordinaten eines Referenzpunktes (Polygonmittelpunkt), um welchen die Polygone angeordnet werden sollen.
Radius	Radius bzw. Kantenlänge der Polygone.

## 5 Berechnung der Hilfsvariablen

Hilfsvariablen bilden die Grundlage für die Modellbildung und werden gebraucht, um anhand der Stichprobendaten ein Modell für die Zielvariable (Vorrat, Stammzahl oder Grundfläche) herzuleiten. Die Hilfsvariablen können aus verschiedenen Quellen stammen, wie LiDAR-Rohdaten, Vegetationshöhenmodelle, Laub - / Nadelholzunterscheidung oder anderen Grundlagen.

Wir unterscheiden zwischen der (1) Berechnung der Hilfsvariablen aus LiDAR-Rohdaten und der (2) Berechnung aus dem Vegetationshöhenmodell und weiteren Rasterdaten (z.B. Laubholz / Nadelholz Unterscheidung). Dies aus dem Grund, da für die beiden Aufgaben jeweils unterschiedliche Module (Python-Skripte) geschrieben wurden. Falls LiDAR-Rohdaten verfügbar sind, macht es Sinn mit diesen zu arbeiten, da diese mehr Informationen enthalten, als das daraus abgeleitete Vegetationshöhenmodell. Insbesondere können auch Strukturen unter der Vegetationsdecke identifiziert werden. Wittwer et al. 2017 haben anhand eines Fallbeispiels in Embrach die Güte von Modellen aus LiDAR-Rohdaten und einem daraus abgeleiteten Vegetationshöhenmodell verglichen. Die Modelle aus den Rohdaten haben dabei deutlich besser abgeschnitten als diejenigen aus dem CHM (Tabelle 7). Auch in unseren Fallbeispielen wurden unter Verwendung von Hilfsvariablen aus den LiDAR-Rohdaten bessere Modellgüten erreicht, als mit Hilfsvariablen aus dem Vegetationshöhenmodell. Der Vorteil von Hilfsvariablen aus dem Vegetationshöhenmodell liegt in der besseren Verfügbarkeit und einfacheren Handhabbarkeit eines CHMs im Vergleich zu den LiDAR-Rohdaten.

Bei der Wahl von Hilfsvariablen sollen folgende Grundsätze befolgt werden: Hilfsvariablen sollten nicht abhängig von der Plot Grösse sein und insbesondere bei LiDAR-Daten unabhängig von der Punktdichte. Die Punktdichte kann selbst innerhalb der gleichen Flug-Aufnahme variieren, da gewisse Gebiete überlappend geflogen werden. Eine Übersicht über forstlich relevante Hilfsvariablen kann in McCallum et al. 2014 oder Saarela et al. 2015 gefunden werden.

### 5.1 Hilfsvariablen aus dem Vegetationshöhenmodell

Die Python-Tools geben für das Vegetationshöhenmodell die Hilfsvariablen gemäss Tabelle 4 standardmässig aus. Die Auswertung der Hilfsvariablen wird jeweils für jedes Polygon (siehe Kapitel 4) separat berechnet.



Tabelle 26: Hilfsvariablen des Vegetationshöhenmodells

	Beschreibung	Abkürzung	Einheit
Percentil – Werte	Gibt die Höhenpercentile der Pixel im Plot an. Beispiel: 95% Percentil: chm_p95 = 20 sagt, dass 95 % der Pixel Werte im Plot unterhalb von 20m liegen	chm_pXX XX = {99, 95, 90, 80, 75, 70, 60,..., 30, 25, 20, 10, 05, 01}	[m] (gleiche Einheit wie das Vegetationshöhenmodell)
Coverage – Werte	Gibt die Vegetationsbedeckung auf einer bestimmten Höhe an. Beispiel: 2m Coverage: chm_c02 = 0.9 sagt, dass 90% der Pixel des Vegetationshöhenmodells im Plot höher oder gleich 2m sind	chm_cXX XX = {00, 02, 05, 10, 15, 20, ..., 50} chm_coverage: Coverage in 1.3m Höhe	[0 - 1]
Minimum	Minimaler Pixel-Wert innerhalb eines Plots	chm_minimum	[m]
Maximum	Maximaler Pixel-Wert innerhalb eines Plots	chm_maximum	[m]
Standardabweichung	Standardabweichung der einzelnen Pixel innerhalb eines Plots	chm_stddev	[m]
Durchschnitt	Durchschnittlicher Wert (Höhe) der einzelnen Pixel innerhalb eines Plots	chm_average	[m]
Quadratsumme	Summe der Quadrate der einzelnen Pixel innerhalb eines Plots. Illustration siehe Abbildung 12 <b>Bem.: Eignet sich selbst nicht als Hilfsvariable -&gt; Durchschnittliche Quadratsumme (chm_mean_sum_of_squares) verwenden!</b>	chm_sum_of_squares	[]
Durchschnittliche Quadratsumme	Quadratsumme geteilt durch Anzahl Pixel eines Plots	chm_mean_sum_of_squares	[]

In Tabelle 4 fehlen zum Teil noch wichtige Hilfsvariablen, wie zum Beispiel der Variationskoeffizient ( $VC = \text{Standardabweichung} / \text{Durchschnitt}$ ). Da dieser gut im Nachhinein berechnet werden kann ( $VC = \text{chm\_stddev} / \text{chm\_average}$ ), wurde auf eine explizite Ausgabe verzichtet. Der Variationskoeffizient kann als ein Mass für die Schichtung (vertikale Struktur des Waldes) betrachtet werden (Pretzsch 2002).

Die Hilfsvariable „Quadratsumme“ wird anhand der Abbildung 12 im Speziellen beschrieben. Diese bildet die Summe der Quadrate der einzelnen Pixel innerhalb eines Plots ab. Die Idee hinter der

Einführung dieser Hilfsvariable besteht darin, eine Möglichkeit zu schaffen, die allometrischen Zusammenhänge besser abbilden zu können.

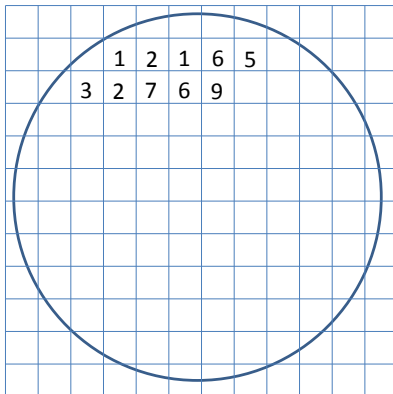
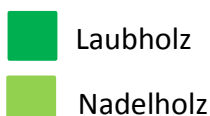
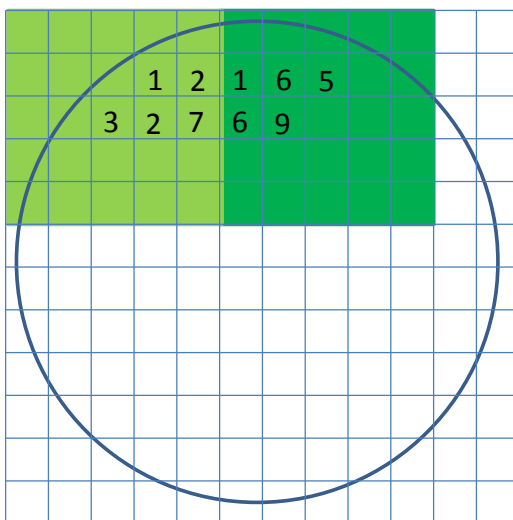


Abbildung 20: Ausgewählte Werte eines Vegetationshöhenmodells innerhalb eines Plot. Die Quadratsumme (sum of squares) berechnet beträgt in diesem Fall =  $1^2 + 2^2 + 1^2 + 6^2 + 5^2 + \dots = 246$

## 5.2 Kombinierte Hilfsvariablen aus dem Vegetationshöhenmodell und weiteren Rastern.

In unserem Fallbeispiel ist neben dem Vegetationshöhenmodell auch ein Raster mit Laub- / und Nadelholzunterscheidung verfügbar. Dieses wurde vom LFI berechnet und deckt die ganze Schweiz ab (Waser et al. 2017). Um diese Information einfließen zu lassen, werden die beiden Raster übereinander gelegt und es erfolgt eine separate Auswertung für jedes Attribut des zusätzlichen Rasters. In unserem Beispiel in Abbildung 13 wird also die Berechnung der Quadratsumme des Vegetationshöhenmodells jeweils getrennt für Laub- und Nadelholz-Pixel durchgeführt. Diese Hilfsvariablen werden zusätzlich mit der Endung „\_Nadel“ oder „\_Laub“ versehen.



$$\text{Sum\_of\_Squares} = 1^2 + 2^2 + 1^2 + 6^2 + 5^2 + \dots = 246$$

$$\text{Sum\_of\_Squares\_Laub} = 1^2 + 6^2 + 5^2 + 1^2 + 6^2 + 9^2 = 179$$

$$\text{Sum\_of\_Squares\_Nadel} = 1^2 + 2^2 + 3^2 + 1^2 + 2^2 + 7^2 = 67$$

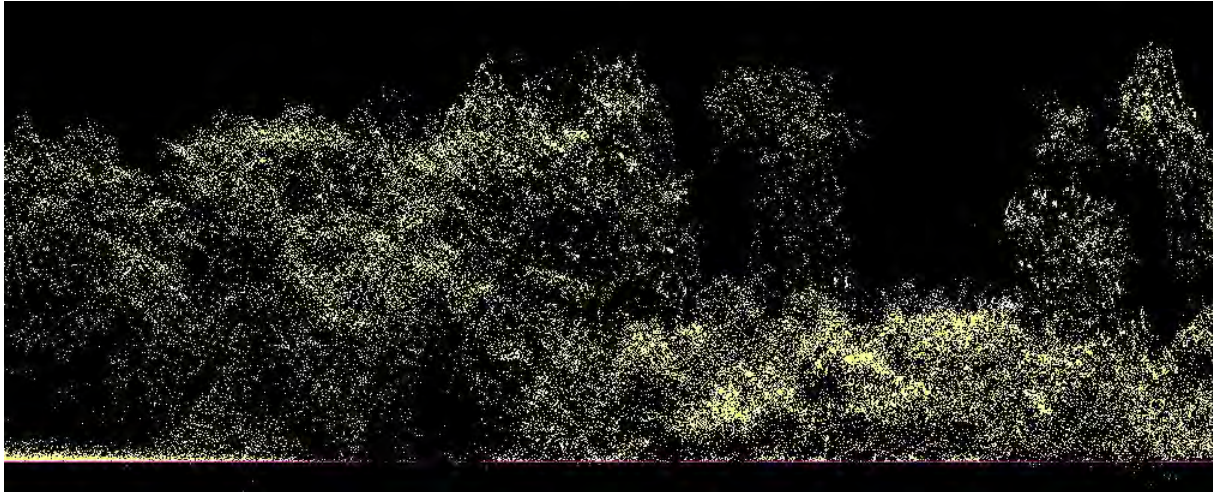
Abbildung 21: Prinzip der kombinierten Auswertung von verschiedenen Rastern: Die beiden Raster (Nadel-/Laubholz und CHM) werden übereinander gelegt und es erfolgt eine separate Auswertung für jedes Attribut des zusätzlichen Rasters ((Nadel-/Laubholz))

Die Hilfsvariable „share\_confier“ (Nadelholzanteil) wird später für die Modellbildung relevant sein. Diese wird folgendermassen berechnet:

$$\text{share\_confier} = \text{chm\_sum\_of\_squares\_nadel} / \text{chm\_sum\_of\_squares}$$

### 5.3 Hilfsvariablen aus den LiDAR-Rohdaten

LiDAR-Hilfsinformationen werden aus höhennormalisierten LiDAR-Punktwolken berechnet. Eine höhennormalisierte LiDAR-Punktwolke ist in Abbildung 14 dargestellt.



**Abbildung 22: Höhennormalisierte LiDAR Punktwolke**

Die LiDAR-Hilfsvariablen lassen sich analog zu den Hilfsvariablen aus dem Vegetationshöhenmodell berechnen (Tabelle 6). Aufgrund der grossen Datenmengen dauert die Berechnung jedoch länger. Im Gegensatz zum CHM erlauben LiDAR-Daten auch Einblicke in tieferliegende Vegetationsschichten, daraus ergibt sich mit der Stratendichte (Strata Density) eine neue Klasse von Hilfsvariablen. Das Prinzip der Stratendichte ist in Abbildung 15 beschrieben. Die Punktwolke wird in verschiedene Straten eingeteilt. Dafür gibt es zwei Möglichkeiten:

- Flexible Straten: Ausgehend vom höchsten Punkt wird der darunterliegende Teil in regelmässige Straten unterteilt;
- Fixe Straten: Die Stratengrenzen sind bereits im Vorfeld definiert und fix eingeteilt.

Für beide Typen von Straten kann dann die „Overall Relative Strata Density“ (ORD) und die „Normalized Relative Strata Density“ (NRD) berechnet werden. Bei der ORD wird der Anteil der Punkte vom Stratum im Vergleich mit der gesamten Anzahl an Punkten berechnet, bei der NRD erfolgt die Berechnung des Anteils ohne die darüber liegenden Straten (Tabelle 5).

**Tabelle 27: Hilfsvariablen der Kategorie Stratendichte**

Name Hilfsvariable Stratum	Beschreibung
las_overall_relative_strata_density_XX_YY_m	ORD für fixe Straten mit Grenzen XX und YY
las_normalized_relative_strata_density_XX_YY_m	NRD für fixe Straten mit Grenzen XX und YY
las_overall_relative_strata_density_perc_XX_YY	ORD für flexible Straten mit Grenzen XX % und YY % von der maximalen Punkthöhe
las_normalized_relative_strata_density_perc_XX_YY	NRD für flexible Straten mit Grenzen XX % und YY % von der maximalen Punkthöhe

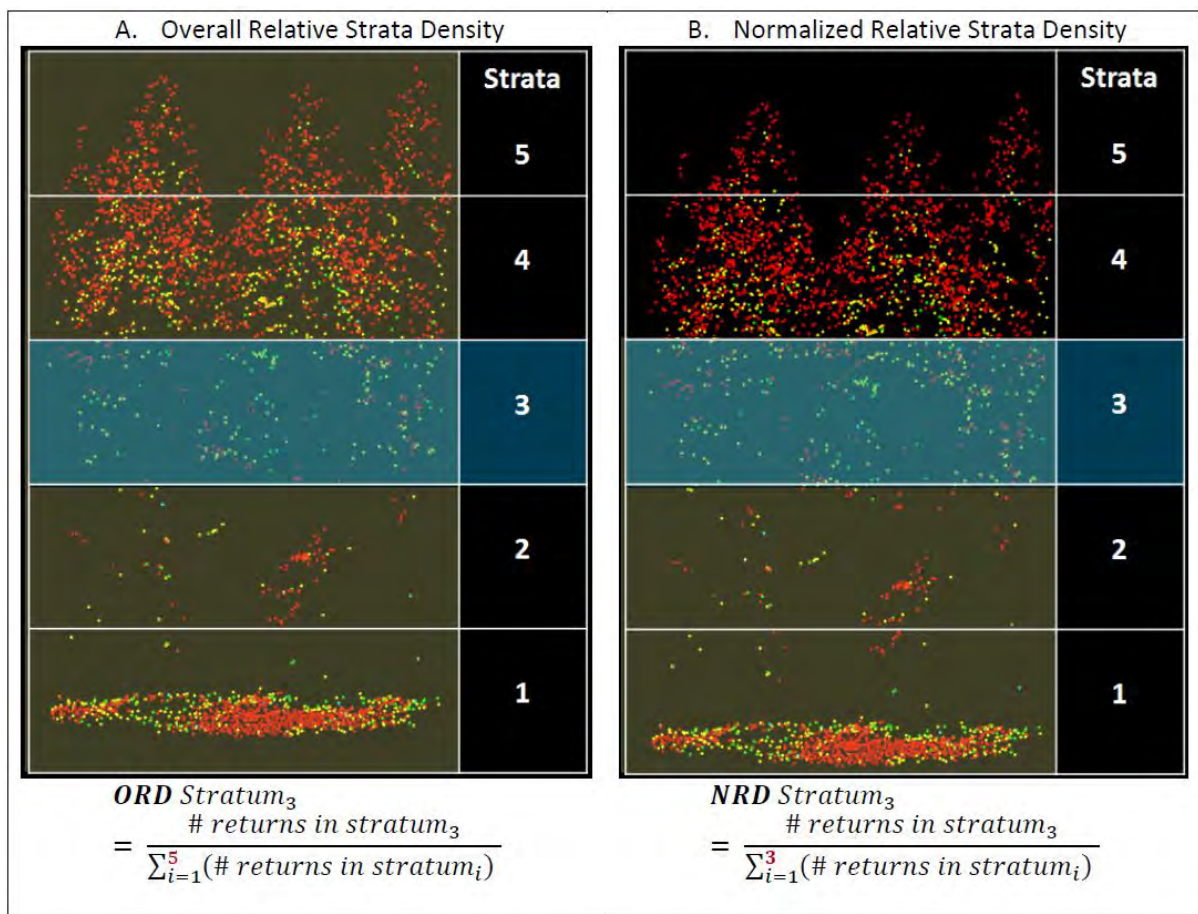


Abbildung 23: Prinzip der Stratendichte. Links Overall Relative Strata Density, Rechts: Normalized Relative Strata Density (McCallum et al. 2014)

Bei den LiDAR-Hilfsvariablen wird die Information direkt aus den Punktwolken abgegriffen. Abbildung 16 zeigt das Beispiel der Bedeckung (Coverage) für zwei unterschiedliche Bestandestypen. Hier wird der Anteil der Punkte über einer Grenze (2m) im Vergleich zu der gesamten Anzahl an Punkten verglichen. Bei einigen Hilfsvariablen erfolgt die Interpretation erst für Punkte die über einem gewissen Grenzwert liegen (z.B. Perzentile, Abbildung 17). In diesem Fall sollen nur die mutmasslichen Punkte der Baumvegetation analysiert werden. Im Beispiel in Abbildung 17 wird die Höhe der 95% Perzentile für die Punktwolke oberhalb von 2m berechnet.



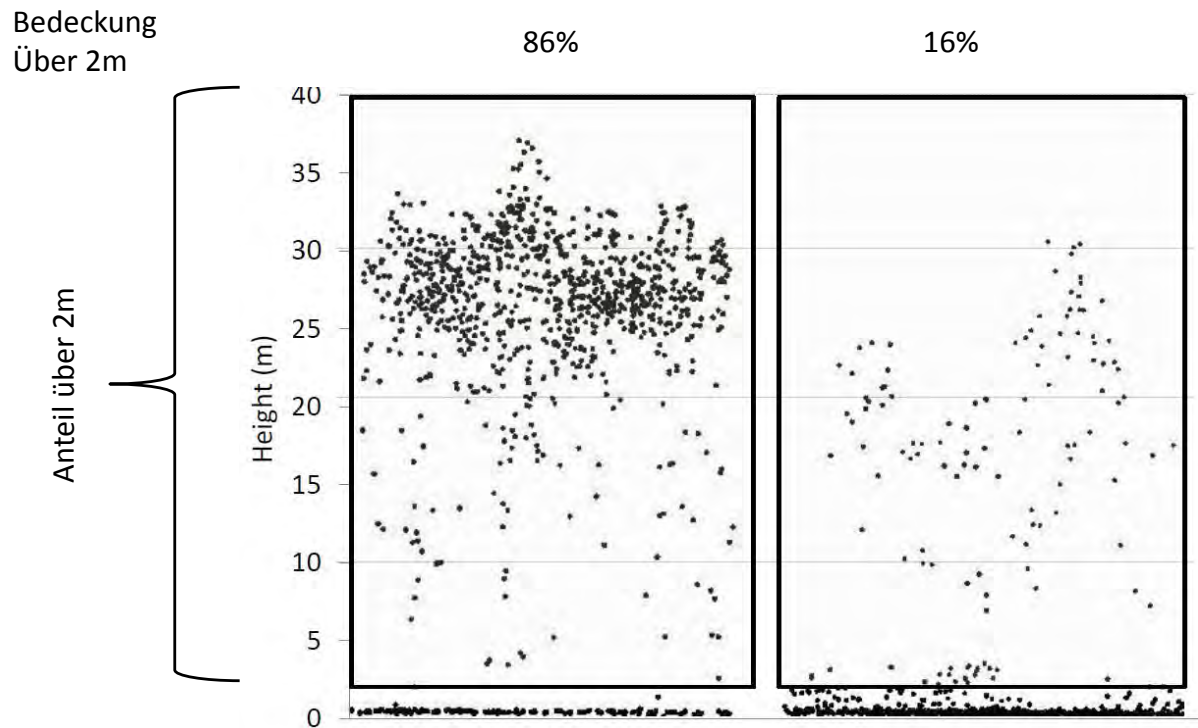


Abbildung 24: Bedeckung (Coverage) einer LiDAR-Punktwolke (nach Bolton 2014)

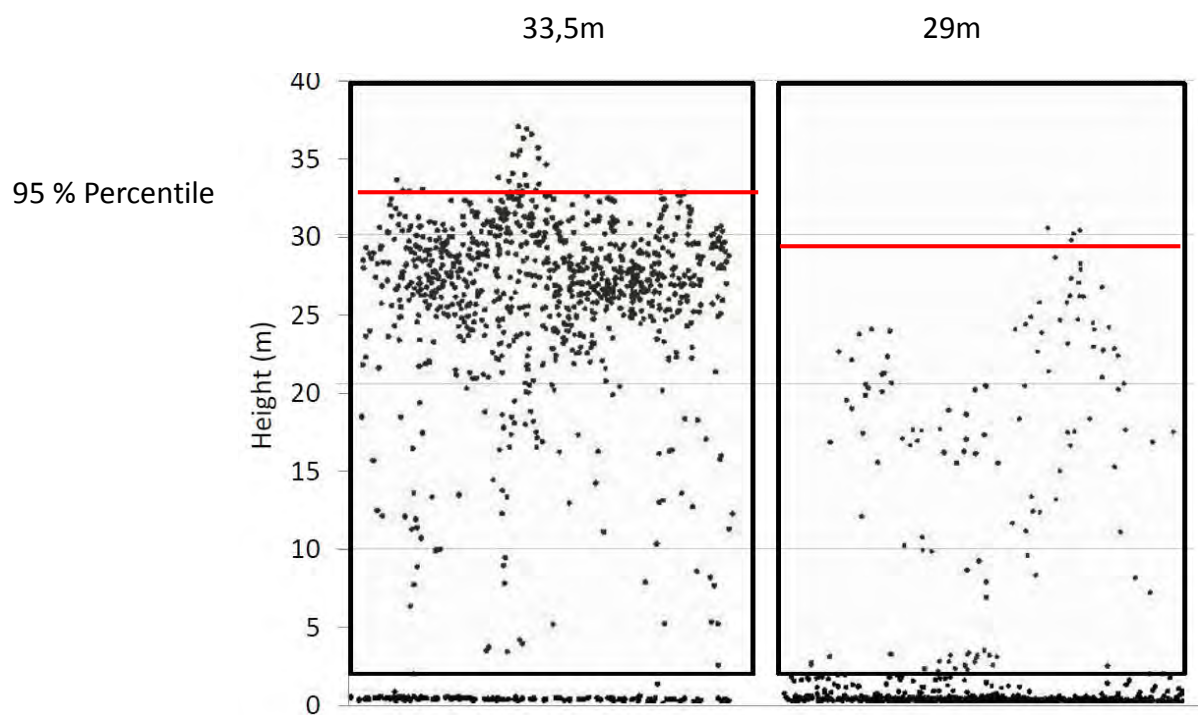


Abbildung 25: 95% Höhen-Perzentil-Werte von zwei verschiedenen Plot-Typen (Bestandestypen) (nach Bolton 2014)

Tabelle 28: Hilfsvariablen aus den LiDAR Daten

	Beschreibung	Abkürzung	Einheit
Perzentile	Höhen Perzentil Werte für die Punkte mit einer Mindesthöhe von 1.3m	las_elev_above_013dm_pXX XX = {99, 95, 90, 80, 75, 70, 60,..., 30, 25, 20, 10, 05, 01}	[m]
Bedeckung (Coverage)	Anteil der Punkte (first returns), die oberhalb von 13 dm liegen	las_cover_above_013dm_1st_return	[0 - 1]
Bedeckung (Coverage)	Anteil der Punkte (all returns), die oberhalb von 13 dm liegen	las_cover_above_013dm_all_return	[0 - 1]
	Durchschnittliche Höhe der Punkte, (*1)	las_elev_above_013dm_average	[m]
Standard- abweichung	Empirische Standardabweichung der Punkte (*1)	las_elev_above_013dm_std	
Maximale Höhe	Höhe des höchsten Punktes	las_elev_above_013dm_max	[m]
Schiefe	Mass für die Symmetrie (*1)	las_elev_above_013dm_skew	[]
Kurtosis	Kurtosis (*1)	las_elev_above_013dm_kurtosis	[]
Kstat	Kstat (*1)	las_elev_above_013dm_kstat	[]
(*1) ->(berechnet aus der Menge der Punkte, die über einer Höhe von 13 dm liegen)			

Eine weitere Charakterisierung der Daten beinhaltet Schiefe (Skewness) und Kurtosis. Diese Eigenschaften sind nachfolgend im Detail beschrieben (Stahel 2002):

Die Schiefe (Skewness) ist ein Maß für die Symmetrie, genauer gesagt für die fehlende Symmetrie. Eine Verteilung (oder ein Datensatz) ist symmetrisch, wenn sie links und rechts vom Mittelpunkt gleich aussieht. Die Schiefe wird mit folgender Formel berechnet:

$$Skewness = \frac{\sum_{i=1}^N (Y_i - \bar{Y})^3}{(N-1)s^3}$$

wobei  $\bar{Y}$  der Mittelwert,  $s$  die Standardabweichung und  $N$  die Anzahl der Datenpunkte ist.

Die Kurtosis (Wölbung) ist ein Maß dafür, ob die Daten im Verhältnis zu einer Normalverteilung stark oder leicht geschwungen sind. Das heisst, Verteilungen mit geringer Kurtosis (Wölbung) streuen relativ gleichmäßig; bei Verteilungen mit hoher Wölbung resultiert die Streuung mehr aus extremen, aber seltenen Ereignissen. Eine gleichmäßige Verteilung wäre der Extremfall. Die Kurtosis wird mit folgender Formel berechnet:

$$Kurtosis = \frac{\sum_{i=1}^N (Y_i - \bar{Y})^4}{(N-1)s^4}$$

## 5.4 Weitere Hilfsvariablen

Weitere Hilfsvariablen können aus Bestandeskarten, Orthophotos und Satellitendaten stammen. Insbesondere das Attribut „Entwicklungsstufe“ aus der Bestandeskarte erweist sich häufig als nützlich.

Geomorphometrische Hilfsvariablen sind Parameter wie Höhe über Meer, Exposition, Hangneigung, Relief, etc. Diese beizuziehen macht insbesondere bei grossflächigen Analysen Sinn, bei welchen eine grosse topologische Bandbreite existiert.

Variiert das Flugjahr der Fernerkundungsdaten, kann auch dieses als Hilfsvariable herangezogen werden (Hill et al. 2018).

## 6 Stichprobenaufnahmen

Die Optimierung der Stichprobenaufnahmen ist nicht der Schwerpunkt dieses Berichts. Dennoch werden wir in diesem Abschnitt ein paar relevante Punkte bezüglich Stichprobenaufnahmen diskutieren.

### 6.1 Lagegenauigkeit der Stichproben

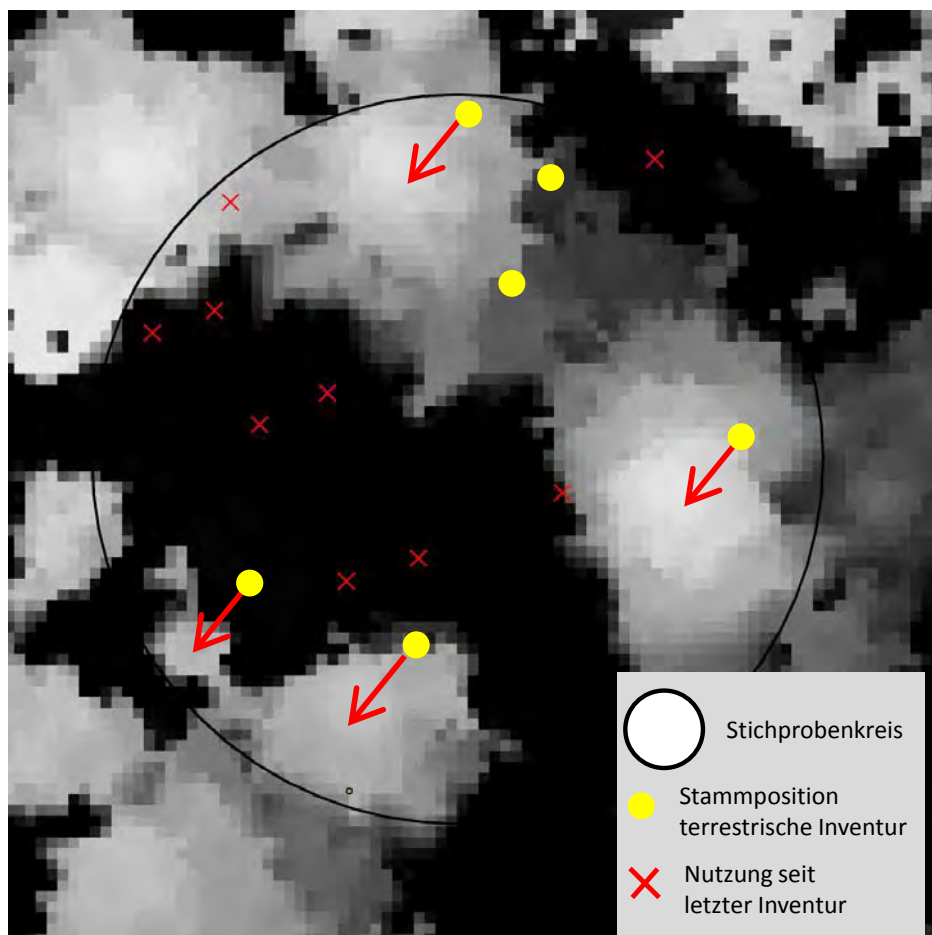
Beim Einmessen der Stichproben kann es zu Fehlern kommen, so dass sich die Stichprobe nicht auf der angegebenen Soll-Koordinate befindet. Bei der einphasigen Stichprobenauswertung war dieser Fehler ohne Folge für die Auswertung und die Genauigkeit des Ergebnisses. Vergleicht man nun aber die Fernerkundungsdaten an den Soll-Koordinaten mit den Inventurdaten, kann es vorkommen, dass sich der Ausschnitt der Fernerkundungsdaten mit den Inventurdaten nur teilweise überschneidet. Im Extremfall überschneidet sich der Ausschnitt der Fernerkundungsdaten überhaupt nicht mit den gemessenen Bäumen auf der Stichprobenfläche. Besonders bei inhomogenen Waldstrukturen (grosse Änderungen auf kleinen Distanzen) ist dies problematisch, mitunter werden dann „Äpfel mit Birnen“ verglichen (Wittwer et al. 2017)

Wittwer et al. 2017 haben den Einfluss der Stichproben-Lagegenauigkeit auf die Modellgüte anhand des Parameters Grundfläche [ $\text{m}^2/\text{ha}$ ] untersucht. Dazu wurden Regressionsmodelle anhand der Soll- und Ist-Koordinaten hergeleitet und geprüft, ob die Verwendung der Ist-Koordinate zu einer Verbesserung des Modells führt. Für die Untersuchung wurde ein 500 ha grosses Waldstück in der Gemeinde Embrach ZH verwendet. Die Ist-Koordinaten wurden mit DGPS (Differentielles GPS) vermessen und mit den Soll-Koordinaten verglichen. Die Abweichungen lagen zwischen 0.36m und 20.80m, mit einem Mittelwert von 5.96m, was einer Überlappung von 5.96m entspricht (Stichprobenkreisradius = 9.77m,  $F = 300\text{m}^2$ ). Es konnte gezeigt werden, dass bei Verwendung der genauen DGPS – Koordinaten Modelle mit wesentlich besserer Vorhersage berechnet werden können (Tabelle 7).

**Tabelle 29: Ergebnisse der Modellvergleiche. Adj. R<sup>2</sup>: angepasstes Bestimmtheitsmass. RMSE: Wurzel der mittleren quadratischen Abweichung (engl. Root Mean Square Error). (Wittwer et al. 2017)**

	Soll-Koordinaten	DGPS-Koordinaten
Vegetationshöhenmodell (CHM)	Adj. R <sup>2</sup> : 0.4332 RMSE: 15.05	Adj. R <sup>2</sup> : 0.5465 RMSE: 14.02
LiDAR-Punkt-wolke (LPW)	Adj. R <sup>2</sup> : 0.4814 RMSE: 13.59	Adj. R <sup>2</sup> : 0.6044 RMSE: 12.52

Selbst dann, wenn die Stichprobenmittelpunkte mittels DGPS vermessen wurden, können immer noch Abweichungen zwischen der gemessenen und der tatsächlichen Koordinate auftauchen. Mittels ‚Co Registration‘ oder ‚Tree Matching Algorithmen‘ kann die Lokalisierung noch zusätzlich verbessert werden (Vauhkonen et al. 2012, Lamprecht et al. 2017). Diese Algorithmen sind aber nur zuverlässig, falls bereits eine genügend genaue Einmessung der Position der Stichprobenmittelpunkte vorhanden ist. Solche hochpräzise Koordinatenangaben sind Voraussetzung um Randeffekte zu berücksichtigen. Abbildung 18 zeigt ein Beispiel einer kleinen Abweichung zwischen den Stammpositionen aus terrestrischer Inventur und den Spitzen im Vegetationshöhenmodell (CHM).



**Abbildung 26: Ungenaue Übereinstimmung der Stammpositionen aus terrestrischer Inventur mit dem CHM (Hintergrund)**

## 6.2 Zeitliche Übereinstimmung der Hilfsvariablen mit den terrestrischen Stichproben

Möchte man eine terrestrische Stichprobe mit Fernerkundungsdaten kombinieren, muss darauf geachtet werden, dass die Aufnahmen möglichst zeitgleich stattfinden. Insbesondere Stichproben, auf welchen nach der terrestrischen Aufnahme eine Nutzung und erst nachher der (LiDAR-) Flug stattfand, verschlechtern die Modellgüte. Price et al. (2018) haben gezeigt, dass die Modellgüte deutlich abnimmt, falls der Aufnahmezeitpunkt zwischen Feldaufnahmen und Fernerkundungsdaten mehr als 2 Jahre auseinander liegt. Eine Möglichkeit dies auszugleichen, ist das Sammeln von Informationen über die Holznutzung und die Integration dieser Informationen in das Modell.

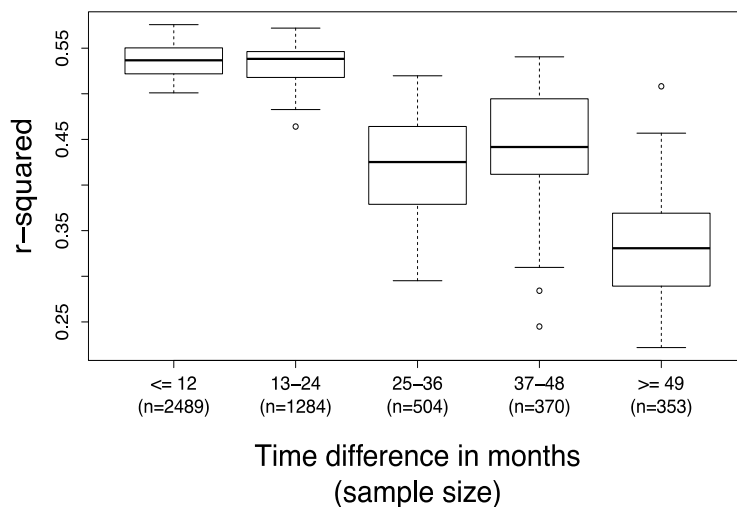


Abbildung 27: Vergleich der Differenz des Aufnahmezeitpunkts zwischen Feldaufnahmen und Fernerkundungsdaten mit der Modellgüte ( $R^2$ ) (Price et al. 2018)

Findet die LiDAR Befliegung nach der terrestrischen Aufnahme statt, ist davon auszugehen, dass in der Zwischenzeit die Grundfläche als auch das Volumen leicht zugelegt haben. Bei der 2-phasigen Auswertung ist dieser kleine Effekt jedoch nicht relevant, da durch die „Residuenkorrektur“ eine Korrektur erfolgt.

## 6.3 Stichprobendesign

Mandallaz (2003) hat Möglichkeiten zur Optimierung des Stichprobenlayouts hergeleitet und gezeigt, dass die Methoden, wie sie im LFI verwendet werden, dem Optimum für die Zielgrösse Vorrat sehr nahe kommen. Er empfiehlt also Aufnahmen mit 2 Probekreisen zu machen ( $r = 7.98\text{m}$  ( $F=200\text{m}^2$ ),  $r = 12.62\text{m}$  ( $F=500\text{m}^2$ )) mit Kluppschwellen von 12 und 36cm.

## 7 Auswertung der terrestrischen Stichprobendaten und Standardisierung

### 7.1 Lokale Dichte

Um ein Modell bilden zu können, müssen die terrestrischen Stichproben ausgewertet werden. Für die ausgewerteten Grössen wird die lokale Dichte berechnet. Die Berechnung erfolgt nach den Schätzern von Mandallaz (2008) und wird nachfolgend stark verkürzt wiedergegeben:

Zunächst kann man eine zufällige Indikatorvariable  $I_i(x)$  für den  $i$ -ten Baum der Population  $p$  am Stichprobenpunkt  $x$  definieren als:

$$I_i(x) = \begin{cases} 1 & \text{if } i \in K_r(x) \\ 0 & \text{if } i \notin K_r(x) \end{cases}$$

Die Indikatorvariable  $I_i(x)$  erhält den Wert 1, falls diese innerhalb des Kreises  $K_i(r)$  liegt, ansonsten den Wert 0. Die Aufnahmewahrscheinlichkeit  $\pi$  des  $i$ -ten Baumes in der Stichprobe am Punkt  $x$  berechnet sich indem man die Fläche  $\lambda$  des Kreises  $K_i(r)$  und die Waldfläche  $\lambda(F)$  verwendet:

$$\pi_i = \mathbb{P}(I_i(x) = 1) = \mathbb{E}_x(I_i(x)) = \frac{\lambda(K_i(r) \cap F)}{\lambda(F)}$$

Wenn die Kreisfläche von  $K_i(r)$  nicht vollständig von der Waldfläche  $F$  bedeckt ist, muss man eine sogenannte Randanpassung (Boundary adjustment) durchführen, d.h. die Kreisfläche muss auf den vollständig im Wald liegenden Teil reduziert werden. Es ist zu beachten, dass die Vernachlässigung der Randanpassungen zu einer Unterschätzung der lokalen Dichte führt.

Die lokale Dichte  $Y(x)$  ist an jedem Punkt  $x$  für eine beliebige Zielgrösse nach dem Horwitz-Thompson-Schätzer definiert als

$$Y(x) = \frac{1}{\lambda(F)} \sum_{i=1}^N \frac{I_i(x) Y_i}{\pi_i}$$

Wenn sich der Messpunkt  $x$  auf einem Hang befindet, ist eine sogenannte Hang-Korrektur erforderlich. Die Projektion eines auf einer Schräge erzeugten Kreises auf die horizontale Ebene ergibt eine Ellipse, deren Fläche größer ist als die korrekte Nennfläche des Kreises mit Radius  $r_i$ . Man muss daher den Radius in der Steigung um den Steigungskorrekturfaktor  $r_{i, slope} = r_i / \cos \theta$  korrigieren, um eine Fehlberechnung der Aufnahmewahrscheinlichkeit zu vermeiden. In der Praxis wird die Neigungskorrektur auf Plot-Ebene und nicht auf Baumebene durchgeführt. (Mandallaz 2007)

## 7.2 Struktur der Stichprobendaten

Die Informationen zu den terrestrischen Stichproben setzen sich aus einem Tabellenblatt zu den aufgenommenen Bäumen („*bdat*“) und einem Tabellenblatt zu den Stichprobenkreisen („*pdat*“) zusammen. Um diese im geschaffenen Python-Skript einlesen zu können, müssen diese im \*.csv Format vorliegen und enthalten folgende Informationen (Tabelle 8 und Tabelle 9).

Tabelle 30: Blatt „bdat“ mit den Eigenschaften der aufgenommenen Bäume

Attribut	Beschreibung	Einheit
<b>PBF</b>	<b>Probeflaeche Nummer</b>	<b>[]</b>
AZI	Azimut	[0-400g]
DIST	Distanz (horizontal Distanz)	[m]
BA	Baumartnummer	[]
BHDA	BHD der vorhergehenden Messung	[cm]
D7A	D7 der vorhergehenden Messung	[cm]
HOHA	Hoehe der vorhergehenden Messung	[m]
VOLA	Volumen der vorhergehenden Messung	[m3]
BHDN	BHD der aktuellen Messung	[cm]
D7N	D7 der aktuellen Messung	[cm]
HOHN	Hoehe der aktuellen Messung	[m]
VOLN	Volumen der aktuellen Messung	[m3]
...	...	...

Tabelle 31: Blatt „pdata“ mit den Eigenschaften der Stichprobenkreise

Attribut	Beschreibung	Einheit
<b>PBF</b>	<b>Probeflaeche Nummer</b>	<b>[]</b>
X_P	X Koordinate des Probekreiszentrum	[]
Y_P	Y Koordinate des Probekreiszentrum	[]
GPS	0 = Nicht per GPS vermessen, 1 = per GPS vermessen	[0 , 1]
FL	Fläche der Probefläche	m <sup>2</sup>
...	...	...

Die Tabellenblätter können auch mehr Attribute als die hier aufgeführten enthalten, bzw. müssen nicht alle aufgeführten Attribute enthalten. Die logische Verbindung zwischen den beiden Tabellenblättern geschieht über das Attribut „**PBF**“ (**Probefläche Nummer**). Darum muss dieses Attribut auf allen Tabellenblättern enthalten sein. Weitere relevante Eigenschaften für die Auswertung können in einem separaten Tabellenblatt „DiversProperties“ definiert werden (Tabelle 10). Das Aufnahmelayout wird im Blatt „DiversProperties“ spezifiziert, standardmässig können bis zu 3 konzentrische Kreise inkl. Kluppschwellen definiert werden.

Tabelle 32: Blatt „DiversProperties“ mit der Definition der Aufnahmelayouts für Bremgarten

Property	Value	Remark
....		
KreisFlaechen_m2_1	400	# Kreisflaechen in aufsteigender Reihenfolge angeben
KreisFlaechen_m2_2		
KreisFlaechen_m2_3		
Kluppschwellen_cm_BHD_1	12	# Kluppschwellen passend zu Kreisflaechen angeben!
Kluppschwellen_cm_BHD_2		
Kluppschwellen_cm_BHD_3		



## 7.3 Standardisierung

### Standardisierung der Attributnamen

Die Python-Skripte und Funktionen basieren auf standardisierten Namen für die Eingabeparameter. Aber auch für den Fall, dass die Attributnamen der eingelesenen Tabellen von den Attributnamen in den Python-Codes abweichen, ist die Schnittstelle gewährleistet. Die Übersetzung der Attributnamen der eingelesenen Tabellen zu den im Code verwendeten Begriffen erfolgt mittels Standardisierungstabellen. Tabelle 11 zeigt ein Beispiel für die Standardisierungstabelle für die Baumdaten. In der Spalte „Intern“ befinden sich die im Code verwendeten Begriffe. In der Spalte „Used“ befinden sich die Begriffe, welche in den einzulesenden Tabellen verwendet werden. Wichtig ist, dass Standardisierungstabellen die vollständige Attributliste der einzulesenden Tabellen aufweisen. Die Spalte „Intern“ sollte nicht geändert werden. Die analoge Standardisierungstabelle für die Stichprobenkreise ist in Tabelle 12 abgebildet.

**Tabelle 33: Standardisierungstabelle für die Baumdaten („bdat“) (Beispiel Bremgarten)**

<i>Intern</i>	<i>Used</i>	<i>Description</i>	<i>Unit</i>
PBF	PBF	Probeflaeche Nummer	[]
AZI	AZI	Azimut	[0-400g]
DIST	DIST	Distanz	[m]
BA	BA	Baumart	[]
BHDA	BHDA	BHD der vorhergehenden Messung	[cm]
D7A	D7A	D7 der vorhergehenden Messung	[cm]
HOHA	HOHA	Hoehe der vorhergehenden Messung	[m]
VOLA	VOLA	Volumen der vorhergehenden Messung	[m3]
BHDN	BHD neu	BHD der aktuellen Messung	[cm]
D7N	D7N	D7 der aktuellen Messung	[cm]
HOHN	HOHN	Hoehe der aktuellen Messung	[m]
VOLN	VOLN	Volumen der aktuellen Messung	[m3]

**Tabelle 34: Standardisierungstabelle für Stichprobenkreise („plot\_data“) anhand des Beispiels Bremgarten**

<i>Intern</i>	<i>Used</i>	<i>Description</i>	<i>Unit</i>
PBF	plot_id	Probeflaeche Nummer	[]
X_P	x_all	X-Koordinate des Probekreiscentrums	[]
Y_P	y_all	Y-Koordinate des Probekreiscentrums	[]
GPS	gps	0 = Nicht per GPS vermessen, 1 = per GPS vermessen	[0 , 1]

### Standardisierung der Baumarten

Um eine korrekte Auswertung der Baumarten zu gewährleisten, müssen ebenfalls die Attribute der Baumarten definiert werden. Dies geschieht ebenfalls mittels Standardisierungstabelle. „Nr\_Intern“ bezeichnet die Interne Codierung der Baumartennummer und sollte nicht verändert werden.



„Nr\_Used“ ist die verwendete Baumartennummer für das Attribut BA in der Tabelle „bdat“. Die weiteren Attribute der Standardisierungstabelle benennen die Baumart („Species\_Name“) und geben Auskunft, ob es sich um einen Laubbaum („**Deciduous\_Tree**“: 1 = Laubbaum, 0 = Nadelbaum) oder Immergrünen Baum („**Evergreen\_tree**“: 1 = Immergrün, 0 = Winterkahl) handelt.

**Tabelle 35: Standardisierungstabelle Baumarten**

<b>Nr_Intern</b>	<b>Nr_Used</b>	<b>Species_Name</b>	<b>Deciduous_Tree</b>	<b>Evergreen_tree</b>
101	1	Buche	1	0
102	2	Eiche	1	0
103	3	Ahorn	1	0
104	4	Esche	1	0
105	5	Linde	1	0
106	6	Kirsche	1	0
107	7	Ulme	1	0
109	9	Uebrige_Laubbaeume	1	0
110	10	Fichte	0	1
120	20	Tanne	0	1
130	30	Foehre	0	1
140	40	Lärche	0	0
150	50	Eibe	0	1
190	90	Uebrige_Nadelbaeume	0	1

## 7.4 Ausgabe

Als Ergebnis des Moduls „Auswertung Stichproben“ wird eine Tabelle mit den lokalen Dichten und weiteren Kennwerten je Stichprobe ausgegeben. Um diese eindeutig dem Ursprung „aus den terrestrischen Stichproben“ zuzuordnen wird das Kürzel „TS\_“ vorangestellt.

Tabelle 36: Ausgabewerte des Moduls „Auswertung Stichproben“

Beschreibung	Abkürzung	Einheit
Durchschnittlicher BHD	TS_BHDN_mean	[cm]
Standardabweichung des BHD	TS_BHDN_std	[cm]
Maximaler BHD	TS_BHDN_max	[cm]
Grundfläche	TS_Basal_Area	[m2]
Probeflächennummer	TS_PBF	[]
X – Koordinate des Stichprobenmittelpunktes	TS_X_Koord	[]
Y – Koordinate des Stichprobenmittelpunktes	TS_Y_Koord	[]
Lokale Dichte des Vorrats in der Stichprobe	TS_Total_Vol	[m3/ha]
Lokale Dichte des Nadelholzvorrats in der Stichprobe	TS_NdH_Vol	[m3/ha]
Lokale Dichte des Vorrats von winterkahlen Bäumen in der Stichprobe	TS_Winterkahl_Vol	
Grundfläche pro ha	TS_BasalAreaha	[m2/ha]
Stammzahl	TS_Stemnumber	[N]
Stammzahl pro ha	TS_STZha	[N/ha]
Lokale Dichte des Vorrats der Immergrünen Bäume (LbH & Lärche) in der Stichprobe	TS_Immergruen_Vol	[m3/ha]
Lokale Dichte des Laubholzvorrats in der Stichprobe	TS_LbH_Vol	[m3/ha]
Anteil Nadelholz des Vorrats	TS_Anteil_NdH	[0..1]
Anteil immergrüne Bäume des Vorrats	TS_Anteil_Immergruen	[0..1]
Anteil immergrüne Bäume des Vorrats gerundet	TS_Anteil_Immergruen_rd	[0, 0.1, 0.2, 0.3, ..., 0.9, 1]
Anteil Nadelholz des Vorrats gerundet	TS_Anteil_NdH_rd	[0, 0.1, 0.2, 0.3, ..., 0.9, 1]

## 8 Modellbildung

Für die Modellbildung wird mit Regressionsmodellen gearbeitet. Regression ist eine der am häufigsten angewandten Methoden der Statistik überhaupt. Wir beschränken uns hier auf die Diskussion und den Einsatz von linearen Modellen, die Klasse der nicht-linearen Modelle wird nicht berücksichtigt. Dies aus folgenden Gründen:

- Lineare Modelle sind einfach anzuwenden und haben einen breiten Anwendungsbereich;
- Für die Verwendung des R-packages „forestinventory“ ist der Einsatz von linearen Modellen Voraussetzung;
- Lineare Modelle sind eine sehr flexible Methode und sie sind auch geeignet, nicht-lineare Zusammenhänge zu beschreiben, beispielsweise durch Transformationen der Variablen.

### 8.1 Einfache lineare Regression

Das Modell der einfachen linearen Regression lautet:

$$Y_i = \beta_0 + \beta_1 x_i + E_i, \quad (i = 1, \dots, n)$$

$$E_1, \dots, E_n \text{ i.i.d.}, \quad \varepsilon(E_i) = 0, \quad \text{Var}(\varepsilon_i) = \sigma^2.$$

Wobei:

Y: Zielvariable

- $\beta_0$ : Achsenabschnitt (Intercept)
- $\beta_1$ : Steigung der Regressionsgeraden
- $E_i$ : zufälliger Fehler, welcher normalverteilt ist mit Erwartungswert 0 und Varianz  $\sigma^2$
- $x$ : erklärende Variable

Die Y-Variable ist die Zielvariable (engl: response variable) und die x-Variable ist die erklärende Variable oder Co-Variable (engl: explanatory variable; predictor variable; covariate). Man nennt das Modell „linear“, weil die Parameter  $\beta$  linear vorkommen. D.h., wenn man nach  $\beta$  ableitet, dann verschwindet es in der Ableitung. Eine einfache lineare Regression kann demzufolge auch folgenderweise aussehen:

$$\log(Y_i) = \beta_0 + \beta_1 \log(x_i) + E_i$$

Die einfache lineare Regression zeichnet sich dadurch aus, dass sie nur eine erklärende Variable aufweist.

## 8.2 Multiple linear Regression

Die multiple lineare Regression weist im Gegensatz zur einfachen linearen Regression mehrere erklärende Variablen (Prädiktoren) auf. Das Modell lautet wie folgt:

$$Y_i = \beta_0 + \beta_1 x_{i,1} + \beta_2 x_{i,2} + \beta_3 x_{i,3} + \dots + E_i,$$

$$E_1, \dots, E_n \text{ i.i.d.}, \varepsilon(E_i) = 0, \text{Var}(\varepsilon_i) = \sigma^2.$$

Es gibt einen wichtigen Unterschied bei der Interpretation der Parameter bei der einfachen und der multiplen linearen Regression:

- Einfache lineare Regression:  $\beta_1$  ist die erwartete Zunahme der Zielgrösse, wenn  $x_1$  um eine Einheit erhöht wird.
- Multiple lineare Regression:  $\beta_i$  ist die erwartete Zunahme der Zielgrösse, wenn  $x_i$  um eine Einheit erhöht wird und die übrigen Variablen fixiert werden.

Es ist i.a. nicht möglich, von den Koeffizienten einer multiplen linearen Regression auf die Koeffizienten einer einfachen linearen Regression mit nur einer der erklärenden Variablen zu schliessen. Die umgekehrte Richtung ist auch nicht möglich. Wenn man in einer multiplen Regression auch nur eine erklärende Variable hinzufügt oder weglässt, können sich alle Parameter völlig ändern. Man müsste die Parameter also erneut schätzen.

## 8.3 Bewerten eines Modells

Das Finden eines guten Modells kann ein zeitintensiver Prozess sein und benötigt statistische Vorkenntnisse. Wir gehen in diesem Bericht nicht auf alle Details der Modellfindung ein, sondern verweisen auf bestehende Literatur (Stahel 2002). Die Modellbildung und Variablenselektion ist ein Prozess, welcher nicht automatisiert werden kann, u.a. ist statistisches aber auch spezifisches Fachwissen notwendig. Zudem kommt man z.B. bei der Residuenanalyse nicht an der visuellen Beurteilung der Plots vorbei. Hier gilt: „das menschliche Auge erkennt bestimmte Muster immer noch am besten“.

Hat man ein Modell definiert, so kann man die Güte des Modells anhand untenstehender Kriterien bewerten. Ein Modell kann nie anhand eines einzelnen Kriteriums bewertet werden, es ist ein Zusammenspiel verschiedener Kriterien. Es ist wichtig zu wissen, wofür man das Modell braucht, denn je nach Verwendungszweck müssen mehr oder weniger Kriterien erfüllt werden. Soll beispielsweise eine modellbasierte Schätzung erfolgen (Schätzung erfolgt ohne Einbezug von terrestrischen Referenzdaten, falls im Kleingebiet nur wenige oder gar keine Stichproben liegen), werden an das Modell höhere Anforderungen gestellt, als wenn eine 2-phasige Schätzung erfolgt (im Kleingebiet gibt es genügend Stichproben damit allfällige systematische Fehler korrigiert werden können). Ein Modell sollte schlussendlich auch physikalisch „Sinn“ machen, d.h. Prädiktoren sollten allometrische bzw. physikalische Zusammenhänge abbilden.

Untenstehende Indikatoren sollten angeschaut werden, um die Güte eines Modells zu bewerten, insbesondere die Residuenanalyse ist zentral und gehört zu jeder seriösen Analyse dazu. Für eine vertiefte Beschreibung wird auf die Fachliteratur verwiesen (Stahel 2002).

### **Bestimmtheitsmass $R^2$**

Das Bestimmtheitsmass gibt an, welchen Anteil der Streuung (Variation) durch das Modell erklärt wird. Falls das  $R^2$  nahe 1 ist, erklärt das Modell viel der totalen Variation, falls  $R^2 \approx 0$  taugt das Regressionsmodell nicht besonders viel. Bei der multiplen linearen Regression wird in der Regel das angepasste  $R^2$  verwendet, welches die Modellgrösse berücksichtigt.

### **Wurzel der mittleren quadratischen Abweichung (Root mean square error, RMSE)**

RMSE ist ein Mass dafür, wie verteilt die Residuen (Residuen sind ein Mass dafür, wie weit die gemessenen Werte von der Regressionsgeraden entfernt sind, Abbildung 20) sind. Es sagt, wie konzentriert die Daten um die Regressionsgerade sind.

### **Kreuzvalidierung**

Bei einer Kreuzvalidierung werden die Daten geteilt, mit dem einen Teil der Daten wird das Modell parametrisiert und mit dem anderen Teil der Daten das Modell überprüft.

### **Residuenanalyse**

In der Residuenanalyse wird geprüft, inwieweit der Fehlerterm  $E_i$  den Modellannahmen entspricht. Dies geschieht, indem man einen Tukey-Anscombe Plot und einen QQ-Plot (Quantile-Quantile-Plot) zeichnet und die Annahmen von Auge überprüft. Es gibt keine automatischen Tests, die diese Aufgabe übernehmen können.

## **8.4 Diskussion einiger besonderer Aspekte der Modellierung**

Im Laufe der Erarbeitung des Projektes sind einige spezifische Fragen aufgetaucht, die für die Modellierung von waldbaulichen Zielgrössen von Interesse sind. Diese werden hier diskutiert, da diese wohl immer wieder auftauchen dürften.

### **Soll man den Interzept durch den Nullpunkt zwingen?**

Eine Regressionsgerade durch den Nullpunkt zu zwingen erreicht man, indem man keinen Interzept (Y-Achsenabschnitt) verwendet. Generell sagt man, dass man das nur tun sollte, wenn man weiss, dass bei einem  $X(Y)$ -Wert von Null auch der  $Y(X)$ -Wert Null ist. Prinzipiell würde hier logischerweise

also auch die Beziehung Holzvolumen auf Einzelbaum / Plotebene gegenüber Baumhöhe / Plotkronenhöhe zählen.

Trotz dieses Vorteils sollte man dies nicht machen. Wenn man ein gutes Modell wählt (eines, das den zugrunde liegenden Prozess gut beschreibt) und dieses Modell ordentlich spezifiziert wird (mit Hilfsvariablen, Transformationen, usw.), dann sollte der Interzept ohnehin nahe Null liegen. Das ist dann eine Qualitätskontrolle für die Modellierung. Das Zwingen durch den Nullpunkt entspricht einem Vorgehen, welches bei einer sauberen Modellierung und bei Daten von guter Qualität gar nicht nötig ist. Wenn das nicht der Fall ist, sollte man eher a) die Modellform überdenken oder / und b) überlegen, warum die Daten nicht gut genug sind.

Im Falle der model-assisted (= design-based) Schätzer gibt es aber noch einen viel wichtigeren Grund, das Weglassen des Interzepts zu unterlassen: Die Unverzerrtheit der Schätzung hängt ganz elementar davon ab, dass die Residuen des Modelles im Mittel Null sind. Wenn das Modell anhand der Inventurdaten hergeleitet wird (interner Modellansatz), ist dies eine Eigenschaft, die automatisch durch die Anwendung von OLS (Ordinary Least Square) linearer Regression sichergestellt ist, aber nur wenn man den Interzept ins Modell mit einschliesst.

Ein Weglassen des Interzepts (Regression durch Nullpunkt) verbessert nicht zwangsweise die Modellgenauigkeit. Beispiel Plotvolumen zu Kronenhöhe: sollte eigentlich eine allometrische Form haben, die man mit einem 2nd order term gut beschreiben kann. Wenn da jetzt bspw. eine einfache Gerade ohne Interzept durchgelegt wird, führt das nicht zu einer besseren Modellgenauigkeit.

Bei einem Weglassen des Interzepts kann das  $R^2$  des Modelles nicht mehr als Qualitätsmass benutzt werden. Man bekommt dann oft ein  $R^2$  nahe oder sogar grösser als 1. Wenn man sich hingegen den RMSE (mittlere quadratische Abweichung) ausrechnet, ist einfacher zu beurteilen, ob eine Gerade durch den Nullpunkt die Vorhersagegenauigkeit verbessert oder verschlechtert. Man bildet mit dem Weglassen des Interzepts dann vielleicht den Raum um den Nullpunkt wahrheitsgetreuer ab, aber evtl. den ganzen anderen Wertebraum schlechter. (Quelle: Andreas Hill, schriftliche Mitteilung)

### Wie sollen Ausreisser behandelt werden?

Beim fertigen Modell können die Modellwerte gegen die gemessenen Werte aufgetragen werden. Bei Punkten, bei denen die gemessenen Werte stark von den modellierten Werten abweichen, handelt es sich um Ausreisser. In diesem Fall kann das Modell die tatsächlichen Werte schlecht voraussagen. Es stellt sich nun die Frage, wie man mit solchen Ausreissern verfahren soll. Dabei muss man zuerst nach Verwendungszweck unterscheiden:

1. **Verwendung als terrestrische Eingangsdaten für die zweiphasige Schätzung.** In diesem Fall dürfen Ausreisser nur entfernt werden, falls es sich um offensichtliche Messfehler handelt.
2. **Verwendung als Inputgrößen für die Modellbildung.** Soll lediglich ein Modell geschaffen werden, welches für die modellbasierte Schätzung verwendet wird, also eine Schätzung ohne Zuhilfenahme der lokalen Dichten aus den Feldmessungen, können Ausreisser weggelassen werden, falls es offensichtlich ist, dass eine Nutzung zwischen Felddatenaufnahme und Aufnahme der Fernerkundungsdaten stattgefunden hat.

## 9 Schätzer (ein- und zweiphasige)

Für die genaue Herleitung und die Formeln der Schätzer der 2-phasigen Schätzung wird auf Mandallaz (2008) (Kapitel 4: einphasige Schätzer, Kapitel 5: zweiphasige Schätzer) verwiesen. Wir gehen hier kurz auf das Prinzip der Residuenkorrektur bei der mehrphasigen Schätzung ein.

Untenstehende Formel wird verwendet um den Mittelwert der Zielgrösse zu berechnen (Mandallaz 2007):

$$\hat{Y}_{reg} = \frac{1}{n_1} \sum_{x \in s_1} \hat{Y}(x) + \frac{1}{n_2} \sum_{x \in s_2} R(x)$$

Wobei:

$s_1$ : Menge der Stichproben aus der ersten Phase (Fernerkundungsdaten) mit der Anzahl  $n_1$

$s_2$ : Menge der Stichproben aus der zweiten Phase (terrestrische Stp.) mit der Anzahl  $n_2$

$\hat{Y}(x)$ : Modellbasierter Schätzer der lokalen Dichte beim Ort  $x \in s_1$

$R(x)$ : Modell Residuen: Abweichung der modellierten Werte von den gemessenen Werten bei den terrestrischen Stichproben  $x \in s_2$

Der erste Term ist der Durchschnitt der modellierten Werte und der zweiten Term ist der Durchschnitt der Modell-Residuen, also der Abweichung der modellierten Werte von den gemessenen Werten (Abbildung 20). Haben nun die modellierten Werte einen systematischen Fehler (bias), so wird dieser durch die Residuen ausgeglichen, wir sprechen dann von Residuenkorrektur. Daraus folgt, dass die Punkt- und Varianzschätzungen bei der Implementierung externer Modelle exakt unverzerrt und bei Verwendung interner Modelle asymptotisch unverzerrt sind (Mandallaz 2007). Wir gehen implizit davon aus, dass die Punkte  $x \in s_2$  fehlerfrei sind, in dem Sinne, dass die Vorhersage  $\hat{Y}(x)$  und die Beobachtung  $Y(x)$  genau dem gleichen Punkt entsprechen. Dies gilt natürlich nur annähernd in der Praxis.

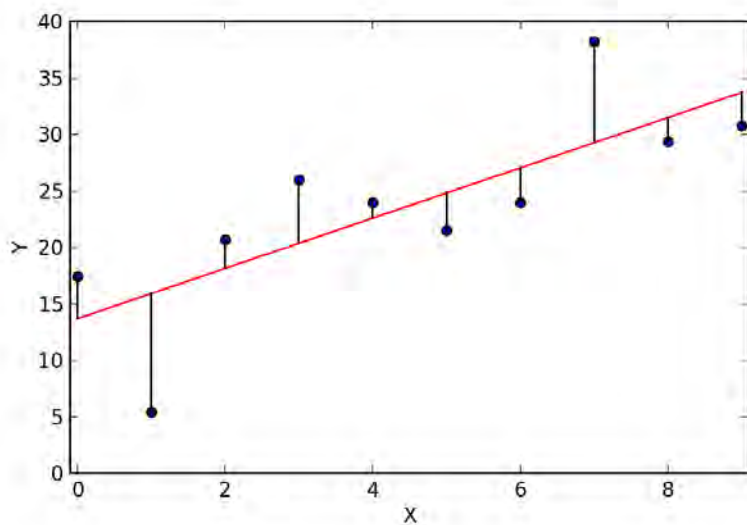


Abbildung 28: Residuen entsprechen der Abweichung der gemessenen Werte (blaue Punkte) von den modellierten Werten (rote Linie) (Quelle: Wikipedia)

## 10 Karten & Bestandesschätzungen

Für Managemententscheidungen möchte man gerne flächendeckende Informationen, oder Informationen auf Bestandes-Ebene haben. Dazu können Karten produziert werden (z.B. Vorratskarten) und die Schätzungen auf Bestände ausgedehnt werden.

Zur Herstellung der Karten und für Bestandesschätzungen empfiehlt sich folgendes Vorgehen:

1. Geeignetes lineares Modell herleiten, aufgrund der terrestrischen Stichproben und den dazugehörigen Hilfsvariablen aus der Fernerkundung.
2. Prüfen der Modellannahmen, insbesondere müssen mittels Residuenanalyse die Voraussetzungen für die lineare Regression überprüft werden (Dettling 2016). Da es sich hier um eine modellbasierte Schätzung handelt, gelten an die Modelle strengere Anforderungen als bei der 2-phasigen Schätzung (model-assisted), bei welcher durch eine Residuenkorrektur sichergestellt wird, dass die Schätzung unverzerrt ist:
  - a. **Linearer Zusammenhang:** Es gibt einen linearen Zusammenhang zwischen gemessenen Werten und den mit dem linearen Modell simulierten Werten (Linearität).
  - b. **Heteroskedastie:** Die Residuen sind unabhängig von der abhängigen und den unabhängigen Variablen (sog. Heteroskedastie). Der Erwartungswert der Residuen ist für jeden Wert der Variable = 0. Die Residuen sind unabhängig vom simulierten Wert.
  - c. **Autokorrelation:** Falls die Residuen geordnet sind (z.B. bei Zeitreihen), dürfen sie nicht voneinander abhängig sein (keine Autokorrelation, z.B. auf grosse Residuen folgen kleine, etc). Da unsere Daten keine natürliche Reihenfolge haben, spielt diese Annahme keine Rolle.
  - d. **Normalverteilung:** Die Residuen sind normalverteilt um den Mittelwert 0.
3. Berechnen der Hilfsvariablen auf Rasterebene: Die Hilfsvariablen werden flächendeckend berechnet. Der zugrundeliegende Raster sollte in etwa die gleiche Auflösung haben, wie die Fläche der Stichprobenkreise. Bei einem Stichprobenkreisradius von 11.3m (400m<sup>2</sup>), sollte der Raster eine Auflösung von 20m x 20m haben.
4. Anwenden des statistischen Modells. Abbildung 21 zeigt das Prinzip. Das statistische Modell wird auf den Rastern mit den Hilfsvariablen angewandt. In diesem Fall handelt es sich um einen Raster mit 75 Prozent Perzentilen (chm\_p75) und der Vegetationsbedeckung auf 2m (chm\_c02). Das Modell mit der Form:  $Vorrat = b_0 + b_1(chm\_p75) + b_2(chm\_c02)$  bzw. logarithmisch transformiert:  $Vorrat = \exp(b_0 + b_1 \ln(chm\_p75) + b_2 \ln(chm\_c02))$  kann nun für jeden Pixel angewandt werden, was schlussendlich die Vorratskarte ergibt.



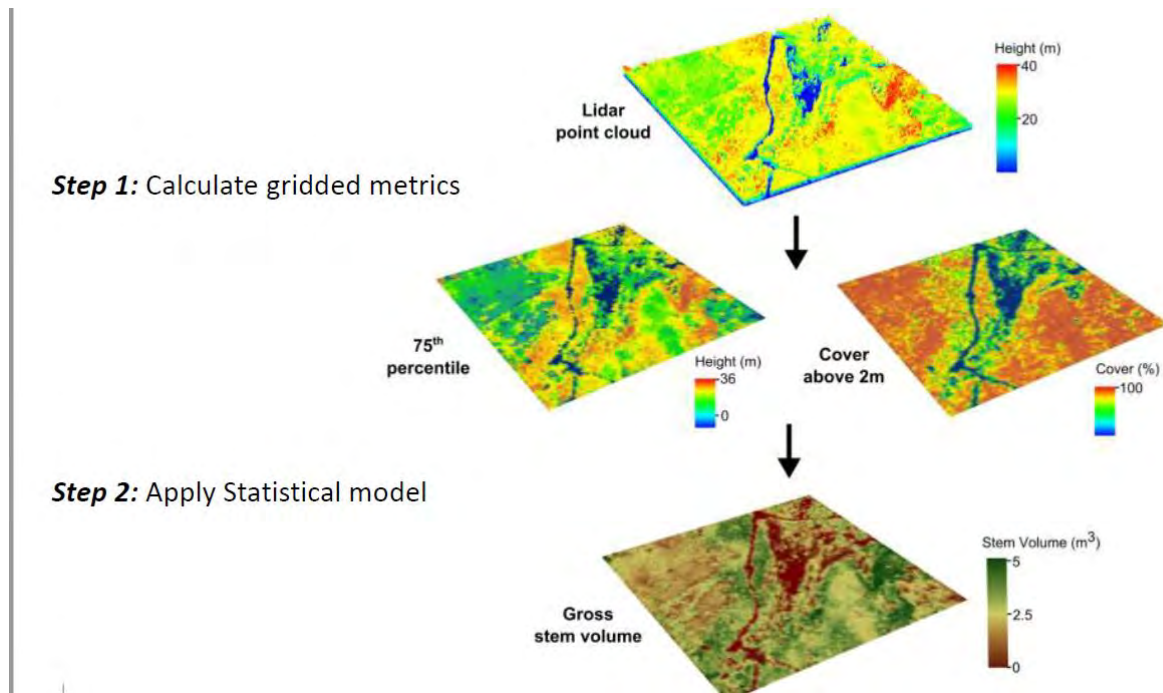


Abbildung 29: Prinzip der Herstellung von (Vorrats-) Karten (nach Bolton 2014)

- Schätzen des Fehlers. Die Berechnung des Standardfehlers einer Voraussage kann für lineare Regressionen folgenderweise angenähert werden (Dettling 2016):

$$se.fit \approx \sqrt{x.^T Cov(\beta)x}, \text{ wobei}$$

$x.^T$  : Voraussage Vektor der neuen Beobachtung,

$Cov(\beta)$ : Varianz - Kovarianz Matrix der Prädiktoren  $\beta$  (Beschreibt die Streuungsstruktur des Regressionmodells)

Für andere Regressionsmethoden finden sich Ansätze zur analytischen Bestimmung des Fehlers in den Publikationen von McRoberts et al. 2017 oder Ene et al. 2018. Eine andere Möglichkeit den Fehler zu bestimmen, besteht darin, eine parametrische Bootstrap-Simulation durchzuführen.

- Der Wert einer Zielgröße für den Bestand entspricht dem Mittelwert der Werte der Rasterzellen, welche in den jeweiligen Bestand zu liegen kommen. Zur Berechnung des Fehlers kann ebenfalls die oben genannte Methode angewandt werden, indem für den Voraussagevektor jeweils der Mittelwert der Hilfsvariablen über den ganzen Bestand verwendet wird.

Wird bei der Modellbildung die Zielgröße transformiert, treten bei der Rücktransformation verzerrte Schätzungen des Mittelwerts („back transformation bias“) auf, welche korrigiert werden müssen. Gregoire et al. (2008) beschreiben den Korrekturfaktor für Wurzeltransformationen und Flewelling und Pienaar (1981) für Logarithmustransformationen.

## 11 Fallbeispiele

Bremgarten und der das Gebiet Glâne-Farzin (Kanton Freiburg) bieten wegen ihrer Datenlage gute Voraussetzungen, um die entwickelten Methoden zu testen. In den Fallbeispielen wurden folgende Punkte untersucht:

- Kann durch die 2-phasige Inventur die Genauigkeit der Schätzung verbessert werden?
- Können bestehende Stichprobennetze ausgedünnt werden und was für Strategien sollten dafür gewählt werden?
- Können auch für Bestände und Kleingebiete brauchbare Schätzungen gemacht werden?
- Für welche Inventurgrößen eignet sich die Kombination von Fernerkundungsdaten und terrestrischen Stichproben?

### 11.1 Eigenschaften der Testgebiete und Rohdaten

#### Bremgarten AG

In Bremgarten (AG) wurde 1971 zum ersten Mal auf einem Netz von 80 x 150m eine Kontrollstichproben-Inventur nach Schmid-Haas durchgeführt. Weitere Aufnahmen erfolgten in den Jahren 1976, 1986 und 1996. Nach derselben Methode wurde 1996 auch Waltenschwil auf demselben Netz inventarisiert. Die für 2006 geplante Aufnahme konnte aus verschiedenen Gründen (interne Gründe an der WSL) nicht durchgeführt werden. Erst 2011 ergab sich die Möglichkeit, diese Aufnahmen in Bremgarten und Waltenschwil zu wiederholen. Die Stichprobenverteilung ist in Abbildung 22 wiedergegeben.

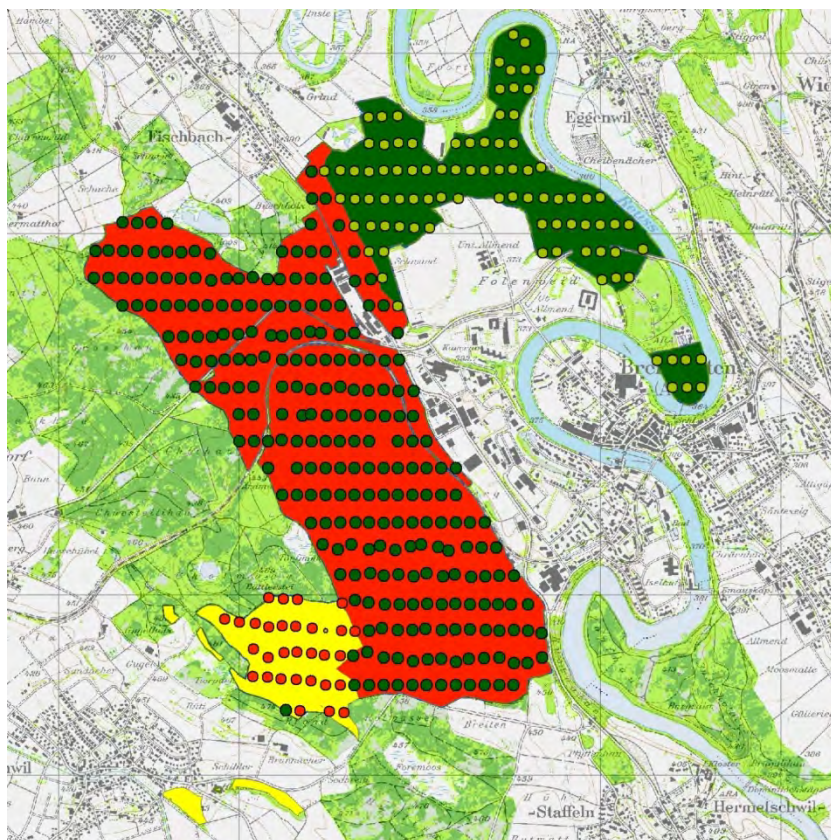


Abbildung 30: Perimeter Bremgarten inklusive Stichproben

Für den Forstbetrieb Bremgarten-Wohlen-Waltenschwil (BWW) ist es wichtig, die Vergleichbarkeit der bisherigen Inventuren mit allenfalls anzuwendenden neuen Methoden sicherzustellen. Dies ist nur möglich, wenn gleichzeitig mit neuen Methoden auch eine KSP-Aufnahme auf dem bisherigen Netz mit denselben Grössen und Parametern aufgenommen wird. Das ist auch deshalb wichtig, weil sich der Wald seit der letzten Aufnahme 1996 durch den Orkan Lothar 1999 und die nachfolgende Käferkalamität, die noch verstärkt wurde durch den Hitzesommer 2003, stark verändert hat. Diese KSP-Aufnahme in den Waldungen von Bremgarten und Waltenschwil wurde im Winter 2011/12 durch das Büro Hasspacher & Iseli durchgeführt. Im Herbst 2011 wurde eine LiDAR-Befliegung der Waldungen des Forstbetriebs durchgeführt, die weitere Informationen zu den Beständen im Forstbetrieb liefert.

Vorhanden für die Erarbeitung einer neuen Lösung für Betriebsinventuren sind also:

- KSP-Aufnahmen aus den Jahren 1971, 1976, 1986, 1996, 2011 vom Wald der OBG Bremgarten
- KSP-Aufnahmen aus den Jahren 1996, 2011 vom Wald der OBG Waltenschwil
- LiDAR-Daten der Befliegung des Forstbetriebs BWW vom September 2011
- Bestandeskarte BKOnline als (nachgeführte) Grundlage der Betriebsplanung für die Waldungen von Bremgarten, Wohlen und Waltenschwil (Stand ~ 2010)
- Bestandesbeschreibungen der ausgeschiedenen Bestände der Waldungen von Bremgarten, Wohlen und Waltenschwil, Stand Ende 2007
- Verdichtete LFI-Stichproben (707 x 707m) des Kantons Aargau aus dem Jahr 2005
- Orthophotos und Stereoluftbilder des Kantons AG und des Bundes aus verschiedenen Jahren

Die Stichprobenaufnahmen vom Winter 2011/12 kosteten (ohne Auswertung) rund CHF 100'000.-, waren also sehr teuer für einen Betrieb mittlerer Grösse. Weitere Eigenschaften der Stichproben sind in Tabelle 15 gegeben. Es wurden 363 Stichproben aufgenommen. Für die 2-phasige Auswertung wird das Stichprobennetz auf einem 20m x 20m Netz mit 11'810 Plots verdichtet. Abbildung 23 zeigt einen Ausschnitt in Bremgarten mit terrestrischen und verdichteten Stichproben.

**Tabelle 37: Vergleich der Testgebiete**

	<b>Bremgarten</b>	<b>Freiburg „Glâne-Farzin“</b>
Anzahl terrestrische Stichproben	363	137
Stichprobennetz theoretisch	80m x 150m	400m x 400m
Präzise Vermessung der Stichprobenmittelpunkte	ja	nein
Aufnahmemethode	400m <sup>2</sup> Kreise, Kluppschwelle: 12cm	2 Konzentrische Kreise: [I] 200m <sup>2</sup> Kreis mit Kluppschwelle 12cm [II] 500m <sup>2</sup> Kreis mit Kluppschwelle 36cm
Zeitpunkt der Aufnahme der Stichproben	Herbst 2011 – Winter 2011/12	Herbst 2016
Zeitpunkt des LiDAR Flug	9.11.2011	07.10.2016 bis 12.02.2017, grösstenteils laubfreier Zustand, jedoch beides vorhanden.
Verdichtung für 2-phasige	20m x 20m, 11810 Plots	25m x 25m, 37870 Plots



Auswertung		
Punktdichte der LiDAR Rohdaten	$\geq 8 \text{ Punkte / m}^2$	$\geq 5 \text{ Punkt / m}^2$



Abbildung 31: Ausschnitt aus Bremgarten mit terrestrischen Stichproben (dunkelgrüne Kreise) und verdichteten Stichproben (hellgrüne Kreise)

### Freiburg

In Freiburg wurde seit mehr als 20 Jahren keine Inventur mehr durchgeführt. Ende 2016 wurde wieder eine Inventur mit 137 Stichproben im Gebiet „Glâne-Farzin“ durchgeführt. Im Vergleich zu Bremgarten sind die Wälder hier homogener. Abbildung 24 zeigt die untersuchten Waldung mit den Stichproben. Das Stichprobennetz ist ein Gitter mit 400m x 400m Abstand. Die Stichprobenmittelpunkte wurde nicht mit DGPS georeferenziert. Weitere Eigenschaften der Stichproben sind in Tabelle 15 aufgeführt.

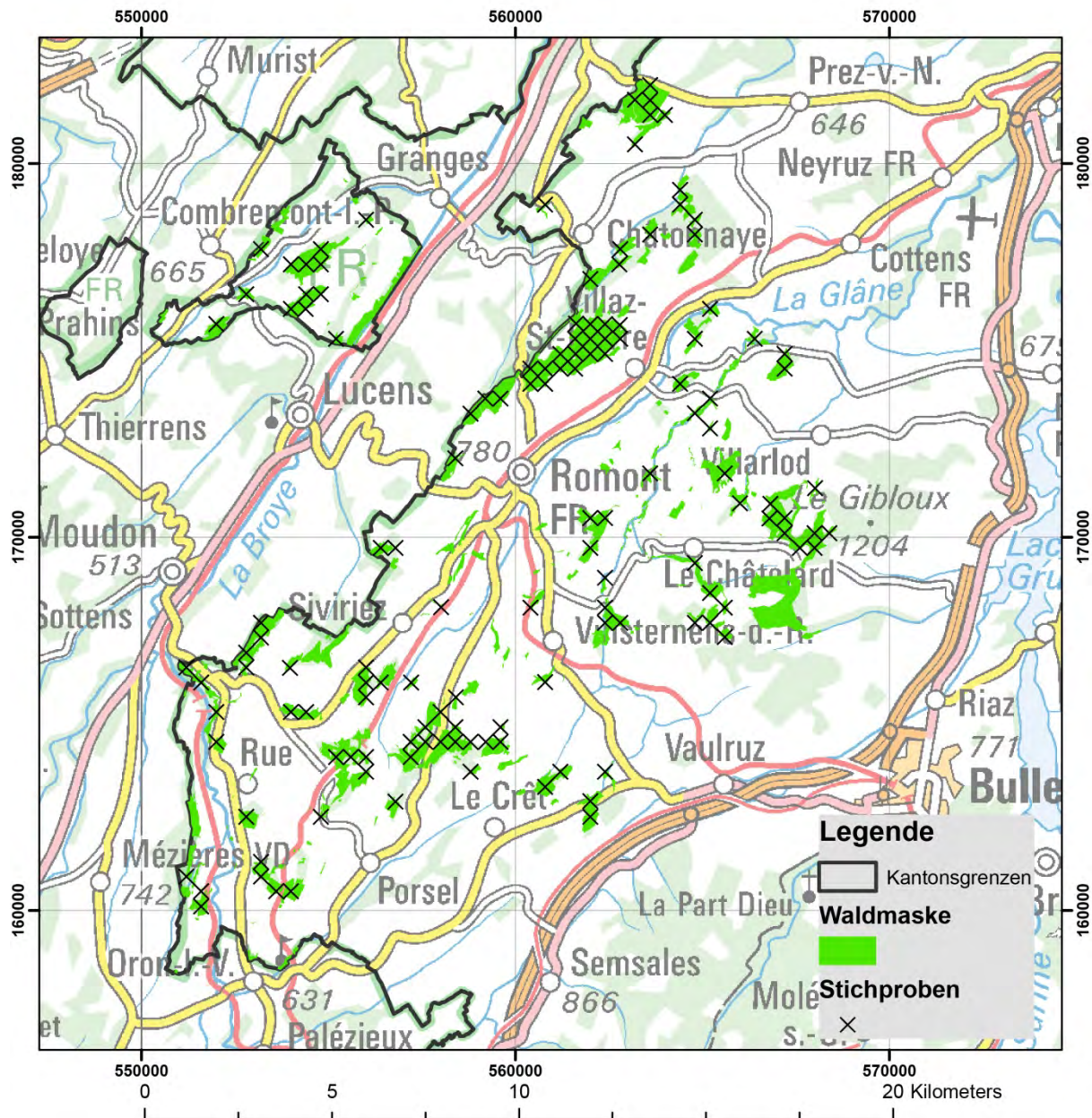


Abbildung 32: Perimeter Freiburg (Glâne-Farzin) inklusive Stichproben

Die Befliegung wurde im Herbst 2016 durchgeführt und es konnte erst verspätet mit den Flügen begonnen werden. Damit wurden die Probleme durch den niederen Sonnenstand und die in der Region verbreiteten Herbstnebel verschärft. Ein Teil der Linien konnte aufgrund der im Herbst 2016 vorherrschenden Nebelverhältnisse nicht mehr geflogen werden. Dies wurde im Februar 2017 nachgeholt. Abbildung 25 und Abbildung 26 geben einen Überblick über die Flugtage und Missionen. Ansonsten konnten grösstenteils schneefreie Aufnahmen realisiert werden. Mehrheitlich lagen laubfreie Bedingungen vor. Neben den LiDAR-Daten und den terrestrischen Stichprobenaufnahmen ist ebenfalls eine aktuelle Bestandskarte verfügbar.



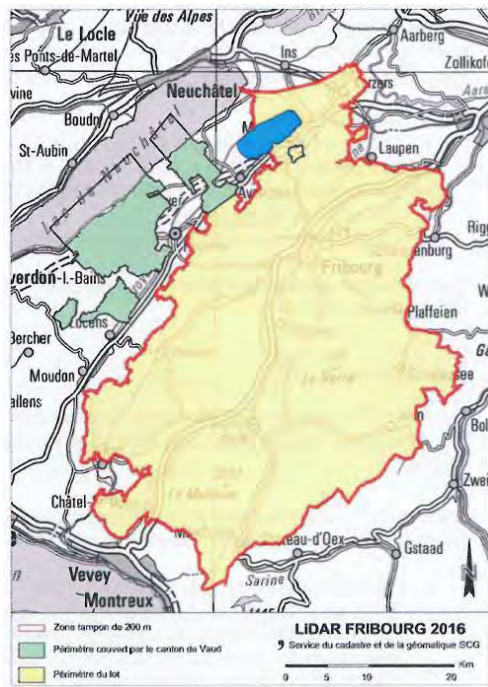


Abbildung 33: Perimeter LiDAR Befliegung Kanton Freiburg (Quelle: Technischer Bericht LiDAR Flug)

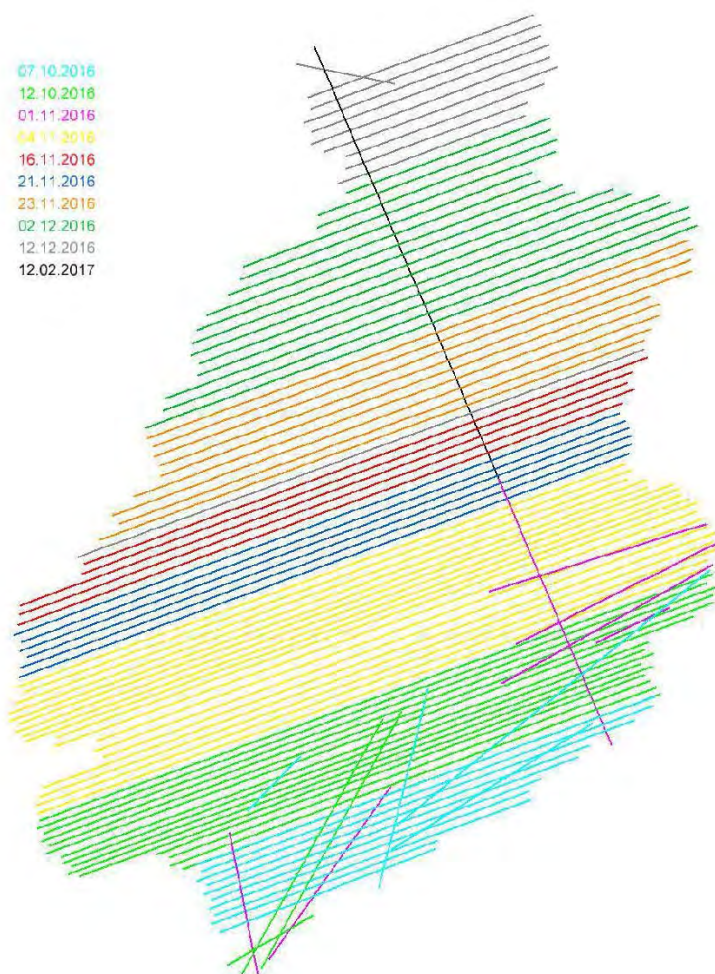


Abbildung 34: Übersicht Flugtage und Missionen (Kanton Freiburg) (Quelle: Technischer Bericht LiDAR Flug)

## Vorratsschätzung

Die Vorräte der einzelnen Bäume wurde mit einem Tarif aus dem BHD abgeleitet. Es handelt sich dabei um Tarife des Forstbetriebs BWW und des Kantons Freiburg. Es ist zu beachten, dass der Tarif auch noch eine potentielle Fehlerquelle ist, auf welche hier aber nicht eingegangen werden kann.

## Laubholz / Nadelholz Unterscheidung

Sowohl für Freiburg als auch für Bremgarten stand eine Karte zur Verfügung, welche Nadelholz von Laubholz unterscheidet (Waser et al. 2017). Diese wurde für das LFI produziert, steht für die ganze Schweiz zur Verfügung und hat eine Auflösung von 3m x 3m. Die Methodik basiert auf der Klassifikation von über 1700 4-Kanal Luftbildstreifen; durch einen welche anhand eines ausreichend grossen Datensatz wird die Auswertesoftware darauf trainiert, die Unterscheidung vorzunehmen. Es wurden verschiedene Klassifikationsverfahren (u.a. Random Forest) angewandt, welche für ausgewählte Gebiete in der Schweiz bezüglich Genauigkeit, Rechenzeit und Anzahl notwendiger Trainingsdaten getestet wurden. Der Trainingsdatensatz besteht aus gut 185'000 Laub- und Nadel-Baumkronengruppen, die systematisch über die ganze Landesfläche verteilt, manuell aus den Luftbildern am Bildschirm digitalisiert wurden.

Die erzielte Gesamtgenauigkeit von knapp 99% für die landesweite Klassifikation von Laub- und Nadelhölzern ist sehr hoch und schwankt zwischen 85 und 99.9% zwischen den 220 einzeln klassierten Kartenblättern. Ein Vergleich der Laubanteile zwischen der LFI Laub- / Nadelbaumkarte der Schweiz und den unabhängigen Referenzdaten aus den 3370 LFI-Luftbildinterpretationsflächen (50 x 50 m Quadrate) zeigt eine leichte Unterschätzung der Laubgehölze (-3.1%). Diese Unterschätzung ist am Alpennordhang und im Tessin in laubholzdominierten Mischbeständen ausgeprägter als im Mittelland und in nadelholzdominierten Beständen. Sie ist hauptsächlich auf reliefbedingte, beleuchtungsspezifische und phänologische Einflüsse in den ADS-Luftbildern, sowie auf die Zeitdifferenz zwischen den Bildern der Luftbildinterpretation und der Klassifikation zurückzuführen. (Waser et al. 2017)

## 11.2 Verwendete Modelle

Die verwendeten Modelle basieren auf CHM Hilfsvariablen. Dies aus folgenden Gründen. Erstens sind Vegetationshöhenmodelle weit verbreitet und wohl für jeden Wald in der Schweiz verfügbar und zweitens ist das Ausscheiden von Hilfsvariablen aus dem CHM einfacher als aus LiDAR-Rohdaten. Die Tatsache, dass Hilfsvariablen aus CHMs leicht schlechter abschneiden, als direkt aus LiDAR-Rohdaten abgeleitete Hilfsvariablen, benutzen wir dazu, eine konservative Schätzung des Nutzens der vorgestellten Methode zu zeigen. Damit können wir davon ausgehen, dass wir in anderen Fällen auch mindestens gleich gute Schätzungen erhalten.

Die Modelle sind in Tabelle 16 aufgelistet und zwar in der Form  $(Zielvariable) \sim Prädiktor1 + Prädiktor2 + \dots$ , zum Teil weisen die Prädiktoren eine Transformation auf ( $\arcsin()$ ,  $\sqrt{}$  oder  $\log()$ ). Der Übersichtlichkeit halber wurde hier für die Illustration der Modellgüte nur das Attribut „angepasstes  $R^2$  (Adj. $R^2$ )“ angegeben. Die Hilfsvariable „share\_confier“ (Nadelholzanteil) wurde folgenderweise berechnet:

$$share\_confier = \frac{chm\_sum\_of\_squares\_nadel}{chm\_sum\_of\_squares}$$

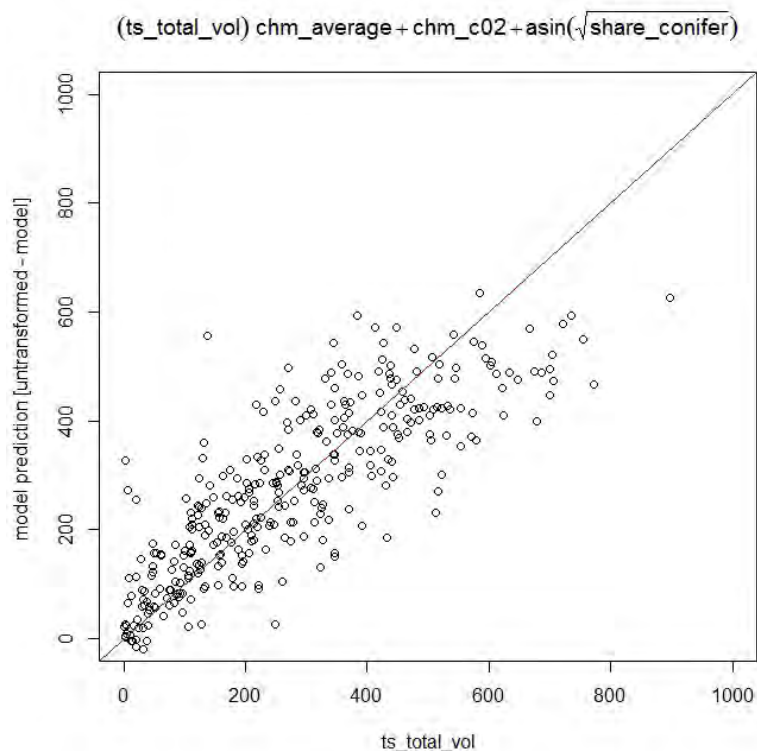
Für die Schätzung der Stammzahl wurde in Bremgarten auf LiDAR – Hilfsvariablen zurückgegriffen (# BS2), da mit dem Modell, welches nur CHM-Hilfsvariablen verwendet eine deutlich schlechtere Güte

(Adj. R<sup>2</sup> von 0.43 vs. 0.51) erreicht wurde (# BS1). In Bremgarten unterscheidet sich das Modell für die Vorratsschätzung, welches in der 2-phasigen Stichprobe verwendet wurde, von demjenigen, welches für die Berechnung der Karte verwendet wird. Abbildung 27 zeigt Modellwerte verglichen mit den Werten der terrestrischen Stichproben für das Modell BV1. Es ist deutlich zu erkennen, dass das Modell Stichproben mit grossen Stehendvolumen systematisch unterschätzt. Beim Modell BV2 wurde eine Logarithmus Transformation eingeführt, dadurch konnte der systematische Fehler für Stichproben mit grossen Volumen eliminiert werden (Abbildung 28). Das Modell BV1 kann für die 2-phasige Schätzung verwendet werden, da systematische Fehler im Modell durch die „Residuenkorrektur“ ausgeglichen werden und deshalb weniger strenge Anforderungen an die Modellierung gelten. Die Berechnung der Vorratskarte hingegen erfolgt modellbasiert, eine „Residuenkorrektur“ findet nicht statt. Deswegen muss darauf geachtet werden, dass das Modell möglichst gut stimmt. Eine einfache Möglichkeit dies zu erreichen, ist eine Logarithmus-Transformation der Zielvariablen (Modell BV2). Da das R-package forestinventory die Möglichkeit der Transformation der Zielvariable nicht bietet, konnte das Modell BV2 nicht für die 2-phasige Schätzung verwendet werden.

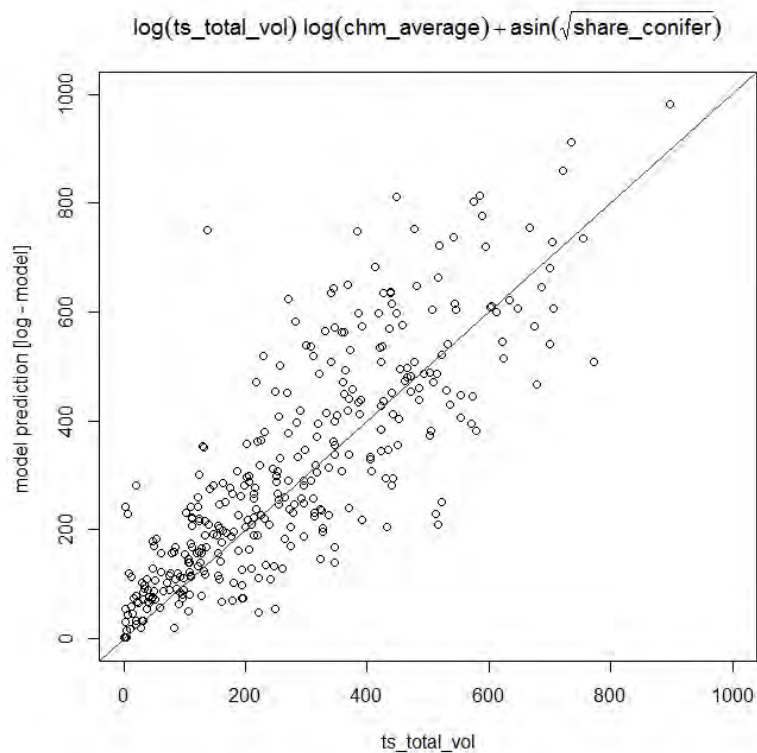
**Tabelle 38: Verwendete Modelle für die Testgebiete**

Modell #	Perimeter	Zielgrösse	Art	Modell – Parameter [R-Code]	Adj.R <sup>2</sup>
BV1	Bremgarten	Vorrat	2PE (2-phasige Sch.)	(ts_total_vol) ~ chm_average + chm_c02 + asin(sqrt(share_conifer))	0.687
BG	Bremgarten	Grundfläche	2PE	(ts_basalareaha) ~ chm_average + asin(sqrt(share_conifer))	0.655
BS1	Bremgarten	Stammzahl	2PE	(ts_stammzahl) ~ asin(sqrt(share_conifer)) + chm_stddev + asin(sqrt(chm_c10))	0.43
BS2	Bremgarten	Stammzahl	2PE	(ts_stammzahl) ~ asin(sqrt(share_conifer)) + chm_p99 + las_normalized_relative_strata_density_10_15_m + las_normalized_relative_strata_density_15_20_m	0.51
FV1	Fribourg	Vorrat	2PE	ts_total_vol ~ chm_average	0.698
FV2	Fribourg	Vorrat	2PE	(ts_total_vol) ~ (chm_average) + asin(sqrt(share_conifer)) + I(asin(sqrt(share_conifer))^2)	0.744
FG	Fribourg	Grundfläche	2PE	(ts_basalareaha) ~ (chm_average) + asin_sqrt_share_conifer + I(asin(sqrt(share_conifer))^2)	0.702
FS	Fribourg	Stammzahl	2PE	(ts_stammzahl) ~ chm_c05 + chm_stddev	0.48
BV2	Bremgarten	Vorrat	Karte	log(ts_total_vol) ~ log(chm_average) + asin(sqrt(share_conifer))	0.663
FV1	Fribourg	Vorrat	Karte	ts_total_vol ~ chm_average	0.698





**Abbildung 35: Modellwerte verglichen mit den Werten der terrestrischen Stichproben für das Modell BV1 (Vorratsschätzung, Einheiten in [m<sup>3</sup>/ha]). Es ist deutlich zu erkennen, dass das Modell Stichproben mit grossen Volumen systematisch unterschätzt (verzerrt bzw. biased).**



**Abbildung 36: Modellwerte verglichen mit den Werten der terrestrischen Stichproben für das Modell BV2 (Vorratsschätzung, Einheiten in [m<sup>3</sup>/ha]). Dank der Logarithmus Transformation, werden Stichproben mit grossen Volumen nicht mehr systematisch unterschätzt (unverzerrt bzw. unbiased).**

### 11.3 2-Phasige Schätzung

Wir werden in diesem Bericht nicht alle Zielgrößen besprechen, sondern uns vor allem auf die Zielgröße Vorrat beschränken. Da für die Grundfläche ähnlich gute Modellgüten wie für den Vorrat erreicht wurden, kann für die Grundfläche mit einer ähnlichen Effizienz der 2-phasigen Stichprobe gerechnet werden.

#### Globale Schätzung

Tabelle 17 zeigt die globale Vorratsschätzung für Bremgarten und Freiburg. In Bremgarten konnte der Standardfehler von 3.89 auf 2.6% reduziert werden, in Freiburg von 5.01% auf 2.6%.

**Tabelle 39: Globale Vorratsschätzung für die Testgebiete Bremgarten und Freiburg**

		<b>Bremgarten</b>		<b>Freiburg</b>	
		1-phasig	2-phasig	1-phasig	2-phasig
<b>Schätzung</b>	[m <sup>3</sup> /ha]	261	269	521	506.7
<b>95% Vertrauensintervall</b>	[m <sup>3</sup> /ha]	241 - 281	255 - 282	470 - 573	480 - 533.6
<b>Standardfehler [%]</b>	[%]	3.89	2.6	5.01	2.6

#### Kleingebietsschätzungen

In Freiburg wurden keine Kleingebiete definiert. Die Auswertung und Diskussion erfolgt daher lediglich für Bremgarten. Die Kleingebiete sind in Abbildung 29 dargestellt. Es wurden die Zielgrößen Vorrat und Stammzahl ausgewertet. Die Schätzungen des Mittelwertes liegen zum Teil ein wenig auseinander. Für den Vorrat wurde für Kleingebiet 1 bei der einphasigen Schätzung 368 m<sup>3</sup>/ha, bei der zweiphasigen Schätzung 404 m<sup>3</sup>/ha geschätzt (Tabelle 18). Die Vertrauensintervalle sind bei allen zweiphasigen Schätzungen deutlich kleiner, ebenso die damit verbundenen Standardfehler. Der Effizienzgewinn ist in Tabelle 19 abgebildet. Die Spalte „rel. eff“ (relative Effizienz) beschreibt, um welchen Faktor die Stichprobenzahl erhöht werden müsste um mit der einphasigen Methode die gleiche Genauigkeit (Standardfehler) zu erhalten wie bei der zweiphasigen Methode. Die relative Effizienz variiert zwischen 1.8 und 2.41. Analoge Aussagen können für die Schätzung der Stammzahl gemacht werden (Tabelle 20 und Tabelle 21). Hier beträgt die relative Effizienz 1.7 bis 2.7.

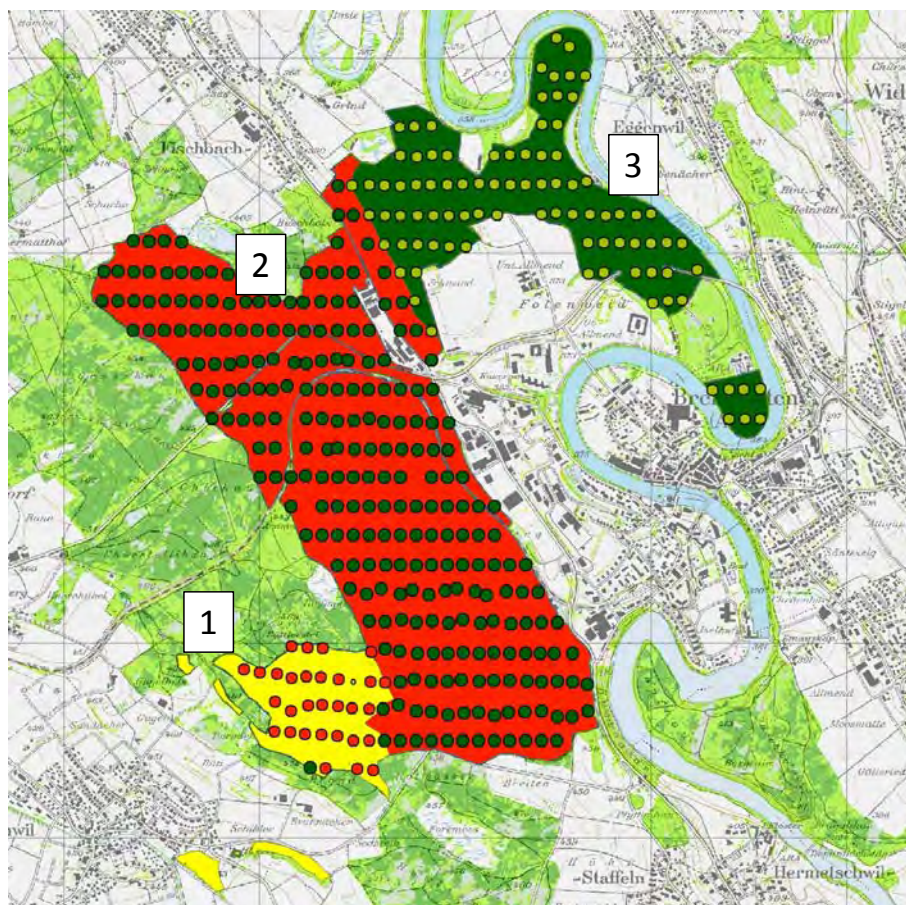


Abbildung 37: Kleingebiete in Bremsgarten, inkl. terrestrische Stichproben.

Tabelle 40: Ergebnisse der Kleingebietsschätzung für die Zielgrösse Vorrat in Bremsgarten

Klein- gebiet	Domäne	Methode	Schätzer	Schätzung	Standard- fehler[%]	95% Vertrauensintervall (untere & obere Grenze)	
1	global	onephase	onephase	368.0	12.9	270.5	465.5
1	smallarea	twophase	psynth extended	404.3	8.8	331.1	477.4
2	global	onephase	onephase	279.8	4.4	255.8	303.9
2	smallarea	twophase	psynth extended	287.5	3.0	270.5	304.4
3	global	onephase	onephase	175.2	8.7	144.8	205.5
3	smallarea	twophase	psynth extended	168.6	5.8	149.1	188.1

Tabelle 41: Effizienzgewinn der 2-phasigen Auswertung gegenüber der 1-phasigen Auswertung für die Vorratsschätzung

Klein- gebiet	Varianz einphasig	Varianz zweiphasig	Methode	Schätzer	Relative Effizienz
1	2250.9	1265.8	twophase	psynth extended	1.78
2	148.7	74.1	twophase	psynth extended	2.01
3	232.7	96.7	twophase	psynth extended	2.41

Tabelle 42: Ergebnisse der Kleingebietsschätzung für die Zielgrösse Stammzahl in Bremgarten

Klein- gebiet	Domäne	Methode	Schätzer	Schätzung	Standard- fehler[%]	n2	r.squared	95% Vertrauens- intervall (untere & obere Grenze)	
1	global	onephase	onephase psynth	353	14.1	27	#NV	251	455
1	smallarea	twophase	extended	346	8.7	363	0.4945	284	407
2	global	onephase	onephase psynth	374	4.6	248	#NV	340	407
2	smallarea	twophase	extended	384	3.1	363	0.5056	361	407
3	global	onephase	onephase psynth	332	9.2	88	#NV	272	393
3	smallarea	twophase	extended	309	7.6	363	0.5087	262	356

Tabelle 43: Effizienzgewinn der 2-phasigen Auswertung gegenüber der 1-phasigen Auswertung für die Stammzahlschätzung

Klein- gebiet	Varianz einphasig	Varianz zweiphasig	Methode	Schätzer	Relative Effizienz
1	2467	900	twophase	psynth extended	2.7
2	293	140	twophase	psynth extended	2.1
3	937	553	twophase	psynth extended	1.7

### Reduktion der Anzahl Stichproben

Wie gezeigt wurde, kann mit der gleichen Anzahl an Stichproben mit der 2-phasigen Auswertung eine deutliche höhere Genauigkeit erreicht werden. Nun interessiert die Frage, inwieweit man Stichproben weglassen kann, um noch aussagekräftige Auswertungen machen zu können.

#### Systematische Ausdünnung

Um dies zu testen, wurde zuerst eine systematische Ausdünnung gemacht, in der ca. [I] die Hälfte (Szenario 2 und 3) und [II]  $\frac{3}{4}$  der Stichproben (Szenario 4 bis 7) weggelassen wurden. Wie sich Szenarien 2 und 3 bzw. 4 bis unterscheiden ist in Abbildung 30 und Abbildung 31 für Bremgarten skizziert, eine analoge Ausdünnung wurde für Freiburg vorgenommen.



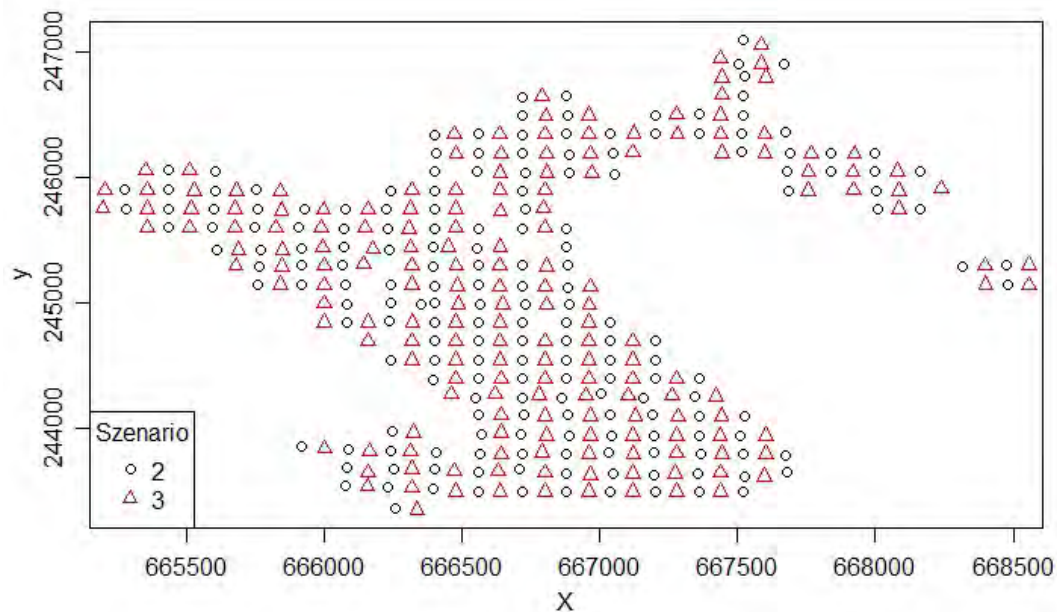


Abbildung 38: Szenarien mit einer systematischen Ausdünnung der Stichproben für Bremgarten. In den Szenarien 2 und 3 wird ca. die Hälfte der Stichproben weggelassen.

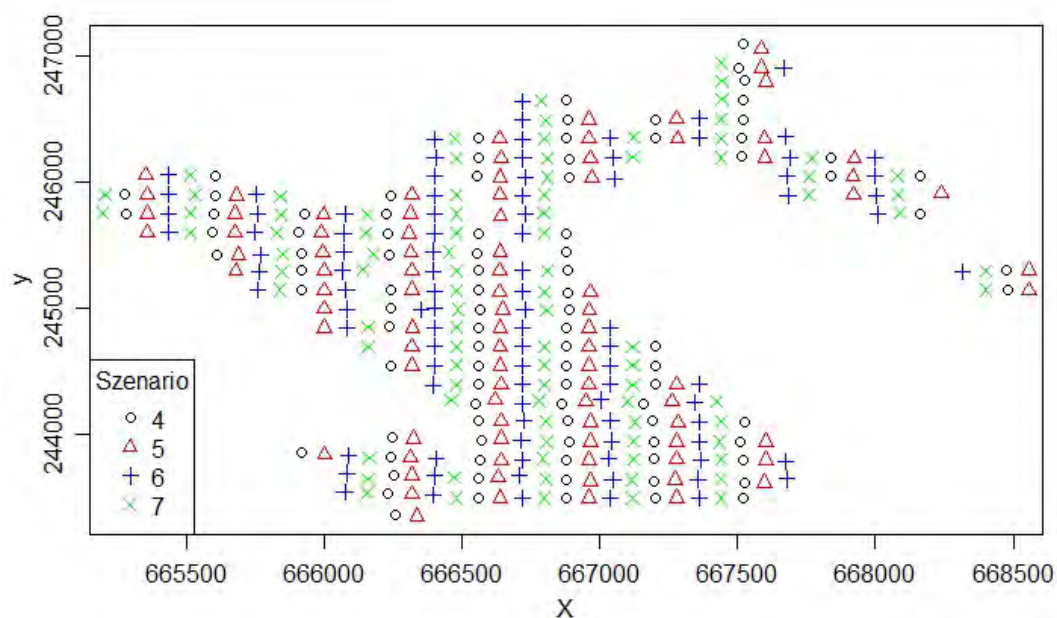


Abbildung 39: Szenarien mit einer systematischen Ausdünnung der Stichproben für Bremgarten. In den Szenarien 4 bis 7 werden ca.  $\frac{1}{3}$  der Stichproben weggelassen.

Nach erfolgter Ausdünnung der Stichproben wurde die Schätzung und das Vertrauensintervall (2 phasig) für die verschiedenen ausgedünnten Szenarien berechnet (Szenarien 2 bis 7). Szenario 1 enthält alle Stichproben und wurde ebenfalls 2-phasig berechnet. Szenario 8 enthält ebenfalls alle Stichproben, wurde aber nur 1-phasig berechnet, d.h. ohne die Hilfsinformationen aus den

Fernerkundungsdaten. Die Resultate sind graphisch in Abbildung 32 (für Freiburg) und Abbildung 33 (für Bremgarten), sowie in Tabelle 22 wiedergegeben. Es kann folgendes festgehalten werden:

Mit der 2 phasigen Auswertung wurde mit der Hälfte der Stichproben in allen Fällen kleinere Fehler erzielt als mit allen Stichproben und 1-phasiger Auswertung. Lässt man  $\frac{3}{4}$  der Stichproben weg, sind die Fehler in den meisten Fällen leicht grösser als mit der einphasigen Auswertung der gesamten Stichproben.

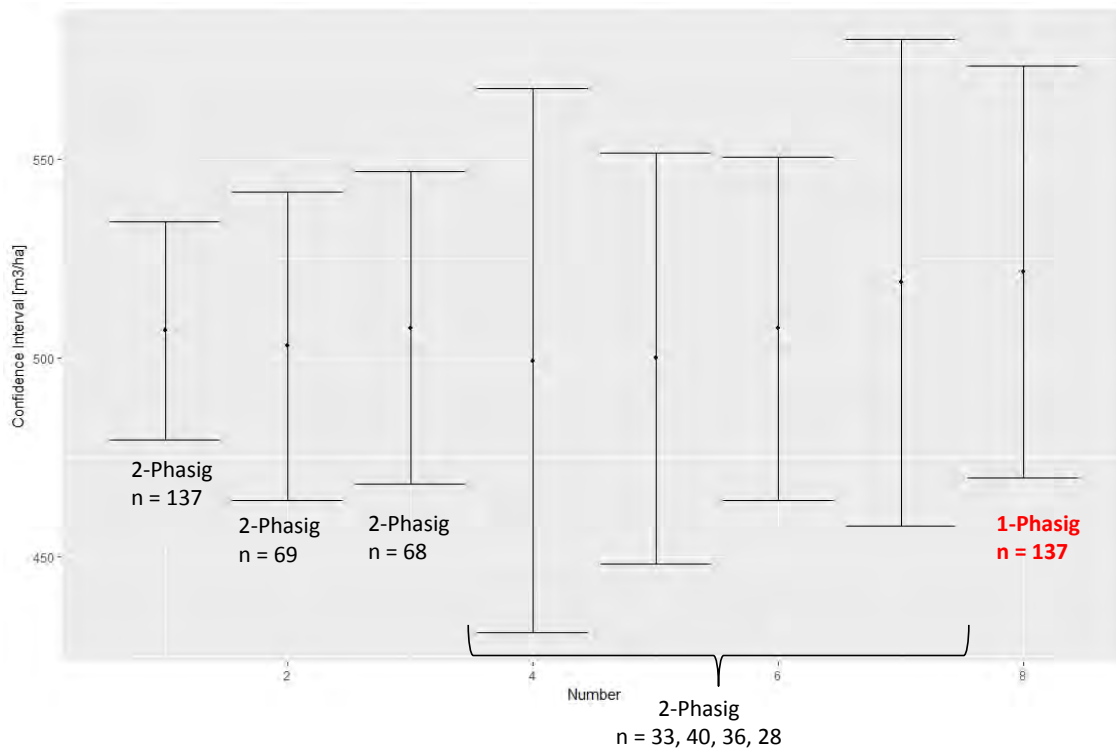


Abbildung 40: Schätzwerte und Vertrauensintervalle für die verschiedenen Szenarien der Ausdünnung der Stichproben für Freiburg (n = Anzahl Stichproben)

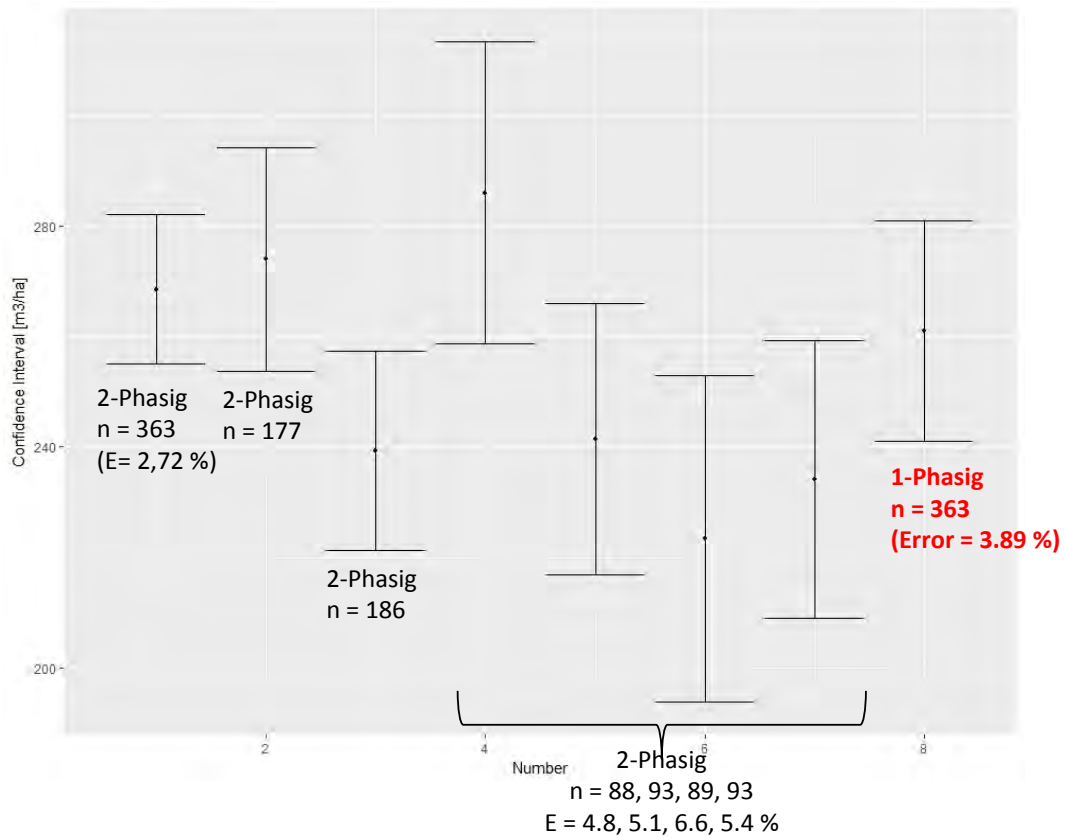


Abbildung 41: Schätzwerte und Vertrauensintervalle für die verschiedene Szenarien der Ausdünnung der Stichproben für Bremsgarten (n = Anzahl Stichproben, E = Standardfehler)

**Tabelle 44: Schätzwerte und Vertrauensintervalle für die verschiedenen Szenarien der Ausdünnung der Stichproben für Bremgarten und Freiburg**

Freiburg					
	Schätzung [m3 / ha]	Obere Grenze 95% Vertrauens- intervall	Untere Grenze 95% Vertrauens- intervall	Standard- fehler [%]	Anzahl Stich- proben
1	506.8	479.4	534.1	2.8	137
2	502.9	464.1	541.7	3.9	69
3	507.5	468.2	546.8	3.9	68
4	499.3	430.8	567.7	7.0	33
5	499.8	448.3	551.3	5.3	40
6	507.3	464.2	550.3	4.3	36
7	518.9	457.7	580.1	6.0	28
8	521.7	469.9	573.4	5.1	137
(einphasige Stichprobe)					
Bremgarten					
1	268.5	255.0	282.1	2.6	363
2	274.0	253.8	294.1	3.8	177
3	239.2	221.2	257.3	3.8	186
4	286.0	258.6	313.4	4.9	88
5	241.5	216.9	266.0	5.2	93
6	223.4	193.8	252.9	6.7	89
7	234.1	208.9	259.3	5.5	93
8	261.0	241.1	281.0	3.9	363
(einphasige Stichprobe)					

### Zufällige Ausdünnung der Stichproben

Neben dem systematischen Weglassen von Stichproben wurde auch untersucht, welche Ergebnisse mit einer zufälligen Entnahme von Stichproben erzielt werden können. Als einzige Nebenbedingung wurde darauf geachtet, dass die Anzahl der Stichproben in den einzelnen Entwicklungsstufen proportional zu den Flächenanteilen der Entwicklungsstufen ist. Die Entwicklungsstufen wurden aus den Bestandskarten herausgelesen.

Es wurden Simulationen mit Szenarien von 25%-, 50%- und 75%-Entnahmen der Stichproben, mit je 1000 zufälligen Durchgängen pro Szenario, gerechnet. Ein Beispiel mit 75%-Entnahme der Stichproben ist in Abbildung 34 dargestellt.

Abbildung 34 zeigt die Ergebnisse von 100 Simulationen (Schätzung und Vertrauensintervall) für eine zufällige 75%-Entnahme der Stichproben für Freiburg. Die Schätzungen streuen wenig und sind robust um den Mittelwert der einphasigen Schätzung verteilt. Das gleiche wird in Abbildung 35 für Bremgarten gezeigt. Hier sieht man jedoch eine grössere Streuung der Vorratsschätzung und etliche Schätzwerte befinden sich ausserhalb des Vertrauensintervall. Dies kann damit erklärt werden, dass die Wälder im Gebiet Glâne-Farzin homogener sind als in Bremgarten.



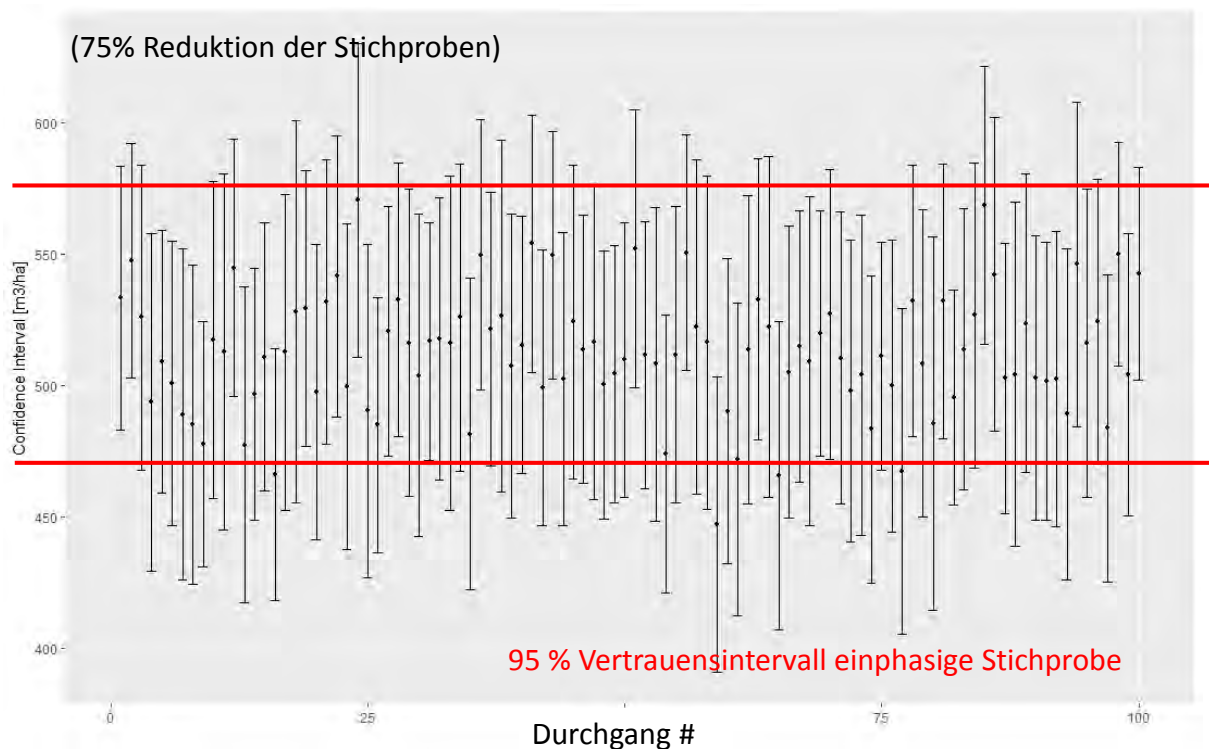


Abbildung 42: Darstellung der Schätzwerte und des Vertrauensintervalls für das Szenario 75% Reduktion der Stichproben in Freiburg. In roter Farbe ist zum Vergleich das Vertrauensintervall der einphasigen Schätzung mit allen Stichproben eingezeichnet. Es sind nur die ersten 100 Durchgänge (von 1000) eingezeichnet.

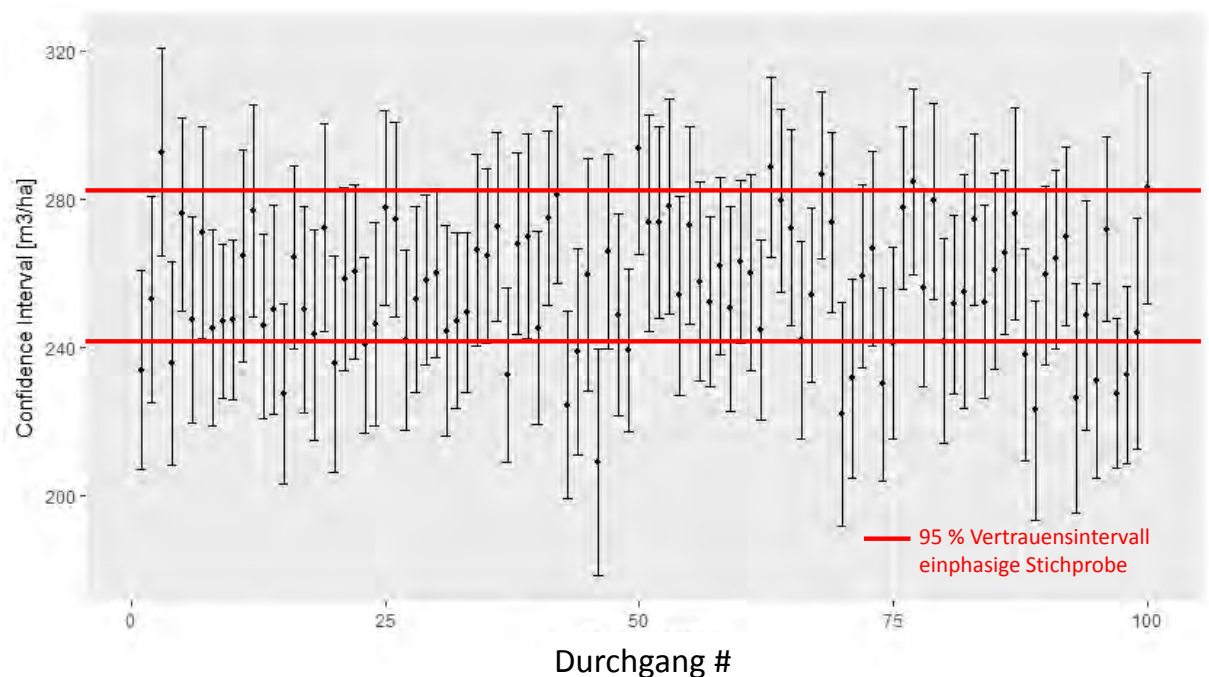


Abbildung 43: Darstellung der Schätzwerte und des Vertrauensintervalls für das Szenario 75% Reduktion der Stichproben in Bremgarten. In roter Farbe ist zum Vergleich das Vertrauensintervall der einphasigen Schätzung mit allen Stichproben eingezeichnet. Es sind nur die ersten 100 Durchgänge (von 1000) eingezeichnet.

Abbildung 36 und Abbildung 37 zeigen das Ergebnis der vollständigen Simulation mit 1000 Durchgängen für Bremgarten. Die Verteilung der Standardfehler der zufälligen Entnahme entspricht in etwa derjenigen der systematischen Entnahme (Abbildung 36). Auch die Vorratsschätzungen

zeigen bei den Simulationen (Abbildung 37) in etwa die gleiche Streuung wie bei den systematischen Entnahmen (vgl. dazu Abbildung 33).

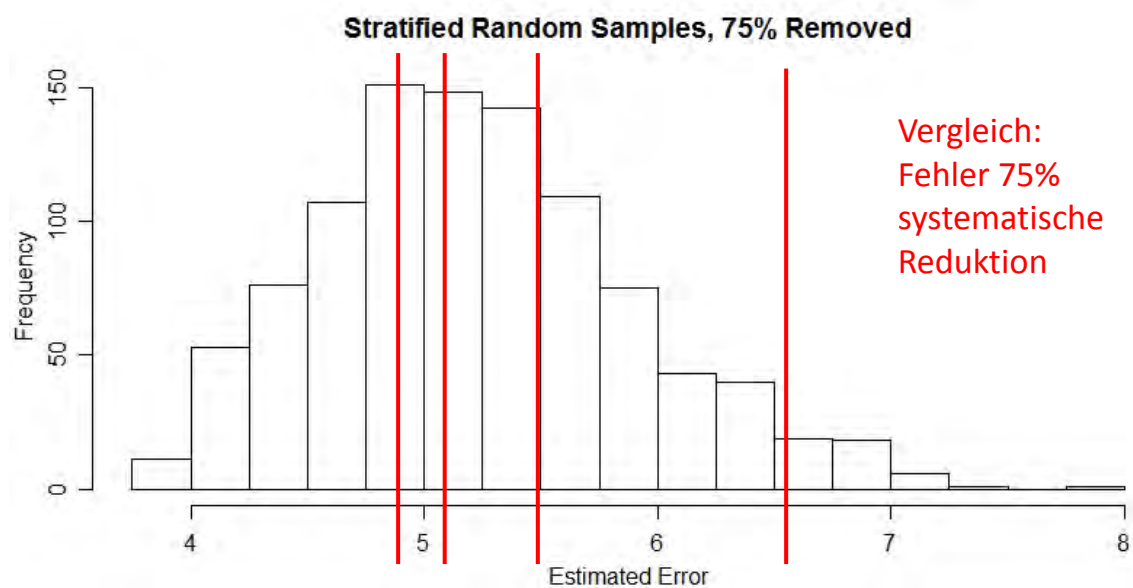


Abbildung 44: Verteilung der Standardfehler [%] bei zufälliger 75% Reduktion der Stichproben (Resultat aus 1000 Simulationen) und Vergleich mit den Standardfehlern bei 75% systematischer Reduktion der Stichproben (rote Linien) für Bremgarten.

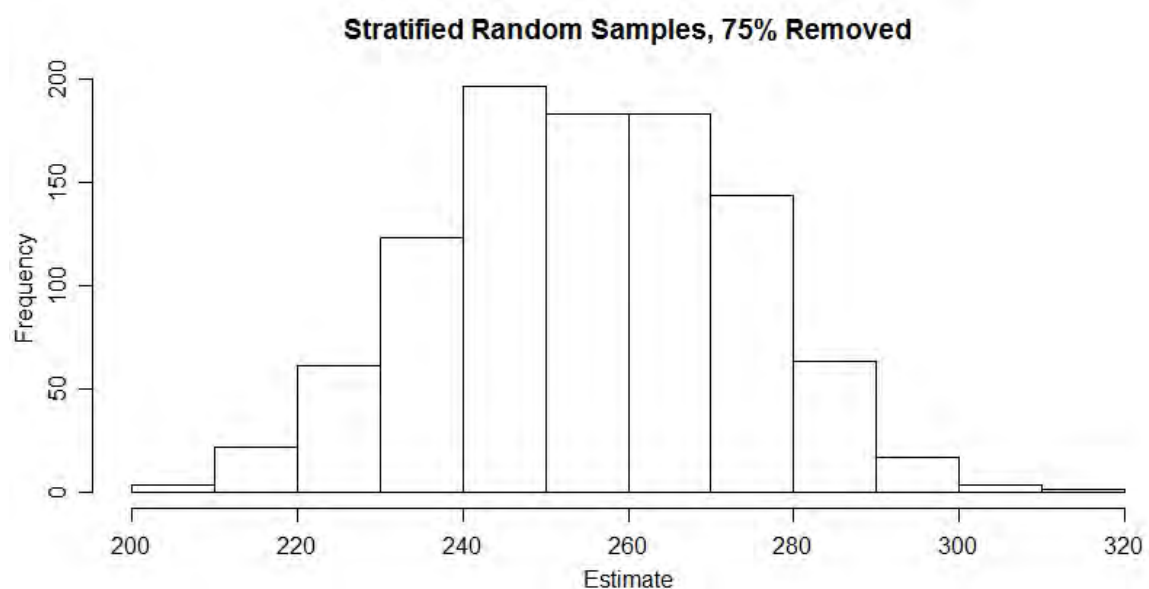


Abbildung 45: Verteilung der Vorratsschätzungen [m3/ha] bei zufälliger 75% Reduktion der Stichproben. Resultat aus 1000 Simulationen für Bremgarten.

Bezüglich Reduktion der Anzahl Stichproben können wir aufgrund der Beispiele folgende Aussagen machen:

- Die Anzahl der benötigten Stichproben hängt von der geforderten Genauigkeit ab. Die Genauigkeit kann als maximaler zulässiger Standardfehler vorgegeben werden und er kann je nach Entwicklungsstufe und Baumartenzusammensetzung unterschiedlich sein.
- Bei gleichbleibenden Anforderungen an die Genauigkeit kann bei einem homogenen Wald wie in Glâne-Farzin (FR) mit nur 25% der Stichproben und einem 2-phasigen Verfahren in etwa die gleiche Genauigkeit erzielt werden wie mit der 1-phasigen Auswertung, in heterogeneren und strukturreicheren Wäldern wie in Bremgarten sind dazu jedoch etwa 50% der Stichproben nötig.
- Die simulierten Fehler einer zufälligen Reduktion der Stichproben sowie die Schätzer sind in etwa vergleichbar mit denen aus der systematischen Reduktion. Aufgrund der regelmässigeren Verteilung der Stichproben über die gesamte Waldfläche mit systematisch ausgedünnten Stichproben, sollten die systematische Reduktion in der Praxis bevorzugt werden.

### 11.4 Karten und Bestandesschätzungen

Für die Testgebiete wurden ebenfalls Vorratskarten gerechnet. Abbildung 38 zeigt einen Ausschnitt aus der Vorratskarte für Glâne-Farzin. Die Auflösung beträgt 20m x 20m was ungefähr der Fläche der Stichprobenkreise entspricht.

Abbildung 39 zeigt eine modellbasierte Vorratsschätzung für die Bestände in Bremgarten.

Modellbasiert heisst hier, dass die Schätzung nur aufgrund des Modells erfolgt, welches mithilfe der Stichproben und Fernerkundungsdaten hergeleitet wurde (man verlässt sich also nur aufs Modell). Abbildung 40 gibt zusätzlich noch den Standardfehler für jeden Bestand an. Dieser gilt unter der Annahme, dass das zugrundeliegende Modell unverzerrt (unbiased) ist. Tabelle 23 zeigt den Einfluss der Stichprobengrösse auf die Modellgenauigkeit (Standardfehler) für Bremgarten. Je kleiner die Anzahl der zugrundeliegenden Stichproben für die Modellbildung ist, desto grösser wird der Standardfehler. Anders als bei der 2-phasigen Schätzung können zur Herleitung des Modells jedoch grundsätzlich auch Stichproben / Fernerkundungsdaten aus benachbarten Gebieten oder früheren Inventuren (bei gleichbleibender Waldbewirtschaftung) verwendet werden.

**Tabelle 45: Zusammenhang der Stichprobengrösse mit dem Standardfehler der modellbasierten Vorhersage für die Bestände in Bremgarten.**

Anzahl Stichproben	Durchsch. Standardfehler [%]
363	9. 0
270	9. 6
180	11. 0
90	17. 9
50	28. 8

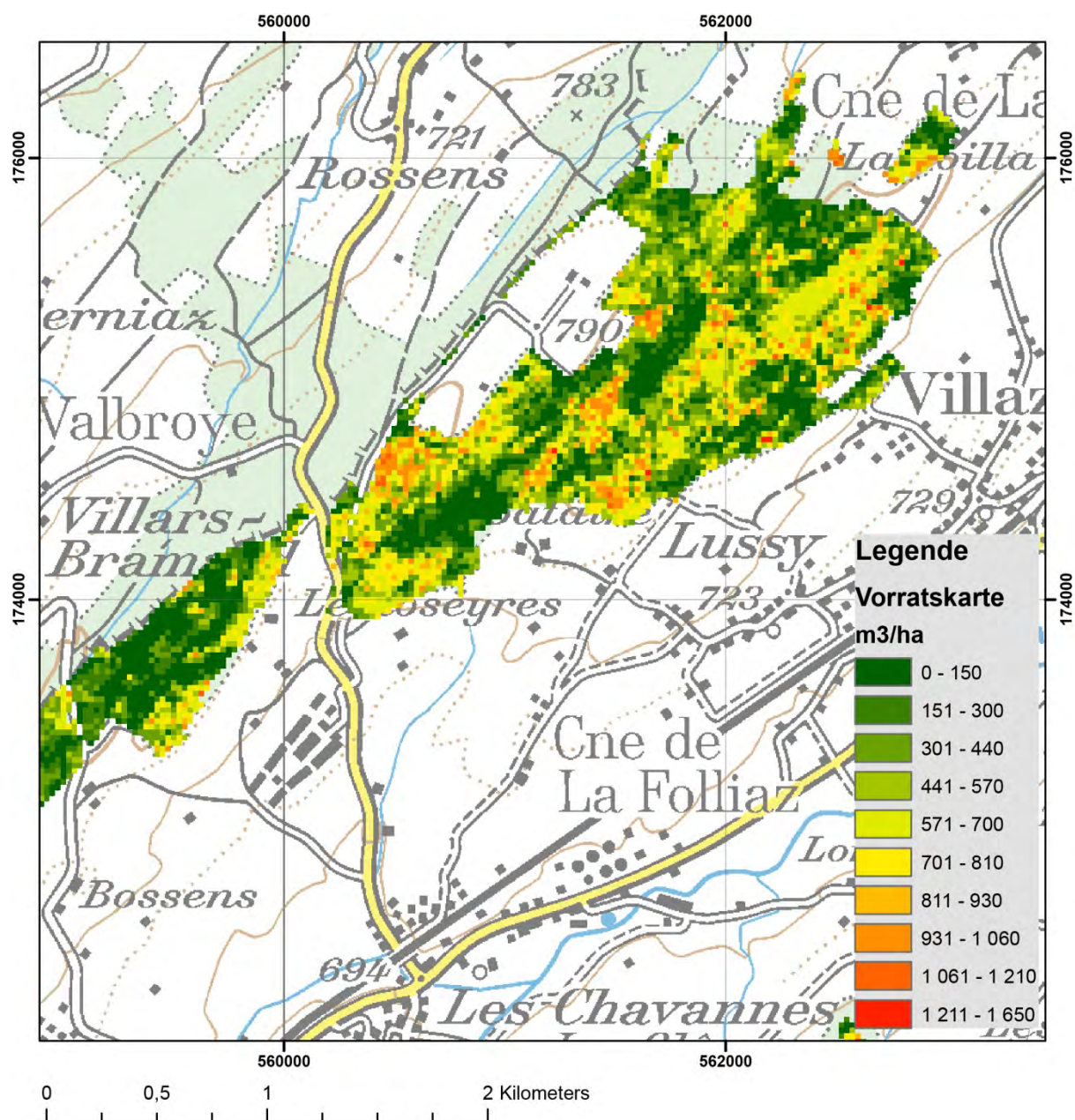


Abbildung 46: Ausschnitt aus der Vorratskarte für Glâne-Farzin (Montagne de Lussy) mit einer Auflösung von 20m x 20m.  
© 2018 swisstopo (JD100042)



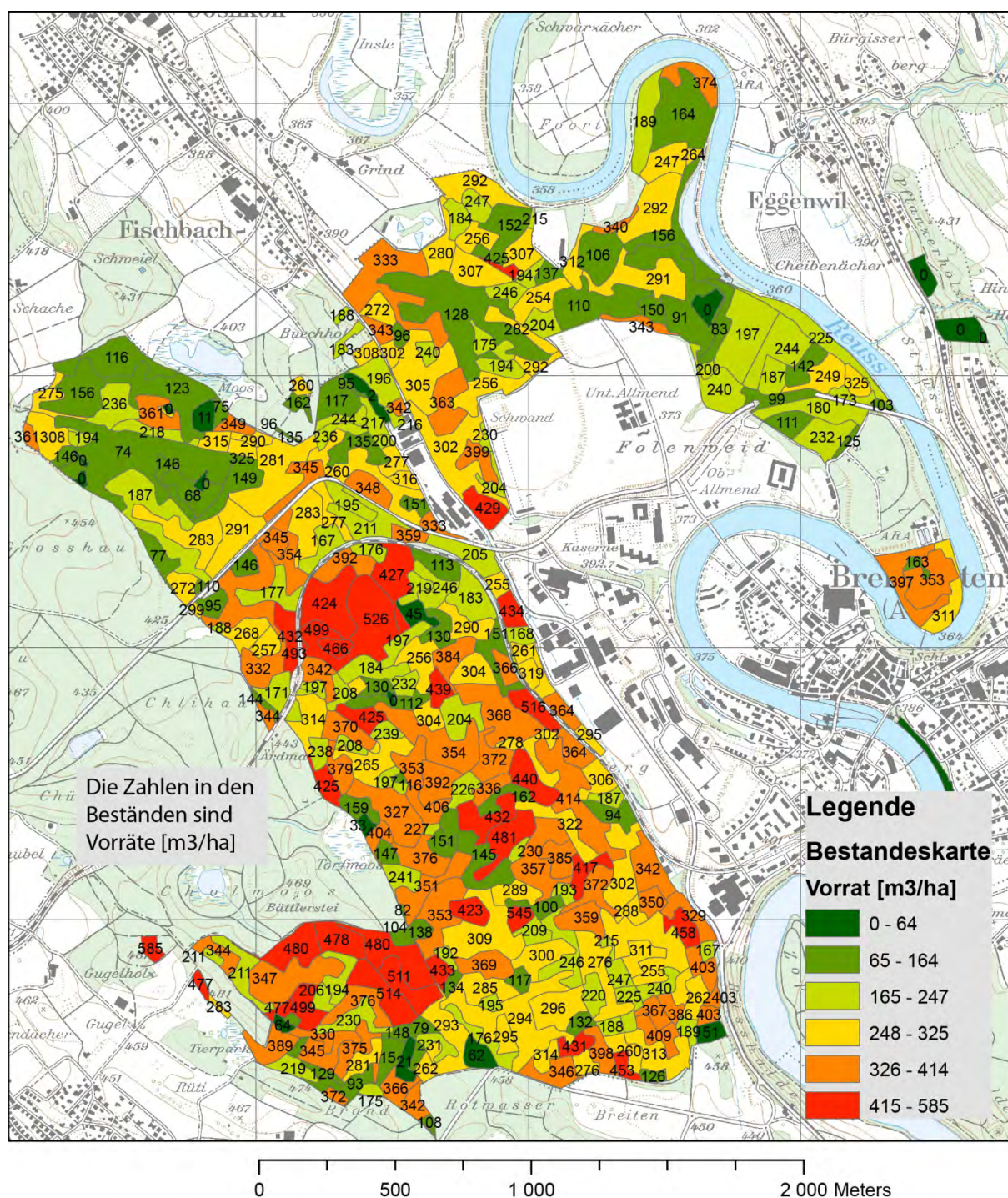


Abbildung 47: Bestandeskarte von Bremgarten mit modellbasierter Vorratsschätzung. In der Abbildung wurde für jeden Bestand der geschätzte Vorrat angegeben. © 2018 swisstopo (JD100042)



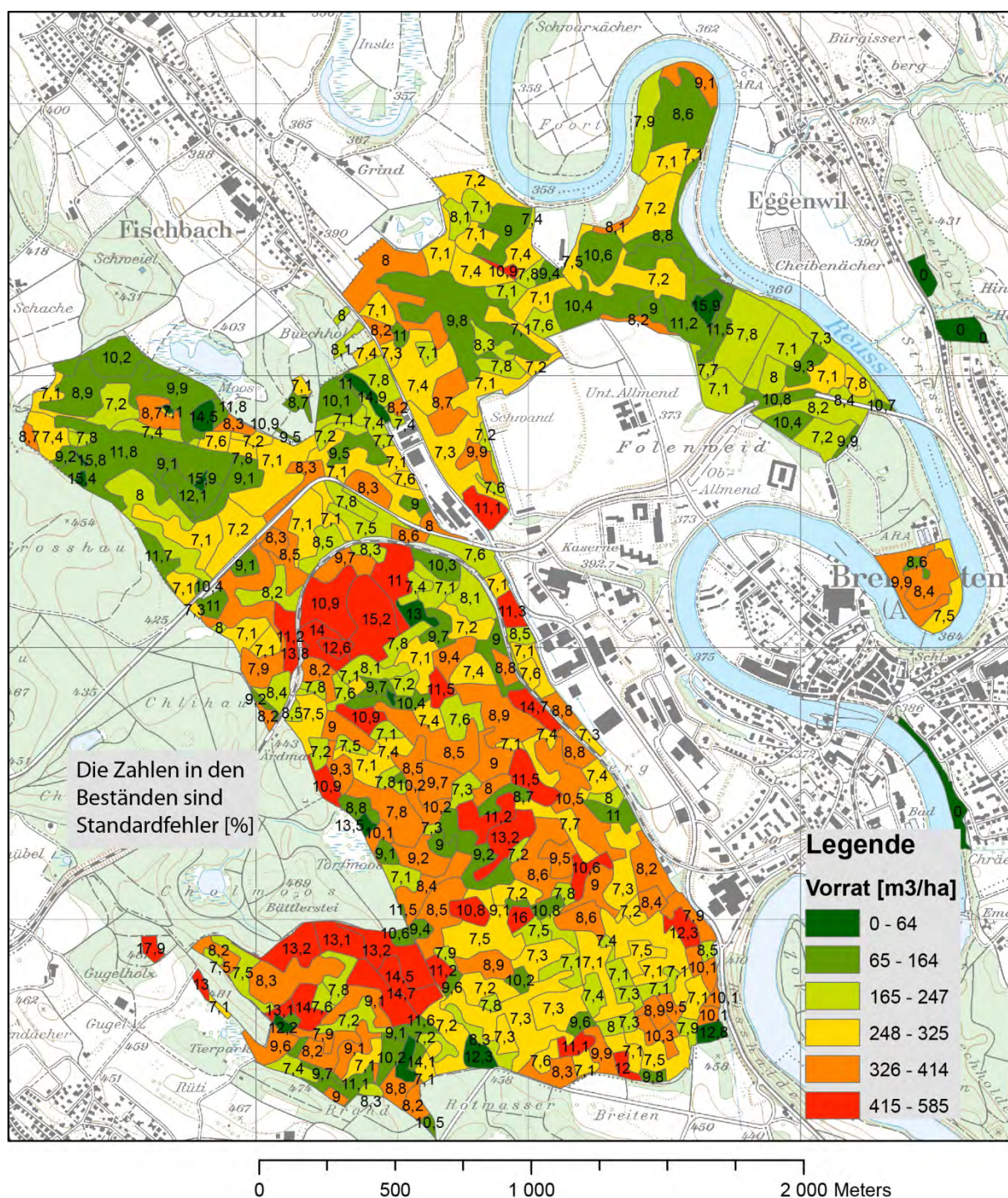


Abbildung 48: Bestandeskarte von Bremsgarten mit modellbasierter Vorratsschätzung. In der Abbildung wurde für jeden Bestand der Standardfehler der Vorratsschätzung angegeben. © 2018 swisstopo (JD100042)

Für die Bewirtschaftung ist es wichtig, mit aktuellen Daten zu arbeiten. Im Beispiel von Bremgarten wurden die Aufnahmen im Jahr 2011 gemacht, zum Zeitpunkt als dieser Bericht geschrieben wurde ist es bereits 2018, die Vorratskarte in Abbildung 39 dürfte also bereits nicht mehr sehr aktuell sein. Ist ein Modell für die Kartenherstellung bzw. für die Bestandesschätzung vorhanden, ist es grundsätzlich möglich bei neu verfügbaren Fernerkundungsdaten die Karten bzw. Bestandesschätzungen zu aktualisieren ohne erneut Stichproben aufzunehmen, vorausgesetzt die Struktur und die Baumartenzusammensetzung hat sich in der Zwischenzeit nicht wesentlich verändert. Wie zuverlässig ein solches Vorgehen ist, könnte anhand einer Folgeinventur überprüft werden.

### 11.5 Fazit der Fallstudien

Durch die 2-phasige Inventur kann die Genauigkeit einer Schätzung wesentlich verbessert werden. Der Standardfehler konnte über das gesamte Gebiet (Zielgrösse Vorrat) für Bremgarten um 33% und in Freiburg um 50% reduziert werden. In den Kleingebieten in Bremgarten betrug die Reduktion des Standardfehlers 30 bis 34% für den Vorrat und 15% bis 38% für die Stammzahl. Um wieviel der Standardfehler reduziert werden kann, hängt von mehreren Faktoren ab, wie der Homogenität des Waldes oder der Anzahl der terrestrischen Stichproben. Bei wenigen Stichproben und homogenen Wäldern ist die Reduktion des Standardfehlers normalerweise grösser, wie anhand des Testgebiets Freiburg zu sehen ist.

Für Zielgrössen, die man gut mit Fernerkundungsdaten vorhersagen kann, können unter Einbezug von Fernerkundungsdaten die Stichprobennetze ohne Verlust an Genauigkeit ausgedünnt werden. In Bremgarten konnte die Anzahl der Stichproben um die Hälfte reduziert werden, in Freiburg sogar um  $\frac{1}{3}$ . Diese Zahl ist wiederum abhängig von der Homogenität des Waldes wie auch von der Anzahl an vorhandenen terrestrischen Stichproben. Für die Ausdünnung empfehlen wir ein systematisches Weglassen auf einem regelmässigen Netz (z.B. jede 2-te Stichproben weglassen). Andererseits muss man beachten, dass sich zahlreiche Zielgrössen wie Baumartenzusammensetzung oder Verjüngung durch Fernerkundungsdaten schlecht voraussagen lassen und für diese eine Ausdünnung des Stichprobennetzes mit reduzierter Genauigkeit verbunden ist.

Der Einbezug von Fernerkundungsdaten erlaubt es insbesondere auch für Bestände brauchbare Schätzungen zu machen. In diesem Fall sind die Schätzungen modellbasiert und es gelten deshalb höhere Anforderungen an die Modellbildung, da anders als bei der 2-phasigen Schätzung keine „Residuenkorrektur“ stattfindet. Überlegt man sich, das Stichprobennetz auszudünnen, muss unbedingt berücksichtigt werden, dass damit auch die Genauigkeit der modellbasierten Schätzung und damit die Genauigkeit der Bestandesschätzung sinkt. Man sollte also bei einer Ausdünnung der Stichprobennetze auch berücksichtigen, dass dann weniger genaue Informationen vorliegen und aufgrund dessen betriebliche Prozesse weniger effizient geplant werden können.

Die Kombination von Fernerkundungsdaten mit terrestrischen Stichproben eignet sich für alle Zielgrössen, für welche vernünftige Vorhersagemodelle aufgrund von Fernerkundungsdaten abgeleitet werden können. In unseren Beispielen konnte dies für den Vorrat, die Grundfläche und die Stammzahl gemacht werden. Denkbar sind auch Modelle für den Nadelholzanteil, da mit der NdH / LbH Karte diesbezüglich gute Grundlagen existieren. Zurzeit laufen einige Forschungsprojekte, die zum Ziel haben, die einzelnen Baumarten aufgrund von Fernerkundungsdaten (Sentinel 2) zu identifizieren (Weber et al. 2018, Fassnacht et al. 2016), was dafür spricht, dass eine Identifikation der Hauptbaumarten, zumindest für die Kronenschicht, in Zukunft möglich sein könnte.



## 12 Diskussion

In diesem Abschnitt wurde ein kombiniertes Verfahren aus terrestrischen Stichproben, Fernerkundungsdaten und weiteren Informationen vorgestellt und an Fallbeispielen im Kanton Freiburg „Glâne-Farzin“ und Bremgarten AG getestet. Das Vorgehensprinzip kann folgenderweise kurz zusammengefasst werden. Bei den terrestrischen Stichprobenkreisen werden die Hilfsinformationen mit den Werten der Zielgrößen aus der terrestrischen Aufnahmen verglichen. Daraus wird ein Regressionsmodell abgeleitet, welches gebraucht wird um für weitere Stichprobenpolygone (ohne terrestrische Aufnahmen) Schätzungen der Zielgrösse abzuleiten. Diese Schätzung wird dann entweder in Kombination mit der terrestrischen Schätzung verwendet (2-phasige Schätzung, modellunterstützte Schätzung) oder allein als Schätzer verwendet (modellbasiert). Letzteres wird gebraucht um Karten, Bestandesschätzungen oder Kleingebiete mit nur sehr wenigen Stichproben zu rechnen, ersteres um Schätzer für ganze Betriebe oder Kleingebiete mit ausreichend vielen Stichproben zu erhalten.

Die Hilfsinformation stammen in erster Linie aus den LiDAR-Rohdaten und einem davon abgeleiteten Vegetationshöhenmodell (CHM). Im weiteren wurde eine Karte mit Laub- / Nadelholzunterscheidung und die Bestandeskarte als Informationsquellen herangezogen. Falls möglich wurde auf vorhandene Tools zurückgegriffen, wo nicht vorhanden wurden Python oder R-Skripte entwickelt. Der ganze Arbeitsablauf ist modular aufgebaut und es können grundsätzlich auch weitere Daten als Hilfsinformationen eingebunden werden.

Für die Zielgrößen Vorrat, Grundfläche und Stammzahl konnte durch die vorgestellten Verfahren die Effizienz der Inventur verbessert werden. Geht man davon aus, dass Fernerkundungsdaten günstig zu haben sind, einige Kanton stellen diese kostenlos zur Verfügung, und die Auswertung in Zukunft grösstenteils automatisiert werden kann, so macht es wirtschaftlich Sinn, die beschriebenen Methoden zu implementieren.

Ob man im Gegenzug die Anzahl der Stichproben reduzieren kann hängt davon ab, welche Genauigkeitsanforderungen an die Schätzer gestellt werden. Falls durch eine bessere Informationsqualität die betrieblichen Abläufe besser geplant werden können, ist die Investition in terrestrische Aufnahmen lohnend. Ausserdem führen die beschriebenen Verfahren, gerade bei waldbaulich wichtigen Zielgrößen wie Baumartenzusammensetzung oder Verjüngung, (noch) nicht zu einer Verbesserung der Effizienz.

Bei unseren Schätzungen wurden für die Zielgrößen Vorrat, Grundfläche und Stammzahl für jede Grösse unabhängige Modelle hergeleitet. So kann es beispielsweise vorkommen, dass die geschätzte Stammzahl nicht zum Vorrat oder zur Grundfläche passt. Weiterentwicklungen sollten dahin zielen, dass diese Zielgrößen nicht mehr mit verschiedenen unabhängigen Modellen geschätzt werden, sondern mit einem einzigen Modell. Dieses könnte beispielsweise mit Methoden der Multivariaten Regression (Mura et al. 2016), Manova (Multivariate Anova) oder Multivariate Random Forest (Segal et al. 2011) hergeleitet werden.



## Teil E: Entwurf eines modularen Gesamtkonzeptes

### 1 Ziel

In diesem Kapitel geht es darum, ein modulares Gesamtkonzept für eine Betriebsinventur zu entwerfen.

### 2 Grundprinzipien einer neuen Betriebsinventur

Für Betriebsinventuren sollten folgende Prinzipien berücksichtigt werden:

- **Fernerkundungsdaten verwenden:** Wie in dieser Arbeit gezeigt, kann die Effizienz von Inventuren mit dem Einbezug von Fernerkundungsdaten deutlich verbessert werden.
- **Fernerkundungsdaten und terrestrische Informationen möglichst synchron aufnehmen.** Die beste Modellgüte wird erreicht, wenn die Aufnahmezeitpunkte von Inventur und Befliegung möglichst gleichzeitig sind. In der Praxis dürfte dies jedoch teilweise schwierig zu realisieren sein. Um die Feldequipen regelmässig zu beschäftigen, finden in vielen Inventuren jedes Jahr Aufnahmen statt (Kanton Zürich, LFI). Eine Möglichkeit wäre zum Beispiel, Informationen über die Holznutzung (Schläge oder Durchforstung) zu berücksichtigen und Stichproben, auf welchen zwischen LiDAR Befliegung und terrestrischer Aufnahme eine Nutzung stattgefunden hat, nicht für die Modellbildung zu berücksichtigen. Flächen mit Holznutzungen können beispielsweise mithilfe von Sentinel-2 Satellitenbildern automatisiert identifiziert werden (Weber et al. 2018).
- Bei terrestrischen Stichproben-Aufnahmen sollte mit **der Methode der konzentrischen Kreise** (LFI Methode) gearbeitet werden (Mandallaz 2008).
- Die Stichprobenetze für regionale oder Betriebs-Inventuren sollten auf dem **LFI-Stichprobenetz** aufbauen (Mandallaz 2008).
- **Stichprobenmittelpunkte präzise vermessen.** Präzis vermessene Stichprobenmittelpunkte führen zu besseren Modellgüten. Stichproben, welche zur Zeit nicht mit DGPS vermessen sind, können bei Folgeaufnahmen kostengünstig und präzise lokalisiert werden. Neben der präzisen Koordinate sollte auch der Standardfehler der Messung angegeben werden.

### 3 Konzept

Ein Ziel dieses Projektes war unter anderem, auch ein Konzept für eine möglichst benutzerfreundlichen Softwarelösung zu entwerfen. Eine benutzerfreundliche Lösung setzt eine möglichst hohe Automatisierung der einzelnen Schritte voraus. Bei einigen Schritten ist jedoch die Automatisierung nur bedingt möglich, oder mit einem Verlust an Genauigkeit verbunden. Tabelle 46 gibt einen Überblick über die Automatisierungsmöglichkeiten der einzelnen Prozesse.

Tabelle 46: Automatisierungsmöglichkeiten der einzelnen Prozesse

Schritt (Prozesse)	Automatisierung möglich?	Bemerkung
LDP (LiDAR Data Processing)	Nein	Rohdaten müssen manuell begutachtet und prozessiert werden. Die Qualitätskontrolle (z.B. erkennen von falschen Klassierungen, Rauschen („Noise“)) kann nicht automatisiert werden. Das Wählen der richtigen Klassifikation für die Vegetations- und „Groundpunkte“ ist ebenfalls nicht automatisch möglich.
Berechnung der Hilfsvariablen	Ja	
Modell-Bildung	Ja, ist jedoch mit Verlust an Präzision verbunden.	Die Modell-Bildung kann für vordefinierte Modelle automatisiert erfolgen. Vordefinierte Modelle sind allerdings starr und schöpfen für das einzelne Gebiet in der Regel nicht das gesamte Potential der Daten aus. Bei den vordefinierten Modellen werden die Prädiktoren (erklärende Variablen) vorgegeben. Die Parametrisierung erfolgt anhand der individuellen Projektdaten.
2-phasige Schätzung	Ja	
Flächige Auswertung	Ja	

Da mit einer weitgehenden Automatisierung nicht ein Maximum an Präzision aus den Daten herausgeholt werden kann, ohne Automatisierung die 2-phasige Auswertung jedoch doch für einige Benutzer zu kompliziert sein dürfte, werden 2 verschiedene Umsetzungen vorgeschlagen: modulare und automatisierte Lösung.

Eine **modulare Lösung** besteht aus den Modulen „Hilfsvariablen“, „Flächige Auswertung“, „2-phasige Schätzung“. Für die „Modell-Bildung“ wird kein Modul kreiert, sondern der Benutzer muss das Modell selbst herleiten. Diese Lösung eignet sich für einen Anwender mit gutem Vorwissen in Statistik, insbesondere in linearer Regression und Kenntnissen der Programmiersprache R.

Die **automatisierte Lösung** besteht aus einem Modul, welches den gesamten Arbeitsablauf (ausgenommen LiDAR Data Processing, LDP) in einem Modul zusammenfasst. Die Modellbildung basiert dabei auf vordefinierten Modellen (erklärende Variablen sind definiert, Parametrisierung anhand der Projektdaten).

Weder bei der modularen, noch bei der automatisierten Lösung wird die Aufarbeitung der LiDAR Rohdaten integriert. Die Daten müssen als CHM (Raster) oder als bereinigte und normalisierte LiDAR-Rohdaten vorliegen.

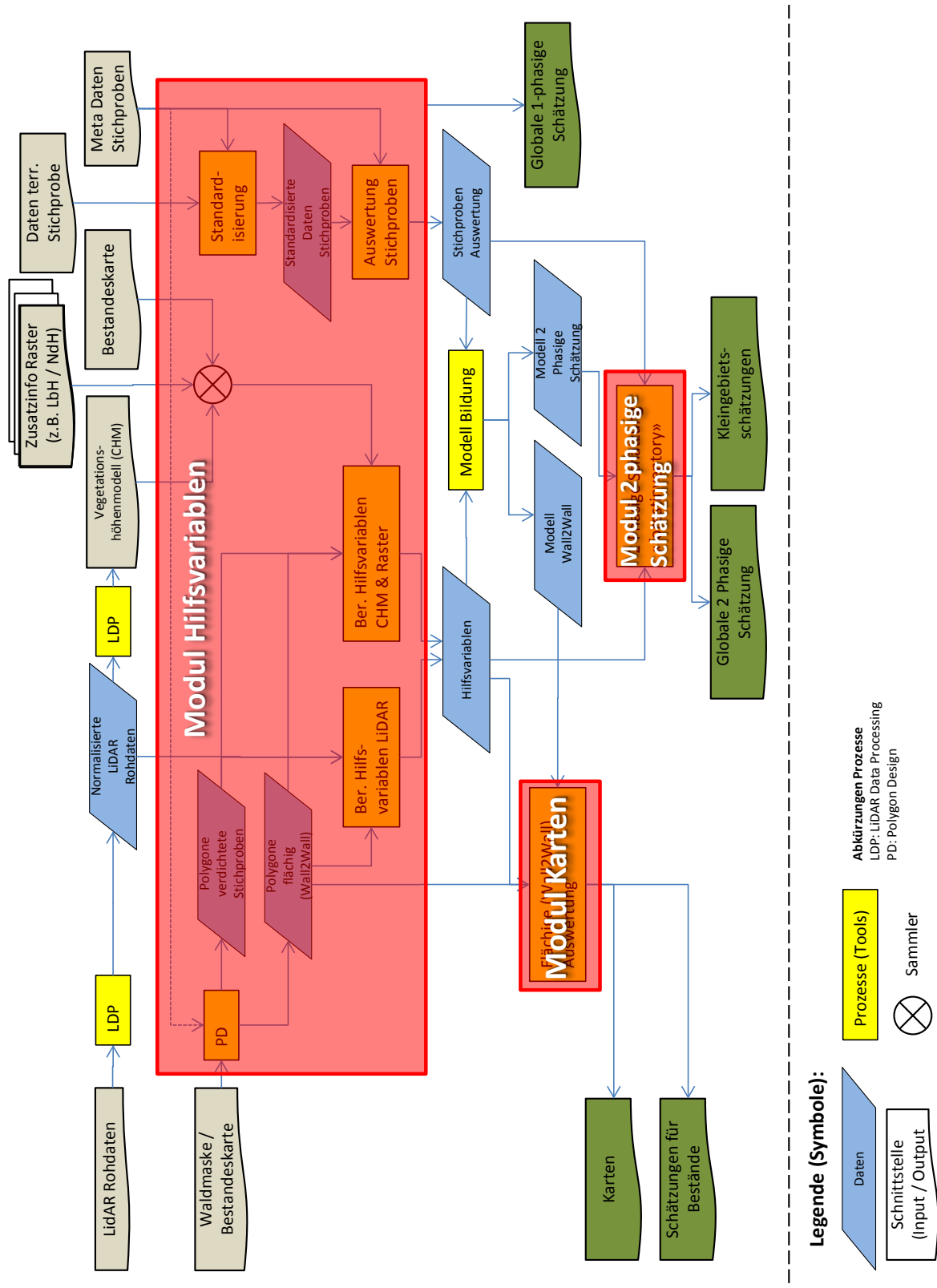
## 4 Modulare Lösung

Die Modulare Lösung ist in Abbildung 49 dargestellt und besteht aus den folgenden Modulen:

**Hilfsvariablen:** Das Modul „Hilfsvariablen“ berechnet aus den Rohdaten (normalisierte LiDAR-Rohdaten, CHM, weitere Rasterdaten) die Hilfsvariablen und führt die Auswertung der terrestrischen Stichprobe aus.

**Karten:** Das Modul „Karten“ erstellt aus einem parametrisierten Modell sowie den Hilfsvariablen eine Karte und macht optional eine modellbasierte Schätzung für Bestände.

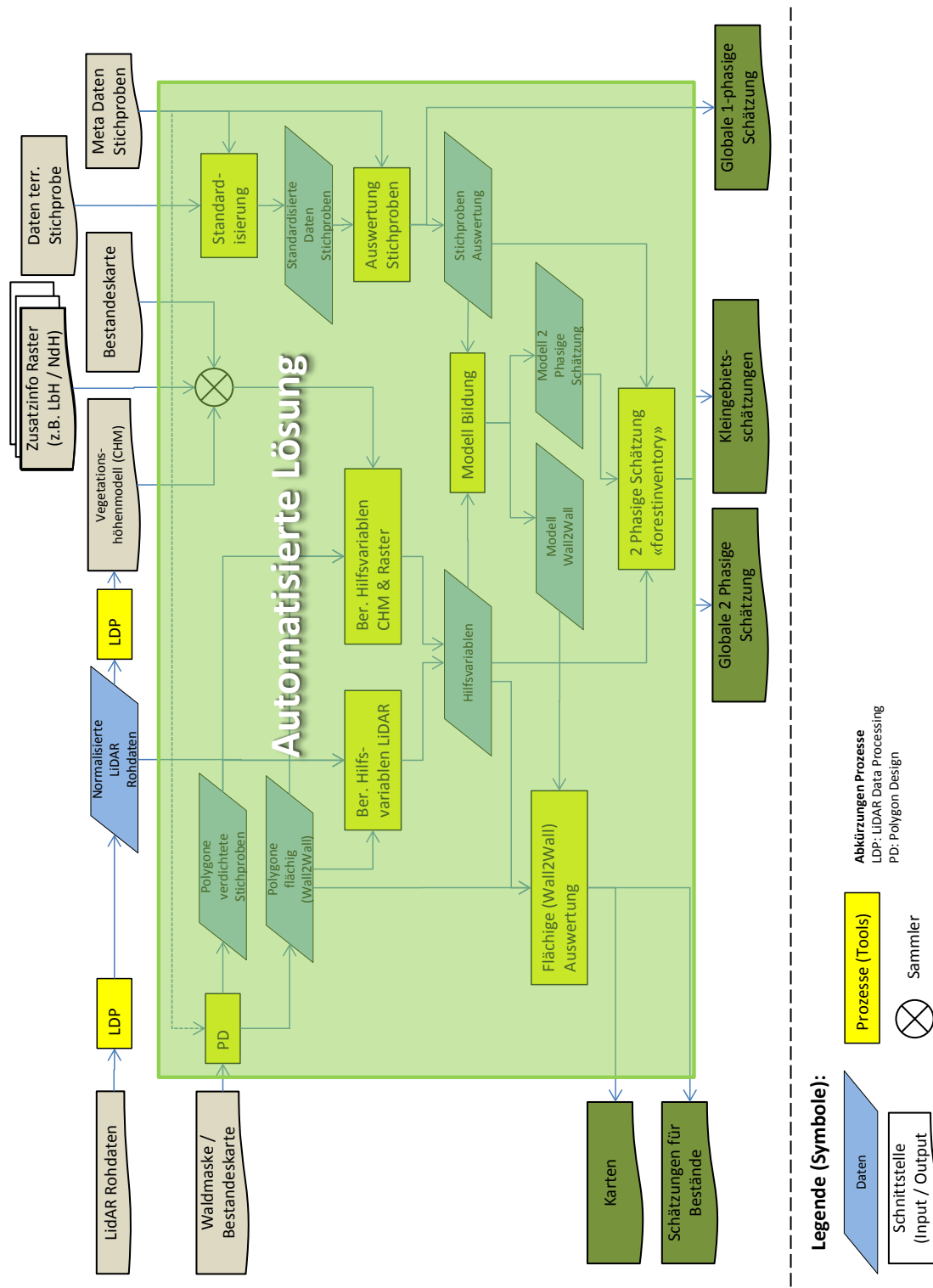
**2-phasige Schätzung:** Dieses Modul macht 2-phasige Schätzungen für das Gesamtgebiet wie auch für Kleingebiete. Als Grundlage benötigt werden die Hilfsvariablen, die Auswertung der Stichproben und die Prädiktoren des Modells. Für diese Aufgabe kann das R-Paket „forestinventory“ verwendet werden.



**Abbildung 49: Konzept für die modulare Lösung. Diese besteht aus den Modulen Hilfsvariablen, Karten und 2-phasige Schätzung**

## 5 Automatisierte Lösung

Das Modul „Automatisierte Lösung“ (Abbildung 50) fasst den ganzen Arbeitsablauf in einem Modul zusammen, mit Ausnahme der Aufarbeitung der LiDAR Rohdaten.



### Abbildung 50: Konzept für die automatisierte Lösung

## 5.1 Robuste Modelle

Der kritische Punkt bei der automatisierten Lösung ist die Modellbildung. Um das Potential der Daten optimal zu nutzen, ist ein gut angepasstes Regressionsmodell Voraussetzung. Ein gut angepasstes Regressionsmodell ist jedoch weniger universell einsetzbar. Es muss also ein Trade Off zwischen einem guten Modell und einer universellen Einsetzbarkeit gefunden werden.

Bei der automatisierten Lösung sollen vordefinierte Modelle implementiert werden. Die Prädiktoren (erklärende Variablen) werden dabei vorgegeben, die Parametrisierung erfolgt anhand der Projektdaten. Es gilt also Modelle zu finden, welche folgende Eigenschaften aufweisen:

**Robust:** Ein Modell soll die Zusammenhänge nicht nur in einem Gebiet plausibel abbilden, sondern universell anwendbar sein. Für ein robustes Modell machen insbesondere erklärende Variablen Sinn, welche sich auch physikalisch begründen lassen, wie zum Beispiel die durchschnittliche Kronenhöhe.

**Einfach:** Ein Modell soll mit möglichst wenigen erklärenden Variablen, einen möglichst grossen Anteil der Streuung erklären. Werden viele Variablen verwendet, kann man zwar ein gutes Bestimmtheitsmass erhalten, andererseits steigt die Gefahr, dass die modellierten Zusammenhänge nur für das eine Projektgebiet gültig sind, oder gewisse Zusammenhänge zufällig vorhanden sind. Man spricht dann von „Überfittung“. Wir beschränken uns daher auf maximal 3 erklärende Variablen.

**Verfügbarkeit der Grundlagen:** Die Daten sollen schweizweit verfügbar sein, dies trifft für das CHM und die Nadel / Laubholzunterscheidung zu. LiDAR-Daten sind zum jetzigen Zeitpunkt nur lokal verfügbar und werden deswegen für die robuste Modellbildung nicht berücksichtigt.

Eine häufige verwendete Hilfsvariable ist „chm\_average“ (Durchschnittliche Höhe der CHM-Pixel innerhalb eines Plots). Diese wurde in zahlreichen Untersuchungen verwendet und hat sich als robust erwiesen (z.B. Naesset 1997). Anhand der Daten in den Projektgebieten wurde evaluiert, ob sich noch weitere Hilfsvariablen für die Modellierung von waldbaulichen Grössen (z.B. Vorrat, Stammzahl, Basalfläche) eignen.

### 5.1.1 Methode

Für die Zielvariablen Vorrat [m<sup>3</sup>/ha], Stammzahl [N/ha] und Basalfläche [m<sup>2</sup>/ha] wurde evaluiert, ob ein brauchbares vordefiniertes Modell formuliert werden kann, und welche erklärenden Variablen sich am besten dazu eignen. Der detaillierte Bericht findet sich im Anhang. Wir geben hier die wichtigsten Punkte wieder:

- Als erstes wurden in den Bremgarten-Daten diejenigen Hilfsvariablen gesucht, welche den grössten Teil der Streuung der Daten erklären.
- Anschliessend wurde geprüft, ob diese Hilfsvariablenkombinationen auch die Streuung in den Daten von Freiburg gut erklären.
- Mittels einer Bootstrap-Simulation und einer Kreuzvalidierung wurde die Robustheit des Modells überprüft. Eine Bootstrap-Simulation gibt Aufschluss darüber, wie sensitiv das Modell auf das Ein-/Ausschliessen einzelner Messwerte reagiert. Bei einer Kreuzvalidierung werden die Daten geteilt, mit dem einen Teil der Daten wird das Modell parametrisiert und mit dem anderen Teil der Daten das Modell überprüft.
- Residuen Analyse: Für die lineare Regression werden folgende Voraussetzungen überprüft:

- Modellannahme 1: Es gibt einen linearen Zusammenhang zwischen gemessenen Werten und mit linearem Modell simulierten Werten (Linearität).
- Modellannahme 2: Die Residuen sind unabhängig von der abhängigen und den unabhängigen Variablen (sog. Heteroskedastie). Der Erwartungswert der Residuen ist für jeden Wert der Variable = 0. Die Residuen sind unabhängig vom simulierten Wert.
- Modellannahme 3: Falls die Residuen geordnet sind (z.B. bei Zeitreihen), dürfen sie nicht voneinander abhängig sein (keine Autokorrelation, z.B. auf grosse Residuen folgen kleine, etc.). Da unsere Daten keine natürliche Reihenfolge haben, spielt diese Annahme keine Rolle.
- Modellannahme 4: Die Residuen sind normalverteilt um den Mittelwert 0.
- Die im Voraus identifizierten "besten" Parameter wurden in diversen linearen Modellen auf korr. R-Quadrat und AIC (Akaike Information Criterion: Ist ein Mass für die Güte eines Regressionsmodells) getestet.

### 5.1.2 Resultate

Die identifizierten robusten Modelle enthalten die in Tabelle 47 beschriebenen Hilfsvariablen. „chm\_mean\_sum\_of\_squares“ und „chm\_mean\_sum\_of\_squares\_Laub\_Anteil“ kommen dabei in allen Modellen vor.

wobei:

$$\text{chm\_mean\_sum\_of\_squares\_Laub\_Anteil} = \text{chm\_mean\_sum\_of\_squares\_Laub} / \text{chm\_mean\_sum\_of\_squares}$$

**Tabelle 47: Verwendete Hilfsvariablen**

Zielgrösse	Hilfsvariable 1	Hilfsvariable 2	Hilfsvariable 3
Vorrat (TS_Total_Vol)	chm_mean_sum_of_squares	chm_mean_sum_of_squares_Laub_Anteil	
Basalfläche (TS_BasalAreaha)	chm_mean_sum_of_squares	chm_mean_sum_of_squares_Laub_Anteil	
Stammzahl	chm_mean_sum_of_squares	chm_mean_sum_of_squares_Laub_Anteil	chm_stddev

Die vollständigen Modelle inkl. Transformation der Prädiktoren lauten folgendermassen: (R - Code)

```
TS_Total_Vol ~ ihst(chm_mean_sum_of_squares) + chm_mean_sum_of_squares +
asinsqrt(chm_mean_sum_of_squares_Laub_Anteil)
```

```
TS_BasalAreaha ~ I(chm_mean_sum_of_squares ^2) + chm_mean_sum_of_squares +
asinsqrt(chm_mean_sum_of_squares_Laub_Anteil)
```

```
TS_Stammzahl ~ I(chm_stddev^2) + chm_stddev + I(chm_mean_sum_of_squares ^2) +
chm_mean_sum_of_squares + asinsqrt(chm_mean_sum_of_squares_Laub_Anteil)
```

Wobei:

`ihst()`: Transformation mit der inversen hyperbolischen Sinusfunktion:  $a \sinh x = \ln(x + \sqrt{x^2 + 1})$

`asinsqrt()`: Transformation mit der Arcus Sinus Funktion  $= \sqrt{a \sin(x)}$

Das Modell für den totalen stehenden Vorrat [ $\text{m}^3 / \text{ha}$ ] ( $\text{TS\_Total\_Vol}$ ) hat ein korrigiertes R-Quadrat ( $\text{adj.R}^2$ ) von 0.59. Aus 1000 Kreuzvalidierungs Wiederholungen beträgt der relative Fehler im Median 30% und das korrigierte R-Quadrat im Median 0.53. für die Vorratsschätzung (Tabelle 48)

**Bemerkung:** Der relative Fehler im Median ergibt sich folgendermassen: für jeden Stichprobenpunkt gibt es einen gemessenen Wert und einen modellierten Wert. Der relative Fehler eines Stichprobenpunktes ist gleich dem modellierten Wert dividiert durch den gemessenen Wert. Der relative Fehler wird für alle Stichprobenpunkte bei allen 1000 Kreuzvalidierungs-Wiederholungen berechnet und daraus wiederum wird der Median berechnet.

Das Modell für die Basalfläche [ $\text{m}^2/\text{ha}$ ] hat ein korrigiertes R-Quadrat von 0.55. Aus 1000 Wiederholungen beträgt der relative Fehler im Median 28% und das korrigierte R-Quadrat im Median 0.48.

Das Modell für die Stammzahl [ $\text{ha}^{-1}$ ] hat ein korrigiertes R-Quadrat von 0.32. Aus 1000 Wiederholungen beträgt der relative Fehler im Median 40% und das korrigierte R-Quadrat im Median 0.15.

Abbildung 51 und Tabelle 48 zeigen, dass die Modelle für Volumen und Basalfläche mit einem R-Quadrat zwischen 0.5 und 0.7 nützliche Schätzungen liefern, mit relativen Schätzfehlern um 30% vom gemessenen Wert. Das Modell für die Stammzahl erklärt deutlich weniger Varianz und auch die relativen Schätzfehler sind mit ca 40% höher. Dieses Ergebnis deckt sich mit der Erwartung, dass das Höhenmodell, aggregiert auf Stichprobenebene nur beschränkt in der Lage ist einzelne Bäume voneinander abzugrenzen.



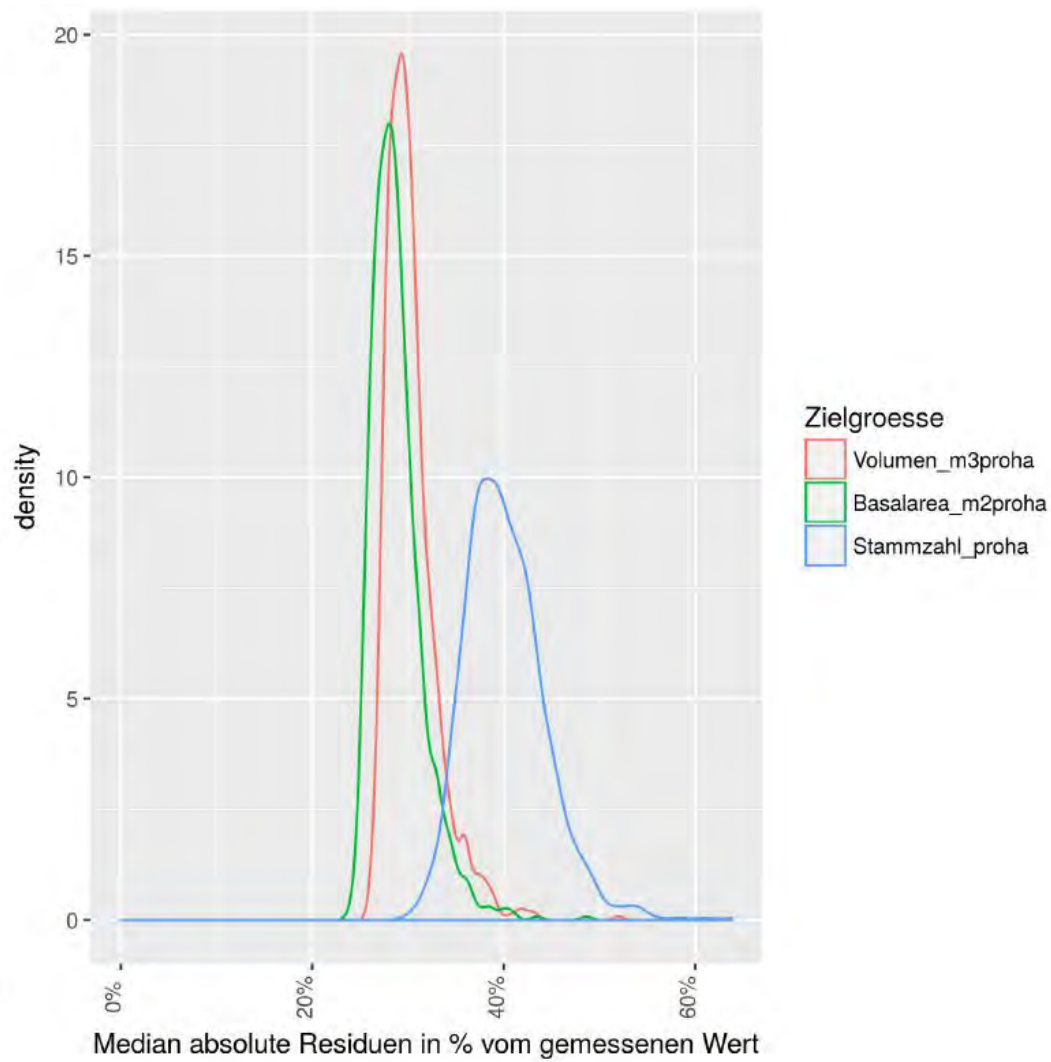


Abbildung 51: Vergleich der Verteilungen der Mediane der absoluten relativen Residuen für die 1000 Kreuzvalidierungs-Wiederholungen. Tiefe Werte markieren kleine Unsicherheiten, grosse Werte grosse Unsicherheiten.

Tabelle 48: Die drei Modelle im Vergleich

Modell	adj.R Quadrat (direkt)	Median R- Quadrat (1000 Kreuzvalidierungs - Wiederholungen)	Median abs. relative Residuen	Median rel. RSE
Vorrat [m3 / ha]	0.59	0.53	30%	32%
Grundfläche [m2 / ha]	0.55	0.48	28%	31%
Stammzahl [ha <sup>-1</sup> ]	0.32	0.15	40%	41%

### 5.1.3 Fazit

Aus dem CHM, sowie aus der Laub- / Nadelholzunterscheidung können gute Schätzungen für Vorrat und Basalfläche gemacht werden, falls das Modell aus vor Ort gemessenen Werten parametrisiert wird. Ebenso lassen sich die Modelle für Vorrat und Basalfläche auch nur mit einem kleinen Teil des Bestandes parametrisieren (hier im Beispiel in Tabelle 48 ca. 10% der Stichproben). Diese Modelle können dann auf den Rest der Stichproben angewendet werden. Die Genauigkeit der Schätzungen variiert für die Modelle, beträgt aber für Vorrat und Basalfläche ca  $\pm 30\%$  (vergleiche Tabelle 48 und Abbildung 51). Im Gegensatz dazu liefert das Modell für Stammzahl Schätzungen mit hohen Schätzfehlern von um  $\pm 40\%$ . Für die Implementation kann man also gut ein robustes Modell für Vorrat und Basalfläche vordefinieren. Für die Stammzahl macht dies jedoch weniger Sinn. Für die Stammzahl haben wir mit Einbezug der LiDAR-Daten bessere Werte erhalten und empfehlen daher die ‚modulare Lösung‘.

## 5.2 Parametrisierung der robusten Modelle

Wie bereits erwähnt, werden bei den vordefinierten Modellen die Prädiktoren (erklärende Variablen) vorgegeben. Die Parametrisierung muss anhand von Stichproben im Projektgebiet erfolgen, wie nachfolgendes Beispiel verdeutlicht: Abbildung 52 zeigt ein Beispiel, in welchem das (vordefinierte) Modell für den Vorrat anhand der Daten von Bremgarten parametrisiert und dann in Freiburg angewendet wurde. Die Modellschätzungen sind systematisch zu tief und dementsprechend ist das R-Quadrat mit 0.184 sehr schlecht. Abbildung 53 zeigt dann das gleiche Modell mit Parametrisierung anhand der Daten in Freiburg und ebenfalls auf Freiburg angewendet. Das Modell passt hier deutlich besser und dementsprechend beträgt das R-Quadrat = 0.645.

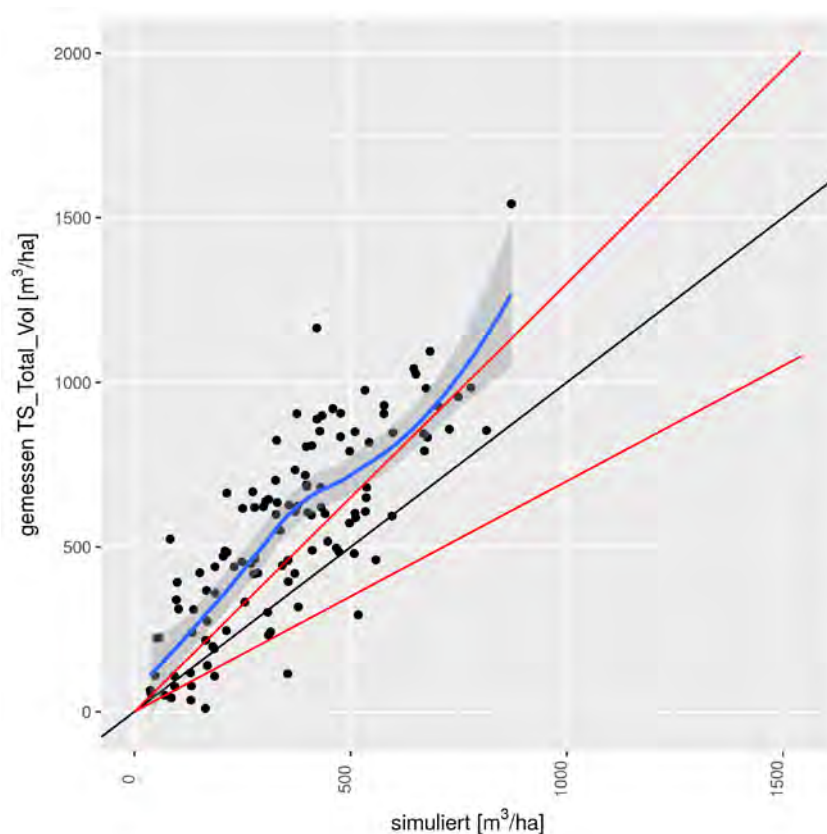


Abbildung 52: Modell parametrisiert mit Daten aus Bremgarten und angewendet auf FR-Daten (R-Quadrat = 0.184)

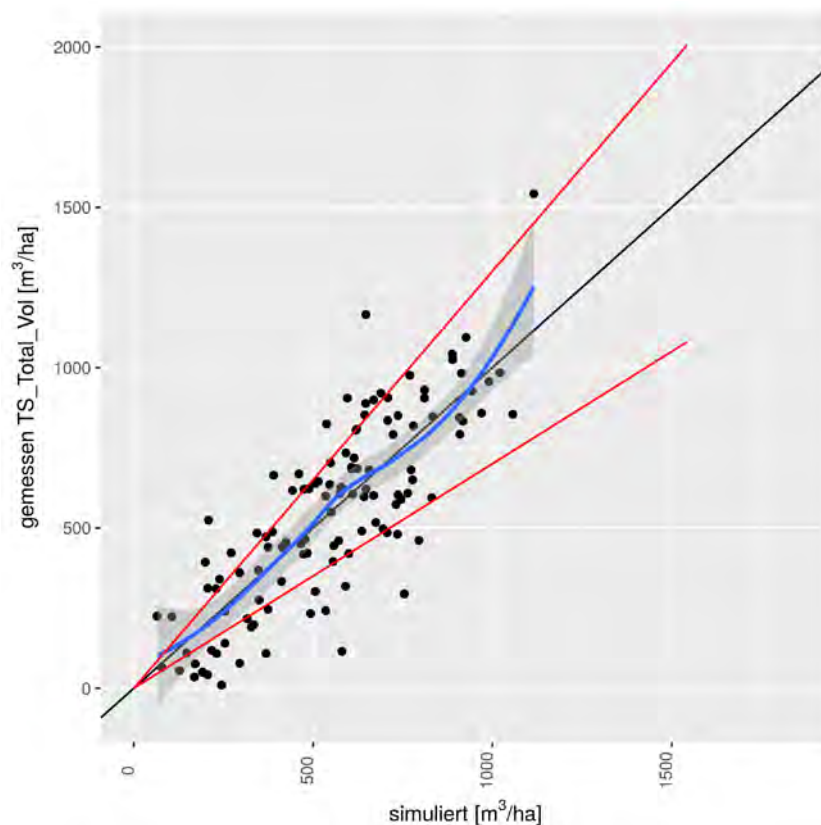


Abbildung 53: Modell parametrisiert mit Daten aus FR und angewendet auf FR-Daten ( $R^2 = 0.645$ )

## 6 Implementation / Softwarelösung

Bei der Implementation sollten folgende Grundprinzipien verfolgt werden:

- **Modulartiger Aufbau mit definierten Schnittstellen:** Die Technik in der Fernerkundung entwickelt sich zurzeit rasant weiter (Drohnen, spektrale Satellitenbilder, spektrale Laser-Scanner, etc.). Es ist daher anzunehmen, dass in Zukunft wohl weitere aussagekräftige Grundlagendaten zur Verfügung stehen werden. Auch die statistischen Methoden werden immer weiterentwickelt, insbesondere relevant für die Inventur dürfte der Zweig der „künstlichen Intelligenz“ werden mit Machine Learning oder Deep Learning. Indem die Softwarelösung modulartig aufgebaut ist, bietet sie grösstmögliche Flexibilität und kann einfach angepasst werden (neue Module hinzufügen, bzw. ändern).
- **Open Source Lösung:** Eine Open Source Lösung hat die Vorteile, dass für die Benutzung keine Lizenzkosten anfallen und der Source Code für die Benutzer und Entwickler einseh- und anpassbar ist. Falls keine Lizenzkosten anfallen, wird der Einsatz in Büros, Ämtern, aber auch an Hochschulen einfacher sein. Der einsehbare Code gewährleistet eine einfachere Weiterentwicklung, somit kann im Prinzip jeder Nutzer (Programmierkenntnisse vorausgesetzt), seine gewünschten Änderungen oder Weiterentwicklungen selbst vornehmen. Als Programmiersprachen bieten sich R oder Python an. R ist jetzt bereits für fast alle statistischen Fragen das „state of the art Tool“ und bietet eine Vielzahl an Bibliotheken für sehr viele Problemstellungen. Python ist ähnlich wie R sehr weit verbreitet,

hat etwas weniger spezialisierte Bibliotheken, jedoch eine bessere Rechenperformance. Für Anwendungen, in denen die Rechenleistung essentiell ist, kann auch die Programmiersprache Julia ( <https://julialang.org/> ) in Betracht gezogen werden. Die Prototypen wurden in R und Python programmiert. Python eignet sich insbesondere auch dazu, graphische Benutzeroberflächen zu entwickeln. Für die automatisierte Lösung wird eine graphische Benutzeroberfläche erarbeitet.

- **Dokumentation:** Eine gute Dokumentation ist essentiell für die Anwendung, aber auch den Unterhalt der Tools. Auf eine gute Dokumentation soll besonderes Augenmerk gelegt werden.
- **Ausbildung der Benutzer:** Für die Anwendung ist es wichtig, dass die Benutzer die Tools verstehen und mit diesen umgehen können. Dies soll einerseits mit Kursen gewährleistet werden und andererseits mit gut dokumentierten Unterlagen (z.B. Tutorials) für das Selbststudium.
- **Langfristiges Konzept suchen für Unterhalt und Weiterentwicklung der Tools:** Eine Software sollte nie abhängig von einzelnen Personen sein, sondern Unterhalt und Weiterentwicklung sollten geregelt sein. Da die HAFL bereits Erfahrung mit ihren eignen Tools besitzt, wird in diesem Punkt die Zusammenarbeit mit der HAFL angestrebt
- **Schnittstellen mit bestehenden und weiterführenden Tools:** Die Software muss kompatibel mit existierenden Tools sein, insbesondere mit dem R-package „forestinventory“ von Hill, Massey und Mandallaz und den Tools der HAFL. Es wird geschaut, das Namen und Datenaustauschformate der Attribute mit diesen erwähnten Tools übereinstimmen. Um weiter einen möglichst einfachen Austausch mit weiteren Tools zu gewährleisten (z.B. GIS-Systeme) werden Schnittstellen (Datenaustausch-Formate) nach folgenden Grundsätzen gestaltet: (1) Keine proprietären Formate (wie z.B. proprietäre Formate von ESRI oder Microsoft), (2) Geodaten werden in folgenden Formaten geliefert: ->Vektor: Shapefiles, -> Raster: Geotiff, und (3) Datentabellen weisen \*.dbf oder \*.csv Format auf

## 7 Inventur ohne Stichproben

Bei der Ausarbeitung des Projektes ist immer wieder die Frage aufgetaucht, ob eine Inventur auch ohne Stichproben ausgeführt werden kann. In diesem Abschnitt wird diese Frage kurz diskutiert.

Eine Möglichkeit der Inventur ohne Stichproben besteht darin, ein externes Modell (Parametrisierung erfolgte ausserhalb des Projektgebietes) zu benutzen. Wird ein externes Modell verwendet, besteht die Gefahr, dass ein systematischer Fehler auftritt. D.h. man muss darauf vertrauen, dass das Modell stimmt und hat keine Möglichkeit zu prüfen, ob dies tatsächlich auch so ist. Zweitens müssen mehr Ressourcen in die Modell-Bildung investiert werden. Es gelten dann strengere Kriterien an die Modellbildung, und es müssen Standorts-Parameter mit einbezogen werden.

Eine andere denkbare Variante besteht darin, ein Modell für ein Projektgebiet einmal zu parametrisieren (‘Einmalparametrisierung’) und dann immer wieder zu verwenden. Um zu prüfen inwieweit diese Methode praktikabel ist, fehlen Erfahrungswerte, da LiDAR-Daten und damit

hochaufgelöste CHMs erst seit ca. 10 bis 20 Jahren zur Verfügung stehen. Dazu muss man wissen, dass parametrisierte Modelle nur unter gleichen Voraussetzungen angewandt werden können, unter denen diese auch erstellt wurden. Falls also keine Umweltveränderungen auftreten und die Wälder in Struktur und Baumartenzusammensetzung konstant bleiben, ist es plausibel, dass die ‚Einmalparametrisierung‘ angewandt werden kann. Ändern sich Umweltbedingungen (z.B. durch Klimawandel) oder die Struktur des Waldes, entspricht die Verwendung eines bereits parametrisierten Modells einer Extrapolation. Extrapolationen von linearen Modellen sind immer mit grossen Unsicherheiten behaftet.

Auch die Tatsache, dass in absehbarer Zeit viele waldbaulich relevanten Parameter (z.B. Verjüngung, Baumarten, etc.) nicht genügend genau mit Fernerkundungsdaten erfasst werden können spricht für die Beibehaltung von terrestrischen Inventuren.

## 8 Diskussion

In diesem Kapitel wurde ein Gesamtkonzept entworfen für eine benutzerfreundliche Umsetzung der mit Fernerkundungsdaten unterstützten Betriebsinventur. Grundsätzlich heisst benutzerfreundlich, dass ein hoher Grad der Automatisierung für die Auswertung und Modellbildung erreicht werden soll. Da mit einer weitgehenden Automatisierung nicht ein Maximum an Präzision aus den Daten herausgeholt werden kann, ohne Automatisierung eine 2-phasige Auswertung jedoch doch für einige Benutzer zu kompliziert sein dürfte, wurden 2 verschiedene Umsetzungen vorgeschlagen: modulare und automatisierte Lösung.

Eine **modulare Lösung** besteht aus den Modulen „Hilfsvariablen“, „Flächige Auswertung“, „2-phasige Schätzung“. Für die „Modell Bildung“ wird kein Modul kreiert, sondern der Benutzer muss das Modell selbst herleiten. Diese Lösung eignet sich für einen Anwender mit gutem Vorwissen in Statistik, insbesondere in linearer Regression und Kenntnissen der Programmiersprache R.

Die **automatisierte Lösung** besteht aus einem Modul, welches den gesamten Arbeitsablauf (ausgenommen LiDAR Data Processing, LDP) in einem Modul zusammenfasst. Die Modellbildung basiert dabei auf vordefinierten Modellen. Für die automatisierte Lösung ist es besonders wichtig, robuste Modelle zu definieren. Modellvorschläge wurden gemacht und ausführlich diskutiert.

Weder bei der modularen, noch bei der automatisierten Lösung wird die Aufarbeitung der LiDAR Rohdaten integriert. Die Daten müssen als CHM (Raster) oder als bereinigte und normalisierte LiDAR-Rohdaten vorliegen.

## Literaturverzeichnis

- Baltsavias, E.P., 1999. Airborne laser scanning: basic relations and formulas. *ISPRS Journal of photogrammetry and remote sensing*, 54(2-3): 199-214.
- Ben-Arie, J.R., Hay, G.J., Powers, R.P., Castilla, G. and St-Onge, B., 2009. Development of a pit filling algorithm for LiDAR canopy height models. *Computers & Geosciences*, 35(9): 1940-1949.
- Blattert, C., Lemm, R., Thees, O., Lexer, M.J. and Hanewinkel, M., 2017. Management of ecosystem services in mountain forests: review of indicators and value functions for model based multi-criteria decision analysis. *Ecological Indicators*, 79: 391-409.
- Böckmann, T., 2016. Warum sind Betriebsinventuren für die forstliche Praxis wichtig? [Why is two-phase sampling for stratification so important for forestry enterprises?]. *forstarchiv*, 87: 31 - 37.
- Bolton, D., Tooke, R. and Coops, N., 2014. Processing LiDAR data: Fusion tutorial, University of British Columbia.
- Borges, J.G., Nordström, E.-M., Garcia Gonzalo, J., Hujala, T. and Trasobares, A., 2014. Computer-based tools for supporting forest management.
- Breschan, J., Hill, A., Ginzler, C. and Gabriel, A., 2017. Kombination Forstinventur und Fernerkundungsdaten. *Methodenseminar*, 271.
- Dettling, M., 2016. Script Applied Statistical Regression, ETH.
- Ene, L.T. et al., 2018. Large-area hybrid estimation of aboveground biomass in interior Alaska using airborne laser scanning data. *Remote Sensing of Environment*, 204: 741-755.
- Fassnacht, F.E. et al., 2016. Review of studies on tree species classification from remotely sensed data. *Remote Sensing of Environment*, 186: 64-87.
- Flewelling, J.W. and Pienaar, L., 1981. Multiplicative regression with lognormal errors. *Forest Science*, 27(2): 281-289.
- Gregoire, T.G., Lin, Q.F., Boudreau, J. and Nelson, R., 2008. Regression estimation following the square-root transformation of the response. *Forest Science*, 54(6): 597-606.
- Heink, U. and Kowarik, I., 2010. What are indicators? On the definition of indicators in ecology and environmental planning. *Ecological Indicators*, 10(3): 584-593.
- Hill, A., Massey, A. and Mandallaz, D., 2016. forestinventory: Design-Based Global and Small-Area Estimations for Multiphase Forest Inventories. CRAN: Comprehensive R Archive Network.
- Isenburg, M. 2016: Generating Spike-Free Digital Surface Models from LiDAR, Zugriff am 12.12.2017, <https://rapidlasso.com/2016/02/03/generating-spike-free-digital-surface-models-from-lidar/>
- Isenburg, M. 2014: Rasterizing Perfect Canopy Height Models from LiDAR, Zugriff am 12.12.2017, <https://rapidlasso.com/2014/11/04/rasterizing-perfect-canopy-height-models-from-lidar/>

- Khosravipour, A., Skidmore, A.K. and Isenburg, M., 2016. Generating spike-free digital surface models using LiDAR raw point clouds: A new approach for forestry applications. *International journal of applied earth observation and geoinformation*, 52: 104-114.
- Khosravipour, A., Skidmore, A.K., Isenburg, M., Wang, T. and Hussin, Y.A., 2014. Generating pit-free canopy height models from airborne lidar. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 80(9): 863-872.
- Köhl, M., Magnussen, S.S. and Marchetti, M., 2006. Sampling methods, remote sensing and GIS multiresource forest inventory. Springer Science & Business Media.
- Küng, S., 2017. Analyse Fernerkundungs-basierter Modelle für die Stammzahlschätzung mit Fokus auf die Vorprozessierung von LiDAR-Daten, ETH, Zürich.
- Lamprecht, S., Hill, A., Stoffels, J. and Udelhoven, T., 2017. A Machine Learning Method for Co-Registration and Individual Tree Matching of Forest Inventory and Airborne Laser Scanning Data. *Remote Sensing*, 9(5): 505.
- Lamprecht, S., Stoffels, J., Dotzler, S., Haß, E. and Udelhoven, T., 2015. aTrunk—an ALS-based trunk detection algorithm. *Remote Sensing*, 7(8): 9975-9997.
- Mandallaz, D., 2003. Die antizipierte Varianz: ein Werkzeug für die Optimierung von Waldinventuren | The anticipated variance: a tool for the optimization of forest inventory. *Schweizerische Zeitschrift für Forstwesen*, 154(3-4): 117-121.
- Mandallaz, D., 2007. Sampling techniques for forest inventories. CRC Press.
- McCallum, K., Beaty, M. and Mitchell, B., 2014. First Order LIDAR Metrics: A supporting document for LIDAR deliverables. RedCastle Resources Inc., Remote Sensing Applications Center (RSAC), Salt Lake City, Utah.
- McRoberts, R.E., 2006. A model-based approach to estimating forest area. *Remote Sensing of Environment*, 103(1): 56-66.
- McRoberts, R.E., Næsset, E. and Gobakken, T., 2013. Inference for lidar-assisted estimation of forest growing stock volume. *Remote Sensing of Environment*, 128: 268-275.
- McRoberts, R.E. et al., 2018. Assessing components of the model-based mean square error estimator for remote sensing assisted forest applications. *Canadian Journal of Forest Research*, 48(999): 1-8.
- Mura, M., McRoberts, R.E., Chirici, G. and Marchetti, M., 2016. Statistical inference for forest structural diversity indices using airborne laser scanning data and the k-Nearest Neighbors technique. *Remote Sensing of Environment*, 186: 678-686.
- Næsset, E., 2004. Accuracy of forest inventory using airborne laser scanning: evaluating the first Nordic full-scale operational project. *Scandinavian Journal of Forest Research*, 19(6): 554-557.

- Næsset, E., 2007. Airborne laser scanning as a method in operational forest inventory: Status of accuracy assessments accomplished in Scandinavia. *Scandinavian Journal of Forest Research*, 22(5): 433-442.
- Naesset, E., 1997. Estimating timber volume of forest stands using airborne laser scanner data. *Remote Sensing of Environment*, 61(2): 246-253.
- Næsset, E. et al., 2004. Laser scanning of forest resources: the Nordic experience. *Scandinavian Journal of Forest Research*, 19(6): 482-499.
- Nothdurft, A., Borchers, J., Niggemeyer, P., Saborowski, J. and Kändler, G., 2009. Eine Folgeaufnahme einer Betriebsinventur als zweiphasige Stichprobe zur Stratifizierung. *Allgemeine Forst- und Jagdzeitung*, 180: 133-140.
- Pelz, D. and Cunia, T., 1985. National Forest Inventories in Europe. *Mitteilungen der Abteilung für Forstliche Biometrie der Universität Freiburg*: 85-3.
- Pretzsch, H., 2002. *Grundlagen der Waldwachstumsforschung: mit 33 Tabellen*. Parey.
- Price, B., Wang, Z., Waser, L.T., Ginzler, C. and Zellweger, F., 2018. Modelling temporal change in biomass at the national extent with stereo aerial imagery. *Geophysical Research Abstracts*, 20.
- Rosset, C., 2005. Le WIS. 2, un instrument informatique performant pour une gestion efficiente et ciblée des écosystèmes forestiers | WIS. 2: a powerful software instrument for the efficient management of forest ecosystems. *Schweizerische Zeitschrift für Forstwesen*, 156(12): 496-509.
- Rosset, C. et al., 2017. MOTI - L'inventaire forestier simplifié par le smartphone. Editions Kessel.
- Rosset, C. et al., 2009. Management von Waldökosystemen mit WIS. 2—Was trägt WIS. 2 zur betrieblichen Planung bei. *Management zukunftsfähige Walnutzung. Grundlagen, Methoden und Instrumente*. Zürich, vdf Hochschulverlag AG an der ETH Zürich: 387-414.
- Rosset, C., Schütz, J.-P., Günter, M. and Gollut, C., 2014. From WIS. 2 to Smart Forest—a sustainable forest management decision support system. *Mathematical and Computational Forestry & Natural Resource Sciences*, 6(2): 89.
- Roussel, J. and Auty, D., 2017. *lidR: Airborne LiDAR Data Manipulation and Visualization for Forestry Applications*.
- Saarela, S. et al., 2015. Model-assisted estimation of growing stock volume using different combinations of LiDAR and Landsat data as auxiliary information. *Remote Sensing of Environment*, 158: 431-440.
- Saborowski, J., Marx, A., Nagel, J. and Böckmann, T., 2010. Double sampling for stratification in periodic inventories—Infinite population approach. *Forest ecology and management*, 260(10): 1886-1895.
- Schmid-Haas, P., 2003. Die Idee der Kontrollstichproben: ihre Entstehung und ihre Zukunft | The Swiss Continuous Forest Inventory: its genesis and its future. *Schweizerische Zeitschrift für Forstwesen*, 154(3-4): 102-111.



- Schütz, J.-P. and Rosset, C., 2016. Des modèles de production et d'aide à la décision sur smartphone. Outils et méthodes.
- Segal, M. and Xiao, Y., 2011. Multivariate random forests. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Data Mining and Knowledge Discovery*, 1(1): 80-87.
- Shao, G. and Reynolds, K.M., 2006. Computer applications in sustainable forest management, 11. Springer.
- Stahel, W., 2013. Statistische Datenanalyse: Eine Einführung für Naturwissenschaftler. Springer-Verlag.
- Vauhkonen, J. et al., 2011. Comparative testing of single-tree detection algorithms under different types of forest. *Forestry*, 85(1): 27-40.
- Waser, L.T., Ginzler, C. and Rehush, N., 2017. Wall-to-Wall tree type mapping from countrywide airborne remote sensing surveys. *Remote Sensing*, 9(8): 766.
- Weber, D., Ginzler, C., Flückiger, S. and Rosset, C., 2018. Potenzial von Sentinel-2-Satellitendaten für Anwendungen im Waldbereich. *Schweizerische Zeitschrift für Forstwesen*, 169(1): 26-34.
- Wittwer, R., 2016. Auswirkung der Lagegenauigkeit von Stichprobeninventuren auf die Schätzung der Grundfläche mit LiDAR-Daten, ETH, Zürich.
- Wittwer, R., Breschan, J. and Hill, A., 2017. Von Äpfeln und Birnen—Bedeutung der Stichproben-Lagegenauigkeit bei der Kombination mit Fernerkundungsdaten.

## Anhang

Anhang zu Teil E (Robuste Modelle): „Schlussbericht Betriebsinventur Analyse Lidar Daten Vegetationshöhenmodell“