

# Flächenhafte Analyse von Bodenbewegungen

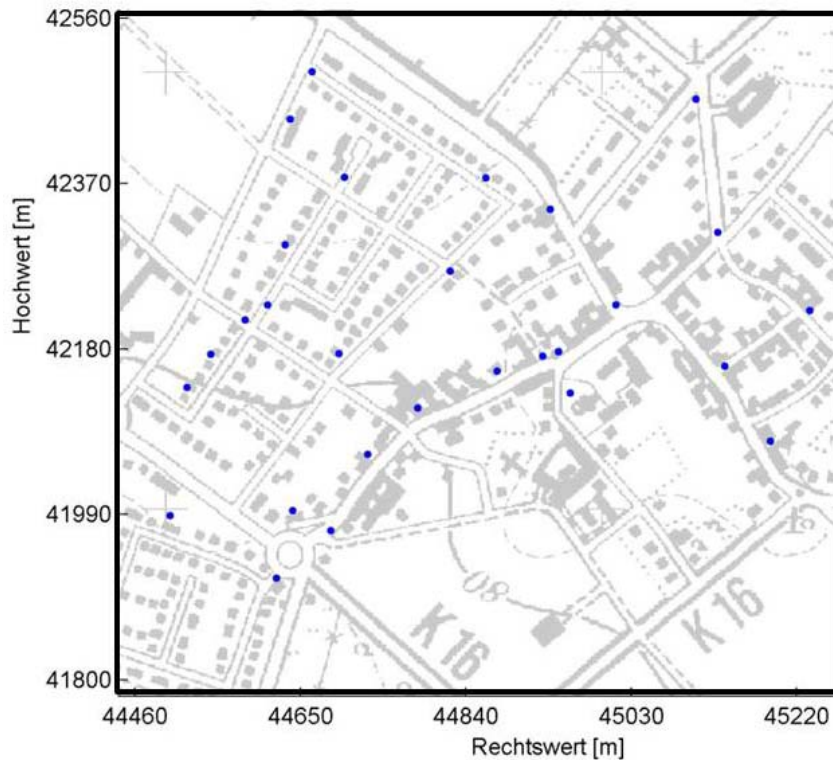
**Heiner Kuhlmann**

**12.03.2015**

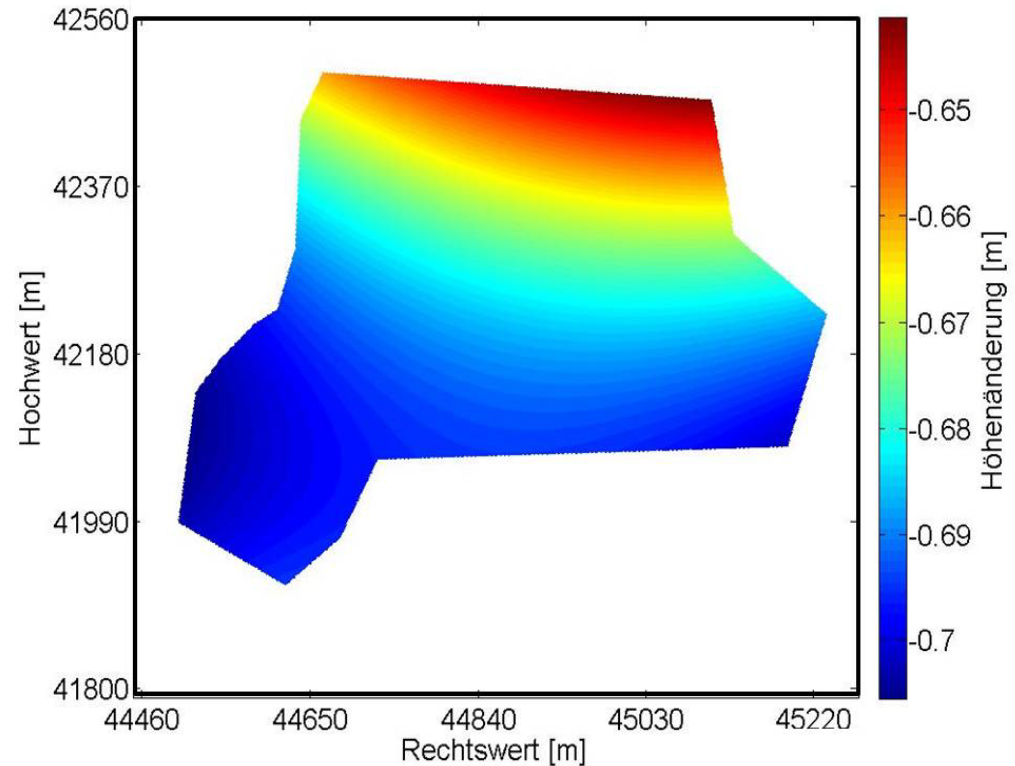
## Flächenhafte Setzung durch Sümpfungsmaßnahmen

- Beispiel Heppendorf (Setzungen zwischen 1998 und 2006)

**Punktfeld**



**Flächenhafte Setzungen**

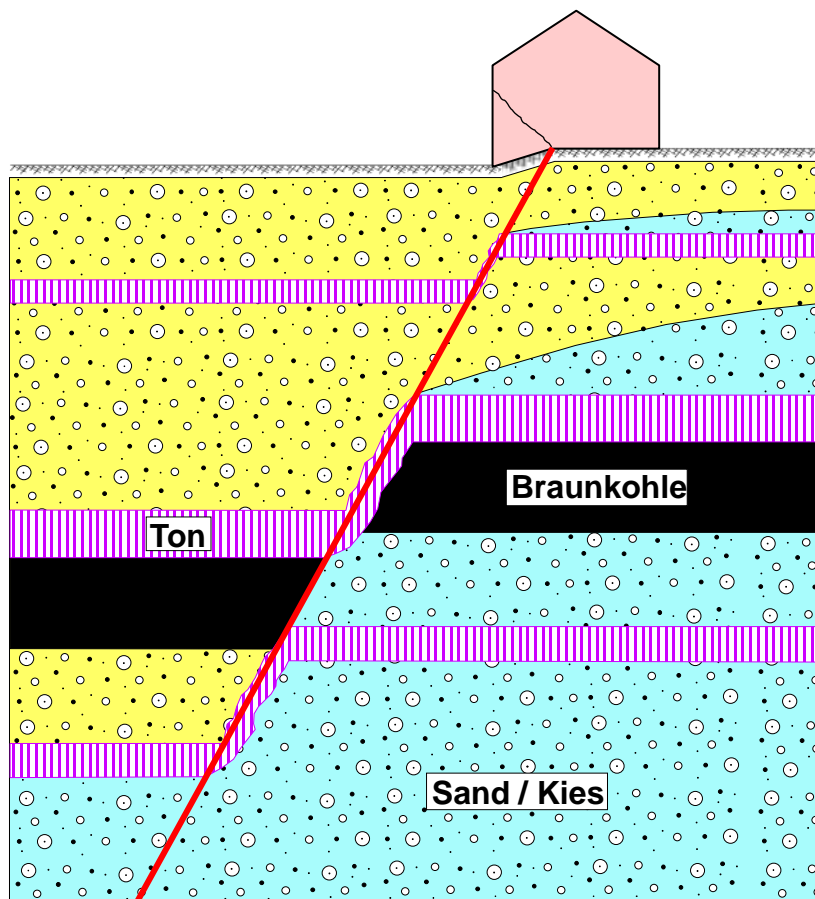


## Grundsätzliche Fragestellungen

- **Gibt es eine „gleichförmige“ Bodensenkung?**
  - Absenkung / Geneigte Ebene / Gekrümmte Fläche
  - ....
- **Gibt es geologische Besonderheiten?**
  - bewegungsaktive tektonische Störung
  - Auengebiete (mit humosen Böden, Grundwasserbeeinflussung)
- **Gibt es kleinräumige „Sonderbewegungen“?**
- **Wie können Messabweichungen von tatsächlichen Bewegungen unterschieden werden?**

## Wann können Bergschäden auftreten?

Nur bei geologischen Besonderheiten können unter bestimmten Grundvoraussetzungen Bergschäden durch unterschiedliche Bodenbewegungen auftreten. Diese sind ...

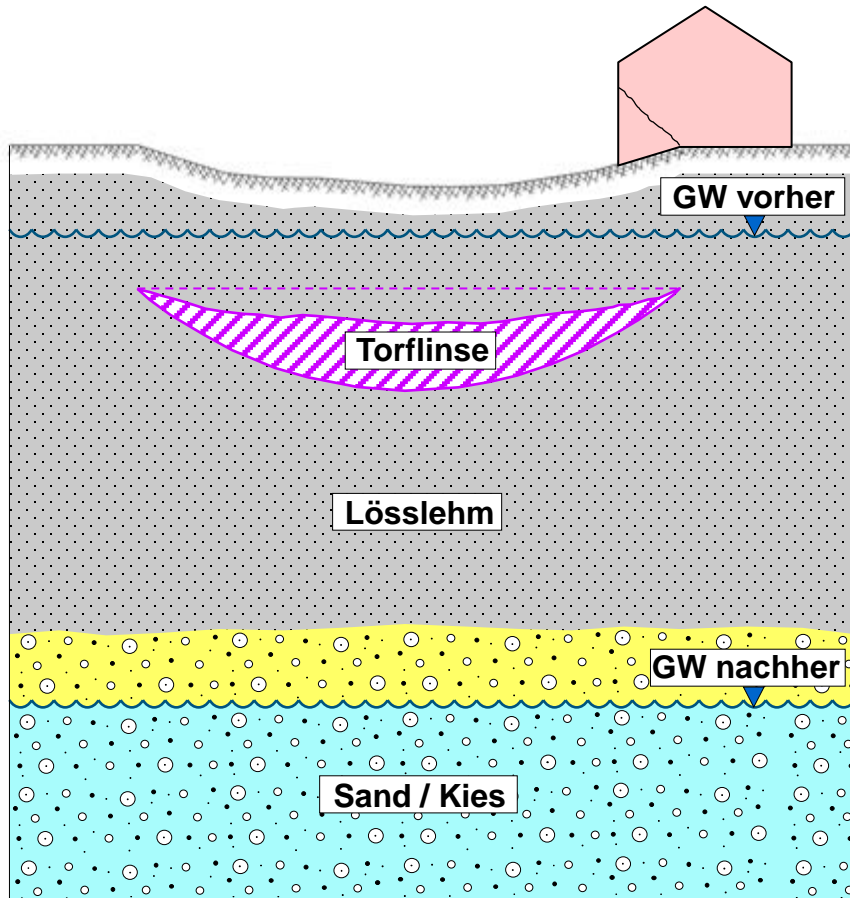


**Typ I: Hydrologisch wirksame, tektonische Störungen.**

Verhindert eine solche Störung die gleichmäßige Ausbreitung der Grundwasserabsenkung bzw. –entspannung, so kann hierdurch an der Erdoberfläche eine linienförmige, eng begrenzte und stufenartige Absatzbildung entstehen.

Quelle: RWE Power AG

## Wann können Bergschäden auftreten?



**Typ II: Vom Grundwasser umschlossene Aueböden**, die partiell mehr oder weniger humose Bestandteile oder sogar Torfschichten beinhalten.

Werden diese Böden entwässert und somit der Sauerstoffzufuhr ausgesetzt, können sie mit unterschiedlichen, schädlichen Setzungen reagieren.

Sind bauliche Anlagen über einer Absatzausbildung bzw. oberhalb entwässerter humoser Aueböden gegründet, so sind entsprechende Schäden nicht auszuschließen.

Quelle: RWE Power AG

## Höhennivellement

- Überwachung der Bodensenkungen u.a. durch die RWE Power AG und die Vermessungsverwaltung
- Messinstrument: Präzisionsnivellier
- Messkampagnen: Präzisionsnivellements in regelmäßigen zeitlichen Abständen
- Vermarkung: stabile Höhenbolzen an Häusern

### Ergebnis:

- Höhenunterschiede relativ zu einem Ausgangszeitpunkt
- Messgenauigkeit:  $\sigma = 1$  mm (Standardabweichung)

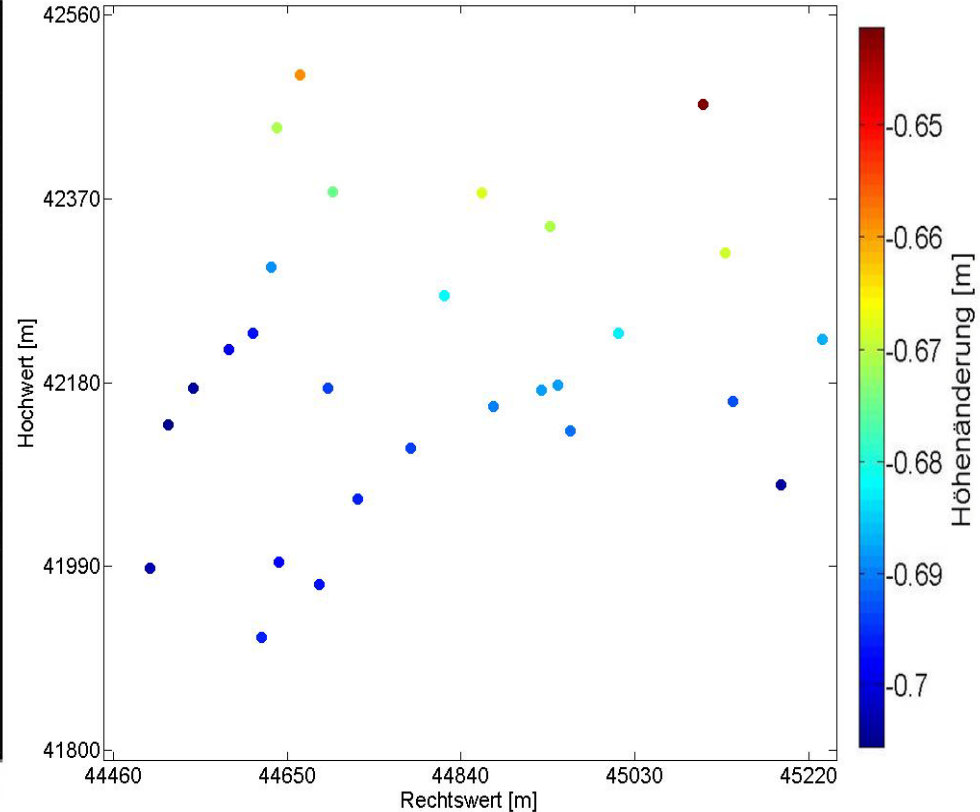
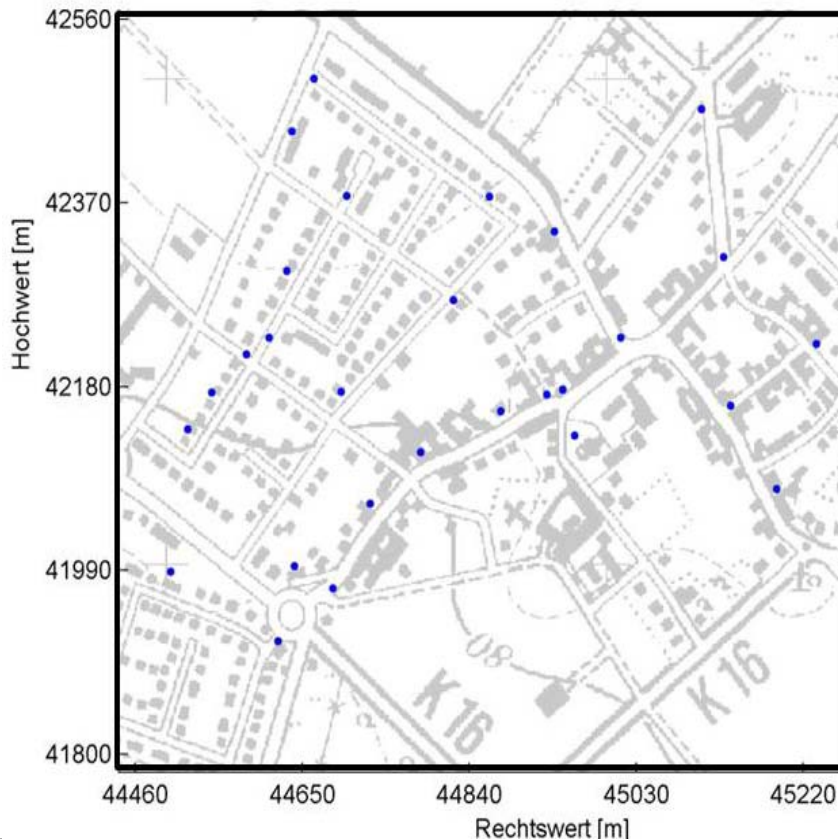


Bild: wikipedia.de

**Verwendetes Verfahren**

- 28 Messpunkte
- Ausdehnung ca. 800 m x 700 m
- Messkampagnen 1998 u. 2006
- Höhenunterschiede ca. -0.71 m bis -0.64 m
- Zunahme Richtung Süd / Süd-West

**Punktdichte ist abhängig von Komplexität der Bodensenkungen**

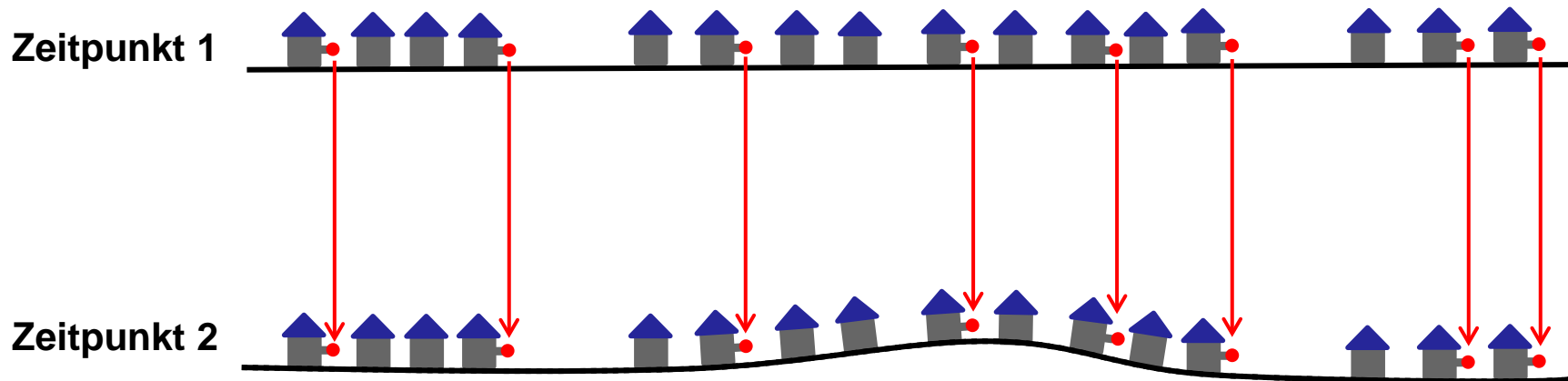


1. Vorstellung der Auswerteverfahren
2. Analyse der Punktverteilung
3. Auffinden unentdeckter Tektonik
4. Alternative Auswertemethoden

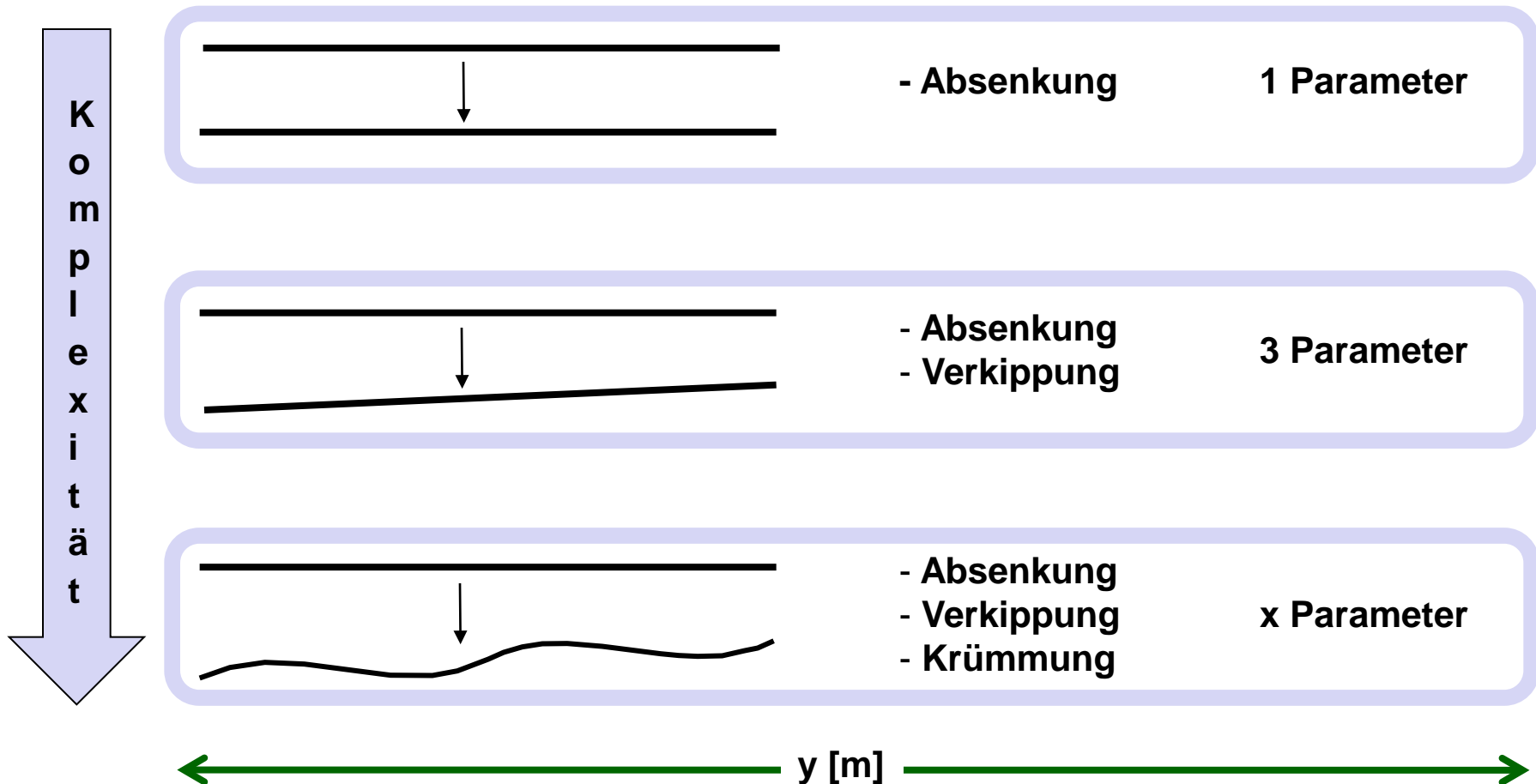


## Bestimmung von Flächendeformationen

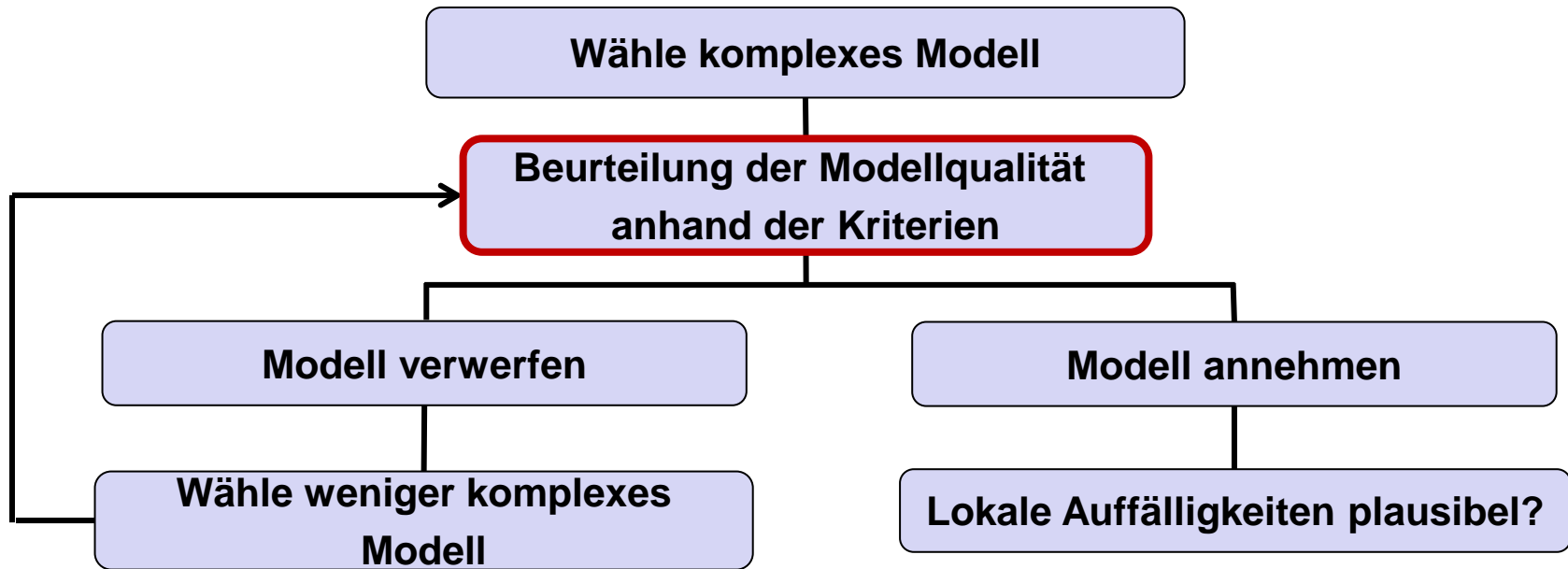
1. Höhennivellement zum Zeitpunkt 1
2. Höhennivellement zum Zeitpunkt 2
3. Bildung von Höhendifferenzen
4. Erstellung eines mathematischen Modells zur flächenhaften Darstellung
5. Übertragung des Modells auf das gesamte Untersuchungsgebiet



## Beschreibung der großräumigen Bodenbewegung durch Polynome



## Vorgehen bei der Entwicklung des Modells



### Vorteile des Vorgehens:

- es gehen keine Vorinformationen ein → hypothesenfrei
- die Übereinstimmung von Modell und Realität ist beurteilbar

## Überprüfung der Modellqualität

- **Generelles Problem / Aufgabe:**  
Trennung der Messunsicherheiten von tatsächlichen Punktbewegungen

- **Eigenschaften des Nivellements:**

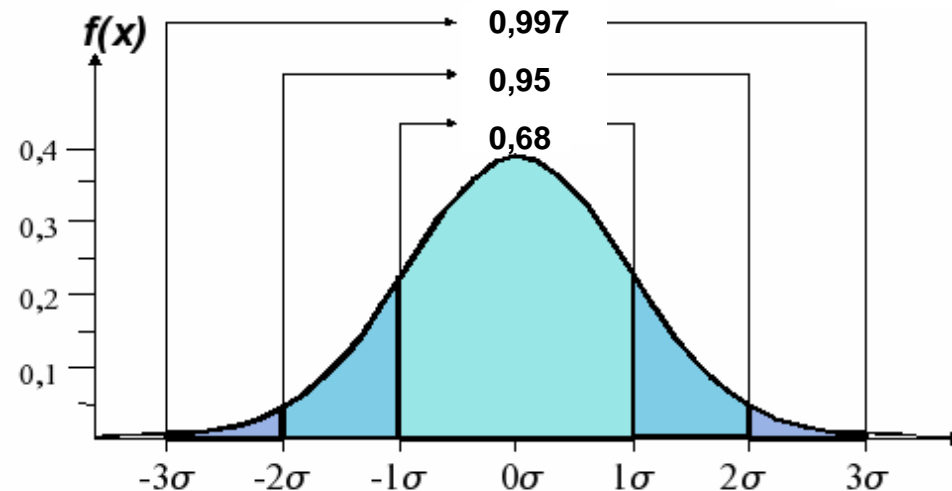
- Genauigkeit  $\sigma = 1$  mm
- Zufällige Messunsicherheiten liegen zu 99.7% im Intervall von  $3 \cdot \sigma = 3$  mm

$$f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{1}{2}\left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right)^2\right)$$

- **Festlegung Grenzwert:**

- üblich: 3 mm (99.7%)
- hier: 2.58 mm (99.0%)

➔ mehr Modellabweichungen werden als Punktbewegungen aufgefasst



## Kriterien zur Entwicklung eines geeigneten Modells

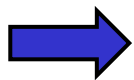
- (1) Anzahl auffällige Punkte vs. Gesamtanzahl der Punkte**
- (2) Anzahl Parameter vs. Gesamtanzahl der Punkte**
- (3) Räumliche Verteilung der auffälligen Punkte**
- (4) „Muster“ in den Modellabweichungen der Punkte**
- (5) Empirische Standardabweichung  $s$**



**Kriterien müssen für eine erfolgreiche Modellierung erfüllt sein**

## Vorteile durch hypothesenfreies Vorgehen

- Nur Höhenmessungen werden verwendet: Präzisionsnivellements mit einer sehr hohen Genauigkeit von  $\sigma = 1 \text{ mm}$
- Keine Hypothesen / Vorinformationen werden verwendet
- Mögliche Vorinformationen wären:
  - Geologie: Aufbau des Bodens
  - Aktivität des Bergbaus
  - Wassergehalt des Bodens / Grundwasserabsenkungen
- Diese Vorinformationen unterliegen viel größeren Unsicherheiten als das Präzisionsnivellement



**Unsicherheiten anderer Modelle / Messungen würde Gesamtunsicherheit erhöhen**

- Daher: Nutzung weitere Vorinformationen im Modell nicht sinnvoll
- **Aber: Infos anderer Modelle / Sensoren können bei Gesamtbeurteilung herangezogen werden**

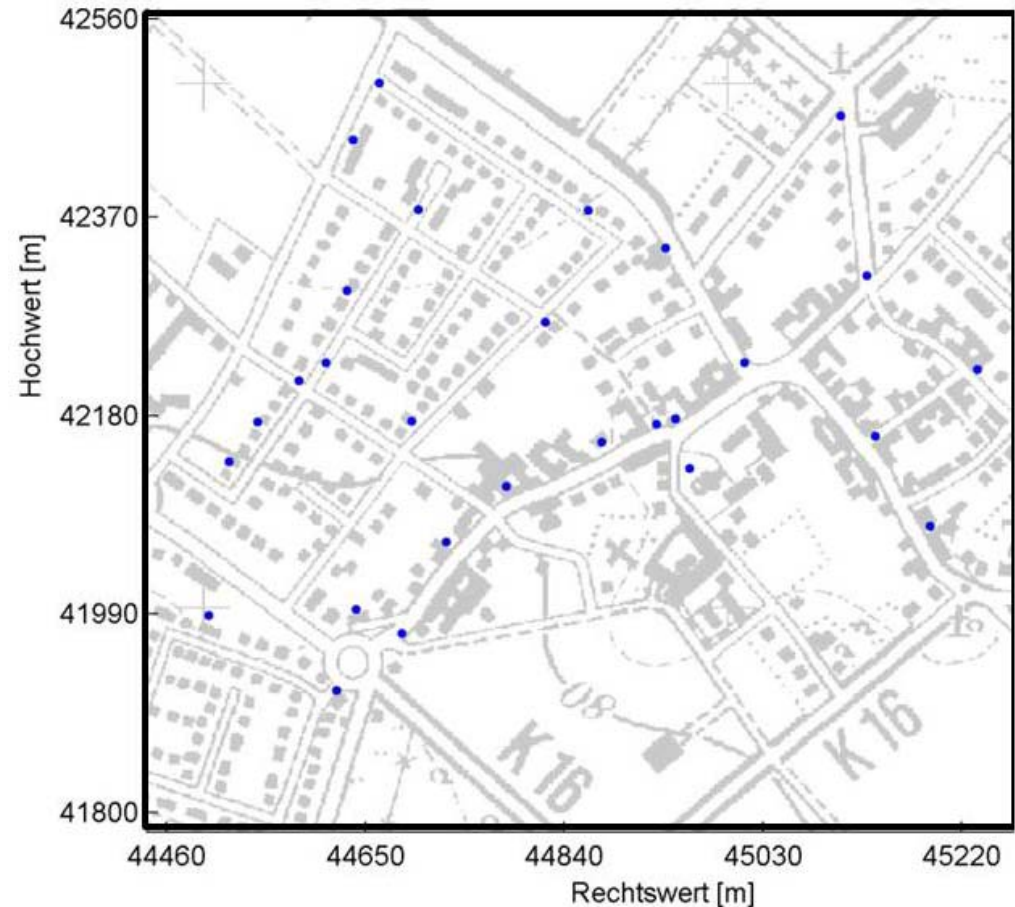
## Prüfung durch unabhängigen Gutachter Prof. Niemeier

- Aus den Ergebnissen des Auswerteverfahrens können belastbare Einschätzungen im Hinblick auf eine generelle Disposition für Bergschäden und damit für ein Bergschadensrisiko gewonnen werden.
- Diese Approximationsansätze erlauben flächenbezogene Aussagen zu den sich ergebenden Absenkungen. Diese Ergebnisse sind sehr gut geeignet, um Aussagen über das `Bergschadensrisiko` zu machen.
- Zonen mit einem bewegungshomogenen, unkritischen Verhalten innerhalb der Ortslagen zeichnen sich durch
  - die Approximation mit einer Flächenfunktion niedrigen Polynomgrads und
  - die Einhaltung der Grenzwerte für Schief lagen und Krümmungen aus.

## Verteilung der Messpunkte

- **28 Messpunkte**
- **Ausdehnung**  
**ca. 800 m x 700 m**
- **Messkampagnen**  
**1998 u. 2006**  
**(insgesamt vier Epochen)**
- **Homogene**  
**Punktverteilung**

### Heppendorf

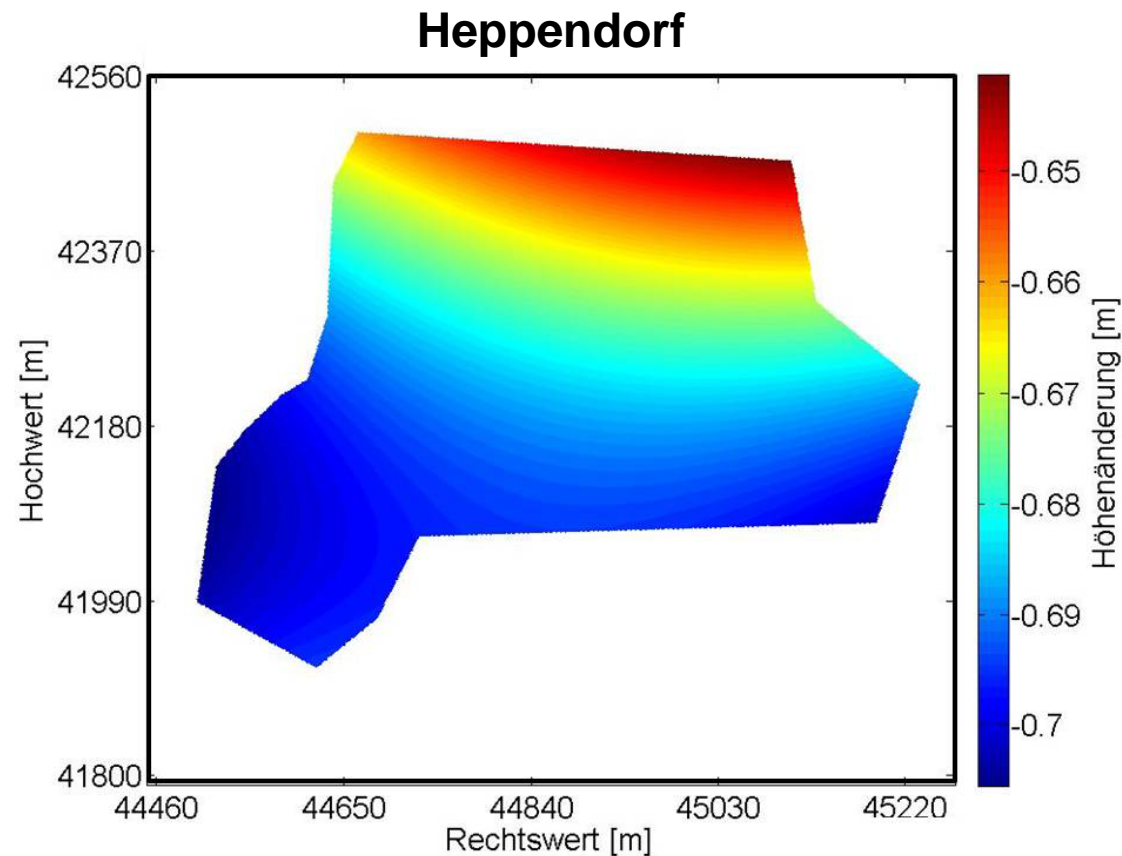




## Mathematische Flächendarstellung

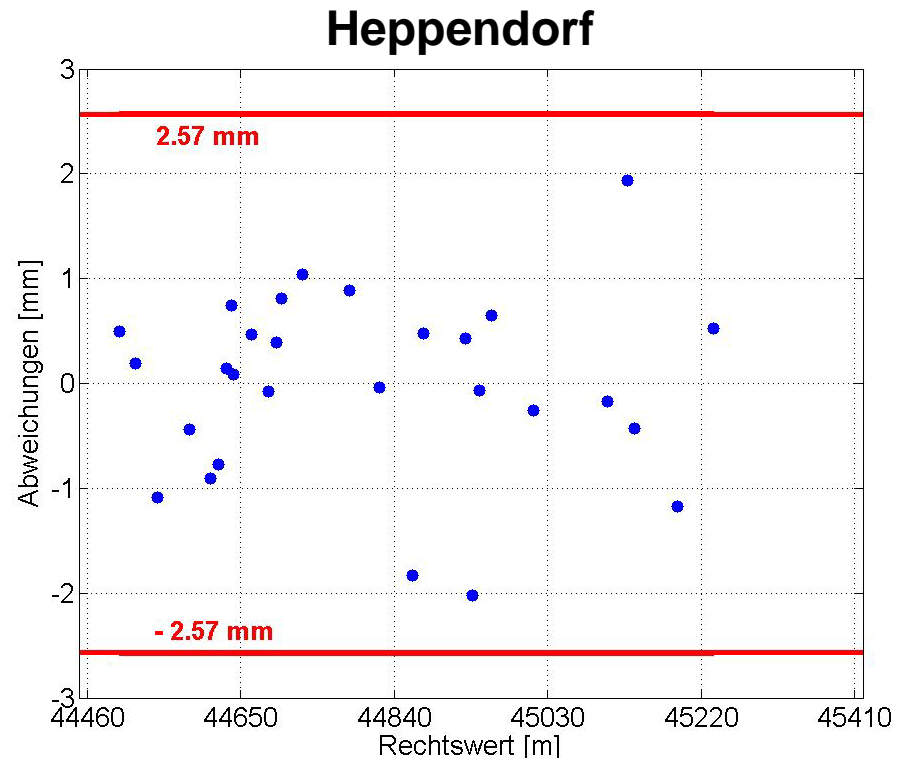
- $P(x,y) = a_{00} + a_{01} \cdot y + a_{02} \cdot y^2 + a_{10} \cdot x + a_{11} \cdot x \cdot y + a_{20} \cdot x^2$

- 6 geschätzte signifikante Parameter
- Ordnung Polynom 2
- Anzahl Parameter signifikant kleiner als Anzahl Beobachtungen



## Abweichungen von der Modellfläche

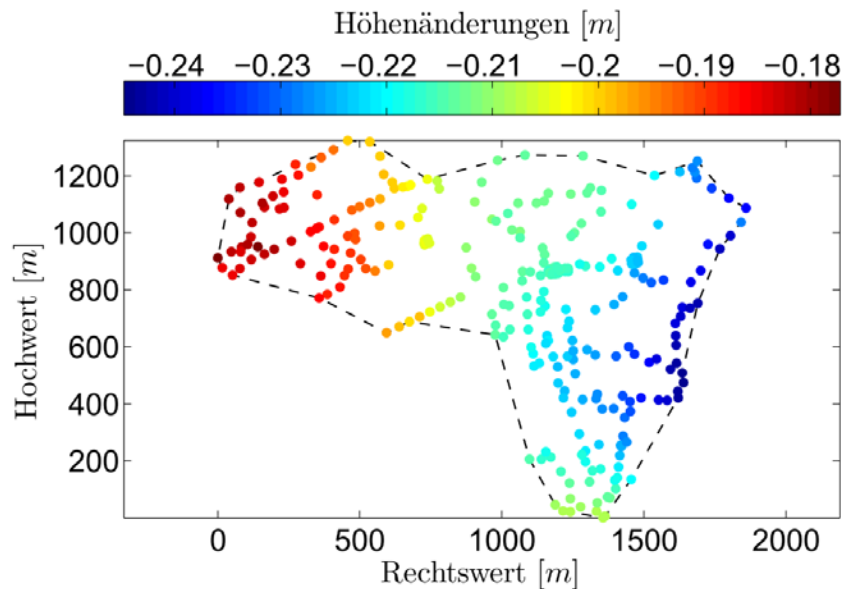
- keine auffälligen Punkte enthalten
- zufällige, unsystematische Streuung der Abweichungen
- Standardabweichung empirisch:  $s = 0.9$  mm



 **Alle Kriterien sind erfüllt**

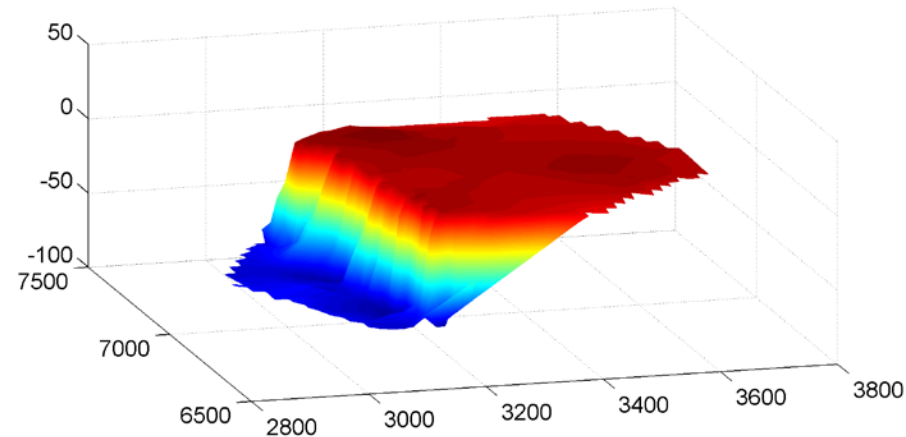
## Analyse der Punktverteilung

- Sind insgesamt genug Punkte vorhanden?
- Sind lokal zu viele oder zu wenige Punkte vorhanden?



## Auffinden unentdeckter Tektonik

- Liegt eine unentdeckte Tektonik im Gebiet?
- Wie lässt sich eine unentdeckte Tektonik aufdecken oder ausschließen?



## Alternative Auswertemethoden

- Existieren neben Polynomen bessere oder gleichwertige Auswertemethoden?
- Sind Verfahren aus dem Bergbau, insb. die Kollokation, geeigneter?

1. Vorstellung der Auswerteverfahren

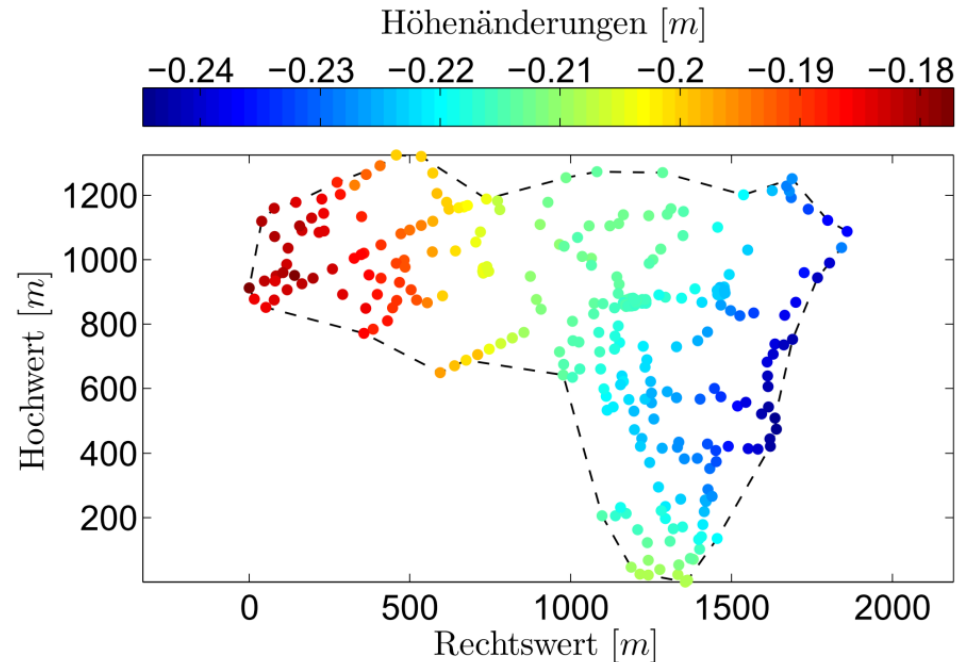
**2. Analyse der Punktverteilung**

3. Auffinden unentdeckter Tektonik

4. Alternative Auswertemethoden

## Warum Analyse der Punktverteilung?

- Sind insgesamt genug Punkte vorhanden?
- Sind lokal zu viele oder zu wenige Punkte vorhanden?
- Wie ist mit dem Randbereich umzugehen?

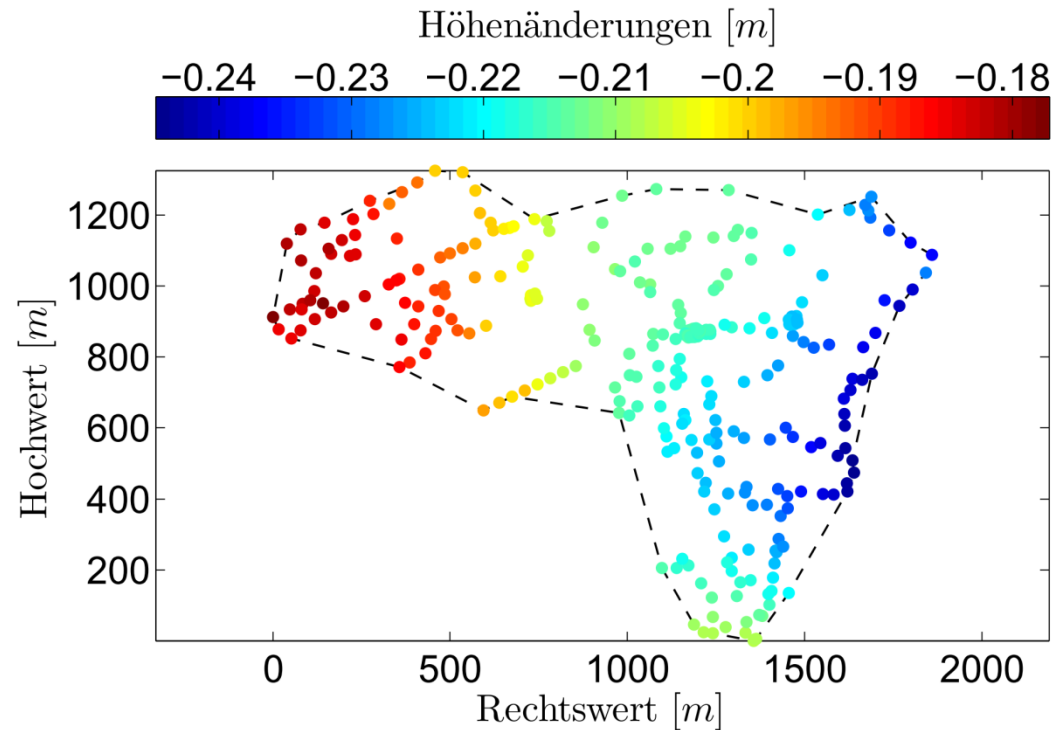


- Lokale Punktanhäufungen beeinflussen die Bestimmung der Flächendeformationen in höherem Maße
- Es ist schwierig, Aussagen über Bereiche zu treffen, wo wenig Punkte vorhanden sind
- Die Zuverlässigkeit der Aussagen hängt von der Homogenität der räumlichen Punktverteilung ab
- Die Punktzahl sollte entsprechend der Komplexität der Bodenbewegungen steigen

**Wie viele Punkte werden benötigt  
und wo müssen diese liegen?**

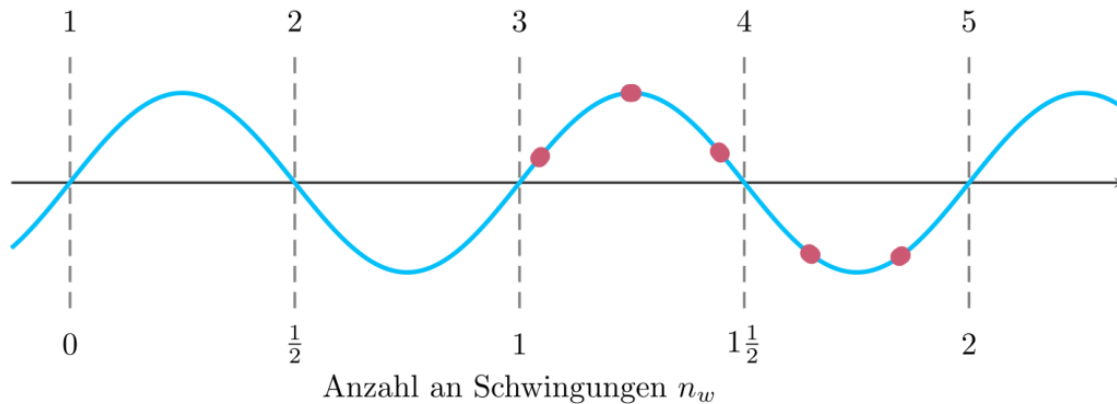
Ansatz:

1. Nehme vorhandene Situation  
⇒ Beschreibe „Welligkeit“ (Polynom)
2. Methoden aus Signalverarbeitung (Abtasttheorem) und Ausgleichsrechnung (Zuverlässigkeitsanalyse)  
⇒ Generiere Gitter über das Gebiet in Abhängigkeit der „Welligkeit“
3. In jeder Gitterzelle muss mindestens 1 Punkt liegen



## Signalverarbeitung

Ordnung des Polynoms  $a$



- ⇒ Wie viele Punkte brauche ich?
- ⇒ Wo sollten zusätzliche Punkte liegen?

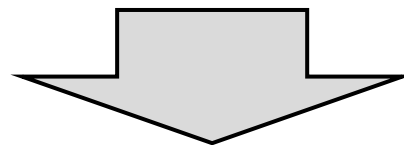
## Zuverlässigkeitstheorie

$$\hat{p} = (A^T Q_{ll}^{-1} A)^{-1} A^T Q_{ll}^{-1} l$$

$$\hat{l} = \underbrace{A(A^T Q_{ll}^{-1} A)^{-1} A^T Q_{ll}^{-1}}_H l$$

$$r_i = 1 - [H]_{i,i}$$

- ⇒ Sind die Ergebnisse zuverlässig genug?
- ⇒ Wo muss die Zuverlässigkeit größer werden?

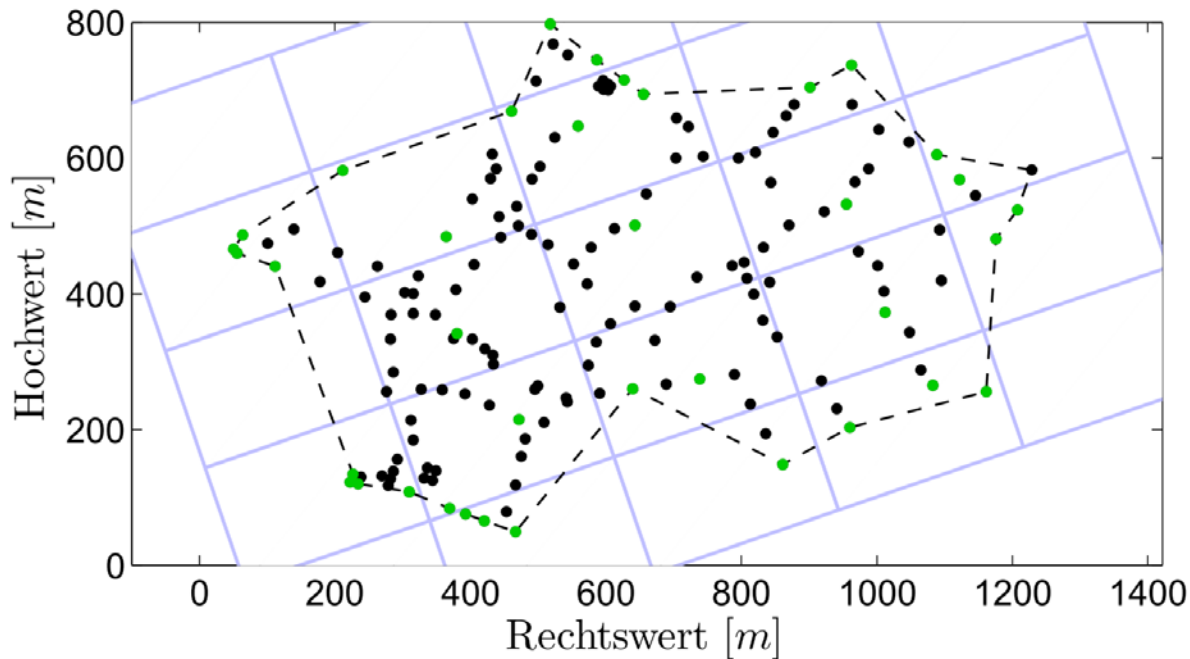


**Erstellung einer optimalen Punktanordnung (Netzkonfiguration)  
auf Basis gegebener Daten**

## Beispielgebiet Heppendorf (2009-2011)

Ziel:

„In jeder Gitterzelle  
sollte ein Punkt  
liegen“



- Originale Daten / gegebene Punkte: **schwarz** + **grün** (162)
- Flächenpolynom: Ordnung 2 / 6 Parameter

### Optimierung

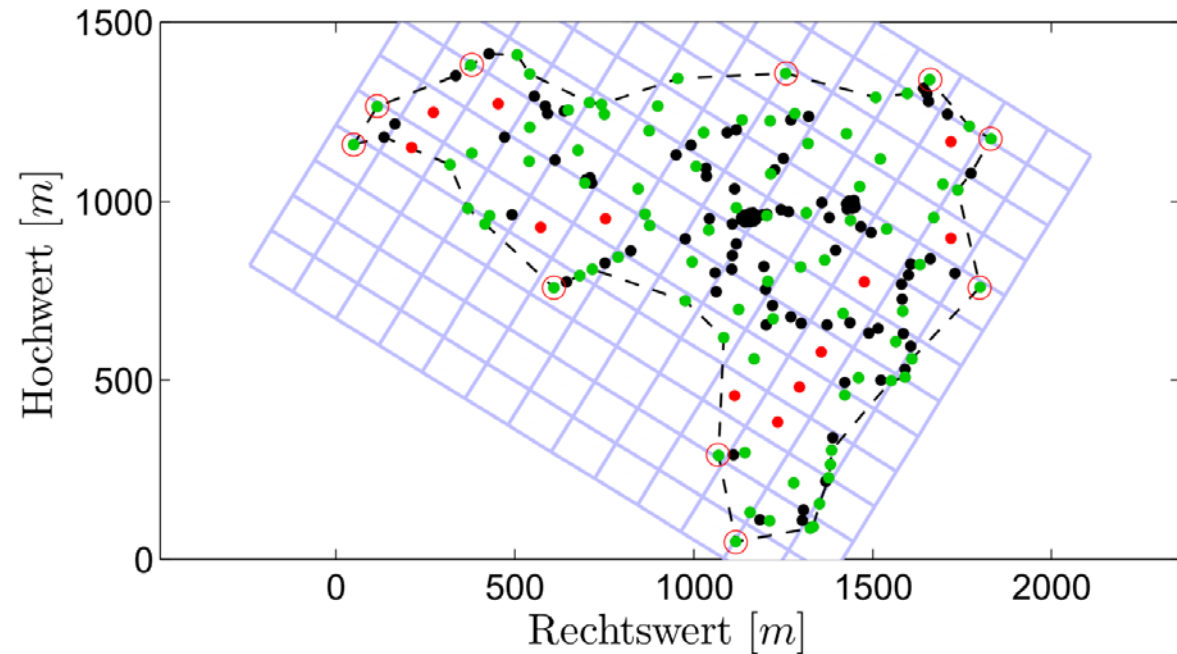
- **schwarz**: Kontrollpunkte (können zur Verifizierung dienen) (125)
- **grün**: optimal verteilte gegebene Punkte (37)



## Beispielgebiet Berrendorf (1992-2007)

Ziel:

„In jeder Gitterzelle  
sollte ein Punkt  
liegen“



- Originale Daten / gegebene Punkte: **schwarz + grün** (194)
- Flächenpolynom: Ordnung 6 / 23 Parameter

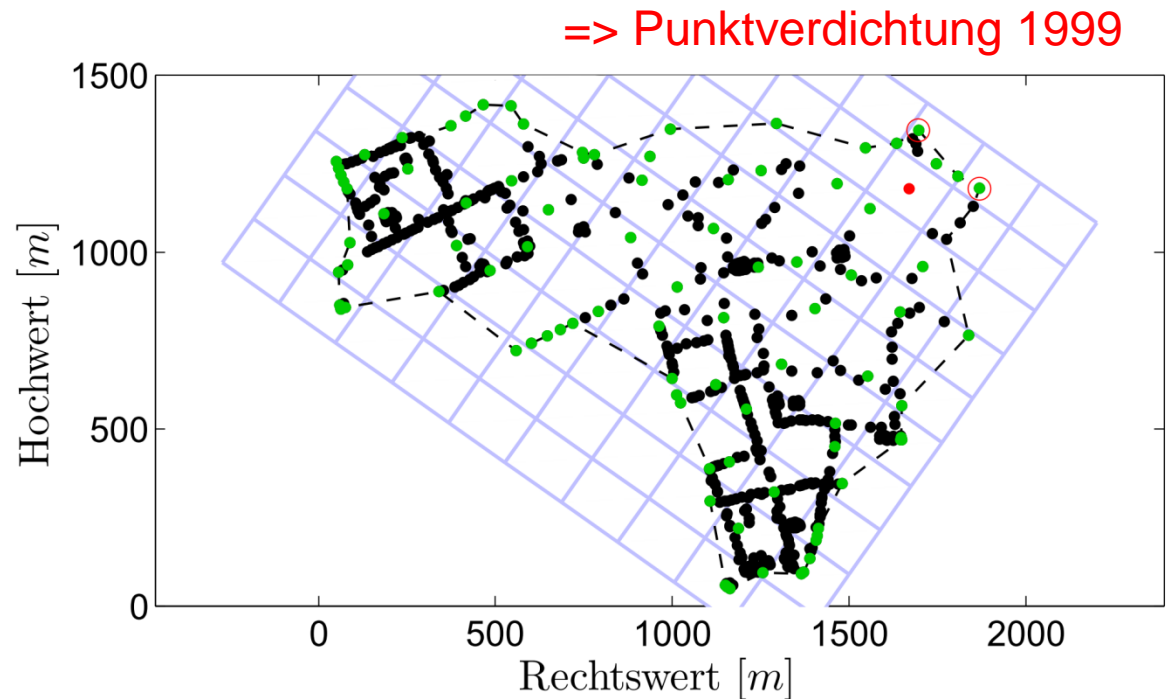
### Optimierung

- **schwarz**: Kontrollpunkte (können zur Verifizierung dienen) (110)
  - **grün**: optimal verteilte gegebene Punkte (84)
  - **rot**: hinzuzufügende Punkte (12)
  - **rote Kreise**: hinzuzufügende „Zwillingspunkte“ für optimale Zuverlässigkeit (10)
- } 106

## Beispielgebiet Berrendorf (1999-2007)

Ziel:

„In jeder Gitterzelle  
sollte ein Punkt  
liegen“



- Originale Daten / gegebene Punkte: **schwarz + grün** (638)
- Flächenpolynom: Ordnung 5 / 17 Parameter

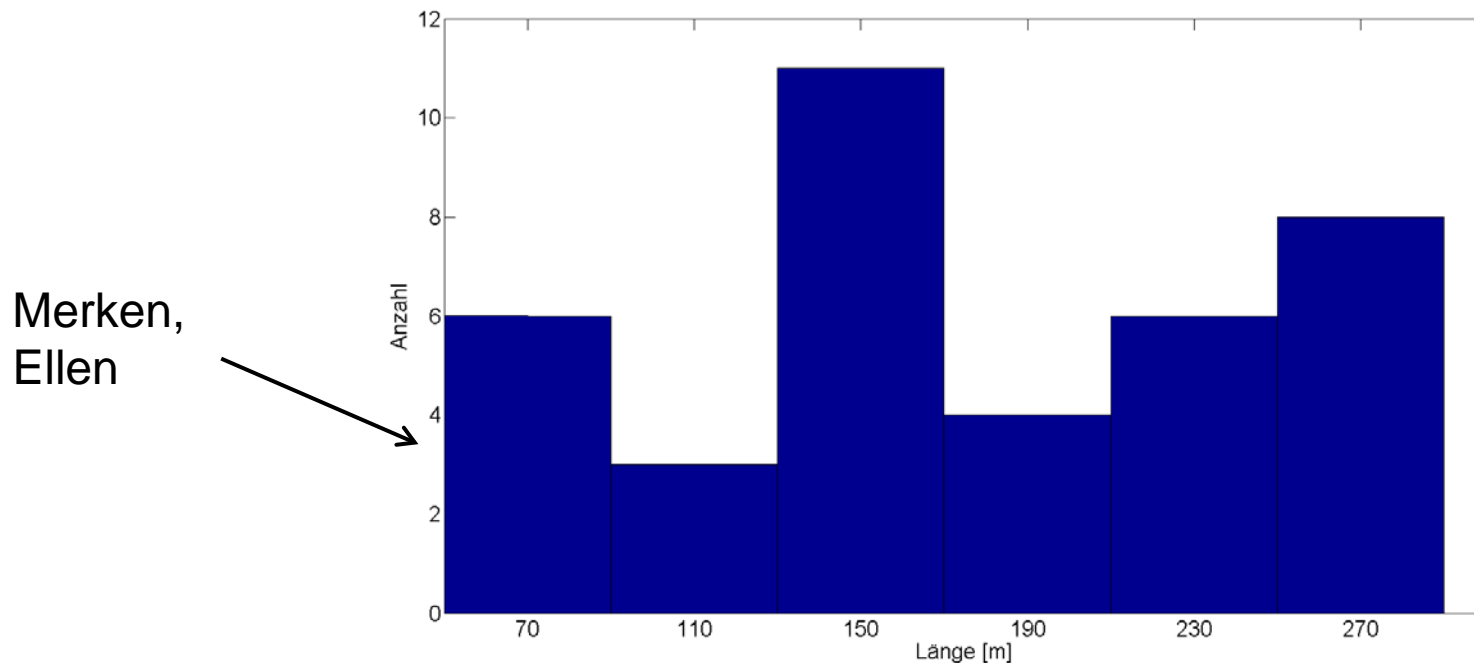
### Optimierung

- **schwarz**: Kontrollpunkte (können zur Verifizierung dienen) (546)
- **grün**: optimal verteilte gegebene Punkte (92)
- **rot**: hinzuzufügende Punkte (1)
- **rote Kreise**: hinzuzufügende „Zwillingspunkte“ für optimale Zuverlässigkeit (2)

} 95

## Analyse bisheriger Punktverteilung

- Merken, Hochneukirch, Heppendorf, Berrendorf, Ellen, Elsdorf
- Bisher Auflistung von 19 Epochen
- Mittelwert optimierter Punktabstände: 180 m



- **Punktanzahl** teilweise völlig ausreichend
- **Punktverteilung / Punktdichte** teilweise optimierbar
- Was bedeuten fehlende Punkte?
  - Aussagekraft schwächer in Bereichen mit optimierbarer Punktanzahl
  - Entwickeltes Verfahren ermöglicht **verbesserte und zuverlässige Aussagen**  
=> Zusatz zu bisherigen Analysen
  - **Bisherige Gutachten behalten volle Gültigkeit**

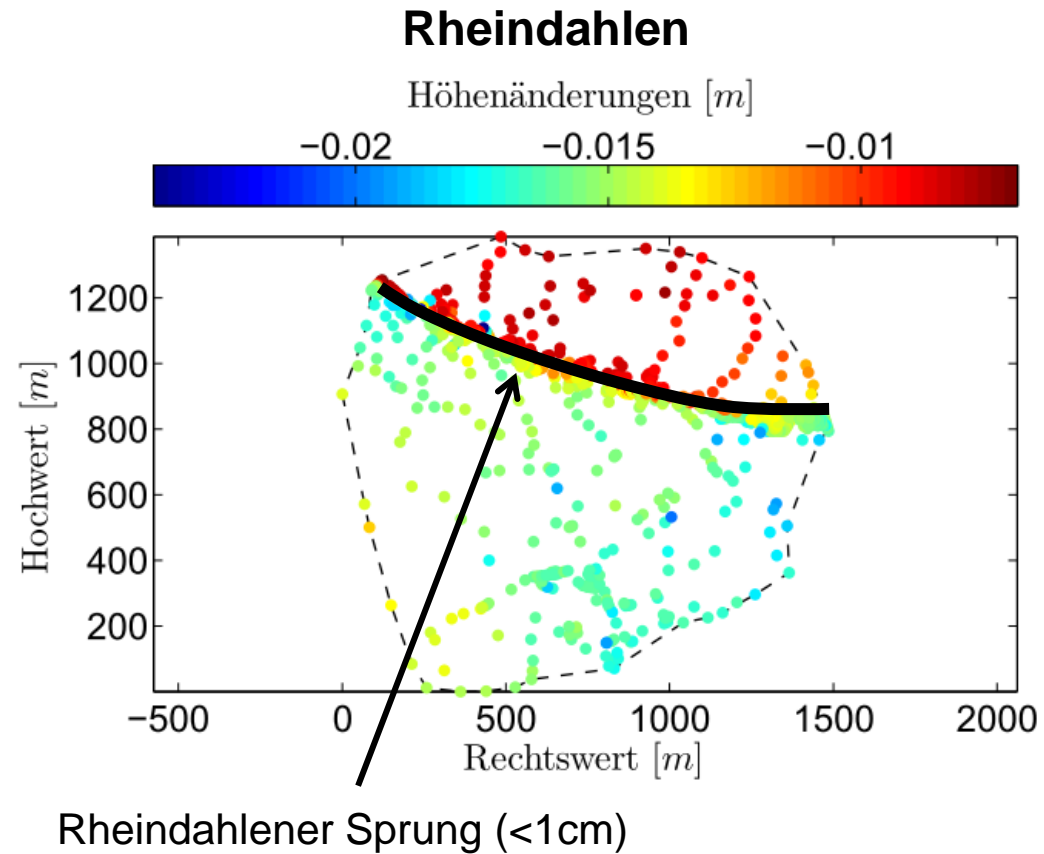
- Entwickeltes Verfahren zur Beurteilung / Optimierung der Punktverteilung ist
  - objektiv
  - hergeleitet aus der Signalverarbeitung / Statistik
  - international begutachtet:

C. Holst, C. Eling & H. Kuhlmann (2013). “**Automatic optimization of height network configurations for detection of surface deformations**”, Journal of Applied Geodesy, Vol. 7, S. 103-113

1. Vorstellung der Auswerteverfahren
2. Analyse der Punktverteilung
- 3. Auffinden unentdeckter Tektonik**
4. Alternative Auswertemethoden

Ausgangslage:

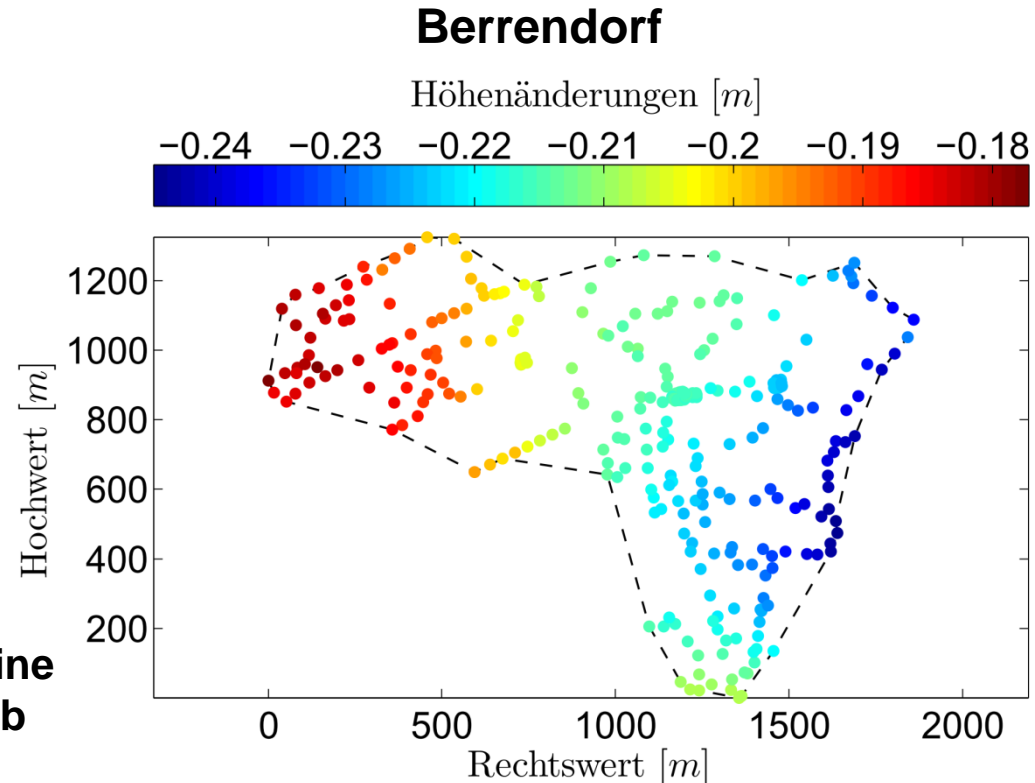
- Tektonik kann in manchen Gebieten problemlos abgegrenzt werden (Beispiel Rheindahlen)
- Detektion hier relativ einfach und offensichtlich



Ausgangslage:

- Tektonik kann in manchen Gebieten problemlos abgegrenzt werden (Beispiel Rheindahlen)
- Detektion hier relativ einfach und offensichtlich
- Zumeist ist die Abgrenzung von einer Tektonik aber nicht offensichtlich (Beispiel Berrendorf)
- Bedeutende Frage:  
„**Können wir ausschließen, dass sich eine bisher unentdeckte Tektonik innerhalb des Gebietes befindet?**“

⇒ Entwicklung einer Strategie zur Beurteilung



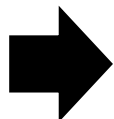
## Algorithmus in 2 Schritten

### 1. Detektion von möglichen Bruchkanten

- **Methoden aus der digitalen Bildverarbeitung**
- **Definition von 3 Subgebieten:**
  - Subgebiet 3 enthält wahrscheinlichste Bruchkante
  - Subgebiete 1 und 2 sind die Bereiche, die Subgebiet 3 umgeben

### 2. Beschreibung von möglichen Bruchkanten

- **Methoden aus der Ausgleichsrechnung**
- **Analysiere die Signifikanz der wahrscheinlichsten Bruchkante**
  - Approximiere nur Subgebiete 1 und 2 mit Bewegungsmodell
  - Beurteile, ob Beobachtungen des Subgebietes 3 zu diesem Modell passen oder auffällig sind und auf eine Bruchkante hindeuten

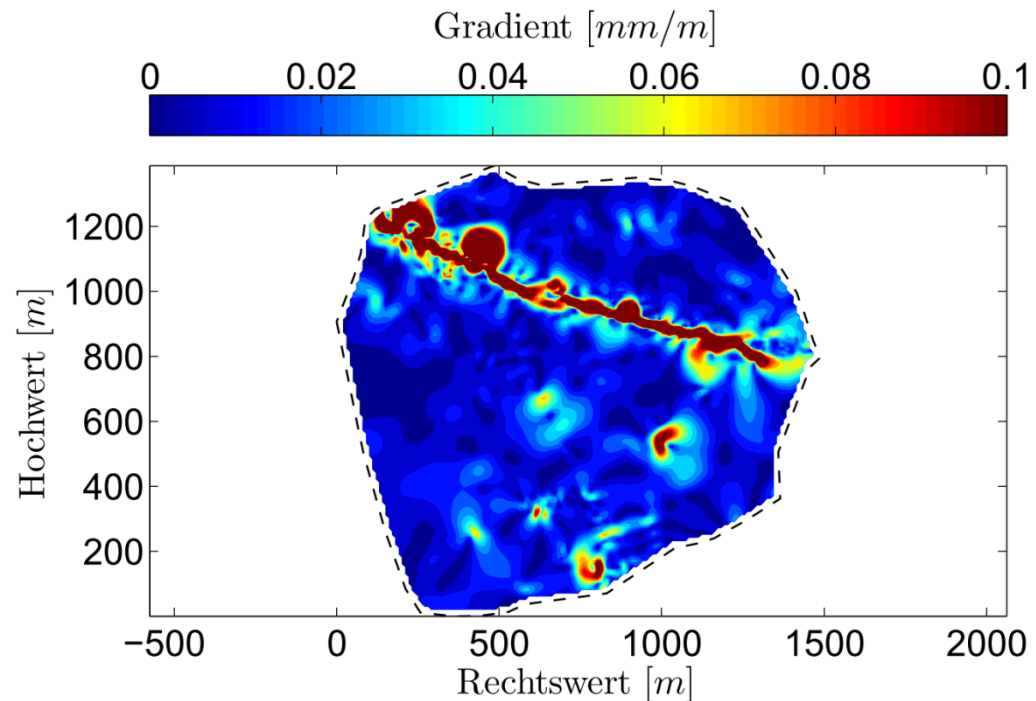
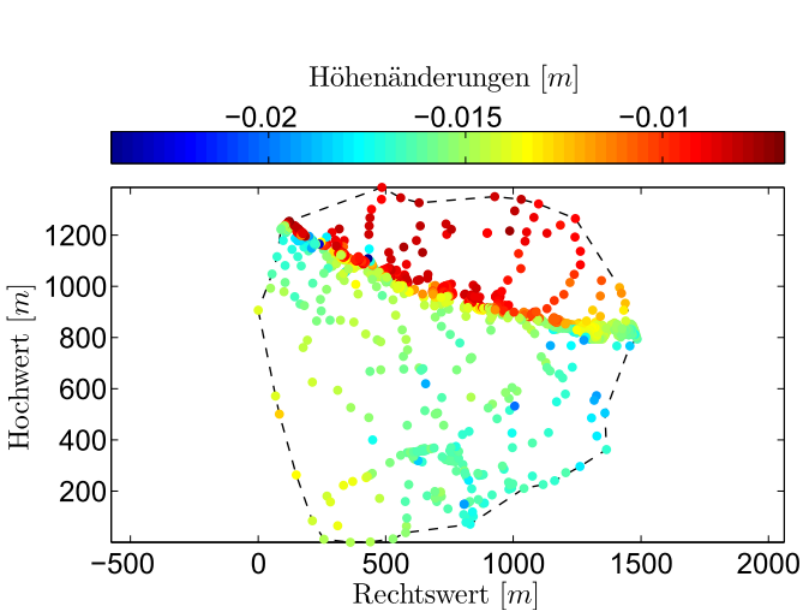


Beschreibung anhand von zwei Beispielen:  
Rheindahlen und Berrendorf



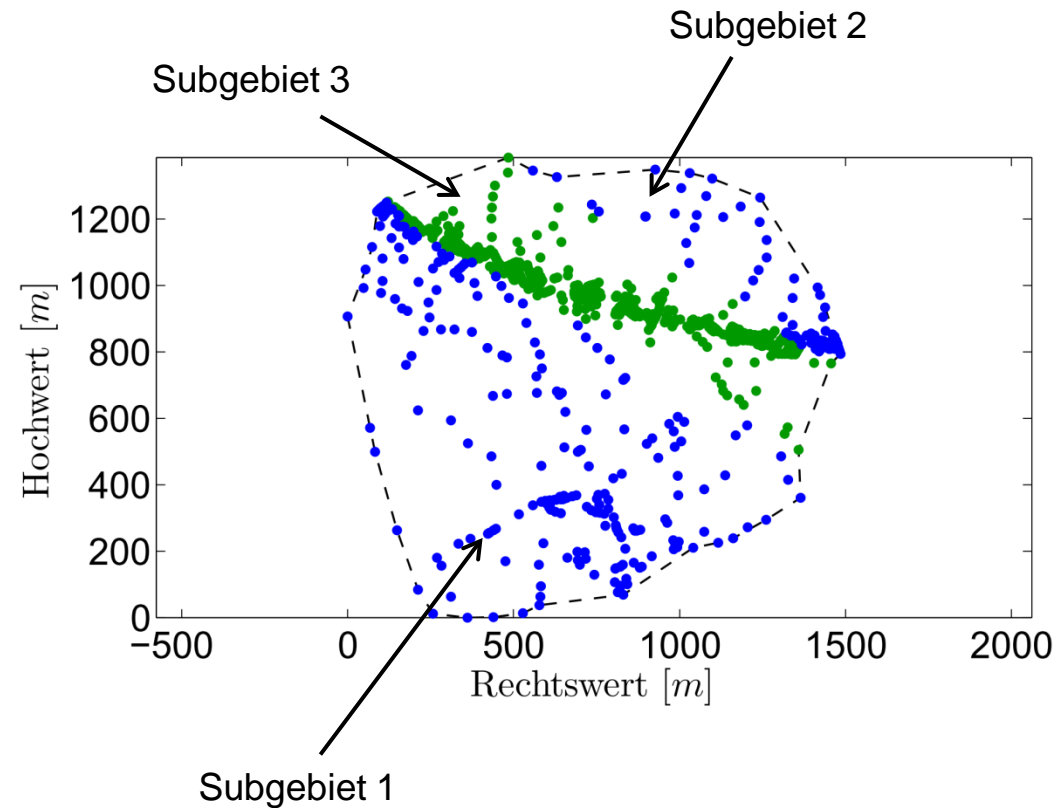
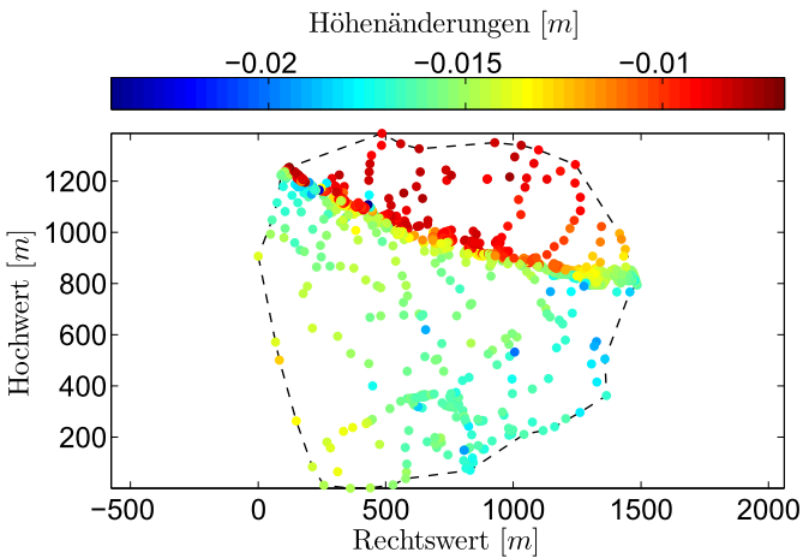
# 1. Detektion von möglichen Bruchkanten:

- A) Interpolation + Gradientenbildung



## 1. Detektion von möglichen Bruchkanten:

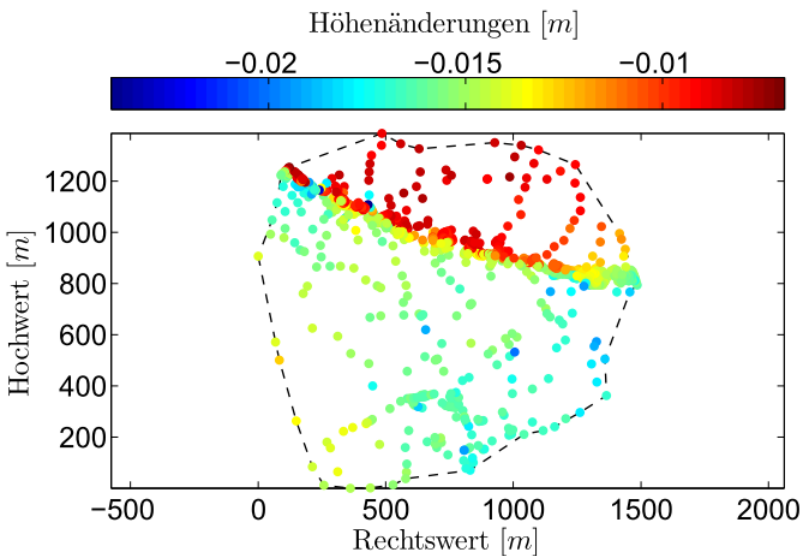
- B) Trennung in Subgebiete



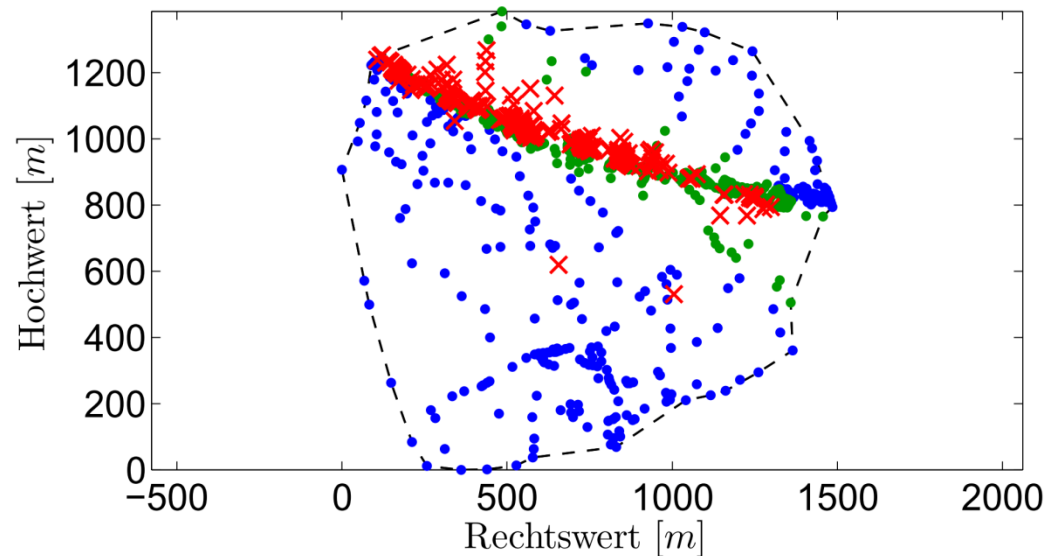
**Stelle mit wahrscheinlichster Bruchkante gefunden**

## 2. Beschreibung von möglichen Bruchkanten:

- Analyse der Residuen



x: auffälliger Punkt  
(Abweichung signifikant  $> \sigma=1\text{mm}$ )



**Ausreißer sehr auffällig:**

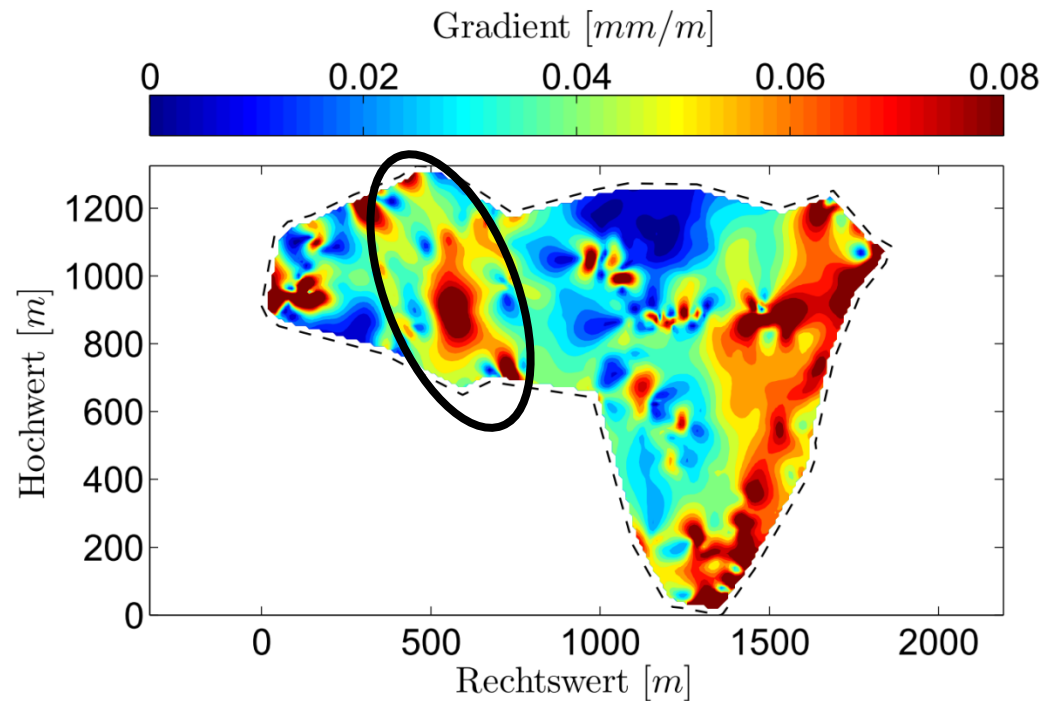
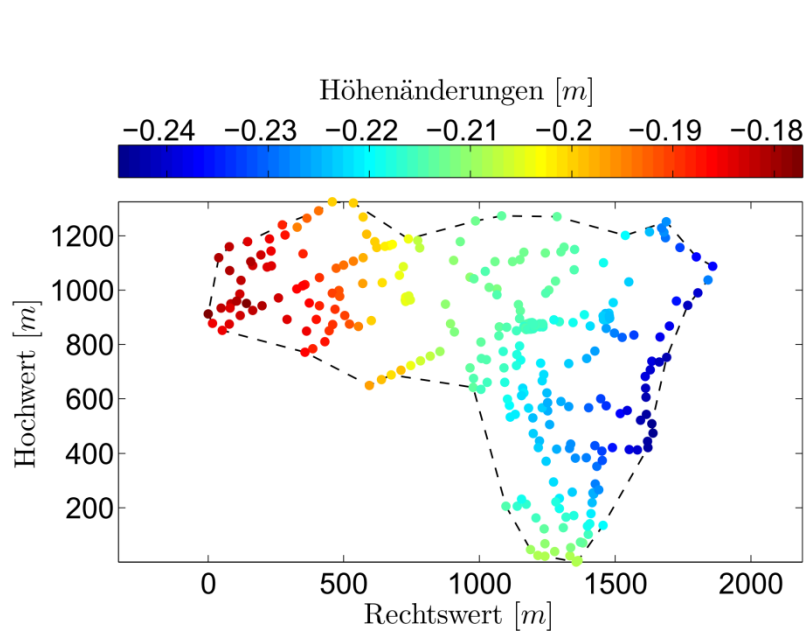
1. Große Anzahl
2. Systematische räumliche Verteilung



**Rheindahlener Sprung  
korrekt analysiert!**

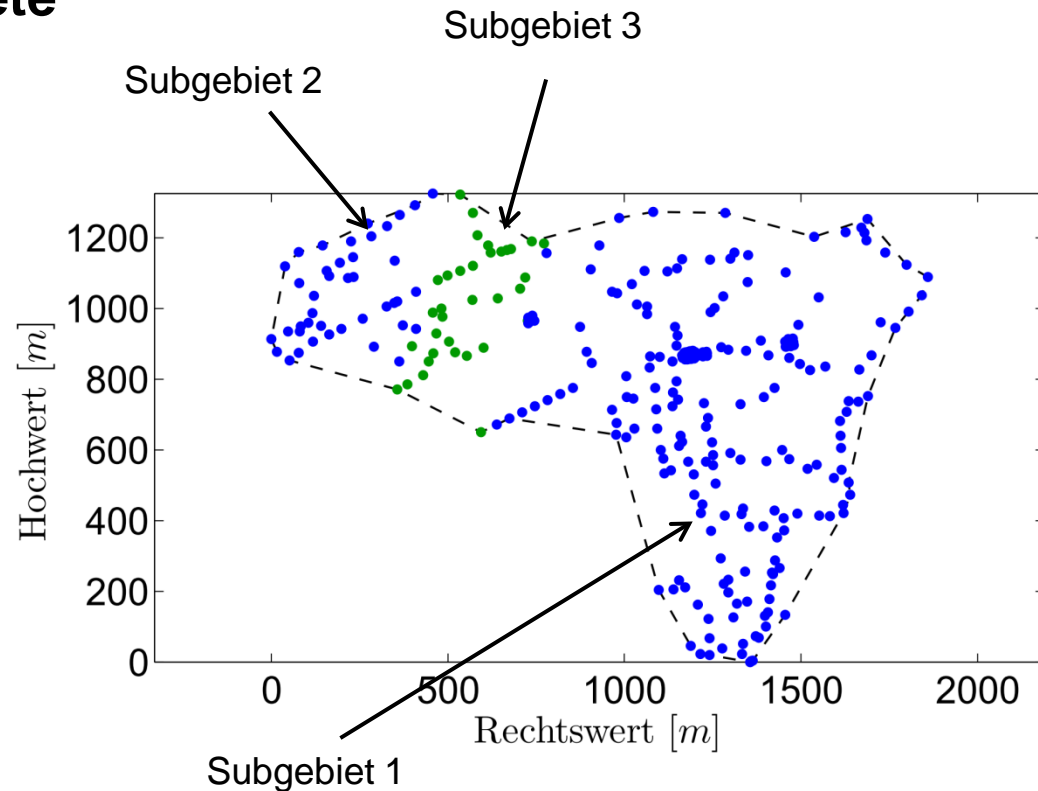
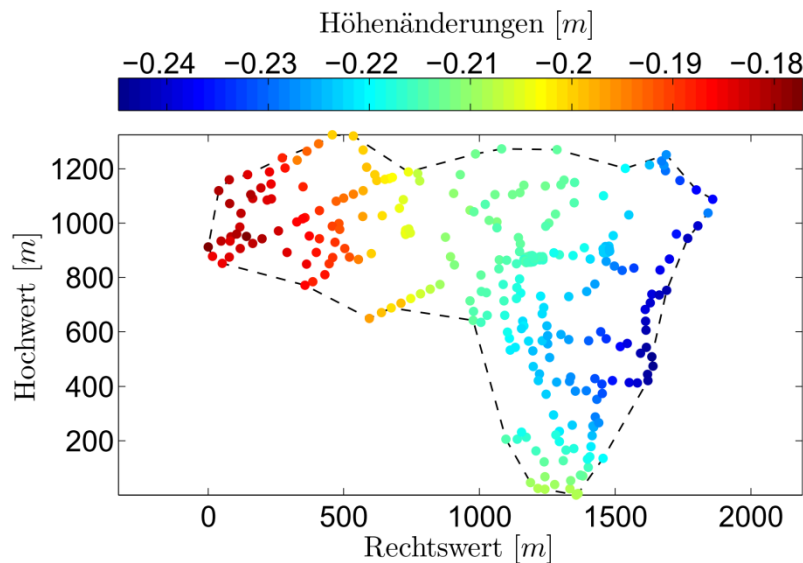
## 1. Detektion von möglichen Bruchkanten:

- **A) Interpolation + Gradientenbildung**



# 1. Detektion von möglichen Bruchkanten:

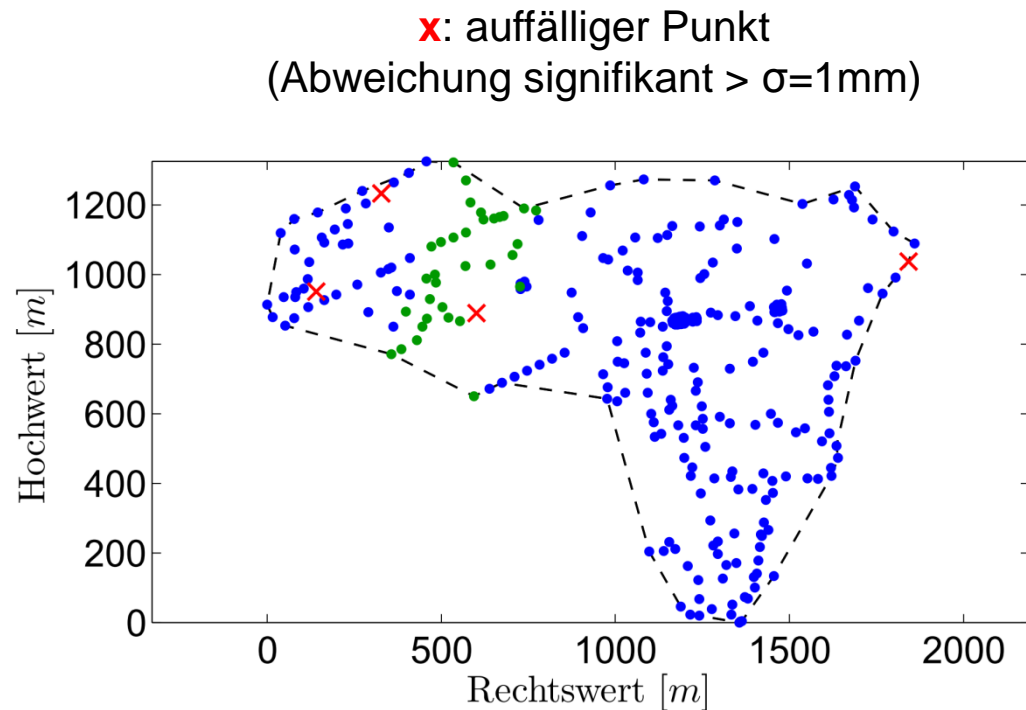
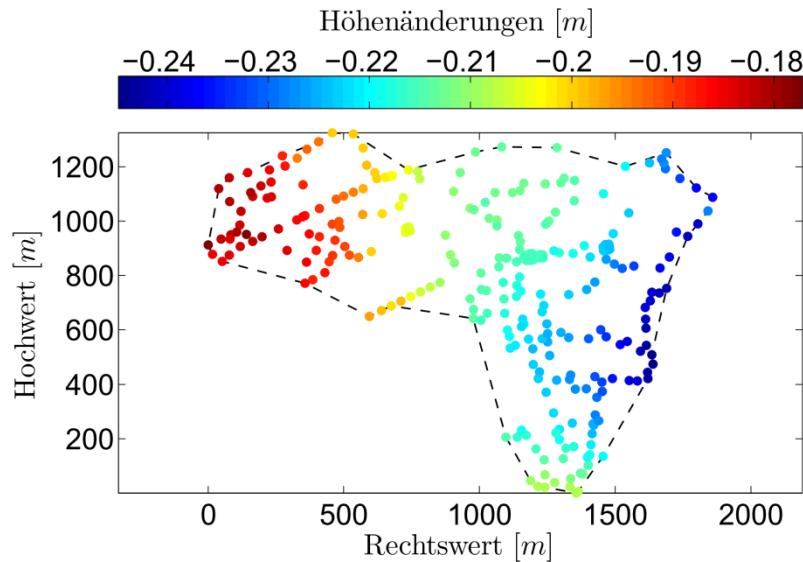
- B) Trennung in Subgebiete



**Stelle mit wahrscheinlichster Bruchkante gefunden**

## 2. Beschreibung von möglichen Bruchkanten:

- Analyse der Residuen



**Ausreißer unauffällig:**

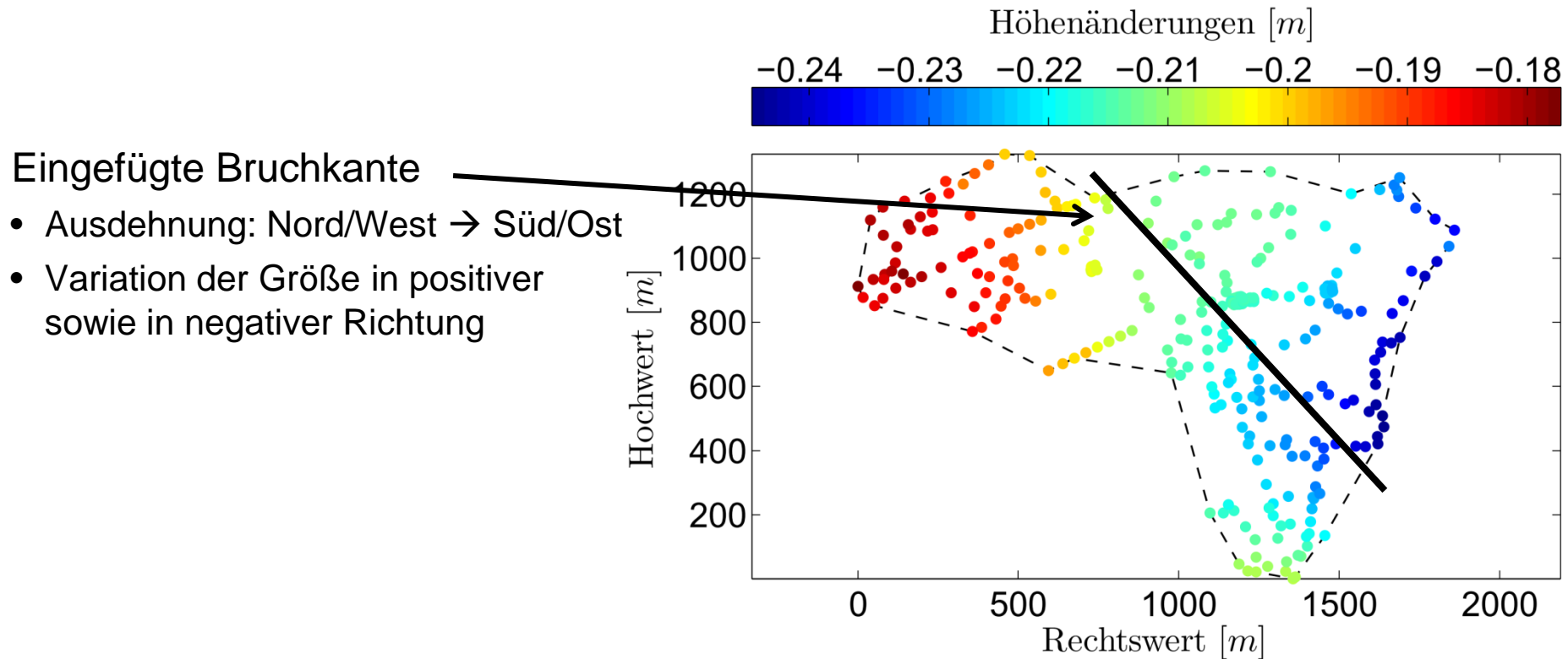
1. Sehr geringe Anzahl
2. Zufällige räumliche Verteilung



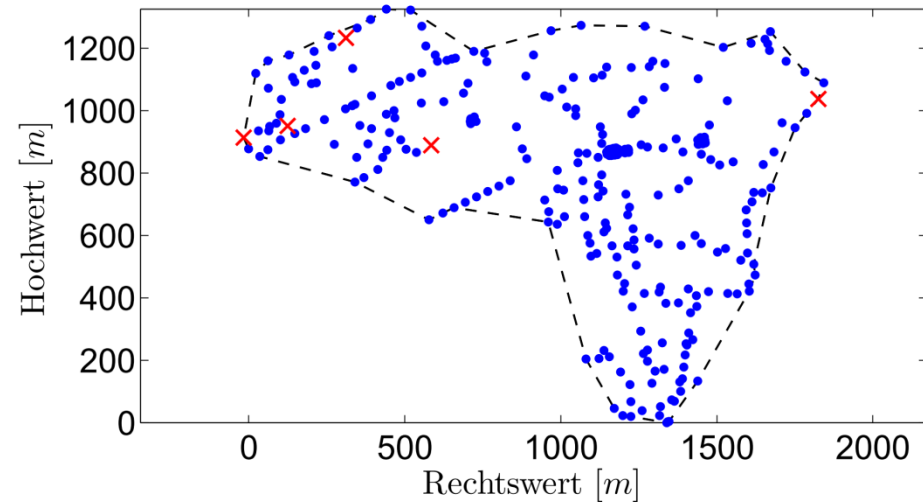
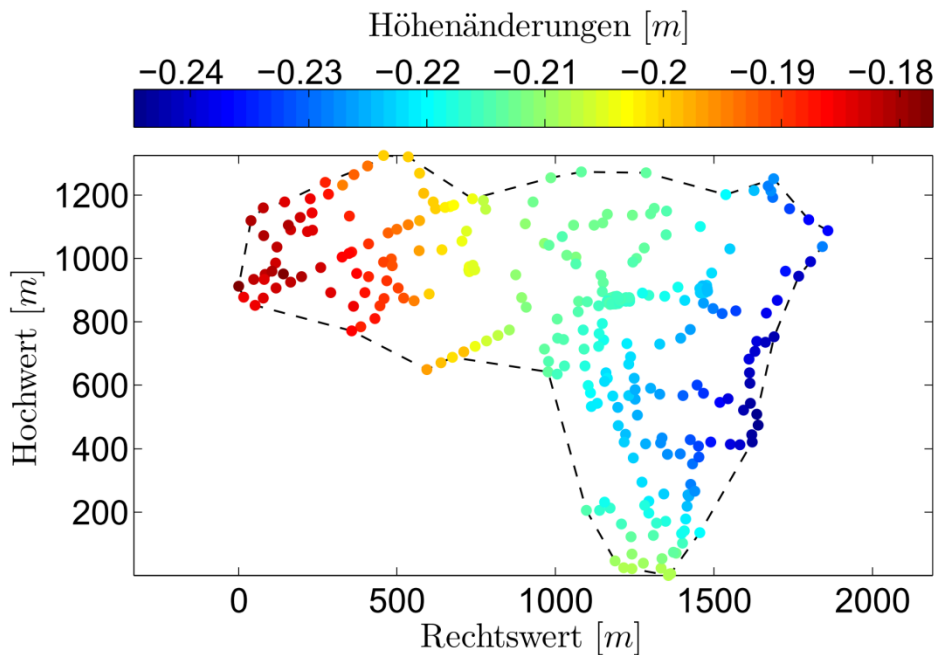
**Keine Hinweise auf Bruchkante**

## Ab wann wird eine Bruchkante gefunden?

- Idee: Nehme Gebiet, simuliere Bruchkante von  $X$  mm an versch. Positionen
- Wie groß muss  $X$  sein, damit die Bruchkante in den Residuen als auffällig detektiert wird?



## Ab wann wird eine Bruchkante gefunden? => + 0mm



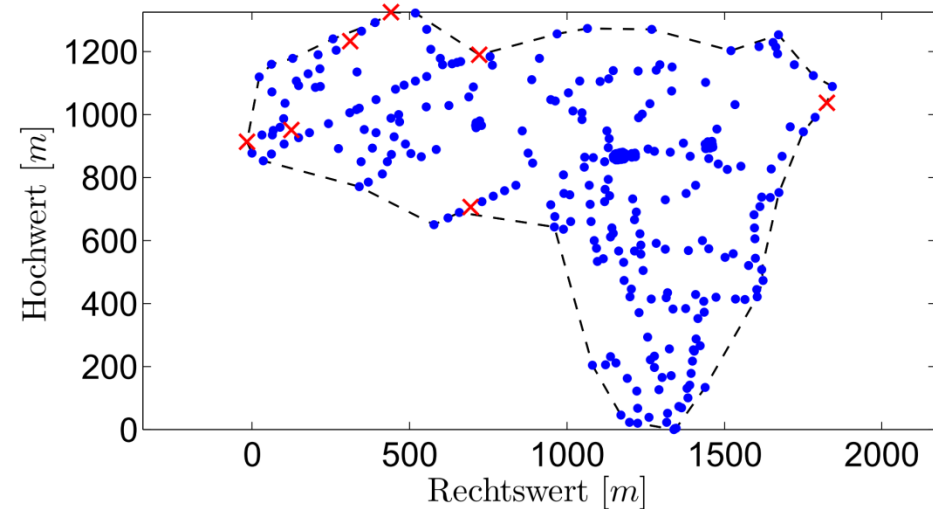
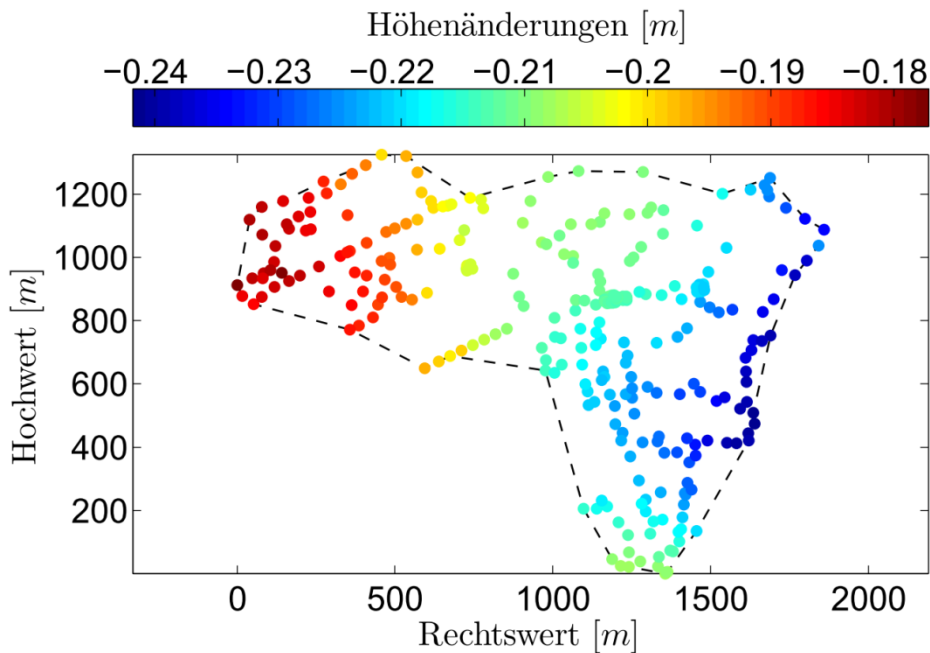
**Ausreißer: geringe Anzahl, zufällige Verteilung**



**unauffällig**



## Ab wann wird eine Bruchkante gefunden? => + 3mm

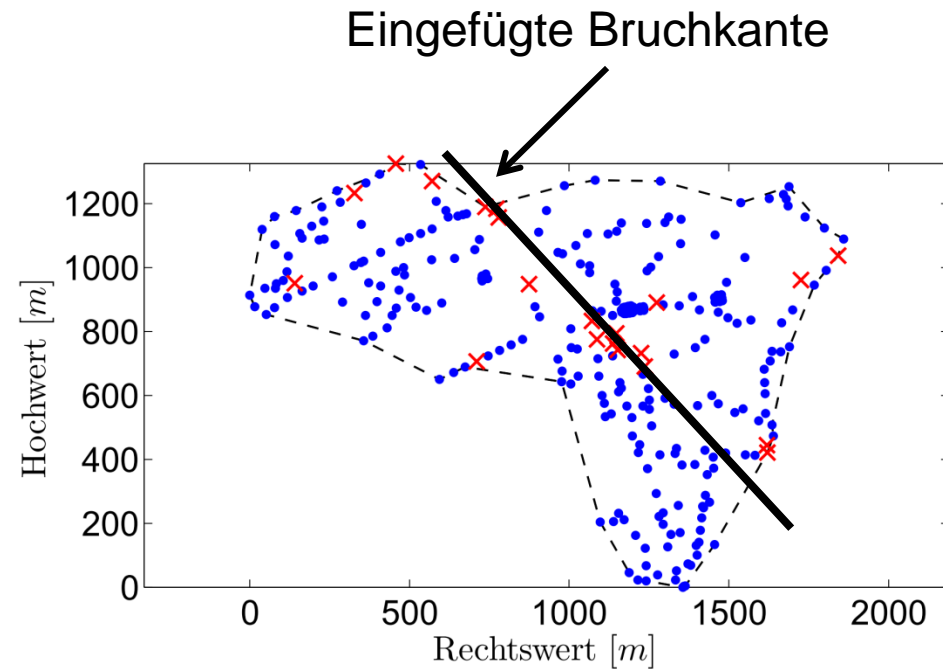
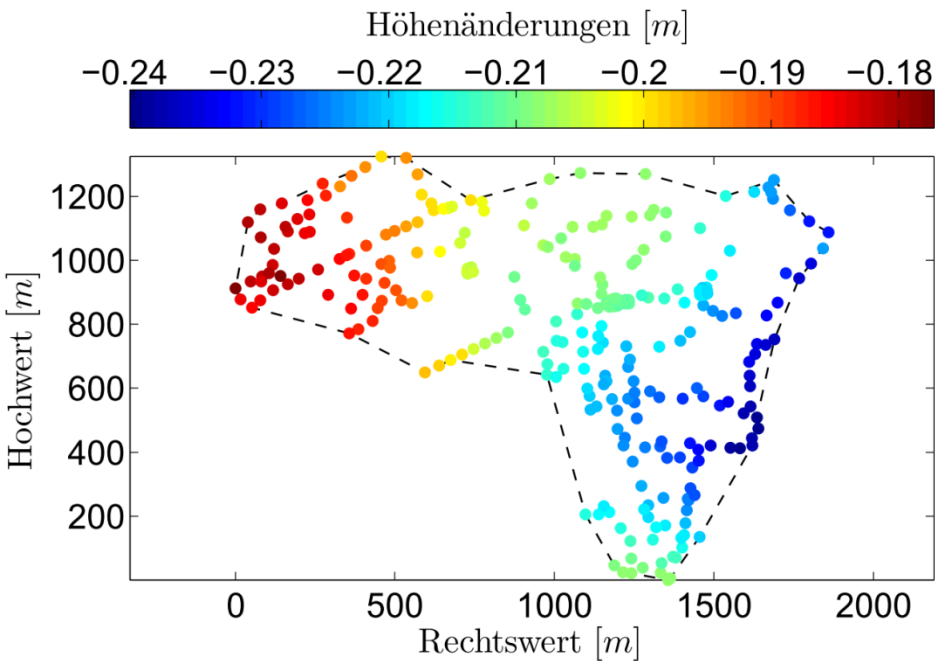


**Ausreißer: geringe Anzahl, zufällige Verteilung**



**unauffällig**

## Ab wann wird eine Bruchkante gefunden? => + 5mm



**Ausreißer: große Anzahl, systematische Verteilung**



**auffällig**

## Ausgangssituation:

- Bekannte Bruchkanten (z.B. Rheindahlener Sprung) sind leicht zu finden
- Daher wichtigere Frage: Gibt es bisher unbekannte Bruchkanten?

## Detektion und Beschreibung möglicher Bruchkanten:

- Bei Bruchkanten gibt es generell viele auffällige Punkte
- **Methode zur Identifikation unbekannter tektonischer Störungen: auffällige Punkte (linienhafte Muster)**
- Bei konkretem Verdachtsfall (Ort bekannt) kann durch rechnerische Einführung einer Kante simuliert werden, ab welchem Höhenversatz auffällige Punkte auftreten (Größenordnung abhängig von Position der Bruchkante, Komplexität der Bodensenkungen und Punktverteilung)

- C. Holst & H. Kuhlmann (2013): **Fault edge detection for analyzing surface deformations with ground movement models**, 2nd Joint International Symposium on Deformation Monitoring, Sep 2013, Nottingham

- C. Holst & H. Kuhlmann (2014): **Detecting and analyzing fault edges in sampled ground movements**, Journal of Applied Geomatics, online verfügbar

1. Vorstellung der Auswerteverfahren
2. Analyse der Punktverteilung
3. Auffinden unentdeckter Tektonik
- 4. Alternative Auswertemethoden**

## Sind neben Polynomen alternative Modellierungen geeignet?

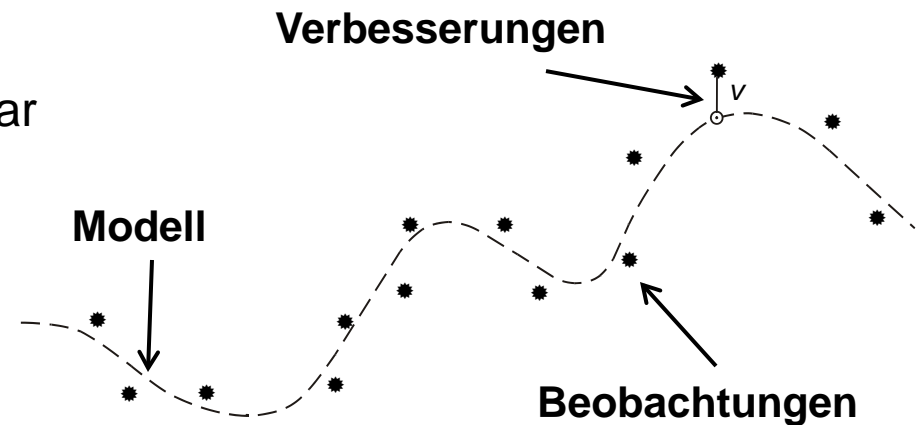
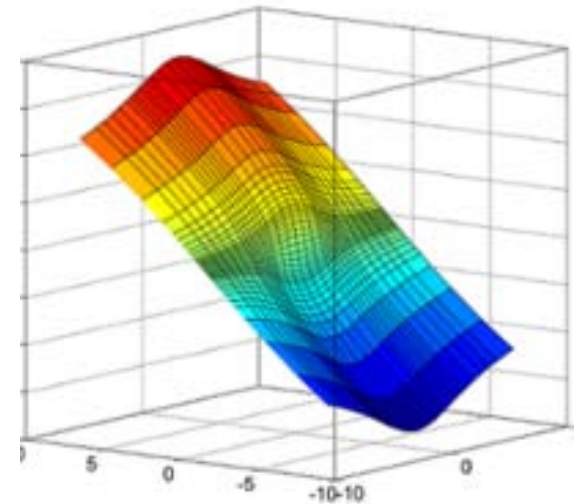
Eigenschaften von Polynomen:

- Parameter haben nur begrenzte geometrische Aussagekraft
- Parameter besitzen Gültigkeit über kompletten Auswertebereich

=> Globale Approximation

=> Hohe Steifigkeit

=> Begrenzte Komplexität modellierbar



## 1. Splines

- Flächenhafte Modellierung im Industriebereich (CAD, Flugzeugträger, Werkstücke, ...)
- Formung von Flächen beliebiger Komplexität

## 2. Kollokation / Kriging

- Flächenhafte Modellierung im Bergbau
- Geostatistische Vorhersage / Interpolation lückenhafter Messwerte

Weitere Möglichkeiten:

- Finite Elemente, Radiale Basisfunktionen, ...
- Eigenschaften ähneln jeweils Splines oder Kollokation

## Eigenschaften von Splines

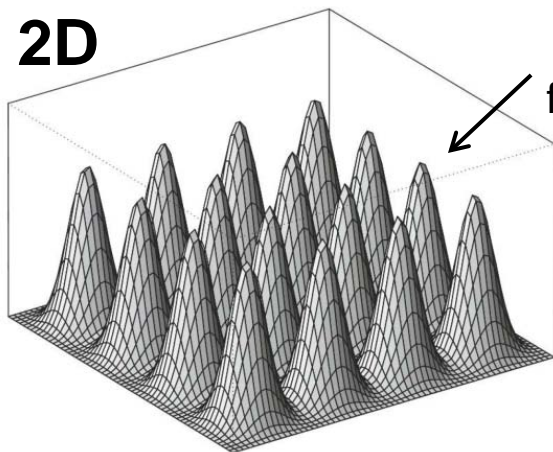
- Parameter haben nur begrenzte geometrische Aussagekraft
- Parameter haben Gültigkeit nur innerhalb Hütchenfunktion

=> Lokale Approximation

=> Hohe Flexibilität

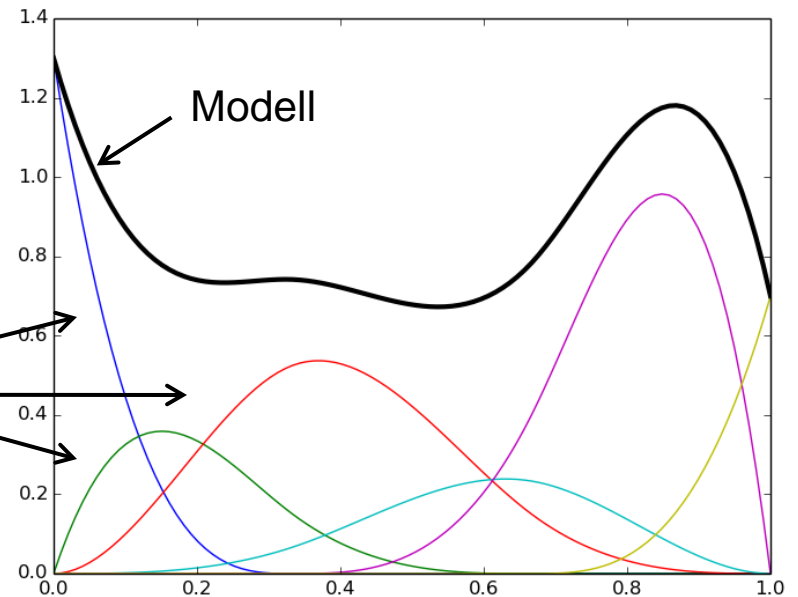
=> Hohe Komplexität modellierbar

**2D**



Hütchen-  
funktionen

**1D**



Modell =  
Summe über aktive  
Hütchenfunktionen

## Eigenschaften der Kollokation / Kriging

- Parameter haben geometrische Aussagekraft
- Signal modelliert lokale Variation aus stochastischen Nachbarschaftsbeziehungen

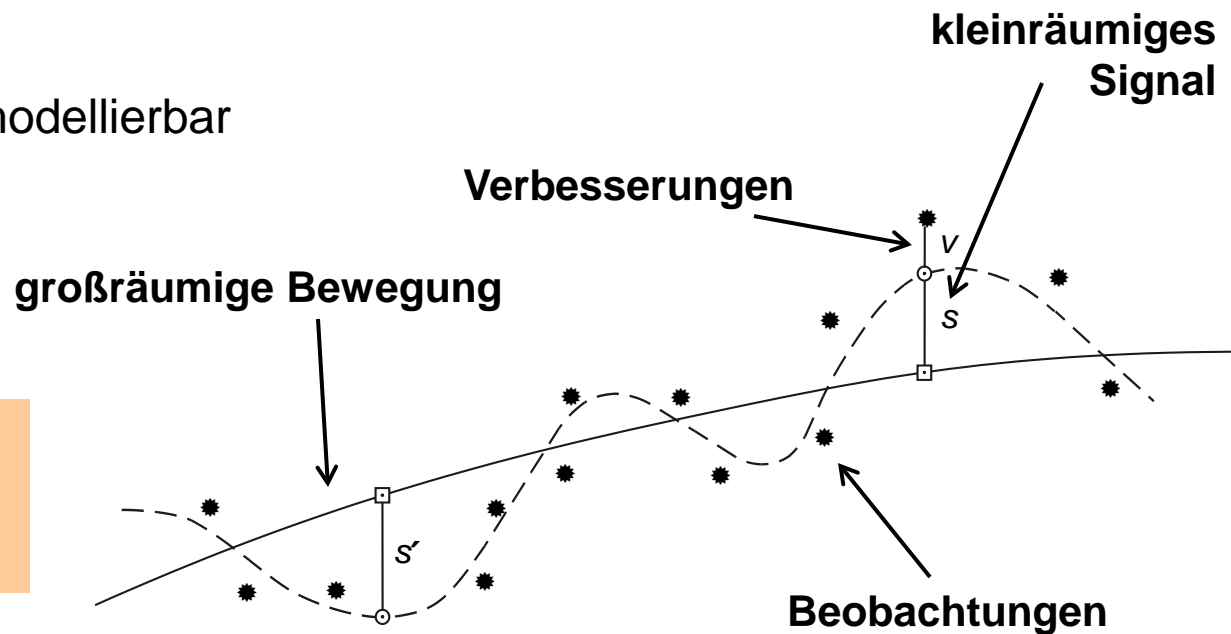
=> Lokale Approximation

=> Hohe Flexibilität

=> Hohe Komplexität modellierbar

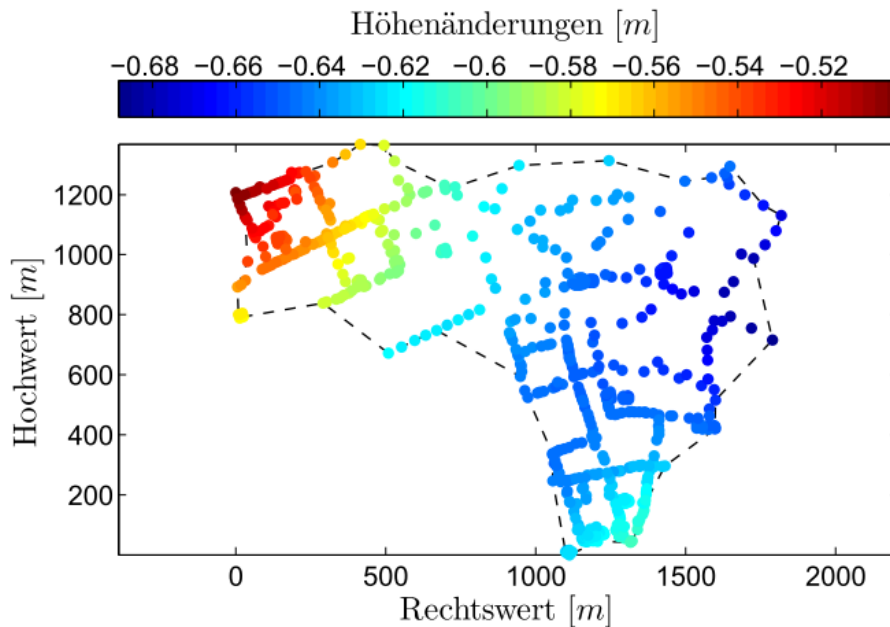


Modell =  
großräumige Bewegung +  
kleinräumiges Signal



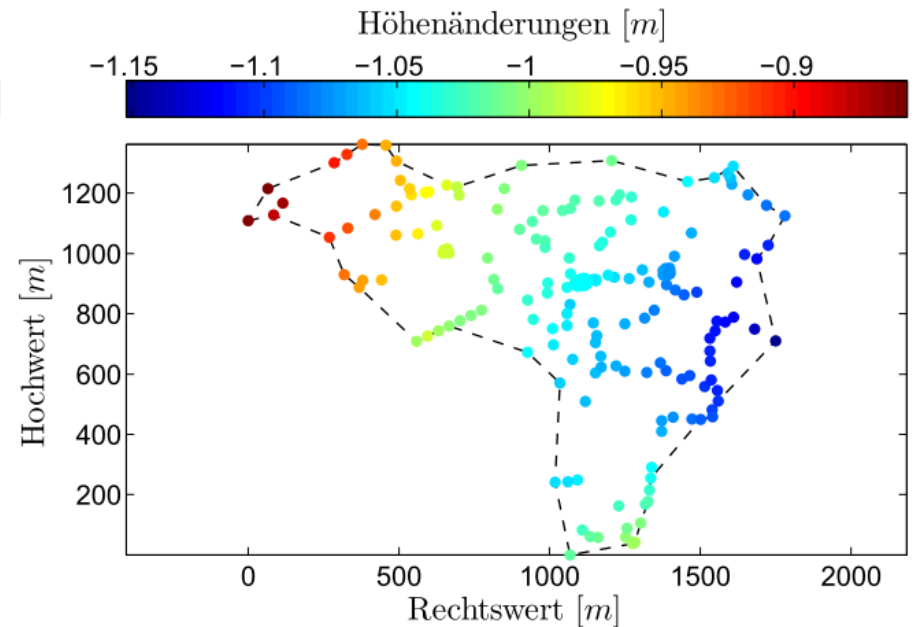


## Berrendorf (1999-2007)

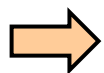


- 638 Messpunkte
- 8 Jahre Epochenunterschied

## Berrendorf (1992-2007)



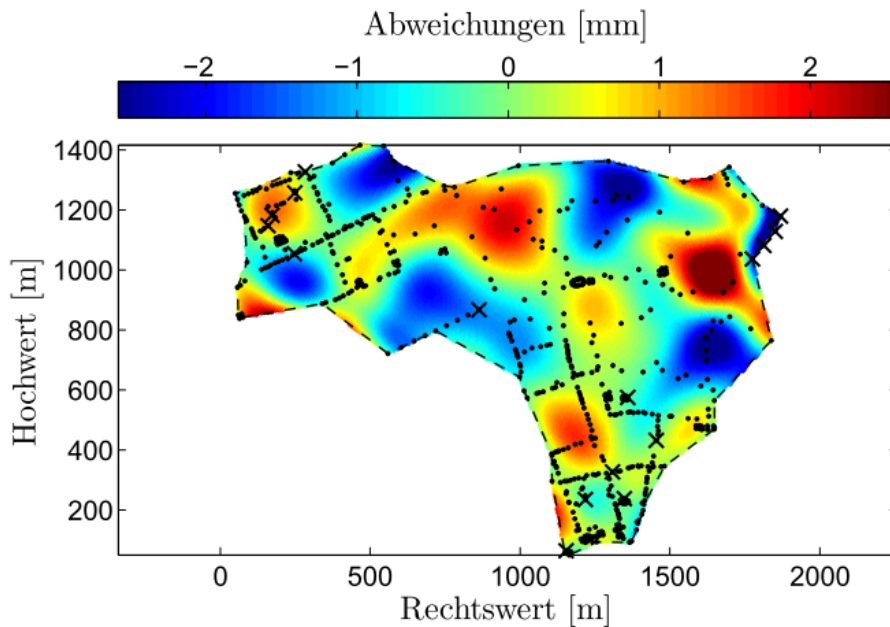
- 194 Messpunkte
- 15 Jahre Epochenunterschied



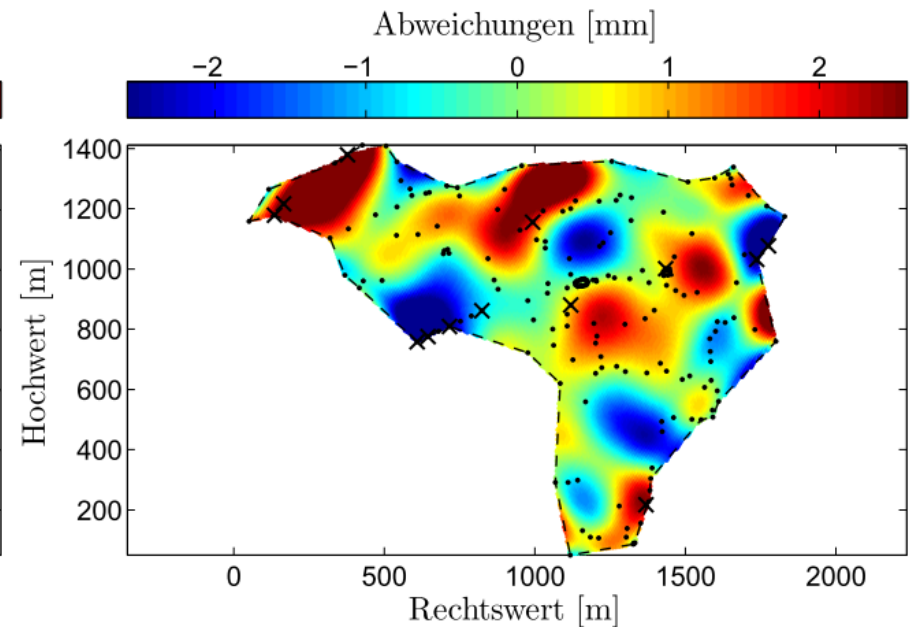
Ähnliche Bodenbewegungen, aber Punktdichte unterschiedlich

## Polynome vs. **Splines**

### Berrendorf (1999-2007)



### Berrendorf (1992-2007)

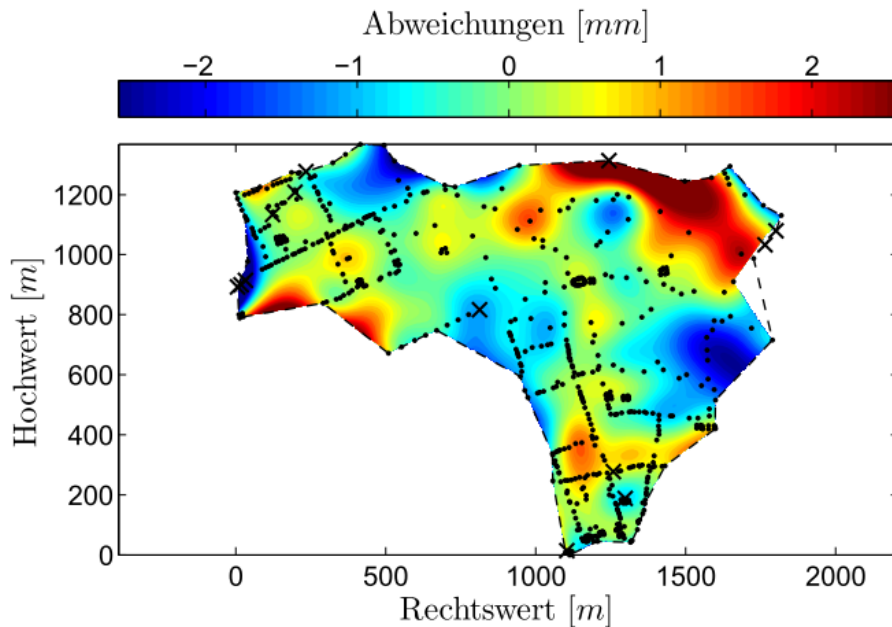


- **Große Abweichungen bei Punktlücken / Bereichen weniger Punkte**
- **Zum Rand hin oft große Abweichungen**

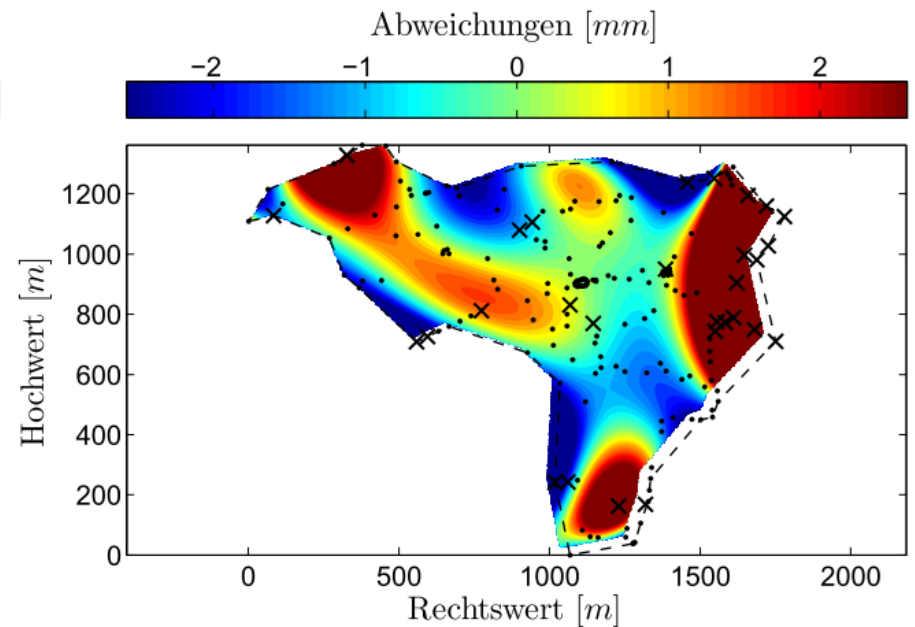
➔ **ungeeignet**

## Polynome vs. **Kollokation**

### Berrendorf (1999-2007)



### Berrendorf (1992-2007)



- **Zum Rand hin oft große Abweichungen**
- Große Abweichungen bei Punktlücken / Bereichen weniger Punkte

➔ **ungeeignet**

## Zwischenfazit

- Splines und Kollokation erhöhen den Nutzereingriff, daher wesentlich subjektivere Modellierung
- Lokale Approximation bei Splines und Kollokation erhöht zwar Flexibilität, dies führt in Bereichen weniger Messpunkte aber zu großen Abweichungen
- In Randbereichen sind Splines und Kollokation wenig zuverlässig  
=> Hier haben Polynome wesentlich bessere Eigenschaften
- Weitere Untersuchungen auf Basis versch. Testgebiete zeigen: Splines und Kollokation weniger geeignet aufgrund ungleichmäßiger Punktverteilung und geringer räumlicher Punktdichte
- C. Holst & H. Kuhlmann (2015): *Mathematische Modelle zur flächenhaften Approximation punktweise gemessener Bodensenkungen auf Basis von Präzisionsnivellements*, Geomonitoring 2015, Clausthal-Zellerfeld, 05-06 März

1. H. Kuhlmann (2010): *Sind Bodenbewegungsanomalien durch Messungen erkennbar?*, Bergschadensforum 2010, Niederzier
2. P. Zeimetz & H. Kuhlmann (2011): *Einsatz parametrischer Modelle zur Analyse der Bodenbewegungsmessungen im Rheinländischen Braunkohlerevier*, World of Mining – Surface & Underground 63 (2011) No. 5
3. H. Kuhlmann, C. Eling & C. Holst (2012): *Können Bodenbewegungsmodelle das Bodensenkungsverhalten im Rheinischen Braunkohlenrevier beschreiben?*, Bergschadensforum 2012, Elsdorf
4. C. Holst, C. Eling & H. Kuhlmann (2013): *Anforderungen und Grenzen von Bodenbewegungsmodellen zur Beschreibung des Bodensenkungsverhaltens im Rheinischen Braunkohlenrevier*, Markscheidewesen, 120 (2013), Nr. 1-2, 13-22
5. C. Holst, C. Eling & H. Kuhlmann (2013): *Automatic optimization of height network configurations for detection of surface deformations*, J. Appl. Geod.,7 (2), 103-113
6. C. Holst & H. Kuhlmann (2013): *Fault edge detection for analyzing surface deformations with ground movement models*, Joint International Symposium on Deformation Monitoring, Nottingham, 09-10 September
7. C. Holst, C. Eling & H. Kuhlmann (2013): *Data-adaptive approximation strategy for monitoring and analysis of height changes*, XV International ISM Congress, Aachen, 16-20 September
8. C. Holst & H. Kuhlmann (2015): *Detecting and analyzing fault edges in sampled ground movements*, Applied Geomatics, online verfügbar
9. C. Holst & H. Kuhlmann (2015): *Mathematische Modelle zur flächenhaften Approximation punktweise gemessener Bodensenkungen auf Basis von Präzisionsnivellements*, Geomonitoring 2015, Clausthal-Zellerfeld, 05-06 März

1. H. Kuhlmann: *Sind Bodenbewegungsanomalien durch Messungen erkennbar?*, 15.03.2010, Bergschadensforum 2010
2. H. Kuhlmann: *Analyse von Bodenbewegungsmessungen - Bsp. Untersuchungsgebiet Elsdorf-Berrendorf-*, 06.06.2011, Anrufungsstelle, Bezirksregierung Köln
3. H. Kuhlmann: *Analyse von Bodenbewegungsmessungen - Bsp. Untersuchungsgebiet Elsdorf-Berrendorf-*, 13.09.2011, Anrufungsstelle, Bezirksregierung Köln
4. H. Kuhlmann: *Können Bodenbewegungsmodelle das Bodensenkungsverhalten im Rheinischen Braunkohlenbergbau beschreiben?*, 09.03.2012, Bergschadensforum 2012
5. H. Kuhlmann: *Beschreibung von Bodensenkungen*, 21.05.2012, Sitzung des Ausschusses für Umwelt und Verkehr der Stadt Elsdorf
6. H. Kuhlmann: *Höhen- und Längenänderungen durch Sumpfungmaßnahmen*, 19.06.2012, Stadt Kerpen
7. C. Holst: *Optimierung der Konfiguration eines Höhennetzes zur Detektion flächenhafter Setzungen*, Geodätische Woche, 10.10.2012, Hannover
8. H. Kuhlmann: *Raum- und zeitkontinuierliche dreidimensionale Darstellung von sumpfungsbedingten Bodensenkungen*, 25.01.2013, Behördenvertreter, Köln
9. H. Kuhlmann: *Beschreibung des großräumigen Bodensenkungsverhaltens durch Bodenbewegungsmodelle*, 06.03.2013, Sachverständigenkolloquium 2013
10. C. Holst: *Fault edge detection for analyzing surface deformations with ground movement models*, 09-10 September 2013, Joint International Symposium on Deformation Monitoring, Nottingham
11. C. Holst: *Data-adaptive approximation strategy for monitoring and analysis of height changes*, 16-20 September 2013, XV International ISM Congress, Aachen
12. H. Kuhlmann: *Weiterentwicklung der mathematischen Modelle zur Analyse von Bodenbewegungen*, 23. 01.2014, Fachgespräche Bodenbewegungen, Köln
13. H. Kuhlmann: *Weiterentwicklung der flächenhaften Analyse sumpfungsbedingter Bodenbewegungen*, 04. 07.2014, Bergheim
14. C. Holst: *Mathematische Modelle zur flächenhaften Approximation punktweise gemessener Bodensenkungen auf Basis von Präzisionsnivelements*, 05-06 März 2015, Geomonitoring 2015, Clausthal-Zellerfeld

- Bisheriges Verfahren zur Analyse der Höhenänderungen hat sich bewährt (Analyse von 9 Ortstagen mit mehr als 20 Epochenvergleichen)  
=> Bestätigung durch unabhängigen Gutachter Prof. Niemeier
- Entwicklung eines mathematisch statistischen Verfahrens zur Optimierung der Punktverteilung  
=> Publikation in international anerkannter Fachzeitschrift
- Herausarbeitung der Wichtigkeit auffälliger Punkte zur Detektion einer unentdeckten Tektonik  
=> Publikation in international anerkannter Fachzeitschrift
- Bestätigung der Polynome als geeignetes Auswertemodell gegenüber Alternativen  
=> Publikation auf nationalem Kongress
- Absicherung der Verfahren durch Öffentlichkeitsarbeit und Qualitätskontrolle  
=> 9 Publikationen (tlw. begutachtet) und 15 Vorträge

**Vielen Dank  
für Ihre Aufmerksamkeit!**