

Zwischenbericht

zur

Berechnung und Prognose von Bodenbewegungen mit Sensitivitätsanalyse im Rheinischen Braunkohlerevier

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

Vergabenummer: 8052/52/ÖA

Projektleitung: Dr. Sabine Bergmann

Projektbearbeitung: Anke Boockmeyer

Auftragnehmer: ZAI Ziegler und Aulbach Ingenieurgesellschaft mbH

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

Projektbearbeitung: Dr.-Ing. Benjamin Aulbach
Michael Knops, M.Sc.
Maximilian Schröder, B.Sc.

Umfang: 56 Seiten Text
1 Seite Anhang

Datum: 01. Oktober 2018

Kurzzusammenfassung

Für die Gewinnung der Braunkohle im Rheinischen Braunkohlenrevier im offenen Tagebau wird der Grundwasserspiegel großräumig abgesenkt. Dadurch kommt es zu Setzungen, die in Abhängigkeit der geologischen Schichtung sowie des Ausmaßes und des zeitlichen Ablaufs der Sumpfung auch zeitverzögert stattfinden. Bei Grundwasserwiederanstieg nach Tagebaueinde und Ende der Sumpfung kommt es zu Bodenhebungen. Diese werden an der Geländeoberfläche meist aber erst mit einer gewissen Zeitverzögerung festgestellt, da die darunterliegenden bindigen Schichten oftmals infolge der GW-Absenkung noch nicht vollständig auskonsolidiert sind und daher trotz des Wiederanstiegs des Grundwassers noch nachlaufende Setzungen stattfinden. In der Gesamtbetrachtung 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.

Zu diesem Zweck wurden im Rahmen des Projektes „Berechnung und Prognose von Bodenbewegungen mit Sensitivitätsanalyse im Rheinischen Braunkohlerevier“ basierend auf einem bereits von ZAI entwickelten und in der Praxis bewährten Prognosemodell zunächst für einen vorgegebenen Höhenfestpunkt die sich aus der Sumpfung und dem anschließenden Grundwasserwiederanstieg ergebenden Setzungen und Hebungen ermittelt. Weiter wurde dann an diesem Punkt der Einfluss der für die Prognose erforderlichen bodenmechanischen Parameter im Rahmen einer Sensitivitätsstudie untersucht und in einem zweiten Schritt die vom LANUV bereitgestellten Eingangsdaten (Grundwasserganglinien, Geologie bzw. Schichtaufbau) ebenfalls variiert. Als dritter Schritt wurde schließlich eine Neuberechnung für einen Höhenfestpunkt durchgeführt, der bereits mit einem vorhandenen Modell erfasst wurde.

Die Studie zeigt, dass sich mit dem so erhaltenen Bodenbewegungsmodell das gemessene Verhalten sehr gut abbilden und damit auch weiter für die Zukunft prognostizieren lässt. Dabei ergibt sich die sehr gute Übereinstimmung zwischen Nachrechnung und Messung dadurch, dass durch das bei ZAI verwendete Bodenbewegungsmodell eine punktspezifische Kalibrierung möglich ist, um auf die wechselhafte Geologie im Rheinischen Braunkohlerevier im Allgemeinen und zwischen einzelnen Punkten im Speziellen zu reagieren.

Weiter hat die Sensitivitätsstudie 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. Etwas größere Unsicherheiten in der aktuellen Prognose resultieren lediglich aus den Hebungen der bindigen Schichten, da diese aufgrund des zeitverzögerten Verhaltens bis heute nur in geringem Maß aufgetreten sind und der „Hebungsfaktor bindig“ daher bisher vergleichsweise mäßig kalibriert ist. Durch die Fortsetzung der Messungen und eine darauf basierende Nachkalibrierung in regelmäßigen Zeitabständen kann diese Unsicherheit aber reduziert und die Prognosegenauigkeit stetig verbessert werden.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung.....	2
2	Fachgrundlagen	4
2.1	Spannungsänderungen infolge Grundwasserstandsänderung	4
2.2	Setzungen und Hebungen infolge Spannungsänderungen.....	6
2.3	Abhängigkeit von der Teufe sowie von der Be- und Entlastung.....	7
2.4	Zeitabhängiges Verhalten bindiger Schichten	9
2.5	Weitere bedeutsame Wirkungszusammenhänge	12
3	Bodenbewegungsmodell.....	13
3.1	Schichtmodell	13
3.2	Grundwasserdaten und Spannungen	15
3.3	Bodenbewegungen.....	16
4	Ergebnisse.....	20
4.1	Sensitivitätsstudie an einem vorgegebenen Höhenfestpunkt.....	20
4.1.1	Eingangsdaten	21
4.1.2	Nachrechnung und Prognose	22
4.1.3	Parametervariation	24
4.1.4	Beurteilung der Modellgenauigkeit und der Sensitivität	33
4.2	Bewertung der Eingangsdaten	37
4.2.1	Variation der Grundwasserganglinien.....	37
4.2.2	Variation der Schichtmächtigkeiten	41
4.2.3	Beurteilung der Auswirkungen möglicher Ungenauigkeiten auf die Nachrechnung und Prognose	46
4.3	Neuberechnung für einen Höhenfestpunkt	48
4.3.1	Vergleich der Eingangsdaten beider Modelle	48
4.3.2	Neuberechnung Modell LANUV mit Eingangsparametern von RWE	50
4.3.3	Vergleich beider Modelle mit individuell kalibrierten Eingangsparametern.....	51
4.3.4	Beurteilung verschiedener Modelle	52
5	Zwischenfazit.....	53
6	Weiteres Vorgehen und Ausblick.....	55
7	Literatur	56

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 Geländevertassungen entstehen. Für die Ermittlung zukünftiger Grundwasserflurabstände nach Grundwasserwiederanstieg ist es deshalb notwendig, die Entwicklung von Senkungen und Hebungen der Geländeoberkante zu quantifizieren.

In diesem Zusammenhang wurde die ZAI Ziegler und Aulbach Ingenieurgesellschaft mbH (nachfolgend ZAI) vom Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz Nordrhein-Westfalen (nachfolgend LANUV) unter der Vergabenummer 8052/52/ÖA mit der „Berechnung und Prognose von Bodenbewegungen mit Sensitivitätsanalyse im Rheinischen Braunkohlerevier“ beauftragt. Dabei dient die Sensitivitätsanalyse der Einschätzung möglicher Prognoseun genauigkeiten, die sich aus Unsicherheiten oder natürlichen Streuungen der Eingangsdaten ergeben.

Basierend auf einem bereits von ZAI entwickelten und in der Praxis bewährten Prognosemodell sollen zunächst für einen vorgegebenen Höhenfestpunkt die sich aus der Sümpfung und dem anschließenden Grundwasserwiederanstieg ergebenden Setzungen und Hebungen ermittelt sowie der Einfluss der für die Prognose erforderlichen bodenmechanischen Parameter im Rahmen einer Sensitivitätsstudie untersucht werden (Abschnitt 4.1). In einem zweiten Schritt sollen dann auch die vom LANUV bereitgestellten Eingangsdaten (Grundwasserganglinien, Geologie bzw. Schichtaufbau) ebenfalls variiert und deren Einfluss untersucht werden (Abschnitt 4.2). Als dritter Schritt soll dann eine Neuberechnung für einen Höhenfestpunkt erfolgen, der bereits mit einem vorhandenen Modell erfasst wurde (Abschnitt 4.3).

Der hier vorliegende Zwischenbericht gibt zunächst einen Einblick in die

- fachlichen Grundlagen der Bodenbewegungen (Abschnitt 2),

enthält daran anschließend

- Erläuterungen zum verwendeten Prognosemodell (Abschnitt 3)

und stellt schließlich die

- Ergebnisse der Berechnungen und der Sensitivitätsanalysen (Abschnitt 4)

dar.

Die Ergebnisse der im Rahmen des Projekts zu erstellenden Prognose für weitere Punkte sind nicht Bestandteil dieses Zwischenberichts, werden aber nach Projektende in einem separaten Abschlussbericht behandelt.

2 Fachgrundlagen

Zum besseren Verständnis der in situ ablaufenden Bodenbewegungen, des durch ZAI entwickelten Bodenbewegungsmodells und der damit erhaltenen Ergebnisse werden im Folgenden zunächst einige fachliche Grundlagen erläutert.

2.1 Spannungsänderungen infolge Grundwasserstandsänderung

Wird der Grundwasserspiegel abgesenkt, wie im vorliegenden Fall durch die Sumpfungsmaßnahmen im Rheinischen Braunkohlerevier, hat dies zweierlei Auswirkungen im Boden. Zum einen führt die Absenkung des Grundwasserspiegels in den oberflächennahen und bereichsweise aber auch in tiefergelegenen Grundwasserleitern zu einer teilweisen oder vollständigen Entwässerung bzw. zum Trockenfallen der Grundwasserleiter. Da der Boden dann nicht mehr unter Auftrieb steht, erhöht sich die Wichte des Bodens in den trockenengefallenen Bereichen von der Wichte unter Auftrieb γ' auf die erdfeuchte Wichte des Bodens γ (Abbildung 1).

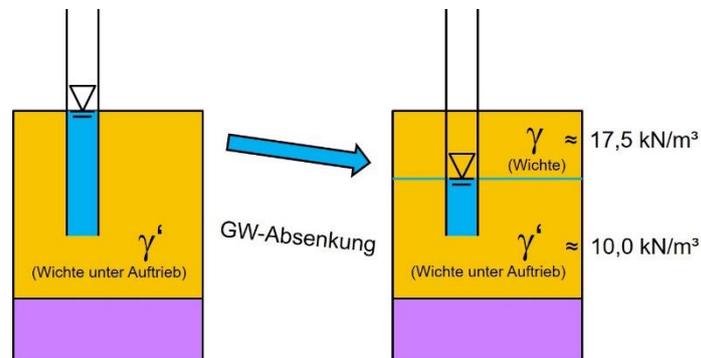


Abbildung 1 Erhöhung der Wichte infolge Trockenfallen

Zum anderen resultiert aus unterschiedlich stark abgesenkten Grundwasserständen in verschiedenen Grundwasserleitern ein hydraulisches Gefälle i und es kommt zur Durchströmung der dazwischenliegenden Grundwasserstauer. Dadurch verändert sich die Wichte im Durchströmungsbereich von der Wichte unter Auftrieb γ' um das Produkt aus hydraulischem Gradienten i und der Wichte von Wasser γ_w zur effektiven Wichte γ^* (Abbildung 2).

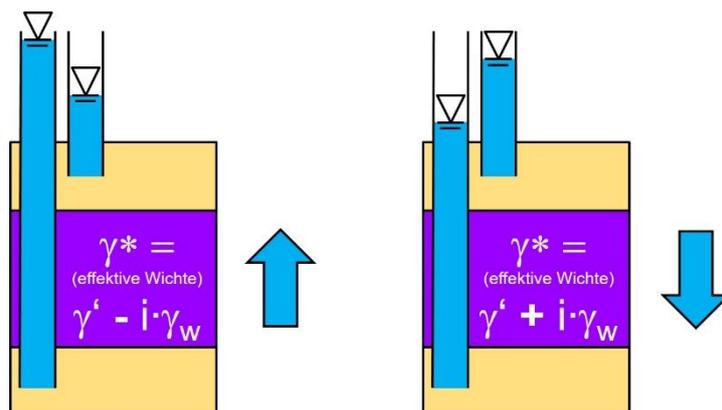


Abbildung 2 Veränderung der Wichte infolge Durchströmung

Wenn im Weiteren auf das „Trockenfallen“ Bezug genommen wird, ist darunter nicht zwangsläufig die komplette Entwässerung eines Grundwasserleiters zu verstehen. Vielmehr wird als Trockenfallen der Vorgang ab dem Zeitpunkt bezeichnet, zu dem der Grundwasserstand unter die Oberkannte eines Grundwasserleiters fällt. Ein solches Trockenfallen gemäß Abbildung 1 ist dabei immer mit einer Erhöhung der Wichte und damit mit einer Spannungszunahme $\Delta\sigma' > 0$ verbunden.

Bei Durchströmung einzelner Bodenschichten ist hingegen sowohl eine Spannungserhöhung als auch eine Spannungsreduzierung möglich. Wird wie in Abbildung 2 links der obere Grundwasserleiter stärker abgesenkt als der untere, führt dies zu einer Durchströmung von unten nach oben. Dadurch verringert sich die Wichte ($\gamma^* < \gamma'$) und es kommt zu einer lokalen Spannungsreduzierung im Grundwasserstauer. Wird hingegen wie in Abbildung 2 rechts der Grundwasserstand im unteren Grundwasserleiter stärker als im oberen abgesenkt, führt dies zu einer Durchströmung von oben nach unten. Die Folge ist eine Erhöhung der Wichte ($\gamma^* > \gamma'$) und es kommt zu einer lokalen Spannungserhöhung.

Dabei pflanzen sich Spannungsänderungen $\Delta\sigma'$ von oben nach unten fort. D.h. auch tiefergelegene nichtbindige Schichten, in denen selbst kein Trockenfallen stattfindet, erfahren eine Spannungsänderung. Weiter kann die Fortpflanzung der Spannungsänderungen aber auch dazu führen, dass trotz lokaler Spannungsreduzierung innerhalb einer Schicht infolge einer Durchströmung von unten nach oben in Summe dennoch eine Spannungserhöhung stattfindet, wie die folgenden Abbildung 3 für den tieferliegenden Grundwasserstauer (violett mit $\gamma^{*,2} < \gamma'$) zeigt.

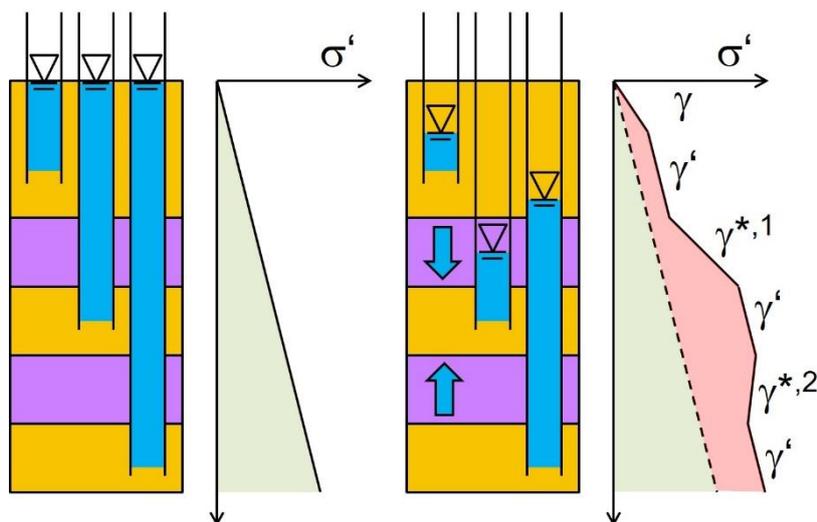


Abbildung 3 Ausgangsspannung (grün) und Spannungsänderung (rot) infolge unterschiedlicher Wasserstandsänderungen in den Grundwasserleitern (gelb)

2.2 Setzungen und Hebungen infolge Spannungsänderungen

Im Gegensatz zu industriell gefertigten Materialien wie z.B. Stahl besteht der natürlich anstehende Boden aus mehreren Komponenten bzw. Phasen, nämlich dem Feststoff in Form eines Korngerüsts und dem Porenraum. Der Porenraum ist i.d.R. je nach Lage bzw. Grundwasserspiegel mit Wasser (Abbildung 4, links), mit Luft oder mit Wasser und Luft (Abbildung 4, Mitte) gefüllt.

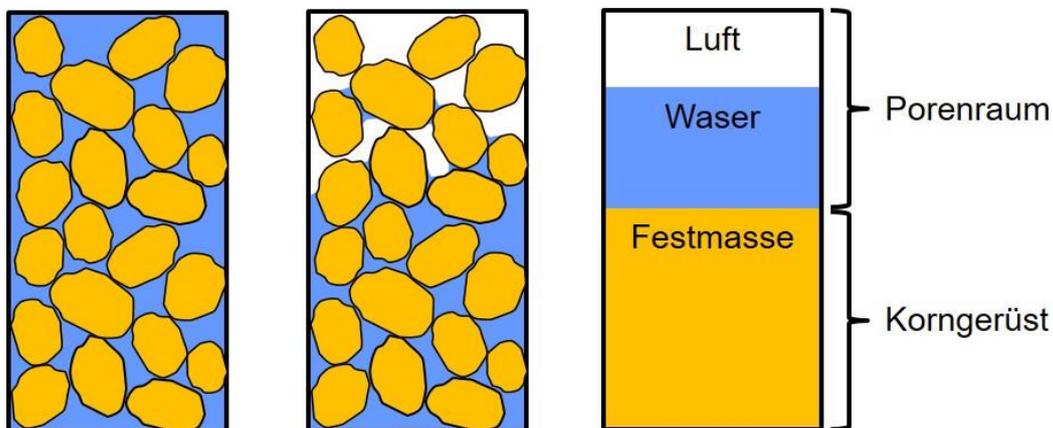


Abbildung 4 Mehrphasensystem Boden

Dabei kann der „gleiche Boden“, d.h. mit gleichem Korngerüst bzw. gleicher Korngrößenverteilung, je nach Entstehungsgeschichte und Spannungszustand unterschiedlich dicht gelagert sein und damit einen unterschiedlich großen Porenraum aufweisen. Erfährt nun ein Boden infolge der vorgenannten Grundwasserstandsänderungen eine Spannungserhöhung, führt dies zu einer Umlagerung bzw. Verdichtung des Korngerüsts bei gleichzeitiger Verringerung des Porenraums. Dies äußert sich dann letztlich in Setzungen Δs wie in der folgenden Abbildung 5 links am Mehrphasensystem und rechts an einem weiter idealisierten Kolben-Feder-Modell zu sehen ist.

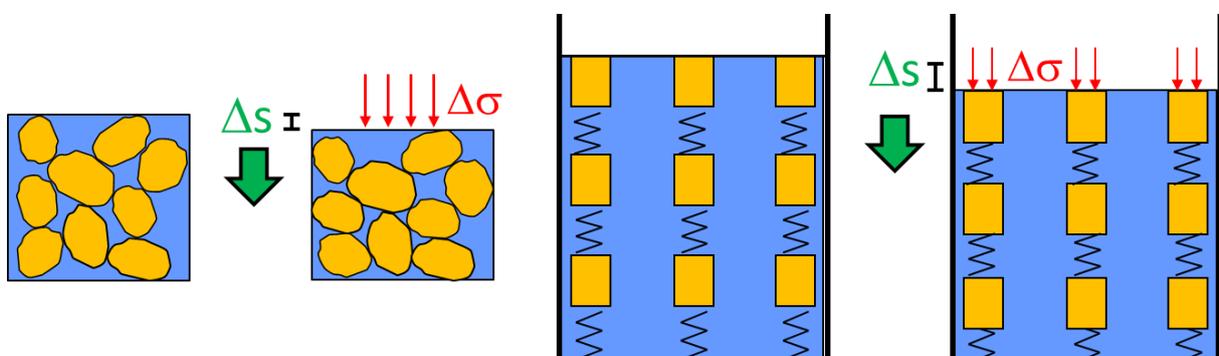


Abbildung 5 Setzungen infolge Spannungserhöhung am Mehrphasensystem und am idealisierten Kolben-Feder-Modell

Bei einer Spannungsreduzierung kommt es hingegen zu einer Entspannung des Korngerüsts, die sich dann letztlich in Hebungen äußert.

2.3 Abhängigkeit von der Tiefe sowie von der Be- und Entlastung

Wie bereits im vorangegangenen Abschnitt dargelegt, verdichtet sich das Korngerüst und verringert sich der Porenraum im Boden mit zunehmendem Spannungsniveau. Da sich der Boden aber nicht beliebig verdichten lässt bzw. der Porenraum endlich ist, nimmt die Verdichtungsfähigkeit mit zunehmendem Spannungsniveau ab bzw. die Steifigkeit des Bodens zu.

Die folgende Abbildung zeigt exemplarisch das Last-Setzungs-Verhalten einer Bodenprobe im Ödometerversuch, die zunächst belastet (0 bis 1), dann entlastet (1 bis 2) und wiederbelastet (2 bis 3) sowie schließlich weiter erstbelastet (3 bis 4) wurde.

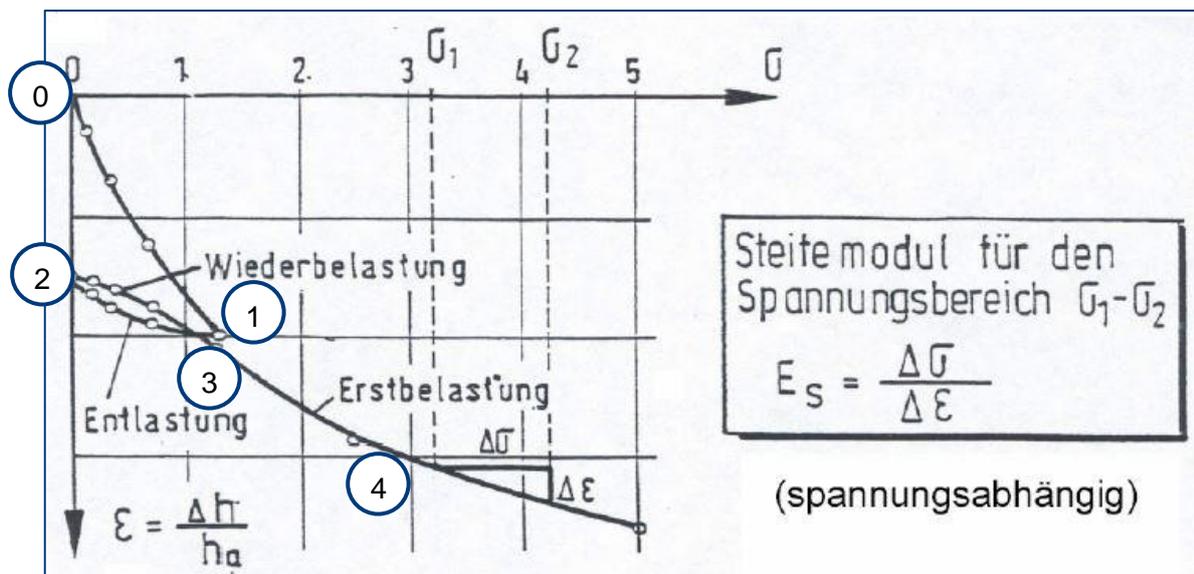


Abbildung 6 Ödometerversuch mit Erst-, Ent- und Wiederbelastung nach [7]

Aus dem Verlauf zwischen 0 und 4 ist zunächst ersichtlich, dass sich der Boden mit zunehmender Spannung steifer verhält und bei gleicher Spannungserhöhung weniger Stauchung erfährt. Die Steifigkeit bzw. der Steifemodul E_s als Quotient aus Spannungsänderung $\Delta\sigma$ und Stauchung ε nimmt also mit der Spannung und damit auch mit größerer Tiefe zu, wie Abbildung 7 nochmals verdeutlicht.

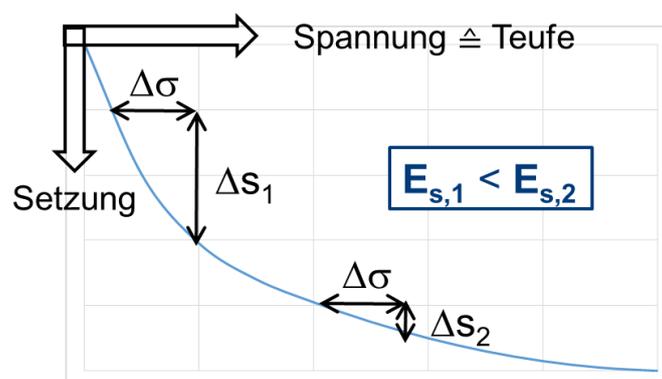


Abbildung 7 Spannungs- bzw. Tiefenabhängigkeit der Steifigkeit und des Steifemoduls E_s

Weiter ist anhand der dargestellten Ergebnisse eines Ödometerversuchs in Abbildung 6 zu sehen, dass eine Entlastung von 1 nach 2 zu einem Rückgang der Stauchung und damit zu Hebungen führt. Allerdings ist auch zu erkennen, dass bei betragsmäßig gleicher Spannungsänderung die Hebungen geringer ausfallen als die zuvor eingetretenen Setzungen. Die Größe der Hebungen bzw. das Verhältnis der Hebungen zu den Setzungen hängt dabei von mehreren Faktoren ab und kann nicht pauschal angegeben werden. Zum einen hängen die Neigungen der Kurvenabschnitte und damit das Verhältnis zwischen Setzung und Hebung vom absoluten Spannungsniveau ab. Zum anderen spielt aber auch insbesondere die Belastungshistorie eine entscheidende Rolle. In Zusammenhang mit den Bewegungen im Rheinischen Braunkohlerevier gilt es dabei zu beachten, dass das ab 1955 betrachtete Verhalten der einzelnen Schichten nicht im Nullpunkt gemäß Abbildung 6 bis Abbildung 8 startet, da die Schichten insbesondere infolge Eigengewicht bereits belastet waren.

Es kann aber festgehalten werden, dass sich der Boden bei Entlastung i.d.R. steifer als bei einer Erstbelastung verhält bzw. der Steifemodul zur Abbildung von Entlastungs- bzw. Hebungsvorgängen $E_{s,Ent.}$ größer ist als der Steifemodul bei einer vorherigen Erstbelastung $E_{s,Bel.}$, was nochmals anhand von Abbildung 8 verdeutlicht wird.

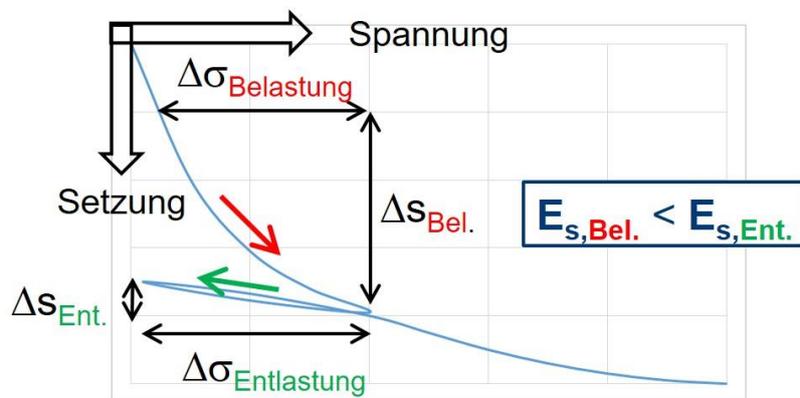


Abbildung 8 Abhängigkeit der Steifigkeit bzw. des Steifemoduls E_s von der Belastung

2.4 Zeitabhängiges Verhalten bindiger Schichten

In gut durchlässigen nichtbindigen Schichten wie Sanden und Kiesen kann das vorhandene Porenwasser bei Belastung unmittelbar entweichen, so dass eine zusätzliche Belastung direkt auf das Korngerüst wirkt und es unmittelbar zu Setzungen kommt. Zeitverzögerte Setzungen finden in der Regel nicht statt. Veranschaulichen lässt sich dies anhand des von Terzaghi [5] entwickelten Kolben-Feder-Modells, bei dem der Abstand zwischen den Kolben wie in Abbildung 9 so groß ist, dass das Wasser ohne Zeitverzögerung abfließen kann.

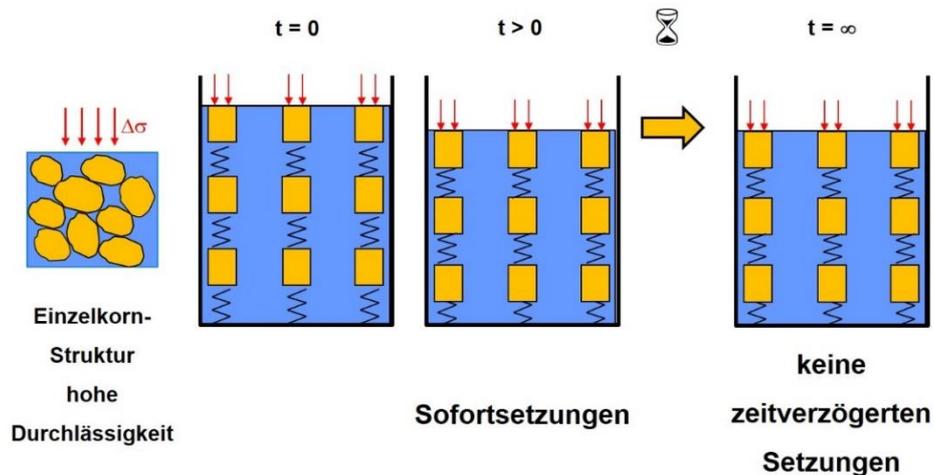


Abbildung 9 Setzungsverhalten nichtbindiger Böden am Kolben-Feder-Modell

Im Gegensatz dazu kann in weniger durchlässigen bindigen Schichten mit Tonen und Schluffen oder auch Kohleflözen das Porenwasser bei Belastung nicht sofort entweichen, so dass zunächst ein Porenwasserüberdruck entsteht. Erst wenn Wasser entweicht, was je nach vorhandener Durchlässigkeit und Steifigkeit des Bodens unterschiedlich lange dauert, baut sich der Porenwasserüberdruck ab und die zusätzliche Belastung geht auf das Korngerüst über. Auch dieser Vorgang lässt sich anhand eines Kolben-Feder-Modells nachvollziehen, bei dem aber wie in Abbildung 10 die Abstände zwischen den Kolben relativ gering sind, so dass der Abfluss des Wassers zeitverzögert stattfindet.

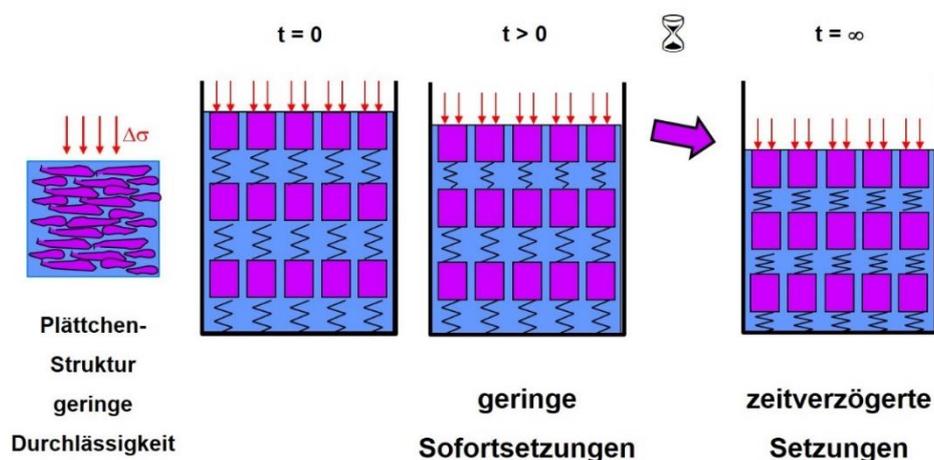


Abbildung 10 Setzungsverhalten bindiger Böden am Kolben-Feder-Modell

Daher treten Setzungen in bindigen Böden erst zeitverzögert ein. Dieser Prozess wird allgemein als Konsolidation bezeichnet.

Dabei erfolgt das Entweichen des Porenwassers zum Schichtrand der angrenzenden durchlässigeren Schicht. Bei zweiseitiger Entwässerung nach oben und unten erfolgt der Abbau des Porenwasserdrucks daher an den Rändern relativ rasch, wird zur Schichtmitte hin aber immer langsamer, da sich damit einhergehend auch der Fließweg des Porenwassers weiter vergrößert. Bei einseitiger Entwässerung liegt der längste Fließweg zwischen dem undurchlässigen und dem durchlässigen Rand. Abbildung 11 spiegelt dazu den Verlauf des mittleren Konsolidationsgrades U über der bezogenen Konsolidationszeit wieder.

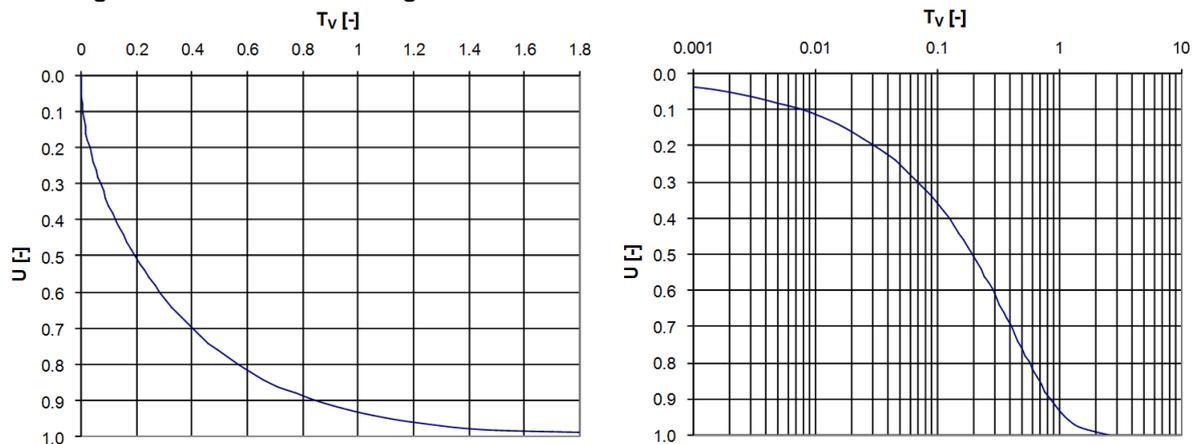


Abbildung 11 Konsolidationskurve in linearer (links) und halblogarithmischer Auftragung (rechts)

Dabei beschreibt der Konsolidationsgrad U das Verhältnis der über die Schichtdicke gemittelten effektiven Spannungen zu den aufgebrachtten totalen Spannungen. Bei Zugrundelegung eines linear elastischen Stoffgesetzes (Setzung proportional zu effektiver Spannung) entspricht das dann dem Verhältnis der zu einem beliebigen Zeitpunkt bereits eingetretenen Setzungen s_t zu den insgesamt zu erwartenden Setzungen $s_{t=\infty}$:

$$U = \frac{s_t}{s_{t=\infty}}$$

Zum Zeitpunkt $t = \infty$ beträgt der Konsolidationsgrad $U = 1$ und der Porenwasserdruck ist abgebaut, alle aufgebrachtten Spannungen wirken auf das Korngerüst und die Setzungen sind abgeschlossen. Setzungen zu einem beliebigen Zeitpunkt ergeben sich dann durch Umstellung der Gleichung aus den Setzungen für $t = \infty$ bzw. $U = 1$ multipliziert mit dem aktuellen Konsolidationsgrad.

Die bezogene dimensionslose Konsolidationszeit T_v hängt zum einen von der tatsächlichen Zeit t und zum anderen vom Quadrat der relevanten Schichtdicke d sowie dem Konsolidationsbeiwert c_v ab:

$$T_v = \frac{c_v}{d^2} \cdot t$$

Die relevante Schichtdicke d entspricht bei einseitiger Entwässerung der Schichtmächtigkeit m und bei zweiseitiger Entwässerung der halben Schichtmächtigkeit $m/2$. Die Größe des Konsolidationsbeiwertes c_v wird wesentlich von der Durchlässigkeit k_f und der Steifigkeit (Steifemodul E_s) des Bodens beeinflusst. Näherungsweise besteht zwischen diesen Größen folgender Zusammenhang:

$$c_v \approx \frac{k_f \cdot E_s}{\gamma_w}$$

2.5 Weitere bedeutsame Wirkungszusammenhänge

Auf Basis der vorherigen Ausführungen lässt sich weiter festhalten, dass die Konsolidation mit der Zeit immer langsamer abläuft. Etwa 50% der Gesamtsetzungen ($U = 0,5$) treten bereits nach einer bezogenen Konsolidationszeit von $T_v \approx 0,2$ ein, wohingegen bis zum Eintritt der restlichen 50% annähernd eine 10-Mal so lange Zeitspanne benötigt wird (vgl. Abbildung 11).

Die Gesamtdauer bis zum Ende der Setzungen hängt insbesondere von der Schichtmächtigkeit ab, die im Quadrat eingeht. Bei gleichen Entwässerungsbedingungen dauert es demnach bei doppelter Schichtmächtigkeit viermal so lang, bis die Konsolidation abgeschlossen ist und bei dreifacher Schichtmächtigkeit bereits fast zehnmal so lang. Dadurch können sich bei mächtigen Schichten sehr lange Konsolidationszeiten ergeben, die dann auch zu den im Rheinischen Braunkohlerevier beobachteten nachlaufenden Setzungen trotz bereits erfolgtem Grundwasserwiederanstieg führen.

Weiter hängen der zeitliche Verlauf und die Gesamtdauer der Setzungen aber auch von den Bodeneigenschaften und insbesondere vornehmlich der Durchlässigkeit und der Steifigkeit des Bodens ab, was sich durch den sogenannten Konsolidationsbeiwert ausdrücken lässt. Theoretisch ändern sich sowohl die Steifigkeit als auch die Durchlässigkeit des Bodens durch die stattfindenden Setzungen und Hebungen. Tatsächlich ist dieser Effekt für die vorliegende Situation aber vernachlässigbar. Zwar können an der Geländeoberfläche maximale Setzungen s_{max} im Meterbereich stattfinden, bezogen auf die Mächtigkeit m von mehreren hundert Metern (vgl. z.B. nachfolgende Abbildung 12) ist die Änderung des Porenraums n und damit auch die Änderung sowohl der Steifigkeit E_s als auch der Durchlässigkeit k_f marginal. So beträgt etwa die mittlere maximale prozentuale Änderung des Porenraums Δn_{max} am Punkt Niedermerz (vgl. Abschnitt 4.1 bzw. Abbildung 22) gerade einmal

$$\Delta n_{max} = \frac{s_{max}}{m \cdot n} \cdot 100\% \approx \frac{0,75 [m]}{493 [m] \cdot 0,4} \cdot 100\% \approx 0,4 \%$$

Relevante Auswirkungen etwa auf die Durchlässigkeit und daraus resultierend auf die Prognosegenauigkeit sind daher nicht zu erwarten. Selbst wenn man im ungünstigsten Fall annehmen würde, dass sich die Änderung des Porenraums 1:1 auch auf die Steifigkeit und die Durchlässigkeit bzw. den Konsolidationsbeiwert und damit letztlich auf die Konsolidationsdauer auswirken würde, und sich weiter die Abweichung durch die Hebungen bzw. Bewegungsumkehr in keiner Weise wieder ausgleichen würde, ergäbe sich bei einem Betrachtungszeitraum von 250 Jahren (1955 bis 2200) im Jahr 2200 eine zeitliche Verschiebung von gerade einmal einem Jahr, um die gleichen Endverschiebungen zu erhalten.

3 Bodenbewegungsmodell

Unter der Regie von Prof. Ziegler wurde am Lehrstuhl für Geotechnik im Bauwesen ein wissenschaftliches Prognosemodell zur Beschreibung und Abbildung von Bodenbewegungen im Rheinischen Braunkohlerevier entwickelt (vgl. ZIEGLER et al [1], GIESE [2]).

Dieses Modell wurde schließlich seitens ZAI für die praktische Anwendung vereinfacht und so weiterentwickelt, dass eine Anwendung auf beliebige Punkte sowie eine punktgenaue Kalibrierung und Anpassung der Eingangswerte auf Basis vorhandener Informationen zur Höhenzeitfolge, zur Geologie und zu vorhandenen oder prognostizierten Grundwasserganglinien möglich ist.

Das so entwickelte Prognosemodell ist mehrstufig aufgebaut und besteht im Wesentlichen aus drei Anwendungsdateien

- 1) Schichtmodell,
- 2) Grundwasserdaten und Spannungen sowie
- 3) Bodenbewegungen,

die im Folgenden näher erläutert werden.

3.1 Schichtmodell

In einem ersten Schritt wird aus den vorhandenen Informationen zur Geologie und zur Hydrologie ein Schichtmodell erstellt. Den Ausschnitt eines so erhaltenen Schichtmodells in einem Excel-Sheet zeigt die folgende Abbildung 12.

Dabei wird zum einen zwischen nichtbindigen (gelb in Abbildung 12) und bindigen Schichten (lila in Abbildung 12) sowie Kohleschichten (rotbraun in Abbildung 12) unterschieden, da das Last-Setzungs- und das Zeit-Setzungs-Verhalten je nach Bodenart deutlich differiert (vgl. Abschnitt 2). Zum anderen werden die Schichtpakete und -mächtigkeiten für das Schichtmodell auf der Basis geotechnischer Informationen und Erfahrungen festgelegt. Dabei werden insbesondere auch die vorhandenen Grundwasserstockwerke berücksichtigt und Besonderheiten erfasst, die bei der späteren Kalibrierung unter Umständen zu berücksichtigen sind.

Im vorliegenden Fall erfolgt die Interpretation der Geologie durch den Geologischen Dienst NRW (GD) und das geologische Schichtprofil über alle von der Grundwasserentnahme betroffenen Schichten wird der ZAI vom LANUV zur Verfügung gestellt (vgl. nachfolgende Abbildung 20). Damit kann das vorgegebene Schichtmodell direkt in das Format des Bodenbewegungsmodells überführt werden.

Geologie Niedermerz gem. Vorgabe LANUV				GW gem- Vorgabe LANUV		
Tiefenlage		Horizont	Mächtigkeit	Anmerkung		Daten vorhanden
[m NN]	[m]		[m]			
123,2	0					
112,35	10,85	14-19	21,7	nichtbindig		14-19
101,5	21,7	9C	4,8	bindig		
99,1	24,1					
96,7	26,5	9B	21,3	...		9B
86,05	37,15					
75,4	47,8	9A	5,9			
72,45	50,75					
69,5	53,7	8	32,5			8
53,25	69,95					
37	86,2	7F/7D/7B	3	Kohle		
35,5	87,7					
34	89,2	7A	23,7			7A
22,15	101,05					
10,3	112,9	6E	10,3			
5,15	118,05					
0	123,2	6D	25,3			6D
-12,65	135,85					
-25,3	148,5	6C	28,1			
-39,35	162,55					
-53,4	176,6	6B	0,4			6B
-53,6	176,8					
-53,8	177	6A	18,2			
-62,9	186,1					
-72	195,2	2-5	110,8			2-5
-127,4	250,6					
-182,8	306	1	4,6			
-185,1	308,3					
-187,4	310,6	02-09	182,6			02-09
-278,7	401,9					
-370	493,2					

Abbildung 12 Schichtmodell Niedermerz gemäß den Vorgaben des LANUV mit Horizontbezeichnung nach SCHNEIDER-THIELE [3]

3.2 Grundwasserdaten und Spannungen

Im nächsten Schritt erfolgt in einem weiteren Excel-Sheet zunächst eine Transponation, so dass die Schichtung horizontal (pro Schicht eine Spalte) und die Zeitachse vertikal (pro Zeitschritt eine Zeile) abgebildet werden kann. Der Zeitschritt im Modell beträgt $\Delta t = 1$ Jahr. Auf Basis von Grundwasserdaten wird dann den nichtbindigen Schichten bzw. Grundwasserleitern für jedes Jahr ein Grundwasserstand zugewiesen.

Die dafür erforderlichen Grundwasserdaten werden im vorliegenden Fall auf Basis eines eigenen Grundwassermodells des LANUV und auf Basis von Grundwassermessstellen vom LANUV konstruiert und der ZAI in Form von Grundwasserganglinien (vgl. nachfolgende Abbildung 21) für alle Grundwasserleiter zur Verfügung gestellt.

Darauf basierend werden für die bindigen Schichten bzw. Grundwasserstauer die hydraulischen Gradienten ermittelt, wie Abbildung 13 beispielhaft zeigt.

		GW-Leiter und -Stauer														
		14-19	9C	9B	9A	8	7F/7D/7B	7A	6E	6D	6C	6B	6A	2-5	1	02-09
OK		123,2	101,5	96,7	75,4	69,5	37	34	10,3	0	-25,3	-53,4	-53,8	-72	-182,8	-187,4
UK		101,5	96,7	75,4	69,5	37	34	10,3	0	-25,3	-53,4	-53,8	-72	-182,8	-187,4	-370
Mächtigkeit		21,7	4,8	21,3	5,9	32,5	3	23,7	10,3	25,3	28,1	0,4	18,2	110,8	4,6	182,6
Datum		GW-Stand [mNN]	Gradient i [-]	GW-Stand [mNN]	Gradient i [-]	GW-Stand [mNN]	Gradient i [-]	GW-Stand [mNN]	Gradient i [-]	GW-Stand [mNN]	Gradient i [-]	GW-Stand [mNN]	Gradient i [-]	GW-Stand [mNN]	Gradient i [-]	GW-Stand [mNN]
01.10.1955		110,90	-0,22	111,95	-1,70	122,00	1,33	118,00	0,34	114,50	0,72	94,20	0,04	93,40	0,00	93,40
01.10.1956		110,87	-0,20	111,82	-1,71	121,93	1,34	117,91	0,37	114,07	0,71	94,11	0,04	93,40	0,00	93,40
01.10.1957		110,84	-0,18	111,69	-1,72	121,86	1,34	117,83	0,41	113,63	0,70	94,02	0,03	93,40	0,00	93,40
01.10.1958		110,81	-0,16	111,56	-1,73	121,79	1,35	117,74	0,44	113,20	0,69	93,93	0,03	93,40	0,00	93,40
01.10.1959		110,78	-0,14	111,43	-1,74	121,71	1,35	117,66	0,48	112,76	0,67	93,84	0,02	93,40	0,00	93,40
01.10.1960		110,75	-0,12	111,30	-1,75	121,64	1,36	117,57	0,51	112,33	0,66	93,76	0,02	93,40	0,00	93,40
01.10.1961		111,65	0,10	111,17	-1,76	121,57	1,30	117,68	0,56	111,89	0,65	93,67	0,01	93,40	0,00	93,40
01.10.1962		112,40	0,28	111,04	-1,77	121,50	1,28	117,66	0,60	111,46	0,64	93,58	0,01	93,40	0,00	93,40
01.10.1963		111,28	0,08	110,91	-1,58	120,26	1,11	116,92	1,16	105,01	0,41	93,49	0,32	87,70	0,00	87,70
01.10.1964		110,05	-0,15	110,78	-1,41	119,11	1,39	114,94	2,09	93,40	0,00	93,40	1,81	60,48	0,00	60,48
01.10.1965		109,48	-0,24	110,65	-1,21	117,78	1,57	113,08	2,33	89,09	0,00	89,09	2,38	45,79	0,00	45,79

Abbildung 13 Ausschnitt aufbereitete Grundwasserdaten für Niedermerz

Damit liegen für alle Schichten und für jeden Zeitpunkt die hydraulischen Randbedingungen vor, die dann als Eingangswerte für die Spannungsermittlung dienen.

Die Bodenbewegungen an der Geländeoberfläche sind nur mittelbar mit den verschiedenen Grundwasserbewegungen verknüpft, da sie ursächlich aus den mit den Grundwasserbewegungen einhergehenden Spannungsänderungen resultieren (vgl. Abschnitt 2.1). Daher werden für die spätere Prognose der Bodenbewegungen (vgl. Abschnitt 3.3) zunächst die Spannungsänderungen innerhalb aller Schichten für jeden Zeitschritt ermittelt, wie Abbildung 14 beispielhaft zeigt.

		Spannungsänderung															
		14-19	9C	9B	9A	8	7F/7D/7B	7A	6E	Mächtigkeit m [m]							
		variabel		4,8	21,3	variabel		5,9	32,5	variabel		3	23,7	variabel		10,3	
		m*		m*		m*		m*		m*		m*		m*		m*	
		$\Delta\sigma^*$ [kN/m²]															
01.10.1955		9,40	0,00	0,00	0,00			0,00	0,00			0,00	0,00			0,00	
01.10.1956		9,38	0,23	0,73	1,22			0,93	0,64			0,71	0,78			2,53	
01.10.1957		9,35	0,23	0,73	1,22			0,93	0,64			0,71	0,78			2,53	
01.10.1958		9,32	0,23	0,73	1,22			0,93	0,64			0,71	0,78			2,53	
01.10.1959		9,29	0,23	0,73	1,22			0,93	0,64			0,71	0,78			2,53	
01.10.1960		9,26	0,23	0,73	1,22			0,93	0,64			0,71	0,78			2,53	
01.10.1961		9,70	-6,75	-1,60	3,55			3,26	2,96			2,06	1,15			3,87	
01.10.1962		10,52	-5,63	-1,23	3,17			2,88	2,59	noch kein Trocken- fallen	noch kein Trocken- fallen	2,33	2,08			4,15	
01.10.1963		10,34	8,40	3,45	-1,50	noch kein Trocken- fallen	noch kein Trocken- fallen	4,05	9,60			7,10	4,60	noch kein Trocken- fallen	noch kein Trocken- fallen	33,15	
01.10.1964		9,16	9,23	3,72	-1,78			3,32	8,43			12,58	16,73			64,88	
01.10.1965		8,26	4,28	2,08	-0,13			5,87	11,88			14,53	17,18			29,43	
01.10.1966		8,86	-13,28	-3,78	5,72			15,53	25,33			25,33	25,33			30,33	

Abbildung 14 Ausschnitt Spannungsermittlung für Niedermerz

Dabei werden neben der Spannungserhöhung durch den Wegfall des Auftriebs im obersten Grundwasserstockwerk (14-19) insbesondere auch Spannungsänderungen durch Strömungskräfte infolge unterschiedlicher Potentiale sowie Effekte aus Trockenfallen auch tiefer gelegener Schichten berücksichtigt. Infolge des Trockenfallens ergibt sich außerdem die Notwendigkeit, eine Fallunterscheidung vorzunehmen. Durch die Fallunterscheidung werden Spannungsänderungen aus den überlagernden Schichten auf die tatsächliche Schichtmächtigkeit m bezogen, wohingegen bei Trockenfallen (vgl. Abschnitt 2.1 bzw. Abbildung 1) die aktuell setzungsrelevante Schichtmächtigkeit m^* und die Spannungsänderung $\Delta\sigma'$ aus dem bereichsweisen Trockenfallen am Ende des betrachteten Zeitschrittes ($t = j$) anzusetzen sind. Wie anhand von Abbildung 15 nachvollzogen werden kann, ergibt sich die setzungsrelevante Schichtmächtigkeit m^* aus der am Anfang des Zeitschrittes ($t = j-1$) benetzten Höhe abzüglich (bzw. bei Grundwasserwiederanstieg zuzüglich) der halben Grundwasserstandsänderung $\Delta h/2$. Dies ist notwendig, damit sich auch rechnerisch in den oberen bereits trockengefallenen Bereichen keine Setzungen mehr aus dem darunter anschließenden Trockenfallen ergeben. Der Ansatz nur des halben Werts von Δh rührt daher, dass die Spannungszunahme durch das Trockenfallen linear mit der Tiefe zunimmt. Der Ansatz nur der halben Schichtdicke kompensiert dabei den Ansatz des Maximalwerts der Spannungszunahme $\Delta\sigma'$.

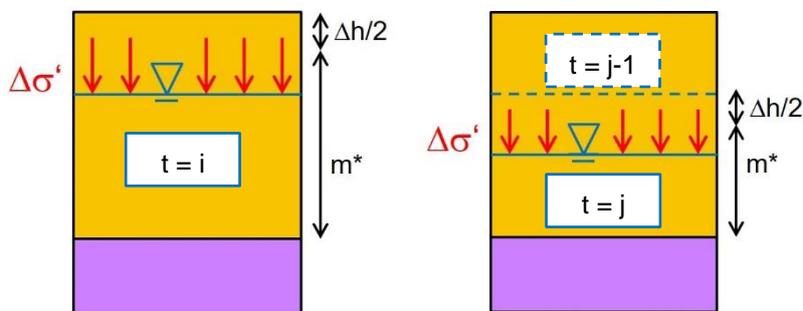


Abbildung 15 Relevante Spannungsänderung und Schichtmächtigkeit

3.3 Bodenbewegungen

Basierend auf den erhaltenen Spannungsänderungen (vgl. Abschnitt 3.2) erfolgt schließlich die eigentliche Ermittlung der sich einstellenden Bodenbewegungen bzw. Setzungen und Hebungen. Die Ermittlung der Bodenbewegungen basiert auf allgemeingültigen bodenmechanischen Gesetzmäßigkeiten und Zusammenhängen (vgl. Abschnitt 2) wie der Theorie der effektiven und totalen Spannungen sowie der Kompressions- und der Konsolidationstheorie (vgl. z.B. TERZAGHI [4], TERZAGHI & JELINEK [5] und KOLYMBAS [6]). Erst dadurch ist es möglich, das zeitverzögerte Setzungs- und auch Hebungsverhalten der bindigen Schichten realitätsnah zu erfassen. Mit herkömmlichen, rein empirischen Ansätzen, welche die Bodenbewegungen z.B. ausschließlich durch Korrelation mit den Wasserständen ermitteln, kann dieses Verhalten nicht abgebildet werden.

Bei der Ermittlung der Bodenbewegungen wird weiter zwischen den nichtbindigen und den bindigen Schichten unterschieden. Während die Bodenbewegungen in den nichtbindigen Schichten sofort eintreten, finden diese in den bindigen Schichten zeitverzögert statt, wie bereits in Abschnitt 2.4 dargelegt wurde.

Da das Last-Setzungs-Verhalten auch deutlich vom Spannungsniveau abhängt und im vorliegenden Fall des Rheinischen Braunkohlereviere Schichtpakete von bis zu 1000 m Mächtigkeit zu betrachten sind, erfolgt die Ermittlung außerdem auf Basis teufenabhängiger Steifigkeiten (vgl. Abschnitt 2.3 bzw. Abbildung 7).

Weiter erfolgt im Modell eine Fallunterscheidung, durch die automatisch bei einer Spannungserhöhung (i.d.R. aus GW-Absenkung) Setzungen und bei einer Spannungsreduktion (i.d.R. aus GW-Anstieg) Hebungen ermittelt werden. Dabei werden für die Hebungen die gleichen bodenmechanischen Ansätze verwendet wie für die Setzungen. Allerdings wird bei der Ermittlung der Hebungen über einen Hebungsfaktor (vgl. dazu auch Abschnitt 4.1.3) berücksichtigt, dass sich die Schichten bei Entlastung infolge des Grundwasserwiederanstiegs steifer verhalten als bei der vorherigen Belastung durch die Grundwasserabsenkung (vgl. Abschnitt 2.3 bzw. Abbildung 8).

Einen Ausschnitt der so erhaltenen Bodenbewegungen bzw. Setzungen für den Punkt Niedermerz in Form jährlicher Setzungen zeigt die folgende Abbildung 16.

Datum	Jährliche Setzungen										
	14-19	9C	9B	9A	8	7F/7D/7B	7A	6E	6D	6C	6B
	variabel	4,8	21,3	5,9	32,5	3	23,7	10,3	25,3	28,1	0,4
Δs [mm]											
01.10.1955	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
01.10.1956	0,01	0,00	0,19	0,00	0,10	0,00	0,07	0,00	0,31	0,00	0,00
01.10.1957	0,01	0,00	0,19	0,01	0,10	0,00	0,07	0,01	0,31	0,01	0,00
01.10.1958	0,01	0,01	0,19	0,01	0,10	0,00	0,07	0,01	0,31	0,01	0,00
01.10.1959	0,01	0,01	0,19	0,02	0,10	0,01	0,07	0,02	0,31	0,02	0,00
01.10.1960	0,01	0,02	0,19	0,02	0,10	0,01	0,07	0,02	0,31	0,02	0,00
01.10.1961	-0,35	0,02	0,56	0,03	0,44	0,01	0,10	0,03	0,48	0,03	0,00
01.10.1962	-0,32	0,01	0,50	0,05	0,39	0,01	0,18	0,04	0,46	0,03	0,00
01.10.1963	0,58	0,00	-0,19	0,06	1,43	0,02	0,40	0,05	4,52	0,04	0,00
01.10.1964	0,56	0,03	-0,22	0,08	1,26	0,03	1,47	0,12	8,29	0,10	0,00
01.10.1965	0,24	0,05	-0,02	0,10	1,77	0,06	1,51	0,27	3,06	0,21	0,04

Abbildung 16 Ausschnitt jährliche Setzungen für Niedermerz

Die erhaltenen Bodenbewegungen bzw. Setzungen in Form aufsummierter Setzungen zeigt der Ausschnitt in Abbildung 17.

Datum	Gesamtsetzungen										
	14-19	9C	9B	9A	8	7F/7D/7B	7A	6E	6D	6C	6B
	variabel	4,8	21,3	5,9	32,5	3	23,7	10,3	25,3	28,1	0,4
s [mm]											
01.10.1955	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
01.10.1956	0,01	0,00	0,19	0,00	0,10	0,00	0,07	0,00	0,31	0,00	0,00
01.10.1957	0,03	0,00	0,39	0,01	0,19	0,00	0,14	0,01	0,63	0,01	0,00
01.10.1958	0,04	0,01	0,58	0,02	0,29	0,01	0,21	0,02	0,94	0,02	0,00
01.10.1959	0,06	0,03	0,77	0,03	0,38	0,01	0,28	0,03	1,25	0,03	0,00
01.10.1960	0,07	0,05	0,97	0,05	0,48	0,02	0,34	0,06	1,56	0,05	0,00
01.10.1961	-0,28	0,07	1,53	0,08	0,92	0,02	0,44	0,09	2,05	0,08	0,01
01.10.1962	-0,59	0,08	2,03	0,13	1,31	0,04	0,63	0,12	2,50	0,11	0,01
01.10.1963	-0,01	0,09	1,84	0,19	2,74	0,05	1,03	0,17	7,03	0,15	0,01
01.10.1964	0,55	0,11	1,61	0,27	4,00	0,09	2,50	0,29	15,32	0,26	0,01
01.10.1965	0,78	0,16	1,60	0,38	5,77	0,15	4,01	0,56	18,37	0,47	0,04

Abbildung 17 Ausschnitt aufsummierte Setzungen für Niedermerz

Die eigentliche Kalibrierung der in die Berechnung einfließenden Eingangswerte erfolgt erst im Anschluss an die vorherigen Arbeitsschritte. Dadurch, dass die Berechnungen mit den Eingangswerten verknüpft sind, erfolgt die Neuberechnung der Bodenbewegungen bei Änderung der Eingangswerte automatisch und ermöglicht so eine direkte und schichtspezifische Kalibrierung durch Abgleich mit der tatsächlichen Höhenzeitfolge bzw. Entwicklung der Geländehöhe über die Zeit. Die grafische Ausgabe der Messergebnisse zusammen mit den berechneten Bodenbewegungen zeigt die folgende Abbildung 18.

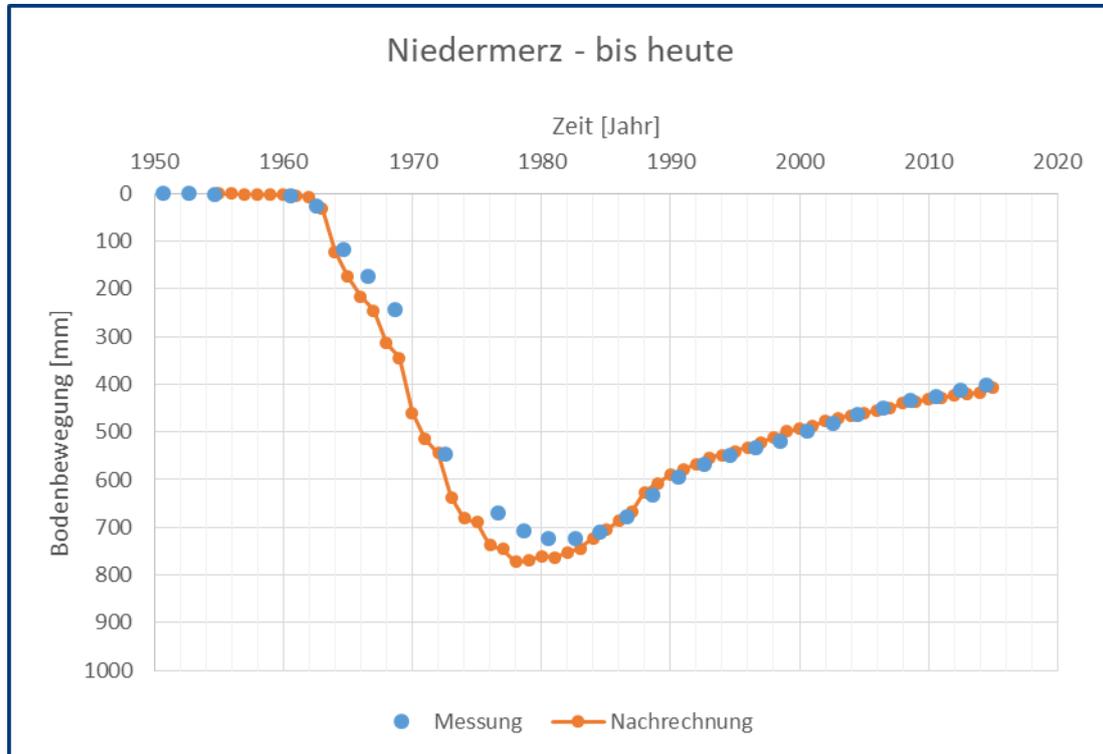


Abbildung 18 Grafische Gegenüberstellung der Messung (Höhenzeitfolge) und Nachrechnung

Es ist zu erkennen, dass es ab den 1960er Jahren infolge der Grundwasserabsenkung zu Setzungen kommt, die um 1980 ihr Maximum erreichen. Anschließend kommt es dann mit Ende der Sumpfungsmaßnahmen bzw. im Zuge des Grundwasserwiederanstiegs zu Hebungen. Diese verlaufen flacher als die vorherigen Setzungen und sind bis heute noch nicht abgeschlossen, wie der Verlauf der Kurven zeigt. Eine weiterführende Beschreibung der gemessenen und berechneten Bodenbewegungen erfolgt in Abschnitt 4.1.2.

Bei der Kalibrierung wird für die nichtbindigen und bindigen Schichten zunächst jeweils eine bodenmechanisch sinnvolle Ausgangssteifigkeit definiert. Die Teufenabhängigkeit kann dann schichtspezifisch definiert bzw. im Zuge der Kalibrierung angepasst werden. Weiter besteht die Möglichkeit, über den Ausgangskonsolidationsbeiwert das zeitabhängige Verhalten der nichtbindigen Schichten und über die Hebungsfaktoren das steifere Hebungsverhalten getrennt für die nichtbindigen und bindigen Schichten nachzukalibrieren.

Durch die Möglichkeit der punktspezifischen Kalibrierung innerhalb des von ZAI entwickelten Bodenbewegungsmodells kann auf die im Rheinischen Braunkohlerevier, insbesondere infolge von Störzonen und Verwerfungen wechselhafte Geologie reagiert werden. Dies ist Voraussetzung dafür, dass das tatsächliche Setzungs- und Hebungsverhalten sehr gut abgebildet werden kann, wie der übereinstimmende Verlauf zwischen Messung und Nachrechnung in Abbildung 18 zeigt.

4 Ergebnisse

Im Folgenden werden die im Rahmen des Projekts bisher erzielten Ergebnisse vorgestellt. Sämtliche Berechnungen und Parametervariationen wurden mit dem in Abschnitt 3 vorgestellten Bodenbewegungsmodell von ZAI durchgeführt. Die Bereitstellung der dazu erforderlichen Eingangsdaten erfolgte durch das LANUV.

4.1 Sensitivitätsstudie an einem vorgegebenen Höhenfestpunkt

Für die Durchführung der Sensitivitätsstudie wurde vom LANUV der Punkt Niedermerz ausgewählt. Dieser liegt auf der Rurscholle südwestlich von Jülich bzw. nordwestlich des Tagebaus Inden wie die folgende Abbildung 19 zeigt.

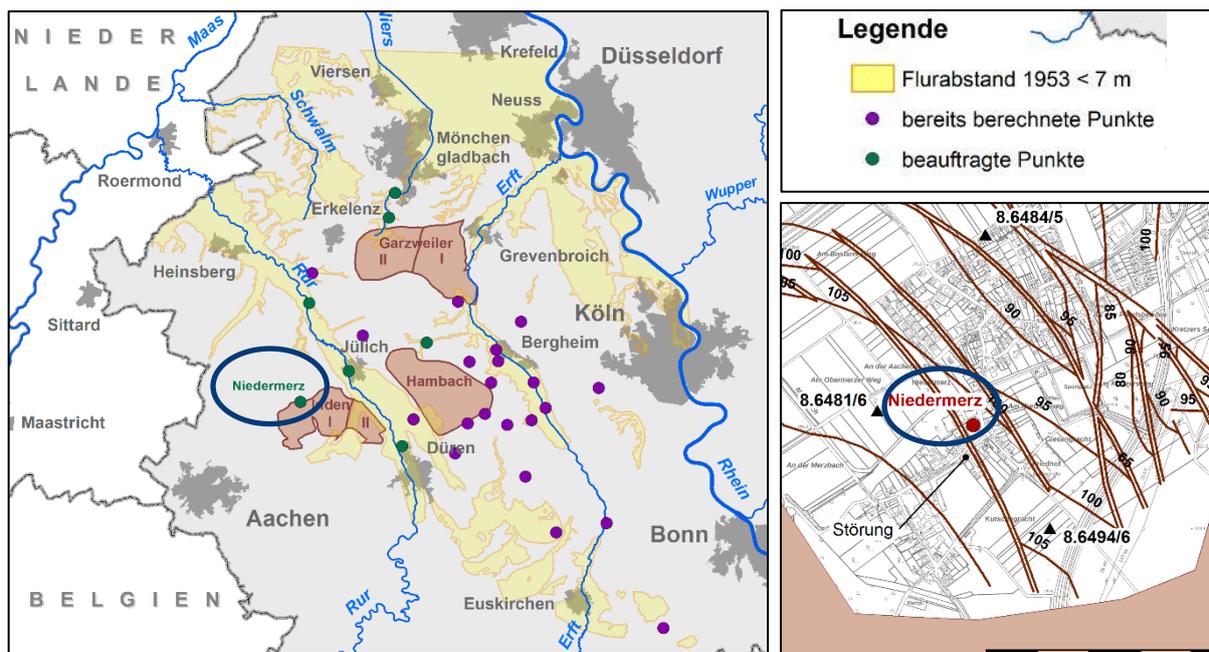


Abbildung 19 Lage des Punktes Niedermerz (blau umrandet) und der Bohrungen 8.6481/6, 8.6484/5 sowie 8.6494/6 (Quelle: LANUV)

Der Punkt Niedermerz bietet sich deshalb für die Durchführung der Sensitivitätsstudie besonders an, da dort bereits seit den 1980er Jahren infolge des Grundwasserwiederanstiegs wieder Hebungen stattfinden (vgl. Abbildung 18). Darüber hinaus wurden im Umfeld von weniger als 1 km drei Bohrungen mit einer Tiefe von jeweils ca. 250 m abgeteuft, so dass auch eine gute Datengrundlage zur Geologie vorhanden ist.

4.1.1 Eingangsdaten

Die für das Bodenbewegungsmodell erforderlichen Eingangsdaten in Form der Schichtenfolge und der zugehörigen Schichttiefen sowie die Grundwasserganglinien wurden der ZAI ebenso wie die gemessenen Bodenbewegungen vom LANUV zur Verfügung gestellt.

Die folgende Abbildung 20 enthält einen Ausschnitt der vom LANUV zur Verfügung gestellten Rohdaten für den Punkt Niedermerz.

Geologie			Leitniveaulement		Grundwasserstände in allen Grundwasserleitern von 1955 bis 2017			
Profil			5103900006		14-19	* trocken	9B	* trocken
horizont	oberkante_m	bemerkung	datum	gok_m	datum	wasserstd_m	datum	wasserstd_m
14-19	123,2	nicht-bindig	01.06.1951	123,217	01.10.1955	110,90	01.10.1955	111,95
9C	101,5	bindig	01.06.1953	123,217	01.10.1956	110,87	01.10.1956	111,82
9B	96,7	nicht-bindig	01.06.1955	123,215	01.10.1957	110,84	01.10.1957	111,69
9A	75,4	bindig	01.06.1957	123,221	01.10.1958	110,81	01.10.1958	111,56
8	69,5	nicht-bindig	01.06.1959	123,218	01.10.1959	110,78	01.10.1959	111,43
7F/7D/7B	37	Flöz	01.05.1961	123,212	01.10.1960	110,75	01.10.1960	111,3
7A	34	nicht-bindig	01.05.1963	123,191	23.10.1961	111,65	01.10.1961	111,17
6E	10,3	Flöz	01.06.1965	123,099	15.10.1962	112,40	01.10.1962	111,04
6D	0	nicht-bindig	01.05.1967	123,044	22.10.1963	111,28	01.10.1963	110,91
6C	-25,3	Flöz	01.06.1969	122,973	12.10.1964	110,05	01.10.1964	110,78
6B	-53,4	nicht-bindig	01.05.1973	122,671	18.10.1965	109,48	01.10.1965	110,65
6A	-53,8	Flöz	01.06.1977	122,547	03.10.1966	111,25	01.10.1966	110,52
2-5	-72	nicht-bindig	01.06.1979	122,51	24.10.1967	112,10	01.10.1967	110,39
1	-182,8	bindig	01.05.1981	122,494	21.10.1968	110,35	01.10.1968	110,26
02-09	-187,4	nicht-bindig	01.05.1983	122,493	21.10.1969	109,59	01.10.1969	110,13
Tertiärbasis	-370		01.04.1985	122,507	26.10.1970	110,05	01.10.1970	110
			01.05.1987	122,538	15.10.1971	108,45	01.10.1971	109,06

Abbildung 20 Ausschnitt Eingangsdaten Niedermerz, bereitgestellt durch LANUV

Abbildung 21 enthält den ebenfalls vom LANUV zur Verfügung gestellten Verlauf der Grundwasserganglinien.

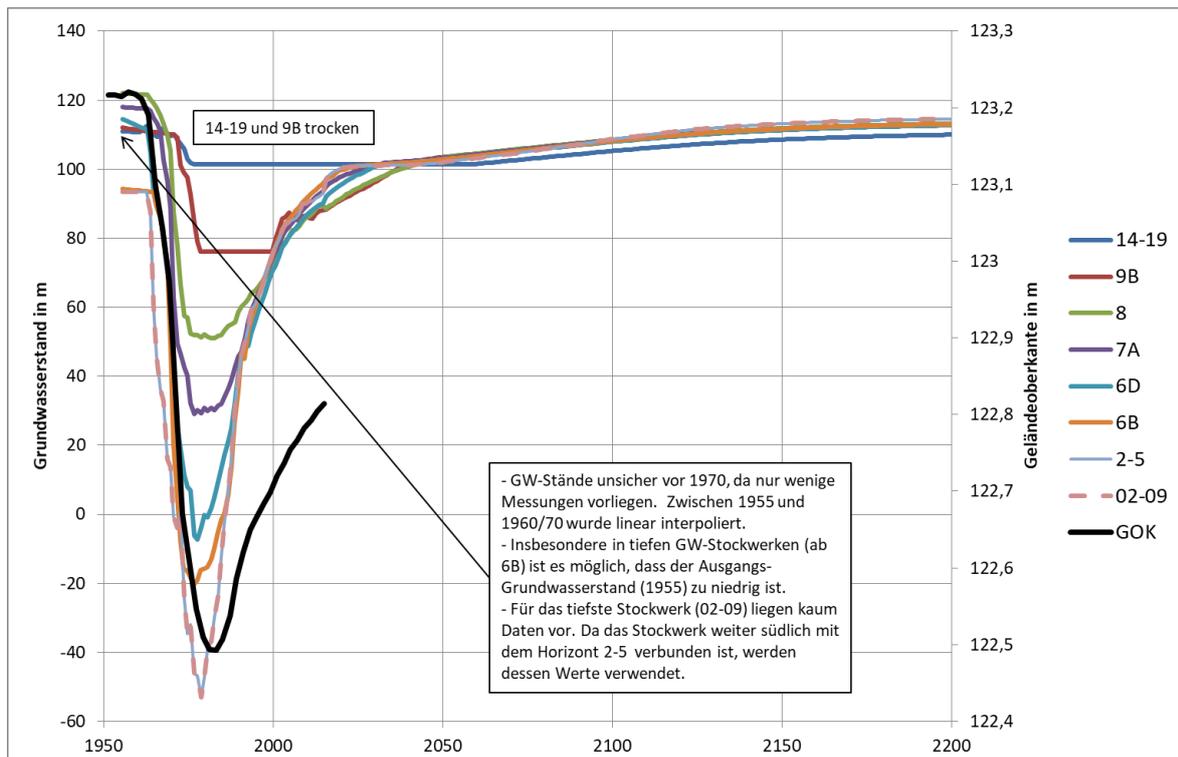


Abbildung 21 Grundwasserganglinien Niedermerz, bereitgestellt durch LANUV

4.1.2 Nachrechnung und Prognose

Auf Basis der in Abschnitt 4.1.1 dargestellten Eingangsdaten wurde dann durch ZAI ein Modell für den Punkt Niedermerz aufgestellt und anhand der gemessenen Bodenbewegungen kalibriert. Das Ergebnis der mit diesem Modell erhaltenen Bodenbewegungen für den Kalibrierungszeitraum zeigt Abbildung 22.

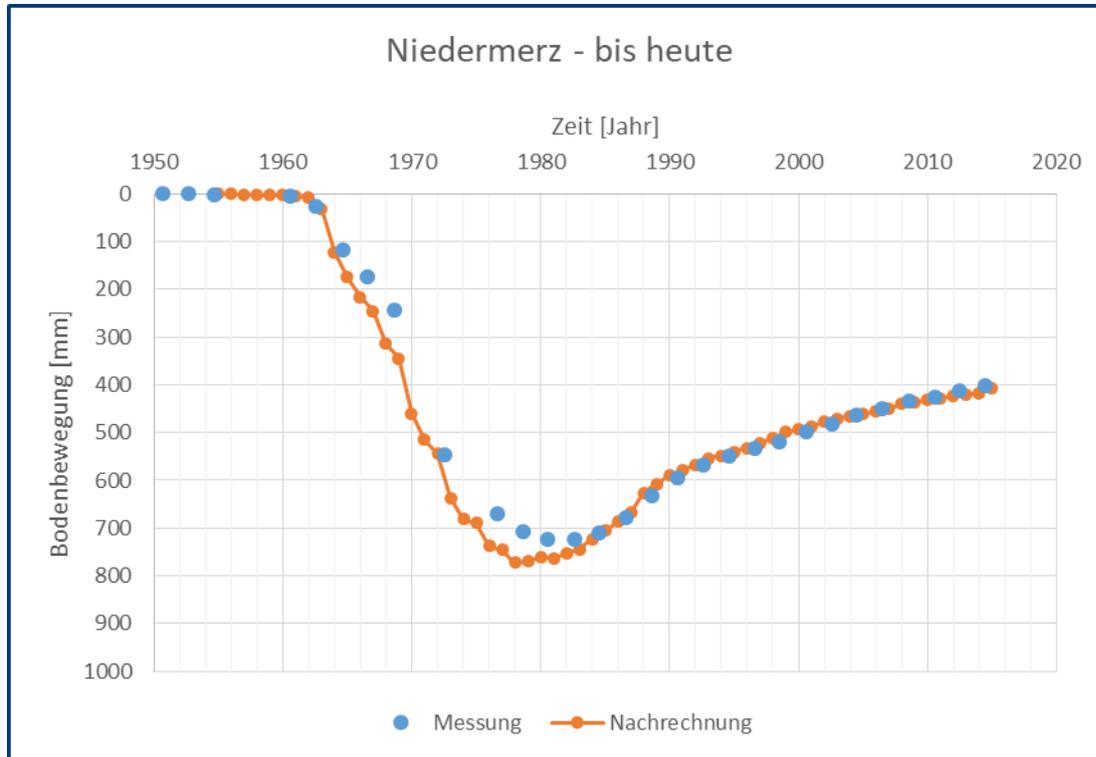


Abbildung 22 Nachrechnung für den Punkt Niedermerz

Es zeigt sich, dass die tatsächlich gemessene Bodenbewegung (blaue Punkte, Messung) mit dem Bodenbewegungsmodell (rote Kurve, Nachrechnung) sehr gut abgebildet werden kann.

Lediglich in den Anfangsjahren der Grundwasserabsenkung treten kleinere Abweichungen zwischen Messung und Nachrechnung auf. Dies ist jedoch nicht auf das Bodenbewegungsmodell selbst sondern vielmehr auf die Eingangsdaten zum Grundwasser zurückzuführen. Dazu wurde vom LANUV (vgl. auch Abbildung 21) folgendes ausgeführt:

- *GW-Stände unsicher vor 1970, da nur wenige Messungen vorliegen. Zwischen 1955 und 1960/70 wurde linear interpoliert.*
- *Insbesondere in tiefen GW-Stockwerken (ab 6B) ist es möglich, dass der Ausgangs-Grundwasserstand (1955) zu niedrig ist.*

Nichtsdestotrotz ergibt sich aber insgesamt dennoch eine sehr gute Übereinstimmung zwischen Messung und Nachrechnung. Insbesondere für den jüngeren Zeitraum ab den 1980er

Jahren beträgt die Abweichung zwischen Messung und Nachrechnung für den hier betrachteten Punkt Niedermerz weniger als 5 cm bzw. weniger als 5% jeweils bezogen auf die aktuelle Setzung.

Basierend auf den durch die Nachrechnung validierten Parametern und der vom LANUV erstellten Prognose der Grundwasserganglinien bis zum Jahr 2200 wurde schließlich mit dem Bodenbewegungsmodell eine Prognose der Bodenbewegungen bis zum Jahr 2200 erstellt. Das Ergebnis dieser Prognose zeigt die folgende Abbildung 23, die verwendeten Eingangsparameter können Tabelle 1 bzw. dem Anhang entnommen werden.

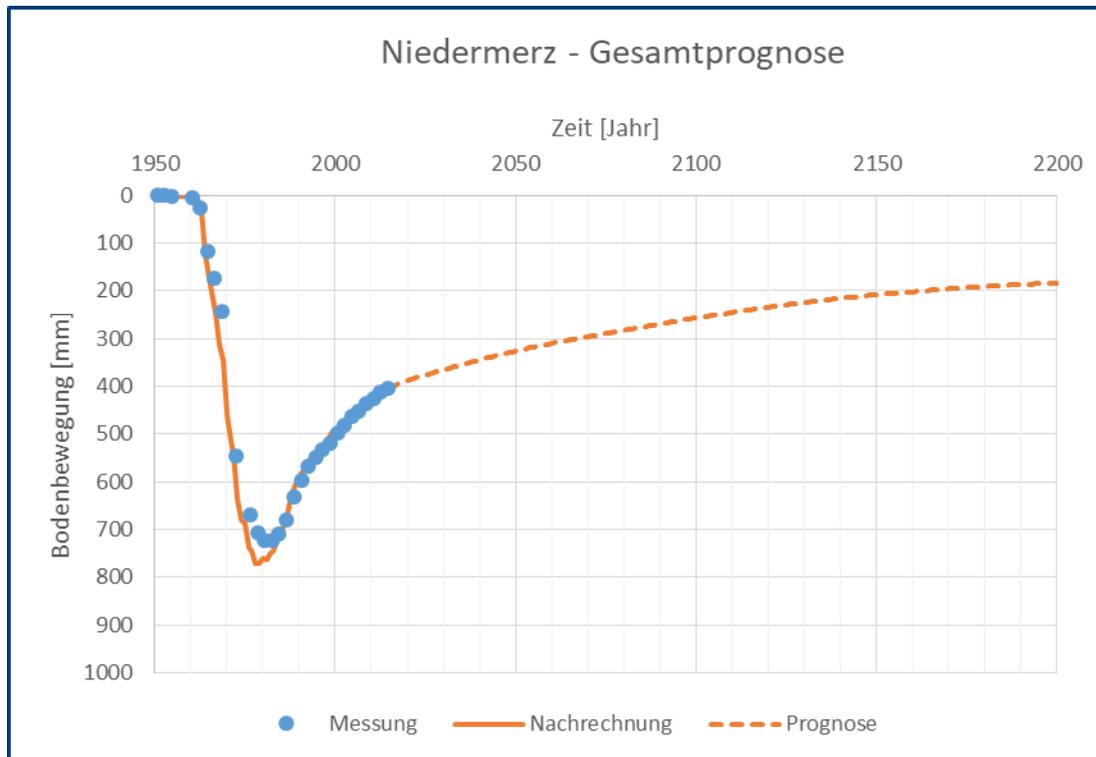


Abbildung 23 Prognose für den Punkt Niedermerz

Es ist zu erkennen, dass es auf Basis des prognostizierten Grundwasserwiederanstiegs in den nächsten Jahren weiter zu Hebungen kommen wird. Dabei flacht der Hebungsverlauf in Zukunft aber immer weiter ab. Weiter werden die insgesamt zu erwartenden Hebungen geringer ausfallen, als die zuvor stattgefundenen Setzungen, was auf das steifere Verhalten bei Entlastung (vgl. Abschnitt 2.3) zurückzuführen ist.

4.1.3 Parametervariation

Zur Überprüfung der Sensitivität der im Bodenbewegungsmodell der ZAI verwendeten Eingangsparameter wurden im Anschluss an die Modellerstellung und Kalibrierung sämtliche Eingangsparameter innerhalb theoretisch denkbarer Wertebereiche variiert:

- 1) Ausgangssteifigkeit nichtbindig
- 2) Ausgangssteifigkeit bindig
- 3) Ausgangskonsolidationsbeiwert*
- 4) Teufenabhängige Steifigkeitszunahme nichtbindig
- 5) Teufenabhängige Steifigkeitszunahme bindig
- 6) Hebungsfaktor nichtbindig
- 7) Hebungsfaktor bindig

*nur bindig, da keine Konsolidation in nichtbindigen Böden stattfindet

Dabei beschreibt die Ausgangssteifigkeit die Steifigkeit der obersten nichtbindigen (1) bzw. bindigen Schicht (2).

Da mit zunehmender Teufe die Überlagerungsspannung und damit auch die Steifigkeit zunehmen (vgl. Abschnitt 2), ist dies durch eine entsprechende Erhöhung bzw. Zunahme (4 & 5) gegenüber der Ausgangssteifigkeit zu berücksichtigen.

Analog zur Steifigkeit beschreibt der Ausgangskonsolidationsbeiwert (3) den Konsolidationsbeiwert der obersten bindigen Schicht, welcher die zeitliche Entwicklung der Setzungen steuert (vgl. Abschnitt 2). Dieser dient dann ebenfalls als Startwert für die übrigen tieferliegenden Schichten, für die mit den Prozentsätzen nach 4) bzw. 5) eine Umrechnung erfolgt.

Mit den Hebungsfaktoren für nichtbindige (6) bzw. bindige Schichten (7) wird schließlich das steifere Verhalten bei Entlastung berücksichtigt (vgl. Abschnitt 2), in dem der Entlastungsmodul gegenüber dem Belastungsmodul entsprechend erhöht wird:

$$E_{S,Entlastung} = \frac{E_{S,Belastung}}{\text{Hebungsfaktor}}$$

Eine Übersicht der im Ausgangsmodell bzw. 0-System verwendeten und der im Rahmen der Parametervariation reduzierten und erhöhten Parameter enthält die folgende Tabelle 1.

Tabelle 1 Variationsbereich der Eingangsparameter

2.1 Parametervariation		Index				
		a	b	0	c	d
Parameter	Einheit	Reduktion		Ausgangsw.	Erhöhung	
Ausgangssteifigkeit nichtbindig	[kN/m ²]	70.000	110.000	150.000	190.000	230.000
Ausgangssteifigkeit bindig	[kN/m ²]	5.000	10.000	15.000	20.000	25.000
Ausgangskonsolidationsbeiwert	[m ² /s]	1,E-12	1,E-11	1,E-10	1,E-09	1,E-08
Teufenabhängige Steifigkeitszunahme nichtbindig	[%]	-50%	-25%	Es,nb (z)	25%	50%
Teufenabhängige Steifigkeitszunahme bindig	[%]	-50%	-25%	Es,b (z)	25%	50%
Teufenabhängige Steifigkeitszunahme: Variation bzw. Berechnung erfolgt nach		= 100% + (Es(z)-100%)*(100%+ij%)				
Hebungsfaktor nichtbindig	[-]	0,2	0,5	0,8	0,9	1
Hebungsfaktor bindig	[-]	0,33	0,5	0,66	0,9	1

Dabei ist zu beachten, dass vor dem Hintergrund möglichst allgemeingültiger Aussagen die Reduktion bzw. Erhöhung der Eingangswerte innerhalb theoretisch denkbarer Grenzen erfolgte. Aufgrund der am Punkt Niedermerz bereits bekannten Bodenbewegungen ist eine Varianz innerhalb dieser theoretischen Grenzen für Niedermerz aber schon nicht mehr als realistisch anzusehen, da mit den theoretisch möglichen Grenzwerten zu große Abweichungen zwischen Messwerten und Nachrechnung erhalten werden.

Im Folgenden werden zunächst die Ergebnisse der einzelnen Parametervariationen dargestellt. Eine Beurteilung der Auswirkung auf die Prognose erfolgt dann in Abschnitt 4.2.3.

4.1.3.1 Ausgangssteifigkeit nichtbindig

Die folgenden beiden Abbildungen zeigen die Ergebnisse der Variation der „Ausgangsteifigkeit nichtbindig“. Bei Reduktion der Ausgangsteifigkeit (a, b) nehmen die maximalen und bleibenden Setzungen gegenüber dem 0-System zu, da sich der Boden weicher verhält. Bei Erhöhung (c, d) der Ausgangsteifigkeit und damit gleichzeitiger Erhöhung der Steifigkeit aller nichtbindigen Schichten nehmen die Setzungen hingegen ab. Weiter ist zu erkennen, dass sich der Einfluss auf den gesamten Betrachtungszeitraum auswirkt. Allerdings ist die Streuung in den 1980er Jahren am größten, da zu diesem Zeitpunkt die größten Setzungen auftreten. Dies gilt für alle Parameter mit Ausnahme der Hebungsfaktoren, bei deren Variation die größte Streuweite erst am Ende des Betrachtungszeitraums mit den maximalen Hebungen auftritt.

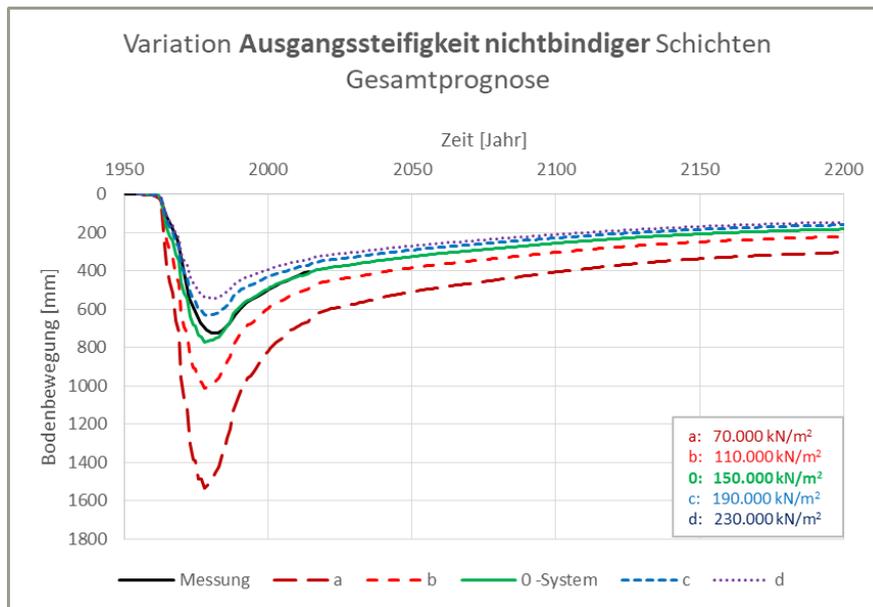


Abbildung 24 Variation Ausgangsteifigkeit nichtbindig - Gesamtprognose

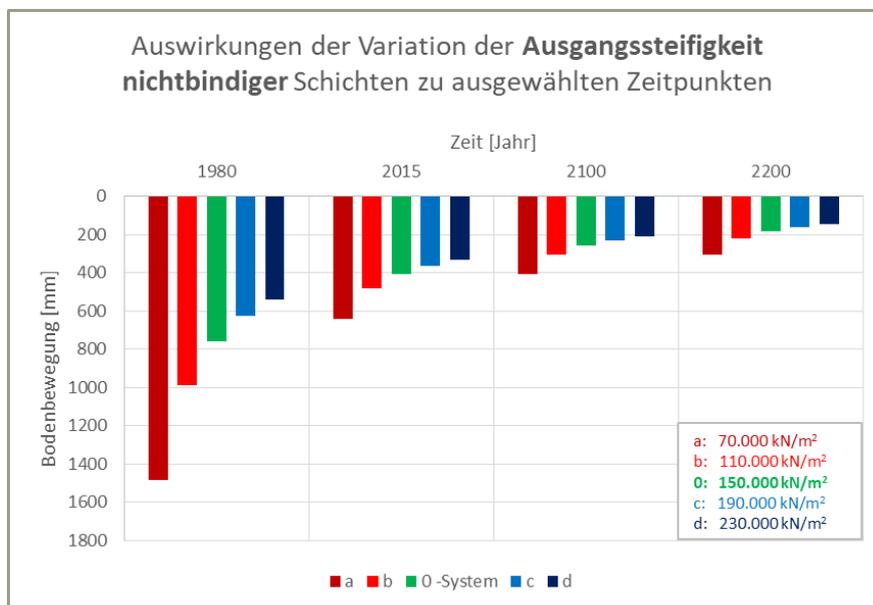


Abbildung 25 Variation Ausgangsteifigkeit nichtbindig – ausgewählte Zeitpunkte

4.1.3.2 Ausgangssteifigkeit bindig

Die folgenden beiden Abbildungen zeigen die Ergebnisse der Variation der „Ausgangssteifigkeit bindig“. Analog zur „Ausgangssteifigkeit nichtbindig“ nehmen auch hier bei Reduktion (a, b) die maximalen und bleibenden Setzungen aufgrund des weicheren Verhaltens gegenüber dem 0-System zu, bei Erhöhung (c, d) hingegen ab. Und auch hier ist zu erkennen, dass sich der Einfluss auf den gesamten Betrachtungszeitraum auswirkt.

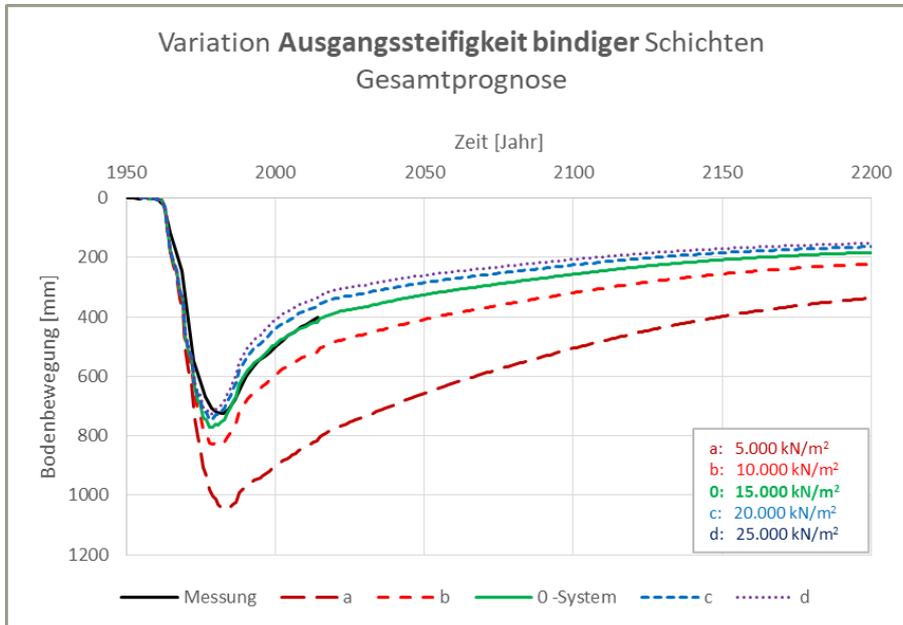


Abbildung 26 Variation Ausgangsteifigkeit bindig - Gesamtprognose

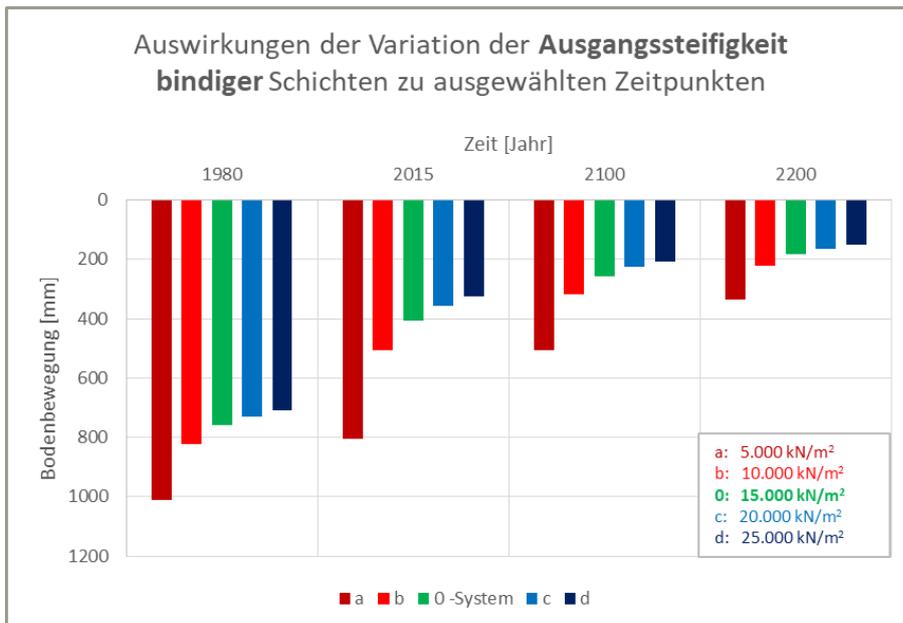


Abbildung 27 Variation Ausgangsteifigkeit bindig – ausgewählte Zeitpunkte

4.1.3.3 Ausgangskonsolidationsbeiwert

Die folgenden beiden Abbildungen zeigen die Ergebnisse der Variation des „Ausgangskonsolidationsbeiwerts“, der ausschließlich für die bindigen Schichten benötigt wird, da in den nicht-bindigen Schichten keine Konsolidationsvorgänge stattfinden. Bei Reduktion des Ausgangskonsolidationsbeiwerts (a, b) reduzieren sich die maximalen und bleibenden Setzungen gegenüber dem 0-System, da die Setzungen früher von den Hebungen „eingeholt werden“. Bei Erhöhung (c, d) vergrößern sich hingegen die Setzungen. Weiter ist auch hier zu erkennen, dass sich der Einfluss auf den gesamten Betrachtungszeitraum auswirkt.

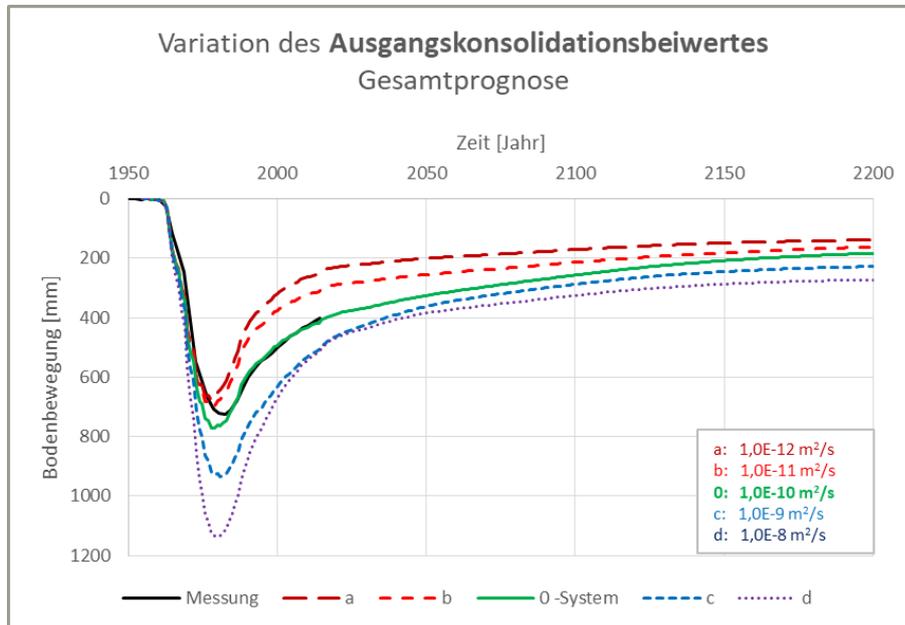


Abbildung 28 Variation Ausgangskonsolidationsbeiwert - Gesamtprognose

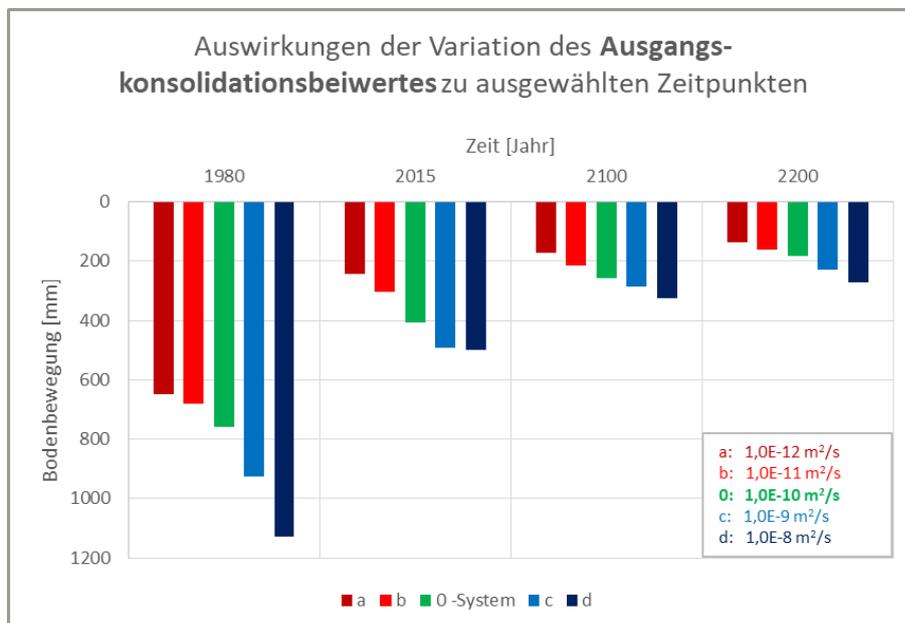


Abbildung 29 Variation Ausgangskonsolidationsbeiwert – ausgewählte Zeitpunkte

4.1.3.4 Teufenabhängige Steifigkeitszunahme nichtbindig

Die folgenden beiden Abbildungen zeigen die Ergebnisse der Variation der „Teufenabhängigen Steifigkeitszunahme nichtbindig“. Bei Reduktion der Steifigkeitszunahme (a, b) nehmen die maximalen und bleibenden Setzungen gegenüber dem 0-System zu, da insgesamt ein weicheres System vorliegt. Bei Erhöhung (c, d) nehmen die Setzungen für das dann steifere System hingegen ab. Weiter ist auch hier zu erkennen, dass sich der Einfluss auf den gesamten Betrachtungszeitraum auswirkt.

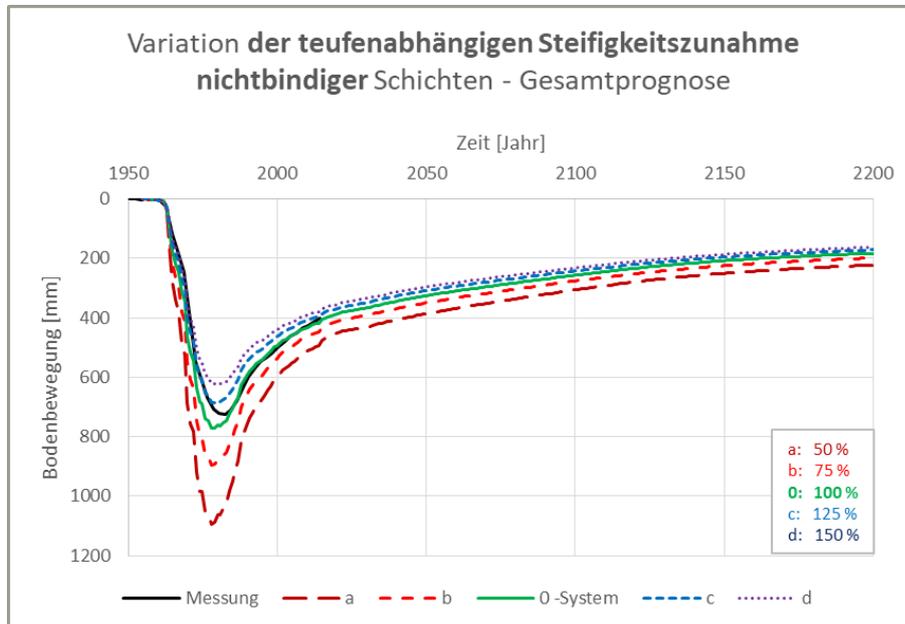


Abbildung 30 Variation teufenabhängige Steifigkeitszunahme nichtbindig - Gesamtprognose

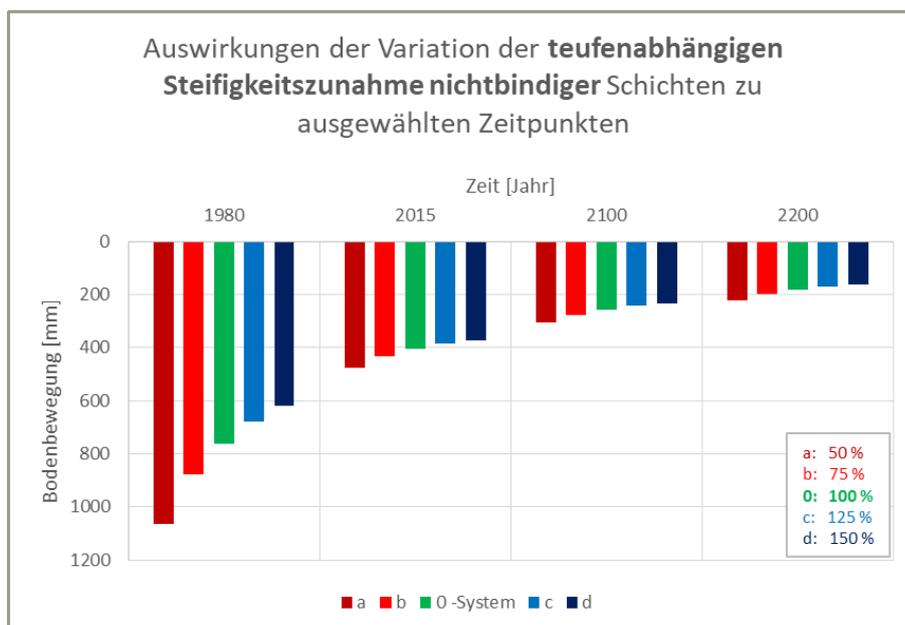


Abbildung 31 Variation teufenabhängige Steifigkeitszunahme nichtbindig – ausgewählte Zeitpunkte

4.1.3.5 Teufenabhängige Steifigkeitszunahme bindig

Die folgenden beiden Abbildungen zeigen die Ergebnisse der Variation der „Teufenabhängigen Steifigkeitszunahme bindig“. Analog zur „Teufenabhängigen Steifigkeitszunahme nichtbindig“ nehmen auch hier bei Reduktion (a, b) aufgrund des dann weicheren Verhaltens die maximalen und bleibenden Setzungen gegenüber dem 0-System zu, bei Erhöhung (c, d) hingegen ab. Weiter ist zu erkennen, dass sich auch hier der Einfluss auf den gesamten Betrachtungszeitraum auswirkt.

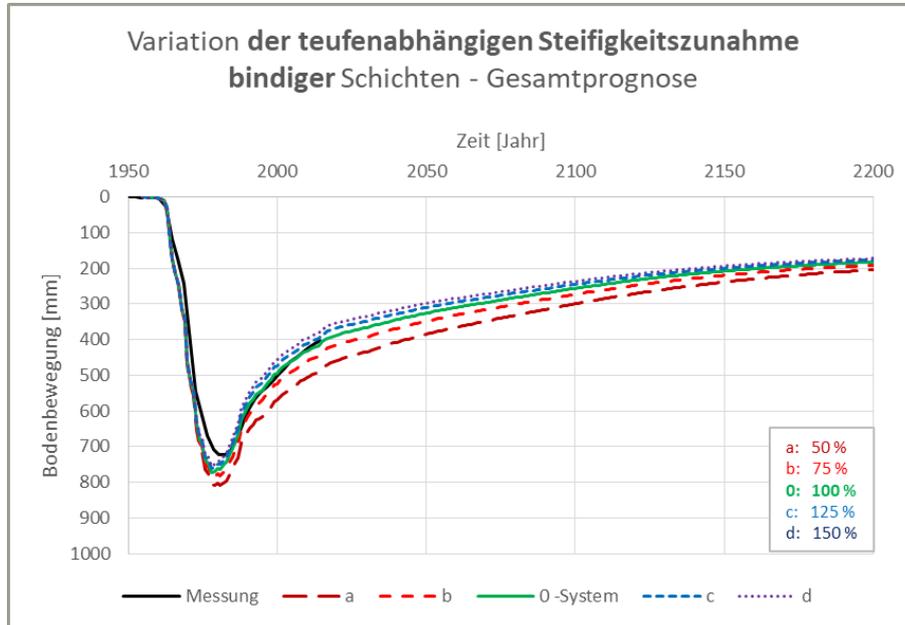


Abbildung 32 Variation teufenabhängige Steifigkeitszunahme bindig - Gesamtprognose

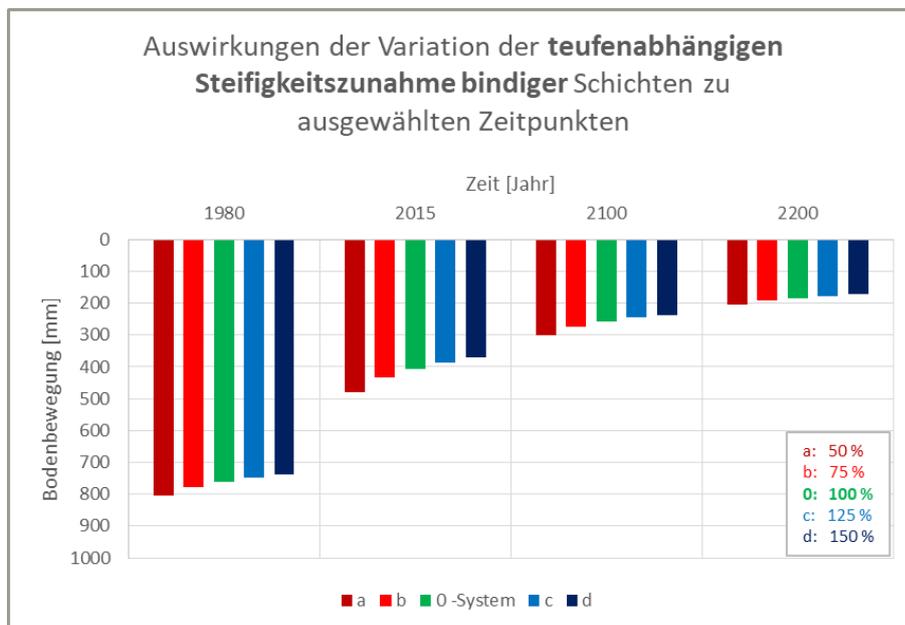


Abbildung 33 Variation teufenabhängige Steifigkeitszunahme bindig – ausgewählte Zeitpunkte

4.1.3.6 Hebungsfaktor nichtbindig

Die folgenden beiden Abbildungen zeigen die Ergebnisse der Variation des „Hebungsfaktors nichtbindig“. Bei Reduktion des Hebungsfaktors (a, b) nehmen die maximalen, insbesondere aber die bleibenden Setzungen gegenüber dem 0-System zu, bei Erhöhung (c, d) hingegen ab. Dies begründet sich damit, dass über die Kopplung des Entlastungsmoduls an den Hebungsfaktor (vgl. oben) bei geringerem Hebungsfaktor automatisch geringere Hebungen ermittelt werden. Weiter ist zu erkennen, dass sich zwar der Einfluss auf den gesamten Betrachtungszeitraum auswirkt, deutlich aber erst nach den 1980er Jahren, da erst dann wesentliche Hebungen auftreten.

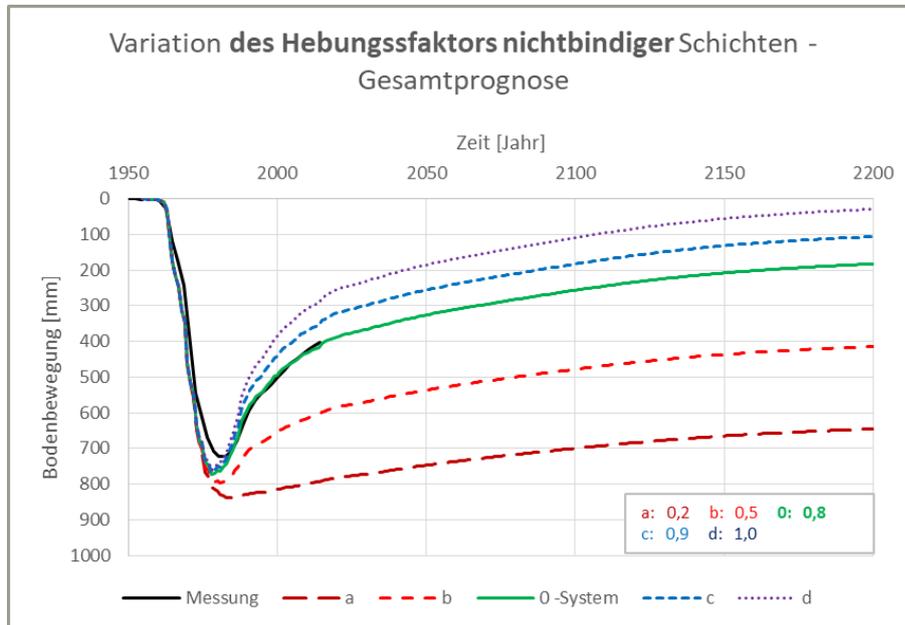


Abbildung 34 Variation Hebungsfaktor nichtbindig - Gesamtprognose

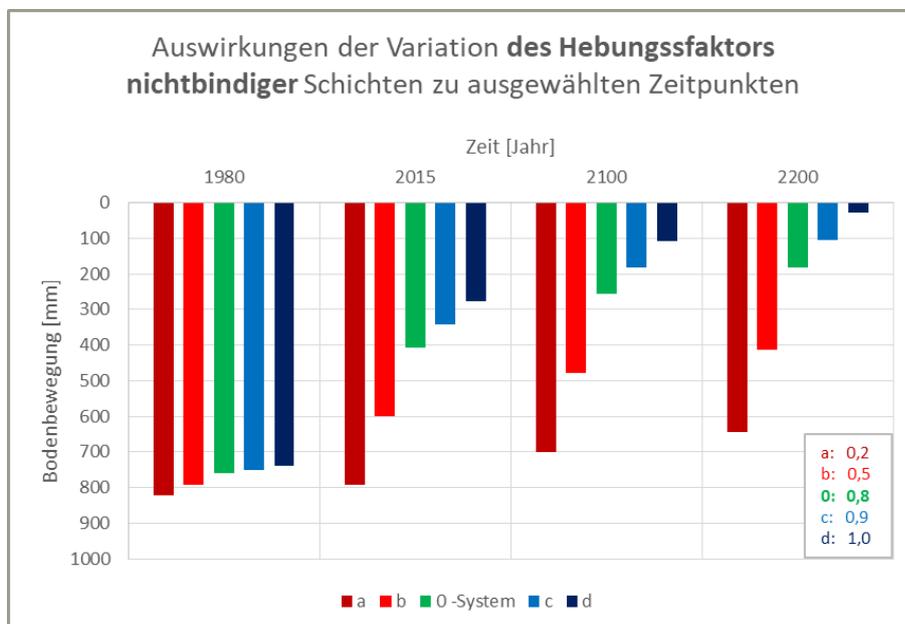


Abbildung 35 Variation Hebungsfaktor nichtbindig – ausgewählte Zeitpunkte

4.1.3.7 Hebungsfaktor bindig

Die folgenden beiden Abbildungen zeigen die Ergebnisse der Variation des „Hebungsfaktors bindig“. Bei Reduktion des Hebungsfaktors (a, b) nehmen ausschließlich die bleibenden Setzungen zu, bei Erhöhung (c, d) hingegen ab. Die maximalen Setzungen bleiben gegenüber dem 0-System hingegen unverändert. Weiter ist zu erkennen, dass sich der Einfluss ausschließlich auf den Zeitraum ab den 2000er Jahren auswirkt, da es erst dann zu einer Spannungsumkehr in den bindigen Schichten und damit zu Hebungen kommt.

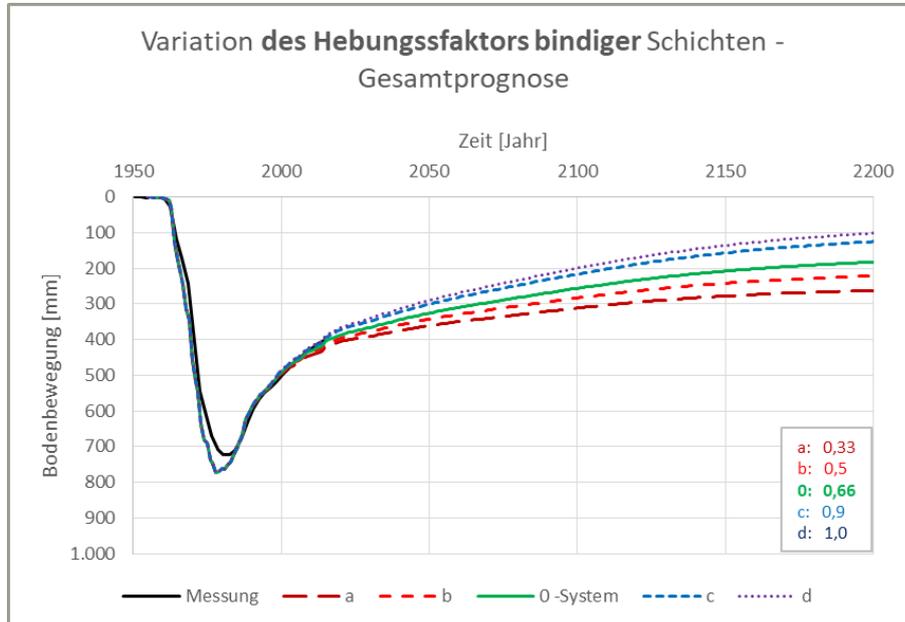


Abbildung 36 Variation Hebungsfaktor bindig - Gesamtprognose

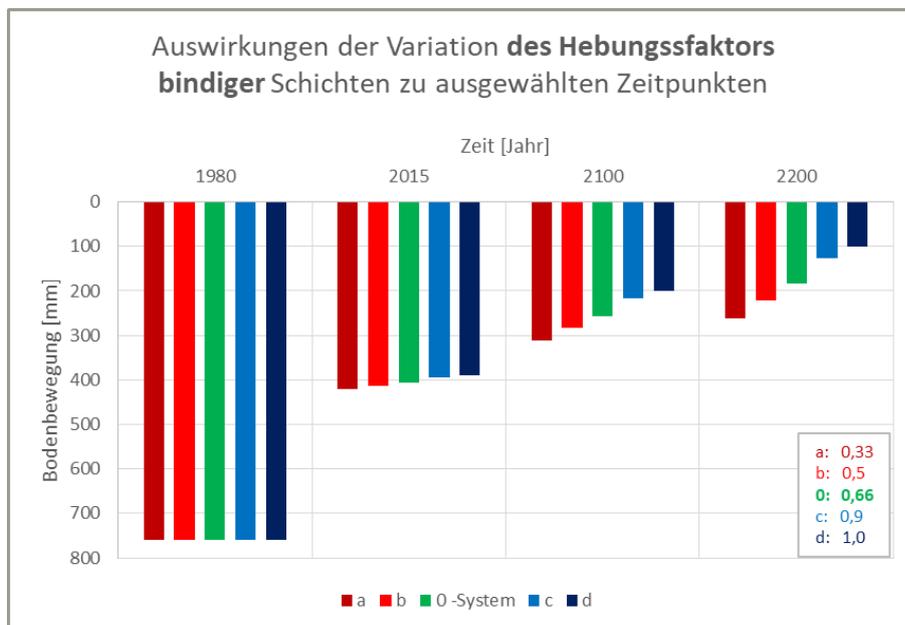


Abbildung 37 Variation Hebungsfaktor bindig – ausgewählte Zeitpunkte

4.1.4 Beurteilung der Modellgenauigkeit und der Sensitivität

Bereits in Abschnitt 4.1.2 wurde dargelegt, dass sich die tatsächlich gemessenen Bodenbewegungen der Geländeoberfläche mit dem von ZAI entwickelten Bodenbewegungsmodell sehr gut abbilden und damit auch für die Zukunft prognostizieren lassen.

Zur Überprüfung der Sensitivität wurden außerdem die Eingangsparameter des Bodenbewegungsmodells variiert. In diesem Zusammenhang wurde bereits in Abschnitt 4.1.3 darauf hingewiesen, dass vor dem Hintergrund möglichst allgemeingültiger Aussagen die Variation innerhalb theoretisch denkbarer, aber für den betrachteten Punkt Niedermerz aufgrund der Kenntnis über die bereits gemessenen Bodenbewegungen nicht mehr realistische Grenzen erfolgte. Veranschaulicht wird dies anhand von Abbildung 38, in der beispielhaft für die „Ausgangsstufigkeit nichtbindig“ der theoretisch mögliche Wertebereich gelb und der aufgrund der Messwerte realistische Wertebereich grün hinterlegt sind.

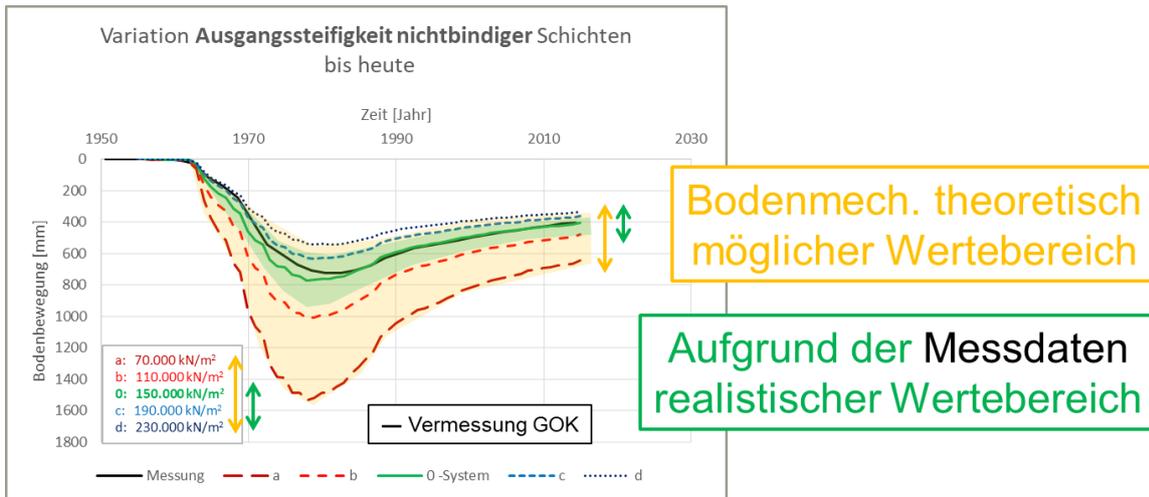


Abbildung 38 Variation Ausgangsstufigkeit nichtbindig mit realistischen Wertebereich

Bei Berücksichtigung des realistischen Wertebereichs ergibt sich dann für die Prognose in 2200 auch eine geringere realistische Streuweite als zuvor, wie Abbildung 39 zeigt.

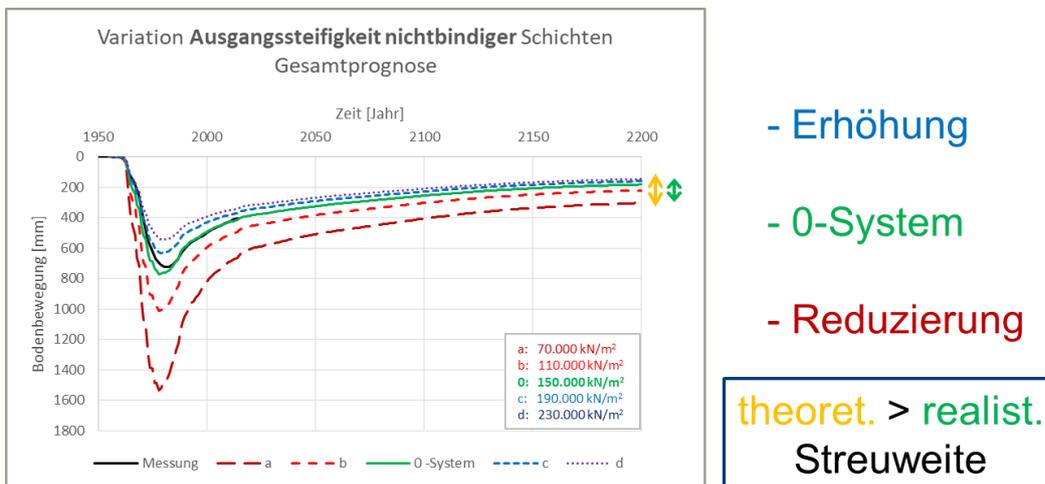
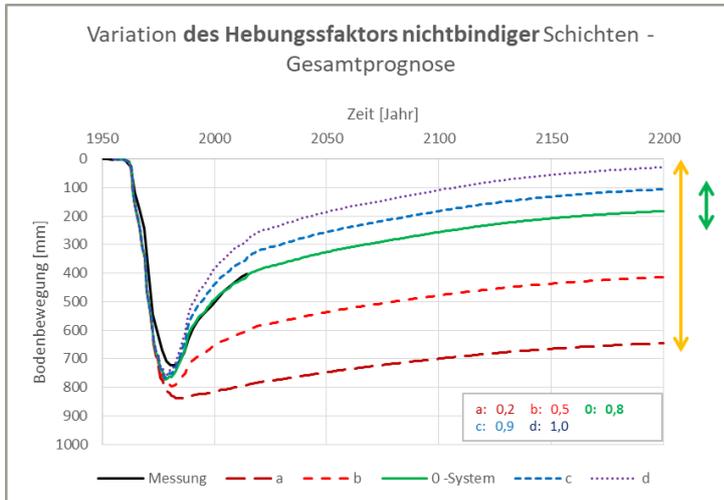


Abbildung 39 Variation Ausgangsstufigkeit nichtbindig mit realistischer Streuweite

Die realistischerweise zu erwartende Streuweite ist in Bezug auf die Ausgangssteifigkeit geringer, als es sich aufgrund der Variation innerhalb der theoretischen Grenzen ergibt. Dies trifft auch für alle anderen Eingangsparameter zu.

Besonders groß ist der Unterschied zwischen realistischer und theoretischer Streuweite beim „Hebungsfaktor nichtbindig“, wie die folgende Abbildung 40 zeigt. Da am Punkt Niedermerz bereits über mehrere Jahre Hebungen in den nichtbindigen Schichten stattgefunden haben, konnte der „Hebungsfaktor nichtbindig“ gut kalibriert und damit die realistische Streuweite gegenüber der theoretisch möglichen Streuweite deutlich reduziert werden.



- Erhöhung

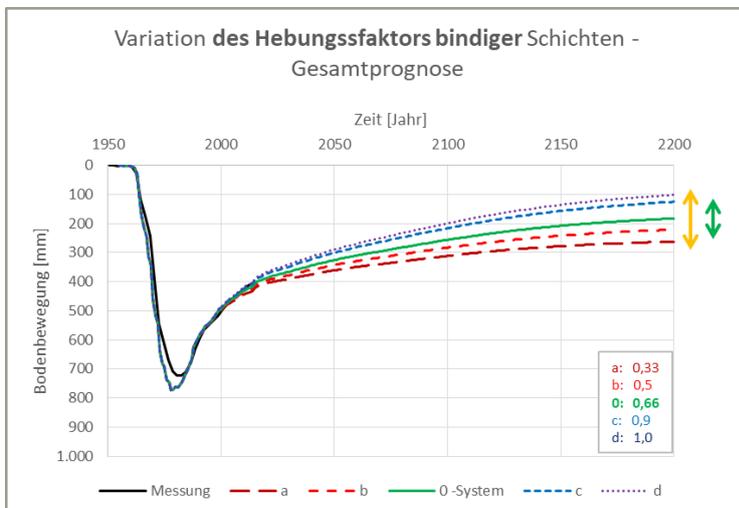
- 0-System

- Reduzierung

theoret. >> realist.
Streuweite

Abbildung 40 Variation Hebungsfaktor nichtbindig mit realistischer Streuweite

Im Gegensatz dazu liegen die realistischen und theoretischen Streuweite beim Hebungsfaktor bindig relativ nah beieinander, wie Abbildung 41 zeigt.



- Erhöhung

- 0-System

- Reduzierung

theoret. > realist.
Streuweite

Abbildung 41 Variation Hebungsfaktor bindig mit realistischer Streuweite

Dies liegt daran, dass bisher kaum Hebungen in den bindigen Schichten stattgefunden haben und damit aber auch das Hebungverhalten bzw. der Hebungsfaktor für die bindigen Schichten im Gegensatz zu allen übrigen Eingangsparametern kaum kalibriert ist.

Aus diesem Grund liegt die größte Unsicherheit bezüglich der Prognose bis 2200 in den Hebungen der bindigen Schichten. Veranschaulicht wird dies auch nochmals anhand von Abbildung 42 und Abbildung 43 in denen die aus der Parametervariation resultierende Abweichung der Prognose im Jahr 2200 für den theoretisch möglichen und für den auf Basis der bisherigen Messungen als realistisch anzunehmenden Wertebereich gegenübergestellt sind.

In diesem Zusammenhang gilt es aber darauf hinzuweisen, dass die realistische Streuweite i.d.R. bereits heute schon als gering einzustufen ist, wie Abbildung 43 verdeutlicht (vgl. dazu auch Abbildung 38 bis Abbildung 41). So ergibt sich am hier betrachteten Punkt Niedermerz selbst für den „Hebungsfaktor bindig“, also den Parameter, der mit der größten Unsicherheit behaftet ist, eine Streuweite von weniger als ± 10 cm.

Durch die Fortsetzung der Messungen und eine darauf basierende Nachkalibrierung in regelmäßigen Zeitabständen kann diese Unsicherheit weiter reduziert und die realistische Streuweite gegenüber der theoretisch denkbaren Streuweite stetig verringert werden.

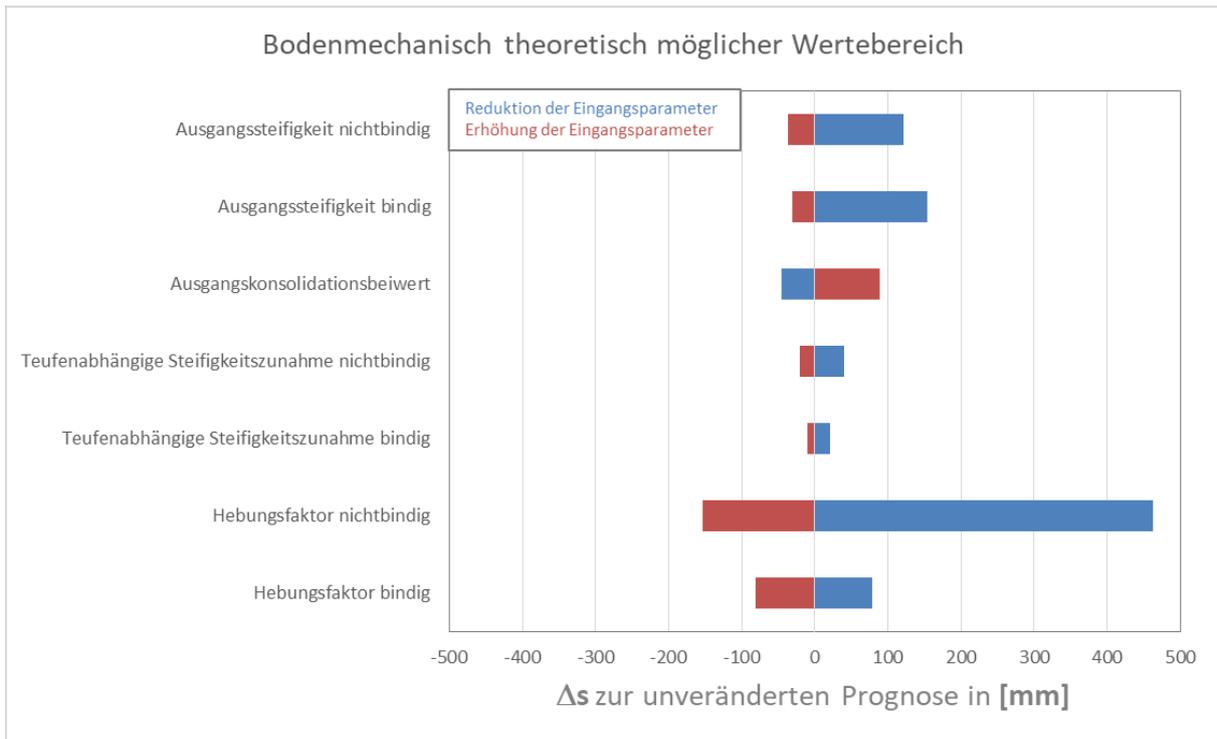


Abbildung 42 Prognoseabweichung Niedermerz in 2200 infolge möglicher Parametervariation

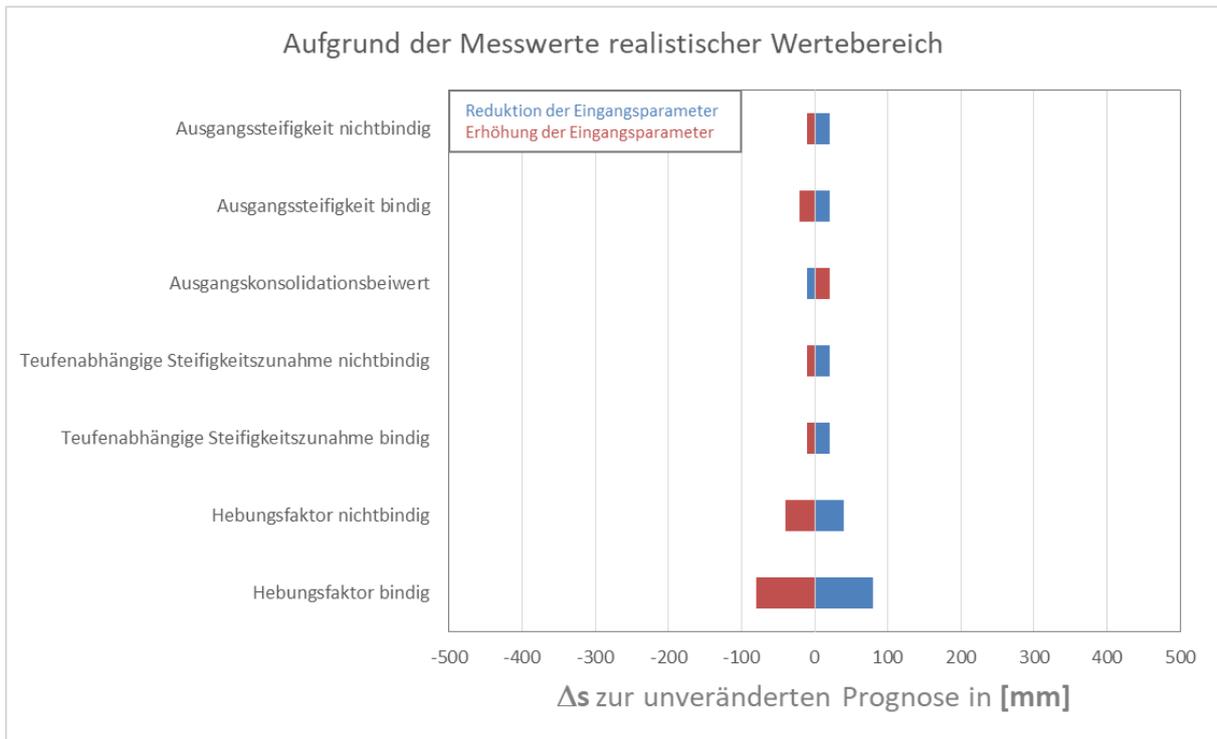


Abbildung 43 Prognoseabweichung Niedermerz in 2200 infolge realistischer Parametervariation

4.2 Bewertung der Eingangsdaten

In Ergänzung zur Variation der für das Bodenbewegungsmodell gewählten Eingangsparameter (Steifigkeit, Konsolidationsbeiwert...) wurden außerdem auch die vom LANUV zur Verfügung gestellten Eingangsdaten (Geologie, Grundwasser) variiert, um den Einfluss möglicher Abweichungen gegenüber der Realität auf die Nachrechnung und insbesondere die Prognose zu untersuchen.

Im Folgenden werden zunächst die Ergebnisse der Variation der Grundwasserganglinien und anschließend der Variation der Schichtmächtigkeiten dargestellt. Eine Beurteilung der Auswirkungen auf die Prognose erfolgt dann in Abschnitt 4.2.3.

4.2.1 Variation der Grundwasserganglinien

Die Genauigkeit der konstruierten Grundwasserganglinien hängt wesentlich von der vorhandenen Datendichte ab. Da jedoch zum einen die Anzahl geeigneter Messstellen begrenzt ist und zum anderen insbesondere vor 1970 überhaupt nur wenige Messdaten erhoben wurden (vgl. Abbildung 21) können die konstruierten Grundwasserganglinien von der Realität abweichen. Zur Untersuchung dieses Einflusses wurden daher folgende Variationen vorgenommen:

- 1) Verschiebung der Endwerte aller Grundwasserganglinien nach oben
- 2) Verschiebung der Endwerte aller Grundwasserganglinien nach unten
- 3) Verschiebung einzelner Grundwasserganglinien im Absenkungsmaximum nach oben
- 4) Verschiebung einzelner Grundwasserganglinien im Absenkungsmaximum nach unten

Die Verschiebung der Endwerte nach oben und unten ist in Abbildung 44 skizziert, die Verschiebung der Absenkungsmaxima bzw. Minima der Grundwasserganglinien in Abbildung 45.

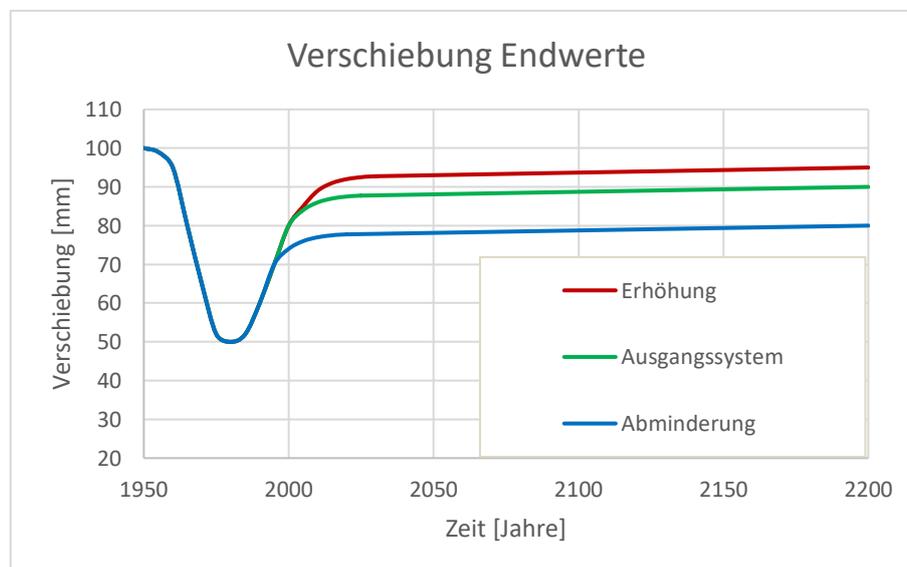


Abbildung 44 Variation der Grundwasserganglinien mit Verschiebung der Endwerte

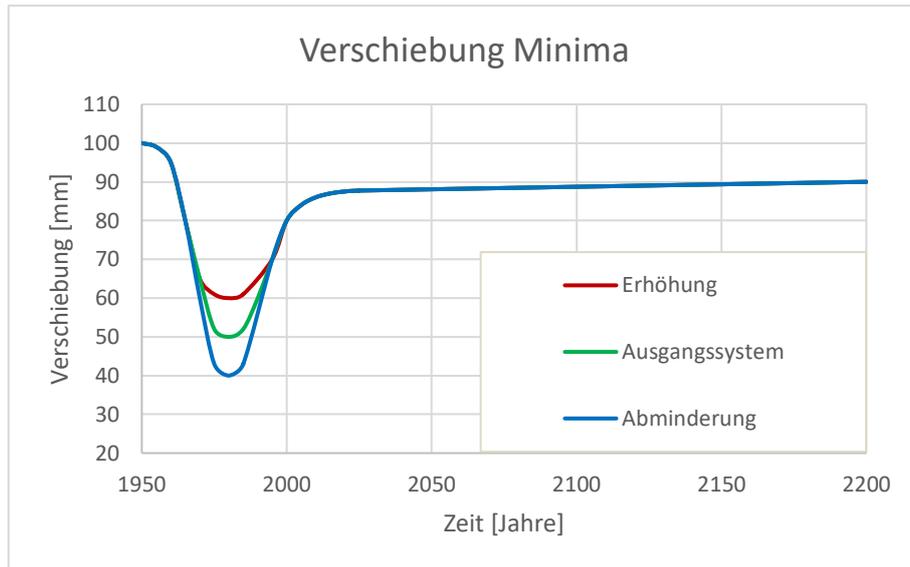


Abbildung 45 Variation der Grundwasserganglinien mit Verschiebung der Minima

In den beiden vorherigen Abbildungen ist die jeweilige Verschiebung qualitativ angedeutet. Tatsächlich wurde die Verschiebung und Abrundung für die einzelnen Grundwasserganglinien vom LANUV individuell für jeden Grundwasserleiter vorgenommen und die so erhaltenen Verläufe an ZAI übergeben.

Eine Übersicht dieser Variationen gegenüber dem Ausgangsmodell bzw. 0-System enthält die folgende Tabelle 2.

Tabelle 2 Variationsbereich der Eingangsparameter

2.2 Variation der Grundwasser-Ganglinien	Index														
	a	c	d	e	f	g	n	0	b	h	i	k	l	m	p
Parameter	Erhöhung [m]							Ausg.	Abminderung [m]						
Endwert aller Ganglinien	5								-10						
Minimum der Ganglinie für Schicht 8		10								-10					
Minimum der Ganglinie für Schicht 7A			10								-10				
Minimum der Ganglinie für Schicht 6D				10								-10			
Minimum der Ganglinie für Schicht 6B					10								-10		
Minima der Ganglinien für Schichten 2-5 & 02-09						10								-10	
Minima der Ganglinien aller Schichten ab Schicht 8							10								-10

In diesem Zusammenhang ist zu beachten, dass eine pauschale Anhebung aller Endwerte der Ganglinien um 10 m nicht sinnvoll gewesen wäre, da dann das Gelände geflutet wäre. Daher wurde für diese Variante a lediglich eine Erhöhung um 5 m vorgenommen.

4.2.1.1 Endwerte aller Ganglinien

Die folgenden beiden Abbildungen zeigen die Ergebnisse der Variation der Endwerte aller Ganglinien. Es ist zu erkennen, dass sich mit einem größeren Grundwasserwiederanstieg und einer damit verbundenen größeren Entlastung bzw. Spannungsreduktion auch das Gelände stärker heben wird, bei einem geringeren Grundwasserwiederanstieg hingegen größere verbleibende Setzungen zu verzeichnen sind.

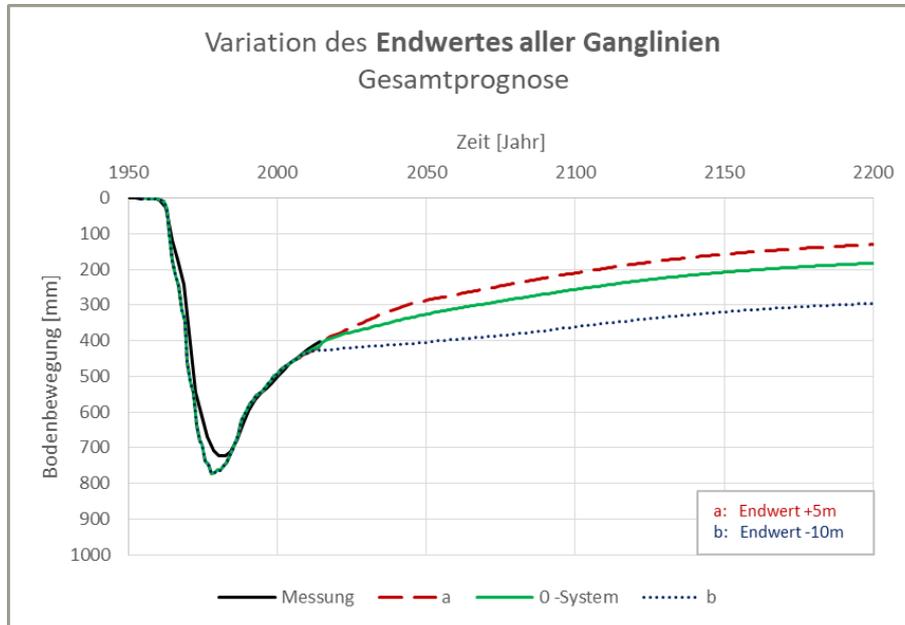


Abbildung 46 Variation Endwerte der Ganglinien - Gesamtprognose

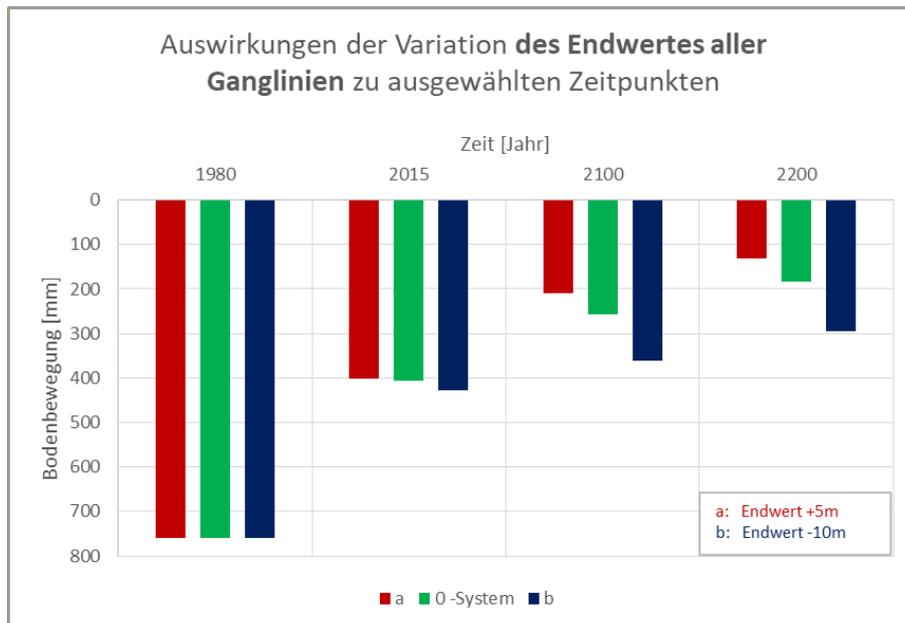


Abbildung 47 Variation Endwerte der Ganglinien – ausgewählte Zeitpunkte

4.2.1.2 Minima der Ganglinien

Insgesamt wurden 10 Variationen durchgeführt, bei denen das Absenkungsminimum einzelner Ganglinien nach oben (vgl. Tabelle 2, c-g) bzw. nach unten (vgl. Tabelle 2, h, i, k-m) verschoben wurde. Daraus ergeben sich allerdings nur marginale Auswirkungen auf die Ergebnisse der Nachrechnung und die damit erstellte Prognose, wie Abbildung 48 beispielhaft für die Verschiebung des Minimums der Schicht 8 zeigt.

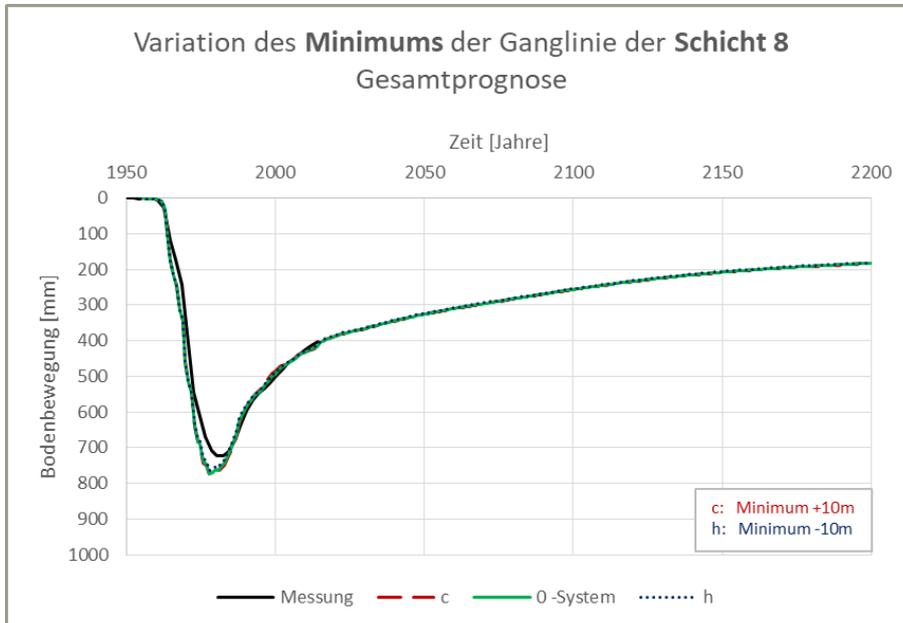


Abbildung 48 Variation Minimum der Ganglinien Schicht 8 - Gesamtprognose

Auch bei den weiteren Variationen einzelner Minima wurden keine relevanten Einflüsse auf die Prognose festgestellt (Ursache vgl. Abschnitt 4.2.3), weshalb auf eine Darstellung der Ergebnisse verzichtet wird. Das Ergebnis der gleichzeitigen Variation aller Minima enthält hingegen Abbildung 49 und zeigt, dass sich bei insgesamt geringerer Absenkung auch geringfügig weniger Setzungen, bei größerer Absenkung hingegen etwas größere Setzungen ergeben.

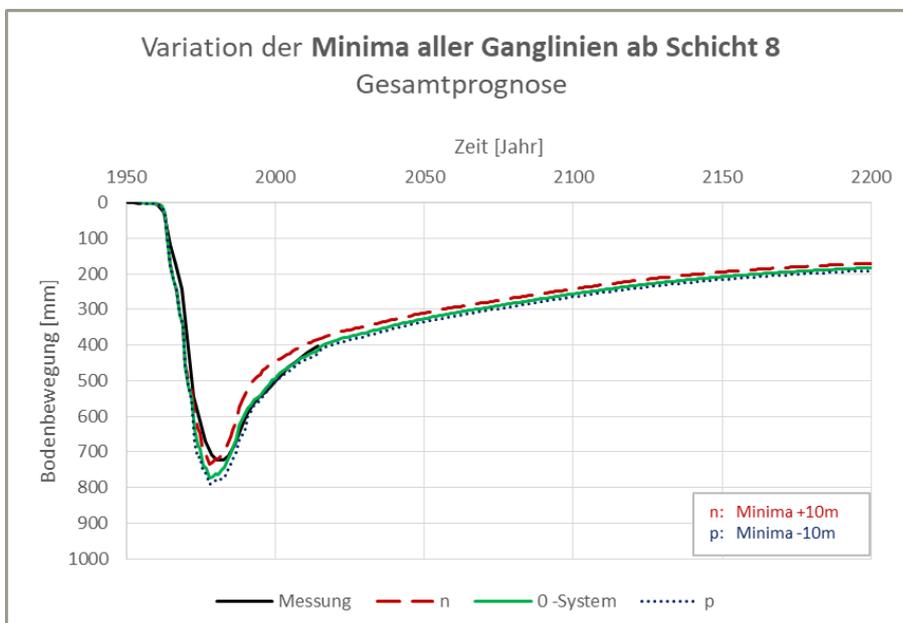


Abbildung 49 Variation Minima aller Ganglinien ab Schicht 8 - Gesamtprognose

4.2.2 Variation der Schichtmächtigkeiten

Es ist davon auszugehen, dass nur für die wenigsten zu untersuchenden Punkte Bohrungen bis zum Prätertiär vorliegen. Zur Untersuchung des Einflusses möglicherweise von der Interpretation des GD abweichender geologischer Verhältnisse bzw. Schichtprofile wurden daher folgende Variationen vorgenommen:

- 1) Verschiebung der untersten Schichtunterkante
- 2) Reduzierung und Vergrößerung aller bindigen Schichten*
- 3) Reduzierung und Vergrößerung aller bindigen Schichten ohne Kohle**

* bei gleichzeitig gegenläufiger Vergrößerung bzw. Reduzierung der nichtbindigen Schichten

** Kohle wird im Modell wie eine bindige Schicht mit Konsolidation berechnet

Eine Übersicht der Variationen gegenüber dem Ausgangsmodell bzw. 0-System enthält die folgende Tabelle 2.

Tabelle 3 Variationsbereich der Eingangsparameter

2.2 Variation der Schichtenmächtigkeiten	Index						
	a	c	e	0	b	d	f
Parameter	Anhebung[m]			Ausgang.	Absenkung [m]		
Schichtunterkante der Schicht 02-09	100				-100		
Schichtunterkante aller bindigen Schichten		x				x	
Schichtunterkante aller bindigen Schichten OHNE KOHLE			x				x

Bei Anhebung der untersten Schichtunterkante (Fall a) wurde gleichzeitig eine proportionale Stauchung der Schichten unterhalb der Kohle vorgenommen, wie Abbildung 50 zeigt. Bei Absenkung der Schichtunterkante (Fall b) erfolgte hingegen eine proportionale Dehnung.

Weiter wurden bei der Anhebung der Schichtunterkante aller bindigen Schichten (Fall c) diese auf 2/3 ihrer vorherigen Mächtigkeit gestaucht und bei Absenkung (Fall d) auf 4/3 gedehnt (vgl. Abbildung 51). Da die jeweilige Schichtoberkante auf gleicher Höhe belassen wurde (gestrichelte schwarze Linien in Abbildung 51) erfolgte damit einhergehend dann auch eine jeweils gegenläufige Dehnung bzw. Stauchung der nichtbindigen Schichten.

Die letzten Beiden Fälle e und f „ohne Kohle“ wurden deshalb zusätzlich betrachtet, da die Erfahrung gezeigt hat, dass die Kohle und damit deren Mächtigkeit i.d.R. relativ gut erkundet sind und somit Unsicherheiten eher bei den „normalen“ Bodenschichten zu erwarten sind.

In diesem Zusammenhang ist zu beachten, dass in der Kohle aufgrund ihrer geringen Durchlässigkeit ebenfalls Konsolidationsvorgänge stattfinden können und sie deshalb im Bodenbewegungsmodell als bindiger Boden behandelt wird.

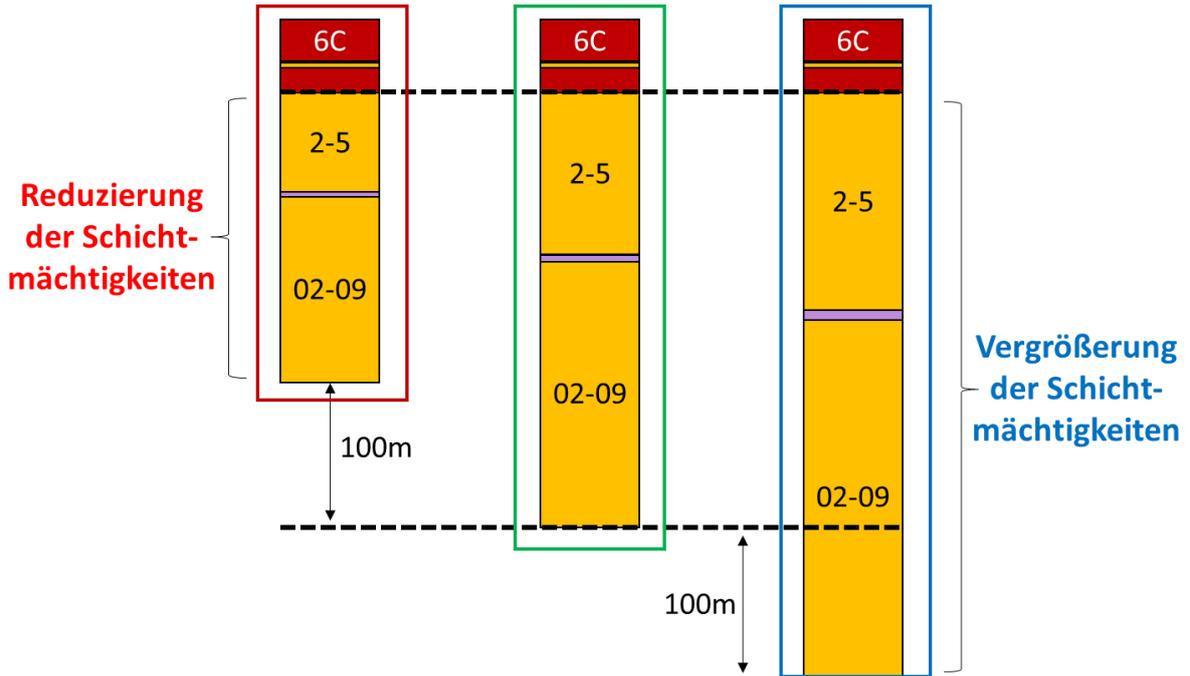


Abbildung 50 Anhebung und Absenkung der Unterkante Schicht 02-09

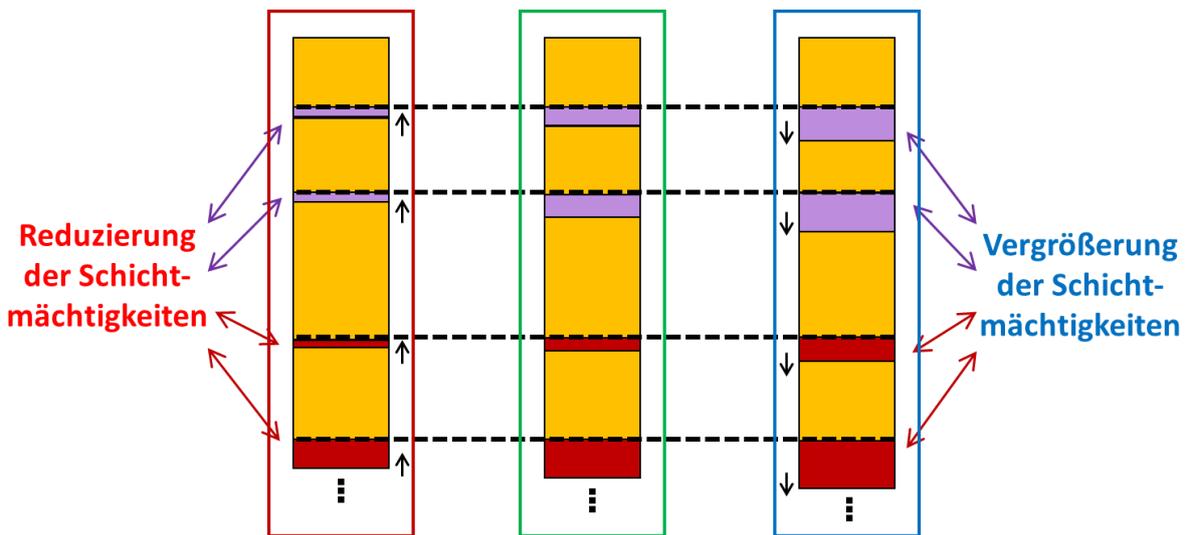


Abbildung 51 Reduzierung und Vergrößerung der bindigen Schichten

4.2.2.1 Verschiebung der untersten Schichtunterkante

Die folgenden beiden Abbildungen zeigen die Ergebnisse der Verschiebung der untersten Schichtunterkante. Es ist zu erkennen, dass sich bei Verschiebung der Schichtunterkante nach oben geringere Setzungen ergeben, da dann die setzungsrelevante Schichtmächtigkeit bei gleichbleibender Steifigkeit abnimmt. Bei Verschiebung nach unten ergeben sich hingegen größere Setzungen. Auch wenn die Abweichungen in den 1980er Jahren am größten sind, zeigt sich, dass sich dies über den gesamten Betrachtungszeitraum auswirkt.

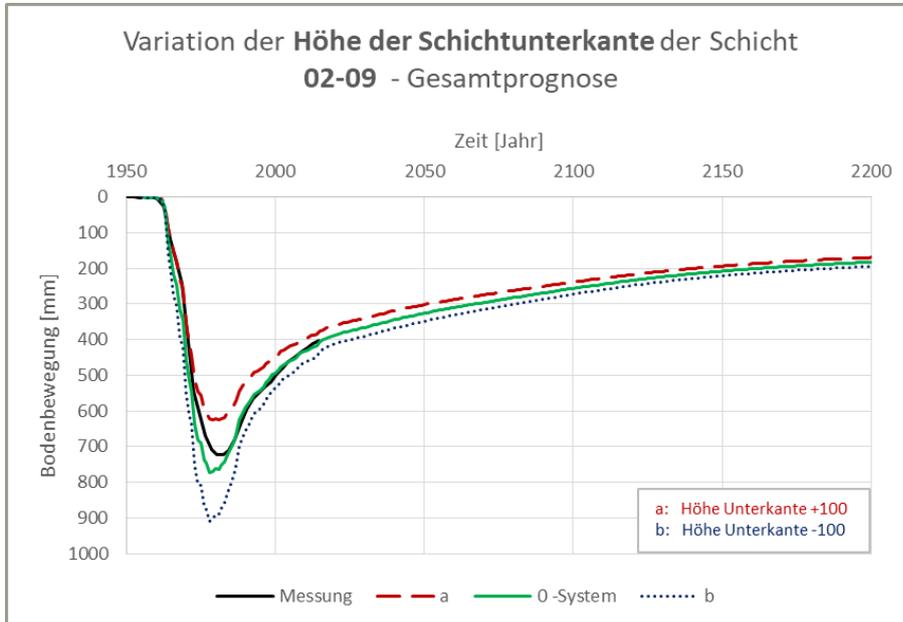


Abbildung 52 Variation unterste Schichtunterkante - Gesamtprognose

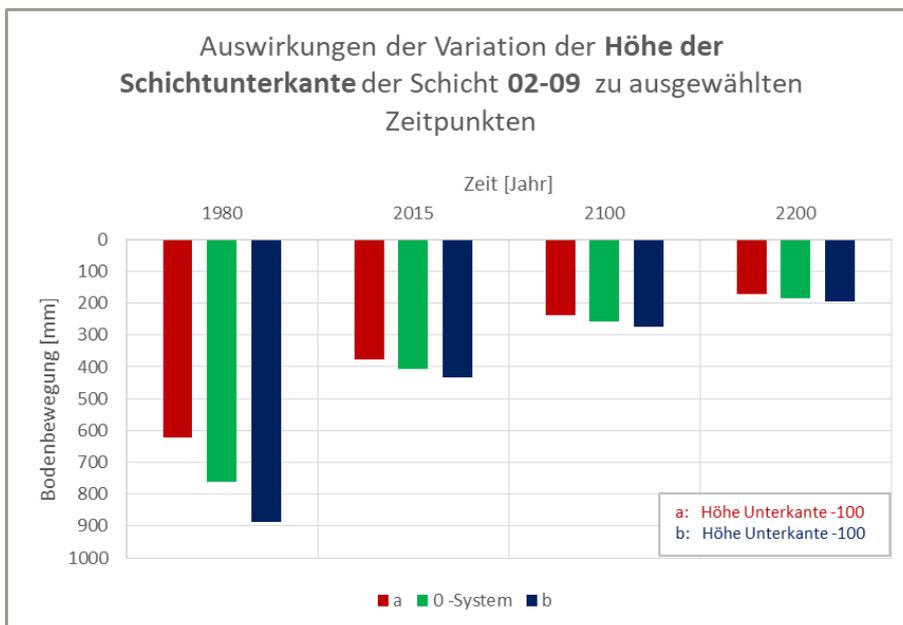


Abbildung 53 Variation unterste Schichtunterkante – ausgewählte Zeitpunkte

4.2.2.2 Verschiebung der Schichtunterkante aller bindiger Schichten

Die folgenden beiden Abbildungen zeigen die Ergebnisse der Verschiebung der Schichtunterkanten aller bindiger Schichten. Es ist zu erkennen, dass bei Verschiebung der Schichtunterkante nach oben und einer damit einhergehenden Stauchung der bindigen Schichten im Maximum größere Setzungen eintreten, diese aber schneller wieder zurückgehen und am Ende des Betrachtungszeitraums etwas geringer ausfallen als zuvor. Bei Verschiebung nach unten bzw. Dehnung können genau gegenläufige Effekte beobachtet werden.

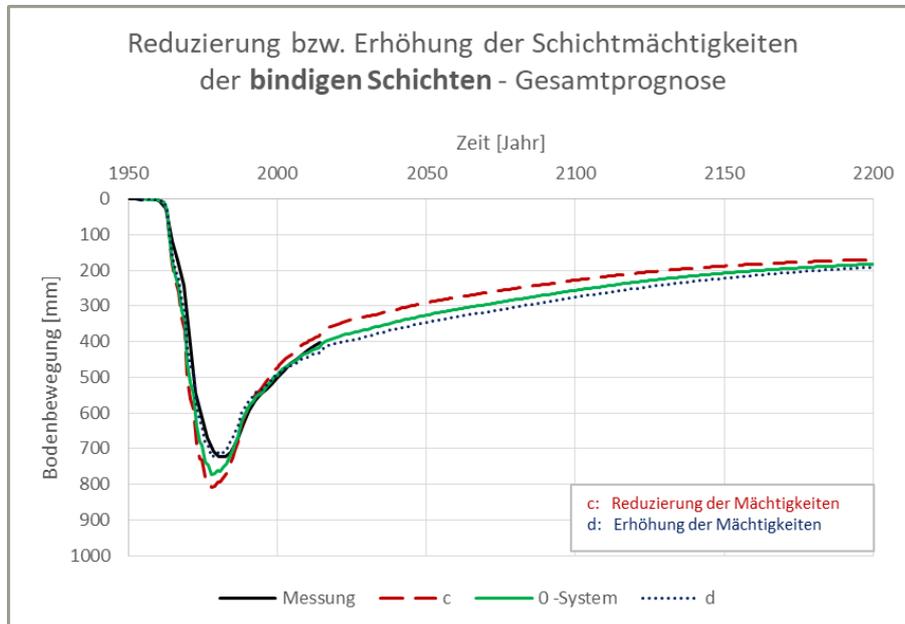


Abbildung 54 Variation bindige Schichten – Gesamtprognose

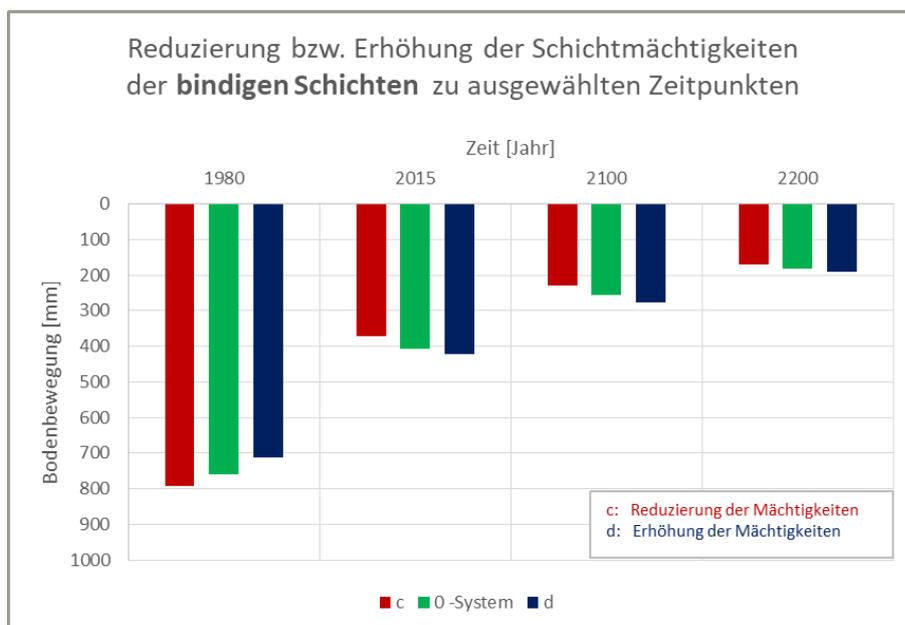


Abbildung 55 Variation bindige Schichten – ausgewählte Zeitpunkte

Die oben genannten Effekte bis in die 2000er Jahre und die anschließende Umkehr sind dabei primär auf den Einfluss der Kohle zurückzuführen, die im vorliegenden Fall gegenüber den „normalen“ bindigen Schichten eine größere Steifigkeit und damit auch kürzere Konsolidationszeiten aufweist.

4.2.2.3 Verschiebung der Schichtunterkante aller bindiger Schichten ohne Kohle

Die folgenden beiden Abbildungen zeigen die Ergebnisse der Verschiebung der Schichtunterkanten aller bindiger Schichten ohne Kohle. Die zuvor genannten „Anfangseffekte“ sind dort nicht zu sehen und die Verschiebung der Schichtunterkanten nach oben und eine damit einhergehende Stauchung der bindigen Schichten führen am Ende des Betrachtungszeitraums zu etwas geringeren Setzungen, die Verschiebung nach unten bzw. Dehnung zu etwas größeren.

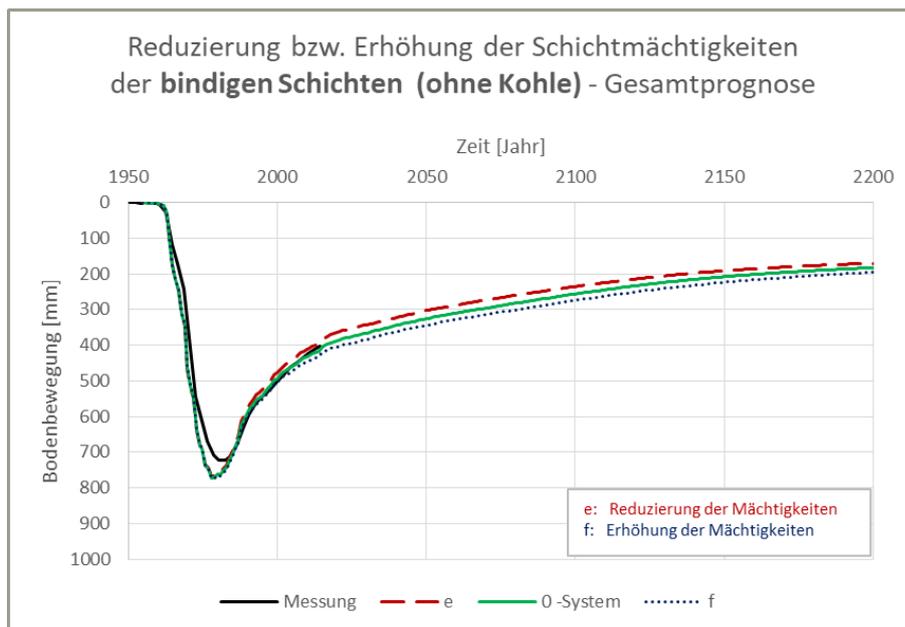


Abbildung 56 Variation bindige Schichten ohne Kohle – Gesamtprognose

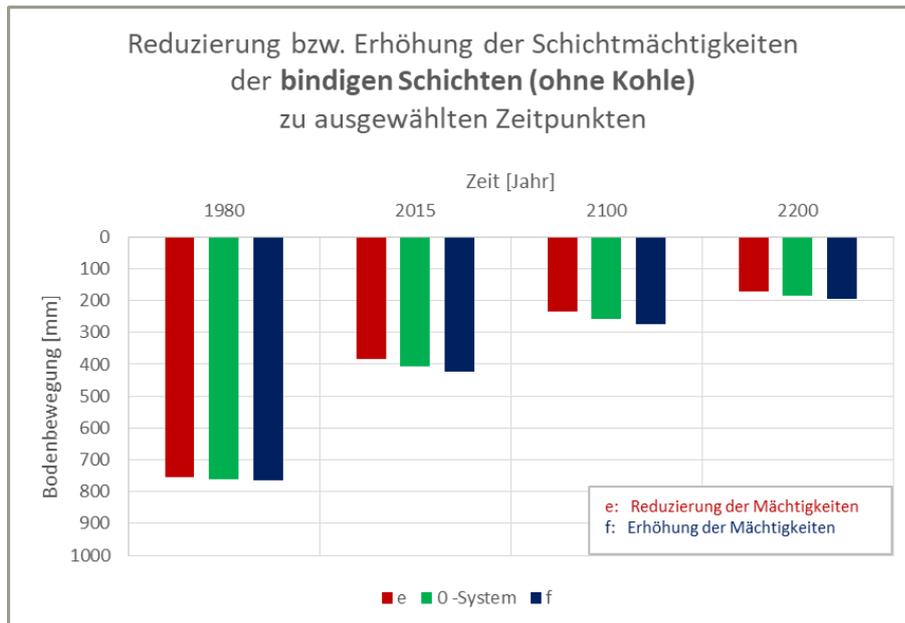


Abbildung 57 Variation bindige Schichten ohne Kohle – ausgewählte Zeitpunkte

4.2.3 Beurteilung der Auswirkungen möglicher Ungenauigkeiten auf die Nachrechnung und Prognose

Die Variation der Grundwasserganglinien hat gezeigt, dass sich bei Abweichung einzelner Grundwasserminima keine relevanten Auswirkungen auf die Berechnung bzw. Prognose ergeben. Dies liegt daran, dass ein tieferer Grundwasserstand innerhalb nur eines Grundwasserleiters auf der einen Seite zu einem höheren Gradienten im überlagernden Grundwasserstauer, auf der anderen Seite aber zu einem geringeren Gradienten im unterlagernden Grundwasserstauer führt. Dies hat dann wiederum zu Folge, dass sich die Spannungsänderungen je nach Schichtmächtigkeiten nahezu ganz oder teilweise gegenseitig aufheben und somit kaum Auswirkungen auf die Bodenbewegungen an der Geländeoberfläche festzustellen sind. Nur wenn alle Grundwasserleiter von den prognostizierten Minima abweichen, führt dies zu spürbaren Effekten. Aber auch diese Abweichungen werden bis zum Prognoseende in 2200 durch den Grundwasserwiederanstieg größtenteils wieder ausgeglichen und wirken sich dann nur noch geringfügig aus (< 2 cm, vgl. Abbildung 49).

Deutliche Auswirkungen haben jedoch Abweichungen bezüglich der Grundwasserstände nach Abschluss der Sümpfungsmaßnahmen bzw. nach vollkommenem Wiederanstieg. Abweichungen wirken sich hier unmittelbar auf die prognostizierten Hebungen und damit auf die prognostizierte Höhenlage der Geländeoberfläche in 2200 aus. So ergibt sich beispielsweise für den Punkt Niedermerz eine Abweichung bezüglich der Geländeoberkante von ca. 10 cm bzw. ca. 13 % bezogen auf die maximale Senkung in den 1980er Jahren, wenn die Grundwasserstände nach Wiederanstieg um 10 m unterschätzt würden. Der richtigen Prognose des Grundwasserwiederanstiegs kommt daher eine große Bedeutung zu und bei relevanten Änderungen, die sich etwa aus einer geänderten Bewirtschaftung ergeben können, sollten diese daher auch im Bodenbewegungsmodell aktualisiert werden.

In Bezug auf die Schichtmächtigkeiten und die Unterkante der untersten relevanten bzw. im Bodenbewegungsmodell noch enthaltenen Schicht bleibt auf Basis der durchgeführten Variationen festzuhalten, dass sich Abweichungen im Modell von der Realität zwar auswirken, durch die punktspezifische Kalibrierung aber ausgeglichen werden können. Wird etwa die unterste nichtbindige Schicht zu geringmächtig angenommen, führt dies im Zuge der Kalibrierung zu einer geringeren Steifigkeit für diese Schicht. Aus der Kombination aus geringerer Mächtigkeit mit geringerer Steifigkeit ergeben sich dann in Summe wieder Setzungen und Hebungen, die dem realen Bodenbewegungsverhalten entsprechen (in $2200 < 2\text{cm}$, vgl. Abbildung 52).

Bei den bindigen Schichten werden aufgrund des zeitlich verzögerten Setzungsverhaltens Abweichungen infolge ungenauer Schichtmächtigkeiten allerdings erst in den nächsten Jahren auftreten (vgl. Abbildung 56), so dass hier ggf. eine Nachkalibrierung der Schichtmächtigkeiten oder Steifigkeiten erforderlich werden kann.

4.3 Neuberechnung für einen Höhenfestpunkt

In Ergänzung zu den oben beschriebenen Variationen der Eingangsparameter und der Eingangsdaten wurde weiterhin eine „Neuberechnung für einen Höhenfestpunkt“ vorgenommen, bei der die in einem älteren bzw. in einem bereits vorhandenen Modell verwendeten Eingangsparameter zur Neuberechnung herangezogen werden.

Zu diesem Zweck wurde vom LANUV der bereits für die vorherigen Berechnungen betrachtete Punkt Niedermerz ausgewählt, für den früher bereits im Auftrag der RWE Power AG (nachfolgend RWE) ein Modell entwickelt worden war.

4.3.1 Vergleich der Eingangsdaten beider Modelle

In einem ersten Schritt wurde seitens ZAI ein Vergleich der Eingangsdaten beider Modelle für den Punkt Niedermerz vorgenommen.

Die folgende Abbildung 58 zeigt zunächst einen Vergleich der Geologie bzw. deren Interpretation und des verwendete Schichtmodells.

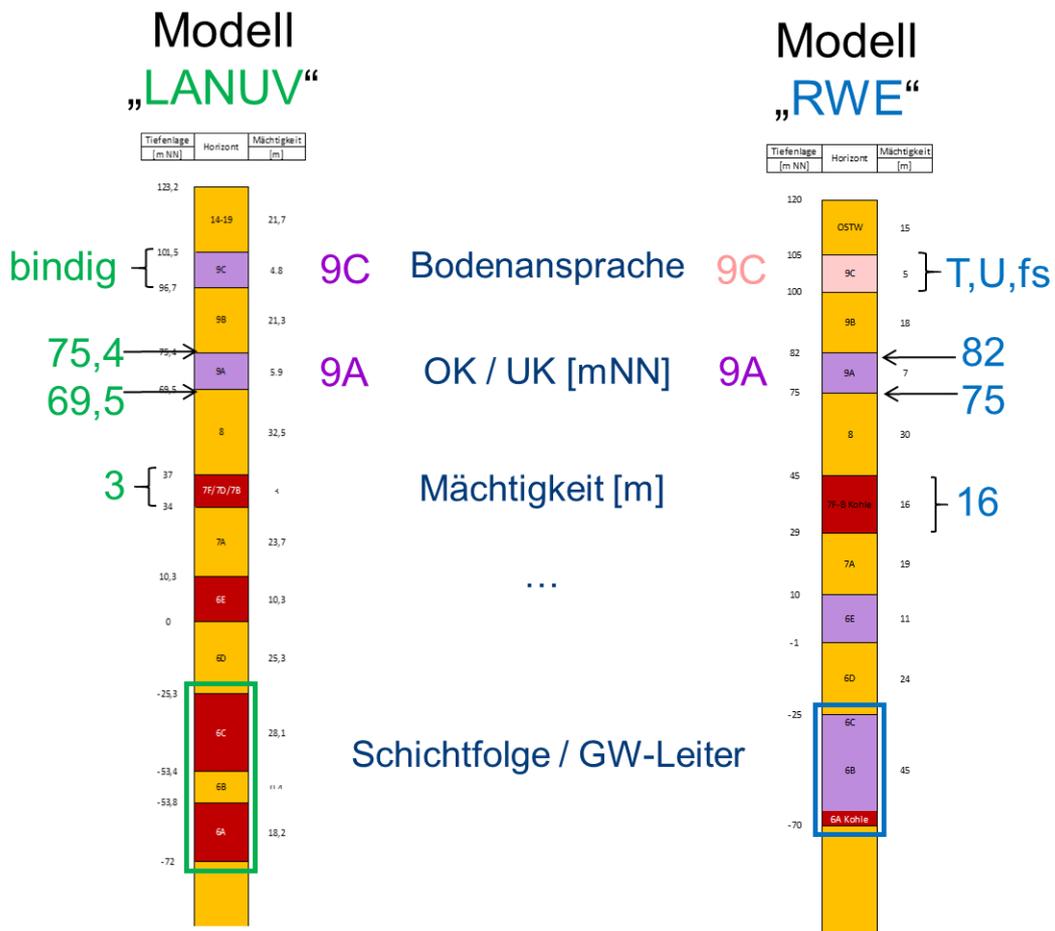


Abbildung 58 Unterschiede in der Geologie bzw. im Schichtmodell mit Horizontbezeichnung nach SCHNEIDER-THIELE [3]

Es ist zu erkennen, dass sich beide Schichtmodelle ähnlich sind, aber auch Unterschiede etwa bezüglich der Bodenansprache, der Ober- und Unterkante der Schichten, der Schichtmächtigkeiten und auch der Schichtfolge bzw. Aufteilung in GW-Leiter und –Stauer aufweisen. So werden beispielsweise die Schichten 6C bis 6A im RWE-Modell durchgängig als bindig bzw. Kohle betrachtet, wohingegen im LANUV-Modell Schicht 6B als nichtbindiger zusätzlicher Grundwasserleiter betrachtet wird.

Diese Unterschiede resultieren daraus, dass am Punkt Niedermerz nicht unmittelbar eine Bohrung vorhanden ist (vgl. Abbildung 19), welche die tatsächlich vorhandenen Verhältnisse relativ eindeutig beschreiben würde. Daher ist zwangsläufig eine Interpretation von bzw. Interpolation zwischen Bohrungen in der Nähe erforderlich, die für das Modell „RWE“ durch RWE und ZAI und für das Modell „LANUV“ durch das LANUV und den GD vorgenommen wurde, was dann zu den in Abbildung 58 zu sehenden Unterschieden führen kann.

Unterschiede zeigen sich weiter auch bei den Grundwasserganglinien, wie die folgende Abbildung 59 zeigt.

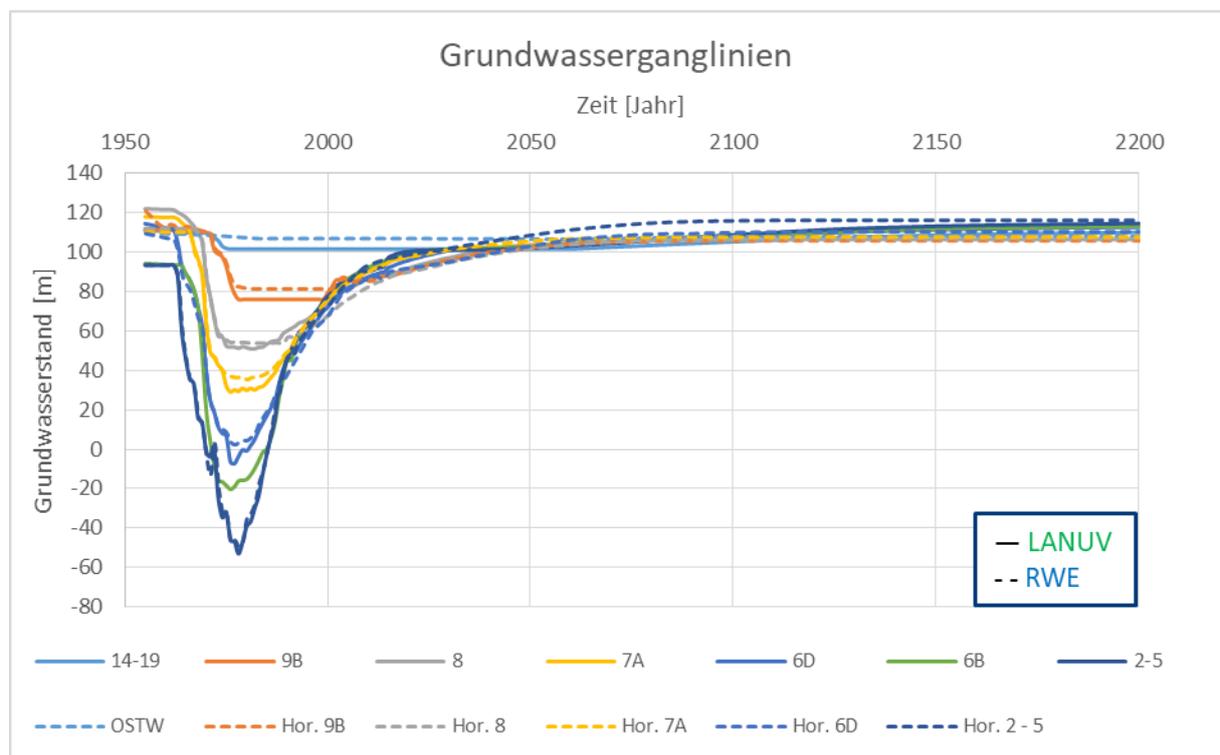


Abbildung 59 Vergleich Grundwasserganglinien

Zum einen ist im Modell „LANUV“ gegenüber dem Modell „RWE“ ein zusätzlicher Grundwasserleiter 6B vorhanden (vgl. auch Abbildung 58), zum anderen gibt es aber auch Unterschiede in den Verläufen. So ist die maximal angenommene Absenkung im Modell „LANUV“ i.d.R. etwas größer als im Modell „RWE“. Weiter gibt es auch Unterschiede bezüglich der Grundwasserstände nach Wiederanstieg, eine pauschale Tendenz (generell höher oder niedriger) ist hier aber nicht auszumachen. Auch hier sind die Unterschiede auf die erforderliche Interpretation der Geologie (vgl. oben) zurückzuführen, weiter aber auch auf die beiden beim LANUV und RWE verwendeten Grundwassermodelle, aus denen die Ganglinien abgeleitet wurden.

Die folgende Abbildung 60 zeigt schließlich die seitens LANUV und RWE an ZAI übergebenen Messwerte der Geländeoberfläche am Punkt Niedermerz.

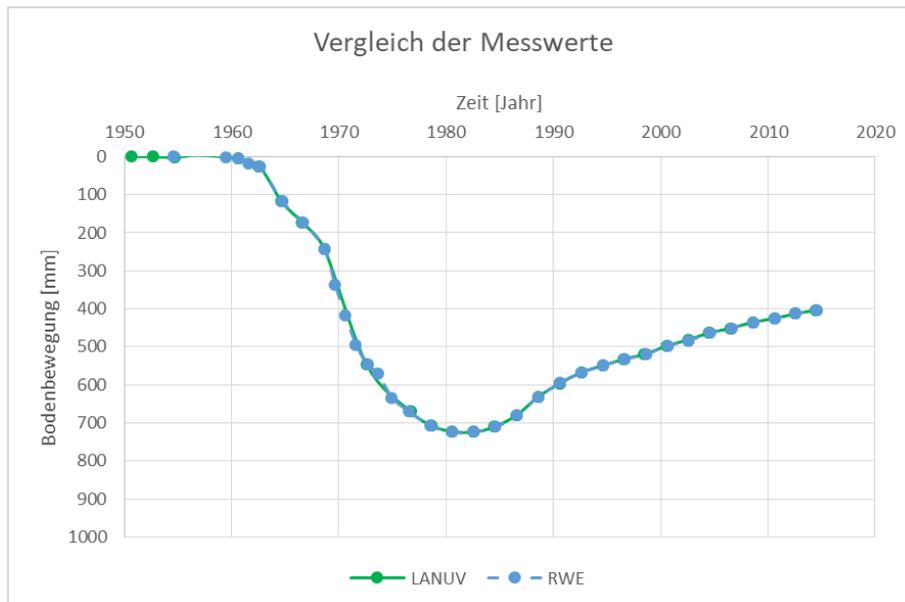


Abbildung 60 Vergleich Messwerte Geländeoberfläche

Unterschiede bezüglich der Messwerte sind nicht festzustellen.

4.3.2 Neuberechnung Modell LANUV mit Eingangsparametern von RWE

Schließlich wurde mit dem Modell „LANUV“ eine Neuberechnung vorgenommen, bei der die Eingangsparameter aus dem Modell „RWE“ verwendet wurden. Dabei ergibt sich zunächst ein qualitativ vergleichbarer Verlauf, wie Abbildung 61 zeigt.

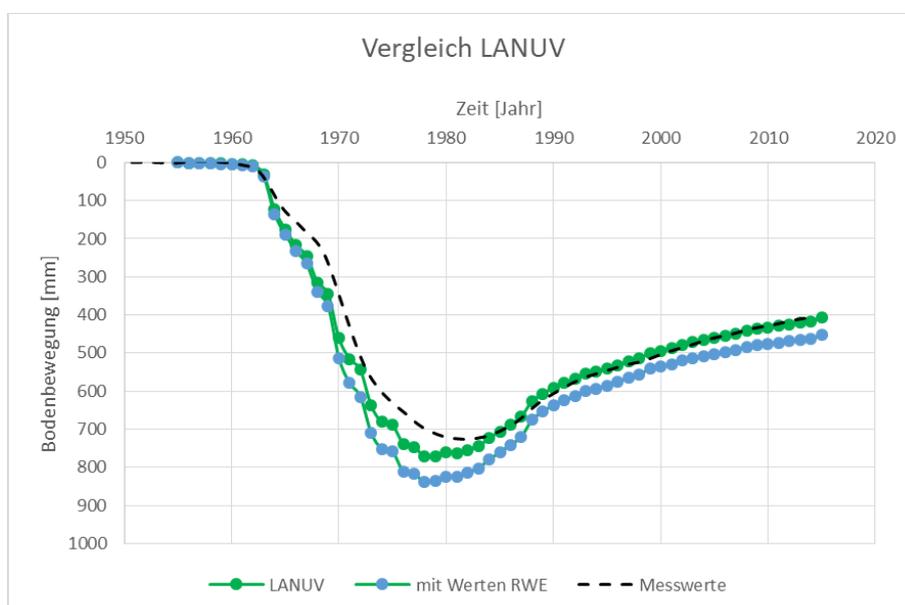


Abbildung 61 Neuberechnung LANUV mit Eingangsdaten RWE

Allerdings sind bezüglich der absoluten Setzungen ab etwa den 1970er Jahren durchaus Unterschiede erkennbar, die sich bis zum Ende des Nachrechnungszeitraums fortsetzen.

Die vorgenannten Unterschiede zeigen die Notwendigkeit einer individuellen Kalibrierung, die auf das tatsächlich verwendete Bodenbewegungsmodell abgestimmt ist und dann aber das tatsächliche Bodenbewegungsverhalten adäquat abbilden kann.

4.3.3 Vergleich beider Modelle mit individuell kalibrierten Eingangsparametern

Die nachfolgende Abbildung 62 stellt zunächst das mit beiden Modellen nach individueller Kalibrierung der Eingangsparameter erhaltene Bodenbewegungsverhalten im Nachrechnungszeitraum gegenüber.

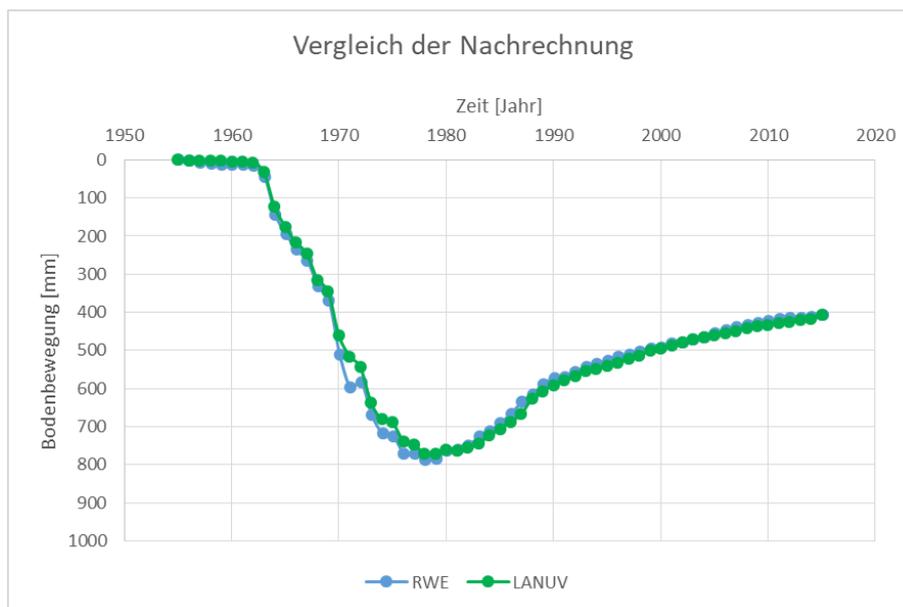


Abbildung 62 Vergleich Nachrechnung beide Modelle mit individueller Kalibrierung

Es zeigt sich, dass mit beiden Modellen ein qualitativ und auch quantitativ absolut vergleichbares Bodenbewegungsverhalten berechnet wird, welches dem gemessenen Verhalten entspricht (vgl. Abbildung 22 bzw. Abbildung 60).

Beim Vergleich beider Modelle bis zum Ende des Prognosezeitraums ergeben sich dann allerdings sehr wohl Abweichungen von ca. 50 mm, wie die nachfolgende Abbildung 63 zeigt. Diese resultieren sowohl aus den unterschiedlichen Eingangsparametern als auch aus den unterschiedlichen Eingangsdaten u.a. in Form der Grundwasserganglinien bis zum Jahr 2200 (vgl. Abbildung 59).

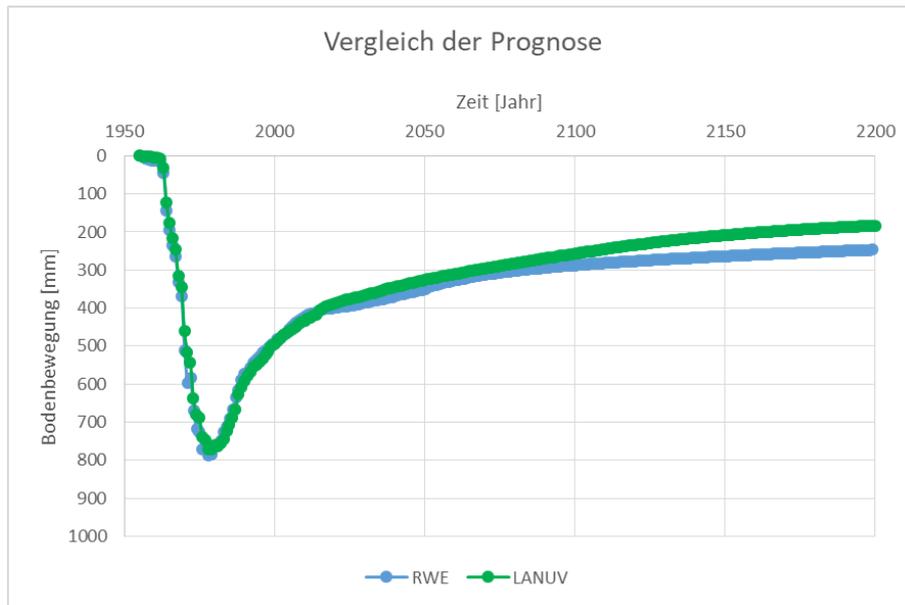


Abbildung 63 Vergleich Prognose beide Modelle mit individueller Kalibrierung

4.3.4 Beurteilung verschiedener Modelle

Die „Neuberechnung für einen Höhenfestpunkt“ hat zunächst gezeigt, dass aufgrund der vorhandenen Geologie und der abweichenden Lage zwischen vorhandenen Bohrungen und den Leitnivelementpunkten Interpretationsspielraum vorhanden ist, der sich dann auch auf das Schichtmodell übertragen kann. Ein weiterer Spielraum ergibt sich aus den verwendeten Grundwassermodellen bzw. deren Interpretation zur Konstruktion der Grundwasserganglinien.

Aus den vorgenannten Gründen können so zwar bereits vorhandene Eingangsparameter für neue Modelle als erste „Startwerte“ verwendet werden, bedürfen aber immer einer individuellen Nachkalibrierung.

Nichtsdestotrotz sind die aktuellen Abweichungen zwischen den Modellen mit i.d.R. weniger als 2 cm vernachlässigbar gering (vgl. Abbildung 62), da Abweichungen oder Ungenauigkeiten im Schichtmodell und den Eingangsdaten durch die individuelle Kalibrierung ausgeglichen werden. Daraus können sich dann zwar in der Prognose bis 2200 Unterschiede ergeben (vgl. Abbildung 63). Allerdings können die Modelle aktualisiert (z.B. Grundwasserganglinien) oder nachkalibriert (z.B. Hebungsfaktor) und so die Prognosegenauigkeit weiter verbessert werden, wenn sich im Laufe der nächsten Jahre zeigt, dass ein Modell zunehmend von der gemessenen Bodenbewegung abweicht.

5 Zwischenfazit

Mit den vom LANUV zur Verfügung gestellten Eingangsdaten zur Geologie und den Grundwasserverhältnissen wurde seitens ZAI auf Basis allgemein gültiger bodenmechanischer Zusammenhänge ein Bodenbewegungsmodell für den Punkt Niedermerz aufgestellt und anhand von gemessenen Bodenbewegungen kalibriert, wie die folgende Abbildung 64 nochmals veranschaulicht.

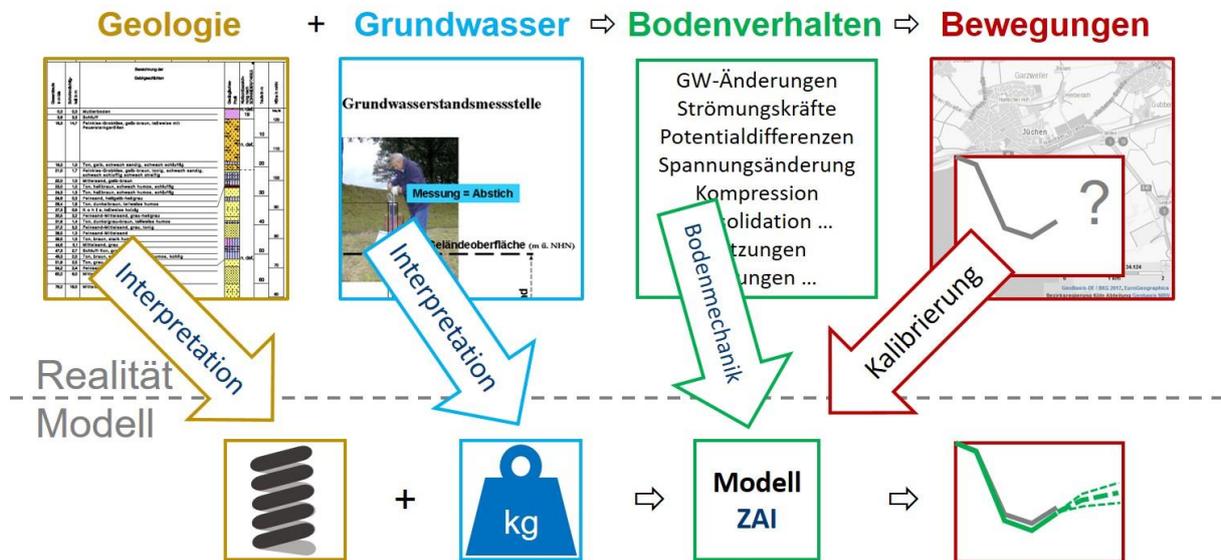


Abbildung 64 Modellentwicklung

Mit dem so erhaltenen Bodenbewegungsmodell lässt sich das gemessene Verhalten sehr gut abbilden und damit auch weiter für die Zukunft prognostizieren (vgl. z.B. Abbildung 22 und Abbildung 23).

Die sehr gute Übereinstimmung zwischen Nachrechnung und Messung ergibt sich dadurch, dass durch das bei ZAI verwendete Bodenbewegungsmodell eine punktspezifische Kalibrierung möglich ist, um auf die wechselhafte Geologie im Rheinischen Braunkohlerevier im Allgemeinen und zwischen einzelnen Punkten im Speziellen zu reagieren. So ergeben sich z.B. für den Punkt Niedermerz ab den 1980er Jahren Abweichungen zwischen Messung und Nachrechnung von weniger als 5 cm (vgl. Abbildung 22).

Weiter hat die Sensitivitätsstudie 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. Etwas größere Unsicherheiten in der aktuellen Prognose resultieren lediglich aus den Hebungen der bindigen Schichten, da diese aufgrund des zeitverzögerten Verhaltens bis heute nur in geringem Maß aufgetreten sind und der „Hebungsfaktor bindig“ daher bisher vergleichsweise mäßig kalibriert ist. In diesem Zusammenhang wäre es denkbar, durch zusätzliche Bohrungen Proben aus den bindigen Schichten zu gewinnen, um diese dann im Labor auch im Hinblick auf

ihr Hebungsverhalten zu untersuchen. Allerdings ist dabei zu beachten, dass generell nur Proben mit vergleichsweise geringen Abmessungen gewonnen werden können und diese Proben bereits durch das Bohren und die Entnahme gestört bzw. entlastet werden. Daher wäre die Aussagekraft und Genauigkeit solcher Untersuchungen im Hinblick auf das tatsächliche Hebungsverhalten beschränkt. Hinzu kommt, dass solche Untersuchungen auch nur punktuell umsetzbar und dennoch mit einem enormen finanziellen und zeitlichen Aufwand verbunden wären. Und letztlich wäre aber auch trotz zusätzlicher Laborversuche immer noch eine Kalibrierung des Modells anhand der gemessenen Bewegungen vorzunehmen, in die dann auch die weiteren Randbedingungen (z.B. die Schichtmächtigkeit) einfließen. In Summe werden solche Untersuchungen daher als wenig zielführend eingeschätzt. Stattdessen sollten die Messungen an der Geländeoberfläche möglichst engmaschig fortgesetzt werden und eine darauf basierende Nachkalibrierung in regelmäßigen Zeitabständen erfolgen. Damit können die aktuell noch vorhandene Unsicherheit reduziert und die Prognosegenauigkeit stetig verbessert werden.

Weiter haben die Variation der Eingangsdaten (Geologie, Grundwasser) und die Neuberechnung für einen Höhenfestpunkt gezeigt, dass übliche Ungenauigkeiten in den Eingangsdaten wie den Schichtmächtigkeiten oder den Absenkungsmaxima durch die Kalibrierung ausgeglichen werden können. Das bisher beobachtete Bewegungsverhalten lässt sich mit einem solchen „Ausgleich“ immer noch gut abbilden. Weiter hat die Neuberechnung für einen Höhenfestpunkt auch gezeigt, dass die möglichen Unterschiede bis 2100 noch sehr gering sind. Allerdings hat ein solcher „Ausgleich“ dann Auswirkungen auf die Prognose bis 2200.

Bei relevanten Änderungen der Eingangsdaten wie z.B. der Grundwasserganglinien, die sich etwa aus einer geänderten Bewirtschaftung ergeben können, sollten diese daher auch im Bodenbewegungsmodell aktualisiert werden.

6 Weiteres Vorgehen und Ausblick

Im Rahmen des Vorhabens „Berechnung und Prognose von Bodenbewegungen mit Sensitivitätsanalyse im Rheinischen Braunkohlerevier“ werden in Ergänzung zu den bereits erfolgten und hier vorgestellten Untersuchungen noch zwölf weitere Punkte betrachtet. Für diese wird analog zur oben beschriebenen Vorgehensweise eine Nachrechnung und Prognose der Bodenbewegungen erstellt werden.

Erste Ergebnisse für die weiteren bereits in der Bearbeitung befindlichen Punkte zeigen, dass sich auch für diese Punkte das tatsächlich gemessene Bodenbewegungsverhalten mit dem vorhandenen Modell qualitativ sehr gut abbilden lässt.

Mit der Fertigstellung der Prognose für alle zwölf weiteren Punkte ist nach derzeitigem Kenntnisstand bis Ende Oktober zu rechnen, mit Aufbereitung der Ergebnisse und Darstellung in Form eines umfassenden Abschlussberichts bis etwa zum Jahreswechsel.

Nach erfolgreicher Nachrechnung und Prognose für alle zwölf weiteren Punkte können dann in einem weiteren Schritt über das gesamte Rheinische Braunkohlerevier verteilte Punkte betrachtet bzw. berechnet werden. Damit kann dann die Basis zum Erreichen des übergeordneten Ziels geschaffen werden, zukünftig Grundwasserflurabstände nach Grundwasserwiederanstieg sicher zu prognostizieren und Bereiche möglicher Geländevernässungen zu identifizieren.

Aachen, 01. Oktober 2018



Dr.-Ing. B. Aulbach



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

7 Literatur

- [1] ZIEGLER, M., GIESE, S., SCHAEFER, W. & FORKEL, C. (2007): Prognose sumpfungsbedingter Bodenbewegungen im Rheinischen Braunkohlenrevier.- Geotechnik 30, Nr. 1
- [2] GIESE, S. (2010): Bodenbewegungen infolge von Sumpfangsmaßnahmen für tiefe Tagebaue am Beispiel des Rheinischen Braunkohlenreviers.- Diss. RWTH Aachen, Schriftenreihe Geotechnik im Bauwesen, RWTH Aachen
- [3] SCHNEIDER; H. & THIELE, S. (1965): Geohydrologie des Erftgebietes.- Ministerium für Ernährung Landwirtschaft und Forsten des Landes Nordrhein-Westfalen, Aachen
- [4] TERZAGHI, K. (1943): Theoretical Soil Mechanics. John Wiley and Sons, Inc., New York-London.
- [5] TERZAGHI, K., JELINEK, R. (1954): Theoretische Bodenmechanik. Springer-Verlag, Berlin – Göttingen – Heidelberg.
- [6] KOLYMBAS, D. (1998): Geotechnik – Bodenmechanik und Grundbau. Springer-Verlag, Berlin – Heidelberg.
- [7] ZIEGLER, M. (2012): Unterlagen zur Vorlesung Geotechnik I, Geotechnik im Bauwesen, RWTH Aachen.

Eingangsparameter

01 Niedermerz

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	1,00E-10	[m ² /s]	Prozentsatz
				[%]
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**