

Bericht
zum
Methodenvergleich
Bodenbewegungsprognose

V2.01

Vergabestelle: LANUV Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz
Nordrhein-Westfalen

Vergabenummer: 18480/52/ÖA

Projektleitung: Dr. Sabine Bergmann

Projektbearbeitung: Anke Boockmeyer

Auftragnehmer: ZAI Ziegler und Aulbach Ingenieurgesellschaft mbH

Projektleitung: Dr.-Ing. Benjamin Aulbach
Univ.-Prof. Dr.-Ing. Martin Ziegler

Projektbearbeitung: Prof. Dr. techn. Ansgar Kirsch
Lukas Nickisch, M.Sc.
Maximilian Schröder, B.Sc.

Umfang: 68 Seiten Text
2 Seiten Anhang

Datum: 24. September 2019

Kurzzusammenfassung

Für die Gewinnung der Braunkohle im Rheinischen Braunkohlenrevier im offenen Tagebau wird der Grundwasserspiegel großräumig abgesenkt und es kommt zu Setzungen, die in Abhängigkeit der geologischen Schichtung sowie des Ausmaßes und des zeitlichen Ablaufs auch zeitverzögert stattfinden können. Bei Grundwasserwiederanstieg nach Tagebauende und Ende der Sümpfung kommt es zu Bodenhebungen. Dabei kann nicht vollständig ausgeschlossen werden, dass in Gebieten mit ehemals geringem Flurabstand und gleichzeitig größeren Geländesenkungen Bereiche mit Geländevernässungen entstehen. Für die Ermittlung zukünftiger Grundwasserflurabstände nach Grundwasserwiederanstieg ist es deshalb notwendig, die Entwicklung von Senkungen und Hebungen der Geländeoberkante zu quantifizieren.

Dazu wurde im Auftrag des Landesamtes für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz Nordrhein-Westfalen (nachfolgend LANUV) im Zeitraum 2017/2019 das Projekt „Berechnung und Prognose von Bodenbewegungen mit Sensitivitätsanalyse im Rheinischen Braunkohlerevier“ durch die ZAI Ziegler und Aulbach Ingenieurgesellschaft mbH (nachfolgend ZAI) durchgeführt. Im Rahmen des Projekts wurden basierend auf einem bereits von ZAI entwickelten und in der Praxis bewährten Prognosemodell nach Ziegler und Aulbach die Setzungen und Hebungen an zahlreichen Leitnivelement-Punkten (nachfolgend: „Punkte“) prognostiziert. Das Modell berücksichtigt alle als relevant eingestuften bodenmechanischen Prozesse und die erhaltenen Ergebnisse zeigen eine sehr gute Übereinstimmung zwischen nachgerechnetem und tatsächlich gemessenem Verlauf der Bodenbewegungen.

Um parallel zu prüfen, welche Methoden und Modelle grundsätzlich verfügbar und potenziell geeignet sind, und ob zusätzlich zu den bislang berücksichtigten Prozessen noch weitere Aspekte relevant sein könnten, wurde im Auftrag des LANUV im Zeitraum 2017/2018 eine Literatur- und Methodenrecherche durch Deltares durchgeführt (LANUV-Fachbericht 88). Als Ergebnis dieser Recherche wurden neben der ZAI-Methode drei weitere methodische Ansätze bzw. Computerprogramme identifiziert, die grundsätzlich zur Prognose von sumpfungsbedingten Bodenbewegungen im Rheinischen Revier geeignet sein könnten: Plaxis, D-Settlement und Modflow/SUB-WT. Darüber hinaus sollen diese drei Methoden in der Lage sein, weitere bodenmechanische Prozesse wie Bodenkriechen und eine hydraulisch-mechanische Kopplung abzubilden.

Daraufhin wurden im Rahmen des hier beschriebenen Projektes „Methodenvergleich Bodenbewegungsprognose“ die Eignung dieser drei weiteren Ansätze (Plaxis, D-Settlement und Modflow/SUB-WT) und die Relevanz der bislang vernachlässigten Prozesse (Bodenkriechen; hydraulisch-mechanische Kopplung) überprüft. Dazu wurden Vergleichsrechnungen durchgeführt und die Ergebnisse untereinander sowie mit den Prognoseergebnissen der bisher angewandten Methode nach Ziegler und Aulbach verglichen.

Die Studie zeigt, dass das Programm Plaxis für die Berechnung und Prognose der Bodenbewegungen im Rheinischen Braunkohlerevier aufgrund programminterner Restriktionen und den damit verbundenen teilweise nicht zufriedenstellenden Berechnungsergebnissen nur als bedingt geeignet einzustufen ist.

D-Settlement ist aufgrund programminterner Restriktionen und den damit verbundenen nicht zufriedenstellenden Berechnungsergebnissen als ungeeignet einzustufen.

Hingegen ist Modflow/SUB-WT für die Berechnung und Prognose der Bodenbewegungen im Rheinischen Braunkohlerevier aus Anwender-Sicht zwar als umständlich, im Hinblick auf die erhaltenen Ergebnisse aber als geeignet einzustufen.

Darüber hinaus bestätigen die Vergleichsrechnungen die schon aufgrund der Randbedingungen im Rheinischen Braunkohlerevier anzunehmende These, dass die Berücksichtigung von Kriechen nicht erforderlich ist.

Weiter ist auch die Berücksichtigung einer hydraulisch-mechanischen Kopplung im Rheinischen Braunkohlerevier nicht erforderlich, da sich diese nur marginal auswirkt und zu keiner Verbesserung der Nachrechnung oder Prognose führt.

Schließlich gilt es festzuhalten, dass sowohl mit Modflow/SUB-WT als auch mit der Methode nach ZIEGLER & AULBACH eine sehr gute Abbildung der gemessenen Bodenbewegungen im Rheinischen Braunkohlerevier möglich ist, auch wenn bei der Berechnung mit Modflow/SUB-WT Eingangsparameter nahe an der Grenze des theoretisch möglichen Wertebereiches gewählt werden mussten.

Bereits im Rahmen der Literaturrecherche von Deltares wurde die „Methode nach Ziegler und Aulbach als sehr gut geeignet ...“ und „zudem auch im Vergleich zu anderen Methoden als am besten geeignet...“ eingestuft. Durch die nunmehr mit Modflow/SUB-WT erhaltenen ebenfalls sehr guten Nachrechnungsergebnisse und die geringen Unterschiede in der Prognose bis 2200 wurden die bisherigen Ergebnisse und die Zweckmäßigkeit der Anwendung der Methode nach ZIEGLER & AULBACH nochmals bestätigt.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung.....	2
2	Ergebnis „Berechnung und Prognose von Bodenbewegungen mit Sensitivitätsanalyse im Rheinischen Braunkohlerevier“ [1].....	3
3	Ergebnis „Methodenrecherche Bodenbewegungsprognose für das Rheinische Braunkohlerevier“ [2].....	5
4	Aufgabenstellung und Vorgehen „Methodenvergleich Bodenbewegungsprognose“.....	6
5	Methodenvergleich	7
5.1	Plaxis	8
5.1.1	Grundlagen	8
5.1.2	Niedermerz	11
5.1.3	Ahe	15
5.2	D-Settlement	20
5.2.1	Grundlagen	20
5.2.2	Niedermerz	21
5.2.3	Ahe	25
5.2.4	Automatische Kalibrierung	29
5.3	Modflow.....	34
5.3.1	Grundlagen	34
5.3.2	Niedermerz	35
5.3.3	Ahe	39
5.4	Gegenüberstellung.....	43
5.4.1	Niedermerz	43
5.4.2	Ahe	45
6	Kriechen und hydraulisch-mechanische Kopplung.....	47
6.1	Plaxis	47
6.1.1	Kriechen.....	47
6.1.2	Hydraulisch-mechanische Kopplung	51
6.2	D-Settlement	54
6.2.1	Kriechen.....	54
6.2.2	Mechanisch-hydraulische Kopplung	57
6.3	Modflow.....	60
6.4	Gegenüberstellung.....	61
6.4.1	Kriechen.....	61
6.4.2	Hydraulisch-mechanische Kopplung	63
7	Bewertung	65
7.1	Plaxis	65
7.2	D-Settlement	65
7.3	Modflow/SUB-WT.....	66
7.4	Kriechen.....	66
7.5	Hydraulisch-mechanische Kopplung	66
8	Fazit und Empfehlungen.....	67
9	Literatur	68

1 Einleitung

Für die Gewinnung der Braunkohle im Rheinischen Braunkohlenrevier im offenen Tagebau wird der Grundwasserspiegel großräumig abgesenkt und es kommt zu Setzungen, die in Abhängigkeit der geologischen Schichtung sowie des Ausmaßes und des zeitlichen Ablaufs auch zeitverzögert stattfinden können. Bei Grundwasserwiederanstieg nach Tagebauende und Ende der Sümpfung kommt es zu Bodenhebungen. Dabei kann nicht vollständig ausgeschlossen werden, dass in Gebieten mit ehemals geringem Flurabstand und gleichzeitig größeren Geländesenkungen Bereiche mit Geländevernässungen entstehen. Für die Ermittlung zukünftiger Grundwasserflurabstände nach Grundwasserwiederanstieg ist es deshalb notwendig, die Entwicklung von Senkungen und Hebungen der Geländeoberkante zu quantifizieren.

Dazu wurde im Auftrag des Landesamtes für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz Nordrhein-Westfalen (nachfolgend LANUV) im Zeitraum 2017/2019 das Projekt „Berechnung und Prognose von Bodenbewegungen mit Sensitivitätsanalyse im Rheinischen Braunkohlerevier“ [1] durch die ZAI Ziegler und Aulbach Ingenieurgesellschaft mbH (nachfolgend ZAI) durchgeführt. Im Rahmen des Projekts wurden basierend auf einem bereits von ZAI entwickelten und in der Praxis bewährten Prognosemodell nach Ziegler und Aulbach die Setzungen und Hebungen an zahlreichen Punkten prognostiziert. Das Modell berücksichtigt alle als relevant eingestuft bodenmechanische Prozesse und die erhaltenen Ergebnisse zeigen eine sehr gute Übereinstimmung zwischen nachgerechnetem und tatsächlich gemessenem Verlauf der Bodenbewegungen (vgl. Abschnitt 2).

Um parallel zu prüfen, welche Methoden und Modelle grundsätzlich verfügbar und potenziell geeignet sind, und ob zusätzlich zu den bislang berücksichtigten Prozessen noch weitere Aspekte relevant sein könnten, wurde im Auftrag des LANUV im Zeitraum 2017/2018 eine Literatur- und Methodenrecherche [2] durch Deltares durchgeführt. Als Ergebnis dieser Recherche wurden drei weitere methodische Ansätze bzw. Computerprogramme identifiziert, die grundsätzlich zur Prognose von sumpfungsbedingten Bodenbewegungen im Rheinischen Revier geeignet sein könnten. Darüber hinaus sollen diese drei Methoden in der Lage sein, weitere bodenmechanische Prozesse wie Bodenkriechen und eine hydraulisch-mechanische Kopplung abzubilden (vgl. Abschnitt 3).

Daraufhin wurde zur Überprüfung der Eignung dieser drei weiteren Ansätze und der Relevanz des Bodenkriechens sowie der hydraulisch-mechanischen Kopplung vom LANUV ein entsprechendes Gutachten ausgeschrieben und ZAI unter der Vergabenummer 18480/52/ÖA mit der Durchführung des Projektes „Methodenvergleich Bodenbewegungsprognose“ beauftragt (Abschnitt 4).

Im Rahmen des hier beschriebenen Methodenvergleichs waren an zwei exemplarischen Leitnivelementpunkten im Rheinischen Braunkohlenrevier mithilfe der drei Computerprogramme Prognosen zu berechnen und untereinander sowie mit den Prognoseergebnissen der bisher angewandten Methode nach Ziegler und Aulbach zu vergleichen (Abschnitt 5)

In einem weiteren Schritt war auch der Einfluss der beiden zusätzlichen Prozesse Bodenkriechen und hydraulisch-mechanische Kopplung zu untersuchen (Abschnitt 6).

2 Ergebnis „Berechnung und Prognose von Bodenbewegungen mit Sensitivitätsanalyse im Rheinischen Braunkohlerevier“ [1]

Mit vom LANUV zur Verfügung gestellten Eingangsdaten zur Geologie und zu den Grundwasserverhältnissen wurde ein seitens ZAI auf Basis allgemein gültiger bodenmechanischer Zusammenhänge aufgestelltes Bodenbewegungsmodell zunächst für den Punkt Niedermerz anhand von gemessenen Bodenbewegungen kalibriert. Mit den so das Bodenbewegungsmodell ein geflossenen Daten lässt sich das gemessene Verhalten sehr gut abbilden und damit auch weiter für die Zukunft prognostizieren.

Weiter hat die Sensitivitätsstudie am Punkt Niedermerz gezeigt, dass die meisten Eingangsparameter auf Basis der bisherigen Setzungen und Hebungen im Nachrechnungszeitraum bereits sehr gut kalibriert sind und sich daraus nur eine geringe Streuweite hinsichtlich der Prognose ergibt. Lediglich aus den Hebungs Faktoren und insbesondere dem Hebungs faktor für die bindigen Schichten können noch etwas größere Streuweiten resultieren. Dies begründet sich damit, dass Hebungen der bindigen Schichten aufgrund des zeitverzögerten Verhaltens bis heute noch gar nicht oder nur in sehr geringem Maß aufgetreten sind und der „Hebungs faktor bindig“ daher bisher zwangsläufig noch mit Unschärfen behaftet ist.

Außerdem hat die Variation der Eingangsdaten (Geologie, Grundwasser) gezeigt, dass übliche Ungenauigkeiten in den Eingangsdaten wie z.B. bei den Schichtmächtigkeiten oder den Absenkungsmaxima durch die Kalibrierung ausgeglichen werden können. Weiter hat die Neuberechnung für einen bereits früher betrachteten Höhenfestpunkt mit etwas abweichenden Eingangsdaten vom LANUV auch gezeigt, dass die dabei möglichen Unterschiede bis 2100 relativ gering sind. Allerdings ergeben sich darüber hinaus Auswirkungen auf die Prognose bis 2200.

Die Kalibrierung des Punktes Niedermerz ohne die Berücksichtigung bereits gemessener Hebungen hat außerdem gezeigt, dass bei unzutreffend gewählten Hebungs Faktoren mit dem Beginn der Hebungen unmittelbar Abweichungen vom tatsächlich gemessenen Verhalten auftreten. Dies eröffnet dann aber auch die Möglichkeit, die Eingangsparameter unmittelbar nachzukalibrieren und die Prognose frühzeitig und stetig zu verbessern. Sofern die Hebungs Faktoren im Zuge der Kalibrierung auf Basis bisheriger Erfahrungswerte bereits in der richtigen Größenordnung gewählt wurden, treten Abweichungen zwischen Prognose und tatsächlich gemessenem Verhalten hingegen erst allmählich auf. Dennoch wird die Prognose aufgrund des bereits in der richtigen Größenordnung gewählten Hebungs Faktors für den Endzeitpunkt relativ zutreffend sein.

Basierend auf den vorliegenden Untersuchungen und den daraus gewonnenen Erkenntnissen wurden schließlich für 12 weitere Punkte mit dem Modell nach Ziegler und Aulbach Bodenbewegungsprognosen aufgestellt. Dabei hat sich gezeigt, dass das bis dato gemessene Verhalten generell sehr gut abgebildet werden kann und somit die Grundvoraussetzung für realistische Prognosen gegeben ist.

Zur Abschätzung aktuell noch vorhandener Unsicherheiten in den Prognosen wurde schließlich eine Variation der Hebungsfaktoren für die 13 im Rahmen dieses Vorhabens betrachteten sowie für 22 weitere im Rahmen eines früheren Projektes betrachteten Punkte vorgenommen. Dabei wurden sowohl theoretisch mögliche Grenzen als auch auf Basis der bisherigen Erkenntnisse als wahrscheinlich anzusehende Grenzen betrachtet. Je nach Geologie und Grundwasserentwicklung ergeben sich daraus unterschiedliche Streuweiten. Dabei ist aber bereits heute an mehreren Punkten festzustellen, dass die theoretisch möglichen Grenzen als zu weit gefasst angesehen werden können und sich das tatsächliche Verhalten innerhalb der i.d.R. deutlich engeren wahrscheinlichen Grenzen bewegen wird. Die wahrscheinliche Streuweite schwankt an den meisten Punkten zwischen ± 10 cm und ± 50 cm, liegt jedoch im Minimum bei ± 2 cm und im Maximum bei ± 120 cm. Aber auch bei den Punkten mit den absolut größten Streuweiten liegt die wahrscheinliche Streuweite in Relation zu den dort maximal zu erwartenden Bodenbewegungen bzw. Setzungen immer noch unter 20%.

Abschließend lässt sich festhalten, dass die Prozesse der Bodenbewegungen im Rheinischen Braunkohlerevier mit dem Modell nach Ziegler und Aulbach grundsätzlich sehr gut abgebildet werden können. Die aus den bis dato nur mäßig kalibrierbaren Hebungen resultierenden Prognoseunsicherheiten müssen jedoch in der Folgezeit durch die Berücksichtigung der Ergebnisse eines geeigneten Bodenbewegungsmonitorings weiter verringert werden, indem durch fortlaufende Messungen und einer darauf basierenden Nachkalibrierung sowie erforderlichenfalls Modellanpassung in regelmäßigen Abständen die Prognosen stetig verbessert werden. Die Notwendigkeit der Nachkalibrierung des Hebungsverhaltens bestünde aufgrund der bis dato kaum eingetretenen Hebungen aber methodenunabhängig auch bei jedem anderen Verfahren.

Das Modell nach Ziegler und Aulbach ist so aufgebaut, dass Modellanpassungen und –erweiterungen durch ZAI generell möglich sind. Damit könnten z.B. in der Zukunft neu gewonnene Erkenntnisse zum Hebungsverhalten oder auch weitere Einflüsse aus dem Steinkohlebergbau berücksichtigt werden. Weiter kann im Rahmen regelmäßiger Nachkalibrierungen aber auch ohne zusätzliche Modellanpassungen jederzeit auf sich möglicherweise ergebende neue Randbedingungen – z.B. abweichende Grundwasserganglinien infolge geänderter Tagebaubetriebspläne – reagiert und die Prognose angepasst werden.

Damit können in einem nächsten Schritt weitere über das gesamte Rheinische Braunkohlerevier verteilte Punkte betrachtet bzw. berechnet werden.

3 Ergebnis „Methodenrecherche Bodenbewegungsprognose für das Rheinische Braunkohlerevier“ [2]

Im Rahmen der von Deltares durchgeführten Methodenrecherche wurden insgesamt 29 Fallbeispiele und etwa zwölf verschiedene Methoden zur Berechnung von Bodenbewegungen identifiziert. In den meisten Fallbeispielen sind die beobachteten Setzungen allerdings auf Grundwasserentnahmen zur Wasserversorgung zurückzuführen und nur in wenigen Quellen wurde auch 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.“* [2]

Die v.g. Methodenrecherche kommt dann *„in der Gesamtbetrachtung aller vorgefundenen Methoden“* zu dem Schluss, *„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...“*. [2]

Allerdings wird gemäß Abschlussbericht [2] zusätzlich zu den bei Ziegler und Aulbach berücksichtigten Prozessen eine Relevanz des Kriechprozesses vermutet und *„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.“* *„Es empfiehlt sich daher, mögliche Vergleichsrechnungen zur Abschätzung der Relevanz von Bodenkriechen ... durchzuführen.“*

Weiter wird gemäß Abschlussbericht [2] vermutet, dass auch *„mit einer Bodenbewegung einhergehende Änderungen der Höhenlage und Änderungen der hydraulischen Parameter“* relevant sein könnten, weshalb empfohlen wird, auch *„diese Effekte im Hinblick auf die Zielsetzung einer Vorhersage der Flurabstände hinsichtlich ihrer Relevanz zu untersuchen, zu beurteilen und ggf. zu quantifizieren.“*

„Um die weiteren“ im Abschlussbericht [2] enthaltenen *„Untersuchungsempfehlungen ... 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.“* Dazu kommen insbesondere folgende Programme bzw. Lösungen in Frage:

- Plaxis (1D),
- D-Settlement,
- Modflow (mit SUB).

Dabei ist *„eine eindimensionale Formulierung der Bodenbewegung in vertikale Richtung ... ausreichend, sodass der Mehraufwand einer dreidimensionalen Modellierung der Bodenbewegung vor allem auch vor dem Hintergrund der zusätzlichen Unsicherheiten nicht gerechtfertigt erscheint.“* [2]

4 Aufgabenstellung und Vorgehen „Methodenvergleich Bodenbewegungsprognose“

Basierend auf den Ergebnissen der vorherigen Untersuchungen (vgl. Abschnitt 2 und 3) erfolgte dann die Ausschreibung und Vergabe des Projektes „Methodenvergleich Bodenbewegungsprognose“ mit dem Ziel,

1. Bodenbewegungsprognosen an zwei exemplarischen Leitnivelementpunkten im Rheinischen Braunkohlenrevier mithilfe der drei vorgenannten Modellprogramme zu berechnen und mit den Ergebnissen der bisher angewandten Methode zu vergleichen

sowie

2. den möglicherweise zusätzlichen Einfluss der beiden erwähnten Prozesse (Bodenkriechen, hydraulisch-mechanische Koppelung) im Vergleich zum Einfluss der bisher bereits berücksichtigten Prozesse (elastoplastische Verformung und Konsolidierung mit Durchströmungsdruck) in geologischen Schichtenprofilen (bis zu 1000 m Gesamtmächtigkeit) mit hohen und geringen Anteilen bindiger Bodenschichten zu quantifizieren und zu bewerten.

Für den Vergleich der Modellprogramme wurden vom LANUV die Punkte Niedermerz und Ahe vorgegeben und für diese durch ZAI mit jeder Softwarelösung eine Nachrechnung und Kalibrierung durchgeführt sowie darauf basierend jeweils eine Prognose erstellt. Mit dem Programm D-Settlement wurde außerdem eine automatische Kalibrierung durchgeführt.

Die programmspezifischen Grundlagen und sämtliche Ergebnisse der drei Softwarelösungen sind in den nachfolgenden Abschnitten 5.1 bis 5.3 dargestellt. Weiter werden die mit allen drei Softwarelösungen erhaltenen und mit der Methode nach ZAI bereits vorhandenen Ergebnisse dann in Abschnitt 5.4 gegenübergestellt.

Zur Untersuchung der Einflüsse aus Kriechen und hydraulisch-mechanischer Kopplung wurden schließlich weitere Vergleichsrechnungen ebenfalls für die beiden Punkte Niedermerz und Ahe durchgeführt. Die Ergebnisse inklusive Gegenüberstellung werden in den Abschnitten 6.1 bis 6.4 dargestellt.

Als Kriechsetzungen werden dabei diejenigen Setzungen bezeichnet, die bei kontinuierlicher Belastung bindiger Böden nach dem Abklingen der Konsolidationssetzungen zusätzlich noch auftreten können.

Als hydraulisch-mechanische Kopplung wird das Phänomen bezeichnet, dass sich infolge der Eigensetzung von Böden dessen Porenraum verringert und damit (in geringem Umfang) auch seine Durchlässigkeit reduziert werden kann.

5.1 Plaxis

Im Finite-Element-Programm Plaxis werden die grundlegenden Bestimmungsgleichungen für die Potentialströmung des Grundwassers sowie für die mechanischen Verformungen des Bodens numerisch gelöst.

Das gegebene Randwertproblem wird dazu zunächst mit Kontinuumselementen begrenzter Abmessungen diskretisiert, denen für die Lösung der Bestimmungsgleichungen erforderliche Materialeigenschaften zugewiesen werden. Für die Prognose der Verformungen des Bodens werden – je nach gewähltem Materialmodell – entsprechende Steifigkeitsparameter benötigt. Für die Strömungsberechnungen sind v.a. die hydraulischen Durchlässigkeiten von Bedeutung.

Mit den gewählten mechanischen und hydraulischen Anfangsbedingungen und den zugehörigen Randbedingungen, die in Plaxis auch in Abhängigkeit der Zeit definiert werden können, kann das Programm dann eine Näherungslösung für das Randwertproblem durch Iteration berechnen. Der zeitliche Aufwand für die Berechnungen hängt neben der Rechnerkapazität von der Komplexität der verwendeten Materialmodelle und der Anzahl der Elemente bzw. Freiheitsgrade des Modells ab.

Das Programm Plaxis eignet sich in der verwendeten 2D-Version vornehmlich für die Modellierung geotechnischer Problemstellungen im ebenen Verzerrungszustand (plane strain) oder im rotationssymmetrischen Fall. Für die gesuchte Prognose der Verformungen im rheinischen Braunkohlerevier ist hingegen bereits eine eindimensionale Betrachtung ausreichend (vgl. dazu auch Abschnitt 3). In der verwendeten Programmversion Plaxis 2019 wurde schließlich eine rotationssymmetrische Betrachtung gewählt.

5.1.1 Grundlagen

Geometrische Modellierung

Grundlage der geometrischen Diskretisierung war für die betrachteten Punkte Niedermerz und Ahe das jeweils vom LANUV zur Verfügung gestellte Schichtmodell mit den Knoten der jeweiligen Schichtgrenzen. Der Durchmesser der modellierten Bodensäulen betrug jeweils 4 m.

Hydraulische Modellierung

Der maßgebende Parameter für die hydraulische Modellierung ist die Durchlässigkeit des Bodens in vertikaler Richtung k_v . Diese steuert im Gesetz von Darcy die Geschwindigkeit der Grundwasserströmung bzw. den Abbau des Porenwasserüberdrucks, der wiederum einen Einfluss auf die effektive Spannungsverteilung und damit die zeitabhängigen Setzungen hat.

Allen Elementen wurde dieselbe hydraulische Durchlässigkeit in horizontaler und vertikaler Richtung, d.h. $k_v = k_h$, zugewiesen. Zur Gewährleistung der Stabilität der numerischen Berechnungen empfiehlt das Plaxis-Handbuch [3], die Durchlässigkeitsunterschiede aneinander

grenzender Bodenschichten nicht größer als 10^5 werden zu lassen. Diese Forderung stellt für die gegebene Problemstellung eine gewisse Einschränkung dar, die sich quantitativ allerdings nur marginal auf die berechneten Setzungen und Hebungen auswirkt.

An den äußeren Rändern des Modells wird die Bodensäule undurchlässig modelliert, so dass es dort keine Strömungskomponenten in horizontaler Richtung mehr gibt. Auch Quellen oder Senken wurden nicht berücksichtigt.

Die zeitabhängigen Grundwasserstände können in Plaxis über sogenannte flow functions eingelesen werden, in denen der Verlauf der Potentialhöhe des Grundwassers über die Zeit anhand diskreter Stützstellen eingegeben werden kann. Die jeweiligen Verläufe in den Grundwasserleitern wurden den Angaben des LANUV entnommen und schichtspezifisch ins Modell übertragen. Die sich in den bindigen Schichten einstellende zeitabhängige Verteilung der Potentialhöhe wurde dann vom Programm ermittelt.

Mechanische Modellierung

Für die mechanische Modellierung des Bodens steht in Plaxis eine Vielzahl von Materialmodellen zur Verfügung, die sich in ihrer Komplexität und ihrer Eignung zur Abbildung bodenmechanischer Verhaltensweisen unterscheiden. So ist für die gegebene Problemstellung die Differenzierung zwischen der Be- und Entlastungssteifigkeit des Bodens von besonderer Bedeutung. Außerdem ist speziell für die bindigen Böden im weiteren Verlauf der Projektbearbeitung die Berücksichtigung von Krieeffekten (vgl. Abschnitt 6) erforderlich, was nur wenige Materialmodelle berücksichtigen können. Die Verwendung unterschiedlicher Materialmodelle für unterschiedliche Bereiche des Modells ist in Plaxis ohne weiteres möglich.

Zur Modellierung der grobkörnigen Böden in den Grundwasserleitern wurde das „Hardening Soil“-Materialmodell verwendet. Dieses Materialmodell ermöglicht die Berücksichtigung einer spannungsabhängigen Steifigkeit, es differenziert zwischen Be- und Entlastung und beinhaltet eine deviatorische und eine isotrope Verfestigung. Vor allem letztere ist für die korrekte Modellierung von Ent-/Wiederbelastungsvorgängen relevant. Details zur mathematischen Formulierung können dem Plaxis-Handbuch [4] entnommen werden.

Die wichtigsten Modellparameter sind (in der Nomenklatur von Plaxis):

- Generelle Parameter
 - Gesättigte Wichte γ_{sat} und Feuchtwichte γ_{unsat}
 - Anfangsporenzahl e_{init}
- Steifigkeitsparameter
 - Referenzsteifigkeit für deviatorische Erstbelastung E_{50}^{ref}
 - Referenzsteifigkeit für ödometerische Erstbelastung $E_{\text{oed}}^{\text{ref}}$
 - Referenzsteifigkeit für elastische Ent-/Wiederbelastung $E_{\text{ur}}^{\text{ref}}$
 - Exponent zur Berücksichtigung der spannungsabhängigen Steifigkeit m
- Festigkeitsparameter
 - Reibungswinkel φ'
 - Kohäsion c'
 - Dilatanzwinkel ψ'

- Durchlässigkeitsparameter
 - Horizontale Durchlässigkeit k_h
 - Vertikale Durchlässigkeit k_v

Zur Wahl der Steifigkeitsparameter sei darauf hingewiesen, dass Plaxis programminterne Kontrollen der Eingabewerte durchführt und Steifigkeitsverhältnisse von $E_{ur}^{ref} < 2 \cdot E_{50}^{ref}$ nicht zulässt, was sinngemäß auch für die ödometrischen Steifigkeiten zutrifft. Dies schränkt die Möglichkeiten zu Kalibrierung des Modells erheblich ein, da die Steifigkeiten bei Ent-/Wiederbelastung und Erstbelastung nicht unabhängig voneinander gewählt werden können. Eine explizite Nachfrage beim Plaxis-Support hat bestätigt, dass diese Einschränkung vom Anwender nicht umgangen werden kann.

Für die bindigen Schichten wurde das sogenannte „Soft Soil“-Materialmodell verwendet, das speziell für die Modellierung gering durchlässiger, feinkörniger Böden entwickelt wurde. Ebenso wie das „Hardening Soil“-Modell ist es in der Lage, die spannungsabhängige Steifigkeit des Bodens zu berücksichtigen und zwischen Be- und Ent-/Wiederbelastung zu differenzieren. Darüber hinaus ist es in der Variante „Soft Soil Creep“ möglich, Kriechvorgänge zu modellieren.

Die wichtigsten Modellparameter sind (in der Nomenklatur von Plaxis):

- Generelle Parameter
 - Gesättigte Wichte γ_{sat} , und Feuchtwichte γ_{unsat}
 - Anfangsporenzahl e_{init}
- Steifigkeitsparameter
 - Kompressionsbeiwert C_c
 - Schwellbeiwert C_s
- Festigkeitsparameter
 - Reibungswinkel φ'
 - Kohäsion c'
 - Dilatanzwinkel ψ'
- Durchlässigkeitsparameter
 - Horizontale Durchlässigkeit k_h
 - Vertikale Durchlässigkeit k_v

Zur Wahl der Steifigkeitsparameter ist hier anzumerken, dass im „Soft Soil“-Modell der Exponent zur Berücksichtigung der spannungsabhängigen Steifigkeit $m = 1$ ist, d.h. die Steifigkeit linear mit der effektiven Vertikalspannung gekoppelt ist. Darüber hinaus gelten bezüglich des Hebungsfaktors dieselben Einschränkungen wie für das „Hardening Soil“-Modell, da im „Soft-Soil“-Modell das Verhältnis zwischen Schwell- und Kompressionsbeiwert auf $C_s < 0,5 \cdot C_c$ begrenzt ist.

Die Festigkeitseigenschaften sind für die 1D-Bodenbewegungsprognosen zwar von untergeordneter Bedeutung, müssen aber der Vollständigkeit halber im Programm für beide Materialmodelle definiert werden.

Berechnungsphasen

Nach einer initialen Phase zur Definition des Anfangszustands für Spannungen und Porenwasserdrücke wurde in allen Modellen als weitere Phase die sogenannte „fully coupled flow-deformation analysis“ durchgeführt. Diese ermöglicht in Plaxis, die simultane Veränderung von Porenwasserdrücken und Spannungen bzw. Verformungen zu modellieren, was vor allem für die Berücksichtigung der gegebenen instationären hydraulischen Randbedingungen erforderlich ist.

Die Steuerung des Zeitschritts wird in Plaxis über einen programminternen Algorithmus geregelt, der die numerische Stabilität gewährleisten soll. Insofern wurde lediglich der maximale Zeitschritt t_{\max} auf 365 Tage bzw. 1 Jahr gesetzt. Gerade die ersten Zeitschritte werden vom Programm etwas kleiner gewählt. Für die Darstellung der Ergebnisse lässt sich aber eine eindeutige Zuordnung zwischen Zeitschritt (bzw. Datum) und berechneter Setzung vornehmen.

5.1.2 Niedermerz

Für die Modellierung des Punktes Niedermerz mit einer gesamten vertikalen Erstreckung von 493,2 m kamen insgesamt 420 15-knotige Dreieckselemente mit 4153 Knoten zum Einsatz. In insgesamt etwa 40 Modellvariationen wurden die maßgebenden Eingabeparameter der verwendeten Materialmodelle so lange variiert, bis eine möglichst gute Übereinstimmung zwischen numerischer Prognose und Setzungsmessung im Kalibrierungszeitraum bis 2015 erzielt werden konnte.

Dabei ist anzumerken, dass es für einige Parameterkombinationen aus nicht nachvollziehbaren Gründen zu sehr langen Rechenzeiten infolge numerischer Konvergenzprobleme kam, die letztlich auch zum Abbruch der Berechnungen führten. Die zugehörige Fehlermeldung „Soil body seems to collapse“ ist für diese 1D-Modellierung mit genau definierten Randbedingungen nicht nachvollziehbar.

Kalibrierung und Prognose

Da sich durch die Rückrechnungen keine durchgängig exakte Übereinstimmung zwischen Messwerten und numerischen Ergebnissen erzielen ließ, konzentrierte sich die Kalibrierung auf den Zeitraum zwischen ca. 1990 und 2015, in dem bereits Hebungen gemessen wurden. Die dafür ermittelten maßgebenden Steifigkeitsparameter sowie die im Rahmen der Kalibrierung minimal und maximal verwendeten Werte sind für die nichtbindigen und die bindigen Schichten in Tabelle 1 dargestellt. In Abbildung 2 finden sich die Ergebnisse der Nachrechnung für den Kalibrierungszeitraum bis 2015 sowie in Abbildung 3 der prognostizierte Verlauf der Bodenbewegungen an der Geländeoberkante bis zum Jahr 2200.

Tabelle 1 Plaxis-Parameter Niedermerz

Eingangswerte					
nichtbindige Schichten (HS)					
		min	gewählt	max	
Steifigkeit bei Erstbelastung	$E_{50,ref}$	60339	104910	315269	[kN/m ²]
Steifigkeit bei Wiederbelastung	$E_{ur,ref}$	120677	209820	630538	[kN/m ²]
Ödometrische Steifigkeit	$E_{oed,ref}$	50000	90000	280000	[kN/m ²]
Exponent	m	0,6	0,65	0,7	[-]
Durchlässigkeit	k_f	0,0864	0,0864	8,64	[m/d]
		1,0E-06	1,0E-06	1,0E-04	[m/s]
bindige Schichten (SS)					
		min	gewählt	max	
Kompressionsbeiwert Erstbel.	C_c	0,01	0,05	0,09	[-]
Kompressionsbeiwert Entl.	C_r	0,002	0,0125	0,035	[-]
Durchlässigkeit	k_f	8,64E-08	8,64E-07	8,64E-05	[m/d]
		1,00E-12	1,00E-11	1,00E-09	[m/s]

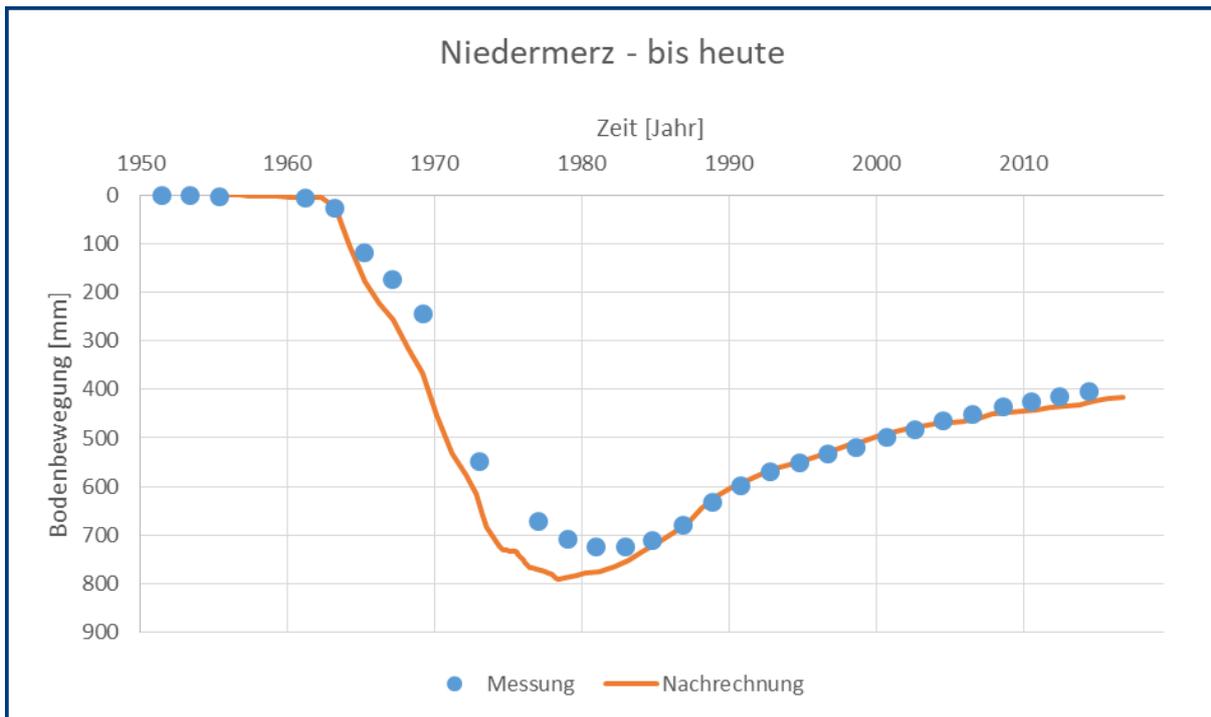


Abbildung 2 Plaxis-Ergebnisse Niedermerz bis heute

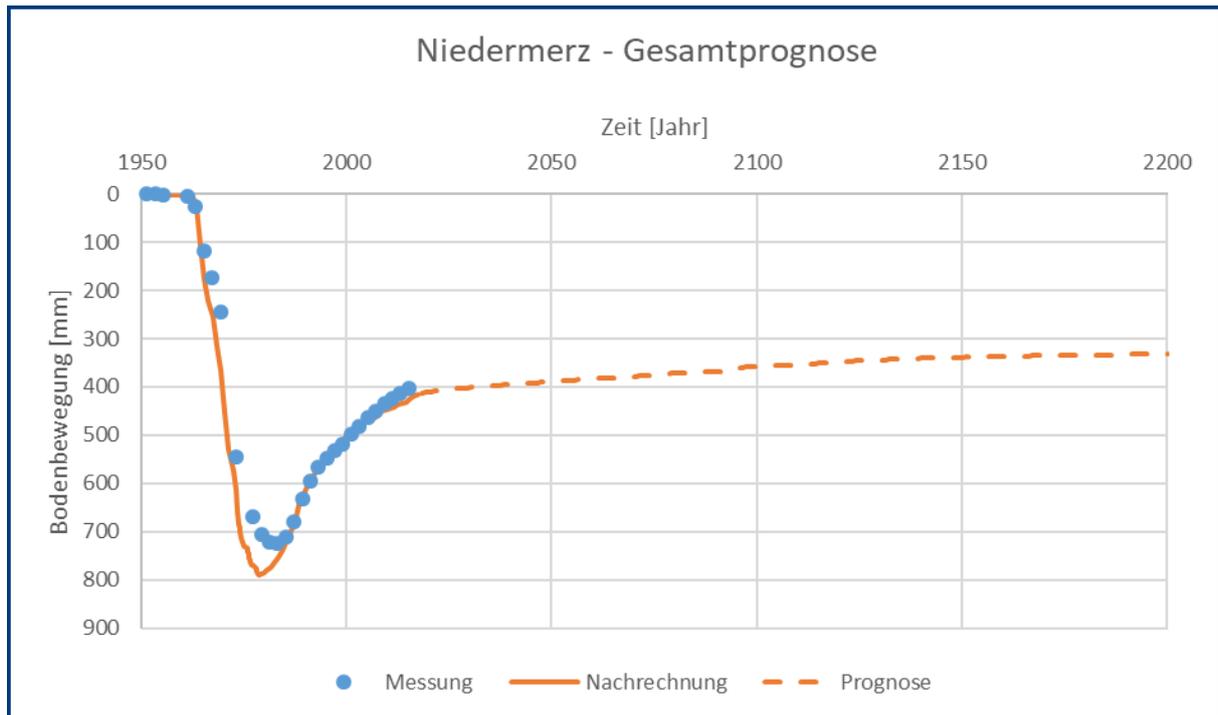


Abbildung 3 Plaxis-Ergebnisse Niedermerz, Prognose

Eine vollständige Übereinstimmung zwischen Messwerten und Nachrechnung wurde für den Kalibrierungszeitraum nicht erzielt. Die Übereinstimmung in den Jahren 1990 bis 2015 ist jedoch sehr gut. Darüber hinaus wird aus Abbildung 3 ersichtlich, dass die Kurve nach dem Jahr 2020 nur noch schwach ansteigt. Dies hängt wesentlich mit der von Plaxis vorgegebenen Beschränkung des Steifigkeitsverhältnisses zwischen Ent-/Wieder- und Erstbelastung zusammen, die ein weiches Verhalten in der Entlastungsphase unterbindet.

Min-/Max-Betrachtung

Im Sinne einer Min-/Max-Betrachtung wurden in weiterer Folge für den Punkt Niedermerz die Steifigkeitsverhältnisse (kurz: „Hebungsfaktoren“) für die nichtbindigen und bindigen Böden im Vergleich zum Referenzparametersatz (Fall 1) variiert (vgl. Tabelle 2), wobei die in Abschnitt 5.1.1 erwähnten Limitierungen für das Steifigkeitsverhältnis zwischen Erst- und Ent-/Wiederbelastung eingehalten werden mussten.

Diese Variation bezog sich für die nichtbindigen Horizonte auf das Verhältnis $E_{50}^{ref}/E_{ur}^{ref}$, wobei die Steifigkeit für die Erstbelastung E_{50}^{ref} konstant gehalten wurde. Für die bindigen Böden wurde das Verhältnis C_C/C_S adaptiert, wobei auch hier der Kompressionsbeiwert C_C im Vergleich zum Referenzmodell beibehalten wurde. Im Fall 2 wurde also der Schwellbeiwert für die bindigen Böden um den Faktor 2 erhöht, wodurch das System in der Entlastung weicher wird. Im Fall 3 wurde der Ent-/Wiederbelastungsmodul um den Faktor 2,5 erhöht, das System also steifer gemacht.

Tabelle 2 Min-/Max-Betrachtung für den Punkt Niedermerz

Fall	Steifigkeitsverhältnis [-]		resultierende Bodenbewegung [mm]			Beschreibung
	nichtbindig	bindig	2015	2100	2200	
2	0,50	0,50	276	168	134	Max. theoretische Hebung
1	0,50	0,25	425	357	332	Prognose
3	0,20	0,25	593	545	529	Min. theoretische Hebung

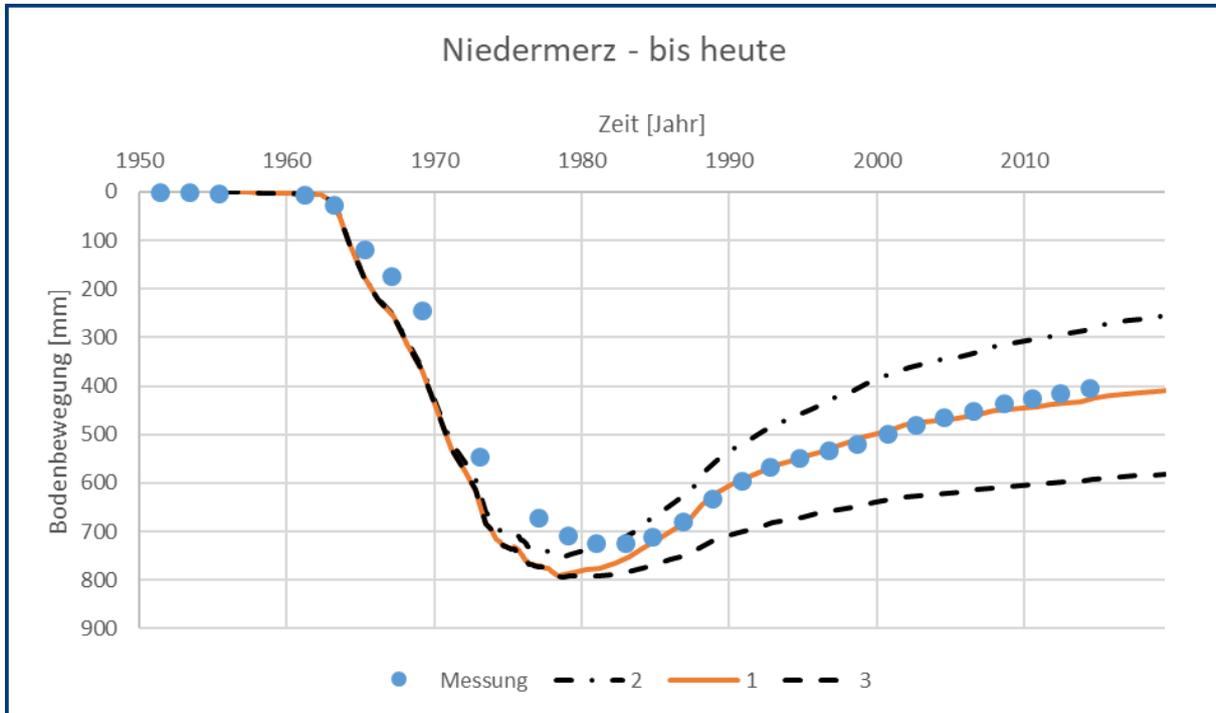


Abbildung 4 Plaxis-Ergebnisse der Min-/Max-Betrachtung im Kalibrierungszeitraum

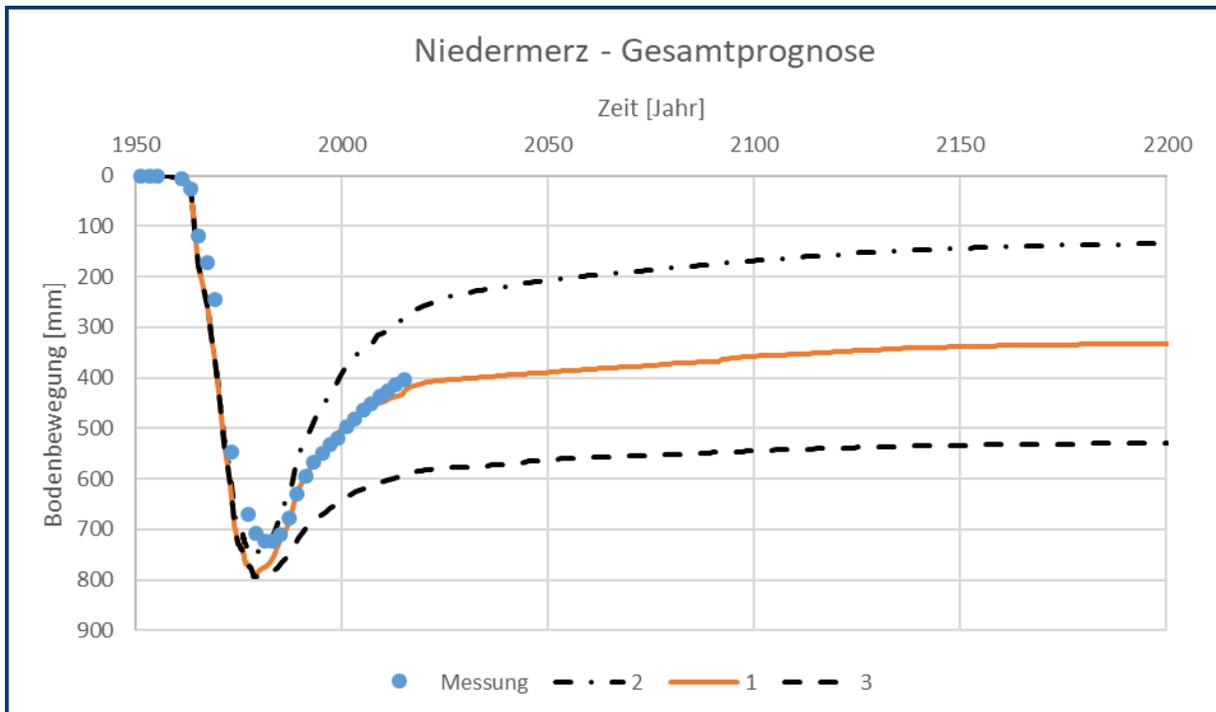


Abbildung 5 Plaxis-Ergebnisse der Min-/Max-Betrachtung im Prognosezeitraum

Da die Steifigkeitsparameter der Erstbelastung in allen Fällen gleich angesetzt wurden, zeigt sich – wie zu erwarten – nur ein marginaler Einfluss auf die maximalen Setzungen. Das He-
bungsverhalten wird allerdings durch die Variation der Steifigkeitsverhältnisse deutlich beein-
flusst, wie Abbildung 4 und Abbildung 5 zeigen. Hier liegt der Unterschied in der Prognose für
das Jahr 2200 bei fast 40 cm zwischen den Fällen 2 und 3.

5.1.3 Ahe

Für die Modellierung des zweiten Referenzpunktes Ahe mit einer gesamten vertikalen Erstreckung von 1.531,9 m wurden insgesamt 1018 15-knotige Dreieckselemente mit 10185 Knotenpunkten verwendet.

Als Zwischenschritt in der Modellierung dieses Punktes wurde gemäß gemeinsamer Abstimmung mit dem LANUV zunächst eine Prognose mit den Materialparametern berechnet, die am Punkt Niedermerz kalibriert worden waren (vgl. Abschnitt 5.1.2). Hierzu ist zu erwähnen, dass das Schichtmodell für den Punkt Ahe durch eine höhere Mächtigkeit der feinkörnigen, gering durchlässigen Schichten geprägt ist. Losgelöst von den in situ variierenden Schichteigenschaften resultiert daraus aber auch, dass die Materialparameter für die bindigen Böden einen höheren Einfluss auf das Berechnungsergebnis haben als am Punkt Niedermerz.

Abbildung 6 zeigt deutlich, dass mit den am Punkt Niedermerz kalibrierten Materialparametern keine zutreffende Prognose zu erzielen war und die Steifigkeit in der Erstbelastungsphase zu hoch ist. Insofern ist die unmittelbare Übertragbarkeit der Parameter von einem Messpunkt auf den anderen nicht gegeben.

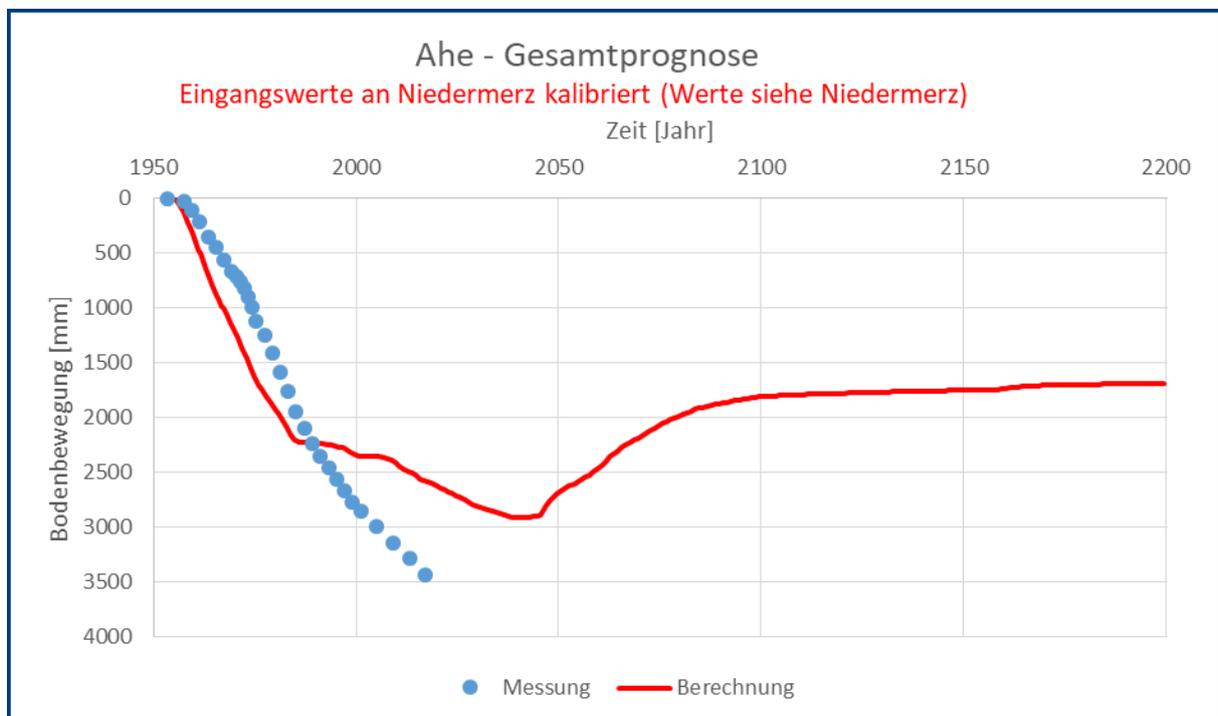


Abbildung 6 Prognose für den Punkt Ahe mit kalibrierten Parametern für den Punkt Niedermerz

Daher wurde auch für den Punkt Ahe eine separate Kalibrierung der Materialparameter vorgenommen. Trotz intensiver Bemühungen (ca. 50 Modellvariationen) zeigten sich jedoch durchweg größere Abweichungen zwischen der numerischen Rückrechnung mit Plaxis und den Messwerten. Die Ergebnisse stimmen lediglich für die letzten fünf Jahre vor 2015 gut mit den Messwerten überein.

Die für diesen Fall ermittelten maßgebenden Steifigkeitsparameter sind für die nichtbindigen und die bindigen Schichten in Tabelle 3 dargestellt. Die Ergebnisse der Nachrechnung für den Kalibrierungszeitraum bis 2015 können Abbildung 7 und die Prognose bis zum Jahr 2200 Abbildung 8 entnommen werden.

Tabelle 3 Plaxis-Parameter Ahe

nichtbindige Schichten (HS)					
		min	gewählt	max	
Steifigkeit bei Erstbelastung	$E_{50,ref}$	22519	83928	168894	[kN/m ²]
Steifigkeit bei Wiederbelastung	$E_{ur,ref}$	45038	167856	337788	[kN/m ²]
Ödometrische Steifigkeit	$E_{oed,ref}$	20000	72000	150000	[kN/m ²]
Exponent	m	0,6	0,65	0,7	[-]
Durchlässigkeit	k_f	8,64	8,64E-02	8,64E-04	[m/d]
		1,0E-04	1,0E-06	1,0E-08	[m/s]
bindige Schichten (SS)					
		min	gewählt	max	
Kompressionsbeiwert Erstbel.	C_c	0,02	0,6	0,9	[-]
Kompressionsbeiwert Entl.	C_r	0,0067	0,3	0,45	[-]
Durchlässigkeit	k_f	8,64E-09	8,64E-08	8,64E-06	[m/d]
		1,00E-13	1,00E-12	1,00E-10	[m/s]

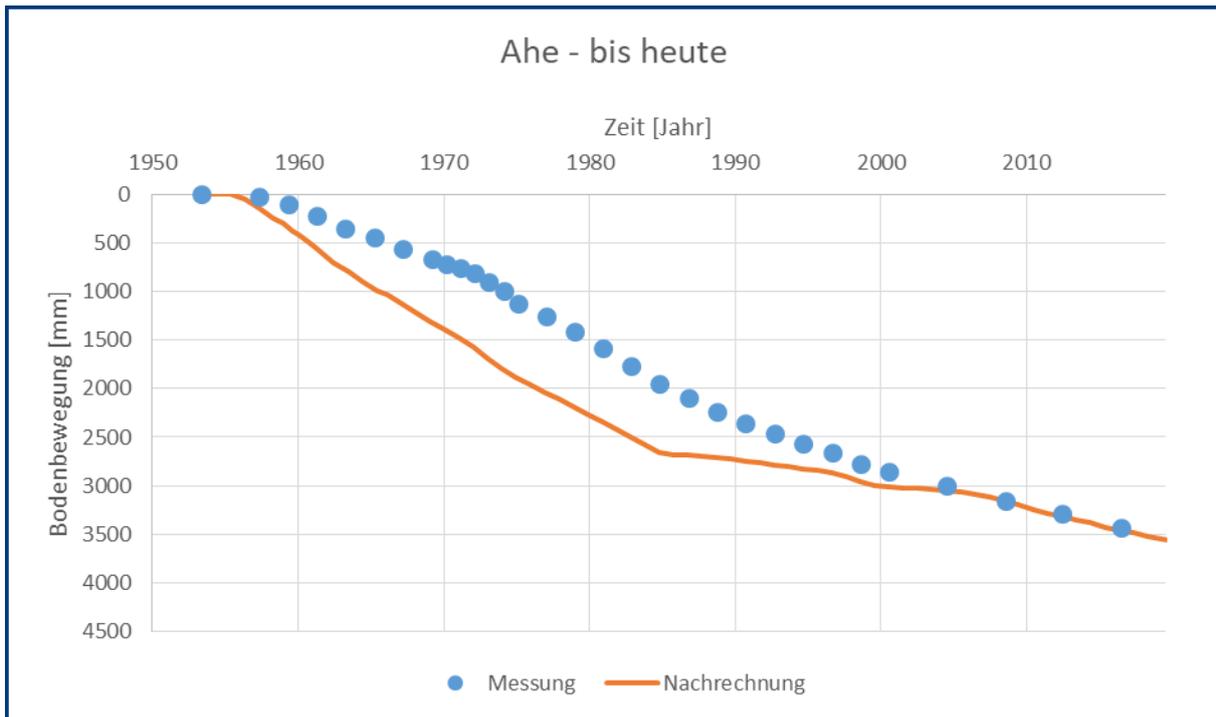


Abbildung 7 Plaxis-Ergebnisse Ahe bis heute

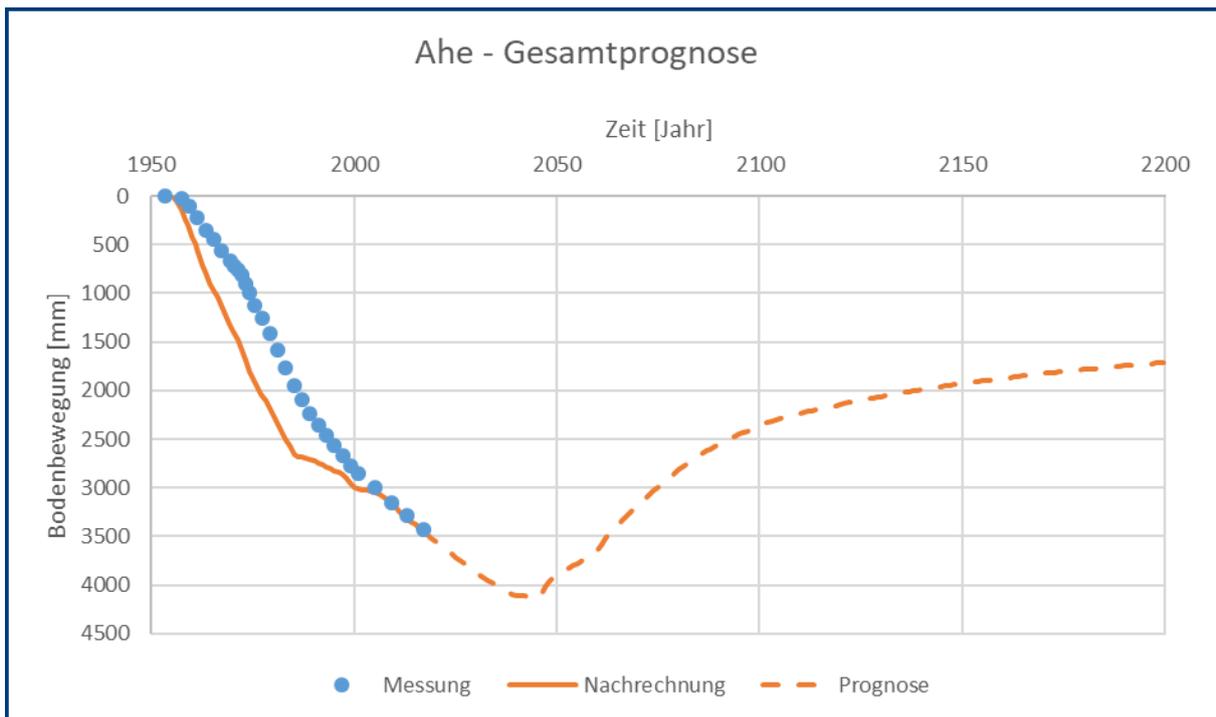


Abbildung 8 Plaxis-Ergebnisse Ahe, Prognose

Offensichtlich lässt sich mit dem numerischen Modell keine durchgängig gute Übereinstimmung zwischen Rückrechnung und Messdaten erzielen und das Plaxis-Modell reagiert im Verhältnis zu den realen Messdaten zu schnell auf die Absenkung des Grundwassers. Diese Diskrepanz ließ sich allerdings auch durch das Verringern der Durchlässigkeit in den bindigen Schichten, die hier eine große Rolle spielt, nicht beseitigen.

Min-/Max-Betrachtung

Für den Punkt Ahe wurden ebenfalls die Steifigkeitsverhältnisse für die nichtbindigen und bindigen Böden im Vergleich zum Referenzparametersatz (Fall 1) im Sinne einer Min-/Max-Betrachtung variiert (vgl. Tabelle 4).

Dabei ist zu berücksichtigen, dass für den Punkte Ahe nur eine Variante mit Verringerung der Steifigkeitsverhältnisse (Fall 3) möglich war, da diese im Referenzparametersatz (Fall 1) sowohl für die nichtbindigen als auch die bindigen Schichten bereits am Eingabelimit von 0,5 gewählt wurden. Die Prognose für den Fall1 entspricht somit gleichzeitig der Max-Betrachtung.

Tabelle 4 Min-/Max-Betrachtung für den Punkt Ahe

Fall	Steifigkeitsverhältnis [-]		resultierende Bodenbewegung [mm]			Beschreibung
	nichtbindig	bindig	2015	2100	2200	
2	-	-	-	-	-	Max. theoretische Hebung
1	0,50	0,50	3384	2362	1713	Prognose
3	0,20	0,25	3614	3680	3390	Min. theoretische Hebung

Die Ergebnisse der Min-/Max-Betrachtung können den beiden nachfolgenden Abbildungen entnommen werden.

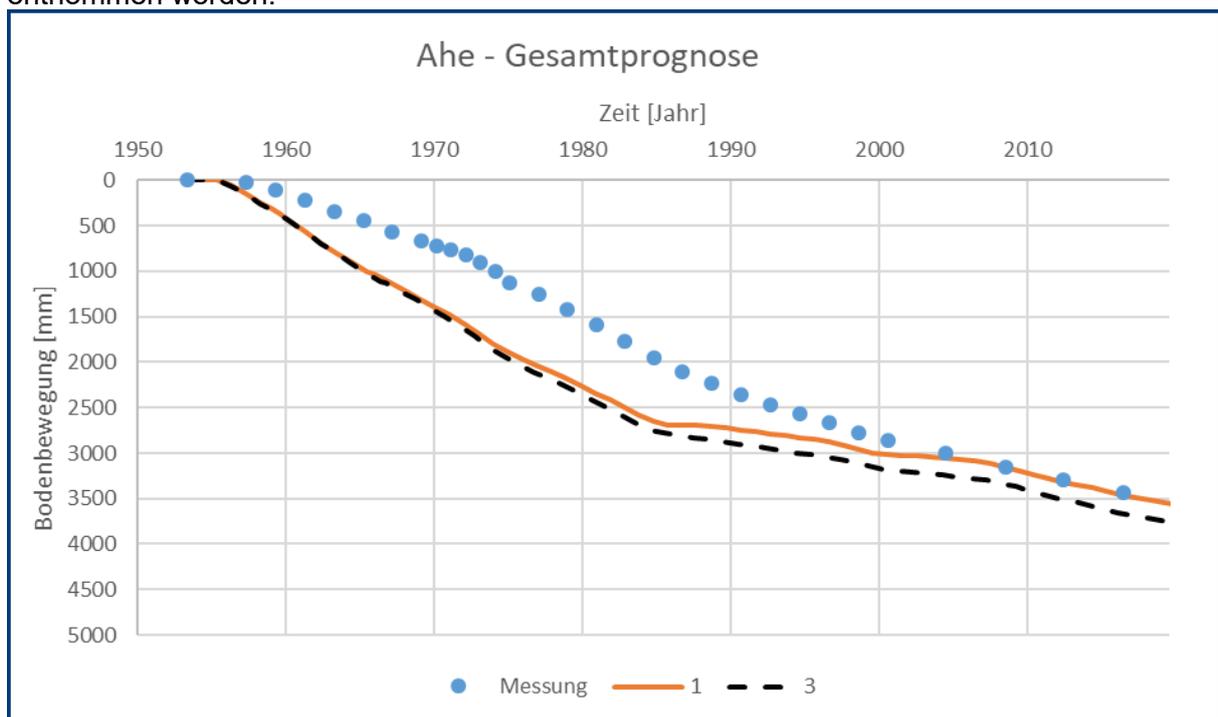


Abbildung 9 Plaxis-Ergebnisse der Min-/Max-Betrachtung im Kalibrierungszeitraum

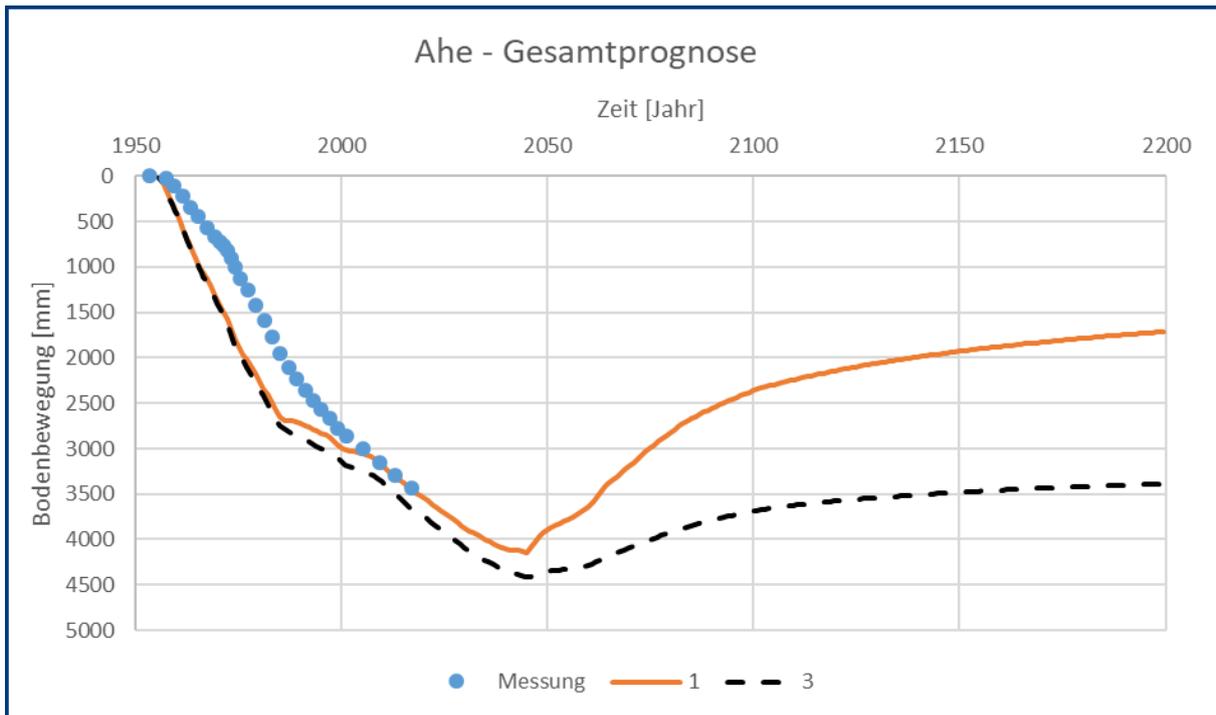


Abbildung 10 Plaxis-Ergebnisse der Min-/Max-Betrachtung im Prognosezeitraum

Analog zur Prognose für den Punkt Niedermerz veranschaulichen Abbildung 9 und Abbildung 10 den deutlichen Einfluss der Ent-/Wiederbelastungssteifigkeit für die langfristige Prognose bis zum Jahr 2200. Der Unterschied zwischen Fall 1 und 3 beträgt für das Jahr 2200 insgesamt knapp 170 cm.

5.2 D-Settlement

D-Settlement ist ein kommerzielles 2D-Programm, welches von Deltares Systems der Stichting Deltares aus den Niederlanden entwickelt wurde [3]. Mit dem Programm können Bodenbewegungen (Setzungen und Hebungen) infolge Auflast und Grundwasserstandsänderungen berechnet werden. Dabei können Sofortsetzungen, Setzungen infolge Konsolidierung und Setzungen infolge Kriechen berücksichtigt werden.

Es stehen mit dem Modell nach Buismann-Koppejan, dem Isotachenmodell nach Bjerrum und dem ABC-Isotachenmodell drei Kompressionsmodelle sowie die beiden Konsolidierungsansätze nach Terzaghi und nach Darcy zur Verfügung. D-Settlement basiert grundsätzlich auf analytischen Lösungsverfahren. Eine Ausnahme stellt der Konsolidierungsansatz auf Basis des Darcy'schen Gesetzes dar, bei dem die Verformungen bindiger Schichten numerisch mit der Grundwasserströmung gekoppelt berechnet werden.

Im Rahmen des Methodenvergleiches Bodenbewegungsprognose wurde nach Abstimmung mit dem LANUV im Rahmen eines Arbeitsgruppentreffens das Kompressionsmodell nach Bjerrum und der Konsolidierungsansatz nach Darcy verwendet.

Für die Berechnungen wurde die Programmversion 19.1 verwendet.

5.2.1 Grundlagen

Geometrische Modellierung

Auf Grundlage des vom LANUV zur Verfügung gestellten Schichtmodells wurde der Bodenaufbau nicht wie ursprünglich vorgesehenen eindimensional sondern zweidimensional modelliert. Zwar bietet D-Settlement die Option einer 1D-Berechnung, darin ist eine Modellierung der verschiedenen Wasserstände aber nicht möglich. Die Modellbreite betrug jeweils 100 m.

Hydraulische Modellierung

Die Definition der hydraulischen Eigenschaften ist im Konsolidierungsmodell nach Darcy entweder durch den Konsolidationsbeiwert c_v [m^2/s] oder durch die vertikale Durchlässigkeit k_f [m/s] möglich. Im Rahmen des Methodenvergleiches wurde aus Gründen der Vergleichbarkeit mit anderen Programmen die vertikale Durchlässigkeit gewählt. Horizontale Strömungen können durch D-Settlement nur über einen sogenannten „leakage“-Term berücksichtigt werden, spielen aber im vorliegenden Fall keine Rolle. Für die bindigen Schichten wird die Durchlässigkeit über die Eingabe des k_f -Wertes definiert. Die nichtbindigen Schichten (Grundwasserleiter) werden als „drained“ definiert. Damit entfällt die Eingabe einer Durchlässigkeit.

Die zeitabhängigen Grundwasserstände sind über mehrere Schritte zu definieren:

1. Erstellen von jeweils zwei Punkten („Points“) pro unterschiedlichem Grundwasserstand
2. Verbinden der jeweils zwei Punkte durch eine Linie („PI-Line“ = Piezometric Level line) zur Definition der verschiedenen Grundwasserstände
3. Definition der verschiedenen Zeitschritte gleicher Grundwasserbedingungen („Water Loads“). Jedem einzelnen Zeitschritt wird pro Layergrenze eine PI-Line zugewiesen.

Dieses Verfahren stellt durch die mehreren manuell auszuführenden Schritte einen großen Aufwand zur Definition der zeitabhängigen Grundwasserstände dar. Der Punkt Niedermerz zum Beispiel beinhaltet 8 verschiedene Grundwasserleiter, wobei zu jedem einzelnen in einem Zeitraum von 1955 bis 2200 ein jährlicher Grundwasserstand vorliegt. Es müssten also zunächst für den Betrachtungszeitraum von 245 Jahren 1960 PI-Lines durch 3920 Points definiert werden. Anschließend sind dann 245 Water Loads entsprechend den Jahren des Betrachtungszeitraums zu definieren, indem je Water Load jedem Grundwasserleiter eine PL-Line zugewiesen wird. Allerdings beschränkt D-Settlement die maximal mögliche Anzahl verschiedener PI-Lines auf 89 und die maximal mögliche Anzahl der Water Loads auf 120. Eine explizite Nachfrage beim Deltares-Support hat bestätigt, dass diese Einschränkungen vom Anwender nicht umgangen werden können.

Eine Modellierung in der eigentlich durch die zeitabhängigen Randbedingungen vorgegebenen Genauigkeit ist daher mit D-Settlement nicht möglich. Daher wurden vom LANUV neue, erheblich ausgedünnte Grundwasserganglinien bereitgestellt, um überhaupt eine hydraulische Modellierung mit D-Settlement zu ermöglichen.

Mechanische Modellierung

Für die mechanische Modellierung wurde das Kompressionsmodell nach Bjerrum verwendet, welches unterschiedliches Verhalten bei Be- und Entlastung sowie den Effekt des Kriechens berücksichtigen kann.

Folgende Eingabeparameter sind zur Definition der Schichteigenschaften erforderlich:

C_c	[-]	Kompressionsbeiwert Erstbelastung
C_r	[-]	Kompressionsbeiwert Ent- und Wiederbelastung
$C_{\alpha e}$	[-]	Kompressionsbeiwert Kriechen
γ	[kN/m ³]	Wichte des feuchten Bodens
γ_r	[kN/m ³]	Wichte des wassergesättigten Bodens
k_f	[m/s]	vertikale Durchlässigkeit

5.2.2 Niedermerz

Das zweidimensionale Modell für den Punkt Niedermerz hat eine Höhe von 493,2 m und eine Breite von 100 m. Die Höhe entspricht der vertikalen Erstreckung der durch das LANUV für diesen Punkt definierten Bodenschichten. Die Breite ist frei gewählt. Das Modell ist in Abbildung 11 dargestellt, wobei für eine übersichtlichere Darstellung in x- und y-Richtung unterschiedliche Maßstäbe gewählt wurden.

Tabelle 5 D-Settlement Parameter Niedermerz

Eingangswerte					
nichtbindige Schichten					
		min	gewählt	max	
Kompressionsbeiwert Erstbel.	C_c	0,005	0,005	0,01	[-]
Kompressionsbeiwert Entl.	C_r	0,004	0,004	0,0095	[-]
Durchlässigkeit	k_f	drained			[m/s]
bindige Schichten					
		min	gewählt	max	
Kompressionsbeiwert Erstbel.	C_c	0,09	0,09	0,1	[-]
Kompressionsbeiwert Entl.	C_r	0,035	0,06	0,066	[-]
Durchlässigkeit	k_f	1,50E-11	2,00E-11	1,00E-10	[m/s]

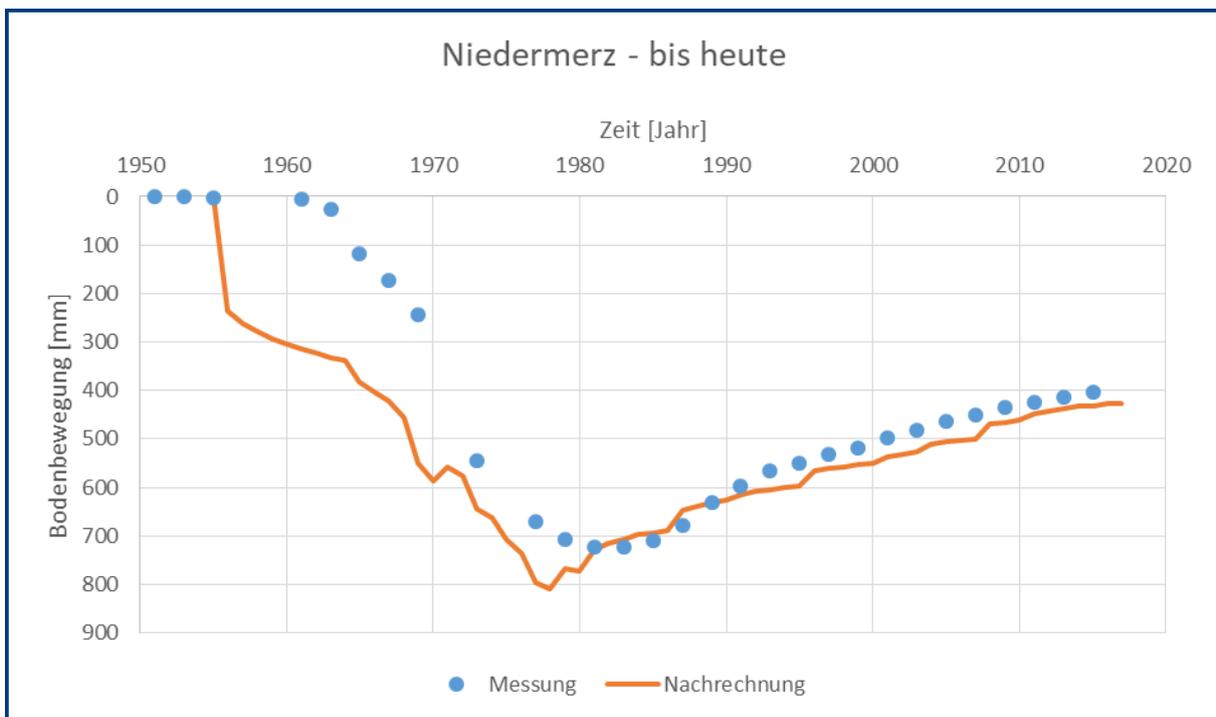


Abbildung 12 D-Settlement Ergebnisse Niedermerz bis heute

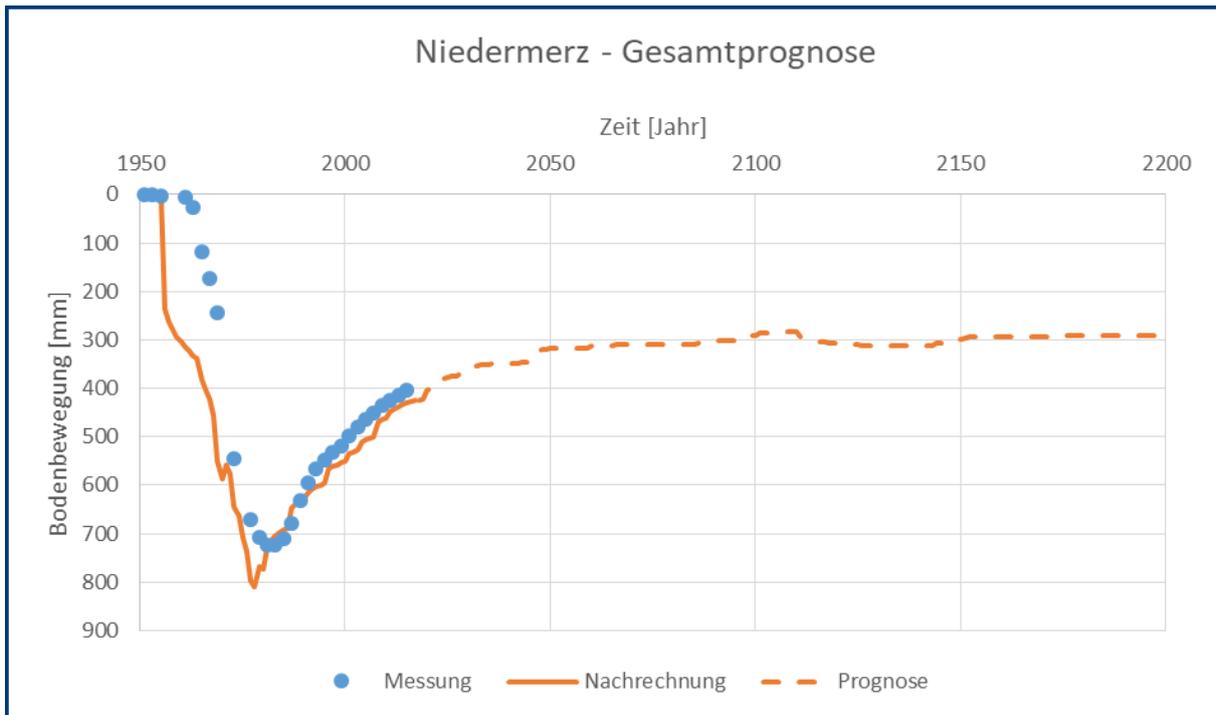


Abbildung 13 D-Settlement Ergebnisse Niedermerz, Prognose

Die Ergebnisse der Nachrechnung mit D-Settlement zeigen nur eine schlechte Übereinstimmung mit den Messwerten. Zu erkennen ist, dass die mit D-Settlement erhaltene Kurve im Vergleich zu mit den anderen Programmen erhaltenen Kurven teilweise stark gezackt ist. Dies ist auf die erforderliche Ausdünnung der Daten der Grundwasserganglinien zurückzuführen. Weiter ergibt sich zwischen den Jahren 2100 und 2150 eine erneute Setzung, deren Ursache aus bodenmechanischer Sicht so nicht nachvollziehbar ist.

Min-/Max-Betrachtung

Im Rahmen einer Min-/Max-Betrachtung wurde das Steifigkeitsverhältnis von Erst- und Wiederbelastung variiert. Die Variation bezog sich dabei auf die Kompressionsbeiwerte C_r für Ent- und Wiederbelastung der nichtbindigen und bindigen Schichten. Der Kompressionsbeiwert C_c für Erstbelastung wurde konstant gehalten. Die variierten Steifigkeitsverhältnisse sind in Tabelle 6 dargestellt, die Ergebnisse der Min-/Max-Betrachtung in Abbildung 14.

Tabelle 6 Min-/Max-Betrachtung für den Punkt Niedermerz

Fall	Verhältnis C_r/C_c [-]		resultierende Bodenbewegung [mm]			Beschreibung
	nichtbindig	bindig	2015	2100	2200	
2	1,00	1,00	242	26	27	Max. theoretische Hebung
1	0,80	0,66	431	292	292	Prognose
3	0,20	0,33	716	662	664	Min. theoretische Hebung

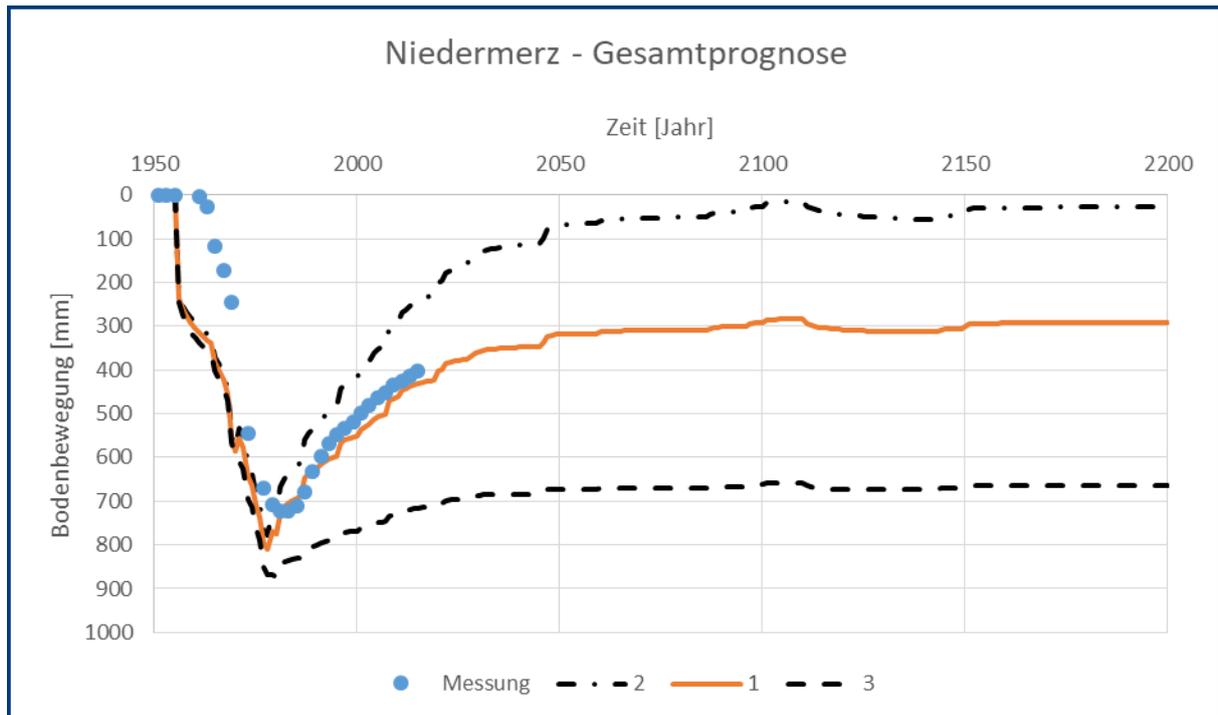


Abbildung 14 D-Settlement Ergebnisse Niedermerz, Min-/Max-Betrachtung

Da im Rahmen der Variation des Steifigkeitsverhältnisses nur der C_r Wert verändert wurde, zeigt sich die Auswirkung der Variation im Wesentlichen im Bereich der Bodenhebungen. Bei der Maximalbetrachtung mit $C_r = C_c$ gleichen die Hebungen die Setzungen fast wieder aus. Weiter ist zu beobachten, dass zwischen minimalem und maximalem Steifigkeitsverhältnis ein Unterschied in der Prognose im Jahr 2200 von gut 600 mm liegt.

5.2.3 Ahe

Das Modell für den Punkt Ahe (siehe Abbildung 15) hat eine Höhe von 1531,89 m und eine Breite von 100 m. Entsprechend dem Modell für den Punkt Niedermerz sind auch hier die nichtbindigen Schichten in orange und die bindigen Schichten in grün dargestellt. Im oberen Bereich sind die Linien zur Darstellung der verschiedenen Grundwasserstände erkennbar. Für die x- und y-Achse sind wie auch beim Punkt Niedermerz verschiedene Maßstäbe gewählt worden, um die Darstellung übersichtlicher zu gestalten.

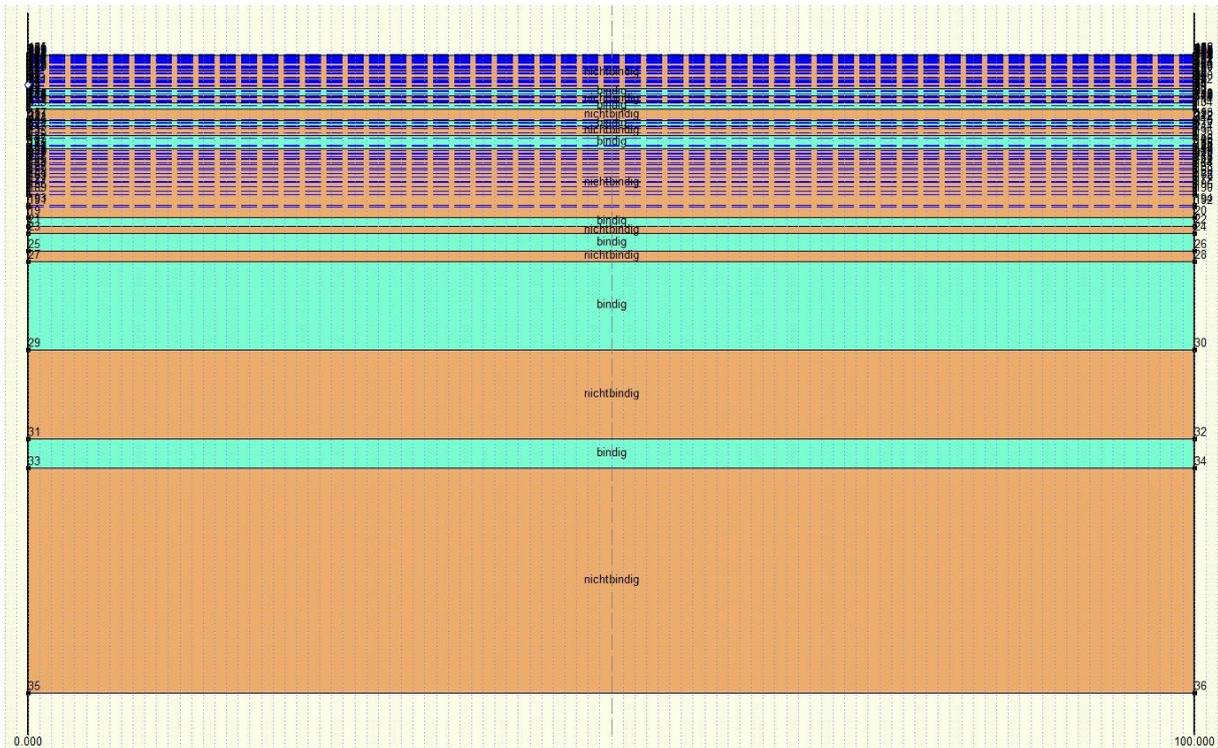


Abbildung 15 D-Settlement Modell Ahe, Darstellung gestaucht

Auch in D-Settlement wurden gemäß der Abstimmung mit dem LANUV als erster Zwischenschritt die am Modell Niedermerz kalibrierten Eingangsparameter (vgl. Abschnitt 5.2.2) verwendet. Die so berechnete Gesamtprognose ist in Abbildung 16 dargestellt. Eine Übereinstimmung mit den Messwerten konnte damit nicht erreicht werden.

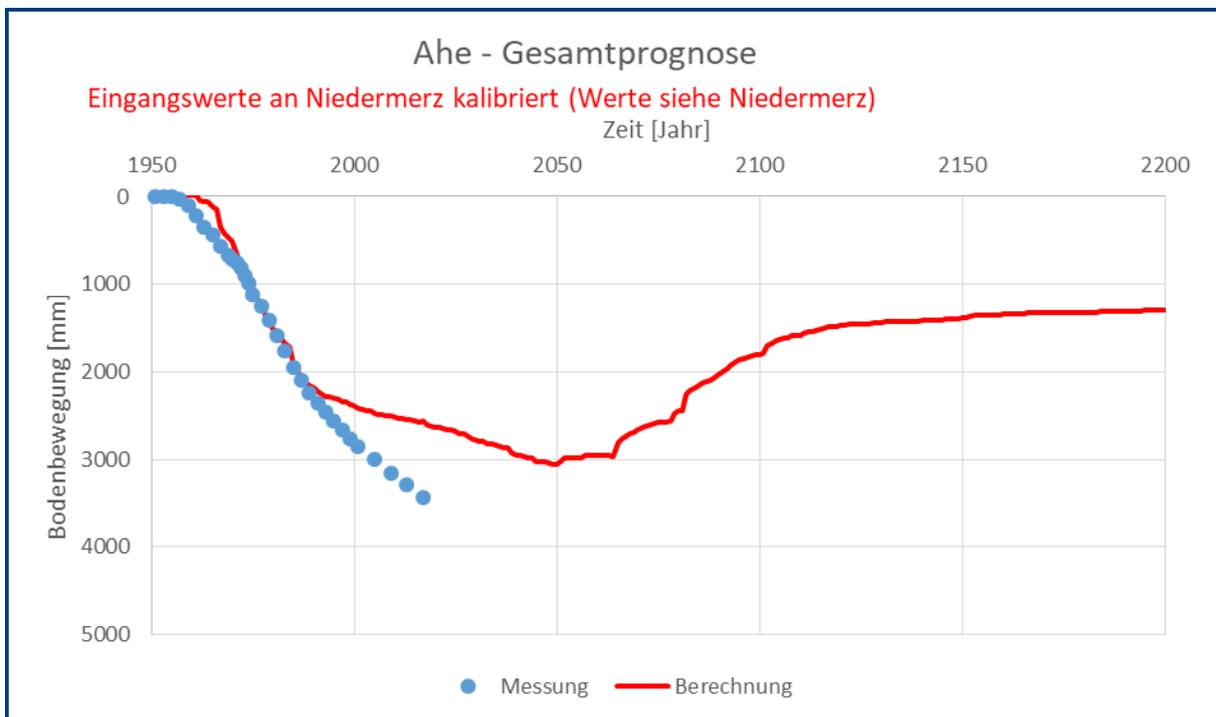


Abbildung 16 D-Settlement Ergebnisse Ahe - Eingangsparameter Niedermerz

Kalibrierung

Im Rahmen der Kalibrierung der Kompressionsbeiwerte C_c und C_r beider Schichttypen und der Durchlässigkeit k_f der bindigen Schichten wurden über 30 Modellvarianten gerechnet, um eine möglichst gute Übereinstimmung mit den Messwerten zu erreichen. Die dabei ermittelten Parameter und die Grenzen innerhalb derer variiert wurde sind in Tabelle 7 dargestellt. Die Ergebnisse der Berechnungen sowie der Vergleich mit den Messwerten sind in Abbildung 17 bis heute und in Abbildung 18 als Prognose bis ins Jahr 2200 dargestellt.

Tabelle 7 D-Settlement Parameter Ahe

Eingangswerte					
nichtbindige Schichten					
		min	gewählt	max	
Kompressionsbeiwert Erstbel.	C_c	0,005	0,005	0,01	[-]
Kompressionsbeiwert Entl.	C_r	0,002	0,002	0,008	[-]
Durchlässigkeit	k_f	drained			[m/s]
bindige Schichten					
		min	gewählt	max	
Kompressionsbeiwert Erstbel.	C_c	0,08	0,17	0,17	[-]
Kompressionsbeiwert Entl.	C_r	0,033	0,09	0,09	[-]
Durchlässigkeit	k_f	9,00E-12	9,00E-12	1,00E-10	[m/s]

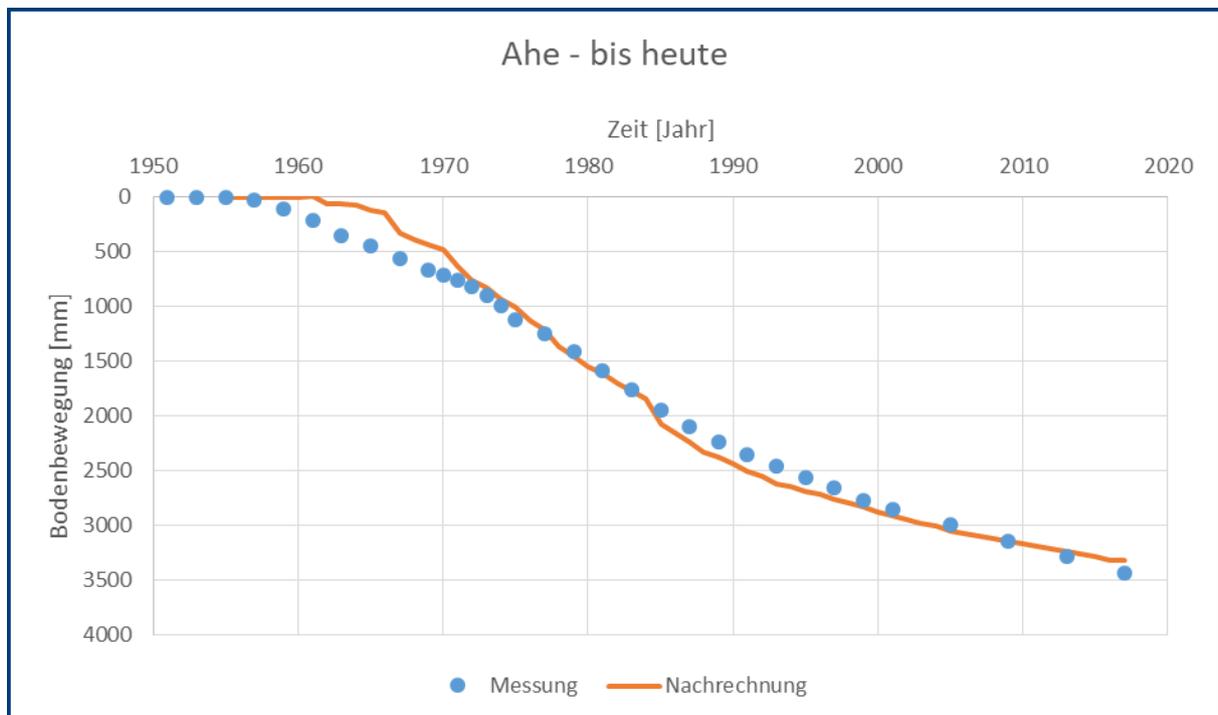


Abbildung 17 D-Settlement Ergebnisse Ahe bis heute

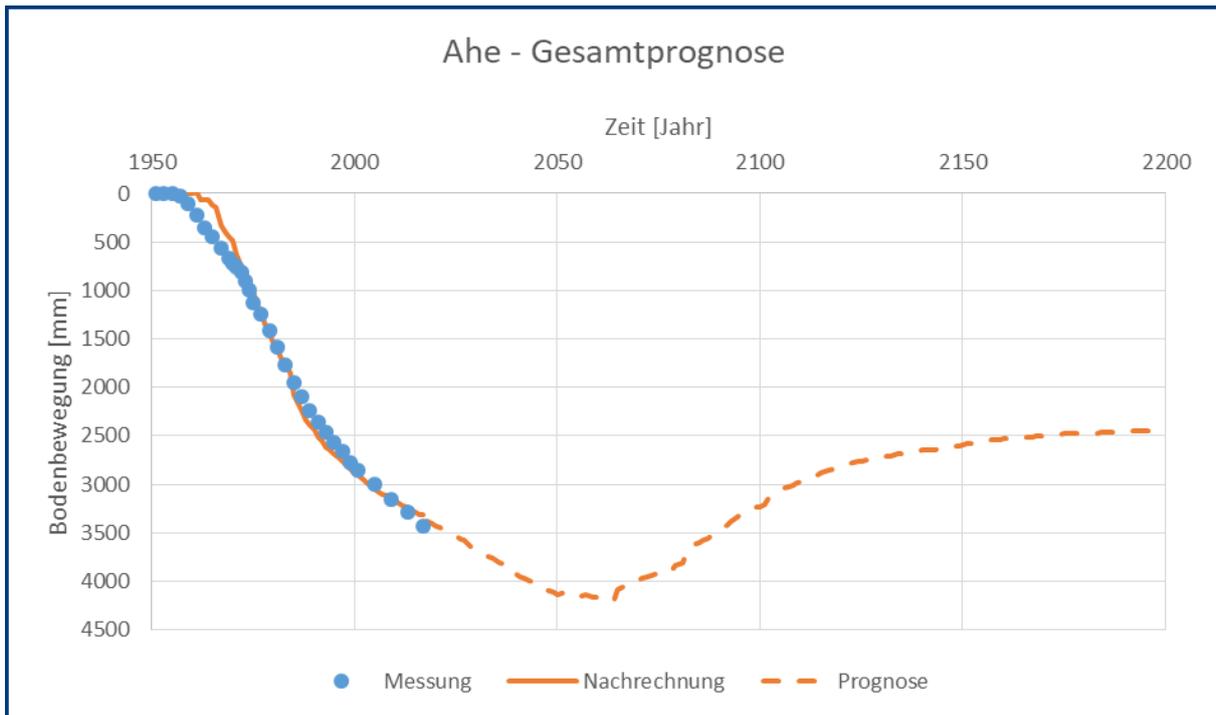


Abbildung 18 D-Settlement Ergebnisse Ahe, Prognose

Die Ergebnisse der Nachrechnung weisen zwar insgesamt betrachtet näherungsweise eine akzeptable Übereinstimmung mit den Messwerten auf, dennoch sind relevante Abweichungen und auch analog zu Niedermerz Zacken in der Kurve zu verzeichnen, die sich durch die Ausdünnung der Daten der Grundwasserganglinien ergeben. Nur aufgrund dessen, dass die Gesamtsetzungen am Punkt Ahe etwa fünfmal so groß sind wie beim Punkt Niedermerz, fallen die Zacken im Gesamtbild der Setzungskurve aber optisch nicht so stark auf.

Min-/Max-Betrachtung

Im Rahmen einer Min-/Max-Betrachtung wurde das Steifigkeitsverhältnis von Erst- und Wiederbelastung variiert. Die Variation bezog sich dabei auf die Kompressionsbeiwerte C_r für Ent- und Wiederbelastung der nichtbindigen und bindigen Schichten. Die variierten Steifigkeitsverhältnisse sind in Tabelle 8 dargestellt, die Ergebnisse der Min-/Max-Betrachtung in Abbildung 19.

Tabelle 8 Min-/Max-Betrachtung für den Punkt Ahe

Fall	Verhältnis C_r/C_c [-]		resultierende Bodenbewegung [mm]			Beschreibung
	nichtbindig	bindig	2015	2100	2200	
2	1,00	1,00	3210	2410	800	Max. theoretische Hebung
1	0,40	0,53	3290	3230	2440	Prognose
3	0,20	0,33	3340	3630	3210	Min. theoretische Hebung

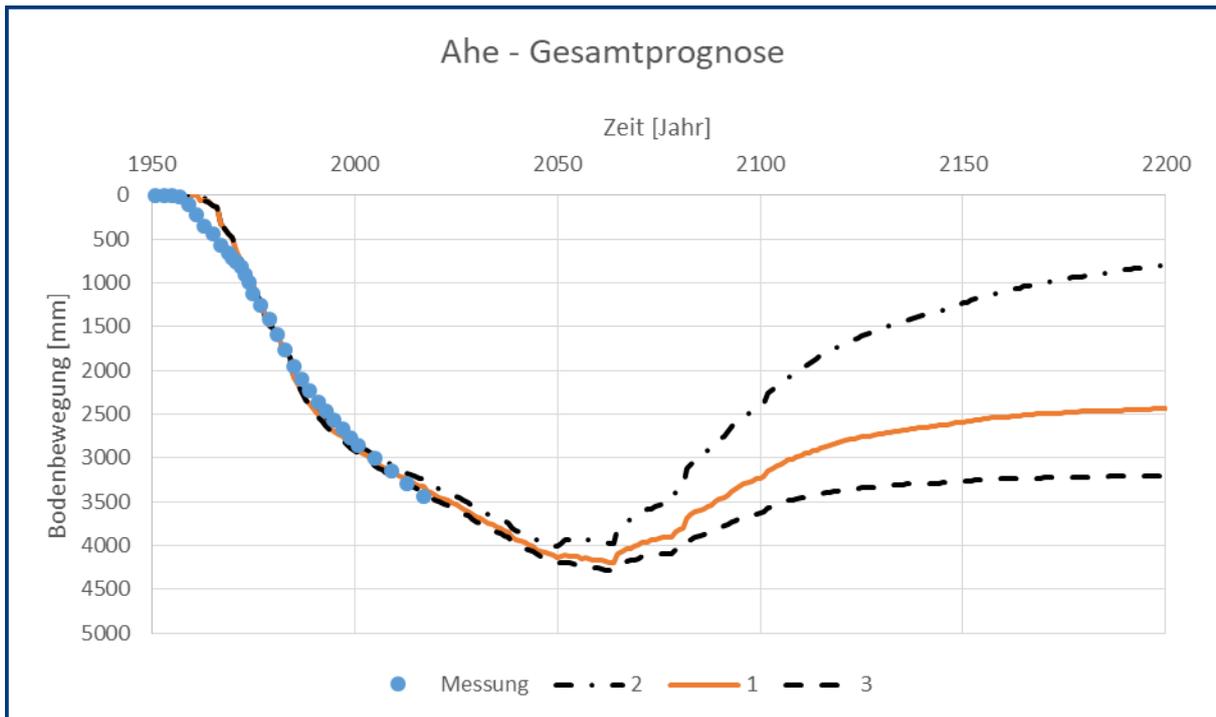


Abbildung 19 D-Settlement Ergebnisse Ahe, Min-/Max-Betrachtung

Durch die Variation von C_r innerhalb theoretisch möglicher Grenzen streuen die Ergebnisse der Setzungsprognose im Jahr 2200 um etwa 2400 mm. Eine Variation des C_r -Wertes hat im Zeitraum der bis heute gemessenen Setzungen hingegen nur einen sehr geringen Einfluss auf die Ergebnisse der Setzungsberechnung.

5.2.4 Automatische Kalibrierung

Das Programm D-Settlement beinhaltet die Option, die Eingangsparameter automatisch kalibrieren zu lassen. Dazu können Daten von gemessenen Setzungen importiert werden (siehe Abbildung 20 links), anhand derer dann ausgewählte Parameter (siehe Abbildung 20 rechts) durch iterative Berechnungen kalibriert werden.

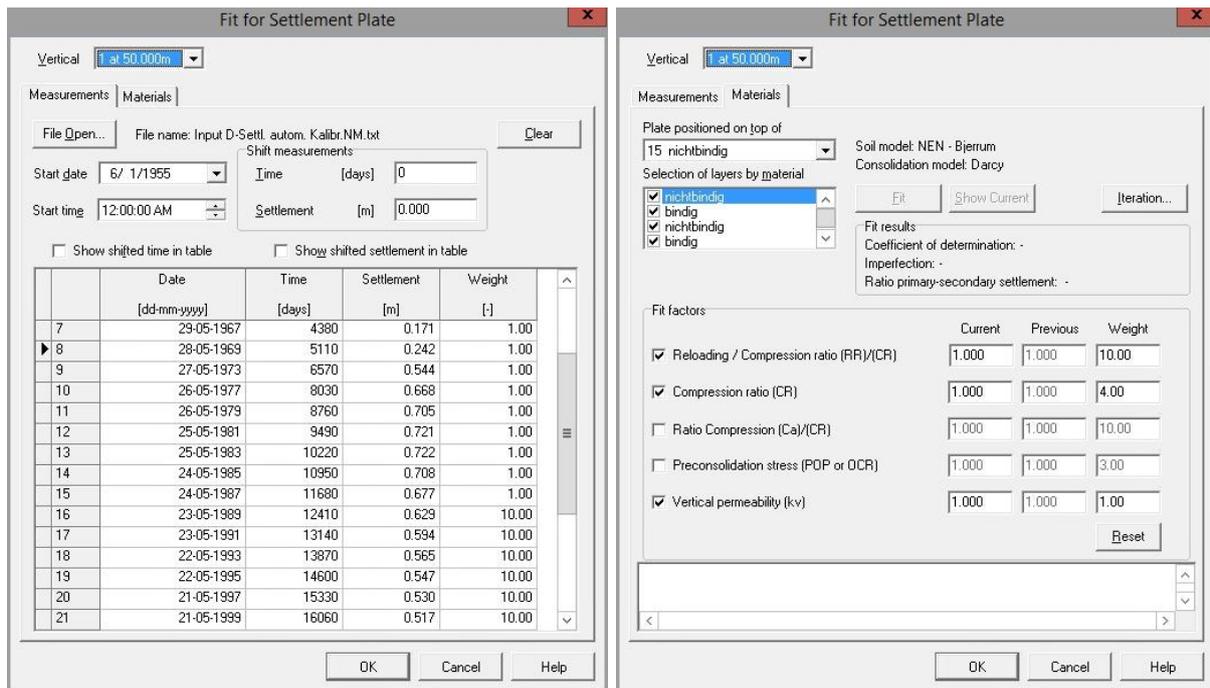


Abbildung 20 Eingabemaske Setzungen und automatische Kalibrierung

Weiter ist es bei der automatischen Kalibrierung erforderlich, Startwerte vorzugeben. Je passender diese Werte gewählt sind, desto schneller und auch besser wird die automatische Kalibrierung durchgeführt. Darüber hinaus können verschiedene Parameter auch unterschiedlich stark gewichtet werden.

Die Veränderung der variierten Eingangsparameter durch eine automatische Kalibrierung am Punkt Niedermerz sind in Abbildung 21 dargestellt. Dabei wird nach jedem Iterationsschritt angegeben, wie sich die Parameter durch die Kalibrierung im Vergleich zum vorherigen Schritt verändert haben.

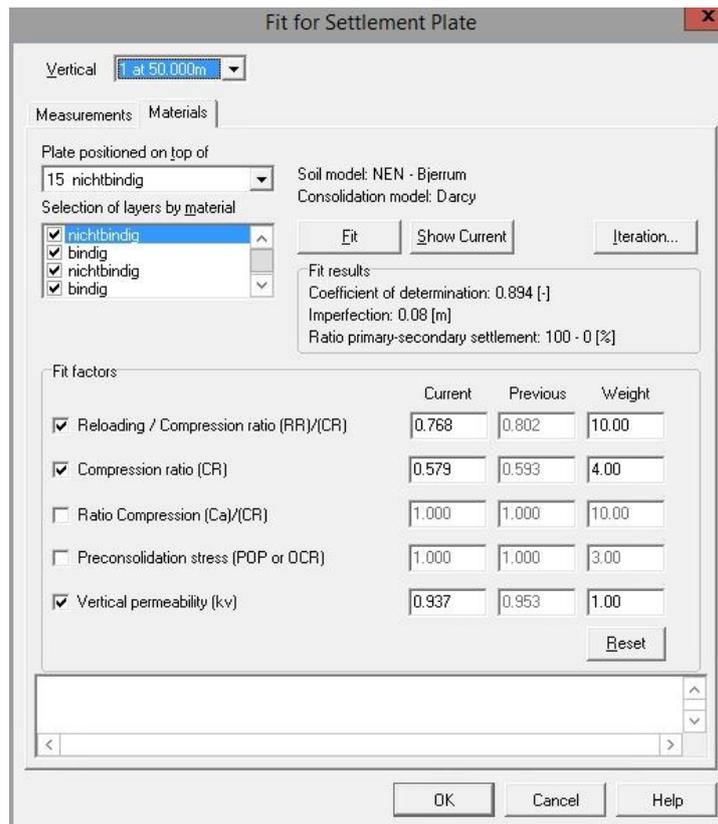


Abbildung 21 D-Settlement, Eingabemaske zur Definition der zu kalibrierenden Parameter und weiterer Kalibriereinstellungen nach durchgeführter Kalibrierung

Die Startwerte für die automatische Kalibrierung am Punkt Niedermerz sind in Tabelle 9 dargestellt. Es folgen in weiteren Spalten die Werte, die sich durch die automatische Kalibrierung (grau hinterlegt) und durch die vorherige manuelle Kalibrierung ergeben haben.

Tabelle 9 D-Settlement Parameter automatische Kalibrierung Niedermerz

Eingangswerte					
nichtbindige Schichten					
		Start	autom.	manuell	
Kompressionsbeiwert Erstbel.	C_c	0,01	0,00579	0,005	[-]
Kompressionsbeiwert Entl.	C_r	0,008	0,00356	0,004	[-]
Durchlässigkeit	k_f	drained	drained	drained	[m/s]
bindige Schichten					
		Start	autom.	manuell	
Kompressionsbeiwert Erstbel.	C_c	0,1	0,0579	0,09	[-]
Kompressionsbeiwert Entl.	C_r	0,066	0,0293	0,06	[-]
Durchlässigkeit	k_f	1,00E-10	9,37E-11	2,00E-11	[m/s]

Die Ergebnisse der automatischen Kalibrierung sind als Setzungsverlauf in Abbildung 22 zusammen mit dem Setzungsverlauf dargestellt, der sich auf Basis der manuellen Kalibrierung ergeben hatte.

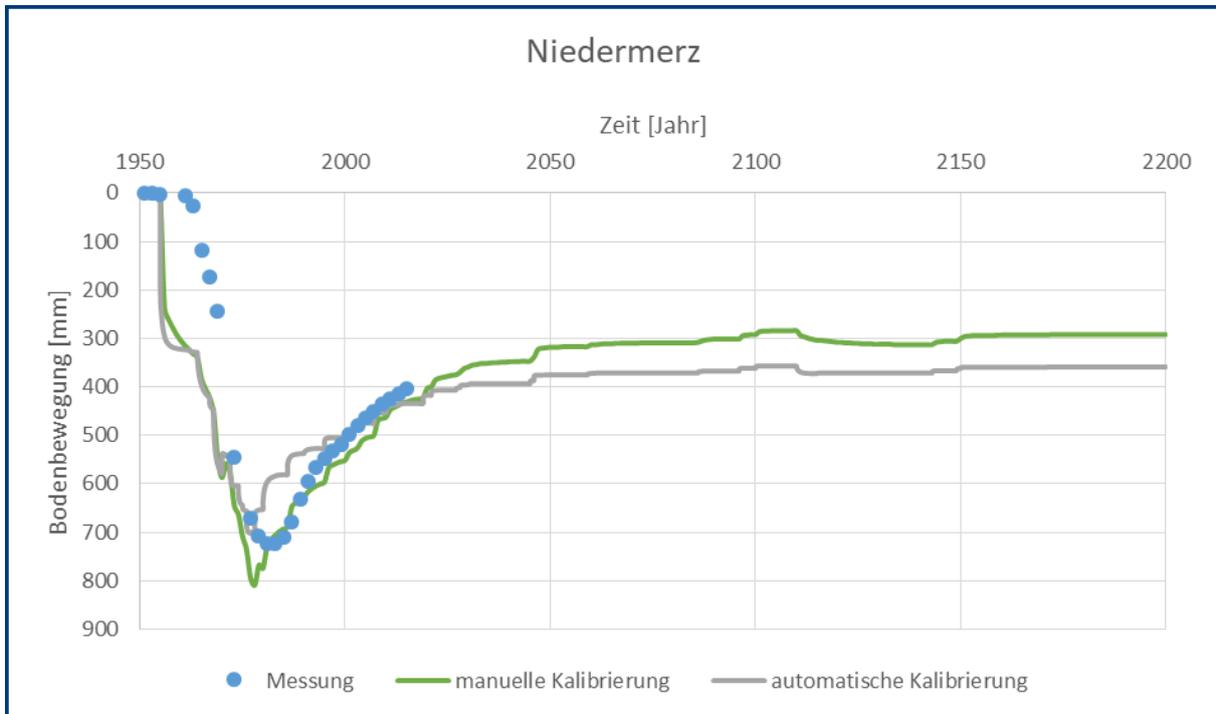


Abbildung 22 D-Settlement Ergebnisse der automatischen Kalibrierung Niedermerz

Es zeigt sich, dass mit der automatischen Kalibrierung eine schlechtere Übereinstimmung zwischen dem berechneten Verlauf und dem gemessenen Verlauf der Bodenbewegungen erzielt wird als durch die manuelle Kalibrierung.

Am Punkt Ahe wurde ebenfalls eine automatische Kalibrierung durchgeführt. Die Eingangswerte und die kalibrierten Werte sind in Tabelle 10, die berechneten Setzungen in Abbildung 23 dargestellt.

Tabelle 10 D-Settlement Parameter automatische Kalibrierung Ahe

Eingangswerte					
nichtbindige Schichten					
		Start	autom.	manuell	
Kompressionsbeiwert Erstbel.	C_c	0.01	0.00719	0.005	[-]
Kompressionsbeiwert Entl.	C_r	0.008	0.00143	0.002	[-]
Durchlässigkeit	k_f	drained			[m/s]
bindige Schichten					
		Start	autom.	manuell	
Kompressionsbeiwert Erstbel.	C_c	0.1	0.0719	0.17	[-]
Kompressionsbeiwert Entl.	C_r	0.066	0.0118	0.09	[-]
Durchlässigkeit	k_f	1.00E-10	1.16E-10	9.00E-12	[m/s]

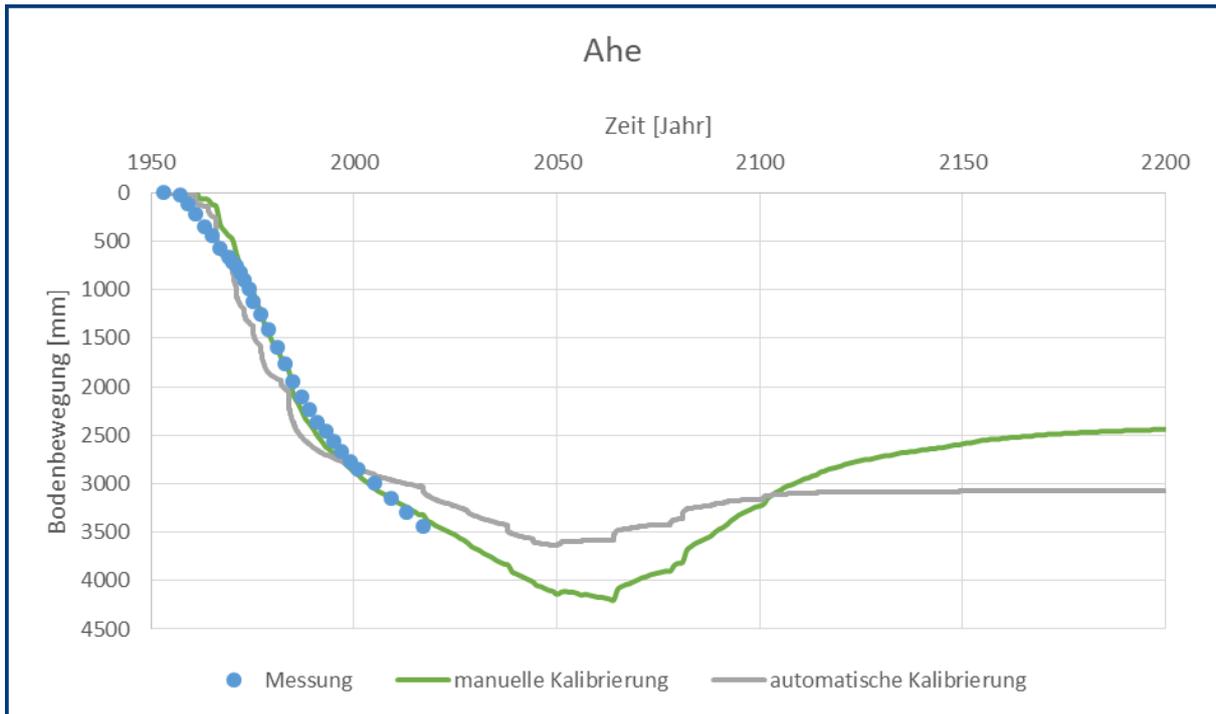


Abbildung 23 D-Settlement Ergebnisse der automatischen Kalibrierung Ahe

Auch hier ist im Rahmen der automatischen Kalibrierung wie beim Punkt Niedermerz eine schlechtere Übereinstimmung der berechneten Setzungen mit den Messwerten zu beobachten als bei der vorigen manuellen Kalibrierung durch ZAI.

5.3 Modflow

Modflow ist ein Open-Source-3D-Grundwasserströmungsprogramm des United States Geological Survey (USGS) auf Basis der Finite-Differenzen-Methode [7]. Es besteht aus einem Hauptprogramm und einer Reihe von unabhängigen Unterprogrammen in modularer Form, sogenannten Packages. Diese Packages werden teilweise ebenfalls vom USGS und teilweise von Drittanbietern zur Verfügung gestellt. Sie sind für unterschiedliche Funktionen wie zum Beispiel für die Definition von Drainagen, Brunnen, Zuflüssen, Grundwasserständen oder auch zur Berechnung von Setzungen verfügbar und können einzeln und unabhängig voneinander ausgewählt werden.

Die aktuelle Version ist Modflow 6. Da jedoch für die Bodenbewegungsprognose das *Subsidence and Aquifer-System Compaction Package (SUB-WT)* [3] verwendet wird und dieses neben anderen Packages in der aktuellen Version nicht unterstützt wird, wurde im Rahmen des Methodenvergleiches Bodenbewegungsprognose mit der Version Modflow-2005 gearbeitet.

Generell hat Modflow die Form eines Compilers, der einen Satz an Input-Textdateien verarbeitet, dessen Umfang in Abhängigkeit von den verwendeten Packages variiert. Die Ausgabe der Ergebnisse geschieht ebenfalls in Form von Textdateien. Zur Definition des Modells und sämtlicher Parameter sowie auch zur Darstellung der Ergebnisse ist es daher sinnvoll, zusätzlich eine Anwendung zur grafischen Ein- und Ausgabe zu verwenden. Im Rahmen des Methodenvergleiches wurde dazu als sogenanntes Graphical User Interface (GUI) das ebenfalls vom USGS angebotene Open-Source-Programm ModelMuse verwendet [8].

5.3.1 Grundlagen

Geometrische Modellierung

Der Schichtaufbau wird unabhängig von Packages definiert. Die einzelnen Schichten werden als Layer Groups bezeichnet und können aus einem oder mehreren einzelnen Layern bestehen.

Hydraulische Modellierung

Die hydraulischen Durchlässigkeiten der einzelnen Schichten werden über das sogenannte *Layer Property Flow Package (LPF)* definiert. Zur Definition der einzelnen zeitabhängigen Grundwasserstände in den verschiedenen Grundwasserleitern stehen verschiedene Packages zur Auswahl. Hier wurde das *Flow and Head Boundary Package (FHB)* verwendet und die Zeitschrittweite zu einem Jahr festgelegt.

Mechanische Modellierung

Über das SUB-WT Package erfolgen darüber hinaus die Eingabe der Sättigungswichte, der Feuchtwichte, der Kompressionsmächtigkeit eines Layers (muss programmspezifisch nicht mit der hydraulisch wirksamen Layermächtigkeit übereinstimmen), des Kompressionsmoduls für

Erst- sowie Ent- und Wiederbelastung, der Anfangsporenzahl, einer evtl. vorhandenen Auflast, einer Initialspannung und einer Anfangskonsolidierung. SUB-WT basiert auf dem Kompressionsmodell von Terzaghi und berücksichtigt dadurch eine Abhängigkeit der Steifigkeit von der Spannung.

Dabei sind folgende Eingangsparameter zur Definition der Setzungseigenschaften notwendig:

C_c	[-]	Kompressionsbeiwert Erstbelastung
C_r	[-]	Kompressionsbeiwert Ent- und Wiederbelastung
γ_r	[m]	Sättigungswichte
γ	[-]	Feuchtwichte
e_0	[kN/m ²]	Anfangsporenzahl

5.3.2 Niedermerz

Das Modell für den Punkt Niedermerz besteht aus 15 Schichten und damit 15 Layer Groups und hat eine Höhe von insgesamt 493,2 m. Das Modell, welches als quadratische Bodensäule modelliert ist, besitzt eine Grundfläche von 100 m x 100 m. Die einzelnen Layer Groups bestehen aus jeweils drei bis vier einzelnen Layern. Jeder Layer ist in 25 (5 x 5) quadratische Elemente aufgeteilt. In Abbildung 24 ist das Modell in gestauchter Form dargestellt, wobei das Raster bzw. die Elemententeilung am linken Rand nachvollzogen werden kann.

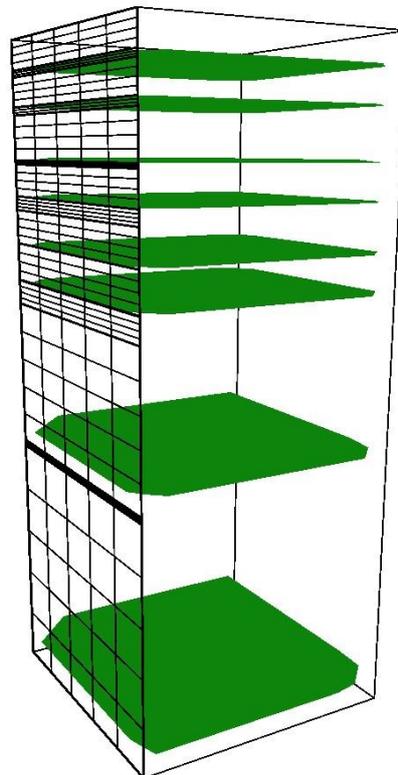


Abbildung 24 Modflow Modell Niedermerz, 100x100x493,2 m; Darstellung gestaucht

Zeitabhängige Grundwasserstände können den einzelnen Elementen durch Objekte zugewiesen werden, die innerhalb des Modells platziert werden. Diese Objekte sind in Abbildung 24 in grün dargestellt. Innerhalb eines Objektes können durch die Objekteigenschaft das FHB-

Package ausgewählt und die Zeitreihen mit den Wasserständen über „Copy and Paste“ eingefügt werden. In allen nichtbindigen Schichten werden so im jeweils untersten Layer der Layer Group die vorgegebenen zeitabhängigen Grundwasserstände definiert.

Kalibrierung

Im Rahmen der Kalibrierung wurden die Kompressionsbeiwerte C_c und C_r und die Durchlässigkeit k_f der bindigen Schichten variiert. Dazu wurden über 30 Modellvarianten gerechnet, um eine möglichst gute Übereinstimmung mit den Messwerten zu erreichen. Die dabei ermittelten Parameter und die Grenzen, innerhalb derer variiert wurde, sind in Tabelle 11 dargestellt. Die Ergebnisse der Berechnungen sowie der Vergleich mit den Messwerten sind in Abbildung 25 bis heute und in Abbildung 26 als Prognose bis ins Jahr 2200 dargestellt.

Tabelle 11 Modflow Parameter Niedermerz

Eingangswerte					
nichtbindige Schichten					
		min	gewählt	max	
Kompressionsbeiwert Erstbel.	C_c	0,008	0,011	0,015	[-]
Kompressionsbeiwert Entl.	C_r	0,007	0,0097	0,014	[-]
Durchlässigkeit	k_f	-	3154	-	[m/a]
		-	0,0001	-	[m/s]
bindige Schichten					
		min	gewählt	max	
Kompressionsbeiwert Erstbel.	C_c	0,04	0,09	0,1	[-]
Kompressionsbeiwert Entl.	C_r	0,01	0,044	0,06	[-]
Durchlässigkeit	k_f	0,0001	0,000147	0,00027	[m/a]
		3,17E-12	4,66E-12	8,56E-12	[m/s]

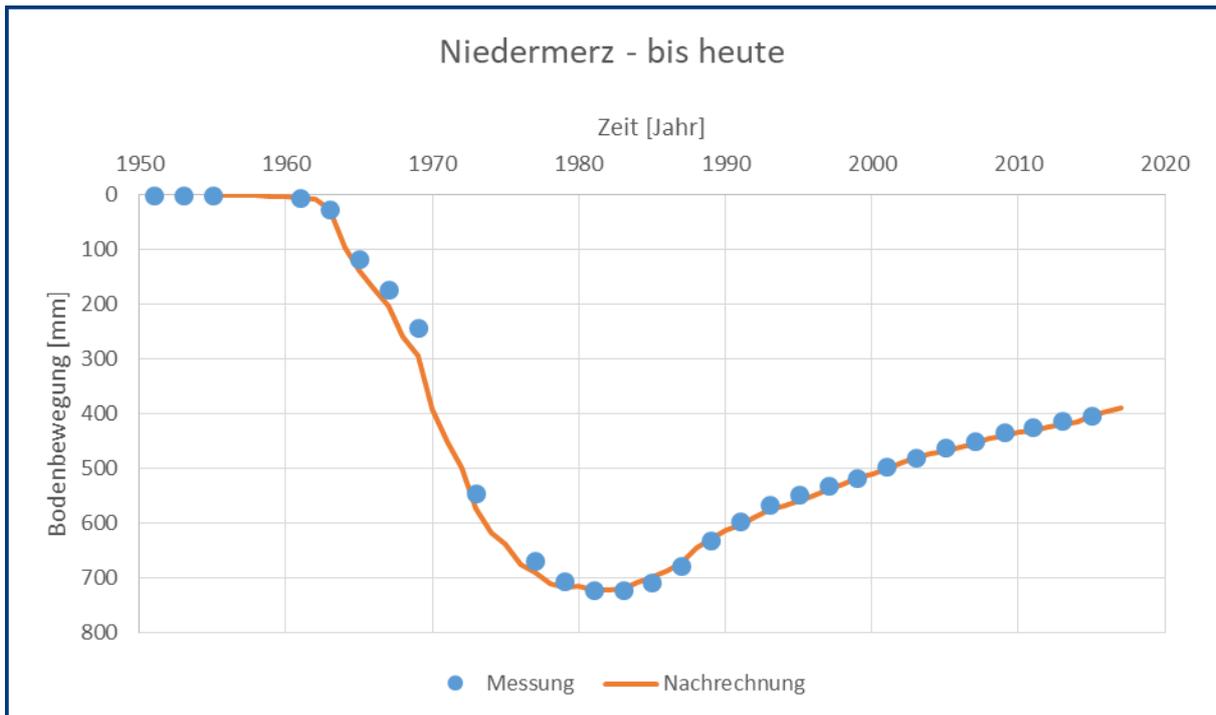


Abbildung 25 Modflow Ergebnisse Niedermerz bis heute

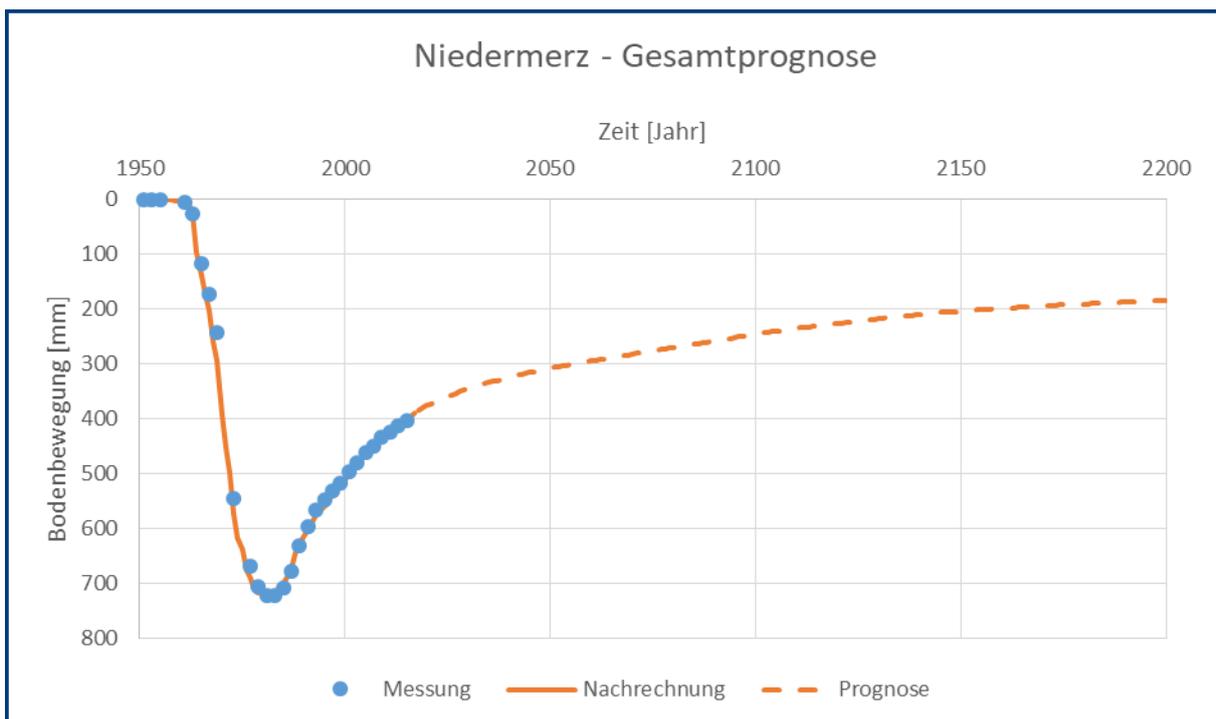


Abbildung 26 Modflow Ergebnisse Niedermerz, Prognose

Durch die Berechnung mit Modflow konnte der Verlauf der gemessenen Setzungen sehr gut nachgebildet werden.

Dabei gilt es jedoch anzumerken, dass für die sehr gute Übereinstimmung u.a. eine sehr niedrige Durchlässigkeit gewählt werden musste, die sich gegenüber den übrigen Anwendungen (Plaxis, D-Settlement) um etwa eine Zehnerpotenz unterscheidet.

Min-/Max-Betrachtung

Im Rahmen einer Min-/Max-Betrachtung wurde das Steifigkeitsverhältnis von Erst- und Wiederbelastung variiert. Die Variation bezog sich dabei auf die Kompressionsbeiwerte C_r für Ent- und Wiederbelastung der nichtbindigen und bindigen Schichten. Der Kompressionsbeiwert C_c für Erstbelastung wurde konstant gehalten. Die variierten Steifigkeitsverhältnisse sind in Tabelle 12 dargestellt, die Ergebnisse der Min-/Max-Betrachtung in Abbildung 27.

Tabelle 12 Min-/Max-Betrachtung für den Punkt Niedermerz

Fall	Verhältnis C_r/C_c [-]		resultierende Bodenbewegung [mm]			Beschreibung
	nichtbindig	bindig	2015	2100	2200	
2	1,00	1,00	270	-14,96	-144	Max. theoretische Hebung
1	0,88	0,49	399	267	218	Prognose
3	0,20	0,33	659	577	546	Min. theoretische Hebung

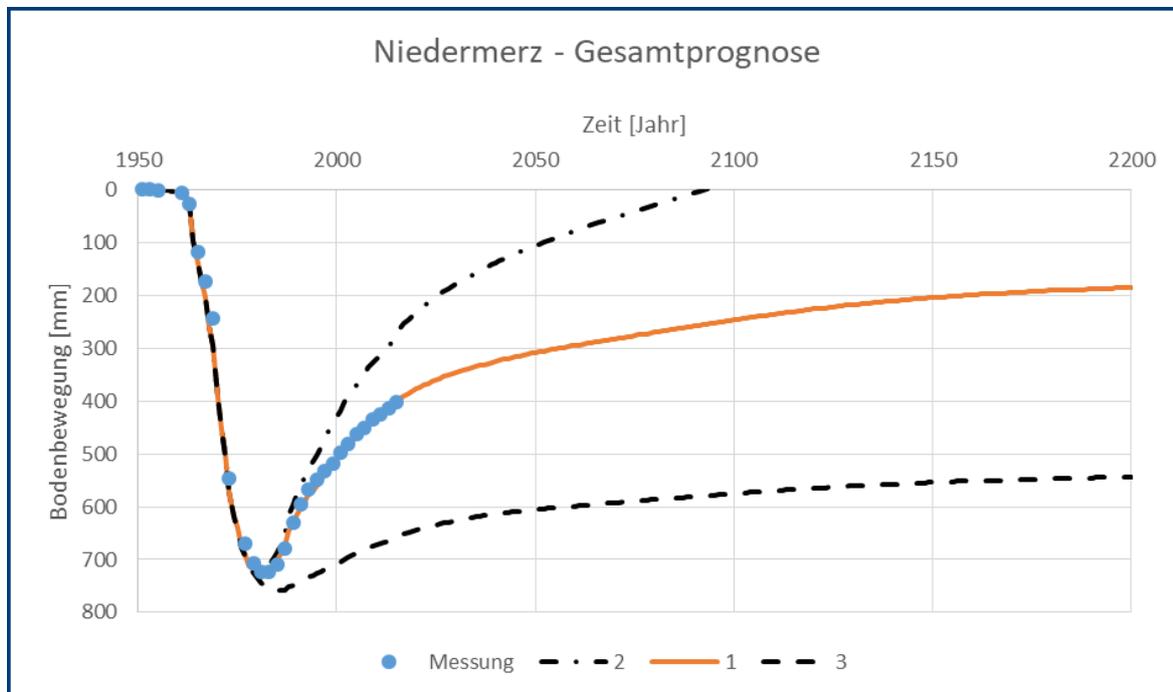


Abbildung 27 Modflow Ergebnisse Niedermerz, Min-/Max-Betrachtung

Da im Rahmen der Variation des Steifigkeitsverhältnisses nur der C_r Wert verändert wurde, zeigt sich die Auswirkung der Variation wie zu erwarten im Wesentlichen im Bereich der Bodenhebungen. Bei der Maximalbetrachtung mit $C_r = C_c$ sind die Hebungen größer als die vorher eingetretenen Setzungen. Dies begründet sich damit, dass die vom LANUV prognostizierten und zur Verfügung gestellten Grundwasserstände in den Grundwasserleitern 6B, 2-5 und 02-09 nach Ende der Sumpfungsmaßnahme höher liegen als im vorbergbaulichen Zustand (siehe auch [1]). Würden alle Grundwasserleiter nach Abschluss der Maßnahmen wieder ihren Ausgangswasserstand erreichen, würden sich mit einem Steifigkeitsverhältnis von $C_r = C_c$ alle Setzungen rechnerisch exakt ausgleichen.

Weiter ist zu beobachten, dass zwischen minimalem und maximalem Steifigkeitsverhältnis ein Unterschied in der Prognose im Jahr 2200 von über 550 mm liegt.

5.3.3 Ahe

Das Modell für den Punkt Ahe besteht aus 17 Schichten und damit 17 Layer Groups, hat eine Höhe von 1531,89 m und ist in Abbildung 28 dargestellt.

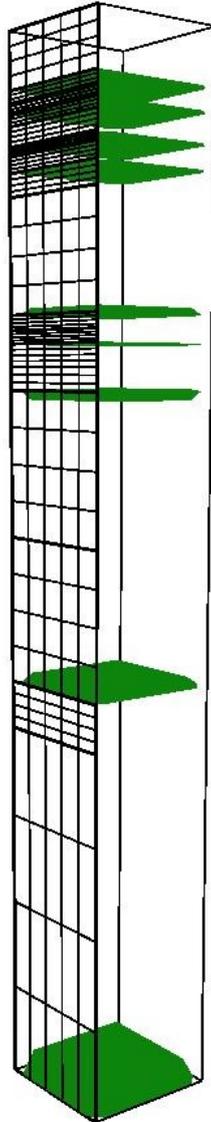


Abbildung 28 Modflow Modell Ahe, 100x100x1531,89 m; Darstellung gestaucht

Wie zuvor wurden in allen nichtbindigen Schichten zeitabhängige Grundwasserstände definiert.

Zunächst wurden auch mit Modflow die am Punkt Niedermerz kalibrierten Parameter übernommen und eine Gesamtprognose berechnet, die in Abbildung 16 dargestellt ist. Eine zufriedenstellende Übereinstimmung mit den Messwerten konnte dabei nicht erreicht werden.

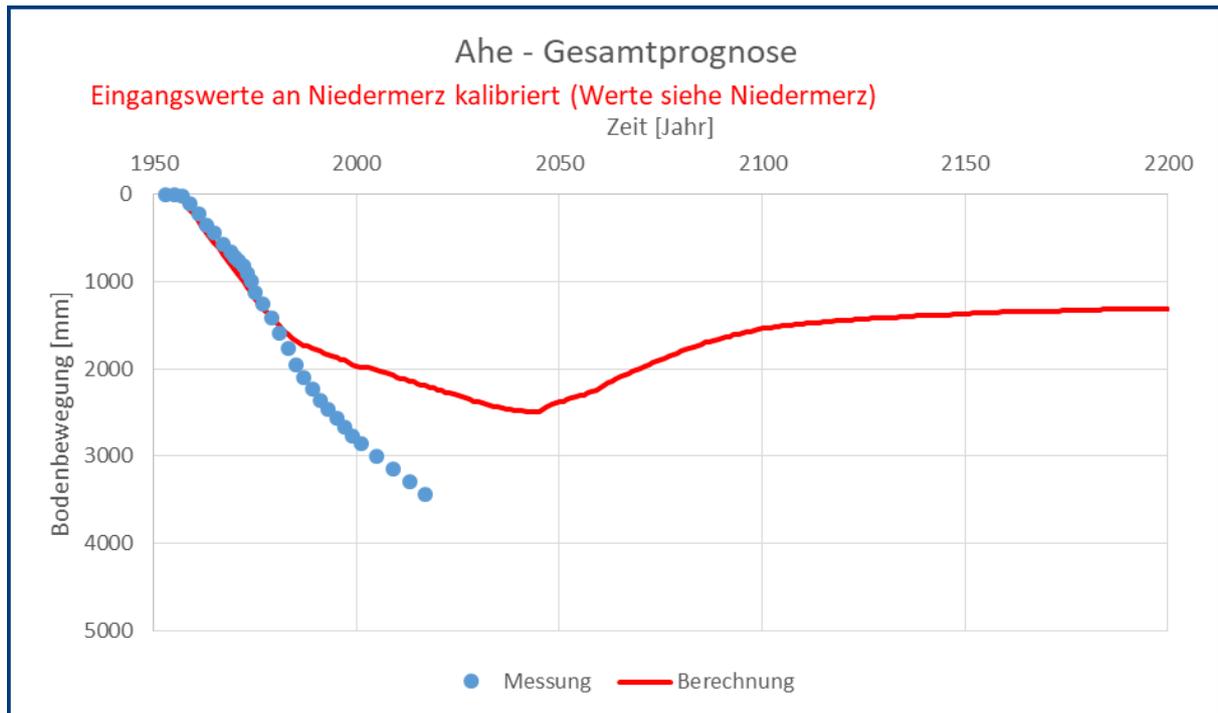


Abbildung 29 Modflow Ergebnisse Ahe - Eingangsparameter Niedermerz

Kalibrierung

Im Rahmen der Kalibrierung wurden die Kompressionsbeiwerte C_c und C_r und die Durchlässigkeit k_f der bindigen Schichten variiert. Dazu wurden über 40 Modellvarianten gerechnet, um eine möglichst gute Übereinstimmung mit den Messwerten zu erreichen. Die dabei ermittelten Parameter und die Grenzen innerhalb derer variiert wurde sind in Tabelle 13 dargestellt. Die Ergebnisse der Berechnungen sowie der Vergleich mit den Messwerten sind in Abbildung 30 bis heute und in Abbildung 31 als Prognose bis ins Jahr 2200 dargestellt.

Tabelle 13 Modflow Parameter Ahe

Eingangswerte					
nichtbindige Schichten					
		min	gewählt	max	
Kompressionsbeiwert Erstbel.	C_c	0,005	0,005	0,025	[-]
Kompressionsbeiwert Entl.	C_r	0,004	0,004	0,013	[-]
Durchlässigkeit	k_f	-	3154	-	[m/a]
		-	0,0001	-	[m/s]
bindige Schichten					
		min	gewählt	max	
Kompressionsbeiwert Erstbel.	C_c	0,04	0,3	0,5	[-]
Kompressionsbeiwert Entl.	C_r	0,01	0,25	0,25	[-]
Durchlässigkeit	k_f	0,00005	0,000175	0,0004	[m/a]
		1,59E-12	5,55E-12	1,27E-11	[m/s]

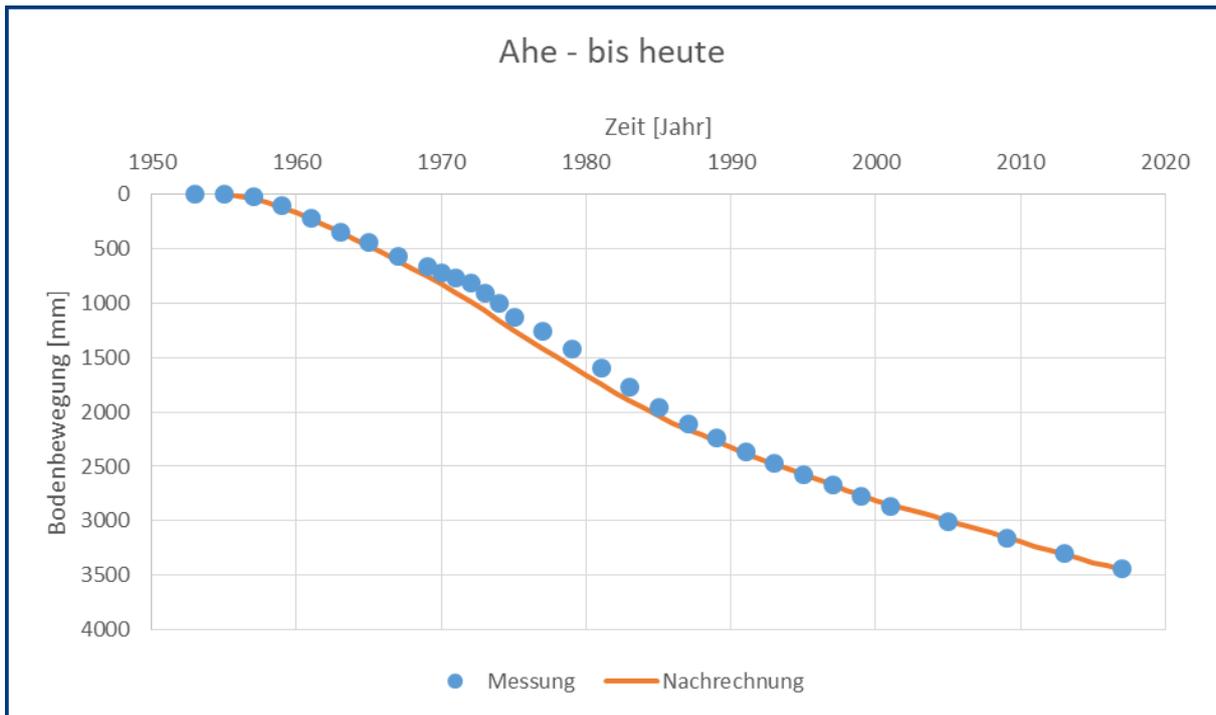


Abbildung 30 Modflow Ergebnisse Ahe bis heute

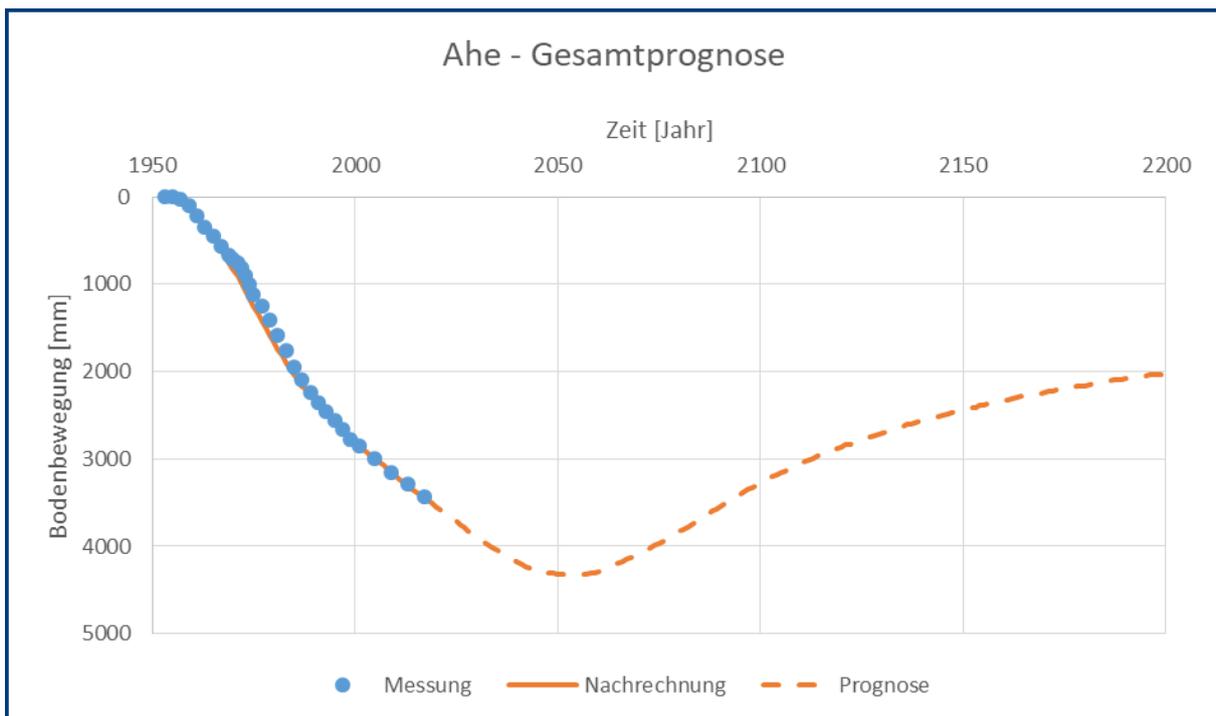


Abbildung 31 Modflow Ergebnisse Ahe, Prognose

Durch die Berechnungen mit Modflow konnte der gemessene Setzungsverlauf sehr gut nachgebildet werden. Lediglich in den Jahren 1965 bis 1990 sind leichte Abweichungen nach unten zu erkennen.

Dabei gilt es jedoch anzumerken, dass für die sehr gute Übereinstimmung Eingangsparameter gewählt werden mussten, die aus bodenmechanischer Sicht teilweise schon an der Grenze des noch möglichen Wertebereichs liegen.

Min-/Max-Betrachtung

Im Rahmen einer Min-/Max-Betrachtung wurde das Steifigkeitsverhältnis von Erst- und Wiederbelastung variiert. Die Variation bezog sich dabei auf die Kompressionsbeiwerte C_r für Ent- und Wiederbelastung der nichtbindigen und bindigen Schichten. Der Kompressionsbeiwert C_c für Erstbelastung wurde konstant gehalten. Die variierten Steifigkeitsverhältnisse sind in Tabelle 14 dargestellt, die Ergebnisse der Min-/Max-Betrachtung in Abbildung 32.

Tabelle 14 Min-/Max-Betrachtung für den Punkt Ahe

Fall	Verhältnis C_r/C_c [-]		resultierende Bodenbewegung [mm]			Beschreibung
	nichtbindig	bindig	2015	2100	2200	
2	1,00	1,00	3370	3110	1620	Max. theoretische Hebung
1	0,80	0,83	3380	3280	2020	Prognose
3	0,2	0,33	3390	3930	3460	Min. theoretische Hebung

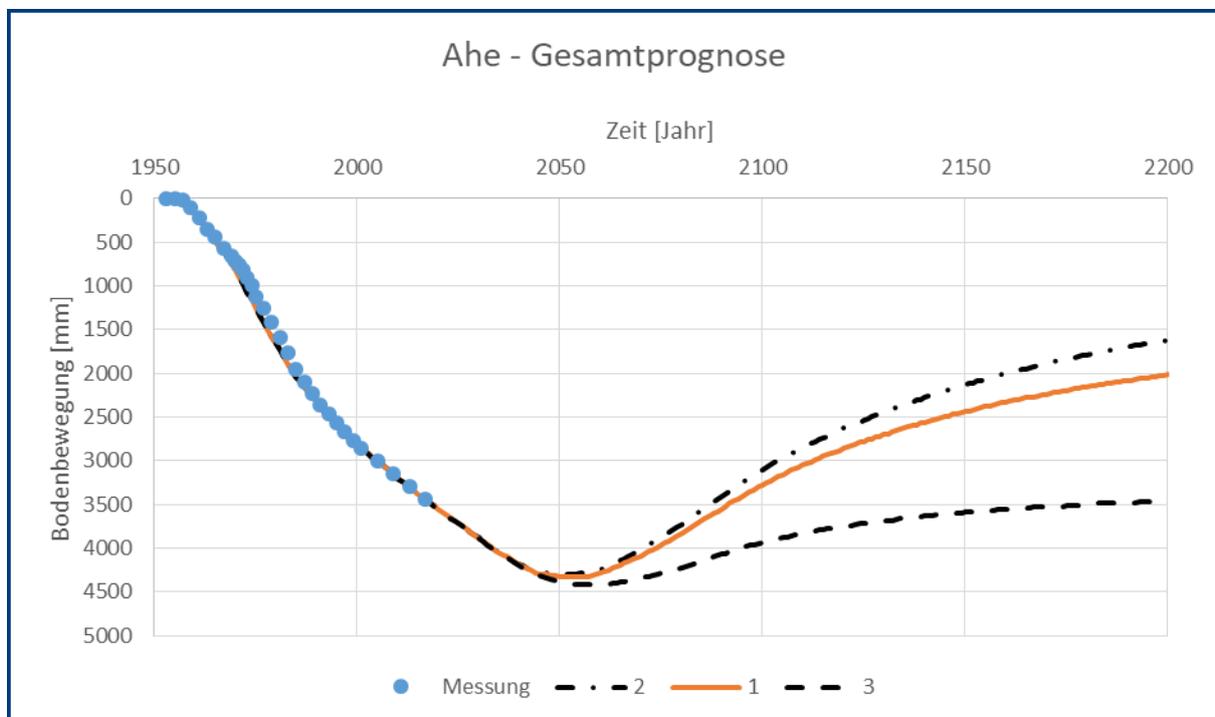


Abbildung 32 Modflow Ergebnisse Ahe, Min-/Max-Betrachtung

Da im Rahmen der Variation des Steifigkeitsverhältnisses nur der C_r Wert verändert wurde, zeigt sich die Auswirkung der Variation wie zu erwarten im Wesentlichen im Bereich der Bodenhebungen. Dadurch, dass die Steifigkeitsverhältnisse schon bei der Prognose sehr hoch waren, hat eine Erhöhung des Steifigkeitsverhältnisses C_r/C_c auf 1,0 eine deutlich geringere Auswirkung auf die Bodenhebung als bei den anderen Programmen.

5.4 Gegenüberstellung

Im Folgenden werden die mit den drei Softwarelösungen Plaxis (vgl. Abschnitt 5.1), D-Settlement (vgl. Abschnitt 5.2) und Modflow (vgl. Abschnitt 5.3) erhaltenen Ergebnisse gegenübergestellt. Dabei werden zusätzlich auch die Ergebnisse nach Ziegler und Aulbach (vgl. [1]) mit dargestellt.

In diesem Zusammenhang gilt es anzumerken, dass die verwendeten Eingangsparameter nicht eins zu eins verglichen werden können, da z.B. in Plaxis für die nichtbindigen Böden das Hardening Soil Stoffgesetz verwendet wurde, welches ebenso wie die Methode nach Ziegler und Aulbach auf schichtspezifischen Steifigkeiten beruht. Den Vergleichsberechnungen mit D-Settlement und Modflow liegen hingegen Stoffgesetze zugrunde, die auf der Verwendung von Kompressionsmoduln basieren. Dabei gilt es zu beachten, dass weder die eine noch die andere Vorgehensweise im vorliegenden Anwendungsfall pauschal als besser oder schlechter bewertet werden kann. Mit beiden Methoden können – vorausgesetzt auch die übrigen programmspezifischen Formulierungen bilden das Gesamtverhalten zutreffend ab – gleich gute Ergebnisse für die vorliegenden Randbedingungen erzielt werden, wie die nachfolgenden Gegenüberstellungen der Ergebnisse insbesondere von ZAI und Modflow zeigen.

5.4.1 Niedermerz

Die mit den drei Softwarelösungen und der Methode nach Ziegler und Aulbach (ZAI) erhaltenen Berechnungsergebnisse sind für den Punkt Niedermerz in Abbildung 33 dargestellt.

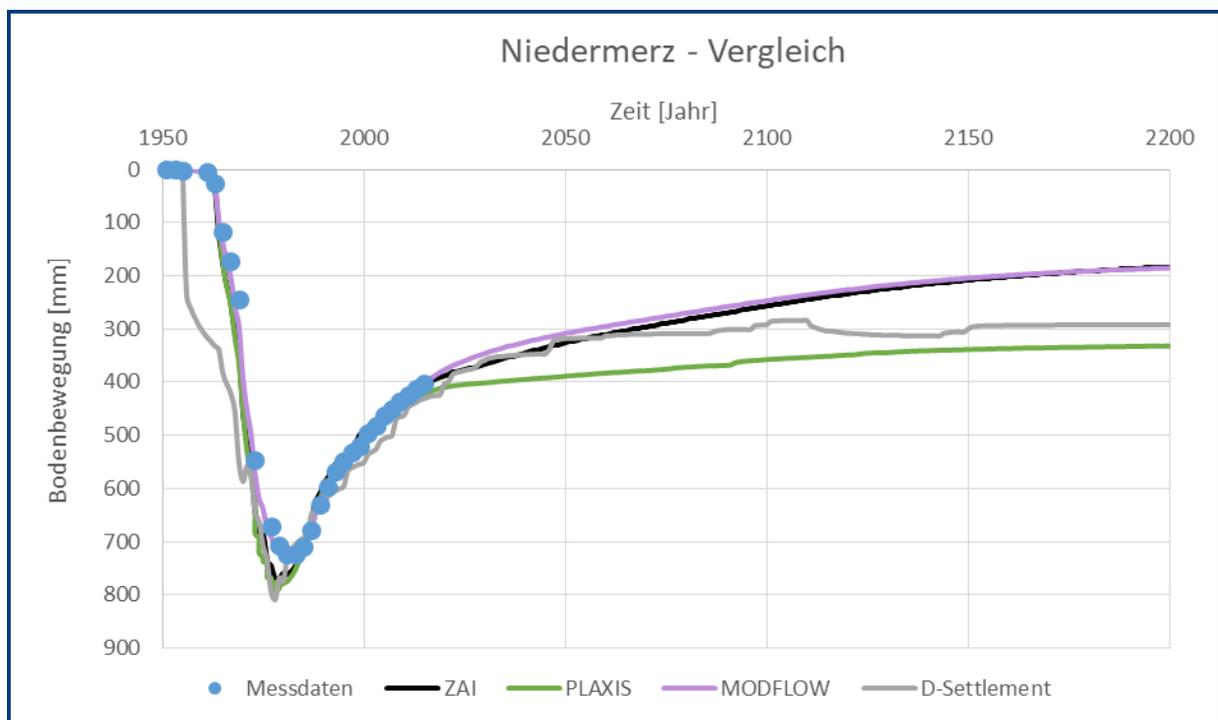


Abbildung 33 Vergleich der Ergebnisse Niedermerz

Es zeigt sich, dass mit D-Settlement (graue Kurve) keine zufriedenstellende Nachrechnung der gemessenen Bodenbewegungen möglich ist und der berechnete Verlauf zudem von

Sprüngen geprägt ist, die aus der begrenzten Anzahl möglicher hydraulischer Randbedingungen resultieren.

Mit Plaxis (grüne Kurve) lassen sich die gemessenen Bodenbewegungen über weite Strecken gut abbilden, allerdings gibt es bei der Darstellung der gegenwärtigen Zeiträume zunehmend Abweichungen und die weitere Prognose verläuft relativ flach. Dies resultiert aus der programminternen Beschränkung des Steifigkeitsverhältnisses bei Be- und Entlastung.

Die beste Übereinstimmung zwischen den Messwerten und der Nachrechnung wird mit der Methode nach Ziegler und Aulbach (schwarze Linie 1) und mit Modflow (lila Linie 1) erzielt, wobei mit Modflow das Verhalten um das Setzungsmaximum besser abgebildet wird. Bezüglich der weiteren Prognose ergeben sich mit beiden Lösungen ausgehend von den letzten Jahren und Messdaten stetige Verläufe (im Gegensatz zu Plaxis), die sich nur geringfügig unterscheiden.

Zusätzlich zu den Nachrechnungs- bzw. Prognoseergebnissen sind in Abbildung 34 auch die Ergebnisse der Min-/Max-Betrachtung dargestellt (Linien 2 und 3).

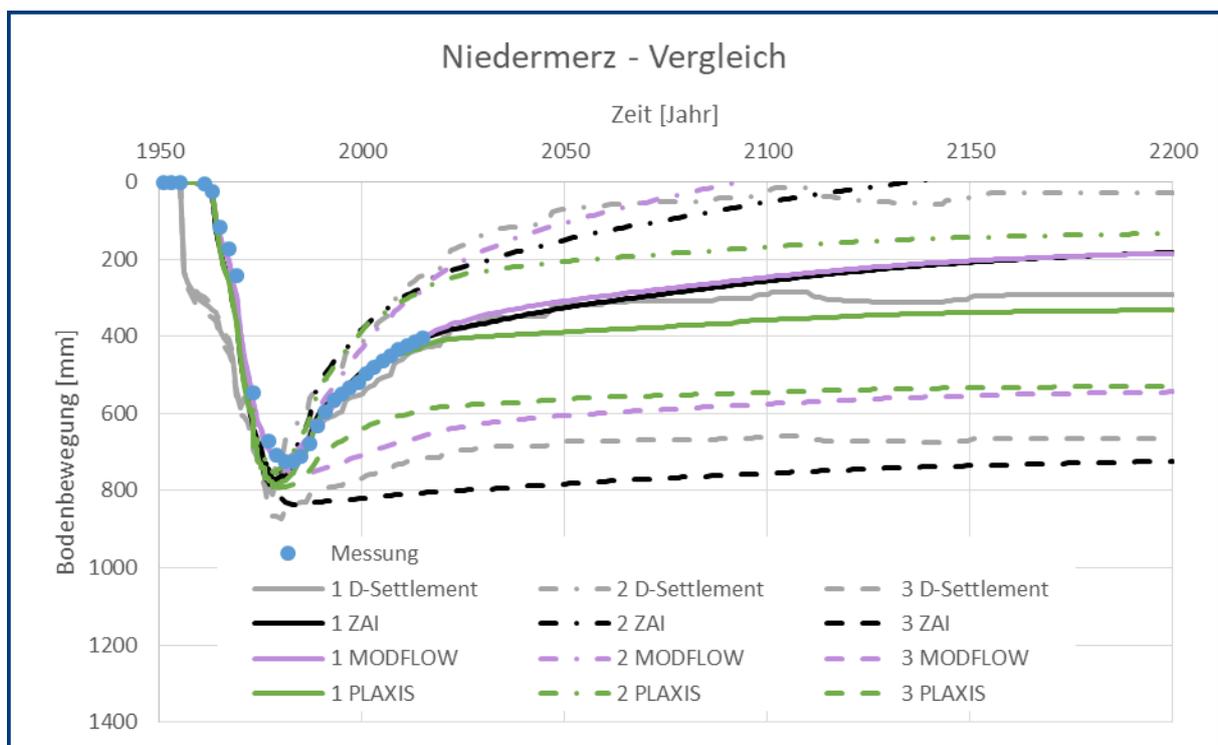


Abbildung 34 Vergleich der Ergebnisse Niedermerz, Min-/Max-Betrachtung

Der Vergleich zeigt, dass sämtliche Prognosen innerhalb der Grenzwertbetrachtungen liegen. Weiter ist zu erkennen, dass die möglichen Streuweiten zwar nach oben und unten gegeneinander verschoben sind, sich die Differenzen aber in der gleichen Größenordnung bewegen. Lediglich aus den Berechnungen mit Plaxis resultiert eine deutlich kleinere Spannweite, was auf die programminternen Restriktionen zurückzuführen ist. Dass bei den Grenzwertbetrachtungen mit Modflow und ZAI Hebungen über das Ausgangsniveau hinaus erhalten werden, resultiert aus den vorgegebenen Grundwasserganglinien, die am Ende der Sumpfungsmaßnahmen teilweise höher liegen als im vorbergbaulichen Zustand.

5.4.2 Ahe

Die für den Punkt Ahe mit den drei Softwarelösungen und der Methode nach Ziegler und Aulbach (ZAI) erhaltenen Berechnungsergebnisse sind in Abbildung 35 dargestellt.

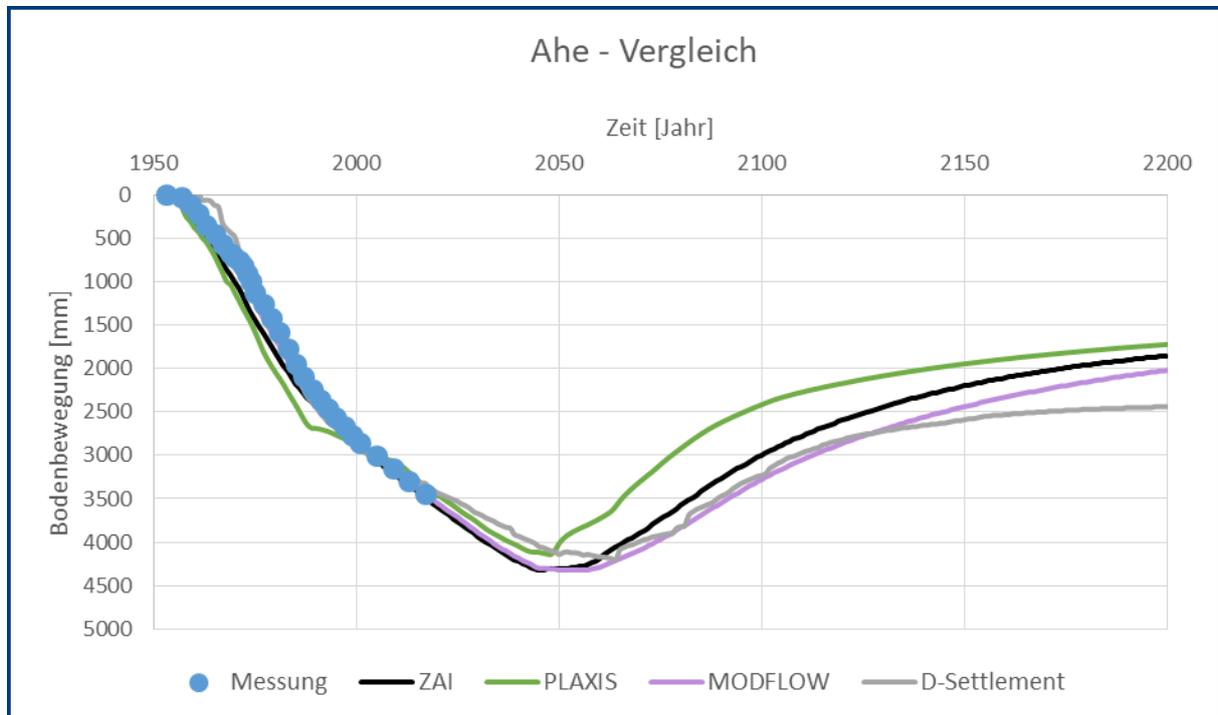


Abbildung 35 Vergleich der Ergebnisse Ahe

Es ist zu erkennen, dass die gemessenen Bodenbewegungen weder mit Plaxis (grüne Kurve) noch mit D-Settlement (graue Kurve) zufriedenstellend nachgerechnet werden können und sich insbesondere deutlich abweichende Neigungen der Kurven ergeben.

Eine sehr gute Abbildung des gemessenen Verlaufs ist hingegen wieder mit der Methode nach Ziegler und Aulbach (schwarze Kurve) und mit Modflow (lila Kurve) möglich. Bei der weiteren Prognose ergeben sich mit ZAI dann etwas früher wieder Hebungen als mit Modflow, die Ergebnisse im Jahr 2200 sind aber wieder nahezu gleich.

In Abbildung 36 sind zusätzlich auch die Ergebnisse der Min-/Max-Betrachtung aller Programme dargestellt.

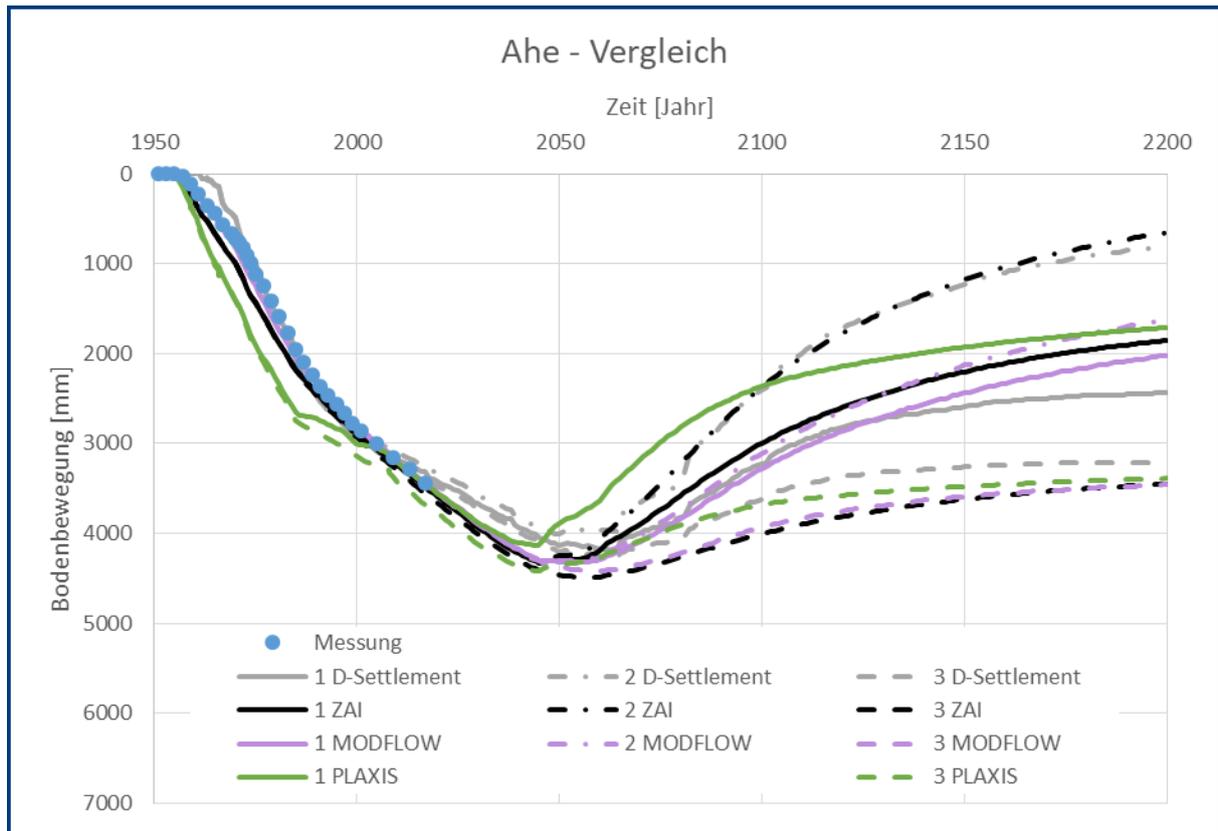


Abbildung 36 Vergleich der Ergebnisse Ahe, Min-/Max-Betrachtung

Im Gegensatz zum Punkt Niedermerz liegen hier die Prognosen nicht generell innerhalb aller Grenzwertbetrachtungen. Zum einen liegt die Plaxis-Prognose (grüne Linie) in weiten Abschnitten oberhalb der übrigen Maximalwertbetrachtungen. Zum anderen liegt auch die Maximalwertbetrachtung mit Modflow (lila strich-punktierte Linie) teilweise unter der ZAI-Prognose (schwarze Linie) und auch nur knapp oberhalb der eigenen Modflow-Prognose (lila Linie). Letzteres begründet sich damit, dass für die zutreffende Abbildung der gemessenen Bodenbewegungen mit Modflow teilweise Eingangsparemeter gewählt werden mussten, die bereits sehr nahe an den theoretisch möglichen Grenzen liegen. Der ZAI-Prognose liegen hingegen Eingangsparemeter zugrunde, die aus bodenmechanischer Sicht wahrscheinlicher erscheinen, wodurch sich dann bei der Min-Max-Betrachtung eine größere Variations- bzw. Streuweite ergibt.

6 Kriechen und hydraulisch-mechanische Kopplung

In einem zweiten Schritt wurden schließlich die gemäß Methodenrecherche (vgl. Abschnitt 3 bzw. [2]) als relevant vermuteten Einflüsse aus Kriechen und hydraulisch-mechanischer Kopplung untersucht.

Dabei gilt es zu beachten, dass mögliche Kriecheffekte ausschließlich in bindigen Schichten auftreten können. Weiter kann sich auch die Reduzierung der Durchlässigkeit infolge von Setzungen, also die hydraulisch-mechanische Kopplung, nur in den bindigen Schichten in einer theoretisch relevanten Größenordnung auswirken. Die nichtbindigen Schichten sind hingegen so durchlässig, dass sich in diesen selbst bei spürbarer Reduzierung der Durchlässigkeit sämtliche Setzungen sofort bzw. immer noch innerhalb der maßgebenden Zeitschrittweite von 1 Jahr einstellen.

Wie zuvor wurden je Software-Lösung die Punkte Niedermerz und Ahe betrachtet. Die erhaltenen Ergebnisse werden nachfolgend erläutert. Eine Gegenüberstellung der erhaltenen Ergebnisse erfolgt in Abschnitt 6.4.

6.1 Plaxis

In Ergänzung der bereits unter Abschnitt 5.1 beschriebenen Modellierungen für die Punkte Niedermerz und Ahe wurden mit Plaxis zusätzlich die Einflüsse des Kriechens bzw. der hydraulisch-mechanischen Kopplung auf die Prognoseergebnisse untersucht.

6.1.1 Kriechen

Zur Bewertung der Kriechkomponente auf die Hebungsprognose wurde in Plaxis das „Soft Soil Creep“-Materialmodell für die bindigen Böden herangezogen. Dieses Materialmodell stellt eine Ergänzung des „Soft Soil“-Modells dar und kann über den Materialparameter C_α auch die rein zeitabhängige Deformation des Bodens abbilden (vgl. detaillierte Beschreibung des Modells im Plaxis-Handbuch [4]).

Es ist dabei anzumerken, dass der Kriechterm zur Berechnung der Deformationsrate erst dann aktiv wird, wenn die Konsolidierung abgeschlossen ist und damit keine Porenwasserüberdrücke in einer Schicht mehr vorhanden sind. Außerdem hängt die Kriechrate vom Überkonsolidierungsgrad des Bodens ab und ist für normalkonsolidierte Böden deutlich höher als für überkonsolidierte.

Für die Abschätzung des Kriechbeiwerts C_α wurde folgende Näherung für anorganische Tone aus dem Grundbau-Taschenbuch [3] herangezogen:

$$C_\alpha \approx (0,04 \pm 0,01) \cdot C_c.$$

Für die ersten Berechnungen wurden die gemäß Abschnitt 5.1 rückgerechneten Materialparameter um den Kriechbeiwert gemäß obiger Formel ergänzt. Die so ermittelten Ergebnisse sind

in Abbildung 37 für den Punkt Niedermerz und in Abbildung 38 für den Punkt Ahe zusammengestellt. In den beiden Abbildungen sind neben den Messdaten die Kurven ohne Berücksichtigung des Kriechens in orange dargestellt. Außerdem finden sich unter dem Legendeneintrag „Kriechen 1“ die Verformungsprognosen mit Berücksichtigung des Kriechens – diese wurden durch das alleinige „Aktivieren“ des Kriechbeiwerts C_α berechnet. Die mit „Kriechen 1, kalibriert“ bezeichneten Kurven wurden unter Aktivierung des Kriechterms mit nochmals an den Messdaten kalibrierten Eingabeparametern (vgl. „Mechanische Modellierung“ in Abschnitt 5.1.1) erzielt. Dabei wurden sowohl für die bindigen als auch die nichtbindigen Schichten die Steifigkeitsparameter angepasst.

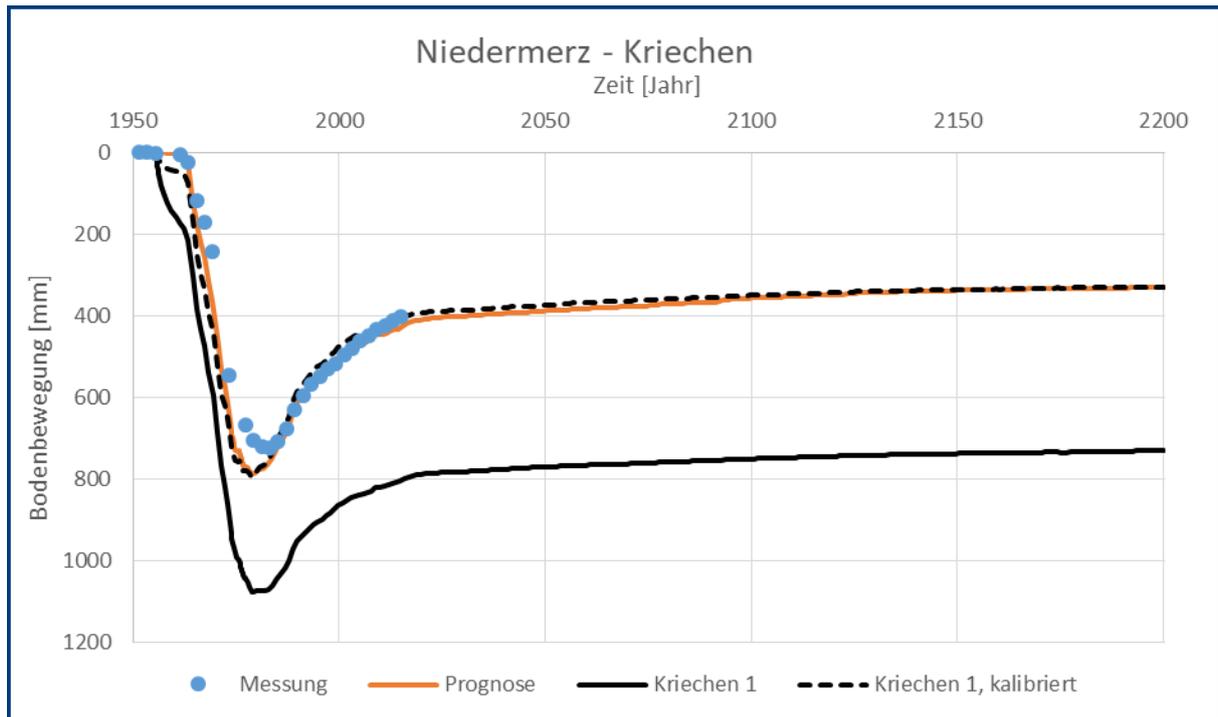


Abbildung 37 Plaxis-Ergebnisse Niedermerz, Prognose unter Berücksichtigung des Kriechens

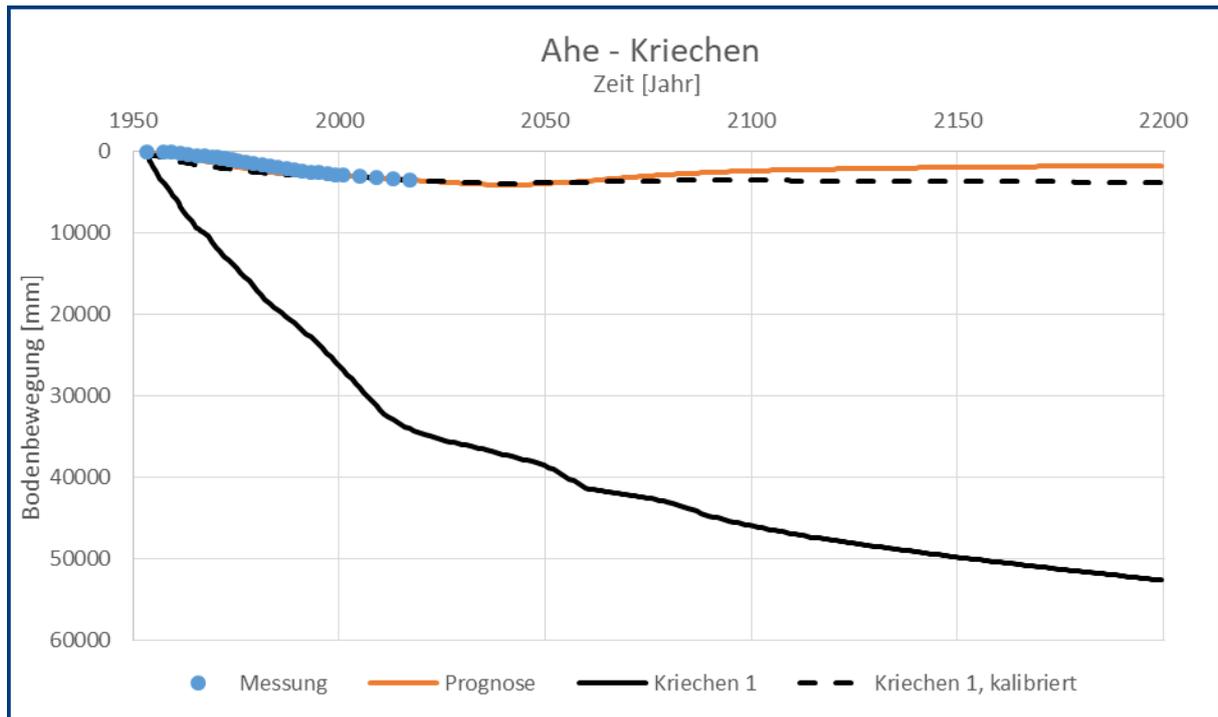


Abbildung 38 Plaxis-Ergebnisse Ahe, Prognose unter Berücksichtigung des Kriechens

Für den Punkt Niedermerz und insbesondere für den Punkt Ahe wird deutlich, dass der Kriecheinfluss ohne weitere Kalibrierung zu unsinnigen Ergebnissen führt. Dies liegt u.a. daran, dass die Kriechverformungen im Modell erst mit Beginn der Simulation auftreten können, was aber i.d.R. nicht mit der Realität übereinstimmt. Denn tatsächlich haben schon lange vorher Kriechverformungen aber unter Eigengewicht bereits auskonsolidierten Bodens stattgefunden.

Dieser Effekt wird exemplarisch in Abbildung 39 für den Punkt Niedermerz verdeutlicht. Daraus geht hervor, um welches Maß der Boden kriecht, selbst wenn keine Änderung des Grundwasserstandes und damit auch keine Änderung der setzungserzeugenden effektiven Spannungen eintritt.

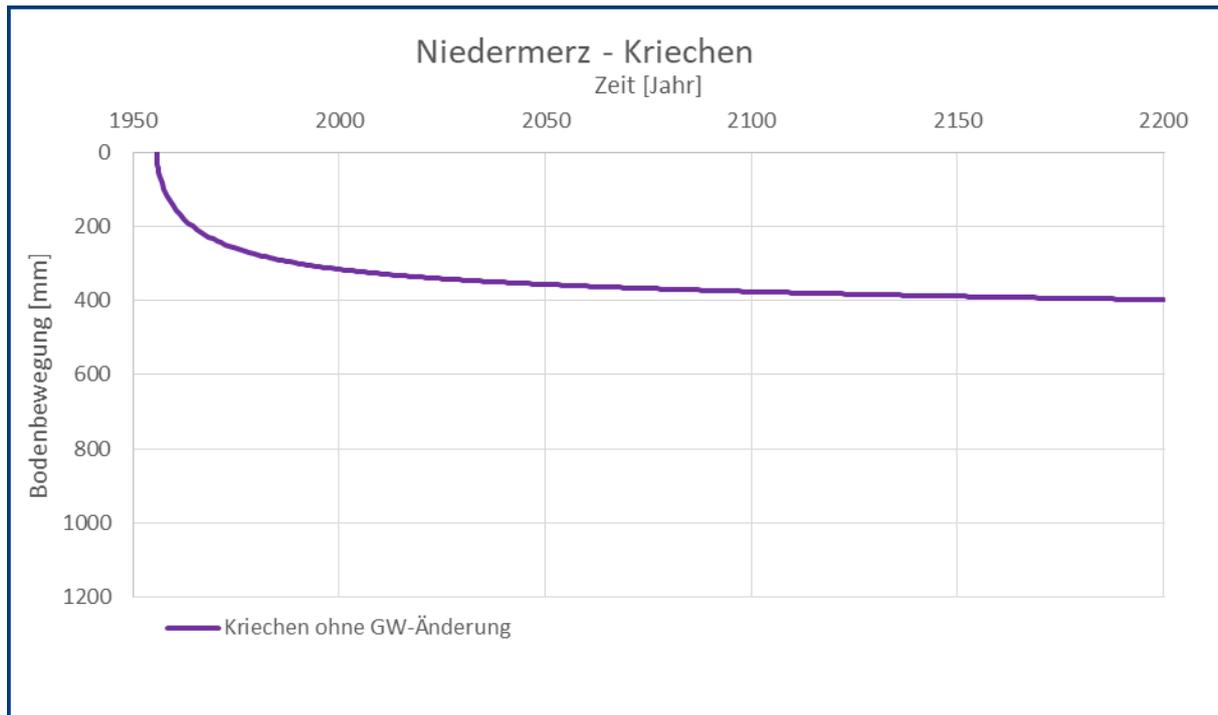


Abbildung 39 Plaxis: Einfluss des Kriechens für den Punkt Niedermerz ohne Änderung des Grundwasserstands

Um sinnvollere Berechnungsergebnisse zu erhalten, muss die Simulation deutlich vor Beginn der eigentlichen Grundwasserabsenkung und der zugehörigen Messung der Oberflächensetzungen einsetzen. Dazu wurde exemplarisch eine weitere Simulation für den Punkt Niedermerz durchgeführt, die im Jahr 1855 startet und in der der Grundwasserstand zunächst für 100 Jahre konstant bleibt. Die entsprechend prognostizierten Bodenbewegungen sind in Abbildung 40 und Abbildung 41 dargestellt.

Darin wird deutlich, dass – bei Nullsetzung der Bodenbewegungsprognose im Jahr 1955 (also mit Beginn der eigentlichen Messungen) – die Prognosen ohne und mit Kriechen im Kalibrierungszeitraum nahezu identisch verlaufen. Es ist zu vermuten, dass sich diese Beobachtung noch verstärkt, wenn der – zunächst willkürlich gewählte – Beginn des Kriechprozesses noch um einige hundert Jahre vorgezogen wird, was der Realität im Rheinischen Braunkohlerevier gerechter würde, da die Ablagerung der Böden sehr lange zurückliegt.

Gleichwohl sind die in der vorliegenden Berechnung mit Berücksichtigung des Kriechens prognostizierten verbleibenden Setzungen am Ende etwas höher. Da bei Berücksichtigung des Kriechens aber schon ab etwa dem Jahr 2000 Abweichungen zu den Messwerten auftreten, ist das so erhaltene Ergebnis für 2200 als weniger vertrauenswürdig einzustufen, wie das Ergebnis der ursprünglichen Prognose – losgelöst von der generellen Problematik der Hebungsprognose mit Plaxis (vgl. Abschnitt 5).

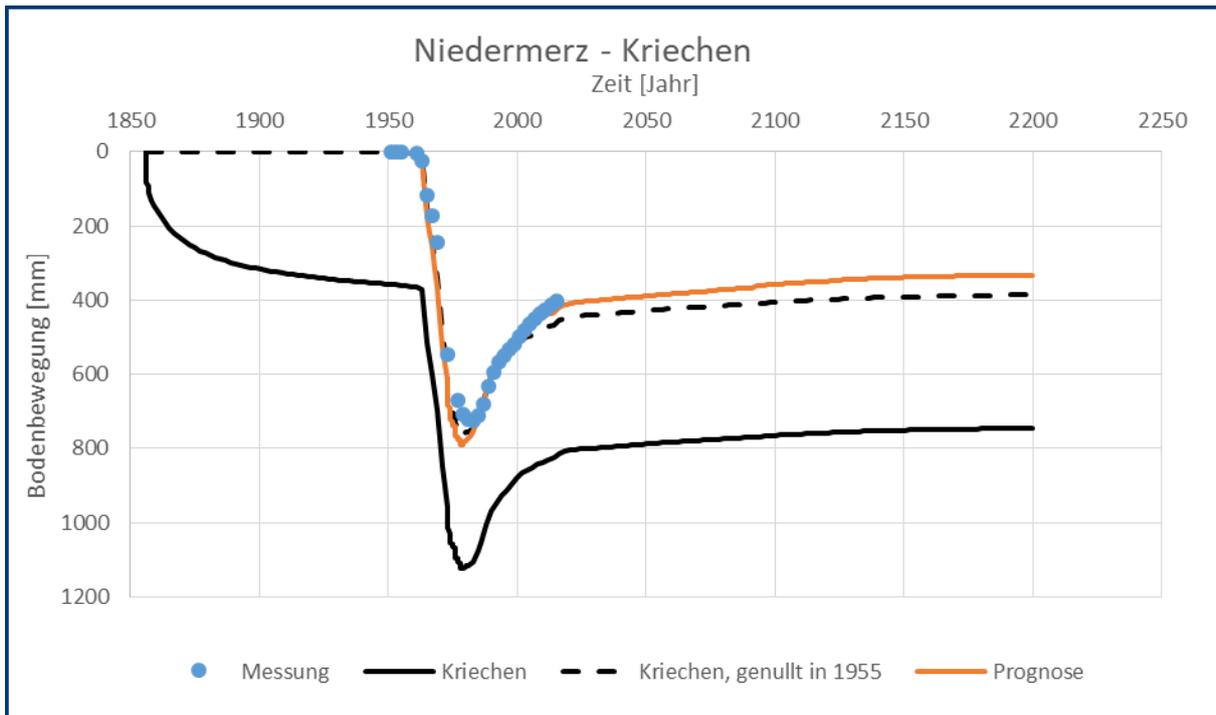


Abbildung 40 Einfluss des Kriechens für den Punkt Niedermerz bei vorgezogenem Beginn der Modellierung (inklusive Vorlaufzeit von ca. 100 Jahren)

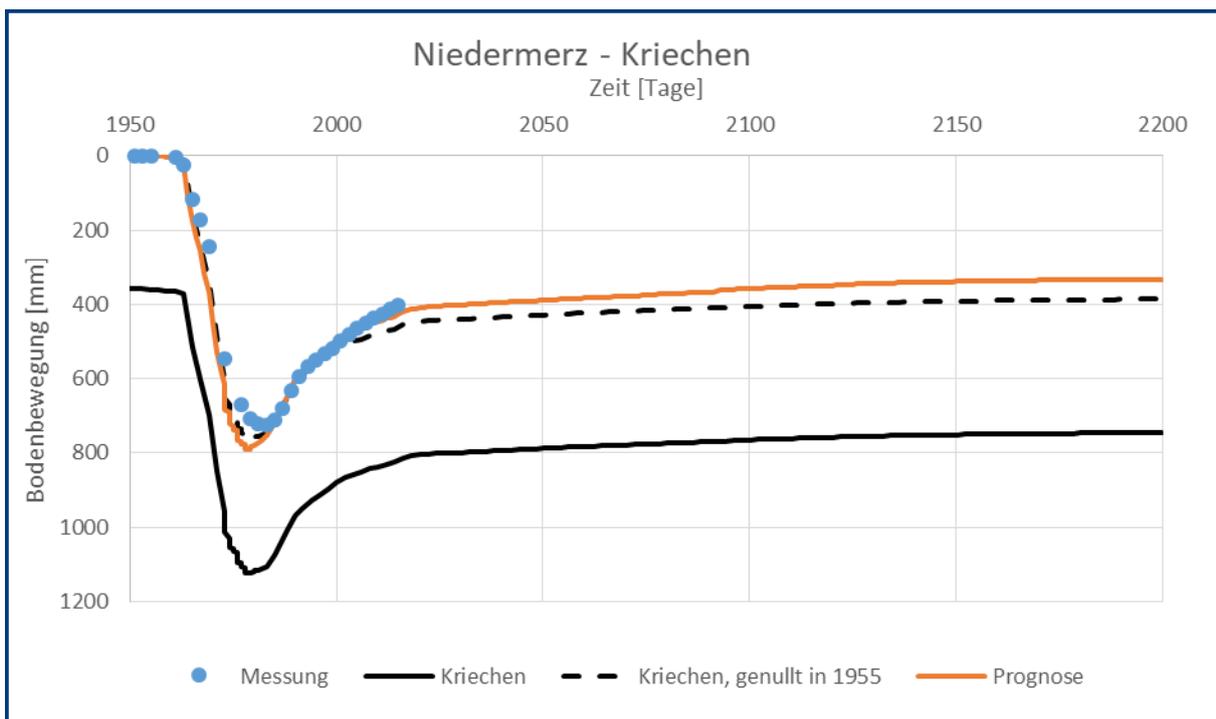


Abbildung 41 Einfluss des Kriechens für den Punkt Niedermerz bei vorgezogenem Beginn der Modellierung

6.1.2 Hydraulisch-mechanische Kopplung

Mit Plaxis ist es außerdem möglich, eine Wechselwirkung zwischen der Eigensetzung bzw. der Verdichtung des Bodens – ausgedrückt über die Änderung der Porenzahl Δe – und der

hydraulischen Durchlässigkeit k in die Berechnungen einfließen zu lassen. Dieser als hydraulisch-mechanische Kopplung bezeichnete Zusammenhang wird in Plaxis über den Parameter c_k gesteuert:

$$\log\left(\frac{k}{k_0}\right) = \frac{\Delta e}{c_k}$$

Dabei ist k_0 die hydraulische Durchlässigkeit, die mit der Anfangsporenzahl e_0 korrespondiert. Gemäß Empfehlungen im Plaxis-Handbuch [3] wurde der Parameter c_k in der Größenordnung des Kompressionsbeiwerts C_c gewählt:

$$c_k \approx C_c.$$

Die Verformungsprognosen, die sich bei ansonsten unveränderten Materialparametern ergeben, zeigen Abbildung 42 für den Punkt Niedermerz und Abbildung 43 für den Punkt Ahe.

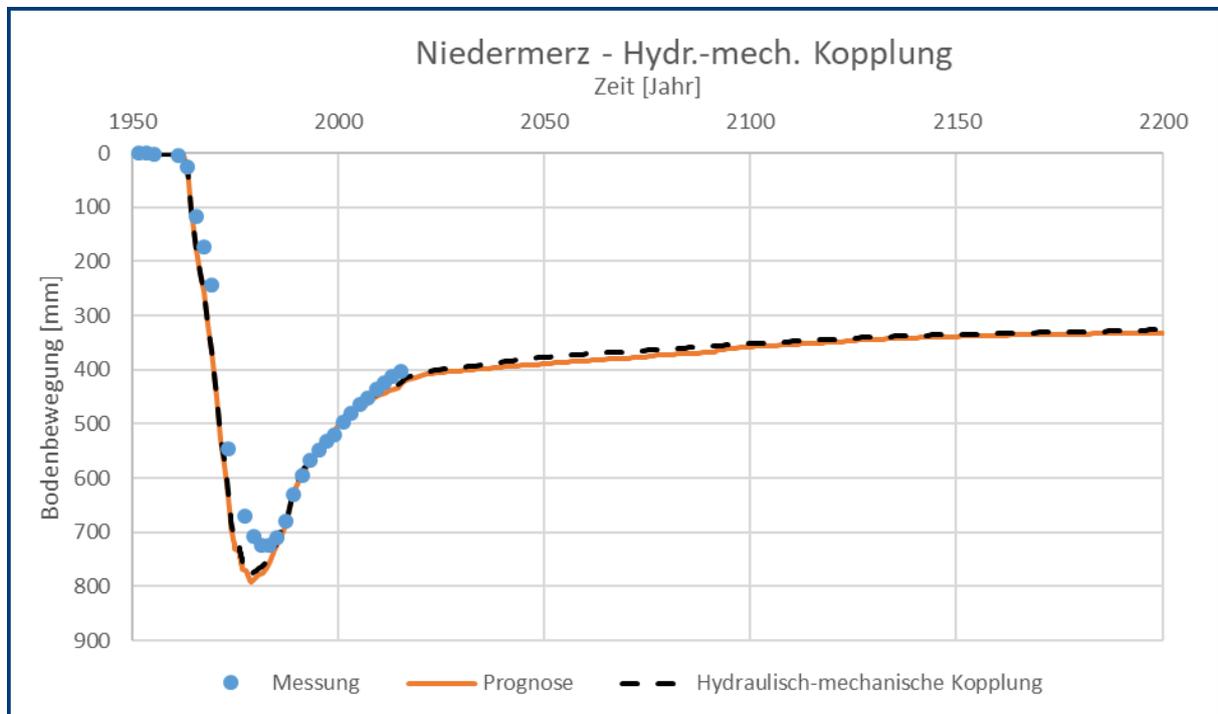


Abbildung 42 Einfluss der hydraulisch-mechanischen Kopplung auf die Hebungsprognosen im Punkt Niedermerz

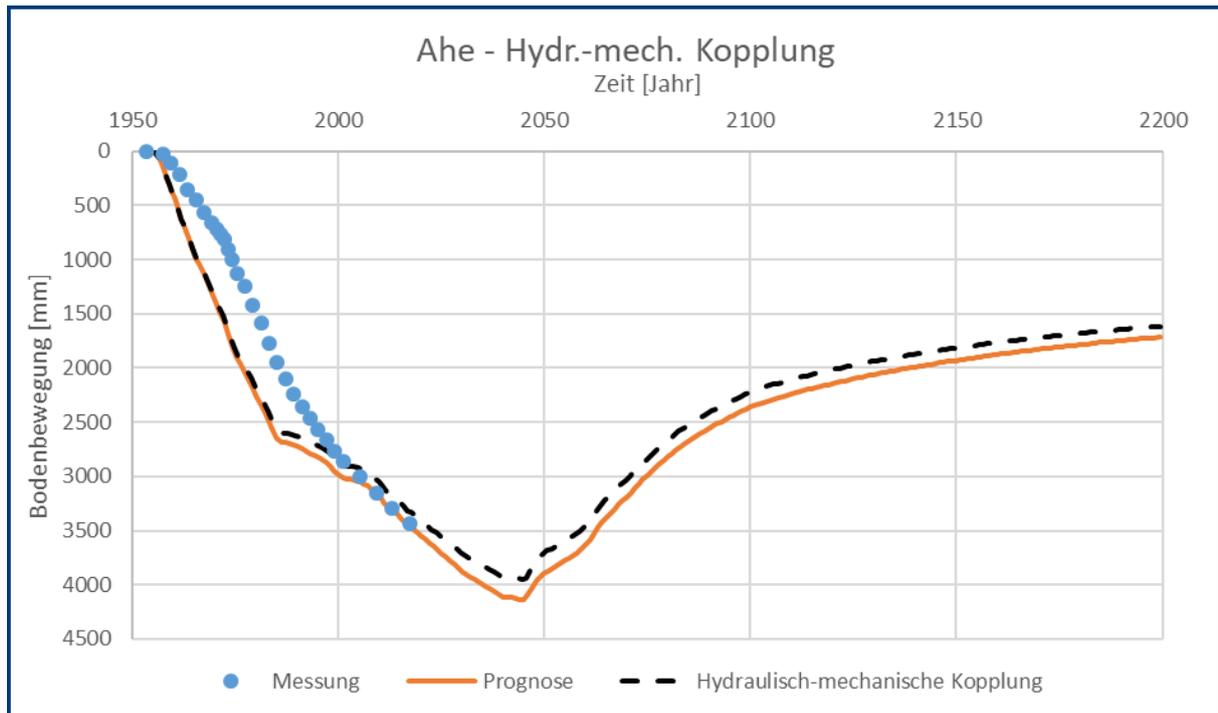


Abbildung 43 Einfluss der hydraulisch-mechanischen Kopplung auf die Hebungsprognosen im Punkt Ahe

Es wird deutlich, dass die Änderung der Durchlässigkeit, die sich durch die Verformung des Korngerüsts in den bindigen Böden ergibt, eine äußerst untergeordnete Rolle für die prognostizierten langfristigen Verformungen spielt. Lediglich im Punkt Ahe, der von einer deutlich größeren Mächtigkeit der bindigen Schichten gekennzeichnet ist, lässt sich überhaupt ein geringer Einfluss feststellen. Dabei werden mit hydraulisch-mechanischer Kopplung geringfügig kleinere Setzungen erhalten, da sich durch die Kopplung die Durchlässigkeit geringfügig reduziert und die Konsolidation damit etwas verzögert. Zum Zeitpunkt des Grundwasserwiederanstiegs und der damit einhergehenden Spannungsumkehr sind die Setzungen dann daher etwas geringer als zuvor. Jedoch ergibt sich somit eine gewisse Abweichung von den Messdaten, so dass eine weitere Nachkalibrierung wiederum in einer Kurve resultieren würde, die mit der eigentlichen Prognose fast deckungsgleich wäre.

6.2 D-Settlement

In Ergänzung der bereits unter Abschnitt 5.2 beschriebenen Modellierungen für die Punkte Niedermerz und Ahe wurden mit D-Settlement ebenfalls zusätzlich die Einflüsse des Kriechens bzw. der hydraulisch-mechanischen Kopplung auf die Prognoseergebnisse untersucht.

6.2.1 Kriechen

Das in D-Settlement verwendete Kompressionsmodell nach Bjerrum ist in der Lage, den Effekt des Kriechens zu berücksichtigen. Dies geschieht über den Materialparameter C_a .

Für die Abschätzung des Kriechbeiwerts C_a wurde folgende Näherung für anorganische Tone aus dem Grundbau-Taschenbuch [3] herangezogen:

$$C_a \approx (0,04 \pm 0,01) \cdot C_c.$$

Für die ersten Berechnungen wurden die gemäß Abschnitt 5.1 durch Kalibrierung ermittelten Materialparameter um den Kriechbeiwert C_a gemäß obiger Formel ergänzt. Die so ermittelten Ergebnisse sind in Abbildung 44 für den Punkt Niedermerz und in Abbildung 45 für den Punkt Ahe zusammengestellt. In den beiden Abbildungen sind neben den Messdaten die Kurven ohne Berücksichtigung des Kriechens in orange dargestellt. Außerdem finden sich unter dem Legendeneintrag „Kriechen 1“ die Verformungsprognosen mit Berücksichtigung des Kriechens – diese wurden durch das alleinige „Aktivieren“ des Kriechbeiwerts C_a berechnet. Die mit „Kriechen 1, kalibriert“ bezeichneten Kurven wurden unter Aktivierung des Kriechterms mit nochmals an den Messdaten kalibrierten Eingabeparametern erzielt.

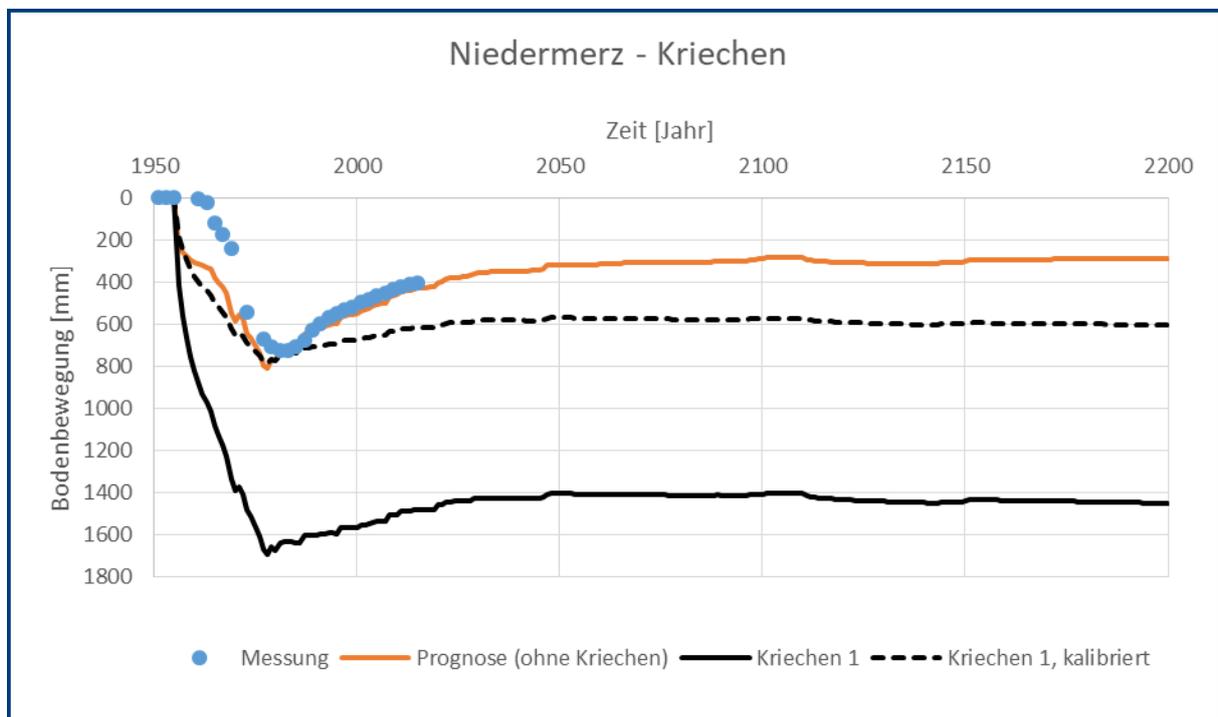


Abbildung 44 D-Settlement-Ergebnisse Niedermerz, Prognose unter Berücksichtigung des Kriechens

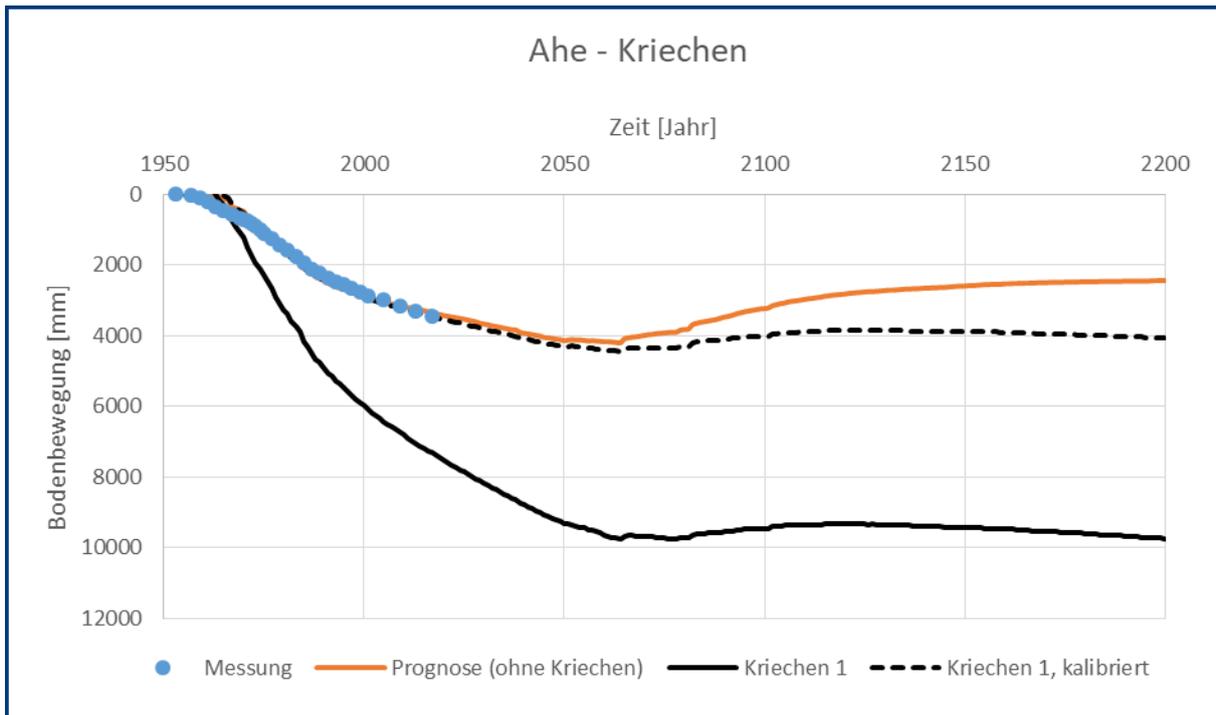


Abbildung 45 D-Settlement-Ergebnisse Ahe, Prognose unter Berücksichtigung des Kriechens

Es wird deutlich, dass sowohl für den Punkt Niedermerz als auch für den Punkt Ahe der Kriecheinfluss ohne weitere Betrachtungen zu unsinnigen Ergebnissen führt (vgl. dazu auch die Erläuterungen in Abschnitt 6.1.1). Trotz Nachkalibrierung können die Messdaten am Punkt Niedermerz generell und insbesondere die Hebungsphase nicht adäquat abgebildet werden. Aber auch am Punkt Ahe werden generell nahezu keine Hebungen mehr prognostiziert. Auch bei Berechnung mit D-Settlement ergeben sich bei Aktivierung des Kriechens ohne jegliche Änderung der Grundwasserstände und damit ohne jegliche Spannungsänderungen deutliche Setzungen, wie Abbildung 46 exemplarisch für den Punkt Niedermerz zeigt.

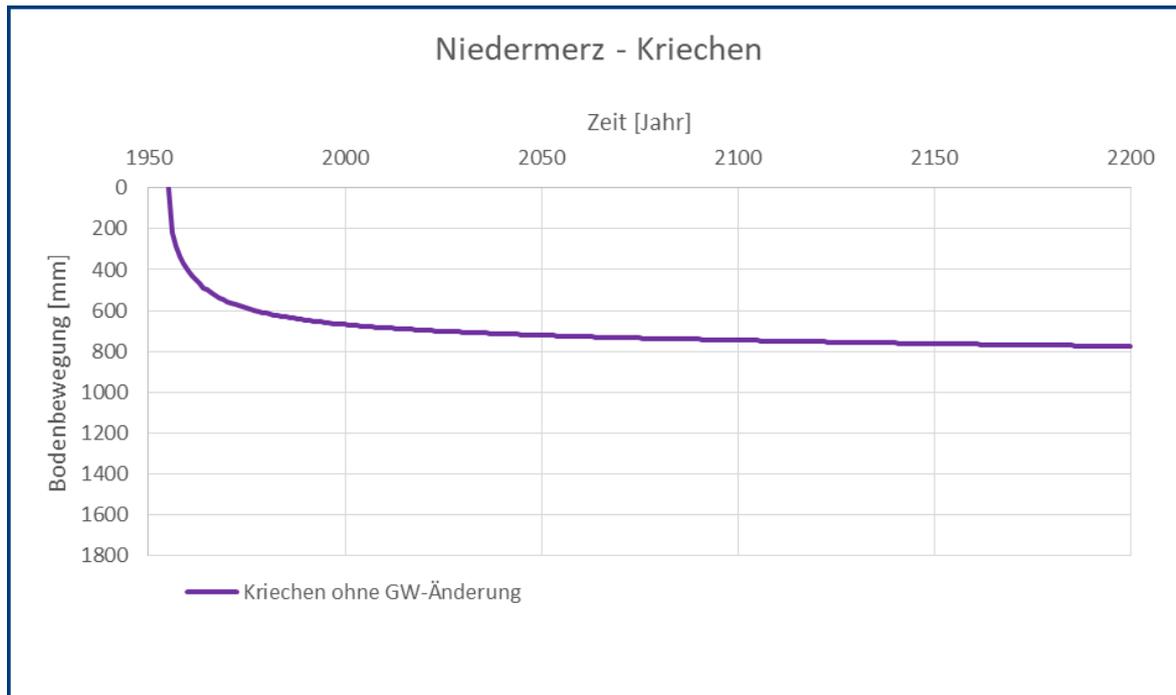


Abbildung 46 D-Settlement: Einfluss des Kriechens für den Punkt Niedermerz ohne Änderung des Grundwasserstands

Analog zu den Plaxis-Berechnungen (vgl. Abschnitt 6.1.1) wurde daher eine Berechnung mit deutlich früherem Start – hier im Jahr 1500 – durchgeführt, bei der die Grundwasserstände zunächst bis ins Jahr 1955 konstant belassen wurden. Das so erhaltene Berechnungsergebnis ist in Abbildung 47 als schwarze Kurve dargestellt. Die Messdaten und die ursprüngliche Prognose sind wie gehabt als hellblaue Punkte bzw. orangefarbene Kurve abgebildet. Nullt man die Kurve mit Kriecheinflüssen im Jahr 1955, so ergibt sich schließlich die schwarz gestrichelte Kurve.

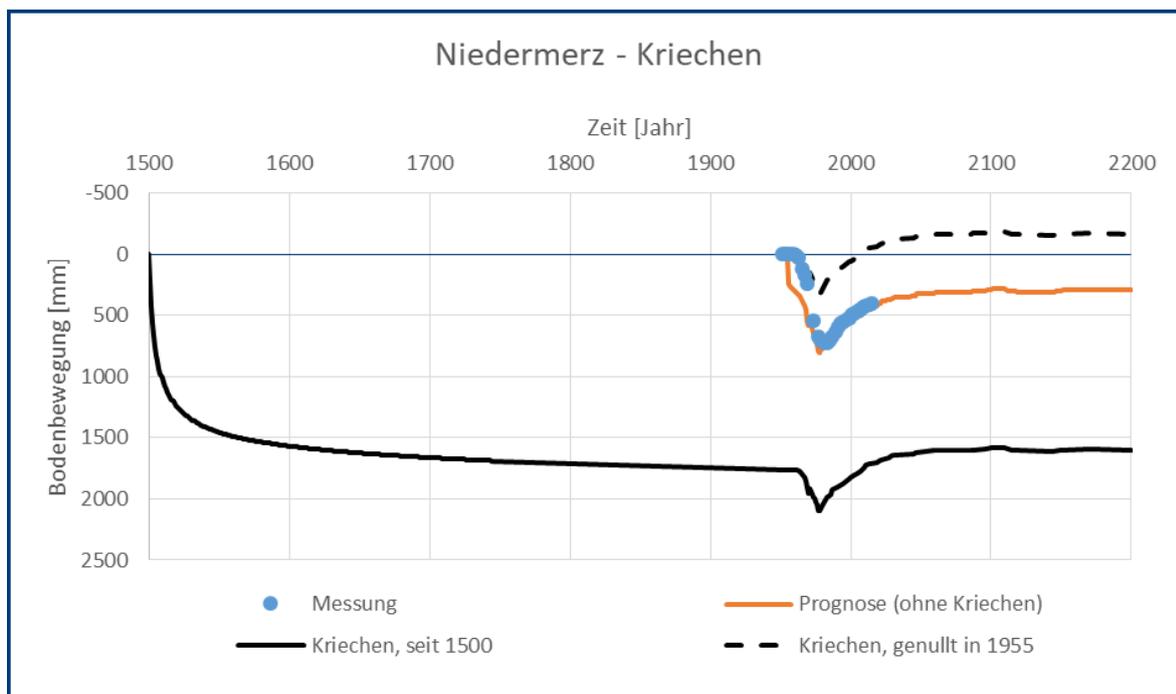


Abbildung 47 D-Settlement: Einfluss des Kriechens für den Punkt Niedermerz mit einem früheren Beginn des Kriechens

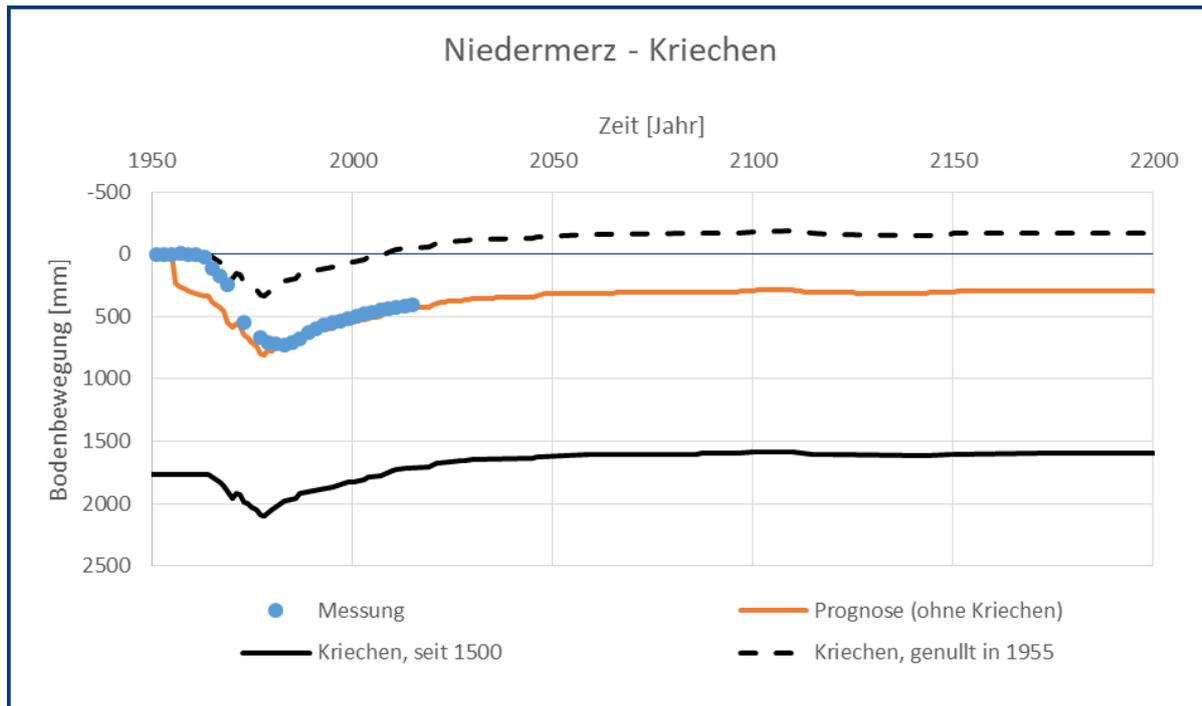


Abbildung 48 D-Settlement: Einfluss des Kriechens für den Punkt Niedermerz ab 1955

Es ist zu erkennen, dass der 1955 genullte Setzungsverlauf unter Berücksichtigung des Kriechens eine wesentlich kleinere Setzung und aber eine in etwa gleichbleibende Hebung wie zuvor (orangefarbene Linie) zeigt. Dies begründet sich damit, dass der Kompressionsbeiwert C_c für die Erstbelastung bei dem verwendeten Kompressionsmodell nach Bjerrum durch das Kriechen infolge von Alterungsprozessen (vgl. [5]) verändert wird bzw. der Boden bei Belastung steifer wird. Um die gemessenen Bodenbewegungen dann wieder besser abbilden zu können, wäre daher zusätzlich eine Reduzierung der Steifigkeit bzw. eine weitere Nachkalibrierung erforderlich. Dann ist aber zu erwarten, dass der Einfluss des Kriechens auf das Berechnungsergebnis wieder verschwindend gering ist bzw. annähernd die gleichen Ergebnisse erhalten werden wie zuvor ohne Kriechen.

6.2.2 Mechanisch-hydraulische Kopplung

Mit D-Settlement ist es ebenfalls möglich, eine Wechselwirkung zwischen der Eigensetzung bzw. der Verdichtung des Bodens – ausgedrückt über die Änderung der Porenzahl Δe – und der hydraulischen Durchlässigkeit k in die Berechnungen einfließen zu lassen. Die Steuerung dieses als hydraulisch-mechanische Kopplung bezeichneten Zusammenhangs geschieht in D-Settlement wie auch in Plaxis (vgl. Abschnitt 6.1.2) über folgenden Zusammenhang:

$$\log\left(\frac{k}{k_0}\right) = \frac{\Delta e}{c_k}$$

Dabei ist k_0 die hydraulische Durchlässigkeit, die mit der Anfangsporenzahl e_0 korrespondiert. Gemäß Empfehlungen im D-Settlement User Manual [3] wurde der Parameter c_k in der Größenordnung des Kompressionsbeiwerts C_c gewählt:

$$c_k \approx C_c.$$

Die Verformungsprognosen, die sich bei ansonsten unveränderten Materialparametern ergeben, zeigen Abbildung 49 und Abbildung 50 für die Punkte Niedermerz und Ahe. Ebenfalls mit dargestellt sind für jeden Punkt zwei Varianten, in denen der für die hydraulisch-mechanische Kopplung maßgebende Parameter c_k halbiert und verdoppelt wurde.

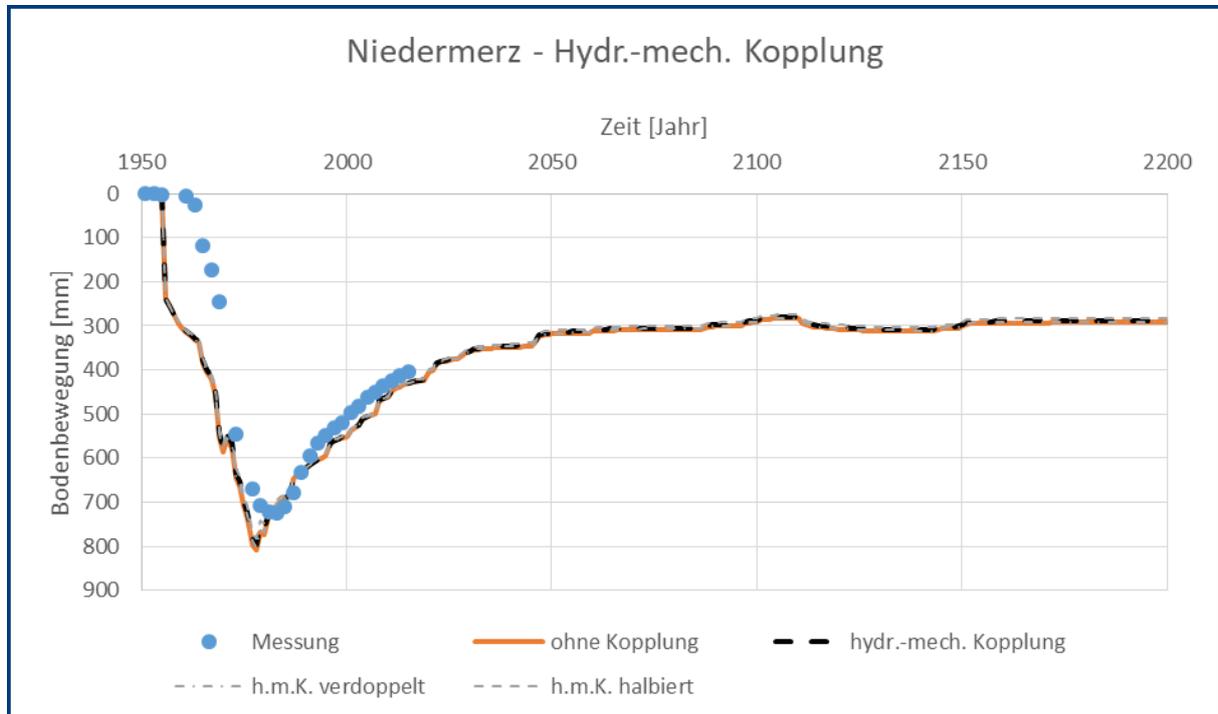


Abbildung 49 D-Settlement, Einfluss der hydraulisch-mechanischen Kopplung auf die Hebungsprognosen im Punkt Niedermerz

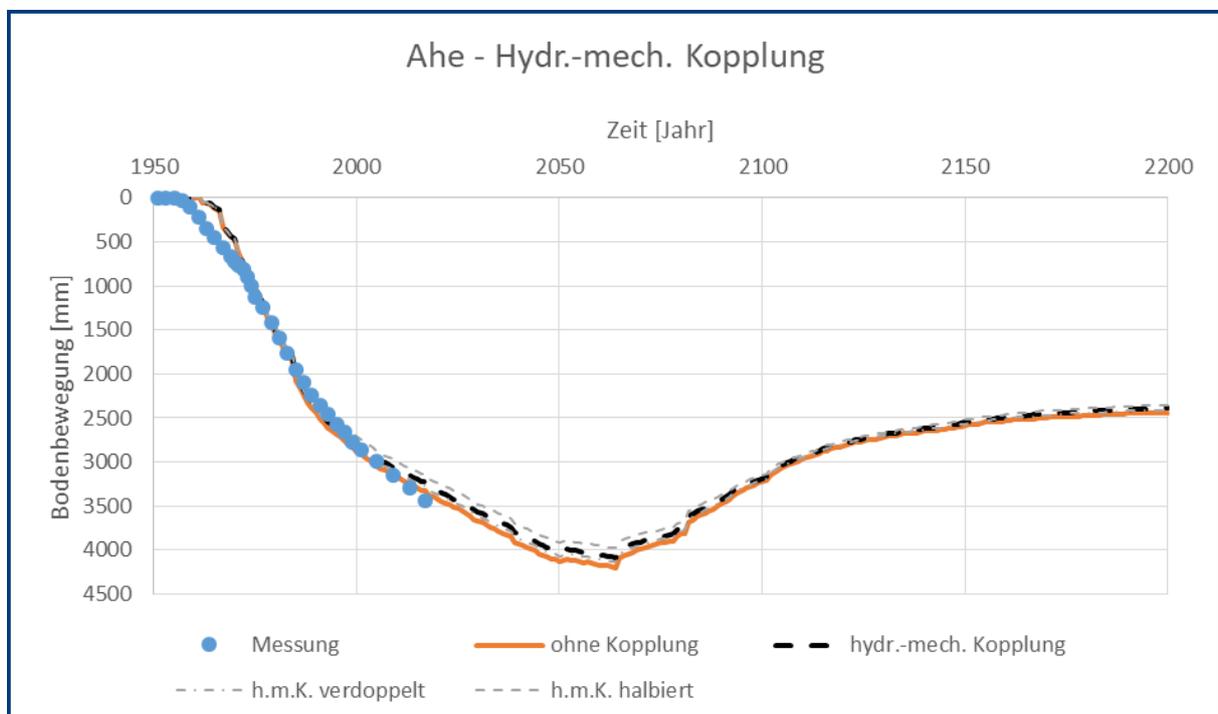


Abbildung 50 D-Settlement, Einfluss der hydraulisch-mechanischen Kopplung auf die Hebungsprognosen im Punkt Ahe

Es wird deutlich, dass die Änderung der Durchlässigkeit, die sich durch die Verformung des Korngerüsts in den bindigen Böden ergibt, auch in den Berechnungen mit D-Settlement eine äußerst untergeordnete Rolle für die prognostizierten langfristigen Verformungen spielt. Lediglich im Punkt Ahe, der von einer deutlich größeren Mächtigkeit der bindigen Schichten gekennzeichnet ist, lässt sich überhaupt ein geringer Einfluss feststellen.

6.3 Modflow

Gemäß Ausschreibung bzw. Leistungsbeschreibung war gefordert, die Modflow-Berechnungen mit einem der „Modflow-Package(s) SUB-WT, SUB-CR oder IBC (als 1D-Berechnung)“ durchzuführen, was im Rahmen der Projektskizze dahingehend präzisiert wurde, dass „die Modellierung der beiden ausgewählten Punkte mit ... Modflow SUB-WT“ erfolgt, welches als Open-Source-Version frei verfügbar ist.

Im Laufe der Projektbearbeitung stellte sich allerdings heraus, dass mit dem SUB-WT-Package keine Berücksichtigung von Kriechen und keine Berücksichtigung einer hydraulisch-mechanischen Rückkopplung möglich sind. Dies wurde auf Nachfrage von ZAI durch das USGS bestätigt.

Im Rahmen einer Projekterweiterung wäre es denkbar, eine Einarbeitung in die weiteren verfügbaren Packages SUB-CR und/oder IBC vorzunehmen und dann – sofern mit diesen Packages möglich – weitere Vergleichsrechnungen zum Kriechen und zur hydraulisch-mechanischen Kopplung anzustellen. Aus Sicht der ZAI erscheint dies aber als wenig zielführend. Zum einen war abweichend von der Vermutung von Deltares (vgl. [2]) unter Berücksichtigung der Randbedingungen im Rheinischen Revier ohnehin nicht mit einem relevanten Einfluss des Kriechens oder der mechanisch-hydraulischen Kopplung zu rechnen (vgl. [1]), zum anderen haben die bisherigen Vergleichsrechnungen mit Plaxis und D-Settlement aber auch gezeigt, dass dies tatsächlich keine Rolle spielt (vgl. Abschnitt 6.1 und 6.2).

6.4 Gegenüberstellung

Im Rahmen des Methodenvergleiches Bodenbewegungsprognose wurde der Einfluss der Prozesse Kriechen und hydraulisch-mechanische Kopplung untersucht. Dabei wurden die Programme Plaxis und D-Settlement verwendet. Modflow ist mit dem Package SUB-WT nicht in der Lage, diese Prozesse mit abzubilden.

6.4.1 Kriechen

In den beiden nachfolgenden Abbildungen sind die mit Plaxis und D-Settlement berechneten Prognosen ohne Kriechen (durchgezogene Linien) und mit Aktivierung des Kriechens schon nach Kalibrierung des Kriechbeiwerts C_α (gestrichelte Linien) dargestellt.

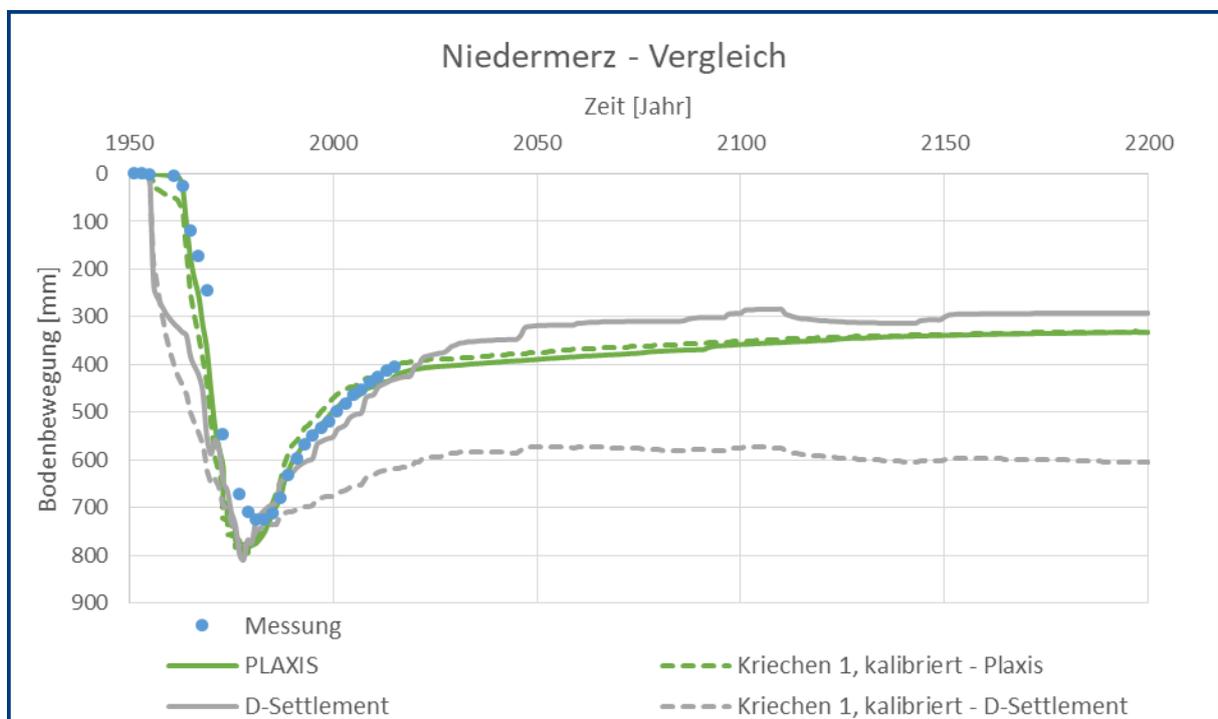


Abbildung 51 Vergleich mit und ohne Kriechen am Punkt Niedermerz

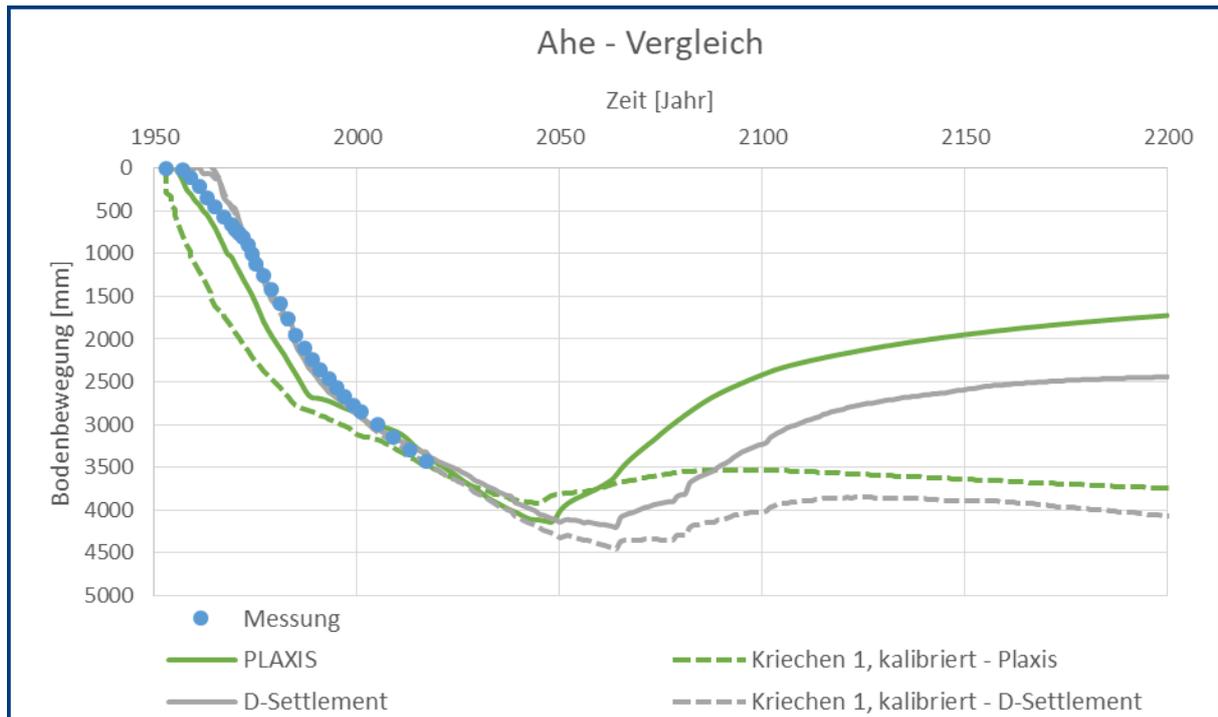


Abbildung 52 Vergleich mit und ohne Kriechen am Punkt Ahe

Softwareunabhängig zeigt sich zum einen, dass durch die Aktivierung des Kriechens keine bessere Übereinstimmung zwischen Nachrechnung und gemessenem Verhalten erzielt werden kann. Zum anderen ist aber auch zu erkennen, dass nach der erforderlichen Kalibrierung anhand der Messdaten entweder kaum noch Unterscheide zwischen der ursprünglichen und der neuen Prognose (vgl. Niedermerz, Plaxis) oder von den Messwerten immer noch stark abweichende Ergebnisse (vgl. Niedermerz, D-Settlement) erhalten werden. Weiter werden am Punkt Ahe mit Kriechen Ergebnisse erhalten, die selbst im Jahr 2200 noch Setzungen aufzeigen, was vor dem Hintergrund bereits an anderen Punkten beobachteten und damit auch hier tatsächlich zu erwartenden Hebungen bei Grundwasserwiederanstieg als unrealistisch eingeschätzt werden muss. Erklärbar ist dies aus der unzureichenden Abbildung des tatsächlichen Hebungsverhaltens (vgl. dazu insbesondere auch den Punkt Niedermerz bzw. Abbildung 51).

Letztlich zeigen die Ergebnisse damit, dass durch die Berücksichtigung theoretisch denkbarer Kriecheffekte keine Verbesserung der Nachrechnungs- und damit der Prognosegenauigkeit erzielt wird. Aber selbst dann, wenn durch eine erfolgreiche Kalibrierung eine quantitativ gute Nachrechnung mit Kriechen möglich ist, sind die Unterschiede zur Nachrechnung bzw. Prognose ohne Kriechen dann aber vernachlässigbar.

6.4.2 Hydraulisch-mechanische Kopplung

In den beiden nachfolgenden Abbildungen sind die mit Plaxis und D-Settlement berechneten Prognosen ohne (durchgezogene Linien) und mit hydraulisch-mechanischer Kopplung (gestrichelte Linien) dargestellt.

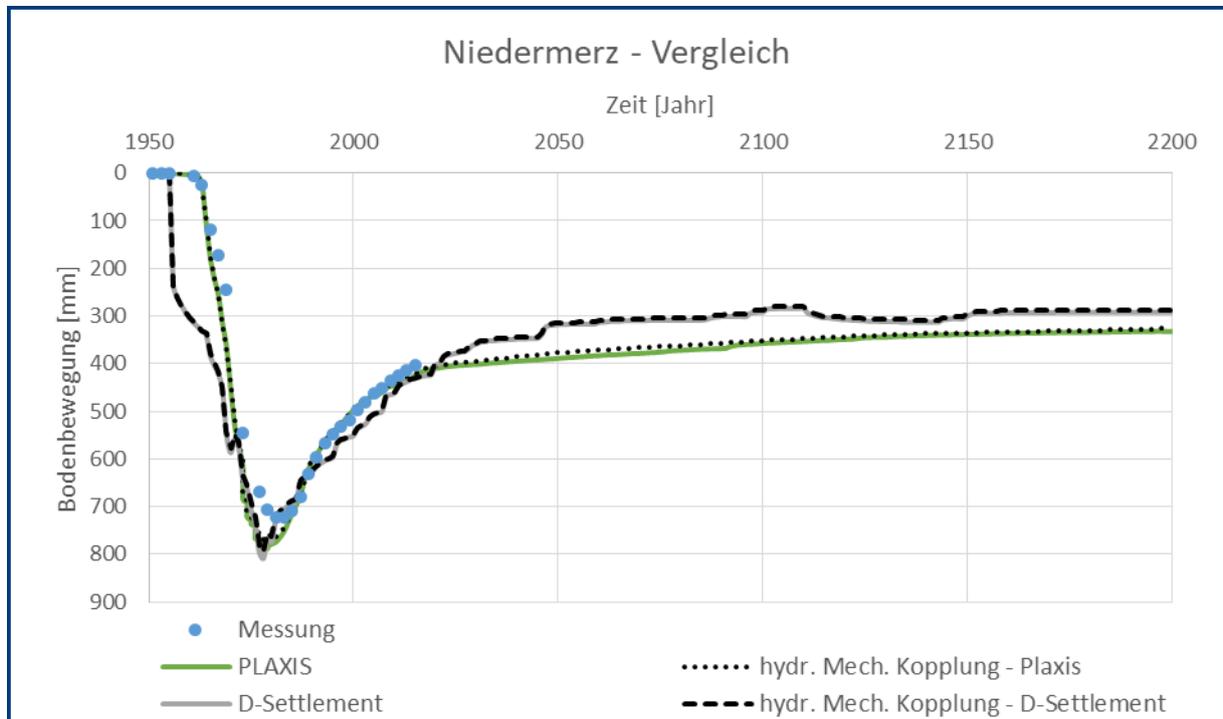


Abbildung 53 Vergleich mit und ohne hydraulische Kopplung am Punkt Niedermerz

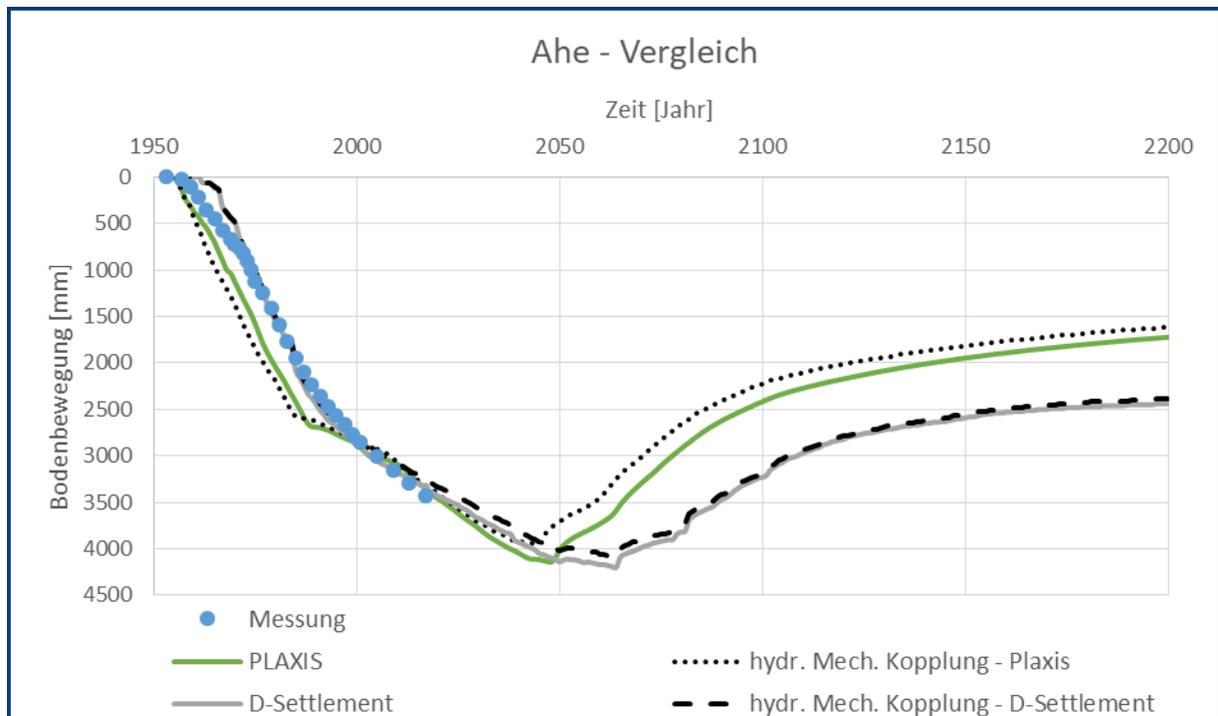


Abbildung 54 Vergleich mit und ohne hydraulische Kopplung am Punkt Ahe

Die Ergebnisse zeigen, dass der Effekt der hydraulisch-mechanischen Kopplung vernachlässigbar ist. Lediglich am Punkt Ahe zeigt sich überhaupt ein sichtbarer Effekt bzw. ein Unterschied zwischen Berechnung mit und ohne hydraulisch-mechanischer Kopplung. Eine Verbesserung der Nachrechnung im Vergleich zum gemessenen Bodenbewegungsverhalten wird aber nicht erzielt.

7 Bewertung

Im Rahmen des Methodenvergleichs wurden mit den drei Softwarelösungen Plaxis, D-Settlement und Modflow/SUB-WT Vergleichsrechnungen für die Punkte Niedermerz und Ahe ange stellt, die nachfolgend bewertet werden.

7.1 Plaxis

Bei den Berechnungen hat sich gezeigt, dass das Programm Plaxis

- nach Einarbeitung gut zu bedienen ist,
- komplexe Materialmodelle bereitstellt
(auch wenn deren Umfang im vorliegenden Fall nicht benötigt wird),
- ein einfaches Einlesen der GW-Ganglinien ermöglicht und
- viele Möglichkeiten der Ergebnisdarstellung und –Ausgabe beinhaltet.

Allerdings ist

- das mögliche Verhältnis der Steifigkeit bei Be- und Entlastung begrenzt und
- es treten teilweise unerklärliche numerische Probleme auf.

Unter anderem deshalb wird bei der Nachrechnung mit Plaxis keine durchgängig zufriedenstellende Übereinstimmung mit den Messwerten erzielt.

Die Anwendung von Plaxis zur Berechnung und Prognose der Bodenbewegungen im Rheinischen Braunkohlerevier ist daher nur als bedingt geeignet einzustufen.

7.2 D-Settlement

Weiter hat sich gezeigt, dass das Programm D-Settlement

- nach Einarbeitung gut zu bedienen ist,
- eine relativ zügige geometrische Modellerstellung aber
- kein automatisches Einlesen von Wasserständen ermöglicht und
- viele Möglichkeiten der Ergebnisdarstellung und –Ausgabe beinhaltet.

Daher ist

- eine aufwändige manuelle Eingabe der Wasserstände erforderlich und
- die Anzahl der möglichen hydraulischen Randbedingungen ist begrenzt.

Aufgrund dieser Restriktion wird bei der Nachrechnung mit D-Settlement keine zufriedenstellende Übereinstimmung mit den Messwerten erzielt.

Weiter haben die Berechnungen mit automatischer Kalibrierung gezeigt, dass damit keine besseren, sondern tendenziell eher schlechtere Ergebnisse als bei manueller Kalibrierung erhalten werden.

Die Anwendung von D-Settlement ist zur Berechnung und Prognose der Bodenbewegungen im Rheinischen Braunkohlerevier daher als ungeeignet einzustufen.

7.3 Modflow/SUB-WT

Und schließlich hat sich gezeigt, dass das Programm Modflow in Kombination mit SUB-WT sowie mit weiteren erforderlichen Packages bzw. Software-Tools

- eine relativ lange Einarbeitung erfordert und
- die Modellerstellung relativ aufwändig ist, aber
- ein automatisches Einlesen der GW-Stände ermöglicht.

Zudem ist

- entweder Programmierverständnis
- oder die Verwendung einer zusätzlichen Software zur grafischen Ein- und Ausgabe erforderlich, so dass
- in Summe fünf verschiedene Programme angewendet werden müssen.

Allerdings wird bei der Nachrechnung mit Modflow/SUB-WT durchgängig eine sehr zufriedenstellende Übereinstimmung mit den Messwerten erzielt.

Die Anwendung von Modflow/SUB-WT zur Berechnung und Prognose der Bodenbewegungen im Rheinischen Braunkohlerevier ist daher zwar als umständlich, im Hinblick auf die erhaltenen Ergebnisse aber als geeignet einzustufen.

7.4 Kriechen

In Bezug auf den Effekt des Kriechens haben die Berechnungen gezeigt, dass bei Aktivierung des Kriechens mit aus der Literatur empfohlenen Kriechbeiwerten zunächst unrealistische und von den Messwerten deutlich abweichende Ergebnisse erhalten werden. Nach der daher erforderlichen Nachkalibrierung werden dann entweder Ergebnisse erhalten, deren Unterschiede zur Prognose ohne Kriechen vernachlässigbar sind, oder aber Ergebnisse, die unlogisch bzw. unrealistisch sind. In allen Fällen werden die Ergebnisse mit Berücksichtigung des Kriechens jedenfalls nicht genauer als zuvor ohne Kriechen.

Die Berücksichtigung von Kriechen bei der Berechnung und Prognose der Bodenbewegungen im Rheinischen Braunkohlerevier ist daher nicht erforderlich.

7.5 Hydraulisch-mechanische Kopplung

In Bezug auf den Effekt der hydraulisch-mechanischen Kopplung haben die Berechnungen gezeigt, dass diese nur einen sehr geringen Einfluss auf die Größe der Setzungen und auch auf den Charakter des Setzungsverlaufs hat. In allen Fällen werden die Ergebnisse mit Berücksichtigung der hydraulisch-mechanischen Kopplung nicht genauer als zuvor ohne Kopplung.

Die Berücksichtigung einer hydraulisch-mechanische Kopplung bei der Berechnung und Prognose der Bodenbewegungen im Rheinischen Braunkohlerevier ist daher nicht erforderlich.

8 Fazit und Empfehlungen

Auf Basis der durchgeführten Berechnungen und den bereits durch vorherige Untersuchungen bekannten Erkenntnissen ergibt sich folgendes Bild:

- 1) PLAXIS ist für die Berechnung und Prognose der Bodenbewegungen im Rheinischen Braunkohlerevier aufgrund programminterner Restriktionen und den damit verbundenen teilweise nicht zufriedenstellenden Berechnungsergebnissen nur als bedingt geeignet einzustufen.
- 2) D-SETTLEMENT ist für die Berechnung und Prognose der Bodenbewegungen im Rheinischen Braunkohlerevier aufgrund programminterner Restriktionen und den damit verbundenen nicht zufriedenstellenden Berechnungsergebnissen als ungeeignet einzustufen.
- 3) MODFLOW/SUB-WT ist für die Berechnung und Prognose der Bodenbewegungen im Rheinischen Braunkohlerevier zwar aus Anwendersicht als umständlich, im Hinblick auf die erhaltenen Ergebnisse aber als geeignet einzustufen.
- 4) Die Berücksichtigung von KRIECHEN ist bei der Berechnung und Prognose der Bodenbewegungen im Rheinischen Braunkohlerevier aufgrund von vernachlässigbaren Effekten nicht erforderlich.
- 5) Die Berücksichtigung einer HYDRAULISCH-MECHANISCHEN KOPPLUNG ist bei der Berechnung und Prognose der Bodenbewegungen im Rheinischen Braunkohlerevier aufgrund der marginalen Auswirkung nicht erforderlich.
- 6) Sowohl mit MODFLOW/SUB-WT als auch mit der Methode nach ZIEGLER & AULBACH ist eine sehr gute Abbildung der gemessenen Bodenbewegungen im Rheinischen Braunkohlerevier möglich. Gleichwohl mussten bei der Berechnung mit MODFLOW/SUB-WT aber Eingangsparameter gewählt werden, die bereits nahe an der Grenze theoretisch möglicher Wertebereiche liegen.
- 7) Bereits im Rahmen der Literaturrecherche von Deltares wurde die „*Methode nach Ziegler und Aulbach als sehr gut geeignet ...*“ und „*zudem auch im Vergleich zu anderen Methoden als am besten geeignet...*“. [2] eingestuft. Durch die nunmehr mit MODFLOW/SUB-WT erhaltenen ebenfalls sehr guten Nachrechnungsergebnisse und die geringen Unterschiede in der Prognose bis 2200 wurden die bisherigen Ergebnisse und die Zweckmäßigkeit der Anwendung der Methode nach ZIEGLER & AULBACH nochmals bestätigt.

Aachen, 24. September 2019

Dr.-Ing. B. Aulbach

Univ.-Prof. Dr.-Ing. M. Ziegler

9 Literatur

- [1] AULBACH, B., ZIEGLER, M. (2019): Berechnung und Prognose von Bodenbewegungen mit Sensitivitätsanalyse im Rheinischen Braunkohlerevier. Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz Nordrhein-Westfalen - Bericht.
- [2] BECKER, B., ROHE, A. (2018): Methodenrecherche Bodenbewegungsprognose für das Rheinische Braunkohlerevier. Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz Nordrhein-Westfalen – Fachbericht 88.
- [3] BRINKGREVE, R.B.J. et al. (Hrsg)., PLAXIS 2D 2019, Handbuch, Part 2: Reference Manual, Plaxis bv, Bentley Systems, Incorporated
- [4] BRINKGREVE, R.B.J. et al. (Hrsg)., PLAXIS 2D 2019, Handbuch, Part 3: Material Models Manual, Plaxis bv, Bentley Systems, Incorporated
- [5] DELTARES (2019): D-Settlement User Manual, Deltares
- [6] 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 6-A23, 42 p.
- [7] HARBAUGH, A.W., 2005, MODFLOW-2005, The U.S. Geological Survey modular ground-water model—the Ground-Water Flow Process: U.S. Geological Survey Techniques and Methods 6-A16, variously p.
- [8] WINSTON, R.B., 2009, ModelMuse – A graphical user interface for MODFLOW-2005 and PHAST: U.S. Geological Survey Techniques and Methods 6-A29, 52 p., available only at <http://pubs.usgs.gov/tm/tm6A29>.
- [9] VON SOOS, ENGEL (2017): Eigenschaften von Boden und Fels – ihre Ermittlung im Labor, Abschnitt 1.3 in: WITT, K.-J., Grundbau-Taschenbuch, Teil 1: Geotechnische Grundlagen, 8. Auflage, Ernst & Sohn Verlag, Berlin

Eingangsparameter

01 Niedermerz - ZAI

Eingangswerte

nichtbindige Schichten

Ausgangssteifigkeit	E_s	150.000	[kN/m ²]	Prozentsatz
				[%]
14-19	E_s	150.000	[kN/m ²]	100
9B	E_s	135.000	[kN/m ²]	90
8	E_s	217.500	[kN/m ²]	145
7A	E_s	270.000	[kN/m ²]	180
6D	E_s	345.000	[kN/m ²]	230
6B	E_s	450.000	[kN/m ²]	300
2-5	E_s	525.000	[kN/m ²]	350
02-09	E_s	2.085.000	[kN/m ²]	1390

Hebungsfaktor **0,8**

Eingangswerte

bindige Schichten

Ausgangskons.beiw.	c_v	6,20E-11	[m ² /s]	
Ausgangssteifigkeit	E_s	15.000	[kN/m ²]	Prozentsatz
				[%]
9C	E_s	15.000	[kN/m ²]	100
9A	E_s	18.750	[kN/m ²]	125
7F/7D/7B	E_s	99.000	[kN/m ²]	660
6E	E_s	120.000	[kN/m ²]	800
6C	E_s	162.000	[kN/m ²]	1080
6A	E_s	192.000	[kN/m ²]	1280
1	E_s	109.500	[kN/m ²]	730

Hebungsfaktor **0,66**

02 Ahe - ZAI

Eingangswerte

nichtbindige Schichten

Ausgangssteifigkeit	E_s	150.000	[kN/m ²]	Prozentsatz
				[%]
14-19	E_s	150.000	[kN/m ²]	100
12	E_s	270.000	[kN/m ²]	180
10	E_s	300.000	[kN/m ²]	200
9B	E_s	450.000	[kN/m ²]	300
8	E_s	1.050.000	[kN/m ²]	700
7E	E_s	1.950.000	[kN/m ²]	1300
7C/7A	E_s	3.000.000	[kN/m ²]	2000
2-5	E_s	7.500.000	[kN/m ²]	5000
01-09	E_s	7.500.000	[kN/m ²]	5000

Hebungsfaktor **0,8**

Eingangswerte

bindige Schichten

Ausgangskons.beiw.	c_v	3,08E-10	[m ² /s]	
Ausgangssteifigkeit	E_s	15.000	[kN/m ²]	Prozentsatz
				[%]
13	E_s	15.000	[kN/m ²]	100
11	E_s	22.500	[kN/m ²]	150
9C	E_s	30.000	[kN/m ²]	200
9A	E_s	42.000	[kN/m ²]	280
7F	E_s	195.000	[kN/m ²]	1300
7D	E_s	225.000	[kN/m ²]	1500
6A-6E	E_s	525.000	[kN/m ²]	3500
1	E_s	750.000	[kN/m ²]	5000

Hebungsfaktor **0,66**