

Bericht

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: 152 Seiten Text
15 Seiten Anhang

Datum: 25. April 2019

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 Tagebauende 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. Anschließend wurde außerdem eine Kalibrierung nur auf Basis der Messdaten bis 1983, d.h. bis vor dem Beginn von Hebungen, vorgenommen, um den Einfluss der Kenntnis bzw. nicht vorhandenen Kenntnis zum Hebungsverhalten auf die Kalibrierung und Prognose zu untersuchen.

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. Die dabei erhaltene sehr gute Übereinstimmung zwischen Nachrechnung und Messung lässt sich dadurch erklären, dass mit dem bei ZAI verwendeten 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. Lediglich aus den Hebungsfaktoren und insbesondere dem Hebungsfaktor für die bindigen Schichten können noch etwas größere Streuweiten resultieren. Dies begründet sich damit, dass Hebungen der bindigen Schichten aufgrund des zeitverzögerten Verhaltens bis heute noch gar nicht oder nur in sehr geringem Maß aufgetreten sind und der „Hebungsfaktor bindig“ daher bisher

noch mit Unschärfen behaftet ist. So wurden an den betrachteten Punkte zwar deutliche Setzungen von bis zu 3,5 m gemessen, allerdings bisher nur an drei Punkten ein stagnierender Setzungsverlauf und lediglich am Punkt Niedermerz Hebungen von ca. 30 cm beobachtet. Durch die Fortsetzung der Messungen und eine darauf basierende Nachkalibrierung in regelmäßigen Zeitabständen kann diese Unsicherheit aber reduziert und die Prognosegenauigkeit stetig verbessert werden.

Der Abgleich mit einem für den Punkt Niedermerz bereits vorhandenem Modell hat außerdem gezeigt, dass aufgrund der generell auch kleinräumig wechselhaften Geologie und der abweichenden Lage zwischen vorhandenen Bohrungen und dem Leitnivelementpunkt 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.

Schließlich wurden bereits für 12 weitere Punkte Bodenbewegungsprognosen erstellt, mit denen bis dato ebenfalls eine sehr gute Übereinstimmung zwischen Messung und Nachrechnung erzielt wird und mit denen insbesondere auch Neigungsänderungen und Wendepunkte der gemessenen Bodenbewegungsverläufe zutreffend abgebildet werden können. Dabei ergeben sich trotz setzungsrelevanter Schichtpakete von 500 bis 1.500 m lediglich Abweichungen von wenigen Zentimetern.

Die an den insgesamt 13 betrachteten Punkten maximal prognostizierten Setzungen schwanken zwischen ca. 0,2 m und ca. 4,3 m. Dabei sind die Setzungen auf der Erftscholle tendenziell am größten und auf der Venloer Scholle tendenziell am geringsten. Weiter nehmen mit größer werdender Entfernung zu den Tagebauen i.d.R. auch die Beeinflussung der Grundwasserstände und damit auch das Setzungspotential ab. Das früheste beobachtete Setzungsmaximum wurde etwa 1980 am Punkt Niedermerz erreicht, das späteste Setzungsmaximum wird etwa 2060 für den Punkt Erftstadt prognostiziert. Dabei gilt, dass an Punkten mit verhältnismäßig geringmächtigen bindigen Schichten und Flözen das Setzungsmaximum nahezu parallel zum Absenkungsmaximum erreicht wird und Hebungen i.d.R. innerhalb des Prognosezeitraums abgeschlossen sind. An Punkten mit mächtigen bindigen Schichten und Flözen kommt es hingegen zu einem gegenüber der Grundwasserbewegung deutlich zeitverzögerten Bodenbewegungsverhalten.

Zusätzlich wurde sowohl für diese 13 Punkte als auch für 22 weitere Punkte, für die im Rahmen eines früheren Projektes bereits Prognosemodelle nach Ziegler und Aulbach erstellt worden waren, eine Variation der Hebungsfaktoren vorgenommen. Dabei wurden sowohl theoretisch mögliche als auch auf Basis der bisherigen Erkenntnisse wahrscheinliche Grenzfälle betrachtet. Zwar ergeben sich je nach Geologie und Grundwasserverhältnissen unterschiedlich große Streuweiten, allerdings ist bereits heute an mehreren Punkten festzustellen, dass sich das tatsächliche Verhalten innerhalb der engeren wahrscheinlichen Grenzen bewegen wird.

Die wahrscheinliche Streuweite schwankt an den meisten Punkten zwischen ± 10 cm und ± 50 cm, liegt jedoch im Minimum bei ± 2 cm und im Maximum bei ± 120 cm. Aber auch an den Punkten mit den absolut größten Streuweiten liegt die wahrscheinliche Streuweite in Relation zu den dort maximal zu erwartenden Bodenbewegungen bzw. Setzungen immer noch unter 20%. Weiter ist festzustellen, dass sich für Punkte mit hohem Anteil bindiger Böden i.d.R. eine größere Streuweite ergibt, als für Punkte mit überwiegend nichtbindigen Böden, was sich aus den bereits vorliegenden Erfahrungswerten für das Hebumverhalten der nichtbindigen Böden begründet. Außerdem fließen an einem Punkt bereits aufgetretene Hebungen in die Bestimmung der wahrscheinlichen Streuweite mit ein und führen so zu einer Reduzierung derselben. Dies gilt auch für Punkte, an denen zwar an der Geländeoberfläche in Summe noch Setzungen gemessen werden, in einzelnen Schichten aber bereits Hebungen aufgetreten sind.

Schließlich können basierend auf einer kontinuierlichen messtechnischen Erfassung der Bodenbewegungen und deren Auswertung die aktuellen wahrscheinlichen Streuweiten noch weiter reduziert und die Bodenbewegungsprognosen durch Nachkalibrierung stetig verbessert werden.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung.....	3
2	Fachgrundlagen.....	5
2.1	Spannungsänderungen infolge Grundwasserstandsänderung	5
2.2	Setzungen und Hebungen infolge Spannungsänderungen.....	7
2.3	Abhängigkeit von der Teufe sowie von der Be- und Entlastung.....	8
2.4	Zeitabhängiges Verhalten bindiger Schichten	10
2.5	Weitere bedeutsame Wirkungszusammenhänge	13
3	Bodenbewegungsmodell	14
3.1	Schichtmodell.....	14
3.2	Grundwasserdaten und Spannungen	16
3.3	Bodenbewegungen	17
4	Ergebnisse der Sensitivitätsanalyse	21
4.1	Sensitivitätsstudie an einem vorgegebenen Höhenfestpunkt.....	21
4.1.1	Eingangsdaten	22
4.1.2	Nachrechnung und Prognose.....	23
4.1.3	Parametervariation.....	25
4.1.4	Beurteilung der Modellgenauigkeit und der Sensitivität	34
4.2	Bewertung der Eingangsdaten	38
4.2.1	Variation der Grundwasserganglinien.....	38
4.2.2	Variation der Schichtmächtigkeiten	42
4.2.3	Beurteilung der Auswirkungen möglicher Ungenauigkeiten auf die Nachrechnung und Prognose	47
4.3	Neuberechnung für einen Höhenfestpunkt	49
4.3.1	Vergleich der Eingangsdaten beider Modelle	49
4.3.2	Neuberechnung Modell LANUV mit Eingangsparametern von RWE	51
4.3.3	Vergleich beider Modelle mit individuell kalibrierten Eingangsparametern.....	52
4.3.4	Beurteilung verschiedener Modelle	53
4.4	Neuberechnung auf Basis der Messwerte bis lediglich 1983.....	54
4.4.1	Kalibrierung mit frei gewählten Hebungsfaktoren	54
4.4.2	Kalibrierung mit auf Erfahrung beruhenden Hebungsfaktoren	56
4.4.3	Beurteilung.....	58
5	Prognoseergebnisse für weitere Punkte	60
5.1	Lage der Punkte und Hinweise zur Kalibrierung.....	60
5.2	Jülich.....	62
5.3	Krauthausen.....	65
5.4	Düren	68
5.5	Körrenzig.....	71
5.6	Heinsberg.....	75
5.7	Titz.....	79
5.8	Oberembt.....	82
5.9	Glesch.....	85
5.10	Ahe.....	88
5.11	Erfstadt	91
5.12	Wanlo	94

5.13	Odenkirchen	97
5.14	Zusammenfassung und Typisierung der einzelnen Punkte	100
6	Variation der Hebungsfaktoren	104
6.1	Niedermerz	107
6.2	Jülich.....	109
6.3	Krauthausen.....	110
6.4	Düren	111
6.5	Körrenzig.....	112
6.6	Heinsberg.....	113
6.7	Titz.....	114
6.8	Oberembt	115
6.9	Glesch.....	116
6.10	Ahe.....	117
6.11	Erfstadt	118
6.12	Wanlo	119
6.13	Odenkirchen	121
6.14	AC 75	122
6.15	Jüchen.....	123
6.16	Niedermerz (RWE)	124
6.17	Kaster	126
6.18	Kaster A61.....	127
6.19	Elsdorf	128
6.20	Zieverich.....	129
6.21	Thorr.....	130
6.22	Horrem	131
6.23	Mödrath	132
6.24	Kerpen.....	133
6.25	Heppendorf.....	134
6.26	Haus Forst.....	135
6.27	Bergerhausen	136
6.28	Buir.....	137
6.29	Merzenich	138
6.30	Wissersheim.....	139
6.31	Baal	140
6.32	Mersch.....	142
6.33	Oberzier.....	143
6.34	Borr.....	144
6.35	Weilerswist	145
6.36	Zusammenfassung und Typisierung der einzelnen Punkte	146
7	Fazit	147
8	Literatur	152

1 Einleitung

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

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 Prognoseungenauigkeiten, die sich aus Unsicherheiten oder natürlichen Streuungen der Eingangsdaten ergeben.

Basierend auf einem bereits von ZAI entwickelten und in der Praxis bewährten Prognosemodell wurden 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 (Abschnitt 4.1).

In einem zweiten Schritt wurden dann auch die vom LANUV bereitgestellten Eingangsdaten (Grundwasserganglinien, Geologie bzw. Schichtaufbau) ebenfalls variiert und deren Einfluss untersucht (Abschnitt 4.2).

Als dritter Schritt wurde dann eine Neuberechnung für einen Höhenfestpunkt durchgeführt, der bereits mit einem vorhandenen Modell erfasst wurde (Abschnitt 4.3).

Die vorherigen Schritte wurden dann um eine Nachrechnung und Prognose ergänzt, bei der für die Kalibrierung ausschließlich die Messdaten bis in die 1980er Jahre verwendet wurden, um den Einfluss auf die Kalibrierung ohne die dort ab den 1980er gemessene Hebungen zu untersuchen (Abschnitt 4.4).

Nach Untersuchung der verschiedenen Einflüsse wurde schließlich für 12 weitere Punkte jeweils ein Prognosemodell aufgestellt, der bisherige Beobachtungszeitraum nachgerechnet, das jeweilige Modell anhand von Messdaten kalibriert und schließlich eine Prognose bis 2200 erstellt (Abschnitt 5).

Aufgrund der an den meisten betrachteten Punkten bis dato noch nicht eingetretenen Hebungen und der dadurch nicht vorhandenen Möglichkeit der punktspezifischen Kalibrierung des

Hebungsverhaltens, wurde in Ergänzung zur Prognose abschließend eine Variation der Hebungs-faktoren vorgenommen um mögliche Streuweiten aufzuzeigen (Abschnitt 6).

Nach dieser

1) Einleitung

gibt der hier vorliegende Bericht zunächst einen Einblick in die

2) fachlichen Grundlagen der Bodenbewegungen (Abschnitt 2),

enthält

3) Erläuterungen zum verwendeten Prognosemodell (Abschnitt 3),

und stellt dann die

4) Ergebnisse der Berechnungen und der Sensitivitätsanalysen (Abschnitt 4)

dar. Daran anschließend werden die

5) Prognoseergebnisse für zwölf weitere Punkte (Abschnitt 5)

sowie die

6) Ergebnisse der Variation der Hebungs-faktoren (Abschnitt 6)

dargestellt und erläutert, bevor ein

7) abschließendes Fazit (Abschnitt 7)

gezogen wird.

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).

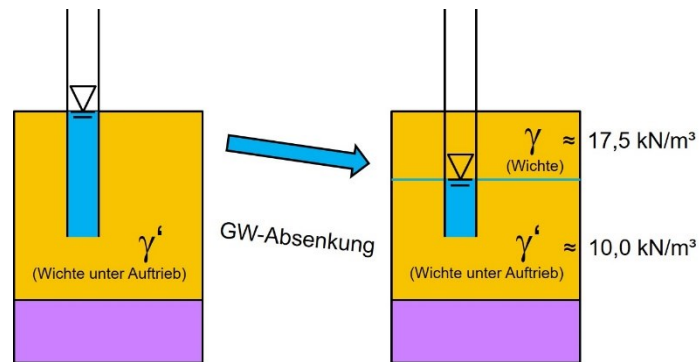


Abbildung 1 Erhöhung der Wichte infolge Trockenfallen

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).

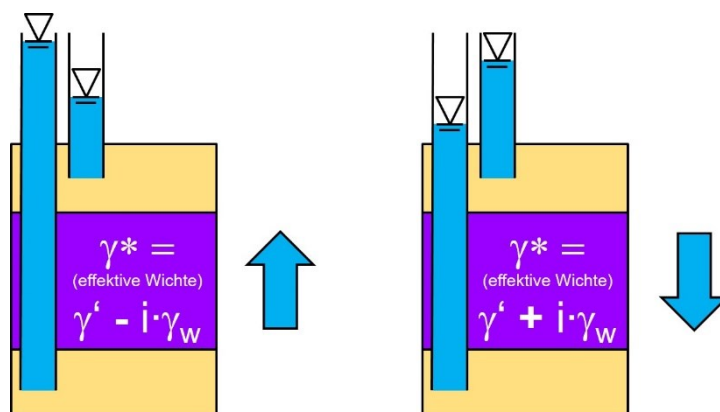


Abbildung 2 Veränderung der Wichte infolge Durchströmung

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.

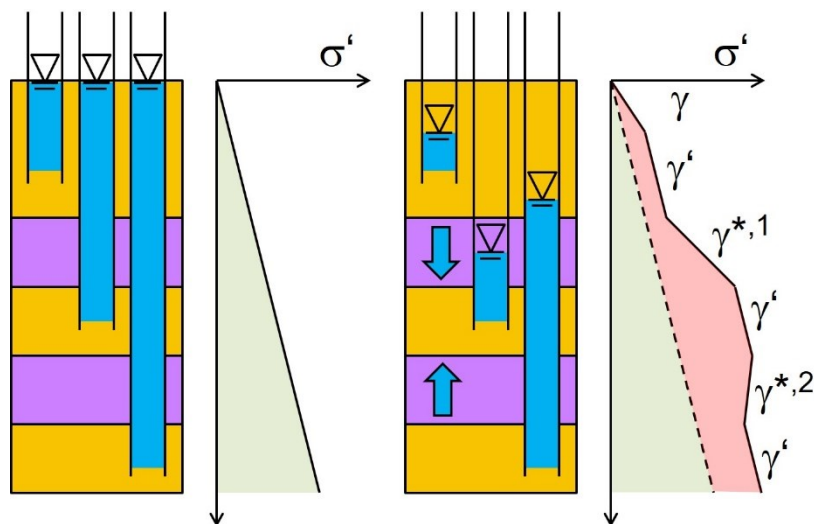


Abbildung 3 Ausgangsspannung (grün) und Spannungsänderung (rot) infolge unterschiedlicher Wasserstandsänderungen in den Grundwasserleitern (gelb)

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.

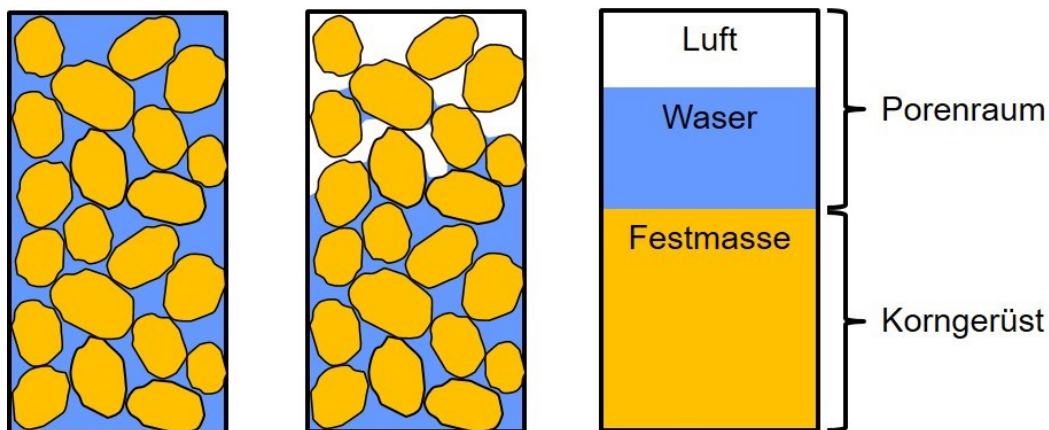


Abbildung 4 Mehrphasensystem Boden

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.

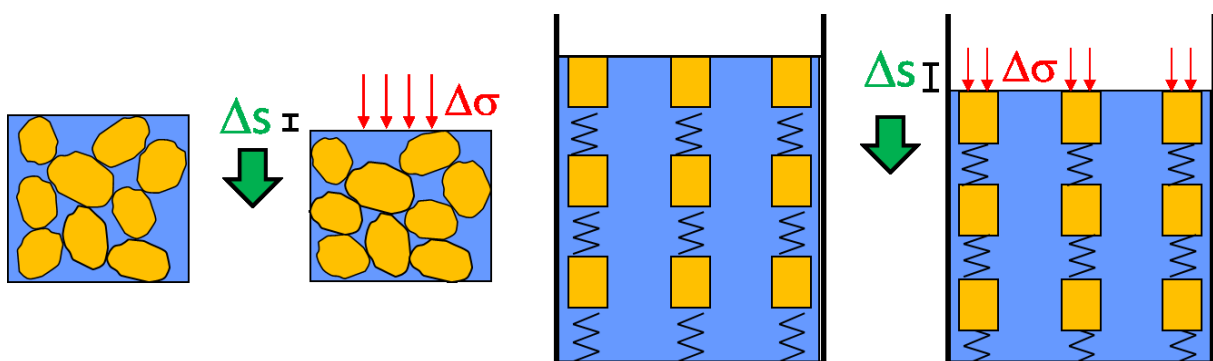


Abbildung 5 Setzungen infolge Spannungserhöhung am Mehrphasensystem und am idealisierten Kolben-Feder-Modell

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.

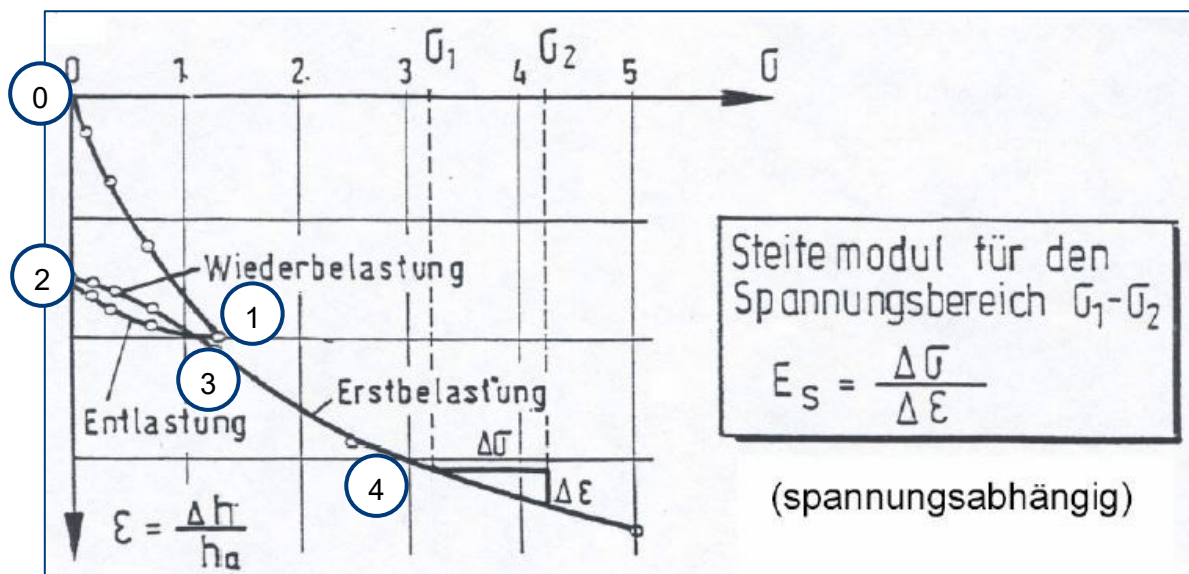


Abbildung 6 Ödometerversuch mit Erst-, Ent- und Wiederbelastung nach [7]

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.

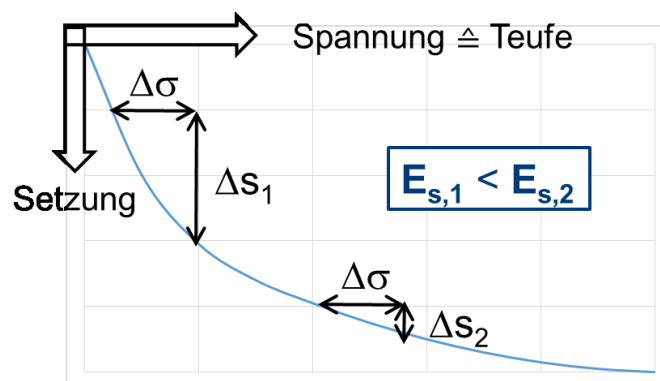


Abbildung 7 Spannungs- bzw. Tiefenabhängigkeit der Steifigkeit und des Steifemoduls E_s

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.

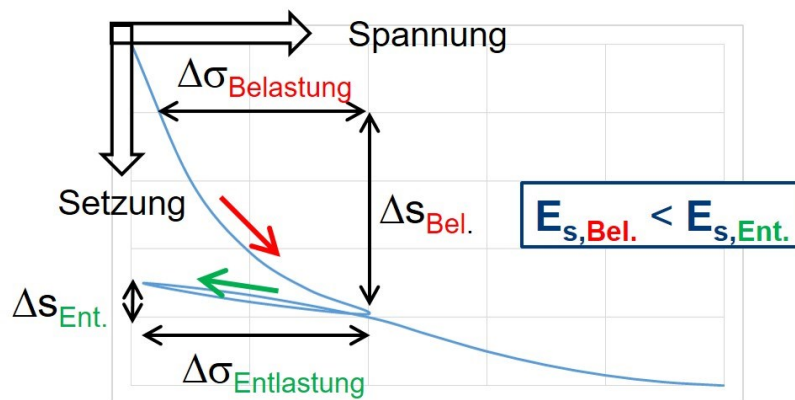


Abbildung 8 Abhängigkeit der Steifigkeit bzw. des Steifemoduls E_s von der Belastung

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.

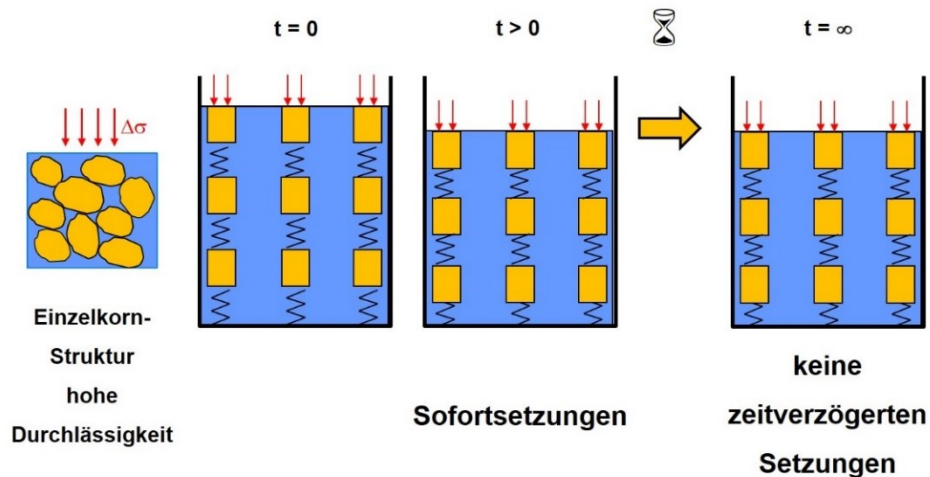


Abbildung 9 Setzungsverhalten nichtbindiger Böden am Kolben-Feder-Modell

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.

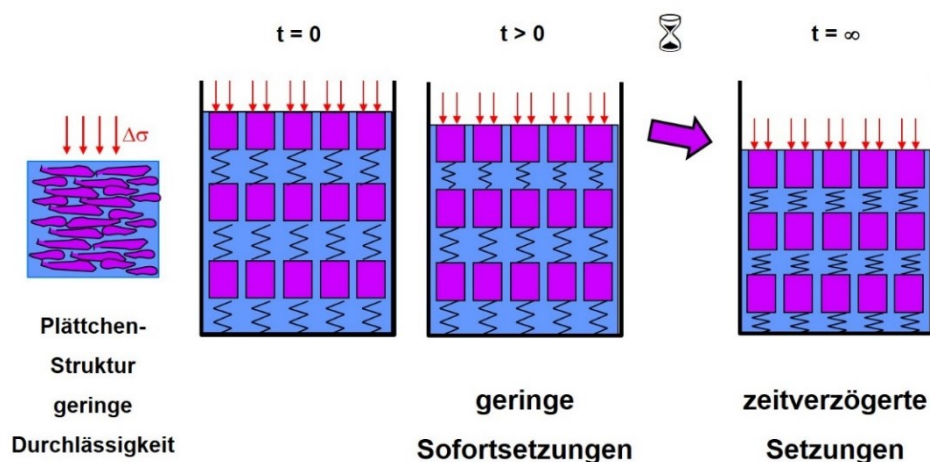


Abbildung 10 Setzungsverhalten bindiger Böden am Kolben-Feder-Modell

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.

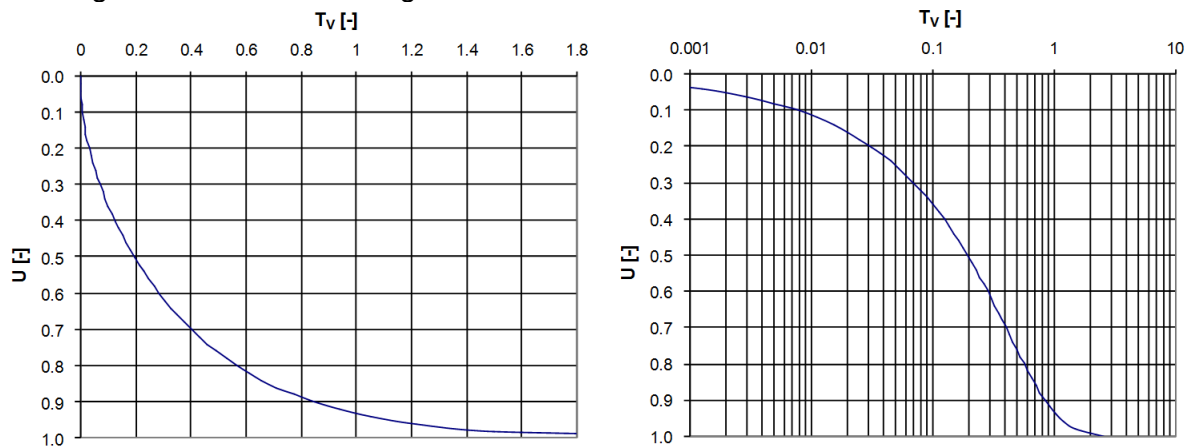


Abbildung 11 Konsolidationskurve in linearer (links) und halblogarithmischer Auftragung (rechts)

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 Grundwasserwideranstieg 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					
99,1	24,1	9C	4,8	bindig		
96,7	26,5					
86,05	37,15	9B	21,3	...		9B
75,4	47,8					
72,45	50,75	9A	5,9			
69,5	53,7					
53,25	69,95	8	32,5			8
37	86,2					
35,5	87,7	7F/7D/7B	3	Kohle		
34	89,2					
22,15	101,05	7A	23,7			7A
10,3	112,9					
5,15	118,05	6E	10,3			
0	123,2					
-12,65	135,85	6D	25,3			6D
-25,3	148,5					
-39,35	162,55	6C	28,1			
-53,4	176,6					
-53,6	176,8	6B	0,4			6B
-53,8	177					
-62,9	186,1	6A	18,2			
-72	195,2					
-127,4	250,6	2-5	110,8			2-5
-182,8	306					
-185,1	308,3	1	4,6			
-187,4	310,6					
-278,7	401,9	02-09	182,6			02-09
-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]														
		m*	variabel	4,8	21,3	m*	variabel	5,9	32,5	m*	variabel	3	23,7	m*	variabel	10,3
		$\Delta\sigma'$ [kN/m ²]														
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			20,33

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 $\Delta\sigma'$.

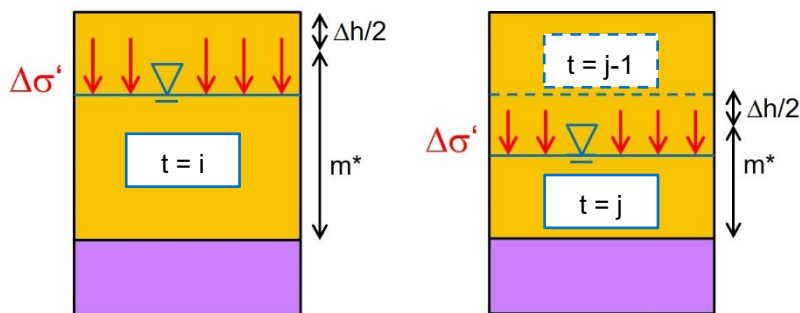


Abbildung 15 Relevante Spannungsänderung und Schichtmächtigkeit

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 Hebeverhalten 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/7 B	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.

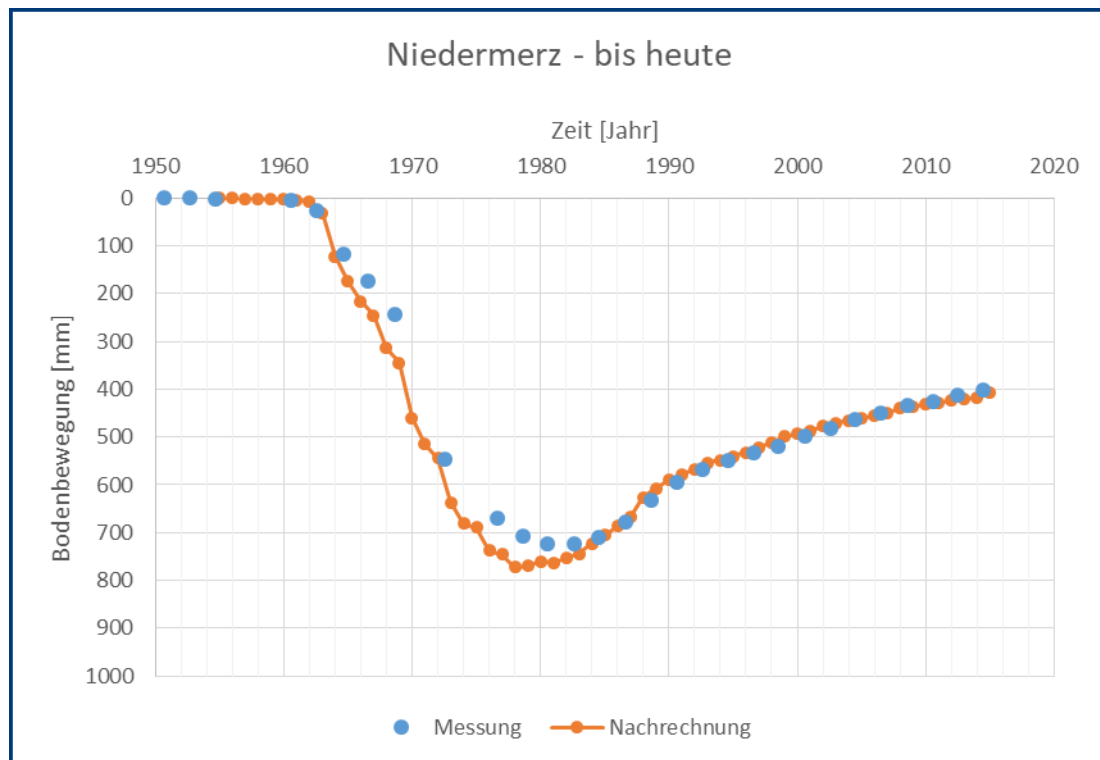


Abbildung 18 Grafische Gegenüberstellung der Messung (Höhenzeitfolge) und Nachrechnung

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 Hebung-

gen. 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 auch kleinräumig, 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 der Sensitivitätsanalyse

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.

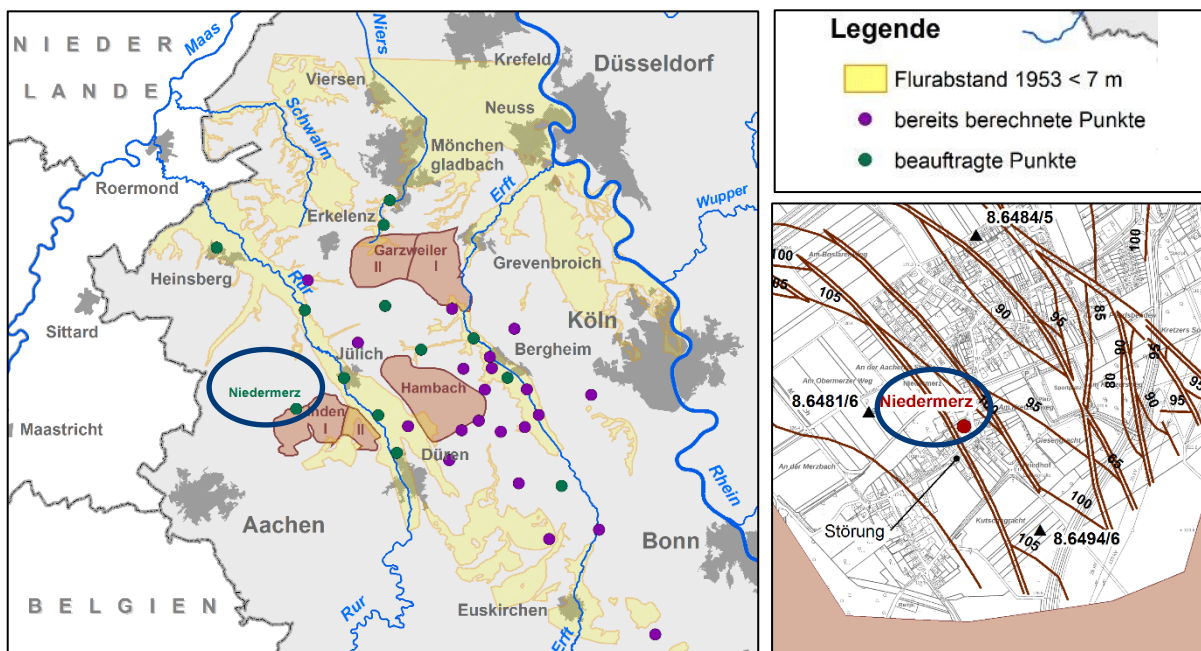


Abbildung 19 Lage des Punktes Niedermerz (blau umrandet) und der Bohrungen 8.6481/6, 8.6484/5 sowie 8.6494/6 (Quelle: LANUV)

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.

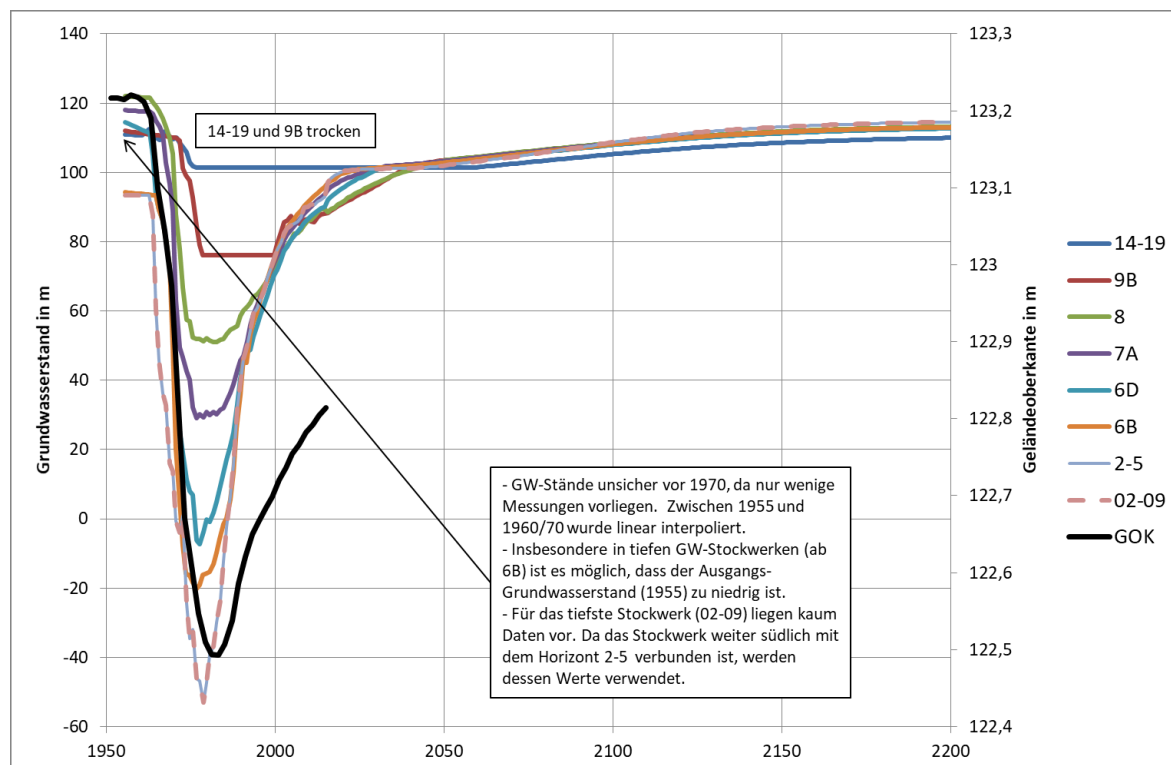


Abbildung 21 Grundwasserganglinien Niedermerz, bereitgestellt durch LANUV

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.

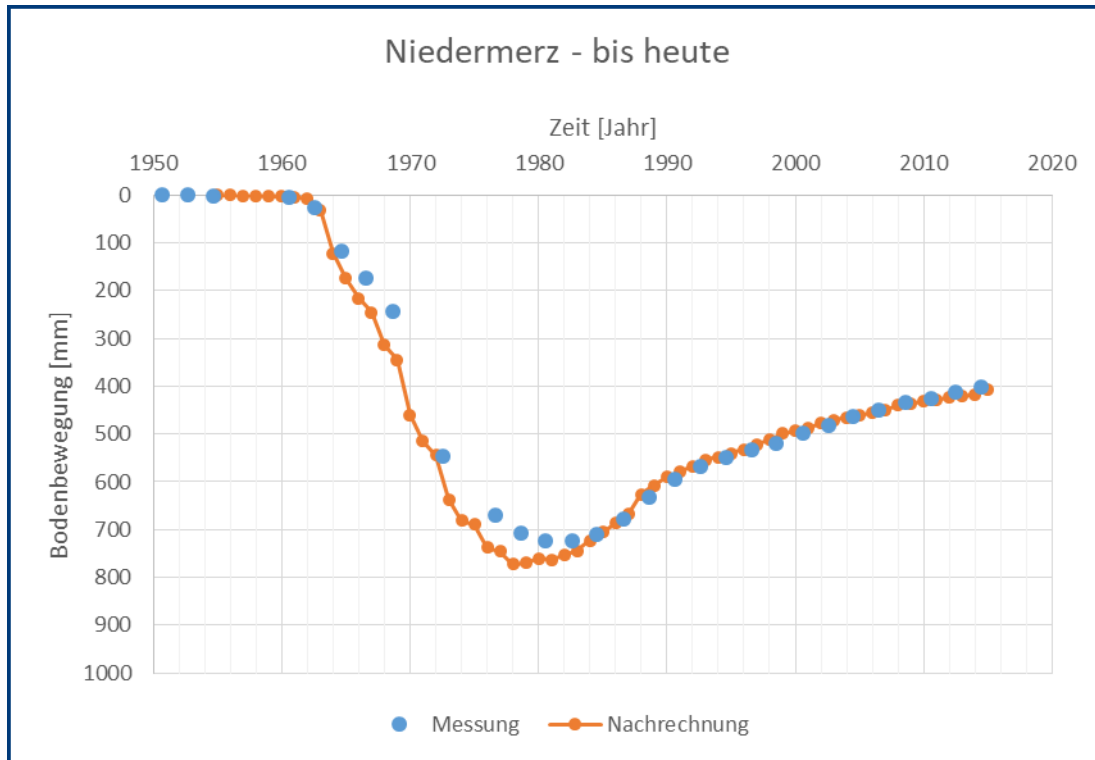


Abbildung 22 Nachrechnung für den Punkt Niedermerz

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:

- 1) *GW-Stände unsicher vor 1970, da nur wenige Messungen vorliegen. Zwischen 1955 und 1960/70 wurde linear interpoliert.*
- 2) *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.

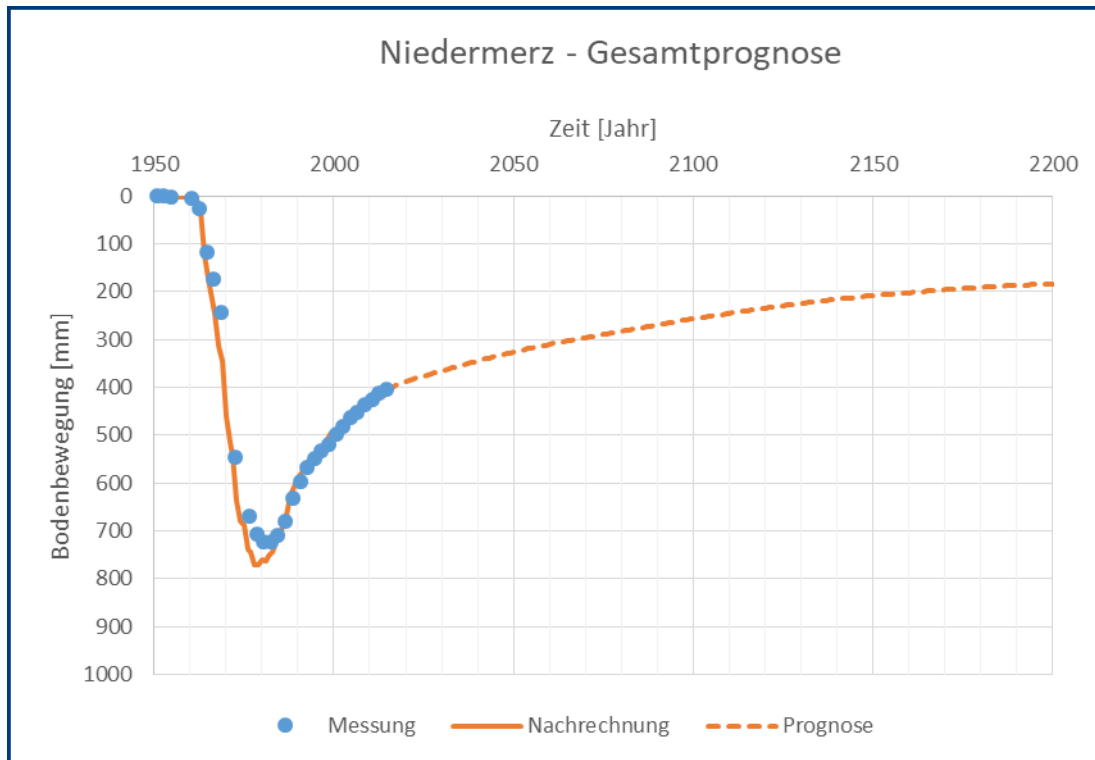


Abbildung 23 Prognose für den Punkt Niedermerz

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]	6,2E-13	6,2E-12	6,2E-11	6,2E-10	6,2E-09
Teufenabhängige Steifigkeitszunahme nichtbindig	[%]	-50%	-25%	Es,nb (z)	25%	50%
Teufenabhängige Steifigkeitszunahme bindig	[%]	-50%	-25%	Es,b (z)	25%	50%
Teufenabh. 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.

Hinweis:

Bei der Erstellung des Zwischenberichts vom 01.10.2018 kam es zu einem Übertragungsfehler beim Ausgangskonsolidationsbeiwert c_v (Startwert 1,0E-11 statt kalibrierter Wert von 6,2E-11). Der Übertragungsfehler wurde im hier vorliegenden Abschlussbericht korrigiert (Tabelle 1, Abbildung 28, Abbildung 29 und Anhang 01). Alle sonstigen Abbildungen, Ausführungen und insbesondere die Ergebnisse der Nachrechnung und Prognose bleiben davon unberührt.

4.1.3.1 Ausgangssteifigkeit nichtbindig

Die folgenden beiden Abbildungen zeigen die Ergebnisse der Variation der „Ausgangssteifigkeit nichtbindig“. Bei Reduktion der Ausgangssteifigkeit (a, b) nehmen die maximalen und bleibenden Setzungen gegenüber dem 0-System zu, da sich der Boden weicher verhält. Bei Erhöhung (c, d) der Ausgangssteifigkeit 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.

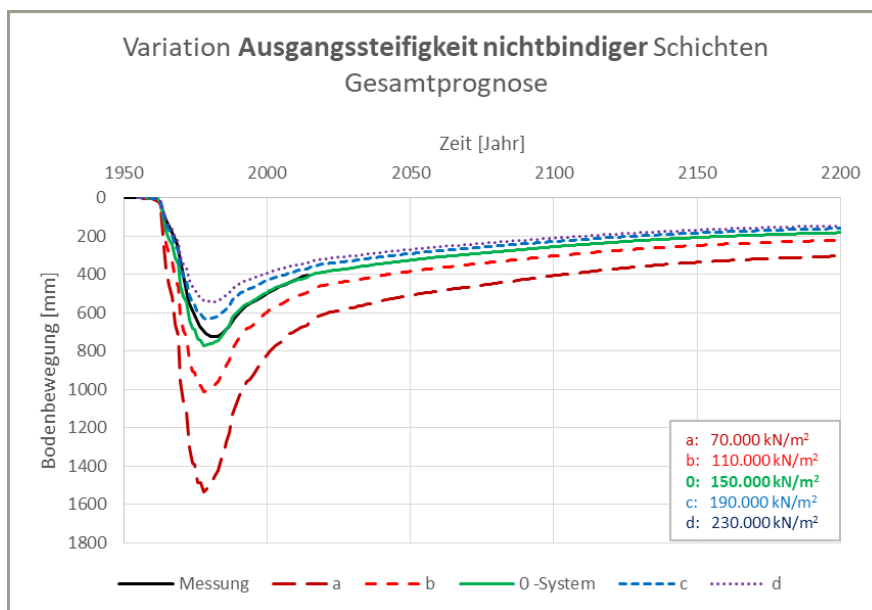


Abbildung 24 Variation Ausgangssteifigkeit nichtbindig - Gesamtprognose

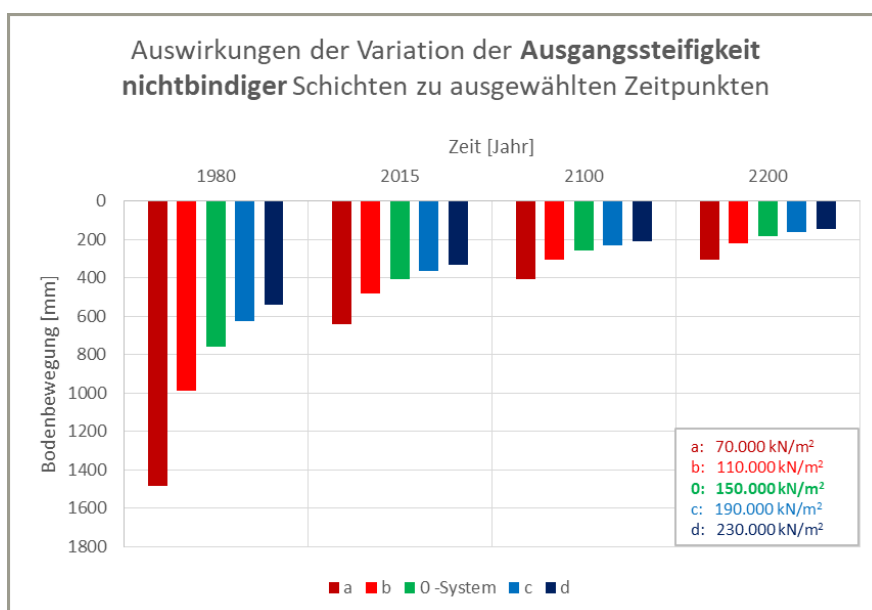


Abbildung 25 Variation Ausgangssteifigkeit nichtbindig – ausgewählte Zeitpunkte

4.1.3.2 Ausgangssteifigkeit bindig

Die folgenden beiden Abbildungen zeigen die Ergebnisse der Variation der „Ausgangsteifigkeit bindig“. Analog zur „Ausgangsteifigkeit 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.

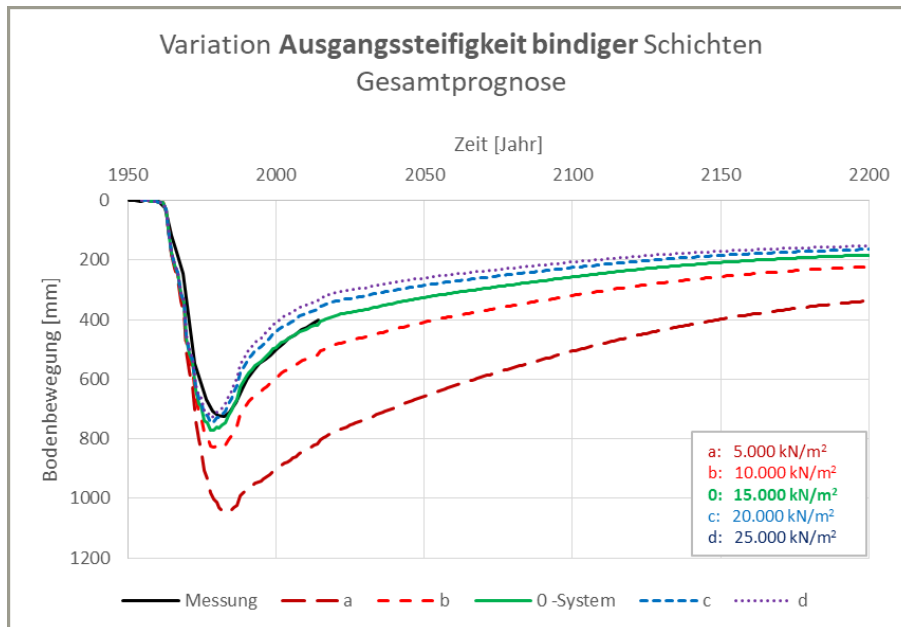


Abbildung 26 Variation Ausgangsteifigkeit bindig - Gesamtprognose

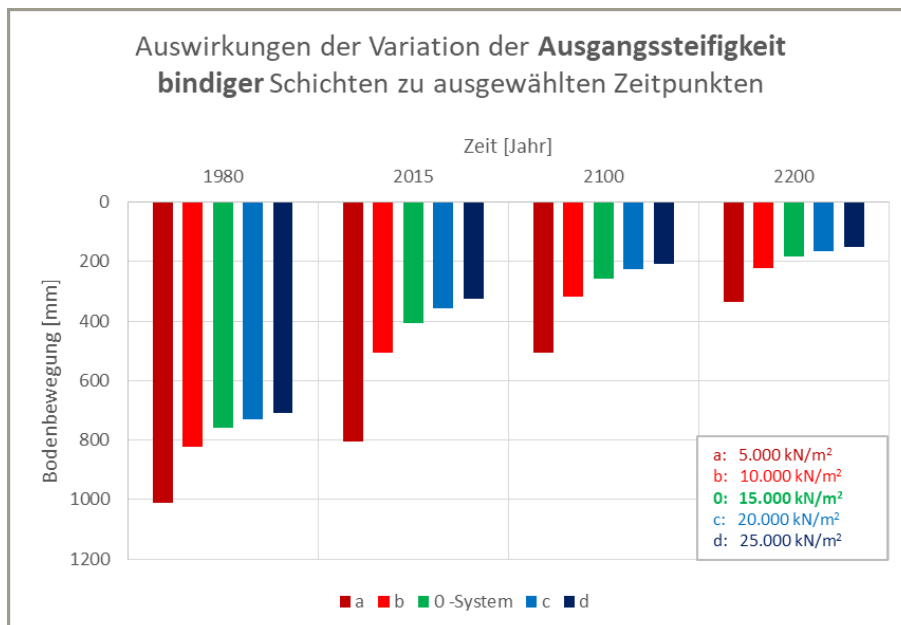


Abbildung 27 Variation Ausgangsteifigkeit bindig – ausgewählte Zeitpunkte

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.

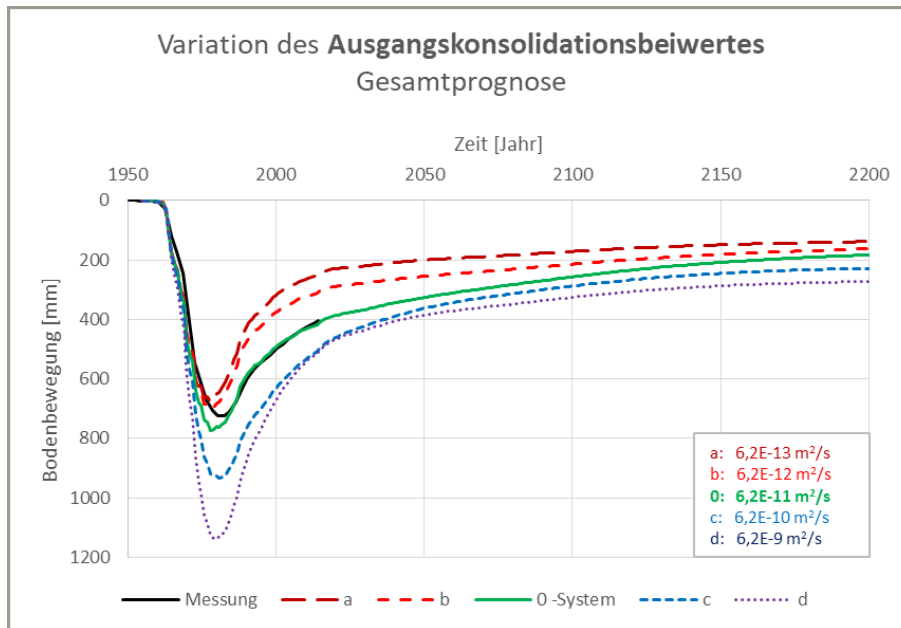


Abbildung 28 Variation Ausgangskonsolidationsbeiwert - Gesamtprognose

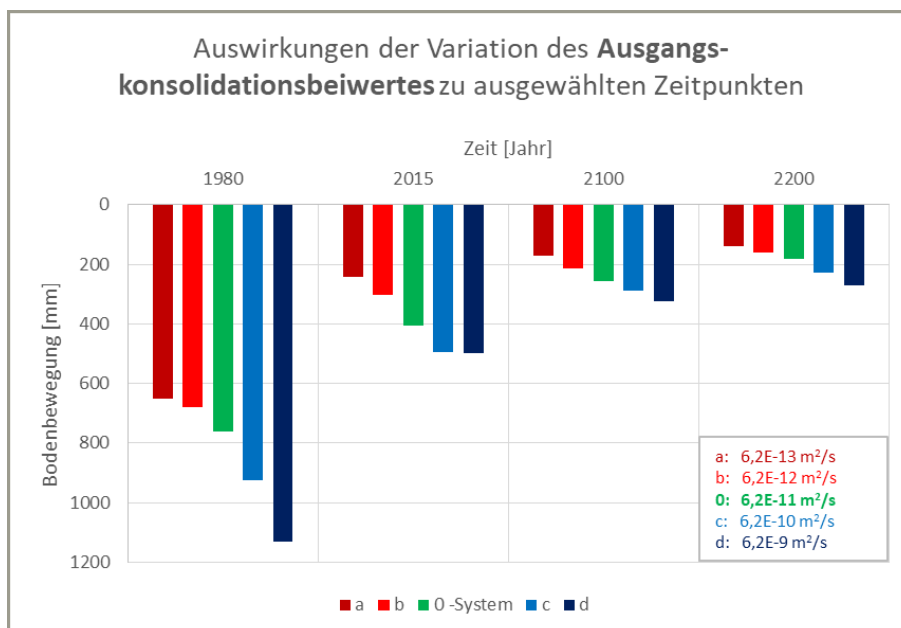


Abbildung 29 Variation Ausgangskonsolidationsbeiwert – ausgewählte Zeitpunkte

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 weiches 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.

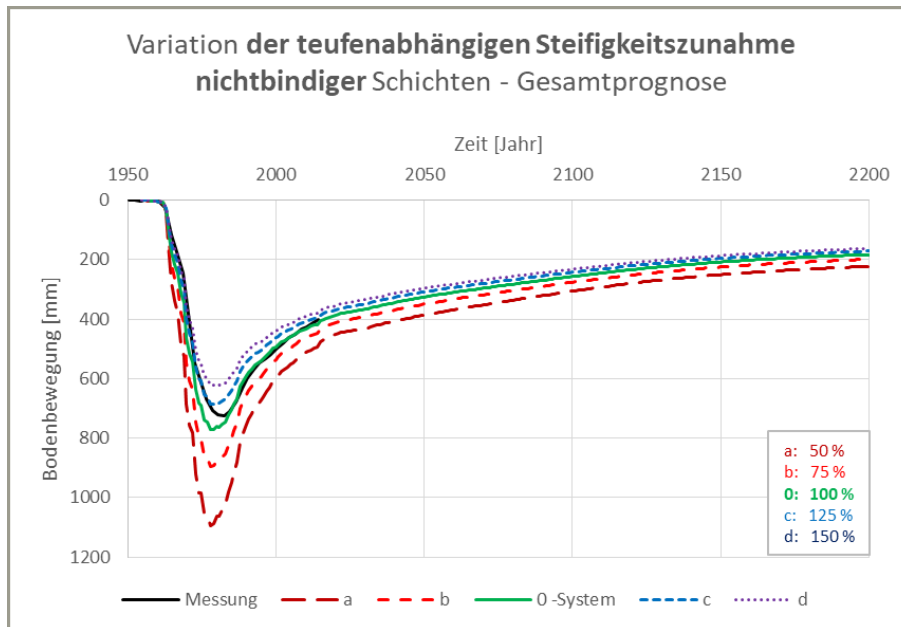


Abbildung 30 Variation teufenabhängige Steifigkeitszunahme nichtbindig - Gesamtprognose

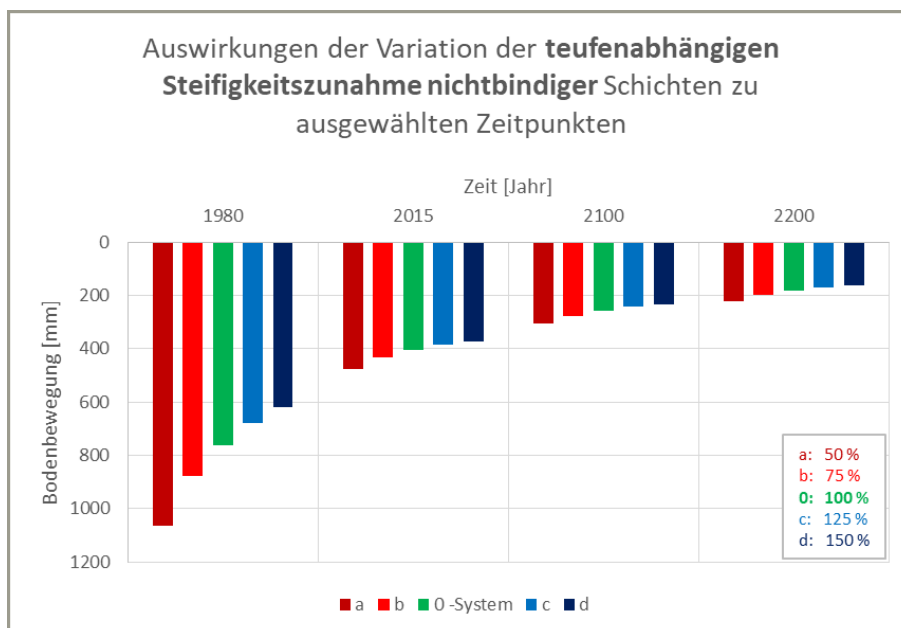


Abbildung 31 Variation teufenabhängige Steifigkeitszunahme nichtbindig – ausgewählte Zeitpunkte

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.

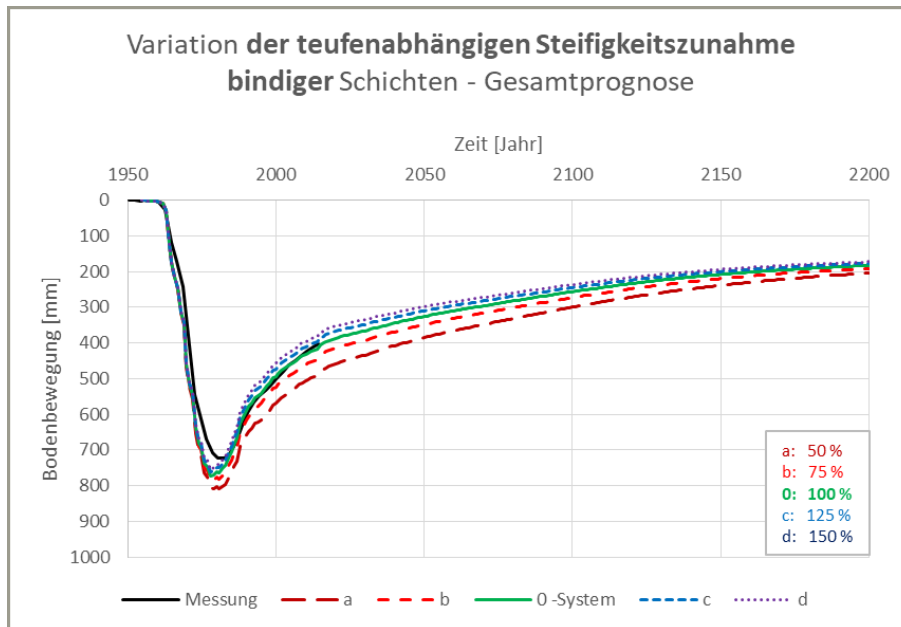


Abbildung 32 Variation teufenabhängige Steifigkeitszunahme bindig - Gesamtprognose

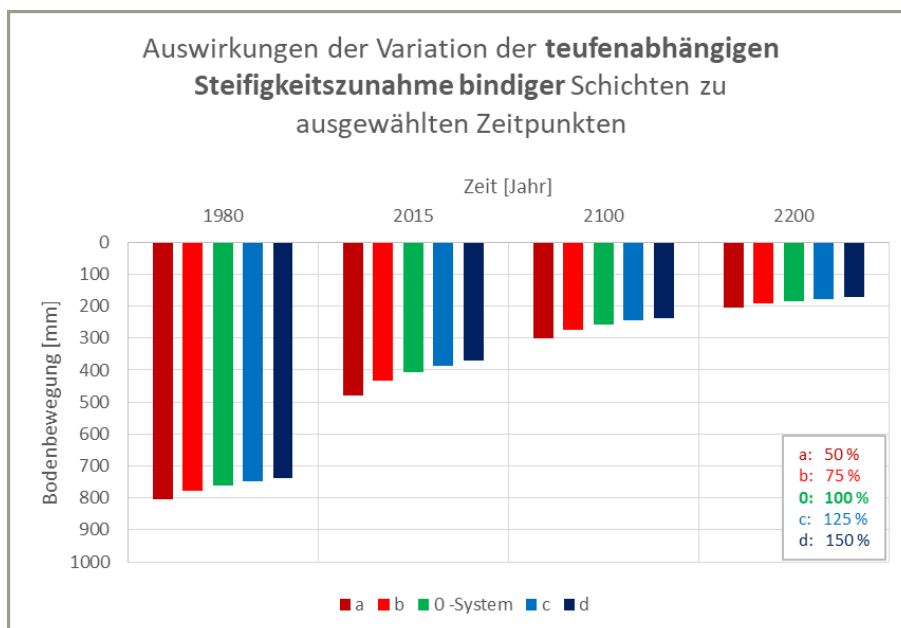


Abbildung 33 Variation teufenabhängige Steifigkeitszunahme bindig – ausgewählte Zeitpunkte

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.

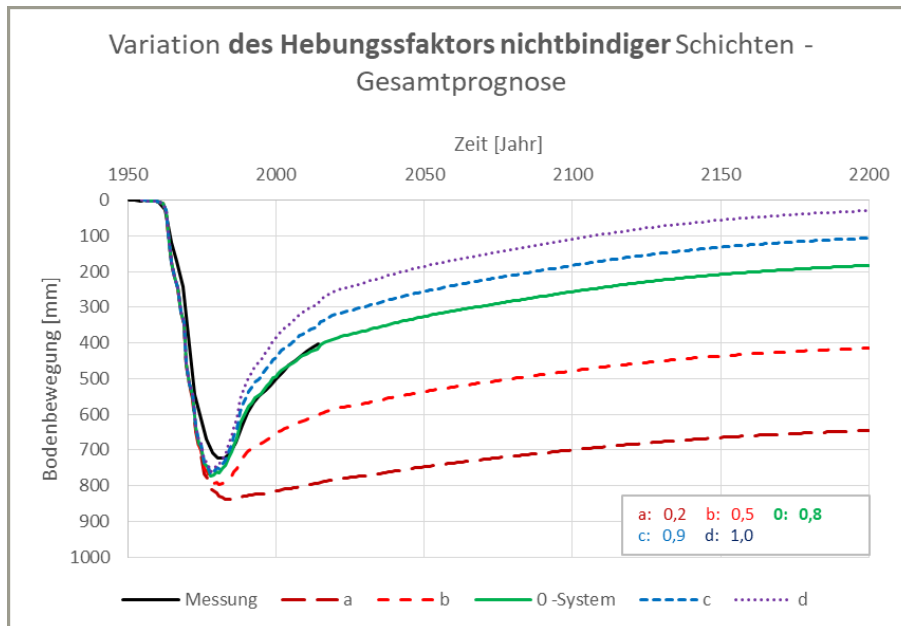


Abbildung 34 Variation Hebungsfaktor nichtbindig - Gesamtprognose

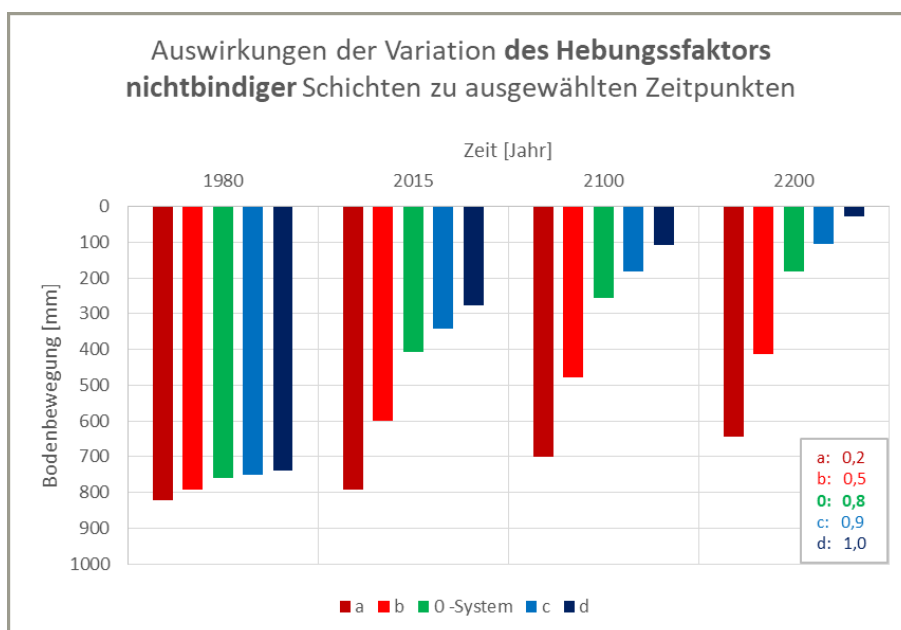


Abbildung 35 Variation Hebungsfaktor nichtbindig – ausgewählte Zeitpunkte

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.

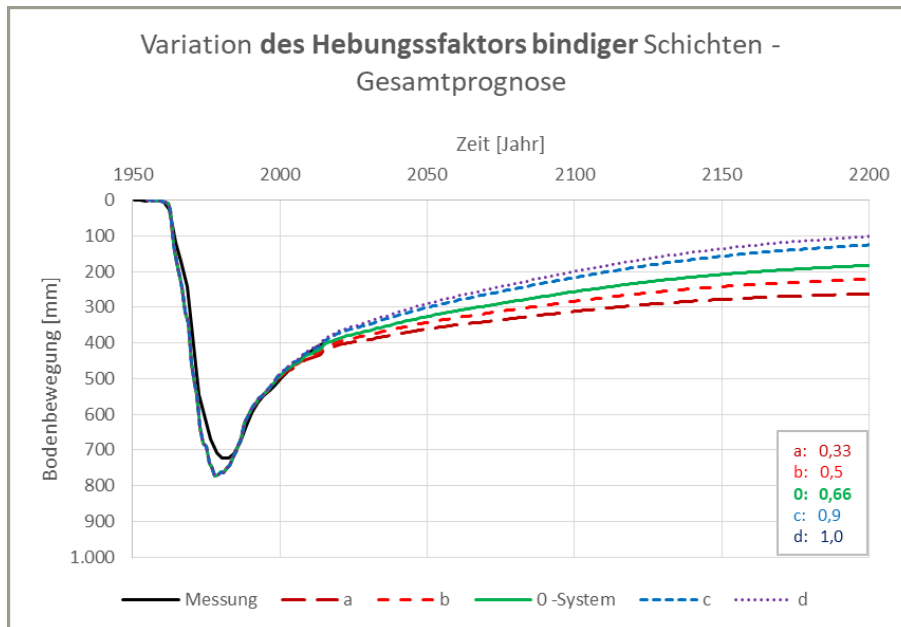


Abbildung 36 Variation Hebungsfaktor bindig - Gesamtprognose

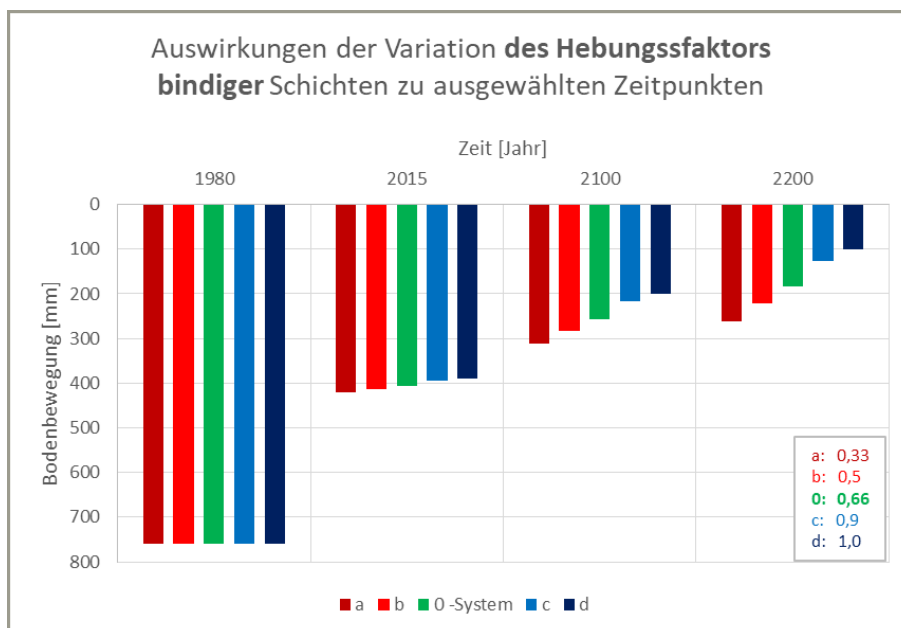


Abbildung 37 Variation Hebungsfaktor bindig – ausgewählte Zeitpunkte

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 „Ausgangssteifigkeit nichtbindig“ der theoretisch mögliche Wertebereich gelb und der aufgrund der Messwerte realistische Wertebereich grün hinterlegt sind.

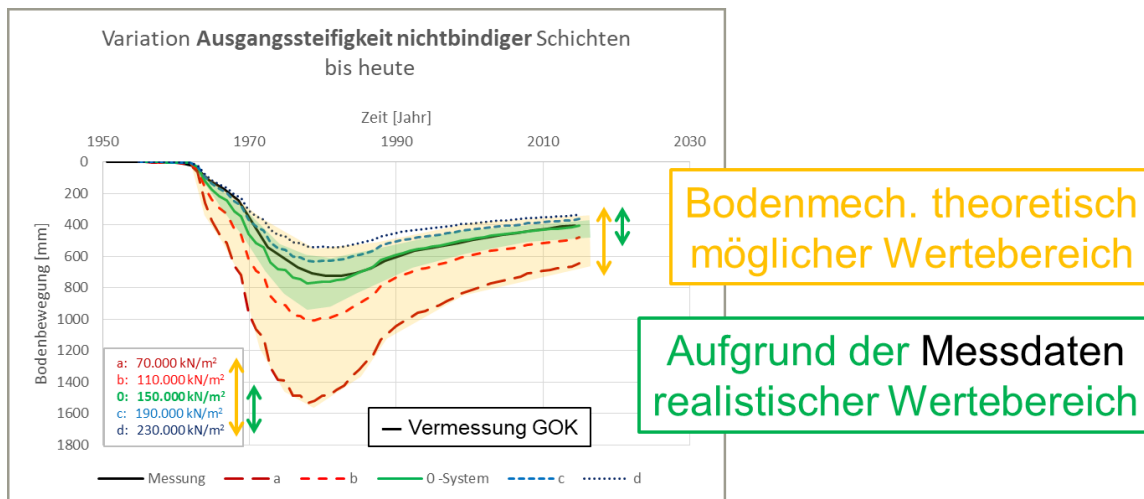


Abbildung 38 Variation Ausgangssteifigkeit nichtbindig mit realistischen Wertebereich

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

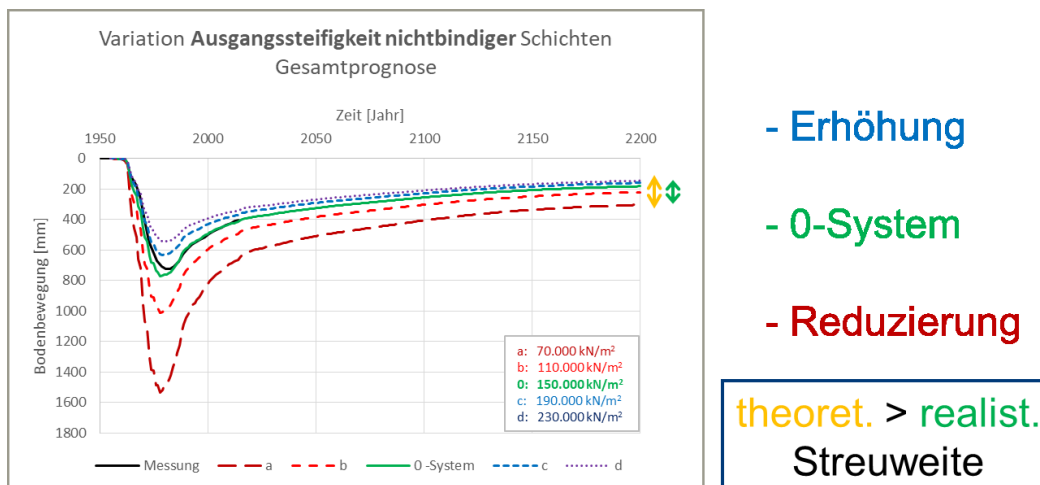
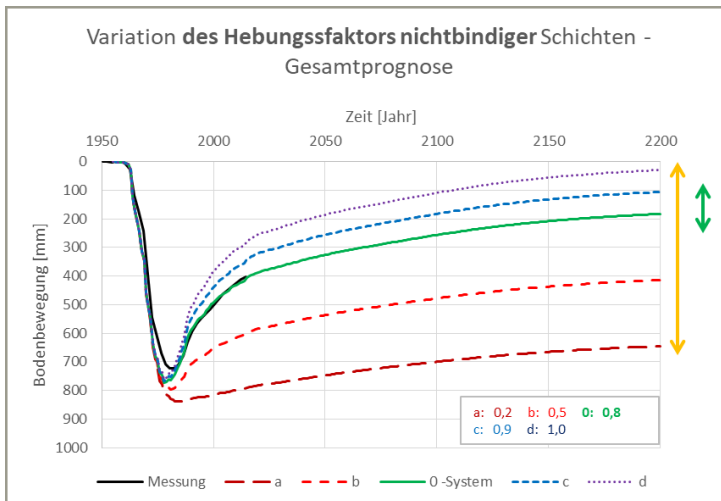


Abbildung 39 Variation Ausgangssteifigkeit nichtbindig mit realistischer Streuweite

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

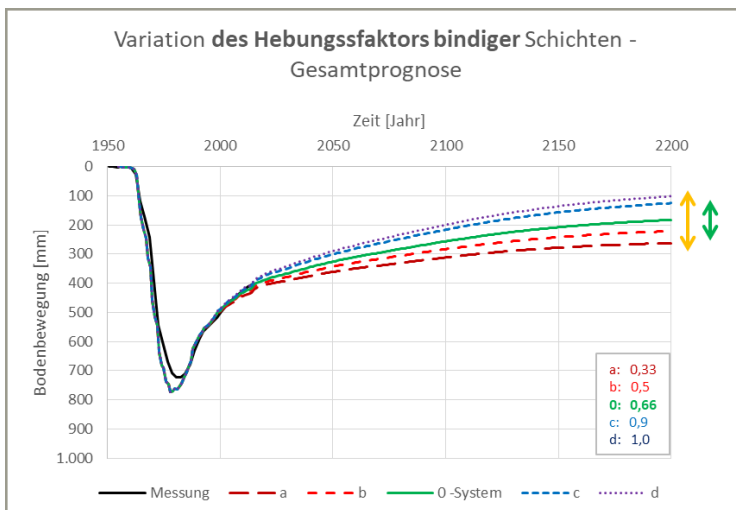
- 0-System

- 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.

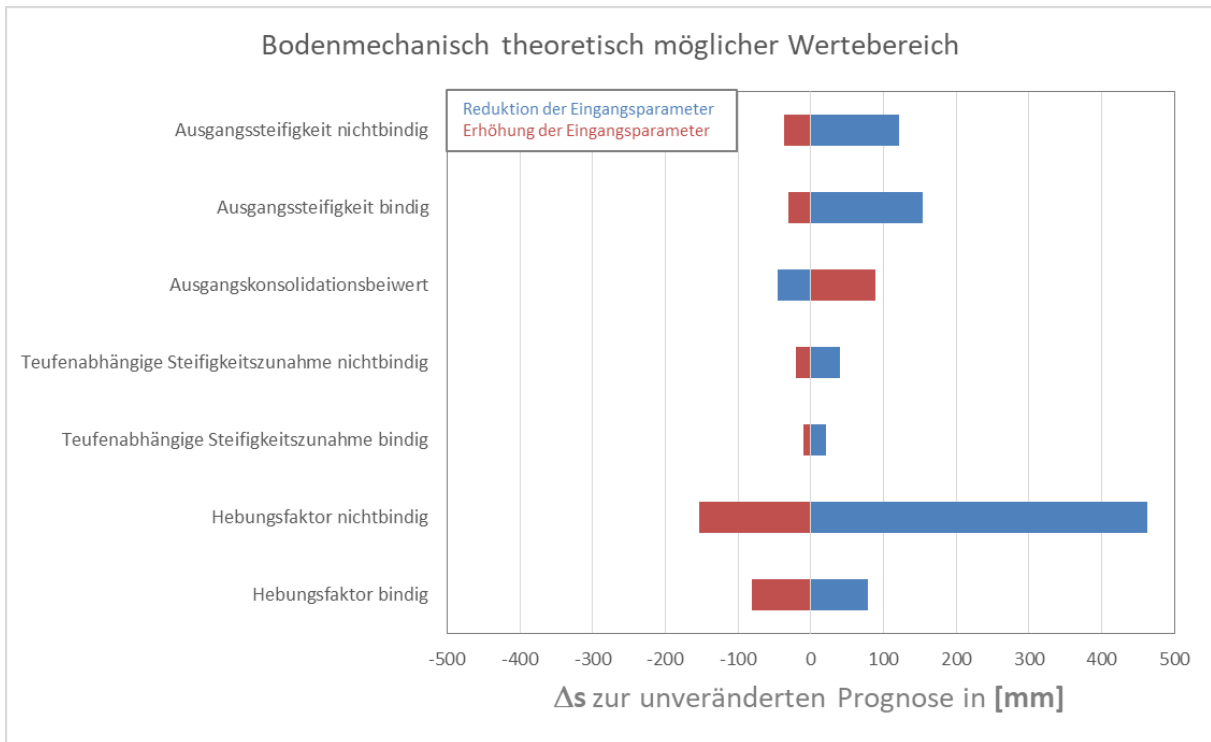


Abbildung 42 Prognoseabweichung Niedermerz in 2200 infolge möglicher Parametervariation

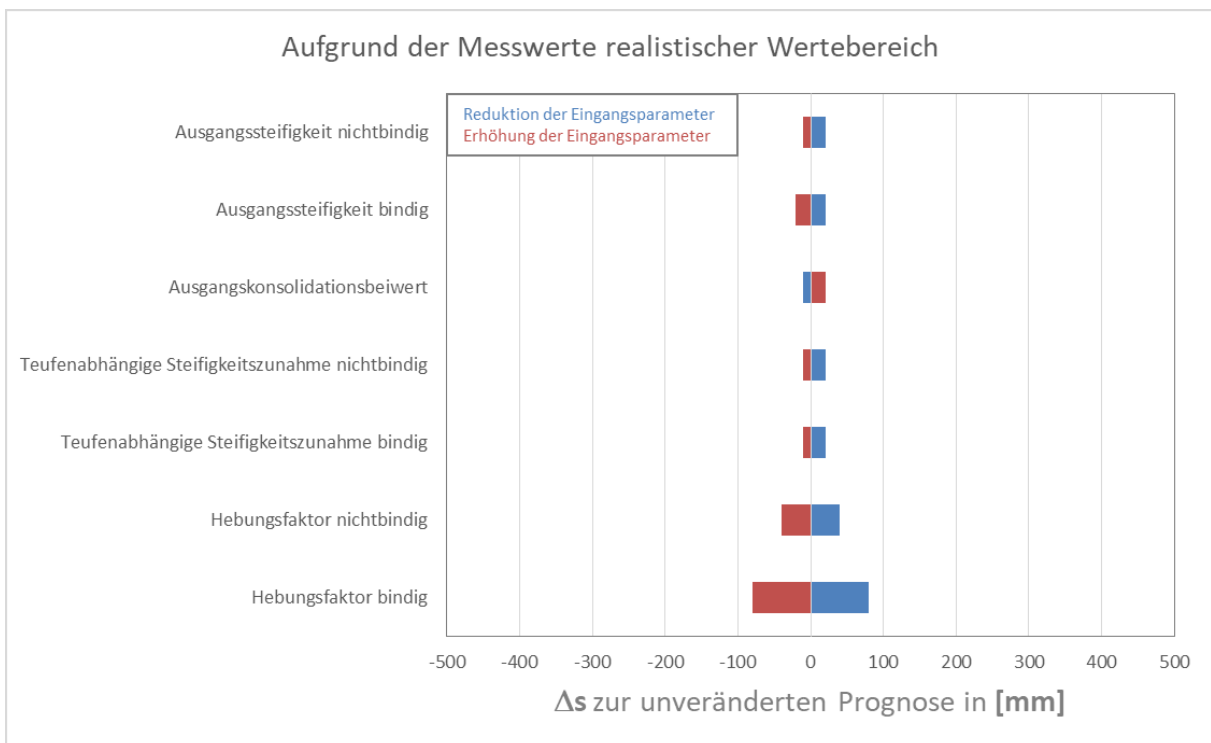


Abbildung 43 Prognoseabweichung Niedermerz in 2200 infolge realistischer Parametervariation

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.

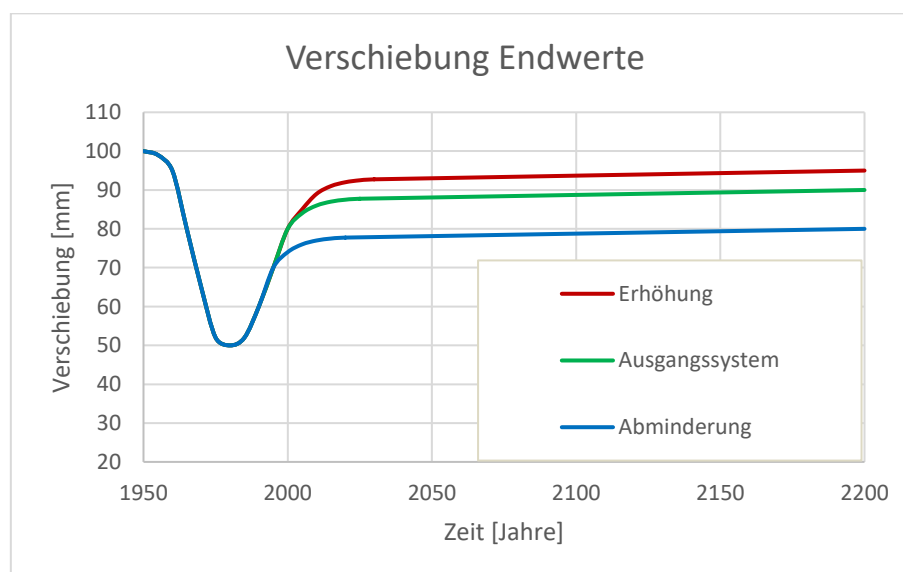


Abbildung 44 Variation der Grundwasserganglinien mit Verschiebung der Endwerte

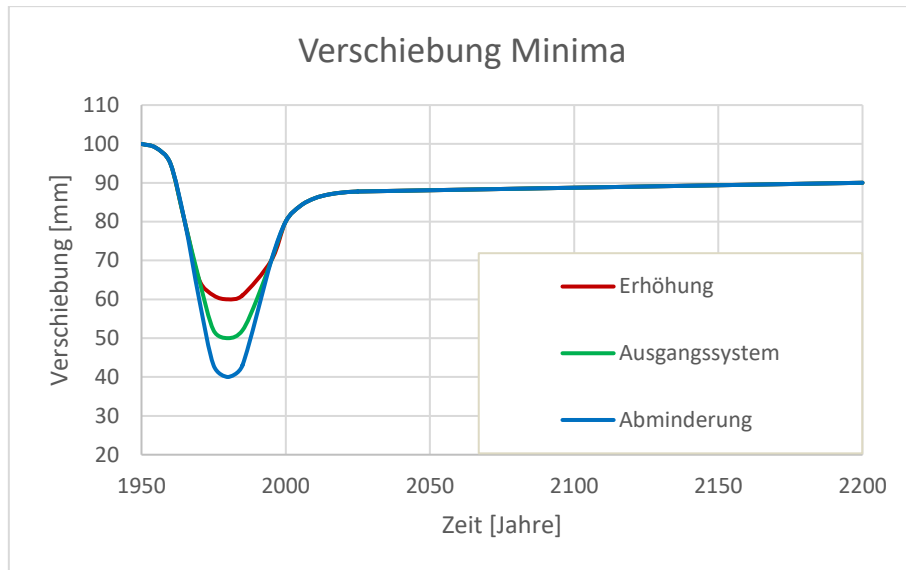


Abbildung 45 Variation der Grundwasserganglinien mit Verschiebung der Minima

In den beiden vorherigen Abbildungen ist die jeweilige Verschiebung qualitativ angedeutet. Tatsächlich wurde die Verschiebung und Ausrundung 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.

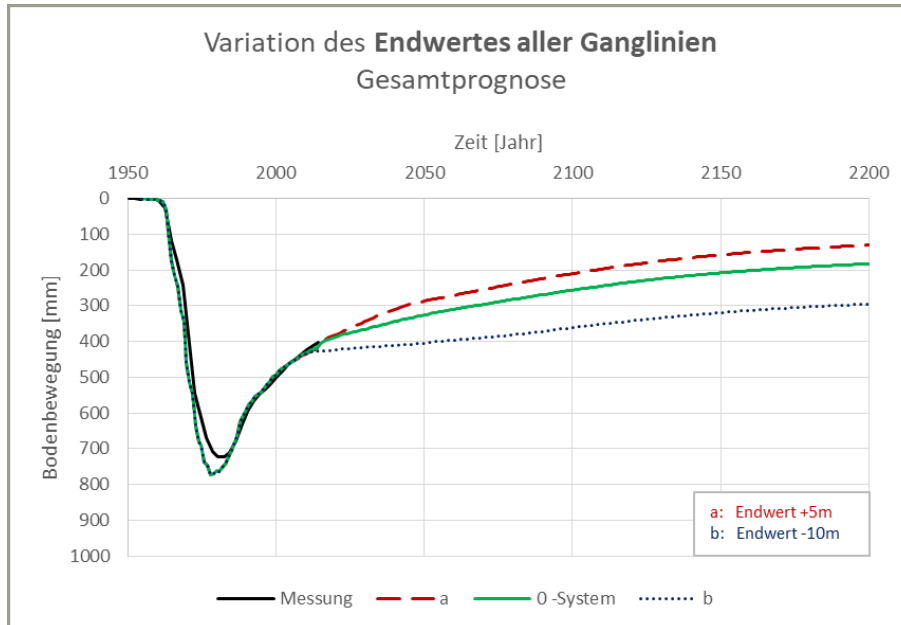


Abbildung 46 Variation Endwerte der Ganglinien - Gesamtprognose

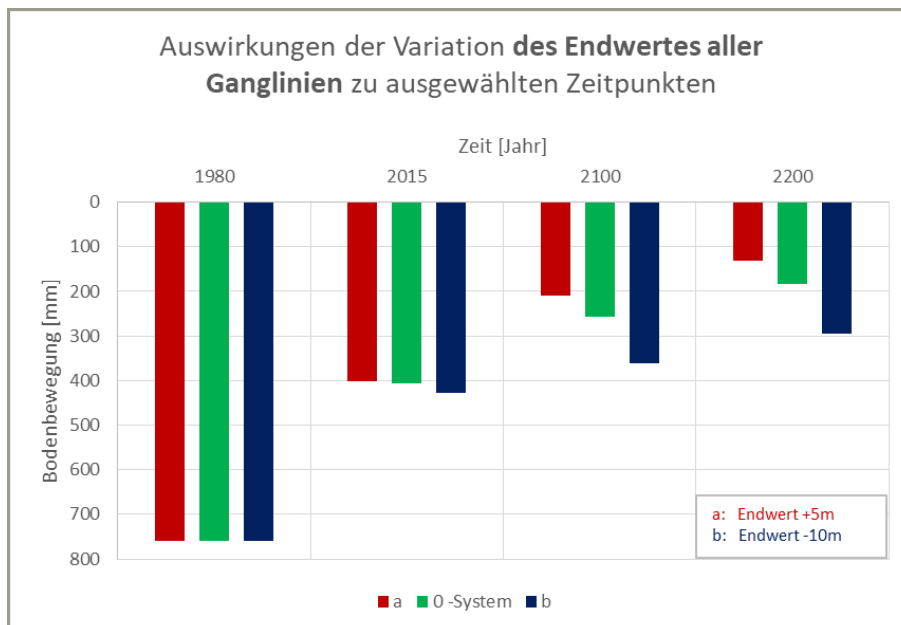


Abbildung 47 Variation Endwerte der Ganglinien – ausgewählte Zeitpunkte

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.

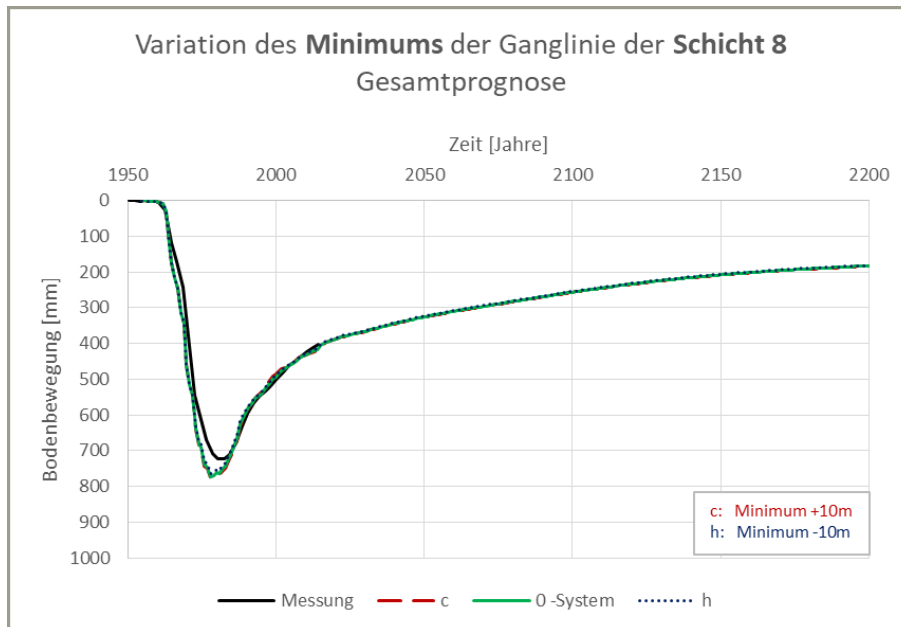


Abbildung 48 Variation Minimum der Ganglinien Schicht 8 - Gesamtprognose

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.

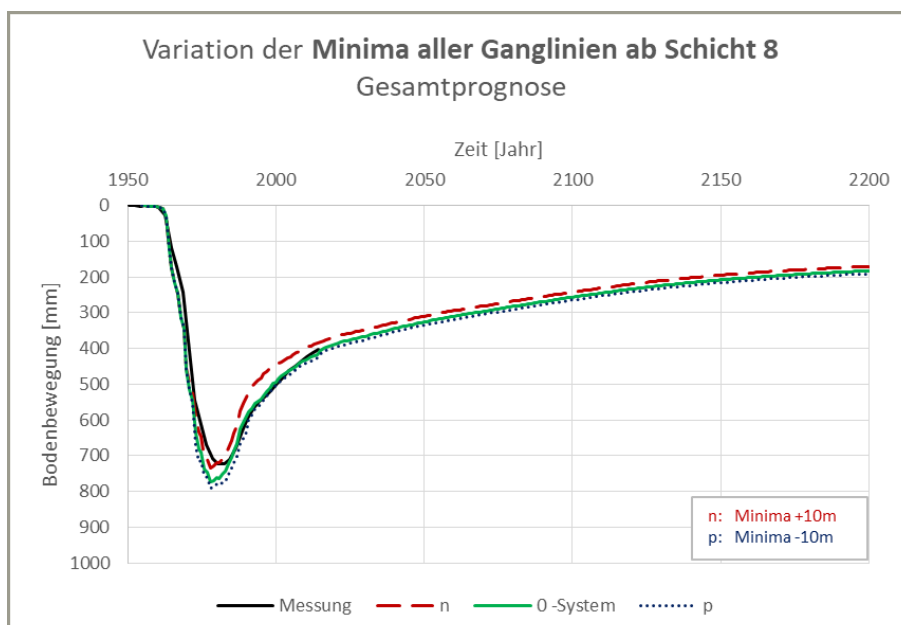


Abbildung 49 Variation Minima aller Ganglinien ab Schicht 8 - Gesamtprognose

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.

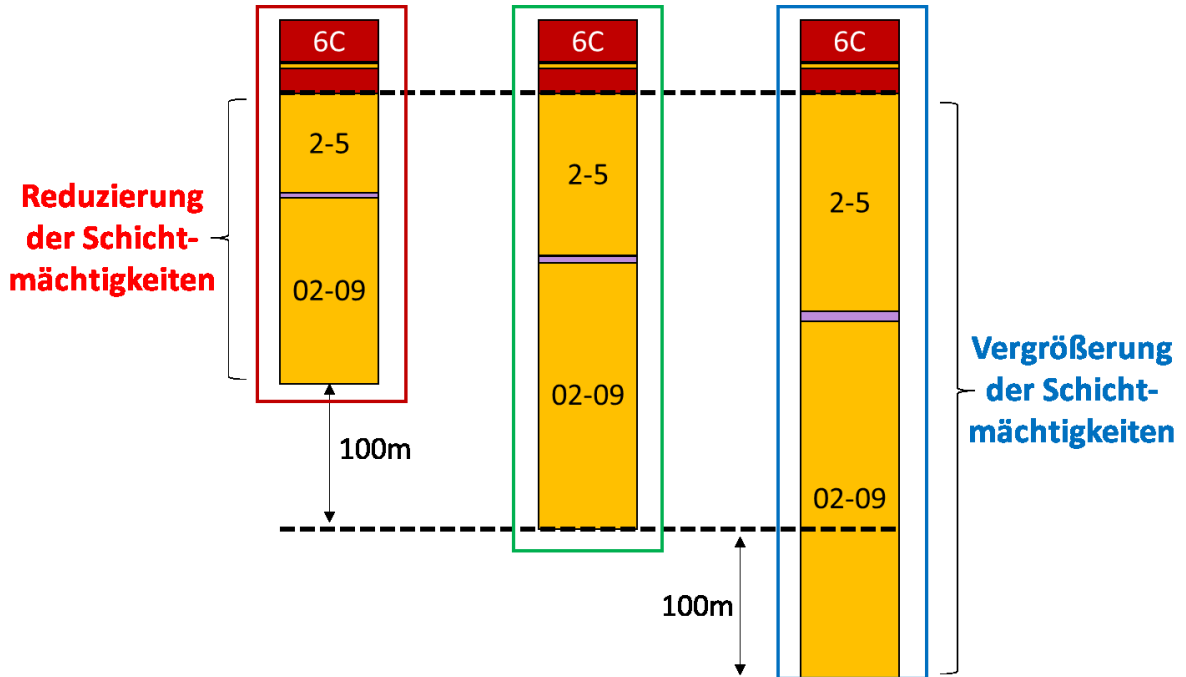


Abbildung 50 Anhebung und Absenkung der Unterkante Schicht 02-09

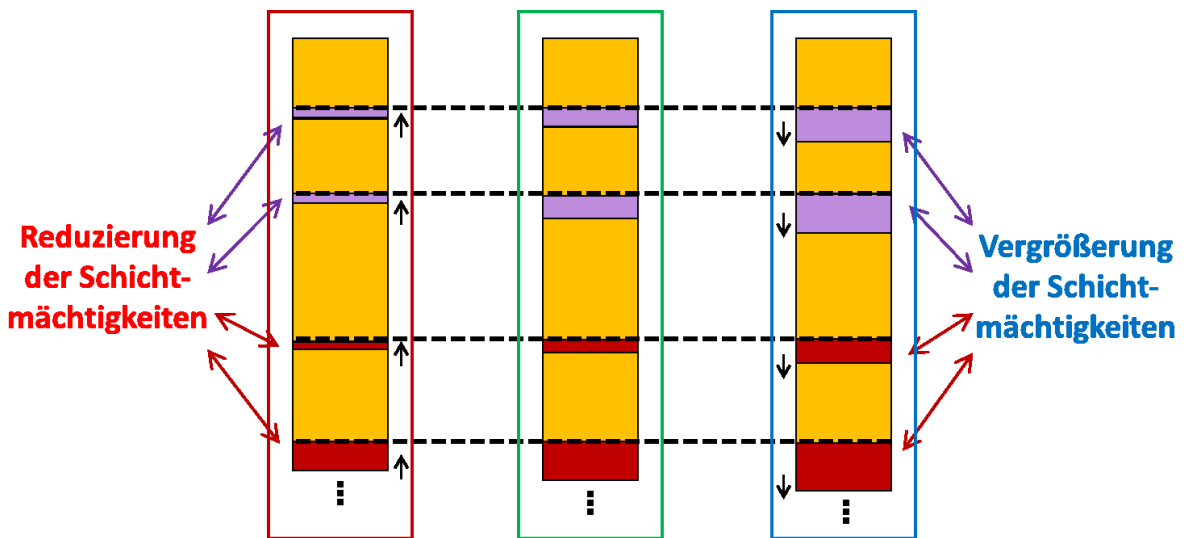


Abbildung 51 Reduzierung und Vergrößerung der bindigen Schichten

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.

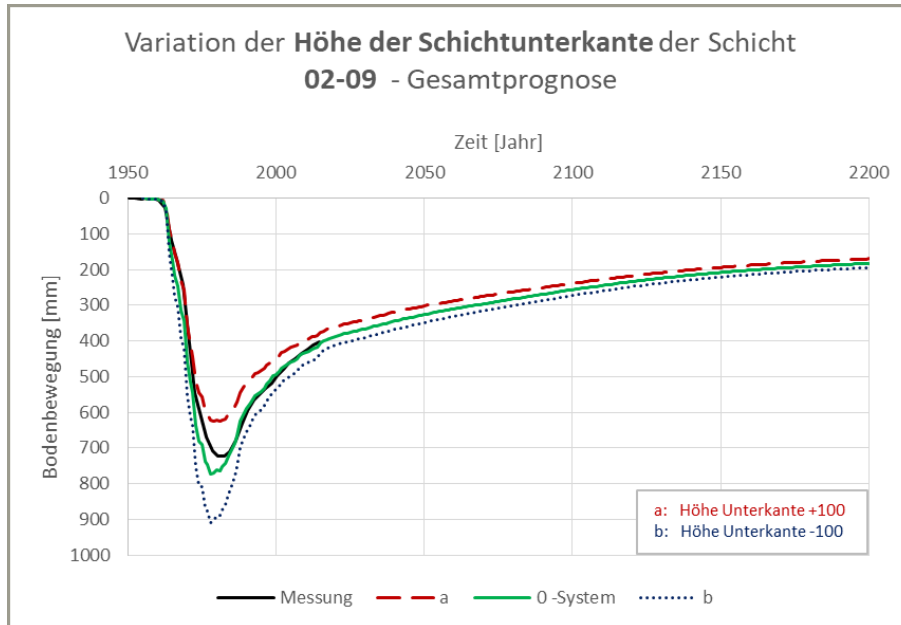


Abbildung 52 Variation unterste Schichtunterkante - Gesamtprognose

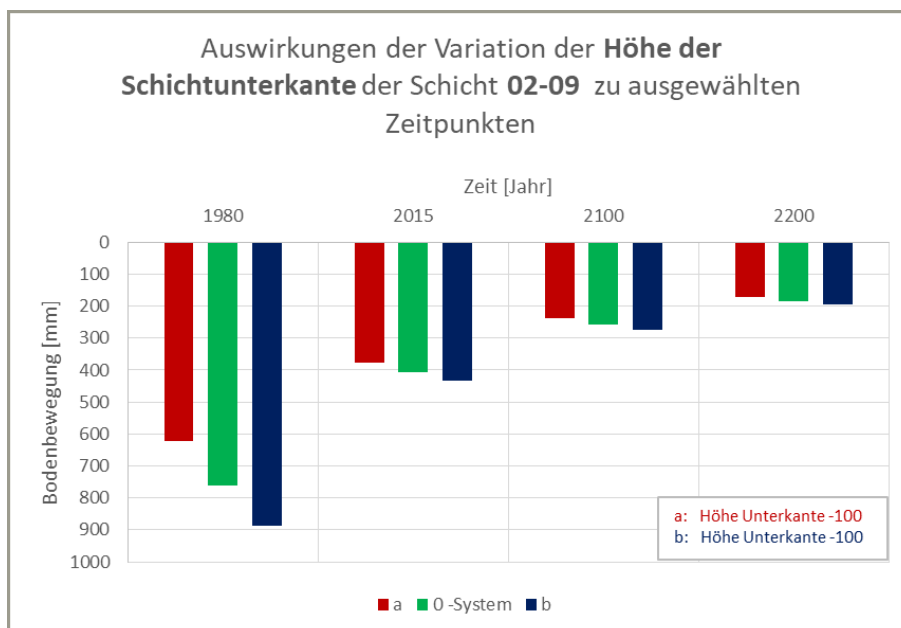


Abbildung 53 Variation unterste Schichtunterkante – ausgewählte Zeitpunkte

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.

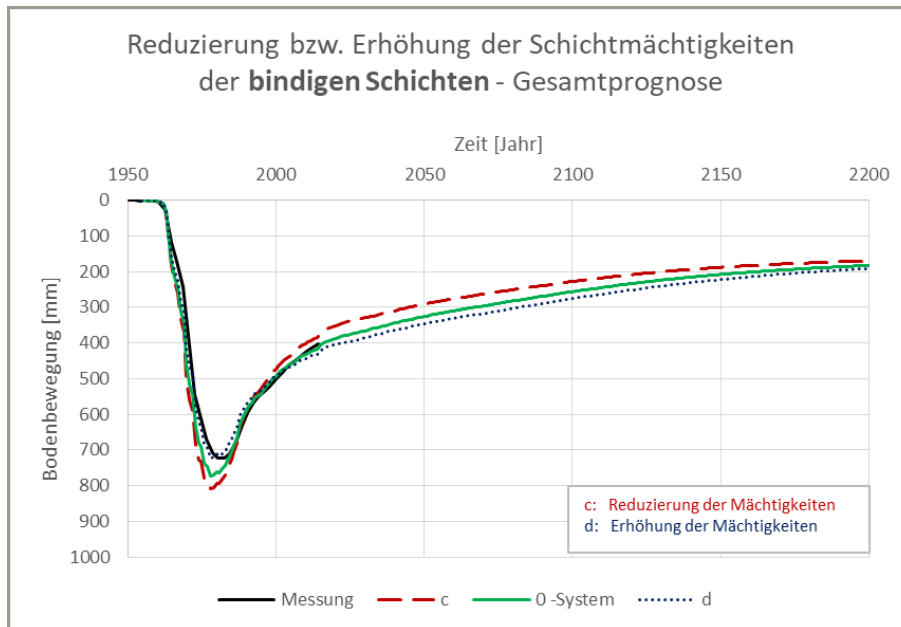


Abbildung 54 Variation bindige Schichten – Gesamtprognose

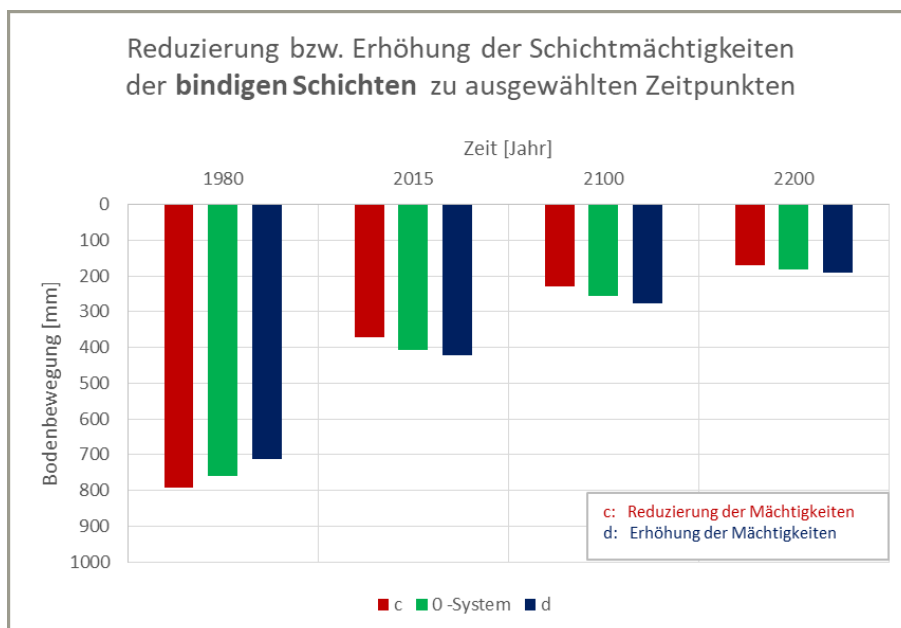


Abbildung 55 Variation bindige Schichten – ausgewählte Zeitpunkte

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.

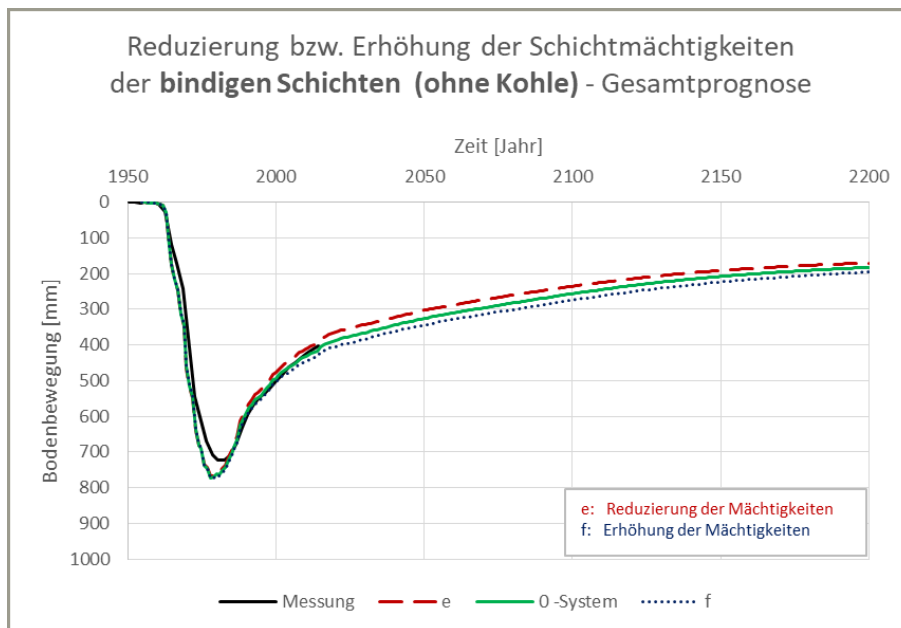


Abbildung 56 Variation bindige Schichten ohne Kohle – Gesamtprognose

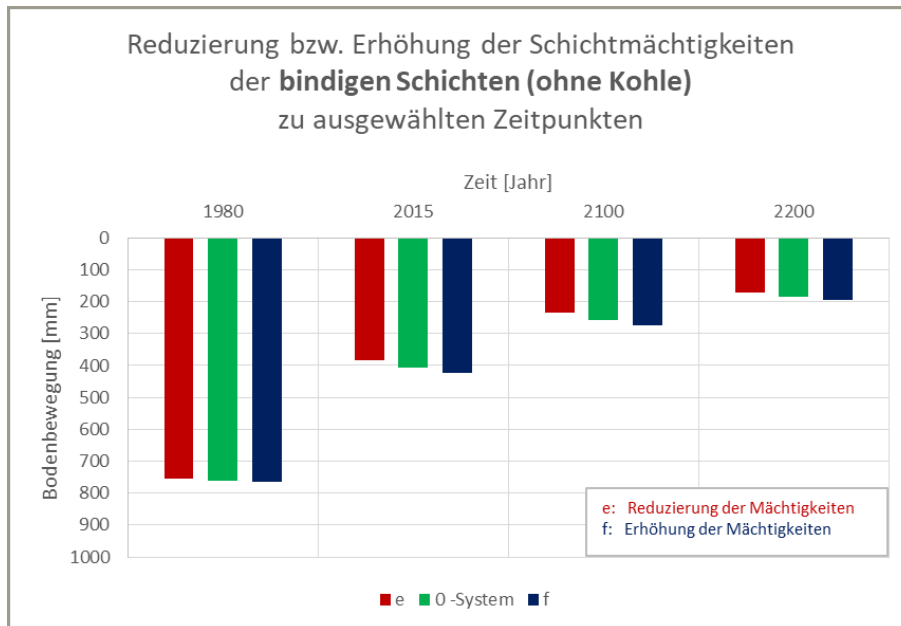


Abbildung 57 Variation bindige Schichten ohne Kohle – ausgewählte Zeitpunkte

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 Sumpfungmaßnahmen 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.

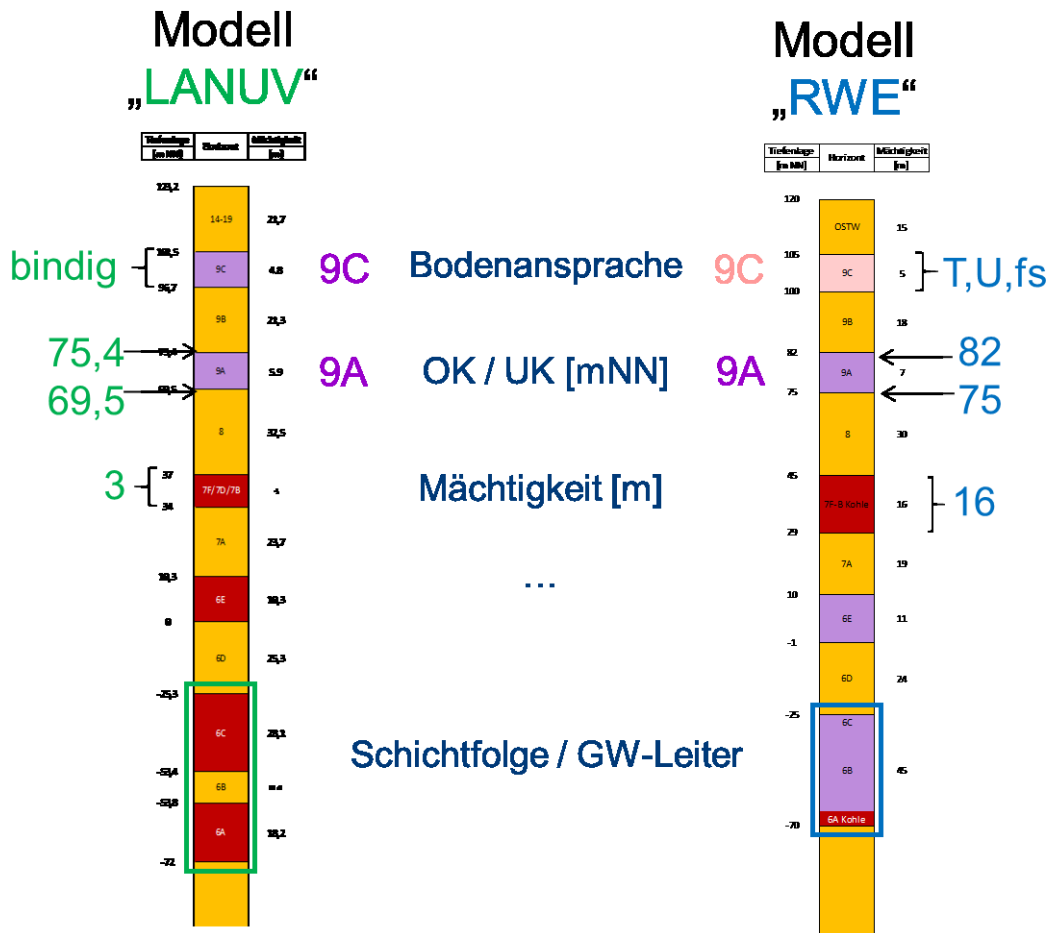


Abbildung 58 Unterschiede in der Geologie bzw. im Schichtmodell mit Horizontbezeichnung nach SCHNEIDER-THIELE [3]

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.

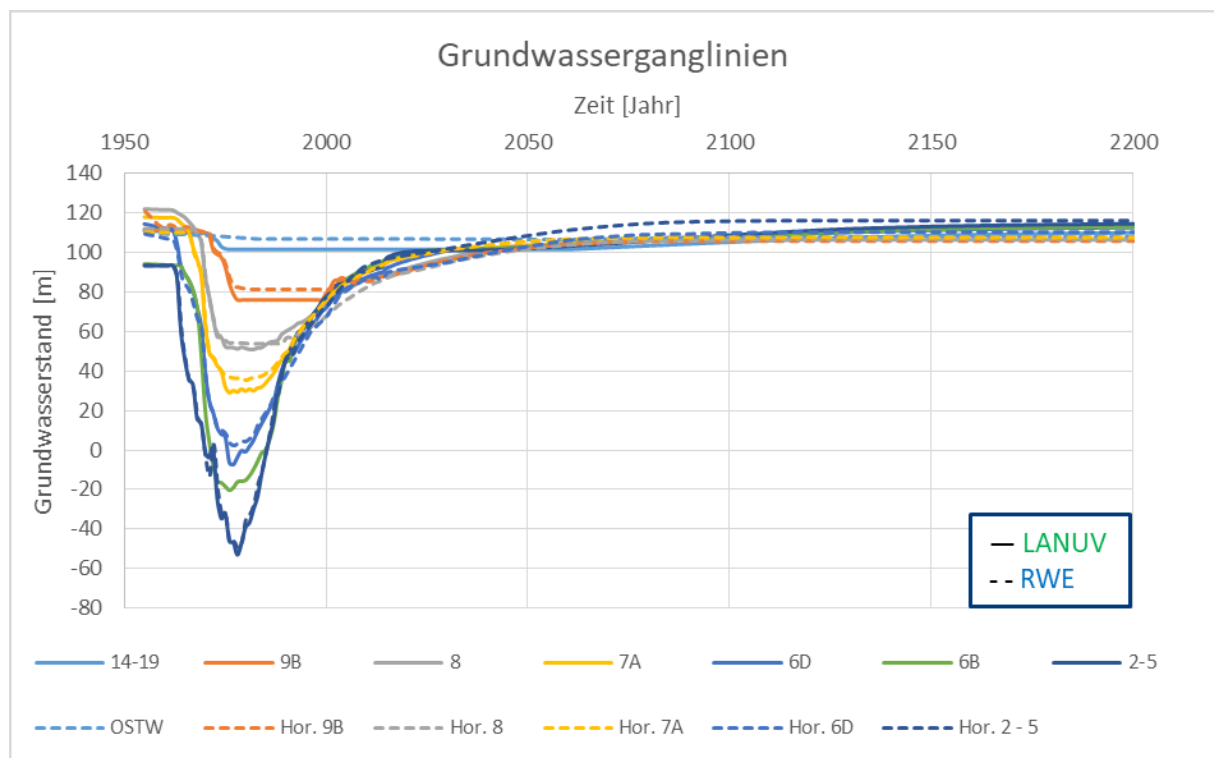


Abbildung 59 Vergleich Grundwasserganglinien

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 Wiederaanstieg, 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.

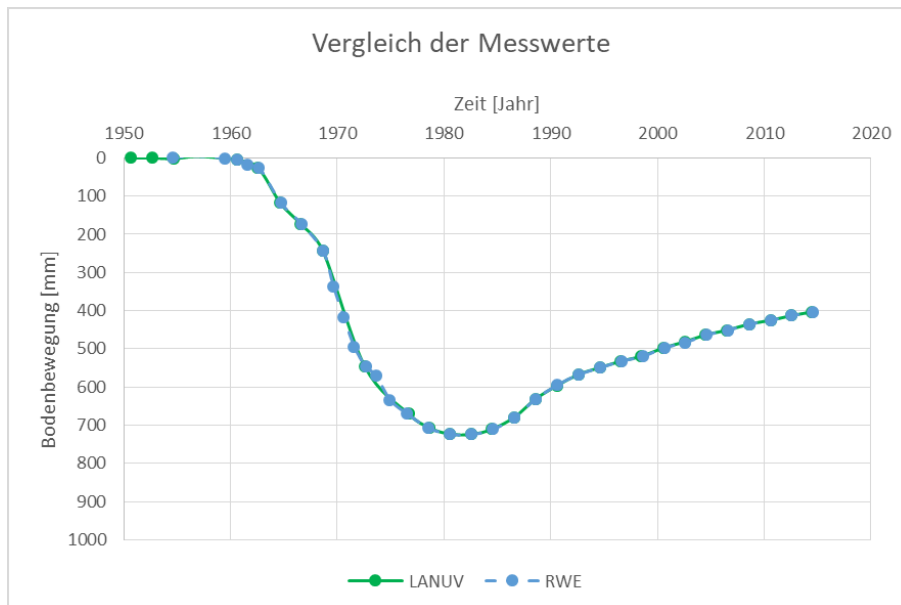


Abbildung 60 Vergleich Messwerte Geländeoberfläche

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.

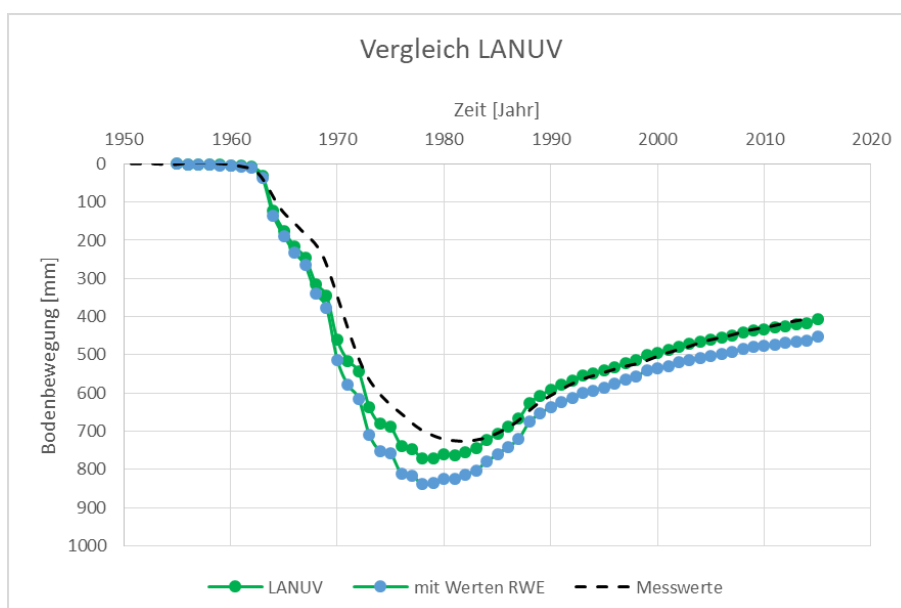


Abbildung 61 Neuberechnung LANUV mit Eingangsdaten RWE

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.

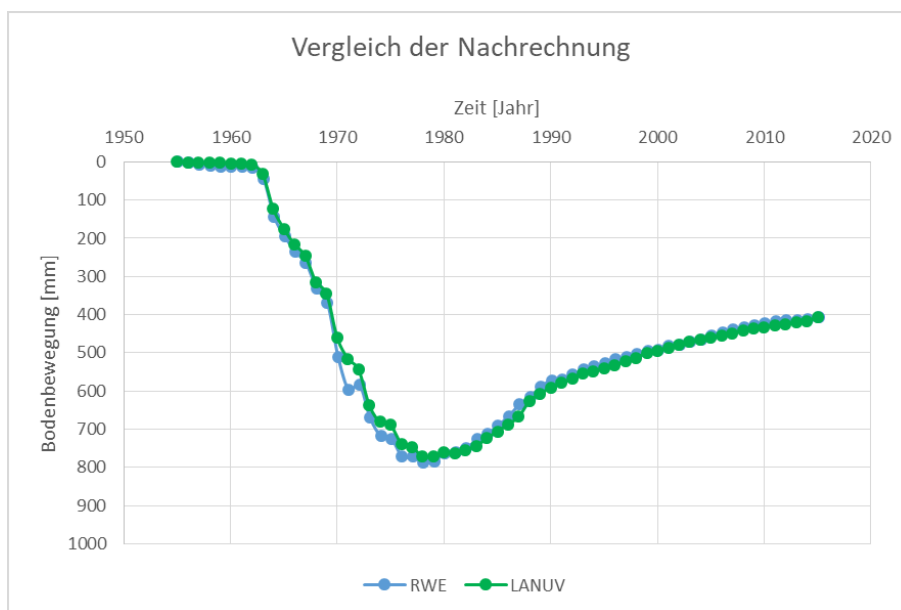


Abbildung 62 Vergleich Nachrechnung beide Modelle mit individueller Kalibrierung

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).

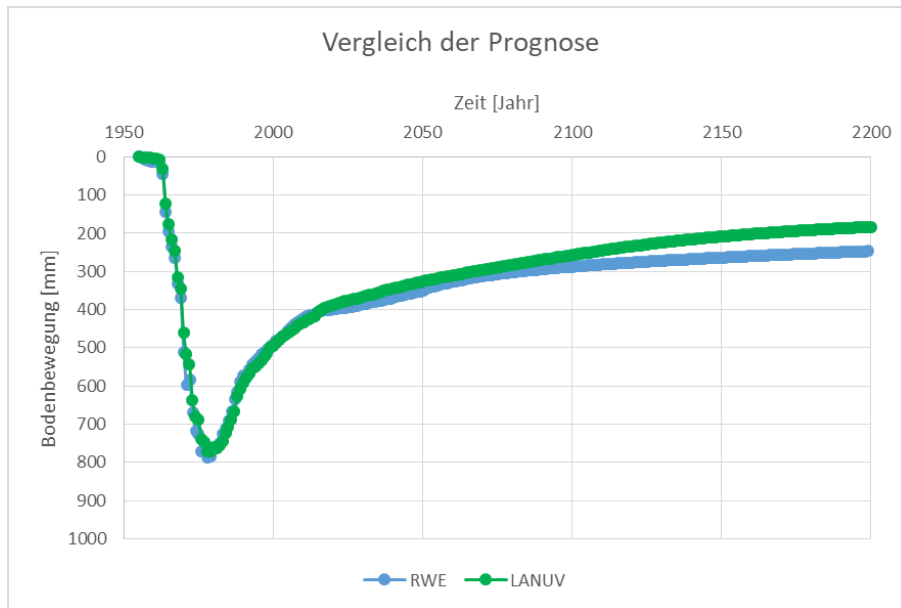


Abbildung 63 Vergleich Prognose beide Modelle mit individueller Kalibrierung

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.

4.4 Neuberechnung auf Basis der Messwerte bis lediglich 1983

Für die Sensitivitätsanalyse wurde bewusst der Punkt Niedermerz ausgewählt, da dort bereits seit den 1980er Hebungen an der Geländeoberfläche beobachtet werden. Da bei den weiteren betrachteten Punkten (vgl. Abschnitt 5) allerdings noch keine relevanten Hebungen an der Geländeoberfläche verzeichnet werden, wurden die vorherigen Schritte um eine weitere Nachrechnung und Prognose ergänzt. Dabei wurden für die Kalibrierung ausschließlich die Messdaten bis 1983 (= Setzungsmaximum) verwendet, um den Einfluss auf die Kalibrierung ohne die Kenntnis über die ab den 1980er gemessenen Hebungen zu untersuchen.

4.4.1 Kalibrierung mit frei gewählten Hebungsfaktoren

In einem ersten Schritt wurden zunächst der Hebungsfaktor nichtbindig zu 0,6 und der Hebungsfaktor bindig zu 0,66 und damit jeweils in der Mitte des theoretisch möglichen Streuweitenbereichs (vgl. Abschnitt 6) gewählt. Anschließend wurden dann die Steifigkeiten und das Konsolidationsverhalten der bindigen Schichten gegenüber der ursprünglichen, auf den Messwerten bis 2015 basierenden Kalibrierung so angepasst (siehe Anhang), dass das gemessene Verhalten bis 1983 sehr gut abgebildet wird.

Die auf Basis dieser Kalibrierung erhaltene sehr gute Abbildung der im Kalibrierungszeitraum bis 1983 gemessenen Bodenbewegungen zeigt die folgende Abbildung 64.

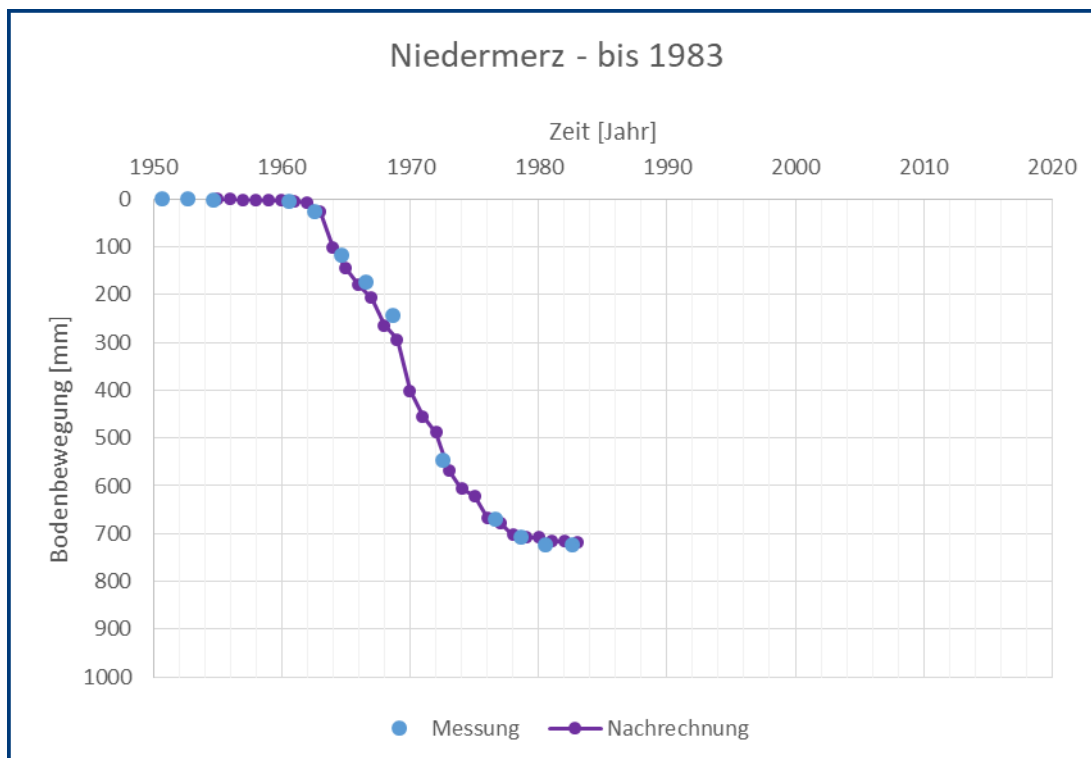


Abbildung 64 Nachrechnung bis 1983 mit frei gewählten Hebungsfaktoren und angepassten Steifigkeiten

Die folgende Abbildung 65 zeigt schließlich die auf Basis dieser angepassten Kalibrierung erhaltene Prognose (lila) im direkten Vergleich zur ursprünglichen Prognose (orange), bei der auch schon der Zeitraum mit Hebungen (1983 bis 2015) bei der Kalibrierung berücksichtigt wurde.

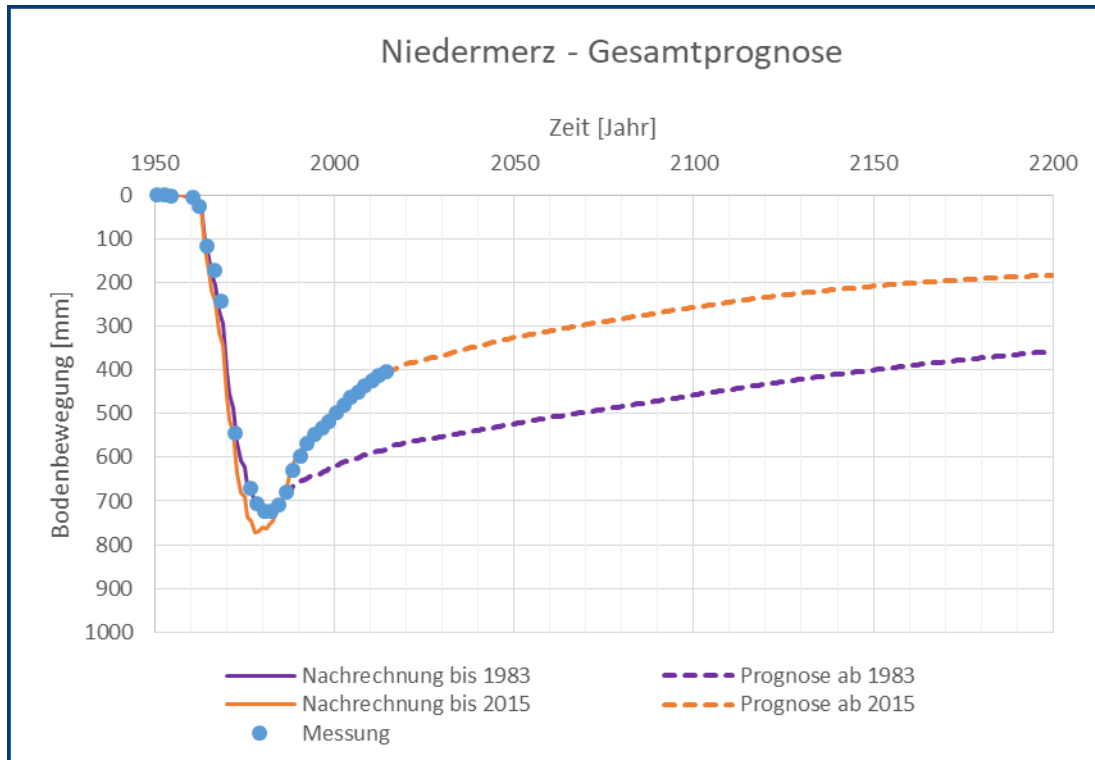


Abbildung 65 Prognose auf Basis verschiedener Kalibrierungszeiträume mit unterschiedlichen Hebungsfaktoren nichtbindig

Das auf Basis der Messdaten bis 1983 kalibrierte Modell (lila) bildet das tatsächliche Verhalten in den 1970er und frühen 1980er Jahren genauer ab als das Ursprungsmodell (orange). Es weicht dann aber ab Mitte der 1980er Jahre deutlich von den gemessenen Bewegungen ab und die weitere Prognose verläuft ab den 2010er Jahren um etwa 150 bis 200 mm parallel zur Ursprungsprognose nach unten verschoben.

4.4.2 Kalibrierung mit auf Erfahrung beruhenden Hebungsfaktoren

Da bei den meisten zu betrachtenden Punkten bis dato noch keine Hebungen an der Geländeoberfläche stattgefunden haben, ist dort eine Kalibrierung der Hebungsfaktoren nicht oder nur bedingt für die nichtbindigen Böden möglich. Daher werden für diese Punkte die Hebungsfaktoren basierend auf der Erfahrung am Punkt Niedermerz sowie an zwei weiteren, im Vorfeld dieses Vorhabens durch ZAI betrachteten Punkten für nichtbindige Böden zu 0,8 und für bindige Böden zu 0,66 gewählt. Basierend auf den so gewählten Faktoren wurden schließlich die Steifigkeiten erneut angepasst, so dass das gemessene Setzungsverhalten bis 1983 möglichst genau abgebildet wird. Die so erhaltene Nachrechnung zeigt Abbildung 66.

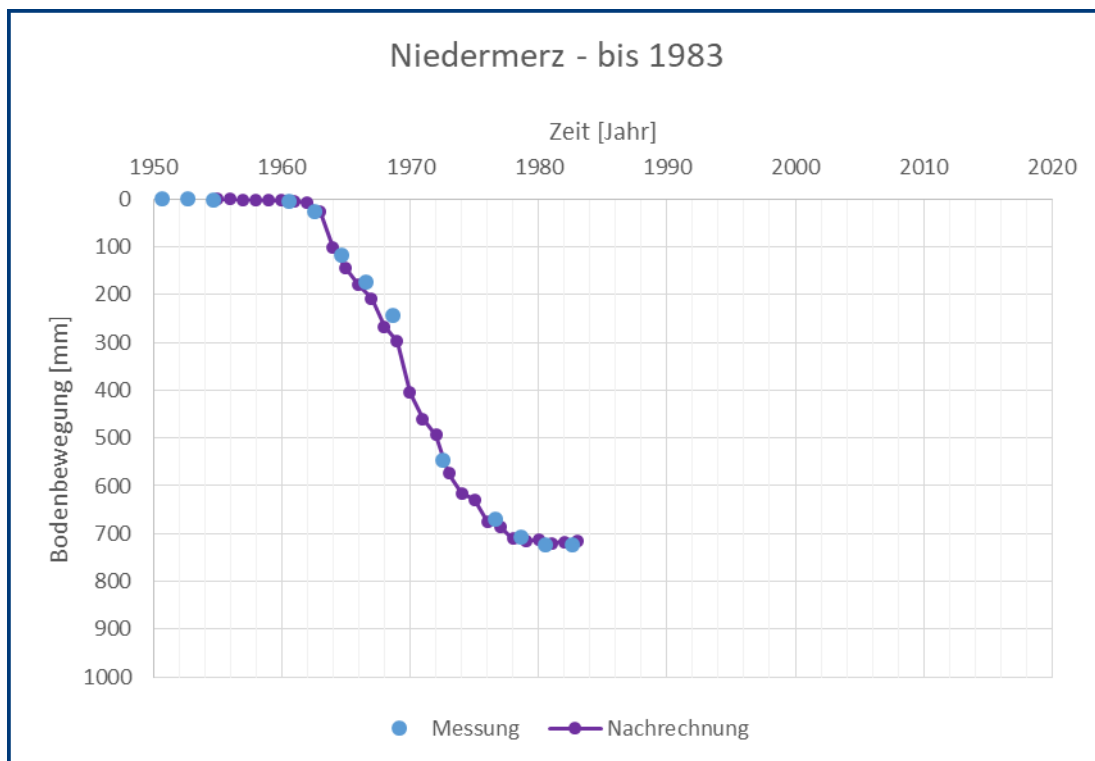


Abbildung 66 Nachrechnung bis 1983 mit auf Erfahrung basierenden Hebungsfaktoren und angepassten Steifigkeiten

Es ist zu erkennen, dass die gemessenen Bodenbewegungen sehr gut abgebildet werden und über den gesamten Betrachtungszeitraum nur marginale Abweichungen auftreten.

Die folgende Abbildung 67 zeigt schließlich die auf Basis der angepassten Kalibrierung erhaltene Prognose (lila) im direkten Vergleich zur ursprünglichen Prognose (orange), bei der auch schon der Zeitraum mit Hebungen bei der Kalibrierung berücksichtigt wurde.

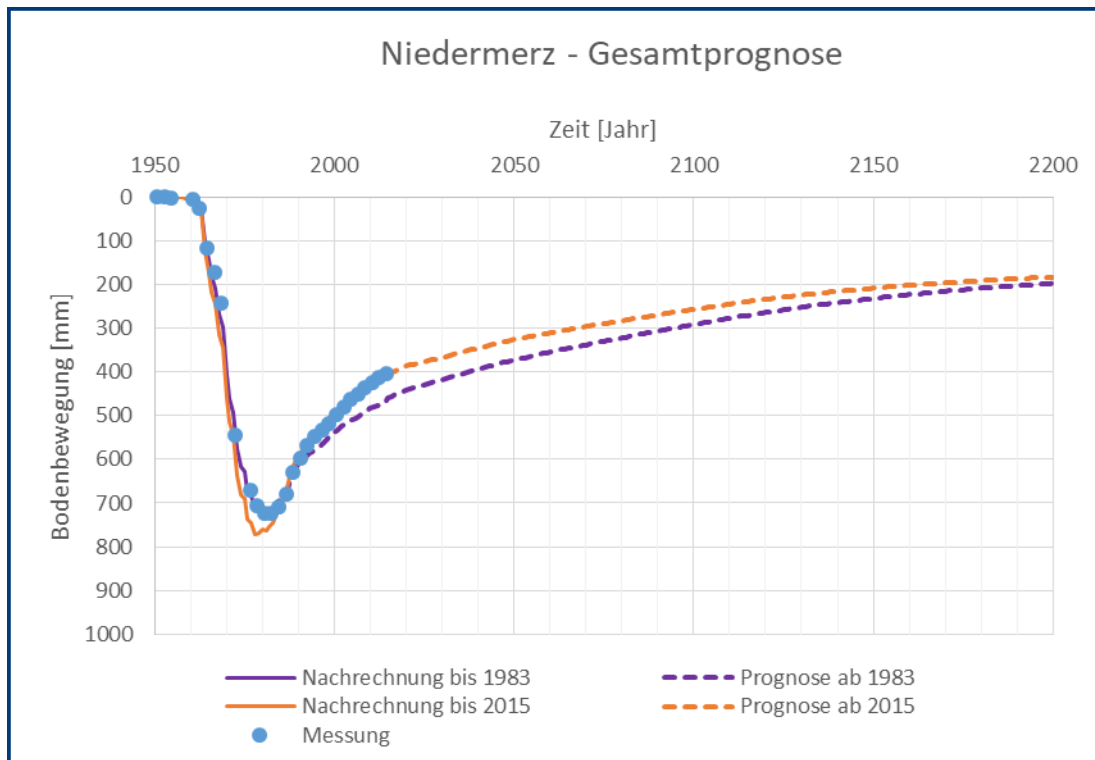


Abbildung 67 Prognose auf Basis verschiedener Kalibrierungszeiträume mit konstanten Hebungsfaktoren

Es zeigt sich, dass zwar mit beiden Prognosen bis zum Jahr 2200 annähernd die gleiche Hebung prognostiziert wird – bedingt durch die gleichen Hebungsfaktoren und die bis dahin nahezu abgeschlossenen Konsolidierungsvorgänge – in den Jahren davor aber Unterschiede von bis zu 50 mm auftreten können. Das Modell, welches ausschließlich anhand der Daten bis 1983 kalibriert wurde (lila), bildet zwar das gemessene Verhalten in den 1970er und frühen 1980er Jahren genauer als das Ursprungsmodell (orange) ab, weist dann jedoch in der Hebungsphase ab den 1980er Jahren zunehmend Abweichungen auf.

4.4.3 Beurteilung

Im Rahmen der Sensitivitätsanalyse wurde für den Punkt Niedermerz ein Modell aufgestellt und dieses basierend auf den bis 2015 gemessenen Bodenbewegungen kalibriert (vgl. Abschnitt 4.1), die auch bereits deutliche Hebungen aufweisen. Im überwiegenden Teil des Rheinischen Braunkohlereviere finden bis dato allerdings noch keine oder nur geringfügige Hebungen an der Geländeoberfläche statt, so dass für die meisten Punkte keine Messdaten zur Kalibrierung des Hebungsverhaltens vorliegen. Daher muss dort auf Erfahrungswerte (Niedermerz, Jüchen, Kaster) zurückgegriffen werden.

Aus diesem Grund wurde zusätzlich eine Prognose für den Punkt Niedermerz aufgestellt, die lediglich anhand des Zeitraums bis 1983 kalibriert wurde. In diesem Zeitraum wurden an der Geländeoberfläche noch keine Hebungen gemessen, die zur Kalibrierung der Hebungsfaktoren herangezogen werden könnten. Auf diese Weise kann abgeschätzt werden, wie hoch die Unsicherheit an anderen Punkten ist, an denen bisher keine Hebungen stattgefunden haben.

Es hat sich gezeigt, dass der Nachrechnungszeitraum bis 1983 mithilfe des angepassten Prognosemodells zwar etwas besser als zuvor abgebildet werden kann, ab Mitte der 1980er Jahre dann aber zunehmend Abweichungen vom tatsächlichen Verhalten auftreten. Dies gilt umso mehr für den Fall, in dem die Hebungsfaktoren frei und nicht auf Basis von Erfahrung gewählt wurden.

Daraus ergeben sich die folgenden Schlussfolgerungen.

Solange der Hebungsprozess an einzelnen Punkten im Kalibrierzeitraum noch nicht eingesetzt hat, lassen sich Hebungsprognosen nur aufgrund von Erfahrungswerten anderer Punkte erstellen.

Das reine Setzungsverhalten kann noch mit unterschiedlich kalibrierten Materialparametern abgebildet werden, die dann aber auch zu unterschiedlichen Prognosen führen können.

Sofern die Hebungsfaktoren noch nicht in der richtigen Größenordnung gewählt wurden (vgl. Abschnitt 4.4.1), werden mit dem Beginn der Hebungen unmittelbar Abweichungen vom tatsächlich gemessenen Verhalten auftreten (vgl. Abbildung 65). Dies eröffnet dann aber auch die Möglichkeit, die Eingangsparameter unmittelbar nachzukalibrieren und die Prognose frühzeitig und stetig zu verbessern.

Sofern die Hebungsfaktoren im Zuge der Kalibrierung auf Basis von Erfahrungswerten bereits in der richtigen Größenordnung gewählt wurden (vgl. Abschnitt 4.4.2), treten Abweichungen zwischen Prognose und tatsächlich gemessenem Verhalten erst allmählich auf (vgl. Abbildung 67). Dies bedeutet zwar, dass nicht optimal bestimmte Eingangsparameter auch erst mit der Zeit identifiziert und nachkalibriert werden können, allerdings wird die Prognose aufgrund des bereits in der richtigen Größenordnung gewählten Hebungsfaktors für den Endzeitpunkt relativ zutreffend sein. Wie Abbildung 67 zeigt, beträgt im vorliegenden Fall die Abweichung im Jahr 2200 lediglich ca. 1 cm.

Basierend auf dem Erkenntnis zu den frei gewählten Hebungsfaktoren wurde außerdem für die im Weiteren betrachteten Punkte (vgl. Abschnitt 5) sowie für 22 zusätzliche Punkte eine Variation der Hebungsfaktoren vorgenommen (vgl. Abschnitt 6), um die mögliche Streuweite der Prognose abschätzen zu können.

Infolge der an den meisten Punkten noch nicht kalibrierbaren Hebungsfaktoren und der damit aktuell noch verbundenen möglichen Streuweite der Prognosen ist es erforderlich, die Prognoseergebnisse regelmäßig in Form eines Bodenbewegungsmonitorings mit Messdaten abzugleichen (vgl. Abschnitt 7).

5 Prognoseergebnisse für weitere Punkte

Nach der Untersuchung verschiedenster Einflüsse (vgl. Abschnitt 4) wurde schließlich für 12 weitere Punkte mit dem Modell nach Ziegler und Aulbach die vorhandene Situation abgebildet, das jeweilige Modell anhand von Messdaten kalibriert und dann eine Prognose bis 2200 erstellt.

Nach einer kurzen Übersicht zur Lage dieser 12 weiteren Punkte im Revier und kurzen Hinweisen zur Kalibrierung werden in den nachfolgenden Abschnitten 5.2 bis 5.13 die Ergebnisse der Nachrechnung und der Prognose vorgestellt und erläutert. Auf eine erneute Beschreibung der Vorgehensweise bzw. Modellerstellung wird an dieser Stelle verzichtet, da diese bereits ausführlich in Abschnitt 3 dargelegt wurde. Eine zusammenfassende Betrachtung erfolgt in Abschnitt 5.14.

5.1 Lage der Punkte und Hinweise zur Kalibrierung

Die Lage der ausgewählten Punkte kann Abbildung 68 entnommen werden.

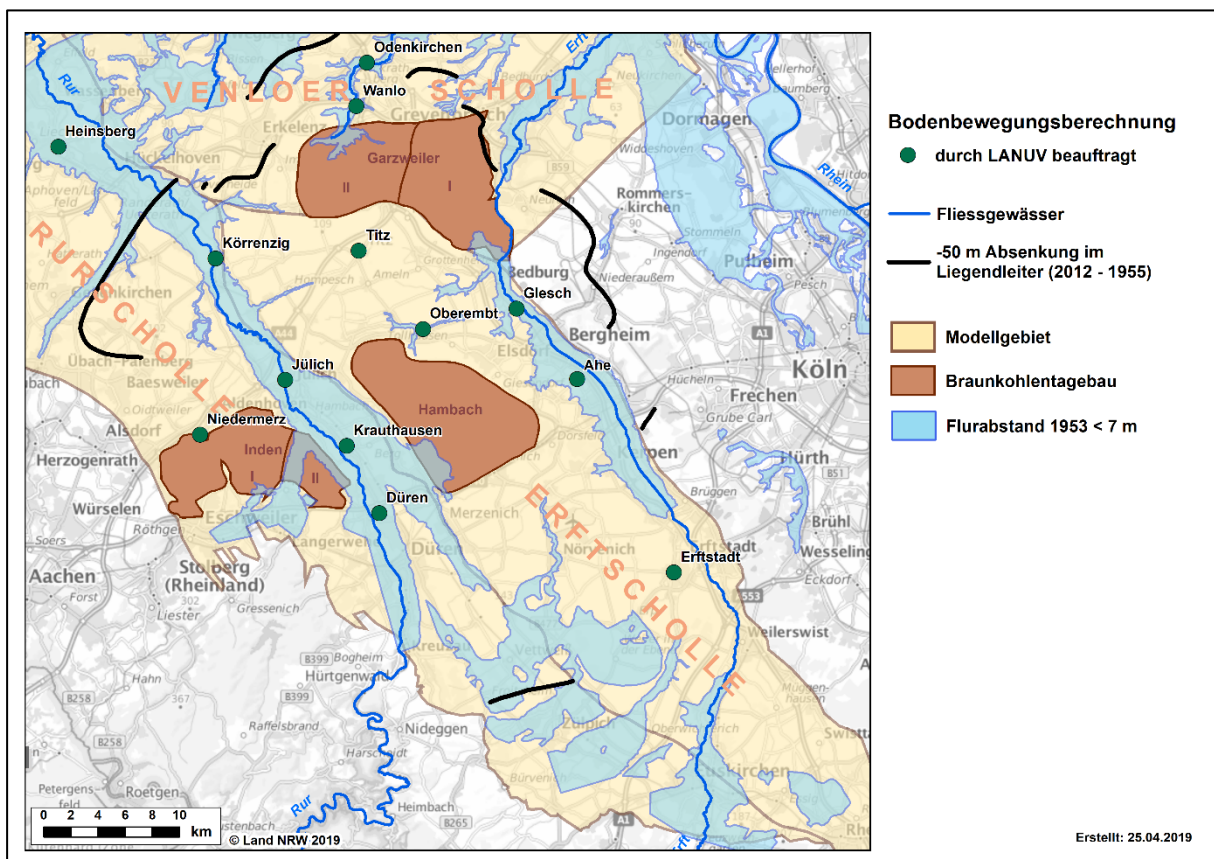


Abbildung 68 Übersicht weitere Punkte (Quelle: LANUV)

Alle Punkte liegen auf der Rurscholle, der Erftscholle oder der Venloer Scholle und innerhalb eines Gebietes, in dem eines oder mehrere Grundwasserstockwerke durch die tagesbaubedingte Grundwasserabsenkung beeinflusst werden. Dabei liegt die Mehrzahl der Punkte relativ nah an bzw. zwischen den Tagebauen oder an Rur und Erft. Am südöstlichsten und zeitgleich

am weitesten stromaufwärts der Erft liegt der Punkt Erftstadt, am nördlichsten der Punkt Odenkirchen. Der nordwestlichste und zeitgleich von den Tagebauen am weitesten entfernte Punkt ist Heinsberg, bei dem auch nur noch sehr geringe Bodenbewegungen zu verzeichnen sind (vgl. Abbildung 87).

Bezüglich der Kalibrierung und der Übereinstimmung zwischen Nachrechnung und Messung gilt es zunächst festzuhalten, dass – wie auch schon in Bezug auf den Punkt Niedermerz angemerkt (vgl. Abschnitt 4.1.2) – hinsichtlich des Grundwassers in den frühen Jahren eine oftmals mangelnde Datenlage vorhanden ist. Daher können zum einen die Ausgangswasserstände für alle Grundwasserstockwerke nicht immer sicher angegeben werden, zum anderen können aber insbesondere in den Jahren bis 1970 Abweichungen zwischen den oftmals linear interpolierten und den tatsächlich aufgetretenen, aber nicht erfassten Grundwasserständen vorhanden sein. Daher wurde im Allgemeinen so kalibriert, dass etwa ab den 1990er Jahren eine möglichst gute Übereinstimmung zwischen Nachrechnung und Messung erzielt wurde, wodurch dann aber aus vorgenannten Gründen in den früheren Jahren geringfügige Abweichungen auftreten können.

Im Folgenden werden zunächst die ebenso wie der bereits in Abschnitt 4 ausführlich betrachtete Punkt Niedermerz auf der Rurscholle liegenden Punkte

- Jülich,
- Krauthausen,
- Düren,
- Körrenzig und
- Heinsberg

betrachtet. Daran anschließend werden die auf der Erftscholle liegenden Punkte

- Titz,
- Oberembt,
- Glesch,
- Ahe und
- Erftstadt

und schließlich die auf der Venoler Scholle liegenden Punkte

- Wanlo und
- Odenkirchen

betrachtet.

5.2 Jülich

Der Punkt Jülich liegt zwischen den Tagebaugebieten Inden und Hambach (vgl. Abbildung 68). Die vom LANUV bereitgestellten Informationen zur Geologie und zum Leitnivelement können der folgenden Abbildung 69 entnommen werden, die ebenfalls vom LANUV bereitgestellten Grundwasserganglinien zeigt die nachfolgende Abbildung 70.

Geologie			Leitnivelement	
Profil			5004900035	
horizont	oberkante_m	bemerkung	datum	gok_m
14-19	81,9	nicht-bindig	01.06.1957	81,866
13	46,6	bindig	01.06.1959	81,868
12	42,6	nicht-bindig	01.05.1961	81,844
11	41,8	bindig	01.05.1963	81,818
10	27,1	nicht-bindig	01.06.1965	81,782
9C	26,2	bindig	01.05.1967	81,748
9B	19,2	nicht-bindig	01.06.1969	81,714
9A	-17,5	bindig	01.05.1973	81,663
8	-24,9	nicht-bindig	01.05.1977	81,606
7F/7D	-107,3	bindig, kaum Kohle	01.05.1981	81,532
7C	-126,7	nicht-bindig	01.05.1983	81,489
7B	-156,4	bindig, kaum Kohle	01.04.1985	81,444
7A	-173,3	nicht-bindig	01.04.1987	81,422
6E	-182,6	Flöz*	01.05.1989	81,401
6D	-186,7	nicht-bindig	01.05.1991	81,365
6C	-253,6	Flöz*	01.05.1993	81,337
6B	-291,7	nicht-bindig	01.05.1995	81,298
6A	-313	Flöz*	01.05.1997	81,243
2-5	-334,5	nicht-bindig	01.04.1999	81,191
1	-475	bindig	01.05.2001	81,16
02-09	-500	nicht-bindig	01.05.2003	81,141
Tertiärbasis	-638		01.04.2005	81,126
			01.04.2007	81,104
			01.05.2009	81,091
			01.05.2011	81,073
			01.04.2013	81,062
			01.05.2017	81,07

Abbildung 69 Ausschnitt Eingangsdaten Jülich, bereitgestellt durch LANUV

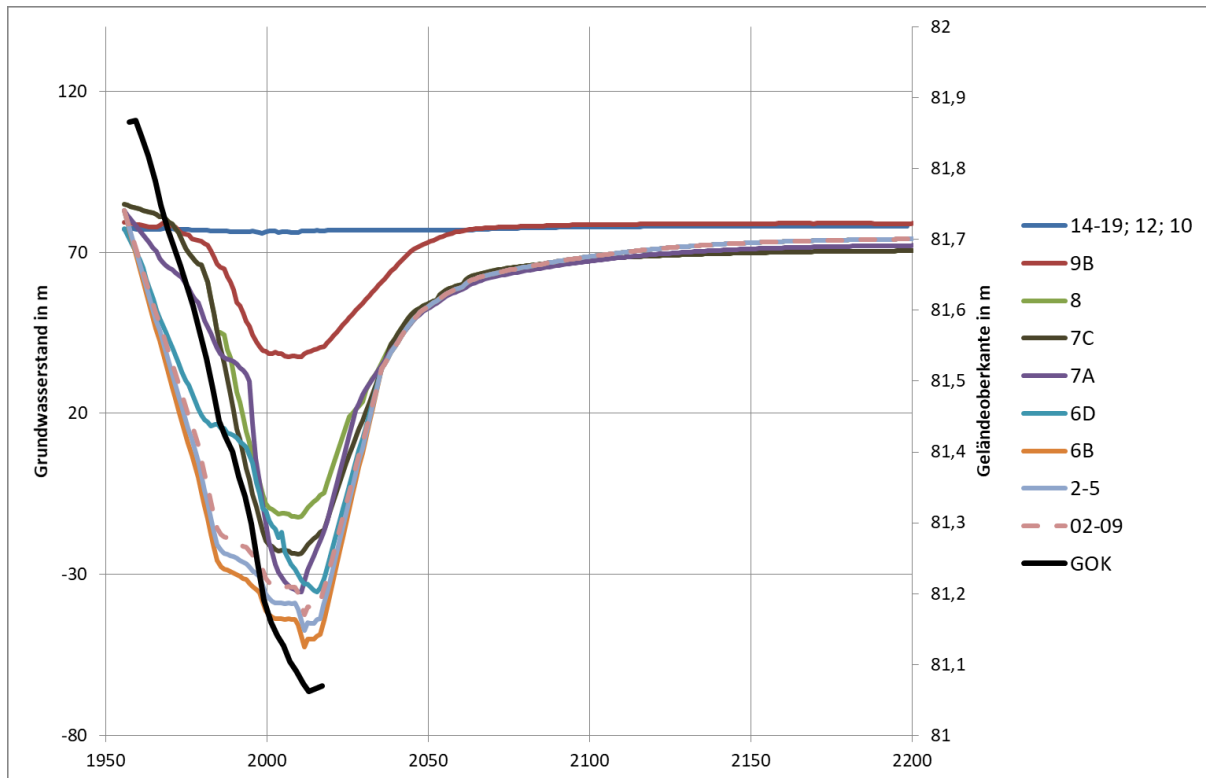


Abbildung 70 Grundwasserganglinien Jülich, bereitgestellt durch LANUV

Die folgende Abbildung 71 zeigt die am Punkt Jülich bis heute an der Geländeoberfläche gemessenen Bodenbewegungen (blau) sowie das Ergebnis der Nachrechnung (orange).

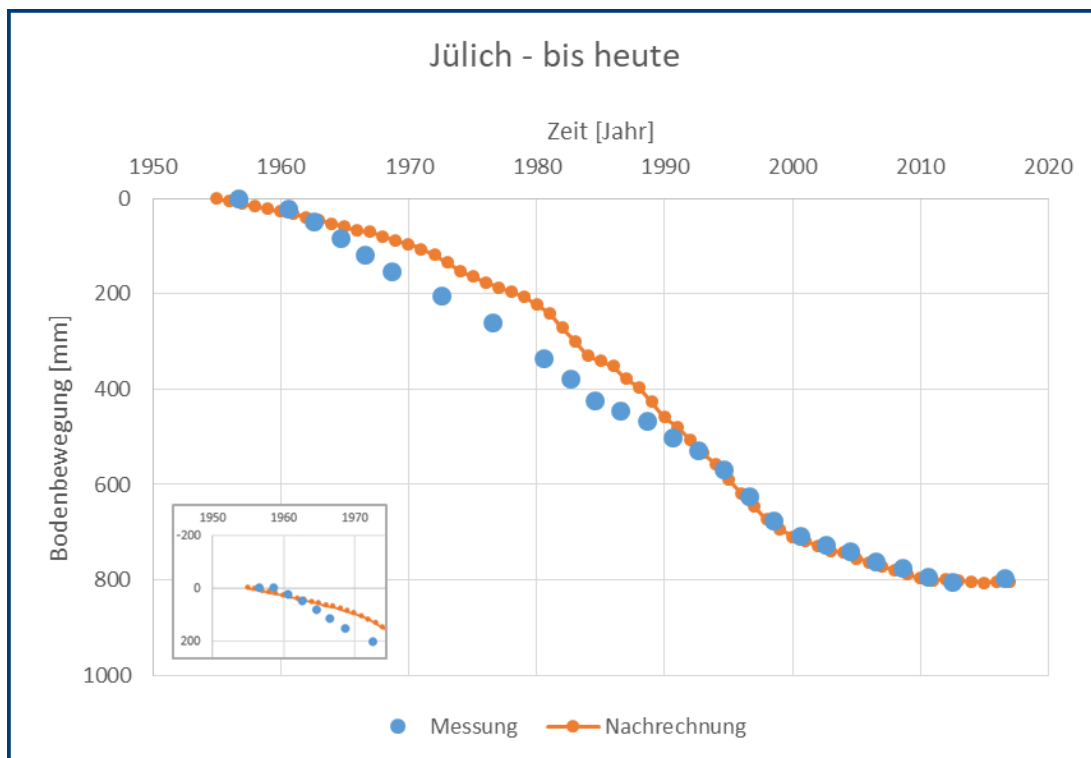


Abbildung 71 Nachrechnung für den Punkt Jülich

Bis heute wurden am Punkt Jülich Setzungen von maximal ca. 80 cm gemessen. Als Besonderheit ist festzuhalten, dass im Jahr 1959 zunächst eine minimale Hebung gemessen wurde (vgl. Ausschnitt links unten in Abbildung 71 bzw. Abbildung 69), die jedoch nicht auf den Tagebaubetrieb zurückzuführen ist und sich ohnehin im Rahmen der Messtoleranz bewegt. Aus dem Tagebaubetrieb bzw. dem Grundwasserwiederanstieg resultiert hingegen die minimale Hebung zwischen 2013 und 2017. Im Allgemeinen lässt sich feststellen, dass die Nachrechnung generell und insbesondere ab den 1990er Jahren sehr gut mit der gemessenen Bewegung der Geländeoberkante übereinstimmt. Lediglich zwischen den 1960er und 1990er Jahren unterschätzt die Nachrechnung die Setzungen leicht, was möglicherweise auf ungenaue Daten zur tatsächlichen Grundwasserstandsentwicklung oder eventuell auch auf Einflüsse aus dem früheren Steinkohlebergbau (vgl. dazu auch 5.5 Körrenzig und 5.6 Heinsberg) zurückzuführen ist.

Die mit dem so kalibrierten Modell auf Basis der vom LANUV bereitgestellten Grundwasserganglinien erhaltene Prognose zeigt Abbildung 72.

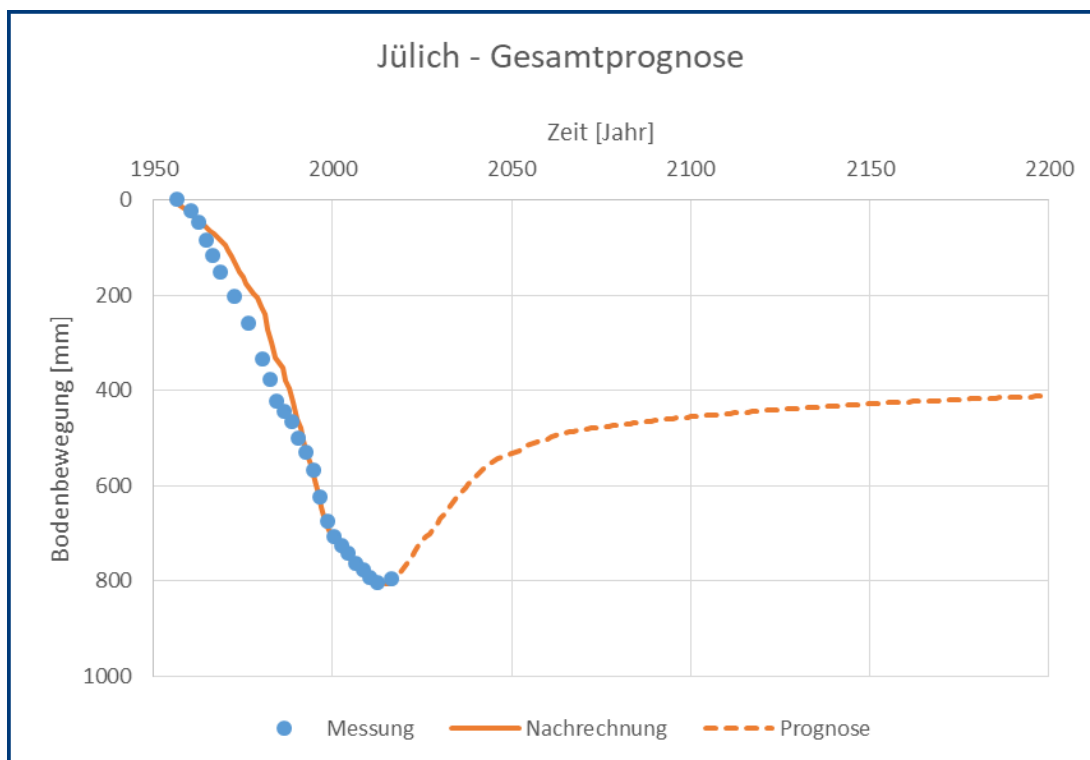


Abbildung 72 Prognose für den Punkt Jülich

Gemäß Prognose finden auch nach 2017 weiter Hebungen statt, die in etwa gleich schnell wie die zuvor stattgefundenen Setzungen ablaufen. Allerdings schwächt sich der Hebungsprozess dann etwa ab den 2050er Jahren ab. Für das Jahr 2200 werden verbleibende Setzungen von etwa 40 cm prognostiziert.

Die für das Modell Jülich verwendeten Eingangsparameter können dem Anhang entnommen werden.

5.3 Krauthausen

Der Punkt Krauthausen liegt zwischen den Tagebaugebieten Inden (westlich) und Hambach (östlich) (vgl. Abbildung 68). Die vom LANUV bereitgestellten Informationen zur Geologie und zum Leitnivelement können der folgenden Abbildung 73 entnommen werden, die ebenfalls vom LANUV bereitgestellten Grundwasserganglinien zeigt die nachfolgende Abbildung 74.

Geologie			Leitnivelement	
Profil			5104900005	
horizont	oberkante_m	bemerkung	datum	gok_m
14-19	97,68	nicht-bindig	01.06.1951	97,682
13	66,14	bindig	01.06.1954	97,686
12	61,30	nicht-bindig	01.06.1957	97,686
11	51,25	bindig	01.06.1959	97,686
10	37,21	nicht-bindig	01.04.1961	97,662
9C	32,40	bindig	01.07.1963	97,632
9B	20,13	nicht-bindig	01.06.1965	97,591
9A	-20,15	bindig	01.06.1967	97,562
8	-32,05	nicht-bindig	01.05.1969	97,522
7F	-48,11	Flöz	01.05.1973	97,458
7E	-52,40	nicht-bindig	01.05.1977	97,398
7D	-68,32	Flöz	01.06.1979	97,359
7C	-76,54	nicht-bindig	01.05.1981	97,32
7B	-99,40	Flöz	01.04.1983	97,283
7A	-111,21	nicht-bindig	01.04.1985	97,244
6E-6C	-157,41	Flöz/nicht-bindig*	01.05.1989	97,197
6B	-236,96	nicht-bindig	01.05.1991	97,169
6A	-246,95	Flöz	01.05.1993	97,148
2-5	-277,16	nicht-bindig	01.05.1995	97,115
1	-411,13	bindig	01.05.1997	97,07
02-09	-459,68	nicht-bindig	01.05.2001	96,959
Tertiärbasis	-698,43		01.04.2005	96,883
			01.05.2009	96,742
			01.05.2011	96,652
			01.04.2013	96,576
			01.05.2017	96,49

* geringmächtige nicht-bindige Zwischenschicht vorhanden

Abbildung 73 Ausschnitt Eingangsdaten Krauthausen, bereitgestellt durch LANUV

Die Angaben zur Geologie am Punkt Krauthausen enthalten die Information, dass in der Schicht 6E-C davon auszugehen ist, dass eine geringmächtige nichtbindige Zwischenschicht vorhanden ist. Da durch diese Zwischenschicht eine Entwässerung möglich ist, wurde die für die Konsolidation relevante Mächtigkeit von dem üblichen Wert $\frac{1}{2}$ auf $\frac{1}{4}$ reduziert. Die setzungsrelevante Mächtigkeit wurde hingegen wie angegeben übernommen.

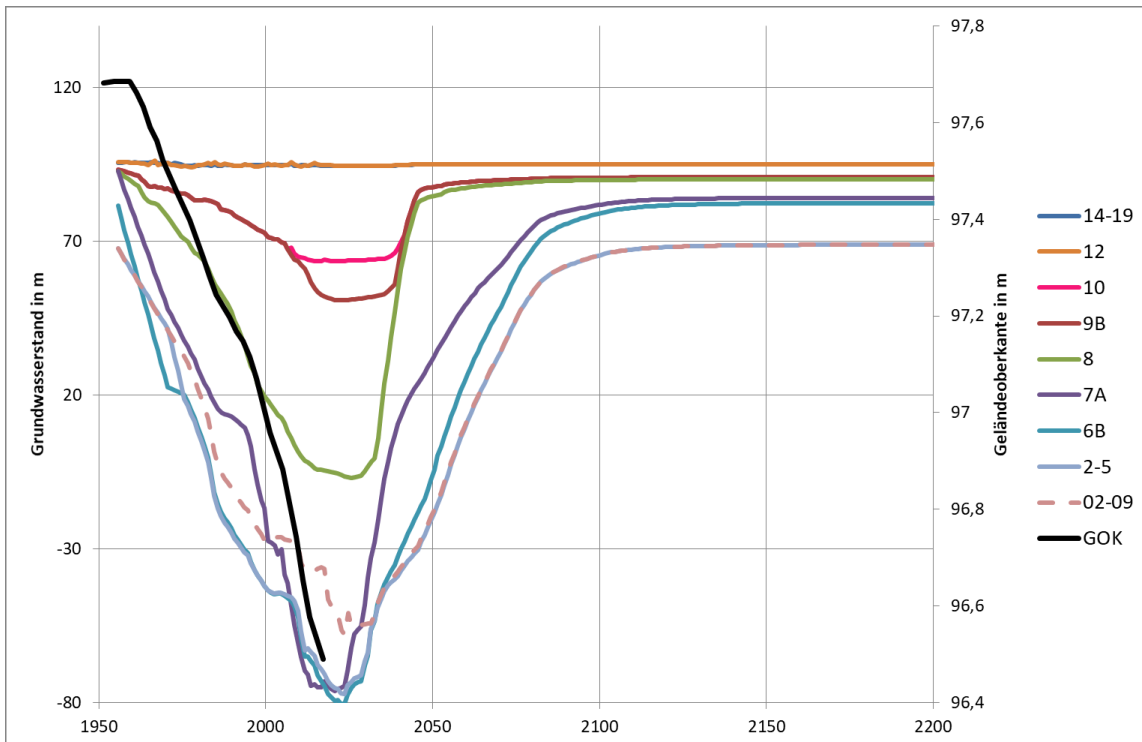


Abbildung 74 Grundwasserganglinien Krauthausen, bereitgestellt durch LANUV

Die folgende Abbildung 75 zeigt die am Punkt Krauthausen bis heute an der Geländeoberfläche gemessenen Bodenbewegungen (blau) sowie das Ergebnis der Nachrechnung (orange).

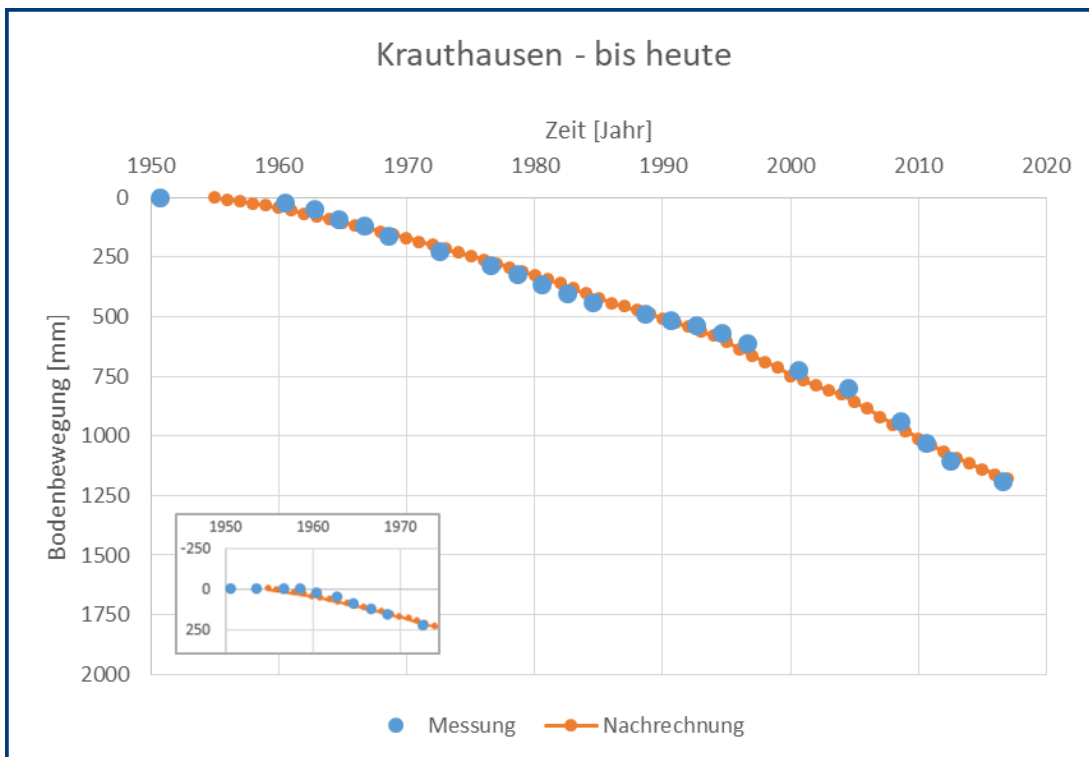


Abbildung 75 Nachrechnung für den Punkt Krauthausen

Wie der Ausschnitt links unten in Abbildung 75 zeigt, wurden in den Anfangsjahren zunächst auch minimale Hebungen gemessen, die jedoch nicht aus dem Tagebaubetrieb resultieren und im Rahmen der Messtoleranz liegen. Die anschließend bis heute gemessenen Setzungen betragen am Punkt Krauthausen ca. 1,2 m, wobei etwa ab Mitte der 1990er Jahre ein leichter Anstieg der Setzungsrate zu verzeichnen ist. Der Verlauf von Nachrechnung und Messung stimmt nahezu perfekt überein.

Die mit dem Modell auf Basis der vom LANUV bereitgestellten Grundwasserganglinien erhaltene Prognose zeigt Abbildung 76.

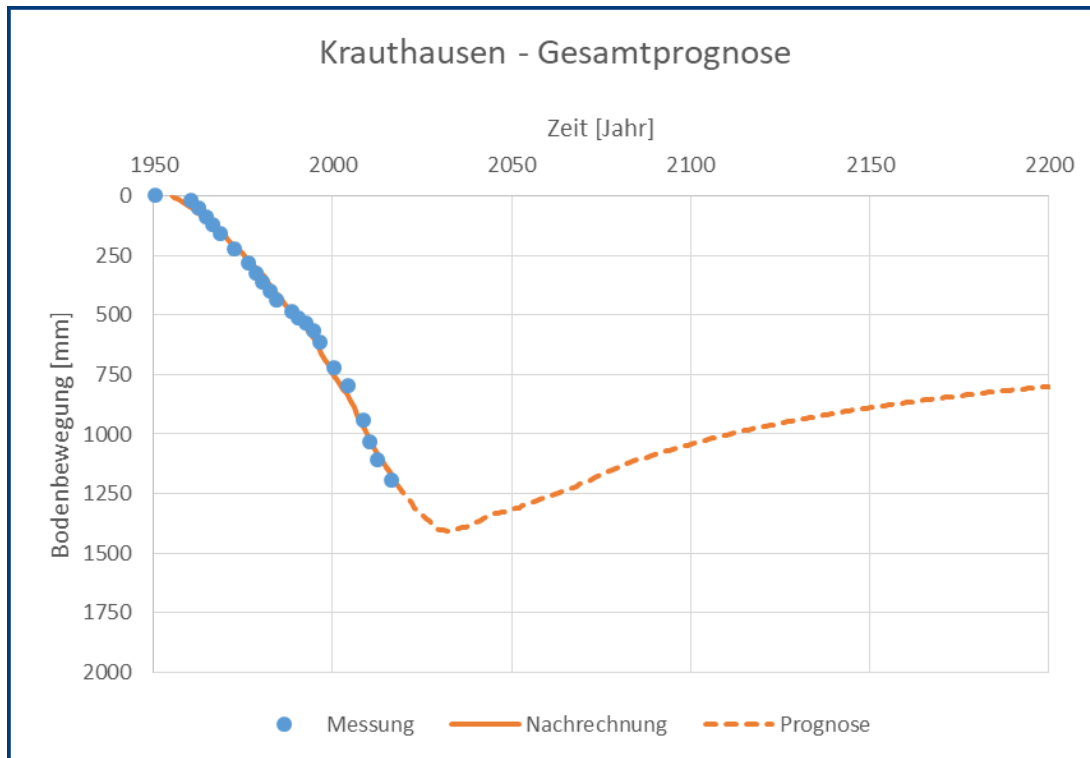


Abbildung 76 Prognose für den Punkt Krauthausen

Die maximale Setzung wird etwa für das Jahr 2040 prognostiziert und beträgt etwa 1,4 m. Die anschließende Hebungsphase ist charakterisiert durch gleichmäßige Hebungsraten bis etwa ins Jahr 2100. Dann verringert sich die Hebungsrate und im Jahr 2200 wird eine bis dahin verbleibende Setzung von ca. 80 cm prognostiziert.

Die für das Modell Krauthausen verwendeten Eingangsparameter können dem Anhang entnommen werden.

5.4 Düren

Der Punkt Düren liegt südlich der Tagebaue Inden und Hambach (vgl. Abbildung 68). Die vom LANUV bereitgestellten Informationen zur Geologie und zum Leitnivelement können der folgenden Abbildung 77 entnommen werden, die ebenfalls vom LANUV bereitgestellten Grundwasserganglinien zeigt die nachfolgende Abbildung 78.

Geologie			Leitnivelement	
Profil			5104900010	
horizont	oberkante_m	bemerkung	datum	gok_m
14-19	114,03	nicht-bindig	01.06.1951	114,03
10	106,1	nicht-bindig	01.06.1954	114,035
9C	97,9	bindig	01.06.1957	114,035
9B	93,2	nicht-bindig	01.06.1959	114,035
9A	72,9	bindig	01.04.1961	114,021
8	63,6	nicht-bindig	01.07.1963	113,996
7F	29,8	Flöz	01.06.1965	113,955
7E	23,9	nicht-bindig	01.06.1967	113,922
7D	13,8	Flöz	01.06.1969	113,882
7C	6,7	nicht-bindig	01.05.1973	113,821
7B	-8,4	Flöz	01.05.1977	113,771
7A	-25,8	nicht-bindig	01.06.1979	113,734
6E	-57,1	Flöz	01.05.1981	113,7
6D	-85,5	nicht-bindig	01.04.1983	113,667
6C	-110,1	Flöz	01.05.1985	113,632
6B	-118,3	nicht-bindig	01.05.1989	113,597
6A	-143,7	Flöz	01.05.1991	113,577
2-5	-173,2	nicht-bindig	01.05.1993	113,565
1	-260	bindig	01.05.1995	113,545
02-09	-285	nicht-bindig	01.05.1997	113,519
Tertiärbasis	-499		01.05.2001	113,463
			01.04.2005	113,421
			01.05.2009	113,368
			01.05.2011	113,321
			01.04.2013	113,277
			01.05.2017	113,215

Abbildung 77 Ausschnitt Eingangsdaten Düren, bereitgestellt durch LANUV

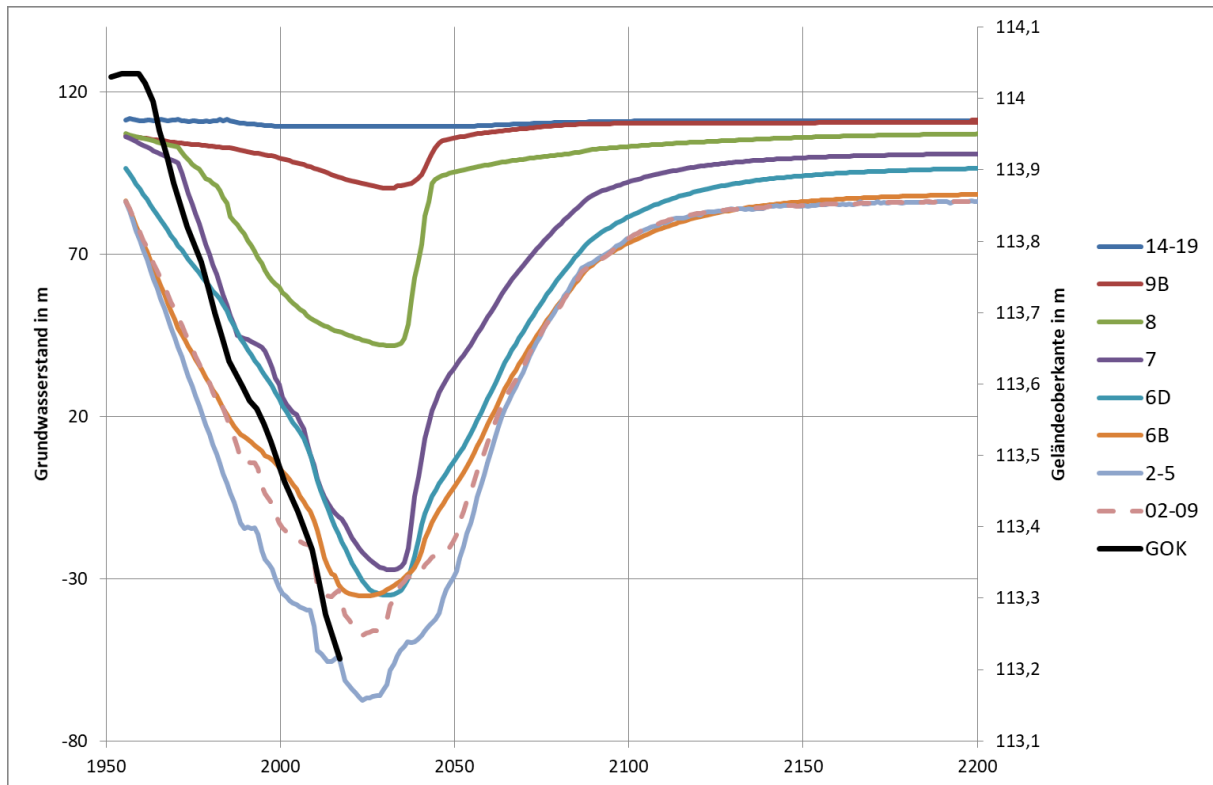


Abbildung 78 Grundwasserganglinien Düren, bereitgestellt durch LANUV

Die folgende Abbildung 79 zeigt die am Punkt Düren bis heute an der Geländeoberfläche gemessenen Bodenbewegungen (blau) sowie das Ergebnis der Nachrechnung (orange).

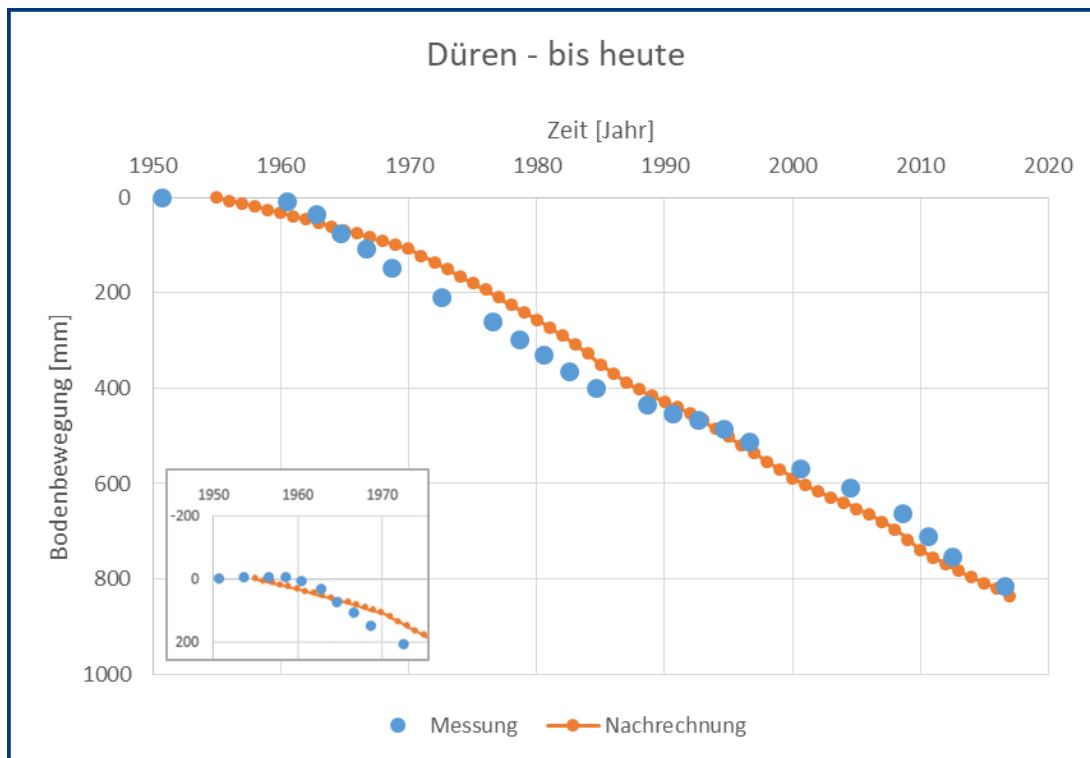


Abbildung 79 Nachrechnung für den Punkt Düren

Die Setzung am Punkt Düren verlaufen seit den 1960er Jahren nahezu kontinuierlich und betragen im Jahr 2017 ca. 80 cm. Wie auch schon am Punkt Jülich wurden in den 1950er Jahren zunächst leichte Hebungen verzeichnet (vgl. Detail links unten in Abbildung 79), die jedoch nicht aus dem Tagebaubetrieb resultieren und im Rahmen der Messtoleranz liegen. Auch der Verlauf der Nachrechnung ist relativ kontinuierlich und kann den Messverlauf in guter Qualität abbilden.

Die mit dem Modell auf Basis der vom LANUV bereitgestellten Grundwasserganglinien erhaltene Prognose zeigt Abbildung 80.

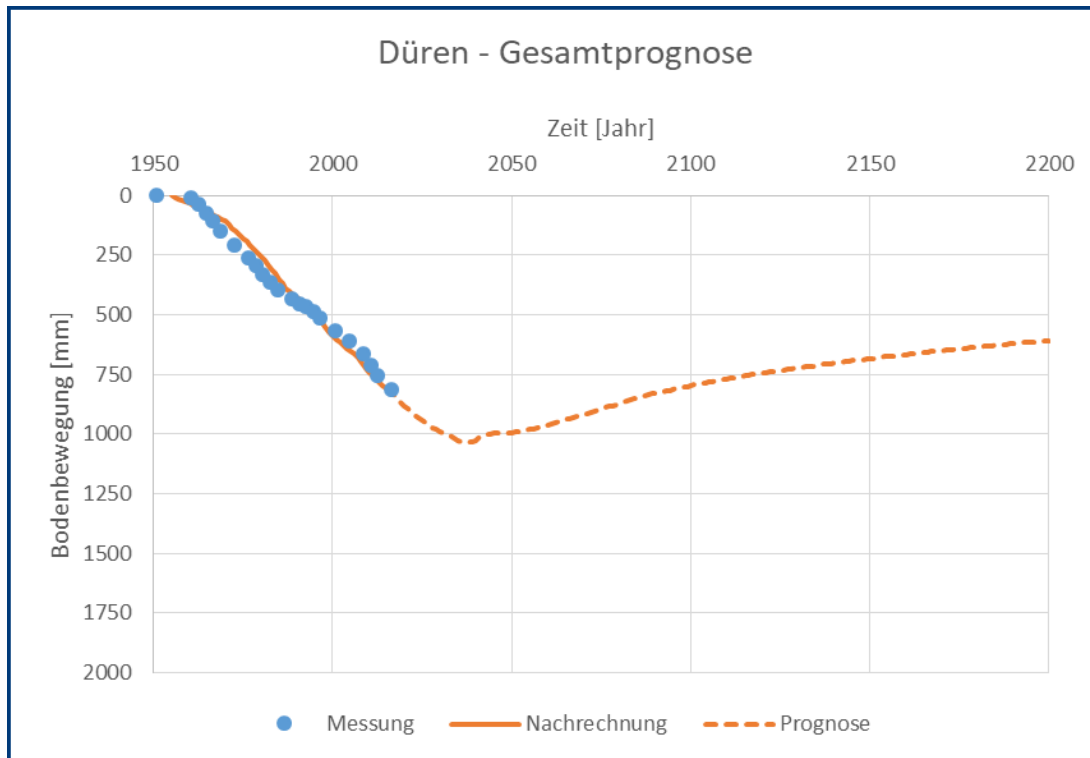


Abbildung 80 Prognose für den Punkt Düren

Gemäß Prognose setzt sich der Setzungsverlauf bis ins Jahr 2039 fort und es werden Setzungen von rund einem Meter im Maximum erreicht. Es folgt dann eine kurze Hebungsphase, gefolgt von einem stagnierenden Verlauf. Ab etwa 2050 setzt eine relativ gleichmäßige Hebung ein, die bis zum Ende des Prognosezeitraums aber noch nicht abgeschlossen sein wird. Im Jahre 2200 wird eine Restsetzung von ca. 60 cm prognostiziert.

Ob die Hebungen bis zum Jahr 2200 an einem Punkt vollständig abgeschlossen sein werden, wie dies z.B. am Punkt Wanlo der Fall ist (vgl. Abbildung 112), oder wie hier am Punkt Düren noch andauern werden, hängt von einer Vielzahl von Faktoren ab. Neben der Größe und dem Verlauf der Grundwasserabsenkung in den einzelnen Grundwasserleitern ist dabei insbesondere auch die Mächtigkeit der bindigen Schichten von besondere Bedeutung (vgl. Abschnitt 2.4).

Die für das Modell Düren verwendeten Eingangsparameter können dem Anhang entnommen werden.

5.5 Körrenzig

Der Punkt Körrenzig liegt südwestlich des Tagebaus Garzweiler an der Rur (vgl. Abbildung 68). Die vom LANUV bereitgestellten Informationen zur Geologie und zum Leitnivellement können der folgenden Abbildung 81 entnommen werden, die ebenfalls vom LANUV bereitgestellten Grundwasserganglinien zeigt die nachfolgende Abbildung 82.

Geologie			Leitnivellement	
Profil			5003900014	
horizont	oberkante_m	bemerkung	datum	gok_m
14-19	61,1	nicht-bindig	01.06.1952	61,091
13	46,6	bindig	01.06.1954	61,091
12	42,6	nicht-bindig	01.06.1957	61,091
11	41,8	bindig	01.06.1959	61,091
10/9B	27,1	nicht-bindig	01.05.1961	61,081
9A	-17,5	bindig	01.05.1963	61,059
8	-24,9	nicht-bindig	01.05.1965	61,051
7F	-107,3	bindig, kaum Kohle	01.05.1967	61,028
7C/7D/7E	-126,7	nicht-bindig	01.06.1969	61,011
7B	-156,4	bindig, kaum Kohle	01.06.1973	60,984
7A/6D	-173,3	nicht-bindig	01.05.1977	60,951
6C	-253,6	Flöz	01.05.1981	60,913
2-5/02-09	-334,5	nicht-bindig	01.04.1985	60,878
Tertiärbasis	-638		01.05.1987	60,871
			01.05.1989	60,863
			01.04.1993	60,841
			01.05.1995	60,834
			01.05.1997	60,819
			01.04.1999	60,802
			01.05.2001	60,796
			01.05.2003	60,787
			01.04.2005	60,788
			01.04.2007	60,78
			01.05.2009	60,783
			01.05.2011	60,78
			01.04.2013	60,778
			01.05.2017	60,781

Abbildung 81 Ausschnitt Eingangsdaten Körrenzig, bereitgestellt durch LANUV

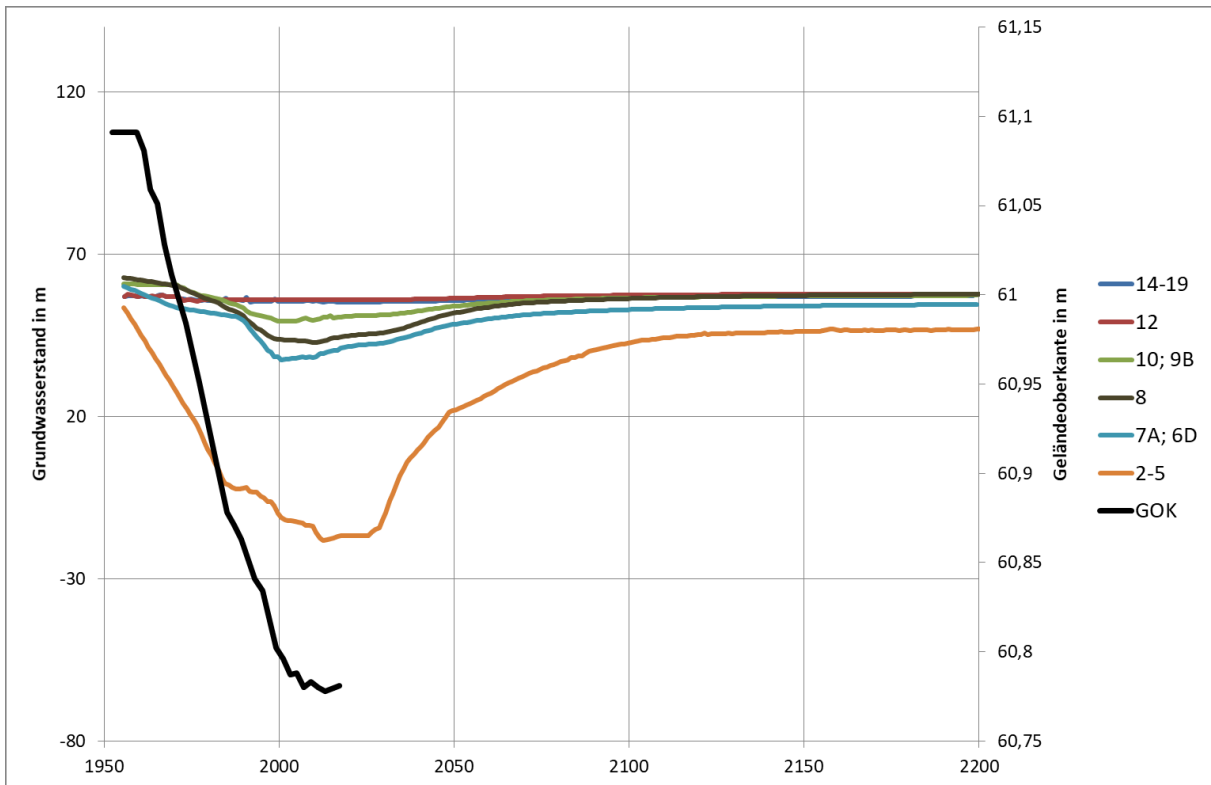


Abbildung 82 Grundwasserganglinien Körrenzig, bereitgestellt durch LANUV

Die folgende Abbildung 83 zeigt die am Punkt Körrenzig bis heute an der Geländeoberfläche gemessenen Bodenbewegungen (blau) sowie das Ergebnis der Nachrechnung (orange).

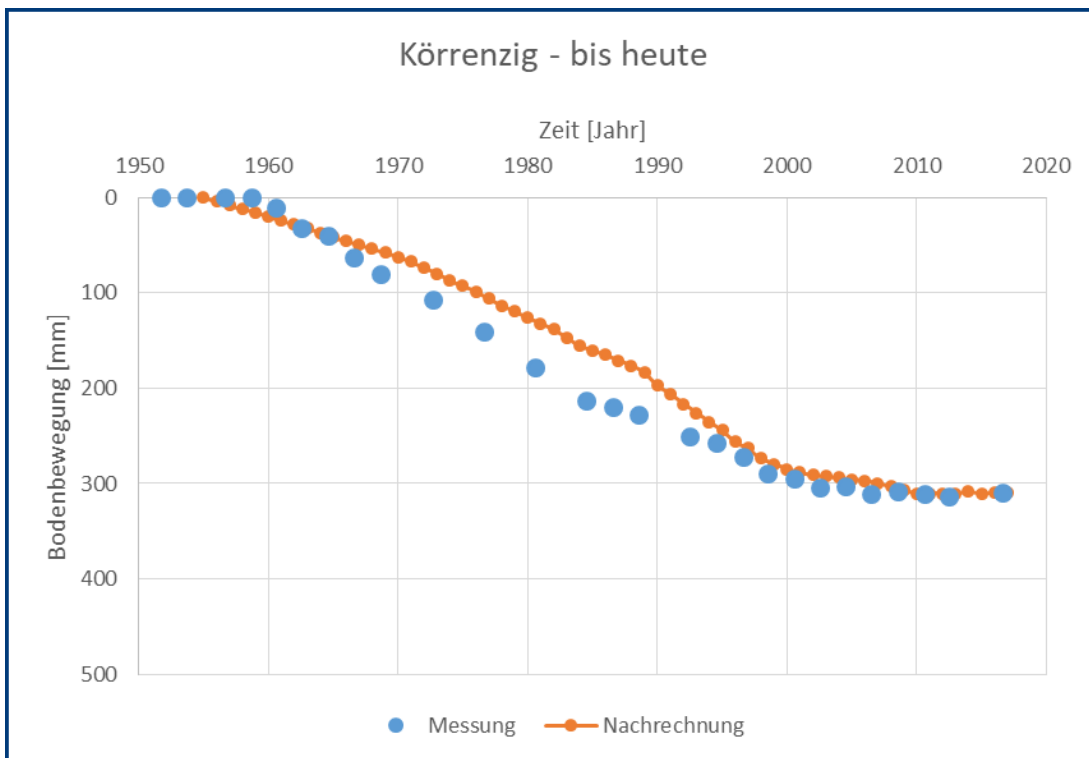


Abbildung 83 Nachrechnung für den Punkt Körrenzig

Am Punkt Körrenzig hat sich bis heute eine Setzung von etwas mehr als 30 cm eingestellt, wobei die Setzungen seit Beginn der 2000er Jahre stagnieren. Insgesamt wird zwischen Nachrechnung und Messung eine gute und insbesondere ab Mitte der 1990er Jahre eine sehr gute Übereinstimmung erhalten. Die im Zeitraum von 1965 bis 1995 vorhandenen Abweichungen sind ebenso wie am Punkt Heinsberg (vgl. Abschnitt 5.6) und eventuell auch am Punkt Jülich (vgl. Abschnitt 5.2) auf Einflüsse aus dem Steinkohlebergbau zurückzuführen.

Gemäß dem LANUV vorliegenden Informationen zeigen die Grundwassermessstellen im Bereich der Punkte Heinsberg/Körrenzig im Oberkarbon, in der Kreide und im Karbon ab etwa dem Jahr 2000 einen Wiederanstieg, der wahrscheinlich auf den Grubenwasseranstieg in den Gruben des Aachener Steinkohlereviers zurückzuführen ist. Deren Stilllegung erfolgte Ende der 1990er Jahre. Daher ist in Körrenzig und Heinsberg und eventuell auch in Jülich von einer Beeinflussung der Bodenbewegungen durch den früheren Steinkohleabbau und durch damit verbundene Grundwasserhaltungsmaßnahmen bzw. durch deren Einstellung auszugehen. Da diese Beeinflussung aber weder über den Nachrechnungszeitraum noch über den Prognosezeitraum konstant ist und auch durch das derzeitige Bodenbewegungsmodell nicht abgebildet wird, ergeben sich je nach Kalibrierung zwangsläufig Abweichungen zwischen Nachrechnung und Messung. Gleichwohl wäre es aber denkbar, das Prognosemodell so zu erweitern, dass auch diese Einflüsse aus dem Steinkohlebergbau abgebildet werden können. Voraussetzung wäre aber, dass auch die erforderlichen Informationen (Geologie, Grundwasser) vorliegen und bereitgestellt werden können.

Die mit dem Modell auf Basis der vom LANUV bereitgestellten Grundwasserganglinien erhaltene Prognose zeigt Abbildung 84.

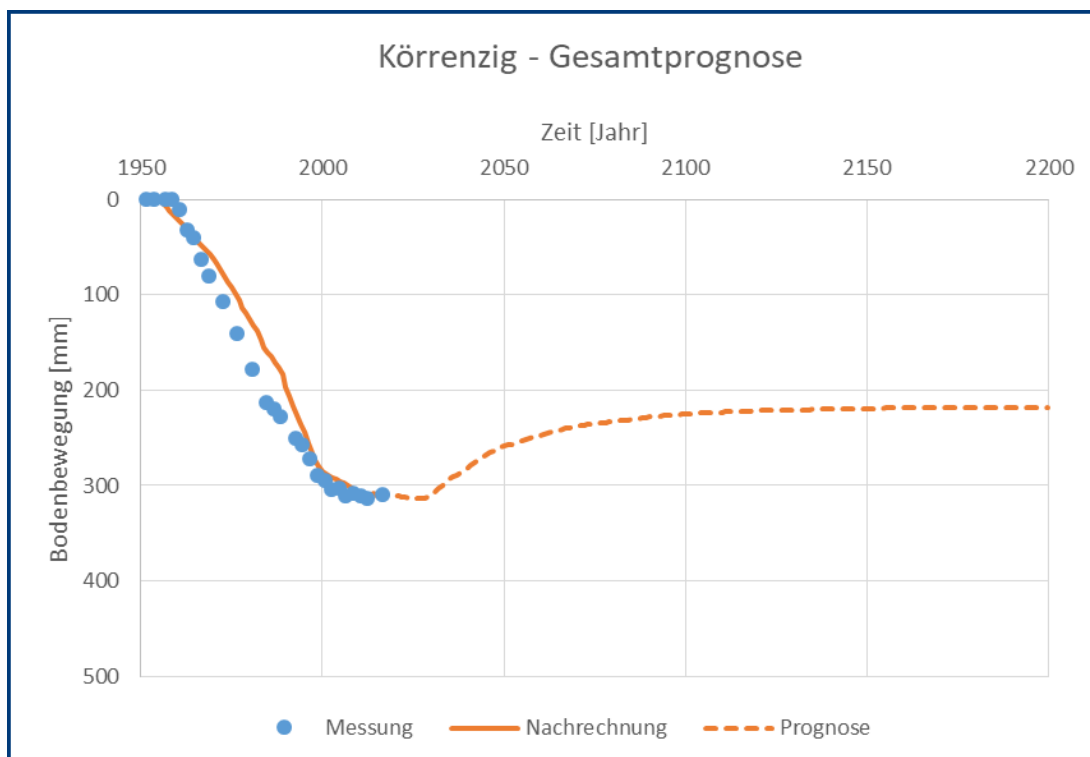


Abbildung 84 Prognose für den Punkt Körrenzig

Die bereits aus der Nachrechnung ersichtliche Tendenz setzt sich fort und es wird bis etwa 2040 ein nahezu horizontaler bzw. nur leicht abfallender Verlauf prognostiziert. Die Setzung wird dann etwas mehr als 31 cm betragen. Anschließend setzt die Hebungsphase ein, welche sich ab 2050 deutlich abschwächt. Im Jahr 2200 beträgt die Setzung noch rund 22 cm.

Dabei sind die verbleibenden Setzungen zum einen darauf zurückzuführen, dass sich der Boden nach Entlastung bzw. den Grundwasserwiederanstieg steifer verhält und daher nur zu einem gewissen Anteil wieder hebt (vgl. Abschnitt 2.3), zum anderen aber auch darauf, dass die für das Jahr 2200 prognostizierten Grundwasserstände teilweise unterhalb des jeweiligen Ausgangsniveaus der 1950er Jahre bleiben (vgl. Abbildung 82).

Die für das Modell Körrenzig verwendeten Eingangsparameter können dem Anhang entnommen werden.

5.6 Heinsberg

Der Punkt Heinsberg ist der am weitesten westlich gelegene Punkt, der betrachtet wird (vgl. Abbildung 68). Die vom LANUV bereitgestellten Informationen zur Geologie und zum Leitnivelement können der folgenden Abbildung 85 entnommen werden, die ebenfalls vom LANUV bereitgestellten Grundwasserganglinien zeigt die nachfolgende Abbildung 86.

Geologie			Leitnivelement	
Profil			4902900112	
horizont	oberkante_m	bemerkung	datum	gok_m
14-19/12	37,5	nicht-bindig	01.10.1955	37,517
11	-48,41	bindig	01.06.1959	37,517
10	-61,37	nicht-bindig	01.06.1961	37,517
9C	-63,74	bindig	01.05.1963	37,488
9B	-78,50	nicht-bindig	01.05.1965	37,493
9A	-136,03	bindig	01.05.1967	37,490
8	-143,06	nicht-bindig	01.05.1969	37,482
6C	-517,25	bindig	01.05.1971	37,469
6B	-544,32	nicht-bindig	01.05.1973	37,456
6A	-611,10	bindig	01.06.1977	37,440
2-5/02-09	-631,01	nicht-bindig	01.05.1981	37,427
Tertiärbasis	-1315,57		01.05.1985	37,417
			01.04.1993	37,394
			01.04.1997	37,395
			01.05.2001	37,390
			01.05.2003	37,386
			01.05.2005	37,388
			01.05.2007	37,383
			01.04.2009	37,385
			01.05.2011	37,382
			01.04.2013	37,382
			01.04.2017	37,383

Abbildung 85 Ausschnitt Eingangsdaten Heinsberg, bereitgestellt durch LANUV

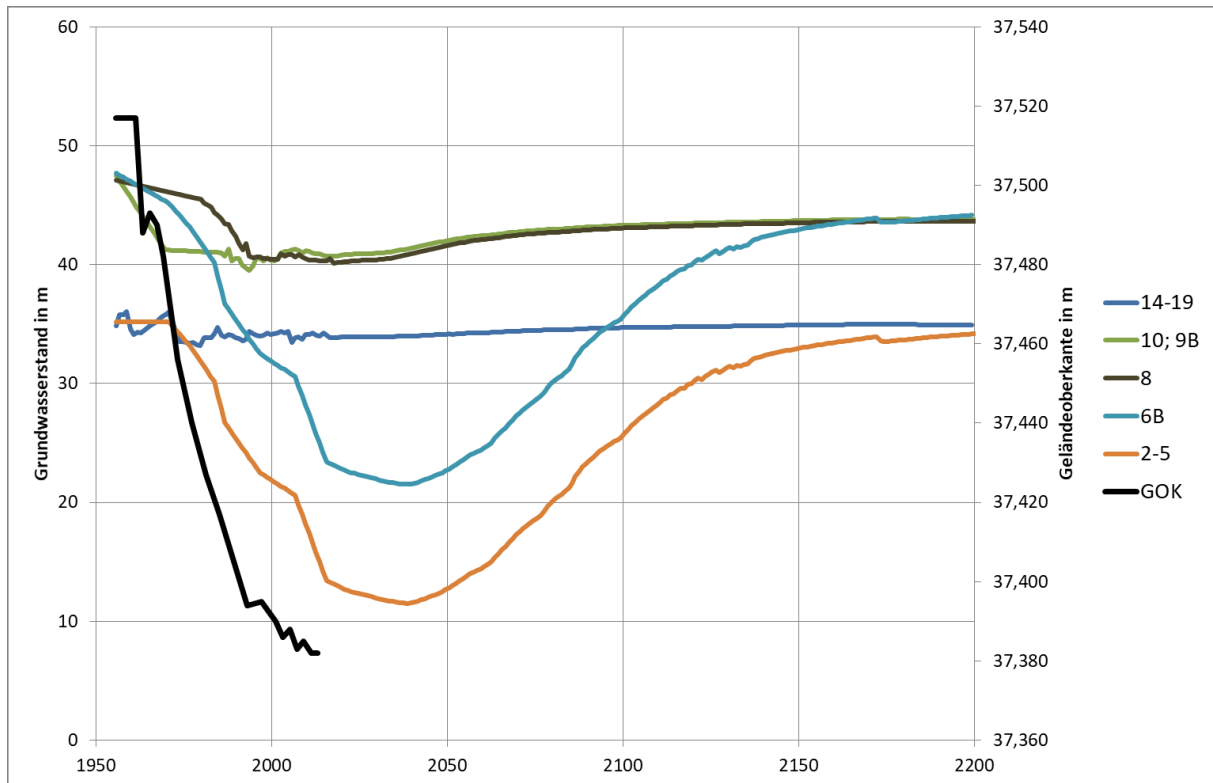


Abbildung 86 Grundwasserganglinien Heinsberg, bereitgestellt durch LANUV

Die folgende Abbildung 87 zeigt die am Punkt Heinsberg bis heute an der Geländeoberfläche gemessenen Bodenbewegungen (blau) sowie das Ergebnis der Nachrechnung (orange).

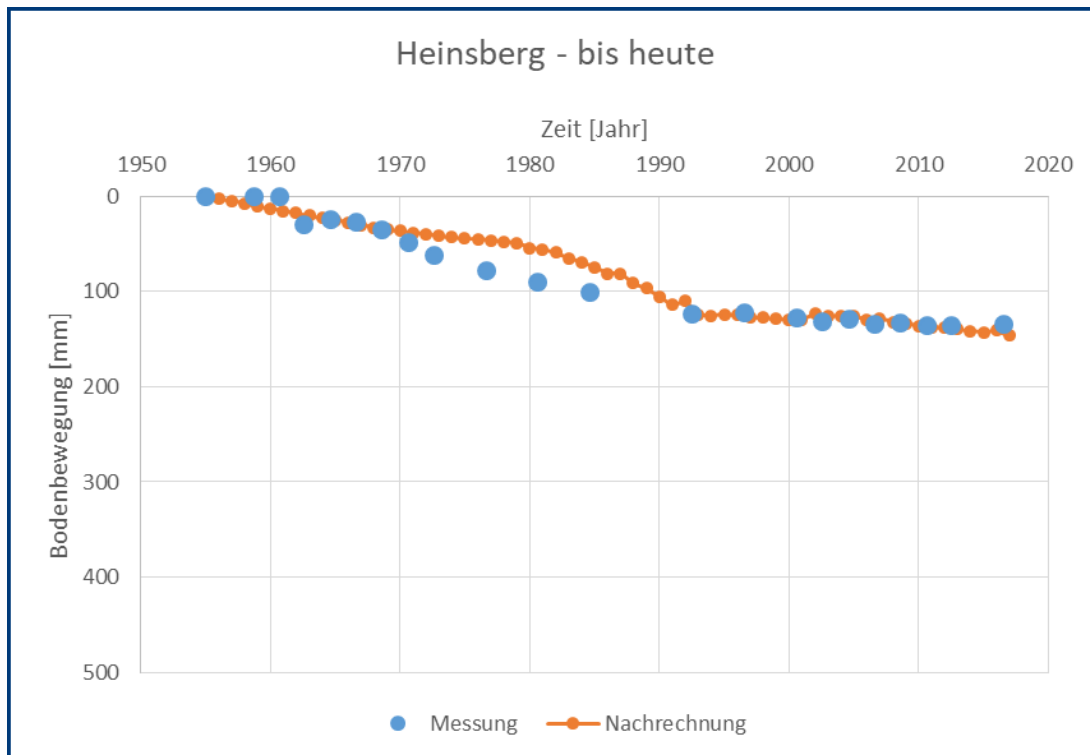


Abbildung 87 Nachrechnung für den Punkt Heinsberg

Am Punkt Heinsberg sind, insbesondere bedingt durch die Entfernung zu den Tagebauen, generell nur geringe Bodenbewegungen zu verzeichnen. Dabei ist zu beobachten, dass bis Anfang der 1990er Jahre mehr oder weniger kontinuierlich Setzungen bis zu einer Größenordnung von etwa 12 cm aufgetreten sind, diese seitdem aber stagnieren. Dies ist auf Einflüsse aus dem Steinkohlebergbau zurückzuführen, wie bereits in Abschnitt 5.5 ausgeführt wurde.

Im Rahmen früherer Berechnungen durch ZAI wurde u.a. der Punkt Baal (vgl. Abschnitt 6.31) betrachtet, der ebenfalls durch den Steinkohleabbau beeinflusst ist. Dort sind nach anfangs fast linear zunehmenden Setzungen ab den 2000er Jahren nahezu keine Vertikalbewegungen mehr zu verzeichnen. Dies ist vermutlich größtenteils auf den Wiederanstieg von Grubenwasser zurückzuführen. Die Kalibrierung für den Punkt Baal wurde so vorgenommen, dass die Anfangsphase vor dem wahrscheinlichen Grubenwasseranstieg sehr gut abgebildet wird, wodurch es dann aber ab dem Jahr 2000 zu einem Auseinanderklaffen zwischen Messwerten und Nachrechnung kommt.

Im hier vorliegenden Fall wurde für den Punkt Heinsberg, bei dem der Steinkohleeinfluss aufgrund der dort generell geringen tagebaubedingten Bodenbewegungen größer als in Körrenzig ist, sowohl eine Kalibrierung analog zu Baal als auch der Art vorgenommen, dass nicht das frühe, sondern das aktuelle Verhalten seit den 1990er Jahren möglichst gut abgebildet wird. Darauf basierend wurde dann vorgegeben, dass die steinkohlebeeinflussten Punkte Heinsberg und Körrenzig nach letztgenannter Methode kalibriert werden sollen (vgl. Abbildung 83 und Abbildung 87), so dass das aktuelle Verhalten möglichst gut abgebildet wird. In diesem Zusammenhang gilt es zu beachten, dass es zu einem späteren Zeitpunkt analog zum Zeitraum vor 1990 wieder zu Abweichungen zwischen Prognose und Messung kommen kann, wenn die Einflüsse aus dem Steinkohlebergbau nachlassen oder sich ändern.

Bedingt durch den Steinkohleeinfluss ist eine durchgängig sehr gut zutreffende Nachrechnung nicht möglich, so dass es bei der gewählten Kalibrierung in den 1970er und 1980er Jahren zu Abweichungen kommt, das aktuelle Verhalten aber sehr gut abgebildet wird.

Die mit dem Modell auf Basis der vom LANUV bereitgestellten Grundwasserganglinien erhaltene Prognose zeigt Abbildung 88.

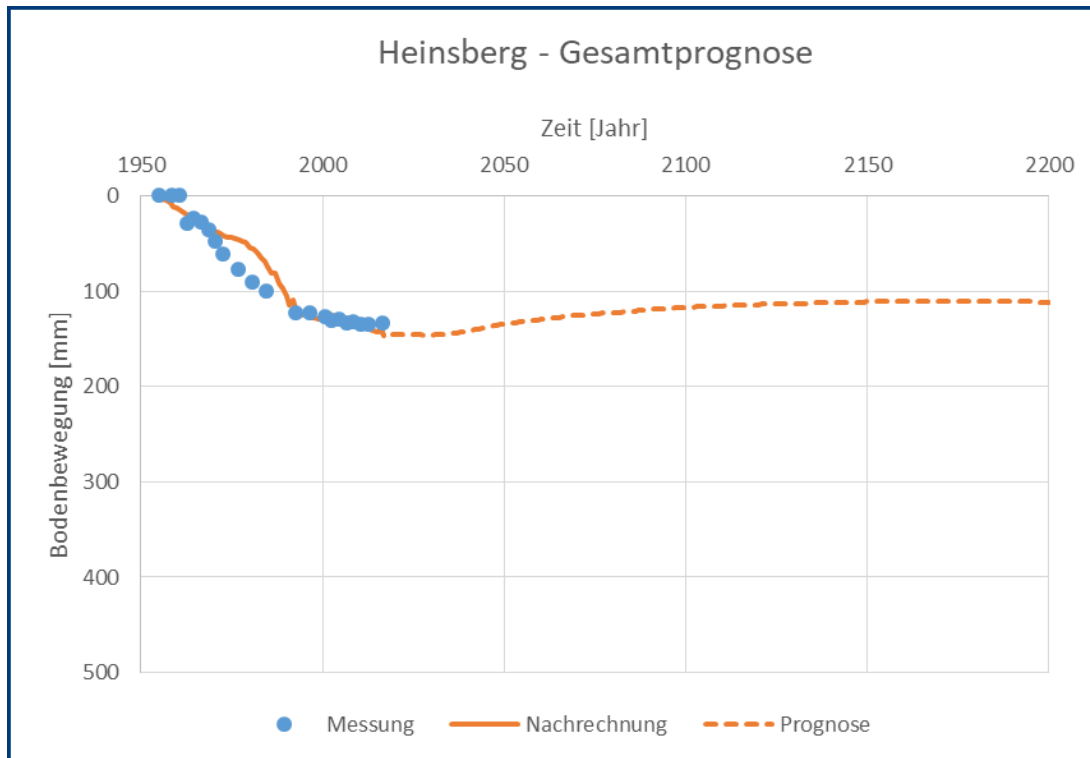


Abbildung 88 Prognose für den Punkt Heinsberg

Für den Punkt Heinsberg werden leicht zunehmende Setzungen bis etwa 2030 prognostiziert, die dann maximal ca. 15 cm betragen. Anschließend treten dann Hebungen ein, die um 2170 zur Ruhe kommen werden. Die Restsetzungen betragen dann etwa noch 12 cm. Weiter ist aber auch zu erkennen, dass dann wieder geringfügige Setzungen an der Geländeoberfläche prognostiziert werden. Dies kann darauf zurückgeführt werden, dass die prognostizierten Grundwasserstände teilweise wieder leicht fallen und es in den oberen bindigen Schichten entgegen dem sonst üblichen Trend teilweise erneut zu positiven Spannungsänderungen kommt. Die daraus weiter resultierenden Setzungen sind aber von untergeordneter Bedeutung im Millimeterbereich.

Die für das Modell Heinsberg verwendeten Eingangsparameter können dem Anhang entnommen werden.

5.7 Titz

Der Punkt Titz liegt zwischen den Tagebaugebieten Garzweiler im Norden und Hambach im Süden, dabei jedoch deutlich näher am südlichen Rand des Tagebaus Garzweiler (vgl. Abbildung 68). Die vom LANUV bereitgestellten Informationen zur Geologie und zum Leitnivelement können der folgenden Abbildung 89 entnommen werden, die ebenfalls vom LANUV bereitgestellten Grundwasserganglinien zeigt die nachfolgende Abbildung 90.

Geologie			Leitnivelement	
Profil			4904900001	
horizont	oberkante_m	bemerkung	datum	gok_m
14-19	105,7	nicht-bindig	01.05.1953	105,728
13/11	41	bindig	01.05.1957	105,723
10	35,7	nicht-bindig	01.06.1959	105,723
9C	25	bindig	01.06.1961	105,692
9B	19,1	nicht-bindig	01.06.1963	105,65
9A	-16,2	bindig	01.06.1965	105,621
8	-21,7	nicht-bindig	01.06.1967	105,585
7F	-90	Flöz	01.06.1969	105,555
7E	-97	nicht-bindig	01.06.1973	105,511
7D	-111	Flöz	01.05.1977	105,468
7C/7A	-122,4	nicht-bindig	01.04.1981	105,419
6E	-145,4	Flöz	01.04.1983	105,387
6D	-157	nicht-bindig	01.05.1985	105,361
6C	-227,2	Flöz	01.05.1989	105,346
6B	-250	nicht-bindig	01.05.1991	105,329
6A	-261,7	Flöz	01.05.1993	105,328
4-5/01-09	-277,3	nicht-bindig	01.05.1995	105,318
Tertiärbasis	-698		01.05.1997	105,307
			01.05.1999	105,279
			01.05.2001	105,272
			01.04.2005	105,256
			01.04.2007	105,251
Hor 9B und 10 sind hydraulisch verbunden			01.05.2009	105,243
			01.05.2011	105,235
			01.04.2013	105,228
			01.05.2017	105,221

Abbildung 89 Ausschnitt Eingangsdaten Titz, bereitgestellt durch LANUV

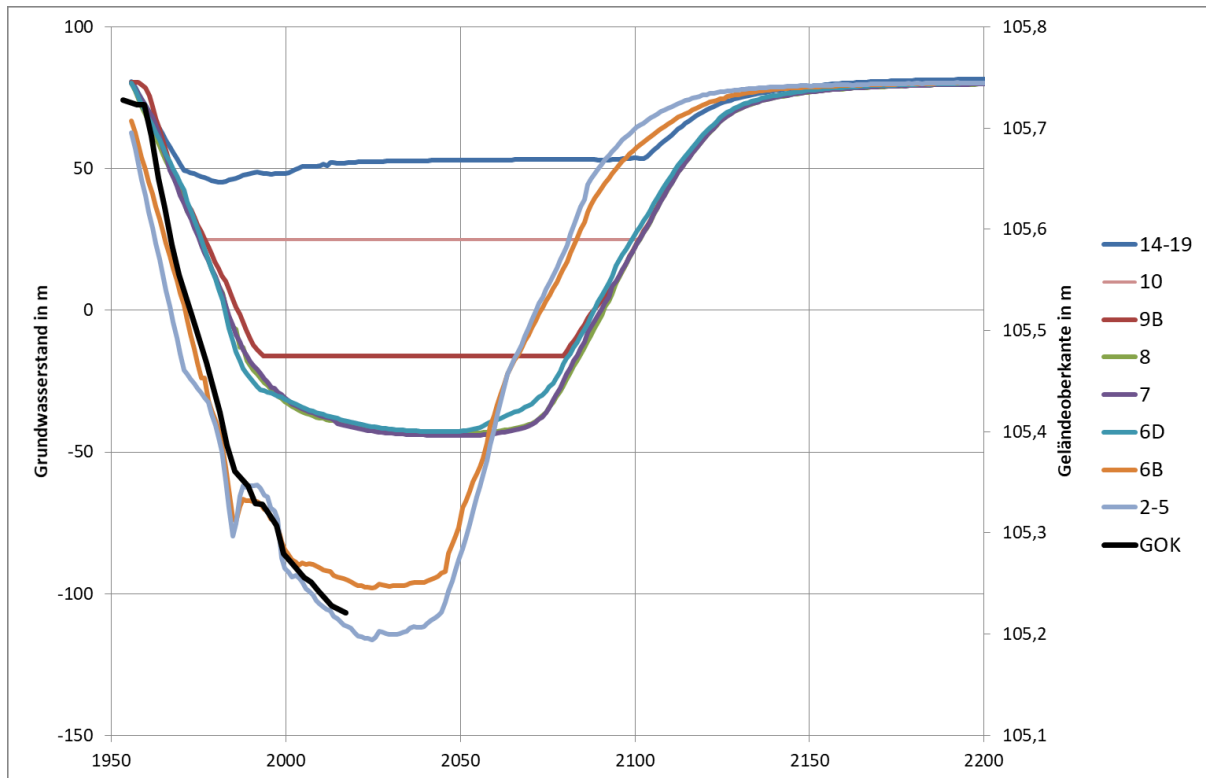


Abbildung 90 Grundwasserganglinien Titz, bereitgestellt durch LANUV

Die folgende Abbildung 91 zeigt die am Punkt Titz bis heute an der Geländeoberfläche gemessenen Bodenbewegungen (blau) sowie das Ergebnis der Nachrechnung (orange).

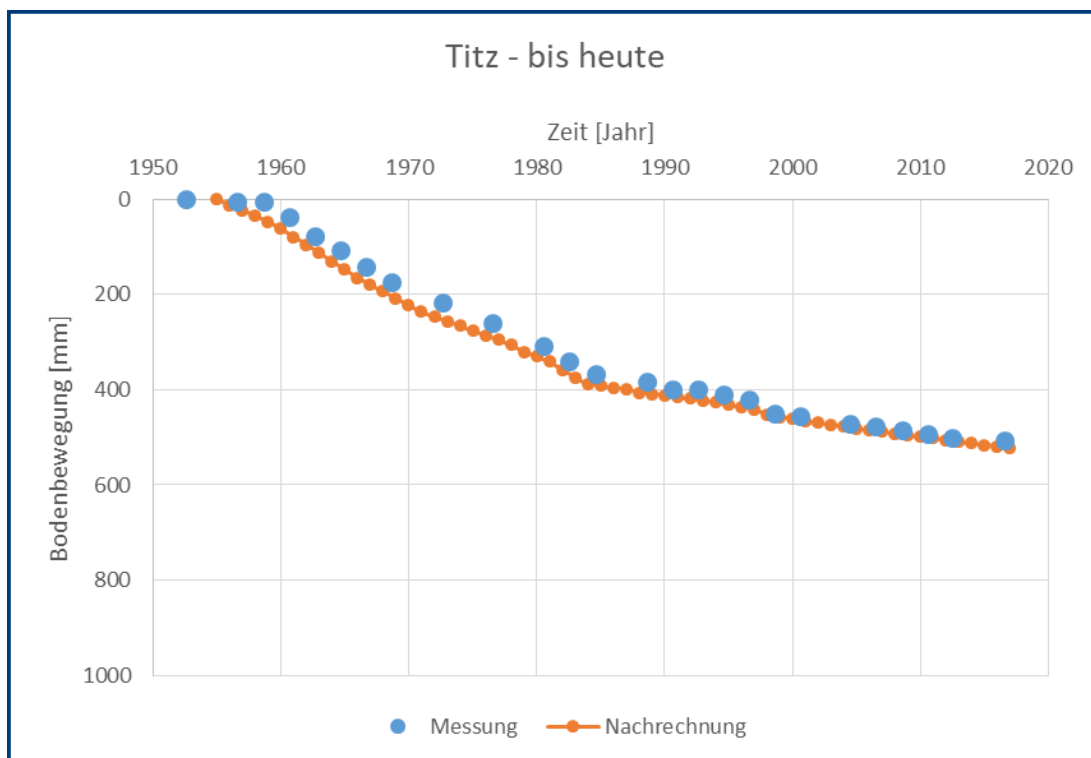


Abbildung 91 Nachrechnung für den Punkt Titz

Bis heute haben sich am Punkt Titz Setzungen von etwa 50 cm eingestellt, die seit Mitte der 1980er Jahren etwas langsamer ablaufen. Die Nachrechnung bildet den Verlauf der Messung in sehr guter Qualität ab.

Die mit dem Modell auf Basis der vom LANUV bereitgestellten Grundwasserganglinien erhaltene Prognose zeigt Abbildung 92.

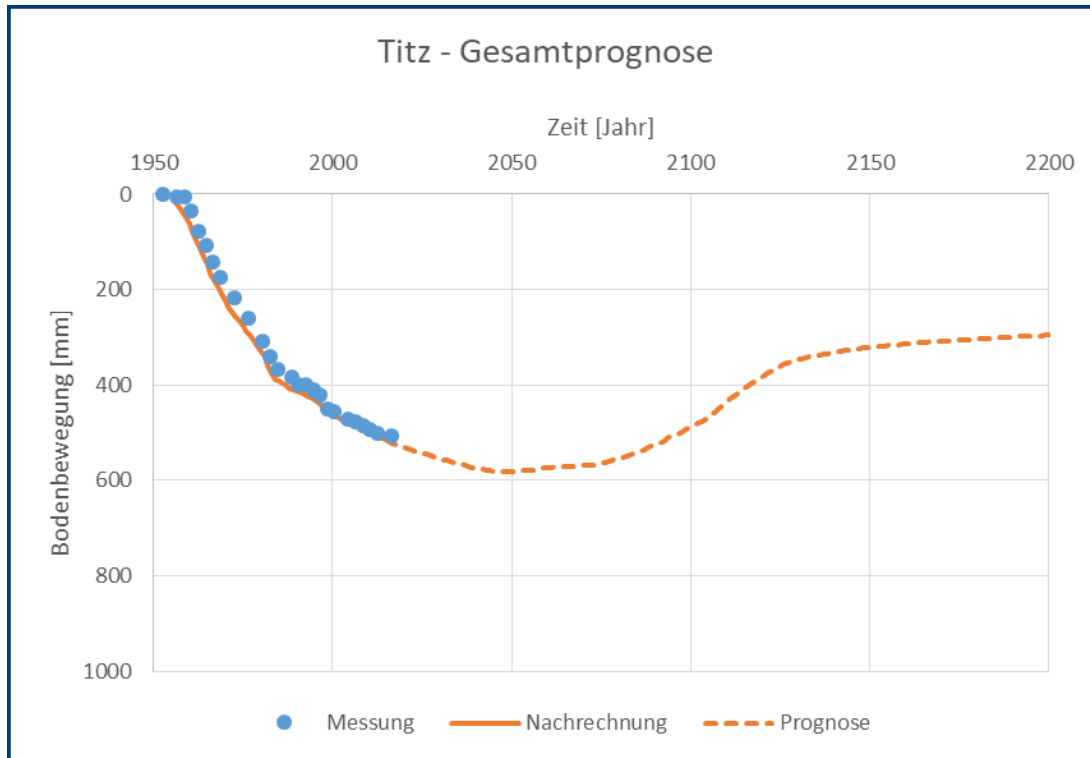


Abbildung 92 Prognose für den Punkt Titz

Die Setzungen erreichen etwa um das Jahr 2050 ihr Maximum, welches mit knapp 60 cm prognostiziert wird. Anschließend beginnt die Hebungsphase, welche zunächst langsam einsetzt, um etwa 2100 die größte Hebungsrate aufweist sich ab etwa 2130 wieder abschwächt. Die Prognose ergibt für das Jahr 2200 Restsetzung von ca. 30 cm.

Die für das Modell Titz verwendeten Eingangsparameter können dem Anhang entnommen werden.

5.8 Oberembt

Der Punkt Oberembt liegt nördlich des Tagebaus Hambach (vgl. Abbildung 68). Die vom LANUV bereitgestellten Informationen zur Geologie und zum Leitnivelement können der folgenden Abbildung 93 entnommen werden, die ebenfalls vom LANUV bereitgestellten Grundwasserganglinien zeigt die nachfolgende Abbildung 94.

Geologie			Leitnivelement	
Profil			5004900330	
horizont	oberkante_m	bemerkung	datum	gok_m
14-19	80,72	nicht-bindig	15.05.1955	80,72
13/11	41,7	bindig	15.10.1957	80,71
10/9B	22	nicht-bindig	15.04.1958	80,70
9A	-39,7	bindig	15.10.1958	80,70
8	-48,4	nicht-bindig	09.05.1959	80,69
7F	-126,1	Flöz	07.04.1960	80,65
7E	-133	nicht-bindig	08.05.1961	80,62
7D	-173,9	Flöz	06.05.1962	80,57
7C	-174,9	nicht-bindig	31.05.1963	80,53
6E	-210,4	Flöz	14.06.1965	80,45
6D	230,5	nicht-bindig	18.05.1967	80,39
6C	-267,1	Flöz	04.06.1969	80,34
6B	-318,9	nicht-bindig	29.05.1973	80,27
6A	-337,1	Flöz	25.04.1977	80,17
4-5	-380,1	nicht-bindig	28.04.1979	80,12
1	-511,6	bindig	03.05.1981	80,06
01-09	-580,3	nicht-bindig	17.04.1983	79,99
Unterkante	-797		28.04.1985	79,89
			02.05.1987	79,86
			27.04.1989	79,81
			03.05.1991	79,78
			03.05.1993	79,75
			11.05.1995	79,72
			07.05.1997	79,67
			17.05.1999	79,60
			15.05.2001	79,55
			02.05.2005	79,49
			07.05.2009	79,42
			24.04.2013	79,37
			10.05.2017	79,35

Abbildung 93 Ausschnitt Eingangsdaten Oberembt, bereitgestellt durch LANUV

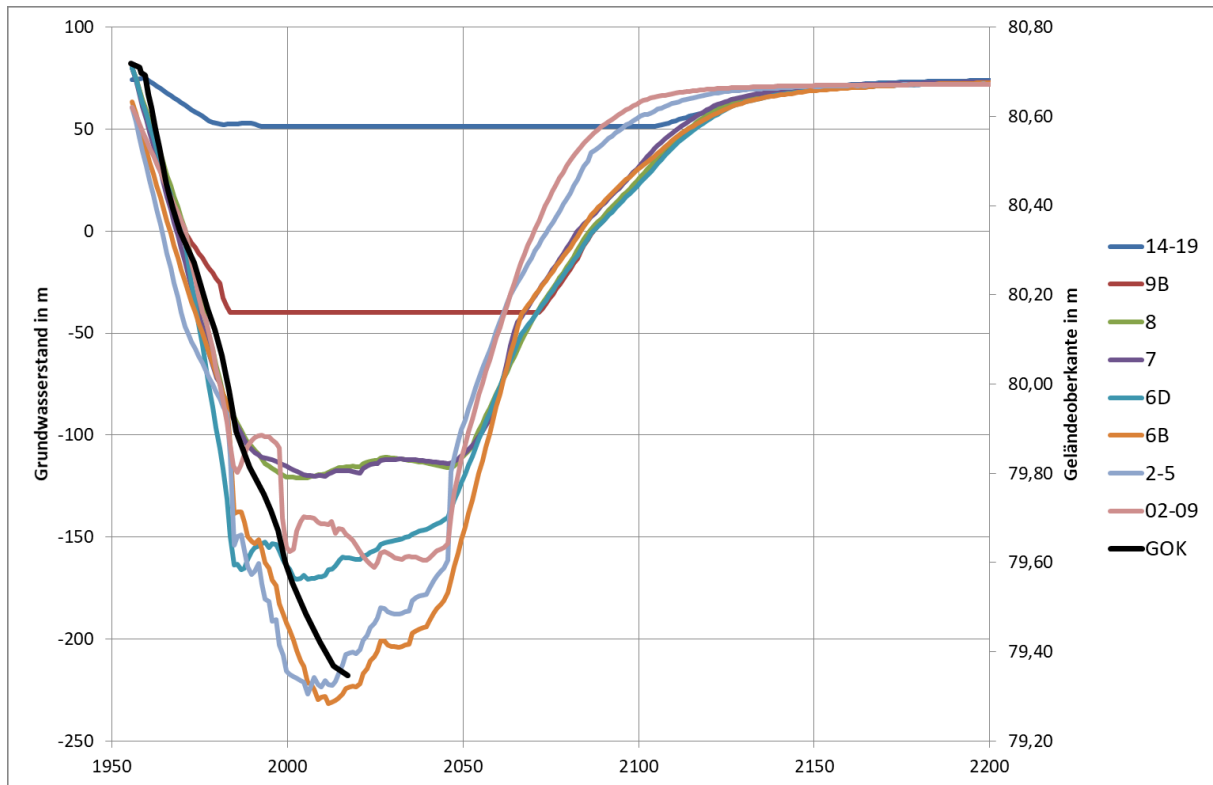


Abbildung 94 Grundwasserganglinien Oberembt, bereitgestellt durch LANUV

Die folgende Abbildung 95 zeigt die am Punkt Oberembt bis heute an der Geländeoberfläche gemessenen Bodenbewegungen (blau) sowie das Ergebnis der Nachrechnung (orange).

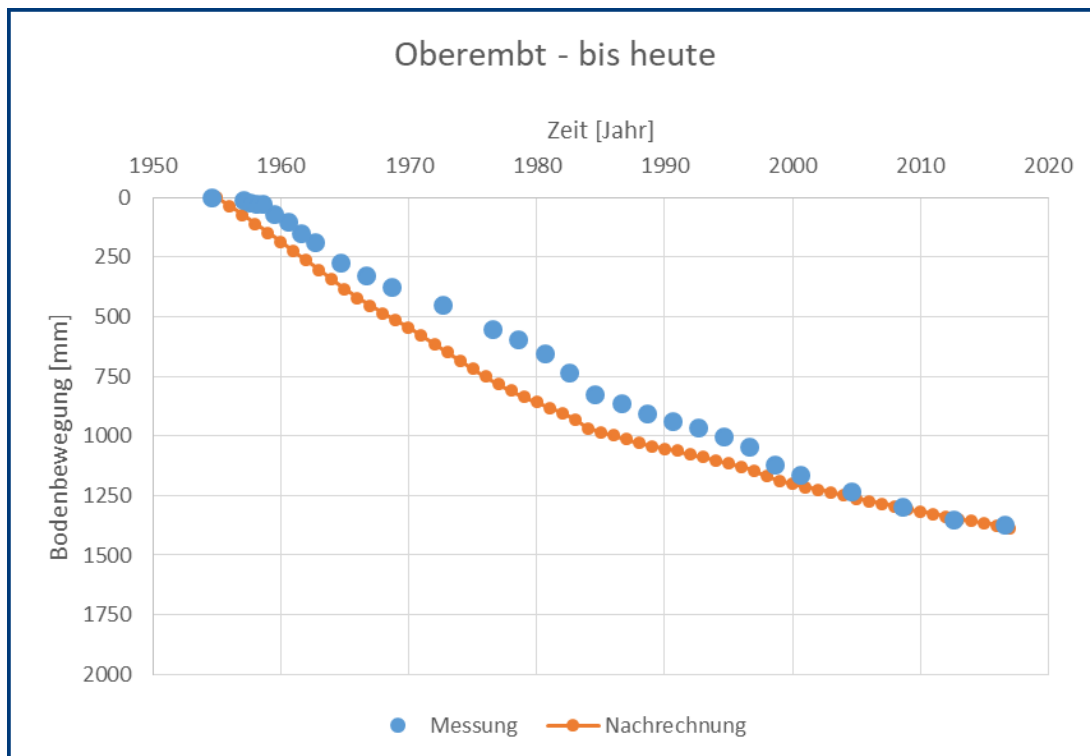


Abbildung 95 Nachrechnung für den Punkt Oberembt

Die gemessene Setzung am Punkt Oberembt beträgt im Jahr 2017 ca. 1,35 m, wobei eine vergleichsweise gleichmäßige Zunahme der Setzungen über die Zeit zu verzeichnen ist. Die Nachrechnung und die Messung stimmen insbesondere ab den 2000er Jahren sehr gut überein. Auch im Zeitraum davor wird eine gute Übereinstimmung erhalten, wobei die Nachrechnung die Setzungen allerdings etwas überschätzt.

Die mit dem Modell auf Basis der vom LANUV bereitgestellten Grundwasserganglinien erhaltene Prognose zeigt Abbildung 96.

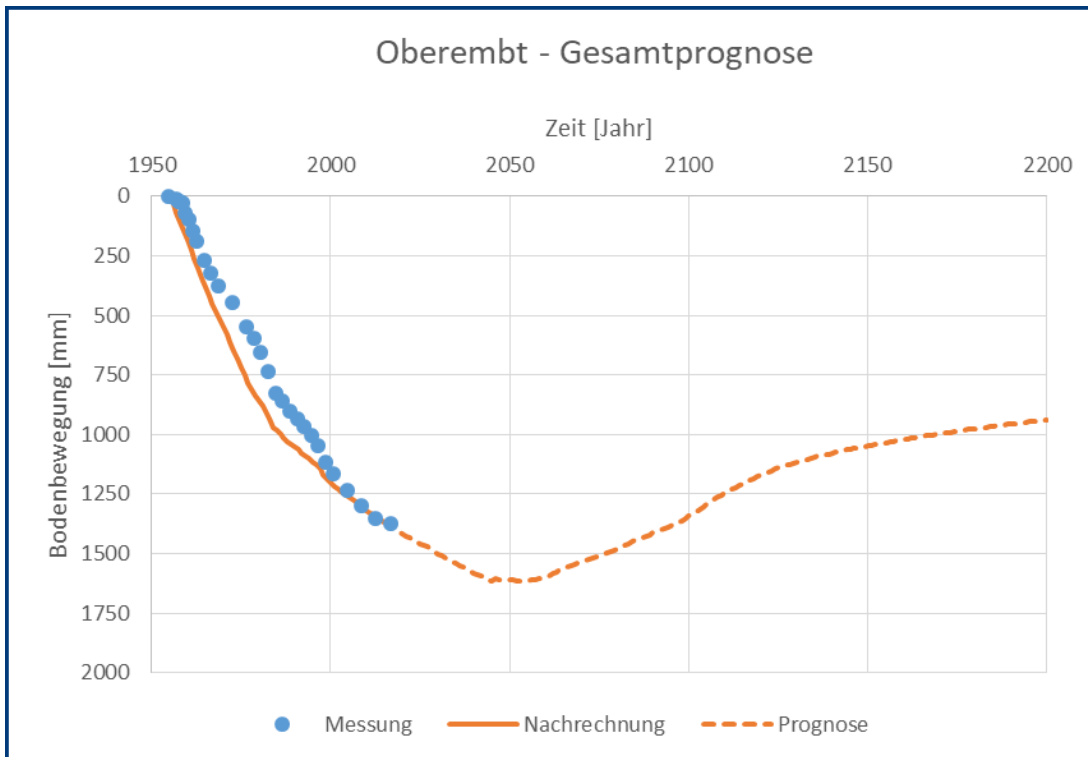


Abbildung 96 Prognose für den Punkt Oberembt

Gemäß Prognose werden die maximalen Setzungen um etwa 2050 erreicht und betragen dann ca. 1,6 m. Im Anschluss setzt die Hebungsphase ein, welche bis zum Ende des Prognosezeitraums zwar schon abklingt, aber noch nicht abgeschlossen sein wird. Im Jahr 2200 beträgt die Restsetzung noch knapp 1 m.

Die für das Modell Oberembt verwendeten Eingangsparameter können dem Anhang entnommen werden.

5.9 Glesch

Der Punkt Glesch liegt zwischen den Tagebaugebieten Garzweiler und Hambach, südlich der Stadt Bedburg an der Erft. (vgl. Abbildung 68). Die vom LANUV bereitgestellten Informationen zur Geologie und zum Leitnivellement können der folgenden Abbildung 97 entnommen werden, die ebenfalls vom LANUV bereitgestellten Grundwasserganglinien zeigt die nachfolgende Abbildung 98.

Geologie			Leitnivellement	
Profil			5005900105	
horizont	oberkante_m	bemerkung	datum	gok_m
14-19	64,7	nicht-bindig	01.06.1953	64,739
13	2,2	bindig	01.06.1957	64,719
12	-12,2	nicht-bindig	01.06.1959	64,655
11	-25,9	bindig	01.06.1961	64,501
10	-38,2	nicht-bindig	01.06.1963	64,334
9C	-44	bindig	01.06.1965	64,156
9B	-67	nicht-bindig	01.06.1967	63,935
9A	-77,6	bindig	01.06.1969	63,837
8	-104,8	nicht-bindig	01.06.1970	63,8
7F	-249	Flöz	01.06.1971	63,76
7E	-259,2	nicht-bindig	01.06.1972	63,702
7D	-288,5	Flöz	01.06.1973	63,605
7C/7A	-301,6	nicht-bindig	01.06.1974	63,54
6A-6E	-336,6	Flöz/bindig	01.06.1975	63,439
2-5	-425	nicht-bindig	01.06.1977	63,329
1	-623	bindig	01.05.1979	63,185
01-09	-684,6	nicht-bindig	01.05.1981	63,051
Tertiärbasis	-915,6		01.04.1983	62,94
			01.04.1985	62,884
			01.04.1987	62,84
			01.04.1989	62,794
			01.05.1991	62,745
			01.04.1993	62,707
			01.05.1995	62,661
			01.05.1997	62,612
			01.05.1999	62,556
			01.05.2001	62,518
			01.05.2003	62,49
			01.04.2005	62,46
			01.05.2009	62,386
			01.04.2013	62,322
			01.05.2017	62,265

Abbildung 97 Ausschnitt Eingangsdaten Glesch, bereitgestellt durch LANUV

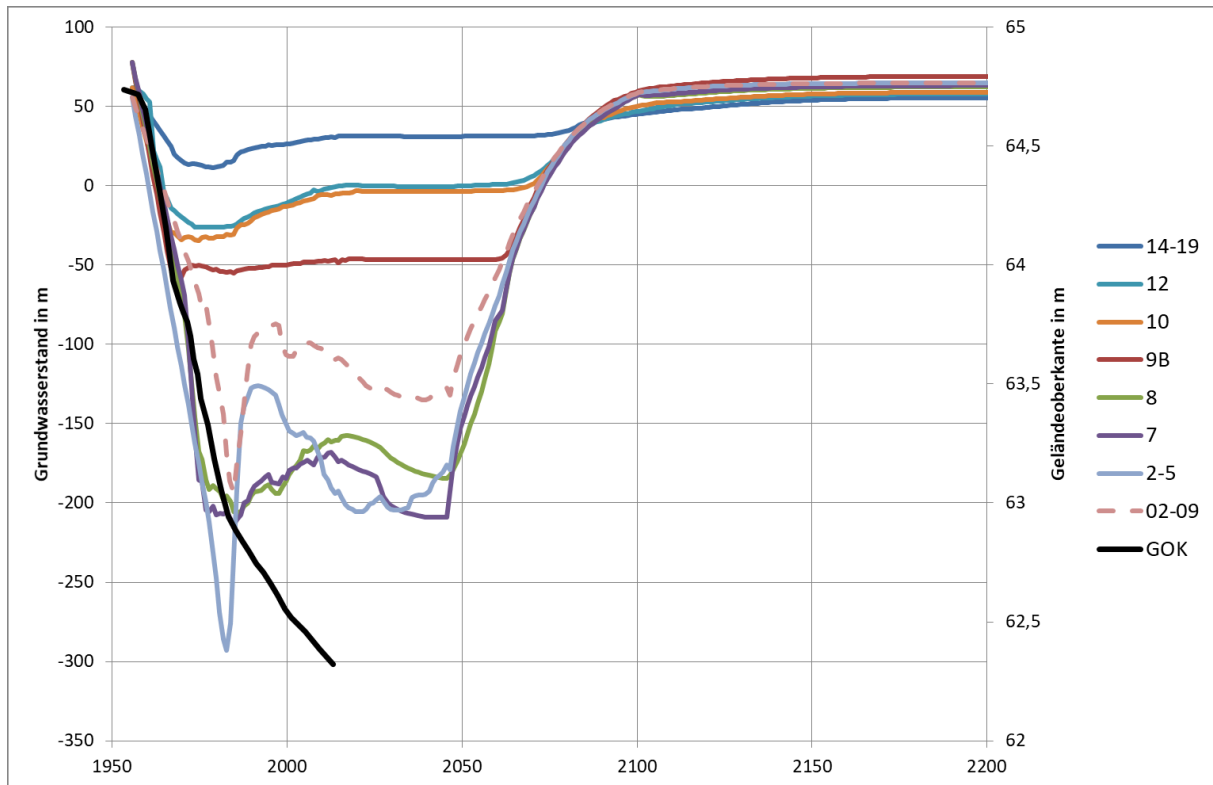


Abbildung 98 Grundwasserganglinien Glesch, bereitgestellt durch LANUV

Die folgende Abbildung 99 zeigt die am Punkt Glesch bis heute an der Geländeoberfläche gemessenen Bodenbewegungen (blau) sowie das Ergebnis der Nachrechnung (orange).

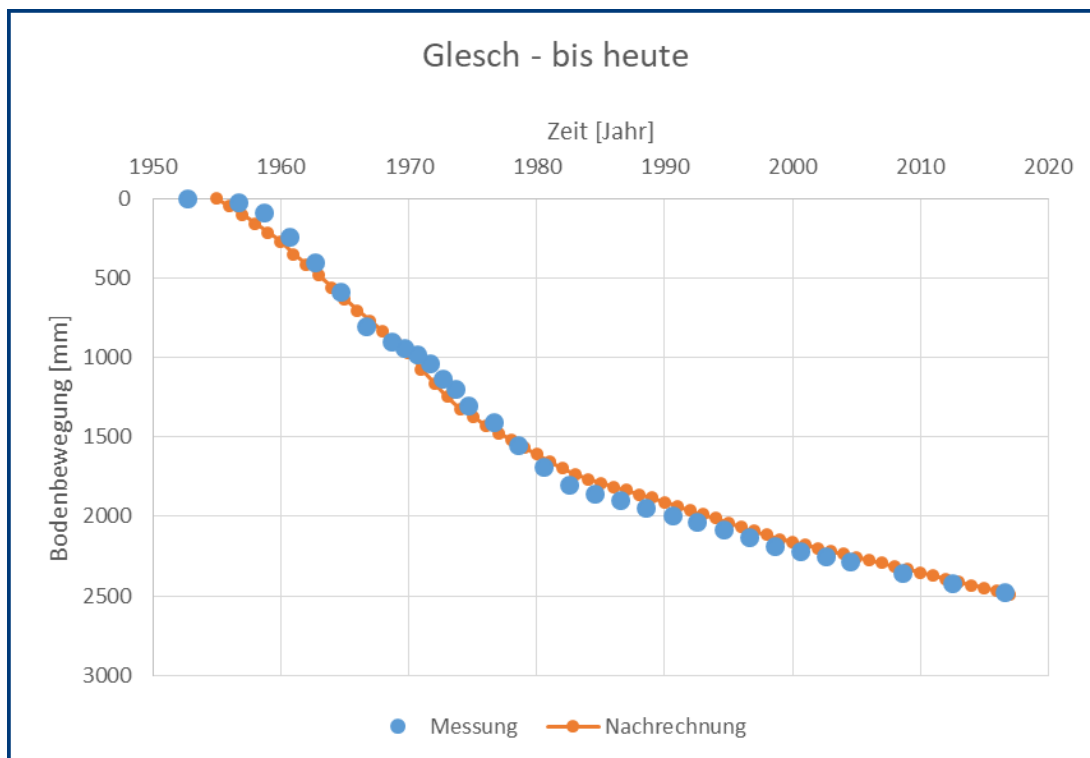


Abbildung 99 Nachrechnung für den Punkt Glesch

Bis heute haben sich am Punkt Glesch Setzungen von ca. 2,5 m eingestellt. Dabei ist zu beobachten, dass sich der Setzungsverlauf ab etwa 1980 etwas flacher als zuvor darstellt. Das Bodenbewegungsverhalten wird durch die Nachrechnung insgesamt sehr gut abgebildet.

Die mit dem Modell auf Basis der vom LANUV bereitgestellten Grundwasserganglinien erhaltene Prognose zeigt Abbildung 100.

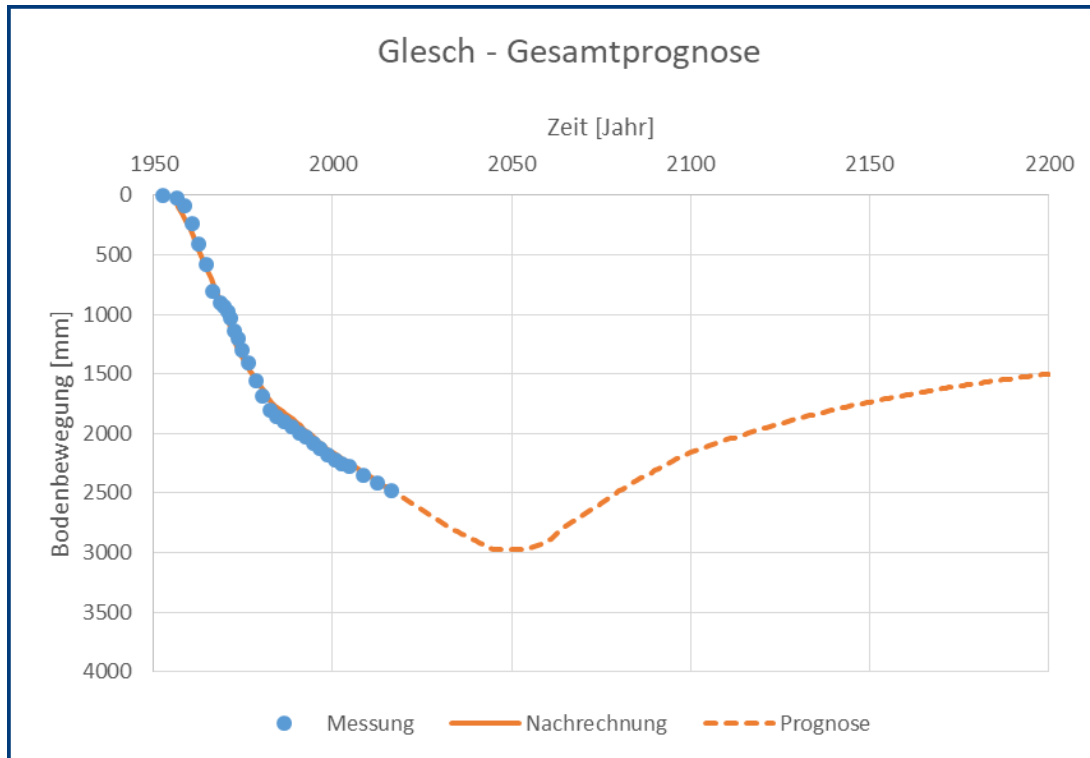


Abbildung 100 Prognose für den Punkt Glesch

Demnach setzt sich der abgeschwächte Setzungsverlauf bis ins Jahr 2050 fort und die Setzungen erreichen dann mit etwa 3 m ihren höchsten Wert. Der einsetzende Hebungsprozess weist zunächst eine große Steigung auf, schwächt sich dann ab dem Jahr 2100 immer weiter ab und wird zum Jahr 2200 aber noch nicht komplett abgeschlossen sein. Die im Jahr 2200 noch vorhandenen Setzungen betragen rund 1,5 m.

Die für das Modell Glesch verwendeten Eingangsparameter können dem Anhang entnommen werden.

5.10 Ahe

Der Punkt Ahe liegt östlich des Tagebaus Hambach an der Erft, mittig zwischen Bedburg im Norden und Kerpen im Süden (vgl. Abbildung 68). Die vom LANUV bereitgestellten Informationen zur Geologie und zum Leitnivelement können der folgenden Abbildung 101 entnommen werden, die ebenfalls vom LANUV bereitgestellten Grundwasserganglinien zeigt die nachfolgende Abbildung 102.

Geologie			Leitnivelement	
Profil			5005900117	
horizont	oberkante_m	bemerkung	datum	gok_m
14-19	71,58	nicht-bindig	01.06.1953	71,575
13	-8,46	bindig	01.06.1957	71,551
12	-25,67	nicht-bindig	01.06.1959	71,468
11	-41,77	bindig	01.06.1961	71,356
10	-56,99	nicht-bindig	01.06.1963	71,225
9C	-84,95	bindig	01.06.1965	71,131
9B	-98,00	nicht-bindig	01.06.1967	71,008
9A	-120,47	bindig	01.06.1969	70,911
8	-153,57	nicht-bindig	01.06.1970	70,858
7F	-317,02	Flöz	01.06.1971	70,814
7E	-338,60	nicht-bindig	01.06.1972	70,76
7D	-356,98	Flöz	01.06.1973	70,674
7C/7A	-389,59	nicht-bindig	01.06.1974	70,578
6A-6E	-422,83	Flöz	01.06.1975	70,453
2-5	-635,44	nicht-bindig	01.06.1977	70,325
1	-849,42	bindig	01.05.1979	70,16
01-09	-919,38	nicht-bindig	01.05.1981	69,988
Tertiärbasis	-1460,31		01.04.1983	69,809
			01.04.1985	69,626
			01.04.1987	69,475
			01.04.1989	69,339
			01.04.1991	69,215
			01.04.1993	69,111
			01.04.1995	69,009
			01.04.1997	68,911
			01.04.1999	68,804
			01.04.2001	68,719
			01.04.2005	68,576
			01.05.2009	68,423
			01.04.2013	68,284
			01.05.2017	68,14

Abbildung 101 Ausschnitt Eingangsdaten Ahe, bereitgestellt durch LANUV

Laut Schichtenprofil wird das Flöz 6A-E als eine durchgehende Schicht mit einer Mächtigkeit von etwa 200 m angegeben. In den übrigen betrachteten Punkten wurden hingegen für die Flöze der Horizonte 6 maximale Mächtigkeiten von etwa 80 m (vgl. 6.5 Körrenzig und 6.9 Gleich) angegeben. Es erscheint höchst unwahrscheinlich, dass der Flöz 6A-E am Punkt Ahe so homogen ist, dass er in keiner Form über nichtbindige Zwischenschichten oder Einlagerungen entwässern kann. Daher wurde die für die Konsolidierung relevante Mächtigkeit der Schicht 6A-E von dem üblichen Wert $\frac{1}{2}$ auf $\frac{1}{6}$ reduziert, was einer durchgehenden Schichtmächtigkeit von etwa 70 m und damit den sonst üblichen Maximalwerten entspricht. Die setzungsrelevante Mächtigkeit wurde hingegen wie angegeben übernommen.

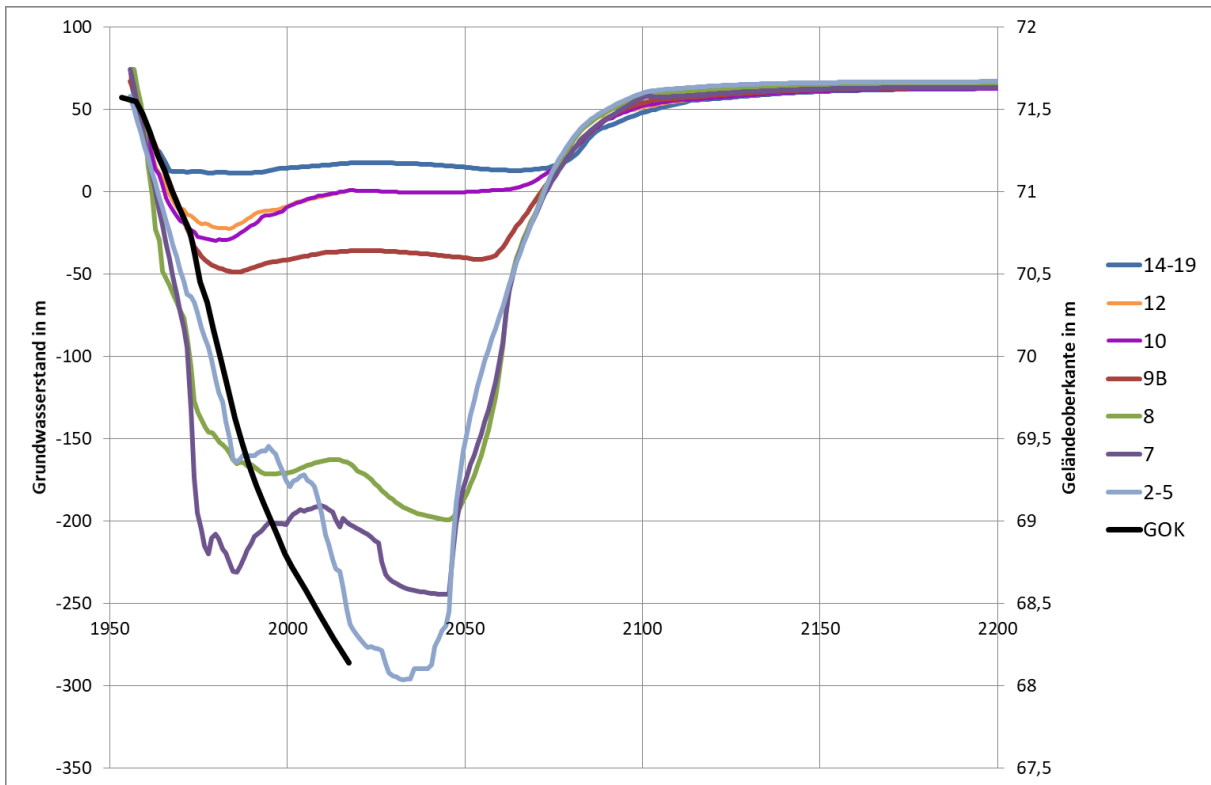


Abbildung 102 Grundwasserganglinien Ahe, bereitgestellt durch LANUV

Die folgende Abbildung 103 zeigt die am Punkt Ahe bis heute an der Geländeoberfläche gemessenen Bodenbewegungen (blau) sowie das Ergebnis der Nachrechnung (orange).

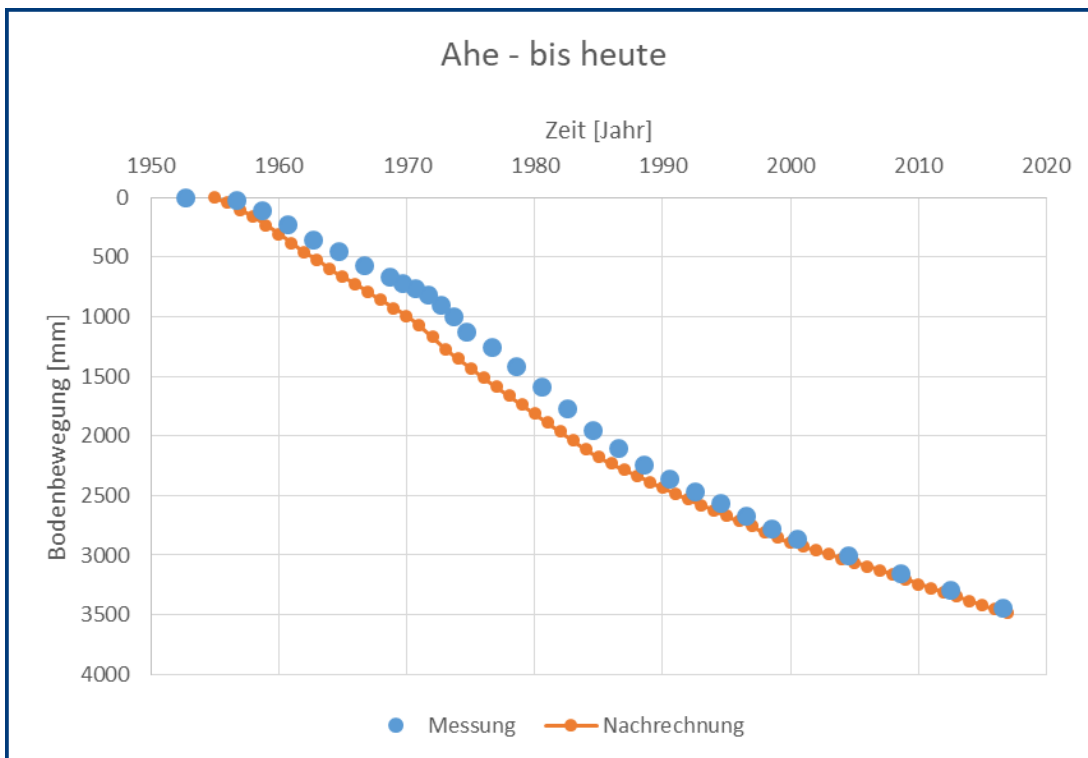


Abbildung 103 Nachrechnung für den Punkt Ahe

Bis heute haben sich am Punkt Ahe Setzungen in Höhe von ca. 3,5 m eingestellt. Die Nachrechnung bildet den Verlauf der Messung sehr gut ab, wobei insbesondere ab den 1990er Jahren eine sehr gute Übereinstimmung erzielt wird.

Die mit dem Modell auf Basis der vom LANUV bereitgestellten Grundwasserganglinien erhaltene Prognose zeigt Abbildung 104.

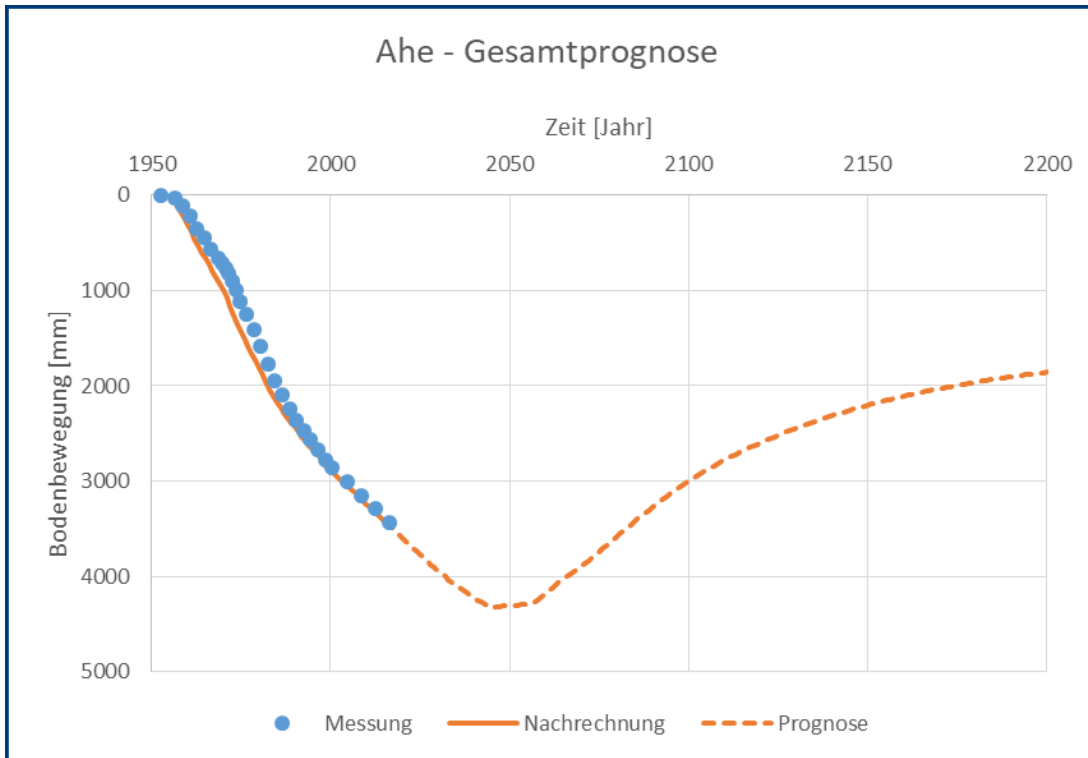


Abbildung 104 Prognose für den Punkt Ahe

Die Prognose gibt die maximale Setzung am Punkt Ahe um das Jahr 2050 mit etwa 4,3 m an. In der sich anschließenden Hebungsphase flacht der Verlauf etwa ab dem Jahr 2100 ab, der Hebungsprozess ist bis zum Ende des Prognosezeitraums aber noch nicht abgeschlossen. Im Jahr 2200 wird eine bis dahin verbleibende Setzung von ca. 1,9 m prognostiziert.

Die für das Modell Ahe verwendeten Eingangsparameter können dem Anhang entnommen werden.

5.11 Erftstadt

Der Punkt Erftstadt befindet sich an der Erft, südöstlich von Kerpen. Er ist der südöstlichste Punkt, der betrachtet wurde (vgl. Abbildung 68). Die vom LANUV bereitgestellten Informationen zur Geologie und zum Leitnivelement können der folgenden Abbildung 105 entnommen werden, die ebenfalls vom LANUV bereitgestellten Grundwasserganglinien zeigt die nachfolgende Abbildung 106.

Geologie			Leitnivelement	
Profil			5106900117	
horizont	oberkante_m	bemerkung	datum	gok_m
14-19	101,55	nicht-bindig	01.06.1953	101,55
13	33,98	bindig	01.06.1957	101,534
12	27,24	nicht-bindig	01.06.1959	101,49
11	5,43	bindig	01.06.1961	101,455
10	3,30	nicht-bindig	01.06.1963	101,409
9C	-10,10	bindig	01.06.1965	101,36
9B	-32,14	nicht-bindig	01.06.1967	101,322
9A	-52,48	bindig	01.06.1969	101,256
8	-74,36	nicht-bindig	01.06.1973	101,159
7F/7D	-211,51	Flöz	01.06.1977	101,06
7C/7A	-250,49	nicht-bindig	01.05.1979	101,004
6A-6E	-275,00	Flöz	01.05.1981	100,943
2-5	-350,00	nicht-bindig	01.05.1983	100,874
1	-616,98	bindig	01.05.1985	100,806
01-09	-671,01	nicht-bindig	01.05.1987	100,753
Tertiärbasis	-872,39		01.05.1989	100,707
			01.05.1991	100,662
			01.05.1993	100,624
			01.05.1995	100,584
			01.04.1997	100,544
			01.05.1999	100,502
			01.05.2001	100,463
			01.05.2005	100,401
			01.05.2009	100,338
			01.04.2013	100,275
			01.04.2017	100,211

Abbildung 105 Ausschnitt Eingangsdaten Erftstadt, bereitgestellt durch LANUV

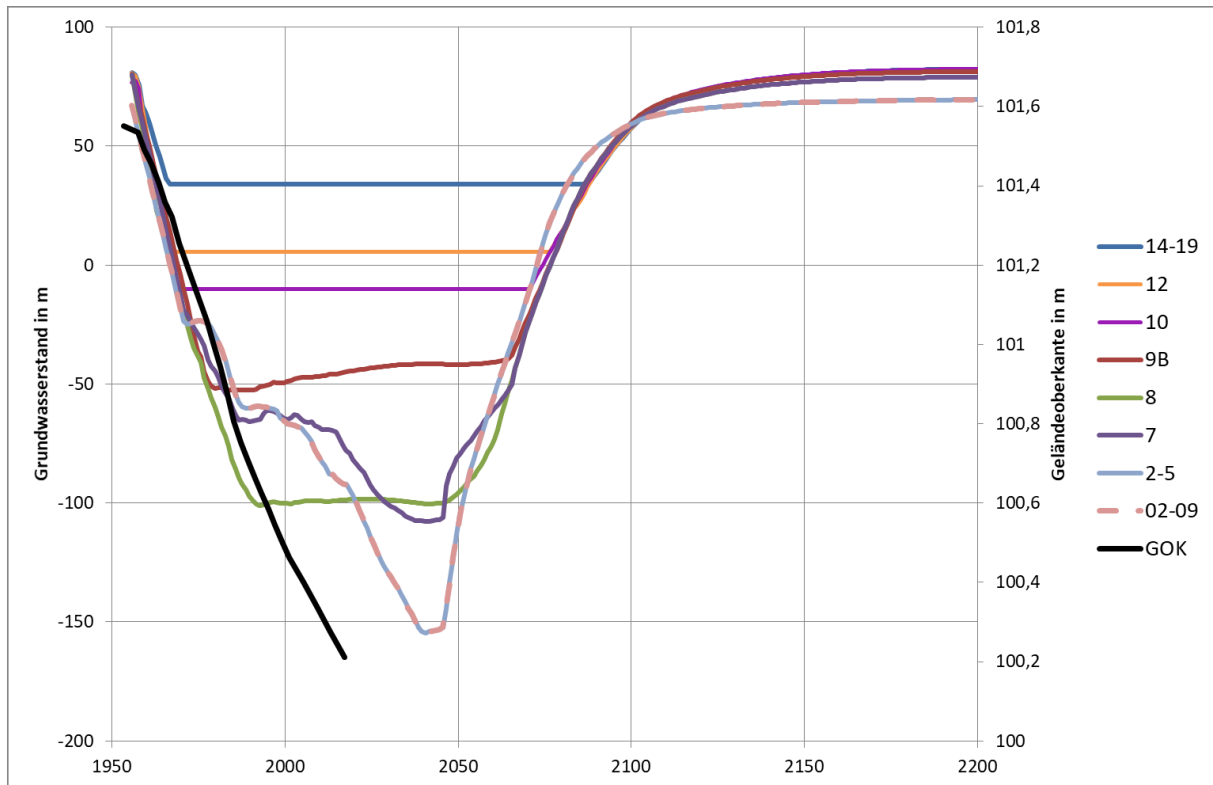


Abbildung 106 Grundwasserganglinien Erfstadt, bereitgestellt durch LANUV

Die folgende Abbildung 107 zeigt die am Punkt Erfstadt bis heute an der Geländeoberfläche gemessenen Bodenbewegungen (blau) sowie das Ergebnis der Nachrechnung (orange).

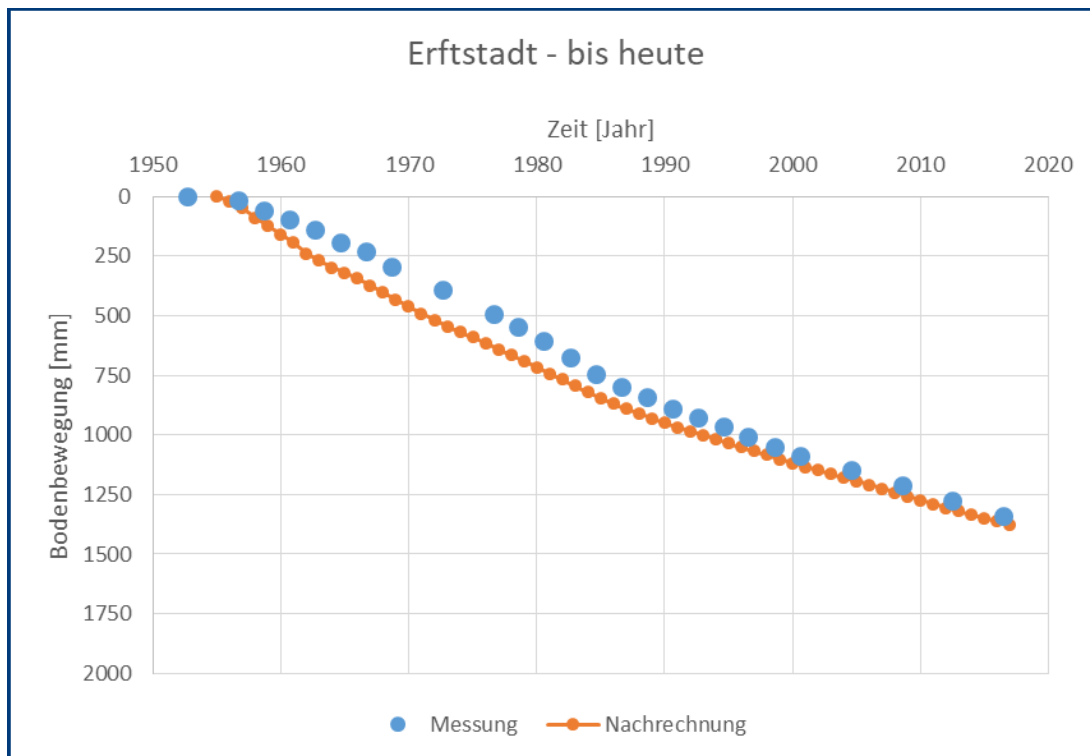


Abbildung 107 Nachrechnung für den Punkt Erfstadt

Am Punkt Erftstadt werden die bis heute eingetretenen Setzungen mit etwa 1,3 m angegeben. Die Nachrechnung bildet den Verlauf der Messung gut nach, wobei ab dem Jahr 2000 eine sehr gute Übereinstimmung festzustellen ist. Zwischen den Jahren 1960 und 1985 überschätzt die Nachrechnung die tatsächliche Bodenbewegung geringfügig.

Die mit dem Modell auf Basis der vom LANUV bereitgestellten Grundwasserganglinien erhaltene Prognose zeigt Abbildung 108.

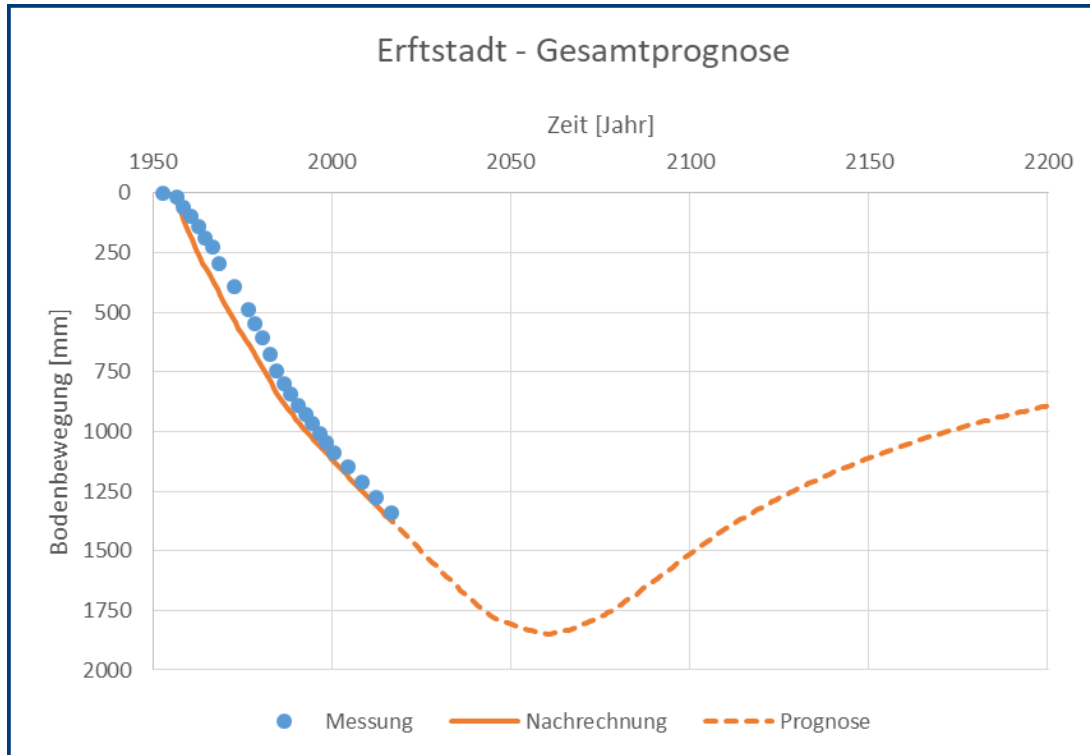


Abbildung 108 Prognose für den Punkt Erftstadt

Die maximale Setzung am Punkt Erftstadt wird erst um das Jahr 2060 prognostiziert und beträgt dann ca. 1,85 m. Die anschließende Hebungsphase wird bis zum Ende des Prognosezeitraums noch nicht abgeschlossen sein. Im Jahr 2200 beträgt die bis dahin verbleibende Restsetzung noch ca. 90 cm.

Die für das Modell Erftstadt verwendeten Eingangsparameter können dem Anhang entnommen werden.

5.12 Wanlo

Der Punkt Wanlo liegt westlich des Tagebaus Garzweiler etwa mittig zwischen Jüchen und Erkelenz. Wanlo ist der südlichste Stadtteil der Stadt Mönchengladbach (vgl. Abbildung 68). Die vom LANUV bereitgestellten Informationen zur Geologie und zum Leitnivelement können der folgenden Abbildung 109 entnommen werden, die ebenfalls vom LANUV bereitgestellten Grundwasserganglinien zeigt die nachfolgende Abbildung 110.

Geologie			Leitnivelement	
Profil			4804900328	
horizont	oberkante_m	bemerkung	datum	gok_m
14-19, 12	69,7	nicht-bindig	01.10.1956	69,676
11C	48	bindig	01.06.1981	69,564
10	46	nicht-bindig	01.05.1985	69,548
9C	34	bindig	01.05.1987	69,536
8	31	nicht-bindig	01.04.1993	69,517
6D	15	nicht-bindig	01.05.1995	69,501
6D Schluff	-50	bindig	01.04.1997	69,49
6D	-69	nicht-bindig	01.04.1999	69,476
6C	-90	Flöz	01.06.2001	69,467
6B	-99	nicht-bindig	01.05.2005	69,432
6A	-133	Flöz	01.05.2009	69,397
4-5	-149	nicht-bindig	01.04.2013	69,339
Tertiärbasis	-460		01.04.2017	69,298

Abbildung 109 Ausschnitt Eingangsdaten Wanlo, bereitgestellt durch LANUV

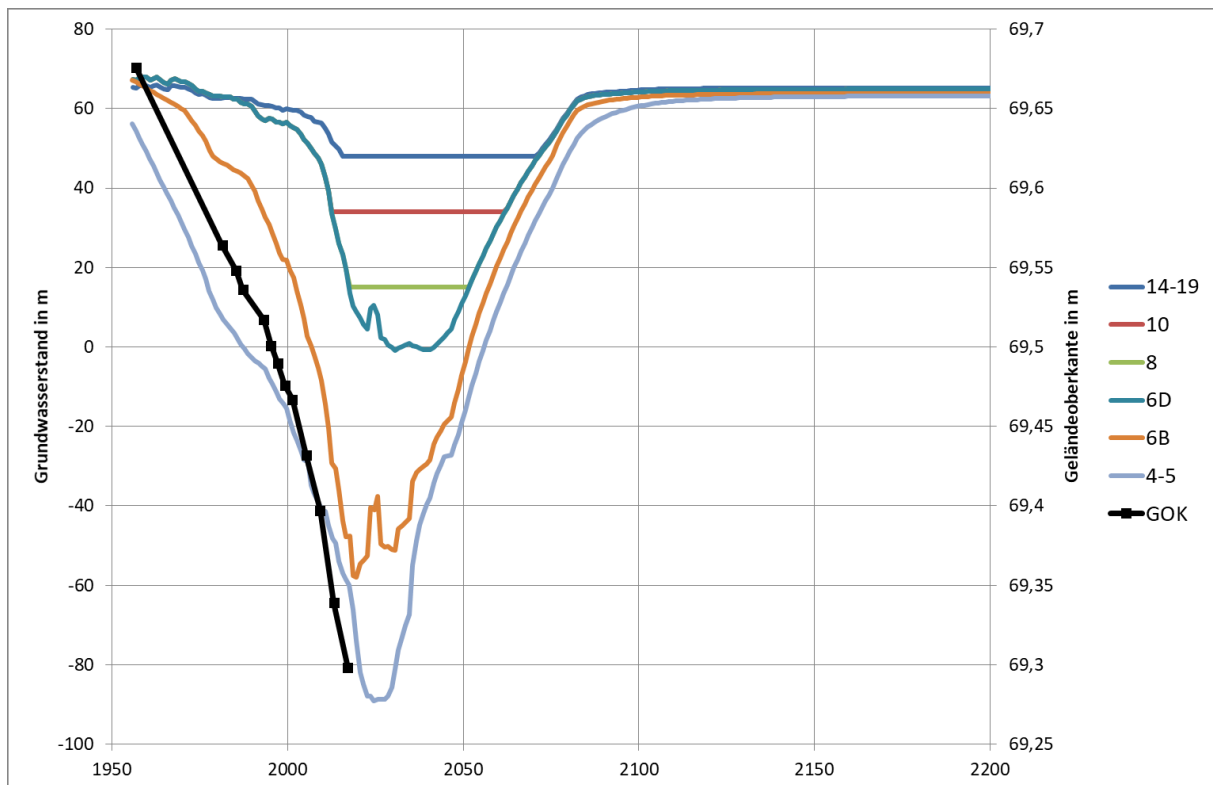


Abbildung 110 Grundwasserganglinien Wanlo, bereitgestellt durch LANUV

Die folgende Abbildung 111 zeigt die am Punkt Wanlo bis heute an der Geländeoberfläche gemessenen Bodenbewegungen (blau) sowie das Ergebnis der Nachrechnung (orange).

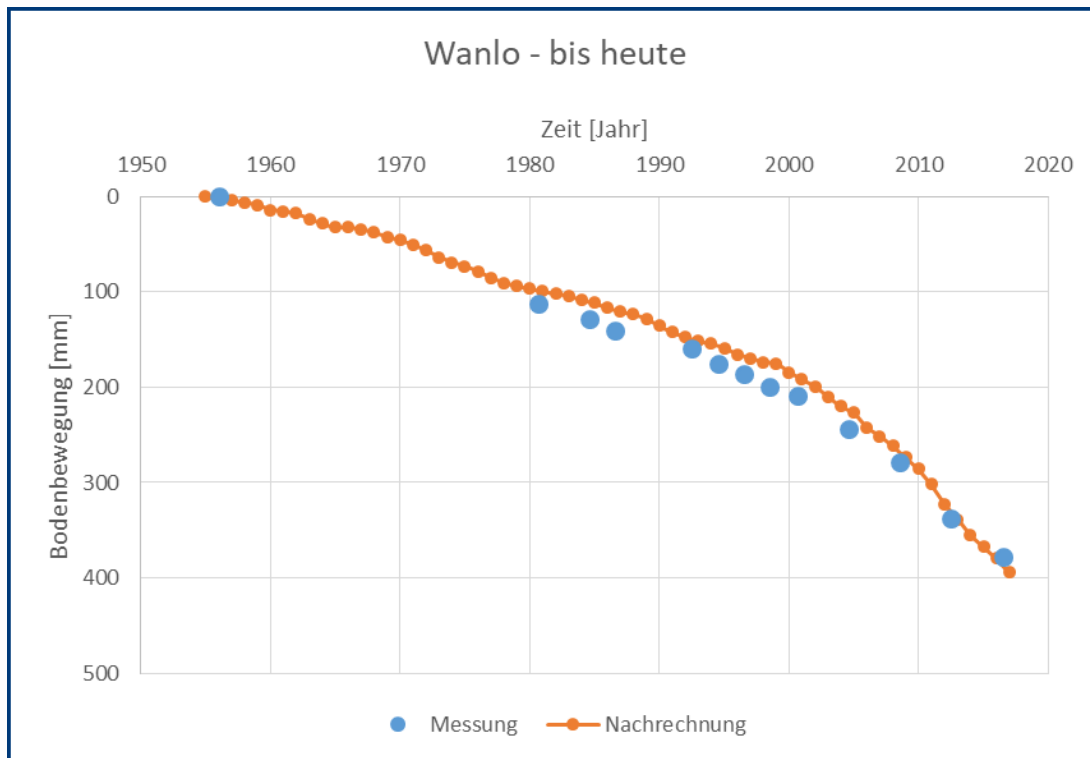


Abbildung 111 Nachrechnung für den Punkt Wanlo

Bis heute wurden am Punkt Wanlo Setzungen von knapp 40 cm gemessen, wobei ab Mitte der 2000er Jahre eine größere Setzungszunahme gegenüber den vorherigen Jahren zu verzeichnen ist. Dieses an der Geländeoberfläche beobachtete Verhalten kann mit dem Modell sehr gut abgebildet werden und es treten zwischen Messung und Nachrechnung nur marginale Abweichungen auf.

Die mit dem Modell auf Basis der vom LANUV bereitgestellten Grundwasserganglinien erhaltene Prognose zeigt Abbildung 112.

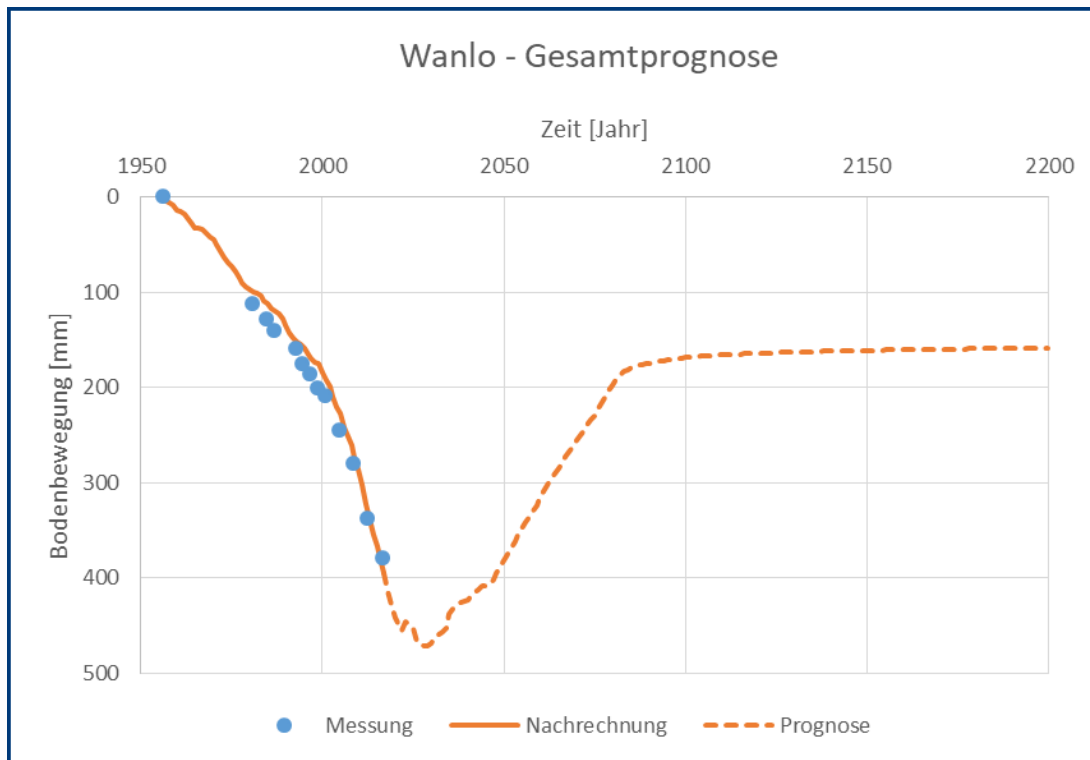


Abbildung 112 Prognose für den Punkt Wanlo

Demnach werden bis etwa 2030 weiterhin Setzungen prognostiziert, die dann maximal knapp 50 cm betragen. Daran schließen sich dann Hebungen an, die ab etwa 2100 mehr oder weniger abgeklungen sein werden. Gegenüber dem Ausgangszustand verbleiben gemäß Prognose Setzungen von etwa 15 cm.

Die für das Modell Wanlo verwendeten Eingangsparameter können dem Anhang entnommen werden.

5.13 Odenkirchen

Der Punkt Odenkirchen liegt im Stadtgebiet Mönchengladbachs und ist der nördlichste Punkt, der betrachtet wurde (vgl. Abbildung 68). Die vom LANUV bereitgestellten Informationen zur Geologie und zum Leitnivellement können der folgenden Abbildung 113 entnommen werden, die ebenfalls vom LANUV bereitgestellten Grundwasserganglinien zeigt die nachfolgende Abbildung 114.

Geologie			Leitnivellement	
Profil			4804900315	
horizont	oberkante_m	bemerkung	datum	gok_m
14-19, 12	57,2	nicht-bindig	01.10.1956	57,211
11C	43,7	bindig	01.06.1981	57,106
8	35,6	nicht-bindig	01.05.1987	57,083
6D	19,5	nicht-bindig	01.05.1993	57,057
6C	-99,9	Flöz	01.05.1995	57,049
6B	-109,8	nicht-bindig	01.05.1997	57,032
6A	-145,6	Flöz	01.05.1999	57,02
4-5	-163,4	nicht-bindig	01.05.2001	57,011
Tertiärbasis	-520		01.05.2005	56,982
			01.04.2009	56,956
			01.04.2013	56,929
			01.05.2017	56,91

Abbildung 113 Ausschnitt Eingangsdaten Odenkirchen, bereitgestellt durch LANUV

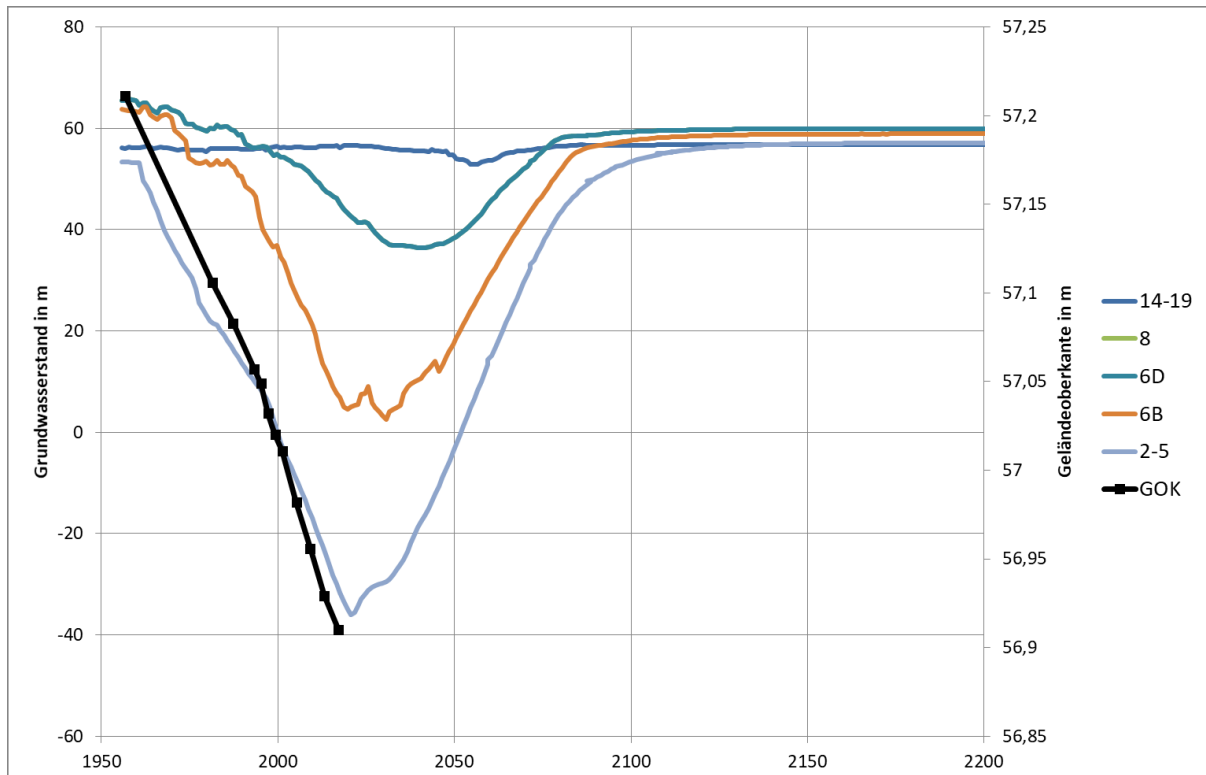


Abbildung 114 Grundwasserganglinien Odenkirchen, bereitgestellt durch LANUV

Die folgende Abbildung 115 zeigt die am Punkt Odenkirchen bis heute an der Geländeoberfläche gemessenen Bodenbewegungen (blau) sowie das Ergebnis der Nachrechnung (orange).

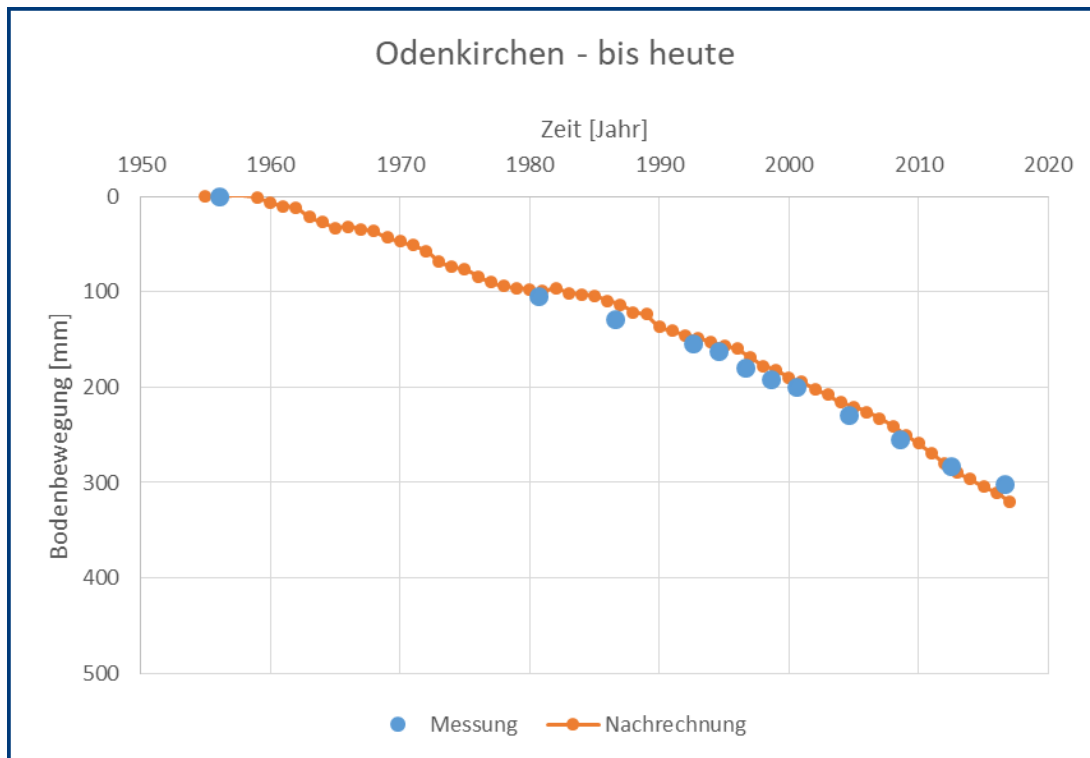


Abbildung 115 Nachrechnung für den Punkt Odenkirchen

Bis heute haben sich am Punkt Odenkirchen Setzungen in Höhe von etwa 30 cm eingestellt. Die Zunahme an Setzungen erfolgte weitgehend gleichmäßig. Nachrechnung und Messung zeigen insgesamt eine sehr gute Übereinstimmung.

Die mit dem Modell auf Basis der vom LANUV bereitgestellten Grundwasserganglinien erhaltene Prognose zeigt Abbildung 116.

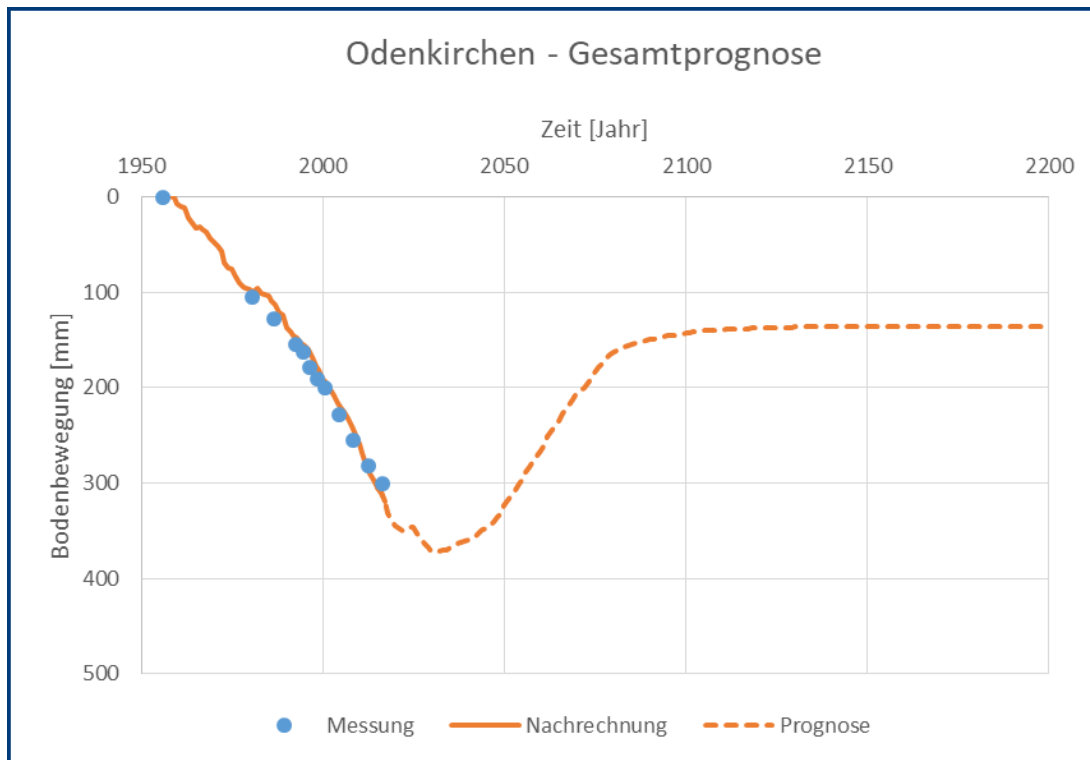


Abbildung 116 Prognose für den Punkt Odenkirchen

Für den Punkt Odenkirchen werden zunächst weiter anhaltende Setzungen bis etwa 2030 prognostiziert, wobei es aber in den Jahren 2023 und 2024 zwischenzeitlich zu geringfügigen Hebungen kommen soll. Die maximalen Setzungen betragen rund 37 cm. Im Anschluss finden dann Hebungen statt, die sich etwa ab den 2080er Jahren stark abschwächen und im Jahr 2200 abgeklungen sein werden. Es verbleibt eine prognostizierte Restsetzung von ca. 13 cm.

Die für das Modell Odenkirchen verwendeten Eingangsparameter können dem Anhang entnommen werden.

5.14 Zusammenfassung und Typisierung der einzelnen Punkte

In Ergänzung zur ursprünglichen Aufgabenstellung, für die vorherigen 13 Punkte jeweils eine Prognose der Bodenbewegungen aufzustellen, wurde im Rahmen des 3. Arbeitstreffen beim LANUV am 06.02.2019 die Frage aufgeworfen, inwiefern einzelne Punkte in ihrem Verhalten ähnlich sind und sich gegebenenfalls zusammenfassen bzw. typisieren lassen.

Vor diesem Hintergrund wäre zunächst eine Typisierung entsprechend der Zuordnung zu den einzelnen Schollen naheliegend. Von den 13 betrachteten Punkten liegen sechs Punkte auf der Rurscholle, fünf Punkte auf der Erftscholle und zwei Punkte auf der Venloer Scholle, wie die folgende Abbildung 117 zeigt.

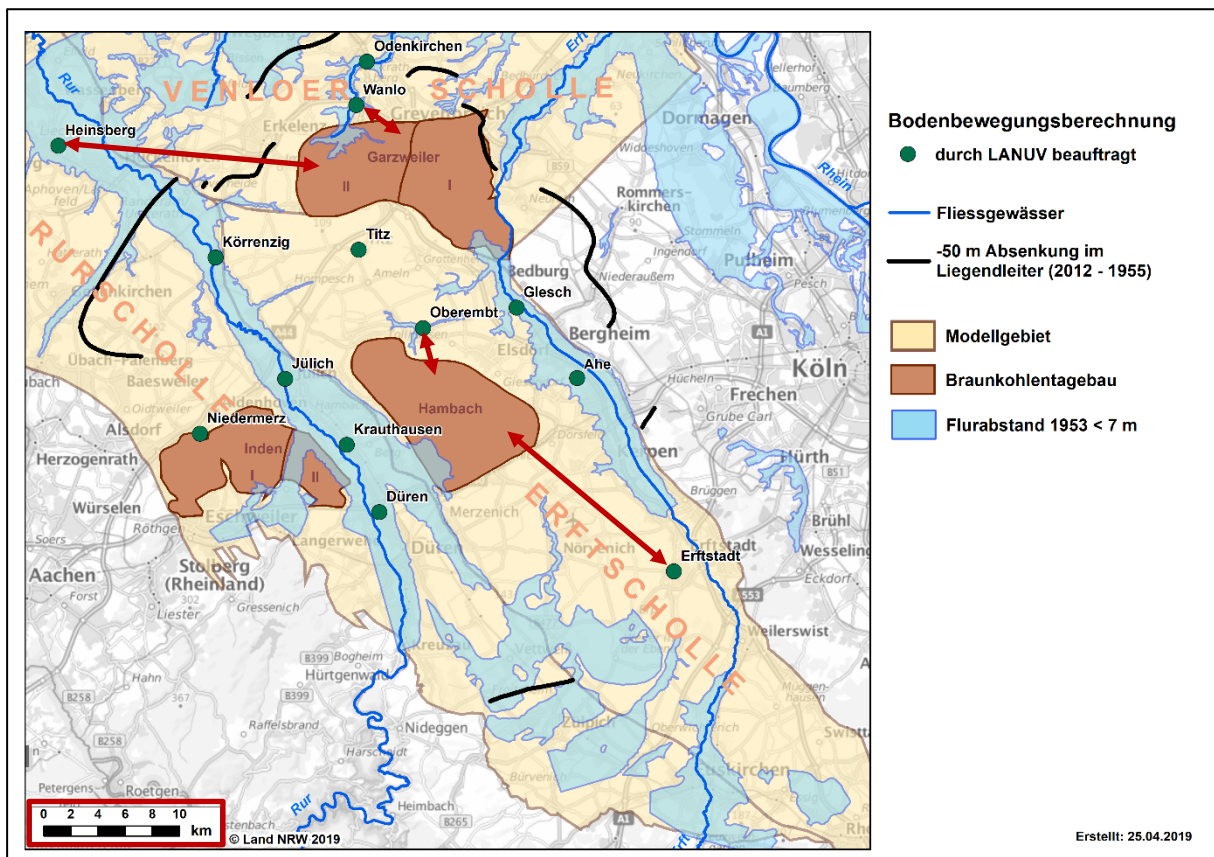


Abbildung 117 Übersicht Punkte (Quelle: LANUV) mit eigenen Eintragungen

Allerdings sind auch die einzelnen Schollen wiederum durch verschiedenen Verwerfungen bzw. Sprünge, unterschiedliche Schiefstellungen und insbesondere durch variable Schichtmächtigkeiten und die variable Tiefenlage der Tertiärunterkante geprägt, wie der nachfolgenden Abbildung 118 entnommen werden kann. Demnach kommt die Unterkante des Tertiärs je nach Lage in einer Tiefe zwischen etwa -200 mNN und -1.400 mNN zum Liegen.

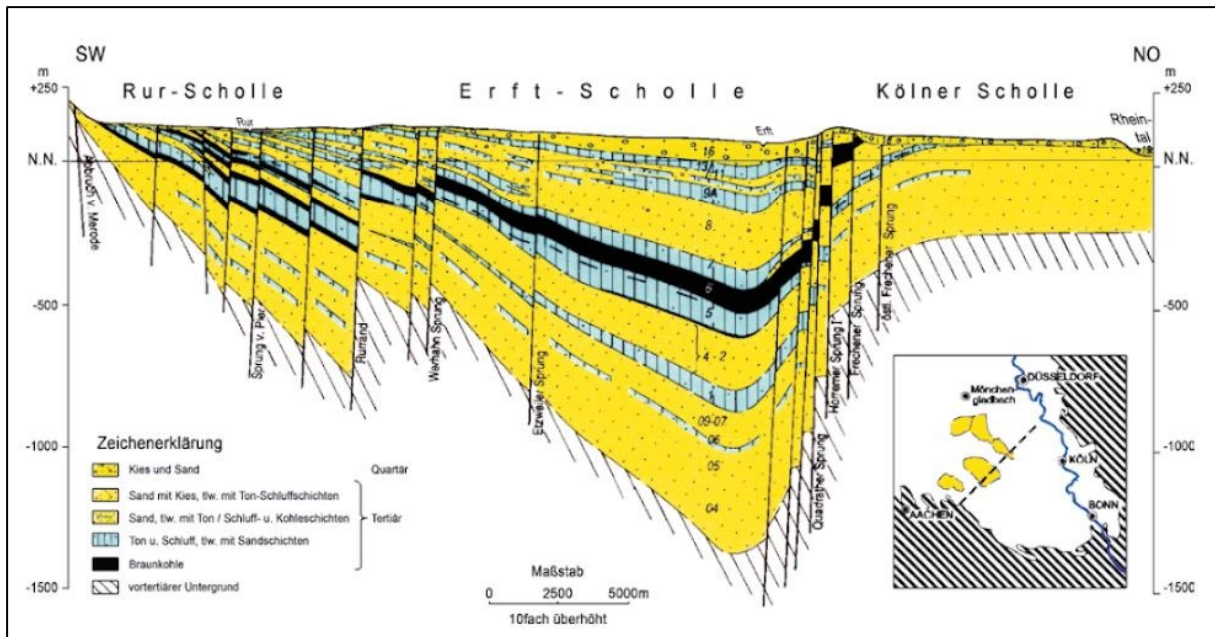


Abbildung 118 Schnitt durch die Lockergesteinsschichtenabfolge der Niederrheinischen Bucht aus [8]

Weiter kann Abbildung 117 entnommen werden, dass die Entfernung der einzelnen Punkte zum jeweils nächstgelegenen Tagebau zwischen weniger als 2 km (z.B. Wanlo oder Oberembt) und mehr als 20 km (z.B. Heinsberg oder Erfstadt) schwankt. Aus der Entfernung zu den Tagebauen und der Geologie zwischen den Punkten und den Tagebauen resultieren aber auch zwangsläufig deutlich unterschiedliche Beeinflussungen der Grundwasserstände.

Die folgende Darstellung enthält exemplarisch die auf den gleichen Maßstab skalierten Grundwasserganglinien für den tagebaufernen Punkt Körrenzig und den tagebaunahen Punkt Glesch.

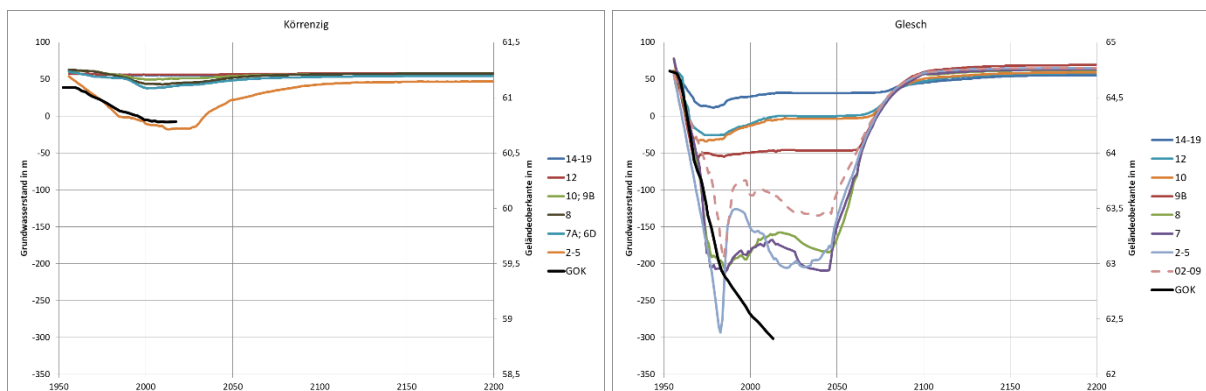


Abbildung 119 Grundwasserganglinien Körrenzig (links) und Glesch (rechts) gleich skaliert

Es ist ersichtlich, dass sich sowohl die Verläufe der Grundwasserganglinien als auch die Größenordnung der Grundwasserabsenkung deutlich unterscheiden. Daraus resultieren dann aber auch deutlich unterschiedliche Spannungsänderungen.

Die wechselhafte Geologie aller 13 betrachteter Punkte kann der folgenden Abbildung 120 entnommen werden, in der die Schichtenabfolge annähernd maßstäblich dargestellt ist.

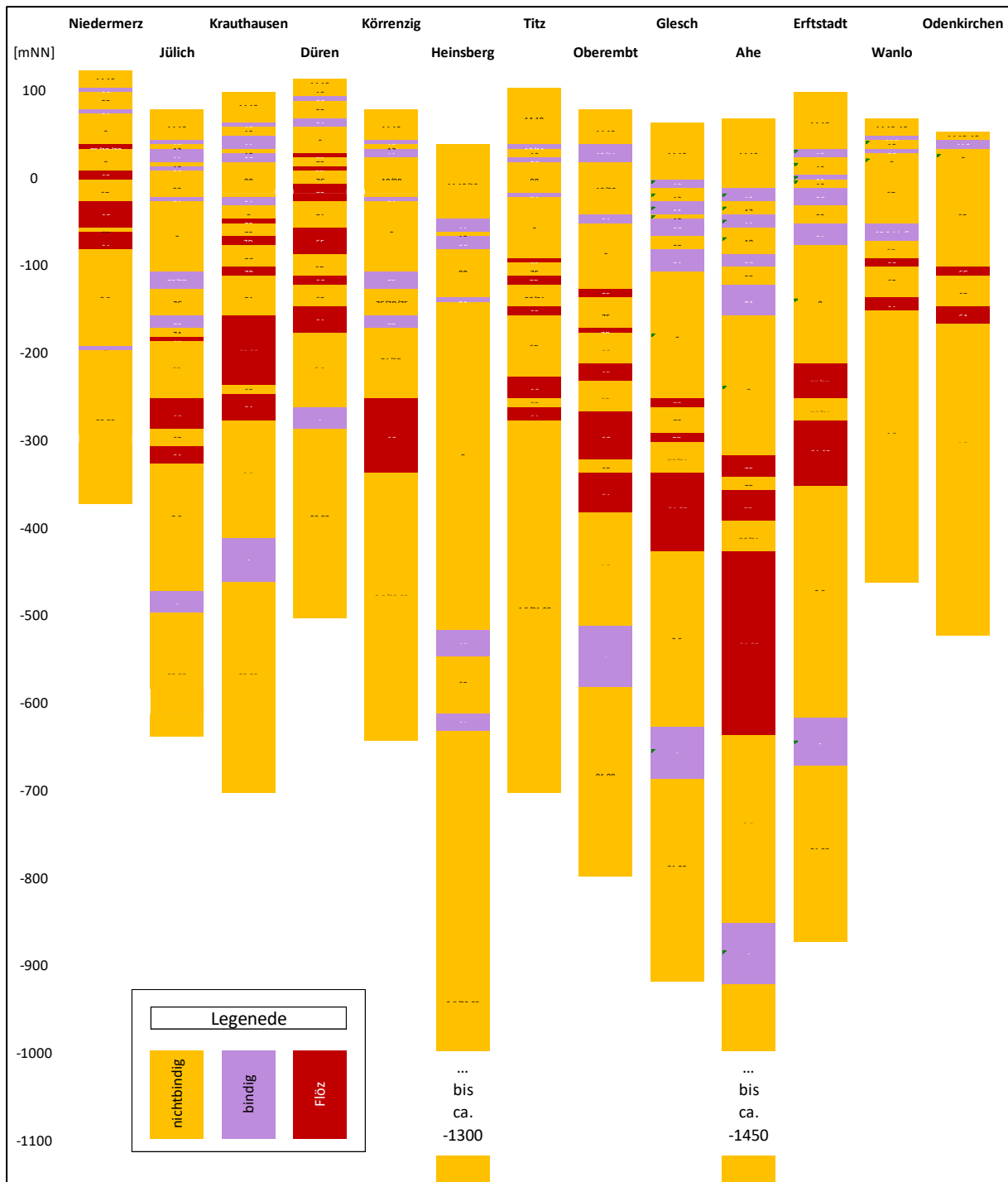


Abbildung 120 Gegenüberstellung Schichtprofile (annähernd maßstäblich)

Es ist ersichtlich, dass sich sowohl die Schichtanzahl als auch die Schichtmächtigkeiten sowie die Verhältnisse zwischen nichtbindigen Schichten, bindigen Schichten und den Flözen deutlich unterscheiden. Weiter variiert auch die Gesamtmächtigkeit in einer großen Bandbreite zwischen ca. 500 m (Niedermerz) und ca. 1500 m (Ahe).

Selbst wenn man unter Berücksichtigung

- der drei Schollen (3x),
- die Entfernung zu den Tagebauen nur in „nah“ und „fern“ (2x),
- die Beeinflussung des Grundwassers nur in „stark“ und „schwach“ (2x) und
- die Geologie nur in „nahezu nichtbindig“ und „bindig beeinflusst“ (2x)

unterteilen würde, ergäben sich in Summe bereits 24 theoretische Kombinationsmöglichkeiten. Tatsächlich ergeben sich für die 13 betrachteten Punkte immer noch 9 verschiedene Kombinationen, so dass eine Typisierung wenig sinnvoll ist. Darüber hinaus würde eine solche Typisierung den tatsächlich deutlich differenzierteren Verhältnissen (vgl. Grundwasserganglinien in Abbildung 119 und Schichtmodelle in Abbildung 120) in keiner Weise gerecht.

Nichts desto trotz lassen sich aber aus den durchgeführten Berechnungen und aus den lokalen Randbedingungen folgende Aussagen ableiten:

- Die maximal prognostizierten Setzungen schwanken zwischen ca. 0,2 m (vgl. Heinsberg) und ca. 4,3 m (vgl. Ahe).
- Die Setzungen sind auf der Erftscholle i.d.R. am größten (vgl. insbesondere Glesch und Ahe) und auf der Venloer Scholle i.d.R. am geringsten.
- Mit zunehmender Entfernung von den Tagebauen nehmen i.d.R. auch die Beeinflussung durch die Grundwasserstände und damit auch das Setzungspotential ab (vgl. Heinsberg und Körrenzig).
- Das früheste beobachtete Setzungsmaximum wurde etwa 1980 erreicht (vgl. Niedermerz), das späteste Setzungsmaximum wird etwa auf das Jahr 2060 prognostiziert (vgl. Erfstadt).
- An Punkten mit verhältnismäßig geringmächtigen bindigen Schichten und Flözen wird das Setzungsmaximum nahezu parallel zum Absenkungsmaximum erreicht und Hebungen sind i.d.R. innerhalb des Prognosezeitraums abgeschlossen (vgl. Niedermerz, Wanlo und Odenkirchen).
- An Punkten mit mächtigen bindigen Schichten und Flözen kommt es zu einem gegenüber der Grundwasserbewegung deutlich zeitverzögerten Bodenbewegungsverhalten (vgl. z.B. Oberembt und Erfstadt).

6 Variation der Hebungsfaktoren

In Abschnitt 4.1 wurde dargelegt, dass die Prognose je nach Wahl der Eingangsparameter einer gewissen Streuweite unterliegt. Dabei ist zwischen einer theoretischen Streuweite, die sich aus den theoretisch möglichen Eingangsparametern ergibt, und der wahrscheinlichen Streuweite zu unterscheiden, die sich aus dem bereits beobachteten Bewegungsverhalten ergibt. Je nach Parameter sind die theoretische und die wahrscheinliche Streuweite unterschiedlich groß, wobei von den wahrscheinlichen Streuweiten die wahrscheinliche Streuweite aus den Hebungsfaktoren und insbesondere aus dem Hebungsfaktor bindig am größten ausfällt (vgl. Abbildung 43). Dies liegt daran, dass i.d.R. bis heute noch keine relevanten Hebungen in den bindigen Schichten stattgefunden haben.

Basierend auf diesen Erkenntnissen wurde im Rahmen der Facharbeitsgruppensitzung am 16.01.2018 vorgeschlagen, für alle Punkte eine Grenzwertbetrachtung mit Variation relevanter Parameter durchzuführen. Dies wurde schließlich im Rahmen eines Abstimmungsgesprächs zwischen LANUV und ZAI am 17.05.2018 der Art präzisiert, dass ausschließlich die Hebungsfaktoren im Rahmen dieser Grenzwertbetrachtung zu variieren sind, bei denen die größte wahrscheinliche Streuweite auftritt. Die Auswirkungen der Variation weiterer Eingangsparameter können exemplarisch für den Punkt Niedermerz anhand der Ausführungen in Abschnitt 4 nachvollzogen werden.

Bei den Prognosen nach Abschnitt 5 betragen die Hebungsfaktoren:

- Hebungsfaktor _{nichtbindig, Prognose} = 0,80
- Hebungsfaktor _{bindig, Prognose} = 0,66

Die Ermittlung dieser Hebungsfaktoren erfolgte im Rahmen früherer Berechnungen auf Basis der Punkte Niedermerz (vgl. Abschnitt 4) und Jüchen (vgl. Abschnitt 6.15), an denen bereits deutliche Hebungen aufgetreten sind. Die Größe der so erhaltenen Hebungsfaktoren wurde außerdem durch die Nachrechnung der Punkte Kaster und Kaster A61 (vgl. Abschnitt 6.17 und 6.18) bestätigt, an denen es zwischenzeitlich schon mal zu Hebungen gekommen war.

Für die theoretische Streuweite wurden dann entsprechend bodenmechanisch sinnvoller Grenzen (vgl. z.B. Verhältnis der Kompressions- zu den Schwellbeiwerten in KOLYMBAS [6]) folgende theoretisch möglichen Hebungsfaktoren zugrunde gelegt:

- $0,20 \leq$ Hebungsfaktor _{nichtbindig, theoretisch} \leq 1,00
- $0,33 \leq$ Hebungsfaktor _{bindig, theoretisch} \leq 1,00

Eine Reduzierung dieser relativ großen theoretischen Streuweite wäre nur dann möglich, wenn z.B. nachweislich eizeitlich stark überkonsolidierte Böden vorlägen. Dann würde man sich generell auf Wieder- und Entlastungsästen bewegen (vgl. Abschnitt 2.3) und die unteren Grenzen lägen theoretisch deutlich höher. Für das Rheinische Braunkohlerevier ist dies aber nicht

der Fall und es gibt auch keine vergleichbaren Erkenntnisse, die bereits im Voraus eine Reduzierung der theoretischen Streuweite rechtfertigen würden.

Die Grenzen der wahrscheinlichen Streuweite wurden jeweils individuell anhand der im Nachrechnungszeitraum gemessenen Bodenbewegungen festgelegt. Wenn sich aber aus der Variation der Hebungsfaktoren innerhalb des Nachrechnungszeitraums noch keine relevanten Auswirkungen auf die Nachrechnung ergaben, wurden die wahrscheinlichen Hebungsfaktoren wie folgt festgelegt:

$$- \quad 0,60 \leq \text{Hebungsfaktor}_{\text{nichtbindig, wahrscheinlich}} \leq 0,87$$

$$- \quad 0,44 \leq \text{Hebungsfaktor}_{\text{bindig, wahrscheinlich}} \leq 0,88$$

Die so festgelegten wahrscheinlichen Grenzen entsprechen für die nichtbindigen Böden einer Abweichung gegenüber dem in der Prognose verwendeten Wert um $\pm 1/3$ der Differenz zwischen diesem Prognosewert und dem jeweiligem theoretisch möglichen Wert:

$$- \quad \text{Hebungsfaktor}_{\text{nichtbindig, MIN, wahrscheinlich}} = 0,8 - 1/3 \cdot (0,8 - 0,2) = 0,6$$

bzw.

$$- \quad \text{Hebungsfaktor}_{\text{nichtbindig, MAX, wahrscheinlich}} = 0,8 + 1/3 \cdot (1,0 - 0,8) = 0,87.$$

Bei den bindigen Böden, deren Hebungsverhalten generell noch mit größeren Unsicherheiten behaftet ist (vgl. Abschnitt 4.1.4), wurde hierfür hingegen $\pm 2/3$ der Differenz zwischen Prognosewert und jeweiligem theoretisch möglichen Wert gewählt (vgl. z.B. Punkt Wanlo, Tabelle 16). Eine

In Bezug auf die theoretischen Grenzen und die damit erhaltenen Streuweiten gilt es Folgendes anzumerken. An den meisten Punkten sind bis heute noch keine Hebungen aufgetreten (vgl. Kapitel 5). Daher wurden die theoretisch möglichen Hebungsfaktoren in der Größenordnung gewählt, wie sie aus bodenmechanischer Sicht ohne die Berücksichtigung spezieller Kenntnisse oder Erfahrungen denkbar sind. Tatsächlich liegen im Rheinischen Braunkohlerevier zu einigen Punkten aber bereits Informationen zum Hebungsverhalten vor, so dass dort bereits ausgeschlossen werden kann, dass eine Streuweite im Rahmen der bodenmechanisch theoretisch möglichen Grenzen auftritt. Besonders deutlich zeigt sich dies am Punkt Niedermetz, bei dem mit den theoretisch möglichen Grenzwerten sehr große Abweichungen zu den Messwerten erhalten werden. Wie Abbildung 122 zu entnehmen ist, würden mit den theoretisch möglichen Grenzwerten im Jahr 2015 Abweichungen gegenüber den Messwerten von bis zu 100% erhalten. Aber auch an weiteren Punkten wie AC 75 (vgl. Abbildung 135), Jüchen (vgl. Abbildung 136), Kaster (vgl. Abbildung 138) oder Zieverich (Abbildung 141) ist zu erkennen, dass die theoretischen Streuweiten (hellgrau in den nachfolgenden Abbildungen) dort bereits heute als unrealistisch anzusehen sind, da sich damit erkennbare Abweichungen von den tatsächlichen Messwerten ergeben. Basierend auf diesen Erfahrungen ist daher davon auszugehen, dass sich das zukünftige tatsächliche Verhalten auch an allen übrigen Punkten

innerhalb der wahrscheinlichen Streuweite (grün in den nachfolgenden Abbildungen) bewegen wird.

In den folgenden Abschnitten 6.1 bis 6.13 werden zunächst die Variationsergebnisse der im Rahmen des Vorhabens untersuchten Punkte gemäß Abschnitt 5 vorgestellt.

Zusätzlich wurde aber auch eine Variation der Hebungsfaktoren für Punkte vorgenommen, für die im Auftrag der RWE Power AG bereits eine Prognose mit dem Modell nach Ziegler und Aulbach vorhanden war. Die Ergebnisse dieser Variationen werden in den sich daran anschließenden Abschnitten 6.14 bis 6.35 dargestellt.

Die Lage der insgesamt 35 Punkte kann Abbildung 121 entnommen werden.

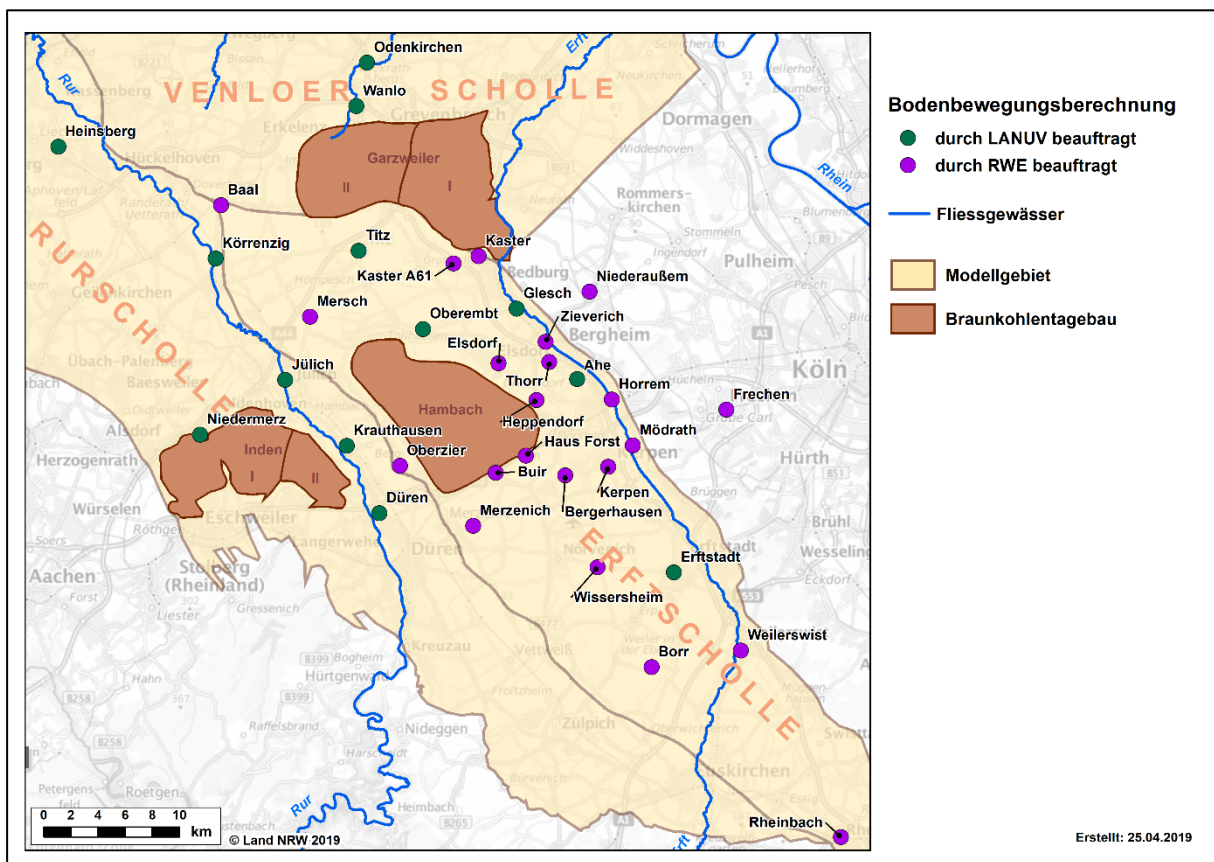


Abbildung 121 Übersicht aller 35 Punkte (Quelle: LANUV)

Eine zusammenfassende Betrachtung folgt in Abschnitt 6.36.

6.1 Niedermerz

Die folgende Tabelle 4 enthält die im Rahmen der Variation letztlich bestimmten Hebungsfaktoren für den Punkt Niedermerz.

Tabelle 4 Hebungsfaktoren Niedermerz

Fall	Hebungsfaktor [-]		Beschreibung
	nichtbindig	bindig	
2	1,00	1,00	Max. theoretisch
3	0,85	0,88	Max. wahrscheinlich
1	0,80	0,66	Prognose
4	0,75	0,44	Min. wahrscheinlich
5	0,20	0,33	Min. theoretisch

Dabei entsprechen Fall 1 der ursprünglichen Prognose (vgl. Abschnitt 4.1.2 bzw. im Allgemeinen Abschnitt 5), die Fälle 2 und 5 dem theoretischen Maximum bzw. Minimum sowie die Fälle 3 und 4 dem wahrscheinlichen Maximum bzw. Minimum.

Die darauf basierenden Bodenbewegungsverläufe bzw. Streuweiten zeigt Abbildung 122.

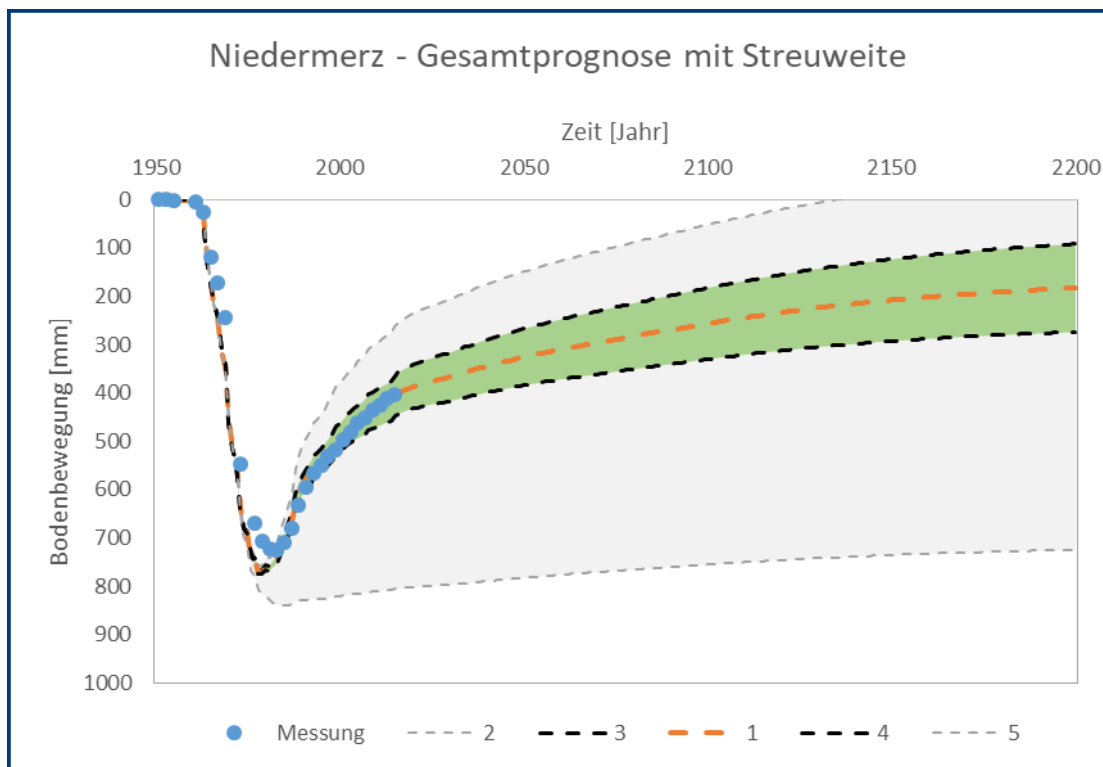


Abbildung 122 Theoretische und wahrscheinliche Streuweite der Prognose Niedermerz

Wie zu sehen ist, liegt die wahrscheinliche Streuweite (grün) innerhalb eines relativ engen Bandes mit Abweichungen von der Prognose im Jahr 2200 von ca. ± 10 cm. Die theoretisch mögliche Streuweite (hellgrau) ist mit Abweichungen von der Prognose im Jahr 2200 von ca. +20 cm bzw. -50 cm deutlich größer.

Allerdings zeigt sich am Punkt Niedermerz, dass die theoretisch möglichen Grenzwerte zu einer deutlichen Abweichung vom bis dato gemessenen Verhalten führen und daher – auch wenn sie allgemein bodenmechanisch denkbar sind – im hier vorliegenden Fall bereits als unrealistisch einzustufen sind.

Die Einzelwerte für die Jahre 2015, 2100 und 2200 können der nachfolgenden Tabelle 5 entnommen werden.

Tabelle 5 Streuweiten Niedermerz in den Jahren 2015, 2100 und 2200

Fall	Bodenbewegung [mm]			Beschreibung
	2015	2100	2200	
2	262	52	-52	Max. theoretisch
3	364	183	92	Max. wahrscheinlich
1	406	257	183	Prognose
4	448	330	274	Min. wahrscheinlich
5	806	755	725	Min. theoretisch

Die Tatsache, dass für den Punkt Niedermerz mit dem maximal theoretisch möglichen Hebungs-faktoren Hebungen bis über das Ausgangsniveau ermittelt werden, begründet sich damit, dass die vom LANUV prognostizierten und zur Verfügung gestellten Grundwasserstände in den Grundwasserleiter 2-5 und 02-09 nach Ende der Sumpfungmaßnahmen höher liegen als zuvor (vgl. Abschnitt 4.1.1 bzw. Abbildung 21).

Sofern alle Grundwasserleiter nach Abschluss der Maßnahmen wieder ihren Ausgangswasserstand erreichten, würden sich mit Hebungs-faktoren von 1,0 alle Setzungen wieder ausgleichen. Die obere theoretische Grenze würde sich dann exakt an Null annähern. Bei generell geringeren Wasserständen und vergleichbaren Potentialunterschieden wie zuvor liegt diese theoretische Grenze dann unterhalb von Null, bei höheren Wasserständen und vergleichbaren Potentialunterschieden hingegen oberhalb von Null.

6.2 Jülich

Die folgende Tabelle enthält die im Rahmen der Variation bestimmten Hebungsfaktoren sowie die zugehörigen Setzungsmaße für die Jahre 2015, 2100 und 2200.

Tabelle 6 Hebungs-faktoren und Streuweiten 2015, 2100 und 2200 für Jülich

Fall	Hebungsfaktor [-]		Bodenbewegung [mm]			Beschreibung
	nichtbindig	bindig	2015	2100	2200	
2	1,00	1,00	797	334	271	Max. theoretisch
3	0,87	0,88	802	410	355	Max. wahrscheinlich
1	0,80	0,66	805	456	412	Prognose
4	0,70	0,44	809	518	486	Min. wahrscheinlich
5	0,20	0,33	830	803	786	Min. theoretisch

Die zugehörigen Bodenbewegungsverläufe und Streuweiten zeigt die folgende Abbildung.

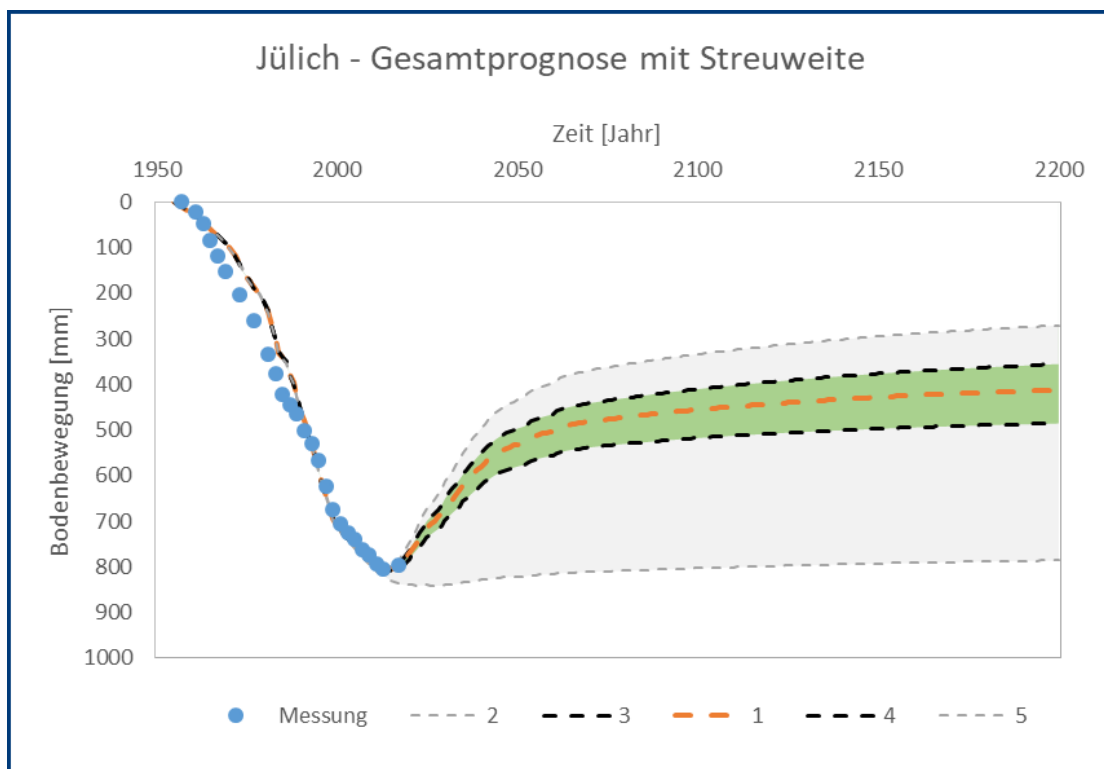


Abbildung 123 Theoretische und wahrscheinliche Streuweite der Prognose Jülich

Die wahrscheinliche Streuweite liegt innerhalb eines Bandes, das nach oben und unten relativ eng ist. Die wahrscheinlichen Abweichungen gegenüber der Prognose betragen im Jahr 2200 ca. ± 10 cm.

6.3 Krauthausen

Die folgende Tabelle enthält die im Rahmen der Variation bestimmten Hebungsfaktoren sowie die zugehörigen Setzungsmaße für die Jahre 2015, 2100 und 2200.

Tabelle 7 Hebungsfaktoren und Streuweiten 2015, 2100 und 2200 für Krauthausen

Fall	Hebungsfaktor [-]		Bodenbewegung [mm]			Beschreibung
	nichtbindig	bindig	2015	2100	2200	
2	1,00	1,00	1135	852	487	Max. theoretisch
3	0,87	0,88	1138	948	627	Max. wahrscheinlich
1	0,80	0,66	1139	1042	800	Prognose
4	0,60	0,44	1142	1199	1038	Min. wahrscheinlich
5	0,20	0,33	1150	1427	1308	Min. theoretisch

Die zugehörigen Bodenbewegungsverläufe und Streuweiten zeigt die folgende Abbildung.

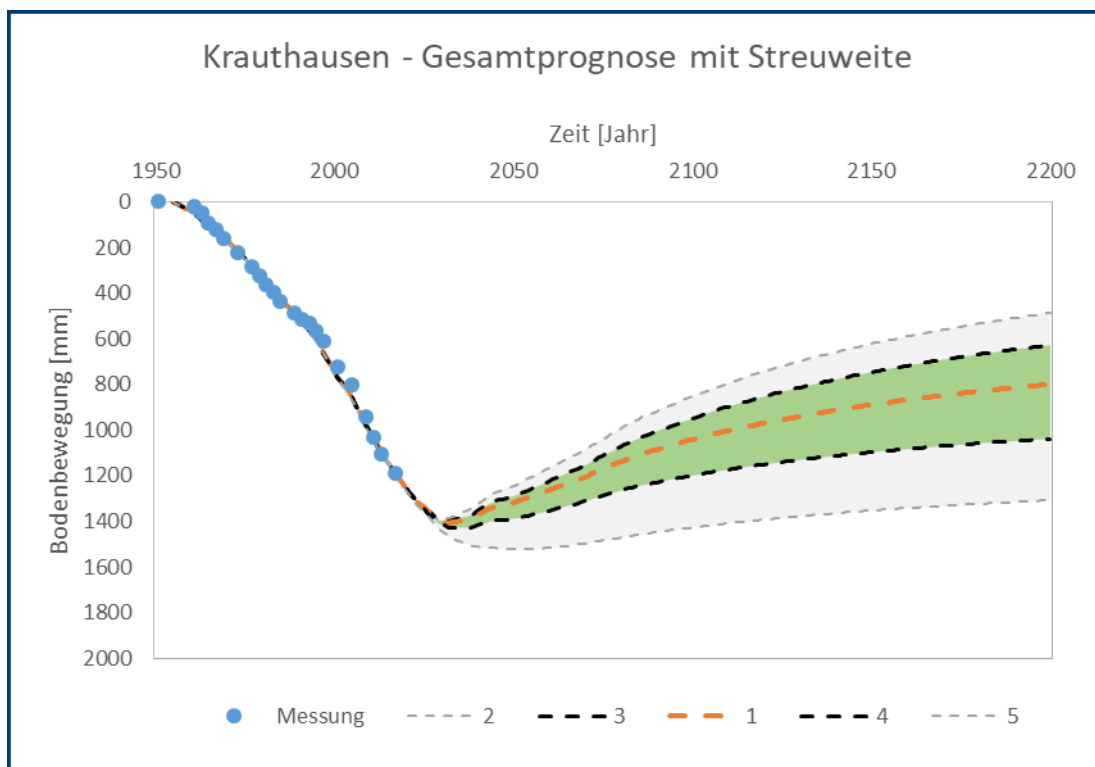


Abbildung 124 Theoretische und wahrscheinliche Streuweite der Prognose Krauthausen

Am Punkt Krauthausen liegt die wahrscheinliche Streuweite innerhalb eines Bandes, das nach oben und unten nicht stark streut. Die wahrscheinlichen Abweichungen gegenüber der Prognose betragen im Jahr 2200 ca. ± 20 cm.

6.4 Düren

Die folgende Tabelle enthält die im Rahmen der Variation bestimmten Hebungsfaktoren sowie die zugehörigen Setzungsmaße für die Jahre 2015, 2100 und 2200.

Tabelle 8 Hebungs-faktoren und Streuweiten 2015, 2100 und 2200 für Düren

Fall	Hebungsfaktor [-]		Bodenbewegung [mm]			Beschreibung
	nichtbindig	bindig	2015	2100	2200	
2	1,00	1,00	807	680	401	Max. theoretisch
3	0,87	0,88	808	751	506	Max. wahrscheinlich
1	0,80	0,66	808	797	607	Prognose
4	0,60	0,44	810	908	780	Min. wahrscheinlich
5	0,20	0,33	812	1113	1030	Min. theoretisch

Die zugehörigen Bodenbewegungsverläufe und Streuweiten zeigt die folgende Abbildung.

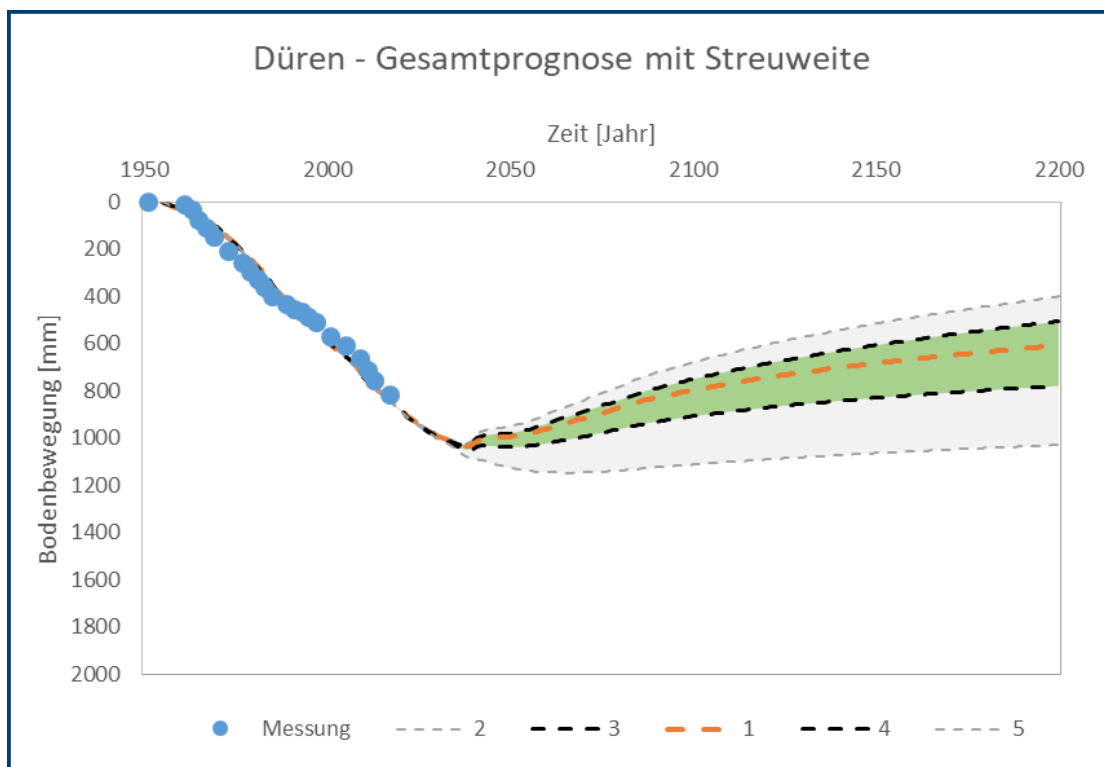


Abbildung 125 Theoretische und wahrscheinliche Streuweite der Prognose Düren

Die wahrscheinliche Streuweite liegt innerhalb eines Bandes, das sich auch über das Jahr 2200 hinaus noch leicht aufweitet, da das Grundwasser gemäß Prognose auch noch nach 2150 weiter ansteigt und somit die Hebungsprozesse bis 2200 noch nicht abgeschlossen sein werden. Die wahrscheinlichen Abweichungen gegenüber der Prognose betragen im Jahr 2200 ca. ± 20 cm.

6.5 Körrenzig

Die folgende Tabelle enthält die im Rahmen der Variation bestimmten Hebungsfaktoren sowie die zugehörigen Setzungsmaße für die Jahre 2015, 2100 und 2200.

Tabelle 9 Hebungs-faktoren und Streuweiten 2015, 2100 und 2200 für Körrenzig

Fall	Hebungsfaktor [-]		Bodenbewegung [mm]			Beschreibung
	nichtbindig	bindig	2015	2100	2200	
2	1,00	1,00	305	185	173	Max. theoretisch
3	0,85	0,88	309	215	206	Max. wahrscheinlich
1	0,80	0,66	310	225	218	Prognose
4	0,65	0,44	314	256	252	Min. wahrscheinlich
5	0,20	0,33	326	347	352	Min. theoretisch

Die zugehörigen Bodenbewegungsverläufe und Streuweiten zeigt die folgende Abbildung.

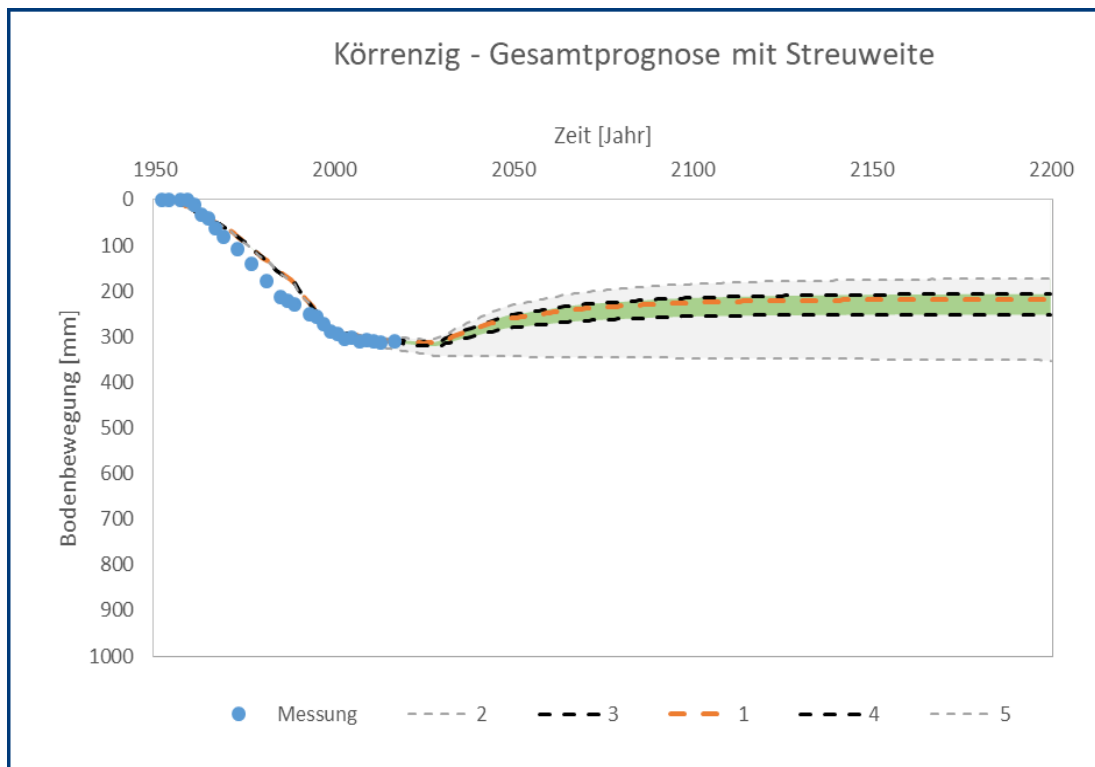


Abbildung 126 Theoretische und wahrscheinliche Streuweite der Prognose Körrenzig

Die wahrscheinliche Streuweite liegt innerhalb eines Bandes, das insbesondere nach oben, aber auch nach unten sehr eng ist. Die wahrscheinlichen Abweichungen gegenüber der Prognose betragen im Jahr 2200 ca. ± 5 cm.

6.6 Heinsberg

Die folgende Tabelle enthält die im Rahmen der Variation bestimmten Hebungsfaktoren sowie die zugehörigen Setzungsmaße für die Jahre 2015, 2100 und 2200.

Tabelle 10 Hebungsfaktoren und Streuweiten 2015, 2100 und 2200 für Heinsberg

Fall	Hebungsfaktor [-]		Bodenbewegung [mm]			Beschreibung
	nichtbindig	bindig	2015	2100	2200	
2	1,00	1,00	128	91	82	Max. theoretisch
3	0,87	0,88	138	108	101	Max. wahrscheinlich
1	0,80	0,66	143	117	111	Prognose
4	0,75	0,44	147	124	119	Min. wahrscheinlich
5	0,20	0,33	188	196	199	Min. theoretisch

Die zugehörigen Bodenbewegungsverläufe und Streuweiten zeigt die folgende Abbildung.

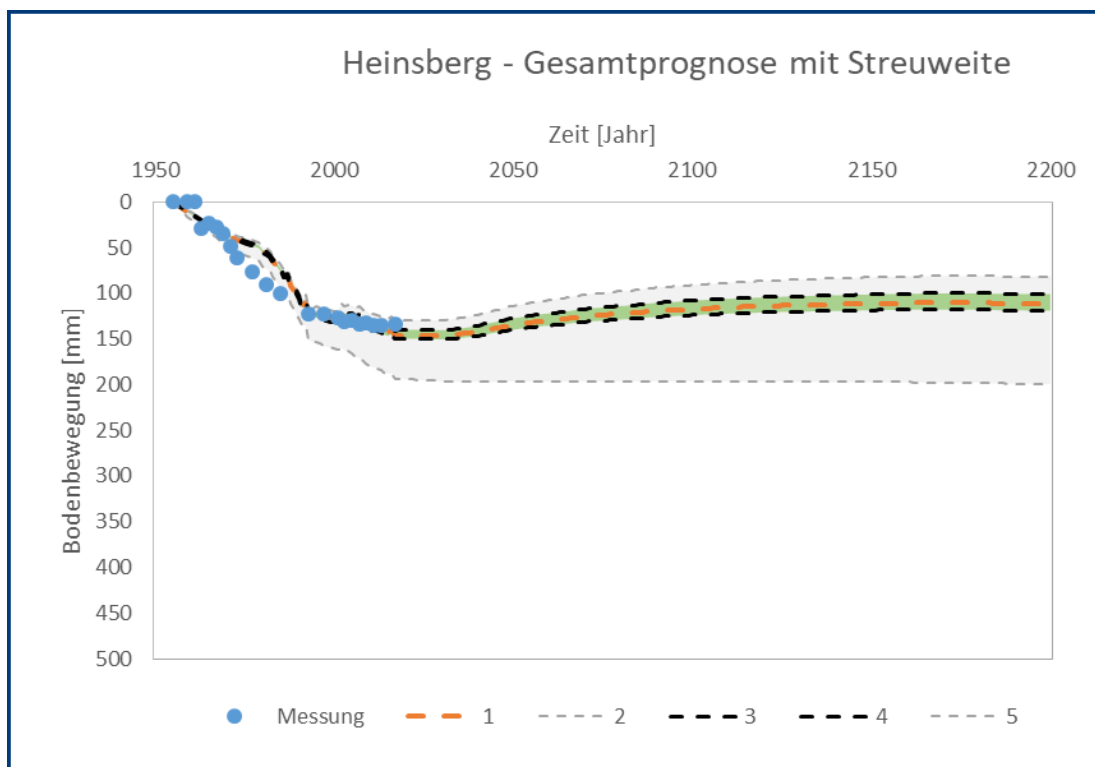


Abbildung 127 Theoretische und wahrscheinliche Streuweite der Prognose Heinsberg

Die wahrscheinliche Streuweite liegt innerhalb eines Bandes, das nach oben und unten sehr eng ist. Die wahrscheinlichen Abweichungen gegenüber der Prognose betragen im Jahr 2200 weniger als ± 2 cm. Dabei ist jedoch zu beachten, dass die Bodenbewegungen am Punkt Heinsberg durch Bewegungen aus dem Steinkohlebergbau beeinflusst sind (vgl. Abschnitt 5.6), wodurch sich zusätzliche Unwägbarkeiten bezüglich der Prognose ergeben können.

6.7 Titz

Die folgende Tabelle enthält die im Rahmen der Variation bestimmten Hebungsfaktoren sowie die zugehörigen Setzungsmaße für die Jahre 2015, 2100 und 2200.

Tabelle 11 Hebungsfaktoren und Streuweiten 2015, 2100 und 2200 für Titz

Fall	Hebungsfaktor [-]		Bodenbewegung [mm]			Beschreibung
	nichtbindig	bindig	2015	2100	2200	
2	1,00	1,00	511	439	189	Max. theoretisch
3	0,87	0,88	514	471	255	Max. wahrscheinlich
1	0,80	0,66	516	489	296	Prognose
4	0,70	0,44	518	514	351	Min. wahrscheinlich
5	0,20	0,33	529	637	590	Min. theoretisch

Die zugehörigen Bodenbewegungsverläufe und Streuweiten zeigt die folgende Abbildung.

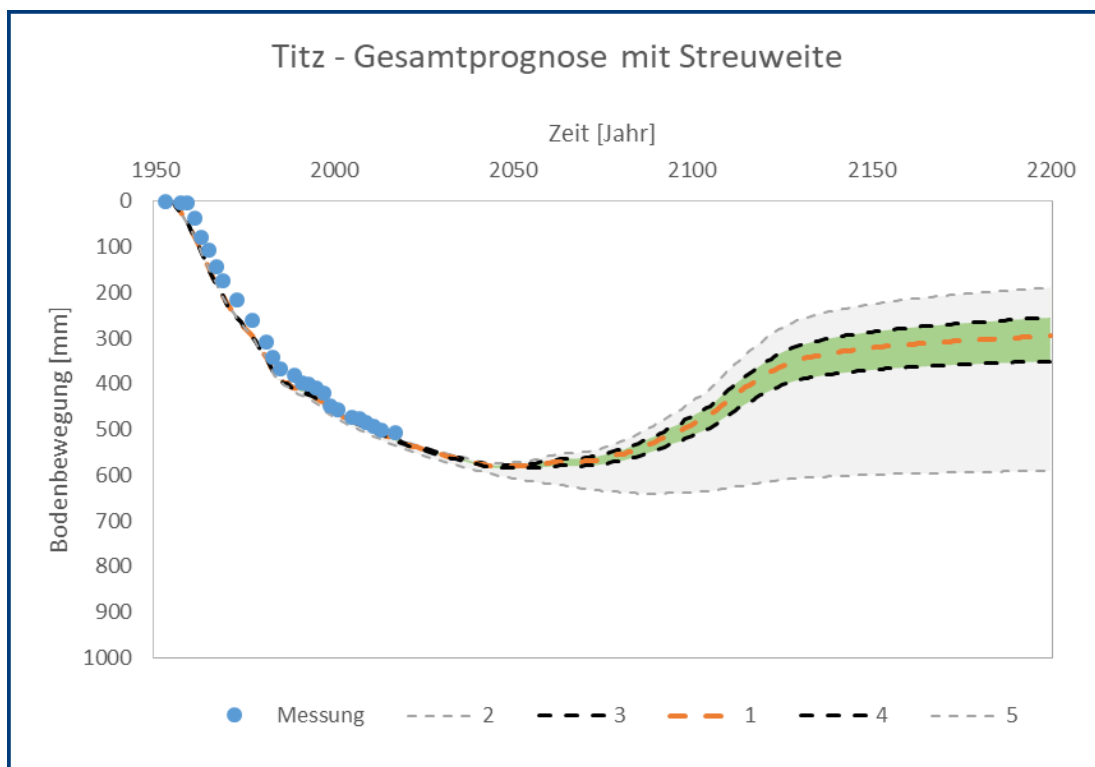


Abbildung 128 Theoretische und wahrscheinliche Streuweite der Prognose Titz

Die wahrscheinliche Streuweite liegt innerhalb eines Bandes, das nach oben und unten relativ eng ist. Die wahrscheinlichen Abweichungen gegenüber der Prognose betragen im Jahr 2200 ca. ± 5 cm.

6.8 Oberembt

Die folgende Tabelle enthält die im Rahmen der Variation bestimmten Hebungsfaktoren sowie die zugehörigen Setzungsmaße für die Jahre 2015, 2100 und 2200.

Tabelle 12 Hebungs-faktoren und Streuweiten 2015, 2100 und 2200 für Oberembt

Fall	Hebungsfaktor [-]		Bodenbewegung [mm]			Beschreibung
	nichtbindig	bindig	2015	2100	2200	
2	1,00	1,00	1354	1206	641	Max. theoretisch
3	0,87	0,88	1362	1291	798	Max. wahrscheinlich
1	0,80	0,66	1366	1343	937	Prognose
4	0,60	0,44	1378	1476	1192	Min. wahrscheinlich
5	0,20	0,33	1403	1727	1585	Min. theoretisch

Die zugehörigen Bodenbewegungsverläufe und Streuweiten zeigt die folgende Abbildung.

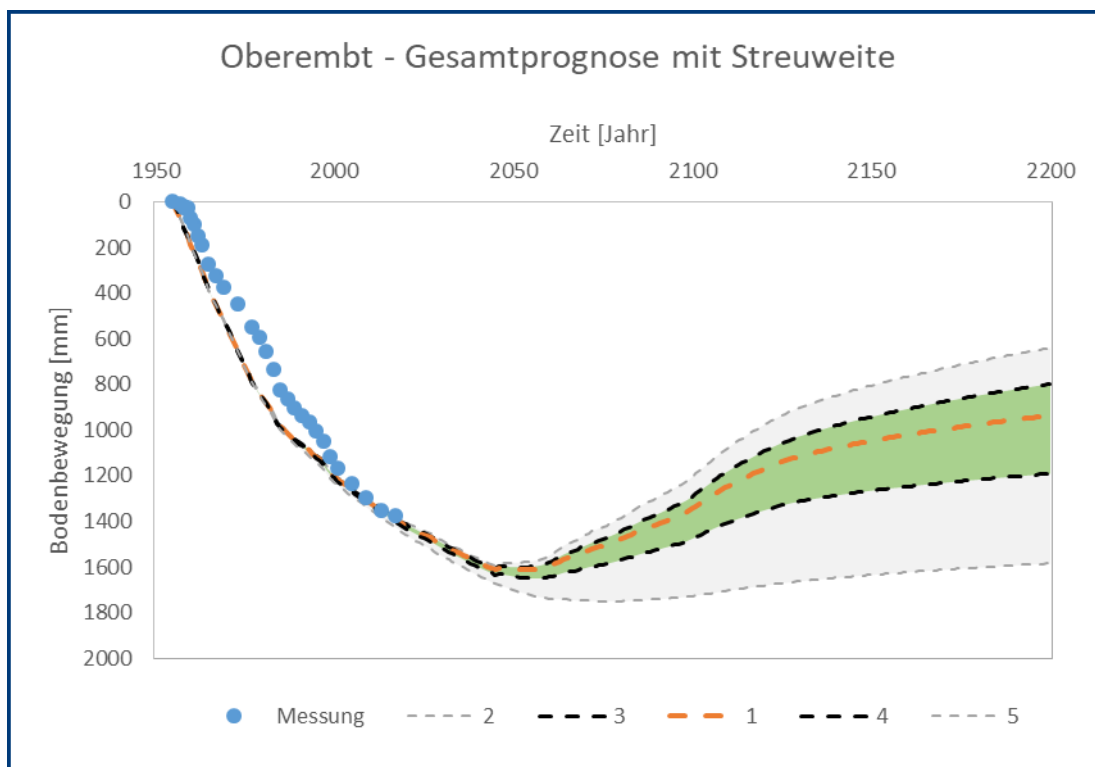


Abbildung 129 Theoretische und wahrscheinliche Streuweite der Prognose Oberembt

Wie in Düren findet auch in Oberembt nach 2150 weiter ein leichter Anstieg des Grundwassers statt, so dass sich das Streuweitenband bis zum Betrachtungsende 2200 aufweitet. Die wahrscheinlichen Abweichungen gegenüber der Prognose betragen im Jahr 2200 ca. +15 cm bzw. -25 cm.

6.9 Glesch

Die folgende Tabelle enthält die im Rahmen der Variation bestimmten Hebungsfaktoren sowie die zugehörigen Setzungsmaße für die Jahre 2015, 2100 und 2200.

Tabelle 13 Hebungsfaktoren und Streuweiten 2015, 2100 und 2200 für Glesch

Fall	Hebungsfaktor [-]		Bodenbewegung [mm]			Beschreibung
	nichtbindig	bindig	2015	2100	2200	
2	1,00	1,00	2411	1777	788	Max. theoretisch
3	0,87	0,88	2436	1974	1105	Max. wahrscheinlich
1	0,80	0,66	2449	2158	1500	Prognose
4	0,60	0,44	2488	2480	2040	Min. wahrscheinlich
5	0,20	0,33	2565	2959	2641	Min. theoretisch

Die zugehörigen Bodenbewegungsverläufe und Streuweiten zeigt die folgende Abbildung.

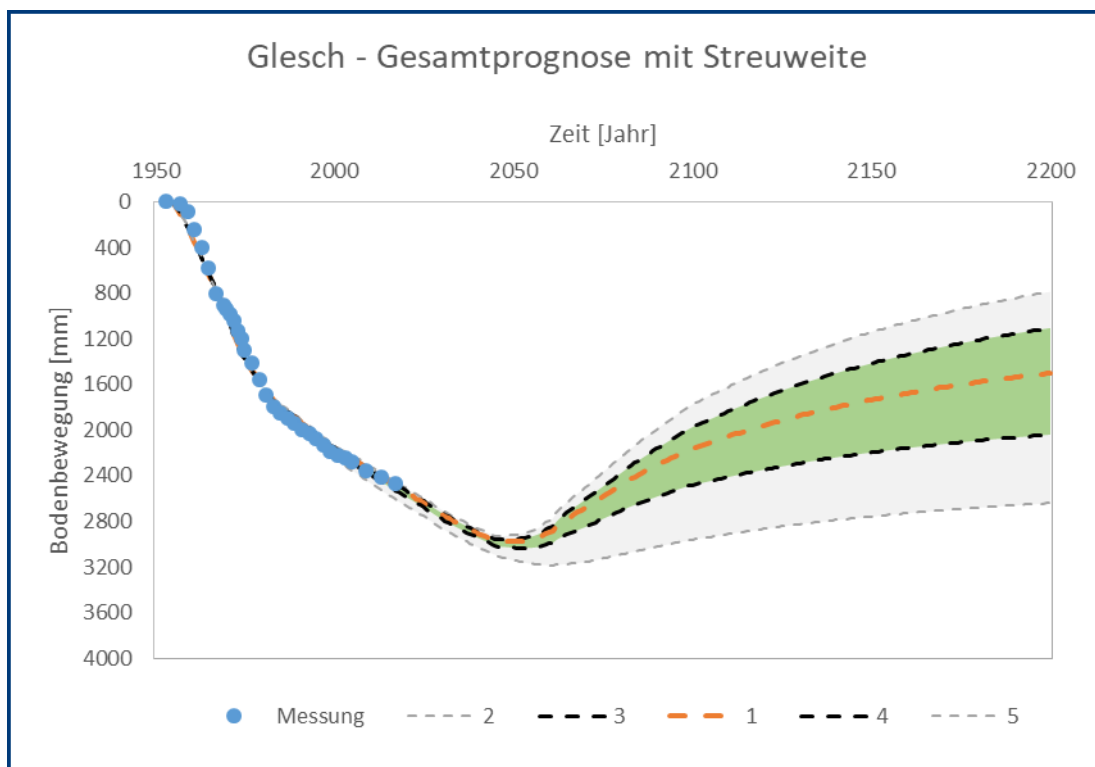


Abbildung 130 Theoretische und wahrscheinliche Streuweite der Prognose Glesch

Wie schon bei einigen Punkten zuvor, sind auch am Punkt Glesch die Hebungen im Jahr 2200 noch nicht vollständig abgeklungen und die Begrenzungen der Streuweitenbänder verlaufen noch nicht parallel. Die wahrscheinlichen Abweichungen gegenüber der Prognose betragen im Jahr 2200 ca. ± 50 cm.

6.10 Ahe

Die folgende Tabelle enthält die im Rahmen der Variation bestimmten Hebungsfaktoren sowie die zugehörigen Setzungsmaße für die Jahre 2015, 2100 und 2200.

Tabelle 14 Hebungs-faktoren und Streuweiten 2015, 2100 und 2200 für Ahe

Fall	Hebungsfaktor [-]		Bodenbewegung [mm]			Beschreibung
	nichtbindig	bindig	2015	2100	2200	
2	1,00	1,00	3397	2367	656	Max. theoretisch
3	0,87	0,88	3412	2648	1142	Max. wahrscheinlich
1	0,80	0,66	3420	2995	1856	Prognose
4	0,70	0,44	3431	3372	2602	Min. wahrscheinlich
5	0,20	0,33	3487	4005	3450	Min. theoretisch

Die zugehörigen Bodenbewegungsverläufe und Streuweiten zeigt die folgende Abbildung.

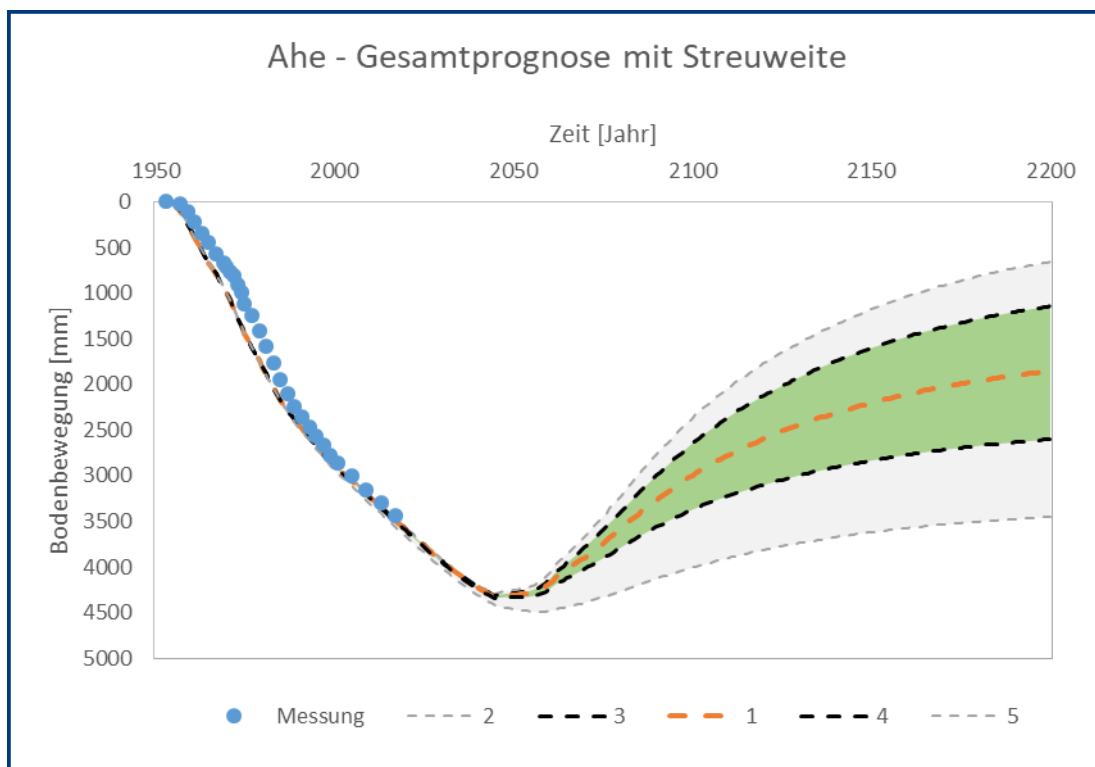


Abbildung 131 Theoretische und wahrscheinliche Streuweite der Prognose Ahe

Auch am Punkt Ahe kommt es aufgrund der Kombination aus Grundwasserwiederanstieg und mächtiger bindiger Schichten über das Jahr 2200 hinaus noch zu Hebungen und die Begrenzungen der Streuweitenbänder verlaufen noch nicht parallel. Die wahrscheinlichen Abweichungen gegenüber der Prognose betragen im Jahr 2200 ca. ± 70 cm.

6.11 Erftstadt

Die folgende Tabelle enthält die im Rahmen der Variation bestimmten Hebungsfaktoren sowie die zugehörigen Setzungsmaße für die Jahre 2015, 2100 und 2200.

Tabelle 15 Hebungs-faktoren und Streuweiten 2015, 2100 und 2200 für Erftstadt

Fall	Hebungsfaktor [-]		Bodenbewegung [mm]			Beschreibung
	nichtbindig	bindig	2015	2100	2200	
2	1,00	1,00	1347	1357	439	Max. theoretisch
3	0,87	0,88	1348	1437	629	Max. wahrscheinlich
1	0,80	0,66	1349	1511	892	Prognose
4	0,60	0,44	1351	1640	1222	Min. wahrscheinlich
5	0,20	0,33	1356	1832	1541	Min. theoretisch

Die zugehörigen Bodenbewegungsverläufe und Streuweiten zeigt die folgende Abbildung.

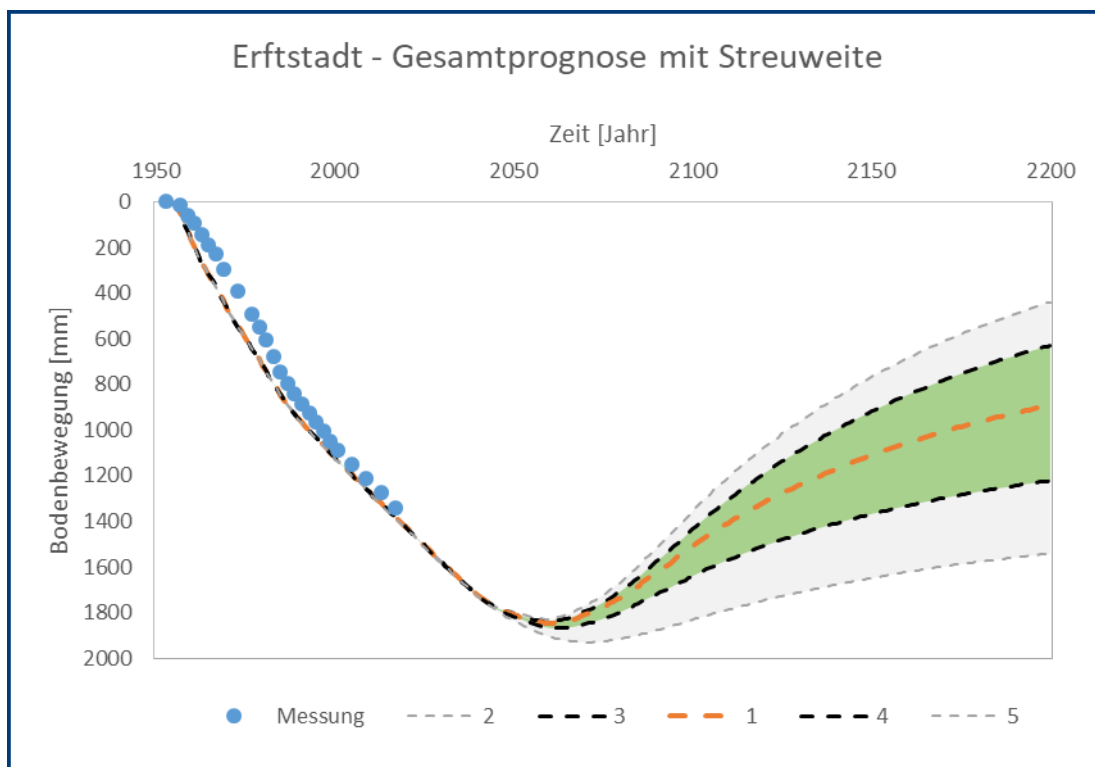


Abbildung 132 Theoretische und wahrscheinliche Streuweite der Prognose Erftstadt

Analog zu den beiden vorherigen Punkten Glesch und Ahe sind auch am Punkt Erftstadt die Hebungen im Jahr 2200 noch nicht vollständig abgeklungen und die Begrenzungen der Streuweitenbänder verlaufen noch nicht parallel. Die wahrscheinlichen Abweichungen gegenüber der Prognose betragen im Jahr 2200 ca. ± 30 cm.

6.12 Wanlo

Die folgende Tabelle enthält die im Rahmen der Variation bestimmten Hebungsfaktoren sowie die zugehörigen Setzungsmaße für die Jahre 2015, 2100 und 2200.

Tabelle 16 Hebungsfaktoren und Streuweiten 2015, 2100 und 2200 für Wanlo

Fall	Hebungsfaktor [-]		Bodenbewegung [mm]			Beschreibung
	nichtbindig	bindig	2015	2100	2200	
2	1,00	1,00	363	74	59	Max. theoretisch
3	0,87	0,88	366	137	125	Max. wahrscheinlich
1	0,80	0,66	367	169	158	Prognose
4	0,60	0,44	371	264	257	Min. wahrscheinlich
5	0,20	0,33	379	453	450	Min. theoretisch

Die zugehörigen Bodenbewegungsverläufe und Streuweiten zeigt die nachfolgende Abbildung.

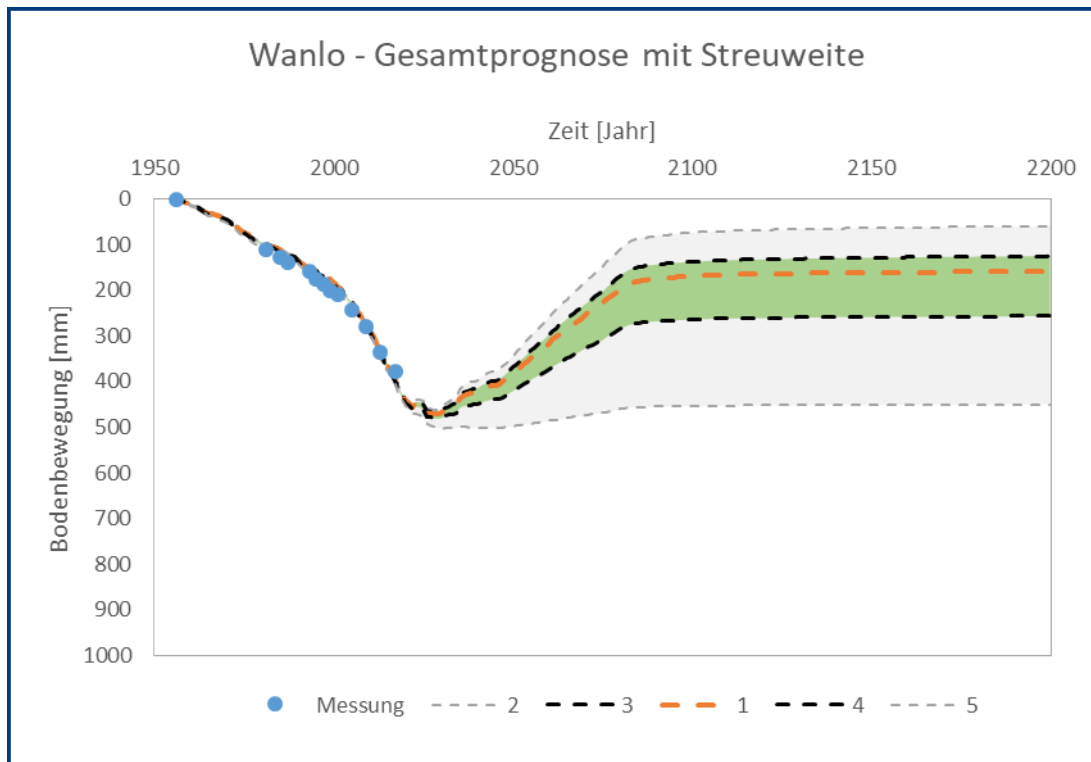


Abbildung 133 Theoretische und wahrscheinliche Streuweite der Prognose Wanlo

Wie zu sehen ist, liegt die wahrscheinliche Streuweite innerhalb eines Bandes, das nach oben sehr eng und nach unten etwas weiter ist. Die wahrscheinlichen Abweichungen gegenüber der Prognose betragen im Jahr 2200 ca. +5 cm bzw. -10 cm.

Der Umstand, dass der untere theoretische Verlauf bis zum Jahr 2080 nahezu keine Hebungen an der Geländeoberfläche aufweist, begründet sich durch den Anteil der nachlaufenden

Setzungen in den bindigen Schichten, der nahezu den Hebungen in den nichtbindigen Schichten bei geringem Hebungsfaktor entspricht.

Weiter resultieren die insgesamt relativ geringen Gesamthebungen im unteren theoretischen Verlauf aber daraus, dass die Grundwasserstände in 2200 in nahezu allen Grundwasserleitern niedriger als zu Beginn der Sumpfungsmaßnahmen prognostiziert werden (vgl. Abbildung 110). Deshalb bleibt auch der obere theoretische Verlauf trotz Hebungs Faktoren von 1,0 unterhalb der ursprünglichen Geländeoberkante (vgl. dazu auch Abschnitt 6.1).

6.13 Odenkirchen

Die folgende Tabelle enthält die im Rahmen der Variation bestimmten Hebungsfaktoren sowie die zugehörigen Setzungsmaße für die Jahre 2015, 2100 und 2200.

Tabelle 17 Hebungsfaktoren und Streuweiten 2015, 2100 und 2200 für Odenkirchen

Fall	Hebungsfaktor [-]		Bodenbewegung [mm]			Beschreibung
	nichtbindig	bindig	2015	2100	2200	
2	1,00	1,00	299	71	61	Max. theoretisch
3	0,87	0,88	302	118	109	Max. wahrscheinlich
1	0,80	0,66	304	143	135	Prognose
4	0,65	0,44	308	197	191	Min. wahrscheinlich
5	0,20	0,33	321	359	359	Min. theoretisch

Die zugehörigen Bodenbewegungsverläufe und Streuweiten zeigt die folgende Abbildung.

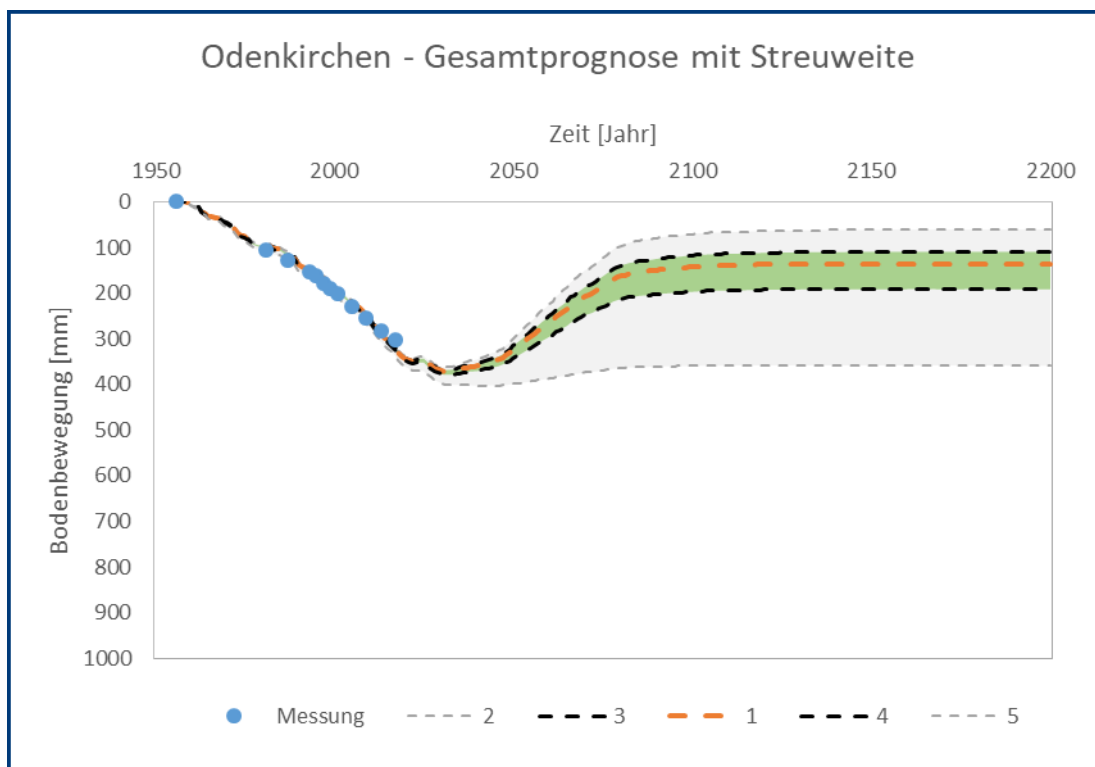


Abbildung 134 Theoretische und wahrscheinliche Streuweite der Prognose Odenkirchen

Die wahrscheinliche Streuweite liegt innerhalb eines Bandes, das nach oben sehr eng und nach unten ebenfalls relativ eng ist. Die wahrscheinlichen Abweichungen gegenüber der Prognose betragen im Jahr 2200 ca. +5 cm bzw. -10 cm.

6.14 AC 75

Der Punkt AC 75 ist der erste von insgesamt 22 Punkten, für die losgelöst von den im Rahmen dieses Vorhabens aufgestellten Modellen (vgl. Abschnitt 5) bereits ein Prognosemodell vorlag und für die ebenfalls eine Variation der Hebungsfaktoren vorgenommen wurde.

Die folgende Tabelle enthält die im Rahmen der Variation bestimmten Hebungsfaktoren sowie die zugehörigen Setzungsmaße am Punkt AC 75 für die Jahre 2015, 2100 und 2200.

Tabelle 18 Hebungsfaktoren und Streuweiten 2015, 2100 und 2200 für AC 75

Fall	Hebungsfaktor [-]		Bodenbewegung [mm]			Beschreibung
	nichtbindig	bindig	2015	2100	2200	
2	1,00	1,00	2814	2671	1321	Max. theoretisch
3	0,87	0,88	2865	2894	1712	Max. wahrscheinlich
1	0,80	0,66	2893	3086	2201	Prognose
4	0,65	0,44	2953	3381	2798	Min. wahrscheinlich
5	0,20	0,33	3132	4015	3602	Min. theoretisch

Die zugehörigen Bodenbewegungsverläufe und Streuweiten zeigt die folgende Abbildung.

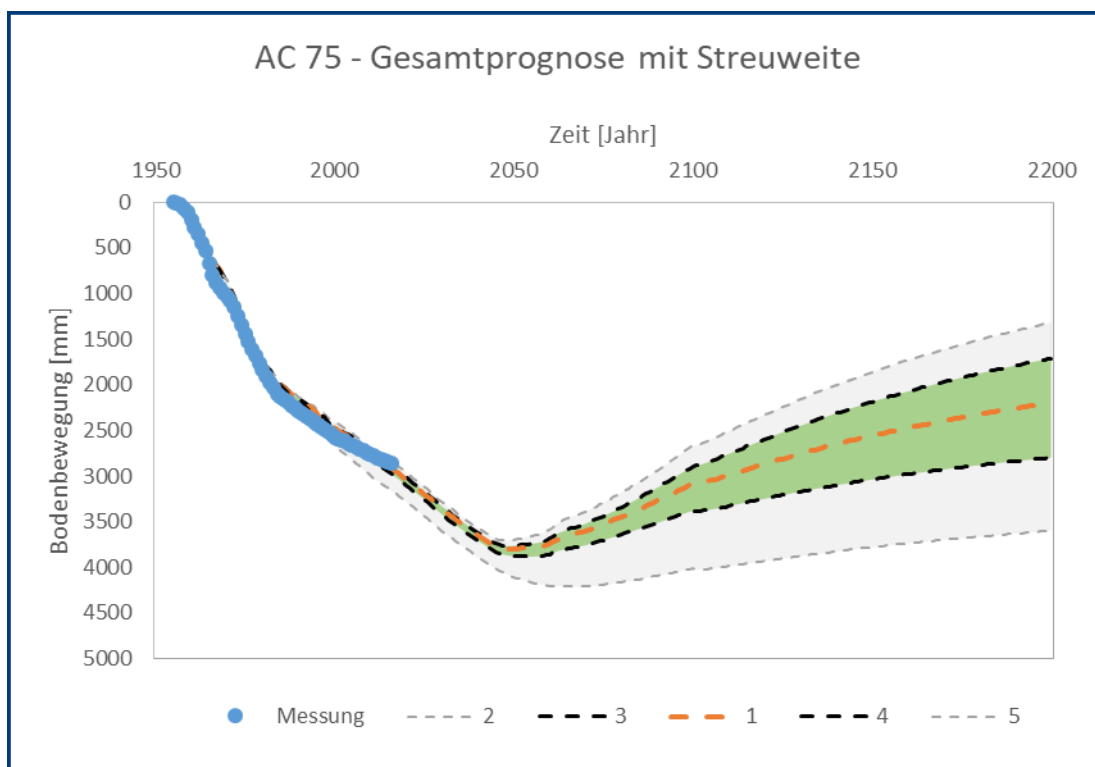


Abbildung 135 Theoretische und wahrscheinliche Streuweite der Prognose AC 75

Am Punkt AC 75 ist der Hebungsprozess im Jahr 2200 noch nicht abgeschlossen. Dementsprechend verlaufen die Streuweitenbänder nicht parallel. Die wahrscheinlichen Abweichungen gegenüber der Prognose betragen im Jahr 2200 ca. ± 50 cm.

6.15 Jüchen

Die folgende Tabelle enthält die im Rahmen der Variation bestimmten Hebungsfaktoren sowie die zugehörigen Setzungsmaße für die Jahre 2015, 2100 und 2200.

Tabelle 19 Hebungs-faktoren und Streuweiten 2015, 2100 und 2200 für Jüchen

Fall	Hebungsfaktor [-]		Bodenbewegung [mm]			Beschreibung
	nichtbindig	bindig	2015	2100	2200	
2	1,00	1,00	316	2	-20	Max. theoretisch
3	0,87	0,88	325	53	34	Max. wahrscheinlich
1	0,80	0,66	330	83	68	Prognose
4	0,70	0,44	337	124	113	Min. wahrscheinlich
5	0,20	0,33	371	317	310	Min. theoretisch

Die zugehörigen Bodenbewegungsverläufe und Streuweiten zeigt die folgende Abbildung.

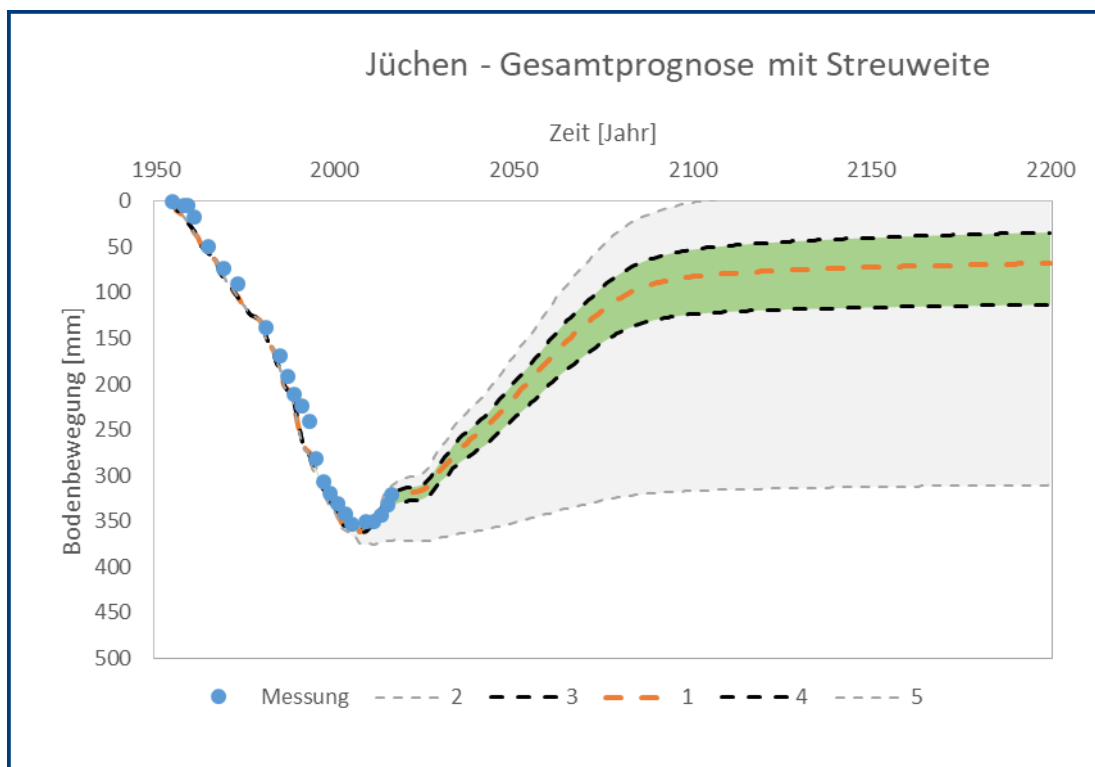


Abbildung 136 Theoretische und wahrscheinliche Streuweite der Prognose Jüchen

Wie schon beim Punkt Niedermerz (vgl. Abschnitt 6.1) ergeben sich auch für den Punkt Jüchen für die theoretischen Hebungs-faktoren von 1,0 im Endzustand größere Hebungen als zuvor eingetretene Setzungen, was auch hier auf gegenüber dem Ursprungszustand abweichende Grundwasserverhältnisse zurück zu führen ist. Die wahrscheinliche Streuweite wird jedoch durch ein relativ enges Band beschrieben und die wahrscheinlichen Abweichungen gegenüber der Prognose betragen im Jahr 2200 lediglich ca. ± 5 cm. Weiter zeigt sich auch hier, dass aus der unteren theoretischen Grenze bereits deutliche Abweichungen gegenüber den bisherigen Messwerten bis 2016 resultieren.

6.16 Niedermerz (RWE)

Der Punkt Niedermerz wurde nicht nur im Rahmen dieses Projektes, sondern auch im Rahmen der Untersuchungen für die RWE Power AG betrachtet. Auf die Ergebnisse und Unterschiede wurde bereits ausführlich in Abschnitt 4.3 eingegangen.

Die folgende Tabelle enthält die im Rahmen der Variation für das „RWE-Modell“ bestimmten Hebungsfaktoren sowie die zugehörigen Setzungsmaße für die Jahre 2015, 2100 und 2200.

Tabelle 20 Hebungs-faktoren und Streuweiten 2015, 2100 und 2200 für Niedermerz (RWE)

Fall	Hebungsfaktor [-]		Bodenbewegung [mm]			Beschreibung
	nichtbindig	bindig	2015	2100	2200	
2	1,00	1,00	261	97	35	Max. theoretisch
3	0,85	0,88	370	231	176	Max. wahrscheinlich
1	0,80	0,66	406	287	246	Prognose
4	0,75	0,44	443	343	317	Min. wahrscheinlich
5	0,20	0,33	839	814	795	Min. theoretisch

Die zugehörigen Bodenbewegungsverläufe und Streuweiten zeigt die folgende Abbildung.

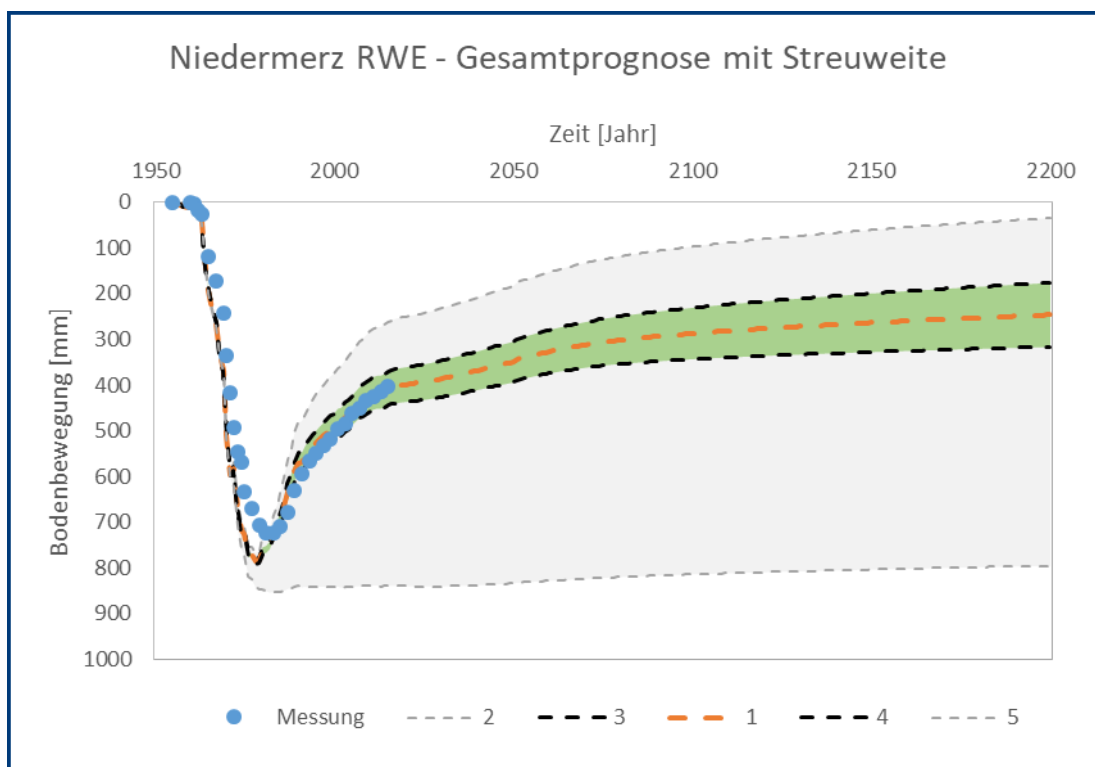


Abbildung 137 Theoretische und wahrscheinliche Streuweite der Prognose Niedermerz (RWE)

Aufgrund unterschiedlicher Eingangsdaten bzw. prognostizierten Grundwasserstandsprognosen (Abschnitt 4.3), werden für den Punkt Niedermerz auf Basis des „RWE-Modells“ im Gegensatz zum „LANUV-Modell“ (vgl. Abbildung 122) mit den theoretischen Maximalwerten keine Hebungen bis über die Geländeoberfläche erhalten. Die prognostizierten wahrscheinlichen

Bodenbewegungen sind jedoch vergleichbar und auch die wahrscheinlichen Abweichungen gegenüber der Prognose betragen für das „RWE-Modell“ ebenso wie für das „LANUV-Modell“ (vgl. Abbildung 122) im Jahr 2200 ca. ± 10 cm.

Wie schon zuvor wird auch hier nochmal sehr deutlich, dass die theoretisch möglichen Hebungsfaktoren bereits im Jahr 2015 zu unrealistischen Abweichungen vom gemessenen Verhalten führen und daher für den Punkt Niedermerz als unzutreffend einzustufen sind.

Weiter macht der gut getroffene Verlauf der Hebungen deutlich, dass das Modell nach Ziegler und Aulbach bei ausreichenden Kalibrierungsdaten nicht nur den Setzungsverlauf bei Grundwasserabsenkung sondern auch die Hebungen bei Grundwasserwiederanstieg sehr zutreffend beschreiben kann.

6.17 Kaster

Die folgende Tabelle enthält die im Rahmen der Variation bestimmten Hebungsfaktoren sowie die zugehörigen Setzungsmaße für die Jahre 2015, 2100 und 2200.

Tabelle 21 Hebungs-faktoren und Streuweiten 2015, 2100 und 2200 für Kaster

Fall	Hebungsfaktor [-]		Bodenbewegung [mm]			Beschreibung
	nichtbindig	bindig	2015	2100	2200	
2	1,00	1,00	1225	637	444	Max. theoretisch
3	0,87	0,88	1246	767	598	Max. wahrscheinlich
1	0,80	0,66	1257	842	704	Prognose
4	0,65	0,44	1280	995	894	Min. wahrscheinlich
5	0,20	0,33	1351	1434	1380	Min. theoretisch

Die zugehörigen Bodenbewegungsverläufe und Streuweiten zeigt die folgende Abbildung.

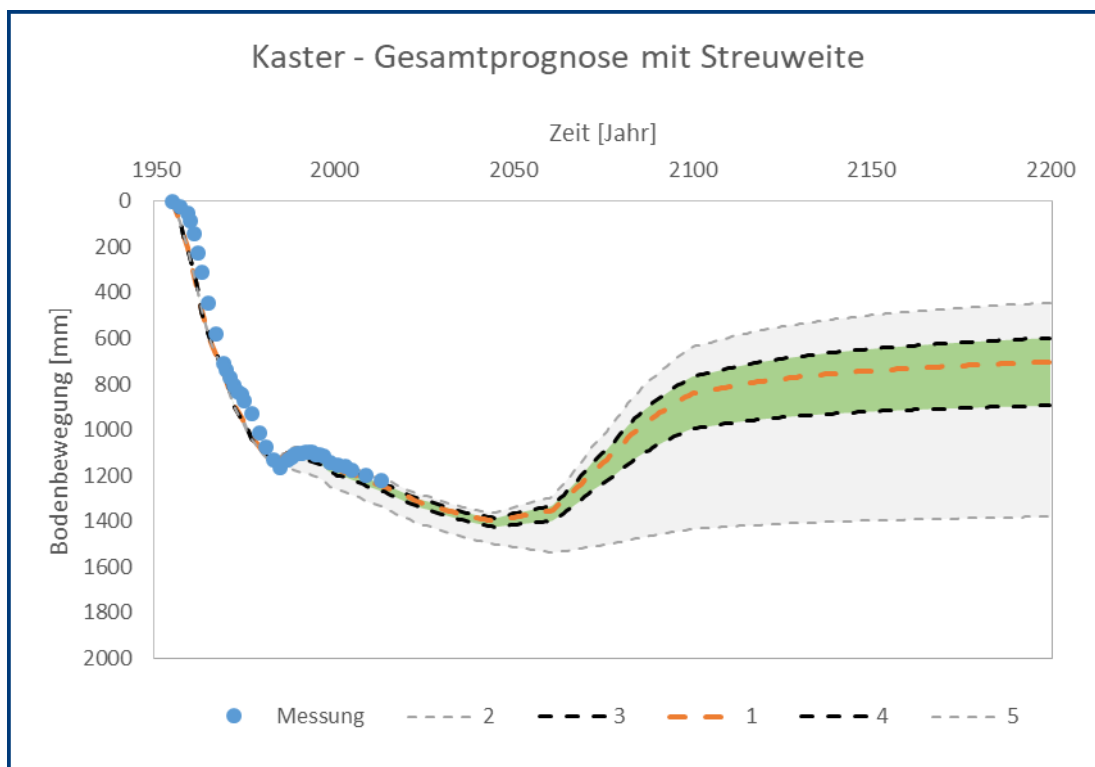


Abbildung 138 Theoretische und wahrscheinliche Streuweite der Prognose Kaster

Die wahrscheinliche Streuweite liegt innerhalb eines Bandes, welches im Jahr 2200 nach oben und unten durch Abweichungen gegenüber der Prognose von ca. +10 cm bzw. -20 cm charakterisiert ist.

Weiter wird anhand der Streuweiten deutlich, dass die unteren theoretischen Grenzwerte zu relevanten Abweichungen vom gemessenen Verhalten führen und daher im Gegensatz zu den wahrscheinlichen Grenzwerten bereits als unrealistisch einzustufen sind.

6.18 Kaster A61

Die folgende Tabelle enthält die im Rahmen der Variation bestimmten Hebungsfaktoren sowie die zugehörigen Setzungsmaße für die Jahre 2015, 2100 und 2200.

Tabelle 22 Hebungs-faktoren und Streuweiten 2015, 2100 und 2200 für Kaster A61

Fall	Hebungsfaktor [-]		Bodenbewegung [mm]			Beschreibung
	nichtbindig	bindig	2015	2100	2200	
2	1,00	1,00	951	659	435	Max. theoretisch
3	0,87	0,88	963	744	548	Max. wahrscheinlich
1	0,80	0,66	970	794	637	Prognose
4	0,60	0,44	988	925	816	Min. wahrscheinlich
5	0,20	0,33	1025	1178	1112	Min. theoretisch

Die zugehörigen Bodenbewegungsverläufe und Streuweiten zeigt die folgende Abbildung.

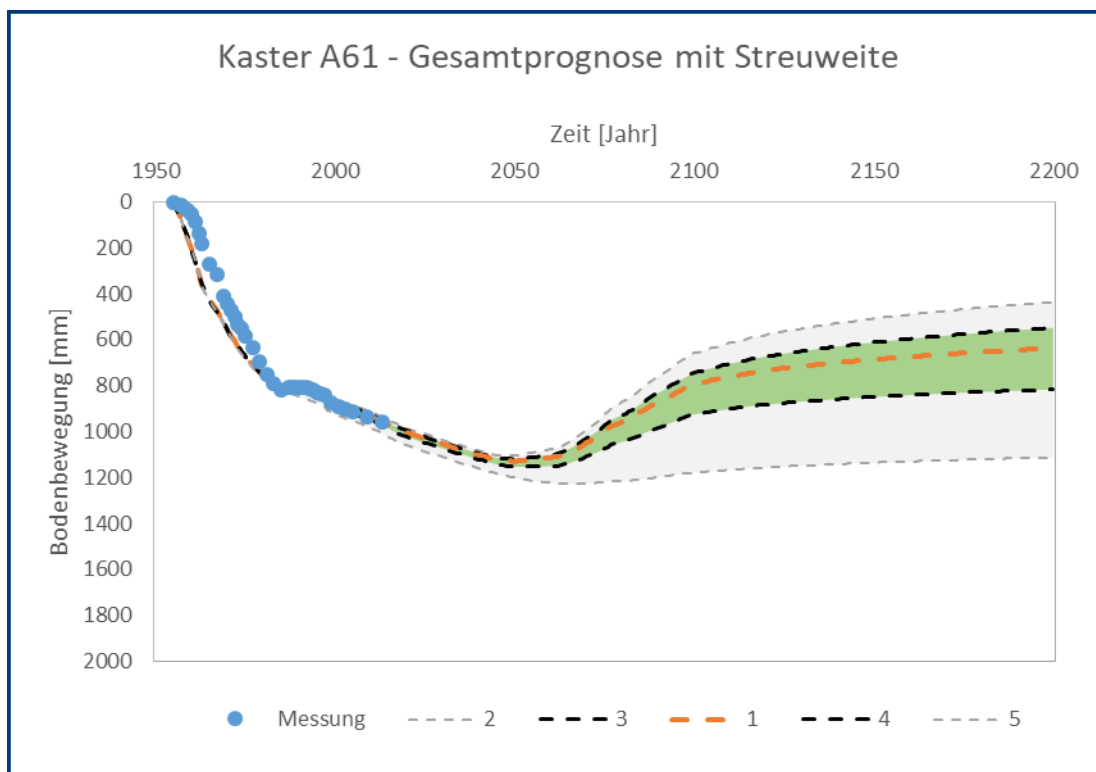


Abbildung 139 Theoretische und wahrscheinliche Streuweite der Prognose Kaster A61

Qualitativ gleichen sich die Verläufe der Punkte Kaster und Kaster A61 sehr, der Punkt Kaster A61 weist jedoch insgesamt etwas geringere Bodenbewegungen und insbesondere auch eine geringere theoretisch mögliche Streuweite auf. Die wahrscheinlichen Abweichungen gegenüber der Prognose betragen im Jahr 2200 ca. +10 cm und -20 cm.

6.19 Elsdorf

Die folgende Tabelle enthält die im Rahmen der Variation bestimmten Hebungsfaktoren sowie die zugehörigen Setzungsmaße für die Jahre 2015, 2100 und 2200.

Tabelle 23 Hebungs-faktoren und Streuweiten 2015, 2100 und 2200 für Elsdorf

Fall	Hebungsfaktor [-]		Bodenbewegung [mm]			Beschreibung
	nichtbindig	bindig	2015	2100	2200	
2	1,00	1,00	4221	3402	1279	Max. theoretisch
3	0,87	0,88	4239	3726	1859	Max. wahrscheinlich
1	0,80	0,66	4252	4116	2708	Prognose
4	0,60	0,44	4280	4664	3722	Min. wahrscheinlich
5	0,20	0,33	4330	5303	4610	Min. theoretisch

Die zugehörigen Bodenbewegungsverläufe und Streuweiten zeigt die folgende Abbildung.

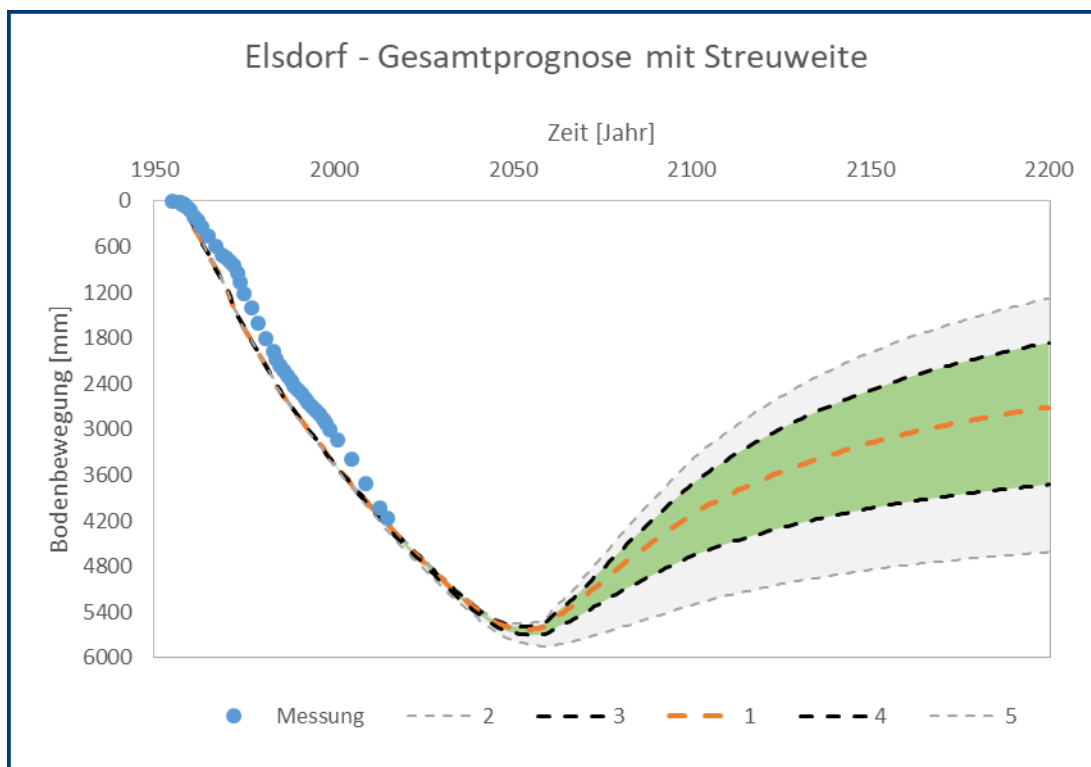


Abbildung 140 Theoretische und wahrscheinliche Streuweite der Prognose Elsdorf

Wie schon bei einigen Punkten zuvor (vgl. z.B. Ahe und Erfstadt) nehmen die Setzungen am Punkt Elsdorf bis in die 2050er Jahre noch deutlich zu, so dass auch der Hebungsprozess im Jahr 2200 noch nicht abgeschlossen sein. Die wahrscheinlichen Abweichungen gegenüber der Prognose betragen im Jahr 2200 ca. ± 100 cm. In Relation zu den maximal zu erwartenden Bodenbewegungen bzw. Setzungen von ca. 5,5 m liegt die wahrscheinliche Abweichung aber immer noch unter 20%.

6.20 Zieverich

Die folgende Tabelle enthält die im Rahmen der Variation bestimmten Hebungsfaktoren sowie die zugehörigen Setzungsmaße für die Jahre 2015, 2100 und 2200.

Tabelle 24 Hebungsfaktoren und Streuweiten 2015, 2100 und 2200 für Zieverich

Fall	Hebungsfaktor [-]		Bodenbewegung [mm]			Beschreibung
	nichtbindig	bindig	2015	2100	2200	
2	1,00	1,00	3179	1855	620	Max. theoretisch
3	0,87	0,88	3220	2163	1078	Max. wahrscheinlich
1	0,80	0,66	3245	2526	1701	Prognose
4	0,65	0,44	3295	2985	2427	Min. wahrscheinlich
5	0,20	0,33	3433	3666	3269	Min. theoretisch

Die zugehörigen Bodenbewegungsverläufe und Streuweiten zeigt die folgende Abbildung.

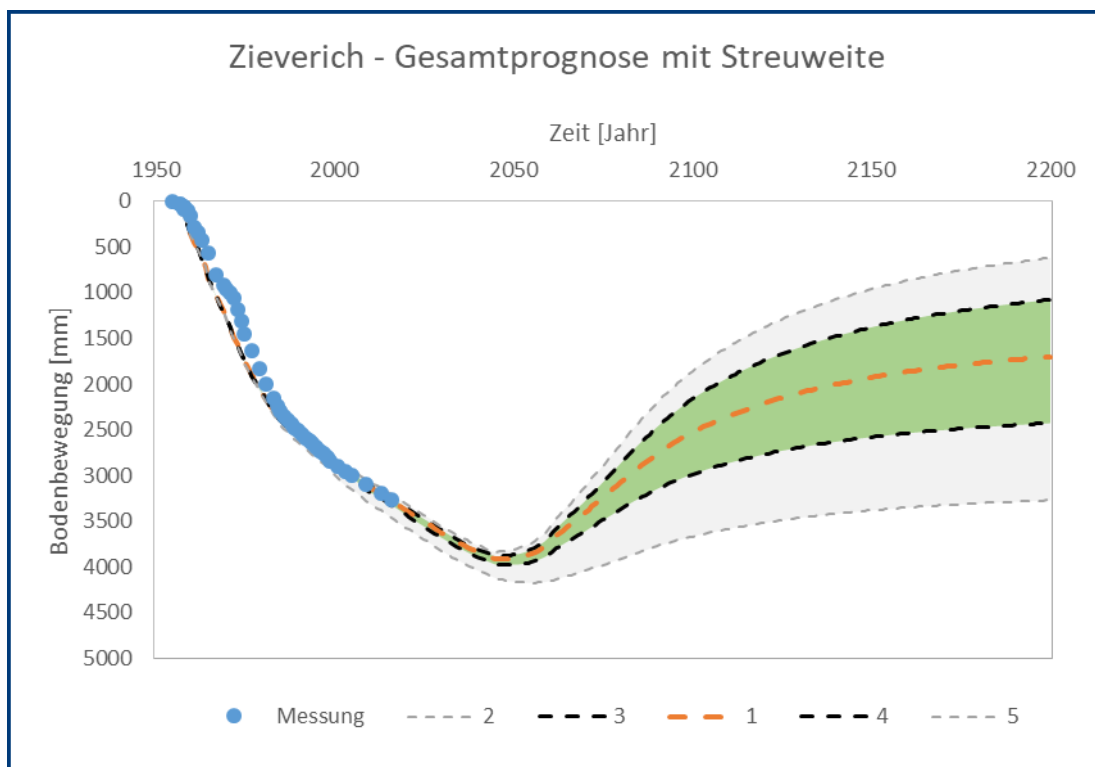


Abbildung 141 Theoretische und wahrscheinliche Streuweite der Prognose Zieverich

Wie zuvor am Punkt Elsdorf sind die Hebungen am Punkt Zieverich im Jahr 2200 ebenfalls noch nicht abgeschlossen, aber zumindest schon in größerem Maße abgeklungen. Die wahrscheinlichen Abweichungen gegenüber der Prognose betragen im Jahr 2200 ca. ± 70 cm.

6.21 Thorr

Die folgende Tabelle enthält die im Rahmen der Variation bestimmten Hebungsfaktoren sowie die zugehörigen Setzungsmaße für die Jahre 2015, 2100 und 2200.

Tabelle 25 Hebungs-faktoren und Streuweiten 2015, 2100 und 2200 für Thorr

Fall	Hebungsfaktor [-]		Bodenbewegung [mm]			Beschreibung
	nichtbindig	bindig	2015	2100	2200	
2	1,00	1,00	3441	2259	774	Max. theoretisch
3	0,87	0,88	3465	2542	1236	Max. wahrscheinlich
1	0,80	0,66	3478	2852	1863	Prognose
4	0,60	0,44	3515	3323	2659	Min. wahrscheinlich
5	0,20	0,33	3588	3929	3450	Min. theoretisch

Die zugehörigen Bodenbewegungsverläufe und Streuweiten zeigt die folgende Abbildung.

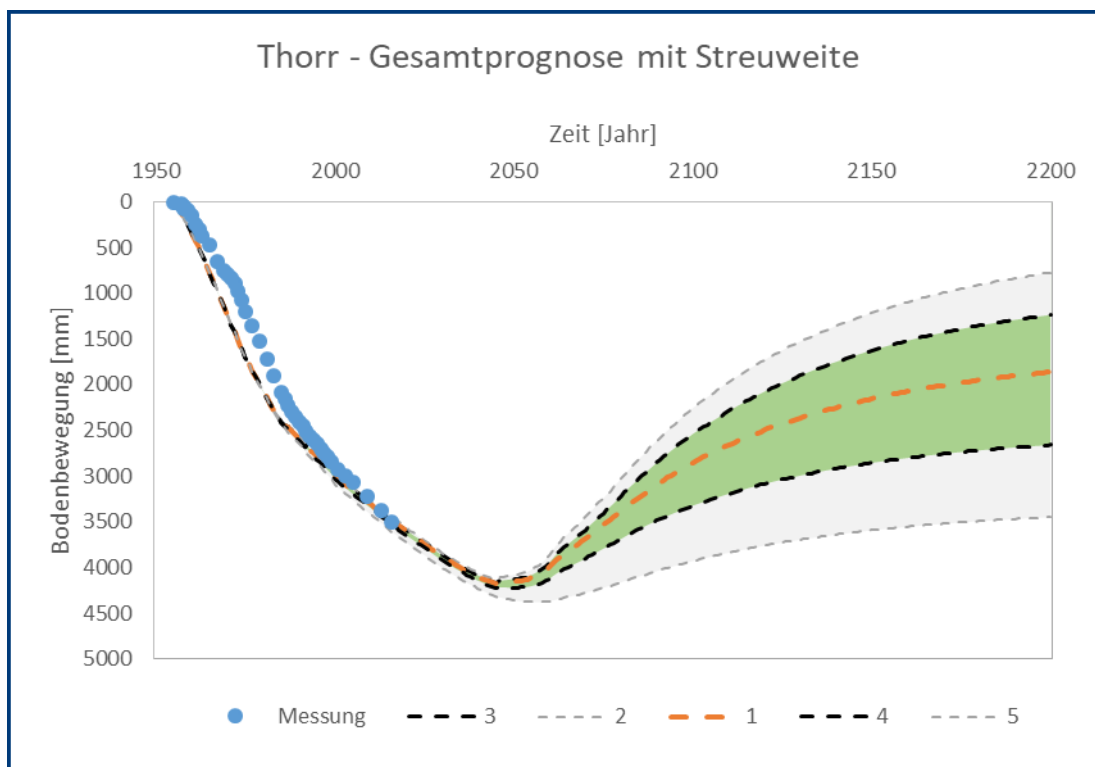


Abbildung 142 Theoretische und wahrscheinliche Streuweite der Prognose Thorr

Der Punkt Thorr weist ein ähnliches Verhalten wie der vorherige Punkt Zieverich auf und die wahrscheinlichen Abweichungen gegenüber der Prognose betragen im Jahr 2200 ebenfalls ca. ± 70 cm.

6.22 Horrem

Die folgende Tabelle enthält die im Rahmen der Variation bestimmten Hebungsfaktoren sowie die zugehörigen Setzungsmaße für die Jahre 2015, 2100 und 2200.

Tabelle 26 Hebungs-faktoren und Streuweiten 2015, 2100 und 2200 für Horrem

Fall	Hebungsfaktor [-]		Bodenbewegung [mm]			Beschreibung
	nichtbindig	bindig	2015	2100	2200	
2	1,00	1,00	2784	2390	1111	Max. theoretisch
3	0,87	0,88	2797	2587	1462	Max. wahrscheinlich
1	0,80	0,66	2804	2794	1940	Prognose
4	0,60	0,44	2823	3119	2545	Min. wahrscheinlich
5	0,20	0,33	2862	3554	3141	Min. theoretisch

Die zugehörigen Bodenbewegungsverläufe und Streuweiten zeigt die folgende Abbildung.

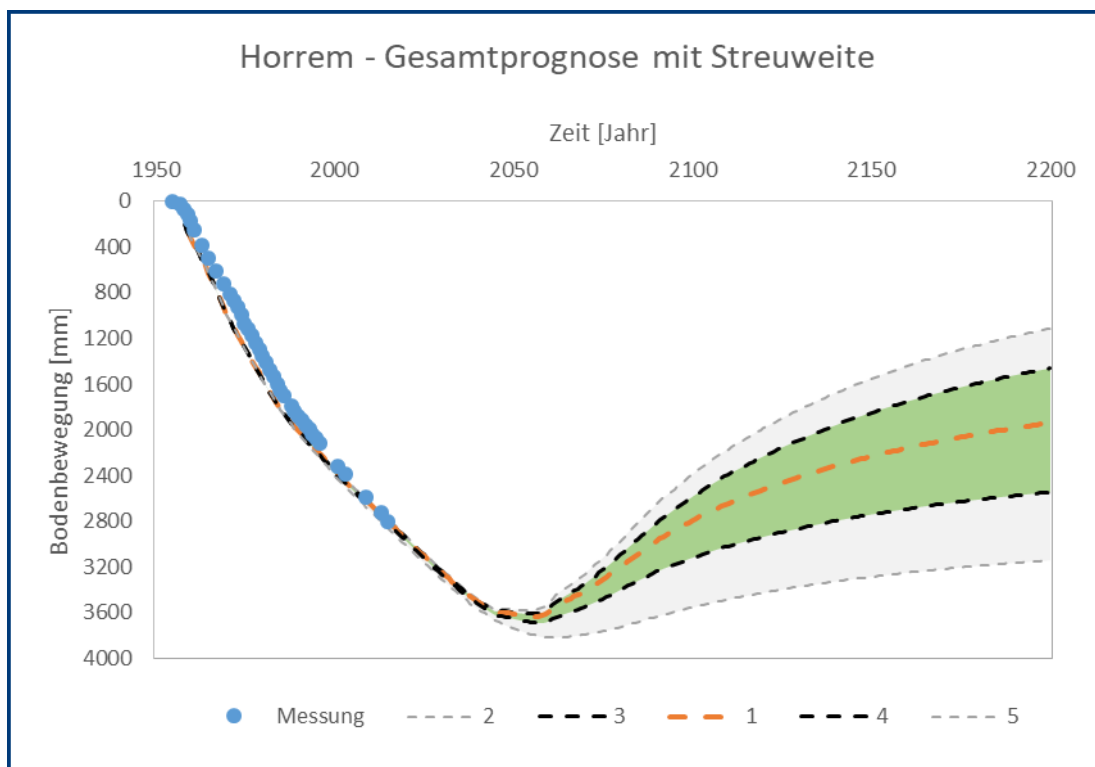


Abbildung 143 Theoretische und wahrscheinliche Streuweite der Prognose Horrem

Qualitativ gleicht der Verlauf der Bodenbewegung am Punkt Horrem – wie auch bei den nachfolgenden Punkten – den Verläufen der Punkte Zieverich und Thorr, allerdings werden insgesamt etwas geringere Bodenbewegungen gemessen und prognostiziert. Die wahrscheinlichen Abweichungen gegenüber der Prognose betragen im Jahr 2200 ca. ± 50 cm.

6.23 Mödrath

Die folgende Tabelle enthält die im Rahmen der Variation bestimmten Hebungsfaktoren sowie die zugehörigen Setzungsmaße für die Jahre 2015, 2100 und 2200.

Tabelle 27 Hebungsfaktoren und Streuweiten 2015, 2100 und 2200 für Mödrath

Fall	Hebungsfaktor [-]		Bodenbewegung [mm]			Beschreibung
	nichtbindig	bindig	2015	2100	2200	
2	1,00	1,00	1914	1382	467	Max. theoretisch
3	0,87	0,88	1932	1546	742	Max. wahrscheinlich
1	0,80	0,66	1942	1699	1084	Prognose
4	0,60	0,44	1969	1966	1551	Min. wahrscheinlich
5	0,20	0,33	2025	2362	2071	Min. theoretisch

Die zugehörigen Bodenbewegungsverläufe und Streuweiten zeigt die folgende Abbildung.

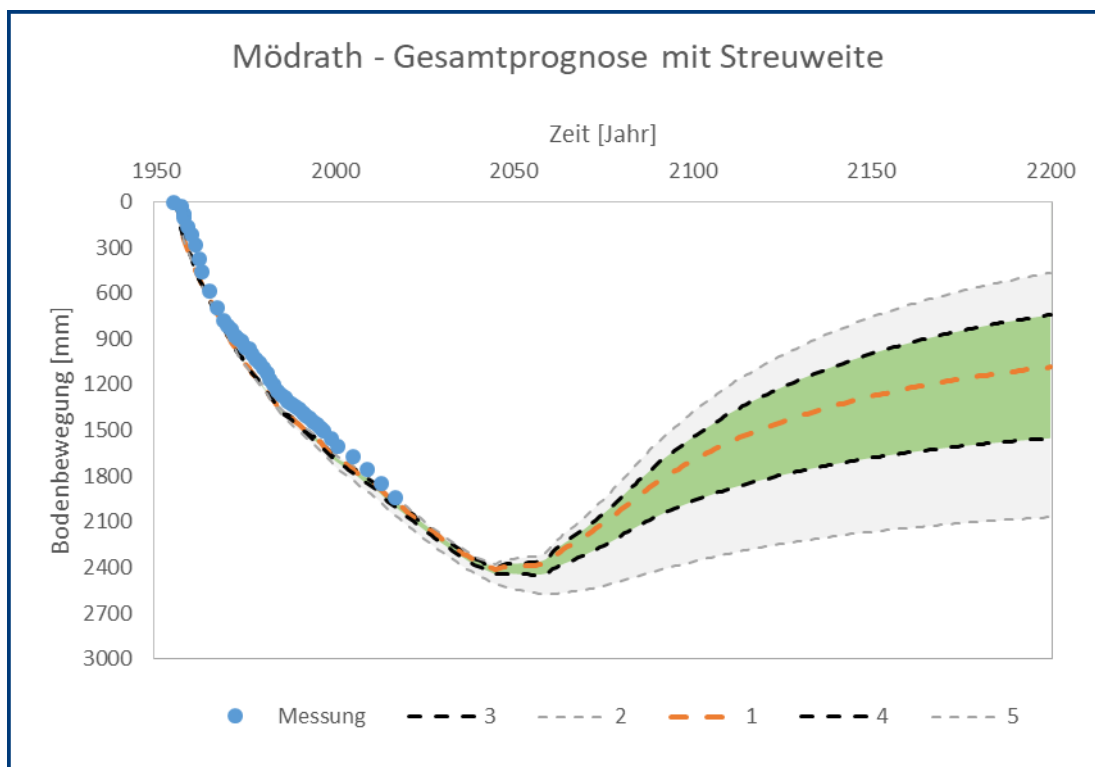


Abbildung 144 Theoretische und wahrscheinliche Streuweite der Prognose Mödrath

Die wahrscheinlichen Abweichungen gegenüber der Prognose betragen im Jahr 2200 ca. +30 cm und -50 cm.

6.24 Kerpen

Die folgende Tabelle enthält die im Rahmen der Variation bestimmten Hebungsfaktoren sowie die zugehörigen Setzungsmaße für die Jahre 2015, 2100 und 2200.

Tabelle 28 Hebungsfaktoren und Streuweiten 2015, 2100 und 2200 für Kerpen

Fall	Hebungsfaktor [-]		Bodenbewegung [mm]			Beschreibung
	nichtbindig	bindig	2015	2100	2200	
2	1,00	1,00	1964	1888	940	Max. theoretisch
3	0,87	0,88	1974	2023	1189	Max. wahrscheinlich
1	0,80	0,66	1978	2155	1521	Prognose
4	0,60	0,44	1993	2376	1949	Min. wahrscheinlich
5	0,20	0,33	2021	2688	2383	Min. theoretisch

Die zugehörigen Bodenbewegungsverläufe und Streuweiten zeigt die folgende Abbildung.

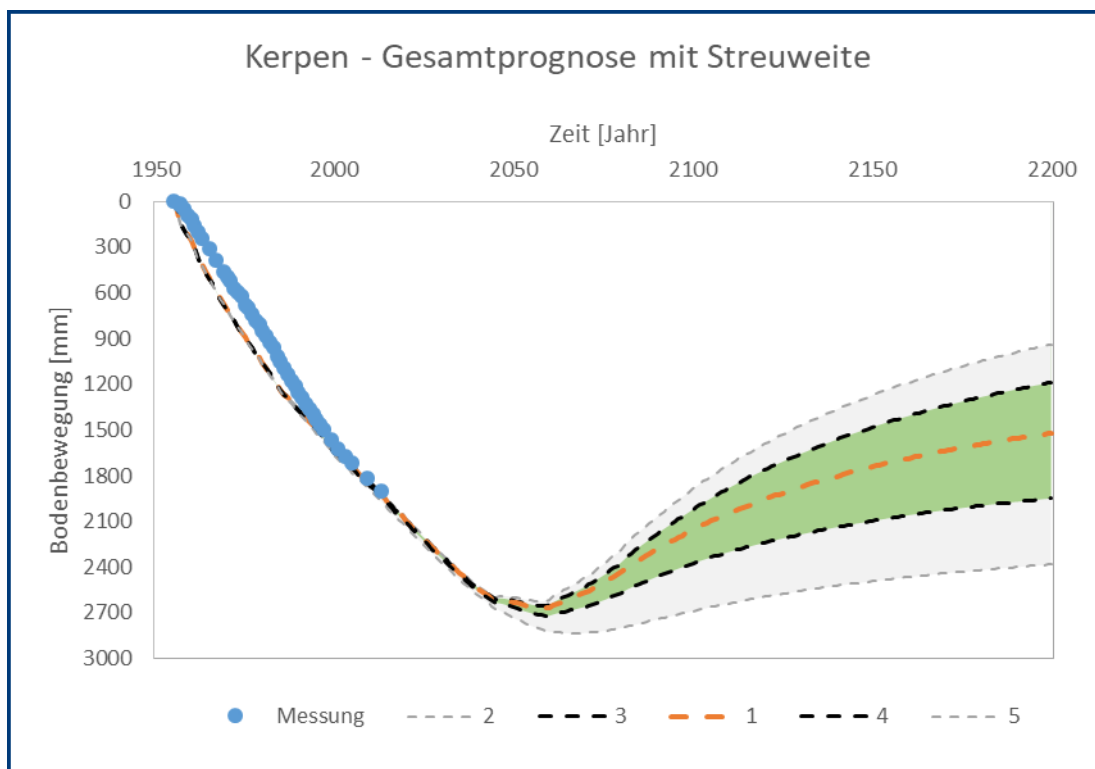


Abbildung 145 Theoretische und wahrscheinliche Streuweite der Prognose Kerpen

Die wahrscheinlichen Abweichungen gegenüber der Prognose betragen im Jahr 2200 ca. ± 40 cm.

6.25 Heppendorf

Die folgende Tabelle enthält die im Rahmen der Variation bestimmten Hebungsfaktoren sowie die zugehörigen Setzungsmaße für die Jahre 2015, 2100 und 2200.

Tabelle 29 Hebungs-faktoren und Streuweiten 2015, 2100 und 2200 für Heppendorf

Fall	Hebungsfaktor [-]		Bodenbewegung [mm]			Beschreibung
	nichtbindig	bindig	2015	2100	2200	
2	1,00	1,00	4745	2755	950	Max. theoretisch
3	0,87	0,88	4755	3260	1672	Max. wahrscheinlich
1	0,80	0,66	4761	4053	2857	Prognose
4	0,60	0,44	4776	4949	4149	Min. wahrscheinlich
5	0,20	0,33	4808	5632	5043	Min. theoretisch

Die zugehörigen Bodenbewegungsverläufe und Streuweiten zeigt die folgende Abbildung.

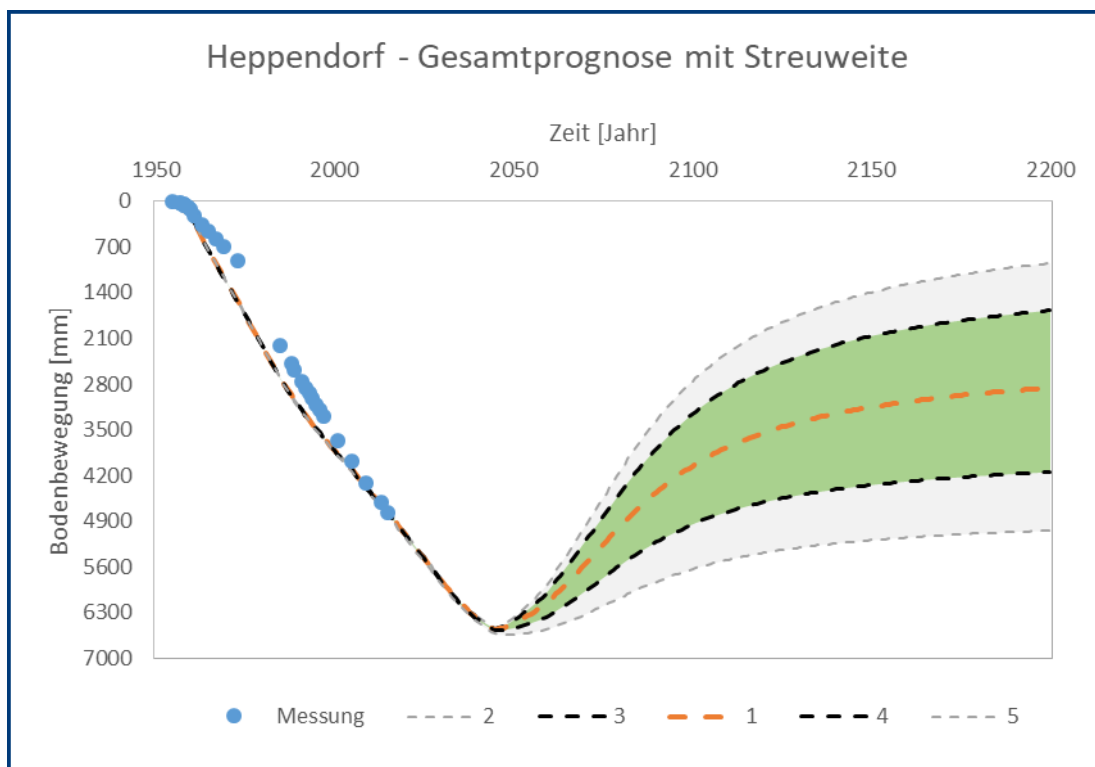


Abbildung 146 Theoretische und wahrscheinliche Streuweite der Prognose Heppendorf

Aus den bestimmten Hebungs-faktoren ergibt sich am Punkt Heppendorf auch für die wahrscheinlichen Hebungs-faktoren ein relativ breites Streuungsband, so dass die wahrscheinlichen Abweichungen gegenüber der Prognose im Jahr 2200 ca. ± 120 cm betragen. Dies begründet sich damit, dass das Hebevverhalten etwa ab 2100 fast ausschließlich durch Hebungen in den bindigen Schichten geprägt wird, bei denen der Abstand zwischen den theoretisch möglichen und den wahrscheinlichen Grenzen geringer als bei den nichtbindigen Schichten ist (vgl. z.B. Tabelle 29, 2. und 3. Spalte). Dennoch beträgt die wahrscheinliche Abweichung in Bezug auf die maximal zu erwartenden Bodenbewegungen bzw. Setzungen von ca. 6,5 m auch hier immer noch weniger als 20%.

6.26 Haus Forst

Die folgende Tabelle enthält die im Rahmen der Variation bestimmten Hebungsfaktoren sowie die zugehörigen Setzungsmaße für die Jahre 2015, 2100 und 2200.

Tabelle 30 Hebungsfaktoren und Streuweiten 2015, 2100 und 2200 für Haus Forst

Fall	Hebungsfaktor [-]		Bodenbewegung [mm]			Beschreibung
	nichtbindig	bindig	2015	2100	2200	
2	1,00	1,00	2378	2297	990	Max. theoretisch
3	0,87	0,88	2383	2462	1312	Max. wahrscheinlich
1	0,80	0,66	2386	2648	1781	Prognose
4	0,60	0,44	2395	2923	2344	Min. wahrscheinlich
5	0,20	0,33	2413	3268	2840	Min. theoretisch

Die zugehörigen Bodenbewegungsverläufe und Streuweiten zeigt die folgende Abbildung.

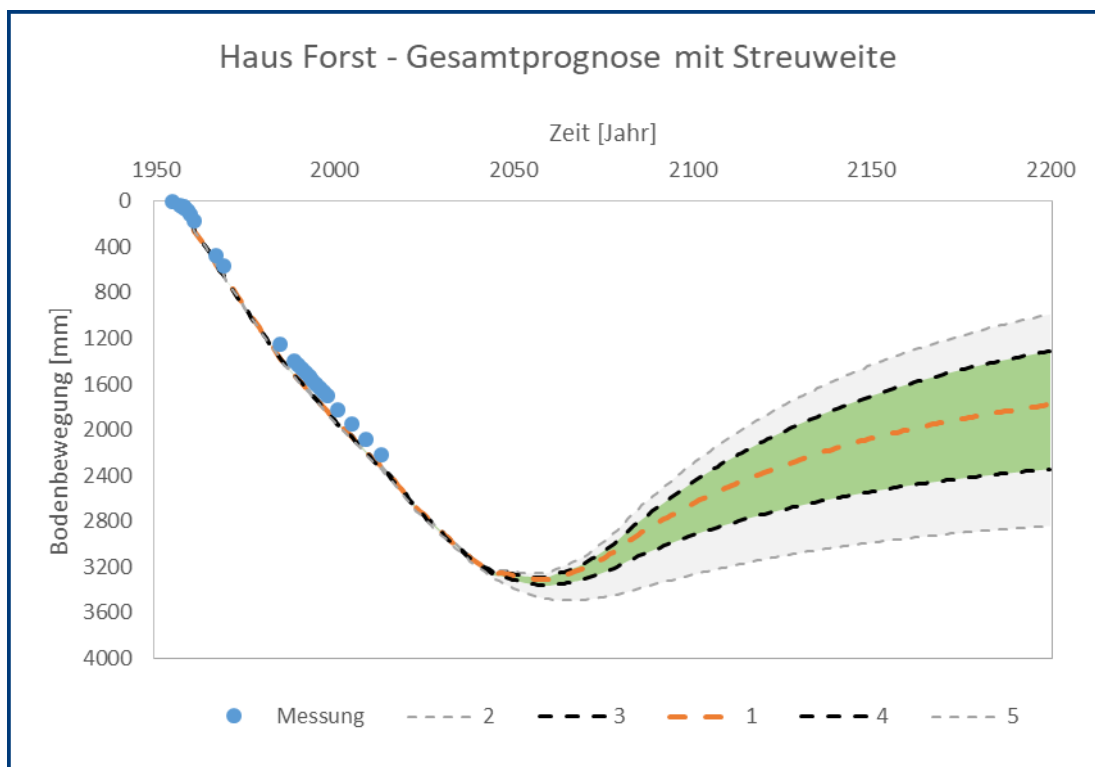


Abbildung 147 Theoretische und wahrscheinliche Streuweite der Prognose Haus Forst

Die wahrscheinlichen Abweichungen gegenüber der Prognose betragen im Jahr 2200 ca. +50 cm bzw. -60 cm.

6.27 Bergerhausen

Die folgende Tabelle enthält die im Rahmen der Variation bestimmten Hebungsfaktoren sowie die zugehörigen Setzungsmaße für die Jahre 2015, 2100 und 2200.

Tabelle 31 Hebungs-faktoren und Streuweiten 2015, 2100 und 2200 für Bergerhausen

Fall	Hebungsfaktor [-]		Bodenbewegung [mm]			Beschreibung
	nichtbindig	bindig	2015	2100	2200	
2	1,00	1,00	2792	1422	308	Max. theoretisch
3	0,87	0,88	2802	1704	724	Max. wahrscheinlich
1	0,80	0,66	2807	2111	1366	Prognose
4	0,60	0,44	2822	2603	2100	Min. wahrscheinlich
5	0,20	0,33	2850	3044	2680	Min. theoretisch

Die zugehörigen Bodenbewegungsverläufe und Streuweiten zeigt die folgende Abbildung.

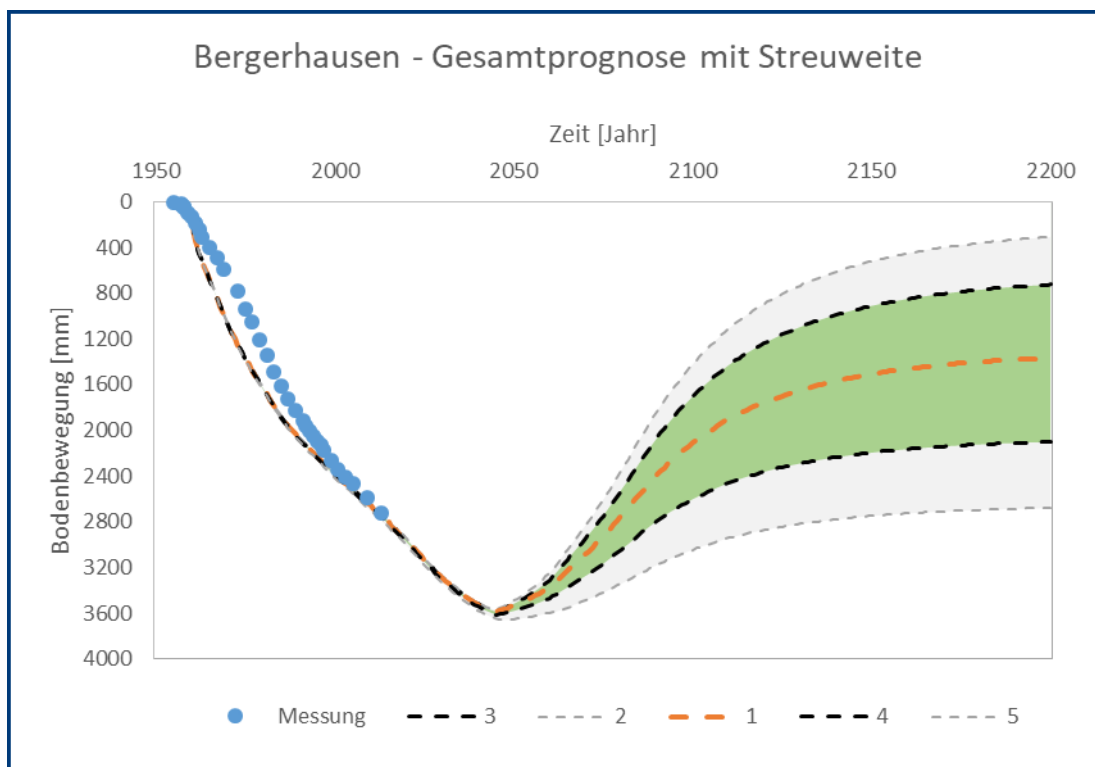


Abbildung 148 Theoretische und wahrscheinliche Streuweite der Prognose Bergerhausen

Wie auch am Punkt Heppendorf ergibt sich am Punkt Bergerhausen eine relativ große Streuweite der wahrscheinlichen Bodenbewegung aufgrund der relativ spät einsetzenden und dann dominierenden Hebungen in den bindigen Böden. Die wahrscheinlichen Abweichungen gegenüber der Prognose betragen im Jahr 2200 ca. ± 70 cm.

6.28 Buir

Die folgende Tabelle enthält die im Rahmen der Variation bestimmten Hebungsfaktoren sowie die zugehörigen Setzungsmaße für die Jahre 2015, 2100 und 2200.

Tabelle 32 Hebungsfaktoren und Streuweiten 2015, 2100 und 2200 für Buir

Fall	Hebungsfaktor [-]		Bodenbewegung [mm]			Beschreibung
	nichtbindig	bindig	2015	2100	2200	
2	1,00	1,00	2086	1852	716	Max. theoretisch
3	0,87	0,88	2091	2036	1036	Max. wahrscheinlich
1	0,80	0,66	2094	2290	1537	Prognose
4	0,60	0,44	2101	2608	2104	Min. wahrscheinlich
5	0,20	0,33	2117	2915	2543	Min. theoretisch

Die zugehörigen Bodenbewegungsverläufe und Streuweiten zeigt die folgende Abbildung.

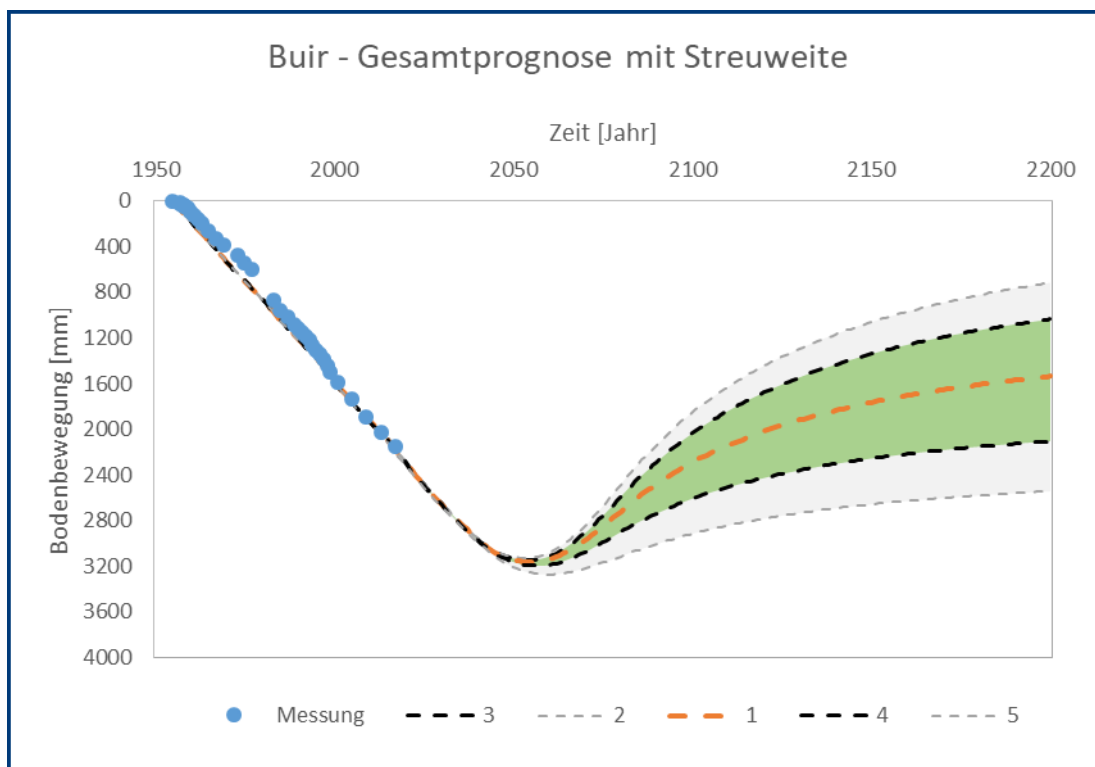


Abbildung 149 Theoretische und wahrscheinliche Streuweite der Prognose Buir

Die wahrscheinlichen Abweichungen gegenüber der Prognose betragen im Jahr 2200 ca. +50 cm bzw. -60 cm.

6.29 Merzenich

Die folgende Tabelle enthält die im Rahmen der Variation bestimmten Hebungsfaktoren sowie die zugehörigen Setzungsmaße für die Jahre 2015, 2100 und 2200.

Tabelle 33 Hebungsfaktoren und Streuweiten 2015, 2100 und 2200 für Merzenich

Fall	Hebungsfaktor [-]		Bodenbewegung [mm]			Beschreibung
	nichtbindig	bindig	2015	2100	2200	
2	1,00	1,00	920	1130	696	Max. theoretisch
3	0,87	0,88	922	1179	797	Max. wahrscheinlich
1	0,80	0,66	923	1228	940	Prognose
4	0,60	0,44	926	1309	1116	Min. wahrscheinlich
5	0,20	0,33	932	1422	1281	Min. theoretisch

Die zugehörigen Bodenbewegungsverläufe und Streuweiten zeigt die folgende Abbildung.

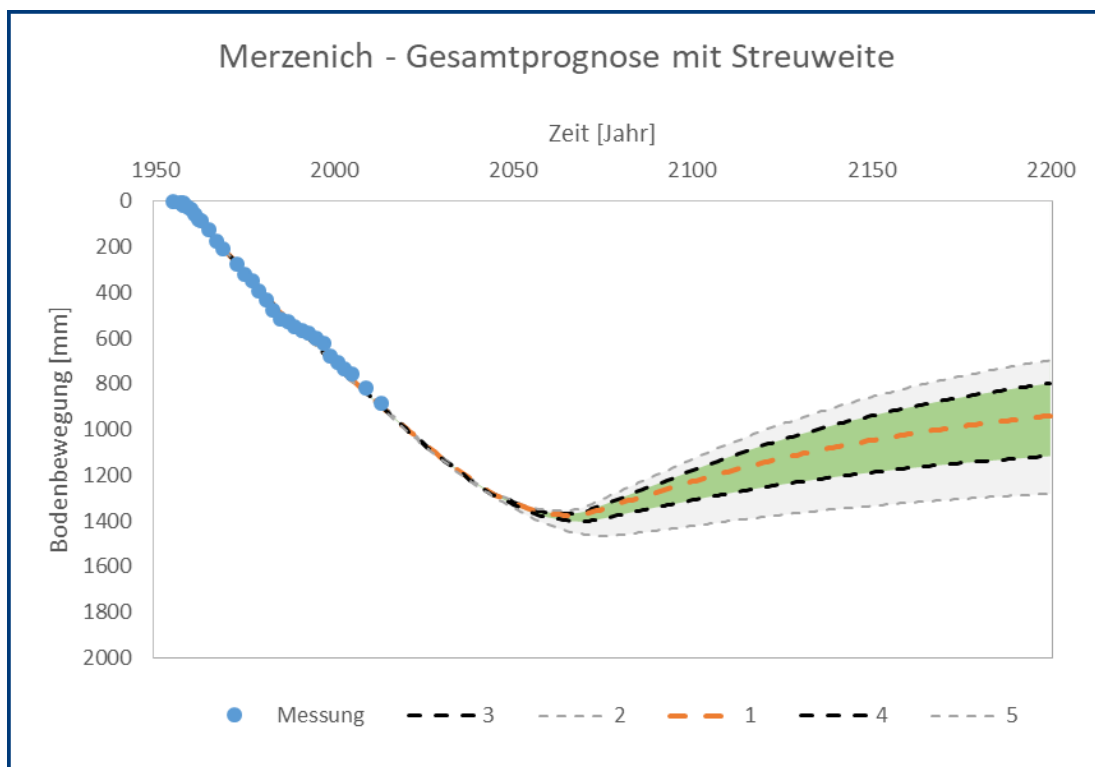


Abbildung 150 Theoretische und wahrscheinliche Streuweite der Prognose Merzenich

Die wahrscheinlichen Abweichungen gegenüber der Prognose betragen im Jahr 2200 ca. ± 15 cm.

6.30 Wissersheim

Die folgende Tabelle enthält die im Rahmen der Variation bestimmten Hebungsfaktoren sowie die zugehörigen Setzungsmaße für die Jahre 2015, 2100 und 2200.

Tabelle 34 Hebungsfaktoren und Streuweiten 2015, 2100 und 2200 für Wissersheim

Fall	Hebungsfaktor [-]		Bodenbewegung [mm]			Beschreibung
	nichtbindig	bindig	2015	2100	2200	
2	1,00	1,00	1048	1103	500	Max. theoretisch
3	0,87	0,88	1051	1182	652	Max. wahrscheinlich
1	0,80	0,66	1053	1271	867	Prognose
4	0,60	0,44	1058	1403	1131	Min. wahrscheinlich
5	0,20	0,33	1067	1569	1376	Min. theoretisch

Die zugehörigen Bodenbewegungsverläufe und Streuweiten zeigt die folgende Abbildung.

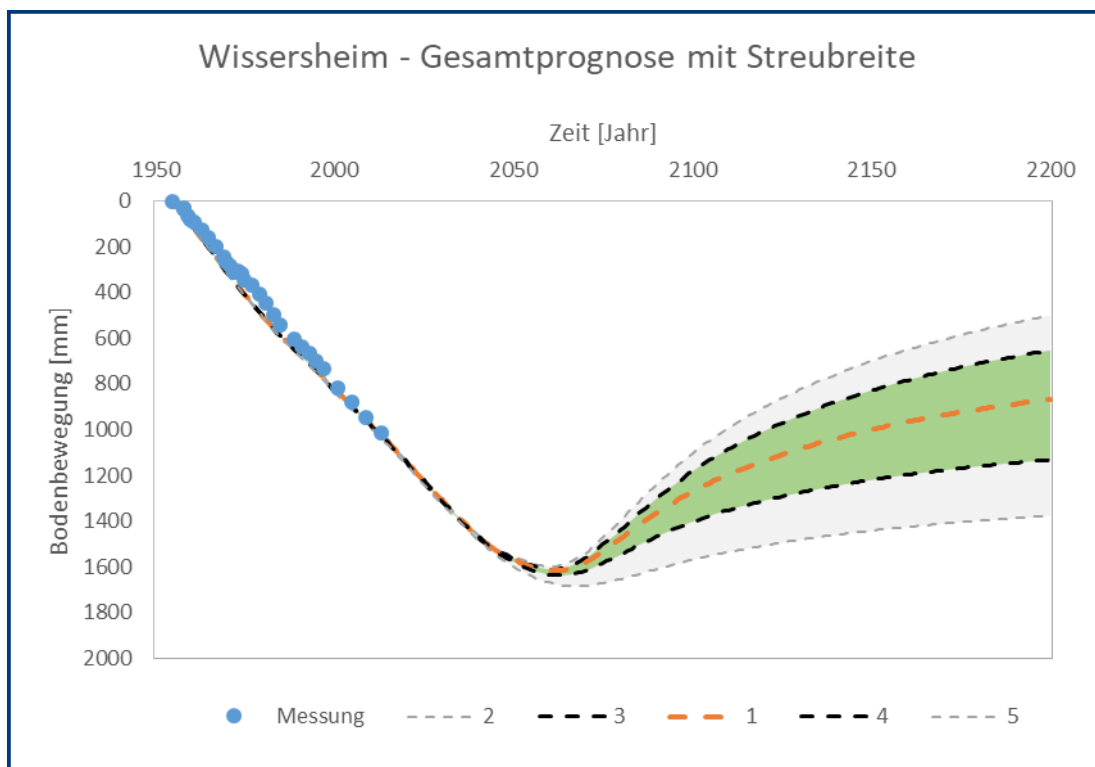


Abbildung 151 Theoretische und wahrscheinliche Streuweite der Prognose Wissersheim

Die wahrscheinlichen Abweichungen gegenüber der Prognose betragen im Jahr 2200 ca. +20 cm und -30 cm.

6.31 Baal

Die folgende Tabelle enthält die im Rahmen der Variation bestimmten Hebungsfaktoren sowie die zugehörigen Setzungsmaße für die Jahre 2015, 2100 und 2200.

Tabelle 35 Hebungsfaktoren und Streuweiten 2015, 2100 und 2200 für Baal

Fall	Hebungsfaktor [-]		Bodenbewegung [mm]			Beschreibung
	nichtbindig	bindig	2015	2100	2200	
2	1,00	1,00	252	160	47	Max. theoretisch
3	0,87	0,88	253	182	83	Max. wahrscheinlich
1	0,80	0,66	254	198	115	Prognose
4	0,60	0,44	256	233	174	Min. wahrscheinlich
5	0,20	0,33	260	297	267	Min. theoretisch

Die zugehörigen Bodenbewegungsverläufe und Streuweiten zeigt die folgende Abbildung.

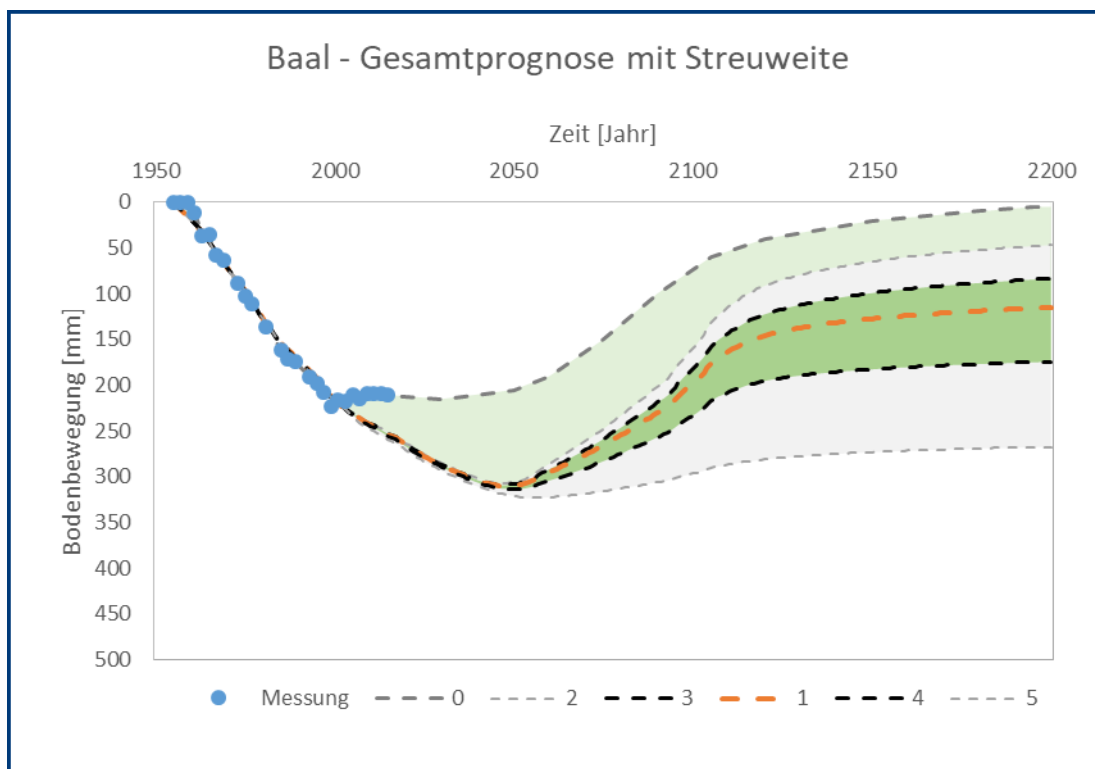


Abbildung 152 Theoretische und wahrscheinliche Streuweite der Prognose Baal

Am Punkt Baal wurde nach anfangs kontinuierlich zunehmenden Setzungen und etwa ab den 2000er Jahren eine Stagnation derselben beobachtet. Dies ist wie auch bei den Punkten Heinsberg und Körrenzig auf Einflüsse aus dem Steinkohlebergbau zurückzuführen (vgl. Abschnitt 5). Da die abschließende Kalibrierung für den Punkt Baal aber so vorgenommen wurde, dass bis ins Jahr 2000 eine sehr gute Übereinstimmung von Nachrechnung und Messung erreicht wird, klaffen in den folgenden Jahren Messung und Nachrechnung auseinander.

Daher wurde die Darstellung der Streuweite in Abbildung 152 um einen weiteren geschätzten Verlauf „0“ ergänzt, welcher zunächst dem gemessenen Verlauf folgt und sich schließlich einem dem oberen theoretischen Verlauf parallelen Verlauf annähert. Mit dem so erhaltenen hellgrün eingefärbten Bereich wird dann zusätzlich dem Einfluss des Steinkohlebergbaus Rechnung getragen.

Die wahrscheinlichen errechneten Abweichungen gegenüber der Prognose ohne Steinkohleeinfluss betragen im Jahr 2200 ca. +30 und -40 cm. Mit Einfluss des Steinkohlebergbaus könnten sich dann letztlich aber auch Hebungen in einer Größenordnung ergeben, durch die das Geländeniveau von 1955 wieder erreicht wird.

6.32 Mersch

Die folgende Tabelle enthält die im Rahmen der Variation bestimmten Hebungsfaktoren sowie die zugehörigen Setzungsmaße für die Jahre 2015, 2100 und 2200.

Tabelle 36 Hebungsfaktoren und Streuweiten 2015, 2100 und 2200 für Mersch

Fall	Hebungsfaktor [-]		Bodenbewegung [mm]			Beschreibung
	nichtbindig	bindig	2015	2100	2200	
2	1,00	1,00	670	698	422	Max. theoretisch
3	0,87	0,88	671	740	499	Max. wahrscheinlich
1	0,80	0,66	671	766	574	Prognose
4	0,60	0,44	672	831	699	Min. wahrscheinlich
5	0,20	0,33	674	955	877	Min. theoretisch

Die zugehörigen Bodenbewegungsverläufe und Streuweiten zeigt die folgende Abbildung.

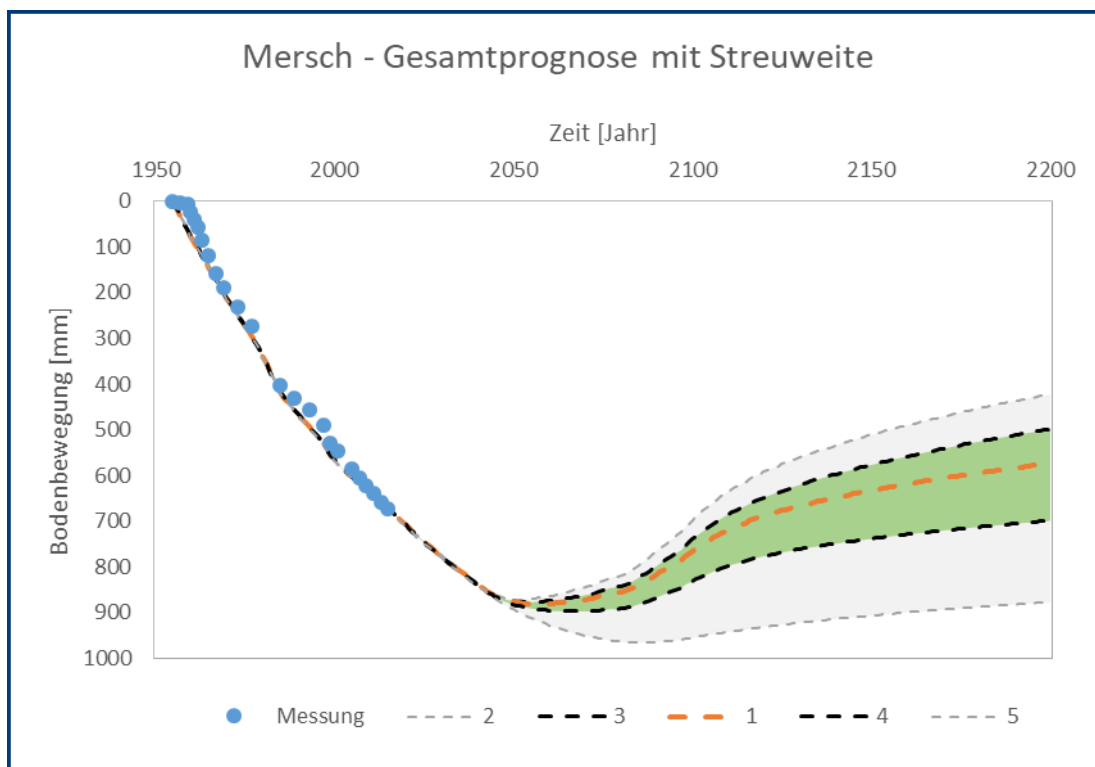


Abbildung 153 Theoretische und wahrscheinliche Streuweite der Prognose Mersch

Die wahrscheinlichen Abweichungen gegenüber der Prognose betragen im Jahr 2200 ca. +7 cm bzw. -12 cm.

6.33 Oberzier

Die folgende Tabelle enthält die im Rahmen der Variation bestimmten Hebungsfaktoren sowie die zugehörigen Setzungsmaße für die Jahre 2015, 2100 und 2200.

Tabelle 37 Hebungsfaktoren und Streuweiten 2015, 2100 und 2200 für Oberzier

Fall	Hebungsfaktor [-]		Bodenbewegung [mm]			Beschreibung
	nichtbindig	bindig	2015	2100	2200	
2	1,00	1,00	654	495	382	Max. theoretisch
3	0,87	0,88	658	552	454	Max. wahrscheinlich
1	0,80	0,66	660	586	513	Prognose
4	0,60	0,44	666	675	628	Min. wahrscheinlich
5	0,20	0,33	678	845	817	Min. theoretisch

Die zugehörigen Bodenbewegungsverläufe und Streuweiten zeigt die folgende Abbildung.

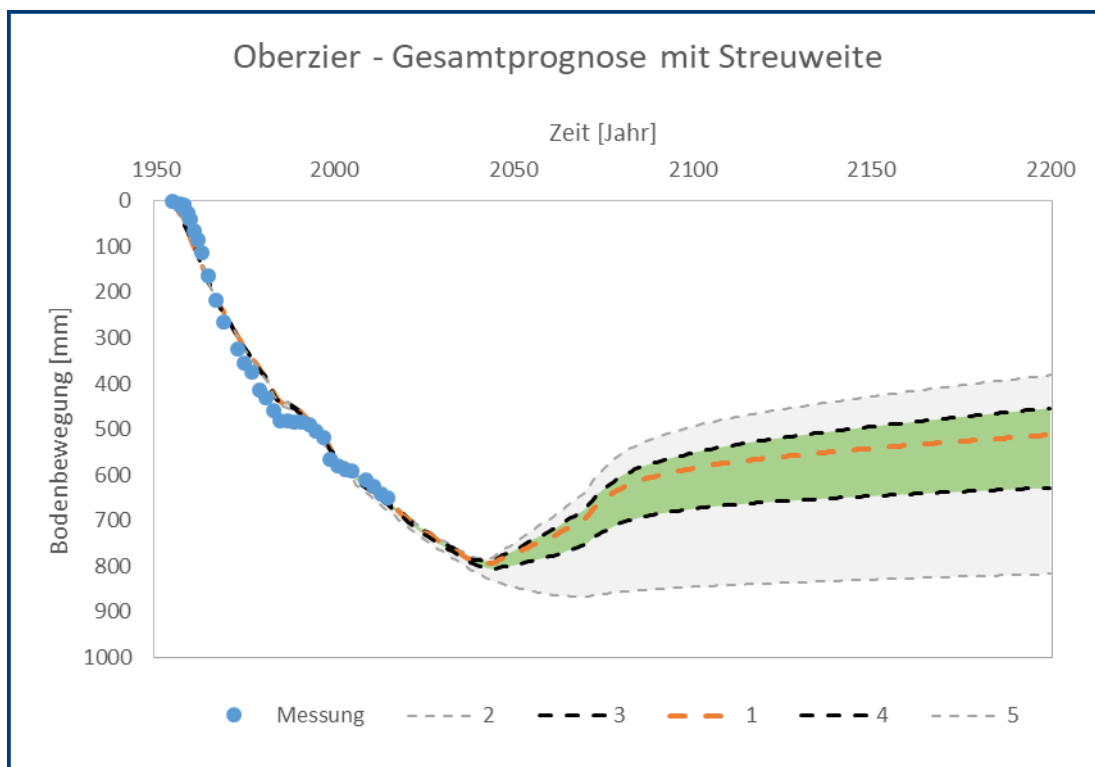


Abbildung 154 Theoretische und wahrscheinliche Streuweite der Prognose Oberzier

Die wahrscheinlichen Abweichungen gegenüber der Prognose betragen im Jahr 2200 ca. +6 cm und -11 cm.

6.34 Borr

Die folgende Tabelle enthält die im Rahmen der Variation bestimmten Hebungsfaktoren sowie die zugehörigen Setzungsmaße für die Jahre 2015, 2100 und 2200.

Tabelle 38 Hebungsfaktoren und Streuweiten 2015, 2100 und 2200 für Borr

Fall	Hebungsfaktor [-]		Bodenbewegung [mm]			Beschreibung
	nichtbindig	bindig	2015	2100	2200	
2	1,00	1,00	281	252	113	Max. theoretisch
3	0,87	0,88	284	279	158	Max. wahrscheinlich
1	0,80	0,66	285	299	208	Prognose
4	0,60	0,44	290	342	283	Min. wahrscheinlich
5	0,20	0,33	297	413	376	Min. theoretisch

Die zugehörigen Bodenbewegungsverläufe und Streuweiten zeigt die folgende Abbildung.

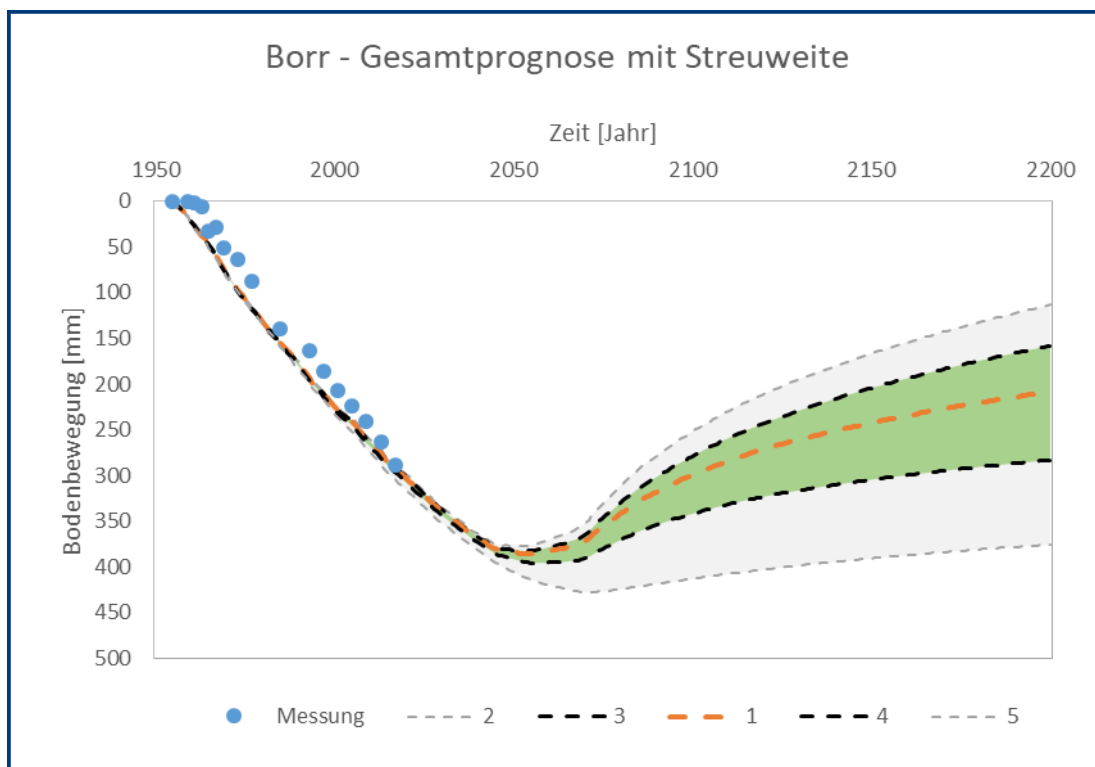


Abbildung 155 Theoretische und wahrscheinliche Streuweite der Prognose Borr

Die wahrscheinlichen Abweichungen gegenüber der Prognose betragen im Jahr 2200 ca. +5 cm und -8 cm.

6.35 Weilerswist

Die folgende Tabelle enthält die im Rahmen der Variation bestimmten Hebungs-faktoren sowie die zugehörigen Setzungsmaße für die Jahre 2015, 2100 und 2200.

Tabelle 39 Hebungs-faktoren und Streuweiten 2015, 2100 und 2200 für Weilerswist

Fall	Hebungs-faktor [-]		Bodenbewegung [mm]			Beschreibung
	nichtbindig	bindig	2015	2100	2200	
2	1,00	1,00	486	474	147	Max. theoretisch
3	0,87	0,88	490	513	225	Max. wahrscheinlich
1	0,80	0,66	491	538	311	Prognose
4	0,60	0,44	496	597	442	Min. wahrscheinlich
5	0,20	0,33	506	707	609	Min. theoretisch

Die zugehörigen Bodenbewegungsverläufe und Streuweiten zeigt die folgende Abbildung.

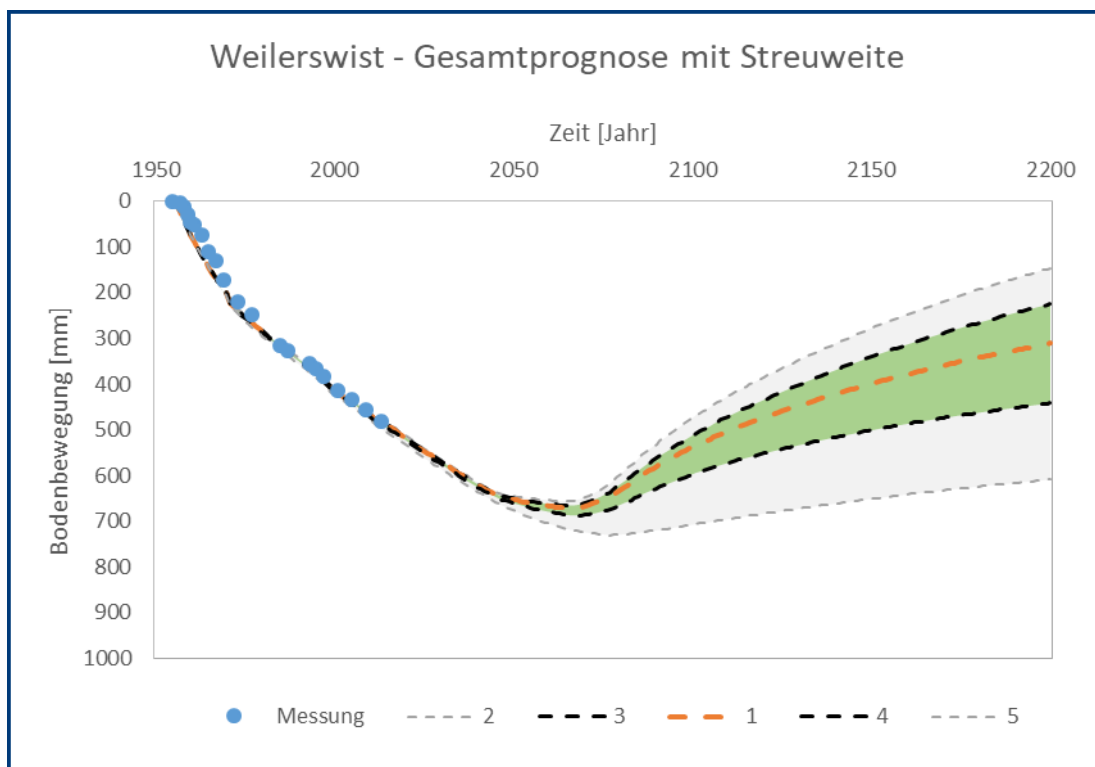


Abbildung 156 Theoretische und wahrscheinliche Streuweite der Prognose Weilerswist

Der Verlauf am letzten Punkt Weilerswist gleicht denen der vorhergehenden Punkte und der Hebungsprozess wird im 2200 noch nicht abgeschlossen sein. Die wahrscheinlichen Abweichungen gegenüber der Prognose betragen im Jahr 2200 ca. + 9 cm und -13 cm.

6.36 Zusammenfassung und Typisierung der einzelnen Punkte

Generell unterliegen die Prognosen verschiedensten Einflüssen, wie dem zeitlichen Verlauf der Grundwasserganglinien und insbesondere der Geologie. Diese Beeinflussung ist gleichermaßen auch auf die prognostizierten Streuweiten vorhanden, wobei sich aber zusätzlich die bisherige Bodenbewegungen und insbesondere bereits eingetretene Hebungen auf die Größenordnung der wahrscheinlichen Streuweite auswirken. Aufgrund der gegenüber der reinen Prognose noch vielseitigeren Einflüsse auf die Streuweite ist daher eine diesbezügliche Typisierung nahezu unmöglich (vgl. dazu auch Abschnitt 5.14).

Allerdings ergeben sich aus der Variation der Hebungsfaktoren unter Berücksichtigung der Randbedingungen folgende Erkenntnisse:

- Die wahrscheinliche Streuweite schwankt an den meisten Punkten zwischen ± 10 cm und ± 50 cm.
- Den größten Einfluss auf die absolute Streuweite haben neben den Hebungsfaktoren selbst die Größe der maximalen Setzungen bzw. das sich daraus ergebende Hebungspotential.
- Die geringsten Streuweiten werden am Punkt Heinsberg mit ± 2 cm und mit ± 5 cm z.B. an den Punkten Körrenzig, Titz oder Wanlo prognostiziert.
- Die größten Streuweiten werden für den Punkt Elsdorf mit ± 100 cm und für den Punkt Heppendorf mit ± 120 cm prognostiziert. In Relation zu den dort maximal zu erwartenden Bodenbewegungen bzw. Setzungen von ca. 5,5 m und 6,5 m liegt die wahrscheinliche Streuweite aber immer noch unter 20%.
- Sofern an einem Punkt bereits Hebungen aufgetreten sind, fließt dies in die Bestimmung der wahrscheinlichen Streuweite mit ein und führt zu einer Reduzierung derselben (vgl. Niedermerz, Jülich, Kaster, Kaster A61).
- Auch an Punkten, an den zwar an der Geländeoberfläche in Summe noch Setzungen gemessen werden, in einzelnen Schichten aber bereits Hebungen aufgetreten sind, kann die wahrscheinliche Streuweite bereits teilweise verringert werden (vgl. z.B. Titz).
- Für Punkte mit hohem Anteil bindiger Böden ergibt sich i.d.R. eine größere Streuweite (vgl. z.B. Erftstadt), als für Punkte mit überwiegend nichtbindigen Böden (vgl. z.B. Odenkirchen), was sich mit für das Heбungsverhalten der nichtbindigen Böden bereits vorliegenden Erfahrungswerten begründet.

7 Fazit

Mit den vom LANUV zur Verfügung gestellten Eingangsdaten zur Geologie und den Grundwasserverhältnissen wurde seitens ZAI auf Basis allgemein gültiger bodenmechanischer Zusammenhänge ein Bodenbewegungsmodell aufgestellt und zunächst für den Punkt Niedermerz anhand von gemessenen Bodenbewegungen kalibriert, wie die folgende Abbildung 157 nochmals veranschaulicht.

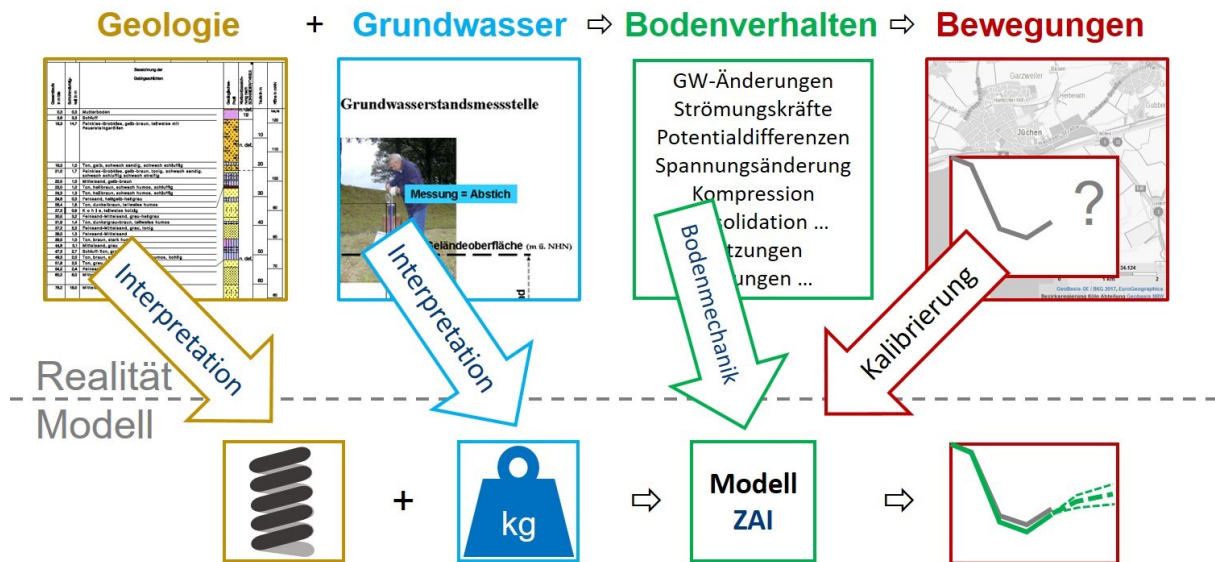


Abbildung 157 Modellentwicklung

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 (vgl. Abbildung 118) und zwischen einzelnen Punkten im Speziellen (vgl. Abbildung 120) 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 am Punkt Niedermerz gezeigt, dass die meisten Eingangsparameter auf Basis der bisherigen Setzungen und Hebungen im Nachrechnungszeitraum bereits sehr gut kalibriert sind und sich daraus nur eine geringe Streuweite hinsichtlich der Prognose ergibt. Lediglich aus den Hebungsfaktoren und insbesondere dem Hebungsfaktor für die bindigen Schichten können noch etwas größere Streuweiten resultieren. Dies begründet sich damit, dass Hebungen der bindigen Schichten aufgrund des zeitverzögerten Verhaltens bis heute noch gar nicht oder nur in sehr geringem Maß aufgetreten sind und der „Hebungsfaktor bindig“ daher bisher noch mit Unschärfen behaftet ist. So wurden an den betrachteten Punkten

zwar deutliche Setzungen von bis zu 3,5 m gemessen, allerdings bisher nur an drei Punkten ein stagnierender Setzungsverlauf und lediglich am Punkt Niedermerz Hebungen von ca. 30 cm beobachtet.

Außerdem haben die Variation der Eingangsdaten (Geologie, Grundwasser) und die Neuberechnung für einen Höhenfestpunkt gezeigt, dass übliche Ungenauigkeiten in den Eingangsdaten wie z.B. bei den Schichtmächtigkeiten oder den Absenkungsmaxima durch die Kalibrierung ausgeglichen werden können. Weiter hat insbesondere die Neuberechnung für einen Höhenfestpunkt auch gezeigt, dass die dabei möglichen Unterschiede bis 2100 relativ gering sind. Allerdings ergeben sich darüber hinaus Auswirkungen auf die Prognose bis 2200. Bei in der Zukunft möglicherweise auftretenden Abweichungen zwischen Prognose und Messwerten sollten daher zunächst immer die bereitgestellten Eingangsdaten überprüft und mit gegebenenfalls in der Zwischenzeit zusätzlich gewonnenen Erkenntnissen abgeglichen werden.

Generell sollten relevante Änderungen der Eingangsdaten wie z.B. der Grundwasserganglinien, die sich etwa aus einer geänderten Bewirtschaftung bzw. Abbauplanung ergeben können, oder relevante neue Informationen fortlaufend berücksichtigt und im Bodenbewegungsmodell aktualisiert werden.

Die Kalibrierung des Punktes Niedermerz ohne die Berücksichtigung bereits gemessener Hebungen hat außerdem gezeigt, dass bei unzutreffend gewählten Hebungsfaktoren mit dem Beginn der Hebungen unmittelbar Abweichungen vom tatsächlich gemessenen Verhalten auftreten. Dies eröffnet dann aber auch die Möglichkeit, die Eingangsparameter unmittelbar nachzukalibrieren und die Prognose frühzeitig und stetig zu verbessern. Sofern die Hebungsfaktoren im Zuge der Kalibrierung auf Basis bisheriger Erfahrungswerte bereits in der richtigen Größenordnung gewählt wurden, treten Abweichungen zwischen Prognose und tatsächlich gemessenem Verhalten hingegen erst allmählich auf. Dennoch wird die Prognose aufgrund des bereits in der richtigen Größenordnung gewählten Hebungsfaktors für den Endzeitpunkt relativ zutreffend sein (vgl. Abbildung 67).

Basierend auf den vorliegenden Untersuchungen und den daraus gewonnenen Erkenntnissen wurden schließlich für 12 weitere Punkte mit dem Modell nach Ziegler und Aulbach Bodenbewegungsprognosen aufgestellt. Dabei hat sich gezeigt, dass das bis dato gemessene Verhalten generell sehr gut abgebildet werden kann und somit die Grundvoraussetzung für realistische Prognosen gegeben ist. Im Nachrechnungszeitraum festzustellende geringfügige Abweichungen sind nicht auf das Modell an sich zurückzuführen, sondern resultieren zum einen aus Unsicherheiten in den Eingangswerten bzw. den Grundwasserganglinien sowie an einzelnen Punkten (Heinsberg, Körrenzig) auch aus Einflüssen aus dem Steinkohlebergbau. Erstere treten i.d.R. auch nur in den frühen Jahren auf und der aktuelle Nachrechnungszeitraum etwa ab den 1990er Jahren wird sehr gut und ohne relevante Abweichungen abgebildet. Aufgrund der gewählten Vorgehensweise bei der Kalibrierung der steinkohlebeeinflussten Punkte wird auch das dort gemessene Verhalten im aktuelleren Nachrechnungszeitraum sehr gut abgebildet.

Die an den insgesamt 13 betrachteten Punkten maximal prognostizierten Setzungen schwanken zwischen ca. 0,2 m und ca. 4,3 m. Dabei sind die Setzungen auf der Erftscholle tendenziell am größten und auf der Venloer Scholle tendenziell am geringsten. Weiter nehmen mit größer werdender Entfernung zu den Tagebauen i.d.R. auch die Beeinflussung der Grundwasserstände und damit auch das Setzungspotential ab. Das früheste beobachtete Setzungsmaximum wurde etwa 1980 am Punkt Niedermerz erreicht, das späteste Setzungsmaximum wird etwa 2060 für den Punkt Erftstadt prognostiziert. Dabei gilt, dass an Punkten mit verhältnismäßig geringmächtigen bindigen Schichten und Flözen das Setzungsmaximum nahezu parallel zum Absenkungsmaximum erreicht wird und Hebungen dort i.d.R. innerhalb des Prognosezeitraums abgeschlossen sind. An Punkten mit mächtigen bindigen Schichten und Flözen kommt es hingegen zu einem gegenüber der Grundwasserbewegung deutlich zeitverzögerten Bodenbewegungsverhalten.

Wie bereits ausgeführt, sind bis dato nur an wenigen Punkten im Rheinischen Braunkohlerevier schon Hebungen zu verzeichnen, so dass eine Kalibrierung des Hebungsverhaltens und insbesondere des Hebungsverhaltens der bindigen Schichten bisher nur bedingt möglich ist. In diesem Zusammenhang wäre es daher zunächst naheliegend, durch zusätzliche Bohrungen Proben aus den bindigen Schichten zu gewinnen, um diese dann im Labor insbesondere 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 sind 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. Aus Sicht der ZAI empfiehlt sich dabei ein zweistufiges Vorgehen. Dazu sollten in der ersten Stufe die im Rahmen der turnusmäßig alle zwei bis drei Jahre durchgeführten Leitnivelemente gewonnenen Vermessungsergebnisse ausgewertet und die Verläufe der Bodenbewegungen fortgeschrieben werden. Darauf basierend sollte dann entschieden werden, welche Punkte nachzukalibrieren sind, was in der zweiten Stufe erfolgen würde. Die Notwendigkeit der Nachkalibrierung ergibt sich immer dann, wenn das prognostizierte und das tatsächlich gemessene Verhalten auseinanderdriften sollten.

Zur Abschätzung der diesbezüglich aktuell vorhandenen Unsicherheit in den Prognosen wurde schließlich eine Variation der Hebungsfaktoren für die 13 im Rahmen dieses Vorhabens betrachteten sowie für 22 weitere im Rahmen eines früheren Projektes betrachteten Punkte vorgenommen. Dabei wurden sowohl theoretisch mögliche Grenzen als auch auf Basis der bisherigen Erkenntnisse als wahrscheinlich anzusehende Grenzen betrachtet. Je nach Geologie und Grundwasserentwicklung ergeben sich daraus unterschiedliche Streuweiten.

Dabei ist aber bereits heute an mehreren Punkten festzustellen, dass die theoretisch möglichen Grenzen als zu weit gefasst angesehen werden können und sich das tatsächliche Verhalten innerhalb der i.d.R. deutlich engeren wahrscheinlichen Grenzen bewegen wird.

Die wahrscheinliche Streuweite schwankt an den meisten Punkten zwischen ± 10 cm und ± 50 cm, liegt jedoch im Minimum bei ± 2 cm und im Maximum bei ± 120 cm. Aber auch bei den Punkten mit den absolut größten Streuweiten liegt die wahrscheinliche Streuweite in Relation zu den dort maximal zu erwartenden Bodenbewegungen bzw. Setzungen immer noch unter 20%. Weiter ist festzustellen, dass sich für Punkte mit hohem Anteil bindiger Böden i.d.R. eine größere Streuweite ergibt, als für Punkte mit überwiegend nichtbindigen Böden, was sich aus den bereits vorliegenden Erfahrungswerten für das Hebehungsverhalten der nichtbindigen Böden begründet. Außerdem fließen an einem Punkt bereits aufgetreten Hebungen in die Bestimmung der wahrscheinlichen Streuweite mit ein und führen so zu einer Reduzierung derselben. Dies gilt auch für Punkte, an den zwar an der Geländeoberfläche in Summe noch Setzungen gemessen werden, in einzelnen Schichten aber bereits Hebungen aufgetreten sind.

Eine weitere Reduzierung der wahrscheinlichen Streuweiten kann ebenfalls mithilfe der oben genannten regelmäßigen Auswertung der Vermessungsdaten erfolgen. Werden an einem Punkt zusätzliche oder überhaupt erstmals Hebungen gemessen und wird dieses Verhalten durch die vorhandene Prognose zutreffend abgebildet, kann auch die wahrscheinliche Streuweite weiter reduziert werden.

Abschließend lässt sich festhalten, dass die Prozesse der Bodenbewegungen im Rheinischen Braunkohlerevier mit dem Modell nach Ziegler und Aulbach grundsätzlich sehr gut abgebildet werden können. Die aus den bis dato nur mäßig kalibrierbaren Hebungen resultierenden Prognoseunsicherheiten müssen jedoch in der Folgezeit durch die Berücksichtigung der Ergebnisse eines geeigneten Bodenbewegungsmonitoring weiter verringert werden, indem durch fortlaufende Messungen und einer darauf basierende Nachkalibrierung sowie erforderlichenfalls Modellanpassung in regelmäßigen Abständen die Prognosen stetig verbessert werden.

Das Modell nach Ziegler und Aulbach ist so aufgebaut, dass Modellanpassungen und –erweiterungen durch die ZAI GmbH generell möglich sind. Damit könnten z.B. in der Zukunft neu gewonnene Erkenntnisse zum Hebehungsverhalten oder auch weitere Einflüsse aus dem Steinkohlebergbau berücksichtigt werden.

Weiter kann im Rahmen regelmäßiger Nachkalibrierungen aber auch ohne zusätzliche Modellanpassungen jederzeit auf sich möglicherweise ergebende neue Randbedingungen – z.B. abweichende Grundwasserganglinien infolge geänderter Tagebaubetriebspläne – reagiert und die Prognose angepasst werden.

Und schließlich können mit dem Modell in einem nächsten Schritt weitere 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 möglichst frühzeitig zu identifizieren.

Aachen, 25. April 2019



Dr.-Ing. B. Aulbach



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

8 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.
- [8] STOLL, R. D. et al (2009): Der Braunkohletagebau – Bedeutung, Planung, Betrieb, Techni, Umwelt, Springer-Verlag Berlin Heidelberg

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

Hebungsfaktor **0,66**

Hinweis:

Bei der Erstellung des Zwischenberichts vom 01.10.2018 kam es zu einem Übertragungsfehler beim Ausgangskonsolidationsbeiwert c_v (Startwert 1,0E-11 statt kalibrierter Wert von 6,2E-11). Der Übertragungsfehler wurde im hier vorliegenden Abschlussbericht korrigiert (Tabelle 1, Abbildung 28, Abbildung 29 und Anhang 01). Alle sonstigen Abbildungen, Ausführungen und insbesondere die Ergebnisse der Nachrechnung und Prognose bleiben davon unberührt.

01 b Niedermerz mit frei gewählten Hebungsfaktoren – Abschnitt 4.4.1

Eingangswerte

nichtbindige Schichten

Ausgangsteifigkeit	E_s	150.000	[kN/m ²]	Prozentsatz
				[%]
14-19	E_s	150.000	[kN/m ²]	100
9B	E_s	172.500	[kN/m ²]	115
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	750.000	[kN/m ²]	500
02-09	E_s	2.100.000	[kN/m ²]	1400

Hebungsfaktor	0,6
---------------	------------

Eingangswerte

bindige Schichten

Ausgangskons.beiw.	c_v	2,47E-11	[m ² /s]	

Ausgangsteifigkeit	E_s	15.000	[kN/m ²]	Prozentsatz
				[%]
9C	E_s	15.000	[kN/m ²]	100
9A	E_s	19.500	[kN/m ²]	130
7F/7D/7B	E_s	22.500	[kN/m ²]	150
6E	E_s	30.000	[kN/m ²]	200
6C	E_s	37.500	[kN/m ²]	250
6A	E_s	45.000	[kN/m ²]	300
1	E_s	109.500	[kN/m ²]	730

Hebungsfaktor	0,66
---------------	-------------

01 c Niedermerz mit auf Erfahrung beruhenden Hebungsfaktoren – Abschnitt 4.4.2

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	172.500	[kN/m ²]	115
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	750.000	[kN/m ²]	500
02-09	E_s	2.100.000	[kN/m ²]	1400
Hebungsfaktor				0,8

Eingangswerte

bindige Schichten

Ausgangskons.beiw.	c_v	6,20E-11	[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	19.500	[kN/m ²]	130
7F/7D/7B	E_s	45.000	[kN/m ²]	300
6E	E_s	60.000	[kN/m ²]	400
6C	E_s	75.000	[kN/m ²]	500
6A	E_s	90.000	[kN/m ²]	600
1	E_s	109.500	[kN/m ²]	730
Hebungsfaktor				0,66

02 Jülich

Eingangswerte

nichtbindige Schichten

Ausgangssteifigkeit	E_s	150.000	[kN/m ²]	Prozentsatz
				[%]
14-19	E_s	150.000	[kN/m ²]	100
12	E_s	180.000	[kN/m ²]	120
10	E_s	195.000	[kN/m ²]	130
9B	E_s	210.000	[kN/m ²]	140
8	E_s	240.000	[kN/m ²]	160
7C	E_s	525.000	[kN/m ²]	350
7A	E_s	750.000	[kN/m ²]	500
6D	E_s	1.050.000	[kN/m ²]	700
6B	E_s	1.875.000	[kN/m ²]	1250
2-5	E_s	3.750.000	[kN/m ²]	2500
02-09	E_s	7.500.000	[kN/m ²]	5000

Hebungsfaktor	0,8
---------------	------------

Eingangswerte

bindige Schichten

Ausgangskons.beiw.	c_v	6,20E-12	[m ² /s]	
Ausgangssteifigkeit	E_s	15.000	[kN/m ²]	Prozentsatz
				[%]
13	E_s	15.000	[kN/m ²]	100
11	E_s	18.750	[kN/m ²]	125
9C	E_s	20.250	[kN/m ²]	135
9A	E_s	27.000	[kN/m ²]	180
7F/7D	E_s	52.500	[kN/m ²]	350
7B	E_s	72.000	[kN/m ²]	480
6E	E_s	82.500	[kN/m ²]	550
6C	E_s	150.000	[kN/m ²]	1000
6A	E_s	210.000	[kN/m ²]	1400
1	E_s	645.000	[kN/m ²]	4300

Hebungsfaktor	0,66
---------------	-------------

03 Krauthausen

Eingangswerte

nichtbindige Schichten

Ausgangssteifigkeit	E_s	150.000	[kN/m ²]	Prozentsatz
				[%]
14-19	E_s	150.000	[kN/m ²]	100
12	E_s	180.000	[kN/m ²]	120
10	E_s	210.000	[kN/m ²]	140
9B	E_s	262.500	[kN/m ²]	175
8	E_s	345.000	[kN/m ²]	230
7E	E_s	375.000	[kN/m ²]	250
7C	E_s	450.000	[kN/m ²]	300
7A	E_s	600.000	[kN/m ²]	400
6B	E_s	1.350.000	[kN/m ²]	900
2-5	E_s	2.700.000	[kN/m ²]	1800
02-09	E_s	7.500.000	[kN/m ²]	5000

Hebungsfaktor	0,8
---------------	------------

Eingangswerte

bindige Schichten

Ausgangskons.beiw.	c_v	3,70E-11	[m ² /s]	
Ausgangssteifigkeit	E_s	15.000	[kN/m ²]	Prozentsatz
				[%]
13	E_s	15.000	[kN/m ²]	100
11	E_s	19.500	[kN/m ²]	130
9C	E_s	21.750	[kN/m ²]	145
9A	E_s	31.500	[kN/m ²]	210
7F	E_s	37.500	[kN/m ²]	250
7D	E_s	43.500	[kN/m ²]	290
7B	E_s	54.000	[kN/m ²]	360
6E-6C	E_s	105.000	[kN/m ²]	700
6A	E_s	150.000	[kN/m ²]	1000
1	E_s	450.000	[kN/m ²]	3000

Hebungsfaktor	0,66
---------------	-------------

04 Düren

Eingangswerte

nichtbindige Schichten

Ausgangssteifigkeit	E_s	150.000	[kN/m ²]	Prozentsatz
				[%]
14-19,10	E_s	150.000	[kN/m ²]	100
9B	E_s	165.000	[kN/m ²]	110
8	E_s	210.000	[kN/m ²]	140
7E	E_s	255.000	[kN/m ²]	170
7C	E_s	300.000	[kN/m ²]	200
7A	E_s	375.000	[kN/m ²]	250
6D	E_s	570.000	[kN/m ²]	380
6B	E_s	750.000	[kN/m ²]	500
2-5	E_s	1.350.000	[kN/m ²]	900
02-09	E_s	4.500.000	[kN/m ²]	3000

Hebungsfaktor **0,8**

Eingangswerte

bindige Schichten

Ausgangskons.beiw.	c_v	1,23E-11	[m ² /s]	
Ausgangssteifigkeit	E_s	15.000	[kN/m ²]	Prozentsatz
				[%]
9C	E_s	15.000	[kN/m ²]	100
9A	E_s	18.000	[kN/m ²]	120
7F	E_s	24.000	[kN/m ²]	160
7D	E_s	27.000	[kN/m ²]	180
7B	E_s	37.500	[kN/m ²]	250
6E	E_s	52.500	[kN/m ²]	350
6C	E_s	75.000	[kN/m ²]	500
6A	E_s	90.000	[kN/m ²]	600
1	E_s	187.500	[kN/m ²]	1250

Hebungsfaktor **0,66**

05 Körrenzig

Eingangswerte

nichtbindige Schichten

Ausgangssteifigkeit	E_s	150.000	[kN/m ²]	Prozentsatz
				[%]
14-19	E_s	150.000	[kN/m ²]	100
12	E_s	150.000	[kN/m ²]	100
10/9B	E_s	165.000	[kN/m ²]	110
8	E_s	180.000	[kN/m ²]	120
7C/7D/7E	E_s	300.000	[kN/m ²]	200
7A/6D	E_s	450.000	[kN/m ²]	300
2-5/02-09	E_s	2.550.000	[kN/m ²]	1700

Hebungsfaktor **0,8**

Eingangswerte

bindige Schichten

Ausgangskons.beiw.	c_v	1,23E-11	[m ² /s]		
				Prozentsatz	
				[%]	
13	E_s	15.000	[kN/m ²]	100	
11	E_s	16.500	[kN/m ²]	110	
9A	E_s	18.000	[kN/m ²]	120	
7F	E_s	30.000	[kN/m ²]	200	
7B	E_s	45.000	[kN/m ²]	300	
6C	E_s	120.000	[kN/m ²]	800	

Hebungsfaktor **0,66**

06 Heinsberg

Eingangswerte

nichtbindige Schichten

Ausgangssteifigkeit	E_s	150.000	[kN/m ²]	Prozentsatz
				[%]
14-19/12	E_s	150.000	[kN/m ²]	100
10	E_s	180.000	[kN/m ²]	120
9B	E_s	195.000	[kN/m ²]	130
8	E_s	300.000	[kN/m ²]	200
6B	E_s	7.500.000	[kN/m ²]	5000
2-5/02-09	E_s	15.000.000	[kN/m ²]	10000

Hebungsfaktor	0,8
---------------	------------

Eingangswerte

bindige Schichten

Ausgangskons.beiw.	c_v	3,08E-12	[m ² /s]
--------------------	-------	-----------------	---------------------

Ausgangssteifigkeit	E_s	15.000	[kN/m ²]	Prozentsatz
				[%]
11	E_s	15.000	[kN/m ²]	100
9C	E_s	28.500	[kN/m ²]	190
9A	E_s	45.000	[kN/m ²]	300
6C	E_s	600.000	[kN/m ²]	4000
6A	E_s	750.000	[kN/m ²]	5000

Hebungsfaktor	0,66
---------------	-------------

07 Titz

Eingangswerte

nichtbindige Schichten

Ausgangssteifigkeit	E_s	150.000	[kN/m ²]	Prozentsatz
				[%]
14-19	E_s	150.000	[kN/m ²]	100
10	E_s	225.000	[kN/m ²]	150
9B	E_s	300.000	[kN/m ²]	200
8	E_s	525.000	[kN/m ²]	350
7E	E_s	675.000	[kN/m ²]	450
7C/7A	E_s	900.000	[kN/m ²]	600
6D	E_s	1.350.000	[kN/m ²]	900
6B	E_s	1.800.000	[kN/m ²]	1200
4-5/01-09	E_s	7.500.000	[kN/m ²]	5000

Hebungsfaktor	0,8
---------------	------------

Eingangswerte

bindige Schichten

Ausgangskons.beiw.	c_v	6,20E-13	[m ² /s]

Ausgangssteifigkeit	E_s	15.000	[kN/m ²]	Prozentsatz
				[%]
13/11	E_s	21.000	[kN/m ²]	140
9C	E_s	24.000	[kN/m ²]	160
9A	E_s	31.500	[kN/m ²]	210
7F	E_s	52.500	[kN/m ²]	350
7D	E_s	61.500	[kN/m ²]	410
6E	E_s	78.000	[kN/m ²]	520
6C	E_s	139.500	[kN/m ²]	930
6A	E_s	172.500	[kN/m ²]	1150

Hebungsfaktor	0,66
---------------	-------------

08 Oberembt

Eingangswerte

nichtbindige Schichten

Ausgangssteifigkeit	E_s	150.000	[kN/m ²]	Prozentsatz
				[%]
14-19	E_s	150.000	[kN/m ²]	100
10/9B	E_s	240.000	[kN/m ²]	160
8	E_s	420.000	[kN/m ²]	280
7E	E_s	600.000	[kN/m ²]	400
7C	E_s	825.000	[kN/m ²]	550
6D	E_s	1.275.000	[kN/m ²]	850
6B	E_s	2.175.000	[kN/m ²]	1450
4-5	E_s	4.500.000	[kN/m ²]	3000
01-09	E_s	7.500.000	[kN/m ²]	5000

Hebungsfaktor **0,8**

Eingangswerte

bindige Schichten

Ausgangskons.beiw.	c_v	1,23E-11	[m ² /s]	
Ausgangssteifigkeit	E_s	15.000	[kN/m ²]	Prozentsatz
				[%]
13/11	E_s	15.000	[kN/m ²]	100
9A	E_s	22.500	[kN/m ²]	150
7F	E_s	52.500	[kN/m ²]	350
7D	E_s	75.000	[kN/m ²]	500
6E	E_s	105.000	[kN/m ²]	700
6C	E_s	150.000	[kN/m ²]	1000
6A	E_s	225.000	[kN/m ²]	1500
1	E_s	750.000	[kN/m ²]	5000

Hebungsfaktor **0,66**

09 Glesch

Eingangswerte

nichtbindige Schichten

Ausgangssteifigkeit	E_s	150.000	[kN/m ²]	Prozentsatz
				[%]
14-19	E_s	150.000	[kN/m ²]	100
12	E_s	225.000	[kN/m ²]	150
10	E_s	270.000	[kN/m ²]	180
9B	E_s	300.000	[kN/m ²]	200
8	E_s	525.000	[kN/m ²]	350
7E	E_s	1.200.000	[kN/m ²]	800
7C/7A	E_s	1.500.000	[kN/m ²]	1000
2-5	E_s	7.500.000	[kN/m ²]	5000
01-09	E_s	15.000.000	[kN/m ²]	10000

Hebungsfaktor **0,8**

Eingangswerte

bindige Schichten

Ausgangskons.beiw.	c_v	1,23E-10	[m ² /s]	
Ausgangssteifigkeit	E_s	15.000	[kN/m ²]	Prozentsatz
				[%]
13	E_s	21.000	[kN/m ²]	140
11	E_s	27.000	[kN/m ²]	180
9C	E_s	30.000	[kN/m ²]	200
9A	E_s	39.000	[kN/m ²]	260
7F	E_s	120.000	[kN/m ²]	800
7D	E_s	165.000	[kN/m ²]	1100
6A-6E	E_s	300.000	[kN/m ²]	2000
1	E_s	1.500.000	[kN/m ²]	10000

Hebungsfaktor **0,66**

10 Ahe

Eingangswerte

nichtbindige Schichten

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

Hebungsfaktor **0,8**

Eingangswerte

bindige Schichten

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

Hebungsfaktor **0,66**

11 Erftstadt

Eingangswerte

nichtbindige Schichten

Ausgangssteifigkeit	E_s	150.000	[kN/m ²]	Prozentsatz
				[%]
14-19	E_s	165.000	[kN/m ²]	110
12	E_s	255.000	[kN/m ²]	170
10	E_s	330.000	[kN/m ²]	220
9B	E_s	525.000	[kN/m ²]	350
8	E_s	900.000	[kN/m ²]	600
7C/7A	E_s	1.800.000	[kN/m ²]	1200
2-5	E_s	7.500.000	[kN/m ²]	5000
01-09	E_s	15.000.000	[kN/m ²]	10000

Hebungsfaktor **0,8**

Eingangswerte

bindige Schichten

Ausgangskons.beiw.	c_v	1,17E-10	[m ² /s]	
Ausgangssteifigkeit	E_s	15.000	[kN/m ²]	Prozentsatz
				[%]
13	E_s	15.000	[kN/m ²]	100
11	E_s	26.250	[kN/m ²]	175
9C	E_s	31.500	[kN/m ²]	210
9A	E_s	45.000	[kN/m ²]	300
7F/7D	E_s	135.000	[kN/m ²]	900
6A-6E	E_s	225.000	[kN/m ²]	1500
1	E_s	750.000	[kN/m ²]	5000

Hebungsfaktor **0,66**

12 Wanlo

Eingangswerte

nichtbindige Schichten

Ausgangssteifigkeit	E_s	150.000	[kN/m ²]	Prozentsatz
				[%]
14-19, 12	E_s	150.000	[kN/m ²]	100
10	E_s	165.000	[kN/m ²]	110
8	E_s	195.000	[kN/m ²]	130
6D	E_s	255.000	[kN/m ²]	170
6D	E_s	450.000	[kN/m ²]	300
6B	E_s	750.000	[kN/m ²]	500
4-5	E_s	2.250.000	[kN/m ²]	1500

Hebungsfaktor **0,8**

Eingangswerte

bindige Schichten

Ausgangskons.beiw.	c_v	6,20E-13	[m ² /s]	
Ausgangssteifigkeit	E_s	15.000	[kN/m ²]	Prozentsatz
				[%]
11C	E_s	15.000	[kN/m ²]	100
9C	E_s	17.250	[kN/m ²]	115
6D Schluff	E_s	33.000	[kN/m ²]	220
6C	E_s	45.000	[kN/m ²]	300
6A	E_s	60.000	[kN/m ²]	400

Hebungsfaktor **0,66**

13 Odenkirchen

Eingangswerte

nichtbindige Schichten

Ausgangssteifigkeit	E_s	150.000	[kN/m ²]	Prozentsatz
				[%]
14-19, 12	E_s	150.000	[kN/m ²]	100
8	E_s	165.000	[kN/m ²]	110
6D	E_s	262.500	[kN/m ²]	175
6B	E_s	472.500	[kN/m ²]	315
4-5	E_s	2.040.000	[kN/m ²]	1360

Hebungsfaktor **0,8**

Eingangswerte

bindige Schichten

Ausgangskons.beiw.	c_v	6,20E-13	[m ² /s]	
Ausgangssteifigkeit	E_s	15.000	[kN/m ²]	Prozentsatz
				[%]
11C	E_s	15.000	[kN/m ²]	100
6C	E_s	40.500	[kN/m ²]	270
6A	E_s	57.000	[kN/m ²]	380

Hebungsfaktor **0,66**