



## Methodenvergleich Bodenbewegungsprognose für das Rheinische Braunkohlenrevier

4. Sitzung des Beratungsgremiums "Flurabstandsprognose"

Düsseldorf, 30. Mai 2018

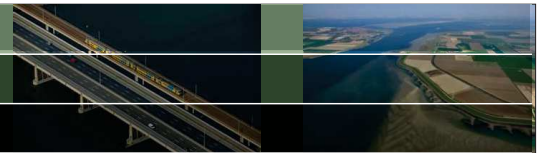
Autoren: Bernhard Becker und Alexander Rohe (Deltares)

Vortrag: Christoph Weidner (LANUV)

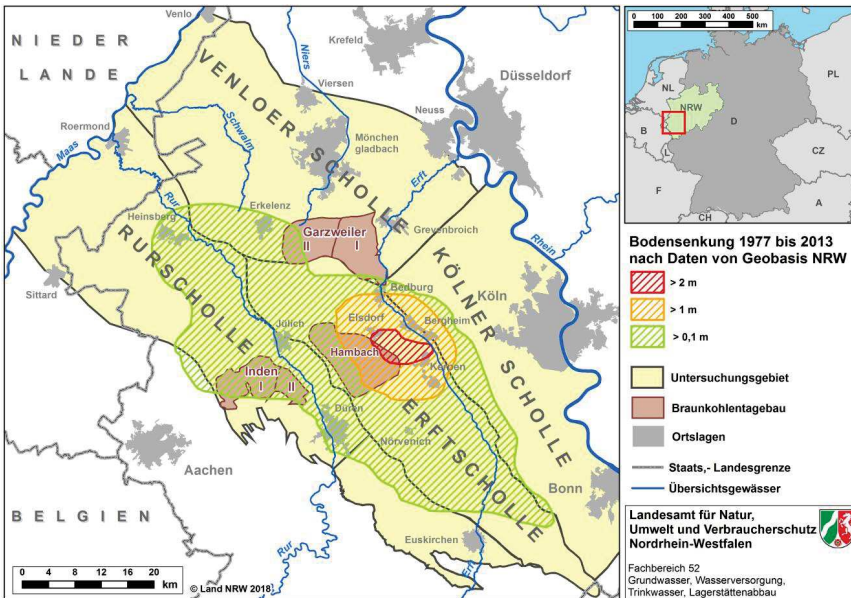
### Vorgehensweise

- Literaturrecherche und Expertenbefragung (national/international)
- Darstellung der bodenmechanischen und hydraulischen Gesetzmäßigkeiten
- **Fallbeispiele**
  - Auswahl nach Vergleichbarkeit mit Referenzfall
  - Darstellung von Besonderheiten in Steckbriefen
- **Methoden zur Bodenbewegungsprognose**
  - Darstellung in Steckbriefen
  - Kriterien zur vergleichenden Bewertung in Abstimmung mit der Facharbeitsgruppe (Bewertungsmatrix)
- **Interpolationsmethoden**
- Schlussfolgerungen, Empfehlungen und offene Punkte

# Fallbeispiele



## Referenzfall „Rheinisches Braunkohlenrevier“



Quelle: LANUV

### Tagebau im Lockergestein

Deutschland

Tagebausümpfung

Methode nach Ziegler und Aulbach,  
Markscheiderische Methode  
nach Poths

Wechselfolge Tone, Braunkohle  
und Sande/Kiese

Grundwasserabsenkungen um  
bis zu 500 m

Besonderheiten:  
Schollenrandstörungen, lokal  
vollständige Entwässerung  
einzelner Schichten

**Deltares**

# Fallbeispiele

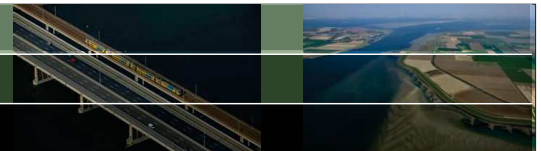


## Referenzfall „Rheinisches Braunkohlenrevier“ – Besonderheiten

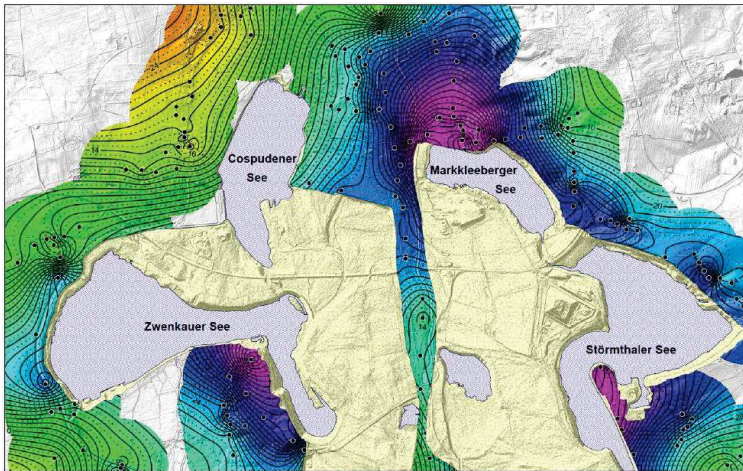
- Komplexer Schichtaufbau: Wechselfolge von bis zu 20 Schichten mit lokalen Variationen (z.B. Schollenränder und andere bewegungsaktive Störungen)
- Mächtige Grundwasserstauer (Ton, Braunkohle bis zu 70 m)
- Abbautiefe über 450 m, Einzugsgebiet 3500 km<sup>2</sup>
- Grundwasserabsenkung und Wiederanstieg
  - Setzungen und Hebungen
- Trockenfallen bzw. Druckentspannung von Grundwasserleitern
- Lange Zeiträume: Absenkung ca. 1955 bis 2045; Wiederanstieg ca. 2045 bis 2100; Absenkungsmaximum z.T. bereits durchlaufen

**Deltares**

# Fallbeispiele



## Mitteldeutsches und Lausitzer Braunkohlenrevier



Interpolierte Höhenänderungen zwischen 1995 und 2015 (Quelle: Lieske & Schade 2016)

### Tagebau im Lockergestein

Deutschland

### Tagebausümpfung

Markscheiderische Methode und andere vereinfachte Ansätze

Wechselfolge Tone, Braunkohle und Sande/Kiese

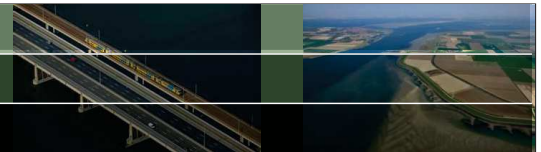
Grundwasserabsenkungen um bis zu 100 m

Besonderheiten:

- Wiederanstieg bereits erfolgt
- **Hebungen** nahe der Restseen

**Deltares**

# Fallbeispiele



## Aachener und Limburger Steinkohlenrevier

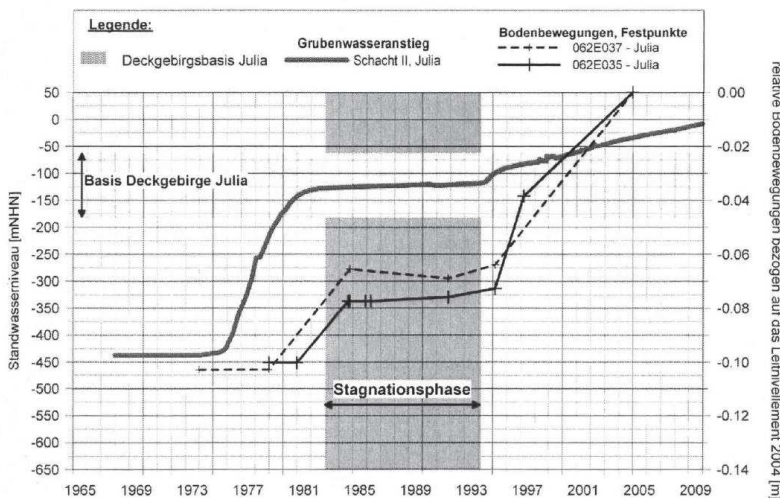


Abb.10 : Zeitliche Entwicklung der Bodenbewegungen im Bereich der Grube Julia, Südlimburger Revier (Lage der Festpunkte s. Abb. 9)

Quelle: Rosner 2011

### Bergbau im Festgestein

Deutschland

Flutung eines **Steinkohlenbergwerks**

Nivellement, keine Bodenbewegungsprognose

Fels, überlagert vom Deckgebirge

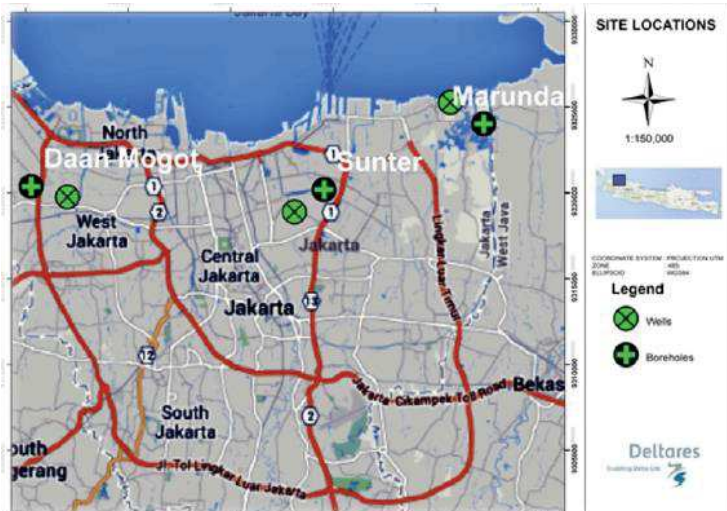
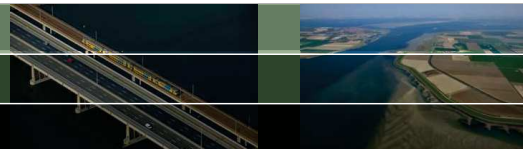
Grundwasserabsenkung bis zu 600 m im Deckgebirge

Besonderheiten:

- Hydraulische Wechselwirkungen zwischen Steinkohle und Deckgebirge

**Deltares**

# Fallbeispiele



## Jakarta

### Andere Fälle

Indonesien

Entnahmen zur Wasserversorgung

D-Settlement (1D)

Alluviale und marine Lockersedimente

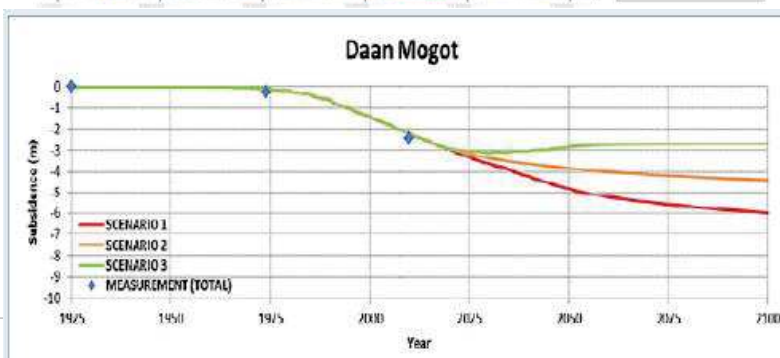
Tiefe: 250 m

Besonderheiten:

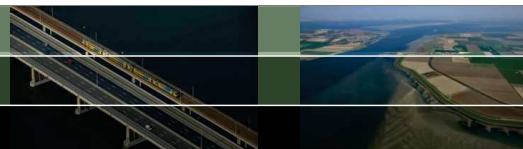
- Stakeholder-Involvement
- Analysen zum Prozess des **Kriechens**
- **Hebungen modelliert**

Quelle: Deltares 2016

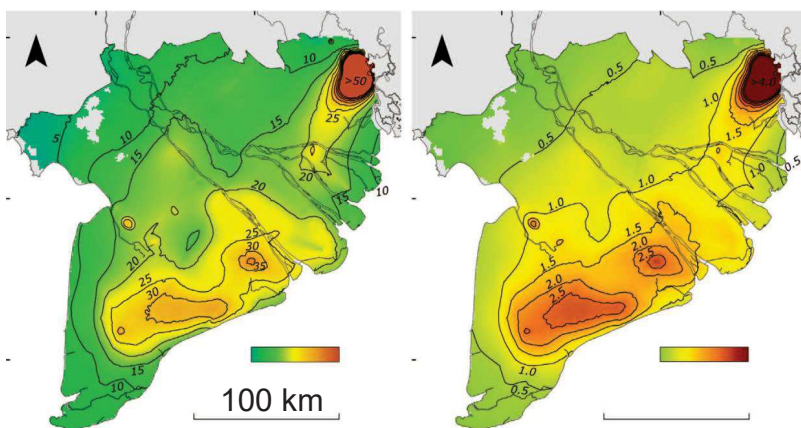
**Deltares**



# Fallbeispiele



## Mekong-Delta



Kumulative Setzung (cm) seit 1991

Setzungsraten 2015 (cm/yr)

Quelle: Minderhoud et al. 2017

### Andere Fälle

Vietnam

Entnahmen zur Wasserversorgung

MODFLOW-SUB-CR (flächige Berechnung)

Ton mit Sandeinschlüssen

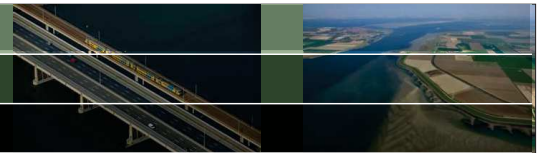
Tiefe: 500 m

Besonderheiten:

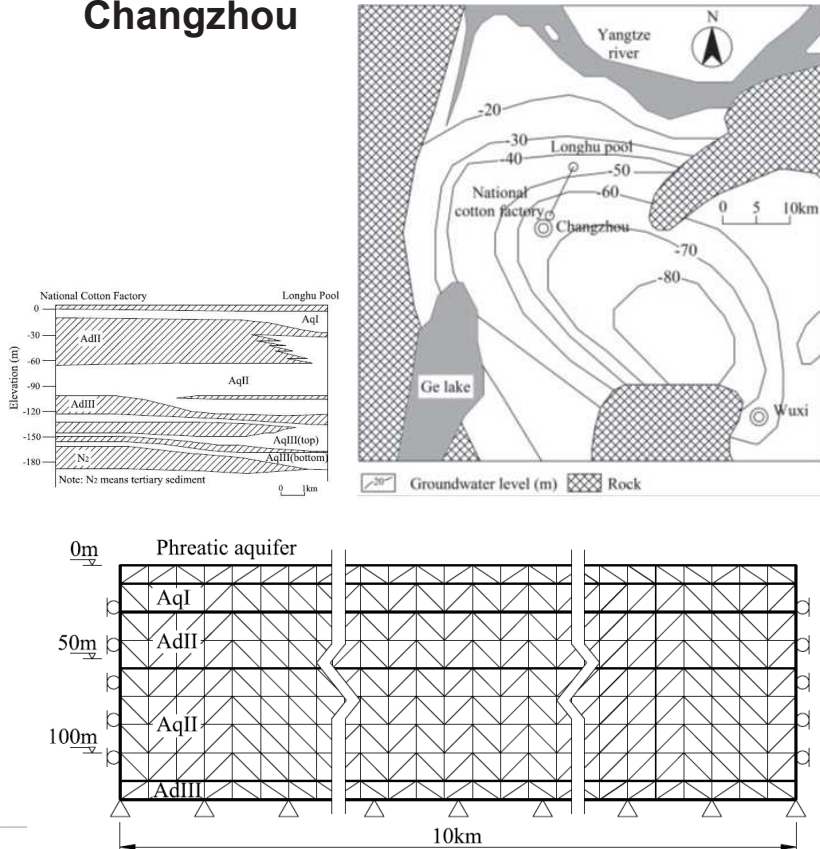
- **Flächendeckende Berechnung auf 30 000 km<sup>2</sup>**
- **Gekoppelte** Berechnung von GW-Strömung und Bodenmechanik
- Kalibrierung anhand von Satellitendaten (InSAR)

**Deltares**

# Fallbeispiele



## Changzhou



### Andere Fälle

China

Entnahmen zur Wasserversorgung

### PLAXIS 3D

Lockergestein im Delta des Yangtze (Alluvialböden); 4 Grundwasserleiter, 3 Stauer; Fels.

Tiefe: 120 – 240 m

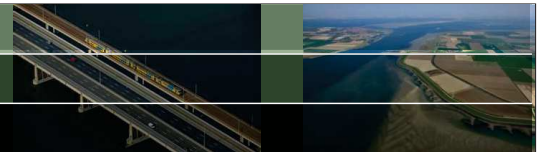
Besonderheit:

- Numerisches bodenmechanisches 3D-Modell für ein großes Gebiet

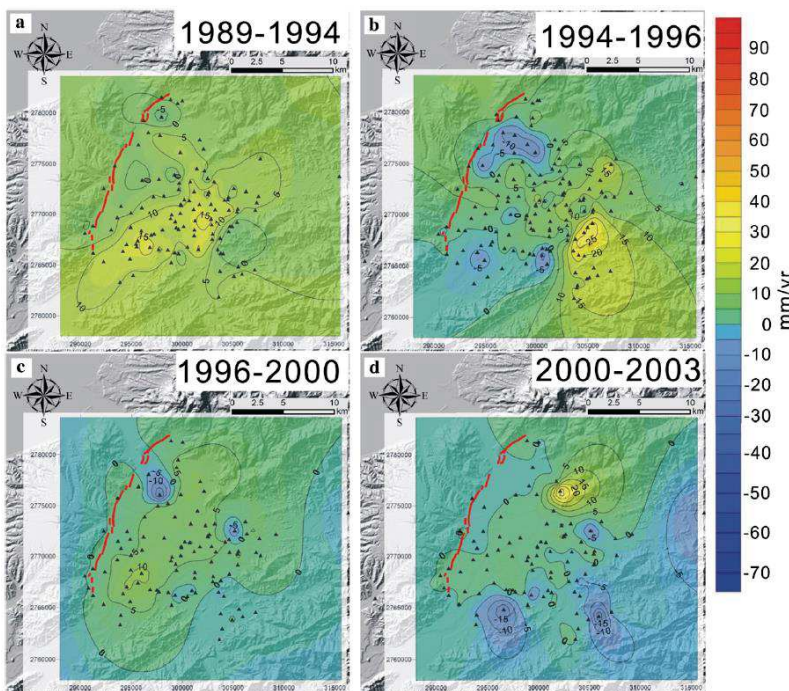
Quelle: Xu et al. 2015

**Deltares**

# Fallbeispiele



## Taipei Basin



### Andere Fälle

Taiwan

Entnahmen zur Wasserversorgung

Leitnivelement, **keine Bodenbewegungsprognose**

Lockergesteinsschichten junger vulkanischer Aschen; vier Grundwasserleiter aus Sand, Kies und Laterit-Konglomerat, mit Ton- und Lehmeinschlüssen

Tiefe: 350 m

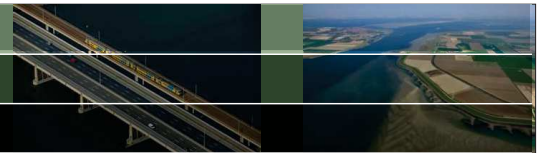
Besonderheiten:

- Interpolation** mit Kriging
- Hebungen** infolge Grundwasserwiederanstieg

Quelle: Chen et al. 2007

**Deltares**

# Fallbeispiele



## Zusammenfassung

Fallbeispiel	Ursache	Bodenbewegung	Schichten	Fläche	Tiefe	Methode zur Prognose von Bodenbewegungen
Rheinisches Braunkohlenrevier	TS	SH	20	290 km <sup>2</sup> (EB: 3500 km <sup>2</sup> )	450 m	ZAI-Methode, 1D
Ostdeutsche Braunkohlenreviere	TS	SH	~ 10	477 km <sup>2</sup> / 814 km <sup>2</sup>	100 m	Markscheiderische und vereinfachte Ansätze
Aachener Steinkohlenrevier	GA	SH	Fels	490 km <sup>2</sup>	600 m	Bisher nur Beobachtung von Hebungen
Jakarta	GE	S(H)	8	300 km <sup>2</sup>	250 m	D-Settlement, 1D
Los Baños-Kettleman	GE	S	3	1500 km <sup>2</sup>	500 m	MODFLOW-IBS, quasi 3D
Hangu	GE	S	5	3600 km <sup>2</sup>	500 m	MODFLOW-IDP, quasi 3D
Mekong-Delta	GE	S	15	30 000 km <sup>2</sup>	500 m	MODFLOW-SUB-CR, quasi 3D
Changzhou	GE	S	7	100 km <sup>2</sup>	240 m	PLAXIS, 3D
Taipei Basin	GE	SH	8	400 km <sup>2</sup>	350 m	Nur Messung/Interpolation

TS: Tagebau-Sümpfung; GA: Grubenwasseranstieg; GE: Grundwasserentnahme  
S: Senkung des Bodens; SH: Senkung und Hebung des Bodens

**Deltares**

# Fallbeispiele



## Fazit

- Wenige vergleichbare Fallbeispiele mit Hebungsprognose
  - Geologie, Größe des Modellgebiets, Prozesse
- Meist Grundwasserentnahmen zur Wasserversorgung
  - Kein Trockenfallen
  - Kein signifikanter Grundwasserwiederanstieg
- Flächige Berechnungen für große Modellgebiete realisiert (MODFLOW-Pakete)
- Numerische 3D-Berechnungen für kleinere Gebiete (PLAXIS)
- Interpolation: wenig detaillierte Beschreibungen in der Literatur
- Keine Beispiele für 1D-Berechnungen mit Interpolation in die Fläche

**Deltares**

# Methoden zur Bodenbewegungsprognose

## Physikalische Methoden

- Vereinfachte Ansätze (Handbuchformeln)
  - Fenk; Wolkersdorfer & Thiem
- 1D-Bodenprofile (analytisch; 1D)
  - Ziegler & Aulbach; D-Settlement
- Erweiterung Grundwasserströmungsprogramm (numerisch; 3D, 1D)
  - MODFLOW-Packages, FEFLOW-IFM von Rùhaak
- Bodenmechanische FE-Methoden (numerisch; 3D, 1D)
  - PLAXIS, ABAQUS

## Statistische Methoden

- Markscheiderische Methoden
  - Korrelation Grundwasserspiegel und Bodenbewegung
  - Methode nach Schaefer; Lieske & Schade

# Methoden zur Bodenbewegungsprognose

## Vergleich von Neutralkriterien

### Auflistung neutraler Charakteristika der Methoden zur Prognose von Bodenbewegungen - Neutralkriterien

<b>Bodenmodelle</b>
Elastisches Dehnungsverhalten nach Hooke
logarithmisches Stoffgesetz nach Terzaghi
Bjerrum
Buisman-Koppejan
abc-Isotachen
<b>Stoffgesetz</b>
linear-elastisch
Mohr-Coulomb
Softsoil-Creep
Cam-Clay
<b>Programmtechnische Aspekte</b>
Dimensionalität
Bedienungsweise
Kopplung mit Grundwassermodell integriert
Ermittlung von Parametersensitivitäten integriert
Automatische Kalibrierung integriert
<b>Leistungen</b>
Qualitätssicherung für Code (automatische Testbank, regelmäßige Rele
Wissenschaftliche Qualitätssicherung
Support- und Wartungsvertrag möglich

### ➤ Rein informative Auflistung ohne Wertung

Abbildung unterschiedlicher Prozesse, die aber bei eindeutiger Relevanz zusätzlich als Mindestanforderung oder Bewertungskriterium definiert wurden

1D, 2D, 3D

Grafische Benutzeroberfläche (G), Eingabe, in Excel (X), als Textdatei (T) oder Codeprogrammierung (C)

Automatisierte Programmfunktionalitäten

Qualitätssicherung (Support, wiss. Review, Anwenderkreis)

# Methoden zur Bodenbewegungsprognose

## Vergleich von Neutralkriterien – Beispiele

Auflistung neutraler Charakteristika der Methoden zur Prognose von Bodenbewegungen - Neutralkriterien	Kriterium	Handbuchformeln	1D-Bodenprofile		FE-Methoden	
		Fenk & Tzscharschuch	Ziegler und Aulbach, 2016	D-Settlement	PLAXIS (3D)	PLAXIS (1D)
<b>Bodenmodelle</b>						
Elastisches Dehnungsverhalten nach Hooke	N*	✓	✓	✓		
logarithmisches Stoffgesetz nach Terzaghi	N*	✗	✓	✓		
Bjerrum	N*	✗	✗	✓		
Buisman-Koppejan	N*	✗	✗	✓		
abc-Isotachen	N*	✗	✗	✓		
<b>Stoffgesetz</b>						
linear-elastisch	N*				✓	✓
Mohr-Coulomb	N*				✓	✓
Softsoil-Creep	N*				✓	✓
Cam-Clay	N*				✓	✓
<b>Programmtechnische Aspekte</b>						
Dimensionalität	N*	0D	1D	1D, 2D	3D	1D, 2D
Bedienungsweise	N*	C	X	G	G	G
Kopplung mit Grundwassermodell integriert	N*	-	✗	✗	✓	✗
Ermittlung von Parametersensitivitäten integriert	N*		✓	✓	✓	✓
Automatische Kalibrierung integriert	N*			✓	✓	✓
<b>Leistungen</b>						
Qualitätssicherung für Code (automatische Testbank, regelmäßige Rele)	N*	o	o	✓	✓	✓
Wissenschaftliche Qualitätssicherung	N*	✗	✓	✓	✓	✓
Support- und Wartungsvertrag möglich	N*			✓	✓	✓

Deltares

# Methoden zur Bodenbewegungsprognose

## Vergleich von Mindestanforderungen und Bewertungskriterien

Bewertungsmatrix für Methoden zur Prognose von Bodenbewegungen - Mindestanforderungen und Bewertungskriterien	Kriterium	Faktor	Maximale Punktzahl
<b>Aussagegenauigkeit / Prozesse und Geologie</b>			
Mehrschichtfälle möglich	M*	1	1
Zeitabhängige Verformung durch Konsolidierung nach Terzaghi oder Darcy	M*	1	1
Belastung, Entlastung, Wiederbelastung	M*	1	1
Konsolidierung oberhalb des phreatischen Grundwasserspiegels	B*	2	1
Zeitlich veränderliche mechanische Bodenparameter	B*	1	1
Hebungen bereits modelliert?	B*	3	1
Instationäre Kalibrierungsqualität nachgewiesen?	B*	2	2
<b>Umsetzbarkeit im Anwendungsfall "Rheinisches Braunkohlenrevier"</b>			
Anwendbarkeit im Rheinischen Revier	B*	1	2
Integration in LANUV-Grundwassermodell (FeFlow) möglich?	B*	1	2
Modellkomplexität / Aufwand der Parameterschätzung (Verfügbarkeit und Anzahl erforderlicher Parameter)	B*	1	2
<b>Programmtechnische Aspekte</b>			
Vertikale Auflösung für Konsolidierung (Grundwasserhydraulik)	B*	0.5	2
Rechenzeitbedarf	B*	0.5	2
Entwicklungsstadium	B*	0.5	2
Verfügbarkeit	B*	0.5	2
Mindestanforderungen erfüllt?			JA
GESAMTBEWERTUNG			23
Rang			
N: Neutralkriterium			
M: Mindestanforderung			
B: Bewertungskriterium			

Mindestanforderungen zur korrekten Abbildung der Bodenmechanik zwingend erforderlich

Weitere bedeutsame bodenmechanische Prozesse mit zum Teil hoher Gewichtung (Faktor)

Umsetzungsaufwand und Machbarkeit

„praktische Aspekte“ von geringerer Bedeutung (geringe Wichtung)

➤ Gesamtpunktzahl und Rangfolge aus „Produktesumme“ von Bewertung und Gewichtung

Deltares



# Methoden zur Bodenbewegungsprognose

## Vergleich von Mindestanforderungen und Bewertungskriterien

Bewertungsmatrix für Methoden zur Prognose von Bodenbewegungen - Mindestanforderungen und Bewertungskriterien	Kriterium	Faktor	Handbuchformeln	1D-Bodenprofile		MODFLOW					FEFLOW-Modul	FE-Methoden		Maximale Punktzahl	
			Fenk & Tzsarschuch	Ziegler und Aulbach, 2016	D-Settlement	IBS (USGS)	SUB-WT (USGS)	SUB (USGS)	IDP	SUB-CR (Deltares) 1D	SUB-CR (Deltares)	Rühaak et al., 2014	PLAXIS (3D)		PLAXIS (1D)
<b>Aussagegenauigkeit / Prozesse und Geologie</b>															
Mehrschichtfälle möglich	M*	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Zeitabhängige Verformung durch Konsolidierung nach Terzaghi oder Darcy	M*	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Belastung, Entlastung, Wiederbelastung	M*	1	0	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1
Konsolidierung oberhalb des phreatischen Grundwasserspiegels	B*	2	0	1	0	0	0	0	0	1	0	1	1	1	1
Zeitlich veränderliche mechanische Bodenparameter	B*	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Hebungen bereits modelliert?	B*	3	1	1	1	0	0	1	0	1	1	1	1	1	1
Instationäre Kalibrierungsqualität nachgewiesen?	B*	2	0	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
<b>Umsetzbarkeit im Anwendungsfall "Rheinisches Braunkohlenrevier"</b>															
Anwendbarkeit im Rheinischen Revier	B*	1	0	2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	2
Integration in LANUV-Grundwassermodell (FeFlow) möglich?	B*	1	0	1	1	1	1	1	1	1	2	0	1	2	
Modellkomplexität / Aufwand der Parameterschätzung (Verfügbarkeit und Anzahl erforderlicher Parameter)	B*	1	2	2	2	1	1	1	1	2	1	0	2	2	
<b>Programmetechnische Aspekte</b>															
Vertikale Auflösung für Konsolidierung (Grundwasserhydraulik)	B*	0.5	0	2	2	0	0	0	2	1	0	0	1	2	
Rechenzeitbedarf	B*	0.5	2	2	2	1	1	1	1	2	1	1	0	2	
Entwicklungsstadium	B*	0.5	0	2	2	2	2	2	1	1	1	1	2	2	
Verfügbarkeit	B*	0.5	2	0	1	2	2	2	0	0	0	2	1	2	
Mindestanforderungen erfüllt?			NEIN	JA	JA	JA	JA	JA	JA	JA	JA	NEIN	JA	JA	JA
GESAMTBEWERTUNG			7	21	18.5	13.5	13.5	16.5	13	19	15	16	15.5	20	23
Rang			12	1	4	9	9	5	11	3	8	6	7	2	
N: Neutralkriterium															
M: Mintesanforderung															
B: Bewertungskriterium															

Deltares

# Methoden zur Bodenbewegungsprognose

## Vergleich von Mindestanforderungen und Bewertungskriterien

Bewertungsmatrix für Methoden zur Prognose von Bodenbewegungen - Mindestanforderungen und Bewertungskriterien	Kriterium	Faktor	1D-Bodenprofile		MODFLOW					FE-Methoden		
			Ziegler und Aulbach, 2016	D-Settlement	IBS (USGS)	SUB-WT (USGS)	SUB (USGS)	IDP	SUB-CR (Deltares) 1D	SUB-CR (Deltares)	PLAXIS (3D)	PLAXIS (1D)
<b>Aussagegenauigkeit / Prozesse und Geologie</b>												
Mehrschichtfälle möglich	M*	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Zeitabhängige Verformung durch Konsolidierung nach Terzaghi oder Darcy	M*	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Belastung, Entlastung, Wiederbelastung	M*	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Konsolidierung oberhalb des phreatischen Grundwasserspiegels	B*	2	1	0	0	0	0	0	1	0	1	1
Zeitlich veränderliche mechanische Bodenparameter	B*	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Hebungen bereits modelliert?	B*	3	1	1	0	0	1	0	1	1	1	1
Instationäre Kalibrierungsqualität nachgewiesen?	B*	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
<b>Umsetzbarkeit im Anwendungsfall "Rheinisches Braunkohlenrevier"</b>												
Anwendbarkeit im Rheinischen Revier	B*	1	2	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Integration in LANUV-Grundwassermodell (FeFlow) möglich?	B*	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1
Modellkomplexität / Aufwand der Parameterschätzung (Verfügbarkeit und Anzahl erforderlicher Parameter)	B*	1	2	2	1	1	1	1	2	1	0	2
<b>Programmetechnische Aspekte</b>												
Vertikale Auflösung für Konsolidierung (Grundwasserhydraulik)	B*	0.5	2	2	0	0	0	2	1	0	0	1
Rechenzeitbedarf	B*	0.5	2	2	1	1	1	1	2	1	0	2
Entwicklungsstadium	B*	0.5	2	2	2	2	2	1	1	1	2	2
Verfügbarkeit	B*	0.5	0	1	2	2	2	0	0	0	1	1
Mindestanforderungen erfüllt?			JA	JA	JA	JA	JA	JA	JA	JA	JA	JA
GESAMTBEWERTUNG			21	18.5	13.5	13.5	16.5	13	19	15	15.5	20
Rang			1	4	9	9	5	11	3	8	7	2
N: Neutralkriterium												
M: Mintesanforderung												
B: Bewertungskriterium												

➤ Schwierigkeiten der 3D-Methoden: Trockenfallen, Erfahrung mit Hebungen, Komplexität und Umsetzbarkeit bei zweifelhaftem Genauigkeitszugewinn

Deltares

# Methoden zur Bodenbewegungsprognose

## Vergleich von Mindestanforderungen und Bewertungskriterien

Bewertungsmatrix für Methoden zur Prognose von Bodenbewegungen - Mindestanforderungen und Bewertungskriterien	Kriterium	Faktor	1D-Bodenprofile		Methoden		Maximale Punktzahl
			Ziegler und Aulbach, 2016	D-Settlement	SUB-CR (Deltares) 1D	PLAXIS (1D)	
<b>Aussagegenauigkeit / Prozesse und Geologie</b>							
Mehrschichtfälle möglich	M*	1	1	1	1	1	1
Zeitabhängige Verformung durch Konsolidierung nach Terzaghi oder Darcy	M*	1	1	1	1	1	1
Belastung, Entlastung, Wiederbelastung	M*	1	1	1	1	1	1
Konsolidierung oberhalb des phreatischen Grundwasserspiegels	B*	2	1	0	1	1	1
Zeitlich veränderliche mechanische Bodenparameter	B*	1	1	1	1	1	1
Hebungen bereits modelliert?	B*	3	1	1	1	1	1
Instationäre Kalibrierungsqualität nachgewiesen?	B*	2	2	2	2	2	2
<b>Umsetzbarkeit im Anwendungsfall "Rheinisches Braunkohlenrevier"</b>							
Anwendbarkeit im Rheinischen Revier	B*	1	2	1	1	1	2
Integration in LANUV-Grundwassermodell (FeFlow) möglich?	B*	1	1	1	1	1	2
Modellkomplexität / Aufwand der Parameterschätzung (Verfügbarkeit und Anzahl erforderlicher Parameter)	B*	1	2	2	2	2	2
<b>Programmetechnische Aspekte</b>							
Vertikale Auflösung für Konsolidierung (Grundwasserhydraulik)	B*	0.5	2	2	1	1	2
Rechenzeitbedarf	B*	0.5	2	2	2	2	2
Entwicklungsstadium	B*	0.5	2	2	1	2	2
Verfügbarkeit	B*	0.5	0	1	0	1	2
Mindestanforderungen erfüllt?			JA	JA	JA	JA	JA
GESAMTBEWERTUNG			21	18.5	19	20	23
Rang			1	4	3	2	
N: Neutralkriterium							
M: Mintesanforderung							
B: Bewertungskriterium							

- Nur geringe Unterschiede zwischen verbleibenden 1D-Methoden

Deltares

# Methoden zur Bodenbewegungsprognose

## Fazit

- Numerische 3D-Berechnungen derzeit nicht zu empfehlen
- Koppelung der bereits weit verbreiteten MODFLOW-Pakete schwierig
- Beste Bewertungen werden durch 1D-Methoden erzielt:
  - Methode von Ziegler und Aulbach (1D): 21 Punkte
  - PLAXIS 1D: 20 Punkte
  - MODFLOW-SUB-CR 1D: 19 Punkte
  - D-Settlement (1D): 18.5 Punkten

- Bisher gewählte Methode derzeit Mittel der Wahl
- 1D-Methoden erfordern Interpolation in die Fläche

Deltares

## Offene Punkte

### Relevanz weiterer Prozesse

- Bodenkriechen (v.a. in Interaktion mit GW-Wiederanstieg)
- Hydraulisch-mechanische Rückkopplung
- **Abschätzung der Relevanz möglich durch Vergleichsrechnungen zwischen 1D-Methoden**

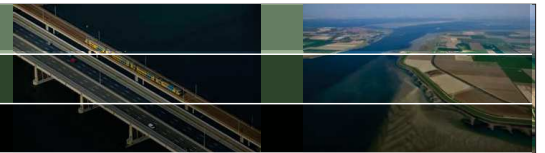
### Mögliche Weiterentwicklungen

- Flächendeckende 1D-Modellierung für Knoten des Grundwassermodells (dafür wäre eine langfristige Methodenentwicklung erforderlich)

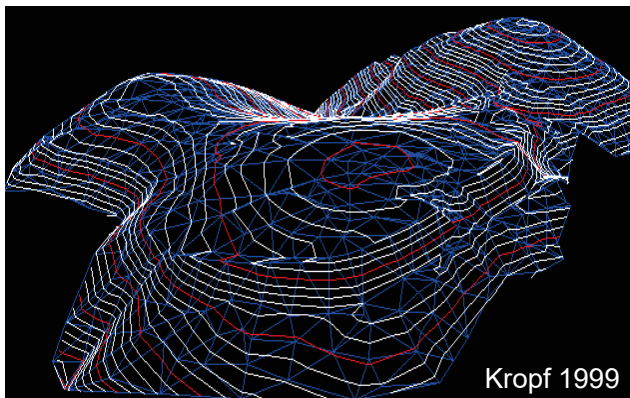
# Interpolationsmethoden

- Übertragung von Punktdaten an „Stützstellen“ in die Fläche (flächendeckend verteilte „Schätzorte“)
- Sehr wenig Information aus Literaturrecherche ableitbar
  - **allgemeine Beschreibung verfügbarer Interpolationsmethoden**

Nicht-statistisch	statistisch
<ul style="list-style-type: none"><li>• Nearest Neighbour-Methode</li><li>• Inverse-Distanz-Methode</li><li>• Polynominterpolation</li><li>• Splines</li><li>• <b>Triangulation mit linearer Interpolation</b></li><li>• Bilineare Interpolation auf Rechteckraster</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>• Simple Kriging</li><li>• Ordinary Kriging</li><li>• <b>Universal Kriging</b></li></ul>



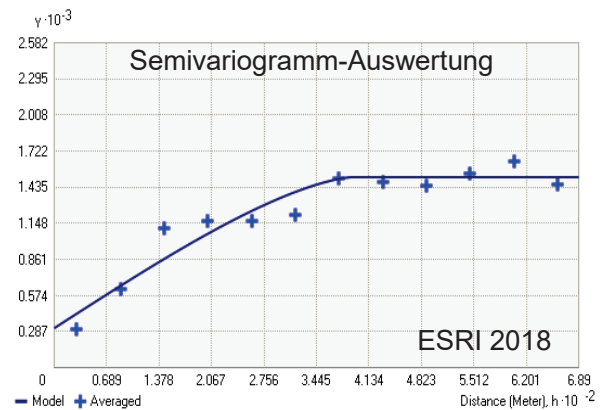
## Triangulation mit linearer Interpolation



- Dreiecknetz aus Stützstellen
- Lineare Interpolation entlang der Kanten
- Es werden keine weiteren Annahmen getroffen, die ggf. nur schwer begründbar sind

## Universal Kriging

- Auswertung der räumlichen Varianz der Stützstellen
- Beschreibung der räumlichen Variabilität durch eine mathematische Funktion
- Interpolation auf dieser Basis



## Fazit

- Kaum Informationen aus der Literatur ableitbar
- Methodenvergleiche erforderlich (Triangulation mit linearer Interpolation, Kriging-Varianten, ...)

## Dabei:

- Wahl eines geeigneten Interpolationsparameters
- Optimierung der Verteilung von Stützstellen und Schätzorten
- Berücksichtigung von Diskontinuitäten (Störungen, Tagebauränder)
- Validierung und Fehleranalyse: GIS stellt hierfür Tools bereit

➤ **Experteneinschätzung erforderlich!**

# Projektteam

## Projektteam



dr. Alex Rohe  
Geotechnik  
Projektleiter



Dr.-Ing. Bernhard Becker  
Grundwasserswirtschaft  
stellv. Projektleiter



ir. Neeltje Goorden, dr. Margreet van Maarle  
(gekoppelte) Modellierung, GIS-Methoden



dr. Henk Kooi  
Mathematische  
Modellierung



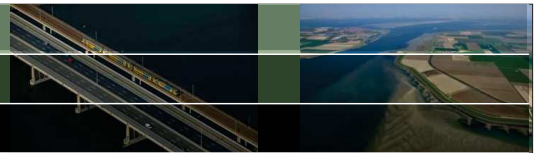
dr. ir. Cor Zwanenburg  
Geotechnische Prozesse

**Deltares**

# Literatur

- Chen, C.-T.; Hu, J.-C.; Lu, C.-Y.; Lee, J.-C.; Chan, Y.-C. (2007): Thirty-year land elevation change from subsidence to uplift following the termination of groundwater pumping and its geological implications in the Metropolitan Taipei Basin, Northern Taiwan. *Engineering Geology* 95 (1), 30–47. DOI 10.1016/j.enggeo.2007.09.001
- Deltares (2016): Sinking Jakarta Causes & Remedies.
- ESRI (2018): Fitting a model to the empirical semivariogram [WWW Document]. URL <http://desktop.arcgis.com/en/arcmap/latest/extensions/geostatistical-analyst/fitting-a-model-to-the-empirical-semivariogram.htm>
- Kropf, R. (1999): TIN (blau) mit überlagerten Höhenlinien [WWW Document]. URL [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Digitales\\_Gel%C3%A4ndemodell.png](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Digitales_Gel%C3%A4ndemodell.png)
- Lieske, K.; Schade, M. (2016): Hebungen der Tagesoberfläche als Folge des Grundwasserwiederanstiegs stillgelegter Braunkohlentagebaue. 17. Geokinematischer Tag 2016.
- Minderhoud, P. S. J.; Erkens, G.; Pham, V. H.; Bui, V. T.; Erban, L.; Kooi, H.; Stouthamer, E. (2017): Impacts of 25 years of groundwater extraction on subsidence in the Mekong delta, Vietnam. *Environmental Research Letters* 12 (6), 064006. DOI 10.1088/1748-9326/aa7146
- Rosner, P. (2011): Auswirkungen des großräumigen Grubenwasseranstiegs im Aachener und Südlimburger Steinkohlenrevier - eine Bilanz aus zwei Jahrzehnten. in: 11. Altbergbau-Kolloquium; Wrocław.
- Verruijt, A. (2012): Soil mechanics. Delft Academic Press, ISBN 978-90-6562-058-3
- Xu, Y.-S.; Yuan, Y.; Shen, S.-L.; Yin, Z.-Y.; Wu, H.-N.; Ma, L. (2015): Investigation into sub-sidence hazards due to groundwater pumping from Aquifer II in Changzhou, China. *Natural Hazards* 78 (1), 281–296. DOI 10.1007/s11069-015-1714-x

**Deltares**



## Expertenbefragung



### Befragte Experten

- Dr. Benjamin Aulbach (Ziegler & Aulbach Ingenieure)
- Prof. Christian Forkel, RWE Power AG
- Alfred Hovekamp, RWE Power AG
- Marco Schade, LMBV
- Prof. Thomas Burbey, Virginia Polytechnic Institute and State University
- Dr. Hendrik Kooi, Deltares
- Dr. Peter Vermeulen, Deltares
- Prof. Christian Wolkersdorfer, Tshwane University of Technology

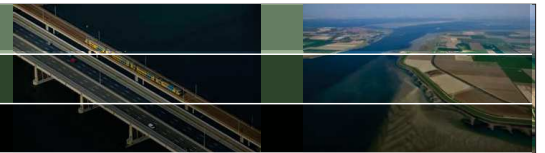


Bild: USGS

## Los Baños-Kettleman (CA, US)

### Andere Fälle

Kalifornien

Entnahmen zur landwirtschaftlichen Wasserversorgung

MODFLOW-IBS (flächige Berechnung)

Sand mit eingeschlossenen Tonlinsen

Tiefe: 500 m

Besonderheiten:  
Flächige Berechnung. Die Konsolidierung der feinkörnigen Interbeds verursacht einen Großteil der Setzung.

**Deltares**

# Methoden zur Bodenbewegungsprognose

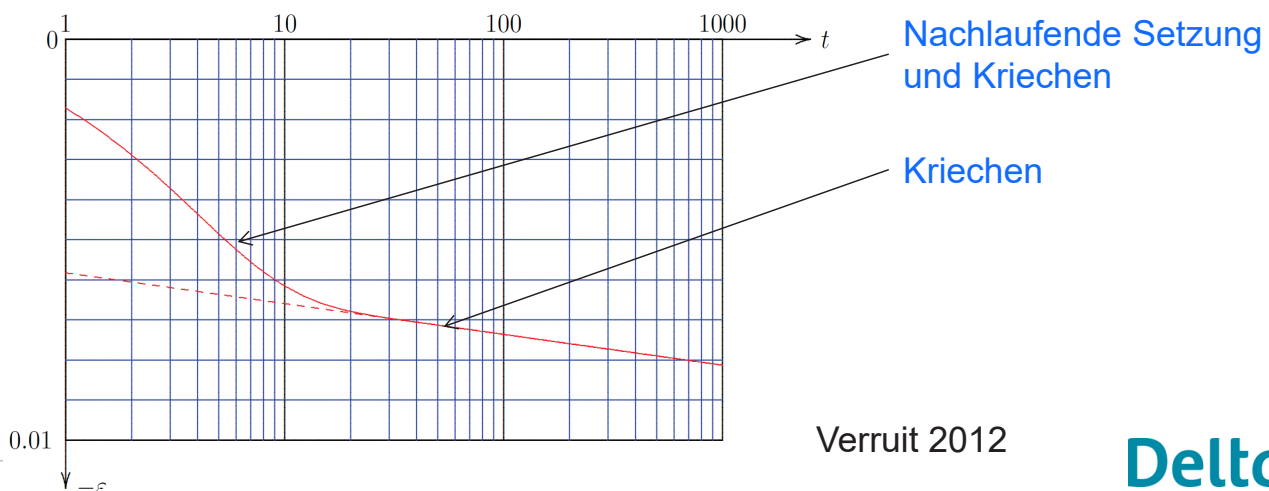


## Prozess: Bodenkriechen („Bodenalterung“)

Langfristige (> 20 Jahre), irreversible Verformung insbesondere bei mächtigen Schichten bindiger Lockergesteine unter gleichbleibender Last

Trennung von zunächst parallel ablaufenden nachlaufenden Setzungsprozessen schwierig

Prozessverständnis ist noch Gegenstand der Forschung (z. B. Giese 2010), vor allem bei gleichzeitigem Wiederanstieg des Grundwassers



**Deltares**