

# **Methodenvergleich Bodenbewegungsprognose für das Rheinische Braunkohlenrevier**

**Recherche, wissenschaftliche Beschreibung und Bewertung  
von Methoden und Anwendungsfällen zur Berechnung von  
Bodenbewegungen infolge Grundwasserstandsänderungen**

Bernhard Becker  
Alexander Rohe

11201293-002

**Title**

Methodenvergleich Bodenbewegungsprognose für das Rheinische Braunkohlenrevier

**Client**

Landesamt für Natur,  
Umwelt und  
Verbraucherschutz  
Nordrhein-Westfalen

**Project**

11201293-002

**Reference**

11201293-002-GEO-0003

**Pages**

163

**Keywords**

Bodenbewegungsprognose; Setzung; Hebung; Sümpfung; Tagebau; Braunkohle; Rheinisches Braunkohlenrevier, D-Settlement, PLAXIS, MODFLOW, FEFLOW, SUB-CR, SUB-WT, subsidence, uplift

**References**

Auftrag-Vergabe-Nr.7288/52/ÖA „Fremdgutachten Flurabstandsprognose“ vom 26.07.2017

Version	Date	Author	Initials	Review	Initials	Approval	Initials
10	June 2018	Bernhard Becker		Alexander Rohe		Joris van Ruijven	
		Alexander Rohe		Henk Kooi			
				Cor Zwanenburg			
				Margreet van Marle			

**State**  
final

## Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Kurzfassung</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>Einleitung</b>	<b>5</b>
2.1	Veranlassung und Ziel	5
2.2	Hydrogeologische und bergbauliche Bedingungen	6
2.3	Bisherige Untersuchungen	8
2.4	Struktur dieses Berichts	9
<b>3</b>	<b>Vorgehensweise</b>	<b>10</b>
3.1	Einführung	10
3.2	Literaturrecherche	10
3.3	Auswahl der Fallbeispiele	11
3.4	Expertenbefragung	13
3.5	Kriterien zur Auswahl einer Methode (Bewertungsmatrix)	14
3.5.1	Überblick	14
3.5.2	Mindestanforderungen und Bewertungskriterien	14
3.5.3	Neutralkriterien	17
<b>4</b>	<b>Bodenmechanische und hydraulische Gesetzmäßigkeiten</b>	<b>18</b>
4.1	Einführung	18
4.2	Ursachen von Bodenbewegungen	18
4.3	Spannungen und Dehnungen im Boden	19
4.4	Prozesse von Bodenbewegungen	23
4.4.1	Konsolidierung	23
4.4.2	Kriechen	24
4.4.3	Prozesse bei Flutung von Untertagebergwerken im Zusammenhang mit Bergsenkungen	25
4.5	Dimensionalität	26
4.6	Bodenmechanische Kompressionsmodelle	26
4.6.1	Einführung	26
4.6.2	Elastisches Modell nach Hooke	27
4.6.3	Kompressionsmodell von Terzaghi	27
4.6.4	Buisman–Koppejan–Modell	28
4.6.5	Bjerrum–Modell	29
4.6.6	ABC–Isotachen–Modell	31
4.6.7	Dreidimensionale Stoffgesetze in numerischen Modellen	33
4.7	Modelle zur Berücksichtigung der Konsolidierung	34
4.7.1	Konsolidierung nach Terzaghi	34
4.7.2	Konsolidierungstheorie auf Basis des Darcy'schen Gesetzes	35
4.8	Bodenparameter und Einflussgrößen	35
4.8.1	Einführung	35
4.8.2	Bodenparameter zur Bestimmung der Spannungen im Boden	35
4.8.3	Bodenparameter zur Beschreibung der Verformung	36
4.8.4	Bodenparameter in Stoffgesetzen numerischer 3D-Modelle	37
4.8.5	Bodenparameter zur Beschreibung der Konsolidierung	39
4.9	Diskussion zur Verwendung der Bodenmodelle	39
4.10	Wechselwirkungen zwischen Grundwasserströmung und Bodenmechanik	41

4.10.1	Einführung	41
4.10.2	Änderung der Höhenlage	41
4.10.3	Änderung der hydraulischen Parameter durch Kompression	42
<b>5</b>	<b>Fallbeispiele</b>	<b>43</b>
5.1	Einführung	43
5.2	Referenzfall: Rheinisches Braunkohlenrevier	44
5.3	Kategorie: Tagebau im Lockergestein	49
5.3.1	Mitteldeutsches und Lausitzer Braunkohlenrevier	49
5.4	Kategorie: Bergbau im Festgestein	53
5.4.1	Steinkohlenbergbau in Deutschland	53
5.5	Kategorie: Andere Fälle von Bodenbewegungen infolge von Grundwasserstandsänderungen	56
5.5.1	Jakarta (Indonesien)	56
5.5.2	Los Baños-Kettleman (Kalifornien)	59
5.5.3	Hangu (China)	63
5.5.4	Mekong-Delta (Vietnam)	66
5.5.5	Changzhou (China)	70
5.5.6	Taipei Basin (Taiwan)	73
5.6	Zusammenfassung und Vergleichbarkeit mit dem Rheinischen Braunkohlenrevier	76
<b>6</b>	<b>Methoden zur Bodenbewegungsprognose</b>	<b>78</b>
6.1	Einführung	78
6.2	Hinweise zur Einschätzung von Genauigkeit und Rechenzeitbedarf der Methoden	80
6.3	Methode nach Ziegler und Aulbach	82
6.4	D-Settlement	84
6.5	Fenk & Tzscharschuch	87
6.6	Bodenbewegungsprognose mit MODFLOW	89
6.6.1	Einführung	89
6.6.2	MODFLOW-IBS: Interbed-Storage-Package	92
6.6.3	MODFLOW-IDP: Interbed Drainage Package	94
6.6.4	MODFLOW-SUB: Subsidence and Aquifer-System Compaction Package	96
6.6.5	MODFLOW-SUB-WT	98
6.6.6	MODFLOW-SUB-CR	100
6.7	FEFLOW-IFM-Modul von Rühaak	102
6.8	Bodenmechanische Programme mit numerischen Lösungsverfahren für dreidimensionale Bodenbewegung	105
6.9	Markscheiderische Methode nach Schaefer	108
<b>7</b>	<b>Zusammenfassende Bewertung der Methoden</b>	<b>112</b>
7.1	Einführung	112
7.2	Mindestanforderungen und Bewertungskriterien	112
7.2.1	Aussagegenauigkeit, Prozesse und Geologie	112
7.2.2	Umsetzbarkeit für den Fall des Rheinischen Braunkohlenreviers	114
7.2.3	Programmtechnische Aspekte	115
7.2.4	Gesamtbewertung	116
7.3	Neutralkriterien	116
<b>8</b>	<b>Interpolationsmethoden</b>	<b>118</b>
8.1	Einführung	118
8.2	Geo-Interpolation	118

8.3	Nicht-statistische Verfahren	119
8.3.1	Nearest Neighbour	119
8.3.2	Inverse-Distanz-Methode	120
8.3.3	Polynom-Interpolation	120
8.3.4	Interpolation von unregelmäßig angeordneten Punktemengen: Dreiecksvermaschung und Triangulation	121
8.3.5	Interpolation von Rechteckgittern	122
8.4	Geostatistische Interpolationsverfahren: Kriging	123
8.5	Bei der Interpolation zu berücksichtigende Aspekte	125
8.5.1	Wahl der Schätzorte	125
8.5.2	Berücksichtigung von Diskontinuitäten	125
8.5.3	Validierung und Fehleranalyse	125
8.5.4	Wahl des zu interpolierenden Parameters	126
8.5.5	Extrapolierung	126
8.6	Anwendungsbereiche	126
<b>9</b>	<b>Schlussfolgerungen und Empfehlungen</b>	<b>128</b>
9.1	Einführung	128
9.2	Schlussfolgerungen	128
9.3	Empfehlungen für weitere Untersuchungen	130
9.3.1	Prozess des Kriechens	130
9.3.2	Überlegungen zur flächendeckenden Modellierung	131
9.3.3	Prozessverständnis	133
9.3.4	Untersuchungen zum Effekt der Wechselwirkungen zwischen Grundwasserströmung und Bodenmechanik	133
9.3.5	Erprobung von Interpolationsmethoden	134
9.4	Empfehlung zur Wahl einer Methode	135
<b>10</b>	<b>Literatur</b>	<b>136</b>
<b>A</b>	<b>Glossar</b>	<b>141</b>
A.1	Begriffe	141
A.2	Software-Produkte	142
<b>B</b>	<b>Literaturrecherche</b>	<b>143</b>
B.1	Suchbegriffe zum Themenkreis „Bodenmechanik“	143
B.2	Suchbegriffe zum Themenkreis „Grundwasserentnahmen“	143
B.3	Suchbegriffe zum Themenkreis Bergbau	143
B.4	Suchbegriffe zu Methoden der Bodenbewegungsprognose	143
B.5	Suchbegriffe zu Interpolationsmethoden	143
<b>C</b>	<b>Auswahl der Fallbeispiele</b>	<b>144</b>
<b>D</b>	<b>Expertenbefragung</b>	<b>147</b>
D.1	Dr. Benjamin Aulbach, Ziegler & Aulbach Ingenieure	147
D.2	Prof. Christian Forkel, RWE Power AG	149
D.3	Alfred Hovekamp, RWE Power AG	150
D.4	Marco Schade, LMBV	152
D.5	Prof. Thomas Burbey, Virginia Polytechnic Institute and State University	154
D.6	Dr. Hendrik Kooi, Deltares	156
D.7	Dr. Peter Vermeulen, Deltares	157

D.8 Prof. Christian Wolkersdorfer, Wolkersdorfer, Tshwane University of Technology	159
<b>E Bewertungsmatrix zur Bewertung von Methoden</b>	<b>162</b>

## 1 Kurzfassung

Das Rheinische Braunkohlenrevier liegt in Nordrhein-Westfalen im Städtedreieck Köln-Düsseldorf-Aachen. Hier wird in den drei Tagebauen Garzweiler, Hambach und Inden Braunkohle in Teufen zwischen 40 und 350 m abgebaut. Für die Fördergeräte benötigt der Tagebau standfeste Böschungen und tragfähige Arbeitsebenen. Dies macht die Entwässerung der wasserführenden Schichten über der Kohle und eine Druckhöhenreduzierung unter dem tiefsten Kohlenflöz notwendig. Zu diesem Zweck wird eine Vielzahl von Sumpfungsbrunnen niedergebracht, mit denen der Grundwasserspiegel abgesenkt wird. Diese Grundwasserabsenkung lässt sich wegen der großen Absenkungstiefe nicht auf die Tagebaue oder zumindest das engere Umfeld der Tagebaue beschränken. Ihr Einfluss erreicht große Teile der jeweiligen geologisch-tektonischen Schollen.

Ab etwa Mitte des Jahrhunderts wird nach derzeitigem Planungsstand in keinem der Tagebaue mehr ein aktiver Bergbaubetrieb stattfinden. Die Sumpfung wird dann kontrolliert zurückgefahren, mit dem Ziel, dass sich etwa ab dem Jahr 2200 ein stationärer Endzustand ähnlich dem des vorbergbaulichen Zustands einstellen wird. Die durch Braunkohleabbau und Abraummaterialeutnahme dann bei jedem Tagebau entstehenden Restlöcher werden kontrolliert mit Oberflächenwasser und Grundwasser zu Restseen gefüllt.

Mit der Absenkung des Grundwassers und dem zukünftigen Wiederanstieg gehen durch die wegfallende und wiederkehrende Auftriebswirkung Bodenbewegungen (Senkungen, Hebungen) einher. Diese laufen zum Teil relativ zeitlich verzögert zum Wiederanstieg des Grundwassers ab. Um abzuschätzen, welche Flurabstände sich in diesem Zusammenspiel zwischen Bodenbewegungen und Grundwasseranstieg einstellen werden und ob es zu potenziellen Geländeversenkungen kommen könnte, sind Prognosemethoden dieser beiden Komponenten von essentieller Bedeutung. Zur Prognose von Grundwasserständen wird am LANUV bereits seit Jahrzehnten ein Grundwassermodell auf Basis von FEFLOW (DHI Wasy) betrieben, das auch für das Projekt Flurabstandsprognose verwendet werden soll. Zur Bodenbewegungsprognose wurden bisher seitens RWE Power AG Ansätze zur punktuellen Prognose von Bodenbewegungen entwickelt oder in Auftrag gegeben. Es ist jedoch bisher unbekannt, welche weiteren Ansätze derzeit im internationalen akademischen Kontext bestehen, die ggf. besser geeignet sind, die im Rheinischen Braunkohlenrevier ablaufenden bodenmechanischen Prozesse zu beschreiben und zu prognostizieren. Gegenstand dieser Literaturrecherche sind daher Methoden zur Prognose von vertikalen Bodenbewegungen, die mit der Änderung des Grundwasserstands einhergehen. Die in der Literatur vorgefundenen Methoden werden hinsichtlich ihrer Aussagegenauigkeit der abgedeckten bodenmechanischen Prozesse sowie ihrer Anwendbarkeit im Rheinischen Braunkohlenrevier bewertet und den bisher im Rheinischen Revier angewandten Referenzmethoden vergleichend gegenübergestellt. Die Informationen aus der Literatur wurden zudem über Expertenbefragungen vertieft.

Zunächst werden die physikalischen Prozesse, die eine Bodenverformung bewirken, erläutert. Grundwasserstandsänderungen führen zu einer Veränderung der Spannungen im Boden und bewirken damit Dehnungen, die sich in Setzungen und Hebungen des Bodens äußern. Eine Zeitabhängigkeit dieser Verformungen werden durch die Prozesse „Konsolidierung“ und „Kriechen“ beschrieben.

Die mechanischen und hydraulischen Prozesse finden Eingang in bodenmechanische Kompressionsmodelle sowie Konsolidierungsmodelle. Die Kompressionsmodelle nach Hooke, Terzaghi, Buisman-Koppejan, Bjerrum und das ABC-Isotachen-Modell werden

vorgestellt. Von den Konsolidierungsmodellen werden das Terzaghi-Modell und der Ansatz nach Darcy vorgestellt.

Die Modelle wiederum sind in verschiedene Methoden implementiert, meistens in Form von Computerprogrammen, seltener in Form von Algorithmen. Eine Methode ist im Prinzip allgemeingültig. Zusammen mit Daten für einen Teil der Erdoberfläche (das Untersuchungsgebiet) entsteht ein gebietsbezogenes Modell zur Bodenbewegungsprognose. Die Anwendung eines gebietsbezogenen Modells für eine bestimmte Fragestellung wird dann als „Fallbeispiel“ bezeichnet. Insgesamt 29 Fallbeispiele wurden in der Literatur identifiziert. Für die neun relevantesten Beispiele wurden Steckbriefe zum direkten Vergleich mit dem Referenzfall erarbeitet. Die meisten Fallbeispiele behandeln Bodenbewegungen im Zusammenhang mit Grundwasserentnahmen zur Wasserversorgung. Das heißt, dass wenig Fälle mit Hebungen dokumentiert sind und dass wenig Erfahrungen mit dem Trockenfallen von Bodenschichten vorliegen.

Die in den Fallbeispielen verwendeten Methoden lassen sich in die folgenden Gruppen einteilen:

- Vereinfachte Ansätze;
- Eindimensionale Methoden;
- Zusatzmodule zu Grundwasserströmungsprogrammen;
- Numerische 3D-Methoden.

Vereinfachte Ansätze lassen sich nur sehr eingeschränkt auf den Fall des Rheinischen Braunkohlenreviers übertragen, da sie wesentliche Prozesse und damit eine Zeitabhängigkeit nicht berücksichtigen. Eindimensionale Methoden werden bereits im Rheinischen Braunkohlenrevier verwendet, sind in den Fallbeispielen aber weniger vertreten als die Zusatzmodule für Grundwasserströmungsprogramme, die die Bodenmechanik eindimensional für Knoten des Berechnungsnetzes des Grundwassermodells berechnen. Die meisten Zusatzmodule gibt es für das Grundwasserströmungsprogramm MODFLOW. Auch für das Programm FEFLOW wurde ein Modul gefunden. Dieses löst die bodenmechanischen Bestimmungsgleichungen allerdings dreidimensional mit der Finite-Elemente-Methode und ist damit gleichzeitig den numerischen Methoden zuzuordnen.

Zur Unterstützung der Auswahl einer Methode wurden Beurteilungs- und Bewertungskriterien zu Aussagegenauigkeit und Anwendbarkeit im Rheinischen Revier erarbeitet. Aus der Gruppe der eindimensionalen Berechnungen konnten somit einerseits die Methode nach Ziegler und Aulbach sowie andererseits ein eindimensionales numerisches Modell (zum Beispiel auf Basis der Software PLAXIS) als geeignet befunden werden.

Von den mehrdimensionalen flächendeckenden Lösungen eignen sich zunächst die numerischen 3D-Modelle, allerdings wurden keine Beispiele gefunden, in denen ein Modellgebiet in der Größenordnung des Rheinischen Braunkohlenreviers mit einem numerischen 3D-Modell abgedeckt wird. Ein weiterer Nachteil ist, dass ein Übertrag des am LANUV auf FEFLOW-Basis vorhandenen Grundwassermodells auf eine andere Modellsoftware vom Aufwand her einem vollständigen Neuaufbau des Modells gleichkommt. Zugleich lässt sich zum aktuellen Zeitpunkt nicht abschätzen, ob und welche Vorteile sich hinsichtlich der Güte von Prognoseergebnissen daraus ergeben würden. Vor dem Hintergrund, dass das LANUV bereits ein Grundwassermodell vorhält und aufgrund des zweifelhaften Zugewinns an Prognosegenauigkeit, ist diese Variante derzeit nicht zu bevorzugen.

Die Zusatzmodule für Grundwassermodelle sind daher zunächst eine naheliegende Lösung für eine flächendeckende Modellierung. Allerdings steht momentan kein Modul zur Verfügung, das direkt mit dem bereits bestehenden FEFLOW-Grundwassermodell ge-

koppelt eingesetzt werden kann und gleichzeitig alle notwendigen bodenmechanischen Prozesse modelltechnisch unterstützt. Die Lücke im Funktionsumfang ist das Trockenfallen von Schichten, und damit verbunden die Konsolidierung/Porenwasserauspressung in einen ungesättigten Grundwasserleiter. Dass dieser Prozess von den meisten in der Literatur vorgefundenen Methoden nicht unterstützt wird, ist damit zu erklären, dass die meisten Anwendungen vor dem Hintergrund von Grundwasserentnahmen zur Wasserversorgung entwickelt wurden. Hier kommt es nur äußerst selten zum Trockenfallen von Schichten. Das Trockenfallen von Schichten ist eine Besonderheit des Bergbaus: um den Abbau zu ermöglichen, sollen hangende Grundwasserleiter (oberhalb der abgebauten Kohleflöze) im Nahbereich des Tagebaus vollständig entwässert werden. Bei den bestehenden Methoden wären also Weiterentwicklungen notwendig, bevor ein solches bodenmechanisches Zusatzmodul zur Grundwassermodellierung theoretisch für das Rheinische Braunkohlenrevier eingesetzt werden kann.

In der Gesamtbetrachtung aller vorgefundenen Methoden ist zunächst zu sagen, dass die für das Rheinische Revier entwickelte und dort bisher angewandte Methode nach Ziegler und Aulbach als sehr gut geeignet eingestuft wird, um die bodenmechanischen Prozesse zu prognostizieren. Derzeit ist diese Methode zudem auch im Vergleich zu anderen Methoden als am besten geeignet einzustufen, vor allem weil sie bereits für das Rheinische Braunkohlenrevier angewendet wird. Jedoch wurden auch hier noch offene Fragen zum Prozess des Bodenkriechens und zu den Wechselwirkungen zwischen Bodenmechanik und Grundwasserströmung als offene Forschungsfragen identifiziert:

Bodenkriechen wird im Rheinischen Braunkohlenrevier mit Modell nach Ziegler und Aulbach für den Kalibrierungszeitraum erfasst, aber modelltechnisch noch nicht in Form eines separaten Prozesses berücksichtigt. Da hier aber Tonschichten von großer Mächtigkeit vorliegen und die betrachteten Zeiträume im Vergleich zu anderen Fallstudien vergleichsweise lang sind, lässt sich eine Relevanz des Kriechprozesses vermuten. Es wird daher empfohlen zu analysieren, wie stark sich eine Berücksichtigung oder Vernachlässigung dieses Prozesses auf die Prognosen von Bodenhebungen auswirkt. Die besondere Schwierigkeit besteht darin, dass Kriechen und Konsolidierung sich nur schwer voneinander trennen lassen und dass der Ablauf des Kriechens bei gleichzeitigen Bodenhebungen infolge Grundwasserwiederanstieg bisher in der Literatur noch nicht beschrieben wurde. Vergleichsrechnungen können Hinweise zur Relevanz des Kriechens geben. Es wurden in der Literatur Modelle und Methoden vorgefunden, in denen dieser Prozess berücksichtigt werden kann. Ihre Anwendung ist auch in den Fallbeispielen dokumentiert. Von diesen Modellen wurden drei eindimensionale Prognosemethoden (1D-PLAXIS, 1D-MODFLOW-SUB-CR, D-Settlement) ebenfalls als gut geeignet eingestuft, um die bodenmechanischen Prozesse im Rheinischen Revier abzubilden. Es empfiehlt sich daher, mögliche Vergleichsrechnungen zur Abschätzung der Relevanz von Bodenkriechen oder zu hydraulisch-mechanischer Koppelung mit diesen Methoden durchzuführen.

Wechselwirkungen zwischen Bodenmechanik und Grundwasserhydraulik werden bisher im Rheinischen Revier vernachlässigt. Diese wirken sich nicht wie der Prozess des Kriechens direkt für die Bodenverformung aus, sondern sind vor allem von wasserwirtschaftlicher Bedeutung. Zwar beeinflussen die mit der Bodenbewegung einhergehenden Änderungen der Durchlässigkeits- und Speichereigenschaften auch die Konsolidierung und damit die Bodenbewegung selbst. Ein größerer Effekt könnte jedoch von der teilweise dauerhaften Reduktion des Speichervolumens ausgehen, was einen Einfluss auf den Ablauf des Grundwasserwiederanstiegs und auf die langfristige Grundwassersituation haben könnte. Auch für diesen Prozess könnten Vergleichsrechnungen zur Einschätzung seiner Relevanz durchgeführt werden.

Werden eindimensionale Bodenbewegungsprognosen für ausgewählte Punkte innerhalb des Modellgebietes berechnet, müssen die Ergebnisse in die Fläche übertragen werden. Hierfür stehen „Nicht-statistische“ und geostatistische Verfahren der „Kriging-Familie“ zur Verfügung. Letztere wurden auch in der Expertenbefragung als gängiges und geeignetes Verfahren genannt, um Bodenbewegungsdaten auch bei geringer Datendichte zu interpolieren. Zum aktuellen Zeitpunkt kann jedoch aufgrund der seltenen Dokumentation von Interpolationsmethoden für Bodenbewegungsprognosen in der Literatur nicht eingeschätzt werden, ob diese generelle Aussage für den Anwendungsfall zutreffend ist. Auch hier wird daher empfohlen, mehrere Interpolationsmethoden im Vergleich anzuwenden und die Ergebnisse vor dem Hintergrund von Expertenwissen zu beurteilen.

Weiterhin wird empfohlen, nach Möglichkeit das Prozessverständnis für Bodenbewegungen im Rheinischen Braunkohlenrevier, insbesondere mit Blick auf Hebungen, mit Hilfe von Messungen und Sensitivitätsstudien zu erweitern.

## 2 Einleitung

### 2.1 Veranlassung und Ziel

Im Zuge der zur Wasserhaltung der Braunkohletagebaue des Rheinischen Braunkohlenreviers notwendigen Grundwasserabsenkung kommt es zu Bodensenkungen. Bereichsweise folgen diese Senkungen dem absinkenden Grundwasserstand, in anderen Bereichen laufen sie zeitverzögert ab. In der Wiederanstiegsphase des Grundwassers nach Ende der Bergbauaktivitäten werden entsprechend Bodenhebungen in Abhängigkeit vom zukünftigen Grundwasserstand und der Belastungshistorie eintreten. Die bodenmechanischen Prozesse, hier im Wesentlichen die sogenannte Konsolidierung, bedingen jedoch, dass die Senkungen nur teilweise reversibel sind, das heißt, dass sich die Geländehöhen nicht zwangsläufig auf das vorbergbauliche Niveau einstellen werden, wenn der Grundwasserhaushalt seinen vorbergbaulichen Zustand erreicht hat. Es ist daher zu prüfen, ob es stellenweise zu einer Verringerung von Grundwasserflurabständen im Vergleich zur vorbergbaulichen Situation kommen wird, die zu potenziellen Geländevernässungen führen könnte.

Vor diesem Hintergrund wurden in der Vergangenheit im Umfeld des Rheinischen Braunkohlenbergbaus unterschiedliche Ansätze entwickelt, um eine Prognose der Bodenbewegungen infolge zukünftiger Entwicklungen der Grundwasserstände in Mehrschicht-Grundwassersystemen vorzunehmen.

Das Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz des Landes Nordrhein-Westfalen (LANUV NRW) leitet im Auftrag des Ministeriums für Umwelt, Landwirtschaft, Natur- und Verbraucherschutz des Landes Nordrhein-Westfalen (MULNV) derzeit eine Facharbeitsgruppe „Flurabstandsprognose“. Ziel dieser Facharbeitsgruppe ist es, eine Flurabstandsprognose nach Grundwasserwiederanstieg in der Bergbaufolgelandschaft des rheinischen Braunkohlenbergbaus zu erstellen und mögliche Vernässungsbereiche zu identifizieren. Die Facharbeitsgruppe setzt sich zusammen aus Vertretern von LANUV, MULNV, GD NRW (Geologischer Dienst NRW), MWIDE (Ministerium für Wirtschaft, Innovation, Digitalisierung und Energie des Landes Nordrhein-Westfalen), der RWE Power AG, der Bergbehörde (Bezirksregierung Arnsberg), Geobasis NRW (Bezirksregierung Köln), den Bezirksregierungen Köln, Düsseldorf und Arnsberg (Bergbehörde), der regionalen Wasserverbände, sowie der betroffenen Kommunen und Interessensvertreter (BUND – Bund für Umwelt und Naturschutz Deutschland; LVBB – Landesverband Bergbaubetroffener NRW). Die Facharbeitsgruppe erarbeitet das Arbeitsprogramm und das methodische Vorgehen. Die Arbeitsergebnisse werden dem übergeordneten Beratungsgremium vorgelegt, das das MULNV bezüglich der Bewertung der Ergebnisse und der daraus zu ziehenden Schlussfolgerungen berät.

Ziel dieser Studie ist es, herauszuarbeiten, welche bodenmechanische Prozesse für die Prognose der Bodenbewegung im rheinischen Braunkohlenrevier relevant sind, und inwieweit diese in den verwendeten Methoden berücksichtigt worden sind. Darüber hinaus sollen weitere Methoden aus der nationalen sowie internationalen Literatur, die zur Prognose von Bodenbewegungen infolge künstlicher Grundwasserstandsänderungen in mächtigen Lockergesteinswechsellagerungen eingesetzt werden können, dokumentiert werden und entsprechende Anwendungsfälle dargestellt werden. Zudem sollen Methoden dokumentiert werden, mit denen an Einzelpunkten gemessene oder prognostizierte Bodenbewegungen in die Fläche interpoliert werden können.

## 2.2 Hydrogeologische und bergbauliche Bedingungen

Zu den hydrogeologischen und bergbaulichen Bedingungen des Rheinischen Reviers schreibt Giese (2010):

„Das Rheinische Revier verdankt seine reichen Braunkohlenvorkommen den besonderen geologischen Verhältnissen der Niederrheinischen Bucht. Als Folge tektonischer Vorgänge bildete sich die Niederrheinische Bucht vor ca. 35 Millionen Jahren als Sedimentationsbecken, dessen stratigraphischer Aufbau [aus Transgressions- und Regressionszyklen des Tertiärs (v.a. Miozän) und Quartärs] zusammen mit tektonischen Verwerfungen die Rahmenbedingungen für die Gewinnung der Braunkohle im Tagebau vorgibt: sowohl durch die Tiefe der anstehenden Flözgruppen als auch durch die Abfolge grundwasserleitender und -stauender Bodenschichten.“

Zum Teil sind über 1000 m mächtige Wechsellagerungen aus bis zu 15 Lockergesteinsgrundwasserleitern mit Mächtigkeiten von bis zu 200 m vorhanden. Tonpakete können Schichtmächtigkeiten von bis über 30 m erreichen, einzelne Braunkohleflöze sogar bis zu 60 m.

Im obersten Grundwasserleiter liegt der Grundwasserstand auch heute noch in Bereichen ohne Sumpfungseinfluss stellenweise dicht unter der Geländeoberfläche, das heißt, es liegen niedrige Flurabstände vor. Im Bereich des bergbaulichen Absenkungstrichters sind vorbergbaulich geringe Flurabstände häufig derzeit deutlich vergrößert. Die darunter liegenden Grundwasserleiter weisen in einer natürlichen Situation ohne Sumpfungseinfluss üblicherweise gespannte Grundwasserverhältnisse auf.

Die industrielle Nutzung von Braunkohle ist seit etwa 1950 ein wesentliches Standbein der deutschen Energieversorgung. Gegenwärtig sind die drei Tagebaue Inden, Hambach und Garzweiler aktiv. Der Abbau erfolgt mit schwerem Gerät, Schaufelradbagger von bis zu 100 m Höhe bewegen kontinuierlich große Mengen an Abraum und Braunkohle. Der Einsatz von großen Maschinen ist ein wesentlicher Faktor für die Wirtschaftlichkeit des Tagebaubetriebs. Die Abbaumaschinen benötigen einen standfesten Boden im Tagebau und stabile Böschungen. Um beides zu erreichen, wird der Tagebau mit Hilfe von Sumpfungsb Brunnen trockengelegt. Wegen der Größe und Tiefe der Tagebaue lässt sich der Einfluss dieser Sumpfungsmaßnahmen nicht auf den Nahbereich des Tagebaus beschränken. An manchen Stellen erreicht der Tagebau Tiefen von 400 m u. GOK. Entsprechend muss der Grundwasserspiegel abgesenkt werden. Die Effekte sind weit außerhalb der Tagebaue zu beobachten, die Sumpfungsmaßnahmen beeinflussen große Teile der jeweiligen geologisch-tektonischen Einheiten, der sogenannten Schollen (Abbildung 2.1). Diese Schollen stehen über die sogenannten Schollenrandstörungen hydraulisch miteinander im Austausch. Das von den Sumpfungsmaßnahmen beeinflusste Gebiet umfasst etwa 3500 km<sup>2</sup>. Die Sumpfungsmaßnahmen richten sich dabei auch auf die unterhalb des tiefsten abgebauten Flözes liegenden Schichten, die sogenannten Liegendleiter. Auch hier muss der Grundwasserleiter entspannt werden, um die hydraulische Stabilität der Tagebausohle zu gewährleisten.

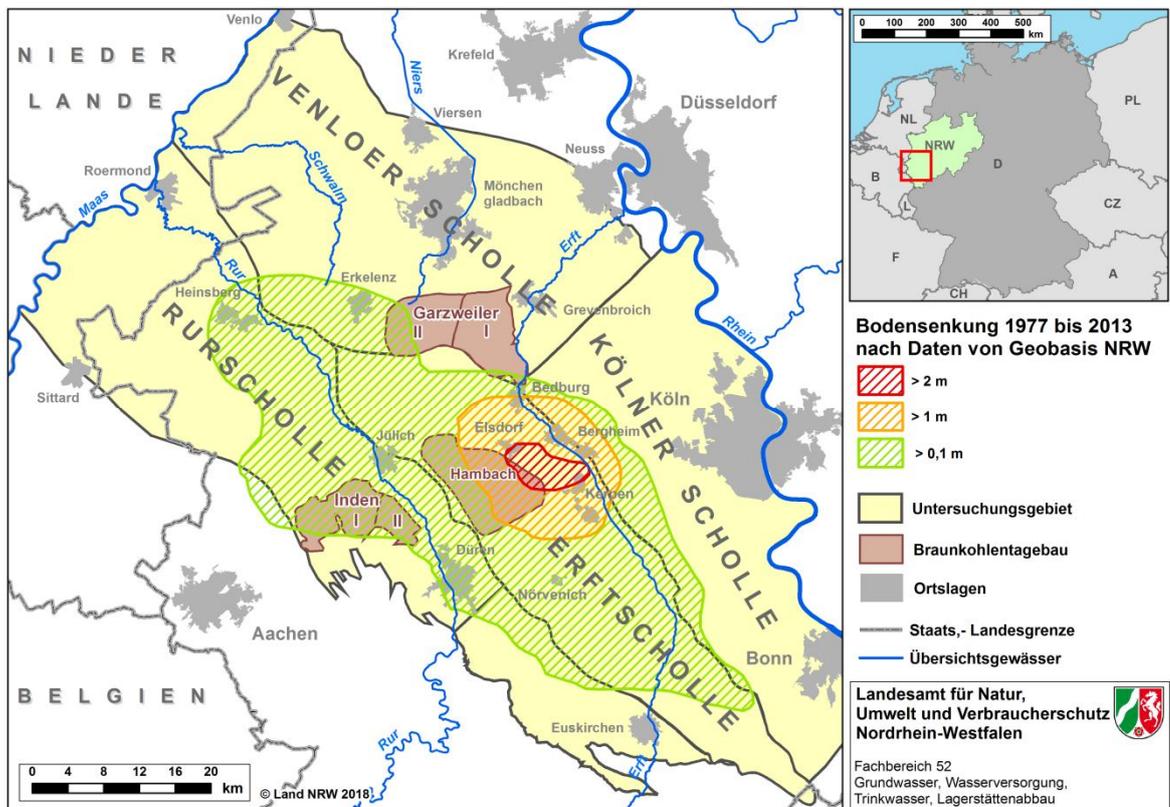


Abbildung 2.1 Übersicht Rheinisches Braunkohlenrevier mit den Tagebauen Inden, Garzweiler und Hambach, den geologischen Einheiten (Schollen) Erftscholle, Rurscholle und Venloer Scholle und Bodensenkung 1977 bis 2013 (Quelle: LANUV)

Mitte des 21. Jahrhunderts werden die derzeit aktiven Tagebaue nicht mehr in Betrieb sein. Die Sumpfung wird dann kontrolliert zurückgefahren mit dem Ziel, dass sich bis ca. 2200 ein stationärer Endzustand einstellt, der der vorbergbaulichen Situation näherungsweise entspricht. Die durch Braunkohleabbau und Abraummaterialentnahme dann bei jedem Tagebau entstandenen Restlöcher werden kontrolliert mit Oberflächenwasser und Grundwasser zu Restseen aufgefüllt.

Der massive Eingriff in den Grundwasserhaushalt hat zur Folge, dass mächtige grundwasserleitende Schichten weiträumig entspannt werden. Bereichsweise können sie auch vollständig trocken fallen; dieser Effekt ist in der Regel auf die unmittelbare Tagebaunähe begrenzt, jedoch können einzelne flache Grundwasserleiter mitunter weitflächig trocken fallen. Liegendleiter, also grundwasserleitende Schichten unterhalb des jeweils tiefsten abgebauten Flözes, werden nur druckentspannt und fallen deshalb nicht trocken.

Schichten bindigen Materials, die sogenannten Grundwassergeringleiter oder Grundwasserstauer, entwässern aufgrund ihrer geringen hydraulischen Durchlässigkeit nur zeitlich verzögert in die oberhalb und unterhalb liegenden entspannten Schichten. Die ersten großräumigen Sumpfungsmaßnahmen wurden etwa mit Beginn des industriellen Tagebaus ab 1955 eingesetzt und werden bis zum Ende des Tagebaubetriebs andauern. Die Grundwasserabsenkung erstreckt sich mit ca. 100 Jahren über einen vergleichsweise langen Zeitraum. Die anschließende Phase des Grundwasserwiederanstiegs nimmt wiederum etwas mehr als ein halbes Jahrhundert in Anspruch. Geologisch gesehen sind dies noch sehr kurze, nach menschlichen Begriffen jedoch lange Zeiträume. Die Dauer der Sumpfungsmaßnahmen im Rheinischen Braunkohlenrevier geht damit weit über das

Maß von den meisten in der Literatur dokumentierten Sumpfungmaßnahmen oder normalen Bauvorhaben hinaus.

Gegenstand dieser Untersuchung sind die mit der Änderung des Grundwasserstands verbundenen vertikalen Bodenbewegungen. Durch die im Zuge der Entwässerung geringer werdende Auftriebswirkung des Grundwassers kommt es zu Setzungen. Steigt das Grundwasser wieder an, kommt es zu Bodenhebungen. Die Beträge der Hebungen erreichen in der Regel nur einen Teil der Setzungsbeträge. Die Setzungen sind also nicht vollständig reversibel. Es ist daher nicht zu erwarten, dass sich die ursprünglichen Geländehöhen wieder einstellen werden. Erreicht der Grundwasserspiegel jedoch sein stationäres Niveau, könnte dies stellenweise zur Verringerung der Flurabstände oder zu Geländevernässungen führen.

Die Grundwassersabsenkung hat ihr Maximum in einigen Regionen gegenwärtig bereits annähernd erreicht oder bereits durchlaufen. Entsprechend ist auch ein Großteil der Setzungen bereits eingetreten. Es werden nur noch Setzungen in geringerem Umfang erwartet. Geländehebungen sind bisher allerdings lediglich stellenweise dokumentiert. Generell verlaufen die Setzungen regional gleichförmig. Schäden an Gebäuden entstehen im Allgemeinen bei lokal auftretenden ungleichförmigen Setzungen im Bereich entwässerter humoser Auebereiche oder bewegungsaktiver Störungen.

### 2.3 Bisherige Untersuchungen

Zur Beantwortung wasserwirtschaftlicher Fragestellungen wird beim LANUV NRW ein Großraum-Grundwassermodell vorgehalten. Das Grundwasserströmungsprogramm FEFLOW (DHI 2018) löst die Bestimmungsgleichungen der Grundwasserströmung mit Hilfe der Finite-Elemente-Methode. Das Berechnungsnetz gibt den hydrogeologischen Schichtenaufbau für die Erftscholle, Rurscholle und Venloer Scholle dreidimensional wieder. Neben natürlichen Randbedingungen wie Grundwasserneubildung und Zustrom aus dem Festgestein, Oberflächengewässern und den Randströmen an den Modellrändern enthält das Modell industrielle, private und öffentliche Wasserentnahmen, historische Steinkohlensümpfung und die Sumpfung- und Infiltrationsmaßnahmen für die Braunkohletagebaue.

Der Tagebaubetreiber RWE Power AG besitzt ebenfalls Grundwassermodelle für das Rheinische Braunkohlenrevier. Diese sind mit etwas anderen Zielsetzungen wie beispielsweise der Planung der Tagebauentwässerung entwickelt worden und basiert auf einem eigens durch die RWE Power AG zu diesem Zweck programmierten Code GWDrei.

Die Überwachung der Bodenbewegungen erfolgt im Rheinischen Revier im Rahmen der Landesvermessung (siehe z. B. Schaefer 2006). Dazu zählen das Leitnivellement auf dem übergeordneten behördlichen Grundlagennetz, die bergbauliche Ortslagenvermessung und bergbauliche Sondermessungen (Poths 2017). Diese Vermessungsdaten fließen in die markscheiderische Bodenbewegungsprognose nach Schaefer (Abschnitt 6.9) ein oder aber in die Prognose der Bodenbewegung infolge Grundwasserabsenkung und Grundwasserwiederanstieg nach Ziegler und Aulbach. Letztere wurde seit Mitte der 2000er Jahre an der RWTH Aachen im Auftrag der RWE Power AG entwickelt (Giese 2010) und wird seither durch die Ziegler und Aulbach GmbH fortentwickelt und betrieben (Abschnitt 6.3, Methode nach Ziegler und Aulbach):

- Für ausgewählte Punkte im Rheinischen Braunkohlenrevier wurden gebietsbezogene Modelle entwickelt, die in ihrer Gesamtheit im Folgenden „Modell Ziegler/Giese 2004“ genannt werden. Die Modelle verwenden gemessene Bodenparameterwerte oder, wo diese fehlen, sinnvolle Annahmen. Dabei wurde versucht, für jede geotek-

tonische Scholle nur einen einheitlichen bodenmechanischen Parametersatz je geologischer Schicht zu identifizieren. Folglich unterschieden sich die Modelle im Wesentlichen lediglich durch das stratigraphische Schichtenprofil. Für die Kalibrierung wurden Vertrauensbereiche in physikalischen Grenzen festgesetzt.

- In einer Überarbeitung des Modells (Ziegler/Aulbach 2016) wurde das Konzept dahingehend verändert, dass nun für alle Punkte unterschiedliche bodenmechanische Parametersätze zugelassen wurden. Die individuelle Kalibrierung an jedem Einzelpunkt zielt auf die Reproduktion des bodenmechanischen Verhaltens (Höhenzeitfolge) ab, wobei darauf geachtet wird, dass die Parameter sich weiterhin in bodenmechanisch sinnvollen Vertrauensbereichen bewegen (Ziegler 2017).

Berechnungen mit der Finite-Elemente-Methode wurden im Rheinischen Revier in der Vergangenheit ebenfalls durchgeführt. Diese beschäftigten sich allerdings mit Fragen zur Standsicherheit von Böschungen (Karcher 2003) und zur Reproduktion von Setzungen infolge Tagebausümpfung (Hügel 1995), nicht zur Vorhersage der Geländeoberfläche nach Grundwasserwiederanstieg.

## 2.4 Struktur dieses Berichts

Nach einem Einführungskapitel (dieses Kapitel 2) mit der Veranlassung und Ziel der Studie und einer Übersicht zu den hydrogeologischen und bergbaulichen Bedingungen im Rheinischen Braunkohlenrevier und bisherigen Untersuchungen werden in Kapitel 3 zunächst die Methoden der Recherche vorgestellt.

Kapitel 4 gibt dann eine Einführung zu den bodenmechanischen Gesetzmäßigkeiten der Bodenbewegungen. Darin werden verschiedene bodenmechanische Kompressionsmodelle vorgestellt, die den Zusammenhang zwischen Spannungen und Dehnungen für einen Boden beschreiben und den Methoden zur Bodenbewegungsprognose zugrunde liegen. Ebenso wird auf Prozesse bei Flutung von Untertagebergwerken eingegangen. Neben den bodenmechanischen Kompressionsmodellen existieren verschiedene Ansätze zur Berücksichtigung der Grundwasserhydraulik (Konsolidierung).

Kapitel 5 enthält verschiedene Fallbeispiele aus der Literatur, die Ähnlichkeiten mit dem Rheinischen Braunkohlenrevier aufweisen und in denen Bodenbewegungsprognosen berechnet wurden. Die jeweils angewendeten Methoden zur Bodenbewegungsprognose sind dann in Kapitel 6 erläutert.

In Kapitel 7 werden schließlich die verschiedenen Methoden vor dem Hintergrund der Anwendbarkeit für das Rheinische Braunkohlenrevier bewertet. Dabei werden sowohl die bodenmechanischen und grundwasserhydraulischen Prozesse berücksichtigt, als auch organisatorische Aspekte wie zum Beispiel die Verfügbarkeit der Software.

Das Kapitel 8 widmet sich Methoden zur Interpolation, mit Hilfe derer Punktinformationen in die Fläche übertragen werden können, um die bodenmechanische Parametrisierung und Berechnung der Bodenbewegungen nicht für das gesamte Untersuchungsgebiet durchführen zu müssen.

Kapitel 9 schließt diesen Bericht mit Schlussfolgerungen und Empfehlungen für das weitere Vorgehen ab.

## 3 Vorgehensweise

### 3.1 Einführung

In diesem Kapitel wird das methodische Vorgehen zum Methodenvergleich erläutert. Zunächst wird die Vorgehensweise bei der Literaturrecherche vorgestellt, es folgen die Auswahl der Fallbeispiele und die Expertenbefragung. Im Kapitel 3.5 werden dann die Kriterien zur Auswahl einer Methode erläutert.

### 3.2 Literaturrecherche

Ziel der Literaturrecherche ist es, in der akademischen Fachliteratur dokumentierte, vergleichbare, nationale und internationale Fallbeispiele der Berechnung von Bodenbewegungen mittels mathematischer Prognosemodelle zu recherchieren. Fallbeispiele, bei denen keine Bodenbewegung berechnet, sondern nur gemessen wurde, sind ebenfalls von Interesse, wenn hier Interpolationsmethoden benutzt wurden. Experimentelle Testmodelle unter Laborbedingungen, sogenannte „Sandkastenmodelle“, sind im Hinblick auf die Zielsetzung weniger interessant.

Fallbeispiele und Methoden werden in Form von Steckbriefen vorgestellt. Damit wird der gängigen Struktur von Fachartikeln Rechnung getragen: oft dient ein Fallbeispiel zur Motivation für die Entwicklung einer Methode, deren Dokumentation dann der Schwerpunkt des Artikels ist. Die Anwendung wird dann im Fallbeispiel aufgegriffen. Informationen aus einem Fachbeitrag fließen dementsprechend in die Steckbriefe zu Fallbeispielen (vgl. Kapitel 5) und Methoden (vgl. Kapitel 6) ein.

Die Suche erfolgte auf drei Ebenen:

- Vom Auftraggeber übergebene Literatur;
- Eigene Literatur (Expertensuche);
- Suchmaschinen (Google, Scopus, Bibliothekskatalog der Technischen Universität Delft und der Freien Universität Amsterdam).

Ausgangspunkt ist die vom Auftraggeber übergebene Literatur. Diese wird mit eigener Literatur aus dem Archiv der bearbeitenden Fachleute ergänzt. Im letzten Schritt wurde eine Internet-Recherche mit Hilfe von Suchbegriffen durchgeführt. Die Literatursuche mit Suchmaschinen liefert hauptsächlich internationale, also englischsprachige Literatur, während die seitens Auftraggeber und aus eigenen Archiven zur Verfügung stehende Literatur auch deutschsprachige Artikel enthält.

Artikel und Beiträge nach Anwendungsbeispielen wurden gemäß der drei Kategorien „Bergbau im Festgestein“, „Tagebau im Lockergestein“, „weitere Fälle“ ausgewählt. Zwar wurden einige Quellen mehrmals gefunden, jedoch stellen die drei Suchebenen eine gute Ergänzung zueinander dar.

Details zur Literaturrecherche mit einem vollständigen Vermerk der verwendeten Suchbegriffe sind im Anhang B aufgenommen. Die Literatur ist durch die Verwendung einer Referenzsoftware (Zotero) digital in einer Datenbank erschlossen, die zur Verfügung gestellt wird.

### 3.3 Auswahl der Fallbeispiele

Aus der Literatur wurden insgesamt 29 Fallbeispiele identifiziert, in denen Bodenbewegungen infolge Grundwasserstandsänderungen eine Rolle spielen (Anhang C). Aus diesen 29 sollten neun Fallbeispiele zur Erstellung von Fallbeispiel-Steckbriefen ausgewählt werden (siehe Kapitel 5), die den Bedingungen im Rheinischen Revier am nächsten kommen, oder in denen Methoden verwendet wurden, die von Interesse für den aktuellen Anwendungsfall sein könnten (vgl. Methodensteckbriefe in Kapitel 6). Um diese Auswahl objektiv durchführen zu können, wurden die in Tabelle 3.1 aufgeführten Kriterien definiert. Die Auswahlkriterien umfassen neben der Größenordnung des Modellgebiets hinsichtlich Tiefe und Fläche im Vergleich zum Referenzfall „Rheinisches Braunkohlenrevier“ auch die bodenmechanischen Prozesse und die flächige Prognose der Bodenbewegung sowie die allgemeine Übereinstimmung mit dem Referenzfall. Es wurden Punktzahlen zwischen 1 und 3 vergeben, mit einem Gewichtungsfaktor multipliziert und zur Gesamtbewertung aufaddiert.

Mit dieser Vorgehensweise wurden zunächst zwölf Fallbeispiele einschließlich des Referenzfallbeispiels identifiziert, die eine Gesamtpunktzahl von mindestens 5 erreichten, methodisch interessant erschienen oder dem vorliegenden Fall sehr ähnlich waren und somit zur weiteren Betrachtung herangezogen wurden. Eine weitere Auswahl wurde dann über die angewandten Methoden durchgeführt, sodass weitere drei Fallbeispiele, deren methodische Ansätze bereits über andere Fallbeispiele abgedeckt waren, aus den weiteren Betrachtungen ausgeschlossen wurden. Für diese Fallbeispiele wurden keine eigenen Steckbriefe erstellt. Verweise bzw. Quellenangaben zu diesen Fallbeispielen, bei denen die jeweilige Methode ebenfalls zum Einsatz kam, werden in den jeweiligen Methodensteckbriefen dokumentiert. Die schließlich zur Erstellung von Steckbriefen ausgewählten Fallbeispiele sind mit ihrer Gesamtbewertung in Tabelle 3.2 wiedergegeben.

Tabelle 3.1 Bewertungskriterien für die Auswahl von Fallbeispielen.

Kriterium	Ausprägung	Punkte	Faktor
Tiefe	ca. 10 m	1	0,5
	ca. 100 m	2	
	ca. 1000 m	3	
Fläche (Kantenlänge des Untersuchungsgebietes)	ca. 10 km	1	0,5
	ca. 50 km	2	
	ca. 100 km	3	
Bodenmechanische Prozesse	Elastisches Kompressionsmodell	1	1,0
	Konsolidierung (z.B. Terzaghi)	2	
	Weitere Prozesse (z.B. Kriechen)	3	
Übertragung der Bodenbewegung in die Fläche	Statistik, historische Daten	1	0,5
	Interpolation aus einzelnen Punkten	2	
	flächige Berechnung, gekoppelt	3	
Übereinstimmung mit Referenzfall	Grundwasseranstieg, Geländehebungen, Braunkohle	0-3	1,0

Tabelle 3.2 Ausgewählte Fallbeispiele verschiedener Kategorien (F: Festgestein, LT: Lockergestein, Tagebau, LW: Lockergestein, weitere Fälle); in der Spalte „Bodenbewegung“ stehen S für Setzung, H für Hebung und SH für Setzung und Hebung). Fallbeispiele ohne Steckbrief sind kursiv hervorgehoben.

Region	Ursache	Quelle	Kategorie	Bodenbewegung	Methode Bodenbewegungsprognose	Interpolation der Bodenbewegung in der Fläche	Punkte
<i>Australien</i>	<i>Grundwasserentnahmen</i>	Helm 1987	<i>LT</i>	<i>S</i>	<i>COMPAC 1D</i>	<i>keine</i>	<i>5.5</i>
Mitteldeutsches und Lausitzer Braunkohlenrevier	Braunkohle	Berkner & Thiemme 2005; Lieske & Schade 2016	LT	SH	keine Bodenbewegungsberechnung	keine	5
Rheinisches Braunkohlenrevier	Braunkohle	Hügel 1995	LT	S	Finite Elemente, ABAQUS, 2D	2D-vertikaler Schnitt	7
<i>Florina (Griechenland)</i>	<i>Braunkohle</i>	Loupasakis et al. 2014	<i>LT</i>	<i>S</i>	<i>PLAXIS, 2D</i>	<i>2D-vertikaler Schnitt</i>	<i>5.5</i>
Steinkohlenbergbau Deutschland	Steinkohle	Fenk & Tzscharschuch 2007	F	SH	Analytische Berechnung, 1D	keine	5
Changzhou (China)	Grundwasserentnahmen	Xu 2015	LW	S	PLAXIS, 3D	für ganzes Modellgebiet berechnet	5
Los Baños-Kettleman (Kalifornien)	Grundwasserentnahmen	Larson 2001	LW	S	MODFLOW-IBS	für ganzes Modellgebiet berechnet	6.5
Jakarta (Indonesien)	Grundwasserentnahmen	Kooi 2015	LW	S	D-Settlement, 1D	keine	6
Mekong-Delta (Vietnam)	Grundwasserentnahmen	Minderhoud 2017	LW	S	SUB-CR	für ganzes Modellgebiet berechnet	6.5
<i>Delft (Niederlande)</i>	<i>Reduktion der Grundwasserentnahmen</i>	<i>Roelofsen</i>	<i>LW</i>	<i>SH</i>	<i>D-Settlement</i>	<i>Interpolation aus einzelnen Berechnungspunkten</i>	<i>6</i>
Hangu (China)	Grundwasserentnahmen	Shearer 1998	LW	S	MODFLOW-IDP	Berechnet für das ganze Modellgebiet	7
Taipei Basin, Taiwan	Grundwasserentnahmen	Chen 2007	LW	SH	Messungen	Kriging	6

### 3.4 Expertenbefragung

Mit dem Ziel, die in der Literatur veröffentlichten Informationen zu vertiefen, wurde eine Expertenbefragung durchgeführt. Ausgewählte Autoren von als relevant eingestuften Veröffentlichungen wurden per E-Mail oder telefonisch zu ihren Veröffentlichungen befragt. Die Fragen wurden für jeden Experten auf Grundlage der Veröffentlichung individuell entworfen, es handelt sich bei der Expertenbefragung also nicht um eine Umfrage. Hintergrund oder Leitfrage war dabei, inwieweit die im Beitrag publizierte Methode sich für das Rheinische Braunkohlenrevier anwenden lässt. Experten, die mit dem Rheinischen Braunkohlenrevier vertraut sind, wurden auch zu ihren konkreten Erfahrungen im Untersuchungsgebiet befragt (D.1, D.2 und D.3).

Die folgende Liste gibt beispielhaft einige Fragen wieder.

- Bei Bedarf allgemeine Verständnisfragen zur Methode.
- Was sind wesentliche Merkmale der Methode?
- Wurden mit der Methode Hebungen berechnet?
- Welche Methode wurde zur Interpolation verwendet?
- Korrektur des Methodensteckbriefs oder des Steckbriefs für ein Fallbeispiel
- Fragen zur Anwendbarkeit der Methode im Rheinischen Braunkohlenrevier:
  - Prozess des Kriechens abbildbar?
  - Empfehlung zu einer Methode?
- Frage nach weiterführender Literatur und weiteren Hinweisen.

Die Fragen und die Antworten stehen in Anhang D und sind in diesem Bericht verarbeitet. Fragen, auf die keine Antwort einging, sind nicht aufgeführt.

Die wichtigsten Impulse aus der Expertenbefragung sind die folgenden.

- Es wurden gute Erfahrungen mit der markscheiderischen Prognose gemacht. (D.3, D.4)
- Für Bereiche, in denen nachlaufende Konsolidierung beobachtet wird, kann die markscheiderische Methode (noch) nicht angewendet werden. (D.2, D.3)
- Da es sich um lange Betrachtungszeiträume handelt, spielt der Prozess des Kriechens wahrscheinlich da eine Rolle, wo mächtige Tonschichten vorliegen (D.5, D.6).
- Wegen der großen Absenktiefe und der langen Dauer der Sümpfung werden sich Porosität und Durchlässigkeit der Grundwasserleiter und -stauer vermutlich signifikant und unumkehrbar reduzieren. Das Grundwasser wird schneller ansteigen als bei unveränderten hydraulischen Parametern. (D.5)
- Die Werte der bodenmechanischen und hydraulischen Parameter sollten spannungsabhängig ermittelt werden. (D.5)
- Zur Interpolation von Punktinformationen in die Fläche wurden gängige Routinen verwendet (D.3, D.4). Geostatistische Verfahren wie das Kriging sind allgemein anerkannt (D.7, D.8).
- Wegen des großräumigen Senkungstrichters wird eine mindestens zwei-, besser eine dreidimensionale Modellierung empfohlen. Sollen alle Besonderheiten berücksichtigt werden (Konsolidierung in ungesättigte Bereiche, Änderung der Bodenpa-

parameter), wird ein vollständig gekoppelter Ansatz empfohlen, der z. B. im Programm ABAQUS umgesetzt ist. (D.5)

- Der Einsatz eines dreidimensionalen numerischen Modells (Finite-Elemente-Programm oder Finite-Differenzen-Programm) ist nur sinnvoll, wenn eine entsprechende Datengrundlage vorhanden ist (D.8) oder ein Mehrwert gegenüber anderen Methoden vorliegt (D.2).

Die Ergebnisse der Expertenbefragung finden Eingang in die Bewertung der Methoden und werden bei den Empfehlungen für weitere Untersuchungen berücksichtigt.

### 3.5 Kriterien zur Auswahl einer Methode (Bewertungsmatrix)

#### 3.5.1 Überblick

Zur Unterstützung der Auswahl einer Methode zur Bodenbewegungsprognose wurden in Rücksprache mit dem LANUV und der Facharbeitsgruppe „Flurabstandsprognose“ drei Kategorien von Beurteilungskriterien erarbeitet:

- Mindestanforderungen;
- Bewertungskriterien;
- Neutralkriterien.

Mindestanforderungen sind Anforderungen, die eine Methode mindestens erfüllen muss, um für eine Bodenbewegungsprognose im rheinischen Braunkohlenrevier grundsätzlich einsetzbar zu sein. Die Bewertung erfolgt mit ja (1) oder nein (0).

Für Bewertungskriterien werden Punkte vergeben. Eine Methode kann zwischen 0 und 2 Punkten erreichen, was z.B. einer Abstufung von schlecht–mittel–gut oder niedrig–mittel–hoch darstellt. Der Hintergrund dieses Notenschemas ist die einfache Anwendbarkeit und Transparenz. Die Note 0 ist kein Ausschlusskriterium. Die Beurteilungskriterien sind für physikalische Methoden entworfen. Markscheiderische Methoden lassen sich nur eingeschränkt anhand der Kriterien beurteilen, darum werden die markscheiderischen Methoden bei der Bewertung außen vor gelassen. Dies bedeutet jedoch nicht, dass markscheiderische Methoden grundsätzlich ungenauer sind.

Die Teilnoten der einzelnen Mindestanforderungen und Bewertungskriterien werden mit Wichtungsfaktoren multipliziert und für jede Methode zu einer Gesamtnote aufsummiert. Mit den Wichtungsfaktoren wird der unterschiedlichen Relevanz der einzelnen Kriterien Rechnung getragen.

Aus den Gesamtnoten wird eine Rangfolge der Methoden gebildet. Die Gesamtnoten und die Rangfolge dienen als Diskussionsgrundlage für die Auswahl einer Methode.

**Neutralkriterien** dienen lediglich zur Information und werden mit „ja“ oder „nein“ bzw. inhaltlichen Angaben beantwortet. Da für die Neutralkriterien jedoch keine Wertung hinsichtlich Genauigkeit oder Anwendbarkeit der Methode vorhanden oder bekannt ist, fließen die Angaben nicht in die Gesamtbewertung ein.

#### 3.5.2 Mindestanforderungen und Bewertungskriterien

In Tabelle 3.1 sind die Mindestanforderungen und Bewertungskriterien aufgeführt. In der Rubrik „Aussagegenauigkeit / Prozesse und Geologie“ kann, mit Ausnahme des Kriteriums „Instationäre Kalibrierung nachgewiesen“ jeweils maximal 1 Punkt (ja) erreicht werden. Beim Kriterium „Instationäre Kalibrierung nachgewiesen“ werden 2 Punkte für einen komplexen Fall, 1 Punkt für einen einfachen Fall und 0 Punkte für „nein“ vergeben. Ne-

ben vier Bewertungskriterien sind in dieser Rubrik auch die einzigen drei Mindestanforderungen enthalten:

- **Mehrschichtfälle möglich (Mindestanforderung):** Der geologische Schichtenaufbau im Rheinischen Braunkohlenrevier erfordert, dass Mehrschichtsysteme modelliert werden können.
- **Zeitabhängige Verformung durch Konsolidierung (Mindestanforderung):** Die im Rheinischen Braunkohlenrevier vorhandenen mächtigen Schichten bindigen Materials erfordern, dass die Verformung zeitabhängig modelliert werden muss. Die Konsolidierung ist ein dominierender Prozess, so dass ein stationärer Ansatz nicht ausreichen wird. Daher soll dieser Prozess mindestens über einen Ansatz nach Terzaghi oder Darcy berücksichtigt werden.
- **Belastung, Entlastung, Wiederbelastung (Mindestanforderung):** Bei dem im Rheinischen Braunkohlenrevier vorhandenen Material sind plastische Verformungsanteile zu erwarten. Darum müssen die Methoden Belastung, Entlastung und Wiederbelastung mit ihrem bodenmechanischen Kompressionsmodell abdecken können.
- **Konsolidierung oberhalb des phreatischen Grundwasserspiegels:** Die Tagebausümpfung bringt es mit sich, dass die grundwasserführenden Schichten bereichsweise vollständig entwässert werden. Das bedeutet zum Einen, dass die Grundwasserstauer in die ungesättigte Zone entwässern, also oberhalb des phreatischen Grundwasserspiegels liegen, und zum Anderen, dass der Grundwasserstand unterhalb der Basis einer Schicht liegen kann. Es ist vorteilhaft, wenn die Kompressionsmodelle hiermit bei der Berechnung der Spannungen im Zusammenhang mit Grundwasserstandsänderungen umgehen können. Aus diesem Grund wurde dieses Kriterium mit einem Wichtungsfaktor von 2 beaufschlagt.
- **Zeitlich veränderliche mechanische Bodenparameter:** Die Bodenparameter ändern sich durch die Kompression über die Zeit. Wegen der langen Simulationszeiträume ist es vorteilhaft, wenn dies im Modell berücksichtigt werden kann.
- **Hebungen bereits modelliert?** Sind Hebungen bereits in anderen Fällen berechnet worden, zeigt dies, dass eine Methode in der Lage ist, neben Setzungen auch Hebungen zu modellieren. Die Berechnung von Hebungen ist ein Schwerpunkt für die vorliegende Fragestellung, daher wird für dieses Kriterium ein Wichtungsfaktor von 3 angesetzt.
- **Instationäre Kalibrierungsqualität nachgewiesen:** Es ist vorteilhaft, wenn eine Methode bereits für einen instationären Anwendungsfall angewendet worden ist. Es sollte dokumentiert sein, dass die Methode nach Kalibrierung eines entsprechenden Modells die beobachteten Verhältnisse ausreichend genau wiedergibt. Dadurch wird gezeigt, dass die Methode grundsätzlich in der Lage ist, instationäre Bodenbewegungsprozesse physikalisch plausibel wiederzugeben. Ein Wichtungsfaktor von 2 trägt der Bedeutung dieses Bewertungskriteriums Rechnung.

Für die Rubrik „Umsetzbarkeit im Anwendungsfall "Rheinisches Braunkohlenrevier“ ist die Benotung wie folgt. Alle Kriterien sind mit dem Faktor 1 gewichtet.

- **Anwendbarkeit im Rheinischen Revier:** 2 Punkte werden vergeben, wenn diese bereits nachgewiesen ist, einen Punkt erhält eine Methode, für die die Anwendbarkeit beurteilt werden kann. Null Punkte werden vergeben, wenn die Anwendbarkeit nicht beurteilt werden kann, zum Beispiel weil die Methode noch in Form von Programmcode umgesetzt werden muss.
- **Integration in LANUV-Grundwassermodell (FeFlow) möglich?** Zwei Punkte erhält eine Methode, wenn ein FEFLOW-IFM-Modul zur Übertragung von Zeitreihen oder direkten Berechnung vorhanden ist, einen Punkt, wenn die Programmierung eines solchen IFM-Modul möglich ist. Wenn ein neues Grundwassermodell erforderlich ist oder der Auf-

wand einer Integration im Projektrahmen unmöglich ist, erhält die Methode für dieses Kriterium null Punkte.

- **Modellkomplexität / Aufwand der Parameterschätzung (Verfügbarkeit und Anzahl erforderlicher Parameter):** Zwei Punkte gibt es für eine niedrige Modellkomplexität, das heißt, es sind wenig Parameter erforderlich, ein Punkt für einen mittleren Komplexitätsgrad und null Punkte für eine hohe Modellkomplexität, das heißt, wenn viele Parameter erforderlich sind.

Tabelle 3.3 Mindestanforderungen (M\*) und Bewertungskriterien (B\*) zur Beurteilung von Methoden zur Prognose von Bodenbewegungen

Bewertungsmatrix für Methoden zur Prognose von Bodenbewegungen - <b>Mindestanforderungen und Bewertungskriterien</b>	Kriterium	Faktor	Maximale Punktzahl
Aussagegenauigkeit / Prozesse und Geologie			
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
Umsetzbarkeit im Anwendungsfall "Rheinisches Braunkohlenrevier"			
Anwendbarkeit im Rheinischen Revier	B*	1	2
Integration in LANUV-Grundwassermodell (FeFlow) möglich?	B*	1	2
Modellkomplexität / Aufwand der Parameterschätzung (Verfügbarkeit und Anzahl er	B*	1	2
Programmtechnische Aspekte			
Vertikale Auflösung für Konsolidierung (Grundwasserhydraulik)	B*	0.5	2
Rechenzeitbedarf	B*	0.5	2
Entwicklungsstadium	B*	0.5	2
Verfügbarkeit	B*	0.5	2

Programmtechnische Aspekte werden wie folgt bewertet und mit einem Wichtungsfaktor von 0.5 beaufschlagt:

- **Vertikale Auflösung für Konsolidierung:** Zwei Punkte wurden für eine hohe vertikale Auflösung oder für ein analytisches Verfahren vergeben, bei dem keine Diskretisierung nötig ist. Methoden, bei denen die Konsolidierung hoch aufgelöst werden kann, erhalten einen Punkt und keine Punkte erhalten Methoden mit niedriger Auflösung, zum Beispiel wenn die vertikale Auflösung für die Konsolidierung durch das Grundwassermodell vorgegeben ist (z. B. Geringleiter mit 3 Schichten diskretisiert). Bei diesem Bewertungskriterium geht es um den hydraulischen Anteil der Konsolidierung, das heißt, wie hoch die vertikale Verteilung des Grundwasserstands aufgelöst ist.
- **Rechenzeitbedarf:** Zwei Punkte wurden für niedrigen Rechenzeitbedarf vergeben, ein Punkt für einen mittleren und null Punkte für einen hohen Rechenzeitbedarf.
- **Entwicklungsstadium (Reifegrad der Software):** Zwei Punkte erhalten Methoden, die direkt einsetzbar sind, einen Punkt gibt es, wenn noch Weiterentwicklungen in geringem Umfang notwendig sind und keine Punkte, wenn eine Neuentwicklung notwendig ist.
- **Verfügbarkeit:** Produkte, die als Open Source oder Freeware bereitgestellt werden, erhalten zwei Punkte, Methoden, die mit kommerzieller Lizenz eingesetzt werden

können, erhalten einen Punkt und keine Punkte gibt es für Methoden, die im Rahmen einer Ingenieurdienstleistung oder Kooperationsvereinbarung verwendet werden können.

### 3.5.3 Neutralkriterien

Die Neutralkriterien sind in Tabelle 3.4 aufgelistet. Wie bereits erläutert, wird dieser Kriterienkatalog lediglich zur Information mit ja oder nein ausgefüllt, wenn das Kriterium anwendbar ist. Die Stoffgesetze sind zum Beispiel nur in numerische Finite-Elemente-Methoden implementiert, die Kategorie „Bodenmodelle“ berücksichtigt die bodenmechanischen Kompressionsmodelle.

Tabelle 3.4 Neutralkriterien (N\*) zur Beurteilung von Methoden zur Prognose von Bodenbewegungen

Auflistung neutraler Charakteristika der Methoden zur Prognose von Bodenbewegungen - Neutralkriterien	Kriterium
Bodenmodelle	
Elastisches Dehnungsverhalten nach Hooke	N*
logarithmisches Stoffgesetz nach Terzaghi	N*
Bjerrum	N*
Buisman-Koppejan	N*
abc-Isotachen	N*
Stoffgesetz	
linear-elastisch	N*
Mohr-Coulomb	N*
Softsoil-Creep	N*
Cam-Clay	N*
Programmtechnische Aspekte	
Dimensionalität	N*
Bedienungsweise	N*
Kopplung mit Grundwassermodell integriert	N*
Ermittlung von Parametersensitivitäten integriert	N*
Automatische Kalibrierung integriert	N*
Leistungen	
Qualitätssicherung für Code (automatische Testbank, regelmäßige Releases)	N*
Wissenschaftliche Qualitätssicherung	N*
Support- und Wartungsvertrag möglich	N*

## 4 Bodenmechanische und hydraulische Gesetzmäßigkeiten

### 4.1 Einführung

Zur Einschätzung der Folgen von Grundwasserstandsänderungen sind bodenmechanische Modelle zur Prognose der Bodenbewegungen erforderlich. Grundlage der bodenmechanischen Modelle sind Gesetzmäßigkeiten zum Materialverhalten des Bodens (Rheologie). Ein wesentlicher Prozess ist zudem die Verdrängung des Porenwassers in verschiedenen Bodenschichten. Diese läuft insbesondere in hydraulisch geringdurchlässigen, bindigen Bodenschichten verzögert ab (Konsolidierung). Des Weiteren hat die räumliche Beschreibung des Modells, d.h. ob ein ein- oder mehrdimensionales Modell angewendet wird, einen wichtigen Einfluss auf die Modellierung. Die Modellunterschiede können in drei Kategorien zusammengefasst werden:

- Das bodenmechanische Modell;
- Das Grundwassermodell und dessen Verbindung mit dem bodenmechanischen Modell;
- Die räumliche Beschreibung (1D, 2D, 3D).

Durch die Wahl des bodenmechanischen Modells wird festgelegt, welches mechanische Verhalten in Betracht gezogen wird (z.B. elastisch, plastisch, Kriechen, etc.), und wie anspruchsvoll und detailliert das Verhalten beschrieben wird (z.B. nicht-linear). Durch die Wahl des Grundwassermodells und dessen Kopplung wird festgelegt, wie gut die räumliche Grundwasserströmung einbezogen wird, und wie gut die vertikale Heterogenität der Bodenschichten in Betracht gezogen werden kann.

In diesem Kapitel werden, als Grundlage für die spätere Analyse der Fallbeispiele, die Räumlichkeit des Modells (Abschnitt 4.5), bodenmechanische Kompressionsmodelle (Abschnitt 4.6) sowie verschiedene Modelle zur Beschreibung der Konsolidierung (Abschnitt 4.7) erläutert. Zuvor werden mögliche Ursachen von Bodenbewegungen beschrieben (Abschnitt 4.2) und gemeinsame Ausgangspunkte der Bodenbewegungsprozesse definiert (Abschnitte 4.3 und 4.4).

### 4.2 Ursachen von Bodenbewegungen

In diesem Abschnitt werden zunächst die relevanten Phänomene, die Bodenbewegungen verursachen können, aufgelistet und erläutert. Deren mathematische Beschreibung bzw. Berücksichtigung in den Modellen und Fallbeispielen folgt in Abschnitten 4.4 und 4.6.

#### *Auflast*

Unter Auflast versteht man den Druck auf eine Gesteinsschicht aus darüber liegenden Gesteinsschichten oder Bauwerken. Infolge der Auflast verformt sich die Gesteinsschicht.

#### *Entwässerung und Grundwasserwiederanstieg*

Lockergestein unterhalb des Grundwasserspiegels steht unter Auftrieb, sodass nur ein Teil der Spannungen vom Korngerüst aufgenommen wird, der restliche Teil vom Porenwasserdruck. Sinkt der Grundwasserspiegel, so wird die Lastaufnahme durch die Verringerung des Porenwasserdrucks auf das Korngerüst übertragen und es kommt zu Setzungen. Bei steigendem Grundwasserstand kommt es zu Hebungen. Im Festgestein füllt das Grundwasser Klüfte und Poren des Festgesteins, das Festgestein steht dann ebenfalls unter Auftrieb.

### *Torfmineralisierung*

Torf ist eine organische Ablagerung und hat einen hohen Anteil nicht oder nur unvollständig zersetzter abgestorbener Pflanzenteile. In wassergesättigten sauerstoffarmen Moorböden werden diese Pflanzenteile in ihrem unzersetzten oder teilweise zersetzten Zustand dauerhaft konserviert. Bei Sauerstoffzufuhr (zum Beispiel infolge Entwässerung) werden Abbauvorgänge in Gang gesetzt. Diesen Prozess nennt man Torfmineralisierung. Torfmineralisierung geht mit einer starken Abnahme des Volumens und damit mit Setzungen einher und ist nicht reversibel.

### *Makroporen*

Makroporen sind größere (Durchmesser > 50 µm), mit Luft oder Wasser gefüllte, Hohlräume im Boden, die vor allem in äolischen Sedimenten wie Lößböden oder in locker gelagerten vulkanischen Aschen auftreten. Diese sind in der Regel sehr willkürlich und inhomogen im Untergrund vorhanden und ihre Lage kann nur durch statistische Bewertungen eingeschätzt werden. Makroporen können durch Veränderungen des Grundwasserstandes infolge des Wegfalls der Kapillarspannungen kollabieren (Grimmer 2006). Je nach Größe kann sich die lokale Sackung bis an die Geländeoberfläche auswirken.

### *Materialentnahme (Bergsenkung)*

Bei den im Zusammenhang mit Steinkohlebergbau in Deutschland bis heute noch auftretenden Bergsenkungen handelt es sich um Setzungen, die primär durch Materialentnahme aus Untertagebergbau hervorgerufen werden. Die Bergsenkungen folgen den Stollen und Abbauen des Bergwerks. Über eingestürzten Grubenbauen entsteht eine zerrüttete Schicht (Fenk, 2008).

## 4.3 Spannungen und Dehnungen im Boden

Vertikale Bodenbewegungen werden verursacht durch vertikale Dehnungen (Stauchung oder Streckung) des Materials im Untergrund. Die vertikale Dehnung  $\varepsilon_z$  ist das Verhältnis zwischen der Veränderung der Schichtmächtigkeit  $\Delta H$  zur ursprünglichen Schichtmächtigkeit  $H_0$ ,

$$\varepsilon_z = \frac{\Delta H}{H_0}. \quad (4.1)$$

Die Dehnungen stehen im direkten Zusammenhang zu den effektiven Spannungen im Boden und können durch dieses Verhältnis quantifiziert werden. Dieses Verhältnis wird durch das bodenmechanische Modell, oder auch rheologisches Modell oder Stoffgesetz, beschrieben.

Boden setzt sich zusammen aus dem Korngerüst und den dazwischenliegenden Poren. Man unterscheidet zwischen bindigen und nicht bindigen Böden. Nichtbindiger Boden hat einen geringen Anteil an Feinkorn; Sande und Kiese sind nichtbindige Böden. Bindige Böden haben einen hohen Anteil an Ton und Schluff. Unter Druckbelastung verformen sich bindige Böden über einen längeren Zeitraum relativ stark, Setzungen nehmen vergleichsweise lange Zeit in Anspruch.

Die Poren können vollständig mit Wasser gefüllt sein (gesättigter Boden), teilweise gefüllt sein (teilgesättigter Boden) oder mit Luft gefüllt sein (trockener Boden). Für die Bestimmung der Wichte des Bodens muss daher sein Wassergehalt berücksichtigt werden. Allgemein beschreibt die Wichte eine volumenspezifische Gewichtskraft, also das Produkt

aus der Dichte und der Erdbeschleunigung. Die Wichte des Bodens kann berechnet werden durch:

$$\gamma = n S_r g \rho_w + (1-n) g \rho_s, \quad (4.2)$$

mit

$\gamma$	Wichte des Bodens [kN/m <sup>3</sup> ]
$n$	Porenanteil [-]: ca. 0,25–0,4 für Sand; ca. 0,6–0,8 für Ton; ca. 0,6–0,9 für Torf (z .B. Verruijt 2012)
$S_r$	Wassergehalt des Bodens [-]: ca. 1,0 unterhalb des Grundwasserspiegels
$g$	Erdbeschleunigung [m/s <sup>2</sup> ]: 9,81
$\rho_w$	Dichte des Wassers [kg/m <sup>3</sup> ]: ca. 1000
$\rho_s$	Dichte der Bodenkörner des Bodens [kg/m <sup>3</sup> ]: ca. 2650 kg/m <sup>3</sup> für Quarzsand

Als Alternative zum Porenanteil  $n$  [-] kann die Porenzahl  $e$  [-] benützt werden. Beide stehen im direkten Zusammenhang durch:

$$e = \frac{n}{1-n}, \quad \text{oder,} \quad n = \frac{e}{1+e}. \quad (4.3)$$

Für einen vollständig gesättigten Boden ( $S_r = 1,0$ ) wird aus Gleichung (4.2) die Wichte abgeleitet als:

$$\gamma_{sat} = n \gamma_w + (1-n) \gamma_s, \quad (4.4)$$

mit

$\gamma_{sat}$	Feuchtwichte des Bodens [kN/m <sup>3</sup> ]
$\gamma_w$	= $\rho_w g$ , Wichte des Wassers [kN/m <sup>3</sup> ]: ca. 10
$\gamma_s$	= $\rho_s g$ , Wichte des Korngerüsts des Bodens [kN/m <sup>3</sup> ]: ca. 26,5 für Quarzsand

Für einen vollständig trockenen Boden ( $S_r = 0,0$ ) wird aus Gleichung (4.2) die Trockenwichte abgeleitet als:

$$\gamma_d = (1-n) \gamma_s. \quad (4.5)$$

Die Verteilung von totalen Spannungen im Boden  $\sigma$  [kPa], effektiven Spannungen im Korngerüst  $\sigma'$  [kPa] und Porenwasserdruck  $p$  [kPa] kann ausgedrückt werden als:

$$\sigma' = \sigma - p, \quad (4.6)$$

nach Terzaghi (1925). Diese Gleichung spiegelt wider, dass Veränderungen der effektiven Spannung sowohl durch eine Veränderung der totalen Spannung als auch durch Veränderungen im Porenwasserdruck verursacht werden können.

Daher gilt, dass unterhalb des Grundwasserspiegels die Spannung, die auf das Korngerüst ausgeübt wird, durch den Auftrieb des Wassers verringert wird. Für einen stationären Zustand, bei dem keine vertikale Grundwasserströmung auftritt, kann die sogenannte vertikale effektive Spannung im Korngerüst  $\sigma'_z$  [kPa] in einer bestimmten Tiefe  $z$  [m] (mit  $z > d_{gw}$ , also unterhalb des Grundwasserspiegels) errechnet werden durch:

$$\begin{aligned}\sigma'_z(z) &= \gamma_d d_{gw} + \gamma_{sat} (z - d_{gw}) - \gamma_w (z - d_{gw}) = \\ &= (1-n)\gamma_s d_{gw} + [n\gamma_w + (1-n)\gamma_s](z - d_{gw}) - \gamma_w (z - d_{gw}) =, \quad (4.7) \\ &= (1-n)[(\gamma_s - \gamma_w)z + \gamma_w d_{gw}],\end{aligned}$$

mit

$d_{gw}$  Abstand zwischen Geländeoberfläche und Grundwasserspiegel [m]

In Mehrschichtfällen müssen die verschiedenen Bodenschichten in Gleichung (4.7) berücksichtigt werden. Insbesondere gilt dies für eine mit der Tiefe variierende Porosität und somit Feuchtwichte  $\gamma_{sat}$  der Bodenschichten. Hierbei ist zu beachten, dass sich eine Grundwasserstandsänderung in ungespannten Grundwasserleitern auf die in tieferen Bodenschichten anstehenden effektiven Spannungen in Form einer veränderten Auflast auswirkt, wie unten näher erläutert. Des Weiteren können Änderungen der effektiven Spannungen auch durch zusätzlich aufgebrachte Auflasten an der Geländeoberfläche eintreten, die im hier betrachteten Fall jedoch nicht relevant sind.

Im Lockergestein haben zunehmende effektive Spannungen üblicherweise Setzungen zur Folge. Eine Abnahme von effektiven Spannungen kann Hebungen verursachen, die abhängig von der Reversibilität der zuvor aufgetretenen Setzungen sind. In bindigen und organischen Böden, wie zum Beispiel Tonen und Torfen, sind die irreversiblen Setzungen stärker ausgeprägt, als in Sanden oder Festgesteinen.

Für die Berechnung der totalen und effektiven Spannungen im Boden als Folge von Grundwasserstandsänderungen muss zwischen gespannten und ungespannten Grundwasserhältnissen unterschieden werden.

#### *Ungespannte Grundwasserhältnisse*

Bei Veränderungen des Grundwasserstands in ungespannten Grundwasserhältnissen (wie im obersten Leiterstockwerk und bei der Entwässerung tieferer Leiter) wird der Porenraum tatsächlich entwässert bzw. mit Wasser gefüllt. Durch das zusätzliche Gewicht des Wassers in den Porenräumen ist in den gesättigten Bodenschichten unterhalb des Grundwasserspiegels die höhere Feuchtwichte  $\gamma_{sat}$  anzusetzen, in trockenen Schichten oberhalb des Grundwasserspiegels die geringere Trockenwichte  $\gamma_d$ . Die resultierenden totalen Spannungen unterhalb des Grundwasserspiegels sind folglich größer als oberhalb. Da aber unterhalb des Grundwasserspiegels auch der Porenwasserdruck in Form von Auftrieb wirksam ist, sind die resultierenden effektiven Spannungen unterhalb des Grundwasserspiegels geringer als oberhalb. Dieser Zusammenhang ist in Abbildung 4.1a illustriert. Aus einer Verschiebung des Grundwasserstandes resultiert somit auch eine Verschiebung der Grenze, ab der ein anderer Wert für die Wichte angenommen werden muss. Die Verteilung der totalen und effektiven Spannungen verändert sich wie folgt:

- Bei einer Grundwasserabsenkung nehmen die totalen Spannungen unterhalb des ursprünglichen Grundwasserstandes durch das fehlende Gewicht des entzogenen

Porenwassers ab. Durch die gleichzeitige Abnahme des Porenwasserdrucks nehmen die effektiven Spannungen unterhalb des ursprünglichen Grundwasserstands hingegen zu (Abbildung 4.1b,c). Es kommt somit zu Bodensetzungen.

- Bei einem Grundwasseranstieg nimmt die totale Spannung durch das zusätzliche Gewicht des Wassers unterhalb des neuen Grundwasserstandes zu. Durch den ebenfalls steigenden Porenwasserdruck nehmen die effektiven Spannungen unterhalb des neuen Grundwasserstandes hingegen ab (Abbildung 4.1d,e). Es kommt somit zu Bodenhebungen.

Dies beschreibt jeweils den stationären Endzustand nach Ablauf etwaiger Grundwasserströmungen und Konsolidierungsprozesse. Der Einfluss des Strömungsdrucks sowie der Konsolidierung auf die effektiven Spannungen wird in Abschnitt 4.4.1 erläutert.

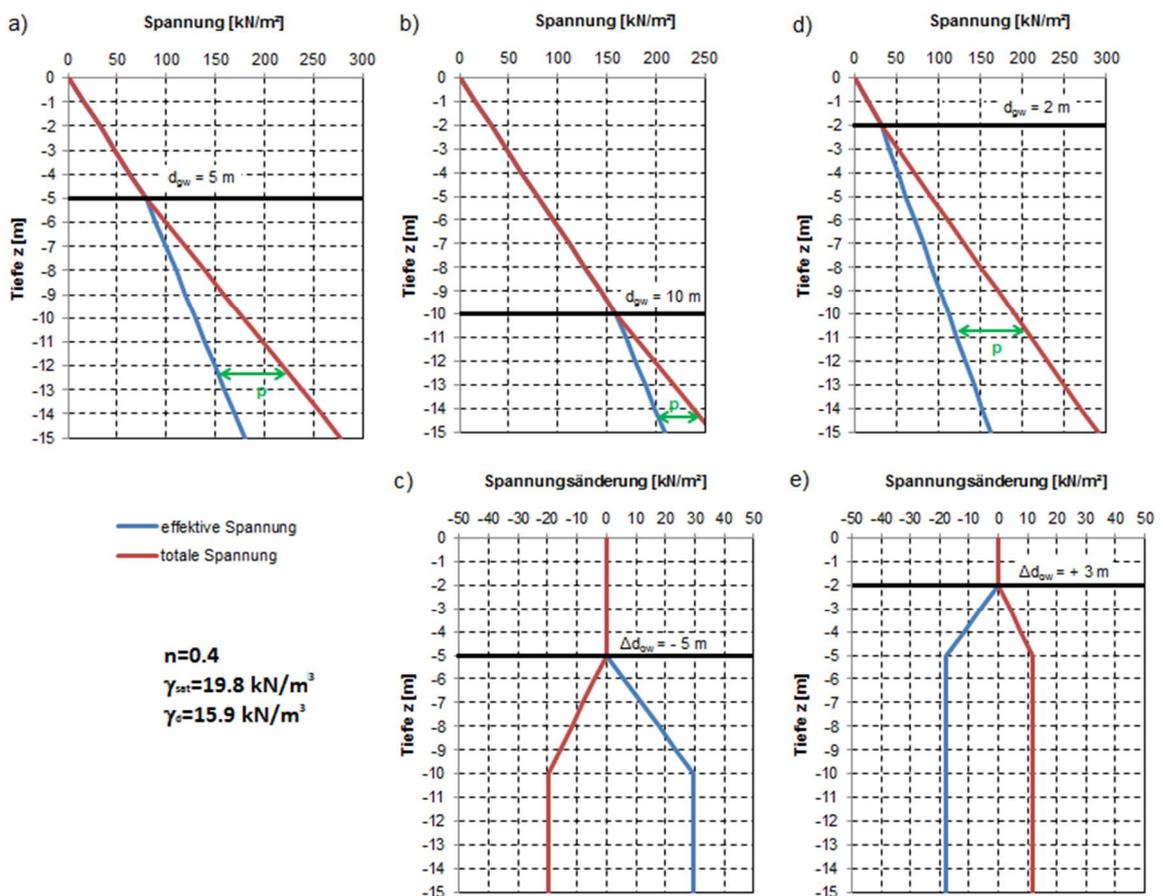


Abbildung 4.1 Totale und effektive Spannungen und Porenwasserdruck in ungespannten Grundwasserverhältnissen nach abgeschlossener Konsolidierung. a) Ausgangslage; b, c) Spannungsverteilung und -veränderung im Vergleich zur Ausgangslage nach Grundwasserabsenkung; d, e) Spannungsverteilung und -veränderung im Vergleich zur Ausgangslage nach Grundwasseranstieg.

### Gespannte Grundwasserverhältnisse

Bei Änderungen der Grundwasserdruckhöhe in gespannten Grundwasserleitern (Druckentspannung) werden die Porenräume nicht entwässert oder befüllt, solange der Grundwasserleiter gespannt bleibt. Da also über die gesamte Mächtigkeit der Grundwasserleiters die Feuchtwichte  $\gamma_{sat}$  anzusetzen ist und nicht die Trockenwichte  $\gamma_d$ , bleibt auch die Verteilung der totalen Spannungen unverändert. Durch Änderungen der Verteilung des Porenwasserdruckes (Absenkung der Grundwasserdruckhöhe durch Sumpfung) und

damit der Auftriebskraft entsteht so lediglich eine Auswirkung auf die effektiven Spannungen (Abbildung 4.2 c,e), sodass auch hier Setzungen und Hebungen resultieren können. Wird ein gespannter Grundwasserleiter so weit entwässert, dass der Grundwasserstand unter die Untergrenze des oberen begrenzenden Geringleiters abfällt, so sind ab diesem Zeitpunkt die Gesetzmäßigkeiten für ungespannte Grundwasserleiter gültig.

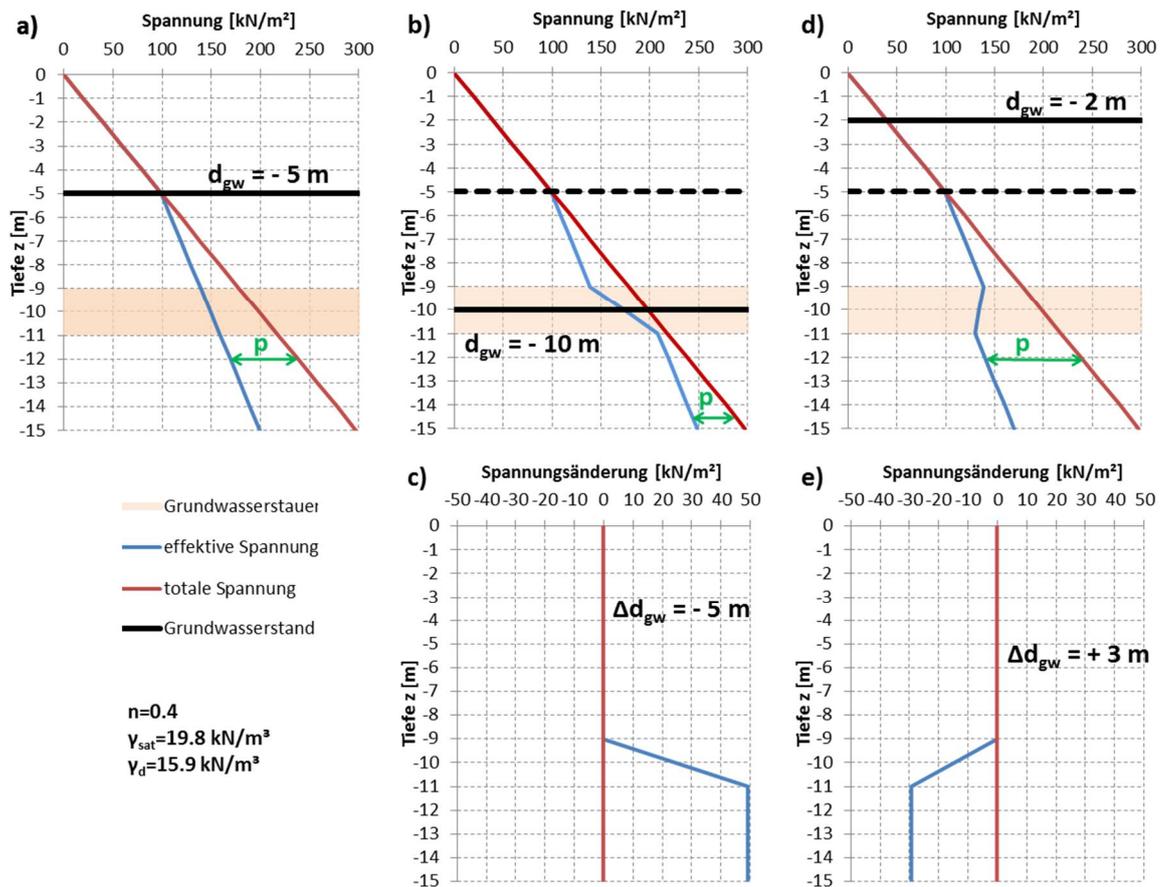


Abbildung 4.2 Totale und effektive Spannungen und Porenwasserdruck in gespannten Grundwasserhältnissen. a) Ausgangslage; b, c) Spannungsverteilung und -veränderung im Vergleich zur Ausgangslage nach Grundwasserabsenkung; d, e) Spannungsverteilung und -veränderung im Vergleich zur Ausgangslage nach Grundwasseranstieg.

#### 4.4 Prozesse von Bodenbewegungen

Die bodenmechanischen und grundwasserhydraulischen Modelle, die zur Berechnung von Bodensenkungen und -hebungen zum Einsatz kommen, haben gemeinsame Ausgangspunkte, die in diesem Abschnitt beschrieben sind.

##### 4.4.1 Konsolidierung

Der Prozess der Konsolidierung kommt zum Tragen, wenn Änderungen des Porenwasserdrucks durch Grundwasserstandsänderungen nicht unmittelbar erfolgen können. Dies ist insbesondere in bindigen Lockergesteinsschichten der Fall, da hier die Wasserdurchlässigkeit oftmals sehr gering ist und das überschüssige Porenwasser nur zeitverzögert austreten kann. Eine zusätzliche Spannung wird so zunächst vollständig durch den Porenwasserdruck aufgenommen, sodass die effektiven Spannungen im Korngerüst der bindigen Schicht anfänglich unverändert bleiben. Mit fortschreitender Auspressung des Porenwassers aus der bindigen Schicht in die über- und unterlagernden Grundwasserlei-

tenden Schichten wird die Auflast zeitverzögert sukzessive auf das Korngerüst (effektive Spannungen) übertragen, siehe Abbildung 4.3. Setzungen erfolgen dann ebenfalls zeitlich verzögert.

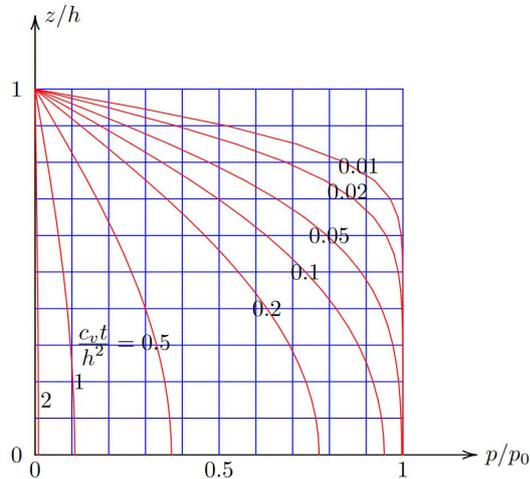


Abbildung 4.3 Zeitlicher Verlauf des Konsolidierungsprozesses bei Entwässerung der Bodenschicht nach oben. Normalisierte Tiefe  $z/h$  aufgetragen gegen den normalisierten Porenwasserdruck  $p/p_0$ . (Verruijt 2012). Konsolidierungskoeffizient  $c_v$ , vgl. Gleichung (4.17).

In ähnlicher Weise entsteht in bindigen Bodenschichten bei Verringerung der Auflast (z.B. Grundwasserwiederanstieg) in bindigen Schichten ein Porenwasserunterdruck. Hier tritt das Porenwasser nur zeitlich verzögert wieder in die bindigen Schichten ein, die Entlastung wird zeitlich verzögert vom Korngerüst (effektive Spannungen) auf den sukzessive ansteigenden Porenwasserdruck übertragen. Hebungen erfolgen ebenso zeitverzögert. Es gilt jedoch nur der elastische Anteil der erfolgten Setzung als reversibel. Die Anteile irreversibler (plastischer) Setzungen sind dabei abhängig von den Bodeneigenschaften und Referenzwerte können nur nach Ausführung von Laborversuchen gegeben werden.

Der Verlauf des Konsolidierungsprozesses verzögert also das Auftreten von Setzungen und Hebungen nach Grundwasserstandsänderungen. Die Verzögerung hängt ab von der Wasserdurchlässigkeit und Mächtigkeit der bindigen Lockergesteinsschichten. Bei nichtbindigen Sanden und Kiesen kann wegen der höheren Durchlässigkeit oft davon ausgegangen werden, dass das Porenwasser schnell entweichen bzw. zuströmen kann.

Bei einem normal konsolidierten Boden ist die maximale Spannung, die der Boden jemals erfahren hat, gleich der aktuellen Spannung. Ein überkonsolidierter Boden hat in der Vergangenheit größere Spannungen als aktuell vorhanden erfahren, zum Beispiel durch die Auflast aus abgeschmolzenem Eis oder ein Gebäude, das abgetragen wurde. Der Over Consolidation Ratio OCR ist ein Maß für die Überkonsolidierung. Es ist das Verhältnis zwischen der maximalen Vertikalspannung in der Vergangenheit und der aktuellen Vertikalspannung. Bei konsolidierten Böden ist der OCR gleich 1.

#### 4.4.2 Kriechen

Mit Kriechen wird in der Mechanik eine langsame plastische Verformung unter gleichbleibender Last bezeichnet (Kolymbas 2011). Als plastische Verformung ist Kriechen nicht reversibel, d. h. bei Rücknahme der Belastung bleibt der plastische Verformungsanteil bestehen. Der Prozess des Kriechens wird auch sekundäre Konsolidierung genannt (Kolymbas 2011). Irreführend sind die Bezeichnung „sekundäre Setzung“ oder „sekundäre Konsolidierung“ deshalb, weil diese Bezeichnungen nahelegen, dass sie erst nach

Abschluss des entsprechenden primären Prozesses einsetzen. Deshalb soll im Folgenden der Begriff „Kriechen“ verwendet werden. Kriechen erfolgt viel langsamer als die durch das Auspressen des Porenwassers bedingte (primäre) Konsolidierung (Abschnitt 4.4.1). In der Praxis lassen sich Kriechen und Konsolidierung nicht leicht voneinander trennen. Beide Prozesse laufen parallel ab. Ein vollständig auskonsolidierten Boden verformt sich infolge Kriechens weiter, obwohl der Prozess der Konsolidierung schon zum Erliegen gekommen ist. Die Setzung infolge Kriechens verläuft in etwa logarithmisch über die Zeit wie in Abbildung 4.4 wiedergegeben (Gesetz von Buisman, Kolymbas 2011) und erstreckt sich über Jahrhunderte, deshalb heißt sie auch Sekularsetzung (Kolymbas 2011).

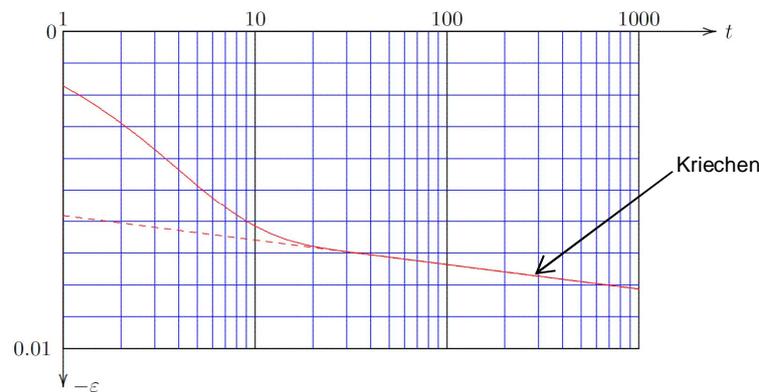


Abbildung 4.4 Verlauf des Kriechens (Verruijt 2012) logarithmisch in der Zeit  $t$ .

Besonders Tone und Torfe neigen zur Kriechverformung: mit zunehmendem geologischem Alter nimmt der Porengehalt auch bei gleichbleibenden Spannungen ab (Giese 2010). Diese Abnahme des Porengehalts durch Kriechen wirkt im Ergebnis wie eine Erstbelastung. Zur Frage, wie ein starker Grundwasserwiederanstieg und die damit verbundenen Hebungen sich auf den Prozess des Kriechens auswirken, wurde keine akademischen Literatur gefunden.

#### 4.4.3 Prozesse bei Flutung von Untertagebergwerken im Zusammenhang mit Bergsenkungen

Ein mit der Flutung eines Bergwerks steigender Grundwasserspiegel kann zunächst Bergsenkungsprozesse erleichtern oder auslösen, da sich die Kohäsion des Materials mit eindringendem Wasser ändert (Fenk & Tzscharschuch 2007).

Wird ein stillgelegtes Untertagebergwerk geflutet, kommt es in Folge dessen im Festgestein in der Regel nur zu geringen Hebungen, da der Porenanteil des Festgesteins klein und die Wichte des Gebirgsmaterials hoch ist. Zerrüttetes Material über eingestürzten Grubenbauen (Stollen und Abbauen) kann jedoch erheblich andere Eigenschaften als das intakte Festgestein haben, so dass es im Bergsenkungsgebiet durchaus zu signifikanten Bodenbewegungen infolge von Grundwasserspiegelanstieg kommen kann (Fenk 2008).

Zunächst kann bei Grundwasseranstieg eine Sättigungssetzung der zerrütteten Gebirgszone durch Verringerung der Kohäsion eintreten (Fenk & Tzscharschuch 2007). Das zerrüttete Gebirgsmaterial kommt unter Auftrieb, was eine Hebung zur Folge hat. Die Bodenbewegungen in der zerrütteten Gebirgszone sind dann jedoch auf die unmittelbare Nähe der eingestürzten Grubenbaue beschränkt.

Oft ist das Steinkohlegebirge von einem Lockergestein (Deckgebirge) überlagert (z.B. Rosner 2011). Insbesondere im Bereich von Störungen können die Grundwasserstands-

änderungen im Steinkohlengebirge Einfluss auf das Deckgebirge haben. Die bodenmechanischen Prozesse sind dann analog zu denen des Lockergesteins.

#### 4.5 Dimensionalität

Die Wahl zwischen ein- oder mehrdimensionalen mechanischen Modellen hat maßgeblichen Einfluss auf die Modellierung und wird in diesem Abschnitt beschrieben.

Mehrdimensionale Modelle sind für geotechnische Problemstellungen, in denen laterale (horizontale) Dehnungen oder Scherbeanspruchungen eine Rolle spielen, unumgänglich. Dies ist zum Beispiel bei Böschungen oder Ausgrabungen der Fall. In mehrdimensionalen Modellen muss das Materialverhalten mit vollständigen Tensoren (2D oder 3D) für Spannungen und Dehnungen beschrieben werden. Solche Gleichungen werden jedoch zur Analyse von Bodensenkungen oder -hebungen nur selten angewendet. In den meisten Fällen ist die Stauchung oder Dehnung überwiegend vertikal, da der Boden seitlich eingeschlossen ist und horizontale Gradienten der effektiven Bodenspannungen vernachlässigbar klein sind. Von dieser Eigenschaft machen praktisch alle eindimensionalen Bodensenkungsmodelle Gebrauch und vereinfachen die Berechnungen auf vertikale Dehnungen  $\varepsilon_z$  und vertikale effektive Spannungen  $\sigma'_z$ .

Ein deutlicher Vorteil dieser auf eine Dimension reduzierten Räumlichkeit ist die Beschränkung der rechen-technischen Beanspruchung. Dadurch können diese Modelle auch in Berechnungen für große geografische Gebiete genutzt werden. Ein weiterer Vorteil ist, dass die Anzahl der benötigten Parameter verhältnismäßig beschränkt bleibt und diese Parameter mit relativ einfachen Laborversuchen ermittelt werden können.

Anzumerken ist außerdem, dass oftmals eindimensionale Dehnungsmodelle mit mehrdimensionalen Grundwassermodellen kombiniert werden. Obwohl in traditionellen bodenmechanischen Modellen die eindimensionalen Dehnungsmodelle überwiegen, werden zunehmend auch mehrdimensionale Modelle verwendet. Dies trifft vorwiegend auf Finite-Elemente-Programme zu, die im Abschnitt 4.6.7 näher erläutert werden.

#### 4.6 Bodenmechanische Kompressionsmodelle

##### 4.6.1 Einführung

Bodenmechanische Modelle beschreiben den Zusammenhang zwischen effektiver Spannung  $\sigma'$  und Dehnung  $\varepsilon$  des Korngerüsts im Boden allgemein und mit Hilfe mathematischer Formeln. Es gibt verschiedene Möglichkeiten, um diese Modelle zu klassifizieren. Gebräuchlich ist eine Einordnung, wobei zwischen Modellen mit direkter und zeitabhängiger Verformung unterschieden wird.

In Modellen mit direkter Dehnung wird die Spannungsänderung infolge mechanischer und hydraulischer Belastungen direkt in Beziehung zu den resultierenden Verformungen gesetzt. Als einfachstes Beispiel gilt das Hooke'sche Gesetz (vgl. Abschnitt 4.6.2). Diese Klasse von Modellen umfasst sowohl elastische Modelle, bei denen die Dehnungen reversibel sind, wie auch plastische Modelle, bei denen die Dehnungen irreversibel sind. Mechanische Belastungen sind Auflasten wie das Eigengewicht natürlicher oder zusätzlich aufgeschütteter Bodenschichten sowie das Gewicht von Gebäuden, Bauwerken oder anderen Auflasten bzw. Einwirkungen (z.B. Deiche, Maschinen). Hydraulische Einwirkungen sind Änderungen des Grundwasserstands, die dann zu Veränderungen der Auftriebswirkung sowie Konsolidierung oder Quellen von Lockergesteinsschichten führen können.

In Modellen mit zeitabhängiger Dehnung (englisch: secular strain) kann eine Verformung auch auftreten, ohne dass eine Belastung angebracht wird. Diese Modelle enthalten eine Gesetzmäßigkeit zur Dehnungsgeschwindigkeit, bei der die Dehnung sich zeitabhängig verändert, und das Verhalten wird auch als viskos oder Kriechen bezeichnet.

Bei Ent- und Wiederbelasten eines Bodens verändern sich seine Eigenschaften. Die relative Verformung des Bodens pro Belastungsänderung (Steigung im Spannungs-Dehnungsdiagramm; siehe Abbildung 4.5) ist dann meist geringer als bei seiner Erstbelastung. Hysteretische Bodenmodelle tragen diesem hysteretischen Verhalten Rechnung.

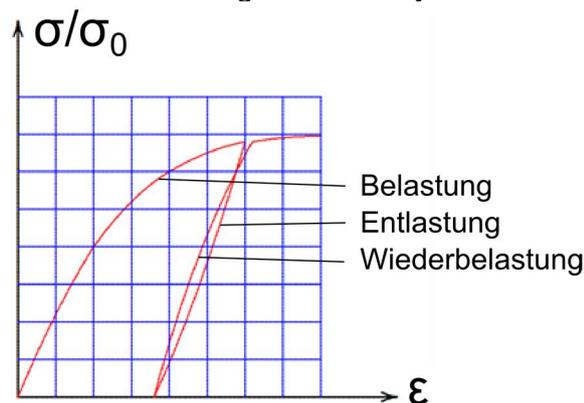


Abbildung 4.5 Hysterese im Boden (Verruijt 2012) bei Be-, Ent- und Wiederbelastung.

Weiterhin lassen sich bodenmechanische Kompressionsmodelle einteilen in eindimensionale Modelle und Stoffgesetze, die für eine dreidimensionale Formulierung der bodenmechanischen Bestimmungsgleichungen verwendet werden. Die dreidimensionalen bodenmechanischen Gleichungen basieren auf dem Kräfte- und Momentengleichgewicht und der Massenbilanz. Es handelt sich um partielle Differentialgleichungen, die in der Regel nicht analytisch gelöst werden können. Man bedient sich daher numerischer Methoden, wobei die Finite-Elemente-Methode am weitesten verbreitet ist. Hierbei wird zur Berechnung der Bodenbewegung ein Stoffgesetz wie das unten beschriebene Hooke'sche Gesetz benötigt.

Die wichtigsten Modelle, die in der Literatur beschrieben werden, sind im weiteren Verlauf dieses Abschnittes erläutert. Ein Schwerpunkt liegt auf den eindimensionalen Modellen, da diese zunächst für die räumliche Größenordnung der vorliegenden Fragestellung besser geeignet erscheinen.

#### 4.6.2 Elastisches Modell nach Hooke

Ein einfaches Stoffgesetz, das aus der Mechanik bekannt ist, ist der linear-elastische Ansatz nach Hooke:

$$\sigma = E \epsilon . \quad (4.8)$$

In dieser Gleichung steht  $E$  für den Elastizitätsmodul, und  $\sigma$  ist die (effektive) Spannung. Das Hooke-Modell ist ein Modell zur Berechnung der direkten Dehnung, es enthält keine Zeitkomponente.

#### 4.6.3 Kompressionsmodell von Terzaghi

Das Kompressionsgesetz nach Terzaghi ähnelt dem elastischen Ansatz nach Hooke aus Abschnitt 4.6.2, verwendet aber eine logarithmische Skala. Dementsprechend stellt es ebenfalls ein Modell mit direkter Dehnung dar.

Das Kompressionsgesetz nach Terzaghi (Giese 2010) in Abhängigkeit der vertikalen effektiven Spannung  $\sigma'$  ausgedrückt als

$$e = e_0 - C \ln \left( \frac{\sigma'}{\sigma'_0} \right), \quad (4.9)$$

mit der Ausgangsporenzahl  $e_0$ , der vertikalen effektiven Ausgangsspannung  $\sigma'_0$  und einem Proportionalitätsfaktor  $C$ . Der Proportionalitätsfaktor ist in der Regel unterschiedlich für Erst- und Wiederbelastungszustand. Damit kann elastoplastisches Verhalten des Bodens modelliert werden.

Um Verwechslungen zu vermeiden, sei an dieser Stelle darauf hingewiesen, dass es neben dem hier beschriebenen bodenmechanischen Kompressionsmodell nach Terzaghi auch noch die Konsolidierungstheorie nach Terzaghi gibt. Diese wird in Abschnitt 4.7.1 näher erläutert.

#### 4.6.4 Buisman–Koppejan–Modell

Dem Buisman–Koppejan–Modell steht das Überlagerungsprinzip zu Grunde. Es wird angenommen, dass die Dehnungen bei einer bestimmten Belastungserhöhung zu einem Zeitpunkt gleich der Dehnungen bei gleichwertiger Belastungserhöhung zu einem anderen Zeitpunkt sind, und aufaddiert werden können. Durch Überlagerung erhält man den Setzungsverlauf nach einer zweiten Belastungserhöhung durch die Extrapolation der Setzungslinie die gilt, wenn erste und zweite Belastung gleichzeitig angebracht worden wären wie in Abbildung 4.6a veranschaulicht. Mit anderen Worten legt diese Superposition den Setzungsverlauf für jede Belastungserhöhung fest, ohne den Einfluss vorhergehender Belastungsschritte in Betracht zu ziehen und daher unabhängig von einer Anfangsspannung  $\sigma'_0$ . Das Buisman–Koppejan–Modell gehört damit zur Gruppe der Modelle mit zeitabhängiger Dehnung (secular strain model; Abbildung 4.6).

Die Dehnung wird mit dem Buisman–Koppejan–Modell berechnet durch:

$$\varepsilon_v = \left[ \frac{1}{C'_p} + \frac{1}{C'_s} \log \left( \frac{t}{t_d} \right) \right] \ln \left( \frac{\sigma'_v + \Delta\sigma'_v}{\sigma'_v} \right), \quad (4.10)$$

mit

$\varepsilon_v$  lineare Dehnung [-]

$C'_p, C'_s$  primärer und sekundärer Kompressionsbeiwert [-], oberhalb der Überlagerungsspannung

$t$  Zeit nach Belastungserhöhung [Tage]

$t_d$  Referenzzeit [1 Tag]

$\sigma'_v$  vertikale effektive Spannung [kPa]

$\Delta\sigma'_v$  Änderung der vertikalen effektiven Spannung [kPa]

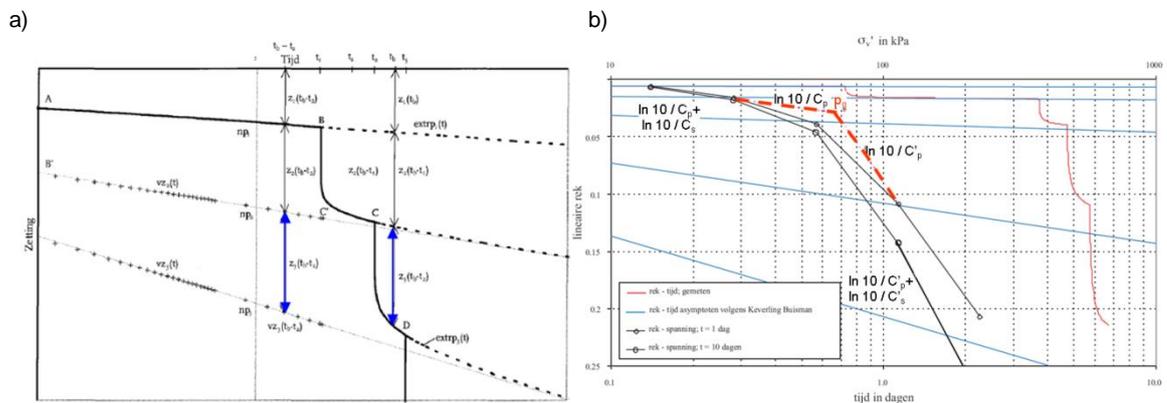


Abbildung 4.6 Buisman–Koppejan–Modell. a) Dehnung über die Zeit; Überlagerungsprinzip bei zwei Belastungserhöhungen. Der verschobene blaue Pfeil veranschaulicht, dass die Setzung durch den zweiten Belastungsschritt aus der Extrapolation der Überlagerung des ersten und zweiten Schrittes folgt. b) Spannungs–Dehnungs–Linie.

Wichtig bei der Anwendung des Buisman–Koppejan–Modells ist, dass bei Laborversuchen zur Parameterbestimmung dieselben Spannungen wie im Gelände benutzt werden. Durch das Überlagerungsprinzip ist es nicht möglich, Belastungsvermindierungen zu modellieren. Sowohl durch das Überlagerungsprinzip als die Beschränkung auf kleine Dehnungen kann das Buisman–Koppejan–Modell bei sehr weichen Böden (z.B. organische Töne, Torfe) zu große Dehnungen, die sogar größer als die Bodenmächtigkeit sind, vorhersagen.

#### 4.6.5 Bjerrum–Modell

Im Bjerrum–Modell (Bjerrum 1972) wird davon ausgegangen, dass Setzungen durch das Zusammendrücken der Poren, die zwischen dem Korngerüst liegen, verursacht werden. Das Modell wurde 1967 durch Bjerrum eingeführt und ist für kleine Dehnungen anwendbar. Kleine Dehnungen bedeuten in diesem Zusammenhang, dass das Verhältnis zwischen effektiven Spannungen und Dehnungen ( $\log \sigma'_{zz} - \varepsilon$ ) noch als linear betrachtet werden kann. Dies ist für jede Bodenart unterschiedlich. Im Bjerrum–Modell wird ein Isotachen–Modell für Kriechen angewandt (siehe auch Abbildung 4.9). Zudem eignet es sich auch für eine stufenweise Belastung, Entlastung und Wiederbelastung. Es gehört zur Gruppe der zeitabhängigen Modelle.

Ein Boden, der in der Vergangenheit bereits eine Belastung erfahren hat (Vorbelastung) reagiert bei erneuter Belastung bis zum Erreichen der Vorbelastung nur mit geringen Setzungen. Geht eine erneute Belastung jedoch über die Vorbelastung hinaus, treten wieder stärkere Setzungen auf (vgl. Abbildung 4.7). Dieses Verhalten kann durch die Addition verschiedener Terme mit unterschiedlichen Geradensteigungen (Kompressionsbeiwerte) in der logarithmischen Darstellung abgebildet werden.

Ein weiterer Ausgangspunkt ist, dass die Kriechgeschwindigkeit mit zunehmender Belastung zunimmt. Die Kriechgeschwindigkeit nimmt ab bei Entlastung und auch im Verlauf der Zeit.

Nach Bjerrum berechnet sich die Dehnung zu:

$$\varepsilon^c = \frac{\Delta h}{h_0} = \frac{C_r}{1+e_0} \log\left(\frac{\sigma'_p}{\sigma'_0}\right) + \frac{C_c}{1+e_0} \log\left(\frac{\sigma'}{\sigma'_p}\right) + \frac{C_{ae}}{1+e_0} \log\left(\frac{t}{t_0}\right), \quad (4.11)$$

mit

$\varepsilon^c$	lineare Dehnung [-]
$\Delta h$	Setzung [m]
$h_0$	Referenzschichtmächtigkeit [m]
$e_0$	Referenzporenzahl [-]
$\sigma'_p$	vertikale effektive Überlagerungsspannung bzw. Vorbelastung [kPa]
$\sigma'_0$	vertikale effektive Referenzspannung im Korngerüst [kPa], die zum Zeitpunkt der Sedimentation vorlag. Etwaige Vorbelastungen sind nicht enthalten.
$t$	Zeit [s]
$t_0$	Referenzzeit [s]

Die Bodeneigenschaften sind die Kompressionsbeiwerte  $C_c$  und  $C_r$  und der Kompressionsbeiwert für sekundäre Setzung  $C_{ae}$ , die im Labor aus sogenannten Ödometerversuchen (oder eindimensionalen Kompressionsversuchen) abgeleitet werden (vgl. auch Abbildung 4.7). Der Beiwert  $C_c$  wird für den Setzungsanteil der Belastung oberhalb der Vorbelastung benützt, der Beiwert  $C_r$  wird für den Setzungsanteil unterhalb der Vorbelastung benützt. Der Anteil des Kriechens wird durch den Beiwert  $C_{ae}$  bestimmt. Für  $C_{ae} = 0$  entfällt der Anteil des Kriechens im Modell und die Zeitabhängigkeit durch Kriechen wird vernachlässigt. Oftmals werden die Kompressionsbeiwerte auch als  $CR$ ,  $RR$  und  $C_\alpha$  ausgedrückt und stehen durch die Referenzporenzahl miteinander im Zusammenhang:

$$CR = \frac{C_c}{1+e_0}, \quad RR = \frac{C_r}{1+e_0}, \quad C_\alpha = \frac{C_{ae}}{1+e_0}. \quad (4.12)$$

Im Falle einer Entlastung, bei der eine Hebung des Bodens auftritt, kann diese durch einen Hebungsterm berücksichtigt werden, der zu Gleichung (4.11) addiert wird:

$$\varepsilon^c = \frac{\Delta h}{h_0} = \frac{C_{sw}}{1+e_0} \log \left( \frac{\sigma'_0 - \sigma'}{\sigma'_0} \right). \quad (4.13)$$

Oftmals wird der Kompressionsbeiwert  $C_{sw}$  dem Beiwert  $C_r$  gleichgesetzt, sollte jedoch für die relevanten Bodenschichten in Ödometerversuchen experimentell bestimmt werden. Die Reversibilität von Setzungen ist für diverse Bodensorten sehr unterschiedlich einzuschätzen. Für grobkörnige Böden wie Sande und Kiese mit höherem Vorkonsolidierungsverhältnis von  $OCR \approx 3,0$  ist eine höhere Reversibilität zu erwarten (bis zu 50 %). Für feinkörnige Böden mit geringem Konsolidierungsverhältnis von  $OCR \approx 1,5$  ist eine geringe Reversibilität zu erwarten (bis zu 10 %). Dies muss jedoch durch Laborversuche und Modellberechnungen für die lokalen Umstände jeweils bestätigt werden.

Der zeitabhängige Setzungsverlauf des Bjerrum-Modells ist in Abbildung 4.7 wiedergegeben. Es wird unterschieden zwischen primärer Kompression, die zeitunabhängig ist,

und sekundärer Kompression, die durch Kriechen bestimmt wird. Der zeitliche Übergang zwischen den Phasen hängt vom berechneten Konsolidierungsverlauf ab und der primäre Setzungsverlauf schließt am Kriechverlauf der Setzung an.

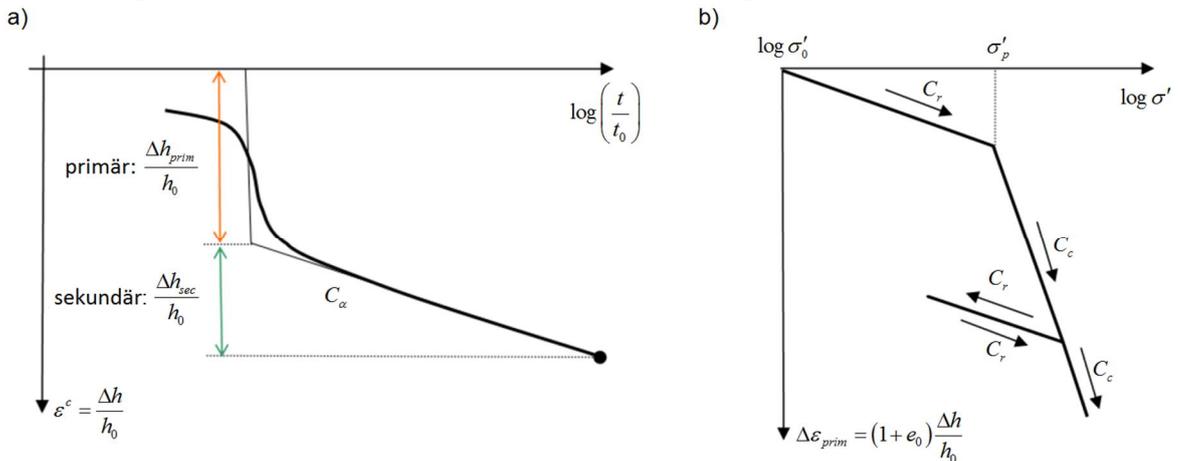


Abbildung 4.7 Bjerrum-Modell: a) Zeitabhängiger Setzungsverlauf, b) Belastungsabhängiger Setzungsverlauf

Die Unterschiede zwischen dem Buisman-Koppejan-Modell und Bjerrum-Modell lassen sich wie folgt zusammenfassen:

- Der spannungsabhängige primäre Teil der Setzungen wird bei Buisman-Koppejan mit dem natürlichen Logarithmus berechnet und bei Bjerrum mit dem dezimalen Logarithmus.
- Das zeitabhängige Kriechen ist bei Buisman-Koppejan ebenfalls spannungsabhängig, wohingegen es bei Bjerrum spannungsunabhängig ist.
- Das Hebungsverhalten kann mit dem Bjerrum-Modell korrekt berechnet werden, wohingegen das Superpositionsprinzip, das bei Buisman-Koppejan angewendet wird, diese Berechnung unmöglich macht.

#### 4.6.6 ABC-Isotachen-Modell

Während alle bisher beschriebenen Bodenmodelle auf Grundlage der linearen Dehnung aufgebaut wurden, basiert das ABC-Isotachen-Modell von den Haan 2003 auf einer natürlichen (d. h. logarithmischen) Dehnungsbeschreibung. Insbesondere bei großen Dehnungsbeträgen, wie sie bei weichen Böden auftreten können, ist die natürliche Dehnung besser zur Beschreibung der Verformungen geeignet als die lineare Dehnung. Die natürliche Dehnung  $\varepsilon_v^H$  ist definiert als

$$\varepsilon_v^H = -\ln\left(\frac{H}{H_0}\right) = -\ln(1 - \varepsilon_v). \quad (4.14)$$

$H_0$  ist die Anfangsschichtmächtigkeit und  $H$  ist die heutige Schichtmächtigkeit.

Der Vorteil der logarithmischen Formulierung der Dehnung wird mit Abbildung 4.8 veranschaulicht: werden im halblogarithmischen Spannungs-Verformungs-Diagramm natürliche Dehnungen gegen die Spannung aufgetragen, ergibt sich für die Erstbelastungslinie ein linearer Verlauf (Abbildung 4.8, blaue Linie), während bei linearer Formulierung der Dehnung ein nichtlinearer Verlauf (Abbildung 4.8, rote Linie) entsteht. Aus der Belastungslinie mit logarithmischer Dehnungsformulierung lässt sich nun ein Kompressionsbeiwert  $b$  eindeutig ableiten, während der Kompressionsbeiwert CR für die lineare Deh-

nung nicht eindeutig bestimmt werden kann, da in diesem Fall die Belastungslinie keine konstante Steigung aufweist.

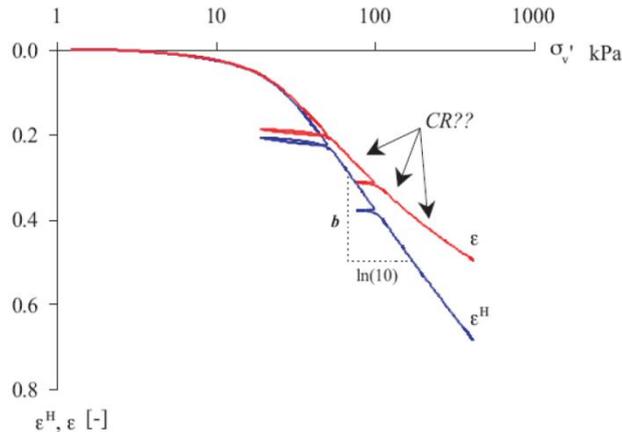


Abbildung 4.8 Ergebnisse von Setzungsmessungen, die mit Hilfe der linearen Dehnung (rot) und natürlichen Dehnung (blau) aufgetragen sind.

Die Erstbelastungslinie der natürlichen Dehnung wird als Isotache bezeichnet (blaue Linie in Abbildung 4.8). Eine Isotache beschreibt eine Linie konstanter Geschwindigkeit. Damit wird zum Ausdruck gebracht, dass es einen Zusammenhang zwischen der effektiven Spannung im Korngerüst, Dehnung und der Dehnungsgeschwindigkeit gibt. Im Spannungs-Dehnungs-Diagramm zeigen sich die Isotachen als schräge parallele Linien mit gleicher, negativer Steigung, die jeweils einer bestimmten Kriechgeschwindigkeit  $\dot{\epsilon}$  des Bodens zugeordnet sind. In Abbildung 4.9 sind mehrere Isotachen als natürliche Dehnung in Abhängigkeit der effektiven Spannung im Korngerüst aufgetragen.

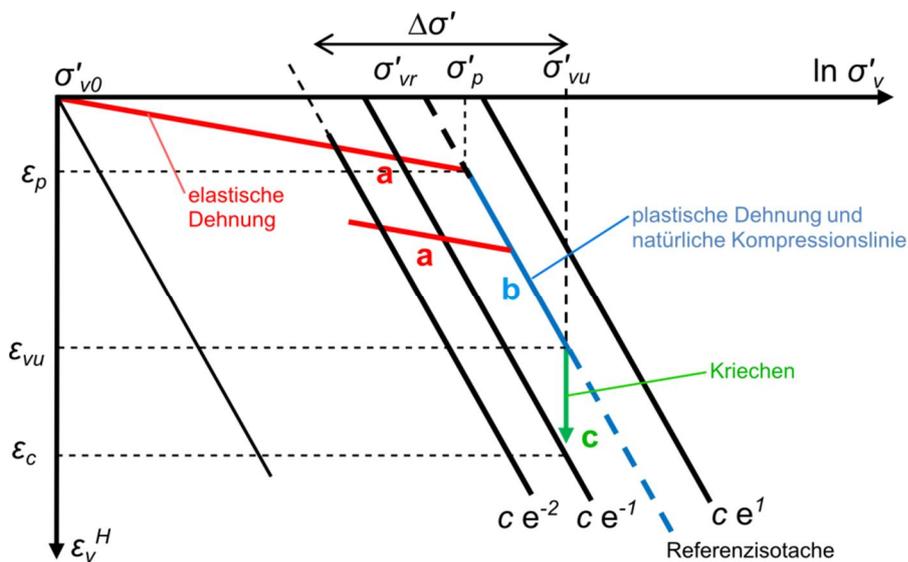


Abbildung 4.9 Das ABC-Isotachen-Modell mit Verlauf der natürlichen Dehnung (vertikal) aufgetragen über den natürlichen Logarithmus der vertikalen effektiven Spannung (horizontal).

Nimmt bei zunehmender Belastung die effektive Spannung im Korngerüst von  $\sigma'_p$  nach  $\sigma'_{vu}$  zu, verformt sich der Boden zunächst plastisch zu  $\epsilon_{vu}$ , in Abbildung 4.9 ist dies mit der mit „b“ beschrifteten blauen Linie angedeutet. Wird die Belastung nicht weiter erhöht, verformt sich der Boden infolge Kriechens dennoch bei gleichbleibender Belastung weiter. In Abbildung 4.9 ist dies mit dem grünen mit „c“ beschrifteten Pfeil dargestellt. Weil

die Kriechgeschwindigkeit mit der Zeit abnimmt, wird das Setzungsverhalten des Bodens mit fortschreitender Zeit durch eine der niedrigeren Isotachen beschrieben.

Das Setzungsverhalten des a,b,c-Isotachen-Modells kann annähernd beschrieben werden mit:

$$\varepsilon_v^H = a \ln \left( \frac{\sigma'_p}{\sigma'_{v0}} \right) + (b - a) \ln \left( \frac{\sigma'_v}{\sigma'_{v0}} \right) + c \ln \left( \frac{\tau}{\tau_0} \right) \quad (4.15)$$

Dies gilt für eine vertikale effektive Spannung  $\sigma'_v$  [kPa], die größer ist als die Vorbelastung  $\sigma'_p$  [kPa], jeweils normiert auf eine vertikale effektive Referenzspannung  $\sigma'_{v0}$  [kPa].  $a$ ,  $b$  und  $c$  sind Modellparameter, die dem Kompressionsmodell den Namen verleihen.

Der erste Term in Formel (4.15) beschreibt die (reversible) **elastische Dehnung**, die durch direkte Kompression bis zur Vorbelastungsspannung verursacht wird. Der Parameter  $a$  [-] ist die Steigung der zugehörigen Wiederbelastungslinie.

Der zweite und der dritte Term in Gleichung (4.15) beschreiben zusammen die irreversible **plastische Stauchung** aus Kriechen. Da der zweite Term in ähnlicher Form auch im Kompressionsmodell von Terzaghi (Abschnitt 4.6.3) vorkommt, wird der dritte Term oft fälschlich als ein Term zur Beschreibung des Kriechens zusätzlich zur elostoplastischen Verformung interpretiert. Tatsächlich hat das Kriechen jedoch sowohl eine belastungsabhängige plastische Verformungskomponente als auch eine rein zeitabhängige Komponente, oder anders ausgedrückt, wird plastische Verformung auch teilweise durch Kriechprozesse hervorgerufen.

Der Parameter  $b$  [-] ist die Steigung der zugehörigen Erstbelastungslinie, die zugleich eine Isotache darstellt. Parameter  $c$  [-] ist der vertikale Abstand zwischen zwei Isotachen, deren Kriechgeschwindigkeit sich jeweils um einen Faktor  $\exp(1)$  unterscheidet.  $\tau$  [s]

ist die sogenannte intrinsische Zeit und  $\tau_0$  [s] ihr Referenzwert. Die intrinsische Zeit ist die Zeit, die benötigt worden wäre, um die heutige Setzung zu erreichen, wenn die heutige Belastung direkt bei geologischer Entstehung der Bodenschicht aufgebracht worden wäre. Oftmals ist jedoch die Kriechgeschwindigkeit dieses Referenzzustandes (vor Lastaufbringung) nicht bekannt. Deswegen wird in der Regel die sogenannte „1-Tages-Isotache“ als Referenz-Isotache verwendet.

Das Superpositionsprinzip des Buisman-Koppejan-Modells (Abschnitt 4.6.4) wird beim ABC-Isotachen-Modell nicht angewendet, d. h. es werden die jeweilig auftretenden Verformungen gänzlich auf die Anfangsbedingungen (Volumen, Spannungen) bezogen und es wird die gesamte kumulative Spannungsänderung berücksichtigt. Dass die Isotachen parallel sind, trägt der Tatsache Rechnung, dass die Kriechgeschwindigkeit nicht sofort mit steigender Spannung zunimmt. Während der Konsolidierung ist auch der Verlauf des Porenwasserdruckes im Isotachen-Modell abweichend zum Buisman-Koppejan-Modell (den Haan 2003).

#### 4.6.7 Dreidimensionale Stoffgesetze in numerischen Modellen

Die in den vorangegangenen Abschnitten vorgestellten bodenmechanischen Kompressionsmodelle sind allesamt eindimensional formuliert. Die bodenmechanischen Bestimmungsgleichungen für den dreidimensionalen Raum sind als partielle Differentialgleichungen für Kräfte- und Momentengleichgewicht sowie Massenbilanz für ein Kontrollvolumen formuliert (vgl. Abschnitt 4.3). Ihre Lösung ist in der Regel nicht analytisch mög-

lich, sondern erfordert eine numerische Lösung. Weit verbreitet sind hierfür die sogenannte Finite-Elemente-Methode (FE) und die Finite-Differenzen-Methode (FD).

Den bodenmechanischen Bestimmungsgleichungen liegt ein Stoffgesetz zu Grunde. Von den in den vorigen Abschnitten eingeführten eindimensionalen Kompressionsmodellen unterscheiden sich die Stoffgesetze im Wesentlichen darin, dass sie eben für den dreidimensionalen Raum formuliert werden. Ein Beispiel für ein Stoffgesetz ist das linear-elastische Stoffgesetz nach Hooke (vgl. Abschnitt 4.6.2), andere gängige Stoffgesetze sind das elastoplastische Mohr-Coulomb-Modell (bis zu einem Grenzwert elastisch wie Hooke, danach irreversibel plastisch in Form von Brüchen), Hardening-Soil Modell, Soft-Soil-Creep Modell (kommt dem ABC-Isotachenmodell nahe, enthält auch Kriechen), Hypoplastisches Modell (ohne Kriechen) und das CAM-Clay-Modell (sogenanntes Critical-State-Modell, äquivalent zum Terzaghi-Kompressionsmodell, ohne Kriechen). Die bodenmechanischen Parameter dieser Modelle sind in Abschnitt 4.8 erläutert.

#### 4.7 Modelle zur Berücksichtigung der Konsolidierung

Die Konsolidierung wird in Modellen zur Bodenbewegungsprognose meistens entweder über die Konsolidierungstheorie nach Terzaghi (Abschnitt 4.7.1) oder nach Darcy (Abschnitt 4.7.2) berücksichtigt.

##### 4.7.1 Konsolidierung nach Terzaghi

Nach Terzaghis eindimensionaler Konsolidierungstheorie wird ein Konsolidierungsgrad  $U(t)$  zur Zeit  $t$  als derjenige Anteil der Belastung, der im Korngerüst bereits verformungswirksam geworden ist, definiert. Der Konsolidierungsgrad wird mit Hilfe einer Fourier-Reihe bestimmt; ein wesentlicher Eingangsparameter ist der Konsolidierungsbeiwert  $c_v$ , siehe Abbildung 4.3. Aus dem Konsolidierungsgrad ergibt sich die Verformung infolge Konsolidierung:

$$\Delta h = f(U(t)). \quad (4.16)$$

Der Konsolidierungsbeiwert nach Terzaghi ist

$$c_v = \frac{k_f E}{\gamma_w}, \quad (4.17)$$

mit dem hydraulischen Durchlässigkeitsbeiwert  $k_f$  [m/s], dem Steifemodul  $E$  [N/m<sup>2</sup>] und der Wichte des Wassers  $\gamma_w$  [N/m<sup>3</sup>].

Der sogenannte „Over Consolidation Ratio“ (OCR, Vorkonsolidierungsverhältnis) ist das Verhältnis zwischen der maximalen Vertikalspannung in der Vergangenheit und der aktuellen Vertikalspannung. Bei konsolidierten Böden ist OCR = 1. Bei OCR-Werten größer 1 hat der Boden in der Vergangenheit eine größere effektive Spannung erfahren als aktuell vorhanden. Oft ist die maximale Spannung in der Vergangenheit unbekannt; es gibt aber Laborversuche, die Hinweise zum Vorkonsolidierungsverhältnis geben können.

Bei Tonen bewirken Kriechprozesse einen Rückgang des Porenvolumens auch bei gleichbleibender Belastung (siehe Abschnitt 4.4.2). OCR-Werte über 1 müssen also ihre Ursache nicht zwangsläufig in einer erhöhten Belastung in der Vergangenheit haben, sondern können auch durch Kriechen hervorgerufen werden (vgl. Giese 2010).

#### 4.7.2 Konsolidierungstheorie auf Basis des Darcy'schen Gesetzes

Die zeitabhängige Dehnung  $\varepsilon$  infolge Konsolidierung kann auch mit Hilfe der folgenden Differentialgleichung beschrieben werden:

$$\frac{\partial}{\partial x} k_x \frac{\partial \varphi}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial y} k_y \frac{\partial \varphi}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial z} k_z \frac{\partial \varphi}{\partial z} + \frac{\partial \varepsilon}{\partial t} = 0. \quad (4.18)$$

In Modellen, bei denen nur vertikale Strömung in einer homogenen Bodenschicht berücksichtigt wird, kann dies vereinfacht werden als,

$$k_z \frac{\partial^2 \varphi}{\partial z^2} + \frac{\partial \varepsilon}{\partial t} = 0. \quad (4.19)$$

Diese Gleichung basiert auf dem Gesetz nach Darcy, hier steht  $k$  [m/s] für die hydraulische Durchlässigkeit in den Raumrichtungen  $x$ ,  $y$  (horizontal) und  $z$  (vertikal),  $\varphi$  ist der Porenwasserüberdruck in Metern. Die Gleichung beschreibt die Entwicklung des Porenwasserüberdrucks über die Tiefe und die Dehnung über die Zeit. Die Lösung dieser Differentialgleichung ist anspruchsvoller als die Fourier-Reihe der Konsolidierungsberechnung nach Terzaghi (Abschnitt 4.7.1), gibt die Konsolidierung aber physikalisch exakt wieder. Programme, die die Bestimmungsgleichungen der Bodenbewegung numerisch lösen, wie zum Beispiel Finite-Elemente-Programme, wird die Konsolidierung darum oft mit Hilfe des Darcy'schen Gesetzes berücksichtigt.

### 4.8 Bodenparameter und Einflussgrößen

#### 4.8.1 Einführung

Dieser Abschnitt enthält eine Zusammenstellung der relevanten bodenphysikalischen und hydraulischen Bodenparameter und Einflussgrößen, die in den vorherigen Abschnitten dieses Kapitels eingeführt und definiert sind.

#### 4.8.2 Bodenparameter zur Bestimmung der Spannungen im Boden

Die folgenden Bodenparameter sind notwendig zur Berechnung der Spannungen im Boden. Sie werden für die meisten Kompressionsmodelle benötigt.

- Porenanteil  $n$  [-], ca. 0,25–0,4 für Sand, ca. 0,6–0,8 für Ton, ca. 0,3–0,8 für Torf, oder Porenzahl  $e$  [-]
- Wassergehalt des Bodens  $S_r$  [-], ca. 1,0 unterhalb des Grundwasserspiegels
- Dichte des Korngerüsts des Bodens  $\rho_s$  [kg/m<sup>3</sup>], ca. 2650 kg/m<sup>3</sup> für Quarzsand
- Dichte des Wassers  $\rho_w$  [kg/m<sup>3</sup>], ca. 1000 kg/m<sup>3</sup>
- Abstand zwischen Geländeoberfläche und Grundwasserspiegel  $d_{gw}$  [m]

Diese Parameter werden im Allgemeinen als vorgegeben angenommen, das heißt, sie werden nicht im Rahmen der Kalibrierung bestimmt, sondern aus Messwerten abgeleitet oder der Literatur entnommen. Hieraus folgen die abgeleiteten Bodeneigenschaften:

- Wichte des Bodens  $\gamma$  [kN/m<sup>3</sup>], Wichte des Wassers  $\gamma_w$  [kN/m<sup>3</sup>], Wichte des Korngerüsts  $\gamma_s$  [kN/m<sup>3</sup>]

- Feuchtwichte des Bodens  $\gamma_{sat}$  [kN/m<sup>3</sup>]
- Trockenwichte des Bodens  $\gamma_d$  [kN/m<sup>3</sup>]

gemäß den Definitionen in Abschnitt 4.3. Als Ergebnis werden hieraus die Spannungen im Boden berechnet (Abschnitt 4.3):

- totale Spannungen im Boden  $\sigma(z)$  [kN/m<sup>2</sup>] in vertikaler Richtung
- effektive Spannungen im Korngerüst  $\sigma'(z)$  [kN/m<sup>2</sup>] in vertikaler Richtung
- Porenwasserdruck  $p$  [kN/m<sup>2</sup>]

#### 4.8.3 Bodenparameter zur Beschreibung der Verformung

Zur Berechnung der Verformungen (Setzungen und Hebungen) müssen je nach Kompressionsmodell unterschiedliche Parameter verwendet werden. Eindimensionale Kompressionsmodelle haben je nach Komplexität ein bis drei Modellparameter. Für die einfachsten Modelle wird nur der Elastizitätsmodul  $E$  (auch Steifigkeit, Steifemodul) benötigt. Höherwertige Modelle erfassen mehr Prozesse und benötigen dementsprechend mehr Parameter. Im Folgenden werden die Bodenparameter gemäß der in Abschnitt 4.6 vorgenommenen Einteilung aufgelistet. In Klammern steht der jeweilige Abschnitt, in dem das Kompressionsmodell beschrieben ist.

Elastisches Modell nach Hooke (4.6.2)

- Elastizitätsmodul  $E$  [kN/m<sup>2</sup>]

Kompressionsmodell von Terzaghi (4.6.3)

- Elastizitätsmodul  $E$  in [kN/m<sup>2</sup>]
- Proportionalitätsfaktor  $C$  [–]
- Ausgangsporenzahl  $e_0$  [–] und Ausgangsspannung  $\sigma'_0$  [kN/m<sup>2</sup>]

Buisman–Koppejan–Modell (4.6.4)

- primärer Kompressionsbeiwert  $C_p$  [–]
- sekundärer Kompressionsbeiwert  $C_s$  [–]
- Referenzzeit  $t_d$  [d], festgesetzt auf 1 Tag

Bjerrum–Modell (4.6.5)

- Kompressionsbeiwert  $C_c$  [–] oder  $CR$  [–]
- Kompressionsbeiwert  $C_r$  [–] oder  $RR$  [–]
- Kompressionsbeiwert für sekundäre Setzung (Kriechen)  $C_{\alpha e}$  [–] oder  $C_\alpha$  [–]
- Kompressionsbeiwert für Entlastung  $C_{sw}$  [–]
- Vorbelastung  $\sigma'_p$  [kN/m<sup>2</sup>]

- Referenzwerte für Schichtmächtigkeit  $h_0$  [m], Porenzahl  $e_0$  [-], Spannung  $\sigma'_0$  [kN/m<sup>2</sup>] und Zeit  $t_0$  [s]

#### ABC–Isotachen–Modell (4.6.6)

- Modellparameter  $a$  [-]
- Modellparameter  $b$  [-]
- Modellparameter  $c$  [-]
- Vorbelastung  $\sigma'_p$  [kN/m<sup>2</sup>]
- Referenzwerte für Spannung  $\sigma'_{v0}$  [kN/m<sup>2</sup>] und Zeit  $\tau_0$  [s]

Diese Bodenparameter werden aus Ödometerversuchen abgeleitet oder mit Hilfe einer Kalibrierung bestimmt. Als Ergebnis werden je nach Kompressionsmodell hieraus die Dehnungen im Boden (Abschnitt 4.6) und Setzungen oder Hebungen (Abschnitt 4.3) abgeleitet:

- Vertikale Dehnung  $\varepsilon_z(z)$  [%], Stauchung oder Streckung
- Ursprüngliche Schichtmächtigkeit  $H_0$  [m]
- Veränderung der Schichtmächtigkeit oder Setzung/Hebung  $\Delta H$  [m]

#### 4.8.4 Bodenparameter in Stoffgesetzen numerischer 3D-Modelle

Bei Stoffgesetzen für numerische Modelle hängen die Parameter naturgemäß vom gewählten Stoffgesetz ab. Im Folgenden werden die Bodenparameter für verschiedene Stoffgesetz aufgelistet. Je nach Programm unterscheiden sich die Ansätze möglicherweise:

FE–Modell mit linear elastischem Stoffgesetz nach Hooke:

- Querdehnzahl  $\nu$  [-] (für den mehrdimensionalen Fall)
- Elastizitätsmodul  $E$  [kN/m<sup>2</sup>]

FE–Modell mit elastoplastischem Stoffgesetz nach Mohr–Coulomb:

- Querdehnzahl  $\nu$  [-] und Elastizitätsmodul  $E$  [kN/m<sup>2</sup>] (wie oben)
- Kohäsion  $c$  [kN/m<sup>2</sup>] oder undrainierte Scherfestigkeit  $s_u$  [kN/m<sup>2</sup>]
- Reibungswinkel  $\varphi$  [°]
- Dilatationswinkel  $\psi$  [°]

FE–Modell mit Hardening–Soil Stoffgesetz:

- Kohäsion  $c$  [kN/m<sup>2</sup>], Reibungswinkel  $\varphi$  [°] und Dilatationswinkel  $\psi$  [°] (wie oben)
- Sekant–Steifigkeit  $E_{50}^{ref}$  [kN/m<sup>2</sup>], Tangent–Steifigkeit  $E_{oed}^{ref}$  [kN/m<sup>2</sup>], Entlastungs–Wiederbelastungs–Steifigkeit  $E_{ur}^{ref}$  [kN/m<sup>2</sup>]
- Exponent zur spannungsabhängigen Steifigkeit  $m$  [-]

FE–Modell mit Softsoil–Creep Stoffgesetz:

- Kohäsion  $c$  [kN/m<sup>2</sup>], Reibungswinkel  $\varphi$  [°] und Dilatationswinkel  $\psi$  [°] (wie oben)
- Modifizierter Kompressionsbeiwert  $\lambda^*$  [-] oder Kompressionsbeiwert  $C_c$  [-] mit Referenzporenzahl  $e_0$  [-]
- Modifizierter Beiwert für Entlastung  $\kappa^*$  [-] oder Beiwert für Entlastung  $C_s$  [-] mit Referenzporenzahl  $e_0$  [-]
- Modifizierter Kriechbeiwert  $\mu^*$  [-] oder Kriechbeiwert für sekundäre Setzung  $C_\alpha$  [-] mit Referenzporenzahl  $e_0$  [-]
- Querdehnzahl für Entlastung-Wiederbelastung  $v_{ur}$  [-], festgesetzt auf 0,15
- Spannungsverhältnis bei normal konsolidiertem Boden  $K_0^{nc}$  [-]

Die Beiwerte für Kompression, Entlastung und Kriechen können umgerechnet werden in die Parameter  $a$ ,  $b$  und  $c$  des ABC–Isotachen–Modells.

FE–Modell mit Hypoplastischem Stoffgesetz für Ton (Mašín 2014):

- Reibungswinkel im Critical–State–Konzept  $\varphi_c$  [°]
- Spannungsverschiebung durch Kohäsion  $p_t$  [kPa]
- Basisparameter des Hypoplastischen Tonmodells  $\lambda^*$ ,  $\kappa^*$ ,  $N$ ,  $v_{pp}$  [-]
- Parameter des Intergranular–Strain–Konzeptes  $\alpha_G$ ,  $R$ ,  $\beta_r$ ,  $\chi$ ,  $m_{rat}$  [-]
- Parameter für sehr kleine Schermoduli  $A_g$  and  $n_g$  [-]
- Kompressionsmodul des Wassers  $K_w$  [kPa], null für Konsolidierungsanalysen
- Referenzporenzahl  $e_0$  [-] oder Over–Consolidation–Ratio  $OCR$  [-]
- Referenzwerte des Intergranular–Strain–Tensors  $\delta_{ij}$  [-]

Das Modell kann erweitert werden für anisotropes Materialverhalten und metastabile Strukturen.

FE–Modell mit Cam–Clay Stoffgesetz:

- Querdehnzahl  $\nu$  [-]
- Neigung der Linie für normal konsolidierter Belastung, Kompressionsbeiwert  $\lambda$  [-]
- Neigung der Entlastungs–Wiederbelastungs–Linie, Schwellbeiwert  $\kappa$  [-]
- Neigung der Critical–State–Linie  $M$  [-]
- Referenzporenzahl  $e_0$  [-]

Die Parameter für die komplexen Stoffgesetze in FE–Modellen müssen aus Laborversuchen abgeleitet werden, wie z.B. Ödometer, Triaxial, Direct Simple Shear, etc. und unterliegen intensiver Kalibrierung.

#### 4.8.5 Bodenparameter zur Beschreibung der Konsolidierung

Zur Beschreibung der Konsolidierung werden entweder der

- Durchlässigkeitsbeiwert  $k$  [m/s] oder
- Konsolidierungsbeiwert  $c_v$  [m<sup>2</sup>/s]

benötigt. Beide können mit Hilfe von Gleichung (4.17) ineinander umgerechnet werden. Für das Darcy'sche Konsolidierungsmodell werden die Durchlässigkeitsbeiwerte in allen drei Raumdimensionen, d. h.  $k_x$ ,  $k_y$  und  $k_z$ , benötigt.

Der Durchlässigkeitsbeiwert und die Speichereigenschaften ändern sich durch Kompression, d. h. den Steifemodul  $E$ . Praktische Bedeutung für das Konsolidierungsmodell nach Terzaghi hat der,

- Over Consolidation Ratio,  $OCR$  [–]

als Anfangsbedingung für die Konsolidierungsberechnung. Der  $OCR$  kann mit Hilfe von Laborversuchen nach Casagrande bestimmt werden, oft wird er auch im Rahmen der Kalibrierung eingestellt.

#### 4.9 Diskussion zur Verwendung der Bodenmodelle

Generell lassen sich die bodenmechanischen Kompressionsmodelle grob hinsichtlich ihrer Komplexität sortieren: die einfacheren Modelle nach Hooke (Abschnitt 4.6.2) und Terzaghi (Abschnitt 4.6.3) berücksichtigen nur die unmittelbare Verformung, die bei Belastung sofort eintritt. Die unmittelbare Verformung wird bei Hooke rein elastisch modelliert, das Modell von Terzaghi lässt die Modellierung von elastoplastischem Verhalten zu, das heißt, ein Teil der Verformung ist irreversibel. Einen zeitabhängigen Verformungsanteil erhält man durch Kombination eines solchen Modells mit einem Konsolidierungsmodell. Diese Kombination berücksichtigt dann allein eine hydraulische Zeitabhängigkeit.

Häufig sind Setzungen der Gegenstand von Bodenbewegungsberechnungen. Hebungen sind quasi Setzungen mit negativem Vorzeichen. Die meisten Kompressionsmodelle können deshalb auch Hebungen berechnen. Lediglich das Buisman-Koppejan-Modell ist wegen des Superpositionsprinzips nicht geeignet für die Berechnung von Hebungen.

Bei langen Zeiträumen erfährt der Boden auch eine plastische zeitabhängige Verformung. Dieser auch als Kriechen bezeichnete Prozess wird im Buisman-Koppejan-Modell, dem Bjerrum-Modell und dem ABC-Isotachen-Modell berücksichtigt. Der Anteil der Verformung aus Kriechen (mechanische zeitabhängige Dehnung) und aus Konsolidierung (hydraulische zeitabhängige Verformung) sind in der Praxis schwierig zu trennen, da die Prozesse zeitgleich auftreten, beide Prozesse sich gegenseitig beeinflussen und sich beide über lange Zeiträume erstrecken. Als Faustregel wird für Bauprojekte davon ausgegangen, dass eine Konsolidierung einer 5 bis 15 Meter dicken bindigen Schicht etwa nach 30 Jahren abgeschlossen ist, während der Kriechprozess weiterhin fortschreitet. Somit werden Bodenbewegungen nach über 30 Jahren nur noch dem Kriechen allein zugeschrieben und nicht mehr beiden Prozessen parallel. Diese Faustregel ist für die im Zusammenhang mit Tagebausümpfung stehenden Bodenbewegungen im Rheinischen Braunkohlenrevier nur bedingt anwendbar, denn die Mächtigkeiten bindiger Schichten sind mitunter größer und es geht hier nicht um ein Bauwerk, sondern um den Effekt von wasserwirtschaftlichen Maßnahmen. Oft können Modelle eine gemessene Bodenbewegung ohne explizite Berücksichtigung des Kriechprozesses gut wiedergeben, auch wenn die Bodenbewegung wahrscheinlich teilweise durch Kriechen hervorgerufen worden sind (Kooi & Trysa 2017). Das Kriechen wird dann modelltechnisch mit dem Konsolidierungs-

prozess erfasst. Die aus der Kalibrierung ermittelten Modellparameter sind dann anders, als wenn Kriechen als separater Prozess berücksichtigt wird. Ein vollständig auskonsolidierten Boden, bei dem der Prozess der Konsolidierung zum Erliegen gekommen ist, kriecht weiter. Deshalb muss zur Berechnung der Bodenbewegung in diesem Fall Kriechen als Prozess modelltechnisch berücksichtigt werden.

Dreidimensionale Finite-Elemente-Modelle bilden die Bodenbewegung im Prinzip am besten ab, da die Bestimmungsgleichungen physikalisch hergeleitet und eben für den dreidimensionalen Raum formuliert sind. Aber auch hier gibt es verschiedene Stoffgesetze, die sich hinsichtlich der berücksichtigten Prozesse und Komplexität unterscheiden. Auch hinsichtlich der Parameter hängt die Komplexität vom gewählten Stoffgesetz ab. Einige Stoffgesetze sind hinsichtlich der zu Grunde liegenden Modellvorstellung und damit auch hinsichtlich ihrer Parameter mit bestimmten eindimensionalen Kompressionsmodellen vergleichbar.

Mit Finite-Elemente-Modellen kann die Bodenbewegung im dreidimensionalen Raum berechnet werden. Eine wesentliche Vereinfachung ist die Reduktion auf zwei oder eine Dimension. Ein eindimensionales Finite-Elemente-Modell kommt den Methoden mit eindimensionalen bodenmechanischen Kompressionsmodellen nahe. Einfache Stoffgesetze kommen für den eindimensionalen Fall mit einer ähnlichen Anzahl an Parametern aus wie das entsprechende analytische Kompressionsmodell. Die Parameterzahl in einem Finite-Elemente-Modell erhöht sich jedoch mit der Dimensionalität. Dem steht im Allgemeinen eine bessere Erfassung der Prozesse gegenüber, zum Beispiel durch Berücksichtigung der Querkontraktion im Falle des linear-elastischen Stoffgesetzes, was jedoch im aktuellen Anwendungsfall nur von untergeordneter Bedeutung ist. Dreidimensionale Finite-Elemente-Modelle sind in der Regel sehr viel rechenzeitintensiver als eindimensionale Finite-Elemente-Modelle und damit auch rechenzeitintensiver als eindimensionale Modelle. Die räumliche und zeitliche Diskretisierung spielen eine Rolle bei Stabilität der Berechnung, der Genauigkeit und beim Rechenzeitbedarf.

Zur Konsolidierungsberechnung stellt der Ansatz nach Darcy grundsätzlich die genauere Lösung dar, er erfordert aber einen höheren Rechenaufwand, da die Bestimmungsgleichung zumindest teilweise numerisch gelöst werden muss. Für komplexere Fälle kann die numerische Lösung auch von der Rechenzeit her gesehen effizienter sein. Die Genauigkeit der numerischen Lösung hängt auch von der räumlichen und zeitlichen Diskretisierung ab. Die Konsolidierungsberechnung nach Terzaghi kann dagegen analytisch formuliert werden, stellt aber konzeptionell eine Näherungslösung dar.

Die Kombination eines direkten Kompressionsmodells mit einem Konsolidierungsmodell erlaubt die Berechnung von zeitabhängigen Dehnungen – dann naturgemäß ohne Berücksichtigung der Kriechprozesse.

Für den vorliegenden Fall des rheinischen Braunkohlenreviers sind die zeitabhängigen Verformungen relevant, denn es werden bei wieder ansteigendem Grundwasserspiegel noch Setzungen beobachtet. Zeitabhängige Verformungen entstehen aus Konsolidierung und Kriechen. Eine bei der Auswahl des Bodenmodells entscheidende Frage ist dann, ob die zeitabhängige Bodenbewegung ausreichend genau mit einem Konsolidierungsmodell allein zu beschreiben ist, oder ob Kriechen als separater Prozess berücksichtigt werden muss.

Wie schon erwähnt, sind Kriechen und Konsolidierung Prozesse, die sich über lange Zeiträume erstrecken und sich nur schwer trennen lassen. Einen Hinweis auf Kriechprozesse kann der Vorkonsolidierungsgrad eines Bodens (Over Consolidation Ratio OCR) geben. Liegt dieser höher als erwartet, ist er also zum Beispiel größer als 1, obwohl keine Vorbelastung aufgetreten ist, spielt der Prozess des Kriechens möglicherweise eine Rol-

le. Giese 2010 hat bei Laboruntersuchungen an Sedimenten des Rheinischen Braunkohlenreviers OCR-Werte von größer als 1 bestimmt, obwohl keine Vorbelastungen aus der Vergangenheit vorlagen. Dies deutet darauf hin, dass der Prozess des Bodenkriechens hier möglicherweise eine Rolle spielen könnte.

Variantenrechnung mit und ohne Kriechen für einen bekannten Setzungsverlauf kann ebenfalls einen Hinweis über den Einfluss des Kriechens geben (Bakr 2015, Kooi & Trysa 2017).

Der relative Einfluss eines Bodenparameters auf das Berechnungsergebnis kann über Sensitivitätsanalysen ermittelt werden. Ergebnisse von Sensitivitätsanalysen sind wertvoll für die Kalibrierung eines Modells sowie die Einschätzung der Aussagegenauigkeit von Prognoseergebnissen. Anhand der Parametersensitivität können Kalibrierungsparameter festgelegt werden und auch eingeschätzt werden, wie stark sich ein Modellergebnis mit der Änderung eines Parameters verändert. Eine solche Sensitivitätsstudie wurde in der Literatur bisher noch nicht vorgefunden, jedoch derzeit im Auftrag des LANUV durch die ZAI GmbH mit der Methode nach Ziegler und Aulbach für Einzelpunkte im Rheinischen Revier durchgeführt. Die Veröffentlichung der Ergebnisse in Form eines LANUV-Fachberichts ist für 2018 geplant.

#### **4.10 Wechselwirkungen zwischen Grundwasserströmung und Bodenmechanik**

##### 4.10.1 Einführung

Zwischen Bodenmechanik und Grundwasserströmung bestehen Wechselwirkungen. So stellt der Grundwasserstand die wesentliche Belastungsrandbedingung für die bodenmechanische Berechnung der Verformung. Im Gegenzug bewirkt die Verformung infolge Konsolidierung wiederum Strömungen, die den Grundwasserstand verändern. Darüber hinaus ändert sich infolge der Verformung zunächst die Höhenlage der einzelnen Schichten. Dies hat wiederum einen Effekt auf den Grundwasserstand und damit auf Grundwasserströmung. Auf der Seite der Bodenmechanik ändern sich mit der Verformung und der Spannungssituation auch die bodenmechanischen Eigenschaften wie zum Beispiel die Steifigkeit. Die Verformung hat aber auch einen Einfluss auf die hydraulischen Bodeneigenschaften: Bei der Kompaktion eines Bodens verringern sich durch die Verringerung der Porosität auch sein Durchlässigkeitsbeiwert und sein Speichervermögen.

Die Wechselwirkungen zwischen diesen beiden Domänen können naturgemäß nur in einem gekoppelten System Berücksichtigung finden, das sowohl Bodenmechanik als auch Grundwasserströmung abbildet. Im Folgenden werden die Zusammenhänge zu diesen beiden Wechselwirkungsprozessen erläutert.

##### 4.10.2 Änderung der Höhenlage

Bei Betrachtung der einzelnen Schicht ist der Effekt einer Setzung zunächst die Reduktion ihrer Mächtigkeit. Dies hat nur dann einen Effekt auf die Grundwasserströmung, wenn die grundwassererfüllte Mächtigkeit die Oberkante des Grundwasserleiters erreicht (gespannte Verhältnisse oder Grundwasseraustritte auf ungespannten Grundwasserleitern). Unabhängig von Änderungen des Durchlässigkeitsbeiwertes würde dadurch dann auch die Transmissivität (Produkt aus Mächtigkeit und Durchlässigkeit der Grundwasserleiters) des Grundwasserleiters verringert.

Setzen sich die Schichten unterhalb eines betrachteten Leiters (Liegendes), ändert sich die Höhenlage, was bei lateral unterschiedlichen Setzungsbeträgen wiederum das hydraulische Gefälle in Längsrichtung verändern und somit die großräumige Grundwasserströmung beeinflussen kann. Für Hebungen gilt entsprechendes.

Setzt sich eine geringleitende Schicht, dann bewegen sich die darüber liegenden Schichten einschließlich des darin enthaltenen Grundwassers mit. Ist nun der Grundwasserstand im Stauer höher als der im darüber liegenden Leiter, würde sich das hydraulische Gefälle in Richtung des Grundwasserleiters durch die Setzung erhöhen. Es ergibt sich also durch die Kompaktierung des Grundwasserstauers in diesem Fall ein selbst verstärkender Effekt der Konsolidierung durch Änderung der Höhenlage.

#### 4.10.3 Änderung der hydraulischen Parameter durch Kompression

Grundsätzlich wird bei einer Kompaktion die Porosität und damit die Durchlässigkeit von Bodenschichten verringert. In Grundwasserstauern wird dadurch die Konsolidierung verlangsamt, es entsteht ein sich selbst dämpfender Effekt. Bei Grundwasserleitern reduziert sich die Fließgeschwindigkeit, und es entstehen steilere Gradienten.

Ein ebenfalls verringerter Speicherkoeffizient kann in Grundwasserleitern zur Folge haben, dass der Grundwasserspiegel bei einem gleichen Zufluss schneller ansteigt als bei einem ursprünglichen höheren Speicherkoeffizienten. Der Grundwasserspiegel im obersten Leiter könnte dann z. B. bei starken Niederschlägen anders reagieren als im unbeeinflussten Fall. Gleichzeitig könnten gleichbleibende Grundwasserentnahmen zu einer stärkeren Absenkung führen.

## 5 Fallbeispiele

### 5.1 Einführung

Für die gemäß Abschnitt 3.3 ausgewählten Fallbeispiele werden im Folgenden Steckbriefe vorgestellt. Der erste Steckbrief beschreibt den Referenzfall des Rheinischen Braunkohlenreviers. Es folgen die Steckbriefe der ausgewählten Fallbeispiele, geordnet nach den Kategorien „Tagebau im Lockergestein“, „Bergbau im Festgestein“ und „andere Fälle von Bodenbewegungen infolge von Grundwasserstandsänderungen“. Im letzten Abschnitt werden die wichtigsten Ergebnisse für die Bodenbewegungsprognose im Rheinischen Braunkohlenrevier zusammengefasst.

Die Struktur der Steckbriefe soll helfen, eine Vergleichbarkeit zum Referenzfall „rheinisches Braunkohlenrevier“ herzustellen. Ein Steckbrief besteht aus fünf mit Farben hinterlegten Blöcken:

- Block 1 – weiß: Allgemeine Informationen;
- Block 2 – rot: Mensch und Umwelt;
- Block 3 – braun: Geologie und Hydrogeologie;
- Block 4 – blau: Datengrundlage;
- Block 5 – grün: Prognoserechnungen.

Im ersten Block werden zunächst allgemeine Informationen zur geographischen Lage und Ausdehnung aufgeführt. Der zweite Block „Mensch und Umwelt“ geht auf die Ursachen, die Folgen und die Bedeutung der Bodenbewegung ein. Im Block „Geologie und Hydrogeologie“ wird auf die geologischen Gegebenheiten eingegangen. Wesentliche Information dieses Blocks sind die Ausdehnung in die Tiefe und das Material. Der vierte Block widmet sich der Datengrundlage. Der letzte Block erläutert, ob Prognoseberechnungen ausgeführt wurden und welche Methoden und Modelle verwendet wurden. In diesem Block wird auch auf Methoden zur Bodenbewegungsprognose in Kapitel 6 verwiesen.

## 5.2 Referenzfall: Rheinisches Braunkohlenrevier

Die Prognose von Bodenbewegungen im rheinischen Braunkohlenrevier ist die Veranlassung der vorliegenden Studie. Darum wird das Fallbeispiel „rheinisches Braunkohlenrevier“ als Referenzfall für andere Fallbeispiele verwendet. Die (hydro)geologischen Gegebenheiten sind bereits in Abschnitt 2.2 erläutert, und bisher durchgeführte Untersuchungen sind bereits in Abschnitt 2.3 zusammengefasst.

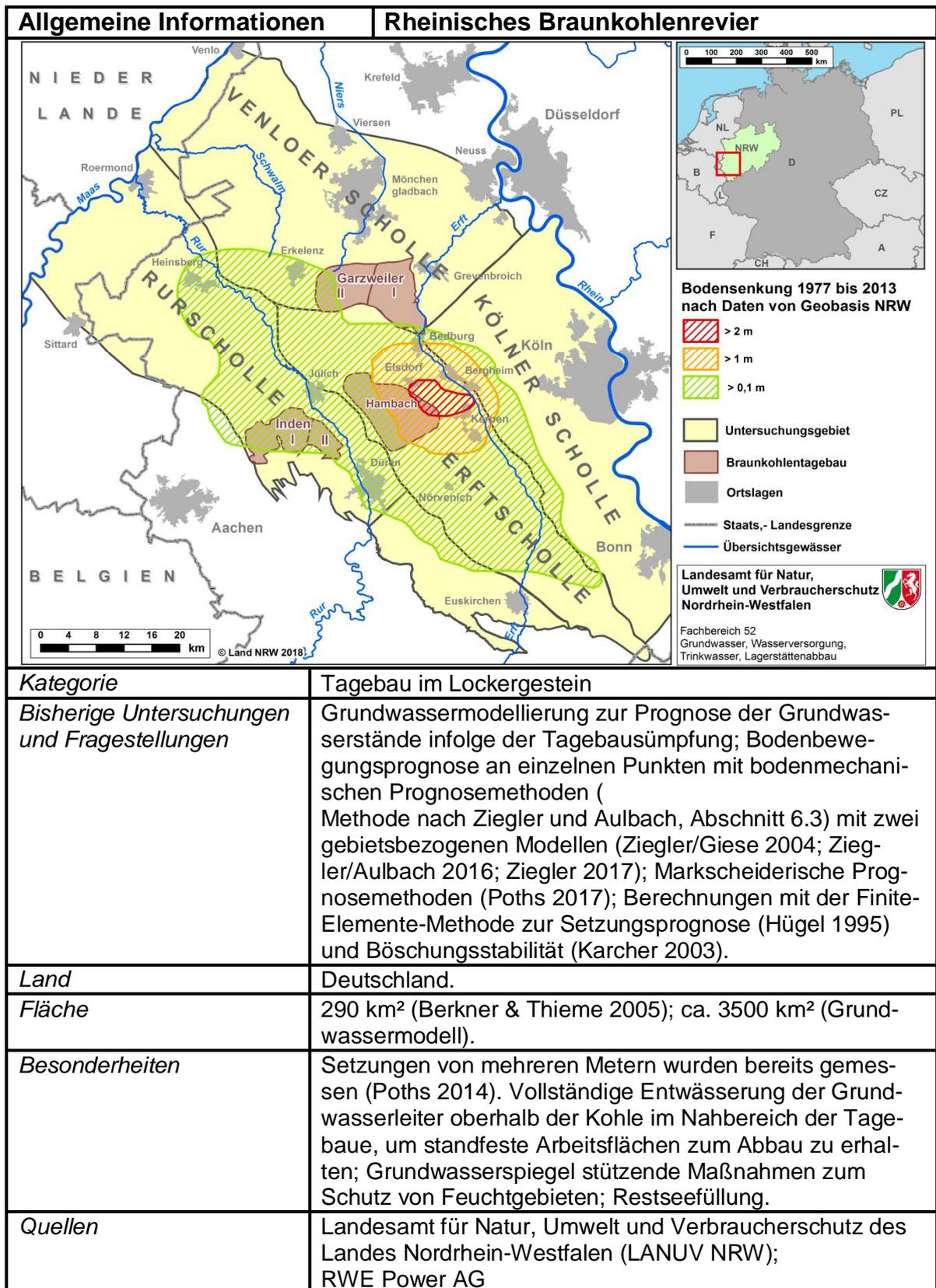
Zur Bodenbewegungsprognose setzt man auf die Modellierung von einzelnen eindimensionalen Bodenprofilen. Diese punktuellen Prognosen sollen dann mit Hilfe von Interpolationsverfahren in die Fläche übertragen werden. Die in Abschnitt 6.3 erläuterte Methode nach Ziegler und Aulbach wurde für diesen Fall entwickelt. Momentan werden mit der Methode nach Ziegler und Aulbach Bodenbewegungsprognosen für ausgewählte Punkte im Modellgebiet erstellt. Es existieren zwei geotechnische Modelle, die auf der Methode von Ziegler und Aulbach beruhen: Das erste soll hier „Ziegler/Giese 2004“ genannt werden, das zweite heißt „Ziegler/Aulbach 2016“ und stellt eine Überarbeitung des ersten dar. Beide Modelle sind als gebietsbezogene Modelle zu verstehen und repräsentieren mehrere einzelne Punkte im rheinischen Braunkohlenrevier. Ein wesentlicher Unterschied der beiden Varianten aus den Jahren 2004 und 2016 ist, dass das Modell Ziegler/Giese 2004 für jede hydrogeologische Einheit (Scholle) einen einheitlichen bodenmechanischen Datensatz je Schicht annimmt. In der Praxis hat sich das als zu ungenau erwiesen und zu einer Überarbeitung hin zum Modell Ziegler/Aulbach 2016 geführt. In dieser Variante ist für jedes geologische Profil ein eigener Datensatz zugelassen (Ziegler 2017). Somit wird für jedes Schichtenprofil eine eigene Kalibrierung der bodenmechanischen Parameter erforderlich.

Berechnungen der Bodenbewegung sind auch mit Finite-Elemente-Methoden durchgeführt worden (Karcher 2003; Hügel 1995), dann allerdings mit anderen Zielsetzungen. Auch markscheiderische Prognosemethoden werden im Rheinischen Braunkohlenrevier mit guten Erfahrungen angewendet (Abschnitt 6.9), diese Methoden sind jedoch nicht in allen Bereichen anwendbar, da die nachlaufende Konsolidierung mit Hilfe statistischer Verfahren bisher nicht wiedergegeben werden kann.

Hinsichtlich der bodenmechanischen Prozesse weist das Rheinische Braunkohlenrevier folgende Besonderheiten auf:

- Tagebaue erreichen Tiefen von über 450 m (Tagebau Hambach 465 m). Die Grundwasserabsenkung im Zusammenhang mit Braunkohlenabbau erfolgt in ähnliche Tiefen und ist damit vergleichsweise groß. Auch Schichten unterhalb der Tagebausohle werden durch Sumpfungmaßnahmen hydraulisch druckentlastet, um ein Aufbrechen der Sohle zu verhindern.
- Obere Grundwasser leitende Schichten von großer Mächtigkeit fallen durch die Sumpfungmaßnahmen im Nahbereich vollständig trocken.
- Grundwasser stauende Schichten (Ton, Braunkohle) können Mächtigkeiten bis zu 70 m erreichen. Durch die Sumpfungmaßnahmen konsolidieren diese Schichten. Der Konsolidierungsprozess läuft wegen der großen Mächtigkeiten und den niedrigen Durchlässigkeiten der Aquitarde sehr langsam ab. Bei Einsetzen des Grundwasserwiederanstiegs sind die Grundwasserstauer nicht unbedingt auskonsolidiert. Es können den Sumpfungmaßnahmen nachlaufende Setzungen entstehen.
- Ein Rückgang der Grundwasserabsenkung, das heißt ein Grundwasseranstieg, ist großräumig geplant und hat in Bereichen der bereits abgeschlossenen Tagebaue bereits begonnen.

- Nicht nur Setzungen, sondern auch Hebungen werden erwartet oder sind bereits aufgetreten.
- Die Grundwasserabsenkung hat im Großen und Ganzen ihren Großteil erreicht oder ist zum Teil bereits durchlaufen. Entsprechend ist auch ein Großteil der Setzungen bereits eingetreten. Es werden überwiegend nur noch Restsetzungen in geringerem Umfang erwartet. Hebungen sind bisher lediglich stellenweise dokumentiert. (Forkel 2017a)
- Großräumige Grundwasserabsenkung (ca. 1955 bis 2045) und -wiederanstieg (2045 bis 2100) erstrecken sich über einen großen Zeitraum (50 bis 100 Jahre). Mit einem stationären Strömungsfeld ist erst ca. 2200 zu rechnen.
- Im Untersuchungsgebiet liegen mehrere Tagebaue, von denen einige bereits abgeschlossen sind, während die drei Tagebaue Hambach, Inden und Garzweiler noch aktiv sind. Die Sumpfungsmaßnahmen beeinflussen sich mittelbar über die Schollenrandstörungen (Becker et al. 2008).
- Das Einzugsgebiet ist mit ca. 3500 km<sup>2</sup> vergleichsweise groß.
- Der Schichtaufbau mit einer Wechselfolge von zum Teil mehr als 20 gering und gut durchlässigen Schichten ist relativ komplex.
- Lokale geologische Verhältnisse können zu ungleichmäßigen Setzungen führen. Dies sind z. B. beeinflusste humose Aueböden und bewegungsaktive Störungen.
- Die geologischen Einheiten Erftscholle, Rurscholle und Venloer Scholle und Kölner Scholle unterscheiden sich hinsichtlich des Schichtaufbaus und der Geologie. Die bindigen Schichten erreichen in der Erftscholle die größten Mächtigkeiten, so dass das Phänomen der nachlaufenden Setzungen vor allem die Erftscholle betrifft. (Forkel 2017a)



<b>Mensch und Umwelt</b>	<b>Rheinisches Braunkohlenrevier</b>
<i>Ursachen der Bodenbewegung</i>	Setzungen infolge von Tagebausümpfung, Hebungen infolge des Grundwasserwiederanstiegs nach Ende des Tagebaubetriebs.
<i>Folgen</i>	Großflächige Grundwasserabsenkung (Druckentspannung und teils Trockenfallen) über mehrere Jahrzehnte. Großflächige gleichförmige Setzungen um bis zu mehrere Meter, die bei Wiederanstieg des Grundwassers anteilig reversibel sind.
<i>Bedeutung und Problemstellung</i>	Schäden infolge ungleichförmiger Setzungen. Bei Grundwasserwiederanstieg besteht die Möglichkeit, dass sich im Vergleich zum vorbergbaulichen Zustand geringere Flurabstände bis hin zu Vernässungen einstellen.
<i>Zeitraum der Anthropogenen Einwirkungen</i>	Beginn der Braunkohlenindustrie 1890 bis 1905; seit 1954 Einsatz von Schaufelradbaggern in Großtagebauen, seit 1955 Beginn der weiträumigen Grundwassersümpfung.
<i>Stakeholder</i>	Anwohner, Städte und Gemeinden; Industrie und Gewerbe; Bergbaubetreiber; Wasserverbände; Naturräume.

<b>Geologie und Hydrogeologie</b>	<b>Rheinisches Braunkohlenrevier</b>
<i>Material (Lockergestein, Fels)</i>	Lockergestein; Schichten aus Kiesen, Sanden, Ton und Braunkohle in Wechsellagerung von bis zu 20 mächtigen Schichten.
<i>Tiefe</i>	Tiefe des Schichtenprofils bis 1500 Meter unter Geländeroberkante; Grundwasserabsenkungen bis zu 500 Meter unter Geländeroberkante.
<i>Besonderheiten</i>	Mehrere tektonische Einheiten (Erftscholle, Venloer Scholle, Rurscholle, Kölner Scholle); ihre Grenzen sind die sogenannten Schollenrandstörungen.

<b>Datengrundlage</b>	<b>Rheinisches Braunkohlenrevier</b>
<i>Geologische Daten</i>	Bohrdaten und Bodenprofile, geologische 3D-Modelle (Geologischer Dienst Nordrhein-Westfalen)
<i>Messungen der Bodenbewegung</i>	Leitnivellement an der Oberfläche (behördliches Grundlagennetz); Vermessung im Zuge des Bergbaus an 200 000 Punkten (Poths 2017); Bodenmechanische Laborversuche (Giese 2010).
<i>Messungen Grundwasserstand</i>	Weiträumiges Netz an Grundwassermessstellen, in verschiedenen Horizonten verfiltert.
<i>Anfangsbedingungen Bodenmechanik</i>	Historische Messungen für einzelne Punkte mit der Annahme eines weitgehend unbeeinflussten Zustands im Jahre 1955.
<i>Anfangsbedingungen Hydrogeologie</i>	Situation 1970 bzw. 1975 als Startbedingung für Grundwassermodellierung.
<i>Bestimmung der Bodenparameter</i>	Kalibrierung im Rahmen von Vertrauensbereichen, die über Literaturwerte, Laborexperimente und Extensiometerbestimmungen für einen Einzelpunkt definiert wurden.
<i>Besonderheiten</i>	Keine.

<b>Prognoserechnungen</b>	<b>Rheinisches Braunkohlenrevier</b>
<i>Methoden Bodenbewegungsprognose</i>	Ziegler/Giese 2004, Ziegler und Aulbach, 2016 (vgl. Kap. 6.3); Markscheiderische Methoden.
<i>Methoden Grundwasserströmungsprognose</i>	Verschiedene Grundwassermodelle: FEFLOW-Model (LANUV); GW3 (RWE).
<i>Auflösung Bodenbewegungsmo- dell</i>	Mehrere Bodensäulen im Untersuchungsgebiet, bedarfsorientierte Punktdichte, ca. 1 Punkt pro 40 km <sup>2</sup> (Erftscholle).
<i>Flächenhafte Information zu Bodenbewegungen</i>	Interpolation erforderlich z. B. nach der markscheiderischen Methode (vgl. Abschnitt 6.9; Interpolation unter Zuhilfenahme punktueller Messdaten an Leitnivellement-Punkten
<i>Erfahrungswerte, Ausblick, Forschungs- und Entwicklungsbedarf</i>	Ggf. Einbezug von Kriechprozessen.
<i>Wurden Hebungen berechnet?</i>	Ja; auch Kalibrierung auf Hebungen.
<i>Besonderheiten</i>	Eigenentwicklung eines Prognosewerkzeugs speziell für den vorliegenden Anwendungsfall.

### 5.3 Kategorie: Tagebau im Lockergestein

#### 5.3.1 Mitteldeutsches und Lausitzer Braunkohlenrevier

Neben dem Rheinischen Revier gibt es in Deutschland weitere Braunkohlenreviere, in denen ähnliche Fragestellungen wie im Referenzfall auftreten könnten. Um die Vergleichbarkeit der Reviere zueinander einschätzen zu können, werden hier das Mitteldeutsche und Lausitzer Braunkohlenrevier vorgestellt. Das Lausitzer Braunkohlenrevier erstreckt sich über den Südosten Brandenburgs und Nordosten Sachsens, die Tagebaue des Mitteldeutschen Braunkohlenreviers liegen im Nordwesten von Sachsen und im Osten von Sachsen-Anhalt. Diese beiden Braunkohlenreviere sind räumlich voneinander getrennt, dennoch sollen sie hier in einem Steckbrief zusammengefasst werden.

So wie im Rheinischen Braunkohlenrevier, wo die drei geologischen Einheiten Rurscholle, Venloer Scholle und Erftscholle sich hinsichtlich der Geologie sehr deutlich voneinander unterscheiden, weisen das Lausitzer und das Mitteldeutsche Braunkohlenrevier eine große lokale Varietät auf. Bis in die 1990er Jahre gab es in beiden Revieren jeweils wesentlich mehr Tagebaue in Betrieb als im Rheinischen Braunkohlenrevier.

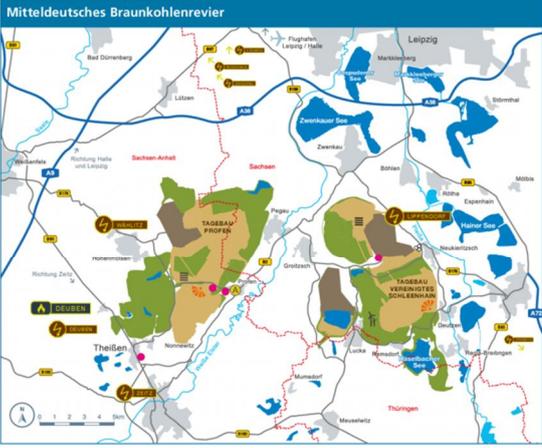
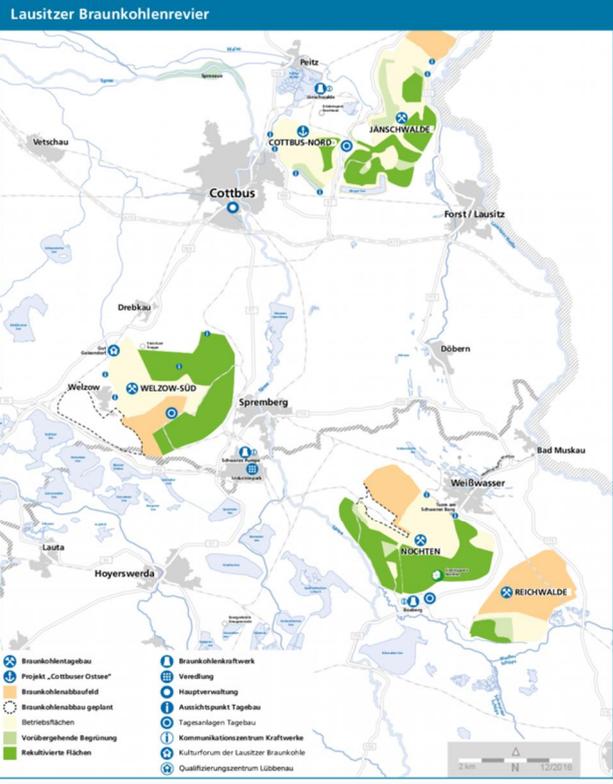
Das Mitteldeutsche und das Lausitzer Braunkohlenrevier liegen im Gebiet der ehemaligen DDR und haben entsprechend eine andere Historie als das Rheinische Braunkohlenrevier. Im Zuge der Wiedervereinigung Deutschlands wurde die Planung des Tagebaubetriebs ab 1990 wesentlich geändert mit dem Ergebnis, dass ein Großteil der Tagebaue kurz nach der Wiedervereinigung stillgelegt wurde. Zwar sind noch einige Tagebaue in Betrieb, im Wesentlichen sind Grundwasserwiederanstieg und Restseebefüllung aber weitgehend abgeschlossen.

Hinsichtlich der Tagebaue selbst liegen die Unterschiede zum Rheinischen Revier in der Tiefe der Tagebaue. So sind die Leipziger Tagebaue etwa 50 bis 60 m tief (Schade 2017). Damit geht der Einfluss der Tagebausümpfung nicht so tief wie im Rheinischen Braunkohlenrevier und erreicht auch nicht eine so große horizontale Ausdehnung. In einigen Fällen können sogar Dichtwände eingesetzt werden, was im Rheinischen Braunkohlenrevier wegen der Tiefen bis zu 350 Metern nicht möglich ist.

Hinsichtlich der Geologie gibt es im Lausitzer und im Mitteldeutschen Revier im Vergleich zum Rheinischen Braunkohlenrevier weniger Störungen. Bindige Lagen nehmen hinsichtlich der Mächtigkeit nicht die Ausmaße an wie im Rheinischen Braunkohlenrevier. Die Validierung der Korrelation zwischen Grundwasserstandsänderung und Bodenbewegungen (Lieske & Schade 2016) zeigt, dass nachlaufende Setzungen infolge Konsolidierung nicht in dem Maße auftreten wie im Rheinischen Braunkohlenrevier.

Was die Bodenbewegungen angeht, liegen die Setzungen im Dezimeterbereich (Schade 2017) und sind damit wesentlich kleiner als im Rheinischen Braunkohlenrevier, wo die Setzungen mehrere Meter erreichen können. Hebungen erreichen Werte unter einem Dezimeter und wurden bisher nur in unmittelbarer Tagebaunähe beobachtet.

Zur Prognose der Hebungen wurde ein auf Korrelation basierendes Verfahren verwendet (markscheiderische Methode, Lieske & Schade 2016). Die damit erstellten Prognosen konnten validiert werden.

Allgemeine Informationen	Mitteldeutsches und Lausitzer Braunkohlenrevier
	
<i>Kategorie</i>	Tagebau im Lockergestein
<i>Bisherige Untersuchungen und Fragestellungen</i>	Entwicklung der Grundwasserstände infolge der Tagebausümpfung und Grundwasserwiederanstieg (Grundwassermodellierung); Maßnahmenplanung zum Schutz von Gebäuden vor Vernässung (z.B. Grundwasserstandsregulierung), Bodenbewegungsprognose an einzelnen Punkten (Wolkersdorfer & Thiem 1998, publiziert in anonymisierter Form), Untersuchungen zur Korrelation zwischen Grundwasserwiederanstieg und Hebungen (Lieske & Schade 2016)
<i>Land</i>	Deutschland
<i>Fläche</i>	Mitteldeutsches Revier: 477 km <sup>2</sup> ; Lausitzer Revier: 814 km <sup>2</sup> (Berkner & Thieme 2005).
<i>Besonderheiten</i>	Mit der Wiedervereinigung Deutschlands änderten sich die politischen und wirtschaftlichen Verhältnisse. Tagebaue wurden schneller still gelegt als geplant. Zur Unterstützung der Maßnahmenplanung zur Sicherung von Gebäuden und Infrastruktur wurden Grundwassermodelle eingesetzt. Der Grundwasserwiederanstieg ist noch nicht vollständig abgeschlossen.
<i>Quellen</i>	Berkner & Thieme 2005; Wolkersdorfer & Thieme 1998; Wendler 2006.

<b>Mensch und Umwelt</b>	<b>Mitteldeutsches und Lausitzer Braunkohlenrevier</b>
<i>Ursachen der Bodenbewegung</i>	Setzungen infolge von Tagebausümpfung, Hebungen infolge des Grundwasserwiederanstiegs seit Stilllegung von Tagebauen und Restseefüllung.
<i>Folgen</i>	Irreversible Anteile aufgrund von durch Grundwasserspiegelabsenkungen erfolgter Setzungen führen zu Schäden an Gebäuden und zu Vernässungen (Berkner & Thieme 2005). Dies betrifft Gebäude, die auf sogenannten Muddesubstraten (organische, torfartige Ablagerungen) gegründet sind.
<i>Bedeutung und Problemstellung</i>	Maßnahmenplanung zur Vermeidung von Schäden und Vernässungen am einzelnen Objekt (Delitzsch) oder für gesamte Gebiete (Hoyerswerda). Schäden und Vernässungen entstehen sowohl infolge von Planungsfehler bei Neubauten (Nichtberücksichtigung der vorbergbaulichen Wasserstände bei der Planung), als auch durch irreversiblen Setzungen infolge der Sümpfungsmaßnahmen.
<i>Zeitraum der Anthropogenen Einwirkungen</i>	Beginn der Braunkohleindustrie im 19. Jahrhundert, mit Entwässerung im großen Stil seit den 1960er Jahren; Stilllegung eines Großteils der Tagebaue in den 1990er Jahren, seitdem Rückgang der Entnahmen und Füllung der Restseen.
<i>Stakeholder:</i>	Anwohner, Städte und Gemeinden; Industrie und Gewerbe; Wasserverbände.

<b>Geologie und Hydrogeologie</b>	<b>Mitteldeutsches und Lausitzer Braunkohlenrevier</b>
<i>Material (Lockergestein, Fels)</i>	Lockergestein; Schichten aus Kiesen, Sanden, Ton und Braunkohle in Wechsellagerung von bis zu 100 m mächtigen Schichten (Walther 2002).
<i>Tiefe</i>	Grundwasserabsenkungen bis zu 100 Meter unter Geländeoberkante.
<i>Besonderheiten</i>	Restseen mit großem Einfluss auf den Grundwasserhaushalt; Graben- und Rinnenstrukturen, Störungen.

<b>Datengrundlage</b>	<b>Mitteldeutsches und Lausitzer Braunkohlenrevier</b>
<i>Geologische Daten</i>	Geologischer Schnitt (Wolkersdorfer & Thiem 1998)
<i>Messungen der Bodenbewegung</i>	Feinnivellement (Lieske & Schade 2016)
<i>Messungen Grundwasserstand</i>	Grundwassermessstellen, in verschiedenen Horizonten verfiltert.
<i>Anfangsbedingungen Bodenmechanik</i>	Höhenlagen 1960er Jahre (Wolkersdorfer & Thiem 1998).
<i>Anfangsbedingungen Hydrogeologie</i>	Grundwasserstand 1960er Jahre (Wolkersdorfer & Thiem 1998).
<i>Bestimmung der Bodenparameter</i>	Variation der Parameter innerhalb von Vertrauensbereichen zur Ableitung der Bandbreite (Wolkersdorfer & Thiem 1998).
<i>Besonderheiten</i>	Keine.

<b>Prognoserechnungen</b>	<b>Mitteldeutsches und Lausitzer Braunkohlenrevier</b>
<i>Methoden Bodenbewegungsprognose</i>	Berechnung der Setzung infolge Reduktion der Auftriebskräfte und der damit verbundenen Spannungserhöhung für mehrere Schichten (Wolkersdorfer & Thiem 1998). Korrelation zwischen Grundwasserwiederanstieg und Hebung (Lieske & Schade 2016).
<i>Methoden Grundwasserströmungsprognose</i>	Wolkersdorfer & Thiem 1998: Gemessene Grundwasserstände; es existieren auch Grundwassermodelle für verschiedene Teilgebiete: PCGEOFIM (IBGW Leipzig 2018)
<i>Auflösung Bodenbewegungsmodell</i>	Wolkersdorfer & Thiem 1998: Einzelner Punkt Lieske & Schade 2016: Einzelne Punkte in der Nähe von Restseen.
<i>Flächenhafte Information zu Bodenbewegung</i>	Lieske & Schade 2016: interpolierte Höhenänderungen auf Basis des Leitnivelements.
<i>Erfahrungswerte, Ausblick, Forschungs- und Entwicklungsbedarf</i>	Tagebaubetrieb und Restseebefüllung sind derzeit weitgehend abgeschlossen. Korrelation zwischen Hebung und Grundwasseranstieg bestätigt (Lieske & Schade 2016)
<i>Wurden Hebungen berechnet?</i>	Ja. (Lieske & Schade 2016)
<i>Besonderheiten</i>	Korrelation des Hebungsprozess mit dem Grundwasserwiederanstieg

## 5.4 Kategorie: Bergbau im Festgestein

### 5.4.1 Steinkohlenbergbau in Deutschland

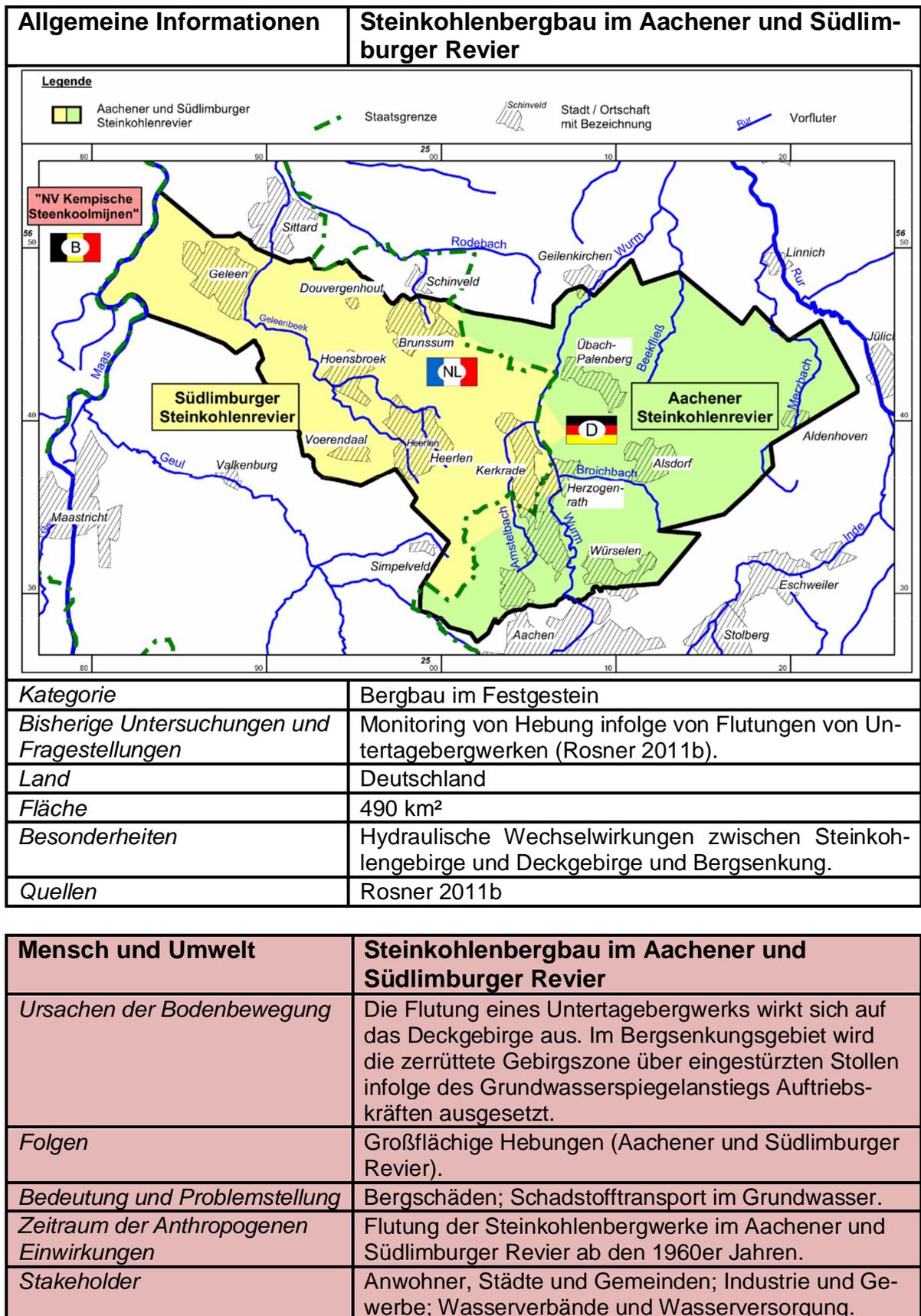
Auch im deutschen Steinkohlenbergbau sind umfangreiche Wasserhaltungsmaßnahmen durchgeführt worden. Der Betrieb der meisten Bergwerke ist bereits abgeschlossen, und die (Teil-)Flutung der Bergwerke wurde eingesetzt. Anders als beim Braunkohlenabbau erfolgte der Steinkohlenbergbau unter Tage. Die Bergwerke erreichten viel größere Tiefen und liegen im Festgestein. Entsprechend richten sich die Wasserhaltungsmaßnahmen auf die tief liegenden Grundwasserstockwerke. An der Oberfläche sichtbare Bodenbewegungen aus Steinkohlenbergbau sind vor allem sogenannte Bergsenkungen, die infolge einstürzender Stollen entstehen und damit vor allem im Zusammenhang mit einer Materialentnahme stehen. Die Bergsenkungen folgen dem Bergwerk und sind hinsichtlich der Lage daher gut vorhersehbar.

Bodenhebungen infolge einer Flutung eines Steinkohlenbergwerks entstehen aus den Auftriebskräften, die mit dem Wasseranstieg auf das verbrochene Steinkohlengestein wirken. Wenn die Flutung eines Bergwerks das Deckgebirge aus Lockergestein erreicht, können hydraulische Wechselwirkungen mit dem Deckgebirge entstehen, was wieder zusätzliche Hebungen hervorrufen kann. Wechselwirkungen mit dem Deckgebirge entstehen zum Beispiel bei Störungen. (Rosner 2011a)

Hebungen im Zusammenhang mit Flutung von Steinkohlenbergwerken sind in mehreren deutschen Steinkohlenbergbaugebieten beobachtet worden (Fenk & Tzscharschuch 2007), unter anderem im Ruhrgebiet (Vosen & Rosner 2014; Fenk & Tzscharschuch 2007) und im Aachener und Südlimburger Revier. Mit einer Dissertation zu dem Thema (Rosner 2011a) ist das Aachener und Südlimburger Revier am besten dokumentiert. Stellvertretend für den deutschen Steinkohlenbergbau wird der Steckbrief daher für das Aachener und Südlimburger Revier ausgefüllt.

Obwohl sich das Aachener und Südlimburger Steinkohlenrevier teilweise im Rheinischen Braunkohlenrevier befindet, sind diese beiden Fälle nur bedingt miteinander vergleichbar. Die Steinkohlenbergwerke liegen im Festgestein, und für das Felsmaterial des Steinkohlenbergwerks gelten andere, oft einfachere Stoffgesetze als für die Lockergesteinsschichten aus Kies, Sand, Ton und Braunkohle, die den Braunkohlentagebau umgeben. Das Dehnungsverhalten von gebrochenem Fels kann mit linear-elastischen Stoffgesetzen beschrieben werden, während für Lockergesteinsschichten andere Zusammenhänge gelten, insbesondere für das bindige Material. Gebrochener Fels ist gut durchlässig, eine Zeitabhängigkeit der Konsolidierung wird daher in der Regel vernachlässigt. Erreicht das Grubenwasser das Deckgebirge, dann spielen jedoch dieselben Prozesse wie im Lockergestein eine Rolle. Es sind bisher vergleichsweise wenige Studien veröffentlicht, in denen Bodenbewegungen infolge Flutung eines Steinkohlenbergwerks durchgeführt wurden (z. B. Fenk & Tzscharschuch 2007). Die Übertragung der Berechnungsmethoden auf Lockergestein wurde vorgeschlagen (Fenk 2008), ist aber aus den oben genannten Gründen für das Rheinische Braunkohlenrevier nur eingeschränkt möglich.

Methoden zur Bodenbewegungsprognose für das Aachener und Südlimburger Steinkohlenbergbaurevier wären vorhanden, sind aber bisher nicht durchgeführt worden. Aus diesem Grund entfällt der Block „Prognose“ im Steckbrief.



<b>Geologie und Hydrogeologie</b>	<b>Steinkohlenbergbau im Aachener und Südlimburger Revier</b>
<i>Material (Lockergestein, Fels)</i>	Fels, Bergsenkungsgebiet; Deckgebirge aus Lockergestein.
<i>Tiefe</i>	Grundwasserabsenkungen um bis zu 600 Meter im basalen Deckgebirge; Deckschichtmächtigkeit bis 700 Meter.
<i>Besonderheiten</i>	Keine.

<b>Datengrundlage</b>	<b>Steinkohlenbergbau im Aachener und Südlimburger Revier</b>
<i>Geologische Daten</i>	Verschiedene Bohrprofile und geologische Schnitte (siehe z.B. Rosner 2011b, 2011a)
<i>Messungen der Bodenbewegung</i>	Messungen an Festpunkten des Leitnivelements, in die Fläche interpoliert (Heitmann et al. 2012); Anzahl der Festpunkte und Interpolationsmethode unbekannt.
<i>Messungen Grundwasserstand</i>	Grundwassermessstellen, in verschiedenen Horizonten verfiltert; vier tiefe Grundwassermessstellen bis in die basalen Deckgebirgsschichten.
<i>Anfangsbedingungen Bodenmechanik</i>	Entfällt.
<i>Anfangsbedingungen Hydrogeologie</i>	Anfang 1970er Jahre.
<i>Bestimmung der Bodenparameter</i>	Entfällt.
<i>Besonderheiten</i>	Keine.

## 5.5 Kategorie: Andere Fälle von Bodenbewegungen infolge von Grundwasserstandsänderungen

### 5.5.1 Jakarta (Indonesien)

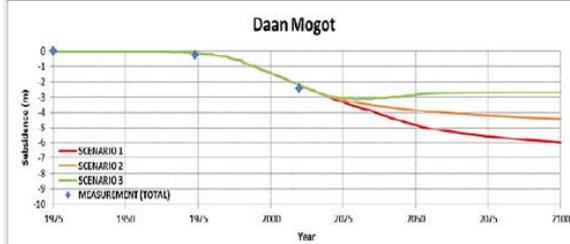
Jakarta ist die Hauptstadt von Indonesien, hat mehr als neun Millionen Einwohner und ist damit die größte Stadt Südostasiens. Grundwasserentnahmen zur Wasserversorgung von Haushalten und Industrie haben seit den 1950er Jahren eine Absenkung des Grundwasserspiegels um bis zu 50 m bewirkt. Damit verbunden sind Geländesetzungen, die zunächst ein Potenzial für Schäden an Gebäuden darstellen, aber auch das Überflutungsrisiko aus dem Meer und den Oberflächengewässern erhöht.

Für Jakarta wurden Bodenbewegungsprognosen an einzelnen Punkten berechnet, ähnlich wie es derzeit im Referenzfall des Rheinischen Braunkohlenreviers ausgeführt wird. Dazu wurde das Programm D-Settlement (Abschnitt 6.4) verwendet. Es wurden gemessene Grundwasserstandsganglinien und Ganglinien aus Berechnungen mit einem MODFLOW-Grundwassermodell verwendet. Ziel der Untersuchung war, eine Strategie zur Begrenzung der Setzungen zu entwickeln. Zunächst kam es darauf an, die Beteiligten über die Prozesse und Zusammenhänge zu informieren. Der Schwerpunkt lag also mehr auf einer Abwägung von alternativen Grundwasserbewirtschaftungsstrategien und der Transparenz der Prozesse, als auf einer quantitativen Prognose. Eine Übertragung der Ergebnisse in die Fläche mit Hilfe von Interpolationen wurde nicht durchgeführt, da die Datenlage hierfür angesichts der Komplexität als nicht ausreichend eingestuft wurde.

Das Untersuchungsgebiet ist mit ca. 300 km<sup>2</sup> kleiner als das Rheinische Braunkohlenrevier. Beim Material handelt es sich um alluviale und marine Tonsedimente mit Sandlinsen.

Hebungen wurden im Zuge der Szenarien berechnet. Messungen von Hebungen gibt es momentan noch nicht, da bisher noch kein Anstieg des Grundwassers aufgetreten ist. Wie in den anderen Fällen dieser Kategorie ist auch hier keine vollständige Entwässerung von Grundwasserleitern erfolgt.

Im Zuge der Berechnungen wurden auch Untersuchungen zum Einfluss des Kriechens vorgenommen (Kooi & Trysa 2015).

Allgemeine Informationen	Jakarta (Indonesien)
	 <p data-bbox="879 645 1425 712">Setzungsprognose für Bodensäule „Daan Mogot“</p>
<p data-bbox="276 790 836 887">Karte von Jakarta mit Lage der Bodensäulen, für die die Bodenbewegung berechnet wurde.</p>	
<p data-bbox="276 896 408 927">Kategorie</p>	<p data-bbox="834 896 1382 927">Weitere Fälle der Grundwasserförderung.</p>
<p data-bbox="276 936 783 1003">Bisherige Untersuchungen und Fragestellungen</p>	<p data-bbox="834 936 1430 1066">Grundwassermodellierung; Bodenbewegungsprognose für einzelne Punkte, Szenarierechnung zur Vorbereitung von politischen Entscheidungen.</p>
<p data-bbox="276 1075 347 1106">Land</p>	<p data-bbox="834 1075 975 1106">Indonesien</p>
<p data-bbox="276 1115 368 1146">Fläche</p>	<p data-bbox="834 1115 991 1146">ca. 300 km<sup>2</sup></p>
<p data-bbox="276 1155 488 1187">Besonderheiten</p>	<p data-bbox="834 1155 1449 1214">Stakeholder-Prozesse, Analysen zum Einfluss des Bodenkriechens</p>
<p data-bbox="276 1218 379 1249">Quellen</p>	<p data-bbox="834 1218 1430 1249">Deltares 2016a; Bakr 2015; Kooi &amp; Trysa 2015.</p>

Mensch und Umwelt	Jakarta (Indonesien)
<p data-bbox="276 1332 687 1364">Ursachen der Bodenbewegung</p>	<p data-bbox="726 1332 1366 1364">Grundwasserentnahmen zur Wasserversorgung.</p>
<p data-bbox="276 1373 368 1404">Folgen</p>	<p data-bbox="726 1373 1433 1473">Grundwasserspiegel liegt bis zu 50 m unter den als natürlich angesehenen Verhältnissen, Setzungen zwischen 1 bis 25 cm/Jahr.</p>
<p data-bbox="276 1478 699 1509">Bedeutung und Problemstellung</p>	<p data-bbox="726 1478 1414 1579">Wegen Küstennähe und dichter Besiedlung steigendes Überflutungsrisiko bei Hochwasser (Fluss, Niederschlag, Küste).</p>
<p data-bbox="276 1583 660 1641">Zeitraum der Anthropogenen Einwirkungen</p>	<p data-bbox="726 1583 1302 1615">Ab ca. 1950 hohe Grundwasserentnahmen.</p>
<p data-bbox="276 1657 440 1688">Stakeholder</p>	<p data-bbox="726 1657 1430 1715">Bewohner der Stadt; Grundwasserentnehmer; Behörden.</p>

Geologie	Jakarta (Indonesien)
<p data-bbox="276 1803 671 1839">Material (Lockergestein, Fels)</p>	<p data-bbox="726 1803 1417 1904">Alluviale und marine Tonsedimente mit Sandlinsen, Wechselfolge aus vier Grundwasserstauern und vier Leitern.</p>
<p data-bbox="276 1908 347 1939">Tiefe</p>	<p data-bbox="726 1908 863 1939">ca. 250 m</p>
<p data-bbox="276 1948 488 1980">Besonderheiten</p>	<p data-bbox="726 1948 1433 1980">Tiefster Grundwasserleiter war bis ca. 1950 artesisch.</p>

<b>Datengrundlage</b>	<b>Jakarta (Indonesien)</b>
<i>Geologische Daten</i>	Daten verschiedener indonesischer Institutionen sowie Literatur.
<i>Messungen der Bodenbewegung</i>	Verschiedene Messungen; für die Modellrechnungen wurden Messungen aus 1985-1995 für einen Bodenkpunkt (Daan Mogot) verwendet.
<i>Messungen Grundwasserstand</i>	Ab 1990 an verschiedenen Grundwassermessstellen.
<i>Anfangsbedingungen Bodenmechanik</i>	1990
<i>Anfangsbedingungen Hydrogeologie</i>	1900-1920 sowie 1990-1995
<i>Bestimmung der Bodenparameter</i>	Laboruntersuchungen, Literatur, Annahmen.
<i>Besonderheiten</i>	Oberflächendrainage; Lückenhafte Datengrundlage.

<b>Prognoserechnungen</b>	<b>Jakarta (Indonesien)</b>
<i>Methoden Bodenbewegungsprognose</i>	Bodenmodell nach Bjerrum (Abschnitt 4.6.5) und Konsolidierungstheorie nach Terzaghi (4.7.1), beide implementiert in MSettle (jetzt D-Settlement, vgl. 6.4).
<i>Methoden Grundwasserströmungsprognose</i>	Finite-Differenzen-Modell (iMOD, MODFLOW), stationär für zwei Zustände; daraus Konstruktion der Grundwasserganglinien.
<i>Auflösung Bodenbewegungsmodell</i>	Einzelne Bodensäule, 3 Punkte im Untersuchungsgebiet (also ca. 1 Punkt pro 100 km <sup>2</sup> ).
<i>Flächenhafte Information zu Bodenbewegung</i>	Keine.
<i>Erfahrungswerte, Ausblick, Forschungs- und Entwicklungsbedarf</i>	Zero-policy für Grundwasserentnahmen aus tief liegendem Grundwasserleiter notwendig; signifikanter Anteil von Kriechen für die berechneten Szenarien; Modellrechnungen sind ein Hilfsmittel, um den beteiligten Akteuren die Zusammenhänge zu verdeutlichen.
<i>Wurden Hebungen berechnet?</i>	Ja (Rückgang der Setzungen in einzelnen Szenarien).
<i>Besonderheiten</i>	Einbezug der Stakeholder, um Akzeptanz für Maßnahmen zu erreichen, Berücksichtigung des Kriechens in der bodenmechanischen Modellierung.

### 5.5.2 Los Baños-Kettleman (Kalifornien)

Das Fallbeispiel „Los Baños-Kettleman“ ist ein gut dokumentierter Anwendungsfall für die Setzungsberechnungen mit MODFLOW-Paketen und eine der ersten Anwendungen von einem Zusatzmodul eines Grundwassermodells für Bodenverformungsberechnungen.

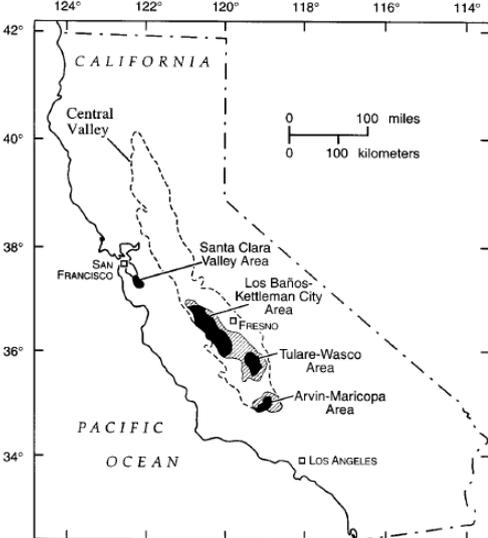
Langjährige Grundwasserentnahmen für die Landwirtschaft haben im San Joaquin Valley in Kalifornien hohe Setzungen verursacht: bereits 1969 wurden an einem Punkt Setzungen von 8,83 m (29 ft) gemessen. Von einem Wiederanstieg des Grundwassers kann bisher nicht gesprochen werden, obwohl die Grundwasserentnahmen wegen der Verfügbarkeit von alternativen Quellen für die landwirtschaftliche Bewässerung zeitweise zurückgegangen sind.

Die gewählte Berechnungsmethode ist das MODFLOW-IBS-Package, eine Methode, der ein einfaches Stoffgesetz zu Grunde liegt. So wie auch im Rheinischen Braunkohlenrevier werden die Setzungen durch Änderungen des Grundwasserstands hervorgerufen. Entsprechend wurde ein Grundwassermodell als Basis der Setzungsberechnungen gewählt. Die Bodenmechanik wird eindimensional-vertikal modelliert und damit ähnlich wie die derzeit laufenden Untersuchungen im Rheinischen Braunkohlenrevier, allerdings wird eine bodenmechanische Berechnung für jede Stützstelle des Grundwassermodells ausgeführt. Damit ist eine Interpolation in die Fläche nicht notwendig.

Das Untersuchungsgebiet liegt von der Fläche und der Tiefe her gesehen in einer ähnlichen Größenordnung wie das Rheinische Braunkohlenrevier. Die Geologie ist jedoch wesentlich einfacher: im Prinzip handelt es sich um ein System aus zwei Grundwasserleitern, die durch eine sechs bis 36 Meter mächtige Tonlage getrennt sind. Im unteren Leiter ist das sandige Leitermaterial mit Linsen aus gering durchlässigem Material durchsetzt, den sogenannten Interbeds. Diese Interbeds sind für einen Großteil der Setzungen verantwortlich. Zwar gibt es auch im Rheinischen Braunkohlenrevier Ton- und Torflinsen, jedoch spielen diese nur auf kleiner Skala eine Rolle und sollen bei der großräumigen Betrachtung nicht berücksichtigt werden.

Die Setzungsprognosen wurden mit dem Ziel ausgeführt, eine Grundwasserentnahmestrategie zu entwerfen, die möglichst wenig Setzungen hervorruft. Entsprechend liegt der Schwerpunkt der Untersuchungen nicht auf Hebungsberechnungen, wenn auch die Setzungen zeitweise zurückgehen, so dass Hebungen in geringem Umfang modelliert werden.

Weil die Setzungen infolge von Grundwasserentnahmen zur landwirtschaftlichen Wasserversorgung entstehen, fallen die Grundwasserleiter nicht vollständig trocken.

Allgemeine Informationen	Los Baños-Kettleman (Kalifornien)
	<p>Untersuchungsgebiet; schraffiert: die Lage der Setzungsgebiete (Larson et al. 2001).</p>
<i>Kategorie</i>	Weitere Fälle der Grundwasserförderung.
<i>Bisherige Untersuchungen und Fragestellungen</i>	Szenarienanalyse zur Begrenzung der Setzungen, räumliche Optimierung der Entnahmen.
<i>Land</i>	USA, Kalifornien, San Joaquin Valley
<i>Fläche</i>	1500 km <sup>2</sup>
<i>Besonderheiten</i>	Import von Oberflächenwasser zur Schonung der Grundwasservorräte und Begrenzung der Setzungen.
<i>Quellen</i>	Larson et al. 2001

Mensch und Umwelt	Los Baños-Kettleman (Kalifornien)
<i>Ursachen der Bodenbewegung</i>	Grundwasserentnahmen weit über das Grundwasserangebot hinaus.
<i>Folgen</i>	Anstieg des Überflutungsrisikos, Reduktion der Grundwasserspeicherung, Schäden an Gebäuden und Infrastruktur, Schäden an Bohrlochverrohrung, Veränderung der Bodenlage von Bewässerungskanälen, erhöhte Pumpkosten, Kosten für Einebnung von Ackerflächen.
<i>Bedeutung und Problemstellung</i>	Das Joaquin Valley ist eines der produktivsten und am intensivsten genutzten Ackerbaugebiete der Welt. Die Grundwasserförderung ist eine wichtige Versorgungsquelle für die Landwirtschaft. Die Grundwasserressourcen sind in der Vergangenheit über Gebühr beansprucht worden, mit starken Setzungen als Folge.
<i>Zeitraum der Anthropogenen Einwirkungen</i>	1920 bis heute. 1960 Beginn des Imports von Oberflächenwasser, dadurch reduzierte Grundwasserentnahmen; 1976-1977 und 1987-1993 im Zuge großer Trockenperioden wieder erhöhte Grundwasserentnahme.
<i>Stakeholder</i>	Anwohner, Städte und Gemeinden; Landwirtschaft; Umwelt.

<b>Geologie und Hydrogeologie</b>	<b>Los Baños-Kettleman (Kalifornien)</b>
<i>Material (Lockergestein, Fels)</i>	Lockergestein; Kies, Sand und Ton. Ein tiefer und ein oberflächennaher Grundwasserleiter, getrennt durch eine Tonschicht von 6 bis 36 m Mächtigkeit. Im tiefliegenden Leiter Linsen (Interbeds) mit Material von geringer Durchlässigkeit.
<i>Tiefe</i>	ca. 500 m
<i>Besonderheiten</i>	Die Konsolidierung der feinkörnigen Interbeds verursacht einen Großteil der Setzung.

<b>Datengrundlage</b>	<b>Los Baños-Kettleman (Kalifornien)</b>
<i>Geologische Daten</i>	Bohrdaten und Bodenprofile (United States Geological Survey).
<i>Messungen der Bodenbewegung</i>	Setzungsmessungen; 6 Messpunkte, in denen jeweils ein Extensiometer unterhalb der Bohrlochverrohrung angeordnet ist; aus Punktmessungen interpolierte Setzungen 1926-1972; Interpolationsmethode unbekannt
<i>Messungen Grundwasserstand</i>	19 Grundwassermessstellen
<i>Anfangsbedingungen Bodenmechanik</i>	Aus Kompaktionsmessungen; Der unbeeinflusste Grundwasserstand (preconsolidation head) wurde aus Messungen des Grundwasserstands abgeleitet (Larson et al. 2001).
<i>Anfangsbedingungen Hydrogeologie</i>	Modellergebnis 1974, mit Anfangsbedingungen von Messungen aus 1972. Diese „numerische Egalisierung“ wurde wegen hoher Gradienten in den Anfangsbedingungen notwendig, die sich fehlerhaft in die Bodenbewegungsberechnung nieder schlagen.
<i>Bestimmung der Bodenparameter</i>	Auswertung der Extensiometermessungen und anschließende Kalibrierung.
<i>Besonderheiten</i>	Keine.

<b>Prognoserechnungen</b>	<b>Los Baños-Kettleman (Kalifornien)</b>
<i>Methoden Bodenbewegungsprognose</i>	MODFLOW-Package IBS (Abschnitt 6.6.2)
<i>Methoden Grundwasserströmungsprognose</i>	MODFLOW
<i>Auflösung Bodenbewegungsmodell</i>	36 x 20 Zellen mit einer Kantenlänge von einer Meile (ca. 1,6 km).
<i>Flächenhafte Information zu Bodenbewegungen</i>	Flächenhafte Berechnung.
<i>Erfahrungswerte, Ausblick, Forschungs- und Entwicklungsbedarf</i>	Eine feinere zeitliche Auflösung wird empfohlen (jetzt: 1 Jahr). Zeitverzögerung der Konsolidierung sollte berücksichtigt werden, genannt wird in diesem Zusammenhang das MODFLOW-IDP-Package.
<i>Wurden Hebungen berechnet?</i>	Ja (Rückgang der Setzungen).
<i>Besonderheiten</i>	Gekoppelte Modellierung Grundwasserströmung und Bodenbewegung.

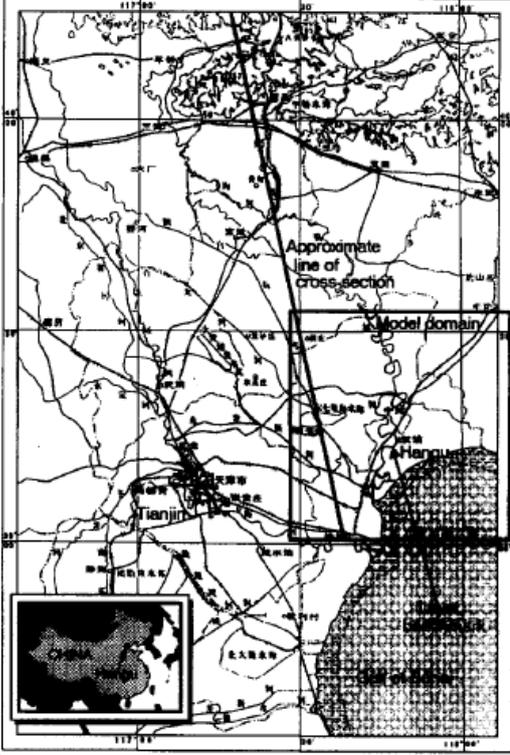
### 5.5.3 Hangu (China)

In der chinesischen Großstadt Hangu wird Grundwasser zur industriellen Wasserversorgung entnommen. Die Entnahmen sind größer als das Grundwasserdargebot, der Grundwasserstand sinkt deshalb und es kommt zu Setzungen. Hangu hat die größten Setzungen in China, im Jahr 1980 wurden bis zu 88 mm pro Jahr beobachtet. Mit den Setzungen geht ein steigendes Überflutungsrisiko mit erhöhten Kosten für Hochwasserschutz an Küsten und Fluss einher.

Das Fallbeispiel Hangu ist ein weiteres Anwendungsbeispiel für die Berechnung von Bodenbewegungen mit einem MODFLOW-Package, hier dem IDP-Package, das in Abschnitt 6.6.3 beschrieben ist. Anders als das IBS-Package kann das IDP-Package den zeitlichen Verlauf der Konsolidierung in den Interbeds, die im Grundwassermodell nicht explizit enthalten sind, modellieren. Es handelt sich also um eine flächendeckende eindimensionale Berechnung der Bodenbewegung, die an ein Grundwassermodell gekoppelt ist.

Das Modellgebiet erreicht mit einer Fläche von 3600 km<sup>2</sup> die Größenordnung des Rheinischen Braunkohlenreviers. Wesentliche Unterschiede zum Rheinischen Braunkohlenrevier bestehen hinsichtlich der Geologie: Das Material ist im Wesentlichen Ton mit eingeschlossenen Sandschichten. Vor diesem Hintergrund ist die Verwendung des Interbed-Ansatzes sinnvoll. Anders als im Rheinischen Braunkohlenrevier ist eine ausgeprägte Wechsellagerung nicht vorhanden. Dennoch können 10 Grundwasserstockwerke (aquifer units) eingeteilt werden. Das oberste Grundwasserstockwerk hat einen hohen Salzgehalt und wird deshalb nicht zur Grundwasserversorgung genutzt, die Grundwasserentnahmen konzentrieren sich deshalb auf die beiden darunter liegenden Stockwerke. Dementsprechend bildet das Modell die drei obersten Schichten bis etwa in eine Tiefe von 300 m ab.

Die Grundwasserentnahmen führen nicht zum Trockenfallen der Grundwasserstockwerke, und es wurden auch keine Hebungen modelliert.

<b>Allgemeine Informationen</b>		Hangu (China)
		<p>Modellgebiet in der Tianjin-Provinz (Shearer 1998).</p>
<i>Kategorie</i>	Weitere Fälle der Grundwasserförderung.	
<i>Bisherige Untersuchungen und Fragestellungen</i>	Extensiometermessungen, Setzungsmessungen; Prognoserechnungen.	
<i>Land</i>	China	
<i>Fläche</i>	ca. 3600 km <sup>2</sup>	
<i>Besonderheiten</i>	Keine.	
<i>Quellen</i>	Shearer 1998	
<b>Mensch</b>		<b>Hangu (China)</b>
<i>Ursachen der Bodenbewegung:</i>	Grundwasserentnahmen zur industriellen Wasserversorgung.	
<i>Folgen</i>	Hohe Setzungsraten von bis zu 88 mm pro Jahr im Jahr 1980.	
<i>Bedeutung und Problemstellung</i>	Größte Setzungen in China; Steigendes Überflutungsrisiko mit erhöhten Kosten für Hochwasserschutz an Küsten und Fluss.	
<i>Zeitraum der Anthropogenen Einwirkungen</i>	Setzungen seit ca. 1967.	
<i>Stakeholder</i>	Bewohner der Städte Hangu, Tianjin und Peking (Beijing); Petrochemische Industrie; Behörden.	
<b>Geologie</b>		<b>Hangu (China)</b>
<i>Material (Lockergestein, Fels)</i>	Ton mit Sandeinschlüssen; 5 Grundwasserleiter.	
<i>Tiefe</i>	500 m	
<i>Besonderheiten</i>	Keine.	

<b>Datengrundlage</b>	<b>Hangu (China)</b>
<i>Bohrdaten und Bodenprofile</i>	Mehrere Bohrprofile
<i>Messungen der Bodenbewegung</i>	Monitoring-Netz (weitere Angaben nicht publiziert)
<i>Messungen Grundwasserstand</i>	Nicht publiziert in der verfügbaren Quelle.
<i>Anfangsbedingungen Bodenmechanik</i>	Kalibrierungszeitraum 1957-1993.
<i>Anfangsbedingungen Hydrogeologie</i>	Kalibrierungszeitraum 1957-1993.
<i>Bestimmung der Bodenparameter</i>	Extensiometermessungen; Kalibrierung.
<i>Besonderheiten</i>	Keine.

<b>Prognoserechnungen</b>	<b>Hangu (China)</b>
<i>Methoden Bodenbewegungsprognose</i>	Modellierung mit MODFLOW-IDP (Abschnitt 6.6.3).
<i>Methoden Grundwasserströmungsprognose</i>	Instationäres Finite-Differenzen-Modell (MODFLOW). Modelliert sind drei Schichten.
<i>Auflösung Bodenbewegungsmodell</i>	Wie Grundwassermodell, variable Zellgröße. Interbed-Ansatz.
<i>Flächenhafte Information zu Bodenbewegungen</i>	Bodenbewegung wird räumlich verteilt berechnet.
<i>Erfahrungswerte, Ausblick, Forschungs- und Entwicklungsbedarf</i>	Verwendung des Interbed-Ansatzes (eingeschlossene Linsen bindigen Materials).
<i>Wurden Hebungen berechnet?</i>	Nein.
<i>Besonderheiten</i>	Gekoppelte Modellierung Grundwasserströmung und Bodenbewegung.

#### 5.5.4 Mekong-Delta (Vietnam)

Ähnlich wie in den vorangegangenen Fallbeispielen bewirken auch im Mekong-Delta Grundwasserentnahmen zur Wasserversorgung Setzungen, hier sind es Setzungsraten von mehreren Zentimetern pro Jahr. Damit verbunden ist ein steigendes Überflutungsrisiko bei Hochwasser (Fluss, Niederschlag, Küste); als besondere Problemstellungen kommen im Mekong-Delta das Risiko des Salzwassereintrags aus dem Meer in die Oberflächengewässer und das Grundwasser und die steigende Gefahr der Küstenerosion hinzu. Die Entnahmepunkte des Grundwassers liegen verteilt im Untersuchungsgebiet (Abbildung 5.1). Dies macht die Grundwasserströmungssituation relativ komplex und inhomogen und spricht dafür, ein flächendeckendes Modell der Berechnung von einzelnen Bodenprofilen vor zu ziehen.

Bodenbewegungen wurden mit dem von Deltares entwickelten MODFLOW-Package SUB-CR berechnet. SUB-CR rechnet im eindimensionalen Raum; anders als das in Abschnitt 5.5.1 verwendete Paket IBS stehen bei SUB-CR zwei bodenmechanische Kompressionsmodelle zur Verfügung. Für das Mekong-Delta wurde das ABC-Isotachen-Modell (Abschnitt 4.6.6) gewählt, weil der Prozess des Kriechens für den Fall als relevant eingestuft wurde.

Bodenbewegungen wurden flächendeckend für das gesamte Modellgebiet berechnet, mit ca. 30 000 km<sup>2</sup> ist das Modellgebiet wesentlich größer als das Rheinische Braunkohlenrevier. Es hat sieben geologische Einheiten, das Modell umfasst 15 Schichten aus Ton, Schluff, Grob- und Feinsand. Die vertikale Ausdehnung ist maximal 500 m, hinsichtlich der Tiefe erreicht das Modell nicht ganz die Ausmaße, die im Rheinischen Braunkohlenrevier vorliegen.

Auch im Mekong-Delta steht die Berechnung der Setzungen infolge von hohen Grundwasserentnahmen im Vordergrund, Hebungen infolge eines Wiederanstiegs wurden nicht berechnet, und die Schichten wurden nicht vollständig drainiert.

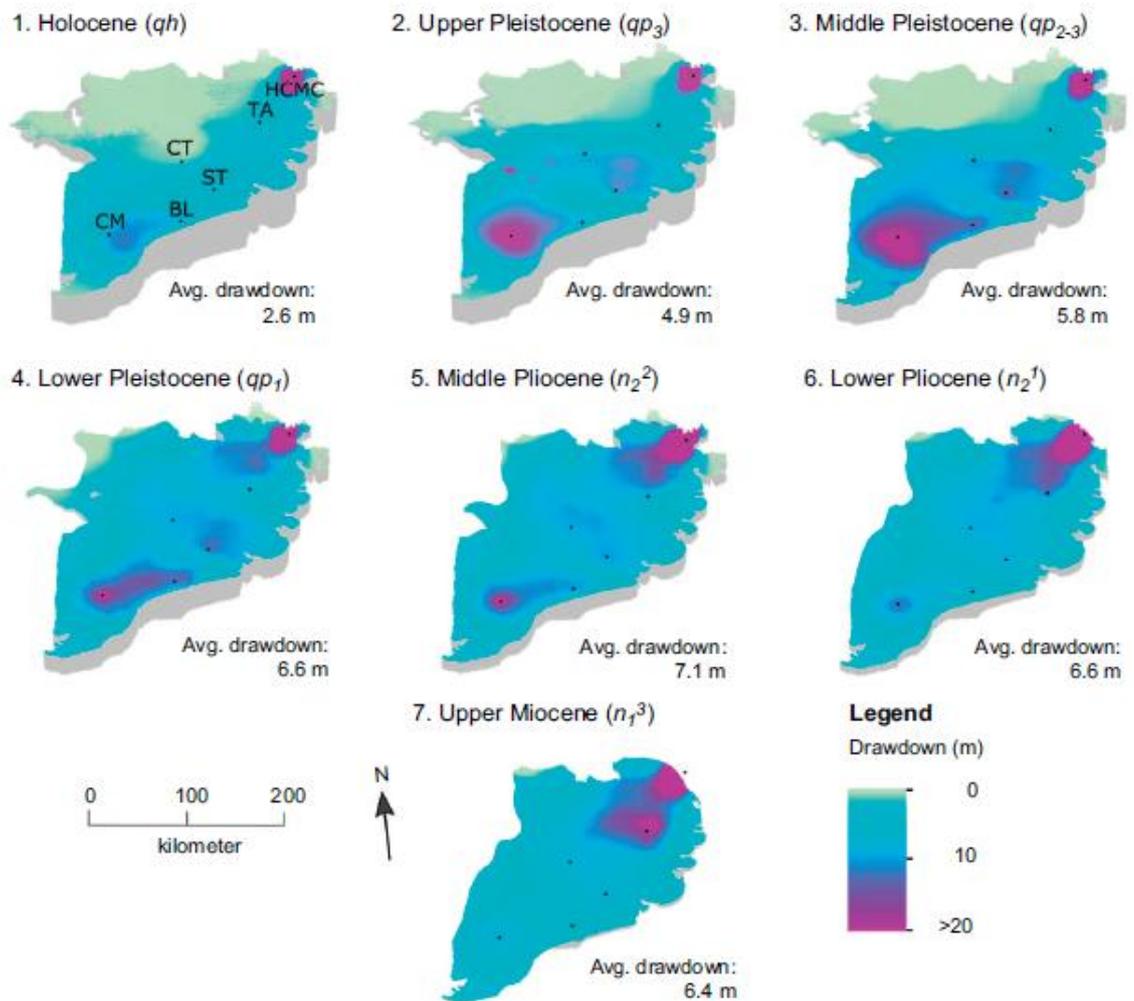
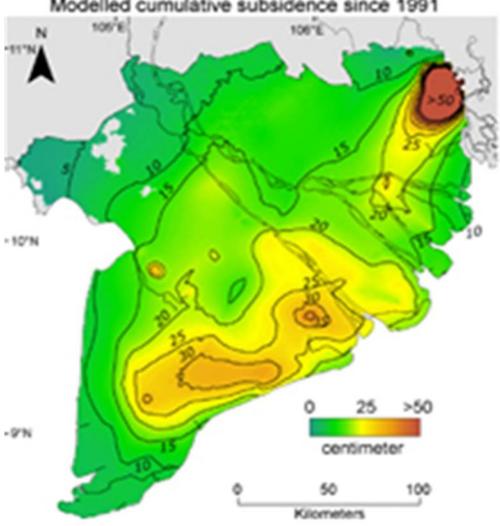


Abbildung 5.1 Entnahmetrichter in den Grundwasserleitern (Anfangsbedingung für die Simulation). Städte: BL: Bac Lieu; CM: Ca Mau; CT: Can Tho; HCMC: Ho Chi Minh City; ST: Soc Trang; TA: Tan An. Entnommen aus: Minderhoud et al. 2017.

Allgemeine Informationen	Mekong-Delta (Vietnam)
 <p data-bbox="879 824 1326 891">Modellierte kumulative Setzungen im Mekong-Delta.</p>	
<i>Kategorie</i>	Weitere Fälle der Grundwasserförderung.
<i>Bisherige Untersuchungen und Fragestellungen</i>	Gekoppelte Grundwassermodellierung und Bodenbewegungsprognose; InSAR-Messungen (Interferometric Synthetic Aperture Radar).
<i>Land</i>	Vietnam
<i>Fläche</i>	ca. 30000 km <sup>2</sup>
<i>Besonderheiten</i>	Es wurde ein Modell für das gesamte Mekong-Delta entwickelt, in dem Grundwasserströmung und Bodenbewegung gekoppelt berechnet werden. Entnahmepunkte sind im Untersuchungsgebiet verteilt.
<i>Quellen</i>	Minderhoud et al. 2017

Mensch und Umwelt	Mekong-Delta (Vietnam)
<i>Ursachen der Bodenbewegung</i>	Grundwasserentnahmen zur Wasserversorgung.
<i>Folgen</i>	Setzungsraten von mehreren Zentimetern pro Jahr.
<i>Bedeutung und Problemstellung</i>	Steigendes Überflutungsrisiko bei Hochwasser (Fluss, Niederschlag, Küste); Risiko der Salzwasserintrusion in die Oberflächengewässer und Grundwasser; Gefahr der Küstenerosion.
<i>Zeitraum der Anthropogenen Einwirkungen</i>	Ab ca. 1990 erhöhte Grundwasserentnahmen.
<i>Stakeholder</i>	Bewohner des Deltas, insbesondere Ho-Chi-Minh-Stadt; Landwirtschaft (Reisanbau für 200 Millionen Menschen); Grundwasserentnehmer; Behörden.

<b>Geologie</b>	<b>Mekong-Delta (Vietnam)</b>
<i>Material (Lockergestein, Fels)</i>	Ton, Schluff; Grob- und Feinsand; 7 Geologische Einheiten, 15 Schichten.
<i>Tiefe</i>	500 m
<i>Besonderheiten</i>	Größe des Untersuchungsgebietes.

<b>Datengrundlage</b>	<b>Mekong-Delta (Vietnam)</b>
<i>Geologische Daten</i>	95 Bohrprofile
<i>Messungen der Bodenbewegung</i>	InSAR-Messungen für Setzungsraten (2006 bis 2010).
<i>Messungen Grundwasserstand</i>	91 Messstellen; Verschiedene Datensätze zu Grundwasserentnahmen.
<i>Anfangsbedingungen Bodenmechanik</i>	1990
<i>Anfangsbedingungen Hydrogeologie</i>	1990
<i>Bestimmung der Bodenparameter</i>	Ödometerversuche, andere Studien, Kalibrierung. Sensitivitätsuntersuchungen zum Overconsolidation Ratio (OCR)
<i>Besonderheiten</i>	Oberflächendrainage; Schwache Datengrundlage, daher Anwendung von statistischen Methoden.

<b>Prognoserechnungen</b>	<b>Mekong-Delta (Vietnam)</b>
<i>Methoden Bodenbewegungsprognose:</i>	MODFLOW-SUB-CR (Kooi 2016, Minderhoud et al. 2017, Kooi et al. 2017)
<i>Methoden Grundwasserströmungsprognose</i>	Instationäres Finite-Differenzen-Modell (iMOD).
<i>Auflösung Bodenbewegungsmodell</i>	Wie Grundwassermodell, Zellengröße 1 km <sup>2</sup> .
<i>Flächenhafte Information zu Bodenbewegungen</i>	Bodenbewegung wird räumlich verteilt berechnet.
<i>Erfahrungswerte, Ausblick, Forschungs- und Entwicklungsbedarf</i>	Messungen und Monitoring der Bodenbewegung (in unterschiedlichen Tiefen) sind entscheidend.
<i>Wurden Hebungen berechnet?</i>	Nein.
<i>Besonderheiten</i>	Gekoppelte Modellierung Grundwasserströmung und Bodenbewegung, Berücksichtigung des Kriechens in der bodenmechanischen Modellierung.

### 5.5.5 Changzhou (China)

Im Bereich der Stadt Changzhou (China) wurde für die öffentliche Wasserversorgung und für die Industrie Grundwasser über das Grundwasserdargebot hinaus entnommen. Die Folge davon sind Setzungen der Landoberfläche. Das Gebiet um Changzhou ist dicht besiedelt, entsprechend besteht eine hohe Nachfrage nach Wasser, die nicht ohne weiteres reduziert werden kann, und Geländesetzungen bergen ein hohes Schadenspotential. Das Anwendungsbeispiel „Changzhou“ wurde ausgewählt, weil hier die Finite-Elemente-Methode für ein verhältnismäßig großes Modellgebiet angewendet wurde (Xu et al. 2015).

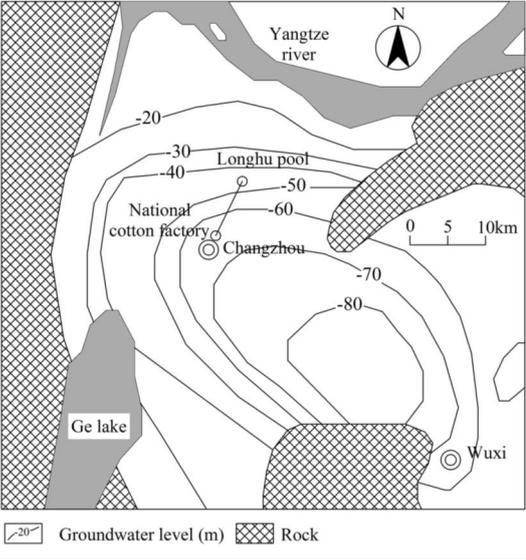
Verwendet wurde zunächst das Finite-Elemente-Programm PLAXIS (siehe Abschnitt 6.8) und ein weiteres Modell, das die sogenannte Cosserat-Kontinuumsmechanik umsetzt. Auf die Cosserat-Kontinuumsmechanik soll hier nicht weiter eingegangen werden, nur so weit, dass jeder materielle Punkt zusätzlich zur Translation in x- y- und z-Richtung auch drei Rotationsfreiheitsgrade besitzt.

Das PLAXIS-Modell deckt das Untersuchungsgebiet vollständig mit einem dreidimensionalen Modell ab. Mit einer Fläche von ca. 100 km<sup>2</sup> ist das Modellgebiet zwar wesentlich kleiner als zum Beispiel die Erftscholle mit etwa 820 km<sup>2</sup>, allerdings zeigt dieses Fallbeispiel, dass mit den Finite-Elemente-Programmen nicht nur Modellgebiete der Größenordnung eines Bauvorhabens berechnet werden können, sondern auch größere Teile der Erdoberfläche.

Neben der Dimensionalität – die Bestimmungsgleichungen werden für den dreidimensionalen Raum gelöst – geht das Modell auch hinsichtlich der Stoffgesetze sehr weit: Es werden zwei unterschiedliche Stoffgesetze für leitende und stauende Schichten angewendet, nämlich für Sande das Mohr-Coulomb-Stoffgesetz und das Soft-Soil-Modell für Tone. Die Konsolidierung ist über die vollständige Kopplung von Grundwasserströmung und Bodenmechanik in der numerischen Lösung erfasst.

Der Schichtaufbau ist, wie im Rheinischen Braunkohlenrevier, eine Wechsellagerung von Tonen und Sanden. Die Tiefe geht mit 180 m nicht so weit wie im Referenzfall, es liegen aber auch Tonschichten mit Mächtigkeiten zwischen 10 und 35 m vor, die die Wahl der eher komplexen Stoffgesetze rechtfertigen.

Die Grundwasserleiter werden nicht vollständig drainiert, denn die Entnahmen zielen auf Wasserversorgung ab und nicht auf das Trockenlegen von grundwasserführenden Schichten. Auch wurden nicht explizit Hebungen berechnet. Der Zeithorizont der Simulationen liegt mit etwa 20 Jahren auch deutlich unter dem des Rheinischen Braunkohlenreviers.

<b>Allgemeine Informationen</b>		<b>Changzhou (China)</b>	
 <p>Legend:  Groundwater level (m)  Rock</p>		<p>Untersuchungsgebiet Changzhou (Xu et al. 2015).</p>	
<b>Kategorie</b>	Weitere Fälle der Grundwasserförderung.		
<b>Bisherige Untersuchungen und Fragestellungen</b>	Messungen der Bodenbewegung, Berechnung der Bodenbewegung mit PLAXIS (Abschnitt 6.6, elasto-plastisches Stoffgesetz) und Cosserat-Modell (Xu et al. 2015).		
<b>Land</b>	China		
<b>Fläche</b>	ca. 100 km <sup>2</sup>		
<b>Besonderheiten</b>	Dichte Besiedlung, unterirdische Bauwerke wie Tunnel, tiefe Grabungen und Bautätigkeiten, Hochhäuser.		
<b>Quellen</b>	Xu et al. 2015		
<b>Mensch und Umwelt</b>		<b>Changzhou (China)</b>	
<b>Ursachen der Bodenbewegung</b>	Grundwasserentnahmen für Wasserversorgung und Industrie.		
<b>Folgen</b>	Hohe Setzungsraten von bis zu 147 mm pro Jahr, Hebungen sind bisher nicht eingetreten.		
<b>Bedeutung und Problemstellung</b>	Schäden an Gebäuden, Rückgang der Grundwasserressourcen.		
<b>Zeitraum der Anthropogenen Einwirkungen</b>	Seit etwa den 1960er Jahren hohe Grundwasserentnahmen; Maximale Setzungsrate von 147 mm pro Jahr Mitte der 1980er Jahre; 1995 starker Rückgang der Grundwasserentnahmen und Rückgang der Setzungen auf 10 mm/Jahr.		
<b>Stakeholder</b>	Anwohner, Städte und Gemeinden; Industrie; Wasserversorger.		
<b>Geologie und Hydrogeologie</b>		<b>Changzhou (China)</b>	
<b>Material (Lockergestein, Fels)</b>	Lockergestein im Delta des Yangtze (Alluvialböden); 4 Grundwasserleiter, 3 Stauer; Fels.		
<b>Tiefe</b>	120–240 m		

<i>Besonderheiten</i>	Gesetzliche Reduzierung der Grundwasserentnahmen haben einen Grundwasserwiederanstieg erreicht, der zu einem Rückgang der Setzungsraten auf 10 mm pro Jahr geführt hat.
-----------------------	---

<b>Datengrundlage</b>	<b>Changzhou (China)</b>
<i>Geologische Daten</i>	Bohrprofile, Geologischer Schnitt
<i>Messungen der Bodenbewegung</i>	Messungen an einem Festpunkt für 5 Schichten.
<i>Messungen Grundwasserstand</i>	Grundwassermessstellen in verschiedenen Schichten verfiltert.
<i>Anfangsbedingungen für Bodenmechanik</i>	1990
<i>Anfangsbedingungen für Hydrogeologie</i>	1950
<i>Bestimmung der Bodenparameter</i>	Über Kalibrierung.
<i>Besonderheiten</i>	Keine.

<b>Prognoserechnungen</b>	<b>Changzhou (China)</b>
<i>Methoden Bodenbewegungsprognose:</i>	Finite-Elemente-Methode PLAXIS (6.6) mit Mohr-Coulomb-Stoffgesetz (Sande) und Soft-Soil-Modell (Tone); Cosserat-Modell (Shen et al. 2013).
<i>Methoden Grundwasserströmungsprognose</i>	Finite-Elemente-Modell (Shen et al. 2006).
<i>Auflösung Bodenbewegungsmodell</i>	10 x 10 km <sup>2</sup> , Zellgröße 500 m (PLAXIS-Modell)
<i>Flächenhafte Information zu Bodenbewegungen</i>	Über 3D-Modellierung.
<i>Erfahrungswerte, Ausblick, Forschungs- und Entwicklungsbedarf</i>	Relativ großes Modellgebiet für ein 3D-Finite-Elemente-Modell. Das Cosserat-Modell bildet die beste Übereinstimmung mit den Messungen ab.
<i>Wurden Hebungen berechnet?</i>	Nein.
<i>Besonderheiten</i>	Relativ großes Modellgebiet für ein 3D-Finite-Elemente-Modell. Kalibrierung nur an einem Messpunkt.

### 5.5.6 Taipei Basin (Taiwan)

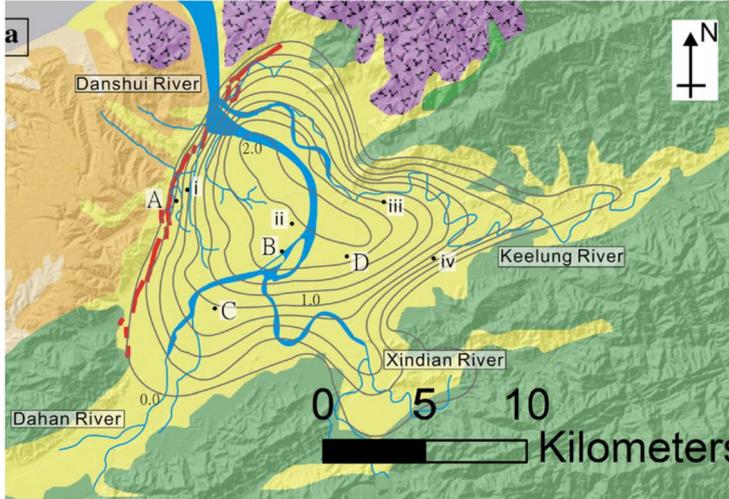
Das Fallbeispiel „Taipei“ wurde ausgewählt, weil hier Geländehöhen aus Punktdaten in die Fläche übertragen worden sind. Als Interpolationsmethode wurde Kriging verwendet. Es wurden keine Prognosen der Bodenbewegungen durchgeführt. Entsprechend wurde kein Steckbrief-Block „Prognoserechnungen“ erstellt. Die Geologie ist relativ komplex: es handelt sich um vier geologische Einheiten aus Sedimentlagen und vulkanischen Ursprungs mit vier Grundwasserleitern aus Sand, Kies und Laterit-Konglomerat mit Ton- und Lehmeinschlüssen.

Auch in diesem Beispiel sind die Ursachen der Setzung Grundwasserentnahmen über das Grundwasserdargebot hinaus. Eine Besonderheit dieses Fallbeispiels ist, dass bereits ein Wiederanstieg des Grundwassers erfolgt ist. Nachdem der Grundwasserspiegel Anfang der 1970er Jahre um 40 m gesunken war, wurde von der Regierung ein Entnahmestopp verhängt, der in den folgenden 30 Jahren einen Wiederanstieg bis auf das ursprüngliche Niveau ermöglichte. Im Zeitraum der großen Grundwasserentnahmen versiegt das Grundwasserangebot zweimal, was quasi einem Trockenfallen gleich kommt.

Anhand von Höhenmessungen wurde die Bodenbewegung historisch rekonstruiert. Ein Großteil der Setzungen ist nicht reversibel. Hebungen nach Grundwasserwiederanstieg erreichen vom Betrag her etwa 10 % der Setzungen infolge von Grundwasserspiegelabsenkung. Tektonisch bedingte Setzungen überlagern in einigen Regionen die durch Grundwasserfluktuation bedingten Setzungen, so dass trotz Grundwasserwiederanstieg die Setzungen fortschreiten.

Leider sind keine Details über die Anwendung des Kriging veröffentlicht.

Auf Fragen zur Veröffentlichung haben die Autoren leider nicht reagiert.

Allgemeine Informationen	Taipei Basin (Taiwan)
 <p>Kumulierte Setzungen im Taipei Basin (Chen et al. 2007)</p>	
<i>Kategorie</i>	Weitere Fälle der Grundwasserförderung
<i>Bisherige Untersuchungen und Fragestellungen</i>	Historische Rekonstruktion von Grundwasserstand und Bodenbewegung bis hin zum Grundwasserwiederanstieg.
<i>Land</i>	Taiwan
<i>Fläche</i>	ca. 400 km <sup>2</sup>
<i>Besonderheiten</i>	Grundwiederanstieg um 40 m über ca. 30 Jahre. Entnahmestopp und Übergang zu alternativen Wasserversorgungsquellen (Stauseen). In den Jahren 1906 und zwischen 1960 und Anfang der 1970er Jahre versiegte die Grundwasserressource.
<i>Quellen</i>	Chen et al. 2007

Mensch und Umwelt	Taipei Basin (Taiwan)
<i>Ursachen der Bodenbewegung</i>	Hauptsächlich Grundwasserentnahmen über das Grundwasserdargebot hinaus.
<i>Folgen</i>	Setzungen bis zu 2 m, insbesondere in den Jahren 1955–1970.
<i>Bedeutung und Problemstellung</i>	Um weitere Setzungen zu verhindern, wurde Anfang der 1970er Jahre ein Grundwasserentnahmestopp verhängt. Daraufhin stabilisierte sich der Grundwasserspiegel Ende der 1990er Jahre.
<i>Zeitraum der Anthropogenen Einwirkungen</i>	Ab 1895, mit Entnahmeschwerpunkt von 1955 bis 1970.
<i>Stakeholder</i>	Anwohner und Stadtverwaltung Taipei City.

<b>Geologie und Hydrogeologie</b>	<b>Taipei Basin (Taiwan)</b>
<i>Material (Lockergestein, Fels)</i>	Lockergestein; vier geologische Einheiten aus Sedimentlagen und vulkanischen Ursprungs; vier Grundwasserleiter aus Sand, Kies und Laterit-Konglomerat, mit Ton- und Lehmeinschlüssen.
<i>Tiefe</i>	350 m
<i>Besonderheiten</i>	Erdbebengebiet

<b>Datengrundlage</b>	<b>Taipei Basin (Taiwan)</b>
<i>Geologische Daten</i>	Mehrere Bohrprofile vorhanden (genaue Anzahl nicht publiziert).
<i>Messungen der Bodenbewegung</i>	Nivellement-Linien ab 1948 (Ministry of the Interior; Land Subsidence Prevention and Reclamation Corp of National Chengkung University); insgesamt 406 Höhenfestpunkte, Kontour-Karten mit Kriging (vgl. Kap. 8.4)
<i>Messungen Grundwasserstand</i>	Nicht vorhanden.
<i>Anfangsbedingungen Bodenmechanik</i>	1975
<i>Anfangsbedingungen Hydrogeologie</i>	Nicht vorhanden.
<i>Bestimmung der Bodenparameter</i>	Nicht vorhanden.
<i>Besonderheiten</i>	Überlagerung von drei Prozessen: 1. Verdichtung von Sedimenten in der Nähe von Flüssen (natural subsidence); 2. Tektonische Bewegungen an Störungen; 3. Bodenbewegung infolge Grundwasserstandsänderungen (Konsolidierung und Umlagerung der Spannungen).

## 5.6 Zusammenfassung und Vergleichbarkeit mit dem Rheinischen Braunkohlenrevier

Die meisten der in den vorangegangenen Abschnitten vorgestellten Studien gehören in die Kategorie „andere Fälle von Bodenbewegungen infolge von Grundwasserstandsänderungen“. Die Grundwasserstandsänderungen rühren in diesen Fällen von Grundwasserentnahmen her, die über das Grundwasserdargebot hinausgehen, im Wesentlichen geht es um massive Grundwasserspiegelabsenkung. Damit verbunden sind Setzungen, die vor dem Hintergrund von Schaden an Gebäuden und, bei Lagen in Küstennähe, erhöhtem Überflutungsrisiko analysiert werden. Die Grundwasserentnahmen stehen im Zusammenhang mit industrieller Entwicklung, so dass in den meisten Fallbeispielen dieser Kategorie bisher noch kein echter Grundwasserwiederanstieg erreicht wurde. Eine kurzfristige Erholung des Grundwasserspiegels ist in einigen Fällen, zum Beispiel in den Anwendungsfällen „Los Baños-Kettleman“ und „Taipei Basin“, beobachtet worden. Im Wesentlichen führt dies zu einem Rückgang der Setzungsrate und nur zu kleinen Hebungen, in Szenarienrechnungen werden jedoch zum Teil Hebungen berechnet. Eine Ausnahme bildet das Fallbeispiel „Taipei Basin“, bei dem ein Grundwasserwiederanstieg mit 10 % reversiblen Setzungsbeträgen verzeichnet wurde. Allerdings handelt es sich hierbei um einen Spezialfall vergleichsweise junger Sedimente vulkanischer Aschen, die grundsätzlich eine hohe Empfindlichkeit hinsichtlich plastischer Setzung aufweisen (vgl. auch „Sackung von Makroporen“ in Kap. 4.2). Zudem wurden hier keine Prognoserechnungen durchgeführt.

Zu Bodenbewegungen im Zusammenhang mit Bergbau sind weniger Studien veröffentlicht. So wurde im Lausitzer Braunkohlenrevier eine Bodenbewegungsprognose im Jahr 1998 veröffentlicht, die vor dem Hintergrund der Gebäudeschäden erstellt wurde. In dieser Studie wurden nur Setzungen betrachtet. Jüngere, unveröffentlichte Studien widmen sich auch Hebungen. Mit den markscheiderischen Prognosemethoden wurden gute Erfahrungen gemacht, sofern keine nachlaufenden Setzungen relevant waren und die Korrelation von Grundwasserständen und Bodenbewegungen eindeutig war.

Bodenbewegungen, die im Zusammenhang mit bergbaubedingten Grundwasserstandsänderungen im Festgestein stehen, wurden beobachtet. Nach derzeitigem Kenntnisstand wurden jedoch keine Bodenbewegungsberechnungen in größerem Umfang durchgeführt. Methoden zur Bodenbewegungsprognose für Hebungen im Festgestein sind jedoch vorgeschlagen worden. Wegen der Andersartigkeit des Materialverhaltens lassen sich diese Methoden jedoch nur mit Einschränkungen, das heißt bei entsprechenden Voraussetzungen hinsichtlich des bodenmechanischen Verhaltens, auf das Rheinische Braunkohlenrevier übertragen.

Für die Prognose von Bodenbewegungen sind Grundwasserganglinien erforderlich. Diese werden meistens aus Grundwassermodellen entnommen. Die Grundwassermodelle sind dann anhand von Grundwasserstandsmessungen kalibriert. Zur Kalibrierung und Validierung der Bodenbewegungsberechnung werden Setzungsmessungen aus Nivellement oder Extensiometermessungen verwendet, zunehmend auch Satellitendaten. Die Bodenparameter werden aus geotechnischen Laboruntersuchungen, zum Beispiel aus Ödometertests, abgeleitet. Oft ist die Datenlage so gering, dass Daten aus Studien aus dem Untersuchungsgebiet oder zu vergleichbaren Anwendungsfällen herangezogen werden. Diese Daten werden als Ausgangspunkt für die Kalibrierung verwendet, mit Hilfe von Sensitivitätsanalysen werden Bandbreiten für die Parameterwerte abgeleitet.

Die Verwendung des Grundwasserströmungsprogramms MODFLOW mit Zusatzmodulen für die Setzungsberechnung ist weit verbreitet und hat bereits eine recht lange Historie.

So wie im Rheinischen Braunkohlenrevier auch, sind für die betreffenden Anwendungsfälle bereits Grundwassermodelle vorhanden, die dann so erweitert werden, dass eine Bodenbewegungsprognose möglich ist. Die Bodenbewegung wird dann eindimensional-vertikal für jede Stützstelle des Grundwassermodells berechnet. Eine Interpolation in die Fläche ist somit nicht nötig.

Auch eine vollständig gekoppelte 3D-Berechnung mit bodenmechanischen Programmen wie PLAXIS oder ABAQUS sind bereits verwendet worden, um großräumige Bodenbewegungen infolge von Grundwasserstandsänderungen zu berechnen. Wurden derartige Methoden ursprünglich eher in der Baustellen-Skala angewendet, zeigt das Beispiel Changzhou (China), dass mit numerischen bodenmechanischen Programmen auch auf größere Gebiete angewendet werden können.

Rückkopplungseffekte der Bodenbewegung auf hydraulische Parameter wurden in allen betrachteten Fällen vernachlässigt. Die Rückkopplung bezieht sich im Falle der flächendeckenden Modelle allein auf die Höhenlagen. Galloway & Burbey 2011 sehen auf diesem Gebiet noch Forschungsbedarf, Kihm et al. 2007 haben eine Rückkopplung der Deformation auf den Durchlässigkeitsbeiwert bereits in einem numerischen 3D-Programm umgesetzt; der entsprechende Anwendungsfall wurde wegen des kleinen Untersuchungsgebietes hier jedoch nicht in die engere Auswahl der Fallbeispiele einbezogen.

Zunächst soll festgehalten werden, dass eine flächige Modellierung der Bodenbewegung durchaus ein gängiges Verfahren ist. Ein Fallbeispiel, bei dem ähnlich vorgegangen wurde wie für das Rheinische Braunkohlenrevier anvisiert, wo also Berechnungen für Bodenprofile an ausgewählten Punkten in die Fläche interpoliert werden, wurde nicht gefunden. Wohl sind für Jakarta Bodenbewegungen für drei Punkte mit einem eindimensionalen Modell berechnet worden. Eine Interpolation in die Fläche war aber nicht angedacht und ist bei drei Prognosepunkten auch nicht sinnvoll. Die Ergebnisse sind vor allem in ihrer qualitativen Form verwendet worden, um strategische Entscheidungen zu unterstützen und die sich abspielenden Prozesse (darunter auch der Einfluss des Kriechens) für die Beteiligten transparent darzustellen. Darüber hinaus wurden die eindimensionalen Berechnungen zur Validierung von flächenhaften Ergebnissen herangezogen (Roelofsen et al. 2008a).

Für die Übertragung von Punktdaten mit Messwerten oder Prognosedaten von markscheiderischen Methoden in die Fläche gibt es in der Literatur allerdings Beispiele. Im Lausitzer Braunkohlenrevier und im Rheinischen Braunkohlenrevier wurden flächige Informationen aus markscheiderischen Prognosen mit Hilfe von Dreieckvermaschung von Nivellementfestpunkten erstellt. Die Kriging-Technik wurde im Beispiel Taipei für Messdaten angewendet. Diesen Beispielen ist gemeinsam, dass eine weitgehend flächige Abdeckung des Untersuchungsgebiets mit Datenpunkten vorliegt.

Kein Fallbeispiel wurde gefunden, bei dem bei der Berechnung der Bodenbewegungsprognose das Trockenfallen von Grundwasserleitern berücksichtigt wurde. Die Prognose von Hebungen ist bisher eher selten publiziert.

Die Komplexität der bodenmechanischen Kompressionsmodelle ist in manchen Fallbeispielen höher und in manchen Fallbeispielen niedriger als in den Modellen, die derzeit für das Rheinische Braunkohlenrevier zur Verfügung stehen (Ziegler/Giese 2004 und Ziegler/Aulbach 2016).

## 6 Methoden zur Bodenbewegungsprognose

### 6.1 Einführung

In diesem Kapitel werden Methoden zur Bodenbewegungsprognose anhand von Steckbriefen vorgestellt. Methoden lassen sich in Kategorien einordnen. Darauf und auf den Aufbau der Steckbriefe wird innerhalb dieses Abschnittes eingegangen, der folgende Abschnitt gibt noch Hinweise zur Einschätzung von Genauigkeit und Rechenzeitbedarf von Methoden. Die zusammenfassende Bewertung der Methoden erfolgt in Kapitel 7 unter Zuhilfenahme der in Abschnitt 3.5 eingeführten Bewertungskriterien.

Eine Methode dient zur Prognose der Bodenbewegung infolge Grundwasserspiegeländerung. Sie soll im Prinzip allgemein sein, und kann dann für mehrere Anwendungsfälle angewendet werden. Meistens ist eine Methode in ein Computerprogramm umgesetzt. Zusammen mit Daten für ein bestimmtes Modellgebiet wird eine Methode zu einem gebietsbezogenen Modell. Das Modell enthält eine 1-, 2- oder 3-dimensionale Schematisierung des geologischen Schichtenaufbaus. Bodenmechanische und grundwasserhydraulische Modellparameter werden mit zum Untersuchungsgebiet passenden Werten belegt. Hinzu kommen Datensätze mit Randbedingungen, die eine historische oder eine mögliche zukünftige Belastung (Szenarien) wiedergeben. Für ein Modellgebiet können verschiedene gebietsbezogene Modelle existieren. So liegen den beiden gebietsbezogenen Modellen Ziegler/Giese 2004 und Ziegler/Aulbach 2016 (Ziegler 2017) dieselbe Methode zu Grunde (Methode nach Ziegler und Aulbach, Abschnitt 6.3), allerdings unterscheiden sich die schematische Wiedergabe des Bodenprofils und die Bodenparameter in beiden Modellen.

Die Beschreibung der Methoden erfolgt in den folgenden Kapiteln in Form von vier Blöcken, die in den Steckbriefen farblich gekennzeichnet sind:

- Block 1 – weiß: Allgemeine Informationen;
- Block 2 – grün: Bodenmechanik;
- Block 3 – blau: Grundwasserbewirtschaftung;
- Block 4 – rot: Übertragung in die Fläche.

Zunächst werden im ersten Block „**Allgemeine Informationen**“ über eine Methode gegeben. Dazu gehören der Anwendungsbereich, Anwendungsbeispiele und die Größenordnung und die Komplexität der Fragestellung, die mit der Methode behandelt werden kann. Auch wird genannt, ob die Methode jemals für die Berechnung von Hebungen eingesetzt worden ist.

Der Block „**Bodenmechanik**“ beschreibt, welche Prozesse der Bodenbewegung die Methode berücksichtigt, und wie die Bodenbewegung berechnet wird. Dieser Block bildet gleichsam den Kern der jeweiligen Methode. Hinsichtlich der Bodenmechanik lassen sich die Methoden in verschiedene Gruppen einteilen:

- **Vereinfachte Ansätze („Handbuchformeln“)**. Diese Ansätze sind aus bodenmechanischen Gesetzen abgeleitet und können analytisch gelöst werden. Sie berücksichtigen keine Zeitabhängigkeit. Bodenbewegungen komplexer geologische Profile können nicht ohne weiteres mit diesen Formeln berechnet werden. Einziges Beispiel für eine Handbuchformel ist der Ansatz nach Fenk und Tzscharschuch (Abschnitt 6.5).

- **1D-Programme** zur Berechnung eines einzelnen Bodenprofils. Mit diesen Programmen können aus mehreren Schichten bestehende Profile eindimensional berechnet werden. Beispiele für 1D-Programme sind die Methode nach Ziegler und Aulbach (Abschnitt 6.3) und D-Settlement (Abschnitt 6.4). Diese beiden Methoden verwenden eindimensionale Bodenmodelle, die Gleichungen werden analytisch oder im Falle der Grundwasserströmung (Konsolidierung nach Terzaghi, Grundwasserströmung nach Darcy) mit Hilfe einfacher numerischer Verfahren gelöst. Es ist auch möglich, mehrdimensionale Programme für ein eindimensionales Bodenprofil anzuwenden. Beispiele hierfür wäre eine 1D-Berechnung mit PLAXIS (Abschnitt 6.8) oder ein eindimensional-vertikales MODFLOW-Modell mit einem Zusatzmodul zur Bodenbewegungsberechnung. Für 1D-Programme wird der Grundwasserstand für die verschiedenen Bodenschichten als Zeitreihe vorgegeben. Da ein 1D-Programm die Bodenbewegung für einzelne Punkte an der Geländeoberfläche ausgibt, müssen die Ergebnisse noch auf die Fläche übertragen werden.
- Berechnung der Bodenbewegung im **Zusammenhang mit einem Grundwasserströmungsprogramm**. Ausgangspunkt für diesen Ansatz ist ein Grundwassermodell, das für grundwasserwirtschaftliche Fragen entwickelt worden ist. Zusätzlich zum Grundwasserstand und der Grundwasserströmung wird mit einem Zusatzmodul auch die vertikale eindimensionale Bodenbewegung an jedem Modellknoten berechnet. Dazu können eindimensionale bodenmechanische Kompressionsmodelle zum Einsatz kommen, oder auch eine dreidimensionale numerische Lösung (z. B. mit Hilfe der Finite-Elemente-Methode). Der Prozess der Konsolidierung wird in der Regel über das Grundwassermodell erfasst. Die Prozesse der Bodenbewegung und der Grundwasserströmung werden gekoppelt berechnet (integrierte Modellierung), das heißt, dass Bodenbewegung und Grundwasserströmung sich gegenseitig beeinflussen. Technisch bedeutet dies in den meisten Fällen einen Datenaustausch bei jedem Zeitschritt. Vorteil dieser gekoppelten Modellierung ist, dass die Bodenbewegung für das gesamte Modellgebiet des Grundwassermodells berechnet wird. Die Übertragung der Ergebnisse in die Fläche ist somit nicht erforderlich. Die Schematisierung des geologischen Schichtenaufbaus im Modell muss gleichzeitig den Anforderungen der Grundwasserströmungsberechnung und denen der bodenmechanischen Berechnung genügen. Beispiele für derartige Lösungen sind das MODFLOW-IBS-Package (Abschnitt 6.6.2) oder das FEFLOW-Modul von Rùhaak (Abschnitt 6.7).
- **Mehrdimensionale numerische Lösung der vom Kontrollvolumen abgeleiteten Bestimmungsgleichungen mit Hilfe der Finite-Elemente-Methode oder der Methode der Finiten Differenzen**. Bei diesen Ansätzen steht die dreidimensionale Berechnung der Bodenmechanik im Vordergrund. Die Berechnung der Grundwasserströmung erfolgt vor allem, um die Wichte unter Auftrieb und den für den Prozess der Konsolidierung relevanten Grundwasseraustritt zu berechnen, und weniger vor dem Hintergrund von Fragen der Grundwasserbewirtschaftung. Ein Beispiel für ein numerisches Programm ist PLAXIS (Abschnitt 6.8). Die Bodenbewegung kann mit PLAXIS dreidimensional berechnet werden, sodass an der Oberfläche eine flächendeckende Information zu Bodenbewegungen ausgegeben wird. Alternativ können mit den meisten Programmen auch zweidimensional-vertikale Schnitte oder eindimensionale Profile berechnet werden, die dann an der Geländeoberfläche eine linien- oder punkthafte Information erzeugen, die wiederum in eine Interpolation einfließen können.
- Eine **Markscheiderische Methode** basiert – anders als die bisher genannten Methoden – nicht auf physikalischen Zusammenhängen, sondern auf der Korrelation

zwischen Grundwasserstand und gemessener (tatsächlicher) Setzung. Die Korrelation ist eine Grundvoraussetzung für die Anwendbarkeit markscheiderischer Methoden. Markscheiderische Methoden liefern Punktinformationen. Die Berechnung ist allerdings computertechnisch gut umzusetzen, so dass diese für viele Punkte automatisiert angewendet werden kann.

Unter dem Block „**Grundwasserbewirtschaftung**“ wird erfasst, wie die Methode die großräumigen Prozesse der Grundwasserströmung berücksichtigt, die eine Veränderung des Grundwasserspiegels bewirken und damit zu einer Bodenbewegung führen können. Bei einigen Methoden wird die Grundwasserhydraulik in Form von Zeitreihen z.B. aus externen Konstruktionen von Grundwasserganglinien vorgegeben, in diesem Fall entfällt der Block „Grundwasserbewirtschaftung“.

Der Block „**Interpolation in die Fläche**“ erläutert, wie aus Punktinformationen der Bodenbewegung flächenhafte Informationen erzeugt werden. Liefert der Methodenblock Bodenmechanik bereits flächige Informationen oder sieht die Methode keine Interpolation in die Fläche vor, dann entfällt der Block.

## 6.2 Hinweise zur Einschätzung von Genauigkeit und Rechenzeitbedarf der Methoden

Genauigkeit und Rechenzeitbedarf sind zwei Kriterien, die wichtig für die Auswahl einer Methode sind. Gleichwohl ist es jedoch sehr schwierig, hierüber allgemeine Aussagen zu machen.

Die Genauigkeit bezieht sich zunächst auf die Prozesse, die eine Methode abbildet. Ist eine Methode in der Lage, einen bestimmten Prozess abzubilden, und die zweite nicht, kann man grundsätzlich davon ausgehen, dass die erste Methode die Bodenbewegung realitätsnäher abbildet. Nur, wenn der betreffende Prozess auch relevant ist, besteht allerdings ein Mehrwert hinsichtlich der Genauigkeit. Erfüllen die Bestimmungsgleichungen einer Methode eine abgeschlossene Massenbilanz sowie abgeschlossenes Kräfte- und Momentengleichgewicht, ist diese Methode grundsätzlich genauer als Methoden, die sich lediglich auf ein Kompressionsmodell stützen. Die Bestimmungsgleichungen mit ausgeglichener Massenbilanz und Kräfte- und Momentengleichgewicht sind in der Regel jedoch nur für Sonderfälle analytisch lösbar, so dass numerische Methoden wie die Finite-Elemente-Methode zur Lösung der Bestimmungsgleichungen angewendet werden müssen. Dies bringt sogenannte numerische Unsicherheiten mit sich und damit potentiell Einbußen hinsichtlich der Genauigkeit; räumliche und zeitliche Auflösung haben einen wesentlichen Einfluss auf die Genauigkeit einer numerischen Lösung. Dementsprechend ist ein Mehrwert einer numerischen Methode gegenüber einer analytischen Lösung nicht uneingeschränkt gegeben. Der Mehrwert einer Methode mit numerischem Lösungsverfahren kann in der erhöhten Dimensionalität liegen. Bei geeigneter Wahl der räumlichen und zeitlichen Auflösung sind numerische Methoden für den eindimensionalen Fall aber auch nicht ungenauer als eine Methode, die ein bodenmechanisches Kompressionsmodell verwendet. Über den Vergleich von Berechnungsergebnissen mit Messungen – nach Möglichkeit mit langjährigen Präzisionsmessungen – ist eine belastbare Genauigkeitsbeurteilung eines Modells möglich.

Hinsichtlich Rechenzeit sind Methoden mit eindimensionalen Kompressionsmodellen grundsätzlich schneller, da die Bestimmungsgleichungen in der Regel analytisch gelöst werden können. Für ein vergleichbares eindimensionales Finite-Elemente-Modell wird die Rechenzeit allerdings bei der heutzutage verfügbaren Computertechnologie im Vergleich nicht ins Gewicht fallen. Eine abschließende Beurteilung verschiedener Methoden hinsichtlich Rechenzeitbedarf kann nur ein Vergleich der Methoden für sogenannte Benchmark-Tests liefern. Ein solcher Test kann beispielsweise ein Ergebnis aus einem Labor-

versuch sein, oder ein Fall, für den eine analytische Lösung bei schließender Massenbilanz und Kräfte- und Momentengleichgewicht bekannt ist, die dann mit verschiedenen Methoden reproduziert wird. Der Vergleich der Rechenzeiten für die Benchmark-Tests erlaubt dann auch Aussagen zum Rechenzeitbedarf der verschiedenen Methoden.

Weil die Quantifizierung der Genauigkeit und des Rechenzeitbedarfs mit Schwierigkeiten verbunden ist, wird in den folgenden Steckbriefen nicht auf diese Parameter eingegangen. In Kapitel 7 werden Genauigkeit und Rechenzeitbedarf bei der Bewertung wieder aufgegriffen.

### 6.3 Methode nach Ziegler und Aulbach

Die Methode nach Ziegler und Aulbach ist eine Methode aus der Gruppe der 1D-Programme. Sie wurde für die Bodenbewegungsprognose im rheinischen Braunkohlenrevier entwickelt. Grundwasserstände werden als externe Zeitreihe vorgegeben, entsprechend entfällt der Block „Grundwasserbewirtschaftung“. Zur Interpolation in die Fläche ist keine eigene Methode vorgesehen, darum entfällt auch dieser Block; Ergebnisse der Bodenbewegungsprognose können mit den gängigen Interpolationsmethoden (Kapitel 8) in die Fläche übertragen werden.

<b>Methode</b>	<b>Ziegler und Aulbach</b>
<i>Anwendungsbereich</i>	Berechnung von Setzungen und Hebungen infolge von Grundwasserstandsänderungen im Lockergestein für eindimensionale Bodenprofile.
<i>Anwendungsbeispiele</i>	Rheinisches Braunkohlenrevier, RWE Power AG.
<i>Größenordnung/Komplexität</i>	Lockergestein, Bodenprofile. Das Modell kann Bodenprofile beliebiger Mächtigkeit (bis > 1.000 m) und mit einer beliebigen Anzahl an Schichten abbilden.
<i>Kopplung von Bodenmechanik und Grundwasserbewirtschaftung</i>	Grundwasserganglinien für die Grundwasserleiter werden als Zeitreihe für die bodenmechanische Berechnung vorgegeben. Eine Rückkoppelung der veränderten Höhenlage ins Grundwassermodell erfolgt somit nicht.
<i>Ist die Methode jemals zur Berechnung von Hebungen eingesetzt worden?</i>	Ja (Giese 2010; Ziegler et al. 2007)

<b>Bodenmechanik</b>	<b>Ziegler und Aulbach</b>
<i>Funktionsprinzip</i>	Bodenmechanisches Modell für einzelne Punkte / Bodenprofile.
<i>Bodenmechanisches Modell</i>	Elastoplastisches logarithmisches Dehnungsverhalten nach Terzaghi (Abschnitt 4.6.3). Die konsolidierenden Schichten (Grundwassergeringleiter) werden als homogen angenommen (konstante Parameter, keine Spannungsabhängigkeit).
<i>Grundwasserhydraulik (Konsolidierung)</i>	Konsolidierungstheorie nach Terzaghi (Abschnitt 4.7.1). Die Formulierung des Porenwasserüberdrucks erlaubt es, die Konsolidierung von gering leitenden Schichten oberhalb des phreatischen Grundwasserspiegels zu modellieren. Die Konsolidierungsgleichung wird implizit gekoppelt mit den Gleichungen zur Kompression berechnet.
<i>Lösungsverfahren</i>	Analytisch, Zeitintegration mit Hilfe des Pilgerschrittverfahrens.
<i>Einbindung Grundwasserbewirtschaftung</i>	Berechnung der hydraulischen Gradienten aus den Zeitreihen der Grundwasserstände für jeden Grundwasserleiter. Daraus berechnen sich die setzungs- bzw. hebungsrelevanten Spannungsänderungen.
<i>Eingabe</i>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Bodenprofil mit Unterscheidung bindiger und nichtbindiger Schichten. Die bodenmechanische Klassifikation der Schichten kann aus Vorgaben übernommen oder auf Basis bodenmechanischer Erfahrungswerte aus geologischen Informationen interpretiert werden;</li> </ul>

	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Grundwasserganglinien für Grundwasserleiter;</li> <li>• historische Höhenzeitfolge.</li> </ul>
<i>Parameter</i>	<p>Je Schicht:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• spezifisches Gewicht für gesättigten und ungesättigten Zustand (Wichte);</li> <li>• Ausgangssteifigkeiten (Proportionalitätsfaktor C);</li> <li>• Vorkonsolidierung (over consolidation ratio OCR oder pre-overburden pressure POP);</li> <li>• Anfangsporosität;</li> <li>• Konsolidierungsbeiwert nach Terzaghi oder Durchlässigkeitsbeiwert;</li> <li>• Hebungsfaktoren (Prozentsatz Anteil elastischer Bodenbewegung).</li> </ul>
<i>Ausgabe</i>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Höhenlage der Geländeoberfläche über die Zeit;</li> <li>• Änderung des hydraulischen Gradienten für Grundwasserstauer;</li> <li>• optional: Höhenlage je Schicht über die Zeit;</li> <li>• optional: Spannungszustände je Schicht über die Zeit;</li> <li>• optional: Abschätzung der Sensitivität.</li> </ul>
<i>Produkt und Hersteller</i>	Methode nach Ziegler und Aulbach, ZAI Ziegler und Aulbach Ingenieurgesellschaft mbH
<i>Referenz (Publikation, User-Manual o. ä.)</i>	Ziegler 2017; Giese 2010; Ziegler et al. 2007.
<i>Verfügbarkeit</i>	Als Ingenieurauftrag.
<i>Besonderheiten</i>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Unterscheidung zwischen Setzungen und Hebungen (Hebungsfaktoren);</li> <li>• Konsolidierungsberechnung auch für Schichten oberhalb des phreatischen Grundwasserspiegels;</li> <li>• zusätzliche Berücksichtigung schichtspezifischer Besonderheiten möglich;</li> <li>• Fortlaufende Verbesserung der Prognose durch Anpassung an neue Messdaten möglich,</li> <li>• Unterstützung zur Ermittlung der Parametersensitivität möglich.</li> </ul>

#### 6.4 D-Settlement

D-Settlement ist ein kommerzielles Programm, in dem verschiedene Kompressionsmodelle und zwei Konsolidierungstheorien zur Auswahl stehen. Es wurde in den Niederlanden zur Berechnung von Bodenbewegungen infolge von Auflast und Grundwasserstandsänderungen entwickelt. Mit D-Settlement können Verformungen infolge von Auflast und Grundwasserstandsänderungen für ein- und zweidimensionale vertikale Bodenprofile berechnet werden. Diese Methode wird daher der Gruppe der 1D-Programme zugeordnet.

Neben dem Fallbeispiel Jakarta (Abschnitt 5.5.1) wurde D-Settlement in seiner Vorläuferversion MSettle für Bodenbewegungsberechnungen infolge reduzierter Grundwasserentnahmen und dem damit verbundenen Anstieg des Grundwasserspiegels in der Stadt Delft eingesetzt (Roelofsen et al. 2008b, 2018). In dieser Studie wurden auch Hebungen berechnet. Die Berechnungsergebnisse wurden zur Validierung einer flächenhaften Bodenbewegungsprognose, die mit einem MODFLOW-Zusatzmodul (siehe Abschnitt 6.6) erstellt wurde, eingesetzt.

<b>Methode</b>	<b>D-Settlement</b>
<i>Anwendungsbereich</i>	Mit D-Settlement kann eine Prognose von bodenmechanischen Setzungen und Hebungen infolge von externen Belastungen und Grundwasserstandsänderungen in ein- und zweidimensionalen Bodenprofilen berechnet werden. Darüber hinaus bietet D-Settlement verschiedene Module, die zur automatischen Kalibrierung bodenmechanischer Modellparameter (zur Anpassung der modellierten an die gemessenen Bodenbewegungen) sowie für automatische Sensitivitäts- und Genauigkeitsanalysen eingesetzt werden können.
<i>Anwendungsbeispiele</i>	Jakarta (Abschnitt 5.5.3), Delft (Roelofsen et al. 2008b), zahlreiche Infrastrukturbauvorhaben (Deiche, Straßen)
<i>Größenordnung / Komplexität</i>	Lockergestein, 1D- und 2D-Bodenprofile mit beliebiger Anzahl Schichten. Für zweidimensionale Bodenprofile kann nur die Auflast variabel über die Länge angegeben werden, die Grundwasserdruckhöhe ist entlang der horizontalen Achse konstant.
<i>Kopplung von Bodenmechanik und Grundwasserbewirtschaftung</i>	Grundwasserganglinien für die Grundwasserleiter werden als Zeitreihe für die bodenmechanische Berechnung vorgegeben. Eine Rückkoppelung der veränderten Höhenlage ins Grundwassermodell erfolgt somit nicht. Bei bisherigen Anwendungen wurde meistens das Programm iMOD verwendet, um die Grundwasserhydraulik zu berechnen.
<i>Ist die Methode jemals zur Berechnung von Hebungen eingesetzt worden?</i>	Ja (Roelofsen et al. 2008b).

<b>Bodenmechanik</b>	<b>D-Settlement</b>
<i>Funktionsprinzip</i>	Verschiedene Bodenmodelle werden für ein- oder zweidimensionale Bodenprofile berechnet.
<i>Bodenmechanisches Modell</i>	Auswahl aus drei bodenmechanischen Kompressionsmodellen: <ul style="list-style-type: none"> <li>• Modell nach Buisman-Koppejan (4.6.2);</li> <li>• Isotachenmodell nach Bjerrum (4.6.5);</li> <li>• Modell der ABC-Isotachen (4.6.6).</li> </ul>
<i>Grundwasserhydraulik (Konsolidierung)</i>	Auswahl aus zwei Konsolidierungsansätzen: <ul style="list-style-type: none"> <li>• Terzaghi (Abschnitt 4.7.1, implizit gekoppelt mit Kompressionsmodell);</li> <li>• Darcy (Abschnitt 4.7.2, über explizite numerische Berechnung der Verteilung von Porenwasserdruck, effektiven Spannungen und Dehnungen).</li> </ul> Konsolidierende Schichten zwischen den Grundwasserleitern können inhomogen sein.
<i>Lösungsverfahren</i>	Grundsätzlich analytisch. Ausnahme: bei Konsolidierungstheorie auf Basis des Darcy'schen Gesetzes werden die Verformungen einer Schicht aus bindigem Boden mit der Grundwasserströmung gekoppelt berechnet (siehe oben).
<i>Einbindung Grundwasserbewirtschaftung</i>	Die Grundwasserstände werden als Zeitreihe vorgegeben. Eine Änderung der Durchlässigkeitsbeiwerte in Abhängigkeit der Verformung kann (für den Konsolidierungsprozess) vorgegeben werden.
<i>Eingabe</i>	Bodenprofil, Zeitreihen für Belastungen an der Oberfläche, Bodenentnahmen und Grundwasserstände
<i>Parameter</i>	Für jede Schicht: <ul style="list-style-type: none"> <li>• spezifisches Gewicht für gesättigten und ungesättigten Zustand (Wichte)</li> <li>• Bodenparameter je nach gewähltem Kompressionsmodell</li> <li>• Hydraulische Durchlässigkeitsbeiwerte oder Konsolidierungsbeiwert nach Terzaghi</li> <li>• Vorkonsolidierung (Over Consolidation Ratio OCR oder Pre-Overburden Pressure POP)</li> <li>• Porenzahl (void ratio)</li> </ul>
<i>Ausgabe</i>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Höhenlage der Schichten und Geländeoberfläche über die Zeit;</li> <li>• Modellparameter aus inverser Modellierung (Kalibrierung anhand von Messwerten) je nach verwendetem Kompressionsmodell;</li> <li>• infolge der Verformung veränderte hydraulische Durchlässigkeitsbeiwerte und Porositäten und Belastung.</li> </ul>
<i>Produkt und Hersteller</i>	D-Settlement Software; Deltares.
<i>Referenz (Publikation, User-Manual o. ä.)</i>	User Manual (Deltares 2016b).
<i>Verfügbarkeit</i>	Kommerzielles Softwarepaket.
<i>Besonderheiten</i>	Früher unter der Bezeichnung MSettle vertrieben. Programmfunktionen zur Genauigkeitsanalyse:

	<ul style="list-style-type: none"><li>• Bestimmung der stochastischen Verteilung der berechneten Bodenbewegungen durch automatische Anwendung einer Standardnormalverteilung für alle stochastischen Parameter mit drei probabilistischen Methoden (siehe unten);</li><li>• automatisierte Kovarianzanalyse für initiale und aktualisierte Parameter;</li><li>• automatisierte Sensitivitätsanalyse: Ermittlung des relativen Einflusses der Parameter auf die Setzung.</li></ul> <p>Probabilistische Methoden:</p> <ul style="list-style-type: none"><li>• Monte-Carlo-Methode (hohe Genauigkeit, aber hoher Rechenzeitbedarf);</li><li>• linearisierte FOSM-Methode (FOSM: First Order Second Moment) zur Bestimmung der Bandbreite einer zu erwartenden Bodenbewegung;</li><li>• iterative FORM-Methode (FORM: First Order Residual Moment) zur Berechnung der Überschreitungswahrscheinlichkeit einer zulässigen Bodenbewegung.</li></ul>
--	---

## 6.5 Fenk & Tzscharschuch

Die Methode von Fenk & Tzscharschuch wurde für die Berechnung von Hebungen infolge von Flutung von Untertagebergwerken angewendet, aber auch für Hebungen im Zuge des Grundwasseranstiegs im Braunkohlentagebau vorgeschlagen. Wesentliches Funktionsprinzip der Berechnungsmethode ist die Änderung der Spannungen infolge der mit einer Grundwasserstandsänderung einhergehenden Änderung der Auftriebskräfte. Der Vorteil dieser Methode liegt in der einfachen Handhabbarkeit. Wegen des einfachen Kompressionsmodells und weil sie keine Zeitabhängigkeit berücksichtigt, wird die Methode den vereinfachten Ansätzen zugeordnet. Wolkersdorfer & Thiem 1998 haben einen Ansatz mit einem ähnlichen Funktionsprinzip verwendet, allerdings für ein Mehrschichtsystem.

<b>Methode</b>	<b>Fenk &amp; Tzscharschuch</b>
<i>Anwendungsbereich</i>	Berechnung von Setzungen infolge Bergsenkung (einstürzender Grubenbaue) und Hebungen in Bergsenkungsgebiet nach Flutung des Untertagebergwerks und Deckgebirges.
<i>Anwendungsbeispiele</i>	Sächsisches und Ibbenbürener Steinkohlenrevier; Braunkohlenrevier Geiseltal bei Halle (Saale) (Mitteldeutsches Braunkohlenrevier)
<i>Größenordnung / Komplexität</i>	Punkt Betrachtung für eine Schicht (Bergsenkung)
<i>Kopplung von Bodenmechanik und Grundwasserbewirtschaftung</i>	Keine, es wird nur der Wasserstand im Gebirge in Metern vorgegeben.
<i>Ist die Methode jemals zur Berechnung von Hebungen eingesetzt worden?</i>	Ja (Fenk & Tzscharschuch 2007 und Fenk 2008).

<b>Bodenmechanik</b>	<b>Fenk &amp; Tzscharschuch</b>
<i>Funktionsprinzip</i>	Stationäre Berechnung; Auftrieb des Lockergesteins.
<i>Bodenmechanisches Modell</i>	Senkung: Hookesches Elastizitätsgesetz (Abschnitt 4.6.2), Änderung der Auftriebskräfte infolge Grundwasserstandsänderung (Abschnitt 4.3).
<i>Grundwasserhydraulik (Konsolidierung)</i>	Nicht berücksichtigt.
<i>Lösungsverfahren</i>	Analytisch.
<i>Einbindung Grundwasserbewirtschaftung</i>	Vorgabe des Wasseranstiegs (stationär)
<i>Eingabe</i>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Mächtigkeit der zerrütteten Gebirgszone</li> <li>• Abbauteufe</li> <li>• Wasseranstieg im Gebirge</li> </ul>
<i>Parameter</i>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Elastizitätsmodul des Gesteinskörpers in der zerrütteten Gebirgszone;</li> <li>• Wichte des die zerrüttete Gebirgszone überlagernden Gebirges;</li> <li>• dränbare Porosität</li> <li>• Wichte von Wasser.</li> </ul>
<i>Ausgabe</i>	Hebung und Senkung der Geländeoberkante.
<i>Produkt und Hersteller</i>	-
<i>Referenz (Publikation, User-Manual o. ä.)</i>	Fenk & Tzscharschuch 2007, Fenk 2008
<i>Verfügbarkeit</i>	Der Ansatz ist als Berechnungsmethode publiziert, aber nicht als Computerprogramm verfügbar.
<i>Besonderheiten</i>	Als Übersichtsformel für die Berechnung von Bergsenkungen (Materialentnahme aus Felsgebirge) konzipiert.

## 6.6 Bodenbewegungsprognose mit MODFLOW

### 6.6.1 Einführung

Für das Grundwasserströmungsprogramm MODFLOW (Harbaugh 2005) sind verschiedene Module zur Berechnung der Bodenbewegung entwickelt worden, sogenannte MODFLOW-Packages. Den älteren MODFLOW-Paketen IBS, SUB und auch IDP liegt die Annahme zu Grunde, dass die totalen Spannungen auch bei sich änderndem Grundwasserspiegel gleich bleiben. Es werden also für die Bodenmechanik gespannte Verhältnisse zu Grunde gelegt, eine Änderung des Porenwasserdrucks wird für die gesamte Schichtmächtigkeit angesetzt. Das Paket SUB-WT stellt hierzu eine Erweiterung dar, mit SUB-WT können auch für ungespannte Verhältnisse die Spannungen realistischer modelliert werden. Zur Entwicklungsgeschichte der MODFLOW-Packages zur Bodenbewegung siehe auch Galloway & Burbey 2011. Einige Packages werden vom United States Geological Survey (USGS), dem Hersteller von MODFLOW, selbst angeboten, andere Module sind von Dritten entwickelt worden.

Allen MODFLOW-Zusatzmodulen ist das Konzept der sogenannten Interbeds gemein. Interbeds sind Linsen bindigen Materials, die einen Grundwasserleiter eingeschlossen sind. Die MODFLOW-Pakete unterscheiden sich unter anderem darin, wie die Konsolidierung der Interbeds modelliert wird. Die Pakete IDP und SUB berücksichtigen die Zeitabhängigkeit der Konsolidierung mit verschiedenen Methoden, während die Pakete IBS und SUB-WT davon ausgehen, dass eine geringleitende Schicht oder Linse innerhalb eines Zeitschritts vollständig auskonsolidiert. Ist ein Grundwasserstauer im Grundwassermodell schematisiert, wird die Konsolidierung über die Lösung der Grundwasserströmungsgleichungen mit MODFLOW direkt modelliert. Um die Zeitabhängigkeit der Konsolidierung und damit die Spannungsabhängigkeit der bodenmechanischen Parameter zu modellieren, kann es notwendig sein, eine bindige Bodenschicht mit mehreren Modelllagen zu modellieren.

Das Modul SUB-CR unterscheidet sich mit den beiden Ansätzen von Bjerrum und dem ABC-Isotachenmodell von den oben genannten Paketen im Wesentlichen durch das bodenmechanische Kompressionsmodell.

Die MODFLOW-Pakete gehören zur Gruppe der Methoden, bei denen die Berechnung der Bodenbewegung in Zusammenhang mit einem Grundwasserströmungsprogramm erfolgt. Mit MODFLOW können jedoch auch eindimensional-vertikale Grundwassermodelle erstellt werden. Es ist deshalb auch möglich, die MODFLOW-Pakete für die Berechnung der Bodenbewegung eines eindimensionalen Bodenprofils einzusetzen (siehe z. B. Kooi 2016).

Da die Abschnitte der Steckbriefe für Informationen allgemeiner Art sowie zur Grundwasserbewirtschaftung für alle bodenmechanischen Module gleich sind, werden diese zunächst vorab wiedergegeben. In den Abschnitten 6.6.2 bis 6.6.6 werden dann die verschiedenen MODFLOW-Module (sogenannte Packages) zur Berechnung von Bodenbewegungen anhand des Steckbriefblocks für Bodenbewegung vorgestellt. Der Block „Interpolation in die Fläche“ entfällt, da die beiden Blöcke für Grundwasserbewirtschaftung und Bodenbewegung jeweils bereits flächenhafte Informationen ausgeben.

<b>Methode</b>	<b>MODFLOW-Packages zur Bodenbewegung</b>
<i>Anwendungsbereich</i>	Berechnung von Setzungen infolge von Änderungen des Grundwasserstands. Ausgangspunkt ist ein Grundwasserströmungsmodell auf Basis von MODFLOW, in dem Grundwasserstände und -strömung berechnet werden. Die Berechnung der Bodenbewegung wird modular in die Grundwasserströmungsberechnung integriert. In erster Linie sind die MODFLOW-Packages zur Berechnung der Bodenbewegung für Grundwasserstandsänderungen infolge überhöhter Grundwasserentnahmen entwickelt. Bodenbewegungsberechnungen infolge von Auflasten sind nicht ohne weiteres möglich.
<i>Anwendungsfälle</i>	MODFLOW-IBS: Los Baños-Kettleman (Kalifornien), Abschnitt 5.5.2 MODFLOW-SUB: Zhang & Burbey 2016 MODFLOW-IDP: Hangu (China), Abschnitt 5.5.3 MODFLOW-SUB-WT: Leake & Galloway 2010 SUB-CR: Mekong-Delta, Abschnitt 5.5.4
<i>Größenordnung / Komplexität</i>	Flexibel, Modellgebiete mit Kantenlänge zwischen 10 und 100 km und Tiefen zwischen 10 und 1000 m. Es können dreidimensionale Modelle mit mehreren Schichten modelliert werden.
<i>Kopplung von Bodenmechanik und Grundwasserbewirtschaftung</i>	Vertikale Bodenbewegung ist in die Massenbilanzgleichung des Gleichungssystems zur Berechnung der Grundwasserströmung integriert. Eine Bodenbewegung wirkt sich somit auch auf die Berechnung der Grundwasserhydraulik aus (gekoppelte hydraulisch-mechanisch Berechnung). Rückkopplung erfolgt für die Konsolidierung (Spannungen bewirken Auspressen des Porenwassers) und für SUB-WT und SUB-CR auch für die Speichereigenschaften. Nicht zurückgekoppelt werden Änderungen in der Höhenlage.
<i>Ist die Methode jemals zur Berechnung von Hebungen eingesetzt worden?</i>	Ja, mit MODFLOW-SUB (Zhang & Burbey 2016); in geringem Umfang mit MODFLOW-IBS (Abschnitt 5.5.1) und mit MODFLOW-SUB-CR (Kooi & Trysa 2017).

<b>Grundwasserbewirtschaftung</b>	<b>MODFLOW</b>
<i>Funktionsprinzip</i>	Numerische Lösung der Grundwasserströmungsgleichungen im dreidimensionalen Raum
<i>Grundgleichungen</i>	Grundwasserströmungsgleichungen
<i>Lösungsverfahren</i>	Finite Differenzen
<i>Eingabe</i>	Berechnungsnetz, Höhenlage der einzelnen Schichten, Anfangsbedingungen.
<i>Randbedingungen</i>	Vorgabe des Grundwasserstands, Vorgabe des Grundwasserdurchflusses, Leakage-Randbedingung für Zu- und Abstrom in Abhängigkeit der Wasserstandsdifferenz zwischen Oberflächen- und Grundwasserstand (RIV-Package) und Well-Package für Grundwasserentnahmen.
<i>Parameter</i>	Durchlässigkeitsbeiwerte, Speicherkoeffizienten.
<i>Produkt und Hersteller</i>	MODFLOW wird vom United States Geological Survey (USGS) bereitgestellt, es gibt verschiedene Benutzeroberflächen wie z. B. PMWin, VisualModflow. GMS oder iMOD
<i>Ausgabe</i>	Grundwasserstand und Fließgeschwindigkeiten über die Zeit für jeden Modellknoten.
<i>Referenz</i>	Harbaugh 2005
<i>Verfügbarkeit</i>	Quellcode: Open Source über USGS; Benutzeroberflächen: iMOD ist Open Source, PMWin, Visual-Modflow und GMS sind kommerzielle Softwarepakete.
<i>Besonderheiten</i>	Sehr weit verbreitet und anerkannt in Wissenschaft und Forschung sowie Ingenieur Anwendungen; Viele Zusatzmodule, z. B. zur Modellierung von Temperatur, Stofftransport und Dichteströmung und Oberflächengewässerinteraktion. Fallen grundwasserleitende Schichten vollständig trocken, wird eine Mindestfließmächtigkeit angesetzt. Zustrom von oberhalb und unterhalb liegenden Grundwasserleitern wird als gesättigt angenommen. Es gibt auch eine Programmoption, mit der Trockenfallen und Wiederbefeuchtung an- und ausgeschaltet werden kann.

## 6.6.2 MODFLOW-IBS: Interbed-Storage-Package

<b>Bodenmechanik</b>	<b>MODFLOW-IBS: Interbed-Storage-Package</b>
<i>Funktionsprinzip</i>	Berechnung der Bodenbewegung infolge Änderung des Grundwasserstands in Grundwasserleitern mit sogenannten Interbeds. Interbeds sind in Grundwasserleitern eingeschlossene Linsen von Material mit geringer Durchlässigkeit. Die Linsen haben eine kleine horizontale Ausdehnung und eine geringe Mächtigkeit. Eine Setzung erfolgt nur in den Interbeds. Das umgebende Leitermaterial wird als steif angesehen. Durchgehende Schichten geringleitenden Materials können mit diesem Ansatz modelliert werden (siehe unten).
<i>Bodenmechanisches Modell</i>	Elastische und plastische Kompression nach Terzaghi, jedoch wird anstelle der logarithmischen Skala ein lineares Verhältnis angenommen, d. h. die Steifigkeit ist konstant. Die Änderung der effektiven Spannung wird mit den von MODFLOW berechneten Porenwasserdrücken berechnet. Eine Änderung des Grundwasserstands resultiert in einer Änderung der effektiven Spannung gleicher Höhe, jedoch mit umgekehrtem Vorzeichen. Das heißt, dass die totalen Spannungen bei fluktuierendem Grundwasserstand gleich bleiben.
<i>Grundwasserhydraulik (Konsolidierung)</i>	Interbed: Im Interbed wird derselbe Grundwasserstand wie in den Leitern angenommen, in dem sich das Interbed befindet. Es wird eine sofortige Entwässerung der Interbeds angenommen, die Zeitschrittweite ist entsprechend zu wählen. Der Konsolidierungsprozess von Interbeds kann folglich nicht abgebildet werden. Aquitarde: Die Konsolidierung durchgehender bindiger Schichten (Aquitarde) wird mit dem Grundwassermodell (MODFLOW) berechnet. Die Entwässerung hin zu einem Leiter, dessen Grundwasserstand unterhalb der Basis des Geringleiters liegt (also in ungesättigtes Leitermaterial), wird in MODFLOW als gesättigte Strömung modelliert.
<i>Lösungsverfahren</i>	Zusatzterm für Speicheränderung in den Grundwasserströmungsgleichungen, Finite Differenzen.
<i>Einbindung Grundwasserbewirtschaftung</i>	Über Grundwassermodell MODFLOW, die Bodenmechanik ist hierin integriert.
<i>Eingabe</i>	Der geologische Schichtenaufbau wird aus dem MODFLOW-Modell übernommen.
<i>Parameter</i>	Elastischer und plastischer Speicherkoeffizient des Korngerüsts (elastic and inelastic skeletal storage coefficients), diese Koeffizienten lassen sich direkt aus der Steifigkeit berechnen. Eine zeitabhängige Vorgabe ist nicht möglich. Der Interbed-Anteil wird in Prozent angegeben, durch Vorgabe eines Anteils von 100 % lassen sich auch durchgehende Geringleiterschichten modellieren.
<i>Ausgabe</i>	Setzung je Schicht, Spannungen, Porenzahl.
<i>Produkt und Hersteller</i>	United States Geological Survey (United States Geological

	Survey 2018a)
<i>Referenz</i>	Leake & Prudic 1991
<i>Verfügbarkeit</i>	Open Source
<i>Besonderheiten</i>	Für im Grundwasserleiter eingeschlossene Tonlinsen (interbeds) entwickelt. Einfacher Ansatz; Annahme ist, dass ein Interbed innerhalb eines Zeitschrittes in das umgebende Leitermaterial entwässern kann.

## 6.6.3 MODFLOW-IDP: Interbed Drainage Package

<b>Bodenmechanik</b>	<b>MODFLOW-IDP: Interbed Drainage Package</b>
<i>Funktionsprinzip</i>	Berechnung der Bodenbewegung infolge Änderung des Grundwasserstands in Grundwasserleitern mit sogenannten Interbeds. Interbeds sind in Grundwasserleitern eingeschlossene Linsen von Material mit geringer Durchlässigkeit, die Linsen haben eine kleine horizontale Ausdehnung und eine geringe Mächtigkeit. Die Interbeds werden zusammen gedrückt, das umgebende Leitermaterial nicht. Anders als bei MODFLOW-IBS (Abschnitt 6.6.2) erfolgt die Entwässerung der Interbeds zeitlich verzögert. Ein Leiter wird in zwei Kontinua aufgeteilt (Interbed und Non-Interbed), entsprechend gibt es für jedes Kontinuum eine Grundwasserdruckhöhe.
<i>Bodenmechanisches Modell</i>	Elastische und plastische Kompression nach Terzaghi, jedoch wird anstelle der logarithmischen Skala ein lineares Verhältnis angenommen, d. h. die Steifigkeit ist konstant. Die Änderung der effektiven Spannung wird mit den von MODFLOW berechneten Porenwasserdrücken berechnet. Eine Änderung des Grundwasserstands resultiert in einer Änderung der effektiven Spannung gleicher Höhe, jedoch mit umgekehrtem Vorzeichen. Das heißt, dass die totalen Spannungen bei fluktuierendem Grundwasserstand gleich bleiben.
<i>Grundwasserhydraulik (Konsolidierung)</i>	Interbed: Zeitlich verzögerte Entwässerung von Tonlinsen (Interbed) hin zum Grundwasserleiter (Non-Interbed) mit Hilfe eines Leakage-Ansatzes. Die Modellierung der zeitlich verzögerten Konsolidierung der Interbeds ist somit möglich. Die Entwässerung von Interbeds in bereits trocken gefallene Grundwasserleiter ist nicht möglich. Aquitarde: Die Konsolidierung durchgehender bindiger Schichten (Aquitarde) kann auch direkt über das Grundwassermodell (MODFLOW) erfolgen. Die Entwässerung hin zu einem Leiter, dessen Grundwasserstand unterhalb der Basis des Geringleiters liegt (also in ungesättigtes Leitermaterial), wird in MODFLOW als gesättigte Strömung modelliert.
<i>Lösungsverfahren</i>	Zusatzterm für Speicheränderung in den Grundwasserströmungsgleichungen, Finite Differenzen.
<i>Einbindung Grundwasserbewirtschaftung</i>	Über Grundwassermodell MODFLOW, die Bodenmechanik ist hierin integriert.
<i>Eingabe</i>	Der geologische Schichtenaufbau wird aus dem MODFLOW-Modell übernommen.
<i>Parameter</i>	Elastischer und inelastischer Speicherkoeffizient des Korngerüsts (elastic and inelastic skeletal storage coefficients), diese Koeffizienten lassen sich direkt aus der Steifigkeit berechnen. Der Interbed-Anteil wird in Prozent angegeben, durch Vorgabe eines Anteils von 100 % lassen sich auch durchgehende Geringleiterschichten modellieren. Vertikale Durchlässigkeit für Interbeds (vertical interbed conductance).

<i>Ausgabe</i>	Setzung an der Oberfläche, Setzung je Schicht, vertikale Verschiebung je Schicht, Spannungen, Porenzahl.
<i>Produkt und Hersteller</i>	Forschungscode (kein USGS-Paket)
<i>Referenz</i>	Shearer 1998
<i>Verfügbarkeit</i>	Forschungscode
<i>Besonderheiten</i>	Für im Grundwasserleiter eingeschlossene Tonlinsen (interbeds) entwickelt. Modifikation des IBS-Packages: zeitlich verzögerte Entwässerung der Interbed-Schichten.

## 6.6.4 MODFLOW-SUB: Subsidence and Aquifer-System Compaction Package

<b>Bodenmechanik</b>	<b>MODFLOW-SUB: Subsidence and Aquifer-System Compaction package</b>
<i>Funktionsprinzip</i>	Berechnung der Bodenbewegung infolge Änderung des Grundwasserstands in Grundwasserleitern mit sogenannten Interbeds. Interbeds sind in Grundwasserleitern eingeschlossene Linsen von Material mit geringer Durchlässigkeit, die Linsen haben eine kleine horizontale Ausdehnung und eine geringe Mächtigkeit. Die Interbeds werden zusammen gedrückt, das umgebende Leitermaterial nicht. Zeitlich verzögerte Entwässerung der Interbed Schichten, Auflösung der Interbeds in Sub-Zellen.
<i>Bodenmechanisches Modell</i>	Elastische und plastische Kompression nach Terzaghi, jedoch wird anstelle der logarithmischen Skala ein lineares Verhältnis angenommen, d. h. die Steifigkeit ist konstant. Die Änderung der effektiven Spannung wird mit den von MODFLOW berechneten Porenwasserdrücken berechnet. Eine Änderung des Grundwasserstands resultiert in einer Änderung der effektiven Spannung gleicher Höhe, jedoch mit umgekehrtem Vorzeichen. Das heißt, dass die totalen Spannungen bei fluktuierendem Grundwasserstand gleich bleiben.
<i>Grundwasserhydraulik (Konsolidierung)</i>	Interbed: Entwässerung von Interbeds mit Hilfe einer Diffusionsgleichung. Dabei wird eine effektive Mächtigkeit für alle Interbeds einer Schicht angenommen. Die Entwässerung von Interbeds in bereits trocken gefallener Grundwasserleiter ist nicht möglich. Aquitarde: Die Konsolidierung durchgehender bindiger Schichten (Aquitarde) kann auch direkt über das Grundwassermodell (MODFLOW) erfolgen. Die Entwässerung hin zu einem Leiter, dessen Grundwasserstand unterhalb der Basis des Geringleiters liegt (also in ungesättigtes Leitermaterial), wird in MODFLOW als gesättigte Strömung modelliert.
<i>Lösungsverfahren</i>	Zusatzterm für Speicheränderung in den Grundwasserströmungsgleichungen. Lösung der eindimensionalen Diffusionsgleichung für Interbeds mit Hilfe der Methode der finiten Differenzen (Sub-Cell 1D finite difference solution).
<i>Einbindung Grundwasserbewirtschaftung</i>	Über Grundwassermodell MODFLOW, die Bodenmechanik ist hierin integriert.
<i>Eingabe</i>	Der geologische Schichtenaufbau wird aus dem MODFLOW-Modell übernommen.
<i>Parameter</i>	Elastischer und inelastischer Speicherkoeffizient des Korngerüsts (elastic and inelastic skeletal storage coefficients); diese Koeffizienten lassen sich direkt aus der Steifigkeit berechnen. Der Interbed-Anteil wird in Prozent angegeben, durch Vorgabe eines Anteils von 100 % lassen sich auch durchgehende Geringleiterschichten modellieren. Vertikale hydraulische Diffusivität (vertical hydraulic diffusivity, Konsolidierungskoeffizient).

	Anzahl der Sub-Zellen zur Lösung der Diffusionsgleichung.
<i>Ausgabe</i>	Setzung je Schicht, Spannungen, Porenzahl.
<i>Produkt und Hersteller</i>	United States Geological Survey (United States Geological Survey 2018b)
<i>Referenz (Publikation, User-Manual o. ä.)</i>	Hoffmann et al. 2003
<i>Verfügbarkeit</i>	Open Source.
<i>Besonderheiten</i>	Erweiterung des IBS-Packages um die verzögerte Entwässerung bindiger Schichten. Dem IDP-Package sehr ähnlich, aber die Interbeds können mit dem Sub-Cell-ansatz sehr viel feiner aufgelöst werden.

## 6.6.5 MODFLOW-SUB-WT

<b>Bodenmechanik</b>	<b>MODFLOW-SUB-WT: Subsidence and Aquifer-System Compaction package (WT: water table)</b>
<i>Funktionsprinzip</i>	Berechnung der Bodenbewegung infolge Änderung des Grundwasserstands in Grundwasserleitern mit sogenannten Interbeds. Interbeds sind in Grundwasserleitern eingeschlossene Linsen von Material mit geringer Durchlässigkeit, die Linsen haben eine kleine horizontale Ausdehnung und eine geringe Mächtigkeit. Bei der Berechnung der Spannungen wird der Wechsel von gesättigtem zum ungesättigten Zustand berücksichtigt.
<i>Bodenmechanisches Modell</i>	Kompressionsmodell nach Terzaghi mit logarithmischer Abhängigkeit der Steifigkeit von der Spannung. Die effektive Spannung ändert sich mit dem aus den von MODFLOW berechneten Grundwasserstand abgeleiteten Porenwasserdruck und der Änderung der totalen Spannungen aus dem Wechsel vom gesättigten zum ungesättigten Zustand infolge einer Änderung des Grundwasserstands. Der Grundwasserstand sollte nicht unter die Schichtbasis fallen (nur bei aktivierter Option „Drying/Wetting“). Die Modellierung einer Entwässerung von Interbeds in einen trockenen Grundwasserleiter ist nicht möglich.
<i>Grundwasserhydraulik (Konsolidierung)</i>	Interbed: Keine zeitlich verzögerte Entwässerung der Interbeds. Die Entwässerung von Interbeds in bereits trocken gefallene Grundwasserleiter ist nicht möglich. Aquitarde: Die Konsolidierung durchgehender bindiger Schichten (Aquitarde) kann auch direkt über das Grundwassermodell (MODFLOW) erfolgen. Die Entwässerung hin zu einem Leiter, dessen Grundwasserstand unterhalb der Basis des Geringleiters liegt (also in ungesättigtes Leitermaterial), wird in MODFLOW als gesättigte Strömung modelliert.
<i>Lösungsverfahren</i>	Zusatzterm für Speicheränderung in den Grundwasserströmungsgleichungen.
<i>Einbindung Grundwasserbewirtschaftung</i>	Über Grundwassermodell MODFLOW, die Bodenmechanik ist hierin integriert.
<i>Eingabe</i>	Der geologische Schichtenaufbau wird aus dem MODFLOW-Modell übernommen.
<i>Parameter</i>	Steifigkeiten (Proportionalitätsfaktor C für Erst- und Wiederbelastung); Vorkonsolidierungsspannung (preconsolidation stress); Anfangsporosität; Interbed-Anteil (der Interbed-Anteil wird in Prozent angegeben, durch Vorgabe eines Anteils von 100 % lassen sich auch durchgehende Geringleiterschichten modellieren); Spezifische Wichte für gesättigten und ungesättigten Zustand; Alternative zu Steifigkeiten: Elastischer und inelastischer Speicherkoeffizient des Korngerüsts (Anfangswerte; elastic and inelastic skeletal storage coefficients); Speichereigenschaften in Abhängigkeit von effektiven Spannungen.

<i>Ausgabe</i>	Setzung an der Oberfläche, Setzung je Schicht, vertikale Verschiebung je Schicht.
<i>Produkt und Hersteller</i>	United States Geological Survey 2005
<i>Referenz (Publikation, User-Manual o. ä.)</i>	Leake & Galloway 2007
<i>Verfügbarkeit</i>	Open Source
<i>Besonderheiten</i>	Logarithmisches Terzaghi-Kompressionsmodell, Berücksichtigung des Sättigungszustands (Auftrieb).

## 6.6.6 MODFLOW-SUB-CR

<b>Bodenmechanik</b>	<b>SUB-CR: Subsidence and Aquifer-System Compaction package (CR: creep)</b>
<i>Funktionsprinzip</i>	Berechnung der Bodenbewegung infolge Änderung der Grundwasserdruckhöhe in Grundwasserleitern mit sogenannten Interbeds. Interbeds sind in Grundwasserleitern eingeschlossene Linsen von Material mit geringer Durchlässigkeit, die Linsen haben eine kleine horizontale Ausdehnung und eine geringe Mächtigkeit. Bei der Berechnung der Spannungen wird der Wechsel von gesättigtem zum ungesättigten Zustand berücksichtigt. Für die Bodenbewegung stehen zwei bodenmechanische Kompressionsmodelle zur Auswahl.
<i>Bodenmechanisches Modell</i>	Kompressionsmodell von Bjerrum (Abschnitt 4.6.5) oder ABC-Isotachen-Modell (Abschnitt 4.6.6). Die effektive Spannung ändert sich mit dem aus dem von MODFLOW berechneten Grundwasserstand abgeleiteten Porenwasserdruck und der Änderung der totalen Spannungen aus dem Wechsel vom gesättigten zum ungesättigten Zustand infolge einer Änderung des Grundwasserstands. Als Porenwasserdruck in der ungesättigten Bodenzone wird der atmosphärische Druck angesetzt, d. h. der Grundwasserstand darf auch unterhalb der Leiter- oder Stauerbasis liegen. Kriechprozesse werden über das Kompressionsmodell berücksichtigt. Kriechen findet auch in Schichten statt, die vollständig auskonsolidiert und trocken gefallen sind.
<i>Grundwasserhydraulik (Konsolidierung)</i>	Interbeds: Keine zeitlich verzögerte Entwässerung der Interbeds. Aquitarde: Konsolidierung über Grundwassermodell (MODFLOW). Die Entwässerung hin zu einem Leiter, dessen Grundwasserstand unterhalb der Basis des Geringleiters liegt (also in ungesättigtes Leitermaterial), wird in MODFLOW als gesättigte Strömung modelliert.
<i>Lösungsverfahren</i>	Zusatzterm für Speicheränderung in den Grundwasserströmungsgleichungen. Iterative Lösung von Bodenmechanik und Grundwasserströmung (iterative Kopplung).
<i>Einbindung Grundwasserbewirtschaftung</i>	Über Grundwassermodell MODFLOW, die Bodenmechanik ist hierin integriert, oder Vorgabe von Zeitreihen.
<i>Eingabe</i>	Der geologische Schichtenaufbau wird aus dem MODFLOW-Modell übernommen
<i>Parameter</i>	Spezifische Wichte für gesättigten und ungesättigten Zustand; Steifigkeiten für Erstbelastung, Entlastung und Wiederbelastung; Kriechparameter; Over Consolidation Ratio (OCR); Vorkonsolidierungsspannung (preconsolidation stress oder preconsolidation stress offset); Interbed-Anteil (der Interbed-Anteil wird in Prozent angegeben, durch Vorgabe eines Anteils von 100 % lassen sich auch durchgehende Geringleiterschichten modellieren).
<i>Ausgabe</i>	Setzung an der Oberfläche, Verdichtung je Schicht, vertikale

	Verschiebung je Schicht und weitere.
<i>Produkt und Hersteller</i>	Deltares (SUB-CR für iMOD und MODFLOW 2005)
<i>Referenz</i>	Kooi et al. 2017; Kooi 2016
<i>Verfügbarkeit</i>	Über Zusammenarbeitsvereinbarung
<i>Besonderheiten</i>	Modifikation des SUB-WT-Packages; berücksichtigt Kriechen, damit geeignet für lange Zeiträume.

## 6.7 FEFLOW-IFM-Modul von Rühaak

Auch für das Grundwasserströmungsprogramm FEFLOW ist ein Zusatzmodul zur Berechnung von Bodenbewegungen im Zusammenhang mit der Grundwassermodellierung entwickelt worden. Das Zusatzmodul kommuniziert mit FEFLOW über den sogenannten Interface Manager (IFM), eine offene Programmierschnittstelle, mit der über Programmcode in den Berechnungslauf von FEFLOW eingegriffen werden kann.

FEFLOW löst die Bestimmungsgleichungen der Grundwasserströmung mit der Methode der Finiten Elemente, entsprechend wurde für das FEFLOW-Modul zur Lösung der bodenmechanischen Gleichungen ebenfalls die Finite-Elemente-Methode gewählt. Die Lösung erfolgt für den dreidimensionalen Raum. Das FEFLOW-IFM-Modul von Rühaak nimmt damit eine Stellung zwischen Methoden ein, bei denen die Bodenbewegung im Zusammenhang mit einem Grundwasserströmungsmodell berechnet wird und den bodenmechanischen Programmen, die numerische Lösungsverfahren zur Berechnung der vom Kontrollvolumen abgeleiteten Bestimmungsgleichungen verwenden.

Das FEFLOW-Modul wäre für den Anwendungsfall des Rheinischen Braunkohlenreviers interessant, weil es für das Untersuchungsgebiet bereits ein FEFLOW-Grundwasserströmungsmodell gibt. Die dreidimensionale Lösung der bodenmechanischen Gleichungen wäre im Hinblick auf die Zielsetzung einer großräumigen Betrachtung nicht unbedingt erforderlich. Nachteilig ist, dass nur ein linear-elastisches Stoffgesetz zur Verfügung steht, welches nur eingeschränkt für die Fragestellung geeignet ist.

Methodenvergleich	FEFLOW-IFM-Modul von Rühaak
<i>Anwendungsbereich</i>	Das Modul erweitert das numerische Grundwasser- und Wärme- und Stofftransportprogramm FEFLOW um dreidimensionale linear-elastische Verformung des Bodens. Damit ist das Modul in Verbindung mit FEFLOW geeignet zur integrierten Modellierung von Grundwasserströmung und Fels- und Bodenmechanik.
<i>Anwendungsbeispiele</i>	Untersuchungen zur Geothermiegewinnung im Molassebecken (Rühaak et al. 2017), Testbeispiele (Rühaak et al. 2014), darunter Bodenverformung infolge Vergletscherung (langer Zeitraum).
<i>Größenordnung/Komplexität</i>	Das Modell zur Berechnung der Bodenverformung infolge Vergletscherung (Rühaak et al. 2014) hat eine Ausdehnung von 800 x 500 km <sup>2</sup>
<i>Kopplung von Bodenmechanik und Grundwasserbewirtschaftung</i>	Kopplung der Bodenmechanik mit Grundwasserströmung, Stoff- und Wärmetransport auf Zeitschrittbasis über den sogenannten Interface-Manager
<i>Ist die Methode jemals zur Berechnung von Hebungen eingesetzt worden?</i>	Ja (Rühaak et al. 2014).

<b>Grundwasserbewirtschaftung</b>	FEFLOW
<i>Funktionsprinzip</i>	Numerische Lösung
<i>Grundgleichungen</i>	Grundwasserströmungsgleichungen
<i>Lösungsverfahren</i>	Finite-Elemente-Methode
<i>Eingabe</i>	Modellparameter, Geologie, Berechnungsnetz
<i>Randbedingungen</i>	Vorgabe des Grundwasserstands, Vorgabe des Grundwasserdurchflusses, Leakage-Randbedingung für Zu- und Abstrom in Abhängigkeit der Wasserstandsdifferenz zwischen Oberflächen- und Grundwasserstand und Brunnenrandbedingung.
<i>Parameter</i>	Durchlässigkeitsbeiwerte, Speicherkoeffizienten
<i>Produkt und Hersteller</i>	DHI-Wasy (DHI 2018)
<i>Ausgabe</i>	Grundwasserstand und Fließgeschwindigkeiten über die Zeit für jeden Modellknoten
<i>Referenz (Publikation, User-Manual o. ä)</i>	Diersch 2005
<i>Verfügbarkeit</i>	Kommerzielle Software
<i>Besonderheiten</i>	Temperatur-, Dichte- und Stofftransportmodellierung möglich.

<b>Bodenmechanik</b>	<b>FEFLOW-IFM-Modul von Rühaak</b>
<i>Funktionsprinzip</i>	Finite-Elemente-Modell
<i>Bodenmechanisches Modell</i>	Dreidimensionale Lösung für linear-elastische Verformung
<i>Grundwasserhydraulik (Konsolidierung)</i>	Über Grundwassermodell (FEFLOW)
<i>Lösungsverfahren</i>	Finite-Elemente-Methode mit linear-elastischem Stoffgesetz
<i>Einbindung Grundwasserhydraulik</i>	Über Grundwassermodell. Es stehen mehrere Methoden zur Behandlung der freien Oberfläche zur Verfügung. Bei Entwässerung eines Stauers in die ungesättigte Bodenzone eines Leiters wird in der Regel die gesättigte Strömung angesetzt.
<i>Eingabe</i>	Bodenmechanische Parameter, Belastung und Verformungsrandbedingungen; es wird das Berechnungsnetz des Grundwassermodells verwendet.
<i>Parameter</i>	Lamé-Parameter $\lambda$ und $\mu$
<i>Ausgabe</i>	Verformung und Druck für numerische Stützstellen
<i>Produkt und Hersteller</i>	Eigenentwicklung
<i>Referenz (Publikation, User-Manual o. ä.)</i>	Rühaak et al. 2014
<i>Verfügbarkeit</i>	Open-Source, <a href="http://sourceforge.net/projects/ffp/">http://sourceforge.net/projects/ffp/</a>
<i>Besonderheiten</i>	Anwendungsbeispiel Vergletscherung mit Simulationszeitraum von 10 000 Jahren (Rühaak et al. 2014); Numerische Lösung bodenmechanischer Bestimmungsgleichungen in Zusammenhang mit einem Grundwassermodell.

## 6.8 Bodenmechanische Programme mit numerischen Lösungsverfahren für dreidimensionale Bodenbewegung

Unter „bodenmechanischen Programmen mit numerischen Lösungsverfahren“ wird hier eine Methode verstanden, bei der die Bestimmungsgleichungen vom Kräfte-, Massen- und Momentengleichgewicht am Kontrollvolumen für den dreidimensionalen Raum abgeleitet werden und numerisch gelöst werden. Es gibt verschiedene Produkte auf dem Markt, die Gleichungen für Kräfte- und Momentengleichgewicht und Massenbilanz für ein Kontrollvolumen lösen. Die verschiedenen Programme unterscheiden sich hinsichtlich der implementierten Stoffgesetze und weiterer Programmfunktionen wie z. B. der graphischen Benutzeroberfläche, Eingabefunktionen für Lastannahmen oder Visualisierungsfunktionen und dem numerischen Lösungsverfahren. Beispiele für gängige Computerprogramme, die bodenmechanische Gleichungen mit der Finite-Elemente-Methode lösen, sind PLAXIS (Plaxis bv Delft) und ABAQUS FEA (Dassault Systèmes). Das Programm FLAC (ITASCA) verwendet Finite Differenzen zur Lösung der Differentialgleichungen.

Stellvertretend wird hier das Programm PLAXIS in Form eines Steckbriefes vorgestellt, da es bereits für ein großräumiges Modell eingesetzt wurde (Abschnitt 5.5.5). ABAQUS wurde ebenfalls bereits zur Bearbeitung von Fragestellungen im rheinischen Braunkohlenrevier verwendet (Karcher 2003; Hügel 1995), allerdings nicht für die großräumige Bodenbewegungsprognose. ABAQUS ist mehr auf industrielle Anwendungen ausgerichtet, während PLAXIS schwerpunktmäßig für geotechnische Anwendungen entwickelt wurde.

<b>Methode</b>	<b>PLAXIS</b>
<i>Anwendungsbereich</i>	Geotechnische Berechnungen aller Art, zum Beispiel Berechnung von Bodenbewegungen für ein- oder zweidimensionale Bodenprofile oder im dreidimensionalen Raum.
<i>Anwendungsfälle</i>	Changzhou (China, Abschnitt 5.5.5), Griechenland (Loupasakis et al. 2014); Rheinisches Braunkohlenrevier (Karcher 2003; Hügel 1995)
<i>Größenordnung/Komplexität</i>	Finite-Elemente-Modelle werden oft für Bauvorhaben erstellt und haben dann eine entsprechend kleine räumliche Ausdehnung. Im Prinzip sind auch größere Modellgebiete möglich (siehe Anwendungsfälle), jedoch begrenzen Rechenzeitbedarf und Parametrisierung die Handhabbarkeit bei großen Modellen. Wesentliches Merkmal der Finite-Elemente-Methoden ist, dass die Bestimmungsgleichungen im dreidimensionalen oder zweidimensional-vertikalen Raum gelöst werden können. Auch eine eindimensionale Formulierung ist möglich.
<i>Kopplung von Bodenmechanik und Grundwasserbewirtschaftung</i>	Vollständig integriert.
<i>Ist die Methode jemals zur Berechnung von Hebungen eingesetzt worden?</i>	Vor dem Hintergrund, dass die Methode sehr weit verbreitet ist, ist anzunehmen, dass dies der Fall ist. In dem betrachteten Fallbeispiel wurden jedoch keine Hebungen berechnet.

<b>Grundwasserbewirtschaftung</b>	<b>PLAXIS</b>
<i>Funktionsprinzip</i>	Lösung der Grundwasserströmungsgleichungen mit Hilfe der Finite-Elemente-Methode
<i>Grundgleichungen</i>	Grundwasserströmungsgleichungen (Darcy-Gesetz und Massenbilanz)
<i>Lösungsverfahren</i>	Finite-Elemente-Methode
<i>Eingabe</i>	Berechnungsnetz (für Bodenmechanik und Grundwasserströmung wird das selbe Netz verwendet)
<i>Randbedingungen</i>	Vorgabe des Grundwasserstands, Vorgabe des Grundwasserdurchflusses, Drainage-Randbedingung
<i>Parameter</i>	Durchlässigkeitsbeiwerte, Speicherkoeffizienten
<i>Produkt und Hersteller</i>	PLAXIS (Produkt), Plaxis (Unternehmen) (Plaxis 2018)
<i>Ausgabe</i>	Wasserstände, Durchflüsse
<i>Referenz (Publikation, User-Manual o. ä)</i>	<a href="https://www.plaxis.com/support/manuals/plaxis-3d-manuals/">https://www.plaxis.com/support/manuals/plaxis-3d-manuals/</a>
<i>Verfügbarkeit</i>	Kommerzielles Software-Produkt
<i>Besonderheiten</i>	Vollständig gekoppelte Berechnung Grundwasserströmung und Bodenmechanik.

<b>Bodenmechanik</b>	<b>PLAXIS</b>
<i>Funktionsprinzip</i>	Die Differenzialgleichungen für Kräfte- und Momentengleichgewicht und Massenbilanz werden für ein Kontrollvolumen formuliert und numerisch gelöst.
<i>Bodenmechanisches Modell</i>	Kräfte- und Momentengleichgewicht und Massenbilanz; verschiedene Stoffgesetze
<i>Grundwasserhydraulik (Konsolidierung)</i>	Grundwasserströmungsgleichungen; verschiedene Optionen zur Berücksichtigung der Wechselwirkungen zwischen Korngerüst und Porenwasser: vollständig gekoppelt, vollständig entwässert, nicht entwässert, nicht-porös (z.B. Betonelemente)
<i>Lösungsverfahren</i>	Numerisch, Finite-Elemente-Methode
<i>Einbindung Grundwasserbewirtschaftung</i>	Grundwasserströmungsmodellierung ist integriert, der Schwerpunkt des Programms liegt jedoch auf der Bodenmechanik.
<i>Eingabe</i>	Bohrprofile mit Schichten; Berechnungsnetz, Sonderelemente für Platten, Balken, Anker und Geogitter; Bodenparameter; Randbedingungen (Bauwerke, Tunnel, Anker und dergl.), Belastung, Verformung
<i>Parameter</i>	Entsprechend des gewählten Stoffgesetzes (siehe Abschnitt 4.6.7). <ul style="list-style-type: none"> <li>• Linear-elastisches Stoffgesetz nach Hooke (Abschnitt 4.6.2): Elastizitätsmodul, Querkontraktionszahl (Poisson-Zahl).</li> <li>• Mohr-Coulomb-Stoffgesetz: Elastizitätsmodul, Querkontraktionszahl (Poisson-Zahl), Kohäsionszahl, Reibungswinkel.</li> <li>• Softsoil-Creep-Stoffgesetz: Kompressionsindex, Quellindex, Kriechindex, Sekundärer Kompressionsindex, Kohäsionszahl, Reibungswinkel, Dilatanzwinkel</li> <li>• Modifiziertes Cam-Clay-Stoffgesetz: Kompressionsindex, Quellindex, Querkontraktionszahl (Poisson-Zahl), Anfangsporenzahl, Tangens der Critical-State-Linie</li> </ul>
<i>Ausgabe</i>	Bodendeformation, Kräfte, Belastung auf Bauwerken
<i>Produkt und Hersteller</i>	PLAXIS (Produkt), Plaxis (Unternehmen), <a href="http://www.plaxis.com">www.plaxis.com</a>
<i>Referenz (Publikation, User-Manual o. ä.)</i>	Plaxis 2017
<i>Verfügbarkeit</i>	Kommerzielles Software-Produkt
<i>Besonderheiten</i>	Sehr umfangreiche Funktionen für geotechnische Anwendungen Funktionen zur Parameteroptimierung, zur Modellierung von Laborversuchen und Temperaturmodellierung (Vereisung)

## 6.9 Markscheiderische Methode nach Schaefer

Während die in den vorigen Abschnitten vorgestellten Methoden die physikalischen Gesetzmäßigkeiten der Bodenbewegung mathematisch abbilden, basieren markscheiderische Methoden auf einer Korrelation zwischen Grundwasserstandsänderungen und Bodenbewegung, sind also statistischer Art. Vermessungsarbeiten, und damit auch die Erfassung der Bodenbewegungen, sind wesentliche Aufgaben des Markscheidewesens (Schade 2004). Die im Folgenden vorgestellten Methoden werden deshalb als markscheiderische Methoden bezeichnet, weil Ergebnisse von Vermessungen die wesentlichen Eingangsdaten sind. Die markscheiderische Methode nach Schaefer (Hovekamp 2018; Poths 2017, Anhang D.3) ist für das Rheinische Braunkohlenrevier entwickelt worden und wird in diesem Abschnitt in Form eines Steckbriefs vorgestellt. Aber auch im Lausitzer Braunkohlenrevier wurden Bodenbewegungsprognosen auf Basis einer Korrelation zwischen Grundwasserstandsänderung und Bodenbewegung angewendet (Lieske & Schade 2016). Die markscheiderischen Prognosen wurden in der Vergangenheit mit Wiederholungsmessungen an Leitnivelementspunkten bestätigt (Hovekamp 2018, Anhang D.3).

Grundsätzlich sind die markscheiderischen Methoden in ihrer Anwendung auf Fälle begrenzt, in denen eine Korrelation zwischen Grundwasserstandsänderung und Bodenbewegung nachgewiesen werden kann. Bei bindigen Schichten mit großer Mächtigkeit kann es, wie eingangs bereits erwähnt, sein, dass noch Setzungen stattfinden, wenn der Grundwasserstand bereits wieder ansteigt. In diesem Fall ist eine Korrelation zwischen Grundwasserwiederanstieg und Bodenbewegung wegen der nachlaufenden Konsolidierung nicht mehr gegeben.

Wo ein markscheiderisches Verfahren angewendet werden kann, liegt sein Vorteil in der einfachen Datenermittlung und den einfachen Berechnungsverfahren. Die Eingangsparameter für die Prognose lassen sich vergleichsweise einfach bestimmen, es sind weder vertiefte geotechnische Kenntnisse noch geotechnische Messungen erforderlich, sondern lediglich die Vermessungsdaten für Geländehöhen und die entsprechenden Grundwasserstandsunterschiede. Es ist darum relativ einfach möglich, Bodenbewegungsprognosen für viele Vermessungspunkte und damit für ein flächendeckendes Netz zu erstellen. Für die beiden oben genannten Anwendungsfälle des Rheinischen Braunkohlenreviers und des Lausitzer Braunkohlenreviers werden markscheiderische Methoden für ein Netz aus Vermessungspunkten angewendet. Lieske & Schade 2016 leiten daraus eine Karte für tagebaunahe Hebungsprognosen ab. Um der Tatsache Rechnung zu tragen, dass benachbarte Punkte sehr unterschiedliche Bodensenkungen aufweisen können, benutzt Poths 2017 für die Interpolation das sogenannte Setzungsverhältnis, da dieses eine bessere räumliche Ähnlichkeit benachbarter Punkte aufweist als die absoluten Setzungsbeiträge selbst. Im Methodensteckbrief wird auf die Berechnungsvorschriften der markscheiderischen Methoden näher eingegangen.

<b>Methode</b>	<b>Markscheiderische Prognose nach Schaefer</b>
<i>Anwendungsbereich</i>	Bodenbewegungsprognose für Punkte oder Bereiche, in denen eine gute Korrelation zwischen Grundwasserstandsänderungen und Bodenbewegungen besteht.
<i>Anwendungsfälle</i>	Rheinisches Braunkohlenrevier
<i>Größenordnung/Komplexität</i>	Im Prinzip unbegrenzt. Anwendungsgrenzen ergeben sich durch die Verfügbarkeit von Daten zu bereits abgelaufenen Bodenbewegungen und den Grundwasserdaten für den Referenz- und Prognosezeitraum.
<i>Kopplung von Bodenmechanik und Grundwasserbewirtschaftung</i>	Grundwasserstandsdaten für den Referenz- und den Prognosezeitraum sind erforderlich. Nachlaufende Konsolidierungssetzungen bindiger Bodenschichten werden nicht explizit berücksichtigt.
<i>Ist die Methode jemals zur Berechnung von Hebungen eingesetzt worden?</i>	Ja.

<b>Bodenmechanik</b>	<b>Markscheiderische Prognose nach Schaefer</b>
<i>Funktionsprinzip</i>	Der Betrag der Setzungen und Hebungen verhält sich zeitlich proportional zum Betrag der Grundwasserabsenkung (- bei gespannten Verhältnissen: Entspannung) bzw. des Grundwasserwiederanstiegs.
<i>Bodenmechanisches Modell und Grundwasserhydraulik (Konsolidierung)</i>	<p>Bodensenkungen <math>B_{\text{PS}} = G_{\text{PS}} \cdot a</math></p> <p>Bodenhebungen <math>B_{\text{PH}} = f_a \cdot G_{\text{PH}} \cdot a</math></p> <p>worin <math>B_p</math> der prognostizierte Wert der Bodenbewegung und <math>G_p</math> die prognostizierte Grundwasserstandsänderung, jeweils mit Index S für Senkung und H für Hebung. <math>a</math> ist der Proportionalitätsfaktor und <math>f_a</math> ist der Abminderungsfaktor zur Berücksichtigung des irreversiblen Bodensenkungsanteils.</p>
<i>Lösungsverfahren</i>	Arithmetische Berechnung
<i>Einbindung Grundwasserbewirtschaftung</i>	Vorgabe der historischen und prognostizierten Änderung der Grundwasserstände
<i>Eingabe</i>	Änderung der Bodenbewegungen und Grundwasserdifferenzen
<i>Parameter</i>	Proportionalitätsfaktor und Abminderungsfaktor
<i>Ausgabe</i>	Bodenbewegung für einen Punkt
<i>Produkt und Hersteller</i>	-
<i>Referenz (Publikation, User-Manual o. ä.)</i>	Poths 2017, siehe auch Lieske & Schade 2016
<i>Verfügbarkeit</i>	intern über RWE Power AG
<i>Besonderheiten</i>	Grundprinzip ist eine Korrelation, keine physikalische Bestimmungsgleichung.

<b>Übertragung in die Fläche</b>	<b>Markscheiderische Prognose nach Schaefer</b>
<i>Algorithmus</i>	Zeitliche Extrapolation, räumliche Dreiecksvermaschung (Triangulation und lineare Interpolation innerhalb eines Dreiecks)
<i>Vorgehensweise</i>	<p>Für Stützstellen mit gemessenen und prognostizierten Bodenbewegungen (Prognosewert ermittelt mit markscheiderischem Verfahren (siehe oben) oder mit der Methode nach Ziegler und Aulbach) wird das Verhältnis der Bodenbewegungen <math>V_B</math> ermittelt:</p> $V_B = \frac{B_{t_p - t_0}}{B_{t_R - t_0}}$ <p>Dabei steht <math>B</math> für die Bodenbewegung innerhalb eines Zeitraums mit dem Anfangszeitpunkt <math>t_0</math>, einem Referenzzeitpunkt <math>t_R</math> und dem Prognosezeitpunkt <math>t_p</math>, wobei der Prognosezeitpunkt größer als der Referenzzeitpunkt ist, und die Anfangs- und Referenzzeitpunkt in der Regel Zeitpunkte einer Messung sind.</p> <p>Mittels Dreiecksvermaschung (Triangulation) wird eine räumliche Fläche der Bodenbewegungsverhältnisse erstellt. Aus dieser Fläche wird das Bodenbewegungsverhältnis für andere Punkte, für die ein Wert zum Referenzzeitpunkt vorliegt, ermittelt. Mit oben angegebener Gleichung lässt sich damit aus der Bodenbewegung im Referenzzeitraum die Senkung zum Prognosezeitpunkt berechnen.</p>
<i>Eingangsdaten</i>	Bodenbewegung im Referenzzeitraum, Bodenbewegungsverhältnis für Stützstellen, Modellierungsgrenzen
<i>Ausgabe</i>	Bodenbewegung für Punkte, für die eine Bodenbewegung im Referenzzeitraum bekannt ist.
<i>Verfügbarkeit des Verfahrens</i>	Als Berechnungsvorschrift verfügbar
<i>Referenz</i>	Poths 2017

## 7 Zusammenfassende Bewertung der Methoden

### 7.1 Einführung

Die im vorangegangenen Kapitel vorgestellten Methoden werden in diesem Kapitel anhand der in Abschnitt 3.5 vorgestellten Bewertungskriterien bewertet. Da die Bewertung vor allem physikalische Kriterien beinhaltet, sind die markscheiderischen Methoden von der Bewertung ausgenommen.

In den folgenden Abschnitten wird die Bewertung der Methoden erläutert. Die Punktzahlen sind in Anhang E in Form von Bewertungstabellen zusammengefasst. Die Erläuterung der Bewertungskriterien enthält Abschnitt 3.5.

Zunächst erfolgt die Bewertung anhand Mindestanforderungen und Bewertungskriterien. Hierfür wird auch eine Gesamtnote für alle bewerteten Methoden berechnet. Der darauf folgende Abschnitt behandelt die Neutralkriterien.

Die beurteilten Methoden sind hier nach Gruppen geordnet aufgelistet:

- Vereinfachter Ansatz
  - Fenk & Tzscharschuch
- Eindimensionale Methoden
  - Ziegler und Aulbach
  - D-Settlement
- Zusatzmodule für Grundwasserströmungsprogramme
  - MODFLOW-IBS
  - MODFLOW-SUB-WT
  - MODFLOW-SUB
  - MODFLOW-IDP
  - MODFLOW-SUB-CR, 1D-vertikales Modell
  - MODFLOW-SUB-CR, flächendeckendes Modell mit 3D-Grundwassermodell
  - FEFLOW: Rühaak
- Programme mit numerischer Lösung der vom Kontrollvolumen abgeleiteten bodenmechanischen Bestimmungsgleichungen
  - PLAXIS, 3D-Modell
  - PLAXIS, 1D- oder 2D-Modell.
- *Markscheiderische Methoden (nicht bewertet).*

### 7.2 Mindestanforderungen und Bewertungskriterien

#### 7.2.1 Aussagegenauigkeit, Prozesse und Geologie

Erste Mindestanforderung ist, dass **Mehrschichtsysteme** modelliert werden können. Von den betrachteten Methoden ist die Methode nach Fenk & Tzscharschuch in ihrer ursprünglichen Form die einzige Methode, die dieses Kriterium nicht erfüllt, alle anderen Methoden sind in der Lage, Mehrschichtsysteme abzubilden. Der von Fenk & Tzscharschuch verwendete Ansatz kann auch für Mehrschichtsysteme verwendet werden (siehe z. B. Fenk 2008; Wolkersdorfer & Thiem 1998), ein entsprechendes Programm müsste dann entwickelt werden.

Der Methode nach Fenk & Tzscharschuch liegt ein stationärer Ansatz zu Grunde, so dass damit die Konsolidierung nicht zeitabhängig modelliert werden kann. Damit erfüllt diese Methode auch die zweite Mindestanforderung, nämlich die Möglichkeit, die **Konso-**

**lidierung zeitabhängig** modellieren zu können, nicht. Alle anderen betrachteten Methoden sind in der Lage, die Konsolidierung nach Terzaghi oder Darcy mit ihrer Zeitabhängigkeit zu modellieren. Die Unterschiede der einzelnen Methoden liegen dann in den verwendeten Kompressionsmodellen und der Art und Weise, wie die Zeitabhängigkeit berücksichtigt wird. Bei den MODFLOW-Packages und dem FEFLOW-Modul wird das Auspressen des Porenwassers bei der Konsolidierung über das Grundwasserströmungsmodell abgehandelt. Die Methode nach Ziegler und Aulbach und das Programm D-Settlement legen den Konsolidierungsansatz von Terzaghi zu Grunde, bei PLAXIS wird wiederum eine numerische Lösung der Grundwasserströmungsgleichung angewendet. Allerdings ist der Funktionsumfang zur Grundwasserströmungsmodellierung in PLAXIS im Vergleich zu den Grundwasserströmungsprogrammen MODFLOW und FEFLOW wegen der unterschiedlichen Ausrichtung etwas kleiner.

Bei dem im Rheinischen Braunkohlenrevier vorhandenen Material sind plastische Verformungsanteile zu erwarten. Darum müssen die Methoden **Belastung, Entlastung und Wiederbelastung** mit ihrem bodenmechanischen Kompressionsmodell abdecken können (Mindestanforderung). Methoden, die allein ein linear-elastisches Spannungs-Dehnungs-Verhalten zu Grunde liegen, erfüllen diese Mindestanforderung nicht. Diese sind das FEFLOW-Modul von Rühaak und die Methode von Fenk & Zscharschuch. Alle MODFLOW-Pakete verwenden das Kompressionsmodell von Terzaghi, allerdings ist dies nur in SUB-WT und SUB-CR in der logarithmischen Form umgesetzt. SUB-WT und SUB-CR sind auch die einzigen beiden MODFLOW-Pakete, die die Veränderung der Spannung infolge einer Grundwasserstandsänderung modellieren können.

Aufgrund der Mindestanforderungen kommen die Methode von Fenk & Zscharschuch und das FEFLOW-Modul von Rühaak nicht in Frage. Nicht erfüllte Mindestanforderungen fließen mit null Punkten in die Gesamtbewertung mit ein.

Die Tagebausümpfung bringt es mit sich, dass die grundwasserführenden Schichten bereichsweise vollständig entwässert werden. Das bedeutet zum Einen, **dass die Grundwasserstauer in die ungesättigte Zone entwässern, also oberhalb des phreatischen Grundwasserspiegels liegen**, und zum Anderen, dass die Grundwasserdruckhöhe unterhalb der Basis einer Schicht liegen kann. Es ist vorteilhaft, wenn die Kompressionsmodelle hiermit bei der Berechnung der Spannungen im Zusammenhang mit Grundwasserstandsänderungen umgehen können. Nur drei der betrachteten Programme, nämlich die Methode nach Ziegler und Aulbach, SUB-CR und PLAXIS sind in der Lage, diese Besonderheit abzubilden. Werden SUB-CR und SUB-WT mit einem räumlichen MODFLOW-Mehrschichtgrundwassermodell eingesetzt, besteht hier die Einschränkung, dass mit MODFLOW nicht ohne weiteres eine ungesättigte Zone zwischen zwei Modellschichten modelliert werden kann. Aus diesem Grund erhält von den MODFLOW-Paketen nur die 1D-Variante des Moduls SUB-CR einen Punkt, denn in einem eindimensional-vertikalen MODFLOW-Modell werden die Grundwasserganglinien als Randbedingungen gesetzt, womit dieses Problem umgangen wird.

Bei allen Methoden, die eine Zeitabhängigkeit berücksichtigen, können die **Bodenparameter zeitabhängig** oder in Abhängigkeit von der Spannung vorgegeben werden. Damit macht dieses Kriterium keinen weiteren Unterschied hinsichtlich der Bewertung von Methoden.

Nicht mit allen MODFLOW-Paketen sind bereits **Hebungen berechnet** worden. einen Punkt erhalten MODFLOW-SUB, das IBS-Paket und SUB-CR. Auch für alle anderen Methoden außerhalb der Gruppe der MODFLOW-Pakete wurden Studien gefunden, in denen Hebungen modelliert wurden. Es sei an dieser Stelle darauf hingewiesen, dass die

Berechnung von Hebungen auch eins der Kriterien für die engere Auswahl von Fallbeispielen (vgl. Kap. 3.3) war.

Alle Methoden, die instationäre Berechnungen erlauben, sind auch für komplexe Fälle angewendet worden und die **instationäre Kalibrierung** ist jeweils nachgewiesen worden. Die Kalibrierung erfolgt in der Regel durch Vergleich der berechneten Setzungen mit gemessenen Setzungen, zum Teil auch anhand von Satellitenaufnahmen. Somit ergibt sich kein zusätzliches Unterscheidungsmerkmal aus diesem Kriterium.

#### 7.2.2 Umsetzbarkeit für den Fall des Rheinischen Braunkohlenreviers

Die **Anwendbarkeit im Rheinischen Braunkohlenrevier** wurde besonders positiv bewertet (zwei Punkte), wenn die Methode bereits in der Vergangenheit im Rheinischen Braunkohlenrevier angewendet wurde. Dies ist der Fall für die Methode von Ziegler und Aulbach. Zwar wurden im Rheinischen Braunkohlenrevier auch numerische Finite-Elemente-Programme eingesetzt (Hügel 1995, Karcher 2003), bei diesen Untersuchungen standen jedoch andere Fragestellungen im Vordergrund als die Prognose von Bodenhebungen. Mit Hilfe von Testrechnungen kann die Eignung für den vorliegenden Anwendungsfall auch für andere Methoden nachgewiesen werden. Wenn die Eignung zwar noch nicht nachgewiesen, aber erfolversprechend ist und somit beurteilt werden kann, wurde dies positiv bewertet (ein Punkt). Ist die Eignung unwahrscheinlich, wurde dies nachteilig eingeschätzt (null Punkte), was jedoch wegen der Mindestanforderungen nur auf die Methode von Fenk & Tzscharschuch zutraf.

Zur **Integration einer Methode in das bestehende Grundwassermodell des LANUV** gab es zwei Punkte, wenn diese bereits realisiert ist, einen Punkt, wenn sie realisiert werden kann und keinen Punkt, wenn ein neues Grundwassermodell entwickelt werden müsste. Die Integration unterscheidet sich wesentlich für die Methoden, die eindimensionale Bodenprofile berechnen und für die Methoden, die als Zusatzmodul für ein Grundwassermodell konzipiert sind. Bei 1D-Methoden genügt es, die Zeitreihen aus dem FEFLOW-Grundwassermodell im richtigen Format zu extrahieren. Steht hierfür ein IFM-Modul zur Verfügung, gab es zwei Punkte; einen Punkt, wenn das Format bekannt ist und ein entsprechendes IFM-Modul für den automatischen Datenexport programmiert werden kann. Zwei Punkte erreicht die Methode von Rühaak, weil diese als FEFLOW-IFM-Modul umgesetzt ist. Die Methode von Ziegler und Aulbach, D-Settlement und das PLAXIS-1D-Modell sowie die MODFLOW-Module erreichen einen Punkt. Bei PLAXIS 3D kommt die Integration des LANUV-Grundwassermodells einem Neuaufbau gleich, deshalb werden für PLAXIS 3D in diesem Kriterium null Punkte vergeben.

Bei den Grundwassermodell-Zusatzmodulen muss das Modul so integriert werden, dass auf Zeitschrittbasis Daten ausgetauscht werden. Für die Methode von Rühaak ist dies bereits gegeben, denn die Methode ist als FEFLOW-IFM-Modul programmiert und erhält somit zwei Punkte. Ein MODFLOW-Modul könnte ebenfalls in die IFM-Schnittstelle von FEFLOW integriert werden. Um einen Punkt zu erreichen, muss der Quellcode dazu verfügbar sein. Dies ist zunächst der Fall für alle vom United States Geological Survey (USGS) als Open-Source bereit gestellten Pakete und das Modul SUB-CR, das über eine Kooperationsvereinbarung zur Verfügung gestellt werden kann.

Für ein dreidimensionales PLAXIS-Modell, das einen großen Teil oder das ganze Untersuchungsgebiet abdeckt, müsste gleichsam ein neues Grundwassermodell in PLAXIS entwickelt werden, darum erhält die 3D-Lösung mit PLAXIS für dieses Kriterium null Punkte.

Zur Beurteilung der **Modellkomplexität** war der ursprüngliche Gedanke, die Anzahl der Parameter heran zu ziehen. Wie in Abschnitt 4.8 erläutert, unterscheiden sich die Kom-

pressionsmodelle hinsichtlich der Parameterzahl. Nun bieten einige Programme eine Auswahl mehrerer Kompressionsmodelle an, so dass in diesem Fall die Beurteilung anhand der Parameterzahl schwierig wird. Weiterhin geht eine höhere Anzahl Parameter mit einer besseren Abbildung der Prozesse einher. Ist die Parameterzahl zu hoch, können einzelne Prozesse durch Wahl eines geeigneten Parameters (oft Null oder Eins) auch deaktiviert werden. Bei dreidimensionalen Modellen könnte die Zahl der Parameter auf eine ähnliche Art reduziert werden. Aus diesem Grund wird die Modellkomplexität auf Grundlage der Modellgröße bewertet. Bei Modellen, die das Untersuchungsgebiet flächenhaft abbilden, müssen die Parameter für jede Stützstelle im Modellgebiet bestimmt werden, also flächendeckend. Eindimensionale Methoden erfordern nur für Einzelpunkte Parameter, damit ist der Aufwand der Parameterschätzung viel geringer.

### 7.2.3 Programmtechnische Aspekte

Hinsichtlich der Konsolidierung haben die auf Grundwassermodellen aufgesetzten Methoden zunächst den Nachteil, dass die Konsolidierung mit der Diskretisierung des Grundwassermodells berechnet wird. Ist die **vertikale Diskretisierung** einer stauenden Schicht hinreichend fein, stellt dies jedoch kein Problem dar. Wegen des Interbed-Ansatzes verfügen einige MODFLOW-Pakete über Funktionen, die eine bessere Abbildung des Konsolidierungsprozesses auch bei grob aufgelösten Schichten ermöglichen. Analytische Ansätze (Konsolidierungstheorie nach Terzaghi) haben hier den Vorteil, dass keine vertikale Diskretisierung erforderlich ist. Zwei Punkte wurden daher für D-Settlement und die Methode nach Ziegler und Aulbach vergeben. Die MODFLOW-Pakete mit Funktionen zur verbesserten Modellierung der Diskretisierung erhielten einen Punkt. Ausnahme ist hier das IDP-Modell, das eine numerische Unterdiskretisierung ermöglicht. Hängt die Diskretisierung allein vom Schichtaufbau ab, wurden null Punkte vergeben. Dies trifft auf MODFLOW-IBS und MODFLOW-SUB-CR zu, ebenso auf die Methode von Rühhaak und auf PLAXIS 3D. Noch einmal sei gesagt, dass mit diesen Methoden dennoch genaue Resultate erreicht werden können, es muss nur das Berechnungsnetz entsprechend verfeinert werden, was in dreidimensionalen Modellen voraussichtlich jedoch eine deutliche Erhöhung der Rechenzeiten nach sich ziehen würde.

Die Frage des **Rechenzeitbedarfs** wird häufig gestellt, ist aber schwierig zu beantworten. Für eine genaue Aussage sind Vergleichsrechnungen notwendig. Grundsätzlich sind eindimensionale Berechnungen viel schneller als mehrdimensionale Berechnungen. Vor diesem Hintergrund erhalten die eindimensionalen Methoden zwei Punkte, Zusatzmodule für Grundwassermodelle, in denen die Bodenmechanik eindimensional berechnet wird, erhalten einen Punkt, und vollständig dreidimensionale Lösungen null Punkte.

Das **Entwicklungsstadium** berücksichtigt den Reifegrad der Software. Produkte, die kommerziell, als Freeware oder als Open-Source-Software einen großen Nutzerkreis erschlossen haben, erhalten zwei Punkte, diese Produkte sind vermutlich für das Rheinische Braunkohlenrevier sofort einsetzbar. Zwei Punkte wurden daher für D-Settlement, die vom USGS herausgegebenen MODFLOW-Pakete und PLAXIS vergeben. Produkte, die als Forschungscode ihre Einsatzfähigkeit bewiesen haben, werden mit einem Punkt bewertet; es wird in diesem Fall davon ausgegangen, dass noch kleinere Weiterentwicklungen notwendig sind, bevor das Produkt für den vorliegenden Fall einsatzbereit ist. Die Methode von Ziegler und Aulbach erhält zwei Punkte, da sie derzeit bereits für die vorliegende Fragestellung eingesetzt wird. Null Punkte erhält der Ansatz von Fenk & Tzschar-schuch, weil dieser noch nicht als Software-Produkt auf dem Markt ist und erst neu entwickelt werden muss.

Hinsichtlich der **Verfügbarkeit** wurden zwei Punkte vergeben, wenn die Methode als Open-Source-Produkt verfügbar ist. Dies trifft für die offiziellen MODFLOW-Pakete zu.

Kommerzielle Produkte wie D-Settlement und PLAXIS erhalten einen Punkt; an der Nutzung dieser Produkte sind Lizenzkosten verbunden. Null Punkte wurden für die Methode von Ziegler und Aulbach, IDP und SUB-CR vergeben; diese Produkte sind (noch) nicht auf dem Markt und/oder können nur im Rahmen einer Ingenieurdienstleistung oder über eine Kooperationsvereinbarung genutzt werden. Die Bewertung spiegelt wieder, inwieweit die Nutzung einer Methode mit laufenden Kosten verbunden ist und inwieweit es neben dem Softwarehersteller und dem LANUV Dritten möglich ist, eine Methode zu nutzen.

#### 7.2.4 Gesamtbewertung

Nach Ausschluss der Methoden, die eine oder mehrere Mindestanforderungen nicht erfüllen, ergibt sich in der Gesamtbewertung für die ersten fünf Plätze die folgende Reihenfolge:

- Methode von Ziegler und Aulbach mit 21 Punkten;
- PLAXIS 1D mit 20 Punkten;
- MODFLOW-SUB-CR 1D mit 19 Punkten;
- D-Settlement mit 18.5 Punkten;
- MODFLOW-SUB mit 16.5 Punkten.

Es liegen damit vier Methoden vorn, mit denen eindimensionale Bodenbewegungsprognosen erstellt werden können.

### 7.3 Neutralkriterien

In Tabelle E.2 sind Charakteristika und Programmfunktionalitäten für die Methoden aufgeführt. Sie werden als Neutralkriterien behandelt und dienen mehr zur Information oder zur sekundären Entscheidungsunterstützung. Im Folgenden wird kurz allgemein auf diese Kriterien eingegangen.

Betrachtet man in Tabelle E.2 die Zeilen für **Bodenmodelle und Stoffgesetze**, dann fällt auf, dass eine Reihe von Programmen nur eine Art Basis-Kompressionsmodell (linear-elastisch oder logarithmisches Modell nach Terzaghi) anbieten, während andere eine Auswahl von mehreren Kompressionsmodellen bzw. Stoffgesetzen anbieten. Mitentscheidend bei der Auswahl eines Programms ist daher, ob die Basis-Kompressionsmodelle für die jeweilige Anwendung ausreichen oder ob komplexere Kompressionsmodelle benutzt werden müssen.

Unter den **programmtechnischen Aspekten** sind die Dimensionalität und die Kopplung mit dem Grundwassermodell Kriterien, die Einfluss auf den Grad der Genauigkeit der Wiedergabe der physikalischen Prozesse betreffen. Diese Kriterien sind dennoch als Neutralkriterien eingestuft, denn sie bestimmen auch maßgeblich den mit einer Bodenbewegungsprognose verbundenen Parametrisierungsaufwand. So ist eine dreidimensionale oder flächendeckende Modellierung mit wesentlich mehr Aufwand verbunden als eine eindimensionale. Ebenso stellen gekoppelte Modellierungen einen nicht unerheblichen Mehraufwand gegenüber der Modellierung getrennter Prozesse dar. Die Bedienungsweise eines Programms ist für das Ergebnis nur mittelbar entscheidend. Modelle können mit oder ohne Benutzerführung (graphical user interface) erstellt werden. Welche Art hier bevorzugt wird ist jedoch subjektiv und hat keine Auswirkung auf die Modellierungsergebnisse. Auch die Ermittlung von Parametersensitivitäten und die Kalibrierung können in der Regel außerhalb eines Bodenbewegungsprogramms erfolgen. Sind derar-

tige Funktionalitäten jedoch Bestandteil eines Programms, reduziert dies den Bearbeitungsaufwand vor allem in der Anfangsphase.

Die unter **Leistungen** aufgeführten Charakteristika geben einen Eindruck über den Reifegrad der Software. Je weiter entwickelt eine Software ist, desto geringer ist die Wahrscheinlichkeit, dass Programmfehler auftreten, die die Arbeit verzögern oder gar behindern. Support- und Wartungsverträge regeln Hilfestellung beim Arbeiten mit einem Programm oder die Behebung von Fehlern. Solche Leistungen werden oft auch erst für etablierte Programme angeboten, die von einer größere Zahl von Nutzern in Gebrauch ist.

## 8 Interpolationsmethoden

### 8.1 Einführung

Dieses Kapitel widmet sich den Interpolationsmethoden zur Übertragung von Punktdaten in die Fläche. Zunächst wird im folgenden Abschnitt die Grundidee dieser Interpolation im zweidimensionalen Raum erläutert. Anschließend werden Methoden aus der Gruppe der nicht-statistischen Verfahren und der statistischen Interpolationsverfahren vorgestellt. Ein weiterer Abschnitt behandelt zu berücksichtigende Aspekte bei der Anwendung von Interpolationsverfahren im Zusammenhang mit Flurabstandsprognosen im Rheinischen Braunkohlenrevier. Im letzten Abschnitt werden die vorgestellten Verfahren hinsichtlich ihrer Anwendbarkeit für die vorliegende Fragestellung diskutiert.

### 8.2 Geo-Interpolation

Interpolationen werden im Allgemeinen durchgeführt, um Funktionswerte für Orte oder Zeitpunkte zu finden, zu denen keine Informationen vorliegen. Diese Funktionswerte werden aus den Funktionswerten umliegender Orte oder Zeitpunkte abgeschätzt. Im einfachsten Fall werden bei einer linearen Interpolation zwischen zwei Punkten die Funktionswerte der zwei nächstgelegenen benachbarten Punkte im eindimensionalen Raum mit einer geraden Linie verbunden und die Funktionswerte von dieser Gerade abgelesen oder über eine Geradengleichung berechnet. Anstelle einer linearen Funktion können auch höherwertige Polynome verwendet werden, zum Beispiel quadratische und kubische Funktionen. Eine weitere weit verbreitete eindimensionale Interpolationsmethode ist die Spline-Interpolation, die häufig in Grafik-Software zur Anwendung kommt.

Im Zusammenhang mit einer Bodenbewegungsprognose geht es allerdings nicht um eine Interpolation zwischen zwei Punkten auf einer Linie, sondern um die Übertragung zweidimensional verteilter Punktdaten in die Fläche (z.B. in ein hoch aufgelöstes, regelmäßiges Raster). Eine solche Übertragung in die Fläche wird auch Regionalisierung genannt. Die Interpolation ist hier die Bestimmung von Werten an unbekanntem Stellen der Erdoberfläche (Schätzpunkte; Rasterknoten) aus punktuellen Werten an bekannten Stellen (Stützstellen). Die zweidimensionale Interpolation wird im Folgenden als „Geo-Interpolation“ bezeichnet. Auch im dreidimensionalen Raum ist eine Interpolation möglich (Ledoux & Gold 2018). Im Zusammenhang mit der Erstellung von Flurabstandsprognosen ist eine dreidimensionale Interpolation wenig sinnvoll, darum wird darauf hier nicht eingegangen.

Mit Hilfe der Geointerpolation sollen Stützstellen um Schätzpunkte ergänzt werden, so dass eine für die Kartenerstellung ausreichende Datengrundlage entsteht. Die den Stützstellen und Schätzpunkten zugeordneten Werte können zum Beispiel Flurabstände oder mit eindimensionalen Modellen berechnete absolute Geländehöhen sein, aber auch absolute Senkungsbeträge oder relative Senkungsverhältnisse aus der markscheiderischen Prognose von Bodenbewegungen (Abschnitt 6.9).

Bei Methoden zur Bodenbewegungsprognose, die das Untersuchungsgebiet mit einem Berechnungsnetz abbilden (numerische 3D-Programme, Zusatzmodule eines Grundwasserströmungsprogramms), ist die Datengrundlage meistens für eine Kartenerstellung ausreichend, das heißt, Konturlinien oder Isolinien können direkt aus den Modellergebnissen abgeleitet werden. Einige Computerprogramme bieten eine solche Darstellung in der Benutzeroberfläche an.

Bei den 1D-Programmen dagegen bildet jedes Bodenprofil gleichsam ein eigenes Modell. Um eine neue Stützstelle zu erhalten, muss ein weiteres Modell erstellt werden. Mit Hilfe der Geointerpolation soll, ausgehend von den vorhandenen Stützstellen, die Datengrundlage so verdichtet werden, dass eine Karte daraus erstellt werden kann. Dieses Kapitel widmet sich der Frage nach geeigneten Interpolationsverfahren, mit denen punktuelle Bodenbewegungsinformationen in die Fläche übertragen werden können.

Die Geointerpolationsverfahren werden dazu in nicht-statistische oder deterministische Verfahren und in geostatistische Verfahren eingeteilt. Zu den nicht-statistischen Verfahren zählen:

- Nearest-Neighbour-Interpolation;
- Inverse-Distanz-Methode;
- Dreiecksvermaschung oder Triangulation;
- Bilineare Interpolation.

Alle statistischen Verfahren gehören zur Kriging-Familie. Die Kriging-Technik ist nach Danie Gerhardus Krige (1919–2013) benannt, der als Pionier der Geostatistik gilt.

Neben Interpolationsverfahren gibt es noch weitere Verfahren zur Regionalisierung, die eher Simulationsverfahren zuzuordnen sind und auf die darum an dieser nicht weiter eingegangen wird. Zunächst können Analogmodelle zu physikalischen Prozessen verwendet werden, um Punktdaten zu regionalisieren. Ein Beispiel ist die sogenannte „Diffusion Interpolation“. Diesem Verfahren liegt die Lösung einer Wärmetransportgleichung zu Grunde. Weiterhin gibt es geostatistische Simulationsverfahren wie zum Beispiel die Gauss'sche geostatistische Simulation. Der wesentliche Unterschied zwischen Interpolationsverfahren und geostatistischen Simulationsverfahren ist, dass Interpolationsmethoden genau einen Wert pro Schätzzort liefern, während geostatistische Simulationsverfahren mehrere mögliche Werte liefern, die eine Art „Rauschen“ natürlich verteilter Parameter widerspiegeln. Die Ergebnisse geostatistischer Simulationsverfahren eignen sich darum gut für Risikoanalysen.

Es ist zudem die Unterscheidung zu treffen, ob bei der Interpolation die Originalwerte an den Stützstellen erhalten bleiben oder ob diese durch eine Art Glättung mit neuen Schätzwerten überschrieben werden.

### 8.3 Nicht-statistische Verfahren

#### 8.3.1 Nearest Neighbour

Die Nearest-Neighbour-Interpolation ordnet einem Schätzzort den Wert der am nächsten gelegenen Stützstelle zu. Das Ergebnis einer solchen Interpolation wird Voronoi-Diagramm oder Thiessen-Polygon genannt. Abbildung 8.1 zeigt ein Beispiel eines Voronoi-Diagramms. Vor dem Hintergrund der Bodenbewegungsprognose liegt der Nachteil von Nearest-Neighbour-Methoden im un stetigen Übergang an den Polygongrenzen. Nearest-Neighbour-Methoden werden deshalb zum Beispiel zur Darstellung der Einzugsgebiete von Schulen oder Geschäften verwendet. Auch in der Hydrologie werden Nearest-Neighbour-Verfahren eingesetzt, zum Beispiel für Niederschlagsdaten. Die Nearest-Neighbour-Interpolation ist ein exaktes Interpolationsverfahren, das heißt, dass die Werte an den Stützstellen exakt getroffen werden.

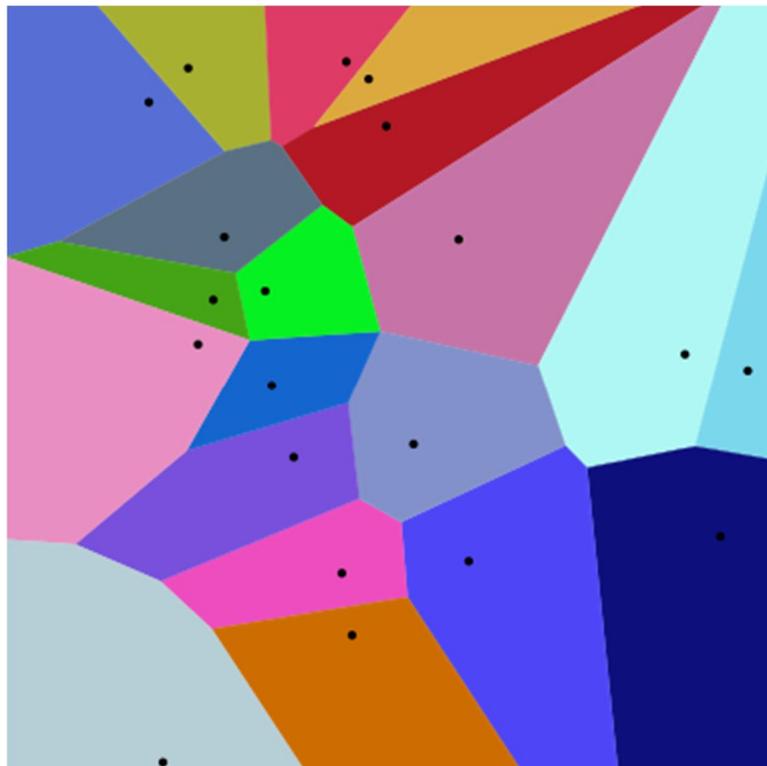


Abbildung 8.1 Beispiel eines Voronoi-Diagramms (Ertl 2015)

### 8.3.2 Inverse-Distanz-Methode

Bei der Inverse-Distanz-Methode ist der Schätzwert die Summe aller Werte an Stützstellen (Messwert), jeweils multipliziert mit einem Wichtungsfaktor. Der Wichtungsfaktor ist der Kehrwert des Abstandes zwischen Schätzzort und der jeweiligen Stützstelle. Grundannahme ist, dass die Ähnlichkeit des Schätzwertes zum Wert einer Stützstelle mit der Entfernung zur Stützstelle abnimmt.

Als Erweiterungen der Methode kann zunächst eine Reichweite vorgegeben werden, das heißt ein maximaler Abstand vom Schätzzort, bis zu dem eine Stützstelle noch in die Berechnung einfließt. Stützstellen, die außerhalb der Reichweite liegen, werden nicht berücksichtigt. Auch kann bei der Berechnung des Wichtungsfaktors der Abstand quadriert werden, es können selbst noch höhere Exponenten verwendet werden.

Inverse-Distanz-Wichtung ist ein einfaches exaktes Verfahren der Geointerpolation. Die Stützstellen sollten räumlich möglichst gleich verteilt sein. Bei einer Clusterung der Stützstellen gewinnen die Stützstellen eines Clusters einen höheren Einfluss als Stützstellen, die in Bereichen mit geringerer Stützstellendichte liegen.

### 8.3.3 Polynom-Interpolation

Die Idee der Polynom-Interpolation ist es, eine glatte Oberfläche zu finden, die durch ein Polynom mathematisch beschrieben werden kann und so gut wie möglich zu den Werten der Stützstellen passt. Anders als bei den oben beschriebenen Methoden werden die Werte der Stützstellen im Interpolationsergebnis nicht zwangsläufig exakt getroffen (siehe Abbildung 8.2). Es gibt verschiedene Weiterentwicklungen der Polynominterpolation:

- Lokale Polynominterpolation: Anstelle eines globalen Polynoms für das gesamte Interpolationsgebiet werden verschiedene Polynome für Teilgebiete verwendet. Die Teilgebiete überlappen.
- Radiale Basisfunktion: Es werden Spline-Funktionen verwendet, so dass die Werte der Stützstellen getroffen werden.
- Die Kernel Interpolation With Barriers: Eine erweiterte lokale Polynominterpolation, die auch in der Lage ist, mit linienförmigen Grenzen (Barriers) umzugehen.

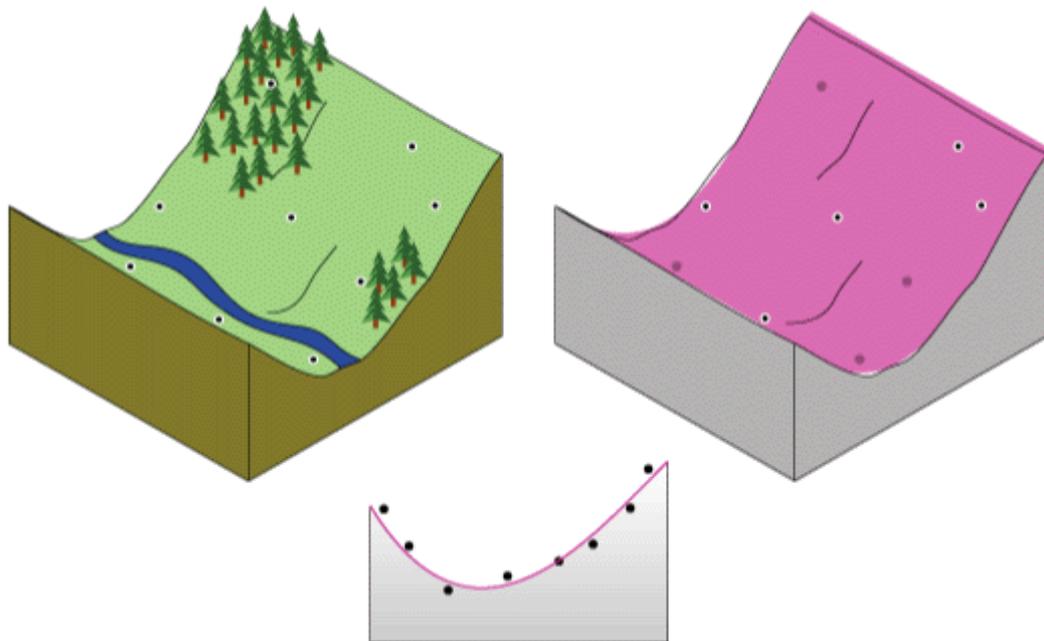


Abbildung 8.2 Polynom-Interpolation einer Geländeoberfläche mit einem Polynom 2. Grades (ESRI 2018a)

#### 8.3.4 Interpolation von unregelmäßig angeordneten Punktemengen: Dreiecksvermaschung und Triangulation

Eine Triangulation oder Dreiecksvermaschung ist zunächst die Erzeugung eines Dreiecknetzes aus einer meistens unregelmäßig verteilten Punktemenge. So entsteht aus der Punktwolke eine 2½-dimensionale Fläche. Handelt es sich um Dreiecke unterschiedlicher Größe, wird das Dreiecknetz Triangulated Irregular Network (TIN) genannt.

Ein sehr verbreitetes Verfahren ist die sogenannte Delaunay-Triangulation, die nach dem russischen Mathematiker Boris Nikolajewitsch Delone (1890–1980) benannt ist. Die Triangulation erfolgt bei diesem Verfahren so, dass innerhalb des Kreises, auf dem die Dreieckspunkte liegen (Umkreis des Dreiecks), keine anderen Punkte enthalten sind.

Vermessungsnetze können als Basis für die Triangulation dienen (Hovekamp 2018; Poths 2017; Lieske & Schade 2016). Finite-Elemente-Netze aus Dreiecken werden in der Regel mit Hilfe von Netzgeneratoren erstellt, in denen Triangulationsroutinen verwendet werden.

Sind die Stützstellen für die Interpolation in einem Dreiecknetz angeordnet, kann nun die Interpolation innerhalb des Dreiecks erfolgen, um die Schätzwerte zu berechnen. Damit gehören Triangulationen zu den exakten Verfahren, die Werte an den Stützstellen werden nicht mit Schätzwerten überschrieben.

Die einfachste Interpolation innerhalb eines Dreiecks ist die lineare Interpolation. Mit einem Schätzzort innerhalb eines Dreiecks und den Eckpunkten dieses Dreiecks lassen sich drei Unterdreiecke einteilen. Die Fläche eines Unterdreiecks geteilt durch die Fläche des Hauptdreiecks ist der Wichtungsfaktor für die dem Unterdreieck gegenüber liegende Stützstelle. Die sogenannte bivariate Interpolation von Akima 1978 verwendet anstelle des oben beschriebenen linearen Zusammenhangs ein Polynom fünften Grades. Die bivariate Interpolation oder Akima-Interpolation ist weit verbreitet für grundwasserwirtschaftliche Anwendungen und zum Beispiel Bestandteil von iMOD (Vermeulen et al. 2017) oder FEFLOW (DHI 2018).

Viele Darstellungsprogramme und geographische Informationssysteme können aus einem TIN Konturlinien ableiten. Abbildung 8.3 zeigt ein Beispiel für eine Oberfläche, die als TIN modelliert ist.

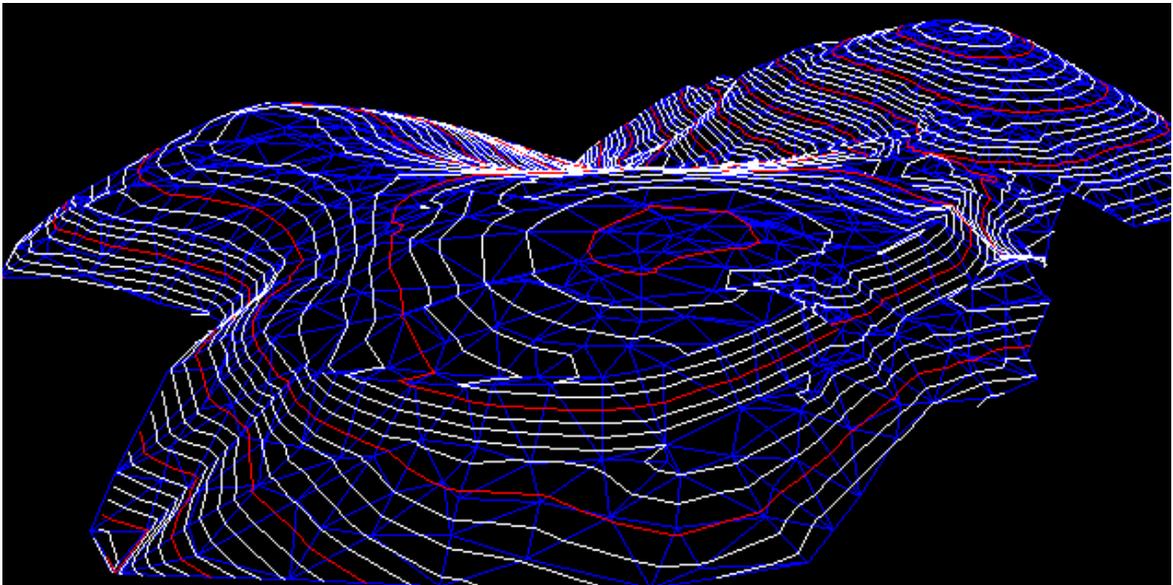


Abbildung 8.3 Dreiecknetz (blau) mit Konturlinien (weiß und rot) als digitales Geländemodell (Kropf 1999)

Die Dreieckvermaschung erfordert eine ausreichend hohe Punktdichte und eine möglichst gleichmäßige räumliche Verteilung, um sinnvolle Ergebnisse zu liefern. An die Lage der Punkte werden keine besonderen Anforderungen gestellt. Aber auch Punktmengen mit hohem Clusterungsgrad können zu einem Dreiecknetz vermascht werden.

### 8.3.5 Interpolation von Rechteckgittern

Auf einem rechtwinkligen Gitter kann eine lineare Interpolation durchgeführt werden: zunächst wird in einer Richtung interpoliert, zum Beispiel in horizontaler Richtung, und mit den Ergebnissen dieses ersten Interpolationsschrittes wird anschließend zum Beispiel in vertikaler Richtung interpoliert. Obwohl in jedem der beiden Interpolationsschritte eine lineare Interpolation ausgeführt wird, entsteht an der Schätzstelle ein quadratisches Ergebnis als Produkt zweier linearer Funktionen. Das oben skizzierte Verfahren wird daher als „bilineare Interpolation“ bezeichnet. Die Zellen des Gitters müssen nicht notwendigerweise gleich groß sein. Raster mit quadratischen Zellen gleicher Größe sind allerdings sehr gebräuchlich. Wie auch bei der oben beschriebenen Interpolation von Dreiecken entsteht so eine Gewichtung durch die Einflussfläche der jeweiligen Stützstelle (Abbildung 8.4).

Eine Erweiterung der bilinearen Interpolation ist die bikubische Interpolation; hier wird nicht nur diejenige Rasterzelle, in der der Schätzzpunkt liegt, verwendet, sondern zusätz-

lich werden benachbarte Stützstellen in die Interpolation einbezogen. Bikubische Interpolation kann mit verschiedenen Polynomen wie zum Beispiel kubischen Splines oder Minimum-Curvature-Methoden verwendet werden. Die oben erwähnten Akima-Methoden (Akima 1978) können auch für regelmäßige Gitter verwendet werden.

Voraussetzung für eine bilineare Interpolation ist, dass die Stützstellen auf einem regelmäßigen Raster angeordnet sind. In der Regel sind diese Interpolationsverfahren exakt (Originalwerte an Stützstellen werden erhalten).

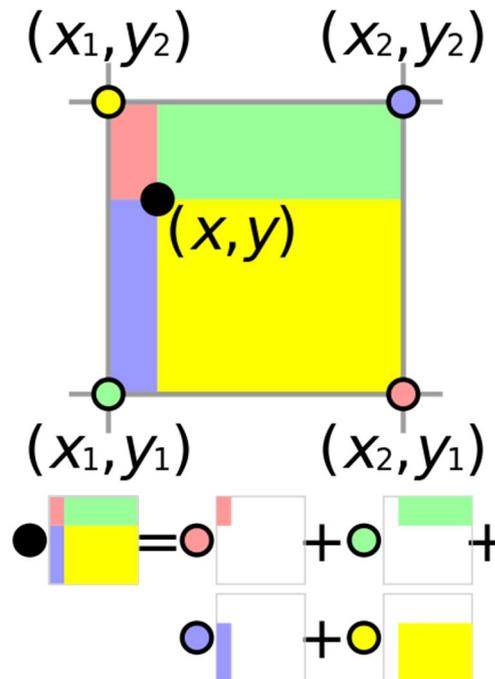


Abbildung 8.4 Beispiel einer bilinearen Interpolation. Der Wert des schwarz markierten Punktes ist die Summe der Werte der vier Eckpunkte der Rasterzelle, jeweils multipliziert mit den jeweiligen Flächen und dividiert durch die Gesamtfläche der Zelle (Cmglee 2018)

#### 8.4 Geostatistische Interpolationsverfahren: Kriging

Wie bei der Inverse-Distanz-Methode ist auch bei statistischen Interpolationsverfahren die Grundannahme, dass nahe beieinander gelegene Punkte ähnlicher sind als weit auseinander liegende. Wesentlicher Unterschied zu nicht-statistischen Methoden ist die Berücksichtigung der räumlichen Varianz der Daten, die in die Interpolation eingehen. Bei einer Clusterung der Eingangsdaten werden die Gewichte der Punkte innerhalb eines Clusters auf diese Weise gesenkt.

Der Interpolation geht also eine Auswertung der räumlichen Varianz der Eingangsdaten voraus. Dazu wird eine statistische Auswertung die räumlichen Beziehung aller Punkte zu allen anderen Punkten in einem Semivariogramm dargestellt. Hierbei wird die Semivarianz, ein Maß für die räumliche Variabilität einer Größe in Abhängigkeit von der Entfernung zwischen zwei Punkten, dargestellt (Abbildung 8.4). Im Allgemeinen ist also die Variabilität der Werte an zwei Punkten geringer, je näher die beiden Punkte beieinander liegen.

Ab einer bestimmten Entfernung ändert sich die Semivarianz nicht mehr wesentlich und nähert sich der Gesamtvariabilität des Gesamtdatensatzes an. Dieser Abstand wird Range genannt. In Abbildung 8.5 hat der Range ungefähr einen Wert von 3.8. Die dazu ge-

hörige Semivarianz heißt Sill. Innerhalb des Ranges besteht eine räumliche Korrelation, außerhalb des Ranges nicht.

Alle Kriging-Techniken benötigen ein Modell eines Semivariogramms. Mit diesem theoretischen Semivariogramm wird versucht, durch Wichtung der Messwerte die Schätzvarianz für den unbekanntem Punkt zu minimieren (Piotrowski & Schmidt 1997). Theoretisch ist Kriging darum das genaueste aller Interpolationsverfahren (Piotrowski & Schmidt 1997). Voraussetzung ist ein gutes Modell des Semivariogramms. Der Anwender muss deshalb eine Funktion auswählen und parametrisieren, die das Semivariogramm der Messwerte bestmöglich repräsentiert (sog. „fitten“). Als Modelle können zum Beispiel sphäroidische Funktionen, Exponentialfunktionen oder Gauss-Polynome verwendet werden (ESRI 2018b). Die Güte des Semivariogrammmodells beeinflusst den Schätzfehler der Kriging-Interpolation und damit die Güte des Interpolationsergebnisses.

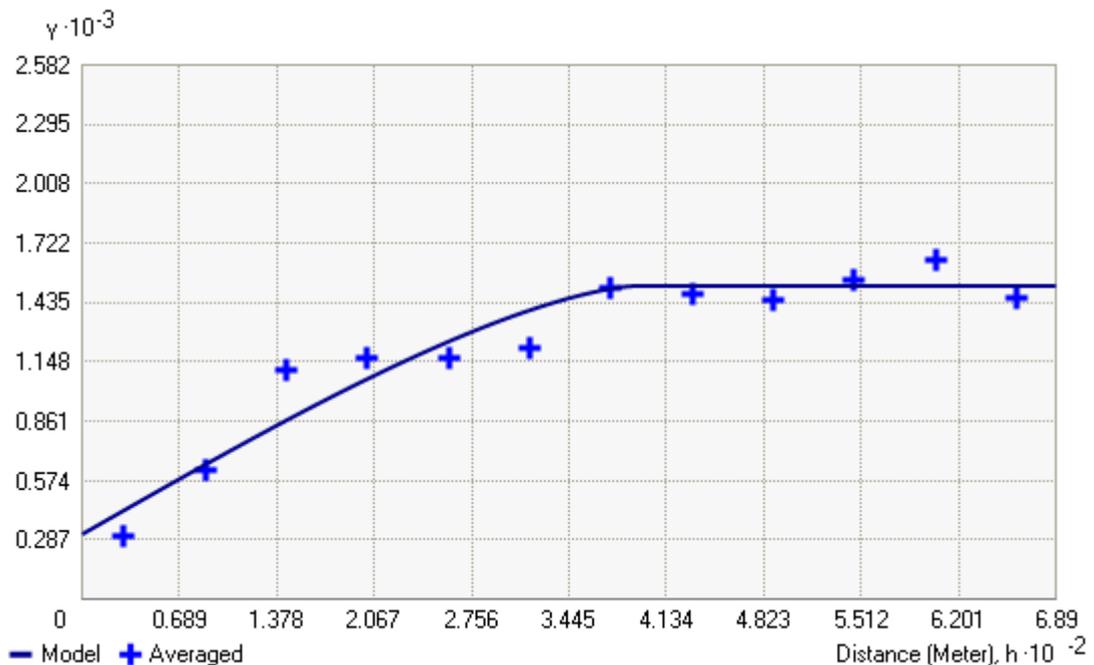


Abbildung 8.5 Beispiel eines Semivariogramms mit dem Abstand (Distance) auf der horizontalen und der Semivarianz auf der vertikalen Achse. Kreuze repräsentieren gemittelte Messwerte, die durchgezogene Linie das theoretische Semivariogramm. (ESRI 2018c)

Die Unterschiede der verschiedenen Kriging-Methoden liegen im Wesentlichen in der Berechnung des Erwartungswertes. Im Ergebnis äußern sich die Unterschiede darin, ob ein räumlicher Trend im Interpolationsergebnis entstehen kann oder sogar vorgegeben werden kann. Die drei wichtigsten Kriging-Methoden sind die folgenden:

- Simple Kriging. Beim Simple Kriging wird ein bekannter, räumlich konstanter Erwartungswert (Zahl, die die Unbekannte (theoretisch) im Mittel annimmt) für das gesamte Interpolationsgebiet zu Grunde gelegt. Damit weist das Interpolationsergebnis keinen räumlichen Trend auf.
- Ordinary Kriging. Beim Ordinary Kriging wird ein konstanter unbekannter Erwartungswert für den Suchbereich des Schätzortes (Range) zu Grunde gelegt. Auf dieser Weise kann ein räumlicher Trend entstehen.
- Universal Kriging: Der Erwartungswert berücksichtigt einen räumlichen Trend über ein Polynom.

- Moving Window Kriging: Die Kriging-Parameter werden für einen kleinen Bereich um jede Stützstelle automatisch generiert.
- Empirical Bayesian Kriging: Anstelle der manuellen Vorgabe des theoretischen Variogramms und seiner Parameter wird dieser Prozess automatisiert.

Grundsätzlich gilt, dass Universal Kriging nur dann verwendet werden sollte, wenn ein räumlicher Trend begründbar ist. Andernfalls sollten Simple Kriging oder Ordinary Kriging verwendet werden. Im Falle der Bodenbewegungsprognose sind räumliche Trends z. B. bei entsprechender räumlicher Verteilung der setzungsrelevanten geologischen Schichten denkbar. Moving Window Kriging ist vielversprechend für eine inhomogene Verteilung der Werte. Empirical Bayesian Kriging ist rechenintensiver als andere Kriging-Methoden, da die Parameter und das theoretische Variogramm automatisch erzeugt werden müssen. Für kleine Datensätze kann eine höhere Genauigkeit erreicht werden.

Kriging-Methoden gehören zu den exakten Interpolationsmethoden, das heißt, dass die Originalwerte an den Stützstellen im Interpolationsergebnis exakt erhalten bleiben.

## 8.5 Bei der Interpolation zu berücksichtigende Aspekte

### 8.5.1 Wahl der Schätzorte

Bei der Regionalisierung ist zunächst zu entscheiden, auf welche Schätzorte interpoliert werden soll. Zum Beispiel können die Schätzorte für den vorliegenden Fall ausgewählte Grundwassermessstellen sein oder Punkte, die anderweitig von Interesse sind, zum Beispiel Gebäude. Für die Kartenerstellung bietet es sich an, auf ein flächendeckendes Rechteckraster oder ein Dreiecknetz zu interpolieren. Die Gesamtheit aller Schätzorte sollte eine Auflösung haben, die hoch genug ist um daraus Höhenlinien oder Konturdarstellungen abzuleiten.

### 8.5.2 Berücksichtigung von Diskontinuitäten

Grundannahme der Geointerpolation ist, dass nahe beieinander gelegene Punkte ähnlicher sind als weit auseinander liegende. Das setzt die Kontinuität der Werte im Interpolationsgebiet voraus. Diskontinuitäten können jedoch in Form von Störungen, Gewässern, Tagebauen oder Restseen gegeben sein.

Das Interpolationsgebiet sollte in diesem Fall in Teilgebiete aufgeteilt werden, innerhalb derer die Kontinuität jeweils gegeben ist. Die Störungen bilden dann die Grenzen des Interpolationsgebiets. Bei Restseen und Tagebauen bildet die Umrandung eine Grenze im Interpolationsgebiet.

Für den Fall, dass Kriging als Interpolationsmethode verwendet wird, kann alternativ der Abstand zu ausgewählten Stützstellen virtuell vergrößert werden (Vermeulen et al. 2017, Abschnitt 8.2.10 XYZTODF-Funktion), sodass sie außerhalb des Kriging-Parameters „Range“ liegen. Stützstellen, die auf der anderen Seite einer Störung liegen, können auf diese Weise von der Interpolation ausgeschlossen werden.

### 8.5.3 Validierung und Fehleranalyse

Die Validierung dient der Überprüfung des Interpolationsergebnisses. Zur Validierung müssen Daten verwendet werden, die nicht in der Interpolation herangezogen werden. Man wählt im Prinzip also eine Stützstelle aus, schließt sie aus dem Eingangsdatensatz aus und vergleicht das Interpolationsergebnis am Ort der Stützstelle mit dem gemessenen Wert. Ein gängiger Parameter zur Beurteilung des Fehlers ist die mittlere quadratische Abweichung.

Einige Geographische Informationssysteme bieten Funktionen zur automatischen Validierung. Die Validierung erfolgt dann reihum für alle Stützstellen automatisch, das heißt, es wird nacheinander für jede Stützstelle eine Interpolation ausgeführt, wobei die jeweilige Stützstelle von der Interpolation ausgeschlossen wird und an ihrer Stelle ein Schätzwert tritt. Im Endergebnis hat man für jede Stützstelle ein Residuum (Abweichung zwischen Originalwert der Stützstelle und theoretischem Schätzwert). Das Ergebnis einer solchen Validierung gibt wieder, ob die Abdeckung der Fläche mit Messwerten ausreichend ist oder in welchen Bereichen weitere Stützstellen hilfreich wären.

#### 8.5.4 Wahl des zu interpolierenden Parameters

Unterschiedliche Parameter können eine unterschiedliche räumliche Variabilität aufweisen. So variieren Geländehöhen in der Regel – nicht zuletzt wegen menschlicher Eingriffe (Bautätigkeit) – räumlich viel stärker als zum Beispiel der Grundwasserstand. Für ein belastbares Interpolationsergebnis ist es vorteilhaft, wenn der zu interpolierende Parameter eine geringe räumliche Variabilität aufweist. Soll zum Beispiel eine Flurabstandskarte aus Grundwassermessungen an Messstellen und einem digitalen Geländemodell erstellt werden, bietet es sich an, zunächst die Grundwasserstände in die Fläche zu interpolieren und daraus die Flurabstände zu berechnen, und nicht für die Stützstellen berechnete Flurabstände zu interpolieren.

Bei der Interpolationsmethode nach Poths (Poths 2017, Abschnitt 6.9) werden aus diesem Grund nicht die absoluten Geländehöhen oder Bodenbewegungsbeträge selbst in die Fläche interpoliert, sondern das Setzungsverhältnis. Aus dem Setzungsverhältnis werden dann die gewünschten Größen berechnet. Das Setzungsverhältnis weist eine geringere räumliche Variabilität auf als die Setzung, aus diesem Grund werden bessere Interpolationsergebnisse erzielt.

#### 8.5.5 Extrapolierung

Wenn auf Schätzwerte, die außerhalb der Umhüllenden der Stützstellen liegen, interpoliert wird, ist dies im Prinzip eine Extrapolation. Chen et al. 2007 weisen darauf hin, dass Extrapolationsergebnisse mit großen Fehlern behaftet sein können.

Bei der Wahl der Stützstellen sollte daher darauf geachtet werden, dass möglichst wenig extrapoliert werden muss. Es kann in diesem Zusammenhang sinnvoll sein, zusätzliche Informationen in die Interpolationsdatengrundlage aufzunehmen. Sind beispielsweise Orte bekannt, für die keine Bodenbewegung erwartet wird, können diese als Stützstellen aufgenommen werden (siehe auch Anhang D.7).

### 8.6 Anwendungsbereiche

Im Folgenden werden die oben vorgestellten Interpolationsmethoden kurz hinsichtlich ihrer Anwendung für die flächendeckende Kartierung von prognostizierten Geländehöhen aus Punktdaten diskutiert.

Die Nearest-Neighbour-Interpolation liefert kein kontinuierliches Ergebnis. Sprünge an den Polygongrenzen sind für Geländehöhen oder Flurabstände physikalisch nicht realistisch. Aus diesem Grund kommt die Nearest-Neighbour-Interpolation für den vorliegenden Fall nicht in Frage.

Die Inverse-Distanz-Methode ist ein einfaches Interpolationsverfahren. Es kann gut als erster explorativer Schritt oder zur schnellen Abschätzung verwendet werden. Bei einer günstigen Verteilung der Stützstellen sind aussagekräftige Ergebnisse zu erwarten.

Die Polynom-Interpolation kann für Oberflächen mit mäßiger Variation verwendet werden, oder um Trends zu entfernen. Bei Geländehöhen ist eher eine große Variabilität zu erwarten, deshalb kommt dieses Verfahren zur Flurabstandsprognose eher nicht in Frage. Interessant für die Berücksichtigung von Störungen wäre die Kernel Interpolation With Barriers, da sie eben mit linienförmigen Interpolationsgrenzen innerhalb des Modellgebiets umgehen kann. Nachteilig ist aber, dass es sich hierbei nicht um eine exakte Methode handelt.

Kriging ist ein gängiges Verfahren (Chen et al. 2007) und es sind damit auch bei wenig Punkten gute Erfahrungen gemacht worden (siehe Anhänge D.7 und D.8). Die Anwendung des Kriging ist allerdings etwas aufwändiger und erfordert eine statistische Analyse. Geographische Informationssysteme können dabei unterstützen. Welche Kriging-Methode die besten Ergebnisse liefert, sollte durch Vergleich der Ergebnisse ermittelt werden.

Die bisher genannten Verfahren kommen ohne ein Netz als Interpolationsbasis aus und funktionieren daher auch mit wenigen Stützstellen. Methoden, die auf Basis von Dreiecken, Rechtecken oder Quadraten interpolieren, bieten sich eher an, wenn eine große Anzahl von Stützstellen vorhanden ist und die Stützstellen das Untersuchungsgebiet gut abdecken. Bei wenigen Stützstellen würden im Falle der Triangulierung nur sehr wenige Dreiecke entstehen, auf denen dann interpoliert wird. Das Interpolationsergebnis wird daher sehr grob sein. Bei geeigneter Punktdichte kann das Triangulationsergebnis jedoch für die Kartenerstellung verwendet werden. In diesem Fall sind dann auch keine Annahmen über den Zusammenhang zwischen Ähnlichkeit und Abstand mehr erforderlich. Ähnliches gilt für regelmäßige Rechteckgitter, allerdings wird die Forderung, dass die Stützstellen auf einem regelmäßigen Gitter angeordnet sein müssen, nur schwer einzuhalten sein. Die Triangulation wurde erfolgreich für Verarbeitung von Daten aus Vermessungsnetzen angewendet (Hovekamp 2018; Poths 2017; Lieske & Schade 2016).

Bei der Wahl der Interpolationsmethode sollte darauf geachtet werden, dass die darin eingehenden Werte an den Stützstellen bei der Interpolation nicht durch Schätzwerte überschrieben werden sollten. Es sollten also exakte Interpolationsverfahren verwendet werden.

Es empfiehlt sich, eine Validierung der Interpolationsergebnisse durchzuführen und diese vor dem Hintergrund von Expertenwissen und Ortskenntnis zu interpretieren.

Auf Dreiecknetzen und Rechtecknetzen können neben (bi)linearer Interpolation aber auch höherwertige Polynome oder Funktionen verwendet werden. Gerade bei großen Netz- bzw. Gitterelementen, das heißt bei wenig Datenpunkten, sollte bei der Verwendung von höherwertigen Interpolationsfunktionen berücksichtigt werden, dass glatte Oberflächen nicht zwangsweise eine höhere Genauigkeit mit sich bringen. Ein „kantiges“ Interpolationsergebnis, das mit linearer Interpolation erreicht wurde, sieht zwar nicht so ansprechend aus wie eine glattere Oberfläche, allerdings wird auch keine Genauigkeit vorgetäuscht, die nicht vorhanden ist.

## 9 Schlussfolgerungen und Empfehlungen

### 9.1 Einführung

In diesem Kapitel werden zunächst Schlussfolgerungen aus der Literaturrecherche gezogen. Es folgt ein Abschnitt mit Empfehlungen für weitere Untersuchungen, darunter auch zur Wahl einer Interpolationsmethode zur Übertragung von Punktdaten in die Fläche. Im dritten Abschnitt werden schließlich Empfehlungen zur Wahl einer Methode der Bodenbewegungsprognose für das Rheinische Braunkohlenrevier gegeben.

### 9.2 Schlussfolgerungen

Die Recherche ergab 29 Fallbeispiele, und es wurden etwa 12 verschiedene Methoden zur Berechnung der Bodenbewegung vorgefunden. In den meisten Fallbeispielen sind Grundwasserentnahmen zur Wasserversorgung, die über das Grundwasserdargebot hinausgehen, Ursache für Setzungen. Nur in wenigen Quellen wurde auf Hebungen infolge eines Grundwasseranstiegs eingegangen. Das Rheinische Braunkohlenrevier stellt somit eine Besonderheit dar, denn es geht hier um Sumpfungmaßnahmen von Braunkohletagebauen, und ein Schwerpunkt der Untersuchungen liegt auf den Hebungen, die mit einem geplanten Grundwasseranstieg einhergehen. Deshalb ist in den in der Literatur vorgefundenen Methoden oft nicht berücksichtigt, dass der Grundwasserstand unter die Basis einer Schicht fallen könnte. Die beiden Prozesse, die hierfür modelltechnisch berücksichtigt werden müssen, sind das Entwässern der Grundwasserstauer in eine ungesättigte Zone, und dass der Grundwasserstand unterhalb der Basis einer Schicht liegen kann. Bei mehrdimensionalen Methoden ist ersteres eine Anforderung an das Grundwassermodell und letzteres an das bodenmechanische Kompressionsmodell. Aus der Gruppe der Zusatzmodule für Grundwasserströmungsprogramme bleibt dann von den MODFLOW-Paketen zur Bodenbewegungsmodellierung nur SUB-CR übrig. Dieses Paket kann allerdings nicht ohne weiteres auf das FEFLOW-Modell des Rheinischen Braunkohlenreviers übertragen werden. Theoretisch könnte dazu das Paket SUB-CR für den Einsatz mit FEFLOW erweitert werden, was jedoch mit Programmieraufwand verbunden wäre. Alternativ könnte theoretisch auch das FEFLOW-Grundwassermodell auf MODFLOW übertragen werden, was jedoch aufgrund der bisher bereits erreichten Modellkomplexität als nicht sinnvoll bewertet wird.

Im Rheinischen Braunkohlenrevier ist der Einfluss der Sumpfungmaßnahmen im Vergleich zu anderen Anwendungsfällen sehr weitreichend. Das Untersuchungs- oder Modellgebiet ist also sehr groß. Dass dreidimensionale Finite-Elemente-Programme wie PLAXIS oder ABAQUS auch für große Gebiete eingesetzt werden können, zeigen einige Beispiele aus der Literatur. Ein Fallbeispiel mit einem Modellgebiet in einer Größenordnung wie zum Beispiel der Erftscholle wurde jedoch nicht gefunden. Gegen die Anwendung von numerischen Bodenbewegungsprogrammen spricht also zunächst, dass keine Erfahrungen hinsichtlich der Anwendbarkeit für große Modellgebiete vorliegen; es ist anzunehmen, dass der Rechenzeitbedarf für ein solches Modell wesentlich höher ist als bei einem Zusatzmodul für ein Grundwassermodell. Auch hier müsste ein neues Grundwassermodell aufgesetzt werden, was mit erheblichem Aufwand verbunden wäre. Dem steht der Vorteil der genaueren Wiedergabe der Prozesse gegenüber: Grundwasserströmung und Bodenbewegung sind vollständig gekoppelt, die Bestimmungsgleichungen werden im dreidimensionalen Raum gelöst und es stehen in der Regel verschiedene Stoffgesetze zur Verfügung. Inwiefern die oben genannte Besonderheit des Trockenfalles von Schichten modelliert werden kann, und ob der Funktionsumfang von dreidimensionalen

numerischen Programmen für die Grundwassermodellierung ausreicht, sollte vor einem Einsatz von dreidimensionalen numerischen Programmen überprüft werden.

Alternativ zu den dreidimensionalen numerischen Modellen können eindimensionale numerische Modelle eingesetzt werden: Studien, in denen für größere Modellgebiete nur eindimensionale Berechnungen für einzelne Punkte durchgeführt wurden, finden sich ebenfalls in der Literatur. Flächige Aussagen wurden aus den Ergebnissen jedoch bisher nicht abgeleitet. Die Zielsetzungen bei diesen Berechnungen waren die Erweiterung des Prozessverständnisses und die Validierung von flächigen Bodenbewegungsprognosen. Aus der Gruppe der eindimensionalen Methoden kommen neben den bisher anvisierten analytischen Ansätzen auch numerische Methoden in Frage. Bei der Bewertung (Anhang E, Tabelle 3.3) wurden ein eindimensionales numerisches 1D-Modell mit PLAXIS und die Methode von Ziegler und Aulbach gleich gut bewertet. Auf Platz Drei liegt ebenfalls ein eindimensionaler Ansatz mit dem MODFLOW-Modul SUB-CR. Ein inhaltlicher Mehrwert von PLAXIS 1D und SUB-CR (1D) gegenüber der derzeit verwendeten Methode von Ziegler und Aulbach liegt darin, dass diese Programme weitere Kompressionsmodelle bzw. Stoffgesetze zur Verfügung stellen. Es können damit Vergleichsrechnungen zum Beispiel zur Untersuchung der Relevanz des Kriechens ausgeführt werden. Dass PLAXIS 1D die Bestimmungsgleichungen numerisch löst, stellt allein keinen wesentlichen Mehrwert gegenüber einer Methode dar, in der ein eindimensionales Kompressionsmodell analytisch gelöst wird. In der Bewertung auf Platz Vier ist das Programm D-Settlement gelandet. Ein Nachteil dieses Programms ist, dass es nicht damit umgehen kann, dass der Grundwasserstand in einer bindigen Bodenschicht unter die Basis dieser Schicht fällt. Allerdings bietet D-Settlement Programmfunktionen zur Genauigkeitsanalyse.

Vor dem Hintergrund der Neutralkriterien (Anhang E, Tabelle 3.4) könnte ein kommerzielles Programm wie PLAXIS oder D-Settlement interessant sein: der Reifegrad eines kommerziellen Modells ist in der Regel hoch, und oft haben solche Programme eine graphische Benutzeroberfläche, die das Arbeiten erleichtert und transparenter macht. Es fallen allerdings Lizenzkosten an und eventuell notwendige Anpassungen am Programmcode sind nur schwer umzusetzen. Dafür lässt sich mit kommerziellen Programmen bei Ausschreibungen wiederum ein größerer Interessentenkreis ansprechen. Durch entsprechende vertragliche Vereinbarungen (Auftrag oder Kooperationsvereinbarung) ließe sich zudem auch die Nutzung der Software von Dritten (z. B. SUB-CR) regeln.

Die zur Verfügung stehenden Methoden unterscheiden sich zum Teil wesentlich hinsichtlich ihrer bodenmechanischen Kompressionsmodelle bzw. Stoffgesetze. Höherwertige Stoffgesetze können die Bodenbewegung grundsätzlich realitätsnaher abbilden, erfordern dann aber auch mehr Parameter. Bei der Bewertung der Methoden soll ein geringerer Aufwand der Parameterschätzung besser bewertet werden als ein hoher Aufwand. Ein Ansatz, der mit weniger Parametern auskommt, ist jedoch einem anderen, der mehr Parameter benötigt, nicht zwangsläufig überlegen, denn die Berücksichtigung von zusätzlichen Prozessen erfordert in der Regel weitere Parameter. In vielen Fällen können bei komplexeren Kompressionsmodellen einzelne Prozesse durch die Wahl eines geeigneten Wertes auch deaktiviert werden, in anderen Programmen stehen mehrere Ansätze zur Auswahl. Vor diesem Hintergrund ergibt eine Beurteilung allein anhand der Parameteranzahl wenig Sinn. Die Bewertung des Aufwandes der Parameterschätzung erfolgte darum vor dem Hintergrund, ob diese punktuell oder flächendeckend sein muss. Damit ist eine Bevorzugung der eindimensionalen Methoden gegeben.

Bodenbewegungsdaten können mit Hilfe von Interpolation von Punkten auf die Fläche übertragen werden. In einzelnen Fallbeispielen wurde die Bodenbewegung mit Hilfe von statistischen Verfahren (markscheiderische Methode) prognostiziert und dann mit Hilfe

der Triangulierung in eine Oberfläche transformiert. Auch die Kriging-Technik scheint als Interpolationsmethode für Bodenbewegungen gängig zu sein. Grundlage für die Interpolation bildete in den oben genannten Beispielen ein geodätisches Netz. Gegenwärtig ist für das Rheinische Braunkohlenrevier vorgesehen, Bodenbewegungsprognosen für ausgewählte Punkte mit eindimensionalen physikalisch basierten Modellen zu erstellen und diese Werte in die Fläche zu interpolieren. Es ist zu erwarten, dass die Punktdichte bei dieser Vorgehensweise nicht die Dichte eines geodätischen Netzes erreicht, sondern dass die Anzahl der Punkte in der Größenordnung von 20 bis 50 liegt. Vermutlich wird eine Triangulierung dann weniger geeignet sein, es eignen sich dann besser Kriging-Verfahren oder vereinfachend die Inverse-Distanz-Methode. Die Expertenbefragung hat ergeben, dass mit Hilfe von Kriging auch bei geringerer Datendichte akzeptable Ergebnisse erzielt werden können.

Nach Möglichkeit sollten bei geringer Datendichte für die Interpolation andere Datenquellen hinzu gezogen werden. Zum Beispiel könnten Bereiche, in denen keine Bodenbewegung erwartet wird, identifiziert werden und entweder von der Interpolation ausgeschlossen werden (bei „harten Bruchkanten“) oder für die Interpolation entsprechende Stützstellen ohne Bodenbewegung hinzugefügt werden (bei glatten Übergängen). Bei Durchführung und Interpretation der Interpolation muss unbedingt Gebietskenntnis einfließen, um Besonderheiten wie Störungen und Tagebaue/Restseen, Abraumkippen oder z. B. lokale Steinkohleneinflüsse zu berücksichtigen. Zur Berücksichtigung von Schollenrandstörungen kann das Untersuchungsgebiet in Teilgebiete eingeteilt werden. Die Störungen bilden dann die Grenzen der Teilgebiete, und die Interpolation wird für jedes Teilgebiet ausgeführt. Abschließend werden die Interpolationsergebnisse der Teilgebiete wieder zusammengesetzt. Da Interpolationen mit vergleichsweise geringem Aufwand ausgeführt werden können, empfiehlt es sich, mehrere Methoden im Vergleich zu testen. Die Ergebnisse der Interpolation können von Experten beurteilt werden, es gibt zusätzlich auch gängige Validierungsverfahren, die zum Teil auch in den Geoinformationssystemen (z.B. ArcGIS) zur Verfügung stehen.

### 9.3 Empfehlungen für weitere Untersuchungen

#### 9.3.1 Prozess des Kriechens

Kriechen ist eine sehr langsam ablaufende Verformung eines Bodens unter gleichbleibender Last („Bodenalterung“) und findet somit auch ohne Veränderung der Auflast (z. B. durch Grundwasserfluktuation) statt, es betrifft insbesondere bindige Bodenschichten wie Tone, Torfe und Schluffe. Zwar werden in der Niederrheinischen Bucht nur geringe natürliche (d. h. nicht durch Bergbaueinfluss hervorgerufene) Bodenbewegungen durch Kriechprozesse beobachtet. Eine Veränderung der Belastung verändert jedoch die Kriechgeschwindigkeit, deshalb sollte die Relevanz des Kriechens für die Berechnung der Bodenbewegung infolge bergbaubedingter Sumpfung und Grundwasserwiederanstieg untersucht werden. Wird Kriechen als relevant eingestuft, sollten Überlegungen angestellt werden, wie Kriechen in der Bodenbewegungsprognose insbesondere im Zusammenhang mit Grundwasseranstieg zu berücksichtigen ist. Es kommen dann Kompressionsmodelle in Frage, in denen Kriechen explizit berücksichtigt ist; eventuell ist es auch ausreichend, Kriechen über andere Ansätze wie zum Beispiel mit Hilfe von Hebungsfaktoren oder über die Konsolidierung abzudecken.

Bei einer Veränderung der Auflast durch Absenkung des Grundwasserspiegels erhöht sich die Kriechgeschwindigkeit, das heißt, der Prozess des Kriechens läuft schneller ab als im unbeeinflussten Zustand. Zunächst wird das Kriechen durch Konsolidierung überlagert, die Prozesse Konsolidierung und Kriechen sind dann schwer voneinander zu

trennen. Grundsätzlich überwiegt in der Anfangsphase die Konsolidierung, und zum Ende hin überwiegt wieder das Kriechen. Bei vollständig auskonsolidiertem Boden finden nur (noch) Kriechprozesse statt.

Bei Grundwasserwiederanstieg kommen zunächst die nichtbindigen Schichten unter Auftrieb, was mit Hebungen einhergeht. Innerhalb der bindigen Schichten ändert sich die Druckhöhe nur langsam, deshalb laufen Konsolidierung und Kriechen zunächst weiter. Dem Grundwasserwiederanstieg nachlaufende Setzungen können auftreten, wobei Kriechen mit durch Grundwasserabsenkung bedingter höherer Kriechgeschwindigkeit beiträgt. Kommt es infolge Grundwasserwiederanstiegs dazu, dass die Druckhöhe im umgebenden Leitermaterial die Druckhöhe im Grundwasserstauer erreicht, so fließt das Porenwasser nicht mehr aus dem Stauer in Richtung Grundwasserleiter ab. Nachlaufende Setzungen infolge Konsolidierung würden dann zum Erliegen kommen. Setzungen infolge des Kriechens könnten aber weiterhin stattfinden. Mit der langsam und nachlaufend steigenden Druckhöhe innerhalb der bindigen Schicht reduziert sich die Kriechgeschwindigkeit dann wieder.

Für das Rheinische Braunkohlenrevier gilt derzeit ein logarithmisches Kompressionsmodell nach Terzaghi unter Berücksichtigung von Belastung, Entlastung und Wiederbelastung als geeignet. Die Konsolidierung muss mit ihrer Zeitabhängigkeit berücksichtigt werden. Zur Frage, ob Kriechen in Bodenbewegungsprognosen für das rheinische Braunkohlenrevier ebenfalls berücksichtigt werden muss, sind bereits Überlegungen angestellt worden (Giese 2010). Zunächst sollte daher überprüft werden, ob die Folgerungen mit dem heutigen Kenntnisstand noch gültig sind. Im Rheinischen Braunkohlenrevier liegen sehr mächtige Tonschichten vor, und der Betrachtungszeitraum ist im Vergleich zu anderen Studien besonders lang. Beides spricht auch nach Meinung von Experten (Abschnitte D.5 und D.6) dafür, dass der Prozess des Kriechens eine Relevanz haben kann. Es sei aber auch darauf hingewiesen, dass nicht alle Experteneinschätzungen zur Relevanz des Kriechens in die gleiche Richtung weisen (siehe Abschnitt D.1) und dass das Prozessverständnis des Kriechens geotechnischer Materialien gegenwärtig noch immer Gegenstand der wissenschaftlichen Forschung ist (siehe z. B. Fossen 2018).

Mit Hilfe von Vergleichsrechnungen kann untersucht werden, wie groß der Effekt des Kriechens ist. Dazu ist ein eindimensionales Modell notwendig, das in der Lage ist, Kriechprozesse zu modellieren. Auch ein Finite-Elemente- oder Finite-Differenzen-Programm kann hierfür eingesetzt werden. Die Vorgehensweise bei einer solchen Vergleichsrechnung ist in Anhang D.6 skizziert. Steht kein Modell, das Kriechen als separaten Prozess berücksichtigen kann, zur Verfügung, kann eine Auswertung des Vorkonsolidierungsverhältnisses (OCR) Hinweise liefern (Anhang D.6).

### 9.3.2 Überlegungen zur flächendeckenden Modellierung

Das Rheinische Braunkohlenrevier hat eine komplexe Geologie, durch die Tagebausümpfung entsteht ein Absenktrichter, und die Prozesse, die eine Bodenbewegung verursachen sind nichtlinear. Interpolationsmethoden berücksichtigen die physikalischen Gesetzmäßigkeiten nicht in ihrer Komplexität. Bei einer flächigen Modellierung werden die geologischen und physikalischen Gesetzmäßigkeiten hingegen flächendeckend gelöst. Grundsätzlich erscheint eine flächige Modellierung daher zunächst vorteilhaft gegenüber der Interpolation aus Punktwerten. Die Fallbeispiele zeigen auch, dass eine flächenhafte Modellierung durchaus gängig ist und im Zusammenhang mit MOFLOW auch eine lange Historie. Die Verwendung eines Moduls, das eindimensionale Bodenbewegung im Zusammenhang mit dem bestehenden Grundwassermodell berechnet, ist daher naheliegend. Die MODFLOW-Pakete SUB-WT und SUB-CR erfüllen die Mindestanforderungen und kämen deshalb grundsätzlich in Frage für das Rheinische Braunkohlenrevier.

Diese Pakete sind jedoch als Zusatzmodule für MODFLOW konzipiert und damit zunächst nicht kompatibel mit dem FEFLOW-Grundwassermodell des LANUV. Damit steht keine Methode zur Verfügung, die für eine flächendeckende Bodenbewegungsprognose direkt eingesetzt werden kann. Dazu wären die folgenden Lösungsansätze denkbar:

- SUB-CR oder SUB-WT werden so verändert, dass sie mit FEFLOW verwendet werden können;
- Erweiterung des FEFLOW-Moduls von Rühaak um die nötigen bodenmechanischen Prozesse;
- Ein neues FEFLOW-Modul mit der Methode von Ziegler und Aulbach.

Bei der Verwendung von SUB-CR und SUB-WT läge der Prozess der Konsolidierung dann vollständig beim FEFLOW-Modell. Hier wäre zu prüfen, ob das bestehende Modell eine ausreichende vertikale Diskretisierung der Grundwasserstauer aufweist. SUB-CR wäre vorzuziehen, da es bei der bodenmechanischen Berechnung auch mit einem Grundwasserstand unterhalb der Schichtbasis umgehen kann. Die Eignung der MODFLOW-Pakete könnte mit dem Modell IBRAHYM-Modell (Vermeulen et al. 2015) getestet werden. IBRAHYM ist ein MODFLOW-Grundwassermodell und deckt einen Teil der Rurscholle ab. Die Methode von Ziegler und Aulbach berechnet die Konsolidierung mit Hilfe des Konsolidierungsmodells von Terzaghi. Hier wäre bei einer Modellkopplung mit FEFLOW ein Ansatz zu entwickeln, so dass die Massenbilanz für Grundwasser mit dem Grundwassermodell abgeglichen wird.

Bei einer flächendeckenden Modellierung ist zu berücksichtigen, dass sie mit wesentlich mehr Aufwand verbunden ist als eindimensionale Bodenbewegungsberechnungen und ihre Übertragung in die Fläche. Auch müssen die physikalischen Parameter, die für eine flächige bodenmechanische Berechnung erforderlich sind, flächendeckend vorliegen. Ist dies nicht der Fall, müssten sie aus Punktinformationen in die Fläche übertragen werden. Durch diese Interpolation werden allerdings zusätzliche Unsicherheiten geschaffen.

Allgemein sollte bei flächendeckender Modellierung im Zusammenhang mit einem Grundwassermodell geprüft werden, inwieweit gemessene Grundwasserganglinien anstelle der modellierten Ganglinien zur Berechnung der Bodenbewegung verwendet werden können, um zu vermeiden, dass Ungenauigkeiten der Kalibrierung des Grundwassermodells sich in den bodenmechanischen Berechnungen fortpflanzen. Dabei ist auch auf den Übergang von Kalibrierungszeitraum zum Prognosezeitraum zu berücksichtigen.

Ein flächendeckendes Modell müsste anhand von Messergebnissen validiert werden. Bei der (Weiter-)Entwicklung eines Bodenbewegungsmoduls für FEFLOW sollte deshalb darauf geachtet werden, dass (weiterhin) auch eindimensional-vertikale Modelle aufgebaut werden können. Dies ermöglicht eine Vorab-Kalibrierung von einzelnen Bodenprofilen mit Vorgabe von gemessenen Grundwasserständen.

Die Erstellung eines flächendeckenden Prognoseinstruments für Bodenbewegung mit dem bestehenden FEFLOW-Grundwassermodell würde einen hohen Aufwand für die Modellerstellung und für die Weiterentwicklung sowie zusätzliche Unsicherheiten mit sich bringen. Demgegenüber steht ein Mehrwert in Form der physikalisch präziseren Prognose für das gesamte Modellgebiet. Ein weiterer Vorteil wäre, dass auf lange Sicht die Wechselwirkungen zwischen Bodenmechanik und Grundwasser mit einer entsprechenden Erweiterung der Methode flächendeckend berücksichtigt werden könnten.

### 9.3.3 Prozessverständnis

Empfehlungen zur Erweiterung des Prozessverständnisses richten sich zunächst auf Hebungen. Bisher liegen im Vergleich zu Setzungsbeobachtungen wenige Messungen von Hebungen vor. Daher sollte im Rahmen der vorhandenen Messprogramme verstärkt ein Schwerpunkt auf Bodenhebungen gerichtet werden, um die Methoden zur Bodenbewegungsprognose auch für Hebungen zu verifizieren und die entsprechenden Modelle zu kalibrieren und zu validieren.

Es wurden in der Literatur keine Studien zur Parametersensitivität bei Bodenbewegungsprognosen vorgefunden. Für die Einrichtung von Messprogrammen ist es jedoch hilfreich, zu wissen, welche Bodenparameter für die Berechnung von Bodenbewegungen welche Bedeutung haben. Studien zur Parametersensitivität sind daher empfehlenswert. Eine entsprechende Studie für das Rheinische Revier wird derzeit im Auftrag des LANUV durch die ZAI-GmbH durchgeführt. Die Veröffentlichung der Studie in Form eines LANUV-Fachberichtes ist für 2018 geplant.

### 9.3.4 Untersuchungen zum Effekt der Wechselwirkungen zwischen Grundwasserströmung und Bodenmechanik

Die Auswirkung einer Grundwasserfluktuation auf die Bodenbewegung ist der Gegenstand der Methoden zur Bodenbewegungsprognose. Es gibt jedoch auch Rückkopplungseffekte, deren Relevanz für das Rheinische Braunkohlenrevier zu untersuchen wäre. Im Wesentlichen geht es um mit einer Bodenbewegung einhergehende Änderungen der Höhenlage und Änderungen der hydraulischen Parameter (vgl. Kap. 4.10). Die Änderung der Höhenlage wird in einigen gekoppelten Ansätzen wie z. B. dem FEFLOW-Modul von Rûhaak und den dreidimensionalen numerischen bodenmechanischen Programmen bei der Grundwasserströmung berücksichtigt; die Änderung der hydraulischen Eigenschaften jedoch nur in wenigen Fällen (z. B. Kihm et al. 2007). Galloway & Burbey 2011 identifizieren dies als Forschungsbedarf.

Es wird empfohlen, diese Effekte im Hinblick auf die Zielsetzung einer Vorhersage der Flurabstände hinsichtlich ihrer Relevanz zu untersuchen, zu beurteilen und ggf. zu quantifizieren. Dabei sollte auch schwerpunktmäßig nach Hebungen gesehen werden. Vorläufig wird davon ausgegangen, dass der Effekt der durch Verformung veränderten Höhenlage, der bereits in gekoppelten Systemen berücksichtigt werden kann, sich geringer auf die Grundwasserströmung auswirkt als die Veränderung der Durchlässigkeitsbeiwerte und vor allem der Speicherkoeffizienten. Eine Expertenmeinung (Abschnitt D.5) untermauert dies; Burbey 2018 berichtet vom Verlust von einem Drittel des Speichervolumens durch Setzungen im kalifornischen San Joaquin Valley (siehe Abschnitt 5.5.2). Dazu ist jedoch anzumerken, dass die Größenordnung solcher Effekte von den lokalen geologischen Gegebenheiten und Ablagerungsbedingungen sowie den seit der Sedimentation bereits in geologischen Zeiträumen erfolgten Kompaktionsvorgängen abhängt. Ein einfacher Übertrag solcher Erfahrungswerte zum Verlust an Porosität, Durchlässigkeit und Speichervolumen ist daher nicht ohne weiteres möglich (siehe auch Abschnitt D.1). Dennoch könnte ein Verlust des Speichervolumens in derartiger Größenordnung den Verlauf des Grundwasserwiederanstiegs beschleunigen und auch einen darüber hinaus gehenden Effekt auf die zukünftige Grundwassersituation haben. Es ist jedoch davon auszugehen, dass insbesondere in den besonders relevanten nichtbindigen Schichten (Sande und Kiese) der irreversible Anteil des Verlusts an Durchlässigkeit und Speichervolumen eher gering ist (siehe Abschnitt D.1).

Zur Quantifizierung der Auswirkungen können die in der Literatur bereits vorgeschlagenen Ansätze zur Berücksichtigung einer Änderung der hydraulischen Eigenschaften in-

folge Verformung (Galloway & Burbey 2011; Kihm et al. 2007) in ein gekoppeltes System integriert werden. Es ist jedoch auch möglich, die hydraulischen Eigenschaften im Grundwassermodell mit Hilfe von externen Zeitreihen (z. B. aus eindimensionalen Berechnungen) als zeitlich veränderlich vorzugeben. Im Vorfeld sollte jedoch geklärt werden, welche Effekte zu berücksichtigen sind und inwieweit sie mit den bekannten Ansätzen modelliert werden können.

### 9.3.5 Erprobung von Interpolationsmethoden

Aus der Literaturrecherche und der Expertenbefragung lässt sich keine klare Aussage für die Wahl einer Interpolationsmethode ableiten, mit der Punktdaten in die Fläche übertragen werden können. Es wird daher vorgeschlagen, verschiedene Interpolationsmethoden hinsichtlich ihrer erreichbaren Güte bei unterschiedlicher Verteilung und Dichte der Stützstellen zu vergleichen.

Auch sollten Überlegungen zur Wahl des zu interpolierenden Parameters angestellt werden. Ziel der Untersuchungen ist es, eine flächige Aussage über die zu erwartenden Flurabstände zu erhalten, es liegt daher nahe, entweder die Flurabstände oder die Höhenlage der Geländeoberkante aus Punktdaten in die Fläche zu übertragen. Diese Größen weisen jedoch u. U. eine hohe räumliche Variabilität auf. Aus diesem Grund werden bei der markscheiderischen Methode von Schaefer (Abschnitt 6.9) nicht die absoluten Geländehöhen oder Bodenbewegungsbeträge selbst in die Fläche interpoliert, sondern das Setzungsverhältnis (Poths 2017). Aus dem Setzungsverhältnis werden dann die gewünschten Größen berechnet. Das Setzungsverhältnis weist eine geringere räumliche Variabilität auf als die Setzung, aus diesem Grund werden bessere Interpolationsergebnisse erzielt.

Die Interpolation ist eine der Fehlerquellen bei der Verwendung von eindimensional-vertikalen Modellen. Die Prognosegüte erhöht sich mit der Anzahl der Bodenprofile. Würde man für jeden Knoten des LANUV-Grundwassermodells ein eindimensionales Modell erstellen, hätte man quasi eine flächendeckende Modellierung (dann allerdings ohne Rückkopplung der Bodenmechanik zur Grundwasserströmung). Eine Idee zur Reduzierung der Unsicherheiten aus Interpolation wäre also, zusätzlich zu den aus Messdaten erstellten eindimensionalen Prognosepunkten automatisch aus dem FEFLOW-Modell Eingangsdaten zu weiteren Prognosepunkten zur Verdichtung der Datenlage zu extrahieren. Aus dem FEFLOW-Modell würden ein geologisches Profil und Grundwasserganglinien abgeleitet und in das Dateiformat der gewählten Methode übertragen. Wo vorhanden sollten hierbei gemessene Grundwasserganglinien den modellierten Ganglinien vorgezogen werden, da sich mögliche Ungenauigkeiten des Grundwassermodells ansonsten in die bodenmechanischen Berechnungen fortpflanzen könnten. Die Vorgehensweise könnte auch auf Punkte beschränkt werden, an denen das Grundwassermodell eine gute Kalibrierung aufweist.

Im Idealfall liegen für die gewählten Punkte historische Höhenzeitfolgen des Leitnivelements zur Kalibrierung vor. Ist dies nicht der Fall, könnten ggf. die an anderen Punkten durch Kalibrierung ermittelten bodenmechanischen Parameter durch eine Interpolation auf den gewählten Punkt übertragen werden. Anstelle der Interpolation der Geländehöhen, in denen ein instationärer Grundwasserstand, Material und geologischer Schichtaufbau sowie bodenmechanische Prozesse verarbeitet sind, tritt dann die Interpolation bodenmechanischer Parameter, die sich nur aus Material und Geologie ableiten. Diese Vorgehensweise greift ebenfalls die oben bereits erwähnte Idee von Schaefer auf und reduziert die Unsicherheit einer Interpolation.

#### 9.4 Empfehlung zur Wahl einer Methode

Gemäß Bewertungsergebnis (Abschnitt 7.2.4) eignen sich die Methoden nach Ziegler und Aulbach und 1D-PLAXIS am besten für die Prognose von Bodenbewegungen im Rheinischen Braunkohlenrevier. Daher kann zum aktuellen Zeitpunkt die Verwendung des Modells von Ziegler und Aulbach zunächst für den Anwendungsfall empfohlen werden. Um die weiteren Untersuchungsempfehlungen (Kap. 9.3) zu berücksichtigen, könnten zur Methode nach Ziegler und Aulbach Vergleichsrechnungen mit anderen eindimensionalen Methoden durchgeführt werden, bei denen z. B. Kriechprozesse und hydraulische Kopplung berücksichtigt werden, um deren Relevanz in Zukunft einschätzen zu können. Neben 1D-PLAXIS kommen hier auch eindimensionale Modelle mit dem MODFLOW-Paket SUB-CR sowie D-Settlement in Frage. D-Settlement kann zwar das Trockenfallen von Schichten nicht berücksichtigen, bietet dafür jedoch Programmfunktionen zur Genauigkeitsanalyse.

Die aktuell hier vorliegende Fragestellung richtet sich auf großräumige vertikale Bodenbewegungen. Eine eindimensionale Formulierung der Bodenbewegung in vertikale Richtung ist daher ausreichend, sodass der Mehraufwand einer dreidimensionalen Modellierung der Bodenbewegung vor allem auch vor dem Hintergrund der zusätzlichen Unsicherheiten nicht gerechtfertigt erscheint. Gegen eine vollständig dreidimensionale Modellierung mit numerischen Methoden spricht auch, dass ein weiteres Modell für die Grundwasserströmung aufgebaut werden müsste. Dies erscheint vor dem Hintergrund der bereits existierenden Grundwassermodelle unpraktisch und unnötig. Daher ist die Verwendung einer dreidimensionalen numerischen Modellierung derzeit nicht zu empfehlen.

Die flächige eindimensionale Modellierung der Bodenbewegung im Zusammenhang mit einem Grundwassermodell ist für große Untersuchungsgebiete ein gängiges Verfahren und wäre ein interessanter Mittelweg zwischen eindimensionaler Modellierung und dreidimensionaler numerischer Modellierung. Vorteil dieser Methoden ist, dass die mit Unsicherheiten behaftete Interpolation von Punktdaten in die Fläche entfällt, da die Bodenbewegung für das gesamte Modellgebiet berechnet wird. Dem steht bei unvollständiger Datengrundlage jedoch eine Parameterunsicherheit gegenüber. Darüber hinaus steht momentan keine Methode zur Verfügung, die mit dem FEFLOW-Grundwassermodell des LANUV direkt eingesetzt werden kann, so dass Weiterentwicklungen von bestehenden Methoden notwendig wären. Eine flächige Modellierung im Zusammenhang mit dem FEFLOW-Grundwassermodell des LANUV ist derzeit also nicht ohne weiteres möglich, es wird jedoch empfohlen, eine solche flächige Modellierung auf lange Sicht ins Auge zu fassen.

## 10 Literatur

- Akima, H. (1978): A Method of Bivariate Interpolation and Smooth Surface Fitting for Irregularly Distributed Data Points. *ACM Transactions on Mathematical Software* 42 (2), 148–159. DOI 10.1145/355780.355786
- Bakr, M. (2015): Influence of Groundwater Management on Land Subsidence in Deltas. *Water Resources Management* 29 (5), 1541–1555. DOI 10.1007/s11269-014-0893-7
- Becker, B.; Klauer, W. S.; Reuter, C.; Köngeter, J. (2008): Modellierung der Randüberströme zwischen Erftscholle, Rurscholle und Venloer Scholle durch Kopplung von Großraum-Grundwassermodellen. *Grundwasser* 13 (1), 15–26. DOI 10.1007/s00767-007-0056-3
- Berkner, A.; Thieme, T. (eds.) (2005): Braunkohlenplanung, Bergbaufolgelandschaften, Wasserhaushaltssanierung / Analysen und Fallbeispiele aus dem Rheinischen, Mitteldeutschen und Lausitzer Revier, ARBEITSMATERIAL DER ARL 323.
- Bjerrum, L. (1972): Engineering geology of Norwegian normally consolidated marine clays as related to settlements of buildings. *Géotechnique* 17 (2), 81–118.
- Burbey, T. (2018): Land subsidence modelling. E-mail “Re: advice sought regarding land subsidence modelling in Germany” 2018-3-02.
- 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
- Clostermann, M.; Wings, R. (2011): Grubenwasseranstieg und Bodenhebung - Gibt es jetzt doch Schadensfälle im Südlimburger Steinkohlenrevier? in: 11. Altbergbau-Kolloquium; Wrocław.
- Cmglee (2018): In this geometric visualisation, the value at the black spot is the sum of the value at each coloured spot multiplied by the area of the rectangle of the same colour, divided by the total area of all four rectangles. [WWW Document]. URL [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Bilinear\\_interpolation\\_visualisation.svg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Bilinear_interpolation_visualisation.svg)
- Deltares (2016a): Sinking Jakarta Causes & Remedies.
- Deltares (2016b): Embankment design and soil settlement prediction D-Settlement. User Manual, version 16.1.
- DHI (2018): FEFLOW All-in-one groundwater modelling solution [WWW Document]. URL <https://www.mikepoweredbydhi.com/products/feflow>
- Diersch, H.-J. G. (2005): `\feflow\textsuperscript\circledR` Reference Manual.
- Ertl, B. (2015): 20 points and their Voronoi cells [WWW Document]. URL [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Euclidean\\_Voronoi\\_diagram.svg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Euclidean_Voronoi_diagram.svg)
- ESRI (2018a): How global polynomial interpolation works [WWW Document]. URL <http://desktop.arcgis.com/en/arcmap/latest/extensions/geostatistical-analyst/how-global-polynomial-interpolation-works.htm>
- ESRI (2018b): 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>
- ESRI (2018c): Understanding a semivariogram: The range, sill, and nugget [WWW Document]. URL <http://desktop.arcgis.com/en/arcmap/latest/extensions/geostatistical-analyst/understanding-a-semivariogram-the-range-sill-and-nugget.htm>
- Ezquerro, P.; Herrera, G.; Marchamalo, M.; Tomás, R.; Béjar-Pizarro, M.; Martínez, R. (2014): A quasi-elastic aquifer deformational behavior: Madrid aquifer case study. *Journal of Hydrology* 519, 1192–1204. DOI 10.1016/j.jhydrol.2014.08.040
- Fenk, F., Jürgen (2008): Grundwasser-Wiederanstieg im Lockergebirge - ein Vorschlag zur Hebungsberechnung. *Markscheidewesen* 115 (3).

- Fenk, J.; Tzscharschuch, D. (2007): Zur Berechnung flutungsbedingter Hebungen der Tagesoberfläche. *Markscheidewesen* 114 (2), 60–64.
- Forkel, C. (2017a): Literaturstudie Bodenbewegungsprognose. Telefongespräch 2017-12-21.
- Forkel, C. (2017b): Themen des Grundwasserwiederanstiegs im Rheinischen Braunkohlenrevier. *Wasserwirtschaft* (4), 12–19.
- Fossen, C. (2018): Creep in Geomaterials [WWW Document]. Creep in Geomaterials. URL <https://www.ntnu.edu/web/creep/about-creep>
- Galloway, D.; Burbey, T. (2011): Review: Regional land subsidence accompanying groundwater extraction. *Hydrogeology Journal* 19 (8). DOI 10.1007/s10040-011-0775-5
- Giese, S. (2010): Bodenbewegungen infolge von Sumpfungmaßnahmen für tiefe Tagebaue am Beispiel des Rheinischen Braunkohlenreviers. Dissertation.
- Grimmer, S. (2006): Sackungsprozesse in natürlichen Lockergesteinsfolgen infolge Grundwasserwiederanstiegs. Dissertation.
- den Haan, E. J. (2003): Het a,b,c-isotachenmodel: hoeksteen van een nieuwe aanpak voor zettingsberekeningen. *Geotechniek* 112 (4), 94–104.
- Hanson, R. T. (1989): Aquifer-system compaction, Tucson basin and Avra Valley, Arizona. U. S. Geological Survey Water-Resources Investigations Report No. 88–4172.
- Hanson, R. T.; Benedict, J. F. (1994): Simulation of Ground-Water Flow and Potential Land Subsidence, Upper Santa Cruz Basin, Arizona. U. S. Geological Survey Water-Resources Investigations Report No. 93–4196.
- Harbaugh, A. W. (2005): MODFLOW-2005, the U.S. Geological Survey modular groundwater model -- the Ground-Water Flow Process. U.S. Geological Survey Techniques and Methods No. 6-A16.
- Heitmann, S.; Hovekamp, A.; Klein, W.; Mengede, S.; Musiedlak, J. (2012): Die Ermittlung von Bodenbewegungsgebieten in Nordrhein-Westfalen. *NÖV Nachrichten aus dem öffentlichen Vermessungswesen Nordrhein-Westfalen* (2).
- Helm, D. C. (1987): Prediction of subsidence due to groundwater withdrawal in the Latrobe Valley, Australia. in: Sixth international congress on rock mechanics; Montreal, Canada.
- Hoffmann, J.; Leake, S. A.; Galloway, D. L.; Wilson, A. M. (2003): MODFLOW-2000 Ground-Water Model User Guide to the Subsidence and Aquifer-System Compaction (SUB) Package. Report No. 2003–233. Open-File Report.
- Hovekamp, A. (2018): Literaturstudie Bodenbewegungsprognose. E-Mail "AW: Literaturstudie Bodenbewegungsprognose" 2018-1-16.
- Hügel, H. M. (1995): Prognose von Bodenverformungen, Veröffentlichungen des Institutes für Bodenmechanik und Felsmechanik der Universität Fridericiana in Karlsruhe 136.
- IBGW Leipzig (2018): PCGEOFIM [WWW Document]. Grundwassersimulationsprogramm PCGEOFIM. URL <http://www.ibgw-leipzig.de/index.php/haupt-pcgeofim>
- Ishitsuka Kazuya; Fukushima Yo; Tsuji Takeshi; Yamada Yasuhiro; Matsuoka Toshifumi; Giao Pham Huy (2014): Natural surface rebound of the Bangkok plain and aquifer characterization by persistent scatterer interferometry. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems* 15 (4), 965–974. DOI 10.1002/2013GC005154
- Karcher, C. (2003): Tagebaubedingte Deformationen im Lockergestein, Veröffentlichungen des Institutes für Bodenmechanik und Felsmechanik der Universität Fridericiana in Karlsruhe 160.
- Kasmarek, M. C.; Strom, E. W. (2002): Hydrogeology and Simulation of Ground-Water Flow and Land-Surface Subsidence in the Chicot and Evangeline Aquifers, Houston Area, Texas. Water-Resources Investigations Report No. 02–4022.
- Kihm, J.-H.; Kim, J.-M.; Song, S.-H.; Lee, G.-S. (2007): Three-dimensional numerical simulation of fully coupled groundwater flow and land deformation due to groundwater pumping in an unsaturated fluvial aquifer system. *Journal of Hydrology* 335 (1), 1–14. DOI 10.1016/j.jhydrol.2006.09.031
- Kolymbas, D. (2011): *Geotechnik / Bodenmechanik, Grundbau und Tunnelbau*, 3., neu bearbeitete Auflage. ed.

- Kooi, H. (2016): Coupled Modeling of Groundwater Flow and Land Subsidence with Creep: MODFLOW / SUB-CR. Draft report No. 1000086–005.
- Kooi, H.; Bakr, M.; de Lange, G.; den Haan, E.; Erkens, G. (2017): Creep consolidation in land subsidence modeling; Integrating geotechnical and hydrogeological approaches in a new MODFLOW package (SUB-CR). *Journal of Hydrology* under review.
- Kooi, H.; Trysa, A. Y. (2017): Updated subsidence scenarios Jakarta / MODFLOW SUB-CR calculations for Sunter, Daan Mogot and Marunda. Deltares draft report No. 1221568–004.
- Kooi, H.; Trysa, A. Y. (2015): Subsidence modelling of the Jakarta alluvial fan-delta Annex B. Report.
- Kratzsch, H. (2013): *Bergschadenskunde*, 6. ed.
- 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)
- Larson, K.; Basagaoglu, H.; Marino, M. (2001): Numerical Simulation of Land Subsidence in the Los Banos-Kettleman City Area, California. Technical Completion Report No. UCAL-WRC-W-8 92.
- Leake, S. A.; Galloway, D. L. (2010): Use of the SUB-WT Package for MODFLOW to simulate aquifer-system compaction in Antelope Valley, California, USA. in: *Proceedings of EISOLS 2010*, IAHS Publ.; Quer'taro, México: IAHS Press.
- Leake, S. A.; Galloway, D. L. (2007): MODFLOW ground-water model—User guide to the Subsidence and Aquifer-System Compaction Package (SUB-WT) for water-table aquifers. U.S. Geological Survey, *Techniques and Methods* No. 6–A23.
- Leake, S. A.; Prudic, D. E. (1991): Documentation of a computer program to simulate aquifer-system compaction using the modular finite-difference ground-water flow model. No. 06-A2.
- Ledoux, H.; Gold, C. (2018): Spatial Interpolation: From Two to Three Dimensions [WWW Document]. URL <https://pdfs.semanticscholar.org/abee/dabb4e91a1157367be6cdb8e90a36e20e905.pdf>
- Lieske, K.; Schade, M. (2016): Hebungen der Tagesoberfläche als Folge des Grundwasserwiederanstiegs stillgelegter Braunkohlentagebaue. 17. Geokinematischer Tag 2016.
- Liu, S.; Nelson, K.; Yunker, D.; Hipke, W.; Corkhill, F. (2014): Regional groundwater flow model of the Pinal Active Management Area, Arizona / model update and calibration. Model Report No. 26.
- Loupasakis, C.; Angelitsa, V.; Rozos, D.; Spanou, N. (2014): Mining geohazards - land subsidence caused by the dewatering of opencast coal mines: The case study of the Amyntaio coal mine, Florina, Greece. *Natural Hazards* 70 (1), 675–691. DOI 10.1007/s11069-013-0837-1
- Mašín, D. (2014): Clay hypoplasticity model including stiffness anisotropy. *Géotechnique* 64 (3), 232–238.
- 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
- Modoni, G.; Darini, G.; Spacagna, R. L.; Saroli, M.; Russo, G.; Croce, P. (2013): Spatial analysis of land subsidence induced by groundwater withdrawal. *Engineering Geology* 167, 59–71. DOI 10.1016/j.enggeo.2013.10.014
- Müller, A.; van Meerten, H.; Brinkgreve, R.; Ngan-Tillard, D. (2014): Flevoland Kennisontwikkeling Programma Archeologie Hanzelijn / Mogelijkheden tot in-situ conservering van begraven archeologische landschappen / Deelonderzoek 2B; De invloed van tijdelijke en permanente afdekkingen of ophoging op maaiveld op de conservering van archeologische vindplaatsen in de ondergrond. ADC Rapport No. 3760.

- Nikos, S.; Papoutsis, I.; Loupasakis, C.; Paraskevas, T.; Kiratzi, A.; Kontoes, C. (2016): Land subsidence rebound detected via multi-temporal InSAR and ground truth data in Kalochori and Sindos regions, Northern Greece. *Engineering Geology* 209, 175–186. DOI 10.1016/j.enggeo.2016.05.017
- Piotrowski, J.; Schmidt, G. (1997): Regionalisierung der Durchlässigkeitsbeiwerte mit un-schaffen (fuzzy) Zahlen: Der Natur näher? *Grundwasser* 97 (1), 3–10.
- Plaxis (2018): PLAXIS 3D [WWW Document]. Plaxis. URL /product/plaxis-3d/
- Plaxis (2017): PLAXIS 3D. Reference Manual.
- Poths, M. (2017): Markscheiderische Prognose von Bodenbewegungen. Flurabstandsprognose im Rheinischen Revier – 2. Facharbeitsgruppensitzung 2017-02-07.
- Poths, M. (2014): Transparenz- und Akzeptanzsteigerung in der Bergschadensbearbeitung. Bergschadensforum 2014-03-12; Bergheim: RWE Power.
- Roelofsen, F.; Goorden, N.; Buma, J.; van Gessel, S.; Goes, B.; de Lange, G.; van Meerten, H.; van Oostrom, N.; Oude Essink, G.; Sperna Weiland, F.; Veldkamp, H.; Vergroesen, T.; Verkaik, J.; Gehrels, H. (2008a): Grondwatereffecten aan de oppervlakte (gebracht) / Onderzoek naar effecten van stopzetting grondwateronttrekking DSM Delft - Technisch rapport. Deltares-rapport No. 2008-U-R1084/A.
- Roelofsen, F.; Goorden, N.; Buma, J.; van Gessel, S.; Goes, B.; de Lange, G.; van Meerten, H.; van Oostrom, N.; Oude Essink, G.; Sperna Weiland, F.; Veldkamp, H.; Vergroesen, T.; Verkaik, J.; Gehrels, H. (2008b): Grondwatereffecten aan de oppervlakte (gebracht) / Onderzoek naar effecten van stopzetting grondwateronttrekking DSM Delft - Hoofdrapport. Deltares-rapport No. 2008-U-R0960/A.
- Roelofsen, F.; Goorden, N.; van Meerten, J.; Becker, B. (2018): Folgen von reduzierten Grundwasserentnahmen: ... FH-DGGV 2018 2018; Bochum.
- Rosner, P. (2011a): Der Grubenwasseranstieg im Aachener und Südlimburger Steinkohlenrevier - eine hydrogeologisch-bergbauliche Analyse der wirkungszusammenhänge. Dissertation.
- Rosner, P. (2011b): Auswirkungen des großräumigen Grubenwasseranstiegs im Aachener und Südlimburger Steinkohlenrevier - eine Bilanz aus zwei Jahrzehnten. in: 11. Altbergbau-Kolloquium; Wroclaw.
- Rühaak, W.; Bense, V. F.; Sass, I. (2014): 3D hydro-mechanically coupled groundwater flow modelling of Pleistocene glaciation effects. *Computers & Geosciences* 67, 89–99. DOI <http://dx.doi.org/10.1016/j.cageo.2014.03.001>
- Rühaak, W.; Heldmann, C.-D.; Pei, L.; Sass, I. (2017): Thermo-hydro-mechanical-chemical coupled modeling of a geothermally used fractured limestone. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences* 100 (Supplement C), 40–47. DOI 10.1016/j.ijrmms.2017.10.019
- Schade, M. (2017): Literaturstudie Bodenbewegungsprognose. Telefongespräch 2017-12-21.
- Schade, M. (2004): Das Markscheidewesen. in: Berkner, A., Wolf, P. (Eds.), *Der Braunkohlenbergbau im Südraum Leipzig, Bergbau in Sachsen*; : Sächsisches Landesamt für Umwelt und Geologie (LfUG).
- Schaefer, W. (2006): Bodenbewegungen im rheinischen Braunkohlenrevier - Beobachtungen nach Wiederanstieg des Grundwassers. 7. Geokinematischer Tag 2006; Freiberg.
- Shearer, T. R. (1998): A numerical model to calculate land subsidence, applied at Hangu in China. *Engineering Geology* 49 (2), 85–93. DOI 10.1016/S0013-7952(97)00074-4
- Shen, S.-L.; Ma, L.; Xu, Y.-S.; Yin, Z.-Y. (2013): An interpretation of the increased deformation rate in aquifer IV due to groundwater pumping in Shanghai. *Canadian Geotechnical Journal* 50 (11), 1129–1142. DOI 10.1139/cgj-2013-0042
- Shen, S.-L.; Xu, Y.-S.; Hong, Z.-S. (2006): Estimation of Land Subsidence Based on Groundwater Flow Model. *Marine Georesources & Geotechnology* 24 (2), 149–167. DOI 10.1080/10641190600704848
- Shi, X.; Wu, J.; Ye, S.; Zhang, Y.; Xue, Y.; Wei, Z.; Li, Q.; Yu, J. (2008): Regional land subsidence simulation in Su-Xi-Chang area and Shanghai City, China. *Engineering Geology* 100 (1), 27–42. DOI 10.1016/j.enggeo.2008.02.011

- Sneed, M.; Galloway, D. L. (2008): Aquifer-System Compaction: Analyses and Simulations-the Holly Site, Edwards Air Force Base, Antelope Valley, California. U. S. Geological Survey Water-Resources Investigations Report No. 00-4015.
- Terzaghi, K. (1925): Erdbaumechanik auf Bodenphysikalischer Grundlage.
- Tomás, R.; Herrera, G.; Delgado, J.; Lopez-Sanchez, J. M.; Mallorquí, J. J.; Mulas, J. (2010): A ground subsidence study based on DInSAR data: Calibration of soil parameters and subsidence prediction in Murcia City (Spain). *Engineering Geology* 111 (1), 19–30. DOI 10.1016/j.enggeo.2009.11.004
- United States Geological Survey (2018a): IBS - Interbed-Storage Package [WWW Document]. URL <https://water.usgs.gov/nrp/gwsoftware/modflow2000/MFDOC/index.html?ibs.htm>
- United States Geological Survey (2018b): SUB - Subsidence and Aquifer-System Compaction Package [WWW Document]. URL <https://water.usgs.gov/nrp/gwsoftware/modflow2000/MFDOC/index.html?ibs.htm>
- Vermeulen, P.; Roelofsen, F.; Veldhuizen, A. (2015): Actualisatie en Kalibratie IBRAHYM / Beschrijving van activiteiten t.b.v. IBRAHYM v2.0. Deltares report No. 1206858-000.
- Vermeulen, P. T. M.; Burgering, L. M. T. M.; Roelofsen, F. J.; Minnema, B.; Verkaik, J. (2017): iMOD User Manual. Deltares user manual No. Version 4.2.
- Verruijt, A. (2012): Soil mechanics.
- Vosen, P.; Rosner, P. (2014): Auswirkungen von Geländehebungen im Zuge des Grubenwasseranstiegs im Ruhrrevier. RuhrGeo Tag 2014 2014; Bochum.
- Walther, A. (2002): Die Braunkohlelagerstätten Deutschlands: genese, Stratigraphie und wichtige Rohstoffeigenschaften. Oberseminar, Studiengang Geologie No. 40756.
- Wendler, S. (2006): Gräben, Pumpen, feuchte Wiesen [WWW Document]. Lausitzer Rundschau. URL [https://www.lr-online.de/nachrichten/graben-pumpen-feuchte-wiesen\\_aid-4086030](https://www.lr-online.de/nachrichten/graben-pumpen-feuchte-wiesen_aid-4086030)
- Wolkersdorfer, C.; Thiem, G. (1998): Land subsidence in north-eastern Saxony (Lusatia)/Germany due to Ground Water Withdrawal. in: International Mine Water Association Proceedings 1998; Johannesburg: International Mine Water Association.
- Xu, Y.-S.; Yuan, Y.; Shen, S.-L.; Yin, Z.-Y.; Wu, H.-N.; Ma, L. (2015): Investigation into subsidence hazards due to groundwater pumping from Aquifer II in Changzhou, China. *Natural Hazards* 78 (1), 281–296. DOI 10.1007/s11069-015-1714-x
- Zhang, M.; Burbey, T. (2016): Inverse modelling using PS-InSAR data for improved land subsidence simulation in Las Vegas Valley, Nevada. *Hydrological Processes* 30, 4494–4516. DOI 10.1002/hyp.10945
- Zhang, Y.; Xue, Y.; Wu, J.; Wang, H.; He, J. (2012): Mechanical modeling of aquifer sands under long-term groundwater withdrawal. *Engineering Geology* 125, 74–80. DOI 10.1016/j.enggeo.2011.11.006
- Ziegler, M. (2017): Modellierung und Prognose der aus Grundwasserabsenkung und Grundwasserwiederanstieg resultierenden Bewegungen der Geländeoberfläche. Vortrag 2017-02-07.
- Ziegler, M.; Giese, S.; Schaefer, W.; Forkel, C. (2007): Prognose sumpfbewingter Bodenbewegungen im Rheinischen Braunkohlenrevier. *Geotechnik* 30 (1), 48–54.

## A Glossar

### A.1 Begriffe

- Auftrieb:** Der Schwerkraft entgegengesetzte Kraft auf einen Körper in Flüssigkeiten und Gasen.
- Belastung:** Auflast durch Eigengewicht, Bodenschichten oder Bauwerke (z.B. Deich).
- Bergsenkung:** Bodenbewegung, die infolge von einstürzenden Stollen (Bergwerk) entsteht.
- Dehnung:** Relative Längenänderung eines Körpers unter Belastung.
- Dichte:** volumenspezifische Masse; das Verhältnis der Masse eines Körpers zu seinem Volumen z. B. in  $\text{kg/m}^3$ .
- Elastizitätsmodul** Materialkennwert, der den proportionalen Zusammenhang zwischen Spannung und Dehnung beschreibt. Auch: E-Modul, Kompressionsmodul, Steifemodul, Steifigkeit oder Youngscher Modul.
- Fels:** Zusammenhängender Gesteinskörper aus Festgestein.
- Hebung:** Vertikale Bewegung eines Gesteinskörpers nach oben, vornehmlich unter Entlastung z. B. durch Auftrieb infolge Grundwasseranstieg.
- InSAR:** Interferometric Synthetic Aperture Radar (satellitengestützte, flächenhafte Höhenmessung).
- Kriechen:** Zeitabhängig fortschreitende Verformung unter gleichbleibender Last.
- Kriging:** Geostatistische Interpolationsmethode nach Danie Krige.
- Konsolidierung:** Zeitlich verzögerte Zusammendrückung eines bindigen Bodens infolge einer Lasterhöhung bei behindertem Auspressen des Porenwassers.
- Lockergestein:** nicht verfestigtes Haufwerk (im Gegensatz zum Festgestein).
- Modell:**
  - (Modell-)Vorstellung über physikalische Gesetzmäßigkeiten, meist in Form von mathematischer Gleichungen (z. B. bodenmechanisches Kompressionsmodell nach Bjerrum);
  - Bestimmungsgleichungen und evtl. Computercode zur Lösung der Gleichungen in Verbindung mit Daten (Parameter, Geometrie) für einen Teil der Erdoberfläche. (z. B. Bodenbewegungsmodell nach Ziegler und Aulbach 2016).
- Porenwasser:** Wasseranteil, der in den Hohlräumen des Gesteins enthalten ist.
- Porenwasserdruck:** Maß für den Druck des Porenwassers in Locker- und Festgestein.
- Steifemodul:** Kennwert zur Berechnung von Bodenbewegungen, in der Bodenmechanik verbreiteter Name für Elastizitätsmodul (siehe dort). Maß für die Steifigkeit eines Bodens.
- Quellen:** Volumenvergrößerung des Bodens durch Eindringen eines Fluids.
- Setzung:** Vertikale Bewegung eines Gesteinskörpers nach unten, vornehmlich unter Belastung z. B. durch wegfallenden Auftrieb infolge Entwässerung.
- Wichte:** volumenspezifisches Gewicht; das Verhältnis der Gewichtskraft eines Körpers zu seinem Volumen z. B. in  $\text{N/m}^3$ .

Zusammendrückungsmodul: Kennwert zur Berechnung von Bodenbewegungen, in der Bodenmechanik verbreiteter Name für Elastizitätsmodul. Beschreibt die Zusammendrückungseigenschaften eines Bodens.

## A.2 Software-Produkte

ABAQUS:	Finite-Elemente-Programm für industrielle (auch geotechnische) Anwendungen.
D-Settlement:	Programm zur Berechnung von 1D- und 2D-vertikalen Bodenbewegungen.
FEFLOW	Finite-Elemente-Grundwasserströmungsprogramm von DHI-Wasy.
IBS:	interbed storage; MODFLOW-Package des USGS zur Modellierung von Bodenbewegung
IDP:	inter bed drain package; MODFLOW-Package des USGS zur Modellierung von Bodenbewegung
iMOD:	MODFLOW-Variante mit graphischer Benutzeroberfläche (Deltares).
MODFLOW:	modular flow model; Grundwasserströmungsprogramm des United States Geological Survey.
PLAXIS:	geotechnisches Finite-Elemente-Programm.
SUB:	Subsidence and Aquifer-System Compaction; MODFLOW-Package des USGS zur Modellierung von Bodenbewegung
SUB-CR:	subsurface creep; MODFLOW-Package zur Modellierung von Bodenbewegung
SUB-WT:	subsidence and aquifer-system compaction (WT: water table); MODFLOW-Package des USGS zur Modellierung von Bodenbewegung
USGS:	United States Geological Survey.

## **B Literaturrecherche**

### **B.1 Suchbegriffe zum Themenkreis „Bodenmechanik“**

soil mechanics, soil deformation, subsidence, aquifer deformation, hydrogeomechanical interaction, land subsidence rebound, uplift, upsidence, creep, poroelasticity theory,

### **B.2 Suchbegriffe zum Themenkreis „Grundwasserentnahmen“**

groundwater extraction, groundwater pumping, Grundwasserwiederanstieg, Grundwasseranreicherung, Grundwasserfluktuation, uplift, groundwater abstraction

### **B.3 Suchbegriffe zum Themenkreis Bergbau**

lignite mining, coal exploitation, Braunkohle, Tagebau, Bergschaden, Erftscholle, Erftbecken, Lockergestein, Bergsenkung, mine drainage

### **B.4 Suchbegriffe zu Methoden der Bodenbewegungsprognose**

numerical modelling, numerical simulation, poroelasticity theory, D-Settlement, creep, Grundwasserströmungsmodell, Hysterese, MODFLOW, iMOD, iBS, PLAXIS, SUB, SUB-CR, Terzaghi

### **B.5 Suchbegriffe zu Interpolationsmethoden**

spatial interpolation, dreidimensional, geostatistical, geostatistisch, inSAR, Setzungskarte

## C Auswahl der Fallbeispiele

Tabelle C.1 Ausgewählte Fallbeispiele verschiedener Kategorien (F: Festgestein, LT: Lockergestein, Tagebau, LW: Lockergestein, weitere Fälle); in der Spalte „Bodenbewegung“ stehen S für Setzung, H für Hebung und SH für Setzung und Hebung). Die neun Fallbeispiele, für die Steckbriefe erstellt wurden, sind in Fettdruck hervorgehoben.

Region	Ursache	Quelle	Kategorie	Bodenbewegung	Berechnung der Bodenbewegung	Interpolation der Bodenbewegung in der Fläche
Australien	Grundwasserentnahmen	Helm 1987	LT	S	COMPAC 1D	keine
Mitteldeutsches und Lausitzer Braunkohlenrevier	Braunkohle	Berkner & Thieme 2005; Lieske & Schade 2016	LT	SH	keine Bodenbewegungsberechnung	keine
Lausitzer Revier	Braunkohle	Wolkersdorfer & Thiem 1998	LT	S	Terzaghi	keine
Rheinisches Braunkohlenrevier	Braunkohle	Hügel 1995	LT	S	Finite Elemente, ABAQUS, 2D	2D-vertikaler Schnitt
Florina, Griechenland	Braunkohle	Loupasakis et al. 2014	LT	S	PLAXIS, 2D	2D-vertikaler Schnitt
Santa Cruz	Grundwasserentnahmen	Hanson & Benedict 1994	LW	S	MODFLOW-IBS	direkte Berechnung für das ganze Modellgebiet
Limburger und Aachener Steinkohlenrevier	Steinkohle	Clostermann & Wings 2011	F	SH	Radarmessungen	entfällt
Steinkohlenbergbau Deutschland	Steinkohle	Fenk & Tzschar-schuch 2007	F	SH	Analytische Berechnung, 1D	keine
Changzhou (China)	Grundwasserentnahmen	Xu 2015	LW	S	PLAXIS, 3D	direkte Berechnung für das ganze Modellgebiet
Griechenland	Grundwasserentnahmen, Grundwasseranreicherung	Nikos et al. 2016		SH	keine, Auswertung von Satelliten	entfällt

Region	Ursache	Quelle	Kategorie	Bodenbewegung	Berechnung der Bodenbewegung	Interpolation der Bodenbewegung in der Fläche
					tendaten	
California (Los Banos-Kettleman)	Grundwasserentnahmen	Larson et al. 2001	LW	S	MODFLOW-IBS	direkte Berechnung für das ganze Modellgebiet
Arizona (Tucson basin and Avra valley)	Wasserstand reduziert	Hanson 1989	LW	S	Helm model	keine
Houston (Texas)	Grundwasserentnahmen	Kasmarek & Strom 2002	LW	S	MODFLOW-IBS	direkte Berechnung für das ganze Modellgebiet
Jakarta	Grundwasserentnahmen	Kooi & Trysa 2015	LW	S	D-Settlement, 1D	keine
Mekong, Vietnam	Grundwasserentnahmen	Minderhoud 2017	LW	S	SUB-CR	direkte Berechnung für das ganze Modellgebiet
Madrid (Spanien)	Grundwasserentnahmen	Ezquerro et al. 2014	LW	SH	Verhältnis aus elastischer und unelastischer Verformung	keine
Delft	Reduktion der Grundwasserentnahmen	Roelofsen et al. 2008b, Roelofsen et al. 2018	LW	SH	D-Settlement	Interpolation aus einzelnen Berechnungspunkten
Flevoland	Konservierung von archäologischen Ausgrabungsstätten	Müller et al. 2014	LW	S	D-Settlement	keine
Hangu (China)	Grundwasserentnahmen	Shearer 1998	LW	S	MODFLOW-IDP	Berechnet für das ganze Modellgebiet
Shanghai (China, Shi)	Grundwasserentnahmen und Grundwasseranreicherung	Shi et al. 2008	LW	SH	Viscoelastoplastisches Modell	direkte Berechnung für das ganze Modellgebiet
Holly Cite (California)	Grundwasserfluktuation	Sneed & Galloway 2008	LW	S	MODFLOW-IBS 1D	keine

Region	Ursache	Quelle	Kategorie	Bodenbewegung	Berechnung der Bodenbewegung	Interpolation der Bodenbewegung in der Fläche
Groningen	Salzbergbau (Untertage)	Deltares	andere	S	entfällt	entfällt
Groningen	Erdgasgewinnung, Erdbeben	Deltares	andere	S	entfällt	entfällt
Murcia (Spanien)	Grundwasserentnahmen	Tomás et al. 2010	LW	S	1D elastische Kompression	entfällt
Taipei Basin, Taiwan	Grundwasserentnahmen	Chen et al. 2007	LW	SH	Messungen	Kriging
Shanghai (China, Zhang)	Grundwasserentnahmen, Grundwasseranreicherung	Zhang et al. 2012	LW	SH	Viscoelastoplastisches Modell	keine
Arizona (Pinal Active Management Area)	Grundwasserentnahmen	Liu et al. 2014	LW	S	MODFLOW-SUB-WT	direkte Berechnung für das ganze Modellgebiet
Bangkok	Grundwasserentnahmen, Grundwasseranreicherung	Ishitsuka Kazuya et al. 2014	LW	SH	Auswertung von Satellitendaten	entfällt (Satellitenbilder)
Bologna (Italien)	Grundwasserentnahmen	Modoni et al. 2013	LW	S	Integrale GIS-Analyse unterschiedlicher Messdaten	GIS-Methoden

## D Expertenbefragung

### D.1 Dr. Benjamin Aulbach, Ziegler & Aulbach Ingenieure

Dr.-Ing. Benjamin Aulbach ist gegenwärtig leitender Entwickler und Anwender der Methode „Ziegler und Aulbach“ und Geschäftsführer und Gesellschafter bei Ziegler & Aulbach Ingenieure. Ein Ergebnis der Expertenbefragung von Herrn Dr. Aulbach ist die tabellarische Beschreibung der Methode von Ziegler und Aulbach in Abschnitt 6.3.

Darüber hinaus wurden Ziegler und Aulbach Ingenieure zwei weitere Fragen vorgelegt. Im Folgenden ist ein Auszug aus dem Schreiben vom 18. Juni 2018 wiedergegeben, indem die Fragen beantwortet werden.

Frage 1: Wie schätzen Sie die Relevanz des Prozesses des Bodenkriechens vor allem vor dem Hintergrund der langen Betrachtungs- und Belastungszeiträume sowie der mächtigen bindigen Lockergesteins-schichten im Rheinischen Revier ein und wie würden Sie den Fehler quantifizieren, der durch Vernachlässigung des Prozesses entsteht?

In bindigen Schichten mit Tonen und Schluffen oder auch Kohleflözen kann aufgrund der geringen Durchlässigkeit das Porenwasser bei Belastung nicht sofort entweichen, so dass zunächst ein Porenwasserüberdruck entsteht. Erst wenn Wasser entweicht, was je nach vorhandener Durchlässigkeit und Steifigkeit des Bodens unterschiedlich lange dauert, baut sich der Porenwasserüberdruck ab und die zusätzliche Belastung geht auf das Korngerüst über. Daher treten Setzungen in bindigen Böden erst zeitverzögert ein (vgl. Abbildung 1). Dieser Prozess wird allgemein als Konsolidation bezeichnet.

Darüber hinaus kann es in bindigen Böden unter konstanter Last aber auch zu Kriechprozessen kommen, bei denen die diffusen Wasserhüllen um die einzelnen Tonminerale eine entscheidende Rolle spielen, da sie die Zähigkeit des Tons bestimmen. Besonders ausgeprägt ist das Kriechverhalten bei bindigen und organischen Erdstoffen mit hoher Wasseraufnahmekapazität. Die Erklärung und Beschreibung der Sekundärsetzungen bedarf zwar noch weiterer Forschung, allerdings ist bekannt, dass diese erst nach Abschluss der Konsolidierung stattfinden. Daher werden die Konsolidationssetzungen auch als Primärsetzungen und die Kriechsetzungen als Sekundärsetzungen bezeichnet. Weiter fallen die Sekundärsetzungen im Vergleich zu den Primärsetzungen deutlich geringer aus, wie Abbildung 1 zeigt.

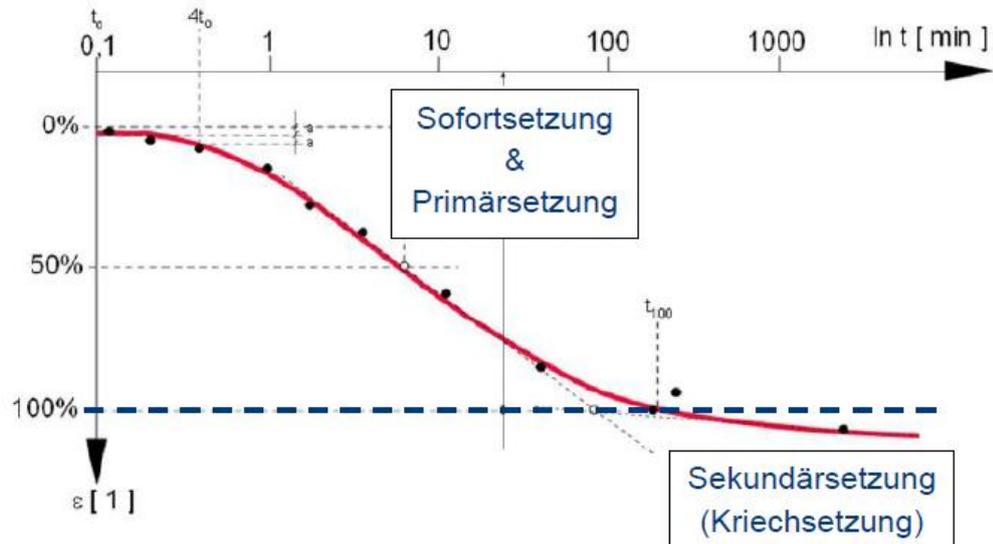


Abbildung 1 Zeit-Setzungslinie (Quelle: Skript Geotechnik I, GiB – RWTH Aachen)

Zu berücksichtigen sind Kriechprozesse aber dennoch z.B. bei der Errichtung von Dämmen und Deichen, wenn die Sekundärsetzungen relevante Auswirkungen auf die erforderliche Höhe haben können.

Im Rheinischen Braunkohlerevier und insbesondere in Bezug auf die aus den Sumpfungsmaßnahmen resultierenden Setzungen sind Sekundärsetzungen bzw. Kriechprozesse allerdings vernachlässigbar. Dies liegt daran, dass die Sumpfungsmaßnahmen nach dem Ende des Tagebaubetriebs wieder eingestellt werden und das Grundwasser wieder ansteigt. Da jedoch die mächtigen bindigen Schichten zu diesem Zeitpunkt noch nicht auskonsolidiert sind (d. h. man befindet sich noch oberhalb der blauen gestrichelten Linie in Abbildung 1) und es durch den Grundwasserwiederanstieg im weiteren Verlauf zu einer Spannungsumkehr kommt, können relevante Kriechprozesse erst gar nicht einsetzen.

Bei Vernachlässigung des Effekts aus Kriechprozessen könnte daher eine Abweichung allenfalls daraus resultieren, dass Kriechprozesse in weniger mächtigen bindigen Schichten bereits parallel zur Konsolidierung ablaufen. Allerdings ist eine eindeutige Trennung dann ohnehin nicht möglich.

Weiter wird bei Verwendung eines Modells, das an den gemessenen Bodenbewegungen punktgenau kalibriert werden kann, ein parallel auftretender Anteil aus Kriechen bei der Berechnung bzw. Prognose ohnehin automatisch mit abgebildet.

Frage 2: Hydraulische Durchlässigkeit und Speicherkoeffizient sind abhängig von der Kompaktion der Bodenschichten, was sich unter anderem auf den Wasserhaushalt auswirkt. Wie schätzen Sie die Relevanz dieses Effektes im Rheinischen Revier ein und wie würden Sie den Fehler quantifizieren, der durch Vernachlässigung des Prozesses entsteht?

Es ist zunächst richtig, dass sich eine Kompaktion von Bodenschichten auf die hydraulische Durchlässigkeit und das Speichervolumen auswirken. Da das Volumen des Korngerüsts als konstant angenommen werden kann, reduziert sich infolge einer Kompaktion nur das Porenvolumen, was bei voller Wassersättigung mit einer

Reduzierung des Speichervolumens gleichzusetzen ist. Zeitgleich reduziert sich auch die Durchlässigkeit, da diese vom zur Verfügung stehenden Porenraum sowie der Größe der einzelnen „Kanäle“ abhängt. Von Relevanz ist die Betrachtung dieser Effekte z. B. bei der Landgewinnung durch Aufspülen, bei der das aufgespülte Material unter Eigengewicht einer deutlichen Kompaktion unterliegt.

Im Rheinischen Braunkohlerevier und insbesondere in Bezug auf die aus den Sumpfungsmaßnahmen resultierenden Setzungen ist dieser Effekt allerdings vernachlässigbar.

Im Bereich innerhalb des Rheinischen Braunkohlereviere mit den größten Setzungen betragen diese etwa 4 m bei einer setzungsrelevanten Schichtmächtigkeit von ca. 1000 m. Legt man einen Porenanteil von 0,4 zugrunde, resultiert daraus eine Reduzierung des Porenanteils in Höhe von gerade einmal:

$$\Delta n = \frac{4 \text{ m}}{1000 \text{ m} \cdot 0,4} = 1\%$$

Eine Änderung des Porenanteils bzw. Speichervolumens in dieser Größenordnung hat allerdings noch keinen relevanten Effekt auf die Durchlässigkeit.

Durch die Vernachlässigung dieses Effekts ergäbe sich folglich auch nur eine absolut vernachlässigbare Abweichung bei der Berechnung der Bodenbewegung bzw. deren Prognose. Außerdem würde eine solche Abweichung wiederum durch die Kalibrierung an den gemessenen Bodenbewegungen ausgeglichen.

## D.2 Prof. Christian Forkel, RWE Power AG

Prof. Dr.-Ing. habil. Christian Forkel ist Leiter der Sektion „Wasserwirtschaft“ bei der RWE Power AG. Aus dieser Funktion ist er mit dem Rheinischen Braunkohlenrevier vertraut und hat mehrere Beiträge in diesem Zusammenhang veröffentlicht (z. B. Ziegler et al. 2007, Forkel 2017b) Außerdem ist er außerplanmäßiger Professor für numerische Methoden an der RWTH Aachen. Im Folgenden ist eine Notiz des Telefongesprächs am 21.12.2017 wiedergegeben, aufgezeichnet von Bernhard Becker.

Was sind die Besonderheiten im rheinischen Braunkohlenrevier?

Die größten Bodenbewegungen finden in der Erftscholle statt. Im Gegensatz zur Erftscholle besteht die Venloer Scholle im Wesentlichen aus Kiesen und Sanden; die Tonschichten und auch die Kohleschichten sind hier viel dünner als in der Erftscholle. Auch in der Rurscholle sind vornehmlich Sande, hier gibt es ebenfalls wesentlich geringere Setzungsbeträge als in der Erftscholle. Die drei geologischen Einheiten Erftscholle, Rurscholle und Venloer Scholle müssen deshalb differenziert betrachtet werden.

Für das Erftbecken sind deshalb die markscheiderischen Methoden nur eingeschränkt anwendbar, da die Setzungen aus Konsolidierung dem Grundwasserwiederanstieg nachlaufen, entsprechend ist die Korrelation zwischen Setzung und Grundwasserstand nicht gegeben.

Gegenüber dem Lausitzer und dem Mitteldeutschen Braunkohlenrevier weist das rheinische Revier eine komplexere Hydrogeologie auf, der Abbau findet in größerer Teufe statt, so dass auch keine Dichtwände eingesetzt werden können. Das rheinische Braunkohlenrevier hat mehrere Kohleschichten (in der Lausitz und im Mitteldeutschen Revier wird im Wesentlichen nur eine Kohleschicht abgebaut), und es

liegen dort wenig Schichten bindigen Materials vor. Entsprechend spielt die dem Grundwasserstand nachlaufende Setzung eine kleinere Rolle.

Welche bodenmechanischen Prozesse sind aus Ihrer Sicht relevant?

Im Wesentlichen ist die Konsolidierung der Tonschichten relevant. Dabei ist zu beachten, dass der Boden noch nicht auskonsolidiert ist, wenn der Wiederanstieg des Grundwassers einsetzt.

Kriechprozesse sind nicht zu 100 % auszuschließen. Hier stellt sich das Problem der Differenzierung der beiden Prozesse Kriechen und Konsolidierung.

Der größte Teil der Setzungen ist bereits passiert, es ist nur noch mit wenig Restsetzungen, im Wesentlichen aus nachlaufender Konsolidierung, zu rechnen, da keine weiteren größeren Grundwasserabsenkungen geplant sind. Schwerpunkt der Untersuchungen muss deshalb auf den Hebungen liegen, und mit den Hebungen ist die größte Unsicherheit verbunden.

Was sind die wichtigsten Merkmale und Vor- und Nachteile der von Ihnen verwendeten Methoden zur Bodenbewegungsprognose (Methode nach Ziegler und Aulbach; mark-scheiderische Methode)?

Die Methode nach Ziegler und Aulbach ermöglicht eine analytische Berechnung der Bodenbewegung. Ein Mehrwert numerischer Methoden (z.B. Finite-Elemente-Methode) ist zunächst nicht gegeben. Die gewählte Methode ist gut handhabbar für den Bearbeiter.

Grundsätzlich ist eine getrennte Modellierung der Prozesse „Grundwasserströmung“ und „Bodenmechanik“ vorzuziehen, denn auch die vorliegenden numerischen Grundwassermodelle sind mit Unsicherheiten behaftet. Aus diesem Grund sollte vorzugsweise der gemessene Grundwasserstand in die Berechnung der Bodenbewegung einfließen, und nicht ein berechneter.

Welche Methoden wären eventuell noch geeignet? Haben Sie z.B. die Verwendung von Finite-Elemente-Methoden wie PLAXIS in Erwägung gezogen?

Nein, da numerische Methoden keinen Mehrwert an sich gegenüber analytischen Modellen darstellen.

### **D.3 Alfred Hovekamp, RWE Power AG**

Alfred Hovekamp arbeitet in der Abteilung Bergschäden / Bergschadensanalyse bei der RWE Power AG. Er ist Mitautor des Beitrags Heitmann et al. 2012. Im Folgenden ist ein Auszug aus der E-Mail vom 16.01.2018 von Alfred Hovekamp an Bernhard Becker wiedergegeben (Betreff: AW: Literaturstudie Bodenbewegungsprognose; zitiert als Hovekamp 2018).

[..] In der angehängten Datei (Steckbrief) sind unsere Korrekturvorschläge (in rot) eingetragen.

Zu Ihrer 3. Frage „Gibt es von Ihrer Seite noch andere Hinweise oder Informationen für die Studie?“ haben wir keine Ergänzungen.

Nachfolgend Antworten zu der 2. und 4. Frage:

Zu Ihrer 2. Frage:

Was sind die wichtigsten Merkmale und Vor- und Nachteile der von Ihnen verwendeten Methoden zur Bodenbewegungsprognose?

Antwort:

Markscheiderisches Prognosemodell:

Vorteile:

- Die GW-Entspannungen (Summe der GW-Differenzen aller gespannten GW-Leiter) korrelieren im Wesentlichen unmittelbar mit den Bodensenkungen und stellen seit Beginn der großräumigen Sümpfung ein bereits früh erkanntes Merkmal dar (vgl. H. Kratzsch, Bergschadenkunde 6. Auflage 2013, u.a. Seite 465 (Kratzsch 2013)).
- Die Markscheiderische Prognoseberechnung basiert auf einfacher Datenermittlung / einfachen Berechnungsverfahren und liefert ortsabhängige individuelle Proportionalitätsfaktoren.
- Eine vergleichsweise engmaschige Höhenmesspunktdichte ist revierweit vorhanden und dokumentiert jahrzehntelang präzise die tatsächlichen Bodenbewegungsverläufe.
- Eine Berücksichtigung der maßgeblich auf die Bodenbewegungen großflächig einwirkenden sumpfungsbeeinflussten gespannten GW-Schichten liefert bereits zuverlässige Prognosewerte.
- Es sind keine geologischen Detailkenntnisse erforderlich.
- Die geologischen Schichtmächtigkeiten des Untergrundes verändern sich im Gegensatz zu den variablen Bodenbewegungen und den sich ändernden GW-Ständen während der Phase der Sümpfungen bzw. des GW-Wiederanstiege unwesentlich in Bezug auf die Gesamtmächtigkeit, so dass deren Einfluss als immer gleichbleibend betrachtet werden kann.
- Es ist ein anerkanntes Prognoseverfahren, das sich seit vielen Jahren bewährt hat und im Prognose-Ist Vergleich immer eine verlässliche gute Übereinstimmung gezeigt hat (z.B. Monitoring Tagebau Garzweiler).
- Die Leitnivelements-Wiederholungsmessungen kontrollieren den prognostizierten Bodenbewegungsablauf regelmäßig. Die guten Übereinstimmungen der prognostizierten mit den gemessenen Bodenbewegungen bestätigen bisher das angewandte Markscheiderische Ermittlungsverfahren.
- Der bereits in den 1980er Jahren für das Rheinische Braunkohlenrevier publizierte proportionale Anteil von wenigen Millimetern Bodensenkungen pro 1 m GW-Absenkung liegt auch heute noch in einer vergleichbaren Größenordnung (i.d.R. im niedrigen einstelligen Promillebereich).

Nachteile:

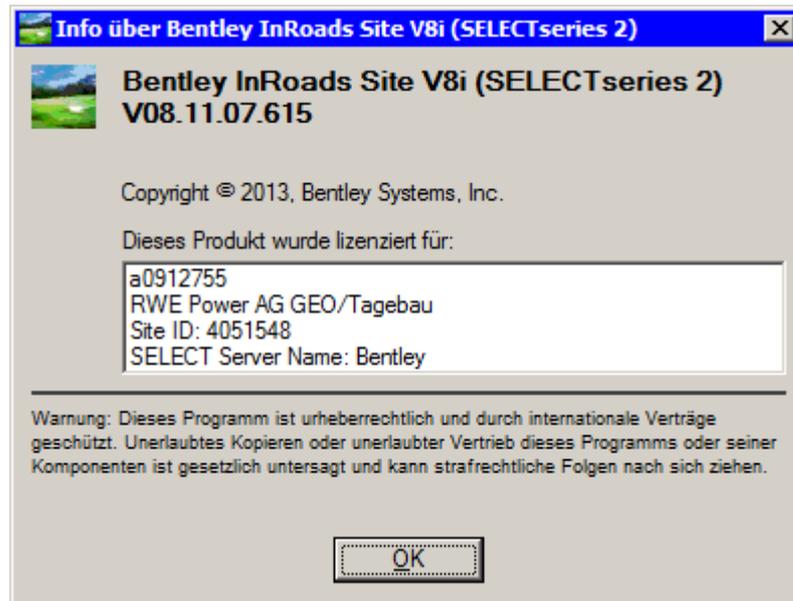
- Nach dem GW-Wiederanstieg werden nachlaufende Konsolidationssetzungen der bindigen Schichten nicht explizit bewertet und zurzeit rechnerisch nicht besonders berücksichtigt.
- Es liegen zurzeit nur vereinzelte und noch keine revierweiten Messwerte über Bodenhebungen vor, die den pauschalierten Abminderungsfaktor bei GW-Wiederanstieg belastbar bestätigen bzw. individuell ortsabhängig anpassen lassen.

Zu Ihrer 3. Frage:

Welche Methode der Dreiecksvermaschung haben Sie verwendet?

Antwort:

Die Triangulation erfolgt bei RWE Power, Abteilung Bergschäden, mit dem CAD – Programm MicroStation und dem Zusatzprogramm „InRoads Site V8i“ von der Firma Bentley (siehe nachfolgende Programm-Info):



Im Handbuch zu dem Programm wird der Triangulationsvorgang wie folgt beschrieben:

„Der Befehl Oberfläche > Triangulieren leitet die Berechnung der Triangulierung ein, wodurch aus den vorhandenen Oberflächenpunkten Dreiecke gebildet werden. Dieser auf den Delaunayschen Kriterien basierende Algorithmus erstellt kleine dreieckförmige Ebenen, die die Oberfläche des Geländes wiedergeben. Da die xyz-Koordinaten der Dreieckscheitelpunkte bekannt sind, kann die Höhe aller auf der resultierenden Dreiecksebene liegenden Punkte durch Interpolation dieser Koordinaten ermittelt werden. Bruchkanten werden so trianguliert, dass das Überlappen von Dreiecken und Bruchkanten vermieden wird. Aussparungen werden mit diesem Befehl ähnlich wie Bruchkanten trianguliert. Die Dreiecke der Aussparungsbereiche werden als gelöscht markiert und zur weiteren Verarbeitung nicht mehr verwendet. Die gelöschten Dreiecke verbleiben im Speicher, Sie haben jedoch keinen Zugriff mehr darauf. Mit Umrandungen wird auf gleiche Weise verfahren. Es werden jedoch nur die Dreiecke als gelöscht markiert, die außerhalb der Umrandung liegen. ...“

Bezogen auf die Auswahl der vorhandenen Stützpunkte (Prognosepunkte) wird die auszuwertende Fläche unter Berücksichtigung der Umrandung (Umring z.B. für den Untersuchungsbereich), den Aussparungen (Innenringe, z.B. Tagebaubereiche) und gegebenenfalls durch die Vorgabe von Bruchkanten (Stufenabgrenzungen, z.B. bewegungsaktive Tektonik) definiert und damit die Triangulation entsprechend durchgeführt.

[...]

#### D.4 Marco Schade, LMBV

Marko Schade arbeitet bei der Lausitzer und Mitteldeutsche Bergbau-Verwaltungsgesellschaft mbH (LMBV) und ist einer der Autoren eines Beitrags, in dem statistische Methode zur Bodenbewegungsprognose angewendet wurde (Lieske & Scha-

de 2016). Im Folgenden ist die Notiz des Telefongesprächs am 21.12.2017 wiedergegeben, aufgezeichnet von Bernhard Becker.

#### Nivellement

- Seit 1999 wird alle zwei Jahre ein Nivellement ausgeführt. Der Abstand der Festpunkte ist objektbezogen; die Punktdichten ist bei Bebauung größer als in unbebautem Gebiet.
- Die Abstände der Messpunkte bei Landverbindungen ist 1 km. Das Nivellement aus dem Jahr 1999 ist die Nullmessung.

#### Hebungen

- Hebungen wurden bisher nur in unmittelbarer Tagebaunähe beobachtet.
- Bei den Nivellements in den Jahren 2001 und 2003 sind Hebungen aufgefallen. Eine Korrelation der Bodenbewegung mit der Änderung des Grundwasserstands wurde 2004 in einer Studie untersucht und festgestellt.
- Für den Bereich Leipzig wurde eine sehr gute Korrelation festgestellt. Die Geologie ist hier weitgehend homogen, der Grundwasseranstieg langfristig, und hier wurden auch Hebungen festgestellt. Insgesamt handelt es sich aber um geringe Bewegungsraten.
- Die damals erwartete Größenordnung der Hebungen war, dass die Hebungen unter einem Dezimeter bleiben, und das ist auch so eingetreten. Die Setzungen sind mindestens doppelt so hoch. Der Absolutbetrag der Setzungen ist unbekannt, weil auf Festpunkte zugegriffen wurde, die wahrscheinlich beeinflusst wurden.
- Die Relation zwischen Bodenbewegung und Grundwasserstandsänderung variiert lokal, die Korrelationskoeffizienten sind nicht überall gleich. Allerdings ist die Variation der Koeffizienten nicht groß, da die Hebungen klein sind.

#### Interpolation

- Die Interpolation für die in Lieske & Schade 2016 veröffentlichten Karten wurde mit Hilfe einer einfachen GIS-Operation durchgeführt.

#### Vergleichbarkeit des Lausitzer Braunkohlenreviers und des mitteldeutschen Braunkohlenreviers mit dem rheinischen Braunkohlenrevier

- Die Leipziger Tagebaue sind etwa 50 bis 60 m tief, die Absenktiefe des Grundwassers ist ähnlich. Damit geht der Einfluss des Tagebaubetriebs nicht so tief wie im rheinischen Braunkohlenrevier.
- Es gibt vergleichsweise wenig Störungen.
- Der Abschluss des Grundwasserwiederanstieg ist weitgehend bereits erreicht.

#### Andere Untersuchungen

- Parallel wurden Abschätzungen der Bodenbewegungen in Form von geotechnischen Gutachten durchgeführt. Diese Gutachten sind unveröffentlicht. Für den Tagebau Cospuden wurde das Finite-Elemente-Programm PLAXIS eingesetzt.
- Die Studie Wolkersdorfer & Thiem 1998 ist nicht bekannt, zu dem Zeitpunkt gab es auch noch keine Hebungen

#### Hintergründe zum Lausitzer und zum mitteldeutschen Braunkohlenrevier

- Die Kohleförderung wurde ab 1995 schrittweise eingestellt, entsprechend kam es in diesem Jahr an einigen Stellen bereits zum Wiederanstieg.
- Schäden im Bereich Delitzsch sind zurückzuführen auf kleinräumige Geologie und nicht fachgerechtes Bauen.
- Hebungsbedingte Schäden sind nicht bekannt.
- Im Bereich der LMBV (Lausitzer Revier) ist die Braunkohlegewinnung abgeschlossen, hier sind Sanierungsfirmen tätig und der Grundwasserwiederanstieg hat nahezu überall eingesetzt.
- Neben der LMBV ist im Lausitzer Revier noch die LEAG aktiv mit der Braunkohleförderung, derzeit geplant bis 2035 oder 2040.
- Im Tätigkeitsgebiet der MIBRAG (Mitteldeutsches Revier) wird noch Kohle gefördert, entsprechend finden heute noch Senkungen statt.
- Im Geiseltal wird seit 300 Jahren Kohle abgebaut, und seit 100 Jahren im industriellen Tagebau.
- Es gibt viele verschiedene Tagebaue.

Literatur:

- Internetseiten der Tagebaubetreiber ([www.mibrag.de](http://www.mibrag.de), [www.leag.de](http://www.leag.de))
- „Bergbau in Sachsen“

Weitere Hinweise

- Lausitzer Braunkohlenrevier und mitteldeutsches Braunkohlenrevier werden in einem Steckbrief zusammen behandelt. Im derzeitigen Stand des Steckbriefs wird der Eindruck erweckt, als wären diese Reviere ähnlich. Die Vielzahl der Tagebaue kommt nicht heraus.

#### **D.5 Prof. Thomas Burbey, Virginia Polytechnic Institute and State University**

Prof. Burbey arbeitet als Professor am Virginia Polytechnic Institute and State University, Department of Geosciences. Er ist Autor zahlreicher Studien zur Bodenbewegung und einer der Autoren eines Review-Papers zum Stand der Technik und Forschung von Methoden zur Bodenbewegungsprognose (Galloway & Burbey 2011).

Auszug aus der E-Mail vom 02.03.2018 von Thomas Burbey an Henk Kooi (Subject: Re: advice sought regarding land subsidence modelling in Germany)

It sounds like a very interesting problem, one that will require at least a 2D cross sectional model, but probably a 3D model because of the cone of depression formed by pumping. This is particularly true because of the goal of understanding what the water levels will be like in 2100. I will try to answer your questions based on the information provided and my understanding of the hydromechanical processes that may be involved. I will let Devin answer as he probably also has some pertinent expertise to offer.

1. When using 1D vertical models for a column (like COMPAC), can you recommend methods to interpolate the results in order to get two-dimensional information (e. g. kriging or inverse distance weighting)?

1. I guess I'd like to know how you plan to apply COMPAC. Are you applying it in specific gridded intervals or sporadically where you have well logs? This will make a difference in how you evaluate the data spatially. It isn't clear too what outcomes

you're evaluating. COMPAC will provide you the compaction of individual units based on known head changes. If you do use this model I recommend using stress-dependent parameters because of the amount of drawdown and the length of time of the simulation, the aquitard parameters are sure to be changing, perhaps quite significantly, which will also play a role in the time it will take for recovery (it will be more rapid) if storage is significantly reduced. Based on your goals of knowing what the head distribution will be like in 2100, of course COMPAC will be of no use to you as you are probably aware. COMPAC assumes you know a priori the head distribution in all the units.

2. The process of consolidation has been identified as a relevant for the study area. Given the long period of mine drainage, would you consider the process of creeping relevant?

2. Based on the large amount of drawdown, the significant thickness of some of the confining units, yes I would predict that creep would be important here and for some time after water levels begin to recover.

3. In the current study, the groundwater extractions will stop within a couple of years, so we expect upwards movement of soil due to a groundwater level rise (several 100 m). Has such a behaviour ever been modelled with MODFLOW subsidence packages?

3. Yes, this behavior has been modeled before. A former PhD student of mine did such an investigation in Las Vegas Valley (Zhang and Burbey, 2016, Hydrological Processes, v.30, issue 24, pp. 4494-4516) where we simulated uplift (upsidence) from water-level recovery.

4. What would be important aspects when modelling the complete drainage of a system of multiple layers of aquifers and aquitards, where parts of the aquifers are completely dried (i. e. aquitards drain towards vadose zones)? Can the MODFLOW packages (e. g. SUB-WT) handle this process?

4. This process can be very complex, particularly if you're dealing with the vadose zone and draining of aquitards above the water table. The SUB-WT package cannot accommodate this type of behavior. In fact one of the drawbacks of using MODFLOW and SUB for this application would be the inability to simulate the reduction in storage and hydraulic conductivity of the aquitards (in particular) that would be important for properly evaluating the magnitude of water-level recovery after 2045. In order simulate the drainage of the unsaturated zone and subsequent compaction as well as simulate the stress-dependent parameters you'll need to use a fully coupled poromechanical code such as Abaqus, which is what I would recommend in your case.

5. You mention the stress-dependence of the hydraulic conductivity of aquitards and aquifers. Can you give an estimation of the error when neglecting this effect?

5. It can be significant. For example, in the San Joaquin valley of California, based on water-level recoveries and then subsequent pumping, it was determined that 1/3 of the storage was permanently lost to compaction of the aquitards and clay interbeds. So without using stress-dependent parameters, it's possible your error could be as much as 33%, which I would imagine would not be acceptable.

6. Given the context of the case study (see below), can you recommend a method for soil movement prediction?

6. Not sure what you mean by soil movement. Are you referring to 3D deformation? There is not a good way to approach this analytically based on the nature of your system. Again, I'd use Abaqus as the numerical code for this system.
7. Do you have any other recommendations, including literature, that might be helpful for the case study?

7. This would take some time because there's a number of different avenues to pursue in the literature. One would be compaction in multi-layered aquifers. The USGS has a regional model of the Atlantic Coastal Plain that has 11 aquifers and 9 aquitards that are also in a wedge like your system. Investigating how the USGS went about simulating this system would be beneficial. I don't recall whether they implemented the SUB package, but they may have, which would be useful. However, this won't help when it comes to huge recoveries after massive drawdowns. The paper I mentioned earlier for Las Vegas Valley is one that looks at large recoveries and uplift after pumping and subsidence, so I recommend looking at that one. I don't have any knowledge of papers dealing with dewatering and desaturating of clays above the water table, but I haven't investigated this.

#### **D.6 Dr. Hendrik Kooi, Deltares**

Dr. Hendrik Kooi ist wissenschaftlicher Mitarbeiter bei Deltares mit Schwerpunkt numerische Methoden für Geowissenschaften. Er ist Entwickler des MODFLOW-Packages SUB-CR und Autor mehrerer Publikationen zur Modellierung von Bodenbewegung (z. B. Minderhoud et al. 2017; Kooi 2016). Im Folgenden ist eine Zusammenfassung von Gesprächsnotizen von Bernhard Becker wiedergegeben.

Welche Methoden wären zur Prognose der Bodenbewegung im Rheinischen Braunkohlenrevier geeignet?

Von den MODFLOW-Paketen käme zunächst SUB-WT in Frage, da es eine Änderung der Gesamtspannungen bei Veränderung des Grundwasserspiegels berücksichtigt. Hierbei ist zu berücksichtigen, dass es grundsätzlich schwierig ist, Trockenfallen und Wiederbefeuchten einer Schicht zu modellieren. Die Konsolidierung von bindigen Schichten kann mit MODFLOW und SUB-WT modelliert werden, indem den bindigen Schichten ein Interbed-Anteil von 100 % zugewiesen wird. Änderungen des Porenwasserdrucks oder der Grundwasserdruckhöhe im Schichtaufbau durch Änderung der Auflast infolge Grundwasserstandsänderung werden nicht berücksichtigt. Für den Anwendungsfall des Rheinischen Braunkohlenreviers müsste hier eine Modifikation vorgenommen werden, da die Grundwasserstände sich relativ schnell ändern im Vergleich zur langsam ablaufenden Konsolidierung der mächtigen grundwasserstauenden Schichten.

SUB-CR käme ebenfalls in Frage. SUB-CR unterscheidet sich von SUB-WT wesentlich hinsichtlich des bodenmechanischen Kompressionsmodells. Vorteil von SUB-CR wäre, dass auch Kriechen berücksichtigt werden kann. Wenn eine Schicht vollständig trocken gefallen ist, findet der Prozess des Kriechens weiterhin statt, dies kann mit dem Kompressionsmodell von SUB-CR berücksichtigt werden.

Hinsichtlich der Entwässerung von konsolidierenden Schichten liegt für die beiden oben genannten Pakete eine Einschränkung in der Grundwasserströmungsberechnung mit MODFLOW: MODFLOW kann das Entstehen eines ungesättigten Bereichs unterhalb einer gesättigten Schicht nicht modellieren. Für vertikale eindimensionale Profile kann dieses Problem über den Ansatz von Randbedingungen umgangen werden.

Für eindimensionale Berechnungen kommen in Frage: Die Methode von Ziegler und Aulbach, Finite-Elemente-Programme wie PLAXIS, das MODFLOW-Paket SUB-CR. Die Methode von Ziegler und Aulbach berücksichtigt die Konsolidierung in phreatische Schichten auf eine elegante Art und Weise über die Berechnung Porenwasserüberdrucks. Mit Finite-Elemente-Programmen können sowohl drei-, zwei als auch eindimensionale Modelle erstellt werden. Auch mit MODFLOW kann eine eindimensionale Bodensäule abgebildet werden, so dass auch mit den MODFLOW-Paketen die Bodenbewegung im eindimensionalen Raum berechnet werden kann. Wie oben bereits erwähnt kommen SUB-WT und SUB-CR in Frage. Das Problem der ungesättigten Bodenzonen in tieferen Schichten stellt sich im eindimensionalen Fall nicht, da über Randbedingungen der Grundwasserspiegel vorgegeben werden kann.

Welche Prozesse sind bei der Auswahl einer Methode zu berücksichtigen?

Wegen des langen Simulationszeitraums und der großen Schichtmächtigkeiten wird Kriechen bei den Tonschichten eine Rolle spielen.

Die Grundwasserkomponente eines Programms muss damit umgehen können, dass eine ungesättigte Zone unterhalb einer gesättigten Schicht entsteht. Mit MODFLOW kann dies nur in eindimensionalen Profilen realisiert werden.

Welche Möglichkeit besteht, um den Einfluss des Kriechens zu quantifizieren?

Kriechen (creep) und primäre Konsolidierung sind schwer zu trennen. Beide treten gleichzeitig auf (Kooi et al. 2017). Kriechen kann Setzungen signifikant erhöhen. Allerdings können sowohl Modelle mit als auch Modelle ohne Kriechen gemessene Setzungen mit gleichem Gütegrad wiedergeben, allerdings dann mit jeweils mit unterschiedlicher Belastung aus Vorkonsolidierung (Kooi & Trysa 2017). Der Anfangswert des Over Consolidation Ratio (OCR) für Tonschichten ist bei Berücksichtigung des Kriechens in der Kompressionsberechnung in der Regel deutlich höher als für ein elastoplastisches Kompressionsmodell nach Terzaghi, in dem Kriechen nicht berücksichtigt ist. Wenn bekannt ist, dass keine Vorbelastung erfolgt ist (z. B. durch Gletscher), dann wäre ein OCR-Wert um 1 die Erwartung für beide Modelle, wenn Kriechen keine große Rolle spielt. Wenn Kompressionsmodelle mit und ohne Berücksichtigung des Kriechens die gemessenen Setzungen mit ähnlichen Parameterwerten wiedergeben können, dann kann Kriechen nicht als Prozess isoliert werden, es ist jedoch möglich, dass Kriechen trotzdem stattfindet. Diese Unsicherheit hinsichtlich der mechanischen Prozesse kann für Prognosen ebenfalls relevant sein.

Geotechnische Informationen über die Belastung aus Konsolidierung vor der Grundwasserabsenkung, zum Beispiel aus Laboruntersuchungen zum sekundären Kompressionskoeffizienten, der das Kriechen bestimmt, können Hinweise für die Beurteilung der Rolle des Kriechens liefern. Wenn die historische Vorbelastungen (z. B. durch Gletscher) viel geringer sind als die aus Labormessungen abgeleitete Belastung aus Vorkonsolidierung, dann stünde dies im Widerspruch zu einem Terzaghi-Kompressionsmodell und wäre ein Hinweis darauf, dass Kriechprozesse relevant sind.

#### **D.7 Dr. Peter Vermeulen, Deltares**

Dr. Peter Vermeulen arbeitet bei Deltares als Senior-Grundwassermodellier und ist der leitende Entwickler des Grundwasserströmungsprogramms iMOD, einer Version des Grundwasserströmungsprogramms MODFLOW von Deltares. Der Funktionsumfang von

iMOD bietet mehrere Interpolationsmethoden (Vermeulen et al. 2017). Über das Grundwassermodell IBRAHYM (Vermeulen et al. 2015), das die Rurscholle und Teile der Erftscholle abdeckt, ist er mit den Gegebenheiten des rheinischen Braunkohlenreviers vertraut. Im Folgenden ist eine von Bernhard Becker aufgezeichnete Gesprächsnotiz wiedergegeben.

Mit welchen Interpolationsroutinen haben Sie Erfahrung zur Übertragung von Punktdaten in die Fläche?

Simple Kriging, Ordinary Kriging, lineare Interpolation und bivariate Interpolation. iMOD stellt diese Methoden zur Verfügung, sie werden z. B. zur Interpolation zwischen Bohrdaten verwendet oder zur Interpolation von Durchlässigkeitsbeiwerten.

Welche Methoden können unter welchen Umständen am besten angewendet werden?

Meiner Erfahrung nach liefern die Kriging-Methoden in den meisten Fällen die besten Ergebnisse. Beim Simple Kriging wird kein Trend berücksichtigt, beim Ordinary Kriging wohl. Werden zum Beispiel Durchlässigkeitsbeiwerte interpoliert, dann ist die Annahme eines räumlichen Trends durchaus realistisch, darum kann für diesen Anwendungsfall im Allgemeinen Ordinary Kriging verwendet werden.

Beim Kriging mit iMOD kann der Range-Parameter vorgegeben werden. Er sagt aus, bis zu welcher Entfernung vom Schätzpunkt Stützstellen berücksichtigt werden sollen und beeinflusst maßgeblich das Interpolationsergebnis. Ist der Range-Parameter sehr klein gewählt, entsteht eine „Kraterlandschaft“, da nur wenig benachbarte Stützstellen in die Interpolation einbezogen werden. Für einen gleitenden Übergang sollte der Range-Parameter so groß gewählt werden, dass sich die Einflussbereiche der Stützstellen überlappen. Das Semivariogramm gibt Hinweise zu geeigneten Werten für den Range-Parameter.

Die lineare Interpolation verbindet quasi die Höhenlage zweier Punkte. Wenn dies die Verhältnisse realistisch wieder gibt, kann die lineare Interpolation verwendet werden. Die bivariate Interpolation verwendet ein Polynom anstelle der linearen Funktion.

Wie geht bei der Interpolation man mit Störungen um?

Störungen können durch Einteilung von Zonen berücksichtigt werden. In diesem Fall setzt man die Störungen als Grenzen des Interpolationsraums fest.

Die in iMOD implementierten Kriging-Funktionen erlauben, den Abstand zu bestimmten Punkten virtuell zu vergrößern (Vermeulen et al. 2017, Abschnitt 8.2.10 XYZTOIDF-Funktion), so dass sie außerhalb des Kriging-Parameters Range liegen. So können benachbarte Punkte, die auf der gegenüber liegenden Seite einer Störung liegen, von der Interpolation ausgeschlossen werden.

Was ist bei der Interpolation mit einer geringen Datendichte (wenig Punkte) zu beachten?

Die Punkte sollten so verteilt sein, dass ein ausgeglichenes Verhältnis zwischen Punkten, für die eine Bodenbewegung erwartet wird, und Punkten, für die keine Bodenbewegung erwartet wird, vorliegt. Wenn nur Punkte mit Bodenbewegung in die Interpolation einfließen, dann wird für den gesamten Interpolationsraum auch eine Bodenbewegung ausgegeben.

Kriging-Methoden geben als Zusatzinformation die Varianz für jeden Interpolationspunkt aus. Die Varianz ist ein Maß für die Unsicherheit des Interpolationsergebnisses.

Zur Einschätzung der Interpolationsgüte können mehrere Interpolationen mit unterschiedlicher Datengrundlage ausgeführt werden: In jeder Interpolation werden schrittweise Punkte hinzugefügt. Ändert sich das Interpolationsergebnis zwischen den einzelnen Schritten nur unwesentlich, ist die Datengrundlage besser, als wenn zugefügte Punkte das Interpolationsergebnis wesentlich verändern.

Es bietet sich an, mehrere Interpolationsroutinen auszuprobieren und die Ergebnisse zu vergleichen. Bei der Beurteilung der Ergebnisse sollte Fachkenntnis einfließen.

Bei einer dünnen Datengrundlage sollte geprüft werden, ob andere Datenquellen hinzu gezogen werden können, zum Beispiel Punkte aus anderen Studien (statistische Bodenbewegungsprognose) oder Punkte, für die keine Bodenbewegung erwartet wird als randliche Nullwerte (siehe oben).

#### **D.8 Prof. Christian Wolkersdorfer, Wolkersdorfer, Tshwane University of Technology**

Prof. Christian Wolkersdorfer ist Professor an der Tshwane University of Technology (TUT) in Pretoria, Südafrika, und Inhaber des South African Research Chair for Mine Water Management. Er war an einer Studie zur Setzungsberechnung im Lausitzer Braunkohlenrevier beteiligt (Wolkersdorfer & Thiem 1998). Im Folgenden ist ein Auszug aus einem Brief von Prof Dr Christian Wolkersdorfer an Dr. Christoph Weidner mit Betreff „Expertenbefragung Bodenbewegungsprognose“ vom 09.03.2018 wiedergegeben. Einige Anmerkungen sind in eckigen Klammern hinzugefügt.

1. Was sind die wesentlichen Aspekte Ihrer Methode zur Berechnung der Bodenbewegung?

Wir haben keine „Bodenbewegungen“ untersucht, sondern Setzungen. Dazu habe ich zur Vereinfachung ausschließlich die Grundlagen von Terzaghis Konsolidierungstheorie [gemeint ist vermutlich Kompressionstheorie] verwendet. Zeitliche Aspekte der Bodenbewegung fanden keine Berücksichtigung, da zu diesem Zeitpunkt folgendes galt: „Most models cannot handle soil parameters varying over time or within the sediments.“ (Wolkersdorfer & Thiem 1999, S. 86). Um den Absenkungstrichter um den Tagebau herum zu modellieren, habe ich die Methode von Rom (1939) verwendet.

2. Im rheinischen Braunkohlenrevier, und da insbesondere im Bereich der Erftscholle, wird die Konsolidierung der Tonschichten als besonders wichtiger Prozess eingestuft; wie würden Sie die Bedeutung der Konsolidierung im Lausitzer und Mitteldeutschen Braunkohlenrevier einschätzen?

Das sehe ich genauso. Da das Steifemodul  $E_v$  der Tone kleiner ( $4 - 10 \text{ MN/m}^2$ ) ist als z. B. das der Sande ( $60 - 150 \text{ MN/m}^2$ ), wird deren Konsolidierung im Lausitzer und Mitteldeutschen Braunkohlenrevier ebenfalls von Bedeutung sein. Das haben unsere Berechnungen auch deutlich gezeigt.

3. In der Literatur sind neben der Ihren weitere Methoden zur Berechnung der Bodenbewegung veröffentlicht, die zum Teil auch als Computerprogramme vorliegen, z. B. verschiedene Packages für MODFLOW, aber auch Finite-Elemente-Programme wie PLAXIS – Welche Methode(n) wäre(n) aus Ihrer Sicht geeignet, um Bodenbewegungsprognosen für das rheinische Braunkohlenrevier durchzuführen, mit Blick auf die folgenden Besonderheiten?

- Die Grundwasserabsenkung im Zusammenhang mit Braunkohlenabbau ist mit mehreren hundert Metern und bis zu 1000 Metern vergleichsweise groß.

- Das Einzugsgebiet der Sumpfungmaßnahmen ist mit ca. 3500 km<sup>2</sup> vergleichsweise groß.
- Schichten von großer Mächtigkeit fallen durch die Sumpfungmaßnahmen vollständig trocken.
- Nicht nur Setzungen, sondern auch Hebungen werden erwartet oder sind bereits aufgetreten. Die Grundwasserspiegelabsenkung hat im Großen und Ganzen ihr Maximum erreicht oder bereits durchlaufen. Entsprechend ist auch ein Großteil der Setzungen bereits eingetreten.
- Der Schichtaufbau mit einer Wechselfolge von zum Teil mehr als 20 gering und gut durchlässigen Schichten ist relativ komplex.
- Die Grundwasserabsenkung erstreckt sich über vier geologisch-tektonische Einheiten (Schollen), die über Schollenrandstörungen hydraulisch miteinander im Austausch stehen.

Welche Software Sie verwenden wollen, hängt in erster Linie von Ihrer Fragestellung ab und welche Datengrundlage Sie haben. Es ist wenig zielführend, ein aufwändiges FE- oder FD-Programm einzusetzen, wenn keine ausreichende Datengrundlage vorhanden ist. Ich selbst würde auf jeden Fall FLAC oder FLAC-3D einsetzen wollen und für simplere Fälle FLACSLOPE

([www.itascacg.com/software/flac](http://www.itascacg.com/software/flac), [www.itascacg.com/software/flac3d](http://www.itascacg.com/software/flac3d), [www.itascacg.com/software/flacslope](http://www.itascacg.com/software/flacslope)). Siehe dazu auch Diskussion in Sassa et al. (2007, S. 280ff). MODFLOW halte ich für weniger geeignet, da die Software ursprünglich für Grundwasserfluss erstellt wurde und nicht speziell für Setzungen oder Fließen.

[...]

5. Zurzeit werden für das rheinische Braunkohlenrevier Bodenbewegungsprognosen für Bodenprofile an einzelnen Punkten berechnet (Methode nach Ziegler und Aulbach) – mit welchen Methoden könnte man aus diesen Punktinformationen eine flächenhafte Information der Bodenbewegung ableiten? Gibt es Erfahrungen aus Ihrer Studie zur Übertragung der Punktinformationen in die Fläche? Welche Punktdichte wäre mindestens erforderlich? Wie geht man am besten mit tektonischen Störungen um?

Wir hatten sogar weniger als punkthafte Beobachtungen, sondern nur vereinfachte Profile unter dem Gebäudekomplex. Lassen Sie mich aber Ihre Frage beantworten: Mit geostatistischen Methoden (siehe z.B. Piotrowski et al. 1997) und Fuzzy Logic (habe ich bei einem Projekt in Görlitz verwendet), können Sie mit wenigen punktuellen Beobachtungen gute Ergebnisse erzielen und regionalisieren. Dies ist eine allgemein akzeptierte Methode. Wichtig: führen Sie Ihr Kriging (Krige 1951) erst durch, nachdem Sie ein Variogramm erstellt haben (siehe z.B. Assari & Mohammadi 2017; Smith & Williams 1996). Um den tektonischen Elementen Rechnung zu tragen, würde ich das Gebiet in Provenancen einteilen, die jeweils von Ihren tektonischen Elementen begrenzt werden. Dann Variogramm und Kriging für jede Provenance einzeln und am Ende wieder zu einer einzigen Prognose zusammensetzen.

Haben Sie noch weitere Hinweise für uns, z. B. Literatur? Wenn ja, welche?

Siehe beigefügte längere Literaturliste, die wir als Grundlage für den Bericht und den Artikel verwendet hatten.

7. Hydraulische Durchlässigkeit und der Speicherkoeffizient sind spannungsabhängig. Ist dieser Effekt in Ihrer Studie berücksichtigt oder untersucht worden? Wenn ja, wie groß ist dieser Effekt wie groß sind die Auswirkungen auf den Grundwasserhaushalt?

Wir haben diese Parameter über die Porosität bedingt berücksichtigt. Zur Vereinfachung haben wir jedoch auf eine detaillierte Diskussion verzichtet. Es ging im Wesentlichen um die Frage, welche maximalen Setzungen zu erwarten wären, sobald der Tagebau nach N fortschreitet. In diesem Fall würde es zu einer weitgehend vollständigen Entwässerung des „Bodens“ führen. Dies war Bearbeitungsziel.

8. In Ihrem Paper stellen sie eine neu entwickelte Berechnungsmethode vor – wären für die Untersuchung auch Finite-Elemente-Programme wie PLAXIS oder Abaqus in Frage gekommen? Was waren die Beweggründe für die Eigenentwicklung?

Wir haben keine „neue“ Methode verwendet, sondern die analytische Lösung in MS Excel für jede einzelne Schicht verwendet, indem wir die Methode von Routschek (1968) ansetzten. Gründe dafür, kein FE oder FD-Programm verwendet zu haben war das Fehlen ausreichender Daten. Ohne hinreichende Datengrundlage ist es wenig zielführend, FE oder FD zu verwenden. Daher haben wir auf eine vollständig analytische Lösung gesetzt, über die wir innerhalb der vorgegebenen Parameter völlige Kontrolle hatten. Wir hatten geprüft, FLAC zu verwenden, das schon damals führende Programm für diese Art von Fragestellung, konnten dies aber innerhalb des Projekts nicht finanzieren.

## E Bewertungsmatrix zur Bewertung von Methoden

Tabelle E.1 Bewertungsmatrix für Mindestanforderungen und Bewertungskriterien

Bewertungsmatrix für Methoden zur Prognose von Bodenbewegungen - <b>Mindestanforderungen und Bewertungskriterien</b>	Kriterium	Faktor	Handbuchformeln	1D-Bodenprofile		MODFLOW					FEFLOW-Modul	FE-Methoden		Maximale Punktzahl	
			Fenk & Tzscharschuch	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)
Aussagegenauigkeit / Prozesse und Geologie															
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	0	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
Umsetzbarkeit im Anwendungsfall "Rheinisches Braunkohlenrevier"															
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	2
Modellkomplexität / Aufwand der Parameterschätzung (Verfügbarkeit und Anzahl erforderlicher Parameter)	B*	1	2	2	2	1	1	1	1	2	1	0	2	2	2
Programmtechnische Aspekte															
Vertikale Auflösung für Konsolidierung (Grundwasserhydraulik)	B*	0.5	0	2	2	0	0	0	2	1	0	0	0	1	2
Rechenzeitbedarf	B*	0.5	2	2	2	1	1	1	1	2	1	0	2	2	2
Entwicklungsstadium	B*	0.5	0	2	2	2	2	2	1	1	1	1	2	2	2
Verfügbarkeit	B*	0.5	2	0	1	2	2	2	0	0	0	2	1	1	2
Mindestanforderungen erfüllt?															
GESAMTBEWERTUNG			NEIN	JA	JA	JA	JA	JA	JA	JA	JA	NEIN	JA	JA	JA
Rang			7	21	18.5	13.5	13.5	16.5	13	19	15	16	15.5	20	23
N: Neutralkriterium			12	1	4	9	9	5	11	3	8	6	7	2	
M: Mintesanforderung															
B: Bewertungskriterium															

Tabelle E.2 Bewertungsmatrix für Neutralkriterien

Auflistung neutraler Charakteristika der Methoden zur Prognose von Bodenbewegungen - Neutralkriterien	Kriterium	Handbuchformeln	1D-Bodenprofile		MODFLOW						FEFLOW-Modul	FE-Methoden	
		Fenk & Tzscharschuch	Ziegler und Aulbach, 2016	D-Settlement	IBS (USGS)	SUB-WT (USGS)	SUB	IDP	SUB-CR (Deltares) 1D	SUB-CR (Deltares)	Rühaak et al., 2014	PLAXIS (3D)	PLAXIS (1D)
Bodenmodelle													
Elastisches Dehnungsverhalten nach Hooke	N*	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓		
logarithmisches Stoffgesetz nach Terzaghi	N*	✗	✓	✓	✗	✓	✗	✗	✓	✓	✗		
Bjerrum	N*	✗	✗	✓	✗	✗	✗	✗	✓	✓	✗		
Buisman-Koppejan	N*	✗	✗	✓	✗	✗	✗	✗			✗		
abc-Isotachen	N*	✗	✗	✓	✗	✗	✗	✗	✓	✓	✗		
Stoffgesetz													
linear-elastisch	N*										✓	✓	✓
Mohr-Coulomb	N*										✗	✓	✓
Softsoil-Creep	N*										✗	✓	✓
Cam-Clay	N*										✗	✓	✓
Programmtechnische Aspekte													
Dimensionalität	N*	0D	1D	1D, 2D	3D	3D	3D	3D	1D	3D	3D	3D	1D, 2D
Bedienungsweise	N*	C	X	G	T	T	T	T	T	T	T	G	G
Kopplung mit Grundwassermodell integriert	N*	-	✗	✗	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✗
Ermittlung von Parametersensitivitäten integriert	N*		✓	✓	✗	✗	✗	✗	✗	✗	✗	✓	✓
Automatische Kalibrierung integriert	N*			✓	✗	✗	✗	✗	✗	✗	✗	✓	✓
Leistungen													
Qualitätssicherung für Code (automatische Testbank, regelmäßige Releases)	N*	o	o	✓	✓	✓	✓	✗	✗	✗	o	✓	✓
Wissenschaftliche Qualitätssicherung	N*	✗	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Support- und Wartungsvertrag möglich	N*			✓	✗	✗	✗	✗				✓	✓

Erläuterungen:

Dimensionalität: 3D: dreidimensionales Modell (raumfüllend); 2D: zweidimensionale Profilschnitte (Linien an Geländeoberfläche); 1D: eindimensionales Bodenprofil (Einzelpunkte an Geländeoberkante); 0D: nur für eine homogene Bodenschicht (Neutralkriterium)

Bedienungsweise: G: graphische Benutzeroberfläche (GUI); X: Strukturierte Datei (z. B. XLS oder XML); T: Textdateien, Batch-Command; C: Code (z. B. Matlab)

Kopplung mit Grundwassermodell integriert: ✓: Grundwasserströmungsgleichungen integriert; ✗: Vorgabe von Zeitreihen des Grundwasserstands; -: keine Kopplung

Qualitätssicherung für Code: ✓: ja (regelmäßige Releases, Testbank) ✗: nein (keine Qualitätssicherung), o: nicht relevant

andere Zeilen: ✓: ja, ✗: nein.