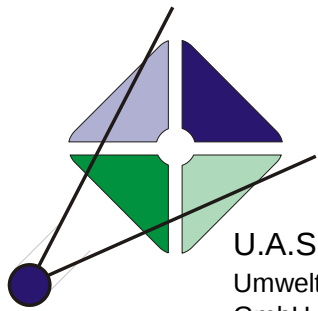




U.A.S.  
Umwelt- und Agrarstudien  
GmbH

Fachgebiet Biostatistik  
Universität Hohenheim  
Stuttgart



# OFE – Versuche zur Prüfung verschiedener Verfahren der Phosphor-Bedarfsermittlung und der teilflächenspezifischen P-Düngung in Ackerkulturen <sup>(1)</sup>

Jörg Perner

(unter Mitarbeit von Mario Schein und Feix Reinsch)

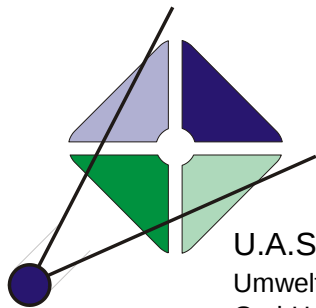
*U.A.S. Umwelt- und Agrarstudien GmbH*

&

Hans-Peter Piepho

*Universität Hohenheim, Fachgebiet Biostatistik*

<sup>(1)</sup> Datengrundlage => OPTIPHOS-Projekt, 2020-22, gefördert durch die Thüringer Aufbaubank (TAB-12472/05.17)



U.A.S.  
Umwelt- und Agrarstudien  
GmbH

Fachgebiet Biostatistik  
Universität Hohenheim  
Stuttgart



# Tandem OPTIPHOS <sup>(1)</sup>

## Teil 1

Kurze Projektvorstellung und (ursprünglicher) Ansatz einer Ertragsabschätzung

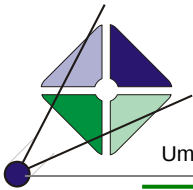
*Jörg Perner*

## Teil 2

Vorstellung weiterführender (robuster) Modelle zur Ertragsabschätzung

*Hans-Peter Piepho*

<sup>(1)</sup> Datengrundlage => OPTIPHOS-Projekt, 2020-22, gefördert durch die Thüringer Aufbaubank (TAB-12472/05.17)

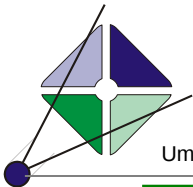


### **Projekthalte** (partim):

- Ertragssicherung durch optimierte (teilflächenspezifische) P-Düngung: (i) Kulturbedarf, (ii) Vermeidung überhöhter P-Düngung (Erosionsrisiko, Austrag), (iii) Berücksichtigung von Mangelflächen
- Prüfung der Aussagekraft von Zusatzmethoden der P-Bodenuntersuchung in Ergänzung zur CAL-Methode (pfl.verfügbares P) bei der Düngbedarfsplanung; Gesamtphosphor, Phosphorfreisetzung, Phosphorsättigung/Speicherkapazität
- Nachweis der P-Düngewirkung in On-Farm-Versuchen nach teilflächenspezifischer P-Düngung (Großparzellenversuche); 2 Jahre (2020, 2021)

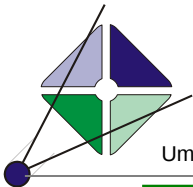
### **Projektpartner:**

- JenaBios GmbH (Projektkonzeption, Untersuchungswesen, Düngplanung)
- U.A.S. GmbH (OFE-Planung, GIS, Drohnenbefliegungen, Ertragsermittlungen)
- EHW – Service GmbH (teilflächenspezifische Probenahmen, Streukarten)
- 4 hinsichtlich der Bodencharakteristik (geol. Herkunft) für Thüringen repräsentative Landwirtschaftsbetriebe (Flächenbereitstellung, teilflächenspez. P-Düngung)



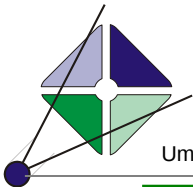
# Variantenplan der On-Farm-Versuche

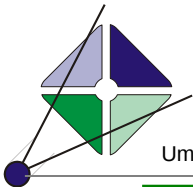
| Prüf-<br>glieder | Kurzbezeichnung                                     | Erläuterungen zur P-Düngeplanung bzw. P-Düngung                                                                                                                                                                                                                                 |
|------------------|-----------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>1</b>         | Kontrolle                                           | ohne P-Düngung                                                                                                                                                                                                                                                                  |
| <b>2</b>         | Starres (1-ha)<br>Probenahme-Raster (I)             | Düngung einheitlich auf Grundlage mittlerer P-Gehalte ( <b>nur CAL-P</b> ) der Fläche und starrem 1-ha-Probenahme-Raster; Bezug zu mittlerem Ertrag <u>ohne</u> Berücksichtigung von Ertragszonen                                                                               |
| <b>3</b>         | Komplexes (integriertes)<br>Probenahme-Raster (I)   | Düngung auf Grundlage der teilflächenspezifischen P-Gehalte ( <b>nur CAL-P</b> ) der Fläche nach komplexer (integrierter) Probenahme; Bezug zu mittlerem Ertrag <u>ohne</u> Berücksichtigung von Ertragszonen                                                                   |
| <b>4</b>         | Komplexes (integriertes)<br>Probenahme-Raster (II)  | Düngung auf Grundlage der teilflächenspezifischen P-Gehalte ( <b>nur CAL-P</b> ) der Fläche nach komplexer (integrierter) Probenahme; <b>mit</b> Berücksichtigung von Ertragszonen (3 Ertragszonen)                                                                             |
| <b>5</b>         | Komplexes (integriertes)<br>Probenahme-Raster (III) | Düngung auf Grundlage der teilflächenspezifischen modifizierten P-Gehalte ( <b>CAL-P plus P-Freisetzung</b> ) der Fläche nach komplexer (integrierter) Probenahme und unter Berücksichtigung der P-Nachlieferung; <b>mit</b> Berücksichtigung von Ertragszonen (3 Ertragszonen) |
| <b>6</b>         | Starres (1-ha)<br>Probenahme-Raster (II)            | Düngung auf Grundlage der teilflächenspezifischen modifizierten P-Gehalte ( <b>CAL-P plus P-Freisetzung</b> ) der Fläche nach starrem 1-ha-Probenahme-Raster und unter Berücksichtigung der P-Nachlieferung; <b>mit</b> Berücksichtigung von Ertragszonen (3 Ertragszonen)      |

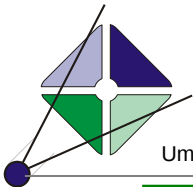


## LWB/ Standort Ranis

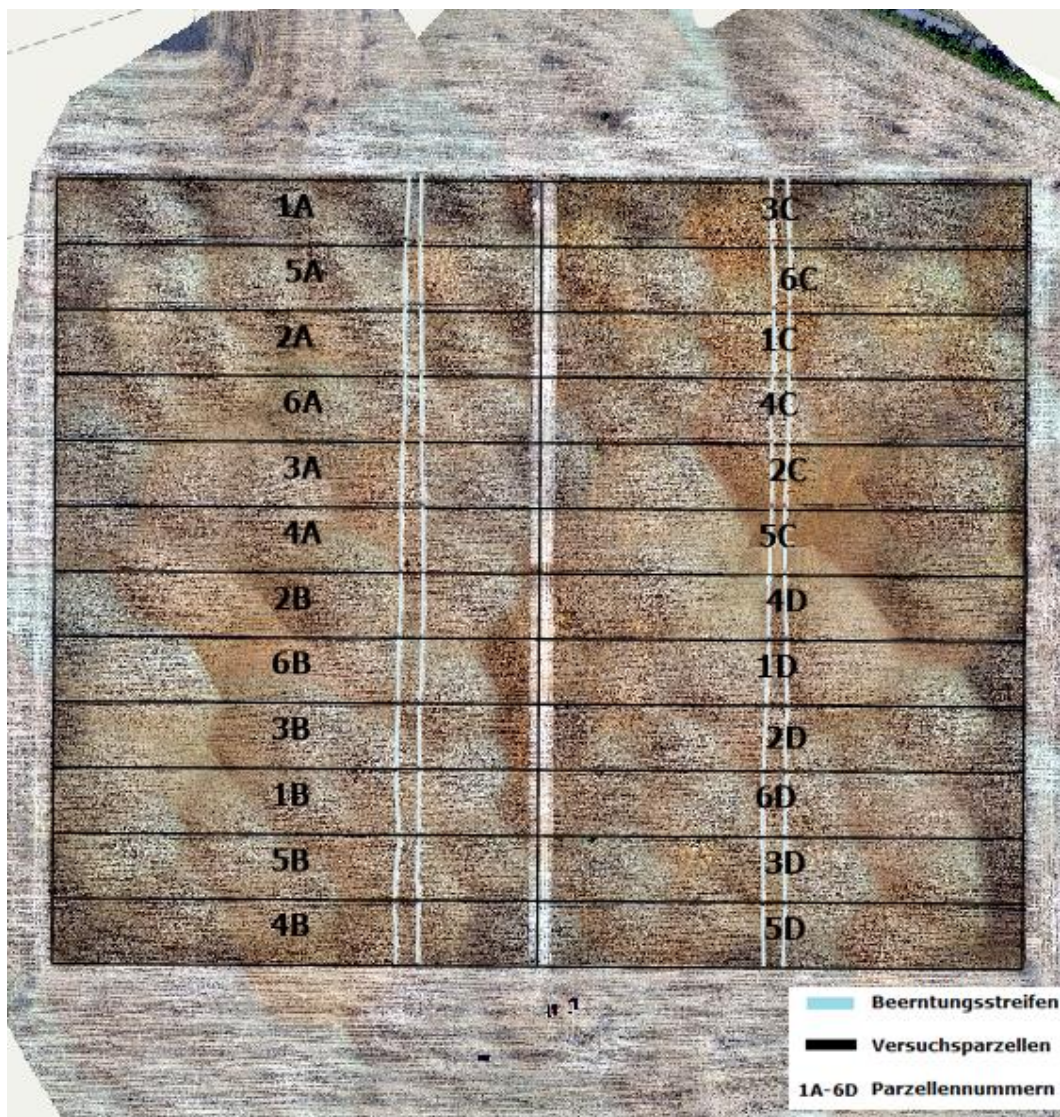


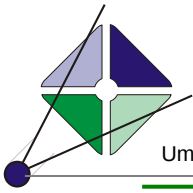






## LWB/ Standort Alperstedt



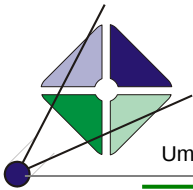


## Design:

- Versuchsanlagen ortsfest, georeferenziert
- 6 Prüfglieder, 4-fach wiederholt und randomisiert
- Großparzellen: Breite => Arbeitsbreiten (teilweise 2-fach); Länge in Abhängigkeit vom Zuschnitt der Feldstücke zwischen ca. 200 – 300 m

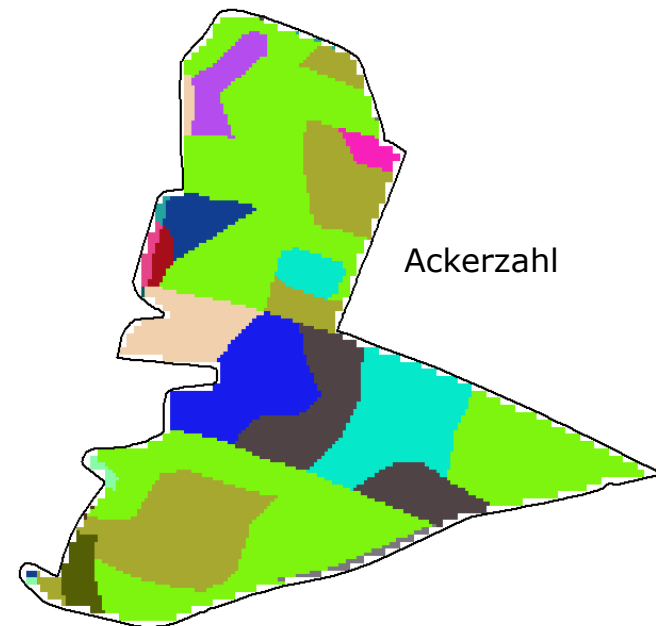
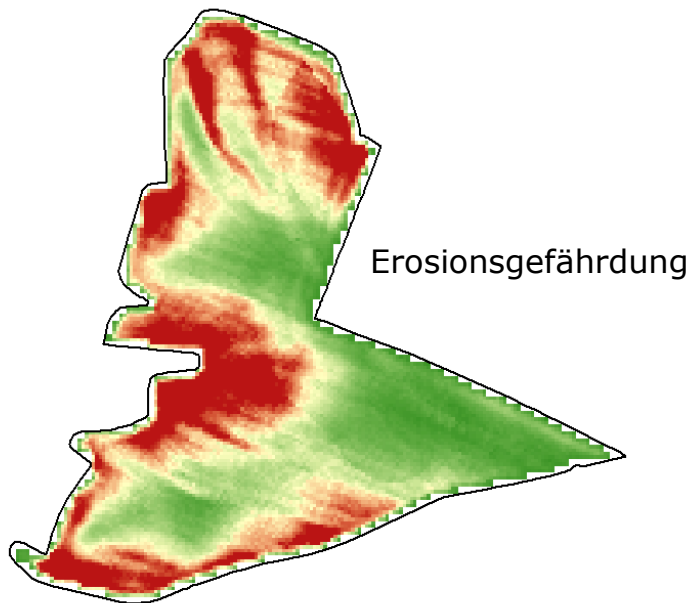
## Fragen:

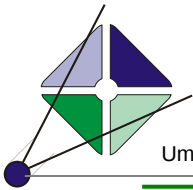
- (1) Ist in den Düngungsvarianten (vorzugsweise nach Düngung im integrierten Raster - IR) grundsätzlich eine Ertragswirkung der sich ergebenden teilflächenspezifischen P-Düngung nachweisbar?
- (2) Ist diese Ertragswirkung bei Düngung nach IR stärker als in den anderen teilflächen-spezifischen Varianten?
- (3) Kann die eingesetzte P-Menge mittels einer Düngung nach IR gegenüber einer durchschnittlichen P-Düngung bzw. starrer Rasterung reduziert werden?



## Komplexe (integrierte) Rasterung

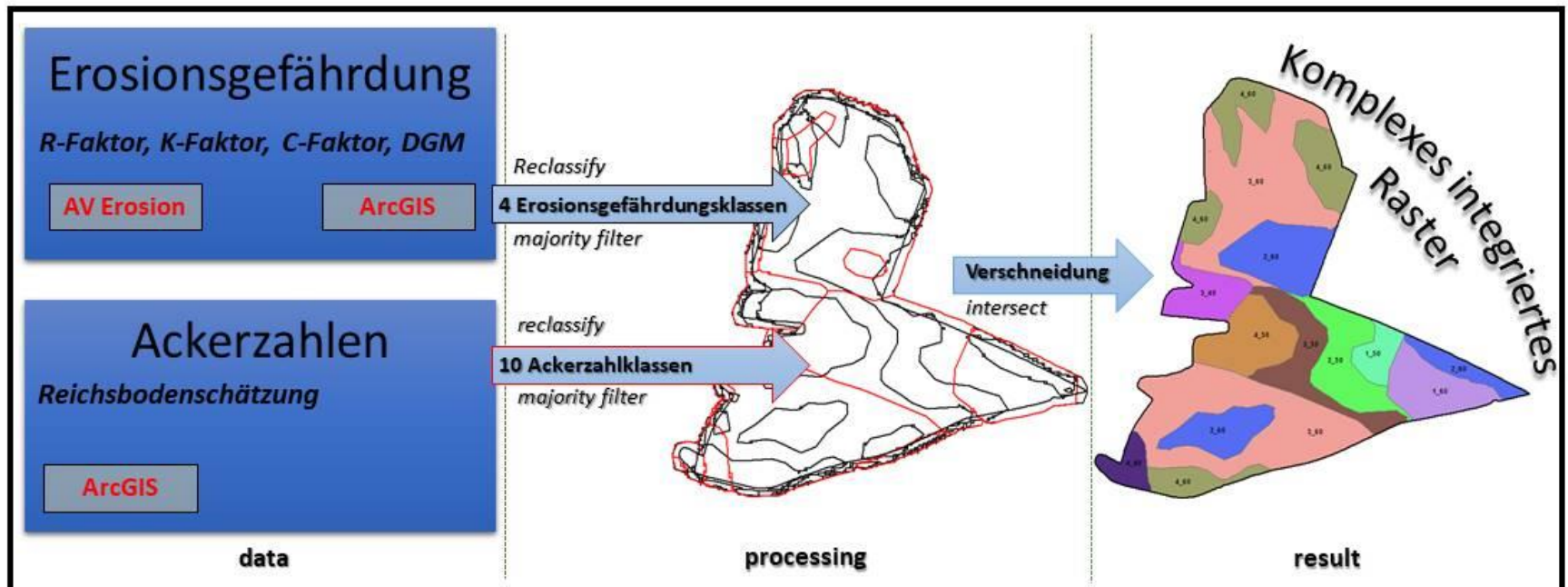
- Beprobung (für P bzw. GBU) üblicherweise im 3-ha-, selten auch im 1-ha-Raster
- diese starren Raster gewährleisten eine stringente und einfache Durchführung, orientieren sich aber nicht an natürlichen Bodengegebenheiten
- die starren (Probenahme-) Grenzen verlaufen nicht an den (natürlichen) Grenzen unterschiedlicher Bodenbereiche (unterschiedliche pflanzenverfügbare P-Gehalte und ggf. Ertragspotenziale); daher ggf. differierender P-Düngungsbedarf

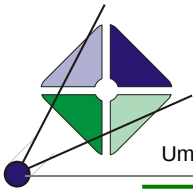




# Komplexe (integrierte) Rasterung

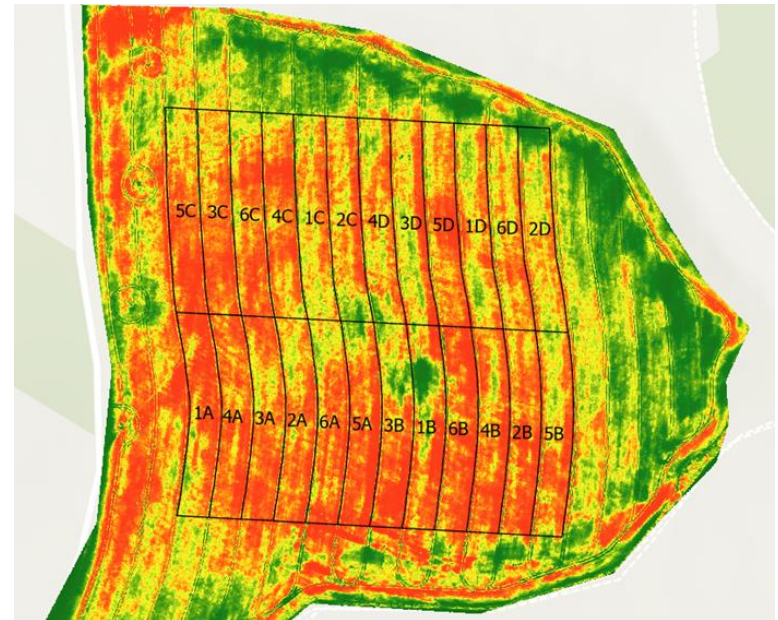
- Beprobung (für P bzw. GBU) meist im 3-ha-, oder 1-ha-Raster; berücksichtigen nicht unterschiedlicher Bodenbereiche (unterschiedliche pflanzenverfügbare P-Gehalte und ggf. Ertragspotenziale)
- Komplexe (integrierte) Rasterung (IR): Verschneidung im GIS
  - von Ackerzahlen-Layer (10 Klassen) => aus Reichsbodenschätzung, Ertragspotenzial
  - und Erosionsrisiko-Layer (4 Klassen) => ABAG

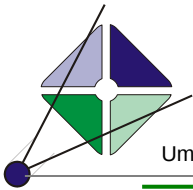




Beispiel: Standort Ranis

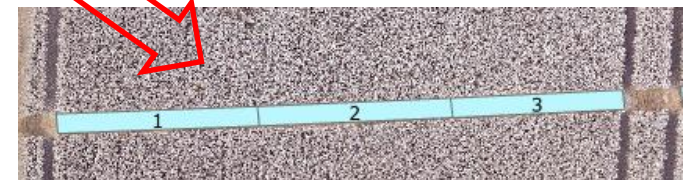
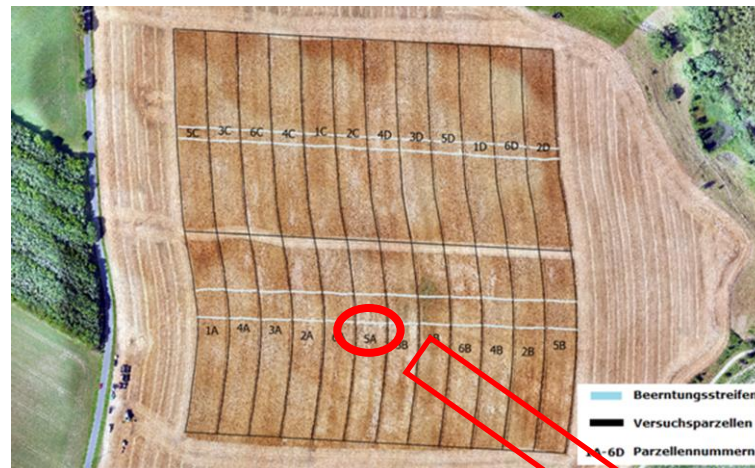
- Befliegungen der Versuchsanlagen mit Drohne (Multispektral) zu 3 Zeitpunkten: (i) BBCH 50, (ii) BBCH 71 und (iii) BBCH 75/77 und NDVI-Kalkulation (10 cm x 10 cm - Raster) für die 3 Befliegungszeitpunkte

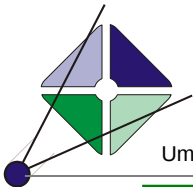




## Beispiel: Standort Ranis

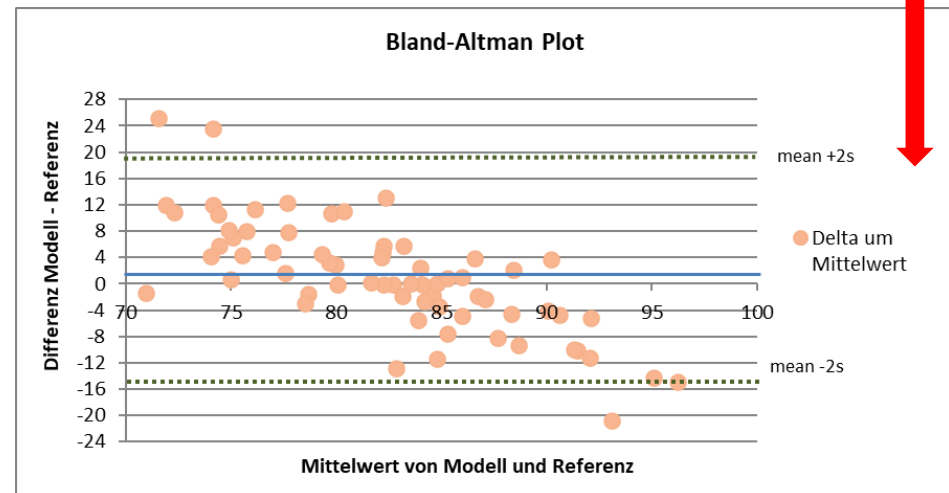
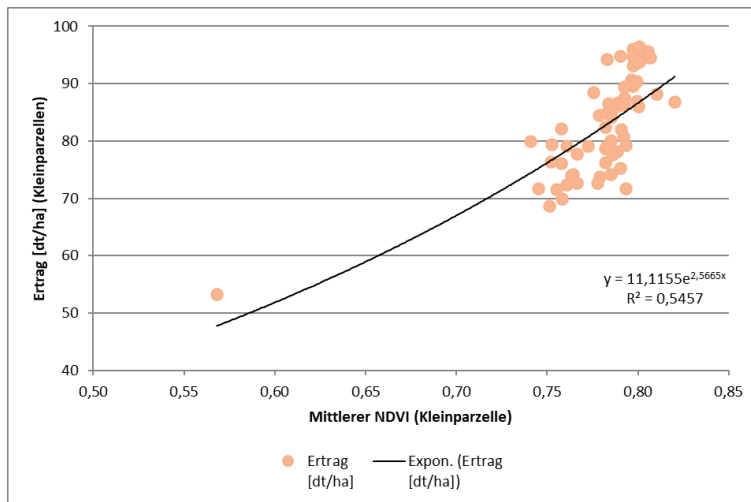
- Beertung von jeweils 2 (repräsentativen) Ernte-Transekten mit jeweils 3 Ernteparzellen („Kleinparzellen“; 1,5 m x 8 m) pro Großparzelle (6 Ertragswerte pro Großparzelle; Pseudoreplikationen)
- Für die gesamte Versuchsanlage: 6 Prüfglieder x 4 Wiederholungen x 6 Ertragswerte = 144 Ertragswerte
- Kalkulation der mittleren NDVI-Werte für jede der 144 Ernte-/Kleinparzellen für die 3 Befliegungszeitpunkte; daher 3 Datenpaar-Datensätze (Erträge vs. NDVI-Werte)

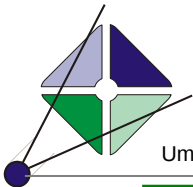




## Beispiel: Standort Ranis

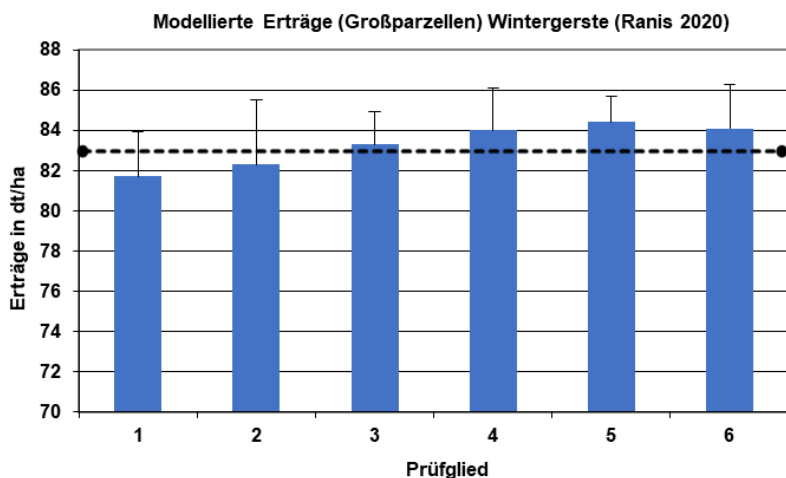
- Modellableitung: Nutzung von 50 % der Ertrags-/NDVI-Datenpaare für die Modellanpassung (räumlich +/- gleichmäßige Verteilung der Datenpaare); Auswahl des besten Regressionsmodells
- Modellvalidierung: Nutzung der restlichen 50 % der Datenpaare und Ertragskalkulation auf Grundlage der NDVI-Werte des ausgewählten Regressionsmodells
- Güteprüfung der modellierten Erträge vs. der real erfassten Erträge mittels Bland-Altman-Methode
- Bland-Altman-Plot: Auftragen der Mittelwerte von 2 Methoden gegen die Differenz der Wertepaare



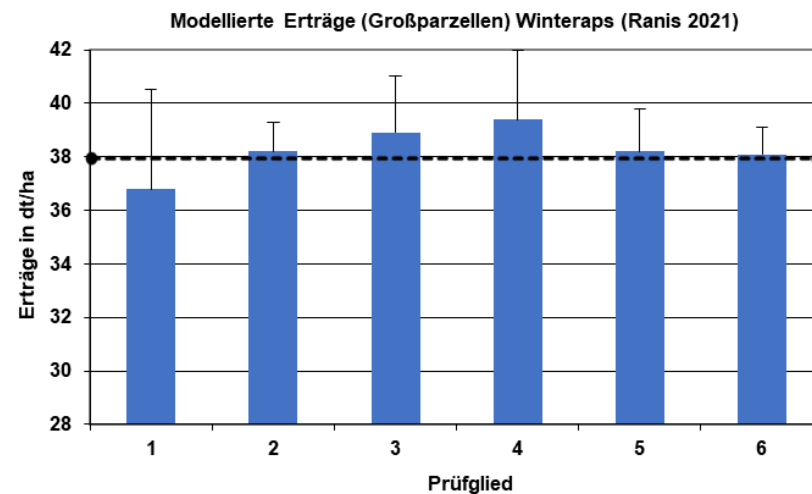


## Beispiel: Standort Ranis

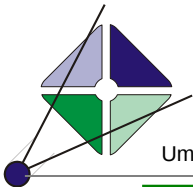
- Nutzung des final ausgewählten Regressionsmodells zur Ertragskalkulation für die (6 x 4 ) Großparzellen der Versuchsanlage (NDVI-Mittelwerte von 1m x 1m genutzt)



| Ertrag bei 86 % TS | Mittelwert | STABW | Mehrertrag im Vgl. zur UK | Ertrag relativ zur UK (=100%) | signifikante Ertragsdifferenzen |
|--------------------|------------|-------|---------------------------|-------------------------------|---------------------------------|
| PG                 | dt/ha      | dt/ha | dt/ha                     | %                             | (1)                             |
| 1                  | 81,7       | 2,2   | 0,0                       | 100                           | a                               |
| 2                  | 82,3       | 3,2   | 0,6                       | 101                           | a                               |
| 3                  | 83,3       | 1,6   | 1,6                       | 102                           | a                               |
| 4                  | 84,0       | 2,1   | 2,3                       | 103                           | a                               |
| 5                  | 84,4       | 1,3   | 2,7                       | 103                           | a                               |
| 6                  | 84,1       | 2,2   | 2,4                       | 103                           | a                               |

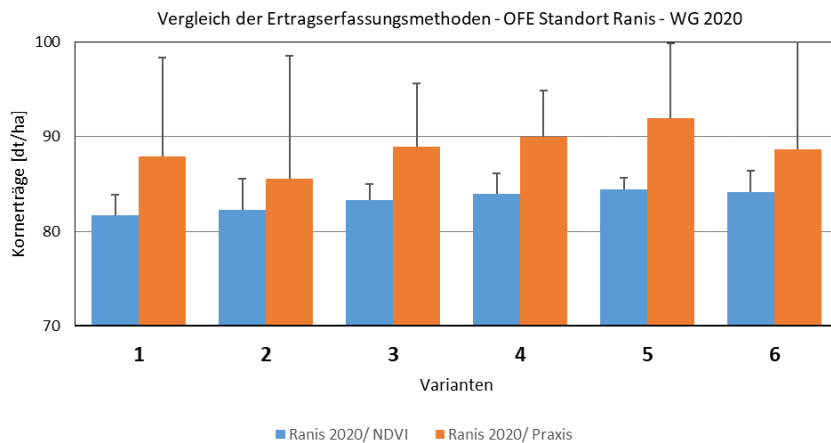


| Ertrag bei 86 % TS | Mittelwert | STABW | Mehrertrag im Vgl. zur UK | Ertrag relativ zur UK (=100%) | signifikante Ertragsdifferenzen |
|--------------------|------------|-------|---------------------------|-------------------------------|---------------------------------|
| PG                 | dt/ha      | dt/ha | dt/ha                     | %                             | (1)                             |
| 1                  | 36,8       | 3,7   | 0,0                       | 100                           | a                               |
| 2                  | 38,2       | 1,1   | 1,4                       | 104                           | a                               |
| 3                  | 38,9       | 2,1   | 2,1                       | 106                           | a                               |
| 4                  | 39,4       | 2,6   | 2,6                       | 107                           | a                               |
| 5                  | 38,2       | 1,6   | 1,4                       | 104                           | a                               |
| 6                  | 38,1       | 1,0   | 1,3                       | 104                           | a                               |

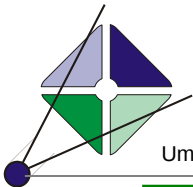


## Beispiel: Standort Ranis

### Vergleich: Ertragsabschätzung über NDVI-Werte vs. Ertragsermittlung mit Praxismähdrescher



| Ertrags-<br>erfassung | Regressionsanalytisch<br>aus NDVI-Werten |       | Praxismähdrescher |       |
|-----------------------|------------------------------------------|-------|-------------------|-------|
|                       | Kultur                                   |       | WG                |       |
| Prüfglied             | Mittel                                   | STABW | Mittel            | STABW |
| 1                     | 81,7                                     | 2,2   | 87,9              | 10,4  |
| 2                     | 82,3                                     | 3,2   | 85,6              | 13,0  |
| 3                     | 83,3                                     | 1,6   | 88,9              | 6,6   |
| 4                     | 84,0                                     | 2,1   | 89,9              | 4,9   |
| 5                     | 84,4                                     | 1,3   | 91,9              | 7,9   |
| 6                     | 84,1                                     | 2,2   | 88,6              | 15,0  |
| Mittel                | 83,3                                     | 2,1   | 88,8              | 9,6   |



Aber ...???

Tandem – Teil 2



## Teil 2

# Vorstellung weiterführender (robuster) Modelle zur Ertragsabschätzung

Hans-Peter Piepho

Fachgebiet Biostatistik  
Universität Hohenheim  
Stuttgart

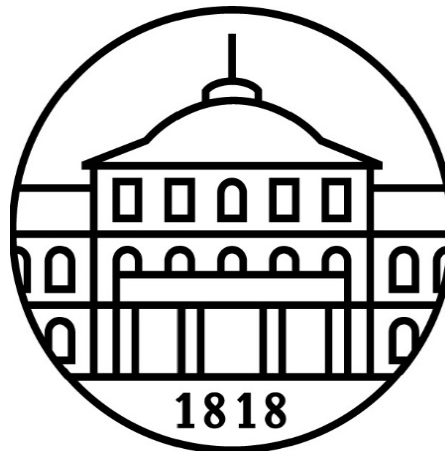




Abbildung 2: On-Farm-Research-Versuchsanlage vom Standort Ranis (Feldstück 116110, Wurzelhügel) mit Beerntungsstrecken (weiße Streifen)

Quelle: U.A.S. GmbH, 2022

## Ausgangslage

- Großparzellen als Versuchseinheiten (Randomisationseinheiten)
- Viele Kleinparzellen je Großparzelle
- NDVI auf ganzer Großparzelle, also auf allen Kleinparzellen
- Ertrag nur auf wenigen Kleinparzellen  
⇒ z.B. 2 Beerntungsstreifen á 3 Kleinparzellen

Ansatz: Ertrag auf ganzer Parzelle auf Basis der NDVI-Werte hochrechnen

## Eine intuitive erste Idee

Zwei Variablen:

NDVI (ganze Parzelle)  $\Rightarrow x$

Ertrag (auf zwei Streifen)  $\Rightarrow y$

- Einfache lineare Regression von  $y$  auf  $x$
- Sage fehlende Erträge  $y$  mit einfacher Regression außerhalb der zwei Streifen je Parzelle vorher  $\Rightarrow$  schätze Parzellenertrag

### Kritik:

- Einfache Regression ignoriert Design
- Unklar, wie Schätzfehler für  $y$  berechnet werden kann (Fehlerfortpflanzung)

## Pseudo-Replikation

Einfaches Modell für eine Behandlung (keine Blöcke):

$$y_{ij} = \mu + u_i + e_{ij} \quad ; \quad u_i \sim N(0, \sigma_u^2); e_{ij} \sim N(0, \sigma_e^2)$$

- $i$  = Index für **Großparzelle**;  $i = 1, \dots, m$
- $j$  = Index für **Kleinparzelle** (Ernteparzelle) innerhalb Großparzelle;  $j = 1, \dots, n$

Varianz eines Mittelwertes:

$$\text{var}(\bar{y}_{..}) = \frac{\sigma_u^2}{m} + \frac{\sigma_e^2}{mn}$$

⇒ Schätzung der fehlenden Erträge nur lohnend wenn  $\sigma_u^2 / \sigma_e^2 \ll 1$ .

# Ein einfaches gemischtes Regressionsmodell

Zwei Zielvariablen:

NDVI (ganze **Großparzelle**)  $\Rightarrow x_{ij}$

Ertrag (auf wenigen **Kleinparzellen** in zwei Streifen)  $\Rightarrow y_{ij}$

Vereinfachende Annahmen:

- vollständig randomisierte Anlage
- Keine Behandlungseffekte

$$y_{ij} = \beta_0 + \beta_c x_{ij} + u_i + e_{ij} \quad ; \quad u_i \sim N(0, \sigma_u^2); e_{ij} \sim N(0, \sigma_e^2)$$

- $i$  = Index für Parzelle;  $i = 1, \dots, m$
- $j$  = Index für Rasterpunkt innerhalb Parzelle;  $j = 1, \dots, n$

(Yoon & Welsh 2020)

## Ein bivariates gemischtes Modell

$$x_{ij} = \mu_x + u_{xi} + e_{xij}$$

$$y_{ij} = \mu_y + u_{yi} + e_{yij}$$

$$\begin{pmatrix} u_{xi} \\ u_{yi} \end{pmatrix} \sim N \left[ \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \end{pmatrix}, \Sigma_b \right] \quad ; \quad \Sigma_b = \begin{pmatrix} \sigma_{ux}^2 & \gamma_b \sigma_{ux}^2 \\ \gamma_b \sigma_{ux}^2 & \sigma_{uy}^2 \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} e_{xij} \\ e_{yij} \end{pmatrix} \sim N \left[ \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \end{pmatrix}, \Sigma_w \right] \quad ; \quad \Sigma_w = \begin{pmatrix} \sigma_{ex}^2 & \gamma_w \sigma_{ex}^2 \\ \gamma_w \sigma_{ex}^2 & \sigma_{ey}^2 \end{pmatrix}$$

$\gamma_b$  und  $\gamma_w$  sind die Regressionskoeffizienten zwischen und innerhalb der Großparzellen (Cluster)

(Yoon & Welsh 2020)

## **Einstufige Analyse mit bivariatem gemischtem Modell**

Dieses Modell kann ich direkt anpassen und Ertragsmittelwert  $\mu_y$  schätzen

Kann das Modell auch um Block- und Behandlungseffekte erweitern und dann Behandlungsmittelwerte für Ertrag schätzen  $\Rightarrow$  nutzt  $x_{ij}$  von ganzer Großparzelle!

## **Zweistufige Analyse mit bivariatem gemischtem Modell**

- (i) Schätzung der Großparzellenmittelwerte für  $y_{ij}$  und  $x_{ij}$   
mit Varianz-Kovarianz-Matrix
- (ii) Passe bivariates Modell für Großparzellenmittelwerte an

## Bedingtes Modell gegeben $x_{ij}$

Herleitung aus bivariatem Modell:

$$y_{ij} \mid x_{ij} = \underbrace{\beta_0^* + \beta_b^* \bar{x}_i + u_i^*}_{\text{Achsenabschnitt der Großparzelle}} + \beta_w^* (x_{ij} - \bar{x}_i) + e_{ij}^*$$

Achsenabschnitt der Großparzelle

(Yoon & Welsh 2020)

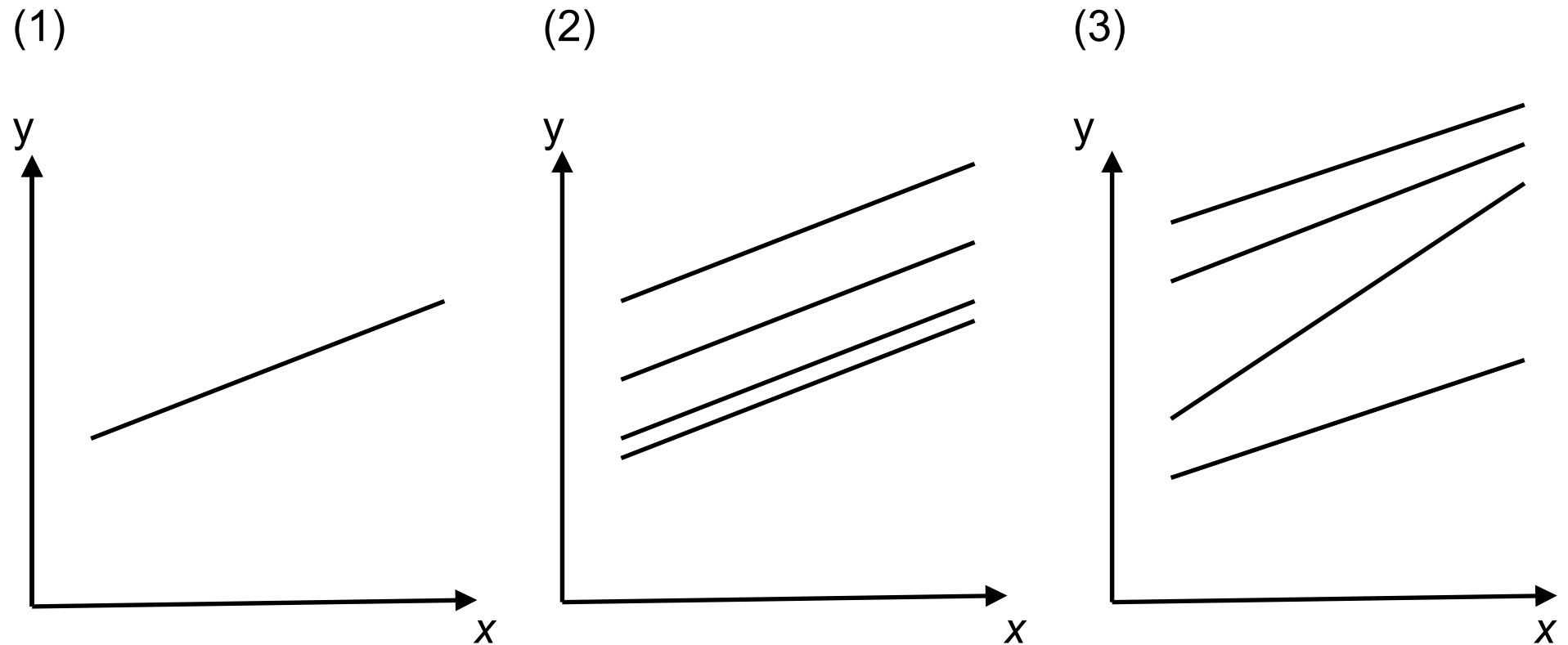
[Modell sieht anders aus als Gleichung (1)!]

⇒ **Zweistufige Auswertung für Ertrag:**

(i) Regression  $y_{ij} \mid x_{ij} = \alpha_i + \beta_w^* (x_{ij} - \bar{x}_i) + e_{ij}^* \Rightarrow$  Kovarianzanalyse (ANCOVA)  
⇒ adjustierte Großparzellenmittelwerte für  $x_{ij} - \bar{x}_i = 0$

(ii) Lineares Modell für Großparzellenmittelwerte (gewichtet!)

## Drei Optionen für Regression von $y = \text{Ertrag}$ auf $x = \text{NDVI}$



Nur eine einzige Regression

Eine eigene Regression für jede Parzelle

Parallele Regressionen

Individuelle Regressionen

(ANCOVA)

## Zweistufige Auswertung (ANCOVA)

Lineare Regression je **Großparzelle**  $\Rightarrow$  Großparzellenmittelwerte

$$y_{ij} \mid x_{ij} = \alpha_i + \beta_w^* (x_{ij} - \bar{x}_i) + e_{ij}^* \quad ; \quad e_{ij}^* \sim N(0, \sigma_{e^*}^2)$$

Adjustierter Großparzellenmittelwert:

$$\mu_i = \alpha_i + \beta_w^* (\bar{x}_{i0} - \bar{x}_i)$$

$\bar{x}_{i0}$  = Mittelwert NDVI der Kleinparzellen in  $i$ -ter Großparzelle mit Ertrag

$\bar{x}_i$  = Mittelwert NDVI aller Kleinparzellen in  $i$ -ter Großparzelle

## Präzision des adjustierten Großparzellenmittelwertes (ANCOVA)

$$\text{var}(\hat{\mu}_i) = \sigma_{e^*}^2 \left( \frac{1}{n_i} + \frac{(\bar{x}_{i0} - \bar{x}_i)^2}{SS_x} \right)$$

$n_i$  = Zahl der Kleinparzellen mit Ertrag in  $i$ -ter Großparzelle

$\bar{x}_{i0}$  = Mittelwert NDVI der Kleinparzellen mit Ertrag in  $i$ -ter Großparzelle

$\bar{x}_i$  = Mittelwert NDVI aller Kleinparzellen in  $i$ -ter Großparzelle

$SS_x$  = Summe der Quadrate aller  $(x_{ij} - \bar{x}_i)$

⇒ sollte  $\bar{x}_{i0} = \bar{x}_i$  anstreben

⇒ sollte grossen Wert für  $SS_x$  anstreben

⇒ muss Varianzheterogenität zwischen Großparzellenmittelwerten erwarten

## Eine kleine Simulation

- 6 Behandlungen
- 10 Großparzellen je Behandlung
- 100 Beobachtungen (Kleinparzellen) je Großparzelle
- 90% fehlende Werte für Ertrag
- Simulation nach bivariatem Modell mit unabhängigen Effekten
- Verschiedene Werte für Varianzen und Korrelationen

Großparzelleneffekte  $u_{xi}$  und  $u_{yi}$ :

$\sigma_{ux}^2$  = Varianz NDVI

$\sigma_{uy}^2$  = Varianz Ertrag

$\rho_b$  = Korrelation NDVI und Ertrag

Kleinparzellenfehler  $e_{xij}$  und  $e_{yij}$ :

$\sigma_{ex}^2$  = Varianz NDVI

$\sigma_{ey}^2$  = Varianz Ertrag

$\rho_w$  = Korrelation NDVI und Ertrag

## Ergebnisse für drei simulierte Datensätze

| Varianzparameter |                 |          |                 |                 |          | Mittlerer SED |           |          |        |                  |
|------------------|-----------------|----------|-----------------|-----------------|----------|---------------|-----------|----------|--------|------------------|
| $\sigma_{ux}^2$  | $\sigma_{uy}^2$ | $\rho_b$ | $\sigma_{ex}^2$ | $\sigma_{ey}^2$ | $\rho_w$ | 1-stufig      |           | 2-stufig |        |                  |
|                  |                 |          |                 |                 |          | Bivariat      | Univariat | Bivariat | ANCOVA | Einfache Regres. |
| 0.1              | 0.07            | 0.95     | 1               | 0.5             | 0.99     | 0.0441        | 0.0743    | 0.0445   | 0.0441 | 0.0332           |
| 1                | 0.5             | 0.95     | 1               | 0.5             | 0.99     | 0.237         | 0.232     | 0.238    | 0.238  | 0.222            |
| 1                | 0.5             | 0.95     | 0.1             | 0.07            | 0.99     | 0.231         | 0.231     | 0.233    | 0.233  | 0.220            |

⇒ Bivariate Analyse und ANCOVA schneiden gut ab, wenn Parzellenfehler klein

⇒ Einfache Regression unterschätzt Standardfehler der Differenz (SED)

## Ergebnisse für Ranis

Mittlerer Standardfehler einer Differenz (SED):

| Datensatz         | Mittlerer SED |           |          |        |                                |
|-------------------|---------------|-----------|----------|--------|--------------------------------|
|                   | 1-stufig      |           | 2-stufig |        |                                |
|                   | Bivariat      | Univariat | Bivariat | ANCOVA | Einfache Regres. <sup>\$</sup> |
| Ranis 2020 Gerste | 3.35          | 4.68      | 3.37     | 3.34   | 1.30                           |
| Ranis 2021 Raps   | 3.21          | 3.27      | 3.39     | 3.43   | 0.88                           |

<sup>\$</sup> Ursprüngliche Idee

## Ergebnisse für Ranis

Korrelationen (bivariates Modell, 1-stufig):

| Datensatz         | Bivariate Korrelation |               |
|-------------------|-----------------------|---------------|
|                   | Großparzelle          | Kleinparzelle |
| Ranis 2020 Gerste | 0.8830                | 0.5161        |
| Ranis 2021 Raps   | 0.3548                | 0.2528        |

## Ergebnisse für Gerste 2020 (Ranis)

| Behandlung | Adjustierte Mittelwerte |                   |                    |                   |                                |
|------------|-------------------------|-------------------|--------------------|-------------------|--------------------------------|
|            | 1-stufig                |                   | 2-stufig           |                   |                                |
|            | Bivariat                | Univariat         | Bivariat           | ANCOVA            | Einfache Regres. <sup>\$</sup> |
| 1          | 81.8 <sup>ab</sup>      | 80.6 <sup>a</sup> | 81.8 <sup>ab</sup> | 81.9 <sup>a</sup> | 80.5 <sup>b</sup>              |
| 2          | 79.9 <sup>b</sup>       | 80.3 <sup>a</sup> | 79.9 <sup>b</sup>  | 79.9 <sup>a</sup> | 81.4 <sup>ab</sup>             |
| 3          | 80.1 <sup>b</sup>       | 77.5 <sup>a</sup> | 80.0 <sup>b</sup>  | 80.0 <sup>a</sup> | 82.4 <sup>ab</sup>             |
| 4          | 87.0 <sup>a</sup>       | 85.9 <sup>a</sup> | 87.0 <sup>a</sup>  | 87.0 <sup>a</sup> | 83.1 <sup>ab</sup>             |
| 5          | 81.9 <sup>ab</sup>      | 83.2 <sup>a</sup> | 81.9 <sup>ab</sup> | 81.9 <sup>a</sup> | 83.6 <sup>a</sup>              |
| 6          | 84.4 <sup>ab</sup>      | 82.9 <sup>a</sup> | 84.3 <sup>ab</sup> | 84.3 <sup>a</sup> | 83.3 <sup>ab</sup>             |
|            |                         |                   |                    |                   |                                |

Mittelwerte in einer Spalte, die keinen Buchstaben gemeinsam haben, sind signifikant verschieden (t-Test,  $\alpha=5\%$ )

<sup>\$</sup> Ursprüngliche Idee

## Ergebnisse für Raps 2021 (Ranis)

| Behandlung | Adjustierte Mittelwerte |                   |                   |                   |                                |
|------------|-------------------------|-------------------|-------------------|-------------------|--------------------------------|
|            | 1-stufig                |                   | 2-stufig          |                   |                                |
|            | Bivariat                | Univariat         | Bivariat          | ANCOVA            | Einfache Regres. <sup>\$</sup> |
| 1          | 41.3 <sup>a</sup>       | 42.8 <sup>a</sup> | 41.2 <sup>a</sup> | 41.2 <sup>a</sup> | 42.0 <sup>b</sup>              |
| 2          | 42.0 <sup>a</sup>       | 41.8 <sup>a</sup> | 42.0 <sup>a</sup> | 42.0 <sup>a</sup> | 43.0 <sup>ab</sup>             |
| 3          | 42.9 <sup>a</sup>       | 41.9 <sup>a</sup> | 42.9 <sup>a</sup> | 42.9 <sup>a</sup> | 43.6 <sup>ab</sup>             |
| 4          | 44.1 <sup>a</sup>       | 43.3 <sup>a</sup> | 44.1 <sup>a</sup> | 44.1 <sup>a</sup> | 43.9 <sup>a</sup>              |
| 5          | 44.1 <sup>a</sup>       | 43.9 <sup>a</sup> | 44.1 <sup>a</sup> | 44.1 <sup>a</sup> | 42.1 <sup>ab</sup>             |
| 6          | 44.4 <sup>a</sup>       | 44.2 <sup>a</sup> | 44.4 <sup>a</sup> | 44.4 <sup>a</sup> | 43.1 <sup>ab</sup>             |
|            |                         |                   |                   |                   |                                |

Mittelwerte in einer Spalte, die keinen Buchstaben gemeinsam haben, sind signifikant verschieden (t-Test,  $\alpha=5\%$ )

<sup>\$</sup> Ursprüngliche Idee

## Geostatistik

Bisher: Beobachtungsfehler  $e_{ij}$  unabhängig verteilt

Alternative: Geostatistisches Modell für räumliche Korrelation der  $e_{ij}$   
**innerhalb Großparzelle** oder **über ganzes Feld**

Erwartung: Kein großer Unterschied zwischen beiden Modellen

Implementation: Bivariates gemischtes Modell mit Geostatistik nicht leicht in R  
zu implementieren  $\Rightarrow$  ASReml-R nötig

Zweistufiger bivariater Ansatz  $\Rightarrow$  Co-Kriging

Zweistufiger ANCOVA Ansatz leicht mit 'nlme' durchführbar

## Geostatistik (II)

Bivariater geostatistischer Ansatz mit Co-Kriging:

Auch rechenbar, wenn Punkt-Koordinaten für  $x_{ij}$  und  $y_{ij}$  nicht identisch!

R-Pakete für Co-Kriging:

'gstat'

'CoKrigingR'

## Fazit

- (1) Regression von Ertrag auf NDVI ist eine sehr gute Idee
- (2) Es ist plausibel, für Ertrag und NDVI dieselbe Art von gemischtem Modell anzunehmen mit zufälligen Effekten für Groß- und Kleinparzellen  
⇒ Ein entsprechendes bivariates Modell ist das Modell der Wahl
- (3) Ableitung einer Regression von Ertrag auf NDVI aus dem bivariaten Modell  
Führt zu einer ANCOVA mit eigenem Achsenabschnitt für jede Parzelle  
⇒ Einfache Regression nicht das richtige Modell
- (4) ANCOVA ⇒ Regression auf Abweichungen  $(x_{ij} - \bar{x}_i)$  vom  
Großparzellenmittelwert für NDVI
- (5) Bivariate Analyse erlaubt Nutzung von Geostatistik  
⇒ Ertrag und NDVI müssen nicht an identischen Koordinaten erfasst sein  
⇒ Vermutlich aber größerer Aufwand für Analyse

## Literatur

Mallinckrodt, C.H., Lane, P.W., Schnell, D., Peng, Y., Mancuso, J.P. (2007): Recommendations for the primary analysis of continuous endpoints in longitudinal clinical trials. *Drug Information Journal* **42**, 303-319.

[unterstützt die Aussage, dass bivariate Analyse die beste Option ist]

Piepho, H.P. (2018): Allowing for the structure of a designed experiment when estimating and testing trait correlations. *Journal of Agricultural Science* **156**, 59-70. <https://doi.org/10.1017/S0021859618000059>

Yoon, H.J., Welsh, A. (2020): On the effect of ignoring correlation in the covariates when fitting linear mixed models. *Journal of Statistical Planning and Inference* **204**, 18-34. <https://doi.org/10.1016/j.jspi.2019.04.001>