

Workshop On-Farm-Experimente

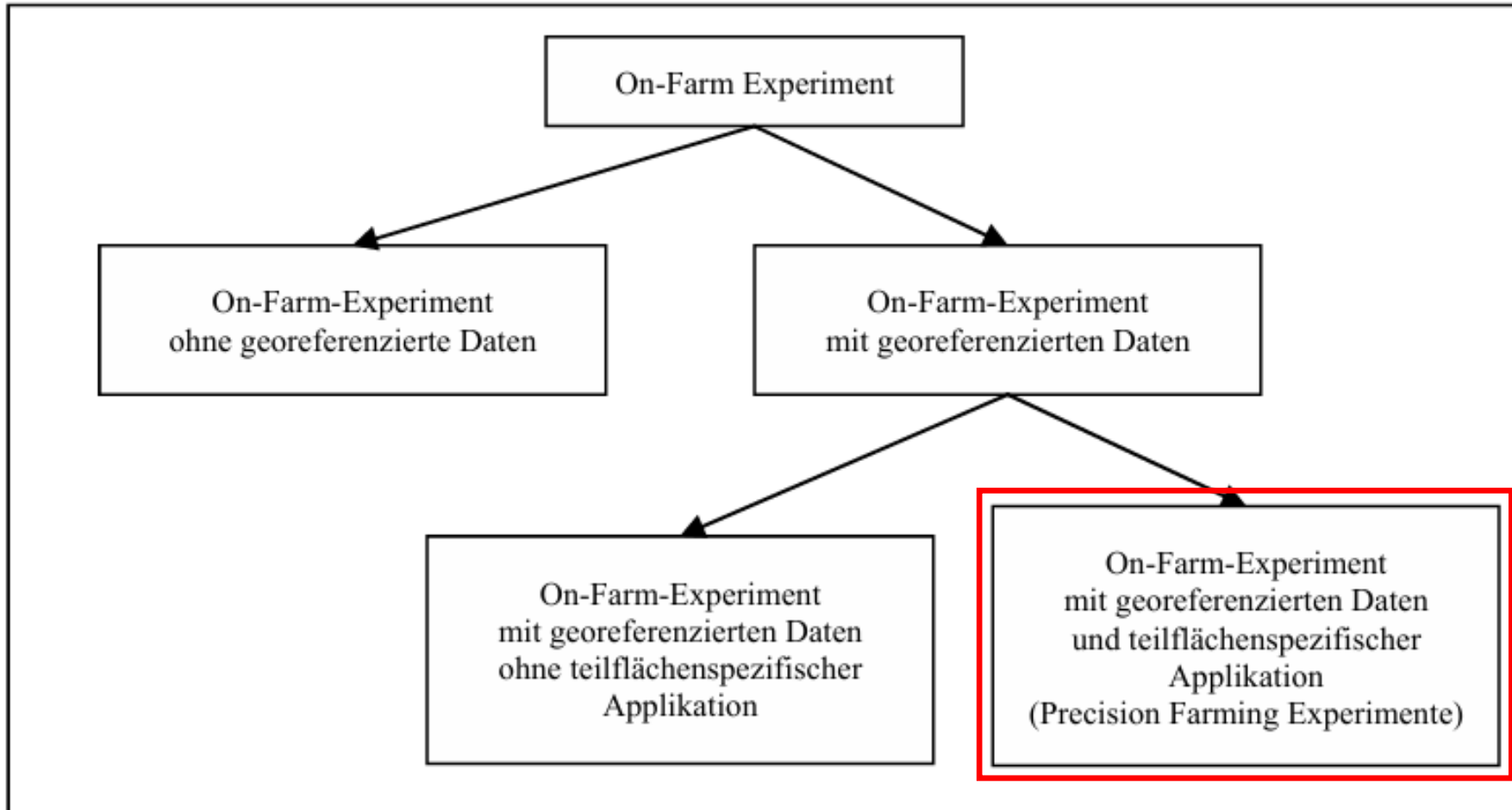
Hannover, 28.11.2025

Blockanlage, Ceteris Paribus & Nutzung von Kovariablen bei OFE mit Precision Farming

Andreas Büchse (Statistical Consultant, Heltersberg)

Sabine Kurz (Hochschule für Wirtschaft und Umwelt Nürtingen-Geislingen)

Klassifikation von On-Farm-Experimenten



Inwieweit sind Blockbildung und Ceteris-Paribus-Prinzip sinnvolle Prinzipien bei Precision Farming Experimenten?

Abbildung 1: Übersicht zur Begriffsbildung und Klassifikation von On-Farm-Experimenten

Ceteris-Paribus-Prinzip im „klassischen“ Versuchswesen

Ceteris paribus, lateinisch „alles übrige sei gleich“

- Alles, was nicht zu testender Versuchsfaktor ist und was wir kontrollieren können, wird gleich gehalten.
 - Sortenvergleich bei ansonsten gleicher Düngung, Pfl.Schutz, Aussaat- und Erntetermine, ...
 - Test von Pflanzenschutzmitteln bei gleicher Sorte, gleicher Düngung ...
- Einflussfaktoren, die wir nicht kontrollieren können aber vorab kennen, verteilen wir durch **BLOCKBILDUNG** möglichst gleichmäßig auf die Varianten.
- Was nicht kontrolliert werden kann und nicht bekannt ist, verteilen wir durch **RANDOMISATION** zufällig auf die Varianten.

Kleinparzellenversuch / Exaktversuch

Auswahl der Versuchsfläche, Lage der Blocks (Gilt auch bei OFE ohne Precision Farming)

- Versuchsfläche soll homogen sein
- Falls Unterschiede in der Fläche, dann bei Lage der Blocks berücksichtigen.
- Heterogenität zwischen Blocks geht in Blockeffekt
- Unterschiede zwischen Blocks sollten nicht zu groß sein, sonst Wechselwirkung Treatment*Block möglich – die aber bei 1 Teilstück je Treatment und Block nicht schätzbar ist und dann in den Fehler geht.
- Heterogenität zwischen Teilstücken im gleichen Block ist Störgröße, geht in Versuchsfehler. Information über die Heterogenität kann evtl. als **Kovariablen** genutzt werden.



Precision Farming

Auswahl der Versuchsfläche, Lage der Blocks

Versuchsfläche innerhalb eines Teilstücks muss heterogen sein: Precision Farming Experimente sollen Reaktion eines Anbausystems auf Heterogenität der Umweltbedingungen (insbesondere Boden) untersuchen. Teilstücke müssen ausreichend groß und heterogen sein.

- Heterogenität in Teilstücken ist gut.
- Heterogenität zwischen Teilstücken im gleichen Block ist schlecht.
- Heterogenität zwischen Blocks geht in Blockeffekt.
- Precision Farming Experimente verlangen **ceteris-paribus-Bedingungen** hinsichtlich Mittelwert aber insbesondere auch hinsichtlich der Variabilität von Umwelteigenschaften, Kovariablen und Störgrößen.

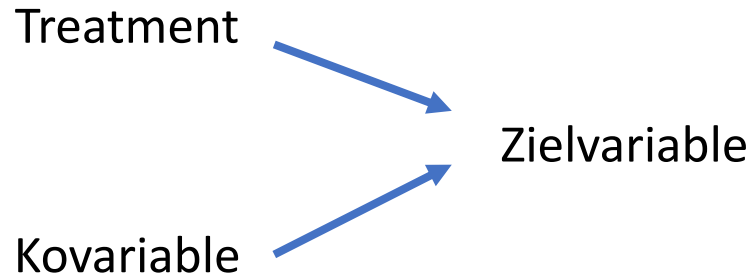


Information über die Heterogenität kann evtl. zusätzlich als **Kovariable** genutzt werden.

Kovariablen

- Variablen, die nicht kontrollierbar, aber vor oder während des Versuchs bekannt oder messbar sind
- Bei OFE oft mit räumlichem Bezug, z.B.: Bodenparameter (Feuchte, Körnung, Humus, Nährstoffe, Relief); Wachstumsparameter (Biomasse, NDVI, ...)
- **Bereits bei Versuchsplanung berücksichtigen?** Zur Blockbildung? Kann u.U. gefährlich sein (Worst Practice: heterogene Teilflächen bekommen bevorzugt Precision Farming Variante, homogene Flächen werden einheitlich behandelt. Das führt die Versuchsidee ad absurdum).
- **In Auswertemodell integrieren? ANCOVA**
 - Kovariable kann Varianz innerhalb der Blocks erklären -> Power der Analyse steigt
 - Adjustierung der Treatment-Effekte. Bei Korrelation Kovariable ~ Treatment problematisch.
 - Oder als Quasi-Versuchsfaktor? Interaktion Treatment:Kovariable ist erlaubt und von Interesse
- **Berücksichtigung von Kovariablen muss gut überlegt sein,**
 - siehe: [10 Things to Know About Covariate Adjustment – Methods](https://methods.egap.org/guides/analysis-procedures/covariates_en.html)
(https://methods.egap.org/guides/analysis-procedures/covariates_en.html)

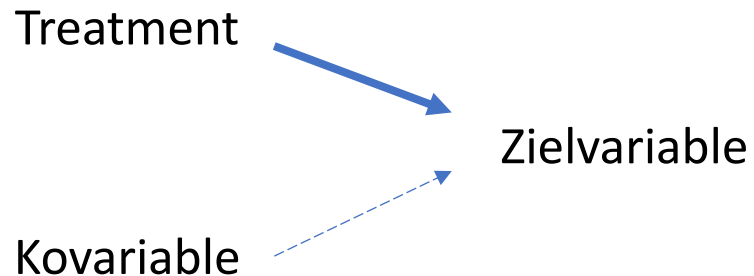
Kovariablen und Kausalität



Unabhängigkeit zw. Treatment und Kovariable

Kovariable erklärt Varianz
Kovariable kann Treatmenteffekt (wenn nötig)
adjustieren (Kovarianzanalyse, ANCOVA)

Beispiel: Einstallgewicht von Ferkeln bei Mastversuch berücksichtigen.



Unabhängigkeit, aber nur schwache Korrelation
Kovariable ~ Zielvariable

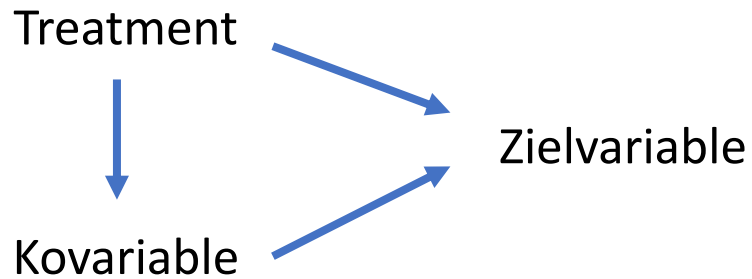
R^2 nur unwesentlich verbessert (und wenn doch dann
evtl. Overfitting!?)
AIC nicht verbessert
StdErr Prüfgliedvergleiche wird größer.

Kovariablen und Kausalität

Treatment beeinflusst Kovariable und die wirkt auch auf Zielvariable. Effekte nicht trennbar.

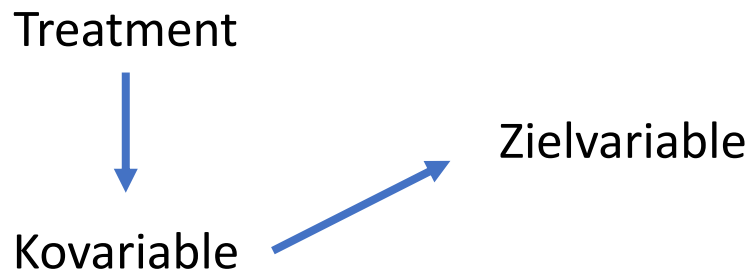
Beispiel: Unkrautdeckungsgrad NACH Behandlung als Kovariable für Herbizideffekt genutzt ☹️

Adjustierung über ANCOVA evtl. irreführend.



Zielvariable wird vom Treatment nur mittelbar beeinflusst. Kovariable ist quasi das Treatment. Indirekte Effekte; Mediationsmodelle.

Adjustierung über ANCOVA irreführend

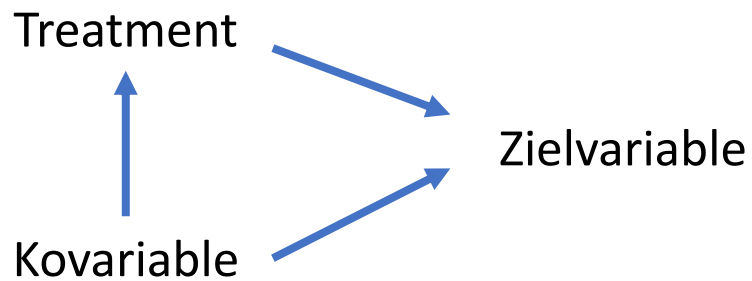


Kovariable steuert das Treatment ist aber auch selbst mit Zielvariable verbunden.

Typisch für Precision Farming, z.B.: Düngermenge in Abhängigkeit von Bodengüte.

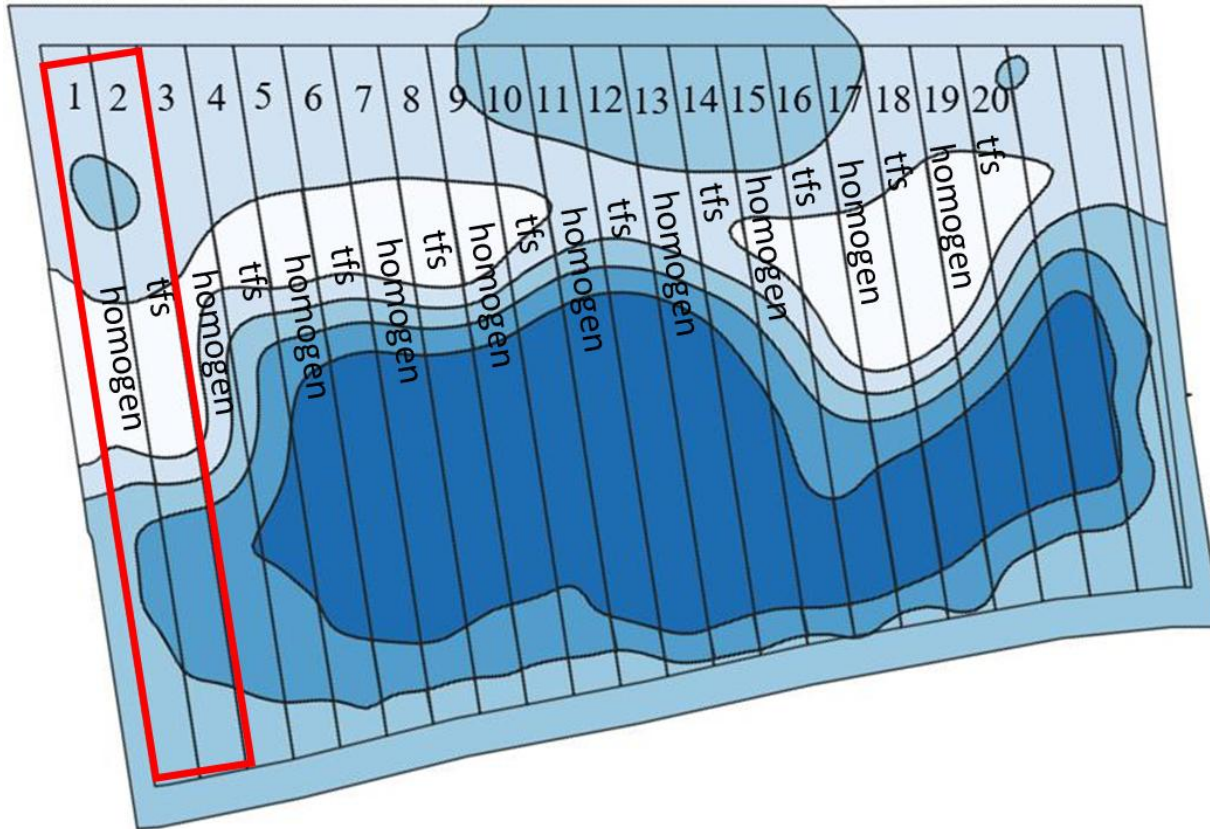
Adjustierung über ANCOVA evtl. irreführend.

Kovarianzanalyse kann dennoch sehr informativ sein.



Beispiel – Precision Farming Versuch HfWU Nürtingen-Geislingen

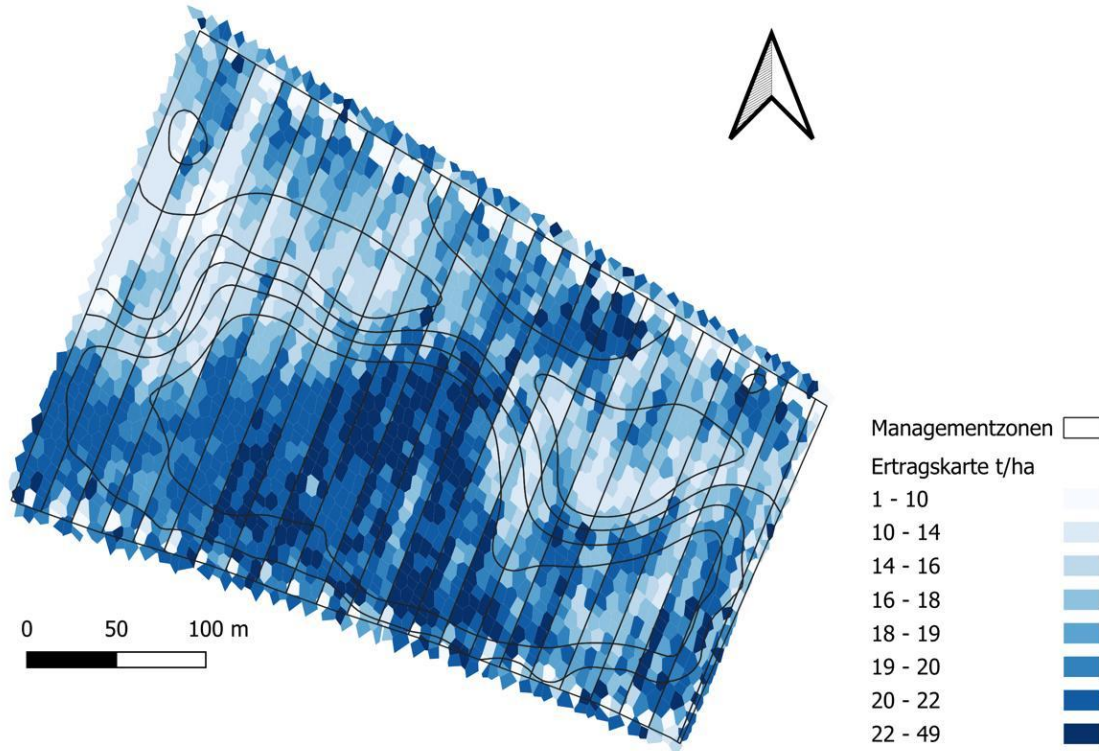
Vergleich teilflächenspezifischer (*tfs*) Düngung gegen homogene (*hom*) Düngung



historische Ertragspotenzialkarte aus Xarvio (Mittelwert der letzten 10 Jahre).
Quelle: A. Schlenker. Standort Buggingen, zw Freiburg und Mühlhausen

- alle Parzellen mit
 - ungeraden Zahlen > homogene Düngung, gleiche Aussaatstärke
 - geraden Zahlen > tfs Düngung und Saat
- Blöcke (rot)
- 20 Erträge über Kerndrusch > Wiegeplatten
- Treatments alternierend, ohne Randomisation 🤖
- 5 Ertragszonen. Dunkelblau= hohes Ertragspotenzial
- 11,9 ha

Berechnung Bodengüte je Parzelle

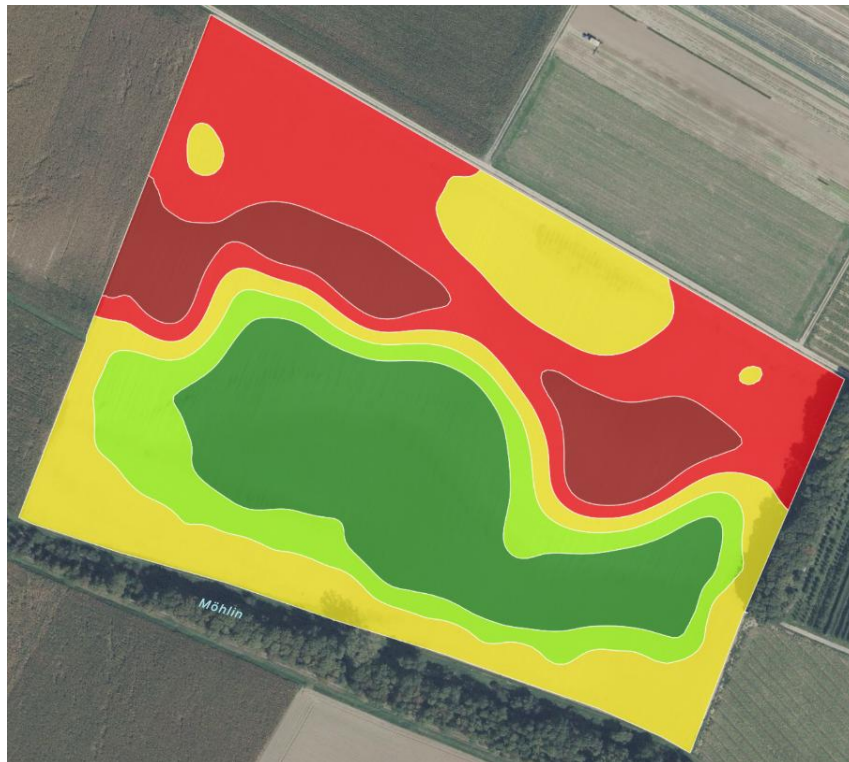


- Ermitteln der durchschnittlichen Bodengüte je Parzelle mit QGIS
 - Raster 18 m* 18 m
 - Flächen pro Zone wurden aufaddiert, anschließend der Mittelwert jeder Zone pro Parzelle berechnet
 - Parzellenplan und historische Ertragspotenzialkarte der letzten 10 Jahre aus Xarvio wurden übereinandergelegt
- jede Parzelle unterschiedlich lang
 - > Umrechnung auf Hektarerträge

Applikationskarte

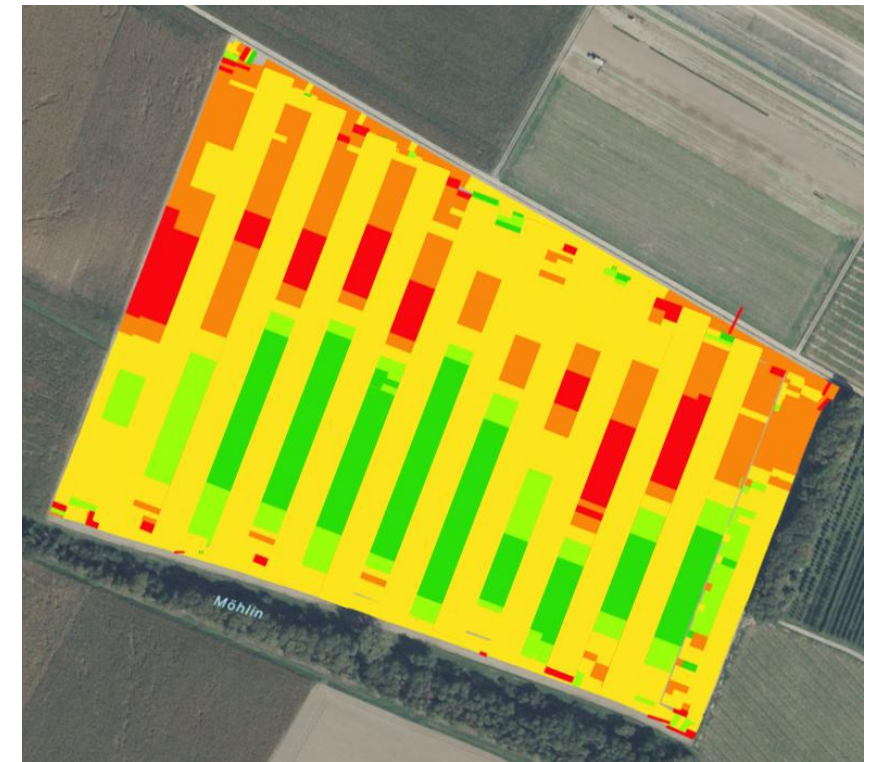
Grün: bessere Zonen, mehr Dünger

Rot: schwächere Zonen, reduzierte Düngung

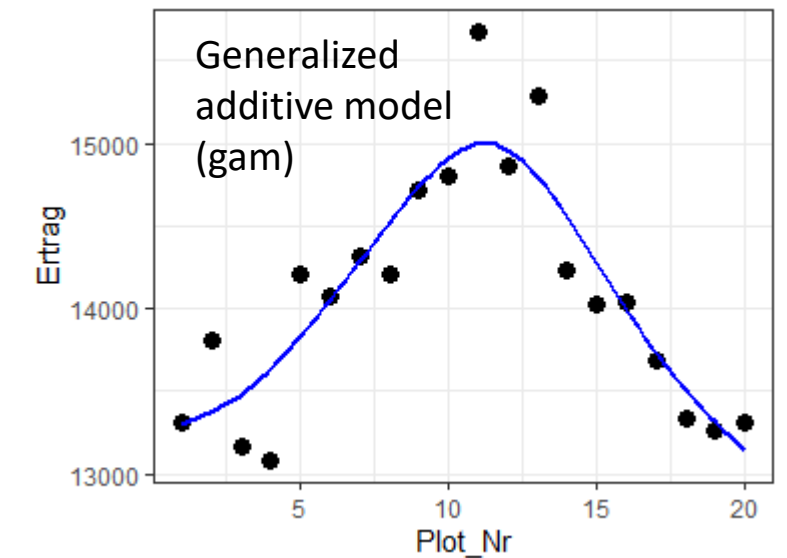
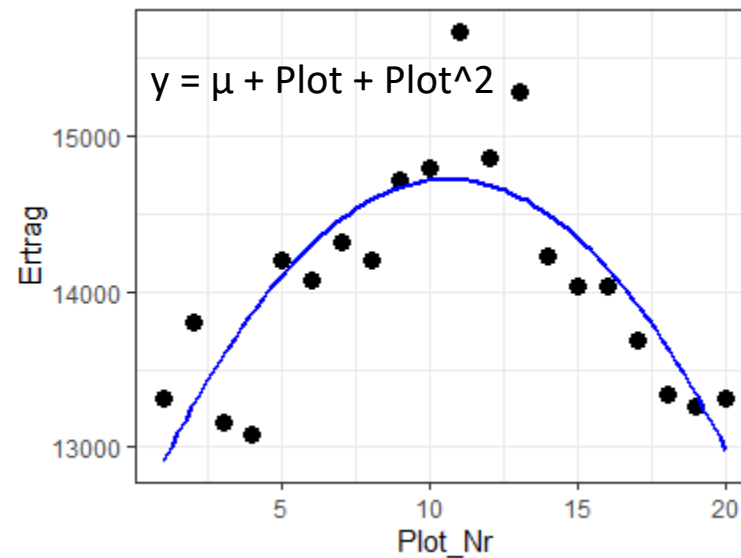
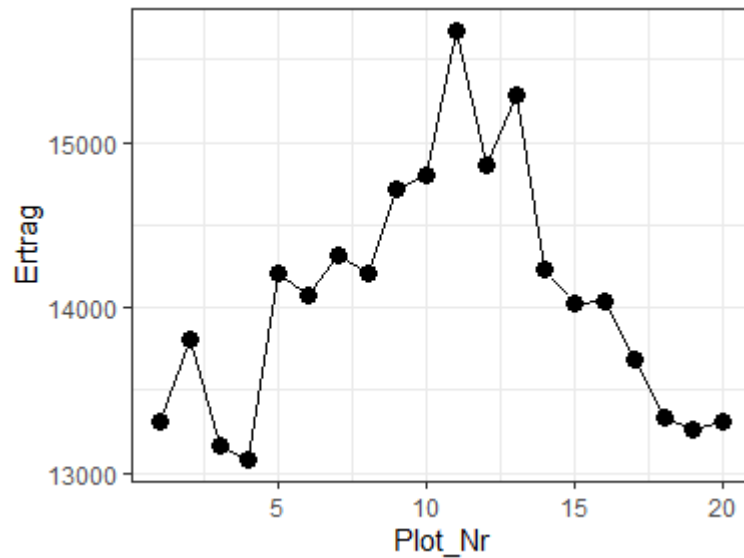
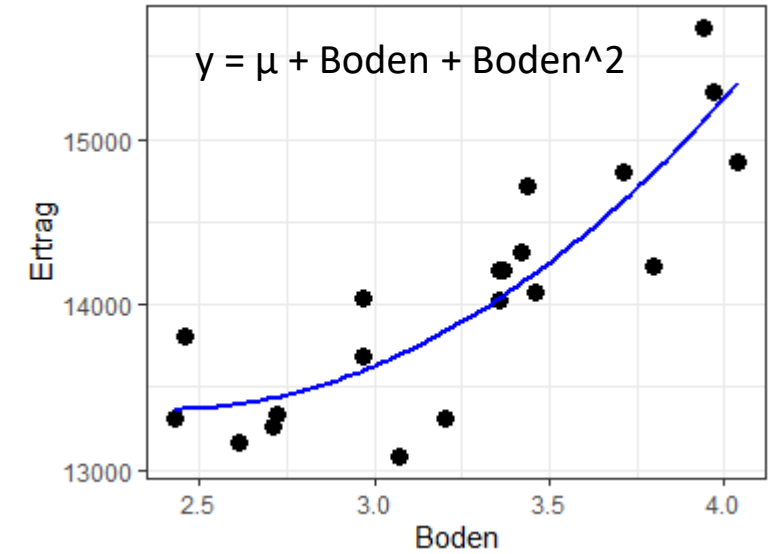
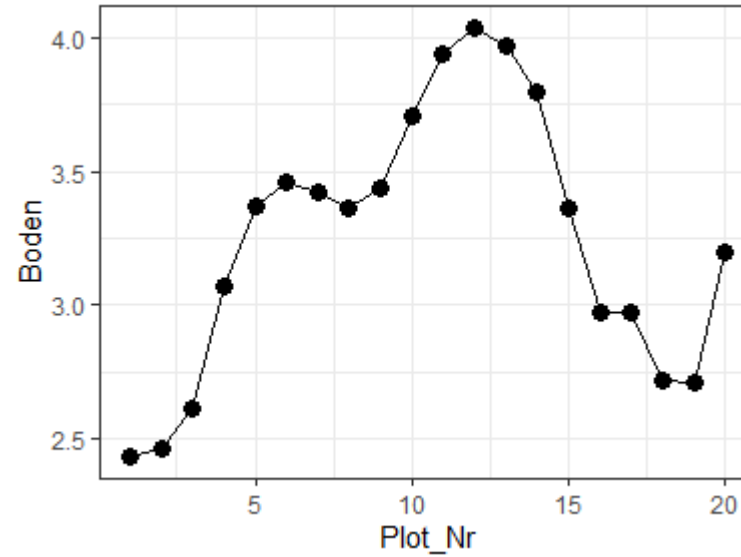
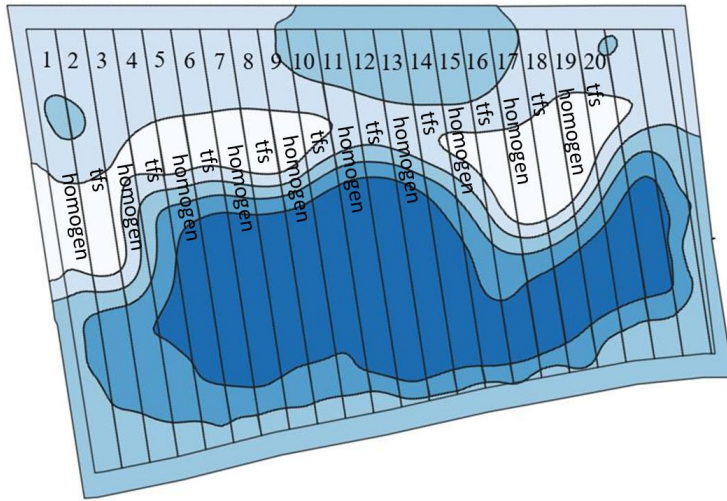


Farbe	kg/ha
Grün	984
Hellgrün	902
Gelb	820
Orange	738
Rot	656

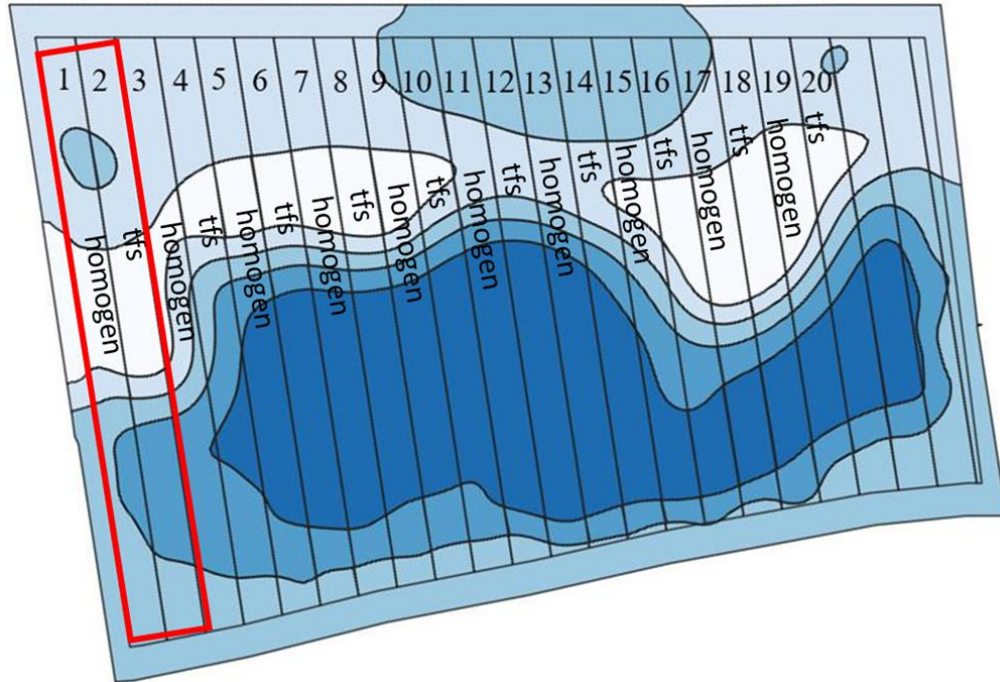
Durchgängige gelbe Streifen:
Homogene Variante



Datenexploration



Beispiel – Precision Farming Versuch HfWU Nürtingen-Geislingen



Mögliche Auswertestrategien

ANOVA ohne Berücksichtigung der Ertragspotenzialzonen:

- 1) Nur Treatment
- 2) Treatment + Block

Linear (Mixed) Model: Trends und Geostatistik:

- 3) Treatment + f(Parzellennummer)
- 4) Treatment + geostatistik (AR1 correlation auf Plot_Nr)
- 5) Treatment + gam-smoother

ANCOVA mit Ertragspotenzialzonen als Kovariable sonst wie 1-5

Was macht ANCOVA?

- ➔ Erklärt ansonsten unerklärte Varianz; RMSE wird kleiner
- ➔ Adjustiert den Treatmenteffekt hinsichtlich Bodengüte
- ➔ Berechnet den Treatmenteffekt bei mittlerer Bodengüte

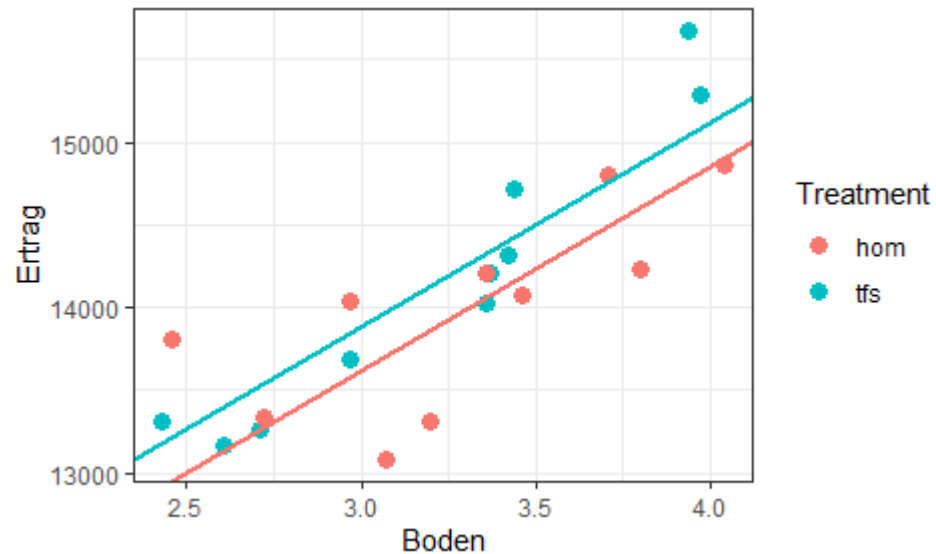
Vergleich der Modelle mittels SE, p-Wert und AIC

Ohne/ mit Boden	Model	difference tfs-hom	SE	dfe	p.value	AIC
1 ohne	Trt	192	333	18	0.5703	325.14
2 ohne	Trt + Block	192	143	9	0.2109	295.44
3 ohne	Trt + f (Plot_Nr^2)	198	199	16	0.3357	306.11
4 ohne	Trt + AR1 auf Plot_Nr	202	120	15	0.1121	285.28
5 ohne	Trt + gam	185	151	13.5	0.2408	296.32
1 mit	Trt + f(Boden^2)	241	166	16	0.1660	298.90
2 mit	Trt + Block + f(Boden^2)	212	159	7	0.2235	297.64
3 mit	Trt + f (Plot_Nr^2) + f(Boden^2)	203	148	14	0.1932	295.36
4 mit	Trt + AR1 + f(Boden^2)	234	138	7	0.1315	252.30
5 mit	Trt + gam + f(Boden^2)	208	143	13.5	0.1681	294.20

ANCOVA

Korrektur auf einheitliche Bodengüte: Treatmenteffekt = Abstand der parallelen Linien

Kovariablen zentrieren: `DF$Boden.c <- DF$Boden - mean(DF$Boden)`

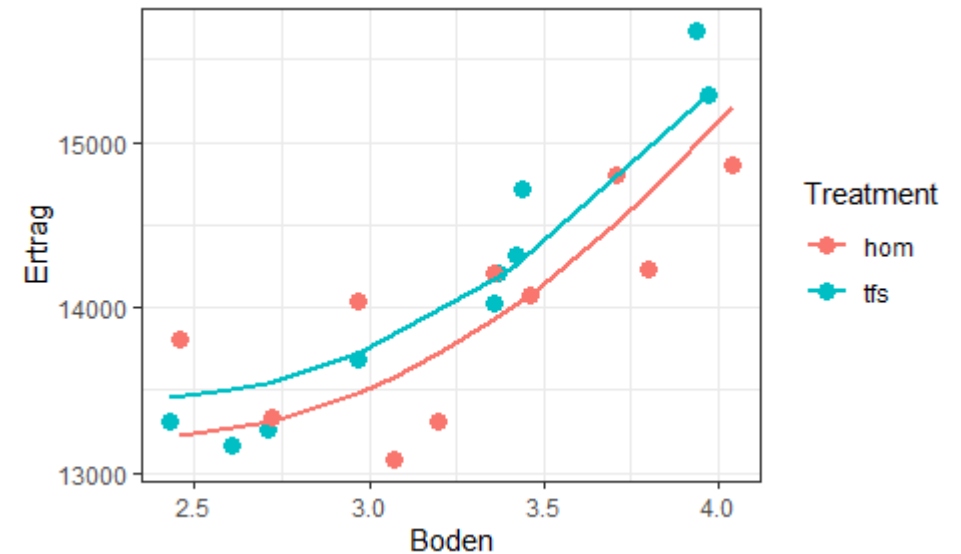


Coefficients:

	Estimate	Std. Error	t value	Pr(> t)
(Intercept)	13938.1	126.8	109.959	< 2e-16 ***
Treatmenttfs	262.9	179.4	1.465	0.161
Boden.c	1236.5	184.1	6.718	3.61e-06 ***

```
> mean(DF$Boden)
```

```
[1] 3.2505
```



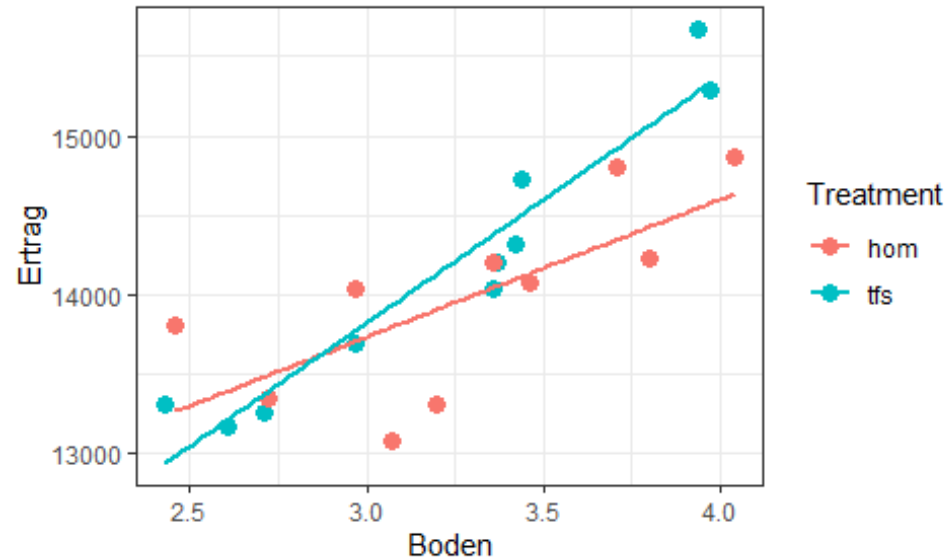
Coefficients:

	Estimate	Std. Error	t value	Pr(> t)
(Intercept)	13781.9	141.7	97.243	< 2e-16 ***
Treatmenttfs	241.5	166.4	1.451	0.1660
Boden.c	1262.8	170.8	7.391	1.52e-06 ***
I(Boden.c^2)	702.5	357.9	1.963	0.0673 .

ANCOVA mit Interaktion Boden*Treatment

Keine Korrektur sondern Wechselwirkung Boden mit teilflächenspezifischer Düngung.

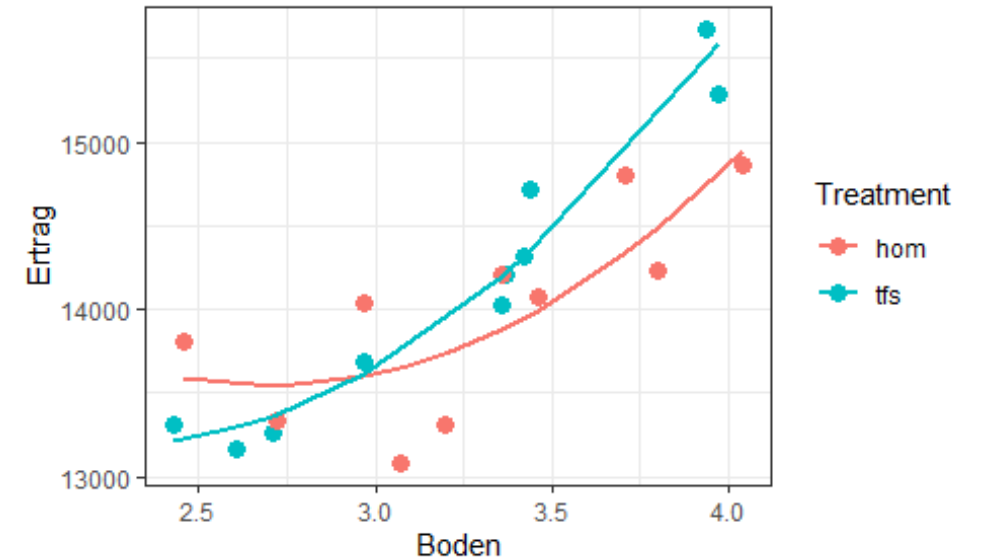
Spezifische Düngung führt ab einer Bodengüte von 2,9 zu stärkerem Ertragszuwachs



```
lm(Ertrag ~ Treatment + Boden.c + Treatment:Boden.c
```

Coefficients:

	Estimate	Std. Error	t value	Pr(> t)	
(Intercept)	13948.6	116.6	119.665	< 2e-16	***
Treatmenttfs	261.5	164.8	1.587	0.13214	
Boden.c	867.8	247.8	3.502	0.00295	**
Treatmenttfs:Boden.c	690.0	339.0	2.035	0.05872	.

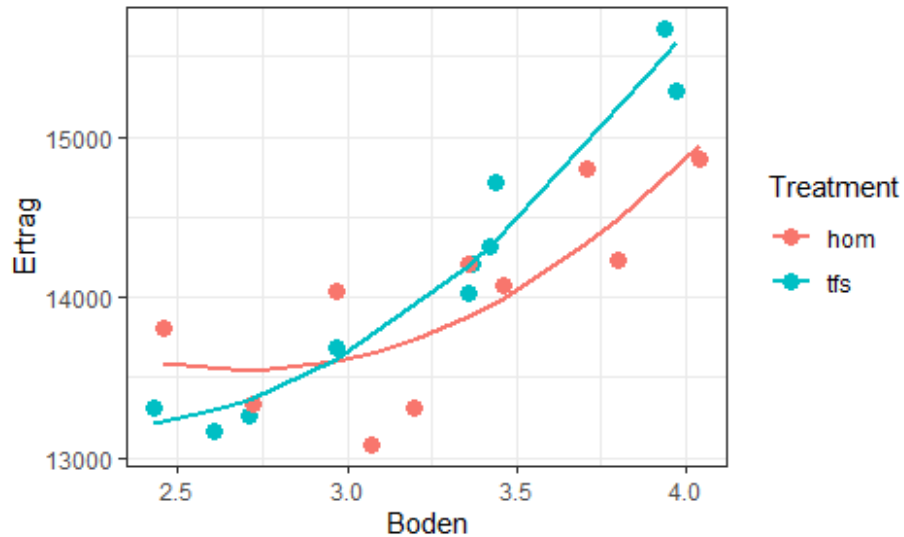


```
lm(Ertrag ~ Treatment * Boden.c + I(Boden.c^2)
```

Coefficients:

	Estimate	Std. Error	t value	Pr(> t)	
(Intercept)	13775.5	121.5	113.346	< 2e-16	***
Treatmenttfs	237.5	142.7	1.665	0.11666	
Boden.c	856.7	214.1	4.002	0.00115	**
I(Boden.c^2)	783.5	308.4	2.541	0.02262	*
Treatmenttfs:Boden.c	765.4	294.2	2.601	0.02005	*

ANCOVA mit Interaktion Boden*Treatment



Ab welchem Ertragspotenzial (Boden) wird auf „tfs“ mehr geerntet als auf „homogen“?

```
mod <- lm(Ertrag ~ Treatment * Boden + I(Boden^2), data = DF)
emm3.25 <- emmeans(mod, ~ Treatment, at = list(Boden = 3.25))
pairs(emm3.25)
```

Tab.: Expected Marginal Means

Boden (Ertragspotenzial-Zone)	Kontrast tfs-homogen	SE	t.Ratio	p-Wert
2.5	-337	264	-1.275	0.22
3.0	46	161	0.284	0.78
3.25 (Mittelwert)	237	143	1.662	0.12
3.35	314	145	2.159	0.05
3.5	428	160	2.682	0.02
4.0	811	261	3.104	0.01

Was ist eigentlich mit dem Blocks? Abschließend Blockeffekt dazu?

Ohne
Block

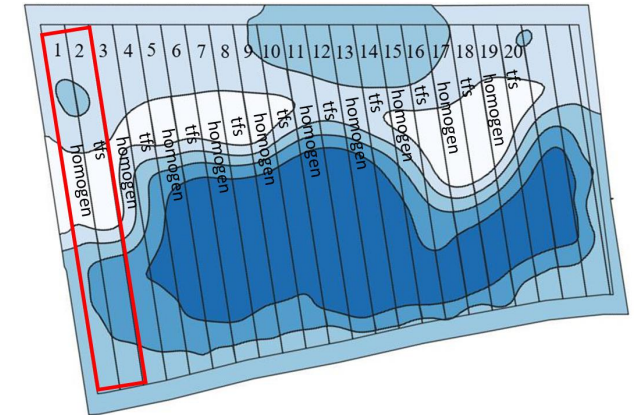
```
lm(Ertrag ~ Treatment * Boden + I(Boden^2) )
```

Anova Table (Type III tests)

Response: Ertrag

	Sum Sq	Df	F value	Pr(>F)	
(Intercept)	1297006425	1	12847.2295	< 2.2e-16	***
Treatment	279870	1	2.7722	0.116658	
Boden.c	1617250	1	16.0193	0.001154	**
I(Boden.c^2)	651587	1	6.4542	0.022620	*
Treatment:Boden.c	683126	1	6.7666	0.020049	*
Residuals	1514342	15			

Residual standard error: 317.7 on 15 degrees of freedom



Mit Block

```
lm(Ertrag ~ Treatment * Boden + I(Boden^2) + Block)
```

Anova Table (Type III tests)

Response: Ertrag

	Sum Sq	Df	F value	Pr(>F)	
(Intercept)	55564448	1	1216.4161	3.702e-08	***
Treatment	184777	1	4.0451	0.09100	.
Boden.c	7254	1	0.1588	0.70405	
I(Boden.c^2)	81342	1	1.7807	0.23047	
Block	1240269	9	3.0169	0.09609	.
Treatment:Boden.c	564726	1	12.3630	0.01258	*
Residuals	274073	6			

Residual standard error: 213.7 on 6 degrees of freedom

- Block „saugt“ Bodenunterschiede auf.
- Kovariable nicht mehr signifikant.
- Inhaltliche Interpretation erschwert.
- kostet 9 Freiheitsgrade.

Linear Mixed Model – immer eine gute Idee 😊

Blockeffekt random, Fit by REML

```
lmer(Ertrag ~ (1|Block) + Treatment * Boden.c + I(Boden.c^2), data = DF)
```

Random effects:

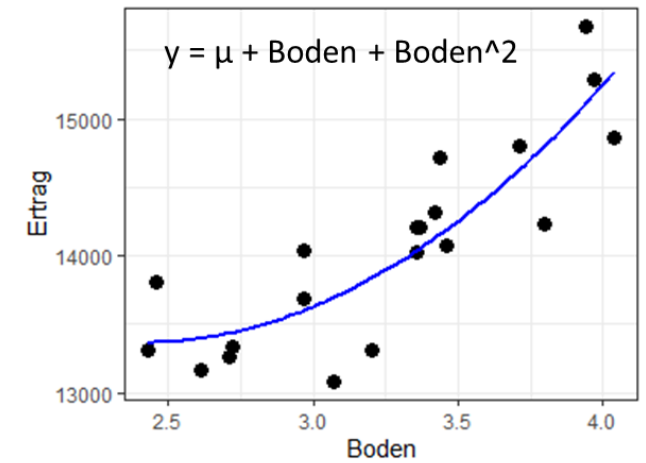
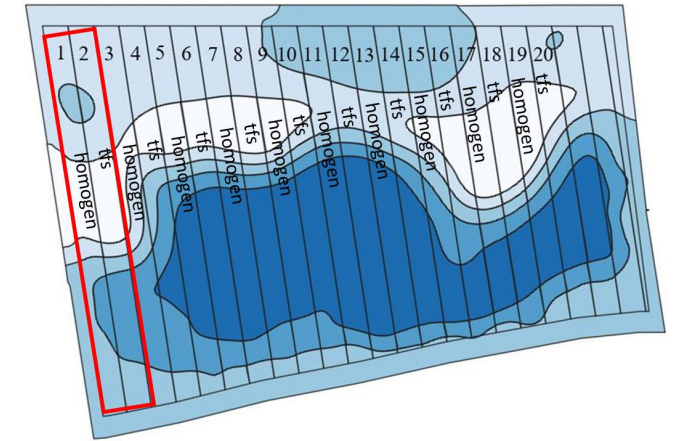
Groups	Name	Variance	Std.Dev.
Block	(Intercept)	50247	224.2
Residual		54008	232.4

```
> library(lmerTest)
> anova(lm_quad_diff, ddf = "Kenward-Roger")
> summary(lm_quad_diff, ddf = "Kenward-Roger")
```

Type III Analysis of Variance Table with Kenward-Roger's method

	Sum Sq	Mean Sq	NumDF	DenDF	F value	Pr(>F)
Treatment	257797	257797	1	7.2647	4.7733	0.06378 .
Boden.c	2137538	2137538	1	10.0837	39.5782	8.687e-05 ***
I(Boden.c^2)	297097	297097	1	13.1819	5.5010	0.03528 *
Treatment:Boden.c	569399	569399	1	7.7842	10.5429	0.01220 *

	Estimate	Std. Error	df	t value	Pr(> t)
(Intercept)	13755.148	132.013	12.277	104.196	< 2e-16 ***
Treatmenttfs	229.521	105.054	7.265	2.185	0.06378 .
Boden.c	788.846	221.702	14.573	3.558	0.00298 **
I(Boden.c^2)	884.417	377.083	13.182	2.345	0.03528 *
Treatmenttfs:Boden.c	736.043	226.686	7.784	3.247	0.01220 *



Linear Mixed Model – immer eine gute Idee 😊

Trt + Boden + Boden² +
Trt:Boden

Boden	Effekt tfs	SE	p- Wert
2.5	-337	264	0.22
3.0	46	161	0.78
3.25	237	143	0.12
3.35	314	145	0.048
3.5	428	160	0.017
4.0	811	261	0.073

Trt + Boden + Boden² +
Trt:Boden
+ fixer Block

Boden	Effekt tfs	SE	p- Wert
2.5	-361	190	0.11
3.0	11	113	0.93
3.25	197	98	0.09
3.35	271	99	0.034
3.5	383	109	0.013
4.0	755	183	0.006

Trt + Boden + Boden² +
Trt:Boden
+ random Block

Boden	Effekt tfs	SE	p- Wert
2.5	-323	202	0.15
3.0	45	121	0.72
3.25	229	105	0.064
3.35	303	107	0.025
3.5	413	118	0.009
4.0	781	198	0.005

Zusammenfassung

- Bei OFE mit Precision Farming (PF) ist klassische ANCOVA mit Adjustierung auf mittleren Wert der mit dem PF-System verknüpften Kovariable unbefriedigend, egal ob mit oder ohne Geostatistik.
- Bei teilflächenspezifischer Düngung ist eine Wechselwirkung zwischen Düngesystem und Bodeneigenschaften vielmehr originärer Teil der zu prüfenden Hypothese.
- Wechselwirkung Boden*Variante muss ins Modell.
- Berücksichtigung Autokorrelation über Geostatistik im dargestellten Versuch sinnvoll.
- Blockeffekt erklärt wiederum Bodenunterschiede; Random Blocks in Mixed Model vorteilhaft.
- **Inhaltliche Interpretation:**
 - Ab Ertragszone 2.9 Mehrertrag durch teilflächenspezifische Düngung
 - Ab Ertragszone 3.3 signifikant ($p < 0.05$)

Dank an A. Schlenker für die Bereitstellung der Daten