



Andreas Hill\*, Johannes Stoffels\*\*, Joachim Langshausen\*\*\*

[andreas.hill@usys.ethz.ch](mailto:andreas.hill@usys.ethz.ch)

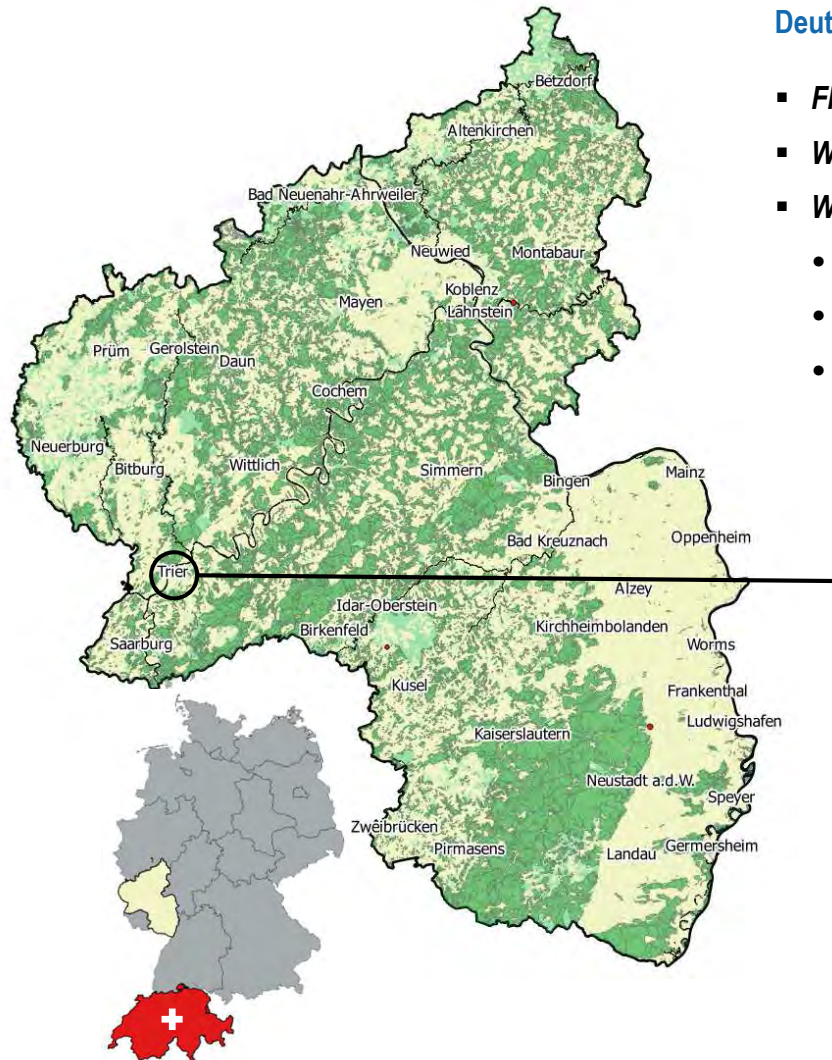
\* Departement Umweltsystemwissenschaften (ETH Zürich)

\*\* Umweltfernerkundung und Geoinformatik (Universität Trier)

\*\*\* Landesforsten Rheinland-Pfalz (Forsteinrichtung / Inventur)

## Schätzung der Holzvorräte in RLP auf Forstamt- und Revierebene durch Kombination von BWI<sup>3</sup> – und Fernerkundungsdaten

# Rheinland-Pfalz (RLP)



## Deutschland

- **Fläche:** 357'208 km<sup>2</sup>
- **Waldfläche:** 114'191 km<sup>2</sup> (32 %)
- **Waldbesitzarten**
  - Staatswald: 33 %
  - Kommunalwald: 19%
  - Privatwald: 48 %

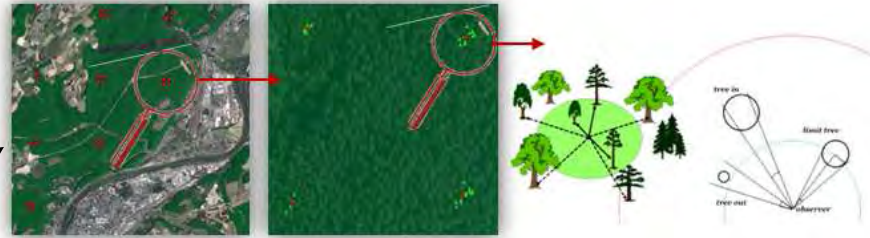
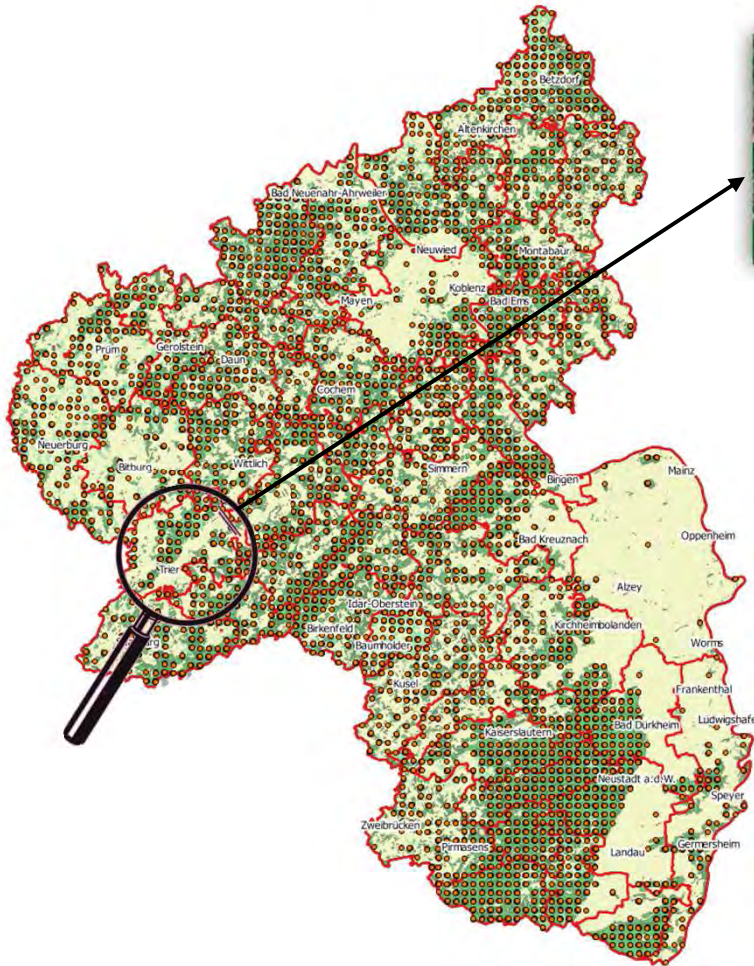
## Rheinland-Pfalz

- **Fläche :** 19'854 km<sup>2</sup>
- **Waldfläche :** 8400 km<sup>2</sup> (42 %)
- **Waldbesitzarten**
  - Staatswald: 27 %
  - Kommunalwald: 46 %
  - Privatwald: 27 %

Dritte Bundeswaldinventur <https://bwi.info>



# Schätzung auf Management-Ebenen mit BWI<sup>3</sup>-Daten



## Management Ebenen

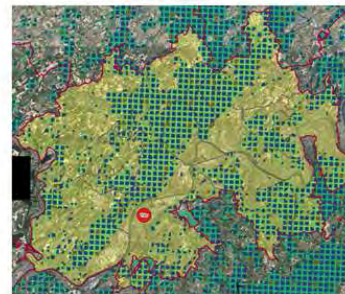
- 46 *Forstämter*
- 427 *Forstreviere*
- 104'184 *Waldorte*

## Terrestrische Inventur in RLP (BWI):

- 2 x 2 km Netz
- 5575 Plots à 1990 Trakte
- *Winkelzählprobe* auf Plot-Level
- Letzte Erhebung in 2012 (BWI<sup>3</sup>)

Small Area Units of Interest (orange: plots with terrestrial information available):

*Forstamt*



*Forstrevier*



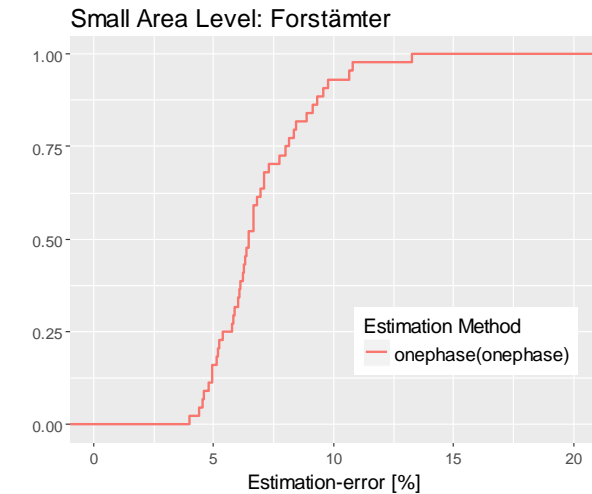
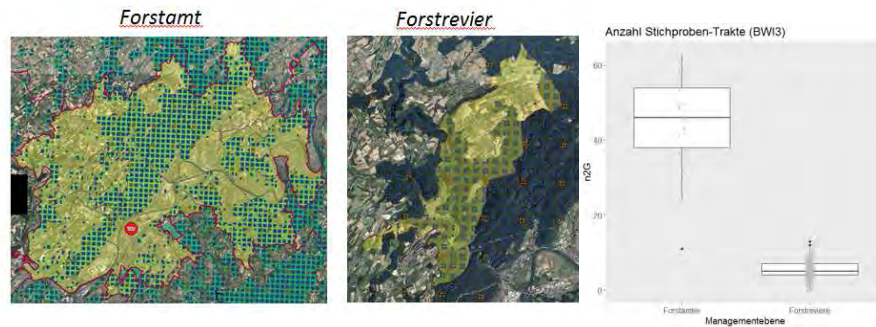
*Waldort (Stand-Level)*



← Sample Size

→ Spatial Detail

# Schätzung Holzvorrat nur mit BWI<sup>3</sup>-Daten

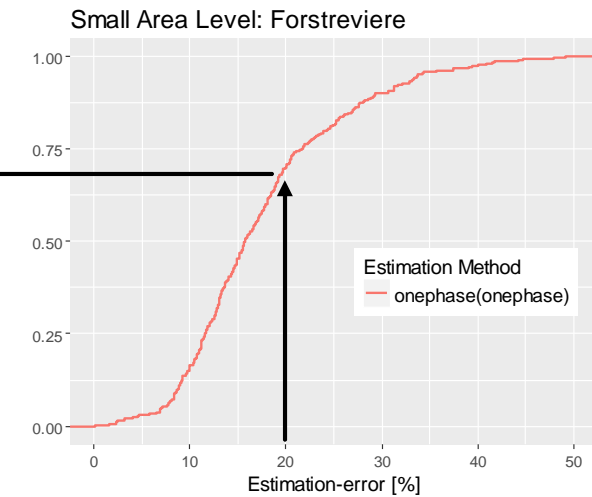
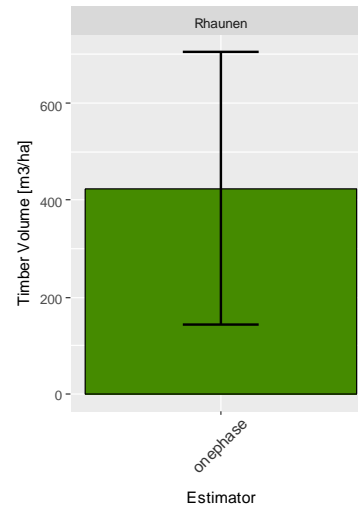


## Dilemma

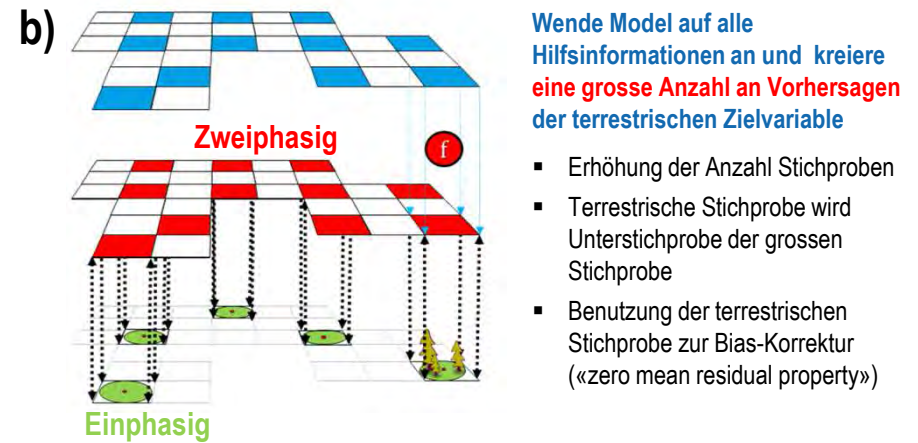
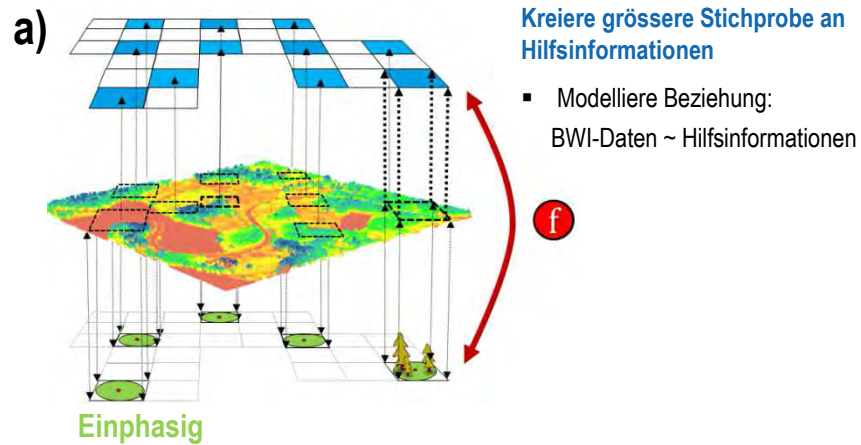
«Terrestrische Inventur bedeutet einen hohen finanziellen Aufwand, aber die Daten sind aufgrund der Schätzfehler nicht unterhalb der Landesebene verwertbar»

## Lösungsansätze

- Finanziellen Aufwand erhöhen (mehr Stichproben im Feld)
- Alternative Inventurmethode:
  - Finanziellen Aufwand beibehalten oder reduzieren und trotzdem Schätzfehler verringern

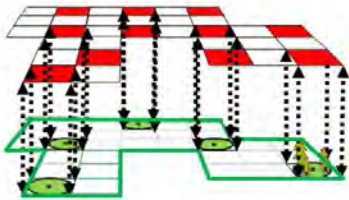


# Konzept der zweiphasigen Waldinventuren



# Konzept der zweiphasigen Waldinventuren

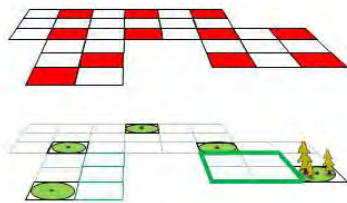
## c.1) Globale Schätzung



$$\hat{Y}_{c,F,reg} = \frac{1}{n_1} \sum_{x \in S_1} \hat{Y}_c(x) + \frac{1}{n_2} \sum_{x \in S_2} \hat{R}_c(x) =: \hat{Z}_{c,1}^t \hat{\beta}_{c,s_2}$$

$$\hat{V}(\hat{Y}_{c,F,reg}) =: \hat{Z}_{c,1}^t \hat{\Sigma}_{\hat{\beta}_{c,s_2}} \hat{Z}_{c,1} + \hat{\beta}_{c,s_2}^t \hat{\Sigma}_{\hat{Z}_{c,1}} \hat{\beta}_{c,s_2}$$

## c.3) Kleingebietsschätzung (potentiell verzerrt)



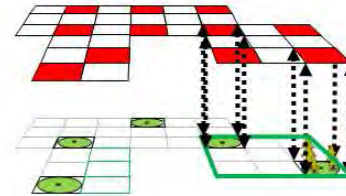
- **Keine** Bias-Korrektur durch Residuen möglich

- **Synthetic small area estimator**

$$\hat{Y}_{c,G,psynth} = \hat{Z}_{c,1,G}^t \hat{\beta}_{c,s_2}$$

$$\hat{V}(\hat{Y}_{c,G,psynth}) = \hat{Z}_{c,1,G}^t \hat{\Sigma}_{\hat{\beta}_{c,s_2}} \hat{Z}_{c,1,G} + \hat{\beta}_{c,s_2}^t \hat{\Sigma}_{\hat{Z}_{c,1,G}} \hat{\beta}_{c,s_2}$$

## c.2) Kleingebietsschätzung (unverzerrt)



- Bias-Korrektur durch Residuen

- **Small area estimator**

$$\hat{Y}_{c,G,psmall} = \hat{Z}_{c,1,G}^t \hat{\beta}_{c,s_2} + \frac{\sum_{x \in S_2,G} M_G(x) \hat{R}_{c,G}(x)}{\sum_{x \in S_2,G} M_G(x)}$$

$$\begin{aligned} \hat{V}(\hat{Y}_{c,G,psmall}) &= \hat{Z}_{c,1,G}^t \hat{\Sigma}_{\hat{\beta}_{c,s_2}} \hat{Z}_{c,1,G} + \hat{\beta}_{c,s_2}^t \hat{\Sigma}_{\hat{Z}_{c,1,G}} \hat{\beta}_{c,s_2} \\ &+ \frac{1}{n_{2,G}(n_{2,G} - 1)} \sum_{x \in S_2,G} \left( \frac{M_G(x)}{M_{2,G}} \right)^2 (\hat{R}_{c,G}(x) - \bar{\hat{R}}_{2,G})^2 \end{aligned}$$

- **Extended small area estimator**

$$\mathcal{Z}_c^t(x) = (\mathbf{Z}_c^t(x), I_{c,G}(x)) \in \mathcal{R}^{(p+1)}$$

$$\hat{Y}_{c,G,psynth} = \hat{\mathcal{Z}}_{c,1,G}^t \hat{\theta}_{c,s_2}$$

$$\hat{V}(\hat{Y}_{c,G,psynth}) = \hat{\mathcal{Z}}_{c,1,G}^t \hat{\Sigma}_{\hat{\theta}_{c,s_2}} \hat{\mathcal{Z}}_{c,1,G} + \hat{\theta}_{c,s_2}^t \hat{\Sigma}_{\hat{\mathcal{Z}}_{c,1,G}} \hat{\theta}_{c,s_2}$$

Mandallaz, D. and Hill, A. and Massey, A. (2016). *Design-based properties of some small-area estimators in forest inventory with two-phase sampling*. ETH Zurich, Department of Environmental Systems Science, Tech. Rep. Available from <http://e-collection.library.ethz.ch>.

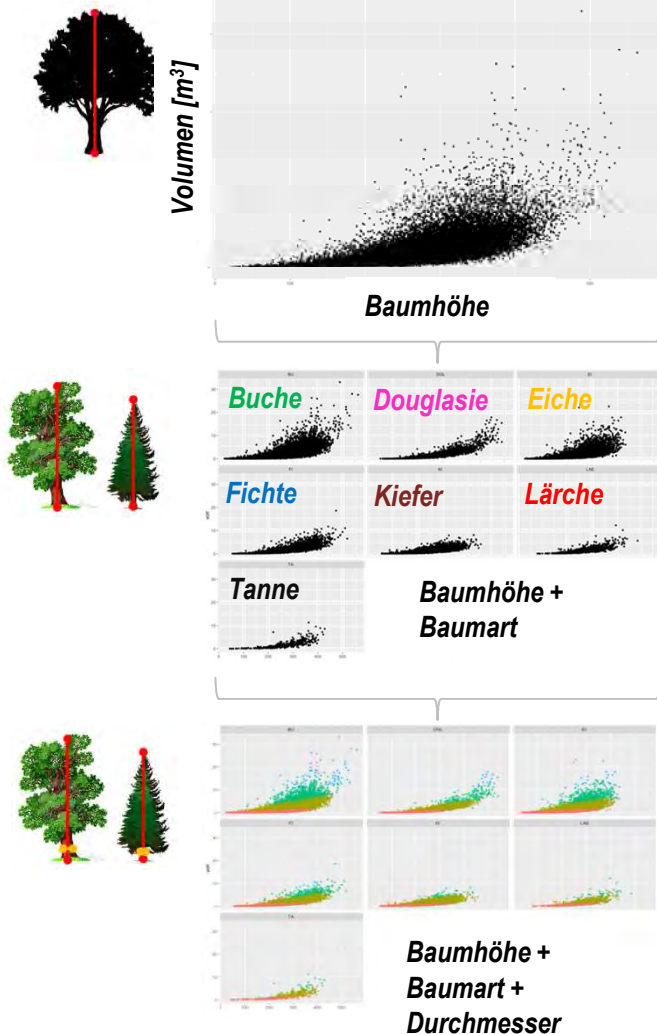
Mandallaz, D. (2013). *Design-based properties of some small-area estimators in forest inventory with two-phase sampling*. Can. J. For. Res. 43: 441-449

Hill, A. (2013). *Comparison of Small Area Estimators in Forest Inventory using Airborne Laserscanning Data* (Master thesis Georg-August-University Göttingen, 2013).

Mandallaz, D. (2007). *Sampling techniques for forest inventories*. Chapter 4. CRC Press.

# Vorhersage des Holzvorrats auf Plotebene

## Einzelbaum - Ebene



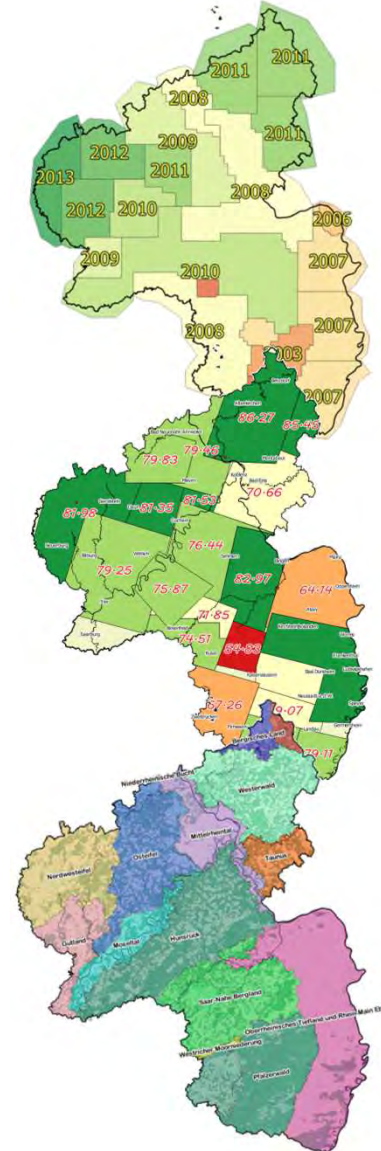
## Plot Level

### LiDAR – Kronenhöhemodell

- Räumliche Auflösung: 5 m
- Sehr heterogener Informationsgehalt
  - Zeitfenster bis zu 10 Jahren zwischen LiDAR-Befliegung und BWI<sup>3</sup>-Aufnahme
  - Variierende Punktdichte (1 p/m<sup>2</sup> – 5 p/m<sup>2</sup>)

### Baumartenklassifikation (Satelliten-Daten)

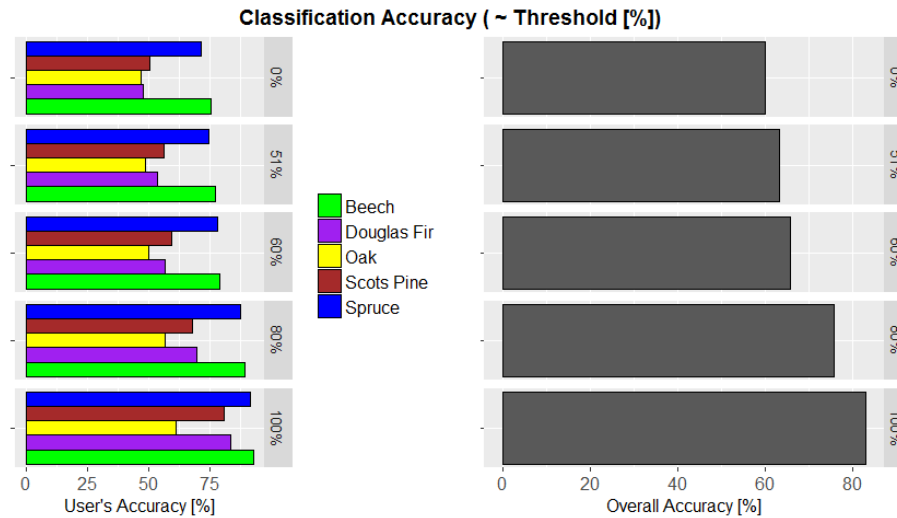
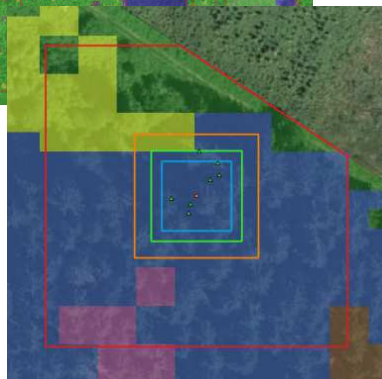
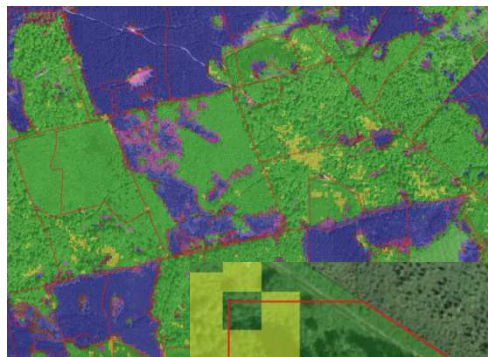
- Räumliche Auflösung: 10 m
- Klassifiz. Arten: **Buche**, **Douglasie**, **Eiche**, **Fichte**, **Kiefer**
- Heterogener Informationsgehalt
  - Räumliche variierende Klassifikationsgenauigkeit



### Bioklimatische Wuchsgebiete

- 15 Wuchsgebiete
- Z.t. stark ausgeprägte bioklimatische Gradienten
  - Von sub-mediteranen bis zu montanen Regionen

# Baumartenklassifikation (Satelliten-Daten)

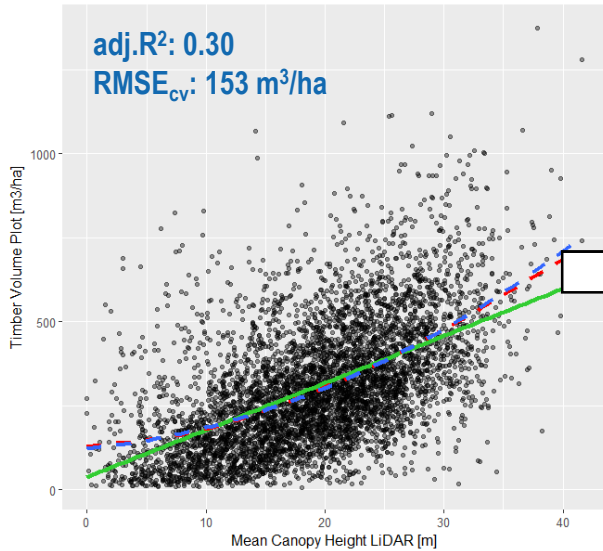


## Validierung der Baumartenklassifikation auf Plot-Ebene:

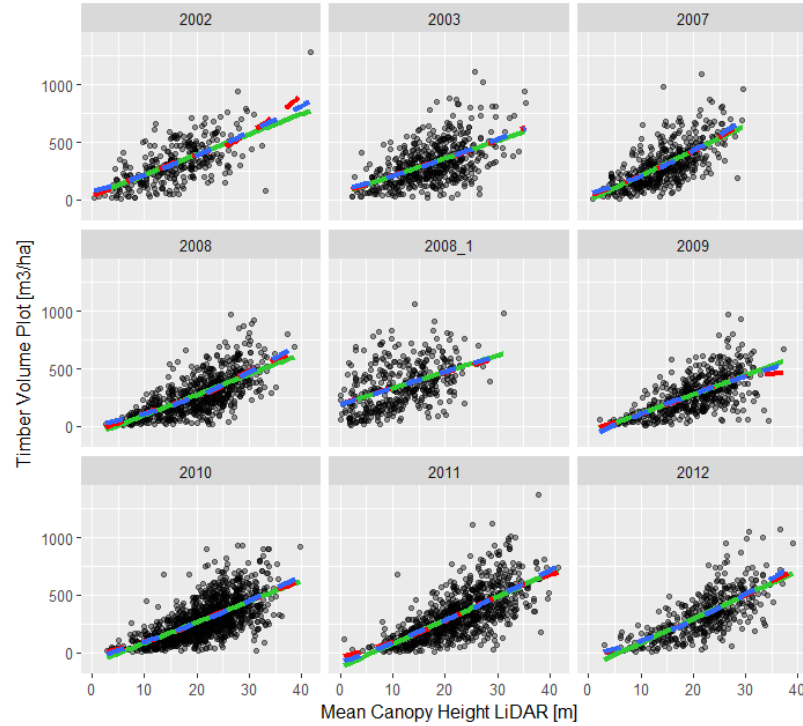
- **“Hard-Classification” der Hauptbaumarten auf Basis 80%-Schwellwert:**
  - Gute Nutzergenauigkeiten für Buche, Fichte, Kiefer und Douglasie (70% -90%)
  - Akzeptable Nutzer Genauigkeit für Eiche (60%)
  - Gesamtgenauigkeit 76%



# OLS Regression Model (Plot Level)



Vorrat = f(MCH, LiDAR-Befliegungsjahre)

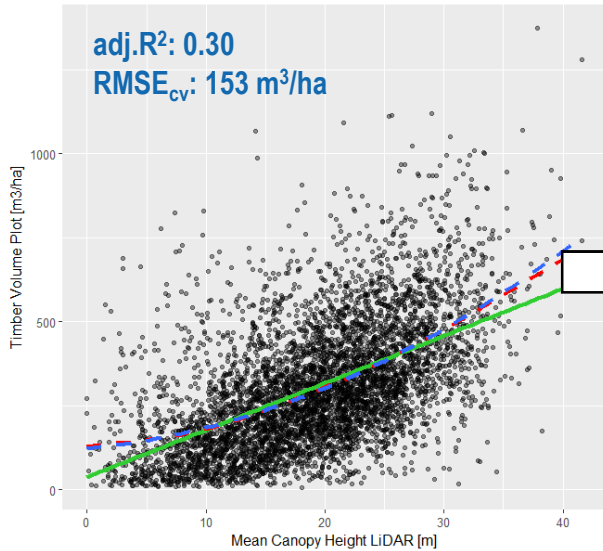


Model

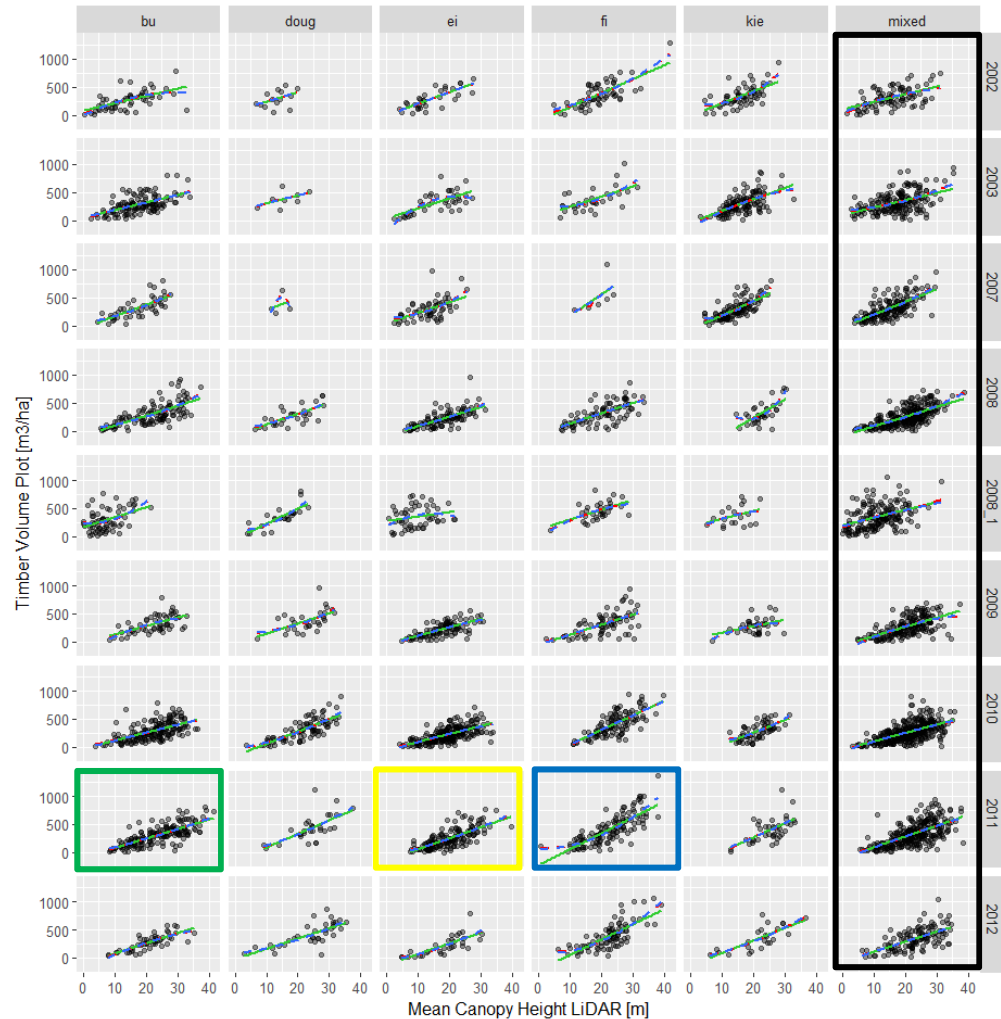
MCH, LiDAR-Jahr

adj.R<sup>2</sup>: 0.42  
RMSE<sub>cv</sub>: 140.3 m<sup>3</sup>/ha

# OLS Regression Model (Plot Level)



Vorrat = f(MCH, LiDAR-Befliegungsjahre , Baumarten)



Model

MCH, LiDAR-Jahr

adj.R<sup>2</sup>: 0.42  
RMSE<sub>cv</sub>: 140.3 m<sup>3</sup>/ha

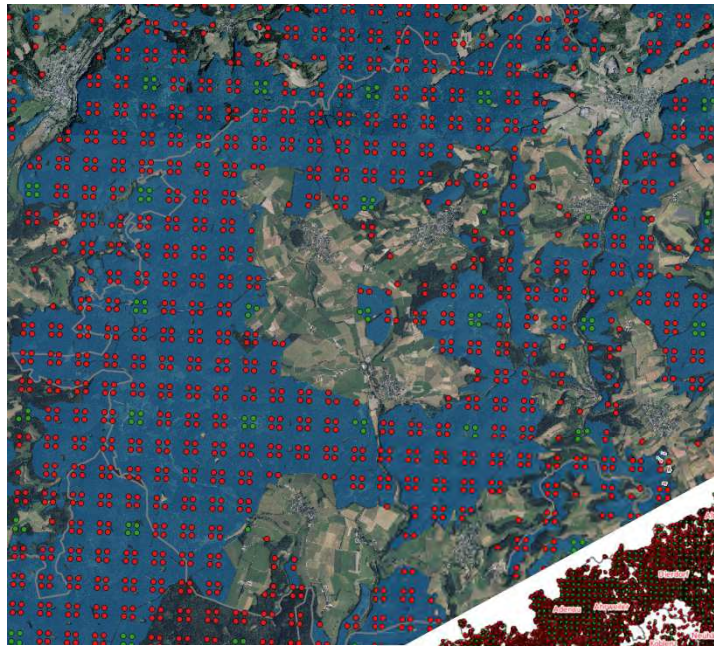
MCH, LiDAR-Jahr,  
Baumarten

adj.R<sup>2</sup>: 0.45  
RMSE<sub>cv</sub>: 137.9 m<sup>3</sup>/ha

MCH, LiDAR-Jahr,  
Baumarten,  
Wuchgebiete

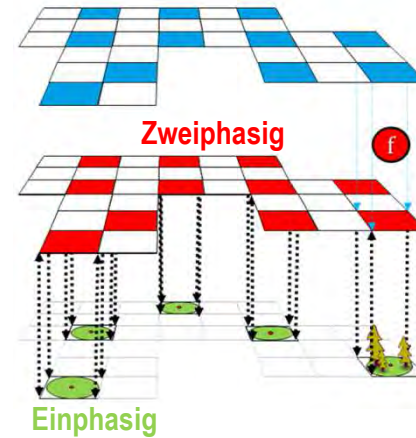
adj.R<sup>2</sup>: 0.45  
RMSE<sub>cv</sub>: 137.6 m<sup>3</sup>/ha

# Konzept der zweiphasigen Waldinventuren



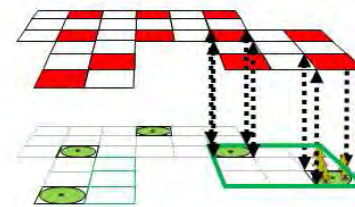
## Stichprobenmenge

<b>1-phasig</b>	1862 Trakte	2 x 2km
	(5193 Plots)	
<b>2-phasig</b>	30'281 Trakte	500 x 500 m
	(86'529 Plots)	



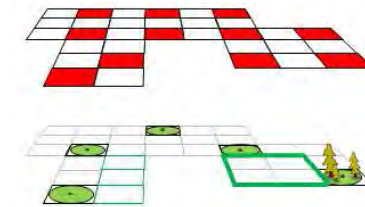
Wende Model auf alle Hilfsinformationen an und **kreiere eine grosse Anzahl an Vorhersagen** der terrestrischen Zielvariable

- Erhöhung der Anzahl Stichproben
- Terrestrische Stichprobe wird Unterstichprobe der grossen Stichprobe
- Benutzung der terrestrischen Stichprobe zur Bias-Korrektur («zero mean residual property»)



### Kleingebietsschätzung (unverzerrt)

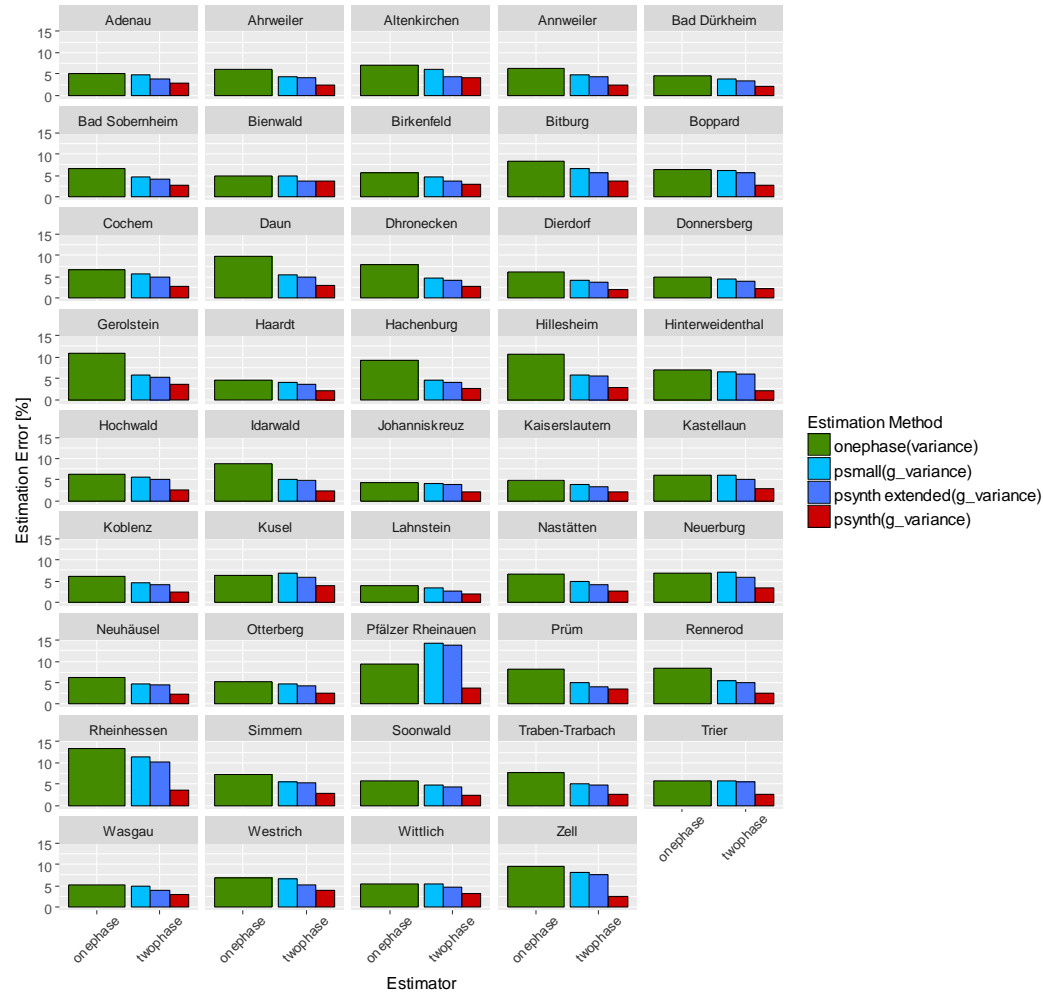
- Bias-Korrektur durch Residuen
- **Small area estimator**
- **Extended small area estimator**



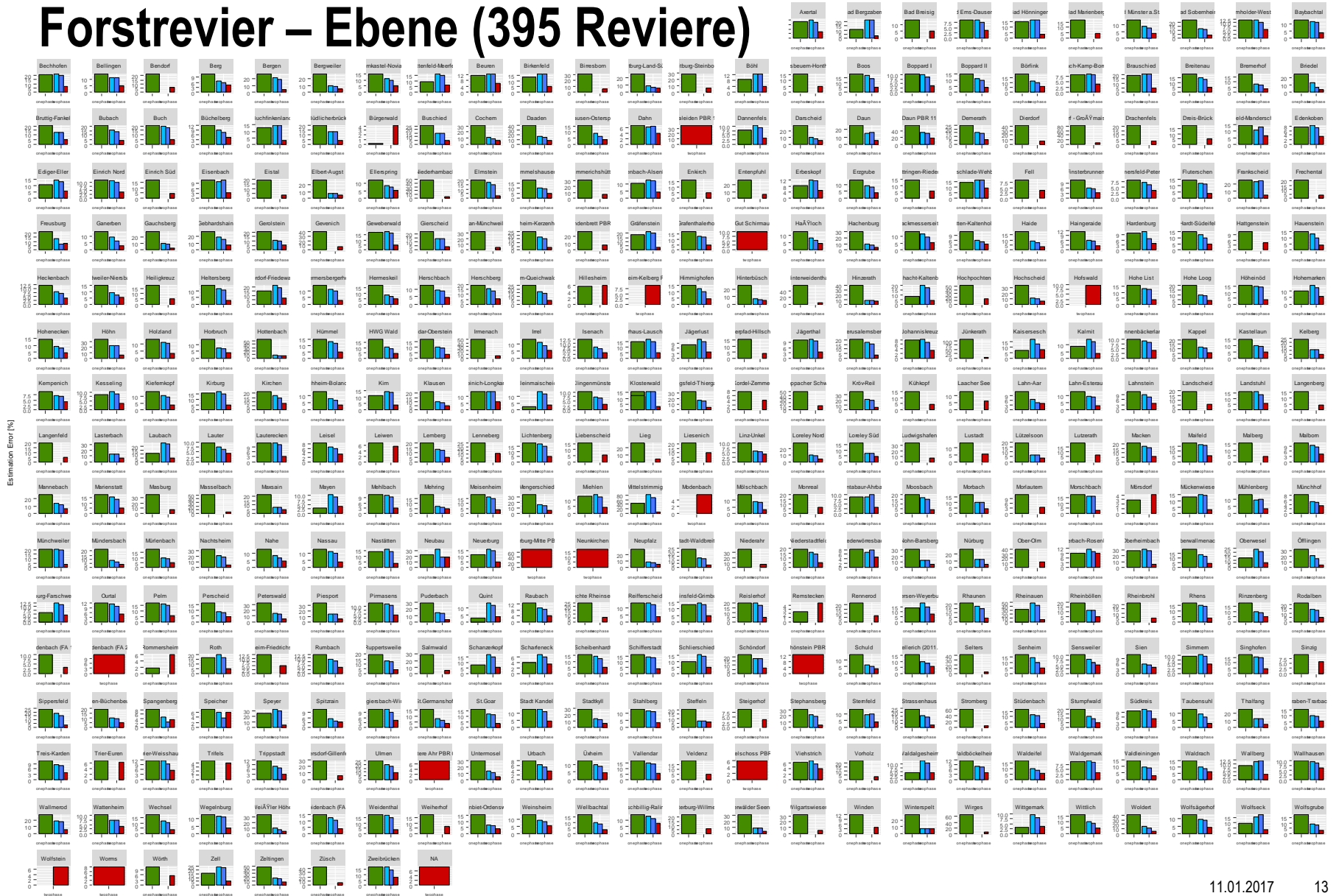
### Kleingebietsschätzung (potentiell unverzerrt)

- **Keine** Bias-Korrektur durch Residuen möglich
- **Synthetic small area estimator**

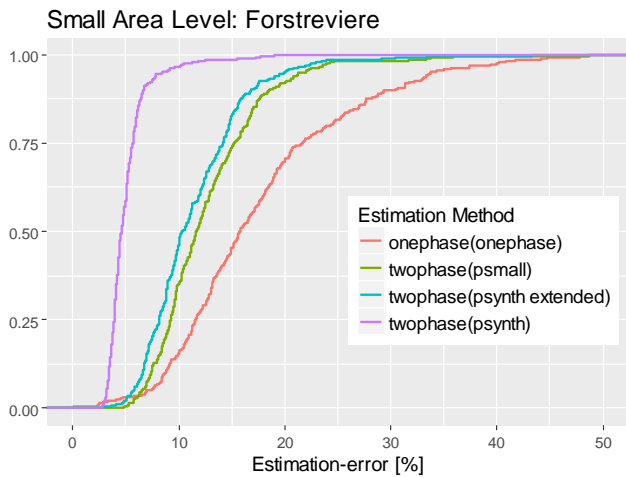
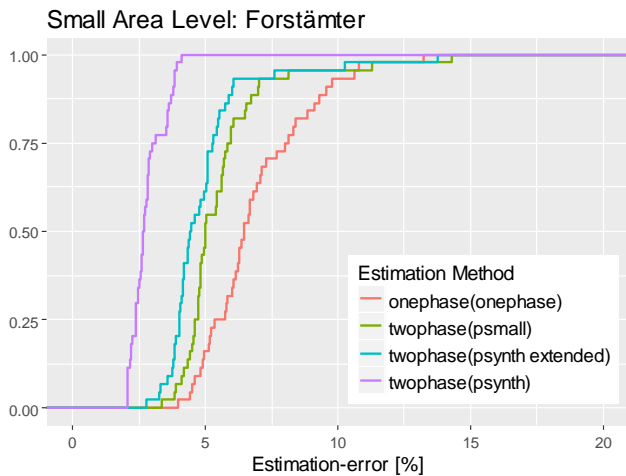
# Forstamt – Ebene (44 Forstämter)



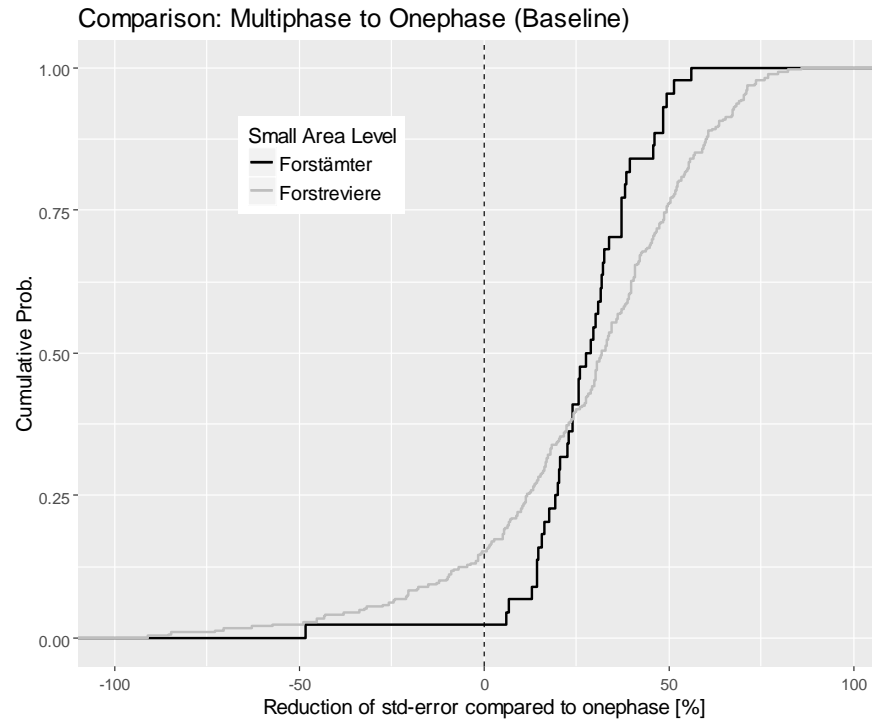
# Forstrevier – Ebene (395 Reviere)



# Vergleich der Methoden (Schätzfehler)



Estimation Error: Std-error / Point Estimate



**Forstämter (unverzerrte Schätzer):**

- 1-phasig: 10% der Fehler < 5%, max. 12%
- 2-phasig: 60% der Fehler < 5%, max 12%

**Forstreviere (unverzerrte Schätzer):**

- 1-phasig: in 50 %, Fehler zwischen 17% and 50%
- 2-phasig: In 50%, Fehler zwischen 10% and 25%

### Ausgangssituation:

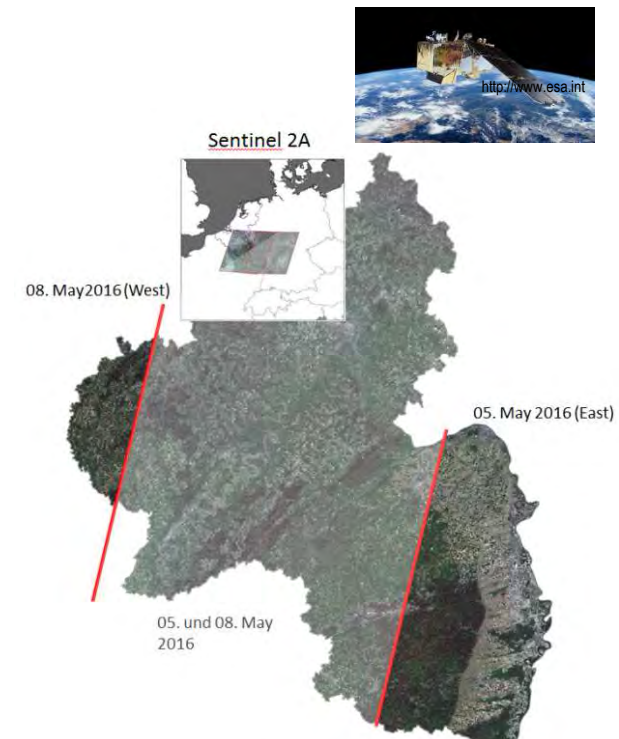
- Hoher finanzieller Aufwand für terrestrische Inventur <> Schätzungen zu ungenau für Verwertung auf Planungsebenen

### Bisherige Ergebnisse:

- Deutliche Reduktion der Schätz- Ungenauigkeiten auf Forstamt- und Revierebene möglich
- Vorhandene Daten intensiver genutzt
- Heterogenität in Fernerkundungs-Produkten in Modellen teilweise abgefangen

### In naher Zukunft:

- Verbesserung der Datenqualität durch:
  - Sentinel2 – Daten zur Baumartenklassifikation (aktueller und homogener)
  - Luftbild-basierte Kronenhöhenmodelle (alle 2 Jahre aktualisiert)
- *Erhöhung der Modellgenauigkeit / weitere Reduktion der Schätzfehler*



Quelle: Fernerkundung Universität Trier (feut)