



TU Clausthal

Bergwerk Ibbenbüren der RAG AG

Analyse von Senkungserscheinungen
außerhalb des prognostizierten
Einwirkungsbereiches

15.02.2016

Institut für Geotechnik und Markscheidewesen, TU Clausthal
<http://www.igmc.tu-clausthal.de>

Gutachten im Rahmen des Gesamtprojektes:	Analyse von Senkungserscheinungen außerhalb der prognostizierten Einwirkungsbereiche aktiver und in jüngster Zeit stillgelegter Steinkohlenbergwerke der RAG AG
Projektbeginn:	24.11.2014
Vergabe Nr.:	12.21-90-13-166
Auftraggeber:  Bezirksregierung Arnsberg	Bezirksregierung Arnsberg Abteilung Bergbau und Energie in NRW Dezernat 65 44135 Dortmund
Auftragnehmer:  TU Clausthal Sachbearbeiter:	TU Clausthal Institut für Geotechnik und Markscheidewesen Erzstraße 18 D-38678 Clausthal-Zellerfeld Univ.-Prof. Dr.-Ing. Wolfgang Busch wolfgang.busch@tu-clausthal.de Dr.-Ing. Diana Walter diana.walter@tu-clausthal.de M.Sc. Furui Xi M.Sc. Xiaoxuan Yin
Subauftragnehmer:  Prof. Dr. Coldewey GmbH Sachbearbeiter:	Prof. Dr. Coldewey GmbH Sperberweg 1 D-48249 Dülmen Univ.-Prof. em., Hon.-Prof., Dr. rer. nat. Wilhelm G. Coldewey M.Sc. Dominik Wesche
Subauftragnehmer:  4GIS Ryszard Hejmanowski Sachbearbeiter:	4GIS Ryszard Hejmanowski ul. Gornikow 30 PL 30-816 Krakow, Polen Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Ryszard Hejmanowski Dr.-Ing. Agnieszka A. Malinowska Dr.-Ing. Andrzej Kwinta Dipl.-Ing. Wojciech T. Witkowski

INHALTSVERZEICHNIS

1. Einleitung	7
1.1. Leistungsbeschreibung	7
1.2. Arbeitspakete	7
1.3. Bericht 2 - BW Ibbenbüren	8
2. Untersuchungsraum	9
2.1. Lagebeschreibung und Landnutzung	9
2.1.1. Geographischer Überblick	9
2.1.2. Siedlungsstruktur	11
2.1.3. Böden	12
2.1.4. Vorfluter und Wasserflächen	13
2.1.5. Übertägige Flächennutzung	14
2.2. Geologie des Untersuchungsraums	15
2.2.1. Stratigraphie	15
2.2.2. Tektonik	18
2.3. Hydrogeologie und Grundwasser	24
2.3.1. Hydrogeologie	24
2.3.2. Niederschläge und Versickerungen	25
2.3.3. Grubenwasserhaltung	26
2.4. Wasserwirtschaft	28
2.5. Mineralische Lagerstätten und Rohstoffgewinnung	29
2.5.1. Historische Entwicklung des Bergwerk Ibbenbüren	29
2.5.2. Altbergbau und aktuelle Baufelder des Steinkohlenbergbaus	32
2.5.3. Benachbarte Steinkohlenbergwerke	40
2.5.4. Erzbergbau	40
2.5.5. Lagerstätten der Sande und Kiese	42
3. Potentielle Ursachen für Bodenbewegungen im Untersuchungsraum	44
4. Datengrundlage	46
4.1. Bereitstellung von Basis- und Fachdaten	46
4.2. Beschaffung von Radardaten	47
4.3. Datenaufbereitung und Bewertung	48
4.3.1. Prognostizierte Senkungsbereiche	48
4.3.2. Abbaudaten	49
4.3.3. Nivellements und Lagemessungen	50

4.3.4. Grundwassermessungen	55
4.3.5. Sonstige Daten	56
5. Radarinterferometrische Ermittlung von Bodenbewegungen	59
5.1. Grundlagen der satellitengestützten Radarinterferometrie und der Auswerteverfahren....	59
5.2. PSI-Datenprozessierung.....	65
5.3. Datenbereinigung	67
5.4. Verfahren zur Bestimmung eines bestangepassten Polynom-Trendmodells für PS-Punkt-Zeitreihen.....	71
5.5. Verfahren zur Flächeninterpolation für PS-Punkt-Daten und zur Rasterdatenerzeugung....	73
5.6. Ergebnisse der PSI-Auswertungen und statistischen Analysen der Zeitreihen von ENVISAT-Daten (2003 – 2010) und Radarsat-2-Daten (2011 – 2015)	73
5.6.1. ENVISAT-Ergebnisse (Dezember 2003 – Oktober 2010)	74
5.6.2. Radarsat-2-Ergebnisse (Januar 2011 – Februar 2015)	74
5.6.3. Bewertung der ENVISAT- und Radarsat-2-Ergebnisse	79
5.7. Generalisierte Abgrenzung von Bodenbewegungsgebieten auf Grundlage flächeninterpolierter LOS-Daten	81
6. Ableitung von Höhenänderungen aus den PSI-Ergebnissen	84
6.1. Abgrenzung von Gebieten mit aus LOS-Daten ableitbaren Höhenänderungen.....	84
6.2. Radarinterferometrisch ermittelte Gesamthöhenänderungen für den Betrachtungszeitraum 12/2008 – 02/2015	88
6.2.1. Zusammenfügung von PSI-Zeitreihen für ausgewählte PS-Punkte.....	89
6.2.2. Flächeninterpolierte Gesamthöhenänderungen	89
6.3. Vergleich mit terrestrischen Daten.....	95
6.3.1. Vergleich flächeninterpolierter radarinterferometrischer Höhenänderungen mit Nivellementsergebnissen (2003 - 2010)	95
6.3.2. Vergleich flächeninterpolierter radarinterferometrischer Höhenänderungen mit GPS- und Nivellementsergebnissen (2007 – 2014).....	96
6.3.3. Vergleich von nivellitisch und radarinterferometrisch bestimmten Höhenänderungszeitreihen (2003 – 2015).....	102
6.4. Abgrenzung von Gebieten mit Bodenbewegungen.....	121
6.4.1. Gebiete mit signifikanten Höhenänderungen.....	121
6.4.2. Gebiete radarinterferometrisch ermittelter Höhenänderungen und Bodenbewegungen	124
7. Statistische Bewertung zur Signifikanz prognostizierter bergbaubedingter Bodenbewegungen	127
7.1. Vorbemerkung	127
7.2. Eingangsdaten und Vorausberechnung der Senkungsnulllinie	127

7.3. Ermittlung des Zeitfaktors	132
7.4. Parametrisierung des Rechenmodells	135
7.5. Signifikanz der prognostizierten Senkungsnulllinie	141
7.5.1. Methodische Vorgehensweise	141
7.5.2. Variabilität der Parameter.....	142
7.5.3. Einsatz des Monte-Carlo-Verfahrens	143
7.5.4. Ergebnisse der Modellierung mit dem Monte-Carlo-Verfahren.....	144
7.5.5. Räumlich statistische Analyse des Nulllinienverlaufes.....	146
7.6. Senkungsnachberechnung mit IST-Abbaudaten.....	151
8. Hydrogeologische Untersuchungen	154
8.1. Räumliche Auswertung von Grundwasserstandsänderungen.....	154
8.1.1. Untersuchungs-Teilgebiet Bockradener Graben.....	155
8.1.2. Untersuchungs-Teilgebiet Mettingen	161
8.1.3. Untersuchungs-Teilbereich Ibbenbüren-Laggenbeck	164
8.2. Zusammenfassende Bewertung der grundwasserbedingten Ursachen.....	167
9. Räumliche Abgrenzung bergbaubedingter Bodenbewegungen und Höhenänderungen.	169
9.1. Problematik der Abgrenzbarkeit.....	169
9.2. Festlegung der Betrachtungsgebiete.....	169
9.3. Räumlich-zeitlicher Zusammenhang zu den Abbauaktivitäten	170
9.3.1. Senkungsgebiet Mettingen	177
9.3.2. Senkungsgebiet Ibbenbüren-Laggenbeck	180
9.3.3. Östliches Senkungsgebiet (Gebiet Westerkappeln).....	186
9.3.4. Bodenbewegungsgebiete.....	186
9.4. Einflüsse durch den Altbergbau	187
9.5. Sonstige Einflüsse	189
10. Bergschadensrelevanz außerhalb des prognostizierten Einwirkungsbereiches	190
10.1. Grundlagen zur Bergschadensrelevanz	190
10.2. Möglichkeit des Auftretens von Bergschäden außerhalb der Nullrandlinie	191
10.2.1. Methodische Vorgehensweise	191
10.2.2. Praktischer Ansatz.....	194
10.2.3. Unstetigkeitszonen.....	195
10.2.4. Fazit	195
11. Zusammenfassung und Schlussfolgerungen	196
12. Schriftenverzeichnis.....	199
12.1. Literatur	199

12.2. Karten.....	203
13. Abkürzungsverzeichnis	204
Anhang A1 – Übersicht bereitgestellter Basis- und Fachdaten für das Bergwerk Ibbenbüren	206
Anhang A2 – Übersichten zu den gelieferten Radarszenen	210
Anhang A3 – Geologische Schnitte.....	213
A3.1 Geologischer NW-SE-Schnitt durch die Lagerstätte (Längsschnitt, Drozdowski 1985)	213
A3.2 Geologischer NE-SW-Schnitte durch die Lagerstätte (nach Drozdowski 1985).....	214
Anhang A4 – Ermittlung des Zeitfaktors	215
Anhang B1 – Begriffsbestimmung Bodenbewegung	217
Anhang B2 – Ursachen von Bodenbewegungen.....	219
B2.1 Generelle Ursachen	219
B2.2 Geogene Ursachen	219
B2.2.1 Klima	219
B2.2.2 Pflanzenbewuchs	220
B2.2.3 Tektonik	221
B2.2.4 Erosion	221
B2.2.5 Subrosion	221
B2.2.6 Suffosion	222
B2.3 Anthropogene Ursachen.....	223
B2.3.1 Übertägige Rohstoffgewinnung.....	223
B2.3.2. Untertägige Rohstoffgewinnung	224
B2.3.3 Veränderungen von Grundwasserhöhen	227
B2.3.4 Technische Verdichtung	237
Anhang B3 – Literatur zum Anhang B.....	238
Anlagen (Karten).....	241

1. EINLEITUNG

1.1. Leistungsbeschreibung

Angeregt durch die Ergebnisse des von der TU Clausthal (Prof. Dr.-Ing. W. Busch) und der WWU Münster (Prof. Dr. G. Coldewey) erstellten Gutachtens „Analyse von Senkungserscheinungen außerhalb prognostizierter bergbaulicher Einwirkungsbereiche des Bergwerks Prosper-Haniel“ (Fundstelle im Internetauftritt der Bezirksregierung Arnsberg unter www.bra.nrw.de/1756332) hat die Bezirksregierung Arnsberg die Abteilung Markscheidewesen und Geoinformation des Instituts für Geotechnik und Markscheidewesen der TU Clausthal (IGMC) beauftragt, zu untersuchen, ob auch im Bereich der anderen in Betrieb befindlichen Steinkohlebergwerke Auguste Victoria und Ibbenbüren sowie der in jüngerer Zeit stillgelegten Steinkohlebergwerke Lippe, Lohberg, Ost, Walsum und West der RAG AG außerhalb der in den Rahmenbetriebsplänen dargestellten prognostizierten Einwirkungsbereiche bergbaubedingte Senkungen eingetreten sind.

Gemäß LEISTUNGSBESCHREIBUNG (2014) sind die insgesamt 7 Bergwerke (BW) in folgender zeitlicher Reihenfolge zu bearbeiten:

- BW Auguste Victoria
- BW Ibbenbüren
- BW West
- BW Walsum
- BW Lohberg
- BW Lippe
- BW Ost

Der Bericht über die Untersuchungsergebnisse zum Bergwerk Auguste Victoria wurde am 15. Oktober 2015 der Bezirksregierung Arnsberg, Abteilung Bergbau und Energie in NRW übergeben (BERGWERK AUGUSTE VICTORIA 2015).

Im Rahmen der gutachterlichen Stellungnahme sind bergwerksbezogen die räumliche Ausdehnung und die Größenordnung der außerhalb der prognostizierten Einwirkungsbereiche eingetretenen Höhenänderungen zu ermitteln. Vor dem Hintergrund der im Projekt „Prosper-Haniel“ gewonnenen Erfahrungswerte ist hierauf aufbauend zu überprüfen, ob und inwieweit der Steinkohlenbergbau für die im Untersuchungszeitraum festgestellten Höhenänderungen bzw. Bodenbewegungen ursächlich ist. Grundsätzlich kommen auch nicht bergbaubedingte Ursachen wie z. B. Tektonik, Auslaugung oder Änderungen der Grundwasserverhältnisse (insbesondere im Bereich des Rheins) in Frage. Diese regional und lokal vorhandenen Ursachen sind zu detektieren, zu untersuchen und zu bewerten (LEISTUNGSBESCHREIBUNG 2014).

1.2. Arbeitspakete

Zur Untersuchung aller Bergwerke wurden entsprechend der LEISTUNGSBESCHREIBUNG (2014) und der vorgeschlagenen Vorgehensweise folgende Arbeitspakete (AP) definiert:

- AP 1 – Recherche und Beschaffung von Radardaten, Basis- und Fachdaten
- AP 2 – Ermittlung potentieller Höhenänderungsursachen im Untersuchungszeitraum

- AP 3 – Radarinterferometrische Ermittlung von Höhenänderungen
- AP 4 – Analyse und Bewertung der ermittelten Höhenänderungen
- AP 5 – Genauigkeitsanalyse mit Erläuterung der signifikant identifizierbaren Grenze für Bodenbewegungsgebiete mittels satellitengestützter Radarinterferometrie
- AP 6 – Zeitlich-räumliche Ursache-Wirkungs-Analyse
- AP 7 – Statistische Bewertungen zur Signifikanz prognostizierter bergbaubedingter Bodenbewegungen
- AP 8 – Deskriptive Abschätzung von Senkungsanteilen
- AP 9 – Festlegung einer Grenze signifikant und vornehmlich bergbaubedingter Höhenänderungen
- AP 10 – Bergschadensrelevanz außerhalb des prognostizierten Einwirkungsbereiches

Die Kapitel 7 und 10 beinhalten die Ergebnisse von AP 7 und AP 10, die durch die Firma 4GIS Ryszard Hejmanowski (kurz: 4GIS) erarbeitet und vom IGMG überarbeitet wurden. Weitere Texte der Firma 4GIS sind in den Anhang B eingeflossen.

Kapitel 8 und der Großteil von Kapitel 2 dieses Gutachtens sowie die Karten 1 bis 5 in der Anlage wurden durch die Prof. Dr. Coldewey GmbH erstellt. Weitere Textbeiträge wurden für das Kapitel 4 sowie insbesondere den Anhang B angefertigt.

1.3. Bericht 2 - BW Ibbenbüren

Maßgeblich für die Untersuchung des aktiven Bergwerks Ibbenbüren sind der vom Auftraggeber festgelegte Untersuchungsraum und Betrachtungszeitraum.

Der Betrachtungszeitraum orientiert sich an der Laufzeit des aktuellen Rahmenbetriebsplanes, die am 01.01.2009 begann und am 31.12.2018 endet. Aufgrund der von der Bezirksregierung Arnsberg, Abteilung Bergbau und Energie in NRW vorgegebenen Bearbeitungsreihenfolge sowie dem Abgabetermin in 2015 wurde mit dem Auftraggeber vereinbart, dass für die gutachterliche Stellungnahme der Betrachtungszeitraum am 01.01.2009 beginnt und Ende Februar 2015 endet. Da für diesen Zeitraum und den Untersuchungsraum Radarsatellitendaten über den Zeitraum vom 11.12.2008 bis 12.02.2015 vorlagen (Kapitel 4.2), beziehen sich die später dargestellten Ergebnisse auf diesen Zeitraum (sofern nichts anderes angegeben ist).

Größe und Lage des Untersuchungsraumes orientieren sich an Angaben im Rahmenbetriebsplan sowie dem von Geobasis NRW angegebenen Bodenbewegungsgebiet. Der Untersuchungsraum mit einer Fläche von 357 km² (Abbildung 1) wird im Kapitel 2 ausführlich beschrieben.

2. UNTERSUCHUNGSRAUM

2.1. Lagebeschreibung und Landnutzung

2.1.1. Geographischer Überblick

Das Bergwerk Ibbenbüren (BW IBB) ist das nördlichste Steinkohlenbergwerk Deutschlands und wird von der RAG Anthrazit Ibbenbüren GmbH, einem Unternehmen der Holding-Gesellschaft RAG AG betrieben. Es befindet sich im Kreis Steinfurt, im Norden von Nordrhein-Westfalen, und besitzt mit dem so genannten Glücksburg-Reservat eine aktuelle Grubenfeldfläche von ca. 93 km² (Abbildung 1).

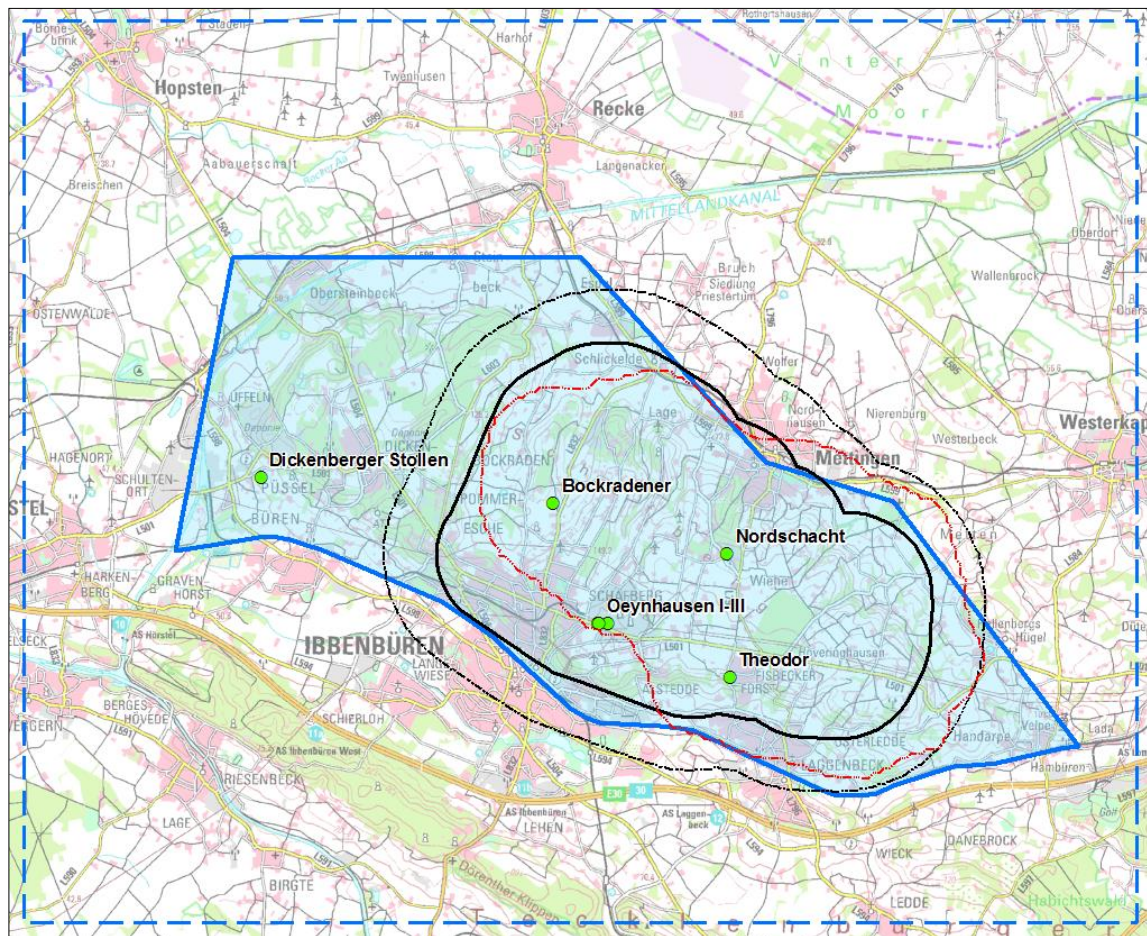


Abbildung 1: Die Bergwerksgrenze des BW Ibbenbüren (IBB; durchgezogene blaue Linie), der prognostizierte Einwirkungsbereich des Rahmenbetriebsplan für das BW IBB 1.1.2009 – 31.12.2018 (schwarze Linie), der um 1000 m erweiterte Betrachtungsraum (schwarze Strichlinie), das von Geobasis NRW für den Zeitraum 2007 - 2011 ermittelte Bodenbewegungsgebiet (rote Linie), der Untersuchungsraum (blaue Strichlinie) sowie die derzeit in Betrieb befindlichen Tagesöffnungen (grüne Punkte). © RAG AG; Bezirksregierung Arnsberg, Abt. Bergbau und Energie in NRW und Geobasis NRW 2012

Die räumliche Begrenzung des Untersuchungsraumes orientiert sich an dem durch Geobasis NRW der Bezirksregierung Köln (Abteilung 7) ermittelten Bodenbewegungsgebiet Ibbenbüren (Zeitraum 2007 - 2011), dem prognostizierten Einwirkungsbereich laut geltendem Rahmenbetriebsplan des BW Ibbenbüren für den Zeitraum 1.1.2009 bis 31.12.2018 sowie dem erweiterten

Betrachtungsraum (Abbildung 1). Der Untersuchungsraum umfasst eine Fläche von 357 km², mit einer Ausdehnung von 21 km x 17 km (Tabelle 1) und beinhaltet die Stadt Ibbenbüren im zentralen Bereich, im Norden die Gemeinden Hopsten, Recke, Mettingen und Westerkappeln (von West nach Ost), im Westen die Kleinstadt Hörstel mit ihren Ortschaften sowie im Südosten die Stadt Tecklenburg (Abbildung 1).

Tabelle 1: Eckkoordinaten des Untersuchungsgebietes im DHDN 90 System (Gauß-Krüger, Bessel)

Rechtswert [m]	Hochwert [m]
3 403 000	5 807 000
3 424 000	5 790 000

Die Ibbenbürener Steinkohlenlagerstätte tritt als Horststruktur der Karbonschichten morphologisch deutlich als Höhenrücken aus dem Umland hervor und wird auch als Ibbenbürener Karbonscholle bzw. im morphologischen Sinne auch als Ibbenbürener Hochplateau bezeichnet (Abbildung 2). Die gesamte Struktur überragt das umliegende Gelände um bis zu 100 m und lässt sich morphologisch in drei Bereiche gliedern.

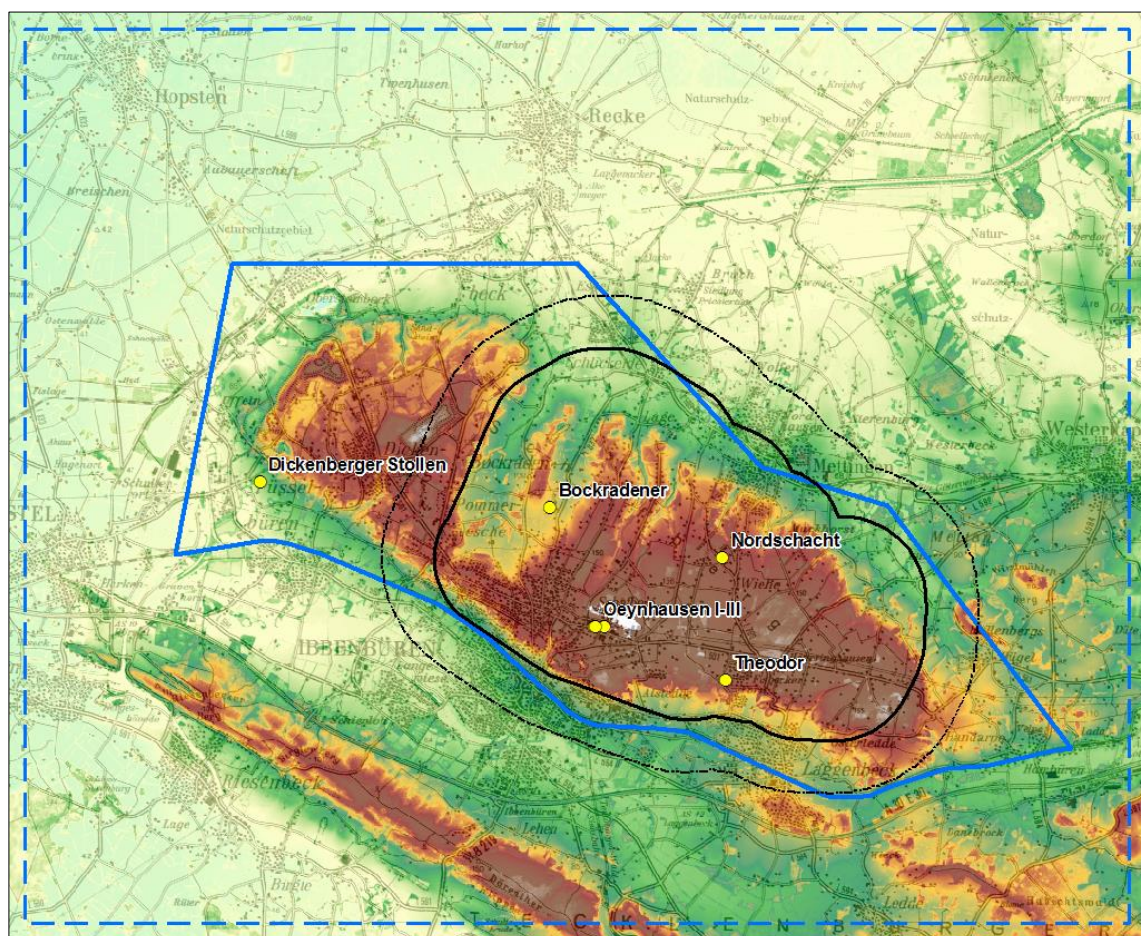


Abbildung 2: Digitales Höhenmodell der Ibbenbürener Karbonscholle, abgeleitet aus den Datensätzen Lidar DOM 1L (© Geobasis NRW 2015) und SRTM-XC (© DLR), und der TK100 im Hintergrund (© Geobasis NRW 2012)

Der westliche Bereich wird als Dickenberg bezeichnet und besitzt eine Höhe von +142 m NHN (Abbildung 3). Im östlichen Teil befindet sich der Schafberg mit einer Höhe von bis zu +174 m NHN. Zwischen diesen beiden Bereichen liegt der in Abbildung 2 deutlich erkennbare Bockradener Graben, der am Gartenberg eine Höhe von ca. +110 m NHN erreicht. Das Hochplateau steigt meist steil und unvermittelt aus dem flachen Vorland auf. Die Täler der nach Norden entwässernden Bäche schneiden tief ins Gelände ein.

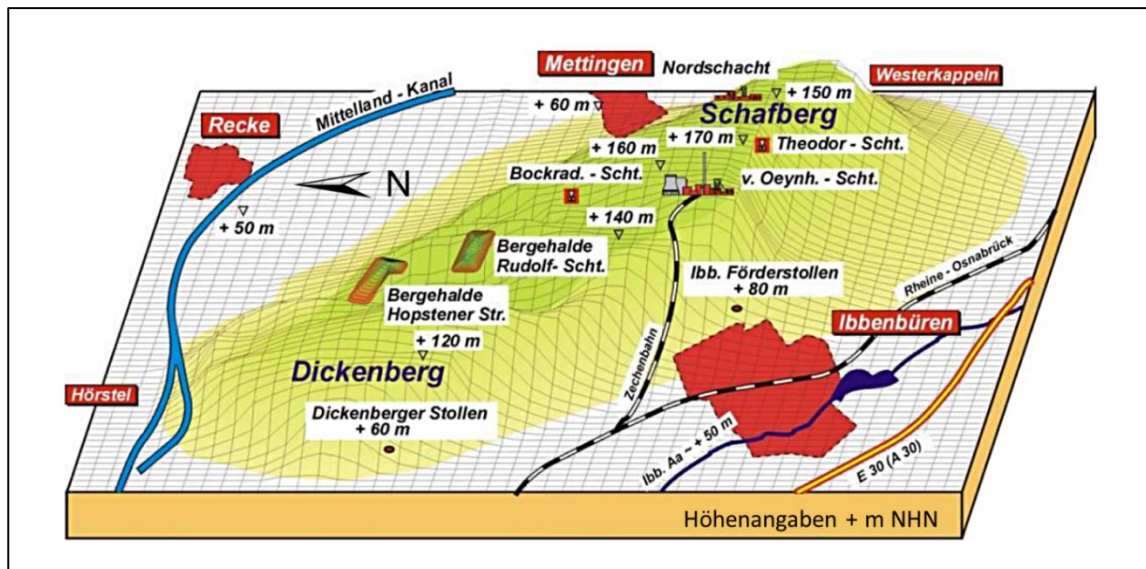


Abbildung 3: Blockbild der Ibbenbürener Karbonscholle mit Blick nach Osten (nach GOERKE-MALLET 2000)

Das Hochplateau weist eine elliptische Form mit einer NW-SE gerichteten Längserstreckung von ca. 15 km sowie einer Breite von ca. 5 km auf und umfasst eine Fläche von ca. 55 km². Der südwestliche Hang fällt steil in das ca. 3,5 km breite Tal der Ibbenbürener Aa ab. Nach Süden schließt sich der Höhenrücken des Teutoburger Waldes an, der durch die steil aufragenden Schichten der Unter- und Oberkreide aufgebaut wird (Karte 1). Die Schichten des Teutoburger Waldes tauchen ca. 8 km westlich von Ibbenbüren aus der Umgebung auf und stellen sowohl geologisch als auch morphologisch die Grenze zum flachen Kernbereich des Münsterländer Kreidebeckens dar. Der nordöstliche Hang des Ibbenbürener Hochplateaus ist weniger steil als der südwestliche Hang und geht in das Norddeutsche Tiefland über.

2.1.2. Siedlungsstruktur

Die Entwicklung der Ibbenbürener Region wurde nach der Jahrhundertwende insbesondere durch die gute Verkehrserschließung begünstigt. Neben der Eisenbahn und den beiden Kanälen kommt in den 70er Jahren des letzten Jahrhunderts die Verlängerung der Autobahn A 30 bis in die Niederlande hinzu. Die Häfen am Dortmund-Ems-Kanal und am Mittellandkanal, welche von 1907 bis 1914 gebaut wurden, stellen bedeutende Umschlagplätze für Kohle, Sandstein, Baustoffe und Weizen dar (GOERKE-MALLET 2000).

Die größten zusammenhängenden Bebauungen finden sich in der Stadt Ibbenbüren (ca. 50.600 Einwohner) im Süden und den Gemeinde Mettingen und Recke (je ca. 11.500 Einwohner) im Nordosten des Gebietes. Wesentlich kleiner sind die Ortschaften Püßelbüren, Uffeln, Obersteinbeck, Steinbeck, Espel und Laggenbeck. Außer den beiden Hauptansiedlungen und den kleineren

Ortschaften sind noch zahlreiche Einzelhöfe vorhanden, die für den ländlichen Charakter des Untersuchungsgebietes kennzeichnend sind (DOMALSKI 1988).

Die Wohnstätten der im Bergbau Beschäftigten, deren Anzahl im Jahre 1958 mit 8.145 ihren Höchststand erreichte, verzahnen sich mit dem ländlichen Raum. Die Bodenständigkeit der Bevölkerung und die starke Bevölkerungszunahme führten zu einem partiell verdichteten Streusiedlungsmuster. Die Entwicklung der Siedlungen erfolgte im Übrigen vornehmlich auf Waldflächen. In den Bergbau-Gemeinden Ibbenbüren und Recke leben rund 25 %, also 11.700 bzw. 2.700 Einwohner, in Siedlungen des Außenbereiches. In Mettingen und Westerkappeln sind es etwa 44 %, also 5.100 bzw. 4.500 Einwohner.

Die dominierende Stellung des Bergbaus in der Zeit nach dem Zweiten Weltkrieg steht im Kontrast zur ländlichen Struktur in der Umgebung der Stadt Ibbenbüren (RÖMHILD 1976). Die mit den besonderen Lagerstättenbedingungen einhergehende jahrhundertealte Tradition des Kohlenbergbaus und des Steinbruchgewerbes sowie die Insellage der Region führten zu einer einseitigen und spezifischen Wirtschaftsstruktur. Die Ibbenbürener Anthrazitkohle wird im Wesentlichen für die Wärme- und Stromerzeugung genutzt. Da sie sich nur schwer verkoken lässt, ist ihr Einsatz in der Stahlindustrie begrenzt.

2.1.3. Böden

Im westlichen Bereich des Ibbenbürener Hochplateaus finden sich überwiegend Braunerden und Gleyböden als bestimmende Bodentypen (Abbildung 4). Die Braunerde besitzt im Bereich des gemäßigten Klimas eine sehr weite Verbreitung. Dieser Bodentyp zeigt im A-Horizont wegen des Vorhandenseins von Humusstoffen (Gesamtheit aller abgestorbenen organischen Stoffe) eine dunkelbraune bis schwarz-braune Färbung. Im B-Horizont ist eine Tonanreicherung und Verbraunung durch Eisen-III-Oxid (FeOOH) feststellbar (GOERKE-MALLET 2000).

Das Ostfeld weist im Bereich östlich des Fahlbachtales großflächig Parabraunerde als bestimmten Bodentyp auf. Es handelt sich bei der Bodenart um schwach lehmigen Schluff bzw. Geschiebelehm, mit Mächtigkeiten zwischen 0,6 m und mehr als 2 m, der direkt vom Oberkarbon unterlagert wird. Im nördlichen Bereich tritt inselartig steiniger lehmiger Sand in einer Mächtigkeit bis 0,6 m auf (Abbildung 4).

Gleyböden treten in Niederungen und Senken, wie z. B. entlang der Fließgewässer sowie im Bockradener Graben, auf (Abbildung 4). Dieser semiterrestische Boden wird aus sandigem Lehm in Mächtigkeit bis 1 m aufgebaut und ist stark vom Grundwasser beeinflusst. Dieser Bodentyp bildet sich im Schwankungsbereich des Grundwasserspiegels, weshalb dort zeitweilig ein reduzierendes Milieu mit einem oxidativen Milieu abwechselt. In den tiefen Bereichen der Gleyböden befindet sich der im ständigen Grundwasserbereich befindliche Reduktionshorizont, der oft fahlgrau, grau-grün oder blauschwarz gefärbt ist.

Der lokal auftretende Pseudogley, ist durch einen Wechsel von Staunässe und Austrocknung charakterisiert und besitzt eine fahlgraue und rostfarbene Marmorierung. Staunässe tritt bei Böden mit hohem Ton- und Schluffgehalt oder bei Böden mit schlecht wasserdurchlässigem Untergrund auf.

Im Nordwesten des Ibbenbürener Hochplateaus besitzt der Podsol (Bleicherde, Grauerde) als Bodentyp feuchter Klimate eine gewisse Bedeutung. Der obere Bereich weist eine Rohhumusdecke (Trockentorf) auf, der tiefere Bereich ist durch eine Eisenhumat-Anreicherung und -Verkittung (Ortstein) gekennzeichnet. Neben dem feuchten Klima bietet die Bewachsung durch Heide (Erzeugung von saurem Rohhumus) eine wichtige Bildungsvoraussetzung (GOERKE-MALLET 2000).

Westlich des Bockradener Grabens bestehen die Quartärschichten aus Lößlehm, Geschiebelehm bzw. Flugsand in teilweise nur geringen Mächtigkeiten. Die Sand- bzw. Tonsteine des Oberkarbon sind daher hier an der Bodenbildung beteiligt. Als Bodentypen entwickelten sich auf den flach- bis mittelgründigen lehmigen Sandböden bevorzugt Braunerden mit Übergangsformen zum Pseudogley und zum Podsol.

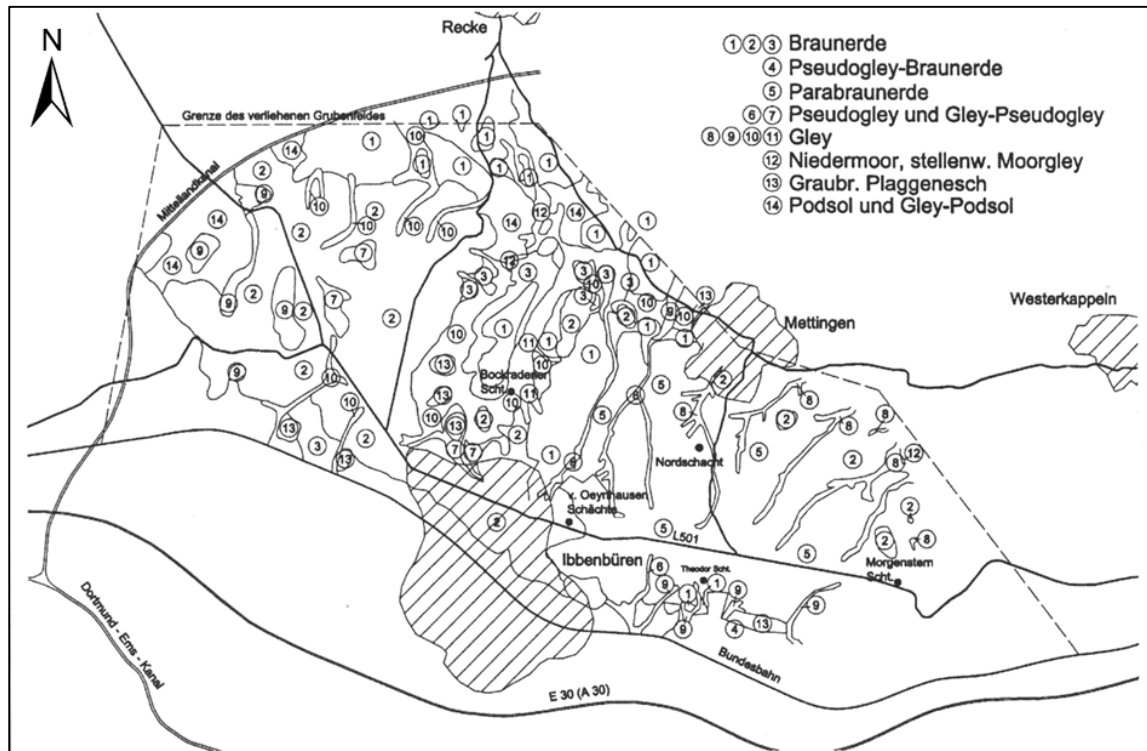


Abbildung 4: Bodentypen des Ibbenbürener Hochplateaus (GOERKE-MALLET 2000)

2.1.4. Vorfluter und Wasserflächen

Im nördlichen Bereich des Hochplateaus existiert eine Vielzahl kleinerer Bäche, die in Richtung NE bzw. N der Recker Aa zufließen, welche in die Ems mündet (Abbildung 16). Die Bäche am südlichen Hang fließen in die Ibbenbürener Aa, die ebenfalls in die Ems mündet. Ein Teilgebiet im Südosten des Hochplateaus befindet sich im Einzugsgebiet der Hase, die bei Meppen in die Ems mündet.

Die Schüttung der Quellen ist teilweise durch bergbauliche Tätigkeit beeinträchtigt worden (Schulenbach, Strootbach, Fahlbach, Ölmühlenbach). Einige Quellen haben nach der Stilllegung des Westfeldes ihre Schüttung wieder aufgenommen (z. B. Pötter'sche Quellen/Uffeln). Die nicht beeinflussten Quellen befinden sich hauptsächlich am Nord- und Nordostrand des Ibbenbürener Hochplateaus (DOMALSKI 1988).

Die Wasserführung dieser Bäche wurde auch durch ihre Begradigung im Rahmen der Flurbereinigung beeinflusst. So bewirkte die Begradigung eine rasche Abführung der Niederschläge und damit eine Grundwasserabsenkung im Randbereich der Bäche. Diese Maßnahmen wurden durchgeführt, um die sonst nassen Böden bewirtschaften zu können. Die Bäche erhalten Zuflüsse aus Gräben, die zur Entwässerung der landwirtschaftlich genutzten Flächen dienen (DOMALSKI 1988). In die Ibbenbürener Aa fließen außerdem die Grubenwässer des betriebenen Ostfeldes aus der Kläranlage Püßelbüren sowie die in der Kläranlage Gravenhorst gereinigten und aufbereiteten Grubenwässer des gefluteten Westfeldes (Abbildung 19).

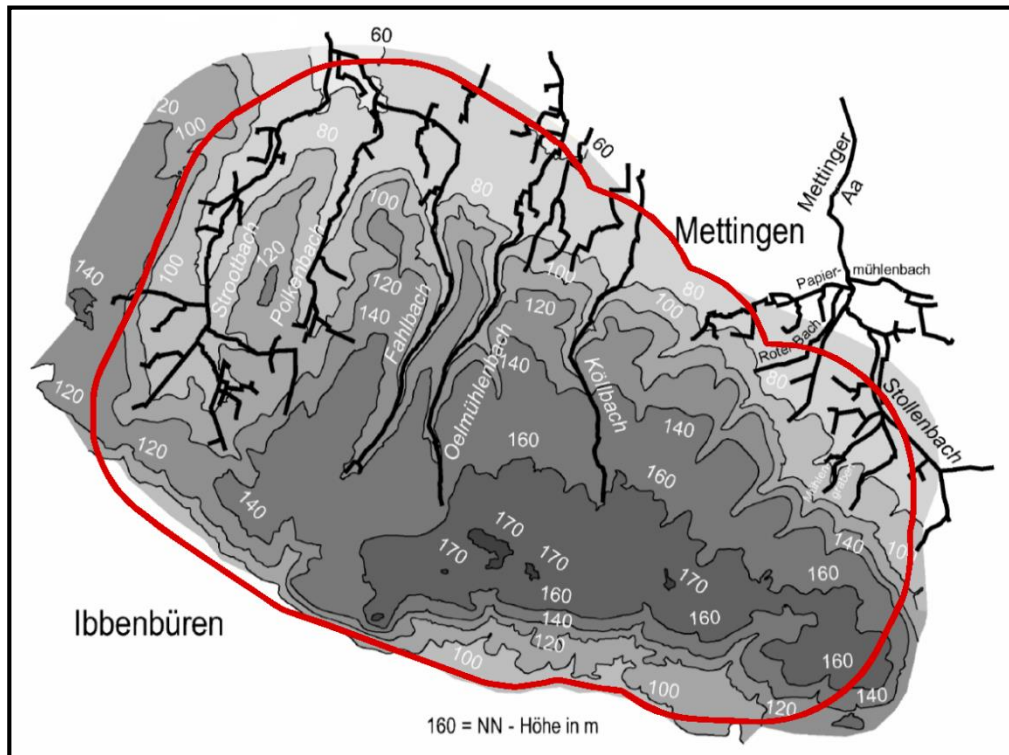


Abbildung 5: Geländehöhen und Vorfluter im Bereich des Bockradener Grabens und des Ostfeldes (rote Umrandung markiert den prognostizierten EW-Bereich; nach DSK ANTHRAZIT IBIBENBÜREN GmbH 2007)

2.1.5. Übertägige Flächennutzung

Der Untersuchungsraum wird überwiegend landwirtschaftlich genutzt. Die landwirtschaftliche Fläche teilt sich in Grünland bzw. Viehweiden und Ackerland (Maisanbau) auf. Größere zusammenhängende Waldflächen befinden sich auf dem Ibbenbürener Hochplateau im Bereich des Staatsforstes Münster (DOMALSKI 1988).

Einen kleineren, jedoch erwähnenswerten Industriezweig bilden Steinbrüche und Tongruben am Rande des Ibbenbürener Hochplateaus (Karte 4). Dort werden Sand- und Tonsteine des Karbon, Kalksteine des Zechstein und Sande des Quartär für die Bauwirtschaft zumeist ortsansässiger Werke (z. B. Ziegelwerke, Klinker- und Keramikwerke, etc.) gewonnen. Die meisten der aktiven Betriebe stehen nicht unter Bergaufsicht und besitzen aktuell Abbaugenehmigungen durch den Kreis Steinfurt. Einer der im Untersuchungsraum größten, unter Bergaufsicht stehenden Steine- und Erden-Gewinnungsbetriebe befindet sich am Querenberg in der Gemeinde Mettingen bzw. Ibbenbüren im Bockradener Gebiet (orange Flächen in Karte 4), wo Ton- und Sandstein abgebaut wird. Des Weiteren gibt es eine Vielzahl von bekannten, meist verfüllten bzw. teilverfüllten, älteren Abgrabungsflächen im Untersuchungsraum, die in Karte 4 der „Künstlich veränderten Flächen“ (KvF) dargestellt sind.

Wie bereits in Kapitel 2.1.2 beschrieben, ist die Region Ibbenbüren seit vielen Jahrhunderten durch den Bergbau geprägt, was durch die große Anzahl bekannter Tagesöffnungen in Betrieb befindlicher bzw. zu meist stillgelegter Schächte und Stollen (Kapitel 2.5.2, Abbildung 24) sowie die im Untersuchungsraum vorkommenden und sehr markanten Steinkohle-Bergehalden „Hopstener Straße“ (Hopstener Halde) und „Rudolfschacht“ (Rudolfhalde oder Buchholzer Halde), die in Abbildung 3 bzw. Karte 4 dargestellt sind, deutlich sichtbar wird. Auf die untertägige Rohstoffgewinnung von Steinkohle, Erz etc. und deren Entwicklung wird in Kapitel 2.5 detailliert eingegangen.

2.2. Geologie des Untersuchungsraums

Die Ibbenbürener Karbonscholle bildet gemeinsam mit den wesentlich kleineren Karbonvorkommen am Piesberg und Hüggel das nordwestlichste Vorkommen zutage tretender Schichten des Paläozoikum in Deutschland. Mit einem flachen Einfallen nach Norden taucht das Karbon am Südrand des Münsterländer Kreidebeckens unter die Schichten der Kreide und tritt im Nordosten in den drei o. g. Karbonhorsten zutage. Die überlagernden Schichten des Mesozoikum treten im Wiehengebirge und im Osning (Teutoburger Wald) zutage (OBERMANN 1968).

2.2.1. Stratigraphie

Der Steinkohlenabbau des Bergwerks Ibbenbüren erfolgt innerhalb der Ibbenbürener Karbonscholle zwischen den Orten Ibbenbüren und Mettingen. Es ist Teil des Schollenlandes der Nordwestfälisch-Lippischen Schwelle, welches das Osnabrücker Bergland mit den paläozoischen Gebirgshorsten des Piesberges, des Schafberges und des Hügels umfasst (THIERMANN & KOCH 1987). Den Nordrand des Schollenlandes bilden die Ausläufer des Wiehengebirges. Die ca. 100 m über ihre Umgebung aufragende Ibbenbürener Karbonscholle ist mit einer Länge von 15 km und ca. 5 km Breite landschaftsbestimmend. Der Schafberg besitzt aufgrund seiner herzynisch streichenden Randverwerfungen eine deutliche Abgrenzung zum umgebenden Umland (Karte 2).

Aufgrund von Erosion existiert im Bereich der Ibbenbürener Karbonscholle kein Deckgebirge. Die Schichten des Karbon streichen entweder frei zutage aus oder werden von Sedimenten des Quartär bedeckt. Diese Sedimente können im Bereich von Grabenfüllungen – wie z. B. im zentralen Bockradener Graben – bis zu 60 m Mächtigkeit erreichen (Abbildung 6, GOERKE-MALLET 2015).

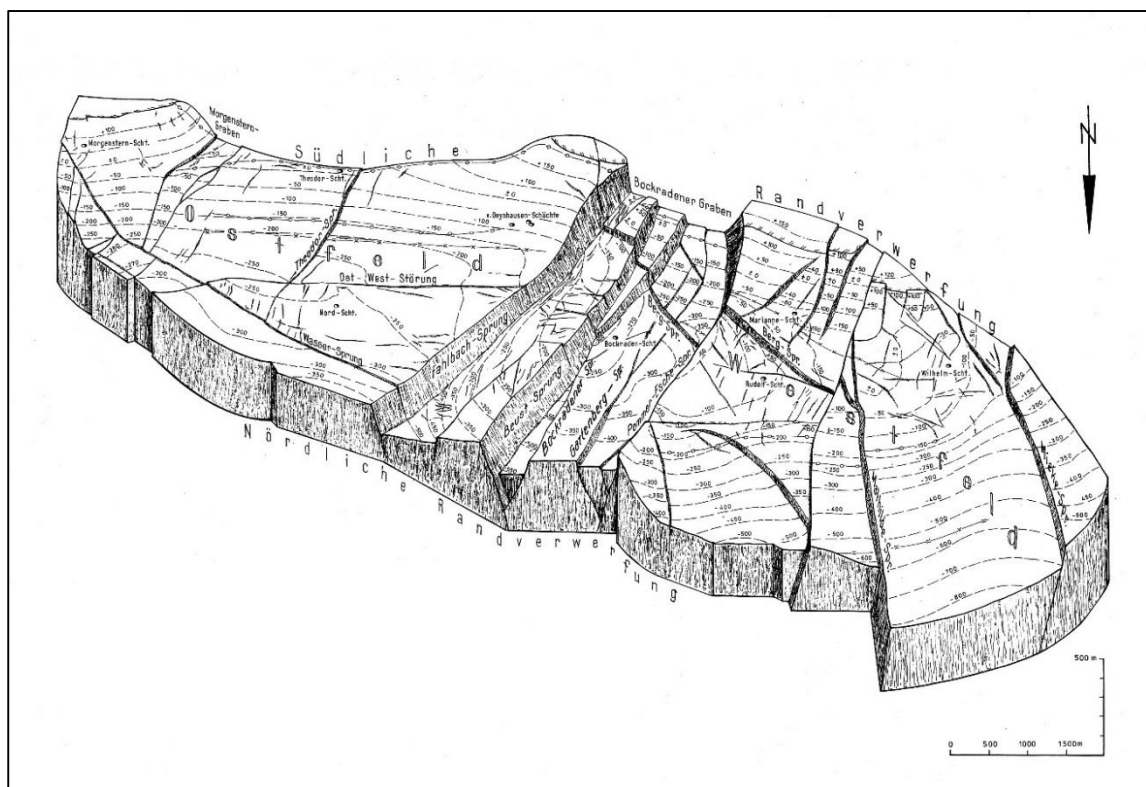


Abbildung 6: Blockbild des Karbon, dargestellt am Flöz Glücksburg (Westfal C, Obere Ibbenbüren-Schichten, DROZDZEWSKI 1985)

■ KARBON

Die stratigraphischen Verhältnisse der Ibbenbürener Karbonscholle sind durch den langjährigen Bergbau auf Steinkohle und Erze gut bekannt. Die Schichten bestehen aus einer Wechsellagerung von Sandsteinen, Schiefertonen und Konglomeraten mit eingelagerten Steinkohlenflözen (Abbildung 7). Die abbauwürdigen Schichten des Westfal B bis zum tiefen Westfal D werden zusammenfassend als Ibbenbürener Schichten bezeichnet. Es folgen im Hangenden die flözleeren Schichten des höheren Westfal D, die eine gewisse Rotfärbung aufweisen.

Bei den tiefsten aufgeschlossenen Gesteinen handelt es sich um Schichten des Oberkarbon vom Westfal B im Liegenden bis zum Westfal D im Hangenden. Die flözführenden Schichten des Westfal erreichen eine Gesamtmächtigkeit von rd. 1.900 m und enthalten ca. 105 Steinkohlenflöze. Die Mächtigkeit der Flöze schwankt in den oberen Bereichen des Oberkarbon zwischen 0,5 m und 1,2 m. Die heute in größerer Tiefe abgebauten Flöze erreichen Mächtigkeiten von mehr als 2 m.

Von den 1.900 m Oberkarbon sind ca. 1.400 m bergmännisch erschlossen (Abbildung 7, BÄSSLER 1970). Die Schichtenfolge besteht zu 70 % aus Sandsteinen mit Konglomeraten und 30 % Schiefer-tonen mit Kohlenflözen.

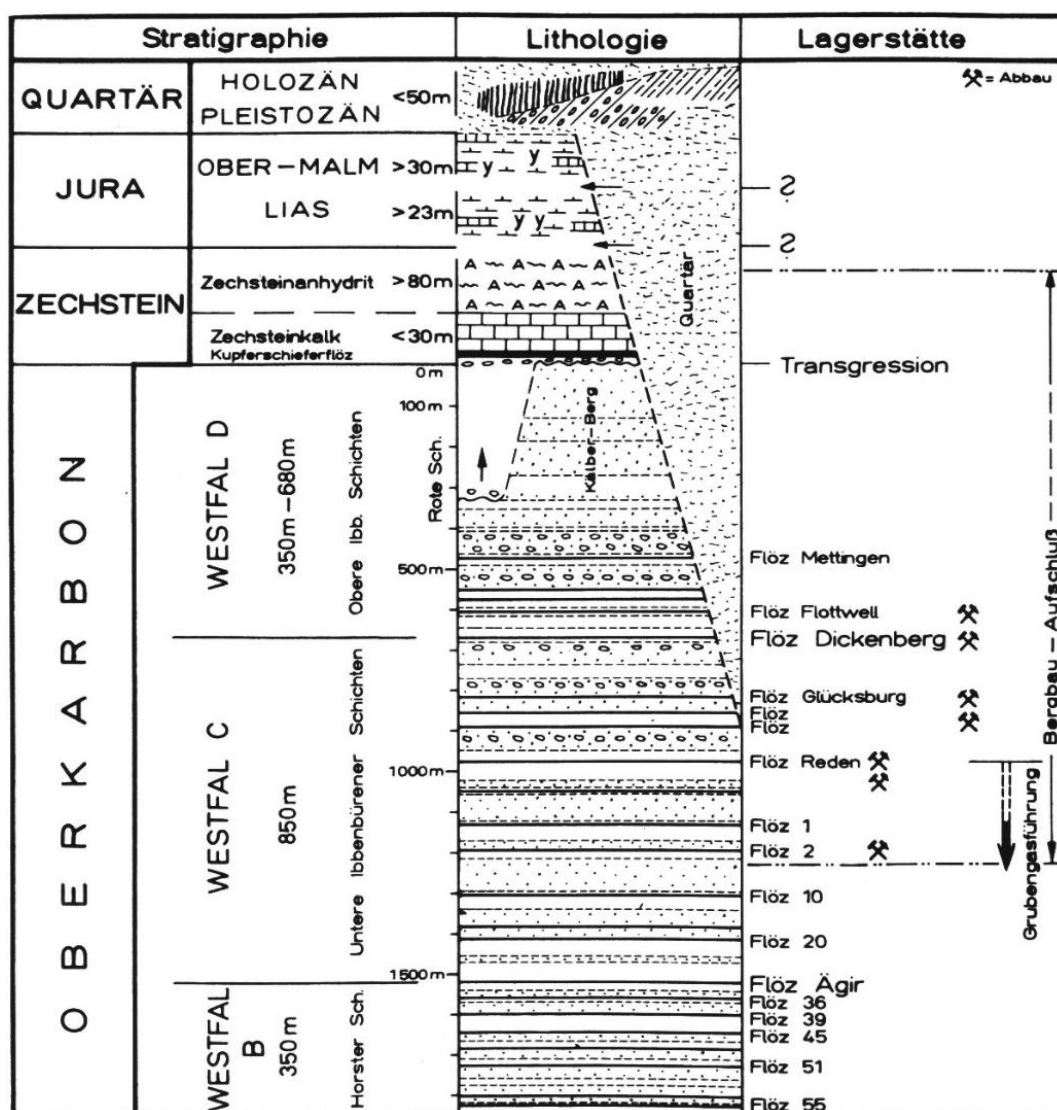


Abbildung 7: Stratigraphischer Aufbau der Ibbenbürener Karbonscholle (BÄSSLER 1970)

■ PERM

Im Umland des Ibbenbürener Karbonscholle lagern oberhalb des Karbon die Schichten des jüngeren Paläozoikum, Mesozoikum und des Tertiär. Im Bereich des Karbonhorstes treten diese Schichten nur vereinzelt, zumeist in Form von Grabenfüllungen, auf.

Auf den Schichten des Karbon folgen mit einer Winkeldiskordanz von ca. 3 - 5° die Schichten des Zechstein (Oberes Perm). Der Zechstein bildet im Allgemeinen 4 Sedimentationszyklen, von denen im Bereich der Ibbenbürener Lagerstätte nur der Zyklus des Zechstein 1 bekannt ist (DOMALSKI 1988). Dieser Zyklus wird durch die Zechsteinkonglomerate (Gerölle aus Karbonsedimenten), Kupferschiefer (bituminöser, dolomitischer Mergelstein) und den Zechsteinkalk aufgebaut. Der Zechsteinkalk wird am Rande der Ibbenbürener Karbonscholle in Tagebauen abgebaut. Die Mächtigkeit der Zechstein-Schichten wird von KELLER (1953) mit bis zu 200 m angegeben.

Im Bockradener Schacht wurden Zechsteinablagerungen mit einer Mächtigkeit von ca. 20 m aufgeschlossen. Hier stehen in einer Teufe von 17,5 m ca. 4,5 m Tonstein sowie im Liegenden 14,5 m Kalkstein an. Die Basis des Zechstein wird aus jeweils 0,5 m Kupferschiefer und Konglomerat (aufgearbeitetes Karbon) aufgebaut. Der Zechstein ist somit dort salzfrei ausgebildet. Die geringmächtigen Tonpartien haben sich durch die Auslaugung der Salze vereinigt und bilden mit den ebenfalls verwitterten Zechsteinkalken einen zähen Verwitterungston, der hier im Hangenden des Kalkes mehrere Meter mächtig ist (OBERMANN 1968).

Östlich des Pommer-Esche-Sprungs treten in den oberen Schichten des Zechsteins Reste von Gips auf. Außerhalb des Bockradener Grabens sind im Blattgebiet Zechsteinablagerungen nur südlich der Südlichen Randverwerfung in der Nähe des Püßelbürener Förderstollens bekannt geworden (OBERMANN 1968).

In den Schichten des Zechstein können in der Umrandung der Südlichen Randverwerfung Eisen- und Buntmetallerze vorkommen. Diese Erze sind nach THIERMANN & KOCH (1987) an die Zechsteinkalke gebunden und kommen in der typischen Abfolge hydrothermalen Vererzungen vor, die im Zusammenhang mit dem Aufdringen des Bramscher-Massivs im Untergrund stehen. Der Aufstieg dieser hydrothermalen Erzlösungen erfolgte über die tiefreichenden Randverwerfungen.

■ TRIAS

Ebenso wie der Zechstein ist der Buntsandstein (untere Trias) nur lückenhaft und in gestörter Lagerung bekannt. Dieser besteht aus roten Tonsteinen mit Sandsteineinlagerungen und wird mit einer Mächtigkeit von rund 500 m angenommen. Im Hangenden des Buntsandstein folgen die überwiegend karbonatischen Schichten des Muschelkalk mit einer Mächtigkeit von ca. 150 m sowie vorwiegend klastischen, rötlich-grau gefärbten Schichten des Keuper mit einer Mächtigkeit von ca. 230 m (KELLER 1953, DROZDZEWSKI 1985).

■ JURA

Die Schichten der Trias werden in der Umrandung der Ibbenbürener Lagerstätte von Schichten des Jura überdeckt. Die ältesten Ablagerungen innerhalb des Jura bilden die dunkelgrauen, schluffigen Ton- und Mergelsteine des Lias, deren Mächtigkeit auf 460 m bis 500 m geschätzt wird (THIERMANN 1980). Darüber folgen, ähnlich wie im Lias ausgebildet, dunkelgraue, feinglimmerige

Tonsteine und z. T. auch Tonmergelsteine des Dogger. Sie erreichen eine mittlere Mächtigkeit von 280 m (DOMALSKI 1988).

Die jüngsten Schichten innerhalb des Jura gehören dem Malm an und besitzen eine weite Verbreitung im Untersuchungsgebiet. Im Malm begann sich das Niedersächsische Becken gegenüber der Rheinischen Masse stark abzusenken. Das Schichtpaket beginnt mit dunkelblauen bis grauen Kalken mit Schwammnadeln. Darüber folgen Sandsteine mit dünnen Tonsteinlagen. Im Mittleren Malm treten vorwiegend Tonsteine mit Feinsandstein-Zwischenlagen auf. Der Obere Malm besteht aus einer Wechselfolge von grauen, dolomitischen Tonsteinen und porösen Schalentrümmer-Kalksteinen. Abgeschlossen wird diese Schichtenfolge von grauen, z. T. grünen Ton- und Mergelsteinen mit Gips und Anhydrit (Münder Mergel, DOMALSKI 1988). Der Malm erreicht insgesamt Mächtigkeiten zwischen 200 m und 300 m.

■ KREIDE

Schichten der Kreide stehen nördlich und südwestlich von Ibbenbüren an. Nördlich der Ibbenbürener Karbonscholle bilden sie unter dem Tertiär die Füllung der Recker Mulde. Südlich der Ibbenbürener Karbonscholle sind sie im Ausbiss des Teutoburger Waldes steil aufgestellt (Karte 1) und gehen weiter nach Süden in das Münsterländer Kreidebecken über (DOMALSKI 1988).

Die größte Mächtigkeit zeigen die Schichten der Unterkreide (Wealden) entlang der Aufragung der Kreide im Teutoburger Wald. Die Mächtigkeit des Wealden wird von DROZDZEWSKI (1985) mit bis zu 400 m angegeben. Die Unterkreide im Hangenden des Wealden ist südwestlich von Ibbenbüren ca. 1.000 m mächtig. Die steil aufragenden Kreideschichten markieren den Nordrand des Münsterländer Kreidebeckens, in dem über 2.000 m mächtige Schichten der Oberkreide ausgebildet sind.

Die Heraushebung der Ibbenbürener Karbonscholle ist nach DROZDZEWSKI (1985) auf die Oberkreide zu datieren. Infolge der Gebirgsbewegungen sind auf der Ibbenbürener Karbonscholle lediglich Reste von Zechstein erhalten geblieben, über denen sich im nördlichen Bockradener Graben noch etwas Miozän befindet.

2.2.2. Tektonik

Die Ibbenbürener Karbonscholle stellt ein geologisches Fenster dar, in dem Schichten des Oberkarbon durch tektonische Prozesse um etwa 2.000 m aus dem umgebenden Jura-Vorland herausgehoben wurden. Die tektonisch stark beanspruchten Schichten des Karbon stehen bereits unter einer nur geringmächtigen Deckschicht des Quartär an. Die gesamte Struktur wird durch die NW-SE (herzynisch) streichende Nördliche sowie die Südliche Randverwerfung begrenzt, die sich vielfach in Zweigstörungen auffiedern und die Karbonscholle im NW und SE begrenzen (Abbildung 8). Bei diesen Randverwerfungen handelt es sich um Staffelbrüche, in deren Verlauf Schollen von Zechstein und Buntsandstein mit hochgeschleppt worden sind (LOTZE et al. 1962). Die Randverwerfungen lassen die Ibbenbürener Karbonscholle morphologisch deutlich über die dem Karbon vorgelagerte Norddeutsche Tiefebene aufragen.

Die Karbonscholle besitzt eine natürliche Gliederung in ein West- und ein Ostfeld, welche durch den quer zur Längsachse verlaufenden Bockradener Graben getrennt werden (Abbildung 6, Karte

2). Dieser entstand durch das Einbrechen der Gesteinsschichten im Scheitelbereich eines ehemaligen flachen Großsattels (EBERT 1954). Tektonisch handelt es sich um ein Grabensystem, das aus Teilgräben, Staffelbrüchen und einer zentralen Horstscholle besteht (BÄSSLER 1968). Der Bockradener Graben (Abbildung 8, Abbildung 9) wird im Nordwesten durch den, mit Verwurfbeträgen von ca. 400 m – 500 m, morphologisch deutlich hervortretenden Pommer-Esche-Sprung begrenzt. Im Südosten wird der Bockradener Graben durch den Beust-Sprung begrenzt, welcher Verwurfbeträge von ca. 220 m aufweist (THIERMANN & KOCH 1987). Innerhalb des Bockradener Grabens tritt eine Vielzahl weiterer SW-NE streichender Abschiebungen auf, die den Graben auch morphologisch an der Geländeoberfläche nachzeichnen. Die Schichten besitzen in diesem Bereich ein generelles NNE-SSW gerichtetes Streichen mit einem Einfallen nach NW. In der zentral gelegenen Horstscholle, die aus kompetenten Gesteinen des Karbon aufgebaut wird, erreicht der Gartenberg eine Höhe von ca. +110 m NHN und bildet damit den höchsten Punkt innerhalb des Bockradener Grabens. Die Seitentäler des Gartenberges leiten mit Höhen von ca. +80 m NHN allmählich zum Norddeutschen Tiefland über (BÄSSLER 1968). Die tektonischen Verhältnisse sind im Anhang A3.1 in einem geologischen Schnitt in der Längserstreckung der Lagerstätte dargestellt

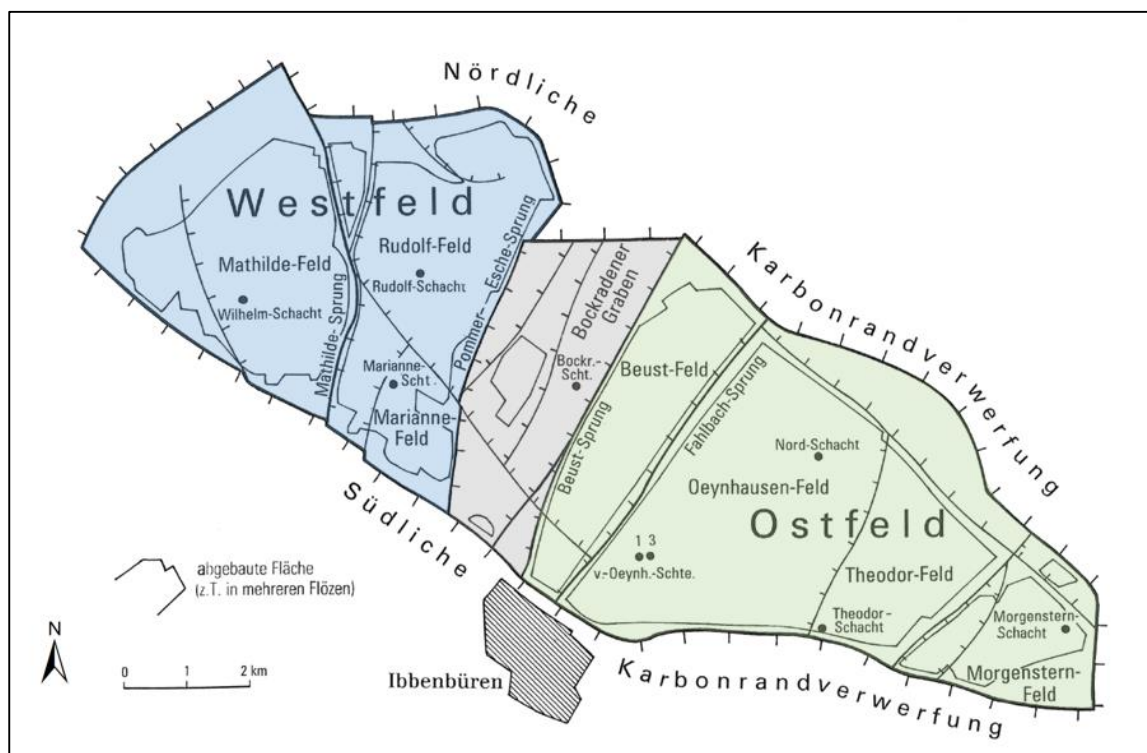


Abbildung 8: Tektonische und bergbauliche Gliederung der Ibbenbürener Karbonscholle (DROZDZEWSKI 1985)

Die Tektonik der Karbonscholle ist in geringen Teufen durch Dehnungsstrukturen gekennzeichnet. Bei den daraus resultierenden Abschiebungen bzw. Sprüngen nehmen die Verwurfbeträge zur Teufe hin ab. Mit zunehmender Teufe treten in der Ibbenbürener Lagerstätte Einengungsstrukturen auf, die sich in Blattverschiebungen und Wechselln bzw. Überschiebungen äußern.

Das vom BW Ibbenbüren seit Ende 2011 abgebaute Beustfeld befindet sich innerhalb dieser Graben-Struktur. Die flach nach Norden einfallenden Schichten des Oberkarbon am Schafberg gehen am Süd- und Nordrand des Karbonhorstes in Falten über, die teilweise schon vor dem Zechstein entstanden sind (Anhang A3.2). Es treten in diesen Bereichen zwischen den Schichten

des Oberkarbon und Zechstein Winkeldiskordanzen von wenigen Grad, in Störungsnähe von 30° - 50° auf (DROZDZEWSKI 2003).

Jenseits der zum Vorland hin einfallenden Randverwerfungen wird die Ibbenbürener Karbonscholle von Schichten des jüngeren Paläozoikum (Zechstein) und des Mesozoikum (Trias und Jura) allseitig umschlossen. Die Jura-Staffel im NW des Untersuchungsgebietes geht dabei durch eine Schichten-Aufbiegung und damit ohne Bruchbildung in das Vorland über.

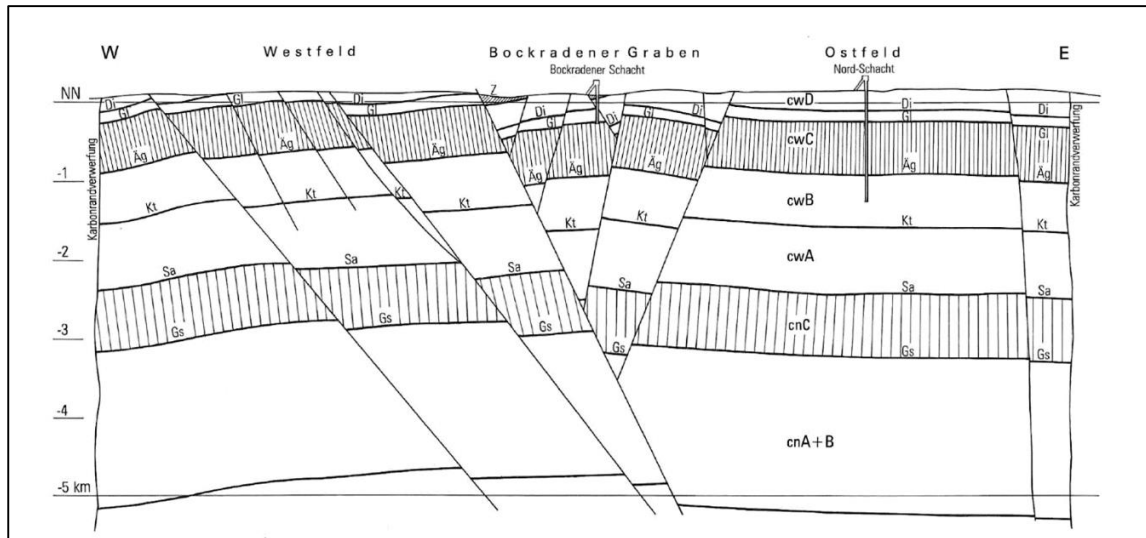


Abbildung 9: W-E-Schnitt zwischen der südlichen und nördlichen Karbonrandverwerfung durch das Westfeld, den Bockradener Graben und das Ostfeld. Der Bockradener Graben läuft in ca. 3 km Tiefe aus (DROZDZEWSKI 1985).

Eingehende tektonische Untersuchungen haben jedoch ergeben, dass die bei Ibbenbüren-Laggenbeck auftretende Osning-Überschiebung nicht als steile Aufschiebung ausgebildet ist, sondern subhorizontal die Laggenbecker Trias-Scholle unterlagert und im direkten Kontakt mit der Südlichen Randverwerfung der Karbon-Scholle steht (DROZDZEWSKI 1985, Anhang A3.2). Dies wird als Beleg für den kausalen Zusammenhang zwischen der Osning-Überschiebung und Ibbenbürener Karbonscholle gesehen, wobei sich jedoch die Osning-Überschiebung im Einfallen nicht in die Ibbenbürener Karbonscholle hinein fortsetzt.

Das flache Einfallen der Osning-Überschiebung scheint mit den steilen Randstörungen der Karbonscholle im Widerspruch zu stehen. Es wird heute angenommen, dass die Randverwerfungen der Ibbenbürener Karbonscholle Bestandteile einer lineamentären Osning-Störung sind, die zu verschiedenen Zeiten wirksam war. Die tektonischen Bewegungen in dieser stark gestörten Zone umfassen Abschiebungen, Aufschiebungen, vor allem aber Seitenverschiebungen. Deren Bewegungen sind die Ursache für die falten- und bruchtektonischen Verformungen der Ibbenbürener Karbonscholle sowie für das Aufreißen der Osning-Überschiebung gewesen (Abbildung 10).

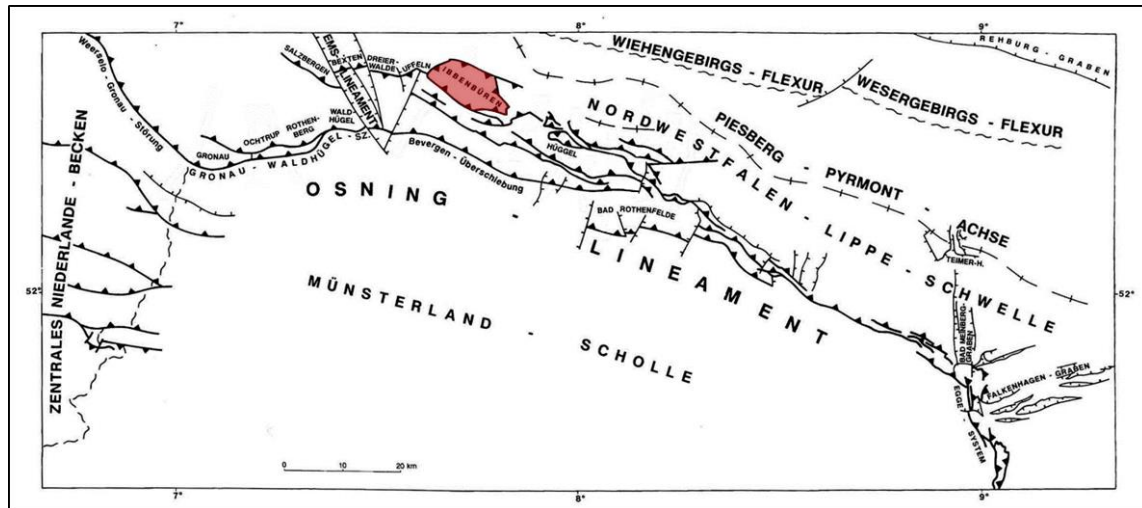


Abbildung 10: Tektonische Übersichtskarte des Osning-Lineaments (Ibbenbüren: rot; nach BALDSCHUHN & KOCKEL 1999)

Nach DROZDZEWSKI (1985) sind an den vertikalen Randverwerfungen sowie an der flachen Osning-Überschiebung horizontale Seitenverschiebungen wahrscheinlich. Hierfür lassen sich bereits aus der Struktur der Ibbenbürener Karbonscholle wesentliche Hinweise ableiten. Die Karbonscholle wird linsenförmig von den bedeutenden Randstörungen umgeben. Damit besteht das Osning-Lineament im Bereich der Ibbenbürener Karbonscholle aus zwei Störungsgästen, der Nördlichen und Südlichen Randverwerfung (Abbildung 8). Die Anordnung der beiden Störungsgäste zeigt das Bild eines rechtshändig versetzten en-echelon-Seitenverschiebungssystems (Abbildung 11a).

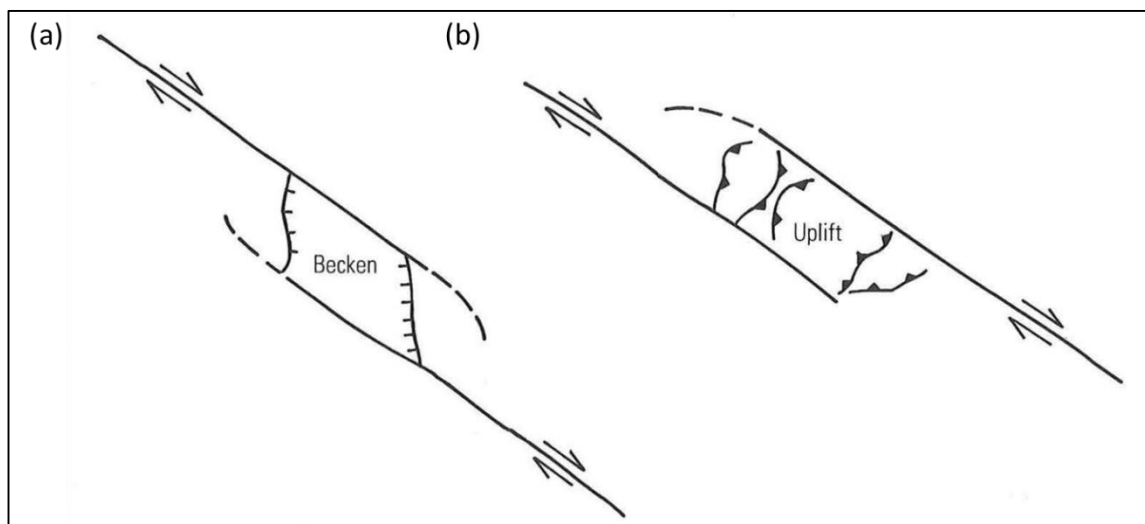


Abbildung 11: Entwicklung von Dehnungsbecken und Horsten mit Überschiebungen in den Verbindungszonen von en-echelon-Seitenverschiebungssystemen (DROZDZEWSKI 1985)

Treten an einem derartigen Störungsmuster horizontale Seitenverschiebungen auf, so ergeben sich entweder einengende oder dehnende Bewegungen und damit Falten und Hebungen (transpressive Tektonik) bzw. Abschiebungen und Senkungen (transtensionale Tektonik). Maßgebend ist hierbei, ob der relative Bewegungssinn der Seitenverschiebungen rechtsseitig oder linksseitig ist. Da die Ibbenbürener Karbonscholle durch randstörungsparallele Falten und in der Tiefe auch Überschiebungen gekennzeichnet ist, müssen bei Zugrundelegung dieses Mechanismus ebenfalls linksseitige Verschiebungen angenommen werden (Abbildung 11b, Abbildung 12).

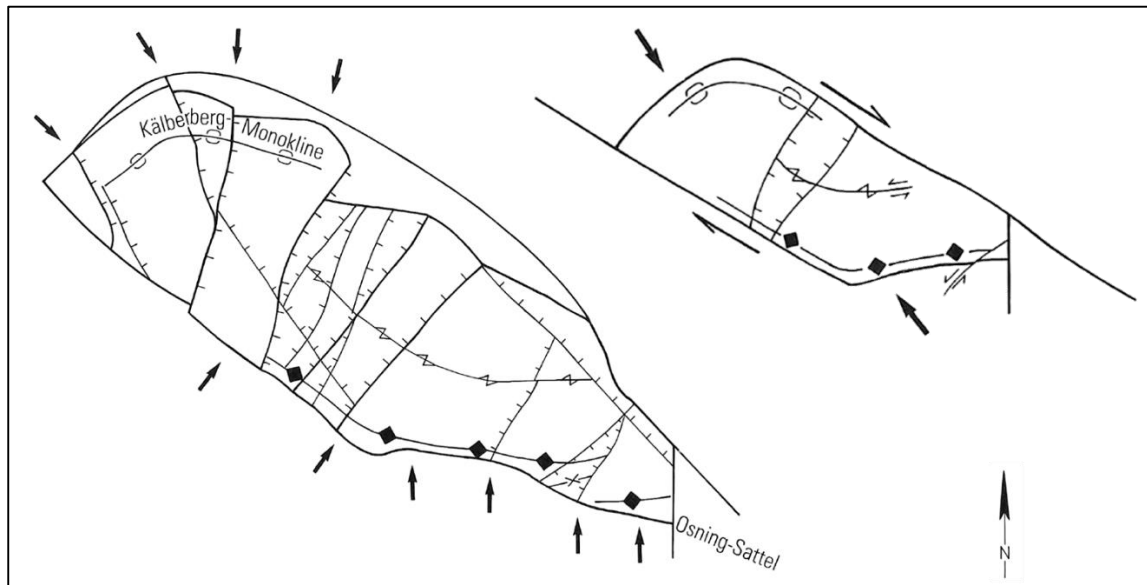


Abbildung 12: Verlauf der Falten und Brüche und der daraus resultierende Faltungsdruck (nach DROZDZEWSKI 1985)

Eine besonderes geologisches Phänomen stellen die zahlreichen im nordwestlichen Untersuchungsgebiet auftretenden Erdfälle zwischen dem Mittellandkanal und der Ortschaft Hopsten dar. Entlang der Landstraße L 504 befindet sich eine ca. 5 km lange, 2,5 km breite, NW-SE-streichende Senkungszone, die als „Heiliges Feld“ bekannt ist. In dieser Lokalität befindet sich eine Vielzahl an Geländevertiefungen, die auf die Auslaugung von Salz-, Gips- und Anhydrit-Einlagerungen in den Schichten des Oberen Jura und der Unterkreide zurückzuführen sind (Abbildung 13, THIERMANN 1975). Das sog. Große Heilige Meer, das auf Auslaugungsprozesse zurückgeführt werden kann, ist der größte natürliche See Westfalens.

Nach WOLTERS et al. (1958) wurde in einer Bohrung ein im Pleistozän entstandener Erdfall mit Quartärsedimenten von ca. 78 m Mächtigkeit und einem Torfvorkommen in 15 – 20 m Bohrtiefe erbohrt, während die Quartärmächtigkeit unmittelbar neben dem Erdfall nur 24 m betrug. Somit lassen sich in diesem Bereich seit dem Beginn des Pleistozäns Absenkungsbeträge von mindestens 50 m rekonstruieren (THIERMANN et al. 1975). Gut dokumentiert ist die Entstehung des Erdfallsees am 14. April 1913, südwestlich des Großen Heiligen Meeres; damals entstand innerhalb weniger Stunden ein Erdfall von 300 m Durchmesser und 10 – 15 m Tiefe (WEGNER 1913).

Bei der Bildung der Senkungserscheinungen kommt den Schichten der Salinargesteine des Münster-Mergel (Oberes Jura bis Unterkreide) eine besondere Bedeutung zu (Abbildung 13, Abbildung 14). Diese Schichten besitzen eine Mächtigkeit von 200 - 500 m und bestehen aus grauen und grünlichen Mergelsteinen mit cm-dicken Bänken aus Anhydrit und Gips. Ursache für die Entstehung der Erdfälle sind die im Münster-Mergel auftretenden, mehrere Meter mächtigen Anhydrite sowie insbesondere ein Steinsalzlager mit einer Mächtigkeiten von bis zu 130 m. Diese Gesteine sind in Kontakt mit fließenden Grundwasser besonders auslaugungsfähig.

Da die Salzablaugung auch an tektonischen Störungen erfolgt, die durch das Deckgebirge in den geschlossenen Salzkörper reichen, ist die Erdfallzone insgesamt sehr viel breiter und ausgehnter, als es nach der Mächtigkeit und dem Einfallen der Salinargesteine zu erwarten wäre. Durch die Zerrüttung des Gesteins und die dadurch vergrößerten Hohlräume ergeben sich in diesen Zonen erhöhte Wasserwegsamkeiten. So lässt sich für die Erdfälle des Großen und des Kleinen Heiligen Meeres, den Heideweiher und den Erdfallsee vom 14. April 1913 sowie das

Uffeler Moor und der nur 1 - 2 m tiefe Herthasee bei Hörstel ein direkter Zusammenhang zu Kreuzungspunkten zweier tektonischer Störungen feststellen, an denen eine punktförmige Ablagerung des Untergrundes auftrat (THIERMANN & KOCH 1987).

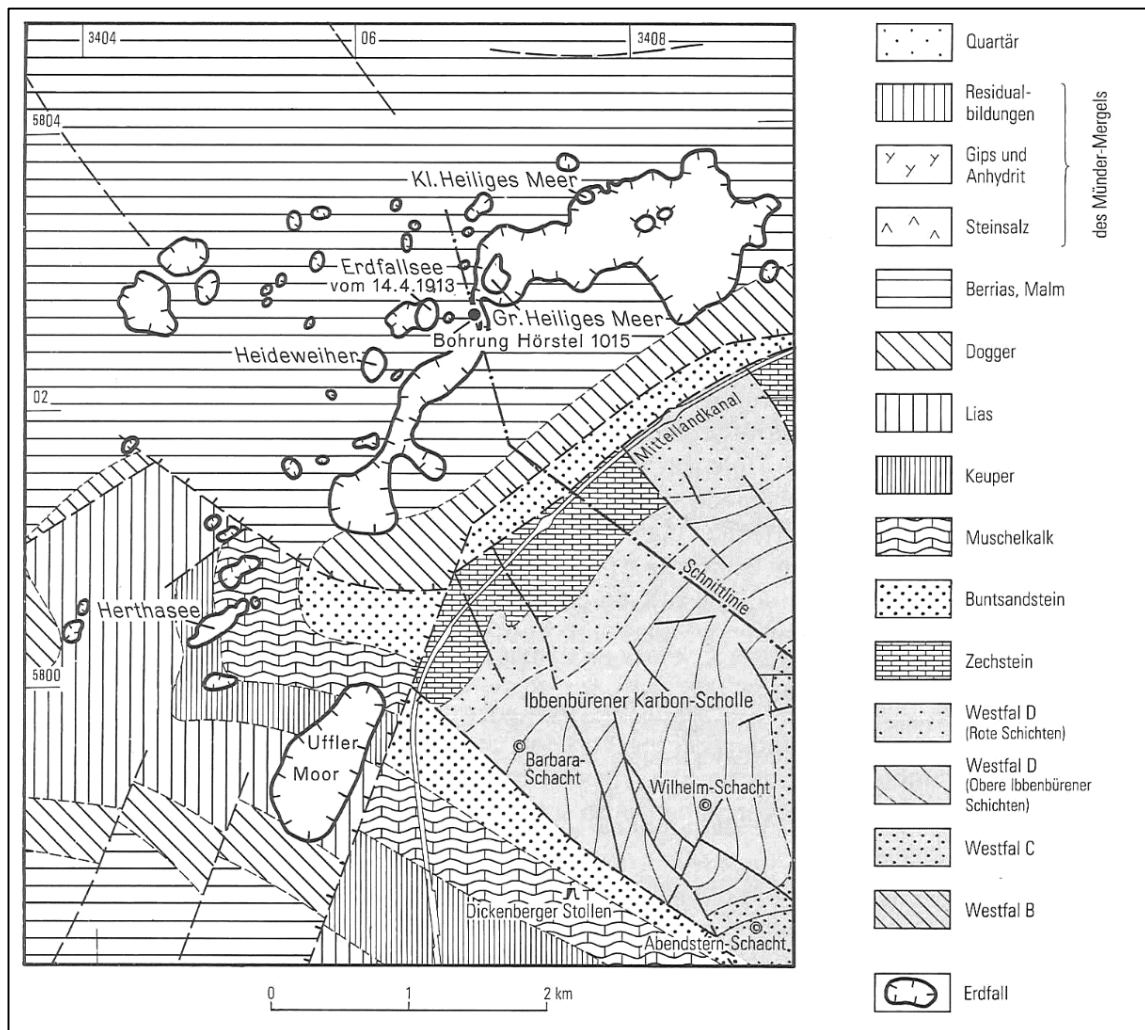


Abbildung 13: Geologische Karte (Quartär abgedeckt) des Erdfallbereiches des "Heiligen Feldes" und seiner Umgebung (THIERMANN & KOCH 1987)

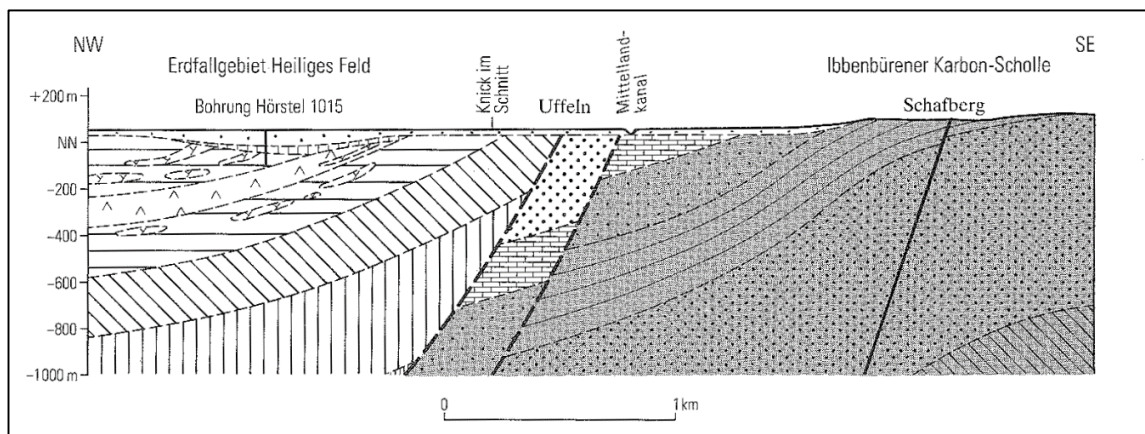


Abbildung 14: Geologischer Schnitt durch den Erdfallbereich des "Heiligen Feldes" (THIERMANN & KOCH 1987)

2.3. Hydrogeologie und Grundwasser

2.3.1. Hydrogeologie

Die Grundwasserströmung erfolgt zumeist schichtparallel und ist damit durch das Einfallen der einzelnen Schichten und deren Durchlässigkeit bestimmt. Der natürliche Zustand ist im Bereich der Ibbenbürener Karbonscholle durch zahlreiche Störungen und den Einfluss des langjährigen Steinkohlenbergbaus am Schafberg gestört.

An den zahlreichen im Untersuchungsgebiet auftretenden Störungen ist das Gestein intensiv zerrüttet, wodurch sich an diesen Strukturen erhöhte Durchlässigkeiten und hydraulische Fließwege für höher konzentrierte Tiefenwässer ergeben. Da es sich überwiegend um Abschiebungen handelt, die auf Zerrungsvorgänge zurückzuführen sind, wird hierdurch die Wasserdurchlässigkeit des Gebirges erheblich vergrößert (LOTZE et al. 1962). Innerhalb der größeren Störungszonen sind weitverzweigte Grundwasserbewegungen vorhanden. Im ungestörten Gebirge ist die Wasserwegsamkeit vor allem an die Porenhohlräume der Sandsteine gebunden, wohingegen die Ton-schichten Grundwasserbewegungen senkrecht zum Schichteinfallen entgegenstehen. Wo diese aber natürlich durch Klüfte oder anthropogen durch den Bergbau gestört sind, kann die Grundwasserwegsamkeit lokal erhöht sein. Bis in 700 m Tiefe (Westfal C und Westfal D) herrschen Dehnungsstörungen im geologischen Bau vor, die im Bergbau zu Grubenwasserzuflüssen führen können. Mit zunehmender Tiefe nehmen die Zuflüsse aufgrund der Einengungstektonik mit Überschiebungen, Blattverschiebungen und flachen Falten ab. Dort setzt nach DROZDZEWSKI (2003) anstelle einer Wasserführung eine starke Gasführung des Gebirges ein.

Die Gesteine des Oberkarbon bestehen aus einer Wechselfolge von Tonsteinen, Schluffsteinen, Sandsteinen, Konglomeraten und Steinkohlenflözen. Teilweise sind in kleineren Gräben des Bockradener Grabens und am NW-Rand der Karbonscholle Ablagerungen des Zechstein erhalten (THIERMANN & KOCH 1987). Die Schichten des Oberkarbon von Ibbenbüren besitzen ein generelles Einfallen von ca. 5° nach NE (THIERMANN & KOCH 1987). So stehen am Dickenberg, am Südwestrand der Ibbenbürener Karbonscholle, Schichten des Westfal C als älteste Schichten an, die in Richtung NE von Schichten des Westfal D überlagert werden. Spezialuntersuchungen von BÄSSLER (1968) im tektonisch stark beanspruchten Bockradener Graben zeigen eine abweichende Schichtlagerung mit einem NNE-SSW gerichteten Streichen bei einem Einfallen nach NW. Der Bockradener Graben wird durch meist abdichtende NNE-SSW streichende Störungen von den umgebenden Abbaufeldern Westfeld und Ostfeld abgegrenzt und stellt nach BÄSSLER (1968) somit hinsichtlich seiner morphologischen Ausbildung eine exakt zu umgrenzende hydrologische Einheit dar (Abbildung 8).

Das hydrogeologische System des Bockradener Grabens wird im Wesentlichen durch die Ausbildung von drei Grundwasserstockwerken bestimmt. Es handelt sich hierbei vom Hangenden zum Liegenden um die schwach bis unverfestigten Deckschichten des Quartär, die Kalke des Zechstein sowie die geklüfteten Sandsteine des Karbon (BÄSSLER 1968). Tektonisch handelt es sich um ein Grabensystem, das aus Teilgräben, Staffelbrüchen und einer zentralen Horstscholle besteht. Diese tektonische Hochscholle prägt sich morphologisch an der Geländeoberfläche aus und wird als Gartenberg bezeichnet. Die jeweils tiefer liegenden Gebirgsschollen weisen eine außerordentlich intensive Klüftung und Zerrüttung des Gesteinsverbandes auf, wohingegen die Hochschollen bis unmittelbar vor den Hauptverwerfungen einen kompakten Verband aufweisen. Der Bockradener

Graben wird durch den Strootbach im westlichen und dem Polkenbach im östlichen Seitental des Gartenbergs nach Norden entwässert.

■ 1. GRUNDWASSERSTOCKWERK

Das erste Grundwasserstockwerk wird aus den Deckschichten des Quartär gebildet. Durch Flurabstände von durchschnittlich bis zu 2 m u. GOK bis maximal 10 m u. GOK wird der tagesnahe Grundwasserkörper durch eine Vielzahl an Brunnen für die Hauswasserversorgung genutzt. Schutzgebiete existieren nur am südlichen Rande des Untersuchungsraumes in Form von Trinkwasserschutzgebieten. Heilquellenschutzgebiete liegen nicht vor (Karte 5). Kennzeichnend für die Wässer des Quartär sind allgemein niedrige Chlorid-Konzentrationen um 70-80 mg/l, schwankende Sulfat-Konzentrationen und Wasserhärten unter 12 °dH. Die Wasserqualität kann lokal durch hohe und stark schwankende Konzentrationen an Eisen, Nitrat, Ammoniak und Sulfat bis 330 mg/l beeinflusst sein (BÄSSLER 1968). Die Sohle des ersten Grundwasserstockwerks wird durch Geschiebelehme, Grundmoränenablagerungen und tonige Verwitterungshorizonte gebildet. Die lokal auftretenden Ablagerungen von Lias und Malm (Münder Mergel und Serpulit) im Liegenden des Quartär sind als Grundwassernichtleiter einzustufen.

■ 2. GRUNDWASSERSTOCKWERK

Das zweite Grundwasserstockwerk bilden die geklüfteten Karbonate des Zechstein (Perm). Die Ergiebigkeit dieses Kluftgrundwasserleiters ist von geringer Bedeutung und nicht anhaltend. Wasserzuflüsse von 100 l/min sind beim Durchteufen des Zechstein im Bockradener Schacht dokumentiert (BÄSSLER 1968). Die geringe Wasserführung kann vermutlich auf die Geschiebelehme und tonigen Verwitterungsbildungen im Hangenden des Zechstein zurückgeführt werden. Die Sohle dieses Kluftgrundwasserleiters bilden die Mergelschiefer des Kupferschieferflözes.

■ 3. GRUNDWASSERSTOCKWERK

Das dritte Grundwasserstockwerk der Ibbenbürener Karbonscholle wird aus den geklüfteten Sandsteinen des Oberkarbon aufgebaut. Wo diese nicht von den Zechstein-Kalken überlagert werden, können diese auch direkt vom ersten Grundwasserstockwerk des Quartär überlagert werden. Die Wasserwegsamkeit der karbonzeitlichen Sandsteine ist in besonderem Maße an die Klüfte gebunden. Die kompakten Sandsteine sind mit einer effektiven Porosität zwischen 6 und 14 Vol.-% und einer Durchlässigkeit von $< 1 \text{ mD}$ (entspr. ca. $< 10^{-8} \text{ m/s}$) nach DIN 18130-1 (1998) als sehr schwach durchlässig einzustufen. Die hydraulische Leitfähigkeit wird außerdem durch undurchlässige Schiefertonglagen beeinträchtigt. Die Sandsteine des Westfal D sind im Untersuchungsgebiet als bedeutende Grundwasserleiter einzustufen. So mussten in einigen Bereichen des Grubengebäudes Zuflussraten von ca. $3 \text{ m}^3/\text{min}$ aus den Sandsteinen des Karbon angenommen werden.

2.3.2. Niederschläge und Versickerungen

Niederschlagsdaten für den Bereich des Ibbenbürener Raums werden vom Deutschen Wetterdienst (DWD) an der Messstation Hörstel (+46 m NHN, ca. 10 km westlich der Schachtanlage Ibbenbüren) aufgezeichnet. Für die Auswertung der Niederschlagshöhen wurden die Tageswerte zu Monatswerten summiert und in einem gemeinsamen Diagramm (Abbildung 15) dargestellt.

Die Niederschlagshöhe im Raum Ibbenbüren beträgt im langjährigen Mittel jährlich ca. 750 - 800 mm/m². Im Betrachtungszeitraum wurde an der Messstation Hörstel eine durchschnittliche monatliche Niederschlagshöhe von ca. 60 mm/m² gemessen (Abbildung 15). Der Betrachtungszeitraum ist zumeist von einer niederschlagsarmen ersten Jahreshälfte geprägt. In der zweiten Jahreshälfte sind monatliche Niederschlagshöhen von ca. 140 mm/m² erkennbar.

Der August 2010 war mit einer Niederschlagshöhe von 298,4 mm/m² besonders regenreich. Diese extreme Niederschlagshöhe ist vor allem auf ein Starkregen-Ereignis am 26.08.2010 mit 131 mm/m² in 24 Stunden zurückzuführen (Messstation Hörstel, DEUTSCHER WETTERDIENST 2015).

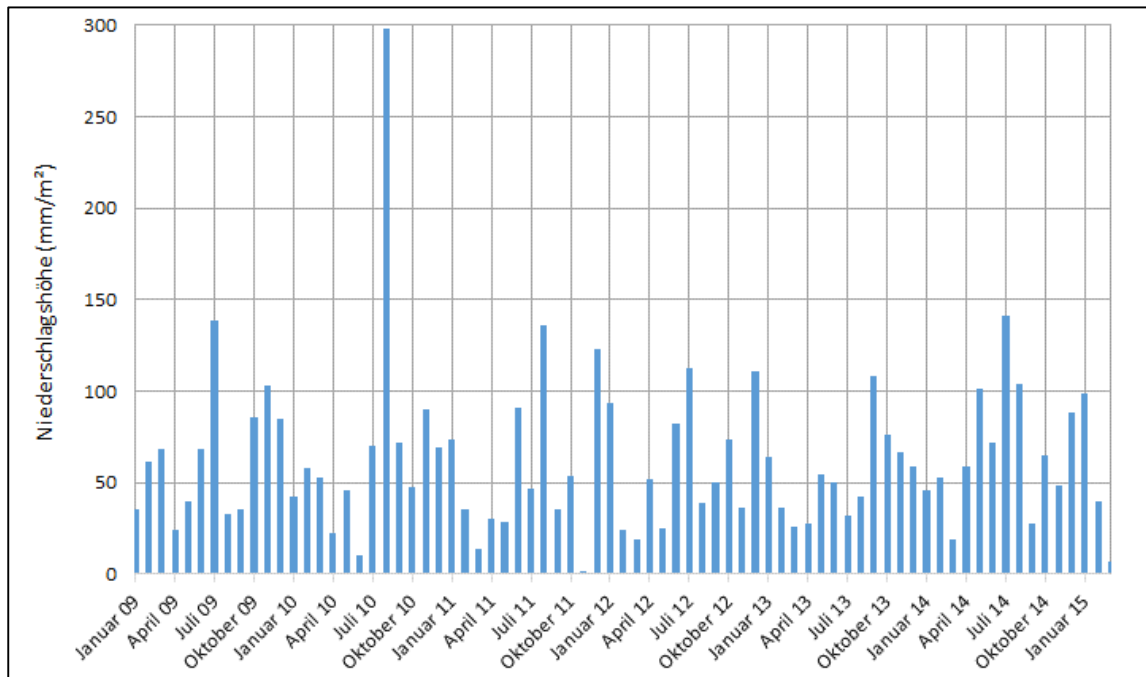


Abbildung 15: Monatliche Niederschlagshöhen (mm) der Messstation Hörstel (DEUTSCHER WETTERDIENST 2015)

2.3.3. Grubenwasserhaltung

Die Wasserhaltung am Standort Ibbenbüren gliedert sich in zwei Teilbereiche: dem Ostfeld und dem Westfeld. Das Westfeld stand bis zum 30.06.1979 in Förderung. Die Steinkohlenförderung im Ostfeld wird zum 31.12.2018 eingestellt (Abbildung 16, Abbildung 19).

Im Zuge der Rückbauarbeiten im Westfeld und der Einstellung der Wasserhaltung im Wilhelm-Schacht stieg ab dem Jahre 1980 das Grubenwasser in diesem Bereich wieder an. Die Entwässerung der Abbaufelder im Westfeld erfolgt über den sog. Dickenberger Stollen am Südwestrand des Dickenberges. Die Überlaufschwelle des Wilhelm-Schachtes liegt bei +59,90 m NHN. Das Grubenwasser fließt aufgrund der topografischen Verhältnisse ohne Pumpbetrieb drucklos über den Dickenberger Stollen aus dem Bergwerk aus und wird über den sog. Stollenbach der Kläranlage Gravenhorst (westlich von Püsselbüren; Abbildung 19) zugeleitet. Nach der Behandlung des Grubenwasser wird es anschließend in die Ibbenbürener Aa eingeleitet und fließt über die Speller Aa der Ems zu (RAG AG 2014). Die derzeitige Grubenwasserhaltung im Westfeld und Ostfeld des Bergwerkes Ibbenbüren ist in Abbildung 16 dargestellt.



Abbildung 16: Grubenwasserhaltung Ostfeld/Westfeld des Bergwerks Ibbenbüren (RAG AG 2014)

Im Ostfeld wird derzeit neben der Grubenwasserhaltung in den von-Oeynhausen-Schächten, noch im Bockradener Schacht und im Nordschacht Wasser zu Tage gepumpt. Die Wasserführung in den Teilgräben des Bockradener Grabens beschränkt sich auf die Grundwasserleiter der Quartär-Sande, des Zechsteinkalke und der Karbonsandsteine. Im Bereich des anstehenden Karbon der mittleren Horstscholle (Gartenberg) tritt Grundwasser nur in Form örtlich auftretender, schwebender Grundwasserstockwerke auf (BAESSLER 1968, COLDEWEY et al. 2007).

Im Bockradener Schacht werden Zuflüsse gefasst, die früher für die Trinkwassergewinnung des Wasserversorgungsverbandes Tecklenburger Land genutzt wurden und heute überwiegend in das Brauchwassernetz des Bergwerks eingespeist werden (RAG AG 2014). Die Wasserzuflüsse treten aus Schichten des Karbon in den Bockradener Schacht ein und erreichten im Jahr 2014 eine maximale Zuflussrate von ca. 574.000 m³/a (RAG 2015). Die höchsten Wasserzuflüsse in den Bockradener Schacht wurden im Betrachtungszeitraum im Januar 2014 mit ca. 55.000 m³ gemessen. Seitdem sinken die Zuflüsse und nähern sich dem langjährigen Mittel von ca. 35.000 m³/Monat. Die Entwicklung der gehobenen Wasserzuflüsse aus dem Bockradener Schacht sind in der Abbildung 17 für den Betrachtungszeitraum dargestellt.

Im Nordschacht wird ebenfalls ein Süßwasserzufluss aus geringer Teufe gefasst, der in den Köllbach eingeleitet wird.

Die austretenden Wässer aus dem Permer Stollen (Abbildung 26) werden gefasst und in Richtung Osnabrück geleitet. Im östlichen Bereich des Permer Stollens befinden sich zwei Blindschächte die vermutlich eine hydraulische Verbindung zum Karbon bilden. Die Zeche Muck und Horst (Abbildung 26) ist an die Störungen der nördlichen Randverwerfung angebunden und entwässert in das Vorland (GOERKE-MALLET 2015).

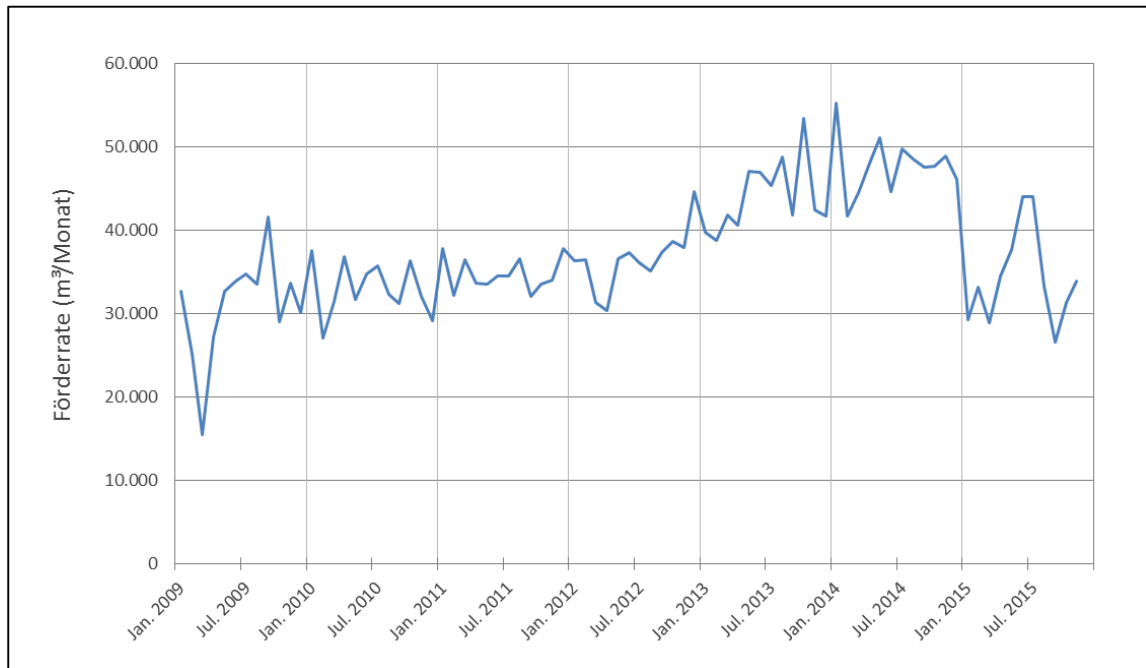


Abbildung 17: Förderrate aus dem Bockradener Schacht (RAG ANTHRACIT IBBENBÜREN GMBH 2015)

2.4. Wasserwirtschaft

Nach der Stilllegung des Ostfeldes sieht das langfristige Grubenwasserkonzept der RAG (gemäß § 4 Absatz 2 des Erblastenvertrags) für das Ibbenbürener Steinkohlenrevier vor, das Grubenwasser aus geringer Teufe zu heben und über den Ibbenbürener Förderstollen (Stollenmundloch auf ca. +80 m NHN, Abbildung 3) zu den bergwerkseigenen Klärteichen Püsselbüren abzuleiten (RAG AG 2014). Anschließend wird es über die Ibbenbürener Aa und die Speller Aa in die Ems eingeleitet (Abbildung 16).

Das Grubenwasser wird im Ostfeld auf eine Höhe von ca. ± 0 m NHN ansteigen und durch Pumpen kurz gehalten (GOERKE-MALLET 2015). Durch diese Pumphöhe ist sichergestellt, dass ein Austritt des Grubenwassers über Stollen aus dem Bereich sehr alter Abbaue weit oberhalb der heutigen Abbaubereiche verhindert wird. Die Ableitung des Grubenwassers des West- und Ostfeldes über die Ibbenbürener Aa zur Ems soll nach dem Grubenwasserkonzept der RAG Anthrazit Ibbenbüren GmbH dauerhaft erfolgen.

Am Standort Ibbenbüren werden voraussichtlich ungefähr 5 Mio. m^3/a zu heben sein. Weitere 4 Mio. m^3/a aus dem Westfeld werden, wie bisher, drucklos am Dickenberger Stollen auslaufen (RAG AG 2014).

2.5. Mineralische Lagerstätten und Rohstoffgewinnung

2.5.1. Historische Entwicklung des Bergwerk Ibbenbüren

Aufgrund der oberflächennah, bzw. direkt an der Oberfläche ausstreichenden Kohlenflöze, blickt die Ibbenbürener Steinkohlenlagerstätte auf eine lange Abbaugeschichte zurück. Eine Zusammenfassung der historischen Entwicklung dieser Lagerstätte wird von DOMALSKI (1988) gegeben, die hier in Auszügen wiedergegeben wird.

Eine erste urkundliche Erwähnung des Ibbenbürener Steinkohlenbergbaus stammt aus dem Jahre 1492. Lange Zeit war der tagesnahe Bergbau durch Probleme mit Wassereinbrüchen beeinträchtigt. Die enge Abhängigkeit zwischen den Niederschlägen und den daraus resultierenden Grubenwasserzuflüssen prägten die geschichtliche Entwicklung des Bergbaus über Jahrhunderte.

Im Jahre 1662 wurde zum ersten Mal von Tiefbauarbeiten (Pingen, Schächten) berichtet. Dieser Übergang zum tieferen, aber noch oberflächennahen Abbau brachte erste Wasserprobleme mit sich. So wurde zwischen 1691 und 1697 der Obere Dickenberger Wasserstollen mit einer Länge von ca. 2,2 km angelegt (Abbildung 18), um überhaupt Abbau betreiben zu können. Der Bau führte zu betrieblichen Verbesserungen, die vom reinen Winterbetrieb zum ganzjährigen Kohleabbau führten. Die Auffahrung dieses Wasserstollens bewirkte eine erhebliche Steigerung der Erträge.

Nach Auffinden des Flözes Buchholz im Jahre 1736 wurde der Steinkohlenabbau auf dem Dickenberg an dessen Fundstelle verlagert und mit dem Osninger Stollen ein Stollenbetrieb eingeführt. Als dieses Flöz erschöpft war, konzentrierte sich ab 1740 der Abbau auf das Flöz Glücksburg. Der Abbau der Flöze war allzeit von starken Wasserzuflüssen beeinträchtigt. Bis zur Übernahme des gesamten Ibbenbürener Bergbaus durch Preußen lag der Kohleabbau in der Hand einzelner Privatunternehmer. Sie hatten von den Grafschaften die Abbaurechte gepachtet.

In der Folgezeit entwickelten sich die Gruben Dickenberg, Buchholz, Schafberg und Glücksburg (Abbildung 18). Der Abbau erfolgte im Stollenbau, für den zahlreiche Schächte zur Grubenbewetterung niedergebracht wurden. Die Grube Dickenberg legte mit Beendigung des Abbaus im Oberstollen 1771 den Dickenberger Tiefen Stollen (Endlänge: ca. 6,5 km) an. Die dort gefassten bzw. gelösten Wässer gelangten über den sog. Stollenbach bei Gravenhorst in die Ibbenbürener Aa. Zeitweise diente der Abfluss auch als Aufschlagwasser für ein Hüttenwerk.

In den Jahren 1841 bis 1843 wurde der Beustschacht (im Beustschacht Feld, Abbildung 18) bis zum Dickenberger Stollen abgeteuft. 1858 erreicht der Beustschacht nach dem Weiter-teufen den bis hierhin reichenden Tieferen Dickenberger Stollen.

Im Jahr 1851 wurde im Ostfeld mit dem von-der-Heydt-Schacht, südlich vom Beustschacht, begonnen (Abbildung 18), um die zu dieser Zeit stark gesunkene Kohleförderung durch die Erschließung neuer Abbaufelder wieder zu steigern. Die Abteufarbeiten wurden durch Wasserzuflüsse öfters unterbrochen. Zeitweise war der Wasserandrang so groß, dass der Schacht volllief. Die eingesetzten Pumpen konnten die Wässer nicht beherrschen; erst eine Hochdruck-Wasserhaltungsmaschine brachte 1856 den gewünschten Erfolg. 1857 begann die regelmäßige Förderung. Nach Errichtung der von-Oeynhausen-Schächte wurde der von-der-Heydt-Schacht 1885 stillgelegt. Der Bau der von-Oeynhausen-Schachtanlage begann 1860. Auch hier wurden die Abteufarbeiten von ständigen Wassereinbrüchen begleitet. 1870 wurde aufgrund der enormen Wasserprobleme beschlossen, den Schacht von Oeynhausen 1 lediglich zu Wasserhaltungszwecken heranzuziehen und einen zweiten Förderschacht zu teufen. 1871 wurden im von-Oeynhausen-Schacht 1 mehrere

Pumpen mit einer Leistung von 8,9 m³/min installiert. Ab 1885 gelangten die gehobenen Grubenwässer des Ostfeldes über den Förderstollen und Tieferen Dickenberger Stollen in die Ibbenbürener Aa.

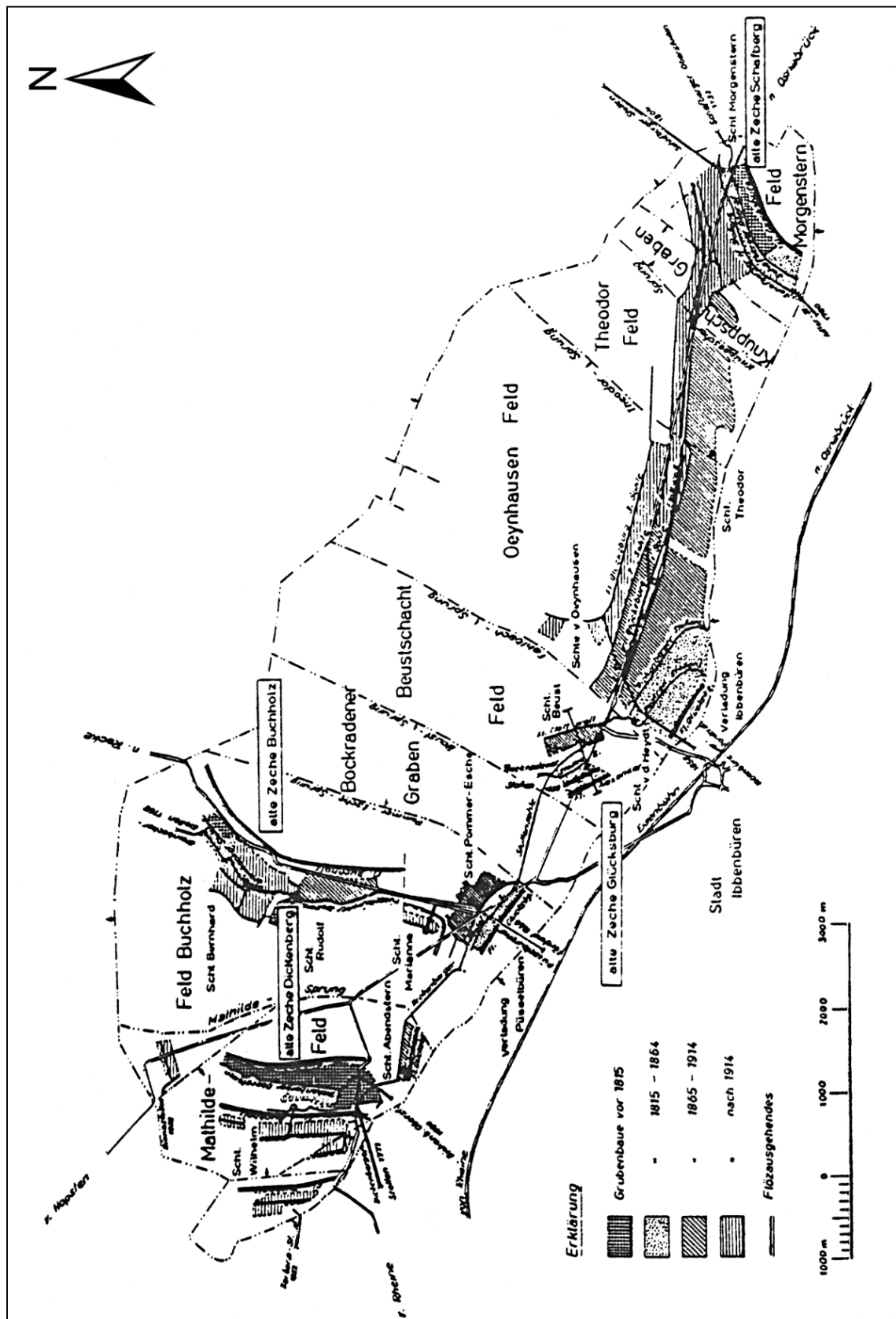


Abbildung 18: Entwicklung der ersten Ibbenbürener Steinkohlengruben (nach DOMALSKI 1988)

Bis zu dieser Zeit belief sich die Wasserhebung am von-Oeynhausens-Schacht auf 4 m³/min und im Buchholzer Revier auf zwischen 2 und 3 m³/min. Da der Tiefe Dickenberger Stollen für Sumpfungszwecke ungeeignet war, wurde der Ibbenbürener Förderstollen zur Wasserhaltung ausgebaut. Doch vor der Einleitung in die Ibbenbürener Aa mussten die eisenhaltigen, sauren Grubenwässer durch die neu errichtete Püsselbürener Kläranlage (Kalkung, Lüftung) gereinigt werden. Der anfallende Eisenocker wurde z. T. an Farbproduzenten verkauft.

Bereits 1855 wurden alle seit dem 17. Jahrhundert am Ausgehenden der Flöze Buchholz, Glücksburg und Dickenberg bauenden Gruben auf dem Schafberg und Dickenberg zum Steinkohlenbergwerk Ibbenbüren zusammengefasst. Mit der Übernahme der Ibbenbürener Bergwerke durch die Preußische Bergwerks- und Hütten-AG (PREUSSAG AG) am 01.11.1924 begann die Umstrukturierung des Kohleabbaus. Da durch Tiefbohrungen reiche Kohlenvorräte festgestellt worden waren, ging der nun folgende Abbau in die Tiefe. Im Ostfeld wurden die von-Oeynhausens-Schächte bis zur 3. Tiefbausohle geteuft und ausreichende Pumpkapazitäten (36 m³/min) geschaffen. Der Theodor-Schacht wurde bis zur 2. Tiefbausohle weiter geteuft. 1933 wurde mit den Abbau-tätigkeiten im Flöz Reden und 1943 im Flöz Theodor im Ostfeld begonnen, die bis 1964 bzw. 1965 andauerten (HÄDICKE 1972).

Während des 2. Weltkrieges wurde die Arbeit des Ibbenbürener Bergbaus durch zahlreiche Fliegerangriffe gestört und zeitweise unterbrochen. Die Förderung erreichte 1943 ihr Maximum mit 1,34 Mio. t/a. Nach dem Krieg liefen die bergbaulichen Arbeiten zunächst nur schleppend weiter. Nach der Währungsreform 1948 begann in Westdeutschland der wirtschaftliche Wiederaufbau, der sich auch im Ibbenbürener Bergbau vollzog. Es begannen im Ostfeld intensive Ausrichtungsarbeiten. Unter anderem wurde der von-Oeynhausens-Schacht 3 bis 1962 auf eine Endtiefe von -672 m NHN weiter geteuft. 1956 wurde mit Teufarbeiten für den Nordschacht begonnen. 1960 waren -660 m NHN (unter Flöz 2a) erreicht. Der Theodor-Schacht wurde bis 1963 auf eine Tiefe von -445 m NHN gebracht.

Der Bockradener Schacht wurde von 1962 bis 1965 niedergebracht. Enorme Wasserzuflüsse (max. 6 m³/min) behinderten die Arbeiten. Die gleichzeitigen Auswirkungen der Kohlenkrise bewirkten, dass der Schacht nur als Wetterschacht für das Ostfeld bis zum Niveau Flöz Glücksburg abgeteuft wurde. Die starken Zuflüsse im Schacht wurden für eine Trinkwassergewinnungsanlage genutzt.

Anfang der 70er Jahre stellte sich für die PREUSSAG AG die Frage nach dem Fortbestehen des Ibbenbürener Steinkohlenbergbaus überhaupt. So wurde aus wirtschaftlichen Erwägungen und auch aufgrund der schwierigen tektonischen Verhältnisse beschlossen, das Westfeld bis zum 30.6.1979 stillzulegen. Fortan sollte nur noch der Abbau im Ostfeld betrieben werden. Es wurde bis dahin überwiegend das Flöz 2 im Ostfeld (1964-1977) abgebaut. Ab 1974/1975 begann die Förderung im Ostfeld im Flöz 53 und 54 (HÄDICKE 1972).

Nach der Stilllegung des Westfeldes begann dieser Grubenbereich vollzulaufen. Am 28.12.1982 erreichten die Grubenwässer das Niveau der Dickenberger Stollensohle (Kapitel 2.3.3). Seitdem läuft es über den Dickenberger Stollen ab. Diese Maßnahme hatte weitreichende Folgen für die Hydrogeologie und Hydrochemie im Bereich des Westfeldes und seines Vorlandes.

Das bereits 1979 abgeworfene Westfeld ist zwischenzeitlich vollständig geflutet. Das Westfeld und das Ostfeld waren lediglich über 2 Strecken, den Querschlag 3. Sohle und die Wetterstrecke im Flöz Glücksburg, miteinander verbunden (KUNZ et al. 2014). Beide Verbindungsstrecken wurden im Rahmen der Stilllegung des Westfeldes mit Hochdruckwasserdämmen verschlossen.

Die RAG Anthrazit Ibbenbüren GmbH plant bis Ende des Jahres 2018 im Beustfeld in einer Teufe von ca. 1.100 m bis 1.200 m weiter Steinkohle zu gewinnen. Das Beustfeld kann als eigenständiger tektonischer Block betrachtet werden, der durch den Bockradener Sprung im Westen sowie dem Fahlbach-Sprung im Osten begrenzt wird. Der Gewinnungsbetrieb umfasst mehrere Bauhöhen der Flöze 53, 54 und 59. Innerhalb des Einwirkungsbereiches der Bauflächen der Flözgruppe 53/59 befindet sich der Bockradener Schacht, der als einer der beiden Abwetterschächte des Bergwerks betrieben wird. Dieser Schacht verbindet die Tagesoberfläche mit dem Grubengebäude der 3. Sohle in einer Teufe von 270 m. Insgesamt weist der Schacht eine Teufe von 391 m auf. Der Schachtabschnitt unterhalb der 3. Sohle ist abgeworfen und mit Wasser erfüllt (KUNZ et al. 2014).

2.5.2. Altbergbau und aktuelle Baufelder des Steinkohlenbergbaus

■ STEINKOHLENABBAUE AB CA. 1800 BIS 1979 IM OBEREN LAGERSTÄTTENABSCHNITT

Im 1979 stillgelegten Westfeld mit dem Bockradener Graben (Abbildung 19) wurde hauptsächlich das Flöz Glücksburg, Flöz Buchholz (Flottwell Hauptflöz), Flöz 2 und Flöz Dickenberg abgebaut, wie in Abbildung 20 zu erkennen ist. Im Ostfeld wurde bis 1976 Steinkohle aus dem Flöz Glücksburg, Flöz Reden, Flöz 2, Flöz Bentingsbank, dem Flottwell Hauptflöz, Flöz Theodor und dem Flottwell Nebenflöz (Röschenflöz) gewonnen. Die Abbaueiträume für die in Abbildung 20 dargestellten Flöze bis 1979, sowie deren Abbautiefen (Westfeld bis -506 m NN, Ostfeld bis -670 m NN) und Mächtigkeiten sind in Tabelle 2 angegeben. Zusätzliche Angaben zu Abbaueiträumen bis 1979 sind in der Chronik des Titelblatt 1 (Blatt 1) des Bergmännischen Risswerks des BW Ibbenbüren (HÄDICKE 1972) zu finden, welche ebenfalls in Tabelle 2 mit aufgelistet sind.



Abbildung 19: Berechtsame, Großtektonik und Baufelder des Bergwerks Ibbenbüren (KUNZ et al. 2014)



Legende

- Bergwerksgrenze
- Prognostizierter Einwirkungsbereich
- +1000 m Zone

Tektonik (Niveau Flöz Glücksburg, Westfal C)

- Abschiebung
- Randverwerfung
- Randüberschiebung
- Blatt

Abbaue bis 1979 (geordnet nach NN-Höhe)

- Flöz Franz (1878 - 1886)
- Flotwell Hauptflöz/Flöz Buchholz (1879 - 1965)
- Flotwell Nebenflöz (1897 - 1963)
- Flöz Alexander (1838 - 1923)
- Flöz Dickenberg (<1800 - 1923)
- Flöz Glücksburg (1889 - 1978)
- Flöz Beningsbank (1928 - 1962)
- Flöz Reden (1942 - 1964)
- Flöz Theodor (1942 - 1965)
- Flöz 1 (1964)
- Flöz 2 (1964 - 1976)

Abbaue
© RAG AG, 2015
© Drozdzewski, 1985
Grenzen
© Bezirksregierung Arnsberg, 2015
TK100
© Geobasis NRW, 2012

0 1 2 4
Kilometer

Untersuchungsgebiet:

Bergwerk Ibbenbüren

Titel:

Früher gebaute Flöze (bis 1979) im oberen Lagerstättenabschnitt des Ost- und Westfeldes

Analyse von Senkungserscheinungen außerhalb prognostizierter Einwirkungsbereiche aktiver und in jüngerer Zeit stillgelegter Steinkohlenbergwerke der RAG AG
Im Auftrag der Bezirksregierung Arnsberg, Abteilung Bergbau und Energie in NRW

Bearbeitung: TU Clausthal
Datum: 04.02.2016
Abbildung: 20

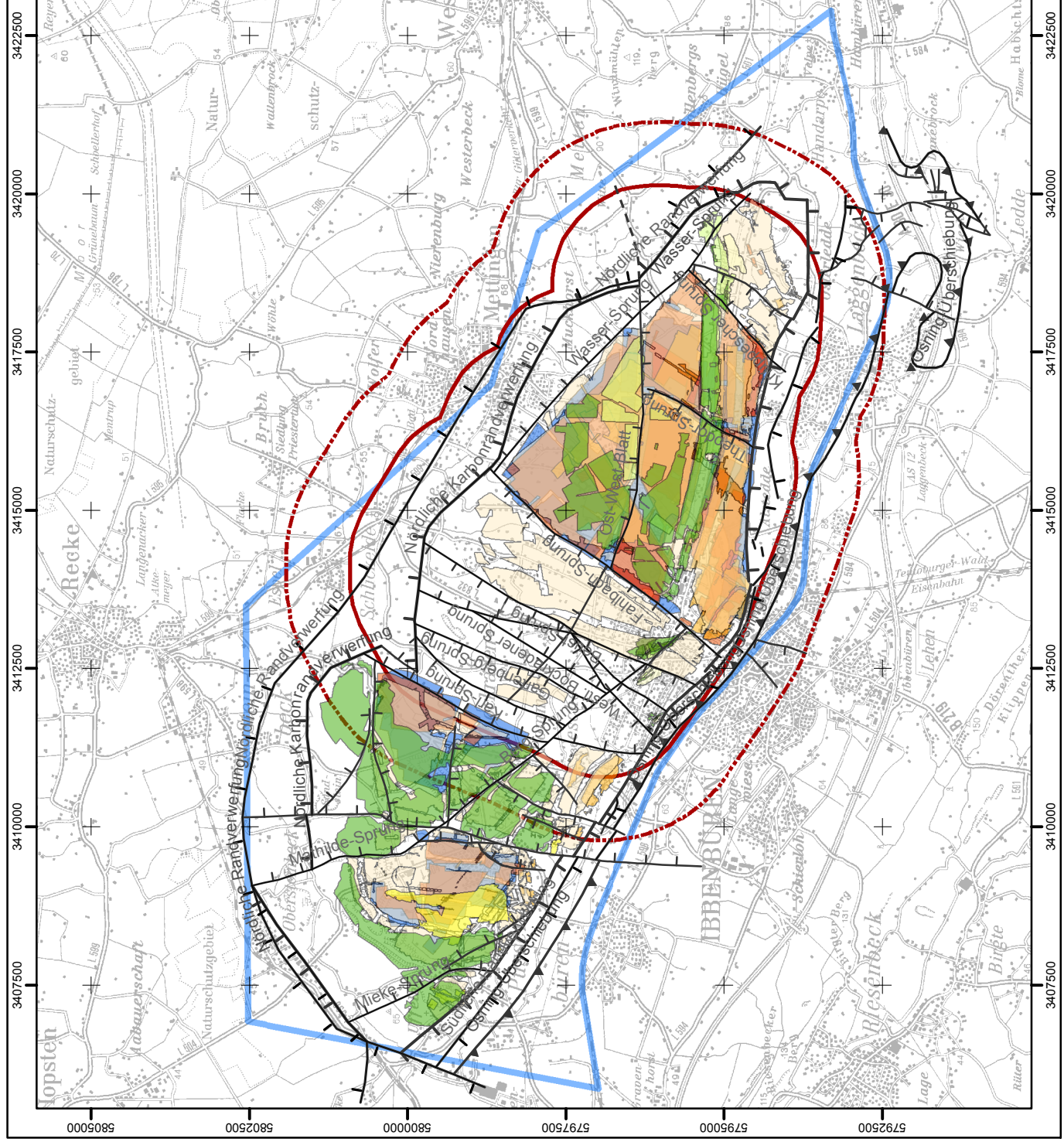


Tabelle 2: Abbaudaten der bis 1979 gebauten Flöze im oberen Lagerstättenabschnitt des Ost- und Westfeldes (© RAG AG)

Flöze	Abbauzeitraum der Flöze in Abbildung 20	Abbauzeiträume nach HÄDICKE (1972)	Abbautiefe [m NN]	Mächtigkeit [m]
Franz	1878 – 1866		[+111]	0,40 – 0,50
Flottwell Hauptflöz (Ostf.) /Buchholz (Westf.)	1879 – 1965	Bis 1970 (Westf.)	[+130,9] – [-124,4]	1,35 – 1,45
Flottwell Nebenflöz	1897 – 1963		[+163] – [-45]	0,60 – 0,70
Alexander	1838 – 1923		[+111] – [+71]	0,40 – 0,55
Dickenberg	<1800 – 1923		[+125,9] – [-120]	0,45 – 0,60
Glücksburg	1889 – 1978	Ab 1975 (Bockr. G.)	[+55] – [-450]	1,15 – 1,30
Bentingsbank	1928 – 1962		[+107] – [-302]	0,80 – 0,90
Reden	1942 – 1964	1933 - 1964 (Ostf.) 1967 - 1975 (Westf.)	[-27] – [-458]	0,75 – 0,95
Theodor	1942 – 1965	Ab 1943 (Ostf.)	[-52] – [-440]	0,45 – 0,55
Flöz 1	1964		[-250]	0,55 – 0,80
Flöz 2	1964 – 1976	1964 – 1977 (Ostf.) 1970 – 1979 (Westf.)	[-240] – [-671]	1,20 – 1,40

■ STEINKOHLENABBAUE VON 1973 BIS HEUTE IM TIEFEREN LAGERSTÄTTENABSCHNITT

Ab 1972/1973 begann der Steinkohlenabbau in dem tieferen Lagerstättenabschnitt des Ostfeldes, zunächst nur im südlichen Bereich in den Flözen 45 und 53, und ab 1976 im Flöz 54. Das Ostfeld ist untergliedert in 7 Baufelder, d. h. von Nordwest nach Südost betrachtet in das Beustfeld, das Westliche Nordfeld, das Westliche Mittelfeld, das Östliche Nordfeld und Östliche & Südöstliche Mittelfeld und das Südfeld (Abbildung 21). Die Begrenzung der aktuellen Baufelder ergibt sich aufgrund der tektonischen Verhältnisse im tieferen Lagerstättenabschnitt. In Abbildung 21 ist die Tektonik im Flöz 54 mit dargestellt. Das Südfeld ist das ältere Baufeld, in dem bis 1990 Kohle aus dem Flöz 54 gefördert wurde (grüne Bauhöhen in Abbildung 21). Während das Westliche Nordfeld und das Östliche und Südöstliche Mittelfeld seit 1976/1977 bis heute aktiv sind, fanden im Westlichen Mittelfeld zwischen 1987 und 2012 keine Abbaue statt (Tabelle 3). Auch im Östlichen Nordfeld erfolgte zeitweise kein Abbau. Im Westlichen Mittelfeld und Östlichen Nordfeld wird derzeit keine Kohle abgebaut. Das aktuellste Abbaufeld ist das Beustfeld, dessen Abbau im RBP 2009-2018 genehmigt wurde und aus dem seit Januar 2012 Kohle gefördert wird.

Tabelle 3: Übersicht der in den Baufeldern des tieferen Lagerstättenabschnitts abgebauten Flöze ab 1972; fett blau markiert sind die im Gültigkeitszeitraum des RBP (1.1.2009 bis 1.2.2015) abgebauten Flöze (© RAG AG)

Baufeld von NW nach SE	Abgebaute Flöze im Ostfeld	Abbauzeitraum
Beustfeld	54	15.1.2012 – 1.4.2015
Westliches Nordfeld	40 , 43, 48, 51 , 53, 54, 59, 65/68, 69, 74	1.10.1977 – 1.7.2015
Westliches Mittelfeld	53, 54 48	1.9.1976 – 1.8.1987 1.6.2012 – 1.4.2014
Östliches Nordfeld	48, 52, 53, 54, 59, 69 43, 74	1.7.1977 – 16.3.2001 1.9.2005 – 1.8.2007
Östliches und Südöstliches Mittelfeld	43, 45 , 48, 52, 53, 54, 59, 65/68, 69, 74	1.11.1976 – 1.8.2015
Südfeld	45, 53, 54, 59	1.1.1972 – 10.8.1990



Legende

- Bergwerksgrenze
- Baufelder des Ostfeldes
- Prognostizierter Einwirkungsbereich +1000m Zone

Tektonik (Niveau Flöz 54)

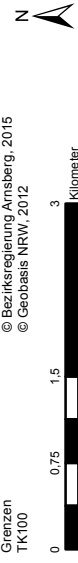
- Blatt
- Abschiebung
- Überschiebung

Abbaue der Baufelder

- Südfeld (1972 - 1990)
- Östliches und Südöstliches Mittelfeld (1976 - 2015)
- Östliches Nordfeld (1977 - 2007)
- Westliches Nordfeld (1977 - 2015)
- Westliches Mittelfeld (1976 - 2014)
- Beustfeld (2012 - 2015)

Abbaue, Tektonik, Baufelder
Grenzen
TK100

© RAG AG, 2015
© Bezirksregierung Arnsberg, 2015
© Geobasis NRW, 2012



Untersuchungsgebiet:

Bergwerk Ibbenbüren

Titel:

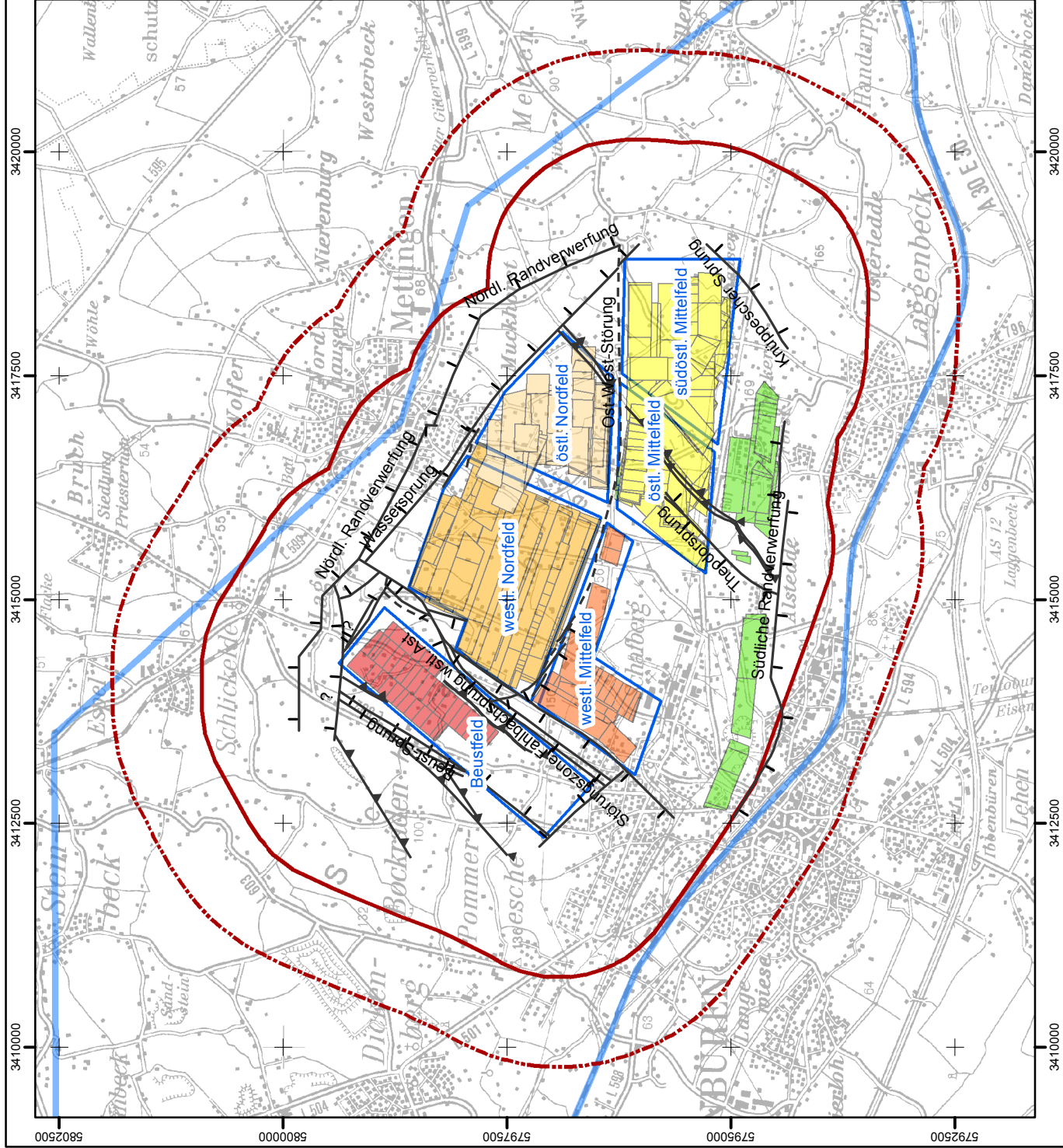
Baufelder des Ostfeldes und deren Abbaue 1973 - 2015

Analyse von Senkungserscheinungen außerhalb prognostizierter Einwirkungsbereiche aktiv und in jüngerer Zeit stillgelegter Steinkohlenbergwerke der RAG AG im Auftrag der Bezirksregierung Arnsberg, Abteilung Bergbau und Energie in NRW

Bearbeitung: TU Clausthal

Datum: 04.02.2016

Abbildung: 21





Legende

- Bergwerksgrenze
- Baufelder des Ostfeldes
- Prognostizierter Einwirkungsbereich +1000m Zone

Tektonik (Niveau Flöz 54)

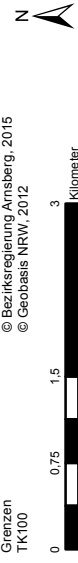
- Blatt
- Abschiebung
- Überschiebung

Abbaue des RBP 2009-2018 des BW Ibbenbüren

- Abbaubeginn 1.1.2009 - 1.2.2015
- Abbaubeginn in 2008
- Abbaubeginn in 2007

Abbaue, Tektonik, Baufelder
Grenzen
TK100

© RAG AG, 2015
© Bezirksregierung Arnsberg, 2015
© Geobasis NRW, 2012



Untersuchungsgebiet:

Bergwerk Ibbenbüren

Titel:

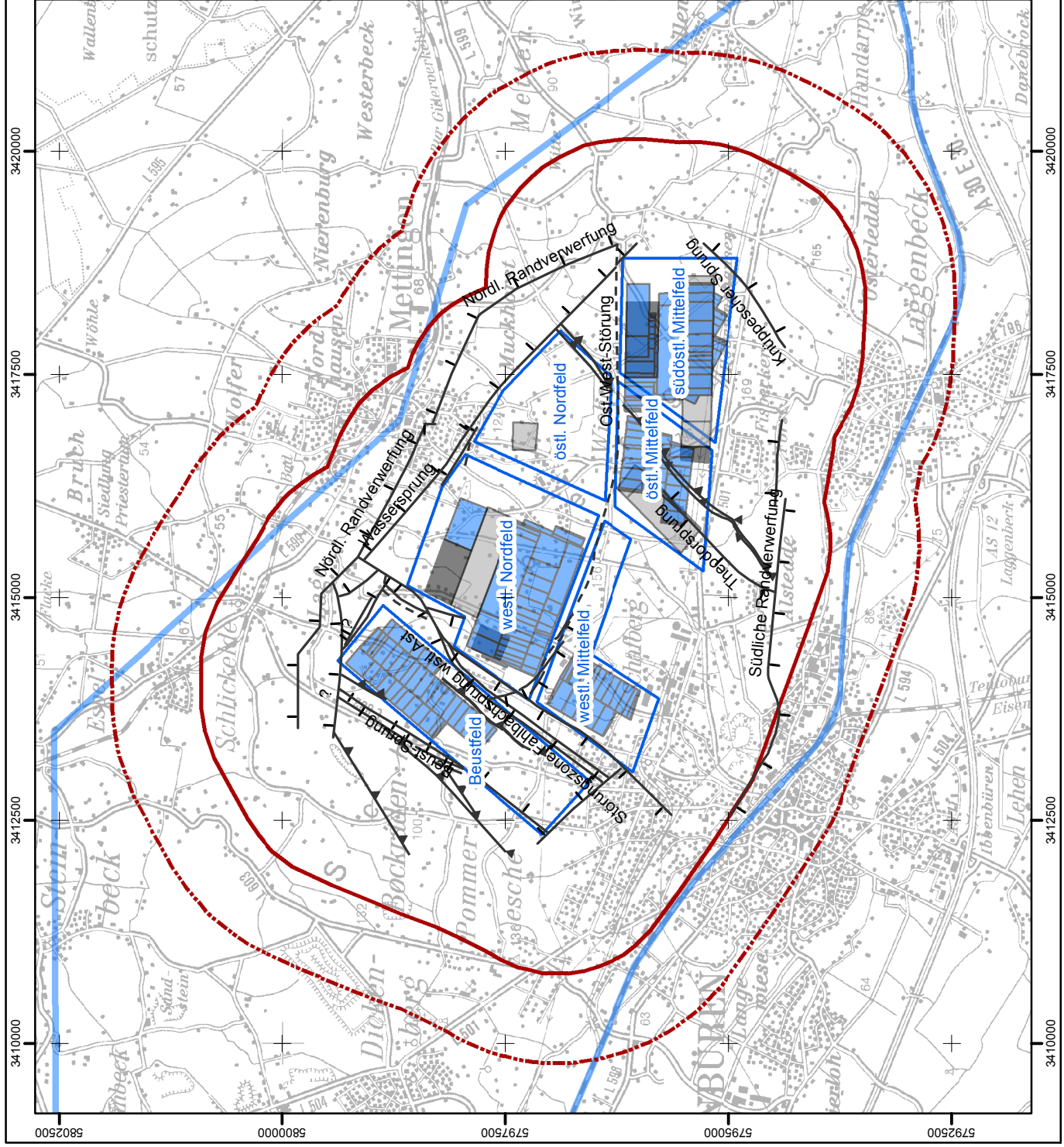
**Abbaue des BW Ibbenbüren des RBP 2009-2018
mit Abbaubeginn 1.1.2009 bis 1.2.2015**

Analyse von Senkungserscheinungen außerhalb prognostizierter Einwirkungsbereiche aktiv und in jüngerer Zeit stillgelegter Steinkohlenbergwerke der RAG AG
Im Auftrag der Bezirksregierung Arnsberg, Abteilung Bergbau und Energie in NRW

Bearbeitung: TU Clausthal

Datum: 04.02.2016

Abbildung: **23**



■ TAGESÖFFNUNGEN

Durch den intensiven Steinkohlenbergbau in der Ibbenbürener Karbonscholle (Kapitel 2.5.1) sowie den intensiven Erzbergbau (Kapitel 2.5.4) und den Abbau von Sanden und Kiesen (Kapitel 2.5.5) gibt es eine Vielzahl von bekannten Tagesöffnungen innerhalb der Berechtsame des BW Ibbenbüren (Tabelle 4). Mehr als 99% der bekannten Tagesöffnungen sind stillgelegte Schächte, Stollen und andere Grubenbaue, die 77 unterschiedlichen Bergwerken zuzuordnen sind (ca. 41% BW Ibbenbüren) und sich hauptsächlich im Bereich des bekannten tages- und oberflächennahen Bergbaus befinden (Abbildung 24). Zu 52 Tagesöffnungen liegen Informationen über deren Sicherungszustand aus der SATÖB-Datenbank der Bezirksregierung Arnsberg vor (Tabelle 4). Die laut SATÖB-Datenbank „nach bisherigen Kenntnissen möglicherweise nicht ausreichend gesicherten Tagesöffnungen“, wie z. B. der ehemalige Schacht Morgenstern und Beustschacht des BW Ibbenbüren, sind in Abbildung 24 mit gelben Dreiecken dargestellt. Die meisten ungeprüften Schächte befinden sich im Bereich von Ibbenbüren-Laggenbeck und gehören zu den ehemaligen Erzbergwerken Perm und Hector (Kapitel 2.5.4).

Die aktuell noch in Betrieb befindlichen Schächte sind zum einen die Materialförder- und Hauptförderschächte „von Oeynhausens I-III“ auf dem Zechengelände des BW Ibbenbüren am Schafberg, zum anderen der Schacht Theodor (Hauptwetterschacht), der Nordschacht (Hauptseilfahrt- und Materialschacht) und Bockradener Schacht (Wetterschacht). Wie bereits in Kapitel 2.3.3 beschrieben, dient der Dickenberger Stollen dem Abfluss der Grubenwässer aus dem Westfeld. Dessen Mundloch befindet sich westlich des Ortsteil Dickenberg der Stadt Ibbenbüren (Abbildung 24).

Tabelle 4: Anzahl der bekannten Tagesöffnungen im Untersuchungsgebiet und zusätzliche Angaben zum Sicherungszustand einiger Tagesöffnungen (© Bezirksregierung Arnsberg)

Art der Tagesöffnung	Anzahl (stillgelegt + in Betrieb)	SATÖB-Informationen		
		ggf. unzureichend gesichert	Ausreichend gesichert	Nicht geprüft
Seigerer Schacht	300+6	13	2	33
Tonnlägiger Schacht	30		1	1
Gebrochener Schacht	3	1	-	-
Sonstige Grubenbaue (>=20gon Neigung)	6	1	-	-
Sonstige Grubenbaue (<=20gon Neigung)	15	-	-	-
Stollen	340+1	-	-	-
Nicht ermittelt bzw. unbekannt	110	-	-	-
Summe	811	15	3	34



Legende

- Bergwerksgrenze
- Prognostizierter Einwirkungsbereich
- +1000 m Zone
- Oberflächen- und tagesnaher Bergbau (generalisiert)

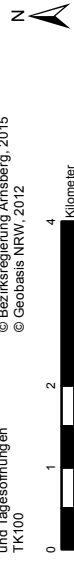
- Unzureichend gesicherte Tagesöffnungen
- Tagesöffnungen in Betrieb

Tagesöffnungen (Art)

- seigerer Schacht
- tonnlägiger Schacht
- gebrochener Schacht
- sonstiger Grubenbau ≥ 20 gon Neigung
- sonstiger Grubenbau < 20 gon Neigung
- Stollen
- nicht ermittelt; unbekannt

Grenzen, generalisiertes Gebiet
und Tagesöffnungen
TK100

© Bezirksregierung Arnsberg, 2015
© Geobasis NRW, 2012



Untersuchungsgebiet:

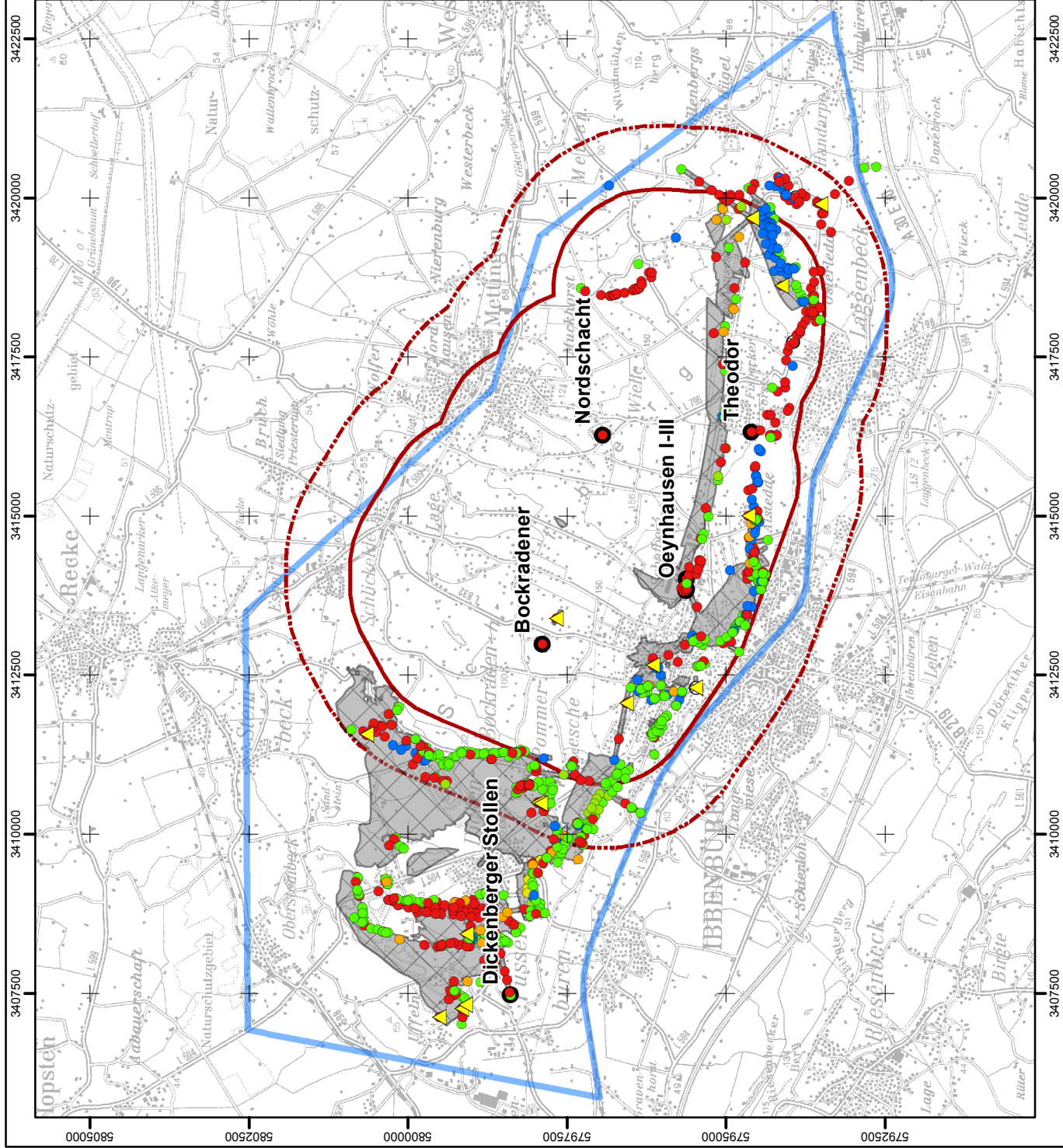
Bergwerk Ibbenbüren

Titel:

Tagesöffnungen (Lage, Zustand) und generalisierter Bereich des oberflächen- und tagesnahen Bergbaus

Analyse von Senkungserscheinungen außerhalb prognostizierter Einwirkungsbereiche aktiver und in jüngerer Zeit stillgelegter Steinkohlengrubenwerke der RAG AG
im Auftrag der Bezirksregierung Arnsberg, Abteilung Bergbau und Energie in NRW

Bearbeitung: TU Clausthal
Datum: 04.02.2016
Abbildung: 24



2.5.3. Benachbarte Steinkohlenbergwerke

Aufgrund der solitären Lage des Ibbenbürener Karbonhorstes fand im Untersuchungsgebiet nur der untertägige Steinkohlenabbau auf dem Bergwerk Ibbenbüren der RAG Anthrazit Ibbenbüren GmbH (vormals PREUSSAG AG) statt.

In der Umrandung der Karbonlagerstätte sind in den Schichten des Zechstein abbauwürdige Vorkommen von Eisen- und Buntmetallerzen vorhanden, die in mehreren Bergwerken oberflächennah über Stollen und Schächte abgebaut wurden. Die Abbaubereiche konzentrieren sich auf den Bereich der südlichen Karbonrandverwerfung und werden eingehend im folgenden Kapitel 2.5.4 beschrieben.

2.5.4. Erzbergbau

Im Ibbenbürener Raum wurde in der Vergangenheit in großem Umfang Bergbau auf Eisenerz betrieben. Hierbei stand Eisenspat als Wertmineral im Vordergrund. Als Gangart werden Schwer-spat sowie sulfidische Zink- und Bleierze erwähnt. In untergeordnetem Umfang sind seinerzeit auch Kupfer- und Schwefelkies sowie Buntkupfererz abgebaut worden.

In der Umrandung des Karbon am Schafberg sind in den Schichten des Zechstein abbauwürdige Vorkommen von Eisen- und Buntmetallerzen entwickelt. Diese Erze sind an die Verbreitung der Zechstein-Kalke gebunden und kommen in der typischen Abfolge einer hydrothermalen Vererzung vor. Die Ursache hierfür ist in dem Aufdringen des Bramscher Massivs in der ausgehenden Oberkreide zu sehen (THIERMANN & KOCH 1987).

Am Rande des Karbonhorstes, wo die Karbonschichten an den tiefreichenden Randverwerfungen steil aufgeschoben wurden (Abbildung 25), fanden die hydrothermalen Erzlösungen gute Aufstiegswege. Die Erzvorkommen des Schafberges konzentrieren sich daher auf die nördliche und südliche Hauptrandverwerfungen (Abbildung 26). Die Teufenerstreckung der Vererzungen ist mit 50 - 100 m relativ gering (THIERMANN & KOCH 1987). Obwohl auch am Westrand des Karbonhorstes Erzablagerungen entwickelt sind, fand der bergmännische Abbau nur im östlichen Bereich statt.



Abbildung 25: Geologischer NE-SW-Schnitt durch das Ostfeld (Schnittlinie in Abbildung 26, nach DROZDZEWSKI 1985)

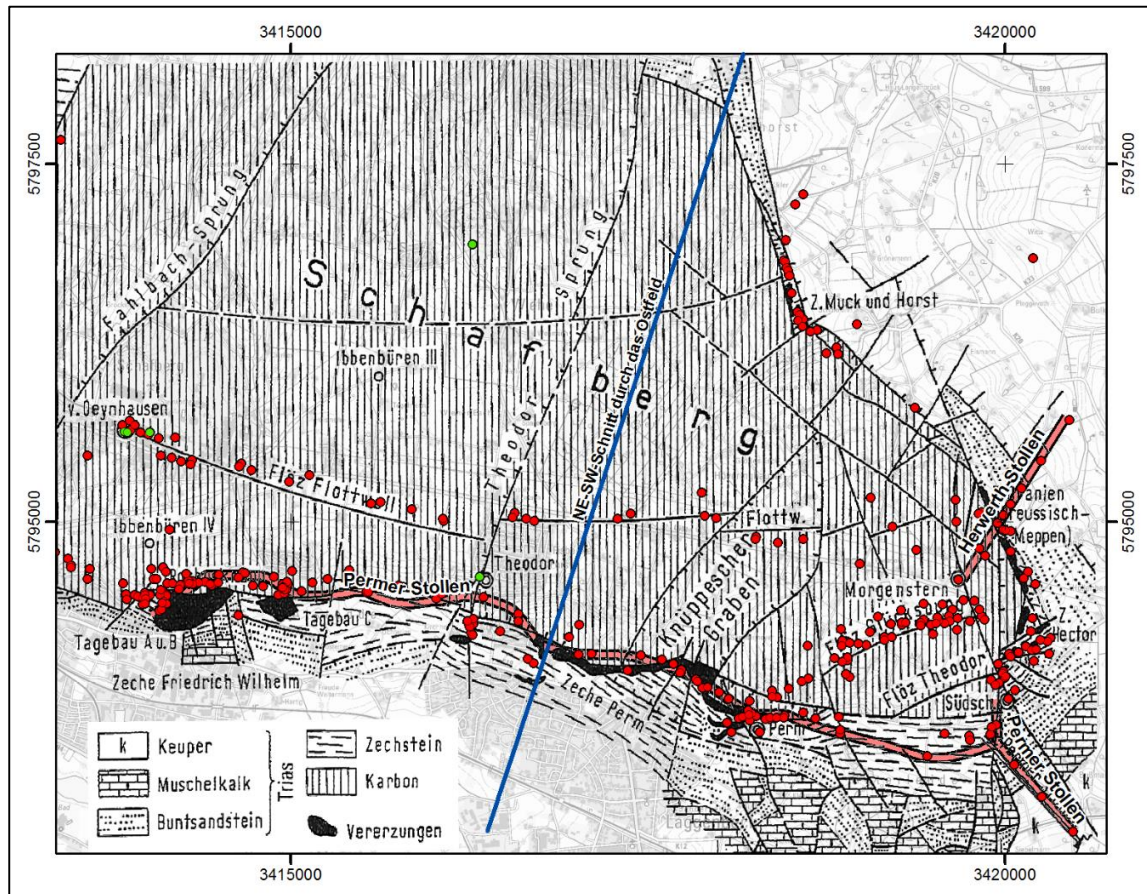


Abbildung 26: Verzerrungen im Ostteil der Ibbenbürener Karbonscholle (stillgelegte Tagesöffnungen: rot, in Betrieb befindliche Tagesöffnungen: grün, Geologische Karte nach THIERMANN & KOCH 1987)

Der Beginn des bergmännischen Abbaus der Vererzungen reicht am Schafberg bis in das 17. Jahrhundert zurück. Die Eisenerze in der Umrandung des Schafberges wurden überwiegend im Tiefbau und nur vereinzelt im Tagebau (südlich der von-Oeynhausens-Schächte, Abbildung 26) gewonnen. In der nahen Gravenhorster Schmelzhütte sowie weiteren kleinen Hüttenbetrieben wurden diese verhüttet. Im ausgehenden 19. Jahrhundert erlebte der Erzbergbau bei Ibbenbüren einen großen Aufschwung, als die Vorkommen vom Georgs-Marien-Bergwerks- und Hüttenverein zur Versorgung der neuen großen Eisenhütte in Oesede bei Osnabrück verwendet wurden. Im Zuge dieses Aufschwungs wurde von 1880 bis 1901 eine Vielzahl kleinerer Bergwerke vom Georgs-Marien-Bergwerks- und Hüttenverein konsolidiert, woraus die „Zeche Perm“ hervorging (RÖHRS 1987, Abbildung 26).

1881 wurde der Permer Stollen aufgefahen, der durch eine 7 km lange Grundstrecke die drei Bergwerke mit ihrer Vielzahl an Tagesöffnungen miteinander verbindet. Bedingt durch die Abnahme der Erzqualität mit zunehmender Teufe sowie durch einen relativ hohen Feuchtigkeitsgehalt des porösen Erzes wurden die am SE-Rand des Schafberges ansässigen Bergwerke Friedrich Wilhelm, Perm und Hector im Jahre 1921 stillgelegt. Nach FRICKE (1954) beträgt allein in der Zeche Friedrich Wilhelm der Vorrat an Eisenerz ca. 1 Mio. t. Mit einer erneuten Aufnahme der Förderung ist jedoch nicht zu rechnen.

Nördlich der Zeche Hector befindet sich die Grube Oranien Preußisch Meppen der „Reissmann & Comp., Kommanditgesellschaft für Bergbau und Hüttenbetrieb Meppen“ (Abbildung 27). Diese lieferte das Eisenerz zunächst an die Gießerei Meppen und später zum Farb

werk Oranien nach Ibbenbüren-Laggenbeck. Auf der Nordseite des Schafberges wurden im Gebiet der Gemeinde Mettingen in der Zeche Muck und Horst ab 1868 Eisen-, Blei und Zinkerze gefördert. Im Jahre 1893 wurden die Gruben Oranien Preußisch Meppen mit der Zeche Muck und Horst zur Gewerkschaft Zeche Oranien konsolidiert (RÖHRS 1987).

Der Erzbergbau wurde in allen Ibbenbürener Erzgruben 1921 eingestellt. Lediglich das Bergwerk Friedrich Wilhelm nahm 1936 kurzzeitig nochmal seine Förderung von Eisenerz im Tagebau C auf. Wegen Erschöpfung der Vorräte wurde der Betrieb 1941 wieder eingestellt (RÖHRS 1987).

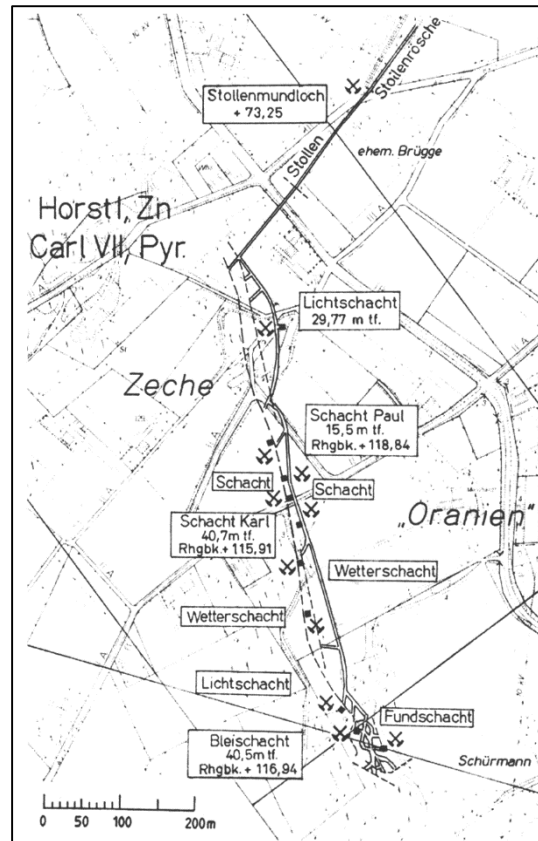


Abbildung 27: Übersichtsplan der Zeche Oranien (GOERKE-MALLET 2000)

2.5.5. Lagerstätten der Sande und Kiese

Im Untersuchungsgebiet werden derzeit die Ton- und Sandsteine des Oberkarbon auf dem Schafberg, die Schmelzwasserkiese im Bockradener Tal und die Sande in den weiten Flachlandbereichen abgebaut (Karte 4). Die früher abgebauten Kalksteine des Zechsteins und die quarziti-schen Sandsteine des Oberen Jura werden heute nicht mehr genutzt (THIERMANN et al. 1980).

Die Verbreitung der abbauwürdigen Rohstoffe im Untersuchungsgebiet ist als Auszug aus dem „Informationssystem Rohstoffkarte von NRW 1:50.000“ in der Karte 3 dargestellt.

■ SANDSTEIN

An der Tagesoberfläche treten Sandsteine in Schichten des Oberkarbon und des Juras auf. Als Werkstein wird jedoch vor allem der Oberkarbon-Sandstein verwendet. Die ehemalige Bedeutung dieser Sandsteine ist an der Vielzahl aufgelassener Steinbrüche auf der Ibbenbürener Karbonscholle zu erkennen. Als Werkstein für den Hausbau besitzt der Oberkarbon-Sandstein auch noch heute eine gewisse Bedeutung.

In mechanisierten Großbetrieben mit mehreren 100.000 t Jahresförderung werden die Oberkarbon-Sandsteine als Packlage für den Straßen- und Wegebau sowie als Uferböschungsmaterial im Wasserbau gewonnen (RÖMHILD 1974, 1976, THIERMANN et al. 1980).

■ KALKSTEIN

Der Abbau der nicht vererzten, zutage austreichenden Zechstein-Kalke ist erstmals in der Bauerschaft Bockraden im Jahr 1556 urkundlich erwähnt. Reste der Kalköfen für die bis in die jüngere Zeit fortgesetzte Branntkalkherstellung finden sich noch heute. Der gebrannte Kalk hatte einen CaO-Gehalt von 70- 80 % (RÖMHILD 1974). Daher wurde er von den 30er Jahren an nur noch als Düngekalk genutzt. Mit dem Aufkommen des Kunstdüngers und den gestiegenen Qualitätsanforderungen hat sich das Kalkbrennen nicht mehr rentiert und wurde auf dem Schafberg im Jahre 1968 endgültig eingestellt.

Wegen der guten Eignung als Splitt-Material wurde der Zechstein-Kalk nach dem Ende der Branntkalkherstellung ab den 60er Jahren in der Zechstein-Scholle von Obersteinbeck abgebaut. Teilweise wurde der Splitt in mehreren tiefen Gruben gewonnen. Der Abbau fand Mitte der 70er Jahre ein Ende, da die mit 10-20° nach Norden einfallenden Zechstein-Schichten unter eine zunehmend mächtige Quartär-Überdeckung abtauchen. Der Abraumanteil war damit zu groß geworden. Die Jahresleistung betrug bis zu 70.000 t (RÖMHILD 1974). Die Gruben sind heute teilweise wieder verfüllt (THIERMANN et al. 1980).

■ TONSTEIN

Die etwas feinsandigen Tonsteine der Ibbenbürener und der Roten Schichten des Oberkarbon sind bedeutende Rohstoffe für die Ziegelherstellung. Die erste Ziegelei wurde bereits im Jahre 1672 erwähnt (CRAMER 1940). Sowohl die Tonsteine als auch die sie einschließenden Sandsteine halten jedoch meist nicht lange in gleicher Mächtigkeit im Streichen aus.

Die letzte produzierende Ziegelei am Kälberberg wurde 2012 geschlossen. Heute werden die roten Tonsteine am Nordhang des Kälberberges und dem Westhang des Martensberges bei Steinbeck abgebaut und an Ziegeleien im Münsterland und im Oldenburger Land verkauft. Dort werden sie mit anderen Materialien wie Löß, Grundmoräne oder mesozoischen Tonen gemischt und dann erst zu Ziegeln gebrannt (THIERMANN et al. 1980).

■ KIES

Im Bockradener Graben treten Vorkommen bis 10 m mächtiger Vorschüttsande und Kames auf, die aus lehmigen Fein- bis Grobsanden mit Kiesen bestehen. Bei den Höfen Gersemann, Lünne- mann und Wersburg bilden sie kleine Hügel, die durch Kiesgruben erschlossen sind. Insbesondere das Vorkommen beim Hof Gersemann wurde Ende der 60er Jahre intensiv abgebaut und als Füllboden für den Autobahnbau am Lotter Kreuz und zwischen Wersen und Tecklenburg verwendet. Die Kiese hingegen wurden dort zur Betonherstellung verwertet (THIERMANN et al. 1980).

■ SAND

An der Oberfläche stellen die fein- bis mittelkörnigen Sande der Niederterrasse das am weitesten verbreitete Gesteinsmaterial dar. Hierzu kommen noch die Dünen, die Flugdecksande und die Schwemmsande der Uferwälle.

Wegen ihrer feinen und gleichmäßigen Körnung sind die Sande als Mörtel- und Betonzuschlag nicht geeignet. Doch lassen sie sich gut bei der Kalksandstein-Herstellung verwenden. Im Übrigen werden sie weithin in vielen kleinen Gruben zu Wegeausbesserungen, Aufschüttungen und dergleichen abgebaut. Die Mächtigkeit der Sande reicht bis zu 10 m; doch wird der Abbau meist durch einen geringen Flurabstand des Grundwassers erschwert (THIERMANN et al. 1980).

3. POTENTIELLE URSACHEN FÜR BODENBEWEGUNGEN IM UNTERSUCHUNGS- RAUM

Der Begriff „Bodenbewegungen“ taucht in vielfältigen fachlichen Zusammenhängen auf und ist somit sehr unterschiedlich definiert. Im Anhang B1 finden sich deshalb einem unseren Verständnis entsprechende Erläuterungen dieses Begriffes sowie im Anhang B2 Erläuterungen der Ursachen von Bodenbewegungen. Grundsätzlich treten Bodenbewegungen als Verformungen eines Ausschnittes der Erdoberfläche oder entlang von linienhaften Strukturen als vornehmliche Horizontal- oder Vertikalverschiebungen auf. Verformungen bilden sich meistens in Richtung der Schwerkraft aus (Senkung, etc.), können aber auch in entgegengesetzter Richtung auftreten (Hebung). Durch die flächenhafte Verformung kommt es zu räumlich unterschiedlichen dreidimensionalen Verlagerungen mit dem „Boden“ verbundener Objekte, die als zweidimensionale Horizontal- und eindimensionale Vertikalbewegungen von Objektpunkten beschrieben werden können. Aus diesen Teilkomponenten einer dreidimensionalen Punktbewegung lassen sich in Relation zu benachbarten Punkten Zerrungen/Pressungen sowie Schief lagen ableiten.

Da die Ursachen für Bodenbewegungen ihre Größe von Ort zu Ort und von Zeitpunkt zu Zeitpunkt ändern, treten Bodenbewegungen (meist mit zeitlicher Verzögerung) mit räumlicher und zeitlicher Veränderung auf. In Abhängigkeit von Art, Ort und Dauer der Ursache sowie dem Übertragungsmedium treten Veränderungen an der Tagesoberfläche klein- oder großräumig und langsam oder schnell auf. Ebenfalls variieren die Beträge dieser Veränderungen.

Bodenbewegungen können geogen - durch die Natur - oder anthropogen - durch den Menschen - hervorgerufen sein. Während die anthropogene Einflussnahme nur im Bereich der exogenen Ursachen stattfinden kann, machen sich natürliche Einflüsse sowohl im endogenen als auch exogenen Bereich bemerkbar (HOLTRUP 1999). Zu den exogenen Ursachen für Bodensenkungen zählen im Allgemeinen die Verminderung und der Wegfall der Stützung im Gebirgskörper (z. B. durch Entzug von Material oder Auslaugung von Gesteinen) sowie die Zunahme der Auflast und Spannungsänderung. Endogene Ursachen können begründet sein in der Tektonik, dem Vulkanismus und der Kontinentalverschiebung (HOLTRUP 1999).

Generell ist zu beachten, dass die Ursachen größtenteils zeitverzögerte Auswirkungen haben, wodurch der direkte kausale Zusammenhang verschleiert und die Ermittlung der Ursache erschwert wird. Ferner ist zu bedenken, dass - lokal unterschiedlich - an der Tagesoberfläche Auswirkungen unterschiedlicher Ursachen zur Wirkung kommen können, sich also überlagern. Eine Ursachenermittlung aus Bodenbewegungsmessungen an der Tagesoberfläche wird dadurch erschwert, bzw. müsste zur Trennung von Ursachenauswirkungen speziell und darauf ausgerichtet angelegt sein.

Entsprechend dem Gesamtziel der gutachterlichen Untersuchungen, d. h. die Ermittlung von bergbaubedingten und nicht bergbaubedingten Höhenänderungen, erfolgte eine a priori Recherche und Ermittlung von potentiellen Ursachen, die im Betrachtungszeitraum wirksam waren und im Bereich des BW Ibbenbüren zu Bodenbewegungen bzw. Höhenänderungen geführt haben könnten.

Basierend auf den zur Verfügung gestellten Daten (Kapitel 4) und einer räumlichen Analyse sind folgende potentielle Ursachen für Bodenbewegungen/Höhenänderungen im Untersuchungsraum nicht auszuschließen:

- gebirgsmechanische Veränderungen der Erdkruste infolge untertägigem Rohstoffabbau, d. h.
 - durch aktiven Bergbau im Untersuchungszeitraum (Abbildung 23) sowie
 - Altbergbau (Abbildung 20, Abbildung 21 und Abbildung 24),
- Rohstoffgewinnung durch übertägige Abgrabung (Kapitel 2.1.5, Karte 4),
- bergbauinduzierte seismische Ereignisse (Kapitel 4.3.5),
- hydrogeologische und hydrologische Veränderungen infolge
 - Grundwasserentzug bei der über- und untertägigen Rohstoffförderung,
 - Grundwassergewinnung,
 - Grubenwassereinstau z. B. in aufgegebenen Grubenbauten und den Nebengesteinen, die zu Hebungen führen würden (Kapitel 2.3.3)
- Tagesbrüche (Karte 4) und Subrosion (Kapitel 2.5.5, Absatz „Kalkstein“),
- Aufbringung von Auflasten in Aufschüttungsgebieten (Deponien, Halden, etc.) (Kapitel 2.1.5, Karte 4),
- Klimaveränderungen (Kapitel 2.3.2).

Grundsätzlich ist ein großflächig überlagernder Einfluss großtektonischer Ursachen nicht auszuschließen. Erfahrungsgemäß sind die dadurch auftretenden Bewegungsraten extrem klein und messtechnisch im Untersuchungsgebiet und über den (geologisch) kleinen Betrachtungszeitraum von etwas mehr als 6 Jahren jedoch kaum signifikant nachweisbar. Geogene seismische Ereignisse (z. B. tektonisch induzierte Erdbeben, Erschütterungen), die ebenfalls Bodenbewegungen verursachen können, sind nicht bekannt.

Informationen zu weiteren möglichen geogenen Ursachen, die zu Bodenbewegungen im Untersuchungsraum führen könnten (z. B. Erosion, Suffosion etc., Anhang B2.2), sind nicht bekannt. Des Weiteren ist kein Fluidbergbau im Untersuchungsgebiet bekannt.

4. DATENGRUNDLAGE

4.1. Bereitstellung von Basis- und Fachdaten

Zur Erstellung des Gutachtens wurden umfangreiche Basis- und Fachdaten (Zusammenstellung in Anhang A1) für den Untersuchungsraum des BW Ibbenbüren bei folgenden Behörden, Firmen und Dienstleistern angefordert und unentgeltlich den Gutachtern (Auftragnehmer und Subauftragnehmer) zu dem vereinbarten Nutzungszweck bereitgestellt:

- Bezirksregierung Arnsberg - Abteilung Bergbau und Energie in NRW, Dezernat 65
- Bezirksregierung Köln, Geobasis NRW (Abteilung 7)
- Geologischer Dienst NRW, Krefeld
- RAG AG, Herne
- RAG Anthrazit Ibbenbüren GmbH
- Kreis Steinfurt
- Stadt Ibbenbüren
- Stadt Mettingen
- Stadt Recke
- Stadt Tecklenburg
- Stadt Westerkappeln
- Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz NRW (LANUV NRW)

Für die weitere Nutzung wurden die Daten aufbereitet, homogenisiert und in das Geoinformationssystem ESRI ArcGIS eingestellt. Als geodätisches Bezugssystem diente das DHDN90 (Gauß-Krüger, 3er Streifen, 3. Meridianstreifen, Bessel) mit den in Tabelle 5 aufgeführten Transformationsparametern.

Tabelle 5: Verwendete Transformationsparameter vom Bezugssystem DHDN90 zum ETRS89

dX [m]	dY [m]	dZ [m]	rX ["]	rY ["]	rZ ["]	ds [ppm]
598,1	73,7	418,2	0,202	0,045	-2,455	6,7

Zusätzlich zu den bereitgestellten Daten wurden folgende Daten über die WMS-Dienste von Geobasis NRW, dem Geologischen Dienst NRW und der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR) für räumliche Analysen und Kartendarstellungen genutzt:

- Digitale Topographische Karten (DGK5, DTK10, DTK25, TK50, DTK100, ALK)
- Digitale Landschaftsmodelle (DLM50)
- Digitale Orthophotos (DOP40)

- Hydrogeologische (Übersichts-) Karten (HK100, HÜK200, HÜK500)
- Rohstoffkarte (RÜK500)
- Bodenkarte (BK50)

Das Ministerium für Klimaschutz, Umwelt, Landwirtschaft, Natur- und Verbraucherschutz (MUNLV) des Landes Nordrhein-Westfalen stellt wasserwirtschaftliche Fachdaten im Web-basierten „Elektronischen wasserwirtschaftlichen Verbundsystem für die Wasserwirtschaftsverwaltung“ (ELWAS-WEB) kostenfrei zur Verfügung. Die Daten im ELWAS-System wurden für den Untersuchungsraum eingesehen und für die weitere Auswertung exportiert (Kapitel 8.1).

Die RAG Deutsche Steinkohle bietet einen webbasierten Bürgerinformationsdienst (BID) mit Informationen über z. B. derzeitige bzw. geplante Abbautätigkeiten der RAG AG in NRW und im Saarland an. Das BID-System wurde bzgl. weiterer relevanter Fachdaten eingesehen und Informationen zu Erschütterungen im Untersuchungsraum exportiert (Kapitel 4.3.5).

Vom Deutschen Wetterdienst (DWD) konnten aus der Online-Datenbank „Wetterdaten und -statistik Express“ (Weste-XL) Niederschlagshöhen der Klimastation Hörstel abgerufen und ausgewertet werden (Kapitel 2.3.2).

4.2. Beschaffung von Radardaten

Die Ermittlung der Höhenänderungen ist laut LEISTUNGSBESCHREIBUNG (2014) vornehmlich mittels aufgezeichneter Radarsatellitendaten und ergänzt durch bereitgestellte terrestrische Daten durchzuführen. Um sowohl eine räumlich wie auch zeitlich vollständige Abdeckung des Untersuchungsraums zu erzielen, mussten Datensätze von zwei verschiedenen Radarsensoren bestellt werden, da kein zeitlich durchgehender Datenstapel eines einzigen Satelliten verfügbar war. Somit wurden folgende Radardaten durch die TU Clausthal beschafft, die im Anhang A2 detailliert aufgelistet sind:

- 68 ENVISAT ASAR Satellitenaufnahmen (18.12.2003 – 7.10.2010, ca. alle 35 Tage, Track 377, Frame 2550, Descendig, Abdeckungsgebiet 100 km x 100 km); Beschaffung über einen Earth Observation Datenantrag bei der ESA (Project-ID: 29485, PI: Dr. Diana Walter, TU Clausthal),
- 54 Radarsat-2 Multi-Look Fine Satellitenaufnahmen (16.01.2011 – 12.02.2015, ca. alle 24 Tage, Multi-Look Fine Mode, Beam MF5F, Descending, Abdeckungsgebiet ca. 50 km x 50 km); Beschaffung über die Firma MDA, Kanada.

Die Radarsat-2 Daten besitzen eine deutlich höhere Bodenauflösung mit etwa 4,2 m x 4,6 m im Vergleich zu den ENVISAT ASAR Daten mit einer räumlichen Auflösung von etwa 23 m x 5 m. Zwischen den beiden Radarstapeln besteht eine zeitliche Lücke von über 3 Monaten (Oktober 2010 – Januar 2011; Abbildung 153 in Anhang A2). Ursache dafür war zum einen die am 22.10.2010 begonnene Orbitänderung des ENVISAT-Satelliten, so dass ab diesem Datum weltweit keine Aufnahmen für interferometrische Analysen mehr zur Verfügung standen. Zum anderen handelt es sich bei dem Radarsat-2 Satelliten um einen kommerziellen Satelliten, welcher erst durch eine potentielle Datenkauf-Anfrage bzw. einen Programmier-Auftrag eines Kunden an die Firma MDA letztendlich Daten aufzeichnet. Eine solche Kundenanfrage bestand erst ab Januar

2011. Des Weiteren soll an dieser Stelle bereits darauf hingewiesen werden, dass zwischen dem 12.12.2012 und 29.5.2013 (d. h. über etwa 5 Monate) keine Daten vom Satelliten Radarsat-2 für den Untersuchungsraum aufgezeichnet wurden. Die Gründe hierfür sind unbekannt. Eine Ursache für Datenausfälle sind häufig Kundenkonflikte, bei denen zur etwa gleichen Zeit und am gleichen Tag Daten z. B. in einem benachbarten Gebiet aufgenommen werden sollen.

Detaillierte Informationen zu den Satelliten ENVISAT und Radarsat-2 sind auf den Webseiten der Europäischen Raumfahrtagentur ESA (<http://earth.esa.int/envisat>) und der Kanadischen Raumfahrtagentur CSA (<http://www.asc-csa.gc.ca/eng/satellites/radarsat2/>) zu finden.

Für die radarinterferometrischen Auswertungen wurde ein aktuelles und hochauflösendes Digitales Oberflächenmodell benötigt, welches durch die Bezirksregierung Köln, Geobasis NRW (Abt. 7) in Form von sog. First-Puls-Laser-Rohdaten im ASCII-Format bereitgestellt und vom IGMC in Rasterdaten umgewandelt wurde.

4.3. Datenaufbereitung und Bewertung

4.3.1. Prognostizierte Senkungsbereiche

Für die gutachterliche Bewertung der Senkungserscheinungen außerhalb des prognostizierten Einwirkungsbereiches des Steinkohlenbergwerks Ibbenbüren ist die planfestgestellte 0,0 cm-Linie (prognostizierte Senkungsnulllinie) des „Rahmenbetriebsplans 2009 - 2020 für den untertägigen Steinkohlenabbau“ des Bergwerks Ibbenbüren der RAG Anthrazit Ibbenbüren GmbH (damals DSK Anthrazit Ibbenbüren GmbH) vom 2.12.2008 (Aktenzeichen 61.05.2-2005-12), der bei der Bezirksregierung Arnsberg, Abteilung Bergbau und Energie in NRW eingereicht wurde, ausschlaggebend (Abbildung 28, durchgezogene schwarze Linie). Der prognostizierte Senkungsbereich ist somit begrenzt durch die prognostizierte Senkungsnulllinie (kurz: Nulllinie oder Nullrand). Außerhalb dieser Nulllinie des BW Ibbenbüren sind „keine Senkungen“ in der planfestgestellten Laufzeit des Rahmenbetriebsplans vom 1.1.2009 bis 31.12.2018 zugelassen. Eine Überprüfung der prognostizierten Einwirkungsgrenze und eine Signifikanzabschätzung erfolgt in Kapitel 7.2 bzw. 7.5.

Der „Rahmenbetriebsplan 2009 - 2020 für den untertägigen Steinkohlenabbau“ des BW Ibbenbüren ist für den Zeitraum 1.1.2009 bis 31.12.2018 planfestgestellt. Die Laufzeit dieses Rahmenbetriebsplans wurde in den Jahren 2004/2005 vor dem Hintergrund der damaligen Abbauplanung festgelegt. Da die kohlepolitischen Beschlüsse vom Februar 2007 einen Ausstieg aus der subventionierten Steinkohleförderung vorsahen, jedoch zu diesem Zeitpunkt wesentliche Verfahrensschritte für die Umweltverträglichkeitsprüfung erfolgt waren, wurde mit Blick auf den verbleibenden Zeitrahmen für das Genehmigungsverfahren die Laufzeit des RBP 1.1.2009 - 31.12.2020 beibehalten (Auszug RBL Antrag Nr. 1). Der Planfeststellungsbeschluss wurde dann aber auf den 31.12.2018 befristet.

Der Abbauplan basierte auf dem Stand von 2007. In die Bodenbewegungsvorausberechnung und damit in die Ermittlung des planfestgestellten Einwirkungsbereiches gingen alle geplanten Abbaue des Beust- und Ostfeldes vom 1.5.2008 bis 31.12.2030 ein (Abbildung 28, blaue Flächen). Der anhand der Abbaudaten ermittelte Einwirkungsbereich (Abbildung 28, durchgezogene rote Linie), der im Folgenden als „Einwirkungsbereich aus den geplanten Bauhöhen“ bezeichnet wird, ist nicht überall identisch mit dem planfestgestellten Einwirkungsbereich (Abbildung 28, durchgezogene

schwarze Linie). Insbesondere im „Beustfeld“, d. h. dem westlichen Baufeld, wurde nach Aussage der Bezirksregierung Arnsberg, Abteilung Bergbau und Energie in NRW, zur Ermittlung des planfestgestellten Einwirkungsbereiches die gesamte Fläche des Baufeldes Beustfeld herangezogen, so dass ein vergrößerter Einwirkungsbereich berechnet wurde. Diese Vorgehensweise wurde im Rahmenbetriebsplan damit begründet, dass der untertägige Steinkohlenabbau ein dynamisches System darstellt, bei dem die tatsächliche Ausführung des Abbaus von der ursprünglichen Planung zum Teil abweichen kann. Das galt insbesondere für das Beustfeld, da dieses zum Zeitpunkt der Antragstellung in der tieferen Lagerstätte noch unverritzelt war und somit nur Informationen aus einem Lagerstättenmodell vorlagen.

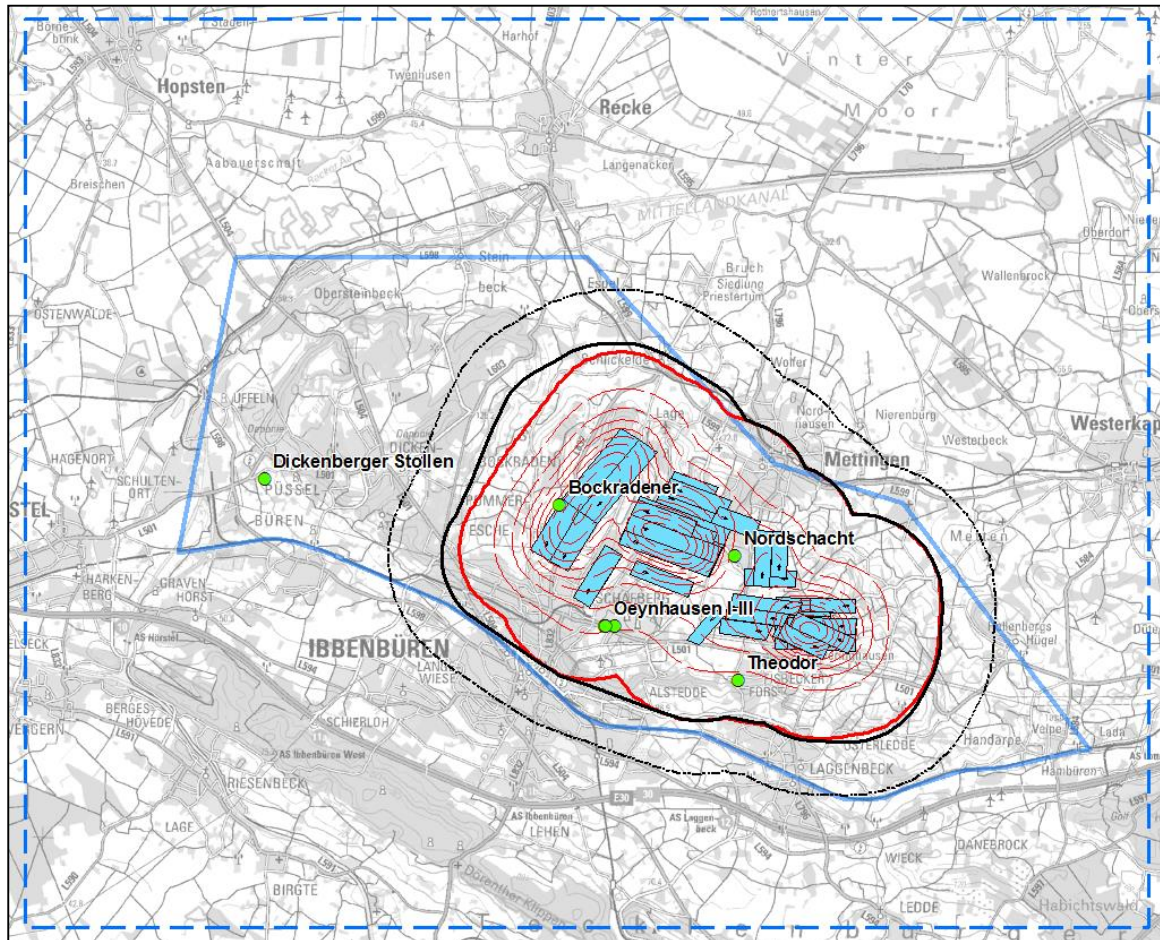


Abbildung 28: Darstellung des im Rahmenbetriebsplan des BW Ibbenbüren (gültig vom 1.1.2009 bis 31.12.2018) planfestgestellten Einwirkungsbereiches (durchgezogene schwarze Linie = Nulllinie), Begrenzung des erweiterten Betrachtungsraumes (gestrichelte schwarze Linie) sowie der anhand der geplanten Bauhöhen 1.5.2008 – 31.12.2030 (blaue Flächen) berechnete Einwirkungsbereich (durchgezogene rote Linie) mit weiteren Senkungslinien (gestrichelte rote Linien) © Bezirksregierung Arnsberg, Abt. Bergbau und Energie in NRW; Hintergrund DTK100 © Geobasis NRW 2012

4.3.2. Abbaudaten

Zur statistischen Bewertung der Signifikanz der prognostizierten bergbaubedingten Senkungsnulllinie wurden die geplanten Abbauhöhen (Soll-Abbaue) des RBP des BW Ibbenbüren vom 2.12.2008 durch die Bezirksregierung Arnsberg, Abteilung Bergbau und Energie in NRW bereitgestellt. Es handelt sich dabei um 55 sog. ABB-Dateien im ASCII-Format, die als Eingangsdaten für das Vorausberechnungsprogramm CadBERG der RAG AG 2007 erstellt worden waren.

Die geplanten Abbaue, die den Berechnungen zu Grunde liegen und in Abbildung 28 dargestellt sind, decken den Abbaue Zeitraum 1.5.2008 bis 31.12.2030 ab. Somit wurden auch Restsenkungen der Abbaue bis 1.1.2009 (Beginn des RBP) mit berücksichtigt. Die Soll-Abbaue wurden für die Voraus- und Signifikanzberechnungen in Kapitel 7.2 bis 7.5. verwendet. Zuvor erfolgte eine sorgfältige Überprüfung der Daten und die Programmierung einer Schnittstelle für den Datenimport in das von der Firma 4GIS entwickelte Vorausberechnungsprogramm.

Für die erforderlichen und in Kapitel 7.6 beschriebenen Nachberechnungen wurden die Abbaugeometrien der im Zeitraum 1.1.1972 bis 1.2.2015 begonnenen Abbaue (Ist-Abbaue) in 142 ABB-Dateien sowie die Baufeldgrenzen von der RAG AG bereitgestellt (Abbildung 21). Bzgl. der abgebauten Mächtigkeiten wurde durch die RAG AG darauf hingewiesen, dass bei einigen Abbauen aus der Vergangenheit teilweise keine gebauten Mächtigkeiten sondern nur die Kohlenmächtigkeiten erfasst wurden. In den entsprechenden ABB-Dateien wurden daher die Kohlenmächtigkeiten um 10% erhöht. Nach Prüfung der Ist-Abbau-Daten erfolgte der Import über die entwickelte Schnittstelle in das verwendete Vorausberechnungsprogramm.

Alle gelieferten ABB-Dateien enthalten Informationen u. a. zu den Abbauständen der Bauhöhen, d. h. deren 3D-Lage und Datum, den gebauten Mächtigkeiten, den Streblängen, der Konvergenzdauer, Übertragungsfaktor etc. Zusätzlich wurden von der RAG AG folgende Modellparameter der Vorausberechnung für das BW Ibbenbüren angegeben:

- der „bergwerksbezogene“ Grenzwinkel $\gamma = 50$ gon und
- der Abbaufaktor $\alpha = 0,9$.

32 der 55 Soll-Abbaudateien (ABB-Dateien), die von der Bezirksregierung Arnsberg bereitgestellt wurden, enthielten Grenzwinkelangaben von 60 gon, was bei den Berechnungen (Kapitel 7.2) berücksichtigt wurde.

Zur Beurteilung des Einflusses von stillgelegten Abbaubereichen im Untersuchungsraum wurden von der RAG AG Abbaudaten der früher gebauten Flöze im oberen Lagerstättenabschnitt des Ost- und Westfeldes bereitgestellt und für die Untersuchungen aufbereitet (Kapitel 2.5.2).

Die Bezirksregierung stellte zusätzlich einen Datensatz mit generalisierten Flächen des bekannten tages- und oberflächennahen Bergbaus im Untersuchungsraum zur Verfügung (Abbildung 24).

4.3.3. Nivellements und Lagemessungen

Für die gutachterlichen Untersuchungen wurden zunächst alle bereitgestellten Höhenmessungen aufbereitet, die im radarinterferometrischen Auswertzeitraum 12/2003 bis 02/2015 mit vermessungstechnischen Methoden erfasst wurden (Anhang A1). Dazu zählen die Leitnivellements der Landesvermessung in NRW (Geobasis NRW) sowie die von der RAG AG bzw. der RAG Anthrazit Ibbenbüren GmbH bereitgestellten Beobachtungslinien und -punkte, die mittels Nivellement oder GPS gemessen wurden. Da die Leitnivellements nur im 4-Jahres-Rhythmus im Herbst z. B. 09/2003 gemessen werden, sind weitere Messungen ab etwa 1999 auch entlang der RAG-Beobachtungslinien aufbereitet und ins GIS-System eingestellt worden. Die aufbereiteten Daten werden zum einen im Kapitel 6.3 für Vergleiche mit den radarinterferometrisch ermittelten Höhenänderungen genutzt, und zum anderen in Kapitel 7.3 und 7.4 zur Ermittlung eines „realen“ Zeitfaktors für die Vorausberechnung der Senkungen und die Parametrisierung des Rechenmodells.

Die von der RAG AG zusätzlich bereitgestellten Längenmessungen (Anhang A1), die zur Beurteilung der Bergschadensrelevanz außerhalb des prognostizierten EW-Bereiches angefordert worden sind, wurden letztendlich nicht aufbereitet, da nur Daten innerhalb des EW-Bereiches im Innenstadtbereich der Stadt Mettingen (Evangelische Kirche und St. Agatha Kirche) und in der Nähe vom Nordschacht vorlagen. Somit waren diese Daten für die Untersuchungen in Kapitel 10 nicht brauchbar. Die GPS-Daten eigneten sich ebenfalls nicht zur Beurteilung der Bergschadensrelevanz in Kapitel 10, da sie meist nur für Einzelpunkte z. B. direkt am Nullrand vorliegen und ihre Genauigkeit mit ± 5 cm für entsprechende Analysen unzureichend ist.

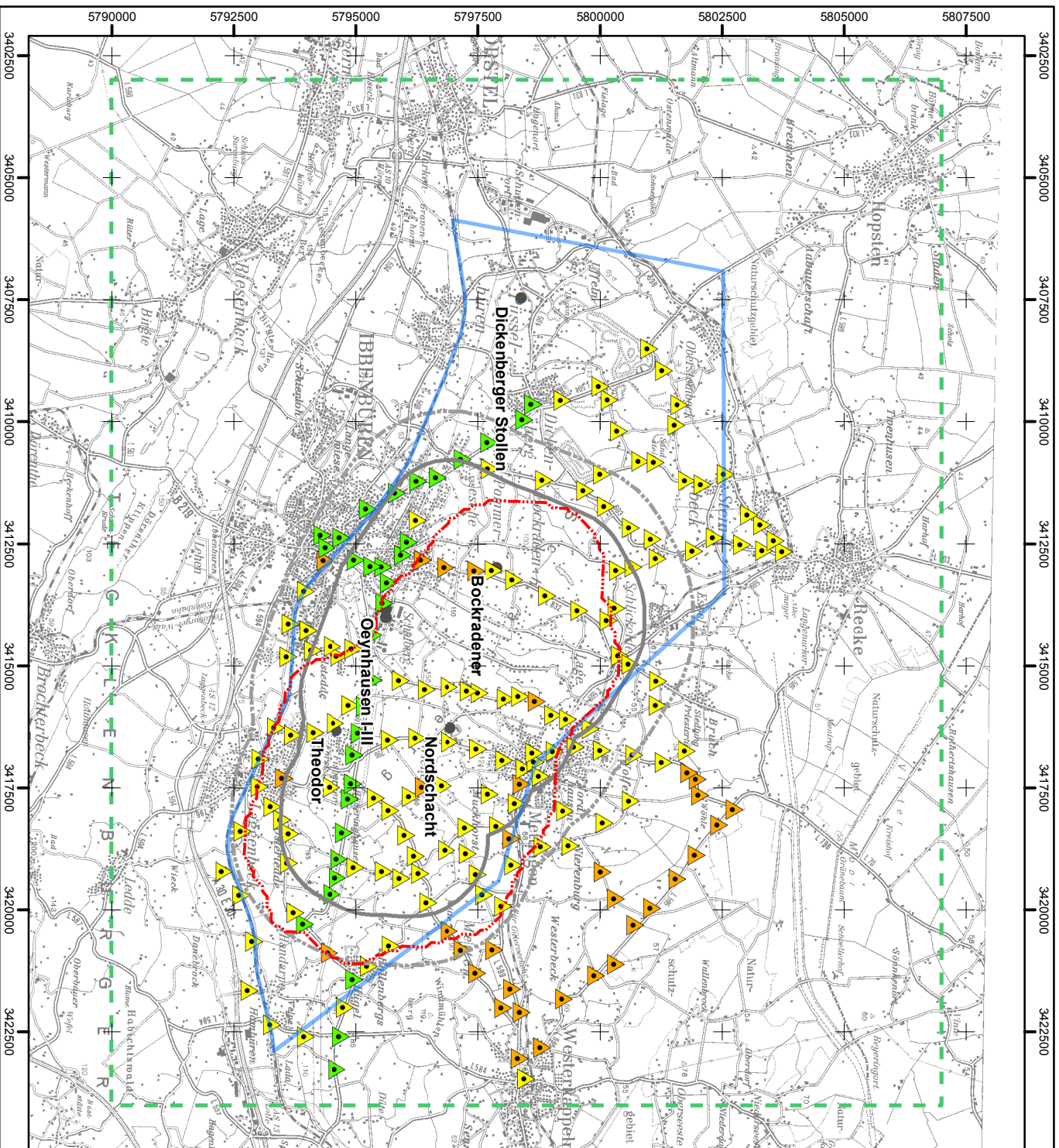
■ LEITNIVELLEMENTS

Die Höhenzeitfolgedatei der Bezirksregierung Köln enthält die Ergebnisse der Leitnivellements (Leitniv), die im mehrjährigen Rhythmus in Nordrhein-Westfalen durchgeführt werden und zur Erhaltung bzw. Erneuerung eines funktionsfähigen Nivellementspunktfeldes in Gebieten dienen, in denen bergbaulich-bedingte Höhenänderungen auftreten (BEZREG 1998). Die einzelnen Netze des Leitnivellements bestehen aus den Nivellementslinien des amtlichen Höhenfestpunktfeldes 1. Ordnung sowie Linien, die aus bergbaubedingten Gründen erforderlich sind (BEZREG 1998).

Das Leitnivellement im Ibbenbürener Revier wurde erstmals 1991 vom LOBA NRW und LVerMA NRW gemeinsam ausgeführt und im vierjährigen Turnus gemessen (BOJE et al. 2008). Seit 1995 erfolgen die Messungen jeweils im Herbst (meist September/Oktober). Für die Untersuchungen im Rahmen des Gutachtens wurden Leitnivellements von der Bezirksregierung Köln ab Juni 1949 für das Ibbenbürener Revier zur Verfügung gestellt, wobei das heutige Gesamtnetz 1980 erst zu 75% vorhanden war. Im Untersuchungsraum befinden sich 191 Leitnivellementspunkte, wovon in den Jahren 1999 und 2003 ca. 160 Punkte eingemessen wurden, sowie 190 Punkte in 2007 und 173 Punkte in 2011. Die Anzahl der Messungen pro Leitniv-Punkt zwischen 2003 und 2011 ist in Abbildung 29 zu erkennen. Alle 191 Leitniv-Punkte wurden zwischen 2003 und 2011 mindestens 2mal eingemessen. Für die in Abbildung 29 grün-dargestellten Punkte erfolgte eine zusätzliche, „außerplanmäßige“ Messung im Jahr 2010. Die Ergebnisse des im Herbst 2015 durchgeführten Leitnivellements liegen noch nicht vor.

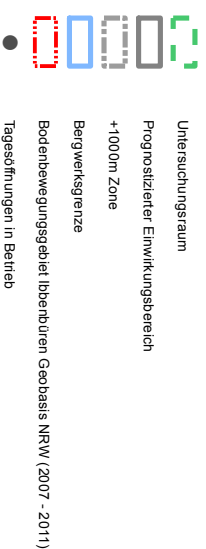
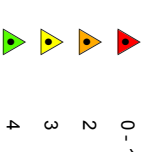
Trotz der geringen räumlichen Abdeckung der Leitniv-Punkte im Untersuchungsgebiet ist der Nutzen der Leitniv-Daten für die Analysen aufgrund der hohen Messgenauigkeit sehr groß. In diesem Gutachten wurden zur Qualitätsbeurteilung die Ergebnisse des Leitnivellements im Zeitraum 2003-2007 und 2007-2010 mit den radarinterferometrisch abgeleiteten Höhenänderungen der ENVISAT-Analysen im Untersuchungsraum verglichen (z. B. Kapitel 6.3).

Das Leitnivellement Ibbenbüren 2007-2011 wurde, wie auch in anderen Gebieten in NRW, von der Landesvermessung NRW zur Ausweisung eines Bodenbewegungsbereiches mit Bewegungsraten größer als ± 3 mm/a genutzt (HEITMANN et al. 2012). Dieser Bereich, der laut der Arbeitsgemeinschaft der Vermessungsverwaltungen (AdV) auch als „Verdachtsgebiet“ bezeichnet wird, ist u. a. in Abbildung 29 dargestellt.



Legende

Anzahl der Leitnivelllementmessungen 2003 - 2011



Tagesöffnungen, EW-Bereiche und Bergwerksgrenze © Bezirksregierung Arnsberg, 2015
Leitnivelllement, Bodenbewegungsgebiet © Geobasis NRW, 2014
TK100 © Geobasis NRW, 2012

0 1,25 2,5 5 Kilometer

Untersuchungsgebiet: Bergwerk Ibbenbüren

Titel: **Lage und Anzahl der Höhermessungen
der Leitnivelllementpunkte zwischen 2003 und 2011**

Analyse von Senkungserscheinungen außerhalb prognostizierter Einwirkungsbereiche aktiver und in jüngerer Zeit stillgelegter Steinkohlenbergwerke der RAG AG
Im Auftrag der Bezirksregierung Arnsberg, Abteilung Bergbau und Energie in NRW

Bearbeitung: TU Clausthal Datum: 04.02.2016 Abbildung: **29**

■ BEOBACHTUNGSLINIEN UND -PUNKTE DER RAG AG

Neben den Leitnivellements, an denen auch die RAG Anthrazit Ibbenbüren GmbH beteiligt ist, werden zusätzliche Höhen-, Lage- und auch Längenmessungen entlang von Beobachtungslinien und an Objektpunkten durch die RAG AG durchgeführt. Diese sind teilweise nach §125 BBergG behördlich vorgeschrieben oder sind im Zusammenhang mit den genehmigten Rahmenbetriebsplänen durchzuführen. Tagesnivellements, wie sie durch die Bergwerke im Ruhrrevier alle 2 Jahre stattfinden, werden vom BW Ibbenbüren nicht durchgeführt.

Einige RAG-Beobachtungslinien/-punkte liegen ab etwa den 80er Jahren des letzten Jahrhunderts vor. Die Lage der Punkte, für die ab 1999 Messungen vorliegen und für das Gutachten aufbereitet wurden, sind in Abbildung 30 dargestellt. Die Messungsergebnisse an einigen Messpunkten innerhalb des prognostizierten EW-Bereiches des BW Ibbenbüren wurden aufgrund ihres relativ geringen Nutzens für diese Untersuchungen nicht aufbereitet und sind entsprechend im Anhang A1 gekennzeichnet.

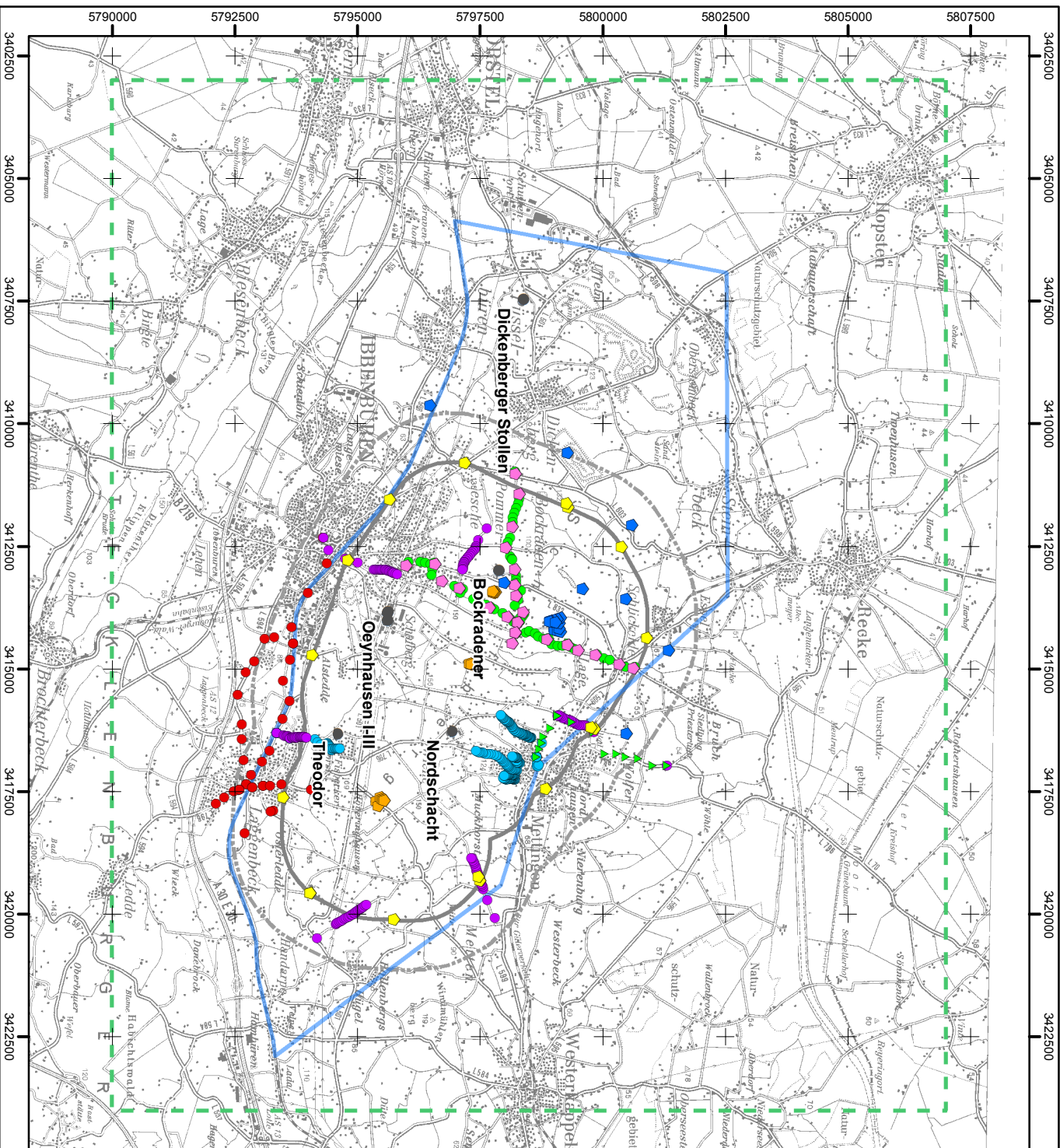
Die Höhen der Nivellementspunkte entlang der Linien „§125 BBergG – Gasleitungen und Objekte“ (Abbildung 30, blaue runde Punkte) wurden mit der Genauigkeitsstufe 1-2 entsprechend der Markscheider-Bergverordnung Anlage 1 (zu §6) eingemessen. Für alle weiteren Nivellementspunkte entlang der Beobachtungslinien und Anschlussmessungen wurden die Höhenmessgenauigkeiten der Klasse 1 eingehalten. Die Messgenauigkeiten an den GPS-Punkten betragen +/- 5 mm.

Die Höhenmessungen an den Nivellements- und GPS-Punkten wurden für Vergleiche mit den radarinterferometrisch ermittelten Höhenänderungen im Kapitel 6.3 herangezogen. Für die Bewertung der Höhenänderungen und Beurteilung des Bergbaueinflusses (Kapitel 9) außerhalb des prognostizierten EW-Bereiches des RBP 2009-2018 waren insbesondere die südlichen Linien im Bereich von Ibbenbüren-Laggenbeck, aber auch im Bereich von Mettingen und Westerkappeln von großer Bedeutung. Die Lagemessungen an den GPS-Punkten des Beustfeldes dienten vor allem der Beurteilung von Horizontalverschiebungen und zur Bewertung der gemessenen radarinterferometrischen Bodenbewegungen in Kapitel 6.1.

Einige GPS-Punkte und Messpunkte der RAG-Beobachtungslinien wurden außerdem zur Ermittlung des Zeitfaktors (Kapitel 7.3) und für die Untersuchungen zu den Modellparametern (Kapitel 7.4) verwendet.

■ NIVELLEMENTS DER KOMMUNEN

Die Kommunen Ibbenbüren, Recke, Mettingen, Tecklenburg und Westerkappeln sowie der Kreis Steinfurt wurden bezüglich weiterer Höhenmessungen angefragt. Leider konnten keine Höhen- oder Höhenzeitfolgedaten bereitgestellt werden (Anhang A1).



TU Clausthal
Institut für Geotechnik und Marschleidenwesen

Legende

RAG-Beobachtungslinien und -punkte

- ▲ Anschlussmessungen Mettingen
- Messungen Einwirkungsbereich RBP 2000-2015
- Nach § 125 BBergG - Gasleitungen und Objekte
- Beobachtungslinien Beustfeld
- Beobacht.linien Ibbenbüren-Lagenbeck-Osterfede

GPS-Beobachtungspunkte

- GPS - RBP 2009-2018 Nullrandmessungen
- GPS - RBP 2009-2018 Senkungsschwerpunkte
- GPS - Siedlung Nießingskamp
- GPS - Beustfeldlinien

- Untersuchungsraum
- Prognostizierter Einwirkungsbereich +1000m Zone
- Bergwerksgrenze
- Tagesöffnungen in Betrieb

RAG-Beobachtungslinien/-punkte
Tagesöffnungen, Bergwerksgrenze, EW-Bereiche
TK100
© RAG AG, 2015
© Bezirksregierung Arnsberg, 2015
© Geobase NRW, 2012

0 1,25 2,5 5
Kilometer

Untersuchungsgebiet: Bergwerk Ibbenbüren

Lage der Höhenmessungen der RAG-Beobachtungslinien und Beobachtungspunkte 2000 - 2015

Analyse von Senkungserscheinungen außerhalb prognostizierter Einwirkungsbereiche aktivier und in jüngster Zeit stillgelegte Steinkohlengruben der RAG AG
Im Auftrag der Bezirksregierung Arnsberg, Abteilung Bergbau und Energie in NRW

Bearbeitung: TU Clausthal Datum: 04.02.2016 Abbildung: 30

4.3.4. Grundwassermessungen

Grundwasserstandsdaten aus dem Bereich des aktiven Bergbaus wurden von der RAG Anthrazit Ibbenbüren GmbH zur Verfügung gestellt. Weitere Grundwasserstandsdaten für die Bereiche außerhalb des festgelegten Rahmenbetriebsplanes werden vom Landesamt für Natur-, Umwelt und Verbraucherschutz NRW (LANUV) betrieben und im Webdienst ELWAS-WEB (Elektronisches wasserwirtschaftliches Verbundsystem für die Wasserwirtschaftsverwaltung) veröffentlicht.

Aufgrund des Rahmenbetriebsplanes 2009 – 2018 des Bergwerks Ibbenbüren werden Aspekte des Grundwassers durch regelmäßig angefertigte Wasserwirtschaftsberichte dokumentiert (WEHR 2009, 2010, 2011; RADEMACHER 2012, RADEMACHER et al. 2013, 2014). Dieses Monitoring dient der Untersuchung der Einflüsse des Bergbaus auf den Zustand von Grundwasser und Oberflächen-gewässern. Im Einzelnen werden Niederschlagsmessungen, Brunnen- und Quellenbeobachtungen sowie Gewässernivellements durchgeführt. Die Untersuchungen erstrecken sich auch auf die Hydrochemie und die Gewässerfauna.

Insgesamt standen folgende Grundwasserdaten für den Untersuchungsraum sowie den Betrachtungszeitraum zur Verfügung (Karte 5):

- Grundwasserdaten der RAG Anthrazit Ibbenbüren GmbH
 - Messstellen insgesamt: 86 Messstellen (überwiegend Brunnen)
 - Im Betrachtungszeitraum: 46 Messstellen
- Grundwasserdaten des LANUV
 - Messstellen insgesamt: 40 Messstellen
 - Im Betrachtungszeitraum: 27 Messstellen

Somit standen Grundwasserstandsdaten von insgesamt 126 Grundwassermessstellen zur Verfügung, von denen 73 Grundwassermessstellen für die Auswertung im Betrachtungszeitraum geeignet waren. Die Lage der Grundwassermessstellen im Untersuchungsgebiet ist aus der Karte 5 ersichtlich.

Es ist zu beachten, dass die Grundwasserstandsdaten unterschiedliche Qualitäten aufweisen und damit teilweise die Auswertung der Grundwasserverhältnisse erschweren. Die Messintervalle der Grundwasserhöhen in den Messstellen sind sehr unterschiedlich (halbjährliche, monatliche und wöchentliche manuelle Messungen, hochauflösende Messungen durch Datenlogger) und im Betrachtungszeitraum zum Teil lückenhaft. Es liegen zudem Grundwassermessstellen vor, die aufgrund einer unzureichenden Tiefe in den Sommermonaten trocken fallen und damit keine Auswertung zulassen.

Veränderungen der Grundwasserhöhen haben generell einen Einfluss auf die Geländeoberfläche, z. B. durch Verminderung des Auftriebs und Schrumpfung bindiger Böden. Die absoluten Grundwasserhöhen (bezogen auf m NHN) werden als Differenz der Messpunkthöhe und des Abstiches (Distanz zwischen der Messpunkthöhe und der Grundwasserhöhe in m) berechnet. Aus diesem Grund sollten die Messpunkthöhen von Grundwassermessstellen in bergbaulich beeinflussten Bereichen möglichst regelmäßig eingemessen werden, um eine korrekte Auswertung von Grundwasserstandsänderungen zu gewährleisten.

Es wurden für alle geeigneten Grundwassermessstellen Ganglinien der Grundwasserhöhen erstellt und hinsichtlich der zeitlichen Entwicklung ausgewertet. Die Ergebnisse der hydrogeologischen Untersuchungen sind in Kapitel 8.1 erläutert.

4.3.5. Sonstige Daten

■ KVF-DATEN UND ALTLASTEN- UND ABLAGERUNGSFLÄCHEN

Vom Geologischen Dienst NRW (GD NRW) wurde ein Datensatz mit Künstlich veränderten Flächen (KvF) aus dem Jahre 2005 bereitgestellt (siehe Karte 4). Der Datensatz entstammt einem Vergleich der topographischen Karten über die Erscheinungsjahre und wurde auch mit Datenbanken beim GD NRW abgeglichen. Im Rahmen dieses Gutachtens wurden weitere Altlasten- und Abgrabungsflächen bei den Kommunen angefragt. Die Stadt Recke konnte entsprechende Daten liefern, die jedoch den Stand von 1990 besaßen und teilweise identisch waren mit den vom GD NRW bereitgestellten KvF-Flächen. Von der Bezirksregierung Arnsberg (BRA), Abteilung Bergbau und Energie in NRW, wurden die unter Bergaufsicht stehenden Flächen der aktiven Nichtsteinkohlengewinnungsbetriebe (u. a. Steine und Erden) bereitgestellt, und vom Kreis Steinfurt die Genehmigungsflächen der „nicht nach Bergrecht“ genehmigten Steine- und Erden-Gewinnungsbetriebe mit Zuständigkeit des Kreises. Die Daten der BRA, des GD NRW, des Kreis Steinfurt und der Stadt Recke wurden durch das IGMC und die Coldewey GmbH aufbereitet, teilweise digitalisiert, mittels aktuellen Luft- bzw. Satellitenbildaufnahmen geprüft und zu einem Datensatz mit neuen, allgemeinen Klassen zusammengefasst (Karte 4). Die zusammengefassten Ablagerungs- und Aufschüttungsflächen wurden speziell zur Untersuchung möglicher nichtbergbaulich bedingter Bodenbewegungen in Kapitel 9 herangezogen.

■ GEOLOGIE UND TEKTONIK

Die Geologie des Ibbenbürener Hochplateaus wurde im Wesentlichen auf Grundlage veröffentlichter Publikationen (DROZDZEWSKI 1985) und der Geologischen Karten des GEOLOGISCHEN DIENSTES NRW (THIERMANN 1975, THIERMANN et al. 1975, 1987, 1980) erarbeitet. Informationen über die Verbreitung der Zechstein-Vorkommen im Bockradener Graben liegen aufgrund jüngerer Untersuchungen des Gutachters im Auftrag der DSK-Anthrazit Ibbenbüren GmbH vor (COLDEWEY et al. 2007). Für die Darstellung der oberflächennahen Gesteinseinheiten wurde das Geologische Übersichtskartenwerk 1:200.000 der BUNDESANSTALT FÜR GEOWISSENSCHAFTEN UND ROHSTOFFE (2007) verwendet. Die Verbreitung der oberflächennahen Gesteinseinheiten wird in der Karte 1 dargestellt.

Für die Untersuchung der tektonischen Verhältnisse wurde eine Vielzahl an Fachinformationen für die Erarbeitung verschiedener Themenkomplexe verwendet. Vom GEOLOGISCHEN DIENST NRW wurde ein digitaler Datensatz der bekannten Störungen in den Schichten der Kreide zur Verfügung gestellt. Diese enthält jedoch nur eine Störung am SW-Rand des Untersuchungsraumes und erwies sich somit, aufgrund der fehlenden Kreide-Verbreitung im Bereich des Untersuchungsgebietes, als ungeeignet.

Die RAG AG stellte digitale Datensätze der tektonischen Verhältnisse der Lagerstätte zur Verfügung. So konnten Datensätze über die Tektonik an der Tagesoberfläche für die Korrelation mit den Ergebnissen der PSI-Auswertung (Kapitel 9.3) sowie der Tektonik im Niveau des Flözes 54 für den Vergleich mit den Ist-Abbaudaten genutzt werden (Kapitel 2.5.2). Weiterhin wurde von der RAG AG ein Datensatz geliefert, der die tektonischen Verhältnisse im Niveau des Flözes Glücksburg darstellt. Dieser deckt sich mit der Darstellung der geologischen Verhältnisse im Titelblatt 1

(Blatt 1) des Risswerkes des Bergwerks Ibbenbüren (HÄDICKE 1972), welches von der Bezirksregierung Arnsberg zur Verfügung gestellt wurde. Die geologischen Verhältnisse im Karbon sind in der Karte 2 im Niveau von Flöz Glücksburg (Westfal C) nach DROZDZEWSKI (1985) dargestellt.

Weitere Informationen zu den geologischen Verhältnissen im Raum Ibbenbüren sowie die Verbreitung und Gewinnung von Rohstoffen konnten in Fachgesprächen mit dem ehemaligen Werksmarkscheider GOERKE-MALLET (2015) und Vertretern der lokalen Rohstoffindustrie gewonnen werden. Alle verwendeten Quellen sind im Literaturverzeichnis und im Anhang A1 angegeben.

■ TAGESÖFFNUNGEN UND TAGESBRÜCHE

Von der Bezirksregierung Arnsberg, Abteilung Bergbau und Energie in NRW wurden Informationen zu bekannten Tagesöffnungen (stillgelegte und in Betrieb befindliche) sowie Informationen zum Sicherungszustand einiger dieser Tagesöffnungen aus der SATÖB-Datenbank (Kapitel 2.5.2 Absatz „Tagesöffnungen“; Abbildung 24) geliefert. Des Weiteren wurden Informationen zu bekannten Tagesbrüchen bereitgestellt. Es gibt elf bekannte Tagesbrüche im Untersuchungsraum (Karte 4), wovon fünf bergbaulich verursacht sind, drei nicht bergbaulich bedingt und bei drei Tagesbrüchen eine bergbauliche Ursache nicht ausgeschlossen werden kann. In Tabelle 6 sind weitere Angaben zu den gefallenen Tagesbrüchen aufgeführt.

Tabelle 6: Informationen zu bekannten Tagesbrüchen im Untersuchungsraum; Lage der Tagesbrüche siehe Karte 4 (© Bezirksregierung Arnsberg)

Nr.	Datum der Entstehung	Datum der Einmessung	Teufe [m]	Ursache
1		23.6.1994	7	Bergbauliche Ursache nicht auszuschließen
2		7.9.1994	4,5	Bergbauliche Ursache nicht auszuschließen
3	01/1999	20.1.1999	3	Bergbauliche Einwirkung
4	04/1999	26.5.1999	0,2	Nicht bergbaulich bedingt
5	05/1999	15.6.1999	3	Bergbauliche Einwirkung
6	06/2001		0,6	Nicht bergbaulich bedingt
7	10/2001	18.10.2001	0	Bergbauliche Einwirkung
8	09/2013		0	Nicht bergbaulich bedingt
9			0	Bergbauliche Ursache nicht auszuschließen
10			0	Bergbauliche Einwirkung
11			0	Bergbauliche Einwirkung

■ BEKANNTE UNSTETIGKEITEN

Die RAG AG hat für die gutachterlichen Untersuchungen einen Vektordatensatz mit bekannten Unstetigkeiten an der Tagesoberfläche bereitgestellt, wobei alle Unstetigkeitslinien bzw. -stellen deutlich innerhalb des prognostizierten EW-Bereiches des BW Ibbenbüren liegen. Auf diese Daten wird in den Betrachtungen in Kapitel 10.2.3 nochmals näher eingegangen wird.

■ ERDERSCHÜTTERUNGEN

Die aus dem BID-System exportierten Informationen zu Erderschütterungen im Bereich des BW Ibbenbüren wurden hinsichtlich besonderer Vorkommnisse, d. h. Ereignisse mit maximalen Geschwindigkeiten von 1-2 mm/s an den Erschütterungsmessstationen IBB-1 bis IBB-11 analysiert und Vergleiche mit den in Kapitel 6.3.3 abgeleiteten radarinterferometrischen Zeitreihen an PS-Punkten in unmittelbarer Nähe zu den seismischen Stationen durchgeführt. Da keine zeitlichen Zusammenhänge zwischen den Erderschütterungen und den an der Tagesoberfläche detektierten Höhenänderungen erkennbar waren, was u. a. auf das Messrauschen in den PSI-Zeitreihen zurückzuführen ist, wurde auf die weitere Verwendung der Daten verzichtet.

■ WASSERSCHUTZGEBIETE

Für Informationen über geplante und festgesetzte Trinkwasser- und Heilquellenschutzgebiete konnte auf Kartendaten des LANDESAMT FÜR NATUR, UMWELT UND VERBRAUCHERSCHUTZ NORDRHEIN-WESTFALEN (2012) zurückgegriffen werden. Die Schutzgebiete im Untersuchungsraum sind in der Karte 5 dargestellt.

5. RADARINTERFEROMETRISCHE ERMITTLUNG VON BODENBEWEGUNGEN

Für die radarinterferometrische Ermittlung von Bodenbewegungen sowie der abgeleiteten Höhenänderungen (Kapitel 6.2) standen für den Untersuchungsraum des BW Ibbenbüren die in Kapitel 4.2 beschriebenen Radardaten der Satelliten ENVISAT ASAR (18.12.2003 – 7.10.2010) und Radarsat-2 (16.1.2011 – 12.2.2015) zur Verfügung. Aufgrund der unterschiedlichen Sensor- und Aufnahmeparameter sind die beiden Datenstapel von Satellitenszenen nur getrennt radarinterferometrisch auswertbar.

5.1. Grundlagen der satellitengestützten Radarinterferometrie und der Auswerteverfahren

Radarsatelliten senden Mikrowellenstrahlung zur Erdoberfläche aus und messen von den zurückgestreuten Signale, die zum Sensor gelangen, sowohl die Rückstreuintensitäten als auch die Phasenlage (kurz: Phase), d.h. den Schwingungszustand des eintreffenden Signals im Wertebereich von $-\pi$ bis $+\pi$, welche proportional zum Signalweg „Sensor-Erde-Sensor“ ist. Die Phase ist die entscheidende Messgröße zur Erfassung von u. a. Bodenbewegungen auf der Erdoberfläche bzw. den sich darauf befindlichen Objekten.

Die SAR-Interferometrie (InSAR) ist ein Messverfahren, bei dem aus jeweils zwei Phasenbildern Differenzbilder, die sogenannten Interferogramme, berechnet werden. Die Phasendifferenzen resultieren zum einen aus der Aufnahmegeometrie (Schrägsicht) und den leicht unterschiedlichen Orbitpositionen des Satelliten zu den Aufnahmezeitpunkten, zum anderen aus Höhenunterschieden der Gelände- und Objektoberfläche (Topographie) sowie deren Veränderung (Deformation). Atmosphärische Effekte führen zu zusätzlichen Signalverzögerungen und entsprechenden Phasendifferenzanteilen. Hauptaufgabe (Ziel) der Differentiellen Radarinterferometrie (DInSAR) ist die Extraktion der deformationsbedingten Phasenanteile aus den Interferogrammen, indem unter Zuhilfenahme eines z. B. Digitalen Höhenmodells (DHM) die topographischen Phasenanteile weitestgehend eliminiert werden. Je aktueller (bezogen auf die Satellitenaufnahmezeitpunkte) und höher auflösend die Höhendaten sind und auch der effektiven Rückstreuhöhe der Radarsignale an den Objekten entsprechen, umso geringer sind letztendlich topographisch bedingte Fehler bei der Ableitung von Deformationen anhand der resultierenden differentiellen Interferogramme. Atmosphärische Einflüsse können nur bedingt aus den differentiellen Phasen eliminiert werden und führen somit ebenfalls zu Fehlern bei der Ableitung der Deformationen.

Das DInSAR-Verfahren ist prinzipiell ein flächenhaftes Messverfahren, bei dem es jedoch zu Signalverlusten (Dekorrelationen) kommen kann, die zu räumlichen Lücken in einigen Interferogrammen führen. Beispielsweise ist in ländlichen Bereichen das DInSAR-Verfahren aufgrund der zu schnellen Änderung des Rückstreuverhaltens einer sich ändernden Vegetation meist nicht anwendbar. Signaldekorrelationen verursachen in bestimmten Gebieten somit teilweise großflächige Unterbrechungen von Beobachtungszeitreihen.

Um umfangreiche Datenstapel für die Erfassung von Bodenbewegungszeitreihen effizient nutzen und vollständige Zeitreihen ableiten zu können, verwendet man das Auswerteverfahren der so genannten „Persistent Scatterer Interferometry“ (PSI). Das PSI-Verfahren umgeht das Problem

der Dekorrelationen, indem die Schätzung der Bewegungen nur für langzeitstabile Rückstreuer, die so genannten Persistent Scatterer (PS-Punkte), erfolgt. PS-Punkte sind in der Realität meist anthropogene Objekte mit guten Rückstreueigenschaften z. B. Hausdächer. Zu Beginn des Auswerteverfahrens werden zunächst die PS-Punkte anhand unterschiedlicher Rückstreu-Kriterien detektiert. Für diese PS-Punkte erfolgt anschließend über zweidimensionale Regressionsanalysen und zeitliche Phasenabwicklungen (wegen der Phasenmehrdeutigkeiten von 2π) die Ermittlung der Objektbewegungen in Blickrichtung des Sensors (*LOS – Line of Sight*) sowie der Punkthöhenfehler, die u. a. auf Ungenauigkeiten des benutzten DHMs zurückzuführen sind. Des Weiteren können atmosphärische Störeinflüsse auch bei dem PSI-Auswerteverfahren zu Fehlern bei den abgeleiteten Bodenbewegungen führen. Teilweise lassen sich Hinweise auf atmosphärische Störeinflüsse durch Vergleich von Zeitreihen benachbarter PS-Punkte finden. Ggf. kann/muss dann eine atmosphärisch stark beeinträchtigte Szene aus dem Datensatz gelöscht werden.

Sehr schnelle und sehr starke nichtlineare Lageänderungen von PS-Punkten können mit dem Verfahren nur bedingt ermittelt werden. Die maximal erfassbare Bewegung eines PS-Punktes in Blickrichtung des Sensors beträgt bei ENVISAT ASAR innerhalb von 35 Tagen etwa 14 mm. Mit den genutzten Radarsat-2 Daten können aufgrund der ähnlichen Wellenlänge ebenfalls maximal etwa 14 mm zwischen zwei Aufnahmen (n-24 d) erfasst werden. Aufgrund der relativ kleinen Wellenlänge ist das Messverfahren sensibel für Bewegungen im mm-Bereich. Treten größere Bewegungen auf als die zuvor für die beiden Sensoren genannten Beträge, können diese über eine sog. Phasenabwicklung (*Phase Unwrapping*) nicht in allen Fällen eindeutig bestimmt werden. Somit können Phasenabwicklungsfehler entstehen. Phasenabwicklungsfehler führen bei ENVISAT als auch Radarsat-2 zu einem Messfehler in LOS um ein Vielfaches von etwa 28 mm. Bei Verwendung der PSI-Methode sind in Abhängigkeit von der Anzahl der Szenen, der Entfernung zu einem gewählten Referenzpunkt und der PS-Punktdichte Standardabweichungen für die mittlere Bodenbewegungsrate in LOS von 1-2 mm/a möglich.

Da die ermittelten „Objekt“-Bewegungen in Blickrichtung des Sensors (LOS) eine eindimensionale Messgröße darstellen, liegt es nahe, daraus unter Berücksichtigung des jeweiligen Einfallswinkels θ_i (Abbildung 31) die Höhenänderung als eindimensionale Größe abzuleiten. Hierbei ist jedoch zu bedenken, dass die Bewegung eines Objektes im Raum vollständig nur durch einen dreidimensionalen Verschiebungsvektor beschreibbar ist. Da ein Radarsensor nur eine Blickrichtung (schräg nach unten; gekennzeichnet durch den Blickwinkel) und in einer azimuthalen Richtung entweder von etwa Osten oder Westen in Richtung auf das Objekt) besitzt, müssten, um die dreidimensionalen Bewegungskomponenten eines Objektes zu erfassen, Radardatenstapel vorliegen und ausgewertet werden, die in verschiedenen Azimut-Blickrichtungen und unter verschiedenen Blickwinkeln (bezogen auf die Nadirrichtung) aufgenommen werden. Aufgrund der Nord-Süd- (absteigend = descending) bzw. Süd-Nord-Flugrichtung (aufsteigend = ascending) aller nutzbaren Radarsensoren könnten Objekte maximal aus zwei unterschiedlichen Azimut-Blickrichtungen (etwa aus Osten oder Westen), jedoch unter verschiedenen Blickwinkeln, beobachtet werden. Im Rahmen dieses Gutachtens liegt jedoch nur jeweils ein Radardatenstapel pro Zeitraum vor, deren Aufnahmeparameter in Tabelle 7 angegeben sind.

Tabelle 7: Aufnahmeparameter der verwendeten Radardaten

	ENVISAT	RADARSAT-2
FLUGRICHTUNG (AUF-/ABSTEIGEND) BLICKRICHTUNG	N → S (ABSTEIGEND) RECHTSBLICKEND	N → S (ABSTEIGEND) RECHTSBLICKEND
KURSWINKEL α_h	-166,7631°	-171,7966°
AZIMUTWINKEL α_{az}	-76,7631°	-81,7966°
MITTLERER EINFALLSWINKEL θ_i ($\cong$ BLICKWINKEL θ)	22,7591°	47,0353°

Die vom Radarsensor gemessene Verschiebung in LOS-Richtung ist abhängig von den Verschiebungsanteilen in X-, Y- und Z-Richtung eines sich im Raum bewegenden Objektes. Unter Berücksichtigung des Kurswinkels α_h bzw. Azimutwinkels α_{az} sowie dem Einfallswinkel θ_i setzt sich laut HANSEN (2001) der Verschiebungsbetrag Δr in LOS wie folgt zusammen:

$$\Delta r = \Delta r_z \cdot \cos \theta_i - \sin \theta_i \cdot [\Delta r_x \cdot \sin \alpha_{az} + \Delta r_y \cdot \cos \alpha_{az}]$$

Bei Aufnahmen mit kleinem Einfallswinkel ist ein Radarsensor deutlich weniger empfindlich gegenüber horizontalen Bewegungen als gegenüber vertikalen Bewegungen. Die Empfindlichkeit des Radarsensors bezogen auf Bewegungsanteile in X-, Y- und Z-Richtung ergibt sich durch Einsetzen der Werte aus Tabelle 7 in die angegebene Formel. Für die verwendeten Radaraufnahmen setzt sich die Verschiebung in LOS wie folgt zusammen:

- ENVISAT: $[0.38, -0.09, 0.92] [\Delta r_x, \Delta r_y, \Delta r_z]^T$
- Radarsat-2: $[0.72, -0.10, 0.68] [\Delta r_x, \Delta r_y, \Delta r_z]^T$

Diese Werte lassen sich wie folgt interpretieren. Der ENVISAT-Sensor ist wegen der Aufnahmegeometrie der benutzten Daten zirka 2,4-fach empfindlicher für vertikale Verschiebungen (Δr_z) als für horizontale Bewegungen in nahezu Ost-West-Richtung (Δr_x). Dagegen ist die benutzte Aufnahmekonstellation von Radarsat-2 etwa genauso empfindlich bzw. etwas stärker empfindlich für horizontale Bewegungen in Ost-West-Richtung als für vertikale Bewegungen. Zur Erfassung von horizontalen Punktbewegungen in Nord-Süd-Richtung sind beide Sensoren quasi fast „blind“ bzw. nicht sensibel, d. h., eine unmittelbare Erfassung dieser Bewegungskomponente ist mit diesen Sensoren nicht möglich.

Die unterschiedliche Sensibilität eines Radarsensors gegenüber Verschiebungen in bestimmten Richtungen hat Konsequenzen; insbesondere dann, wenn die tatsächlichen Verschiebungsvektoren eines Bewegungsfeldes nicht bekannt sind. Bei der Umrechnung eines in LOS-Richtung gemessenen Wertes in Höhenänderungen und unter z. B. der (fehlerhaften) Annahme, dass keine horizontalen Verschiebungen stattgefunden haben, d. h. $\Delta r_x = 0$ und $\Delta r_y = 0$, kann es je nach Einfallswinkel zu einer deutlichen Über- oder Unterschätzung von Vertikalbewegungen kommen.

Wie das Beispiel von WALTER (2012) in Abbildung 31 zeigt, werden tatsächlich eingetretene Senkungen am Punkt P1 ($\Delta r_{z, \text{wahr}}$) bei der Umrechnung der LOS-Bewegung in Höhenänderungen ($\Delta r_{z, \text{Radar}}$) überschätzt, da sich der Punkt vom Sensor wegbewegt ($\Delta r_x < 0$), was als zusätzliche Vertikalbewegung interpretiert wird. Auf der gegenüberliegenden Seite der Senkungsmulde am Punkt P3 kommt es dagegen zu einer Unterschätzung der Senkungen, da sich der Punkt auf den Sensor zu bewegt ($\Delta r_x > 0$). Ist die Sensibilität des Sensors gegenüber Bewegungen in X-Richtung und Z-Richtung ähnlich hoch und treten gleiche Verschiebungsanteile in diesen Richtungen auf, heben sich diese Verschiebungsanteile auf, so dass eine LOS-Bewegung von 0 mm gemessen wird. Bei einer Umrechnung in die Vertikalrichtung ergibt sich dann ebenfalls ein Betrag von Null.

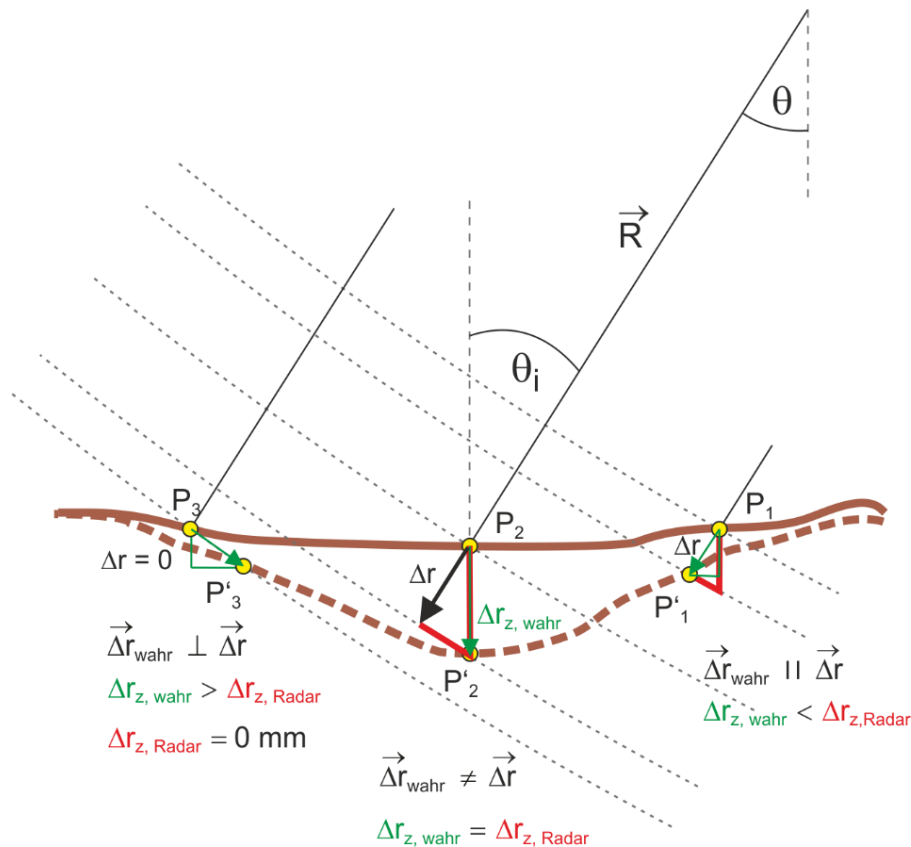


Abbildung 31: Radar-Aufnahmegeometrie und Punktbewegungen. Mögliche Fehlschätzungen von Höhenänderungen bei Umrechnung von LOS- in Vertikalbewegungen unter der Annahme, dass keine horizontalen Bewegungen aufgetreten sind. (nach WALTER 2012)

Betrachtet man die für das Untersuchungsgebiet verwendeten Radardaten, ergibt sich z. B. daraus, dass bei den ENVISAT-Messungen Horizontalbewegungen in X-Richtung 2,4-fach so groß wie die Vertikalbewegungen sein müssen und sich die Objekte auf den Sensor zu bewegen müssten, um keine LOS-Bewegungen zu messen. Bei den Daten von Radarsat-2 müssen dagegen die Horizontalbewegungen in X-Richtung nur ca. 95% der Vertikalbewegungen betragen. Bei gleich großen Verschiebungsbeträgen Δr_x und Δr_z würden positive LOS-Bewegungen entstehen, die nach einer Umrechnung von LOS-Daten in die Vertikalkomponente als Hebungen interpretiert würden.

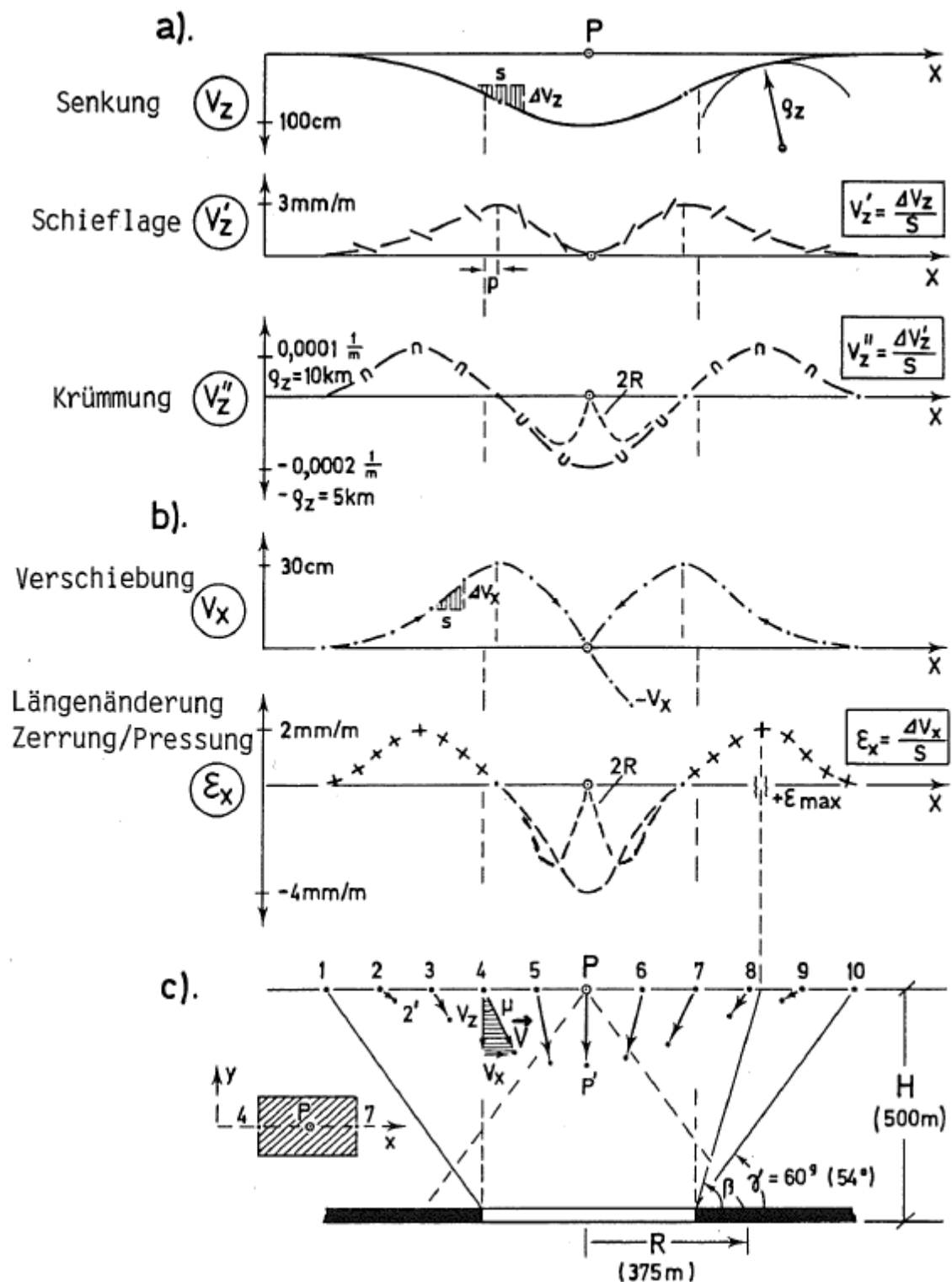
Aufgrund der für die Erfassung von Höhenänderungen sehr ungünstigen Aufnahmegeometrie des Satelliten Radarsat-2, mit einem sehr flachen Blickwinkel auf das Untersuchungsgebiet des BW Ibbenbüren, musste das Bewegungsfeld hinsichtlich möglicher Horizontalbewegungen näher

untersucht werden, um letztlich auch Höhenänderungen (Kapitel 6) ableiten zu können. Bei Vorliegen größerer Horizontalbewegungen in Ost-West-Richtung würde eine Umrechnung in die Vertikalkomponente zu deutlichen Über- und Unterschätzungen von Senkungen kommen, wie Tabelle 8 zeigt. Bei einer gleich großen Horizontalbewegung in X-Richtung und Höhenänderung (Verhältnis 1:1) würden beispielsweise Senkungen bei ENVISAT-Messungen um ca. 40% über- bzw. unterschätzt werden, bei Radarsat-2 dagegen um 106%. Zusätzlich könnte es, infolge dieser Umrechnung der LOS-Daten mit den für das BW Ibbenbüren benutzten Szenen von Radarsat-2, sogar zu einer Umkehrung der vertikalen Bewegungsrichtung (Senkungen würden als Hebungen berechnet) kommen, wenn sich Punkte wie P3 (Abbildung 31) auf den Sensor zu bewegen. Je nach Verhältnis zwischen der Horizontalbewegung in X-Richtung und Höhenänderung ergeben sich laut Tabelle 8 entsprechende systematische Fehler bei der Umrechnung von LOS-Daten in Höhenänderungen.

Tabelle 8: Über- bzw. Unterschätzung von Höhenänderungen bei der Annahme $\Delta r_x = 0$ und $\Delta r_y = 0$ entsprechend der Abbildung 31

PUNKT, $\Delta r_x : \Delta r_z$ [wahre Bewegungsanteile]	ENVISAT	RADARSAT-2
P3, 1:1 [$\Delta r_x > 0, \Delta r_z < 0$]	Senkung um 40,8% unterschätzt	Senkung um 106% unterschätzt
P3, 0.5:1 [$\Delta r_x > 0, \Delta r_z < 0$]	Senkung um 20,4% unterschätzt	Senkung um 53,1% unterschätzt
P3, 0.25:1 [$\Delta r_x > 0, \Delta r_z < 0$]	Senkung um 10,2% unterschätzt	Senkung um 26,6 % unterschätzt
P1, 1:1 [$\Delta r_x < 0, \Delta r_z < 0$]	Senkung um 40,8% überschätzt	Senkung um 106% überschätzt

Typisch für Senkungsmulden als Folge untertägigen Steinkohlenbergbaus sind nach KRATZSCH (1997) auch Horizontalbewegungen, da sich die Gebirgspunkte nicht lotrecht absenken, sondern sich auf einer schräg nach unten gerichteten, bogenförmigen Bahn Richtung Senkungsschwerpunkt bewegen (Abbildung 32c). Die lotrechte Komponente ist dabei um „einige Male größer“ als die waagerechte Komponente (KRATZSCH 1997). Das Maximum der Horizontalverschiebungen wird dabei etwa oberhalb der Abbaukante bei flacher Lagerung erreicht (Abbildung 32b+c). Das Verhältnis Horizontal- zu Vertikalbewegung nimmt jedoch zum Rand der Senkungsmulde hin deutlich zu, wie auch die Richtungspfeile in Abbildung 32c zeigen. Am „10 cm“-Senkungsrand könnten die Horizontalbewegungen theoretisch 5-10fach größer sein als die Vertikalbewegungen. Für genauere Aussagen sind entsprechende Messlinien und -punkte in dem zu untersuchenden Einwirkungsbereich anzulegen. Für die Untersuchungen im Rahmen dieses Gutachtens konnte auf bereitgestellte GPS-Messungen für das Beustfeld zurückgegriffen werden, auf die im Kapitel 6.1 näher eingegangen wird.



5.2. PSI-Datenprozessierung

Die radarinterferometrischen Prozessierungen wurden am Institut für Geotechnik und Markscheidewesen der TUC mit der GAMMA SAR and Interferometry Software der Firma GAMMA Remote Sensing Research and Consulting AG (Schweiz) durchgeführt.

Für die ENVISAT-Daten erfolgte zunächst eine Vorprozessierung der Satelliten-Rohdaten (Level-0 Daten), bei dem die Radarsignale zu einem Bild fokussiert werden und gemessene Phasen und Intensitäten im komplexen Zahlenformat, so genannte Single Look Complex (SLC) Daten, abgespeichert werden. Die Radarsat-2 Daten lagen bereits als Level-1, d. h. SLC-Daten vor. Anschließend erfolgte die exakte Koregistrierung aller Szenen eines jeden Datenstapels zu jeweils einer Referenzszene (Master), d. h. die räumliche Überlagerung aller Szenen. Die Szenen des ENVISAT-Datenstapels wurden alle auf die Szene vom 6.11.2008 koregistriert (Tabelle 15) und die Szenen des Radarsat-2 -Sensors auf die Szene vom 25.10.2012 (Tabelle 16). In einem weiteren Schritt wurde das aus den gelieferten DOM 1L-Daten generierte Digitale Oberflächenmodell (Raster 5 m) ins Radarsystem überführt. Die PSI-Auswertungen erfolgten mit dem GAMMA Modul „Interferometric Point Target Analysis“ (IPTA).

Voraussetzung für eine erfolgreiche PSI-Analyse ist zum einen die Wahl einer geeigneten Referenzszene, die nicht identisch sein muss mit der Referenzszene der Koregistrierung. Jedoch sollte sie möglichst unbeeinflusst von atmosphärischen Einflüssen sein sowie weitere auswertespezifische Kriterien erfüllen. Zum anderen ist die Wahl eines stabilen, d. h. bewegungsfreien Referenzpunktes entscheidend.

Für die ENVISAT und Radarsat-2 Auswertungen wurden die in Tabelle 9 aufgelisteten Referenzszenen und -punkte in den PSI-Auswertungen verwendet. Die für die beiden getrennt durchgeführten PSI-Auswertungen benutzten Referenzpunkte befinden sich in der nordwestlichen Ecke des Untersuchungsraums in der Ortschaft Hopsten (Abbildung 33) in ca. 160 m Abstand voneinander. Durch mehrfache Auswertungen und Untersuchungen mit anderen Referenzpunkten in ebenfalls stabilen Gebieten im Untersuchungsraum darf angenommen werden, dass das Gebiet Hopsten bewegungsfrei ist. Leitnivelementsmessungen liegen für den nordwestlichen Bereich des Untersuchungsraums nicht vor (Abbildung 29).

Tabelle 9: Parameter und Ergebnisse der PSI-Auswertungen mit ENVISAT und Radarsat-2 Daten im Untersuchungsgebiet (Abbildung 34)

	ENVISAT	RADARSAT-2
AUSGEWERTETER ZEITRAUM	18.12.2003 – 07.10.2010	16.01.2011 – 12.02.2015
ANZAHL DER GENUTZTEN SZENEN	69	53
DATUM DER REFERENZSZENE	06.11.2008	03.06.2012
REFERENZPUNKT-NR.	16114	112116
LAGE DES REFERENZPUNKTES [KOORDINATEN]	HOPSTEN [3403707.75, 5807203.00]	HOPSTEN [3403870.0, 5807199.5]
ANZAHL DER ERMITTELTEN PS- PUNKTE	29.778	242.250

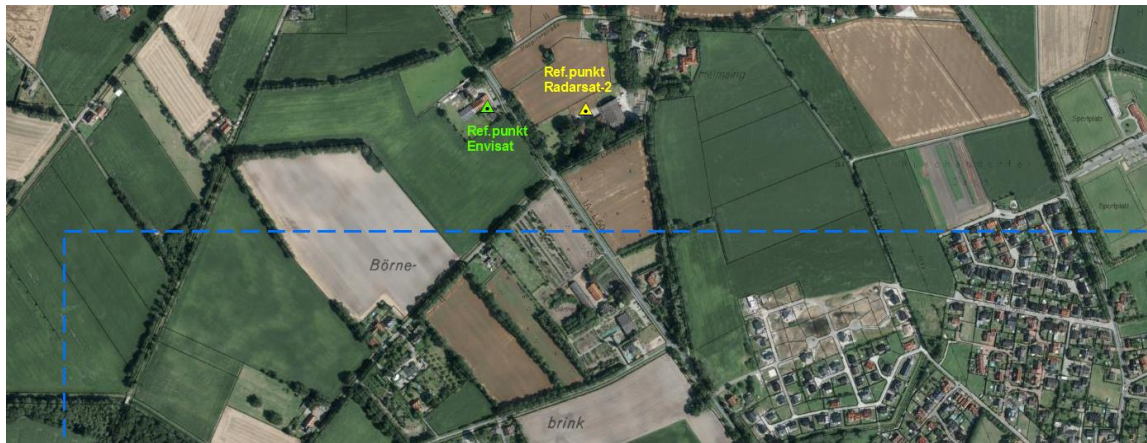


Abbildung 33: Lage der ausgewählten Referenzpunkte der PSI-Auswertungen für ENVISAT ASAR (grünes Dreieck) und Radarsat-2 (gelbes Dreieck); Hintergrund DTK10 + DOP40 © Geobasis NRW 2013

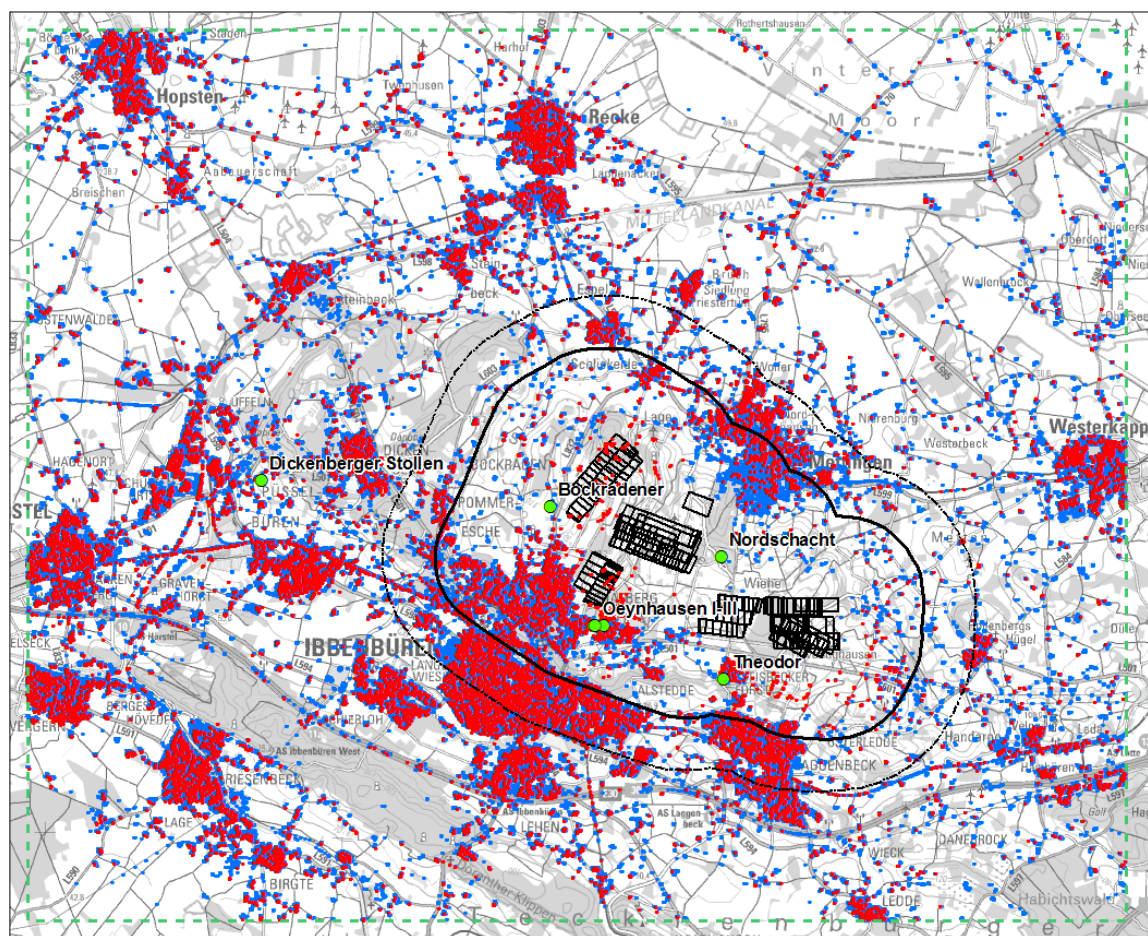


Abbildung 34: Lage der ermittelten PS-Punkte im Untersuchungsraum; rote PS-Punkte: ENVISAT ASAR, blaue PS-Punkte: Radarsat-2; Lage der Bauhöhen mit Abbaubeginn 1.1.2009 – 1.2.2015 (schwarze Polygone) © RAG AG; Hintergrund DTK100 © Geobasis NRW 2012

Im Untersuchungsraum konnten 29.778 PS-Punkte mit der PSI-Methode für den ENVISAT-Datenstapel mit 69 Szenen (= 69 Messzeitpunkte) und den Zeitraum 18.12.2003 bis 7.10.2010 ermittelt werden (Tabelle 9). Im Vergleich dazu ergaben sich im gleichen Gebiet mit dem Datenstapel des höher auflösenden Sensors Radarsat-2 242.250 PS-Punkte für den Zeitraum 16.1.2011 bis 12.2.2015 (= 53 Messzeitpunkte). Die Szene vom 4.2.2012 des Radarsat-2 Datenstapels wies starke Dekorrelationen infolge einer Schneebedeckung zum Aufnahmezeitpunkt auf, was sich negativ

auf die Anzahl der PS-Punkte auswirkte. Somit wurde diese Szene aus der PSI-Auswertung mit ursprünglich 54 Szenen ausgeschlossen und die PSI-Auswertung erneut durchgeführt. Abbildung 34 zeigt die Lage der ermittelten PS-Punkte. Die höhere Anzahl von PS-Punkten bei der Radarsat-2 Auswertung ergibt sich hauptsächlich durch:

- die deutlich höhere Bodenauflösung der Radarsat-2 Daten mit ca. 4,2 m x 4,6 m (ENVISAT ASAR Daten: etwa 23 m x 5 m),
- den kürzeren Zeitraum (von 4 Jahren), in dem Veränderungen an den rückstreuenden Objekten seltener eintreten als bei einem längeren Zeitraum, sowie
- die höhere maximal erfassbare Bewegungsrate pro PS-Punkt, aufgrund des größeren Blickwinkels des Sensors Radarsat-2 und der höheren Wiederholrate von 24 Tagen (Kapitel 5.1), weshalb auch PS-Punkte in Gebieten mit schnelleren Bewegungen ausgewertet werden können.

Die räumliche Punktdichte ist in städtischen Bereichen deutlich höher als in ländlichen Gebieten, da in Vegetationsbereichen nur wenige geeignete Rückstreuer zu finden sind.

Innerhalb des prognostizierten EW-Bereiches, insbesondere in den aktiven Abbaubereichen zwischen 01/2009 und 02/2015, konnten aufgrund dort typischerweise auftretender schneller und stark nichtlinearer Bewegungen nur vereinzelt PS-Punkte detektiert und ausgewertet werden (Abbildung 34). Trotz der schlechteren Bodenauflösung der ENVISAT-Aufnahmen ist die PS-Punktdichte im Bereich zwischen dem Bockradener Schacht und von-Oeynhaus-Schächten höher als bei den Radarsat-2 Ergebnissen. Ursache dafür sind die stärkeren Abbautätigkeiten im Radarsat-2 Zeitraum, speziell im Beustfeld im Nordosten (ab 15.1.2012) sowie auch im westlichen und östlichen Mittelfeld, die zu größeren Bodenbewegungen geführt haben dürften.

■ HINWEIS FÜR DIE NACHFOLGENDEN KAPITEL

Die in den folgenden Unterkapiteln beschriebenen Untersuchungsschritte und Analyseverfahren wurden nicht nur zur Untersuchung und Analyse der für die PS-Punkte ermittelten Bodenbewegungen in LOS-Richtung (LOS-Bewegungen) sondern auch in späteren Kapiteln, wenn sinnvoll, verwendet.

5.3. Datenbereinigung

Die Genauigkeit radarinterferometrischer Ergebnisse ist u. a. abhängig von der Qualität und Anzahl der Radardaten, den charakteristischen Merkmalen des Untersuchungsraums (wie z. B. der Flächennutzung), den im Untersuchungszeitraum aufgetretenen Bodenbewegungen (Bewegungsraten, Bewegungsrichtung, räumliche Ausdehnung) und dem gewählten Auswerteansatz. So spielt bei der PSI-Methode beispielsweise auch die Entfernung der PS-Punkte zu einem gewählten Referenzpunkt und die PS-Punktdichte eine zusätzliche Rolle.

Als Ergebnis einer PSI-Auswertung erhält man für jeden PS-Punkt den zeitlichen Bewegungsverlauf in LOS-Richtung zwischen der ersten und letzten Aufnahme eines Stapels von Radardaten. Jede dieser punktbezogenen Zeitreihen setzt sich aus einer Trendkomponente sowie stochastischen Schwankungen zusammen. Letztere ergeben sich durch autoregressive Prozesse (Signalschwankungen, deren Ursachen zunächst unbekannt sind), systematische und grobe Messfehler

sowie zufällige Fehler. Zufällige Fehler werden durch das Messrauschen verursacht. Aus ihnen lässt sich die innere Messgenauigkeit ableiten.

Systematische Fehler werden durch atmosphärische und topographische Einflüsse verursacht. Grobe Messfehler, wie z. B. Phasenabwicklungsfehler, können durch Modellfehler bei der PSI-Regressionsanalyse entstehen oder bei Überschreitung der maximalen Bewegungsraten wie in Kapitel 5.1 angegeben. Einige systematische Messfehler können mit der PSI-Methode, aufgrund der Auswertung langer Zeitreihen, ermittelt und weitestgehend korrigiert werden.

Die in Kapitel 5.2 ausgewerteten PS-Punkte wurden anhand folgender Kriterien und Verfahren auf grobe Messfehler (Ausreißer) überprüft und grob fehlerhafte PSI-Zeitreihen bzw. PS-Punkte aus den Ergebnisdatensätzen der ENVISAT und Radarsat-2 Auswertungen eliminiert:

- Detektion von sprunghaften Messwertänderungen in PSI-Zeitreihen aufgrund von Phasenabwicklungsfehlern nach dem von YIN et al. (2015) vorgestellten Verfahren.
- Detektion von PS-Punkten mit höheren Standardabweichungen für eine Beobachtung in LOS (oberhalb einer festgelegten Grenze) nach einer Trendermittlung mit einem bestangepassten Polynommodell für jede PSI-Zeitreihe (BUSCH & LINKE 2014; Kapitel 5.4).
- Überprüfung der räumlichen Ähnlichkeit der Ergebnisse, d. h. Bewegungen bzw. Bewegungsraten benachbarter PS-Punkte, anhand einer Clusteranalyse nach dem von XI et al. (2015) vorgestellten Verfahren und einem Clusterradius von 200 m.
- Manuelle Detektion von Ausreißern anhand einer Plausibilitätsprüfung unter Einbeziehung von Kenntnissen zum Untersuchungsraum und dem Bewegungsfeld sowie der fachlichen Expertise des Operators.

Die ENVISAT-Datenbereinigung erfolgte in der Reihenfolge der aufgelisteten Schritte, wobei im zweiten Schritt die PS-Punkte mit einer Standardabweichung größer gleich 5,346 mm (1%-Grenze) entfernt wurden. Bei der manuellen Datenbereinigung der ENVISAT-Ergebnisse, insbesondere in den Senkungsschwerpunkten, wurden u. a. die bereitgestellten Nivellementsdaten zur Überprüfung verwendet.

Für die Radarsat-2 Ergebnisse musste ein neuer Verfahrensablauf für die Datenbereinigung entwickelt werden, da hauptsächlich aufgrund der großen Datenlücke zwischen dem 12.12.2012 und 29.05.2013 (Abbildung 153) der entwickelte Sprung-Detektionsalgorithmus nach YIN et al. (2015) nur eingeschränkt funktionierte. Zunächst wurden einzelne differentielle Kurzzeit-Interferogramme (max. 72 Tage) (Abbildung 35), Ein-Jahres-Interferogramme sowie weitere Interferogramme zur Überbrückung der Zeitlücke zwischen 12/2012 und 05/2013 mittels der klassischen DInSAR-Methode berechnet.

Das differentielle Ein-Jahres-Interferogramm „12.12.2012 – 7.12.2013“ (Abbildung 36a) erwies sich als sehr gut geeignet zur Detektion von Phasenabwicklungsfehlern im nördlichen Bereich von Ibbenbüren. Dazu wurden die differentiellen Phasen räumlich abgewickelt (Abbildung 36b), mit den PSI-Ergebnissen des identischen Zeitabschnittes verglichen (Abbildung 36c) und die Differenzen beider Ergebnisse an den PS-Punkten berechnet (Abbildung 36d). Somit konnten teilweise automatisiert PS-Punkte mit Phasenabwicklungsfehlern identifiziert und eliminiert werden. Anhand der weiteren Interferogramme (Abbildung 35) wurden die Ergebnisse einiger PS-Punkte innerhalb des prognostizierten EW-Bereiches auf Plausibilität überprüft und grob fehlerhafte PS-Punkte aus dem Ergebnisdatensatz entfernt. Weitere Kenntnisse zum Untersuchungsraum und

dem Bewegungsfeld sowie die fachliche Expertise des Operators halfen bei der „manuellen“ Detektion und Elimination von Ausreißern im ersten Schritt der Radarsat-2 Datenbereinigung.

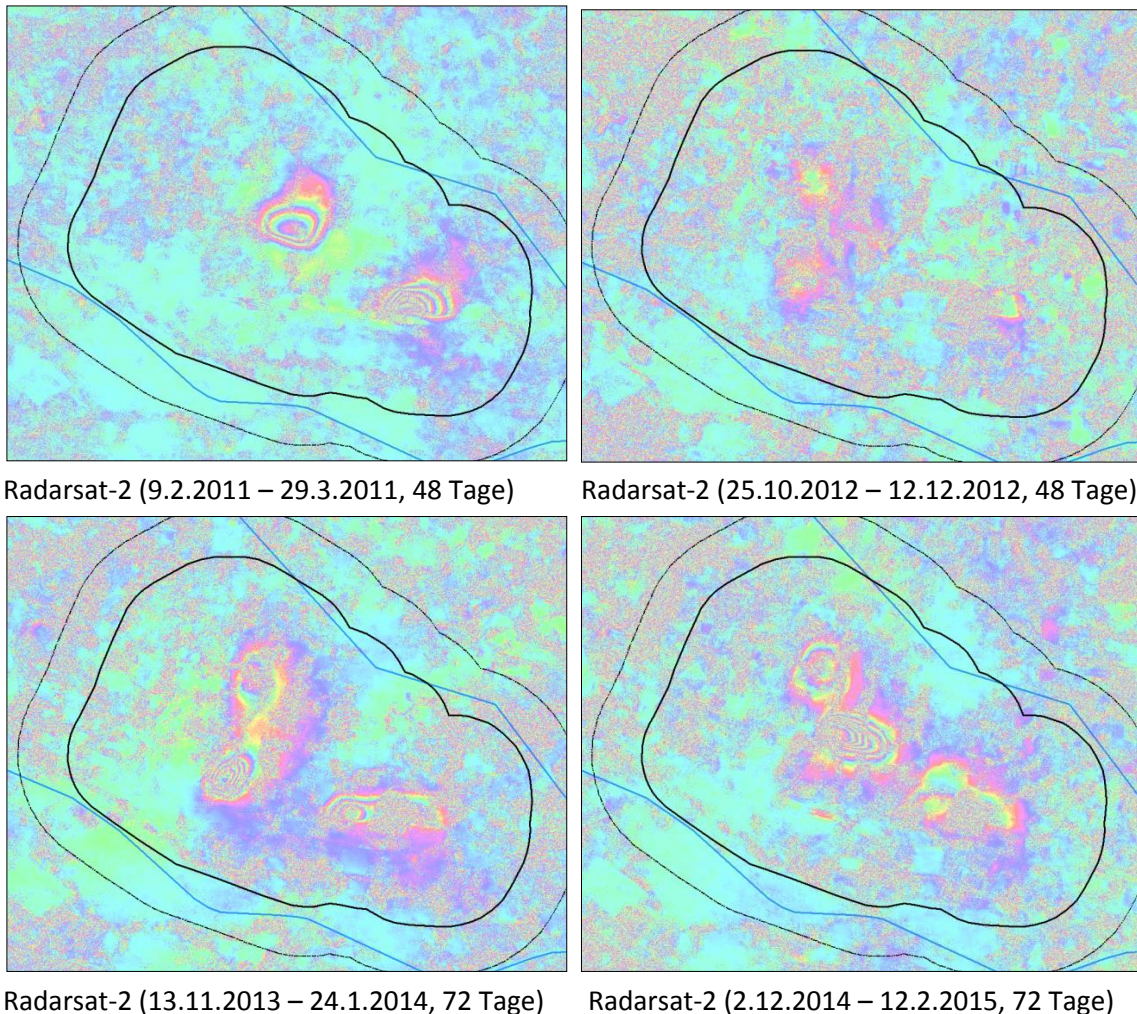


Abbildung 35: Differentielle Kurzzeit-Interferogramme, berechnet aus verschiedenen Radarsat-2 Datenpaaren; 1 Farbzyklus entspricht einer Verschiebung in LOS-Richtung von etwa 28 mm innerhalb des angegebenen Aufnahmezeitraumes

Im zweiten Schritt der Radarsat-2 Datenbereinigung wurden die nach einer Polynomausgleichung erhaltenen Standardabweichungen der Beobachtungen in LOS genutzt. Da die beiden Radarsat-2 Aufnahmen 29.5.2013 und 22.6.2013 an allen PS-Punkten systematische Fehler und damit hohe Standardabweichungen in allen PSI-Zeitreihen verursachten, mussten diese beiden Messwerte nachträglich aus allen PS- Punkt-Zeitreihen entfernt werden (Abbildung 37). Ursache dafür waren sehr starke atmosphärische Einflüsse zu beiden Aufnahmezeitpunkten. Es erwies sich als nicht sinnvoll bereits in der PSI-Auswertung, d. h. von vornherein, diese beiden Aufnahmen wegzulassen, da sie unmittelbar nach der großen zeitlichen Lücke aufgenommen worden sind und damit zu dessen Vergrößerung beigetragen hätten. Dies wiederum hätte zu einer deutlichen Zunahme von Phasenabwicklungsfehlern im Gesamtergebnis der Radarsat-2 PSI-Auswertung geführt, wie Tests gezeigt haben. Nach der Entfernung der beiden Messzeitpunkte erfolgte erneut eine Polynomausgleichung und die Berechnung der Standardabweichungen s_0 (Kapitel 5.4). Dabei konnte eine Verbesserung der mittleren Standardabweichung einer Beobachtung in LOS für den Untersuchungsraum von ca. 0,2 mm erzielt werden (Kapitel 5.6.3). Aufgrund der vielen PS-Punkte

im Ergebnis der PSI-Auswertung der räumlich höher auflösenden Multi-Look Fine Daten des Sensors Radarsat-2 wurden im zweiten Schritt der Datenbereinigung die PS-Punkte mit einer Standardabweichung größer gleich 4,684 mm automatisch entfernt. Dies entspricht 0,5% der PS-Punkte. Der letzte Datenbereinigungsschritt der Radarsat-2 Ergebnisse erfolgte mittels der Clusteranalyse.

Mit den beschriebenen Vorgehensweisen zur Datenbereinigung wurden ca. 5 % der PS-Punkte der ENVISAT-Ergebnisse und 2 % der Radarsat-2 PS-Punkte eliminiert, so dass für alle weiteren Analysen die in Tabelle 10 aufgeführte Anzahl von PS-Punkten zur Verfügung stehen.

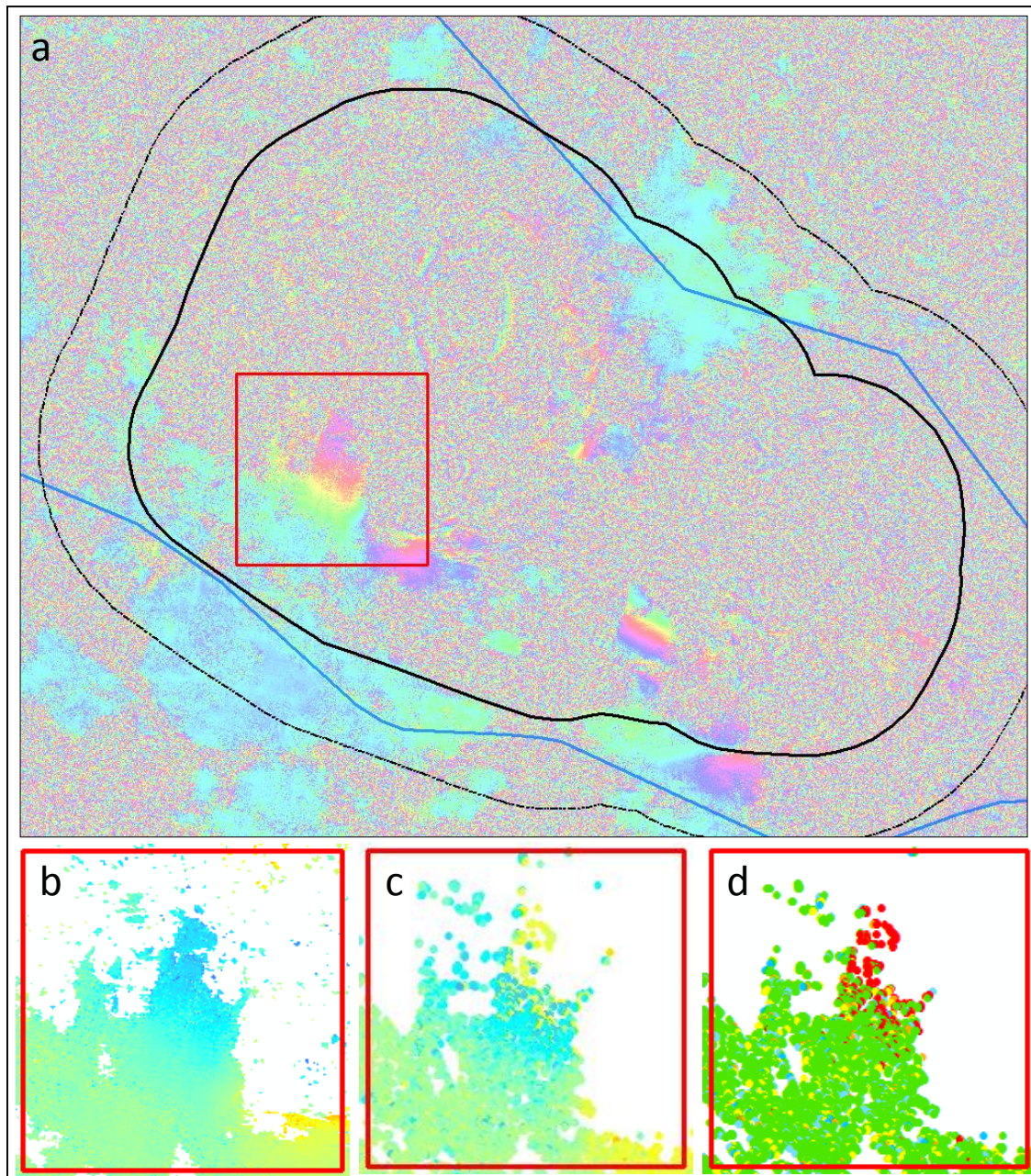


Abbildung 36: a) Differentielles Ein-Jahres-Interferogramm 12.12.2012 – 7.12.2013 mit Kennzeichnung (roter Rahmen) der räumlichen Ausschnitte in b-d; b) DInSAR-Ergebnis und c) PSI-Ergebnis (Farbskala vgl. Abbildung 43); d) Differenzen „DInSAR – PSI“ an den PS-Punkten in mm → rot [$> +25$], orange [$> +15$; $+25$], gelb [$>+7$; $+15$], grün [$- 7$; $+7$], blau [< -7]

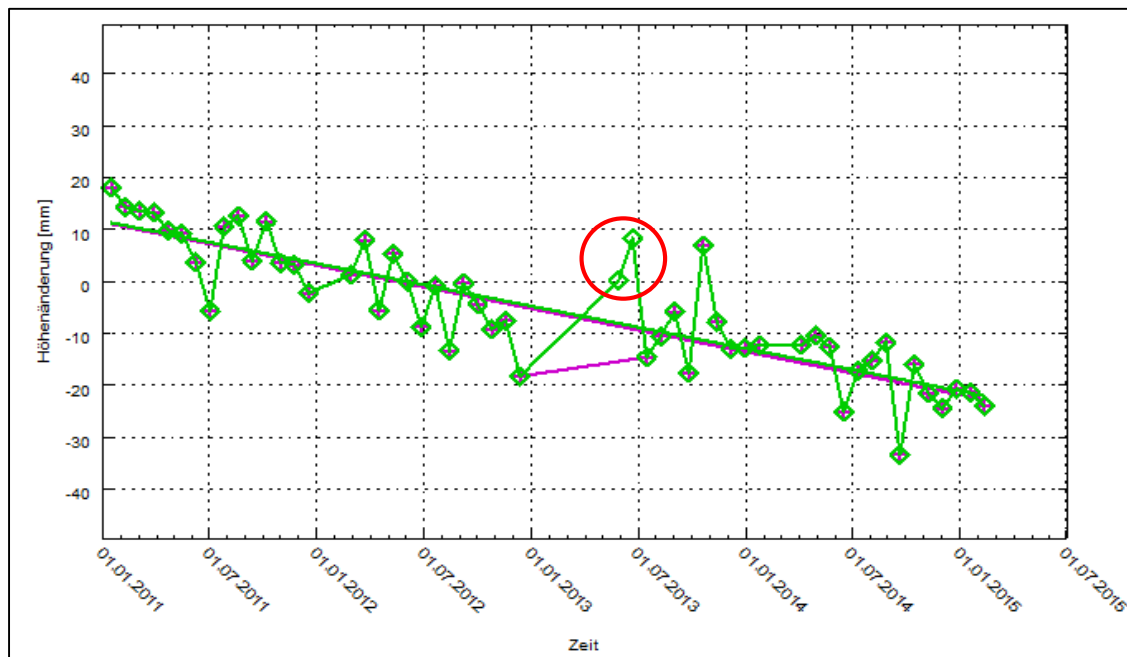


Abbildung 37: Beispielhafte PSI-Zeitreihen mit (grün, $s_0=6,55$ mm) und ohne die (magenta, $s_0=6,09$ mm) Radarsat-2 Aufnahmezeitpunkte 29.5.2013 und 22.6.2013 (roter Kreis)

Tabelle 10: Ergebnis der Datenbereinigungen für die ermittelten PS-Punkte der ENVISAT und Radarsat-2 Zeitreihen

	ENVISAT	RADARSAT-2
ANZAHL DER PS-PUNKTE <u>VOR</u> DER DATENBEREINIGUNG (EINGANGSDATEN)	29.778	242.250
ANZAHL DER ELIMINIERTEN PS-PUNKTE	1.481	4.846
ANZAHL DER PS-PUNKTE NACH DER DATENBEREINIGUNG (AUSGANGSDATEN)	28.297	237.404

5.4. Verfahren zur Bestimmung eines bestangepassten Polynom-Trendmodells für PS-Punkt-Zeitreihen

Für eine weiterführende Beurteilung der bereinigten Daten erfolgte eine statistische Analyse auf Grundlage best-angepasster Trendfunktionen für die Zeitreihen der LOS-Bewegungsdaten.

Durch das PSI-Auswerteverfahren werden zunächst lineare Bewegungsraten in LOS [mm/a] abgeleitet. Ein solches Ergebnis einer der PSI-Auswertung zugrundeliegenden linearen Regressionsmodells beschreibt jedoch in vielen Fällen nicht genau genug den tatsächlichen zeitlichen Verlauf der Bodenbewegungen. Hier bietet ein allgemeines Polynommodell deutliche Verbesserungen, da in der Praxis Bodenbewegungen in Abhängigkeit von der zeitlichen Variabilität ihrer Ursachen häufig nichtlinear ab- oder zunehmen. Daher ist die Ermittlung des „richtigen“ Polynomgrades zur Beschreibung des zeitlichen Bodenbewegungstrends von großer Bedeutung. Zur automatisierten Ermittlung eines best-angepassten Polynom-Trendmodells für die massenweise vorliegenden PSI-Zeitreihen wurde deshalb ein Programm entwickelt, dessen Anwendung und Ergebnisse z. B. in den Kapiteln 5.6.1 und 5.6.2 beschrieben werden.

Bei Bodenbewegungen, die durch verschiedene geogene und anthropogene Ursachen hervorgerufen werden, können in Abhängigkeit vom Betrachtungszeitraum zeitlich sowohl lineare Bodenbewegungstrends auftreten als auch Trends, die besser mit einem Polynom höherer Ordnung als 1 (= Gerade) beschrieben werden. Beispiele hierfür sind das nichtlineare Senkungsverhalten nach Einstellung bergbaulicher Aktivitäten oder die Umkehr des Senkungstrends in einen Hebungstrend z. B. infolge der Einstellung der Grubenwasserhaltung. Ziel dieser am Institut für Geotechnik und Markscheidewesen der TU Clausthal (IGMC) durchgeführten Entwicklung war es deshalb, automatisiert für jeden der im Rahmen einer PSI-Auswertung erhaltenen PS-Punkte aus der Zeitreihe seiner Bewegungen in LOS-Richtung oder daraus abgeleiteten Höhenänderungen den Polynomgrad für die statistisch optimale Anpassung zu ermitteln. Hierzu wurde auf das bewährte Modell orthogonaler Polynome zurückgegriffen und zur Parameterschätzung die Methode der kleinsten Quadrate verwendet. Einzelheiten zur Theorie sowie der softwaretechnischen Umsetzung sind der Veröffentlichung (BUSCH & LINKE 2014) zu entnehmen. Das Ergebnis einer solchen Trendmodellierung ist exemplarisch für eine Zeitreihe mit Höhenänderungen in Abbildung 38 dargestellt.

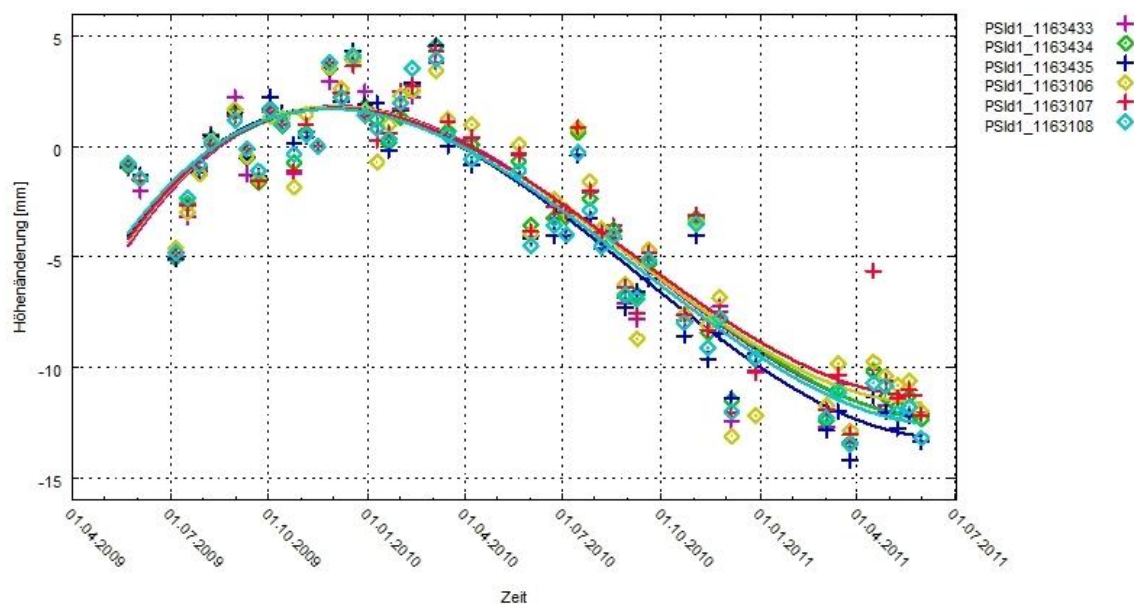


Abbildung 38: Ausgleichende Polynome 3. Grades für ausgewählte PS-Punkte und deren Höhenänderungen (BUSCH & LINKE 2014)

Neben der graphischen Darstellung des Polynoms erhält man die folgenden weiteren Ergebnisse, die in einer Datei gespeichert werden:

- den Polynomgrad, die Polynomkoeffizienten und ihre Standardabweichungen,
- die Standardabweichung der Gewichtseinheit s_0 der einzelnen Beobachtung (z. B. LOS-Bewegung oder Höhenänderung),
- im Falle eines linearen Polynoms die Bewegungsrate (in LOS oder Höhenänderungsrate) in mm/a und ihre Standardabweichung und
- die Verbesserungen v .

Dadurch ist es möglich, die Qualität der Daten zu beurteilen. Die Standardabweichung der Gewichtseinheit s_0 repräsentiert die Standardabweichung eines einzelnen, mit der PSI-Methode

ermittelten Beobachtungswertes. Diese ist u. a. vom jeweiligen Radarsensor abhängig. Als ein weiteres Ergebnis werden auch die Standardabweichungen der ermittelten Polynomkoeffizienten erhalten. So ist beispielsweise die Standardabweichung der (linearen) Bewegungsrate ein Maß für die Unsicherheit der Steigung einer Regressionsgeraden.

Ebenfalls kann die Standardabweichung ausgeglichener Beobachtungen (= Funktionswerte) berechnet werden, wie sie für weiterführende Signifikanzermittlungen von Interesse sind (z. B. Kapitel 6.4).

Die Ergebnisse der Polynomausgleichung sind Grundlage für:

- die Suche nach grob-fehlerhaften PSI-Zeitreihen (Kapitel 5.3),
- die Charakterisierung des Bodenbewegungsverlaufs, z. B. durch den Polynomgrad (Kapitel 5.6.1 ff),
- die Berechnung von Höhenänderungsdifferenzen zwischen zwei beliebigen Zeitpunkten mittels der Funktionswerte (Kapitel 6.2.2) und
- Genauigkeits- und Signifikanzuntersuchungen (Kapitel 5.6.1).

5.5. Verfahren zur Flächeninterpolation für PS-Punkt-Daten und zur Rasterdatenerzeugung

Unter der üblichen Annahme, dass eine an einem Punkt gewonnene Information auch repräsentativ für einen gewissen Umkreis um diesen Punkt ist, wurde für verschiedene flächenhafte Anwendungen und Darstellungen im Gutachten die IDW-Interpolationsmethode (IDW: Inverse Distance Weighting), wie sie als Funktion in dem verwendeten Geoinformationssystem ArcGIS zur Verfügung steht, angewendet. Als Interpolationsradius wurde ein Wert von 200 m gewählt.

Die IDW-Interpolationsmethode wurde im Gutachten im Rahmen der Umwandlung von Vektordaten (z. B. punktbezogener LOS- und Höhenänderungsdaten) in Rasterdaten, unter Anwendung gleicher Ergebnis-Parameter (z. B. Startkoordinate, Zellgröße 5m) genutzt.

Diese so einheitlich erzeugten Rasterdaten dienen z. B. der Ableitung von Gesamthöhenänderungen (Kapitel 6.2.2) oder sind Grundlage bei der Ableitung von Höhenänderungswerten entlang einer gewählten Profilsur (Kapitel 9.3) oder der Konstruktion von Isolinen.

5.6. Ergebnisse der PSI-Auswertungen und statistischen Analysen der Zeitreihen von ENVISAT-Daten (2003 – 2010) und Radarsat-2-Daten (2011 – 2015)

Um einen ersten Vergleich der Ergebnisse (die aus unterschiedlichen Satellitendaten und für unterschiedliche Zeiträume ermittelt wurden) zu ermöglichen, werden in Kapitel 5.6.1 und 5.6.2 die nach der Datenbereinigung (Kapitel 5.3) mittels PSI-Auswerteverfahren ermittelten linearen Bewegungsraten in LOS-Richtung dargestellt.

Einer PSI-Auswertung (Kapitel 5.1) liegt ein lineares Regressionsmodell zugrunde. Die hiermit ermittelten linearen LOS-Bewegungsraten [mm/a] der PSI-Zeitreihen sind geeignet, um einen vergleichenden Überblick über die eingetretenen Bewegungen in LOS-Richtung trotz der unterschiedlich langen Zeitreihen der ENVISAT-Daten (ca. 7 Jahre) bzw. der Radarsat-2-Daten (4 Jahre) zu erhalten.

5.6.1. ENVISAT-Ergebnisse (Dezember 2003 – Oktober 2010)

■ BEWEGUNGSRATEN IN LOS-RICHTUNG

In Abbildung 40 sind die Bewegungsraten in LOS [mm/a] für den Zeitraum 18.12.2003 bis 7.10.2010 der ENVISAT PSI-Zeitreihen dargestellt. Diese Bewegungsraten in Abbildung 40 und Abbildung 43 (der Radarsat-2 Ergebnisse) werden im Rahmen der PSI-Auswertungen mit der Gamma-Software standardmäßig, basierend auf einem linearen Modell für alle Zeitreihen, bestimmt und dienen hier nur einem ersten Überblick über das Bodenbewegungsgeschehen. Da der Radarsensor von einem wahren Verschiebungsvektor Δr (roter Vektor in Abbildung 39) den Bewegungsanteil in LOS-Richtung misst (blauen LOS-Vektor in Abbildung 39), ist die Richtung der tatsächlichen Bewegung unbekannt. Negative LOS-Bewegungen in Abbildung 40 und Abbildung 43 bedeuten, dass sich ein PS-Punkt weg vom Sensor bewegt, der sich wiederum selbst ca. 100-110° (Tabelle 7) in östlicher Richtung vom Beobachtungsobjekt in einer Flughöhe von ca. 800 km befindet. Positive LOS-Bewegungen (blaue PS-Punkte) in Abbildung 40 und Abbildung 43 bedeuten, dass sich ein PS-Punkt auf den Sensor zu bewegt, d. h. von West nach Ost verschiebt, wobei unbekannt ist, ob er sich dabei horizontal und/oder vertikal bewegt.

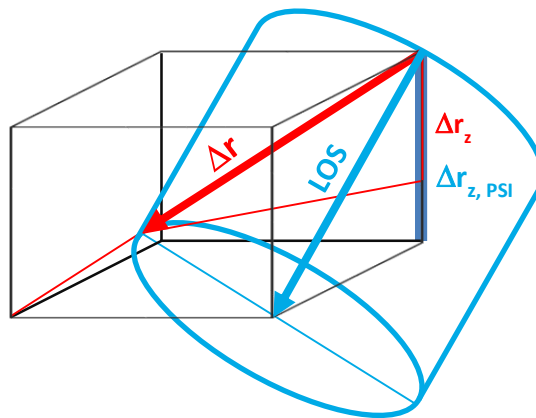


Abbildung 39: Darstellung eines wahren (realen) Verschiebungsvektors Δr (roter Vektor) und die von einem Sensor entsprechend gemessenen Verschiebung in LOS-Richtung (blauer Vektor)

■ ERGEBNISSE DER POLYNOMAUSGLEICHUNG

In Abbildung 41 sind die mittels der Polynomausgleichung ermittelten Polynomgrade für die ENVISAT PSI-Zeitreihen dargestellt und in Abbildung 42 die mittels der Polynomausgleichung ermittelten Standardabweichungen einer Beobachtung in LOS-Richtung.

5.6.2. Radarsat-2-Ergebnisse (Januar 2011 – Februar 2015)

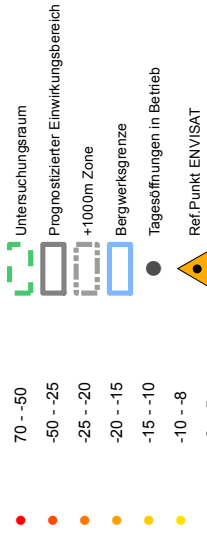
■ BEWEGUNGSRATEN IN LOS-RICHTUNG

In Abbildung 43 sind die Bewegungsraten in LOS [mm/a] für den Zeitraum 16.01.2011 bis 12.02.2015 der Radarsat-2 PSI-Zeitreihen dargestellt.



Legende

LOS-Bewegungsraten [mm/a]

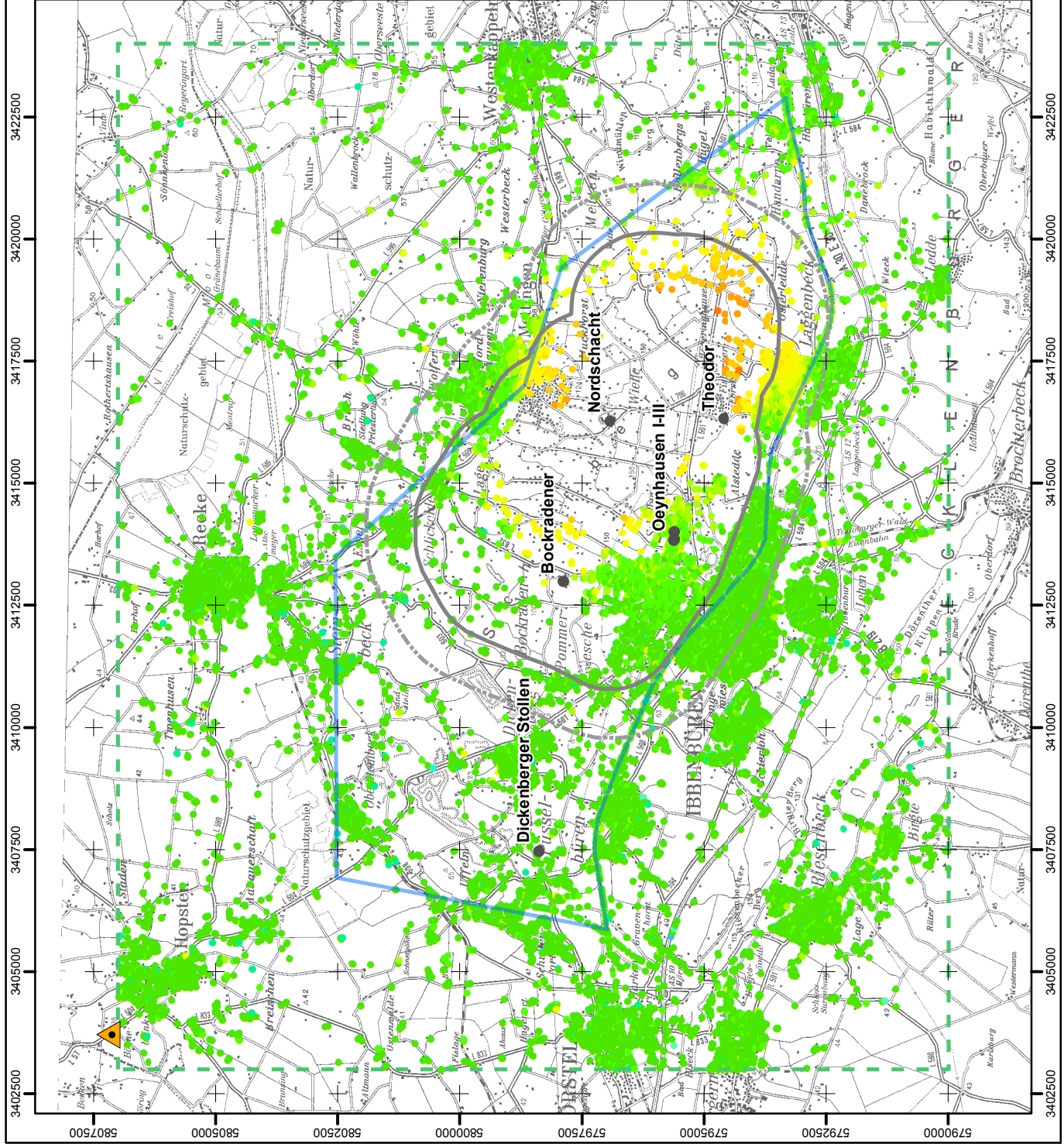


PSI-Ergebnis
Bergwerksgrenze, EW-Bereiche und Tagesöffnungen
TK100

© IGMC, 2015
© Bezirksregierung Arnsberg, 2015
© Geobasis NRW, 2012



Untersuchungsgebiet:	Bergwerk Ibbenbüren
Titel:	Bewegungsraten in LOS [mm/a] der ENVISAT PSI-Zeitreihen (18.12.2003 - 07.10.2010)
Analyse von Senkungsscheinungen außerhalb prognostizierter Einwirkungsbereiche aktiv und in jüngerer Zeit stillgelegter Steinkohlengrubenwerke der RAG AG Im Auftrag der Bezirksregierung Arnsberg, Abteilung Bergbau und Energie in NRW	
Bearbeitung:	TU Clausthal
Datum:	03.12.2015
Abbildung:	40



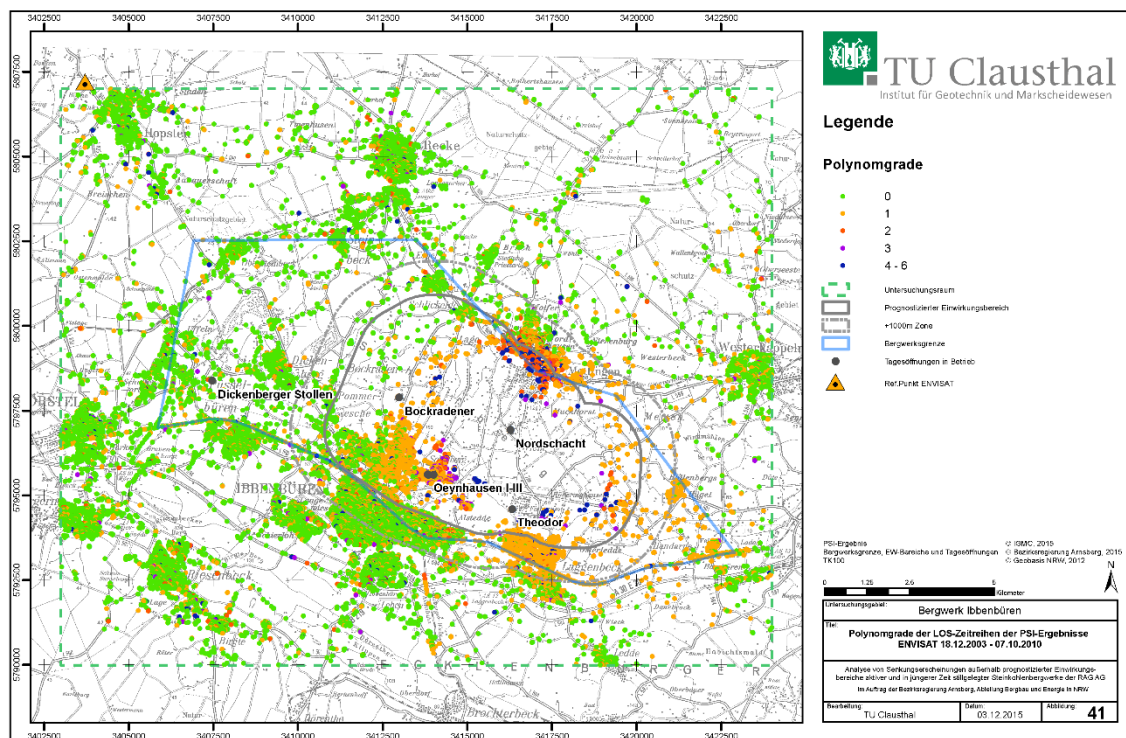


Abbildung 41: Polynomgrade der ENVISAT LOS-Zeitreihen der PS-Punkte (18.12.2003 – 07.10.2010)

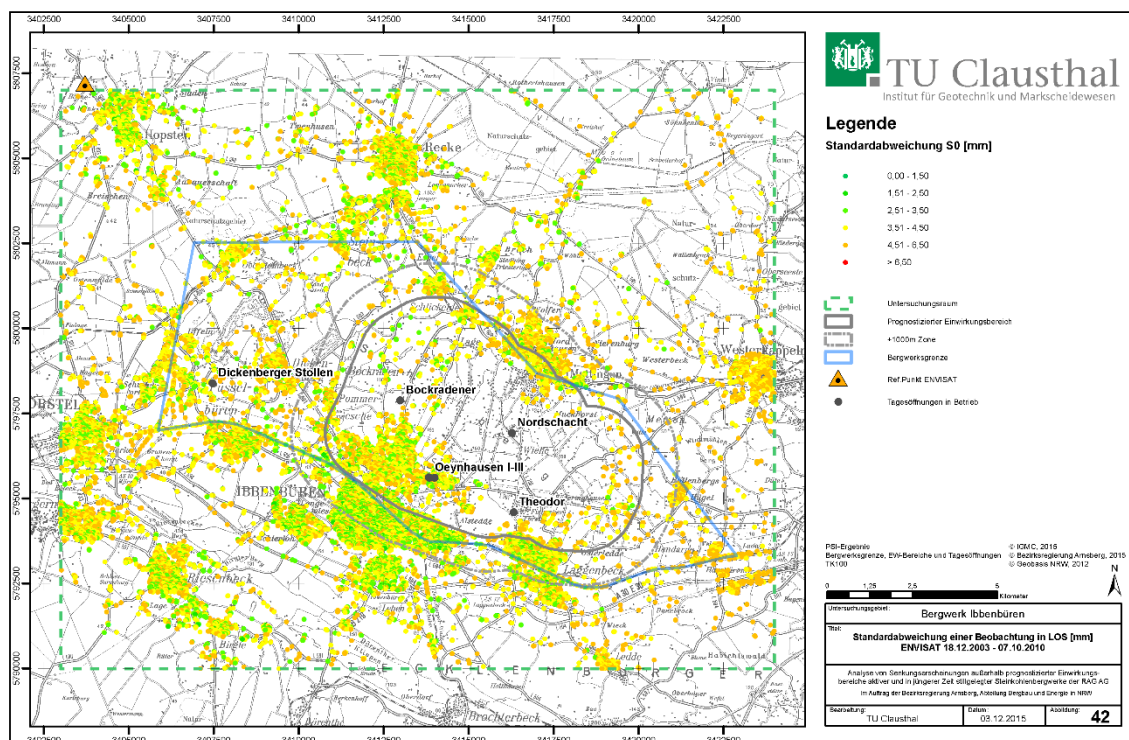
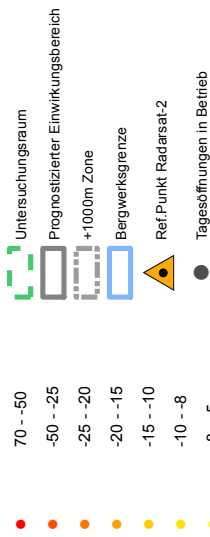


Abbildung 42: Standardabweichungen einer Beobachtung in LOS der ENVISAT PS-Punkte (18.12.2003 – 07.10.2010)



Legende

LOS-Bewegungsraten [mm/a]

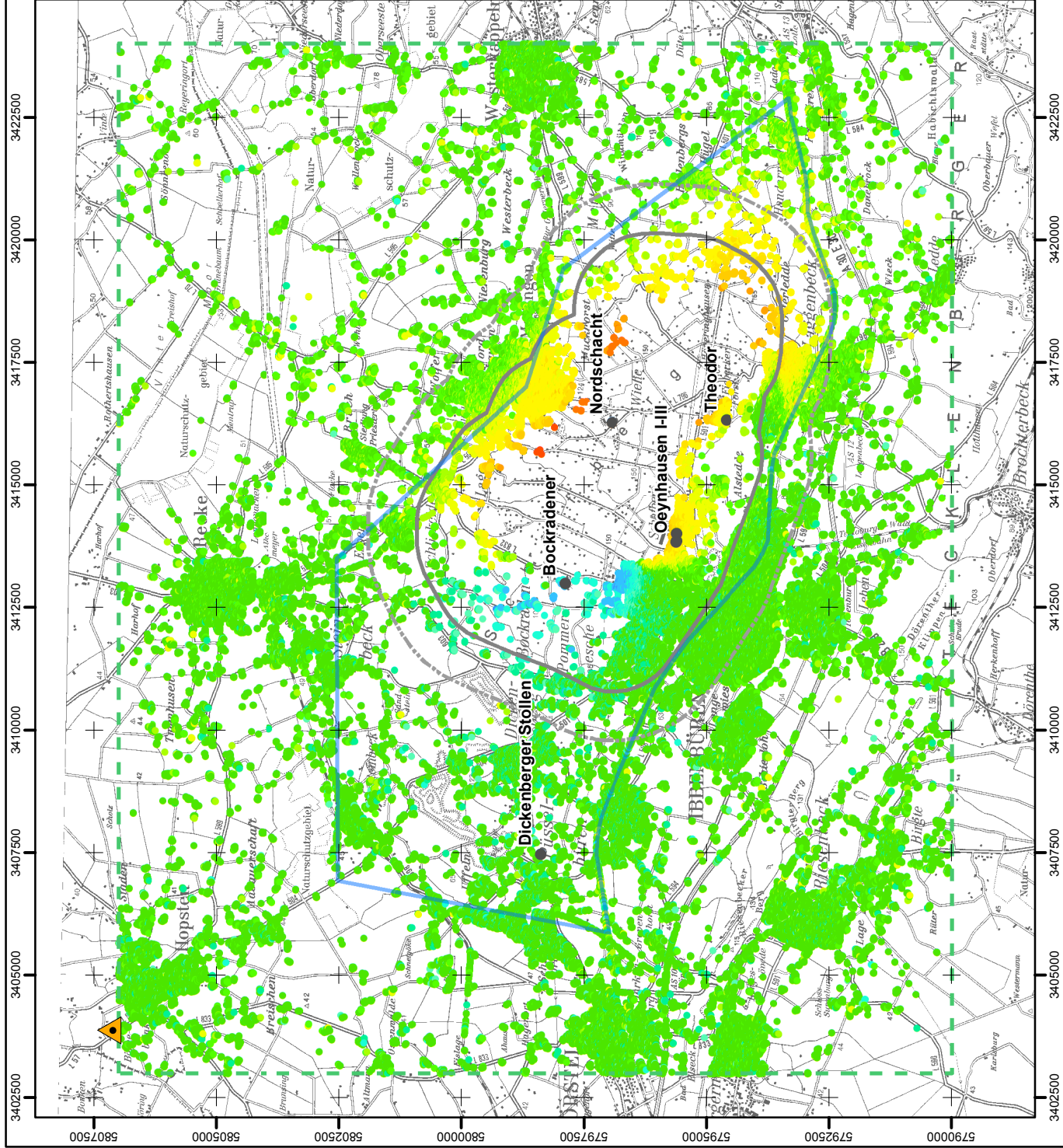


PSI-Ergebnis
Bergwerksgrenze, EW-Bereiche und Tagesöffnungen
TK100

© IGM, 2015
© Bezirksregierung Arnsberg, 2015
© Geobasis NRW, 2012



Untersuchungsgebiet:	Bergwerk Ibbenbüren
Titel:	Bewegungsraten in LOS [mm/a] der Radarsat-2 PSI-Zeitreihen (16.01.2011 - 12.02.2015)
Analyse von Senkungsscheinungen außerhalb prognostizierter Einwirkungsbereiche aktiv und in jüngerer Zeit stillgelegter Steinkohlengrubenwerke der RAG AG Im Auftrag der Bezirksregierung Arnsberg, Abteilung Bergbau und Energie in NRW	
Bearbeitung:	TU Clausthal
Datum:	03.12.2015
Abbildung:	43



■ ERGEBNISSE DER POLYNOMAUSGLEICHUNG

In Abbildung 44 sind die mithilfe der Polynomausgleichung ermittelten Polynomgrade sowie in Abbildung 45 die ermittelten Standardabweichungen einer Beobachtung in LOS-Richtung für die Radarsat-2 PSI-Zeitreihen dargestellt.

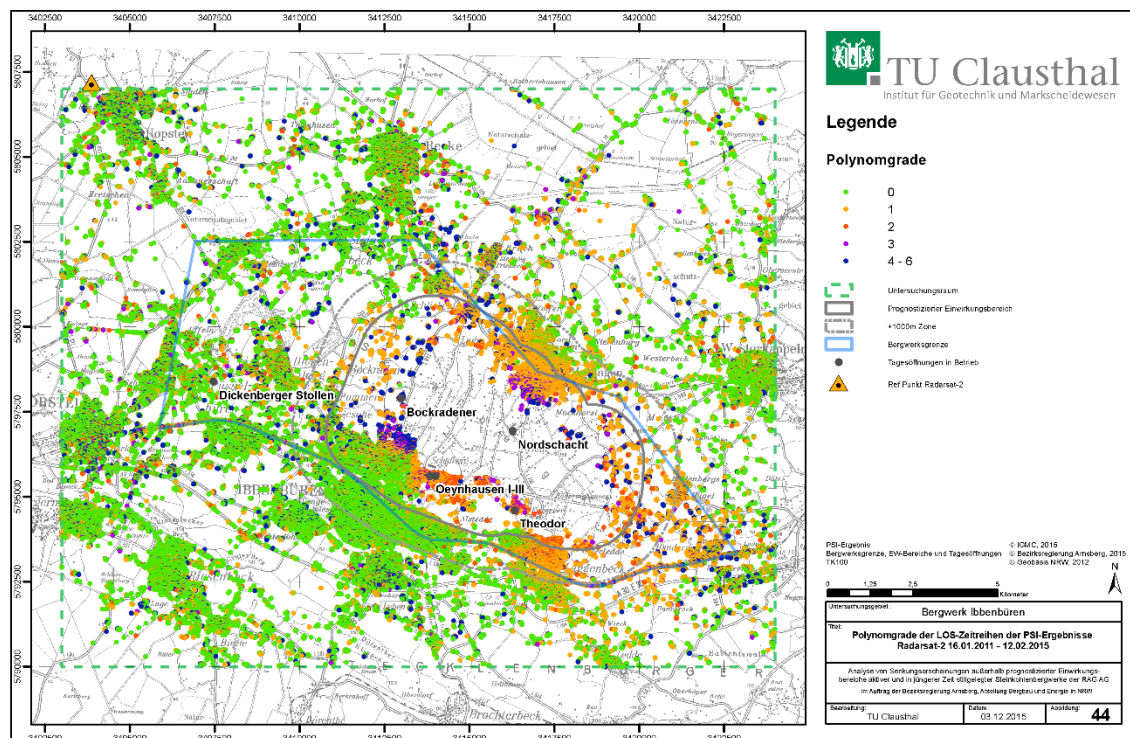


Abbildung 44: Polynomgrade der Radarsat-2 LOS-Zeitreihen der PS-Punkte (16.01.2011 – 12.02.2015)

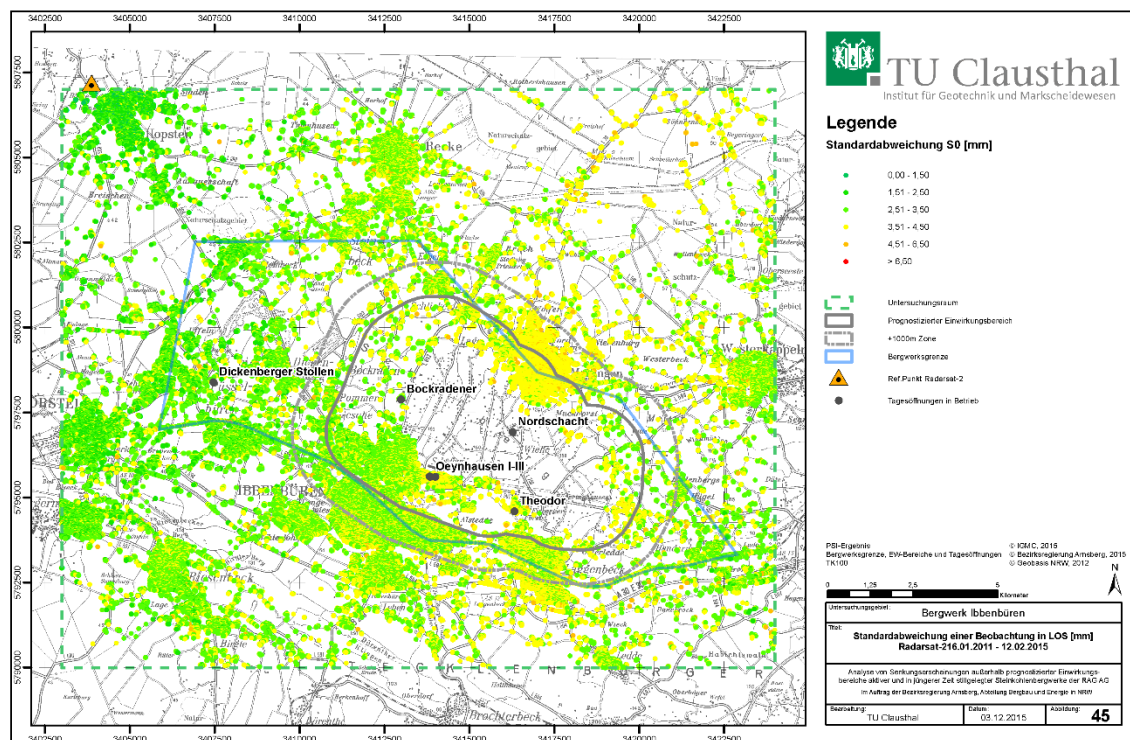


Abbildung 45: Standardabweichungen einer Beobachtung in LOS der Radarsat-2 PS-Punkte (16.01.2011 – 12.02.2015)

5.6.3. Bewertung der ENVISAT- und Radarsat-2-Ergebnisse

Mit Hilfe der Ergebnisse der Polynomausgleichungen der ENVISAT- und Radarsat-2-Zeitreihen kann eine erste vergleichende Bewertung erfolgen. So ermöglichen die ermittelten Polynomgrade (Tabelle 11) einen Überblick über das Bodenbewegungsverhalten im Untersuchungsgebiet innerhalb der Zeiträume der beiden aufgezeichneten Datensätze.

Die in Abbildung 41 und Abbildung 44 in ihrer räumlichen Verteilung dargestellten Polynomgrade sowie zusammengefasst in Tabelle 11 zeigen, dass der Bodenbewegungstrend für 66 % (ENVISAT) bzw. 62 % (Radarsat-2) der PS-Punkt-Zeitreihen im Untersuchungsraum am besten mit dem Polynomgrad 0 beschrieben werden kann. Dies bedeutet, dass mehr als 60 % aller ermittelten PS-Punkte (mit einem Polynomgrad 0, in den Abbildungen grün dargestellt) keine signifikanten Bodenbewegungen in dem jeweiligen Zeitraum (2003 – 2010 bzw. 2011 – 2015) aufweisen. Da die Bodenauflösung der ENVISAT-Aufnahmen geringer ist als die der Radarsat-2-Aufnahmen ist der Vergleich der absoluten Zahlen in Tabelle 11 ungeeignet zur Bewertung, inwieweit sich das Bodenbewegungsgebiet im Radarsat-2 Zeitabschnitt verändert hat. Ein Vergleich der Abbildung 41 und Abbildung 44 macht jedoch deutlich, dass gegenüber dem Zeitraum 2003 - 2010 im Zeitraum 2011 - 2015 der Anteil von Gebieten mit Bodenbewegungen leicht zugenommen hat. Dies ist auch anhand der LOS-Bewegungsraten in Abbildung 40 und Abbildung 43 erkennbar.

Tabelle 11: Ermittelte Polynomgrade der PSI-Zeitreihen (LOS-Bewegungen)

POLYNOMGRAD	0	1	2	3	4	5	6
ENVISAT (Absolute Anzahl der PS-Punkte)	18824	7476	982	442	346	141	86
Prozentuale Anzahl	66,5%	26,4%	3,5%	1,6%	1,2%	0,5%	0,3%
Radarsat-2 (Absolute Anzahl der PS-Punkte)	148103	55836	11713	4469	3020	1635	12628
Prozentuale Anzahl	62,4%	23,5%	4,9%	1,9%	1,3%	0,7%	5,3%

Ein Vergleich der Zahlenangaben für Polynomgrade ≥ 1 in Tabelle 11 zeigt deutlich, dass die meisten PS-Punkte mit Bodenbewegungen einen linearen Bewegungstrend (Polynomgrad 1) aufweisen, also eine konstante Bewegungsgeschwindigkeit in LOS-Richtung über den jeweiligen Auswertez Zeitraum. Höhere Polynomgrade als 1 deuten auf eine Zu- oder Abnahme der LOS-Bewegungsgeschwindigkeit über den jeweiligen Zeitraum hin. Dies trifft für 7,1 % aller PS-Punkte der ENVISAT-Zeitreihe sowie für 14,1 % aller Radarsat-2 PS-Punkte zu (Tabelle 11). Ein Vergleich der räumlichen Verteilung dieser Punkte in Abbildung 41 und Abbildung 44 zeigt, dass solche Punkte in den Bodenbewegungsschwerpunkten und vor allem im Umfeld des prognostizierten Nullrandes zu finden sind. Auffallend ist die u. a. lokale Anhäufung solcher Punkte im nördlichen Bereich des prognostizierten Nullrandes der ENVISAT PSI-Zeitreihen (Abbildung 41) sowie im westlichen und südwestlichen Bereich bei den Radarsat-2 Zeitreihen (Abbildung 44). Hier treten vermehrt Abweichungen in den LOS-Bewegungsraten auf, was vermutlich in direktem Zusammenhang mit der Dynamik der Abbautätigkeiten steht, auf die in Kapitel 9.3 näher eingegangen wird. Ein Vergleich der in Abbildung 40 und Abbildung 43 in gelben und roten Farbtönen dargestellten LOS-Bewegungsraten deutet auf eine Zunahme der Bewegungen in vielen Bereichen im Radarsat-2 Zeitraum hin.

Die mittels der Polynomausgleichungen der ENVISAT- und Radarsat-2 PSI-Zeitreihen ebenfalls abgeleiteten Standardabweichungen s_0 einer Beobachtung in LOS (Abbildung 42, Abbildung 45 und Tabelle 12) sind ein Maß für die erreichte Messgenauigkeit und eine Grundlage für Signifikanzbetrachtungen. Die Ergebnisse in Abbildung 45 und Tabelle 12 lassen den Schluss zu, dass die Standardabweichungen (die sog. innere Messgenauigkeit) der mit den Radarsat-2-Daten ermittelten Bodenbewegungen etwas besser sind als die mittels der ENVISAT-Daten bestimmten. So sind alle in Tabelle 12 aufgeführten Modal-, Median- und Mittelwerte für die Standardabweichungen einer LOS-Beobachtung von Radarsat-2 etwas kleiner. Die Genauigkeit einer LOS-Bewegung (für diesen Untersuchungsraum) kann somit für ENVISAT-Daten mit etwa 3,9 mm und für Radarsat-2-Daten mit etwa 3,2 mm angegeben werden.

Tabelle 12: Statistische Parameter (gerundet) der Standardabweichungen s_0 einer Bewegung in LOS

	ENVISAT	RADARSAT-2
Anzahl der PS-Punkte	28.297	237.404
Modalwert von s_0 [mm]	3,9	3,1
Median von s_0 [mm]	3,9	3,2
Mittelwert von s_0 [mm]	3,9	3,2

Neben den „Durchschnittswerten“ in Tabelle 12 zeigen die Histogramme in Abbildung 46 zusätzlich, dass jeweils ca. 24 % aller PSI-Zeitreihen Standardabweichungen größer als $s_0 = 4,5$ mm bei den ENVISAT-Ergebnissen aufweisen und bei Radarsat-2 ca. 20% größer als $s_0 = 3,75$ mm.

Die räumliche Verteilung der ermittelten Standardabweichungen (Abbildung 42 und Abbildung 45) ist für beide Auswertungen unterschiedlich und sicherlich auch eine Folge unterschiedlichen Bodenbewegungsverhaltens in den beiden Zeiträumen sowie der Unterschiede in den Sensorspezifika.

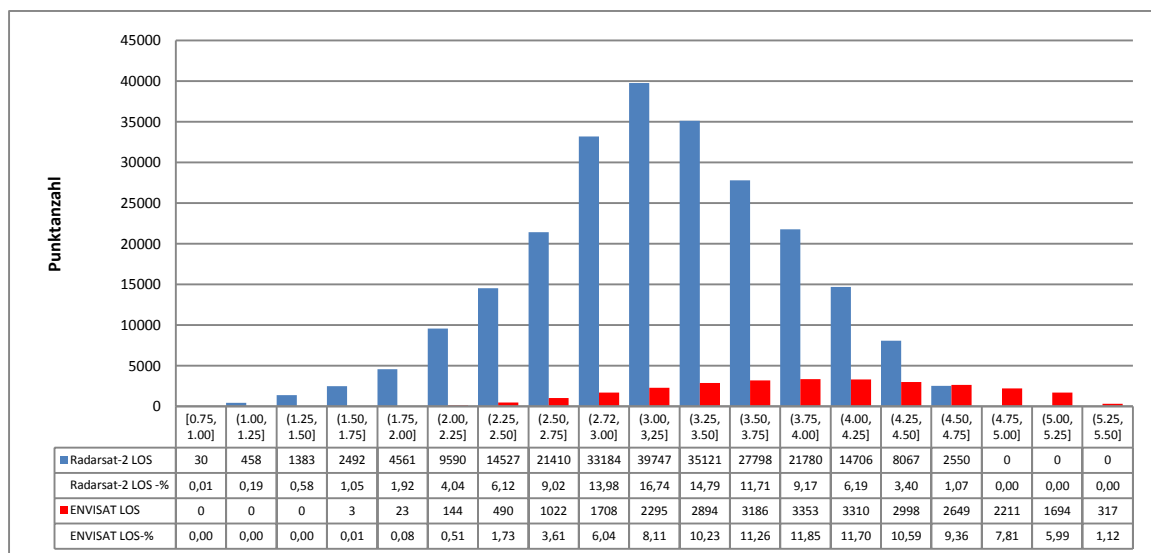


Abbildung 46: Histogramme der Standardabweichungen s_0 einer Beobachtung in LOS-Richtung für die PSI-Zeitreihen ENVISAT (rote Balken) und Radarsat-2 (blaue Balken)

Die in Abbildung 40 und Abbildung 43 dargestellten Bewegungsraten zeigen deutliche Unterschiede in der räumlichen Ausdehnung der Bodenbewegungsbereiche für die Zeiträume 12/2003

bis 10/2010 (ENVISAT) und 01/2011 bis 02/2015 (Radarsat-2), insbesondere im Norden (Stadt Mettingen), aber auch im Westen/Südwesten (Bockradener Graben und Stadt Ibbenbüren) des prognostizierten EW-Bereiches, wo im Radarsat-2 Zeitraum auch positive Bewegungen in LOS-Richtung, d. h. auf den Sensor zu bewegend, detektiert wurden.

Die größten erfassten LOS-Bewegungsraten außerhalb des prognostizierten EW-Bereiches des BW Ibbenbüren betragen in den PSI-Auswertungen der ENVISAT-Daten -10,5 mm/a und -13,1 mm/a in den PSI-Auswertungen von Radarsat-2. Diese größten LOS-Bewegungsraten treten in beiden Zeitreihen am südlichen Nulllinienrand im nordöstlichen Bereich von Ibbenbüren-Laggenbeck auf.

5.7. Generalisierte Abgrenzung von Bodenbewegungsgebieten auf Grundlage flächeninterpolierter LOS-Daten

Die abgeleiteten Bewegungen bzw. Bewegungsraten in LOS-Richtung (Abbildung 40 und Abbildung 43) zeigen deutlich Gebiete, in denen im Zeitraum 12/2003-10/2010 und 01/2011-02/2015 Bodenbewegungen (unabhängig von ihrer Ursache) aufgetreten sind, auch wenn aus diesen Daten die tatsächliche Größe der einzelnen räumlichen Bodenbewegungskomponenten (Horizontalverschiebung und Höhenänderung) in der Realität nicht ermittelt werden kann. Die ermittelten Polynomgrade (Abbildung 41 und Abbildung 44) verweisen jedoch auf statistisch signifikante Bewegungen in LOS-Richtung.

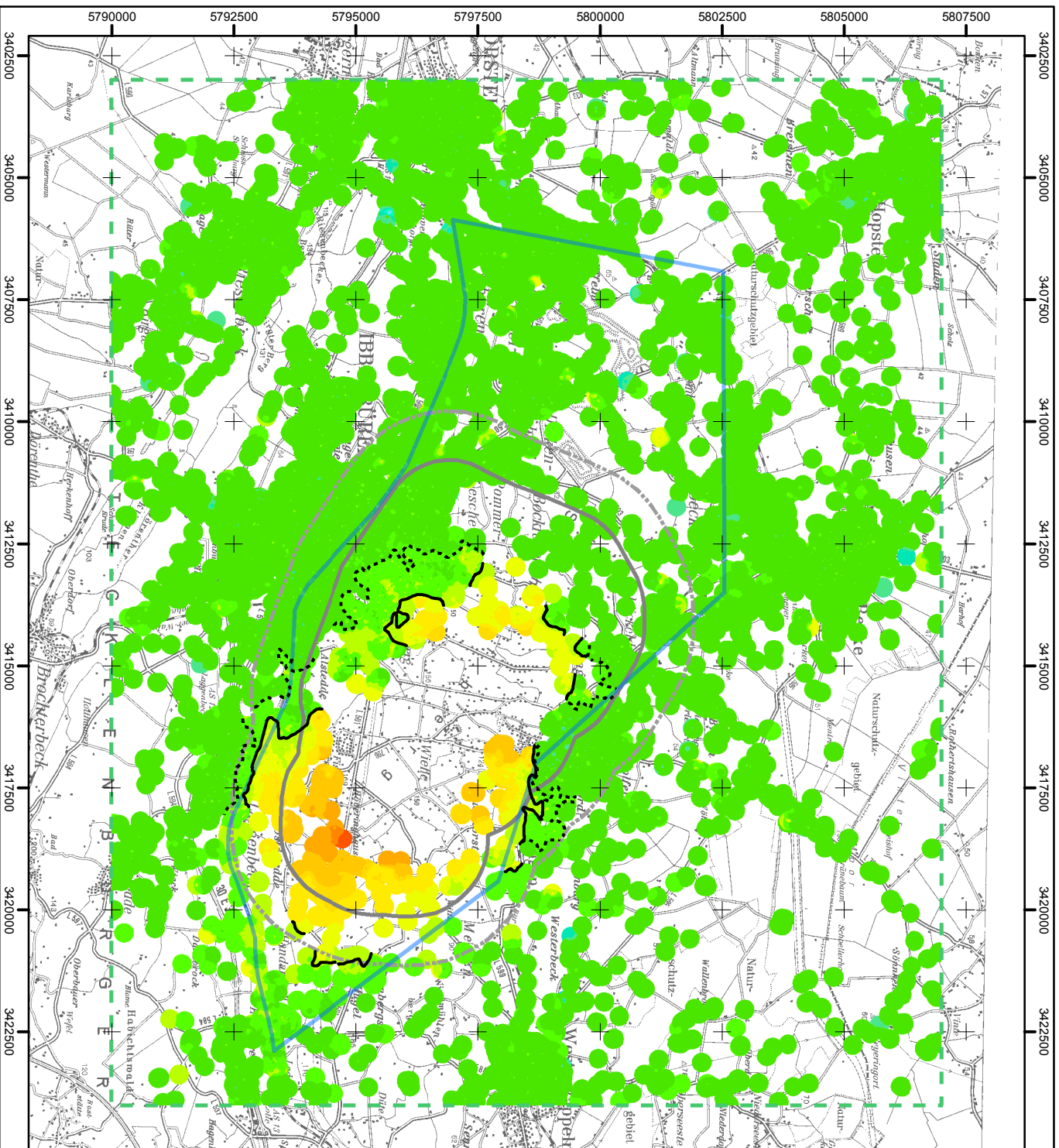
Auch wenn die Abgrenzung von signifikanten Höhenänderungsbereichen im Mittelpunkt des Gutachtens steht, liefern die LOS-Daten zusätzliche Informationen über Gebiete, in denen Bodenbewegungen aufgetreten sein müssten. In Abbildung 47 ist deshalb das Ergebnis eines Versuchs einer automatischen Abgrenzung des Bodenbewegungsgebietes für den ENVISAT-Zeitraum 12/2008 - 10/2010 dargestellt. Die Berechnung erfolgte anhand der Funktionswerte der ermittelten best-angepassten Polynome für jeden PS-Punkt, einer anschließenden IDW-Interpolation, wie sie im Kapitel 5.5 kurz erläutert ist, sowie der Ableitung von Linien gleicher LOS-Bewegungen.

Die Abgrenzung von Gebieten mit LOS-Bewegungen für den Zeitraum von etwa 2 Jahren (12/2008 - 10/2010) soll mit den Isolinien -2 mm und -4 mm in Abbildung 47 verdeutlicht werden. Im gesamten östlichen Bereich reicht das Bewegungsgebiet über den prognostizierten EW-Bereich des RBP heraus.

Wie für den ENVISAT-Zeitraum, wurde auch versucht, Bewegungsgebiete für den Auswertzeitraum von Radarsat-2 zu ermitteln. Die Abgrenzung von Gebieten mit LOS-Bewegungen für den Zeitraum von über 4 Jahren (01/2011-02/2015) soll anhand von Isolinien -4 mm und -8 mm in Abbildung 48 verdeutlicht werden. Auch in diesem Zeitraum reicht das Bewegungsgebiet im gesamten östlichen Bereich über den prognostizierten EW-Bereich des RBP heraus, jedoch deutlich weiter als im ENVISAT-Zeitraum. Zusätzlich sind auch im nördlichen Bereich weiterreichende Bewegungen erkennbar.

Die im Westen für den Radarsat-2 Zeitraum abgeleiteten positiven LOS-Bewegungen reichen ebenfalls leicht über den prognostizierten EW-Bereich des RBP hinaus, wobei nur wenige PS-Punkte in diesem Bereich für die Interpolation zur Verfügung standen (Abbildung 43) und eine automatische Abgrenzung auch deshalb dort nicht möglich ist. Somit erfolgte im Westen des EW-Bereiches eine manuell erzeugte, generalisierte Abgrenzung des LOS-Bewegungsgebietes.

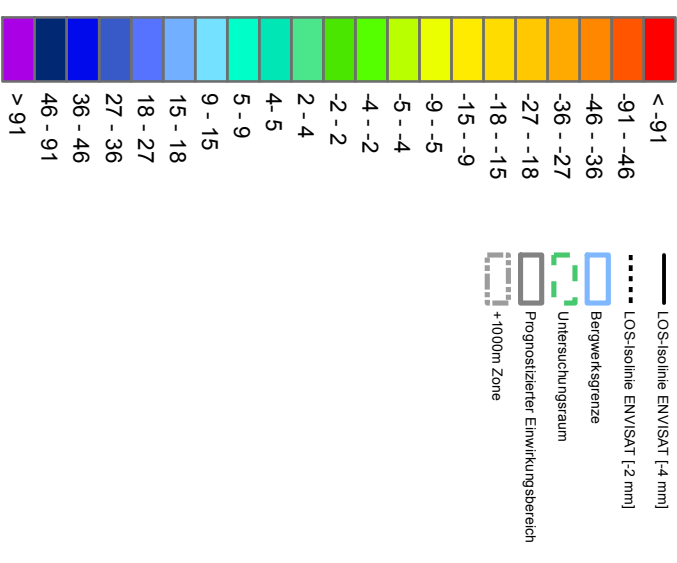
Auf die abgegrenzten LOS-Bewegungsbereiche wird nochmals im Kapitel 6.4 im Zusammenhang mit den abgeleiteten Höhenänderungen eingegangen.



TU Clausthal
Institut für Geotechnik und Marschleidenwesen

Legende

LOS-Bewegungen [mm]



PSI-Ergebnis
Bergwerksgrenze, EW-Bereiche
TK100
© IGMC, 2015
© Bezirksregierung Arnsberg, 2015
© Geobasis NRW, 2012

Untersuchungsgebiet: **Bergwerk Ibbenbüren**

Titel
IDW-Ergebnis der ENVSAT LOS-Bewegungen [mm]
für 12/2008 – 10/2010 und daraus abgeleitete LOS-Isolinien
[-4, -2 mm]: ermittelt aus den PS-Punkt-Trendfunktionen

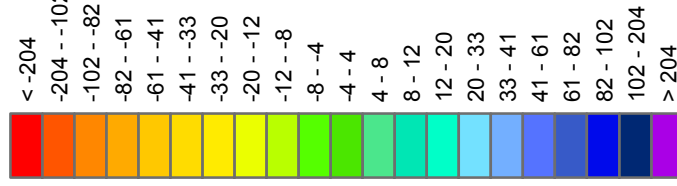
Analyse von Senkungserscheinungen außerhalb prognostizierter Einwirkungs-
bereiche aktiver und in jüngerer Zeit stillgelegter Steinkohlenbergwerke der RAG AG
Im Auftrag der Bezirksregierung Arnsberg, Abteilung Bergbau und Energie in NRW

Bearbeitung: **TU Clausthal** Datum: **03.12.2015** Abbildung: **47**



Legende

LOS-Bewegungen [mm]



PSI-Ergebnis
Bergwerksgrenze, EW-Bereiche
TK100
© IGMC, 2015
© Bezirksregierung Arnsberg, 2015
© Geobasis NRW, 2012

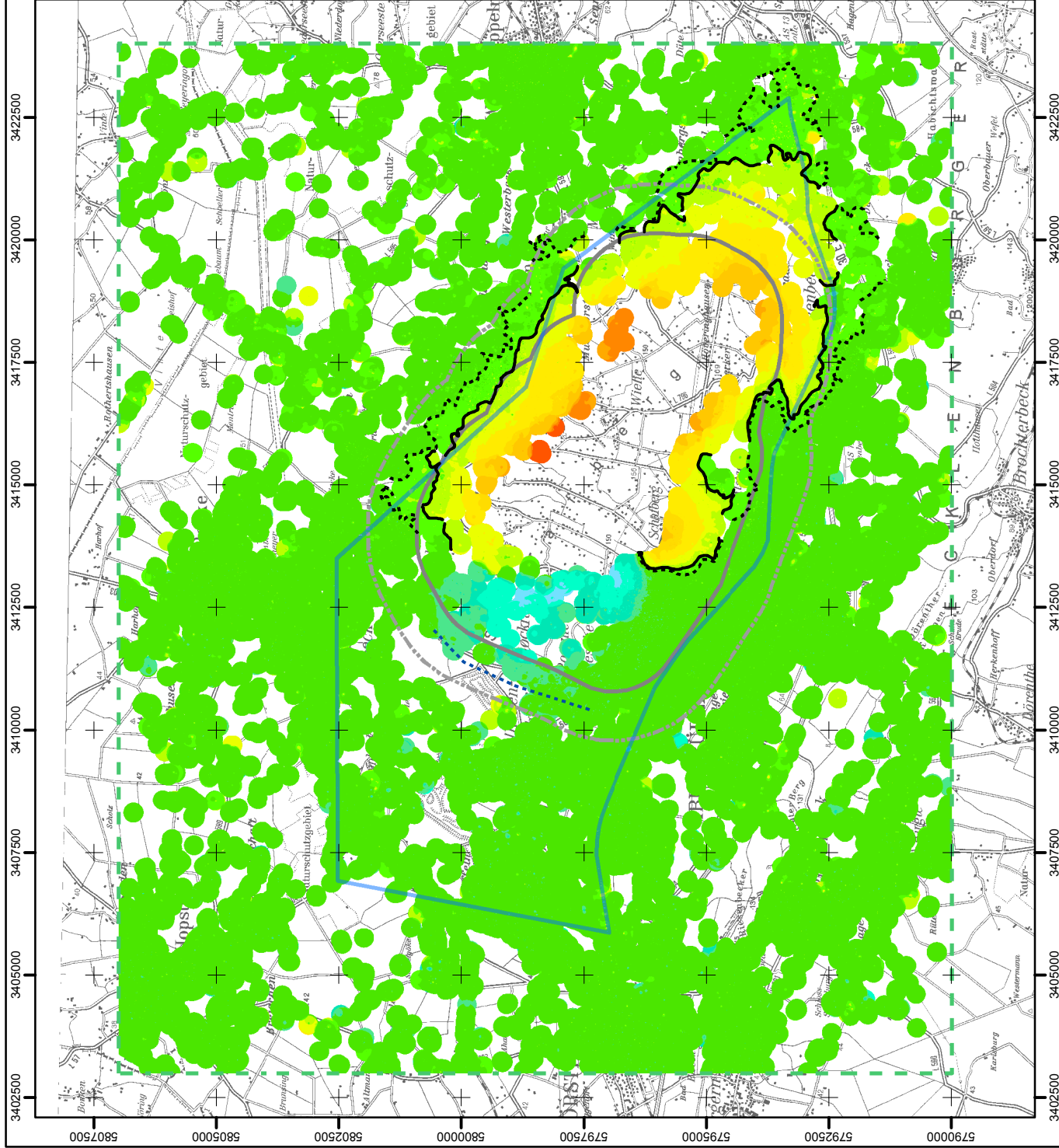
0 1,25 2,5 5 Kilometer



Untersuchungsgebiet:

Bergwerk Ibbenbüren

Titel: IDW-Ergebnis der Radarsat-2 LOS-Bewegungen [mm] für 01/2011 – 02/2015 und daraus abgeleitete LOS-Isolinien [-8; -4 mm]; ermittelt aus den PS-Punkt-Trendfunktionen			
Analyse von Senkungsscheinungen außerhalb prognostizierter Einwirkungsbereiche aktiver und in jüngerer Zeit stillgelegter Steinkohlenbergwerke der RAG AG Im Auftrag der Bezirksregierung Arnsberg, Abteilung Bergbau und Energie in NRW			
Bearbeitung:	TU Clausthal	Datum:	03.12.2015
Abbildung:			48



6. ABLEITUNG VON HÖHENÄNDERUNGEN AUS DEN PSI-ERGEBNISSEN

Ausgehend von den an den PS-Punkten ermittelten Bewegungen in LOS-Richtung kann mit Hilfe der Einfallswinkel die Umrechnung in Höhenänderungswerte erfolgen. Da diese Umrechnung nur zu „realitätsnahen“ Ergebnissen führt, wenn in den LOS-Daten keine horizontalen Bewegungsanteile enthalten sind (Kapitel 5.1), musste zunächst geprüft werden, in welchen Gebieten diese Voraussetzung erfüllt wird und in welchen Bereichen Horizontalbewegungen aufgetreten sein können, die zu einer grob fehlerhaften Berechnung von Höhenänderungen führen würden. Erste Anhaltspunkte für stärkere Horizontalbewegungen lieferten die ermittelten positiven LOS-Bewegungen in den Radarsat-2 Ergebnissen (Abbildung 43), die durch eine sehr ungünstige Satellitenaufnahmegeometrie mit großem Blickwinkel und einer dadurch sehr hohen Empfindlichkeit gegenüber horizontalen Bewegungen deutlich sichtbar wurde. Somit erfolgte zunächst die Analyse von Horizontalbewegungen für den Auswertzeitraum des Sensors Radarsat-2 und anschließend auch für den ENVISAT-Zeitraum, wie im folgenden Kapitel beschrieben wird.

6.1. Abgrenzung von Gebieten mit aus LOS-Daten ableitbaren Höhenänderungen

Für die Ableitung von Horizontalbewegungen (Lageverschiebungen) konnten von der RAG AG bereitgestellte Ergebnisse von GPS-Messungen zwischen 11/2011 und 04/2014 für das Beustfeld genutzt werden. Die Analyse der GPS-Daten bestätigt Horizontalbewegungen an der Tagesoberfläche oberhalb des Beustfeldes, die hauptsächlich nach Osten gerichtet sind, d. h. die entsprechenden Bewegungsvektoren weisen entgegen der LOS-Blickrichtung (Abbildung 49). Die Horizontalverschiebungsbeträge sind an einigen GPS-Punkten zeitweise größer als die Höhenänderungen. Das erklärt auch die gemessenen positiven LOS-Bewegungen in den Radarsat-2 Ergebnissen, da entsprechend den Beschreibungen in Kapitel 5.1 und den Erläuterungen in Tabelle 8 die Horizontalbewegungen in LOS-Richtung mindestens genauso groß sein müssen wie die Vertikalbewegungen, um positive Verschiebungen in LOS zu verursachen. Da sich nur einige wenige GPS-Punkte in der Nähe von Radarsat-2 PS-Punkten befinden, ist eine flächendeckende Modellierung der Bewegungsanteile z. B. in LOS-Richtung und die korrekte Umrechnung in Höhenänderungen in dem Bereich mit positiven LOS-Bewegungsraten unmöglich. Deshalb wurde versucht, Bereiche mit (vermuteten) Horizontalbewegungen und einem Hauptverschiebungsanteil ungefähr in Ost-West-Richtung zu ermitteln, in denen eine Umrechnung zu fehlerhaften Höhenänderungsangaben führen würde.

Die Konstruktion einer solchen Ausmaskierungsfläche erfolgte zunächst für die Radarsat-2 Ergebnisse unter Zuhilfenahme der in die Abbildungsebene projizierten Blickrichtung des Sensors (LOS) und die anschließende Erstellung von Senkrechten zu den jeweils am weitesten nördlich und südlich liegenden Abbaupunkten der im Aufnahmezeitraum des Satelliten abgebauten Flächen (Abbildung 49). Da der Radarsensor Bewegungen quer zur LOS-Richtung nicht erfassen kann, wurde eine Fläche konstruiert, in der theoretisch Bewegungsanteile in LOS-Richtung aufgetreten sein könnten, wenn man berücksichtigt, dass die Horizontalverschiebungen immer in Richtung der Abbauschwerpunkte zeigen (Abbildung 50) und ihr Maximum, wie in Kapitel 5.1 beschrieben, etwa über der Abbaukante erreichen. Bei der Flächenabgrenzung blieb die räumliche Verlagerung der Abbaue innerhalb der Betrachtungszeiträume und die sich infolgedessen ändernde Richtung der Bewegungsvektoren unberücksichtigt. Die räumliche Begrenzung der Ausmaskierungsfläche

am westlichen Einwirkungsrand erfolgte unter Zuhilfenahme der Radarsat-2 PS-Punkte, welche positive LOS-Bewegungsraten aufwiesen.

Die in Abbildung 49 schraffiert dargestellte Ausmaskierungsfläche beschreibt letztendlich den Bereich, in dem aus LOS-Daten umgerechnete Höhenänderungen eine nicht zu vernachlässigbare Unterschätzung der tatsächlich eingetretenen Senkungen beinhalten würde.

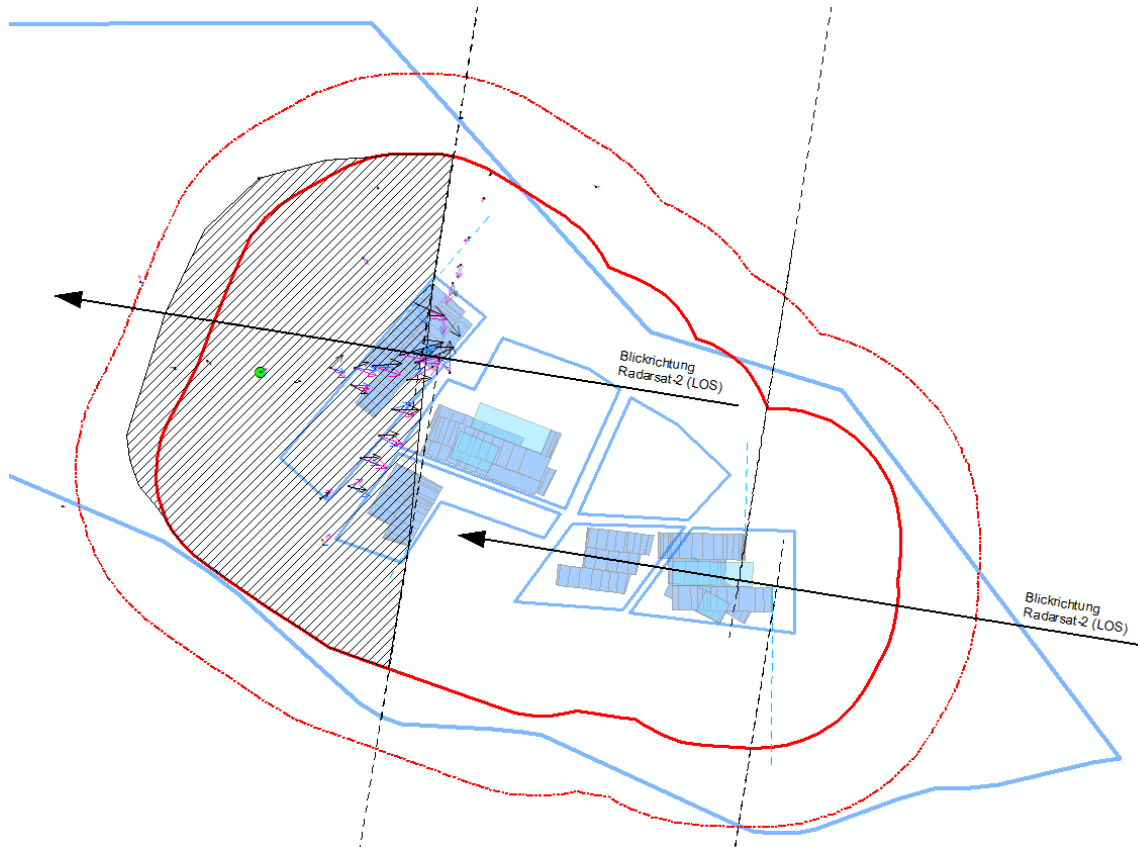


Abbildung 49: Konstruktionsskizze zur Ermittlung von Bereichen mit Horizontalbewegungen entgegen der LOS-Aufnahmerichtung (schwarz-schraffierte Fläche); GPS-Verschiebungen halbjährlich ab 11/2012 bis 04/2014 dargestellt (kleine Pfeile) u. a. für den Punkt 9GPS (grüner Punkt); Baufelder und Abbaue 01/2011 bis 02/2015 + 1 Jahr vorher; LOS-Blickrichtung des Radarsat-2 Sensors sowie weitere Konstruktionslinien

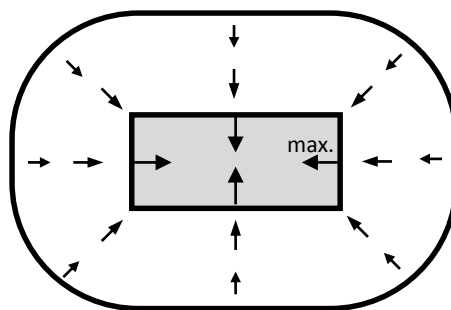


Abbildung 50: Richtungen der horizontalen Bodenbewegungskomponente im Grundrissplan über einem rechteckigen Abbau und maximalen Verschiebungen ungefähr über der Abbaukante (nach KRATZSCH 1997)

Im östlichen Bereich des prognostizierten EW-Bereiches in Abbildung 49 müssten entsprechend der Abbildung 50 Horizontalbewegungen, die etwa von Osten nach Westen erfolgen, aufgrund der Bewegungsrichtung weg vom Sensor zu einer deutlichen Überschätzung der abzuleitenden

Höhenänderungen führen, wie anhand Tabelle 8 erläutert wurde. Da aufgrund der ermittelten LOS-Bewegungen für Radarsat-2 (Abbildung 48) keine eindeutige Abgrenzung der Bodenbewegungsbereiche im Osten möglich war, wurde vorsorglich der Bereich östlich der beiden konstruierten Abgrenzungslinien (Abbildung 49) bis zum Untersuchungsrand als Ausmaskierungsfläche definiert (Abbildung 51). GPS-Messungen entlang von Beobachtungslinien (wie im Beustfeld) lagen für den östlichen Untersuchungsraum nicht vor.

Die Konstruktion von Linien zur Abgrenzung von Bereichen mit nicht zu vernachlässigbaren Horizontalbewegungen für die ENVISAT-Ergebnisse erfolgte im Osten vergleichsweise wie bei Radarsat-2, jedoch hier unter Berücksichtigung der Abbaue im ENVISAT-Zeitraum 12/2003 bis 10/2010 und 1 Jahr vorher (Abbildung 51). Des Weiteren wurde berücksichtigt, dass die LOS-Richtung von ENVISAT (blauer Pfeil in Abbildung 51) gegenüber der von Radarsat-2 um etwa 5° verdreht ist (grüner Pfeil in Abbildung 51). Da der ENVISAT-Sensor die Aufnahmen mit einem deutlich kleineren Blickwinkel aufgenommen hat und damit in den LOS-Daten auch ein deutlich geringerer Horizontalbewegungsanteil enthalten ist, wurde nur der Bereich bis zum prognostizierten EW-Bereich als Ausmaskierungsfläche angenommen (Abbildung 51). Vergleiche zwischen ENVISAT- und Nivellements-Zeitreihen in Kapitel 6.3 bestätigten die Richtigkeit der Vorgehensweise.

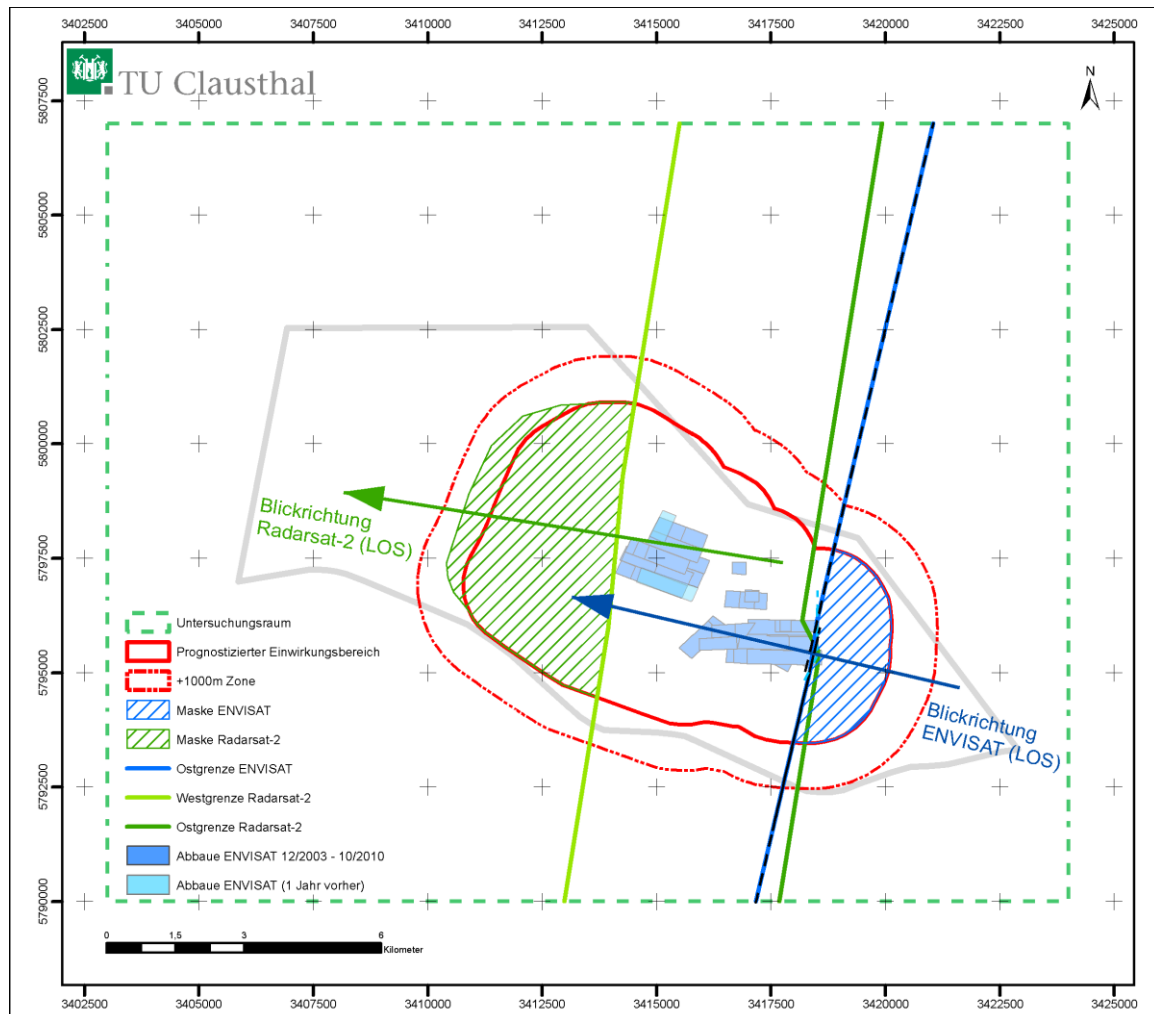


Abbildung 51: Ausmaskierungsflächen für die PSI-Ergebnisse ENVISAT (blau) und Radarsat-2 (grün); für ENVISAT konstruiert mittels der Abbaue 12/2003 -10/2010 +1 Jahr vorher (blaue Abbaufächen)

Da im ENVISAT-Zeitraum Abbautätigkeiten im Beustfeld noch nicht begonnen hatten, ergaben sich, bestätigt durch vorliegende Nivellementsergebnisse sowie Vergleiche mit ENVISAT-PSI-Ergebnissen (Kapitel 6.3), im westlichen Einwirkungsbereich im Umfeld der Einwirkungsgrenze keine Senkungen. Somit darf davon ausgegangen werden, dass in diesem Zeitraum und in diesem Gebiet auch keine Horizontalbewegungen aufgetreten sind. Aus diesem Grund und auch in Anlehnung an die LOS-Bewegungsraten in Abbildung 40 wurde auf die Konstruktion einer Ausmaskierungsfläche im Westen für die ENVISAT-Daten verzichtet. Die gute Übereinstimmung der ENVISAT-Zeitreihen mit den Messwerten der Leitnivellementspunkte in Abbildung 68ff (Kapitel 6.3.3) bestätigen, dass der Anteil von Horizontalbewegungen in den LOS-Daten vernachlässigbar klein ist.

In Abbildung 51 sind alle Ausmaskierungsflächen dargestellt, in denen die Ableitung von Höhenänderungen aufgrund von nicht zu vernachlässigbaren horizontalen Bewegungsanteilen in LOS-Richtung systematisch fehlerhaft wäre. An PS-Punkten innerhalb dieser sensorspezifischen Flächen sind deshalb keine Umrechnungen in Höhenänderungen erfolgt. Eine Ableitung von Gesamthöhenänderungen (Kapitel 6.2.2) für den Zeitraum 12/2008 – 02/2015 durch Summation der flächeninterpolierten Höhenänderungen aus den PSI-Ergebnissen von ENVISAT und Radarsat-2 ist deshalb nur in dem mittleren Gebietsteil des EW-Bereiches möglich (Abbildung 51).

■ UMRECHNUNG DER LOS-DATEN IN HÖHENÄNDERUNGEN

Die Umrechnung der beschriebenen LOS-Bewegungen erfolgte zunächst für jeden PS-Punkt der ENVISAT- sowie Radarsat-2 Ergebnisse. In Abbildung 52 ist exemplarisch die abgeleitete Höhenänderungszeitreihe eines Radarsat-2 PS-Punktes im Vergleich zu einer Zeitreihe eines benachbarten GPS-Punktes zu sehen, der sich innerhalb der Ausmaskierungsfläche von Radarsat-2 befindet (grüner Punkt in Abbildung 49). Der GPS-Punkt 9 GPS weist seine größten Horizontalbewegungen zwischen dem 10./11.4.2013 und 12./14.11.2013 auf, die etwa gleich groß wie die Vertikalbewegungen (ca. 7-10 mm) sind. In Übereinstimmung mit den theoretischen Überlegungen führt dies zu einem leicht positiven LOS-Wert. Unter der (falschen) Annahme, dass dieser Punkt keine Horizontalbewegung erfahren hat, würde die Umrechnung in eine Höhenänderung mit Hilfe des Kosinus des Einfallswinkels (Kapitel 5.1) einen Wert ergeben, der fälschlicherweise als Hebung interpretiert werden würde. Dieses Beispiel zeigt, dass eine Umrechnung von LOS-Daten von PS-Punkten innerhalb der definierten Ausmaskierungsflächen (insbesondere für die verwendeten Radarsat-2-Daten) zu systematischen Verfälschungen in den berechneten Höhenänderungen führt.

Die Zeitreihen-Vergleiche in Kapitel 6.3 zeigen eine Vielzahl von Beispielen für korrekt berechnete und mit den Nivellementsergebnissen übereinstimmende Höhenänderungen für PS-Punkte außerhalb der jeweiligen Ausmaskierungsflächen für die ENVISAT- und Radarsat-2 Zeitreihen.

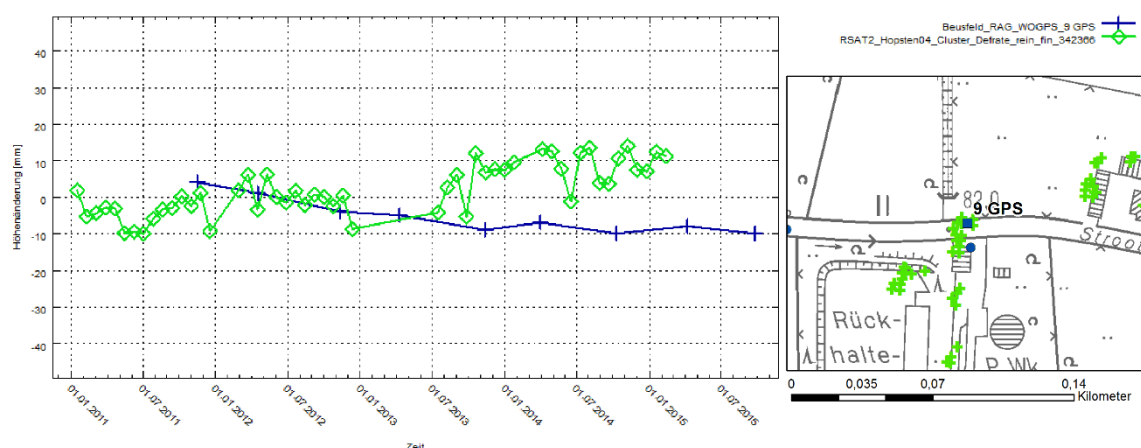


Abbildung 52: Zeitreihe der Höhenänderungen des GPS-Punktes „9 GPS“ der West-Ost-Linie des Beustfeldes im Vergleich zur Zeitreihe berechneter Höhenänderungen eines benachbarten PS-Punktes der Radarsat-2 Auswertung 01/2011 – 02/2015; Hintergrund DGK5 © Geobasis NRW 2013

6.2. Radarinterferometrisch ermittelte Gesamthöhenänderungen für den Betrachtungszeitraum 12/2008 – 02/2015

Mittels der PSI-Methode lassen sich Bodenbewegungen nur aus dem Datenstapel eines Tracks eines Radarsatellitensensors ableiten. Da die maximale Lebenszeit eines Satelliten meist unter 10 Jahren liegt oder die Datenaufzeichnungen nicht über den gesamten Lebenszyklus erfolgten, ist der mit der PSI-Methode maximal auswertbare Zeitraum entsprechend limitiert. Viele Bodenbewegungsvorgänge, wie zum Beispiel durch untertägigen Bergbau verursacht, halten jedoch länger an. Besteht die Notwendigkeit diese Bodenbewegungen über einen längeren Zeitraum als den Aufzeichnungszeitraum eines Satellitendatenstapels zu erfassen, so benötigt man einen Datenstapel eines zweiten Satelliten (oder eines anderen Tracks desselben Satelliten). Somit sind im Minimum zwei voneinander getrennte PSI-Auswertungen durchzuführen, die die Höhenänderungen bezogen auf unterschiedliche Referenzzeitpunkte bestimmen (Abbildung 53).

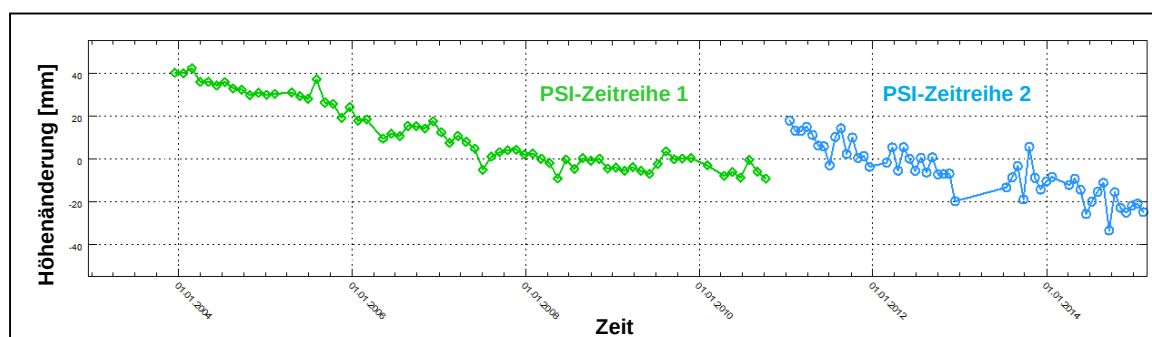


Abbildung 53: Höhenänderungszeitreihen getrennt durchgeführter PSI-Auswertungen mit Datenstapeln verschiedener Radarsatellitensensoren und mit unterschiedlichen Referenzzeitpunkten

Für die Darstellung und Ermittlung der Gesamthöhenänderungen im Bereich des BW Ibbenbüren über den Zeitraum 12/2008 bis 02/2015 wurden zwei Möglichkeiten genutzt:

- Graphische Zusammenfügung von Höhenänderungszeitreihen von ausgewählten räumlich benachbarten PS-Punkten der beiden unterschiedlichen PSI-Auswertungen.
- Berechnung der Gesamthöhenänderungsdifferenz ab einem gewählten Zeitpunkt der PSI-Zeitreihe 1 (hier: ENVISAT ab 11.12.2008) bis zum letzten Zeitpunkt der PSI-Zeitreihe 2 (hier: Radarsat-2 bis 12.02.2015) mittels Flächeninterpolation und Rasterdatensummutation.

6.2.1. Zusammenfügung von PSI-Zeitreihen für ausgewählte PS-Punkte

Liegen Radardatenstapel mit einer zeitlichen Überlappung vor, bestehen gute Voraussetzungen für die Ableitung von Höhenänderungen (bezogen auf einen Referenzzeitpunkt) über den gesamten Zeitraum (vom 1. Zeitpunkt der Zeitreihe 1 bis zum letzten Zeitpunkt der Zeitreihe 2). Für die Untersuchungen zum BW Ibbenbüren liegen jedoch zwei Zeitreihen vor, die sich zeitlich nicht überlappen, wie das Beispiel in Abbildung 53 zeigt. Es besteht eine Datenlücke zwischen den beiden ENVISAT- und Radarsat-2-Zeitreihen im Zeitraum 10/2010 bis 01/2011. Eine Zusammenfügung der Höhenänderungszeitreihen, wie bei BUSCH et al. (2015) über zuvor gefundene homologe PS-Punktpaare (ENGEL & BUSCH 2015) beschrieben, ist somit nur bedingt mittels Modellannahmen möglich. Um jedoch, wie in Kapitel 6.3.3 gezeigt wird, Vergleiche zwischen radarinterferometrisch und nivellitisch bestimmten Höhenänderungen für den Gesamtbetrachtungszeitraum durchführen zu können, wurden ausgewählte PSI-Zeitreihen von benachbarten PS-Punkten der ENVISAT und Radarsat-2 Ergebnisse graphisch zusammengefügt, indem manuell ein geeigneter, gemeinsamer Referenzzeitpunkt ausgesucht wird (Abbildung 54). Ein hierdurch hervorgerufener kleiner Offset-Fehler wurde in Kauf genommen, zumal die zeitliche Lücke von ca. 3 Monaten und im Bereich der Einwirkungsnullgrenze die Höhenänderungsgeschwindigkeiten sehr klein sind.

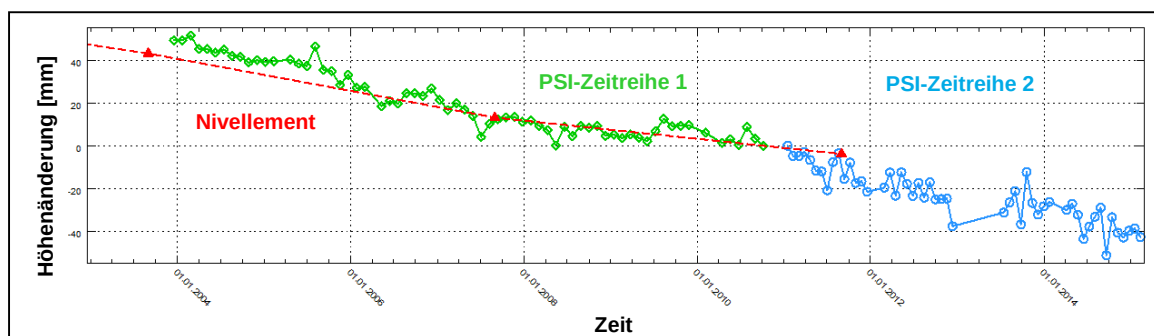


Abbildung 54: Graphisch zusammengefügte PSI-Zeitreihen durch Auswahl eines neuen gemeinsamen Referenzzeitpunktes (hier letzter Zeitpunkt der PSI-Zeitreihe 1 am 7.10.2010) und Vergleich mit Nivellementsergebnissen

6.2.2. Flächeninterpolierte Gesamthöhenänderungen

Eine Gesamthöhenänderung kann aus der Summe der Höhenänderungsdifferenz des gewünschten ersten und letzten Messwertes der ersten PSI-Zeitreihe und der Höhenänderungsdifferenz des ersten und letzten Messwertes der zeitlich nachfolgenden zweiten PSI-Zeitreihe berechnet werden.

Für die Untersuchungen über das BW Ibbenbüren sind folgende wichtige Aspekte zu beachten:

1. Die PS-Punkte der Zeitreihe 1 (ENVISAT) und der Zeitreihe 2 (Radarsat-2) besitzen eine unterschiedliche, individuelle Lage und auch Dichte im Raum (Kapitel 5.2).
2. Zwischen den beiden PSI-Zeitreihen von ENVISAT und Radarsat-2 besteht eine zeitliche Lücke von über 3 Monaten.
3. Für die PSI-Auswertung der ENVISAT-Szenen sind alle ab 18.12.2003 vorhandenen Szenen verwendet worden, während der für das Gutachten relevante Betrachtungszeitraum erst am 11.12.2008 beginnt.
4. Bereiche mit PS-Punkten, in denen Horizontalbewegungen zu fehlerhaft abgeleiteten Höhenänderungen führen würden, müssen ausmaskiert werden. Die Ausmaskierungsflächen für die ENVISAT- und Radarsat-2 - Ergebnisse sind nicht identisch (Kapitel 6.1).

Für die Ableitung der Gesamthöhenänderungen werden aus den PSI-Ergebnissen (hier ohne die PS-Punkte in den jeweiligen Ausmaskierungsflächen wie in Kapitel 6.1) nach Umrechnung in Höhenänderungen über eine IDW-Interpolation Zellenwerte eines definierten Rasters mit einer Zellengröße von 5 m (Kapitel 5.5) getrennt für die Zeitreihen von ENVISAT und Radarsat-2 ermittelt. Zur Berechnung der Höhenänderungsdifferenzen werden die für jeden PS-Punkt der ENVISAT und der Radarsat-2 PSI-Zeitreihen vorliegenden Trendfunktionen der ermittelten Höhenänderungen verwendet, um die höhere statistische Qualität von Funktionswerten (gegenüber den stärker verrauschten Messwerten) nutzen zu können. Somit wurden folgende Rasterdatensätze mit Höhenänderungswerten in mm erzeugt:

- ENVISAT Raster (11.12.2008 – 7.10.2010)
- Radarsat-2 Raster (16.1.2011 – 12.2.2015)

Die Ergebnisse der IDW-Interpolationen sind in den Abbildung 56 und Abbildung 57 zu sehen. Rasterzellen, für die keine Werte mit den angegebenen Interpolationsparametern berechnet werden konnten, werden als „Zellen ohne Wert“ gekennzeichnet. Dazu zählen auch die Ausmaskierungsflächen für die jeweiligen Sensor-Zeitreihen.

Um die Zeitlücke zwischen den beiden Raster-Datensätzen zu schließen, wurden verschiedene Extrapolationsversuche anhand der ermittelten Trendfunktionen getestet. Die Extrapolation erfolgte zum einen zeitlich vorwärtsgerichtet bis zum 16.1.2011 mittels der ENVISAT-Ergebnisse und zum anderen rückwärtsgerichtet bis zum 7.10.2010 anhand der Höhenänderungszeitreihen von Radarsat-2. Aufgrund des teilweise sich stark ändernden Trends im Bewegungsverlauf der ENVISAT-Zeitreihen im Vergleich zu den Radarsat-2 Zeitreihen, ergaben sich große Unterschiede für die ermittelten Höhenänderungen in dem Zwischenzeitraum 7.10.2010 bis 16.1.2011. Insbesondere die Extrapolation mit den Radarsat-2 - Daten erwies sich als problematisch, nicht zuletzt aufgrund der ermittelten deutlich höheren Polynomgrade sowie der größeren Standardabweichungen, so dass die Extrapolation mit den Radarsat-2-Daten als Möglichkeit zur Überbrückung der zeitlichen Datenlücke ausgeschlossen werden musste.

Es wurde deshalb in einem weiteren Schritt untersucht, wie groß die extrapolierten Höhenänderungen für den Zeitraum 7.10.2010 bis 16.1.2011 auf Grundlage der Trendfunktionen der ENVISAT-PS-Punkte sind. Um im Hinblick auf die gutachterliche Aufgabenstellung zu relevanten

Ergebnissen zu kommen, wurden die extrapolierten Höhenänderungswerte nur für einen Abstandsbereich von 2000 m um den prognostizierten EW-Bereich berechnet (Abbildung 55).

Die statistische Auswertung der Ergebnisse für diesen Bereich ergab, dass 95 % der Rasterzellen Höhenänderungen [mm] für den Extrapolationszeitraum von weniger als 1 mm aufweisen, 99 % sogar unter 2 mm. Trotz einer möglichen Unterschätzung der Senkungen wurde aufgrund der geringen Beträge der Extrapolation und unter Berücksichtigung nicht auszuschließender Extrapolationsfehler an einigen PS-Punkten der ENVISAT-Ergebnisse auf eine Extrapolation verzichtet und die Gesamthöhenänderungen nur auf Grundlage der IDW-Ergebnisse (Abbildung 56 und Abbildung 57) berechnet.

Zur Bestimmung der Gesamthöhenänderungen für den Zeitraum 12/2008 bis 02/2015 wurden beide Raster summiert. Hierbei wurden in der Ergebnisdatei Zellen mit dem Attribut „ohne Wert“ ausgewiesen, wenn eine der beiden zu addierenden Zellen ebenfalls das Attribut „ohne Wert“ enthielt. Aufgrund der unterschiedlichen Ausmaskierungsbereiche für ENVISAT und Radarsat-2 ergaben sich auch größere Gesamt-Ausmaskierungsbereiche bei der Bestimmung der Gesamthöhenänderungen.

Die so ermittelten flächeninterpolierten Höhenänderungsdifferenzen (= Gesamthöhenänderungen) für den Zeitraum 12/2008 bis 02/2015 sind in Abbildung 58 dargestellt.

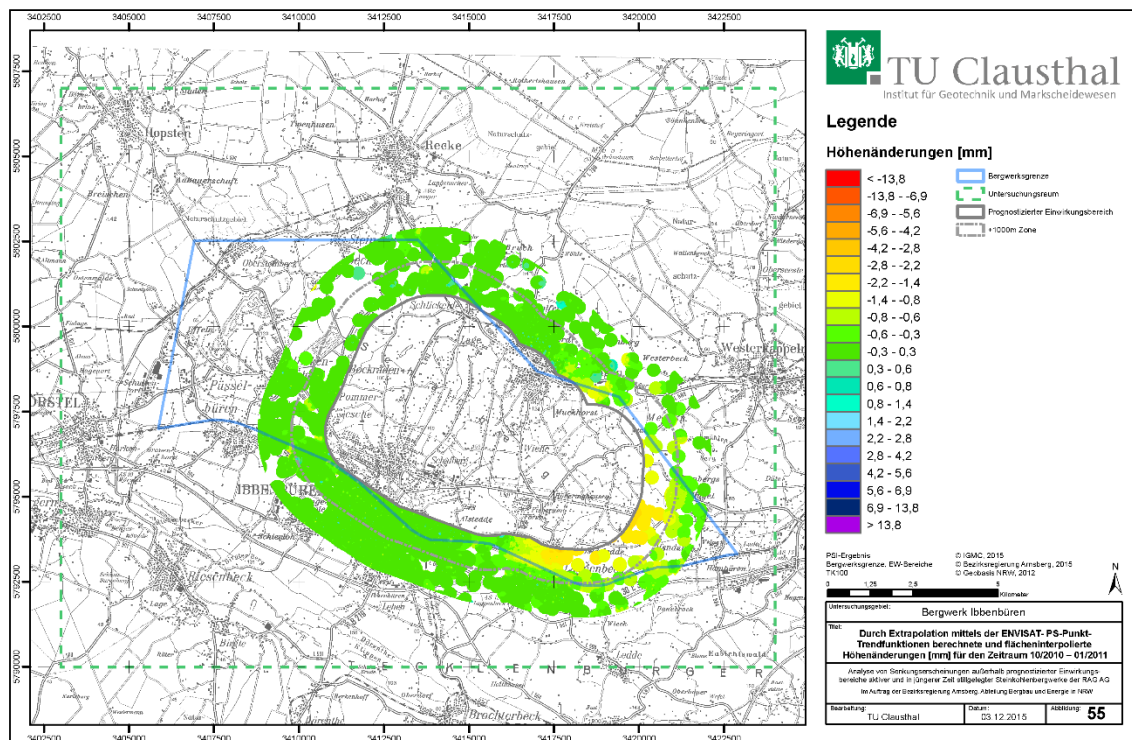
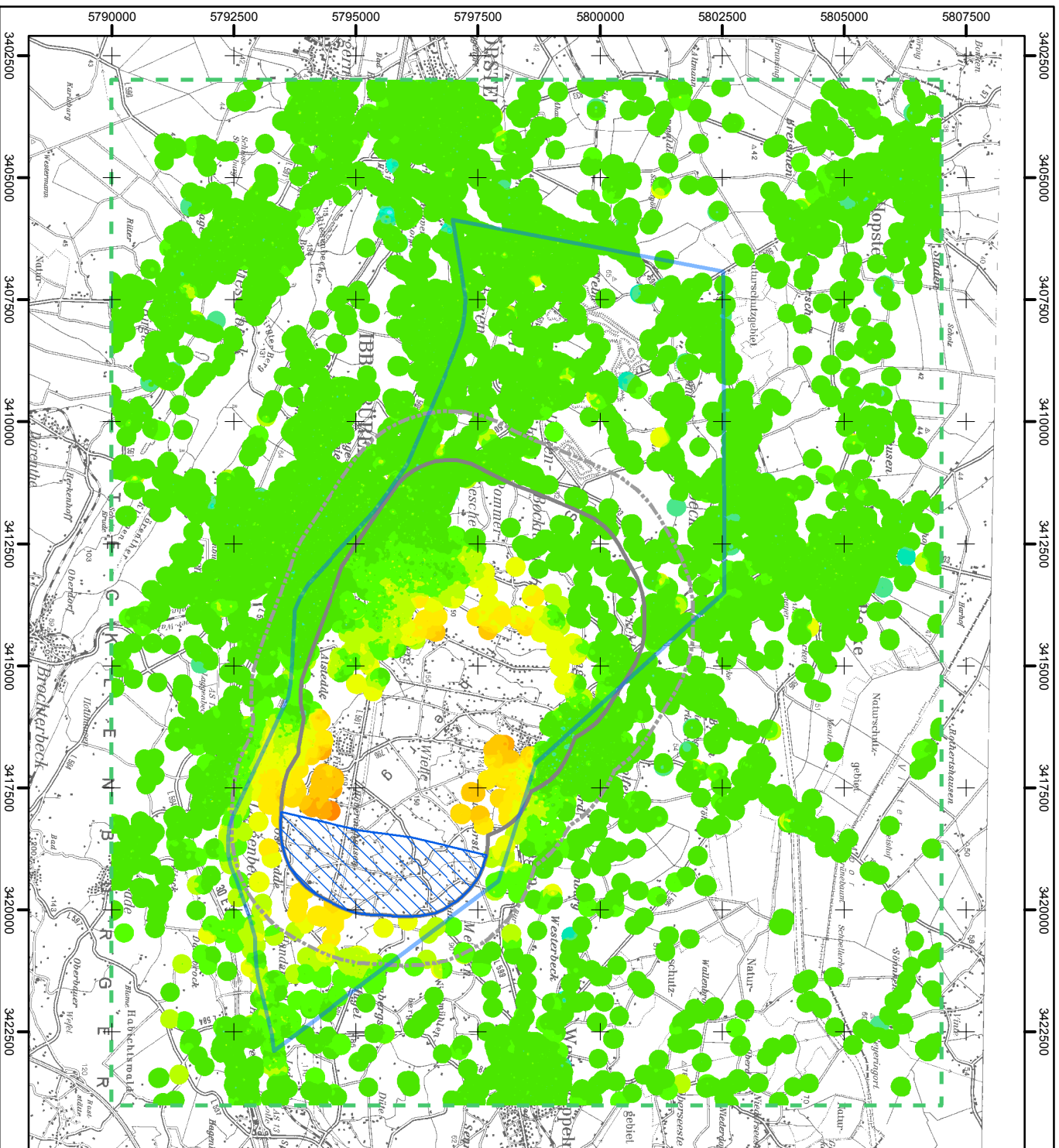
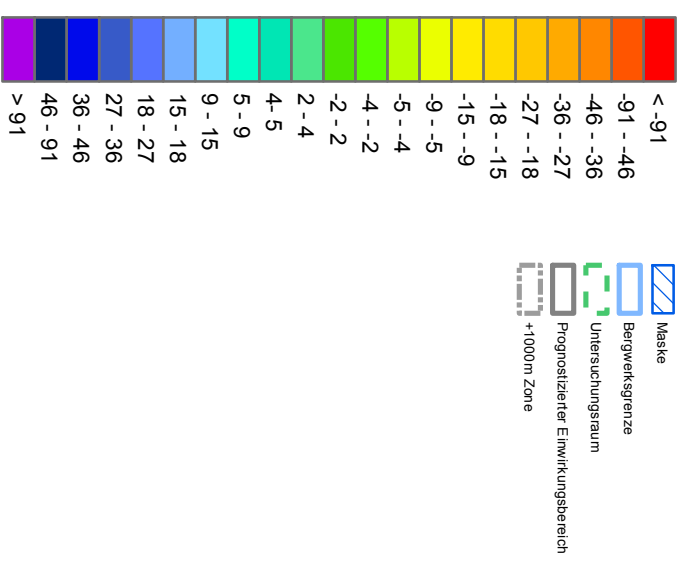


Abbildung 55: Durch Extrapolation mittels der ENVISAT- PS-Punkt-Trendfunktionen berechnete und flächeninterpolierte Höhenänderungen [mm] für den Zeitraum 10/2010 – 01/2011



Legende

Höhenänderungen [mm]



PSI-Ergebnis
 Bergwerksgrenze, EW-Bereiche
 TK100
 © IGMC, 2015
 © Bezirksregierung Arnsberg, 2015
 © Geobasis NRW, 2012

Untersuchungsgebiet:
 Bergwerk Ibbenbüren

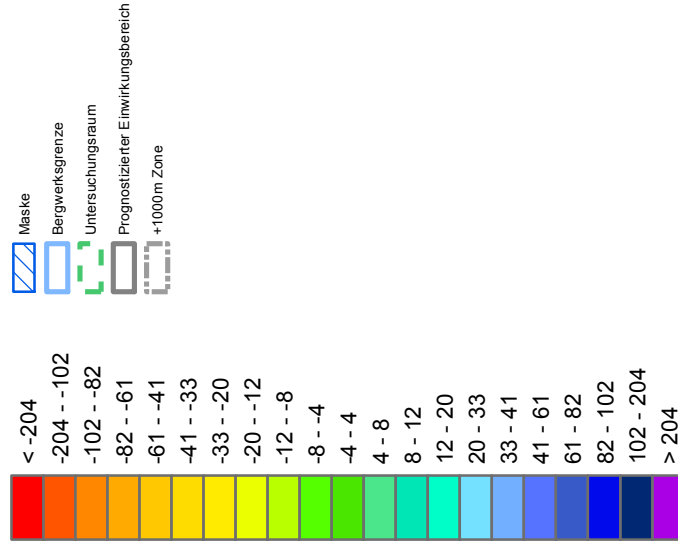
Titel:
 Flächeninterpolierte Höhenänderungen [mm] für den Zeitraum
 12/2008 – 10/2010 ermittelt aus den ENVISAT-PS-Punkt-
 Trendfunktionen; Inkl. Ausmaskierungsfläche

Analyse von Senkungserscheinungen außerhalb prognostizierter Einwirkungs-
 bereiche aktiver und in jüngerer Zeit stillgelegter Steinkohlenbergwerke der RAG AG
 Im Auftrag der Bezirksregierung Arnsberg, Abteilung Bergbau und Energie in NRW

Bearbeitung: TU Clausthal
 Datum: 03.12.2015
 Abbildung: 56

Legende

Höhenänderungen [mm]



PSI-Ergebnis
EW-Bereiche, Grenze
TK100
© IGMC 2015
© Bezirksregierung Arnsberg, 2015
© GEObasis.nrw 2012

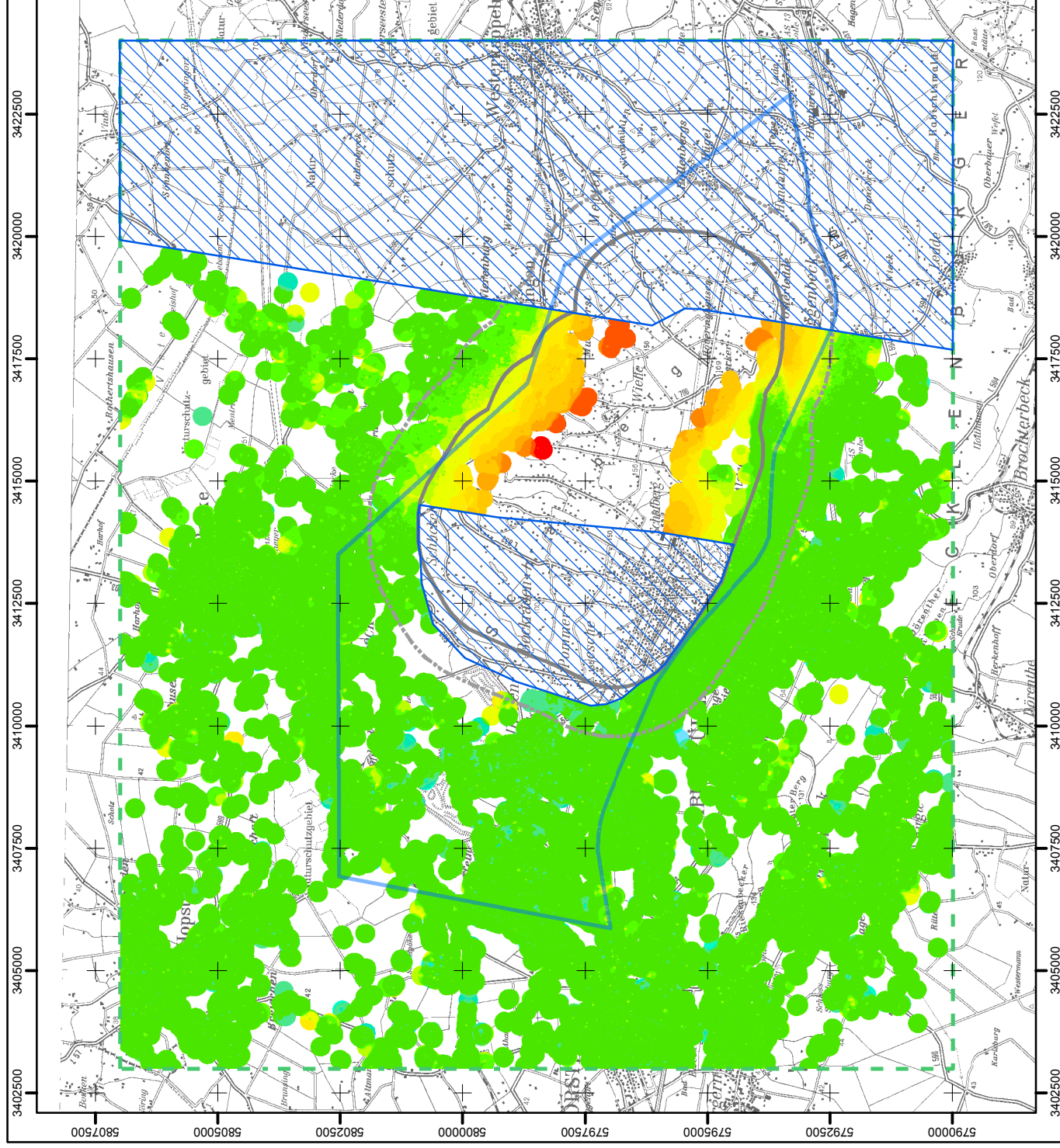
$$z \prec$$

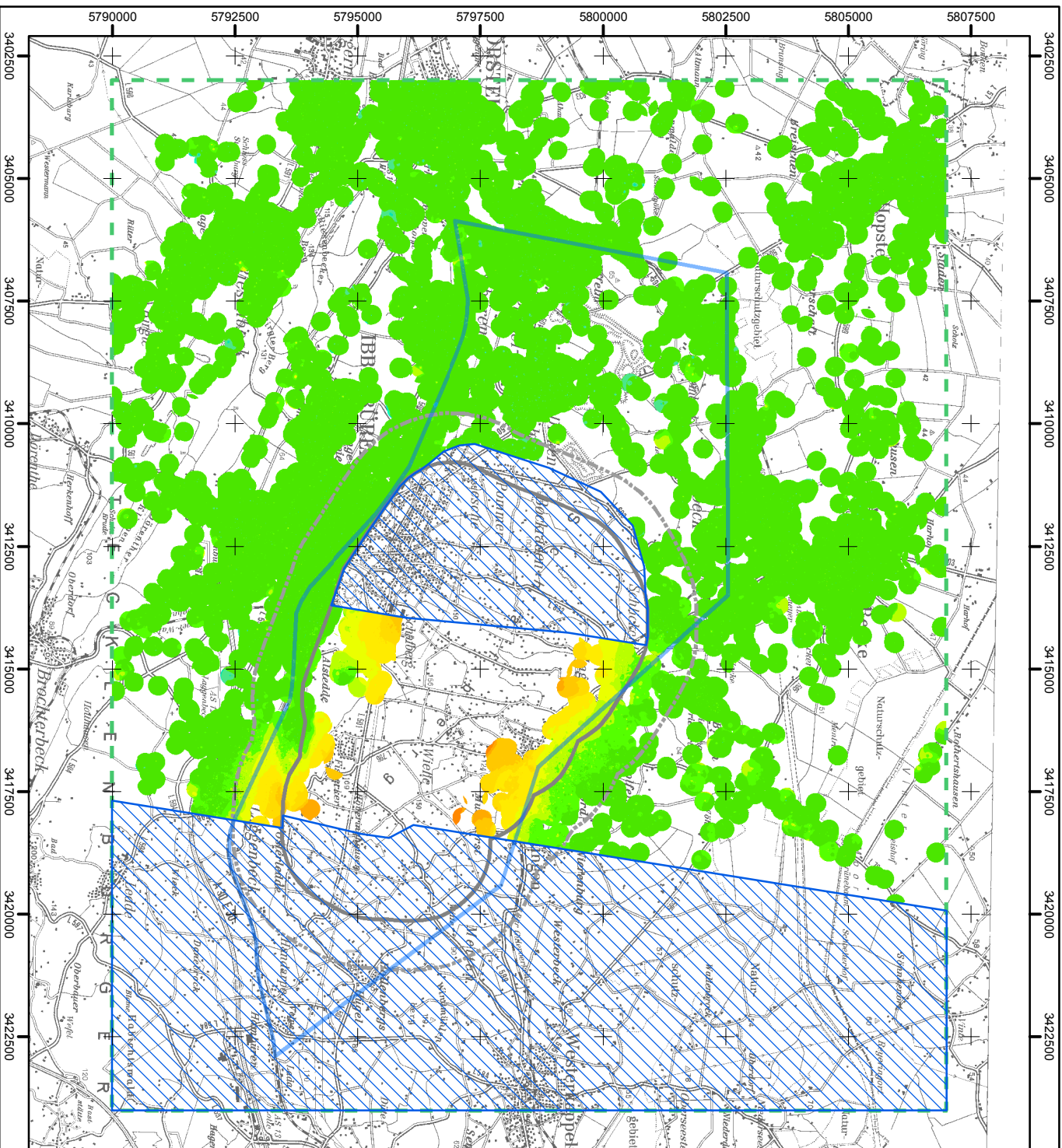
Untersuchungsgebiet: **Bergwerk Ibbenbüren**

Titel:
Flächeninterpolierte Höhenänderungen [mm] für den Zeitraum
01/2011 – 02/2015 ermittelt aus den Radarsat-2 PS-Punkt-
Trendfunktionen; inkl. Ausmaskierungsflächen

Analyse von Senkungserscheinungen außerhalb prognostizierter Einwirkungsbereiche aktiver und in jüngerer Zeit stillgelegter Steinkohlenbergwerke der RAG A

Bearbeitung:	Datum:	Abbildung: 57
--------------	--------	----------------------

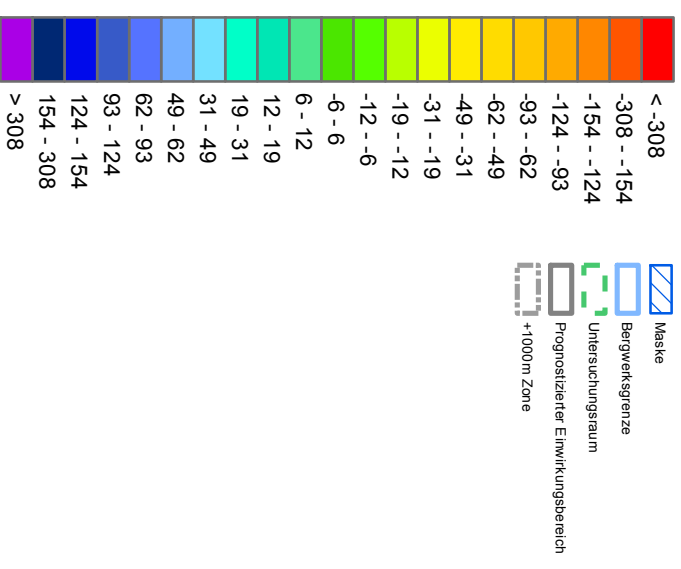




TU Clausthal
Institut für Geotechnik und Marschleidenwesen

Legende

Höhenänderungen [mm]



PSI-Ergebnis
 Bergwerksgrenze, EW-Bereiche
 TK100
 © IGMC, 2015
 © Bezirksregierung Arnsberg, 2015
 © Geobasis NRW, 2012

Untersuchungsgebiet: Bergwerk Ibbenbüren

Titel:
Fächinterpolierte, radarinterferometrische Gesamthöhenänderungen [mm] für den Zeitraum 12/2008 – 02/2015; Inkl. Ausmaskierungsflächen

Analyse von Senkungserscheinungen außerhalb prognostizierter Einwirkungsbereiche aktiver und in jüngster Zeit stillgelegter Steinkohlenbergwerke der RAG AG
 Im Auftrag der Bezirksregierung Arnsberg, Abteilung Bergbau und Energie in NRW

Bearbeitung: TU Clausthal
 Datum: 03.12.2015
 Abbildung: 58

6.3. Vergleich mit terrestrischen Daten

Theoretisch wäre ein Vergleich der radarinterferometrisch bestimmten Bewegungen in LOS-Richtung mit entsprechenden terrestrisch ermittelten Daten denkbar. Geeignet wären für einen solchen Vergleich die Ergebnisse von DGPS-Messungen. Da solche Messungen jedoch nur an sehr wenigen Stellen und zudem auch nur über einen begrenzten Zeitraum vorliegen, wurde auf so einen Vergleich mit LOS-Ergebnissen verzichtet, wegen der sehr begrenzten Aussagekraft.

Nivellistisch bestimmte Höhenänderungen liegen dagegen in verschiedenen Bereichen im erweiterten Betrachtungsraum vor, so dass sie für eine Validierung der radarinterferometrisch ermittelten Höhenänderungen sinnvoll genutzt werden können. Hierbei ist zu beachten, dass Nivellements nur in deutlich größeren Zeitabständen wiederholt werden und deshalb die durch Differenzbildung der zeitlich variierenden Höhenwerte an den Nivellementspunkten abgeleiteten Höhenänderungen nur einen Trend beschreiben können. Ferner sind die Unterschiede in der Vermarkung von Nivellementspunkten und die Unterschiedlichkeit der Qualität der verschiedenen Nivellements bei einem Vergleich zu beachten. Da grundsätzlich ein Nivellement bei jeder Messung (zu einem Zeitpunkt) an einen zuvor höhenmäßig bestimmten Punkt angeschlossen werden muss, können zudem unbekannte Höhenänderungen des Anschlusspunktes seit der letzten Messung zu einer systematischen Verfälschung der abgeleiteten Höhenänderungen führen.

Da mit unterschiedlichen Verfahren gemessene Höhenänderungen streng genommen nur an ein und demselben Punkt vergleichbare Ergebnisse liefern können, aber PS-Punkte im Regelfall nicht unmittelbar an einem Nivellementspunkt vorliegen, können für einen Vergleich der zeitlichen Höhenänderungsverläufe nur PS-Punkte in der Nachbarschaft von Nivellementspunkten genutzt werden.

Um einen flächenhaften Vergleich zwischen den Ergebnissen der Nivellements und der radarinterferometrisch bestimmten Höhenänderungen zu ermöglichen, bietet sich auch an, für durch die vorhandenen Nivellements bestimmten Zeiträume nivellistisch bestimmte Höhenänderungen [mm] und zeitlich vergleichbare radarinterferometrisch bestimmte Höhenänderungen (abgeleitet aus den Trendfunktionen, mittels IDW-Interpolation überführt in Rasterdaten) zu verwenden.

Wegen der zuvor dargestellten Probleme der Interpretation der LOS-Ergebnisse hinsichtlich einer Aufspaltung in eine vertikale und eine horizontale Komponente erfolgen diese Vergleiche nur in den nicht ausmaskierten Bereichen (Kapitel 6.1).

6.3.1. Vergleich flächeninterpolierter radarinterferometrischer Höhenänderungen mit Nivellementsergebnissen (2003 - 2010)

Die in den folgenden beiden Abbildungen gezeigten Vergleiche basieren auf flächeninterpolierten radarinterferometrisch ermittelten Höhenänderungen, die aus den Ergebnissen einer PSI-Auswertung der ENVISAT-Szenen von 12/2003 bis 10/2010 unter Nutzung der für jeden PS-Punkt ermittelten Trendfunktion abgeleitet wurden. In Anlehnung an die Messungszeiträume der zur Verfügung stehenden Nivellements erfolgt der Vergleich in den unterschiedlichen Zeitscheiben, 12/2003 – 12/2007 (Abbildung 59) sowie 10/2007 – 10/2010 (Abbildung 60).

Die gemeinsame und gleichartige Darstellung der mit beiden Verfahren ermittelten Höhenänderungen zeigt weitgehend, von sehr wenigen einzelnen Nivellementspunkte abgesehen, eine gute Übereinstimmung.

6.3.2. Vergleich flächeninterpolierter radarinterferometrischer Höhenänderungen mit GPS- und Nivellementsergebnissen (2007 – 2014)

In Anlehnung an die bis Herbst 2011 zur Verfügung stehenden Leitnivellements erfolgt in Abbildung 61 der Vergleich der aus ihnen für den Zeitraum 09/2007 – 10/2011 abgeleiteten Höhenänderungen mit den flächeninterpolierten radarinterferometrisch ermittelten Gesamthöhenänderungen. Grundlage für diese Gesamthöhenänderungen sind die Ergebnisse der separat durchgeführten PSI-Auswertungen der ENVISAT-Zeitreihe und der Radarsat-2-Zeitreihe. Die weiterführende Bearbeitung dieser Daten und ihre Zusammenführung zur Ableitung von Gesamthöhenänderungen erfolgte, unter Berücksichtigung der unterschiedlichen Vergleichszeiträume, wie in Kapitel 6.2.2 beschrieben.

Um einen Vergleich mit Ergebnissen von ebenfalls vorliegenden RAG-Nivellements und GPS-Punkten der RAG vornehmen zu können, sind für den Zeitraum 03/2009 – 04/2014 entsprechende Gesamthöhenänderungen aus der ENVISAT-Zeitreihe und der Radarsat-2-Zeitreihe berechnet worden. Die gemeinsame graphische Darstellung der abgeleiteten Ergebnisse findet sich in Abbildung 62.

Obwohl die den Vergleichen zugrundeliegenden Höhenänderungen unterschiedliche Genauigkeiten (insbesondere die der GPS-Messungen) besitzen und auch lokale Ursachen zu abweichenden Höhenänderungen führen können, zeigen die beiden Abbildungen eine gute Übereinstimmung zwischen den nivellitisch und radarinterferometrisch bestimmten Höhenänderungen auf.

In Ergänzung zur Abbildung 62 sind in Abbildung 63 die für den Zeitraum 08/2011 bis 10/2014 abgeleiteten terrestrischen (Nivellement, GPS) und radarinterferometrischen Höhenänderungen dargestellt. Durch Wahl dieses Zeitraumes ist der Vergleich mit weiteren Ergebnissen von RAG-Nivellements möglich. Die entsprechenden radarinterferometrisch abgeleiteten Höhenänderungen basieren auf der PSI-Auswertung der Radarsat-2-Szenen. Bei näherer vergleichender Betrachtung der beiden dargestellten Ergebnisse im Bereich der prognostizierten Einwirkungsgrenze fallen in zwei Bereichen Unterschiede auf. So sind nivellitisch bestimmte Höhenänderungen im Raum Mettingen etwas geringer und im Bereich Ibbenbüren-Laggenbeck größer als die radarinterferometrisch abgeleiteten Höhenänderungen. Diese Unterschiede sind auch in Abbildung 62 für den Zeitraum 03/2009 – 04/2014 ersichtlich.

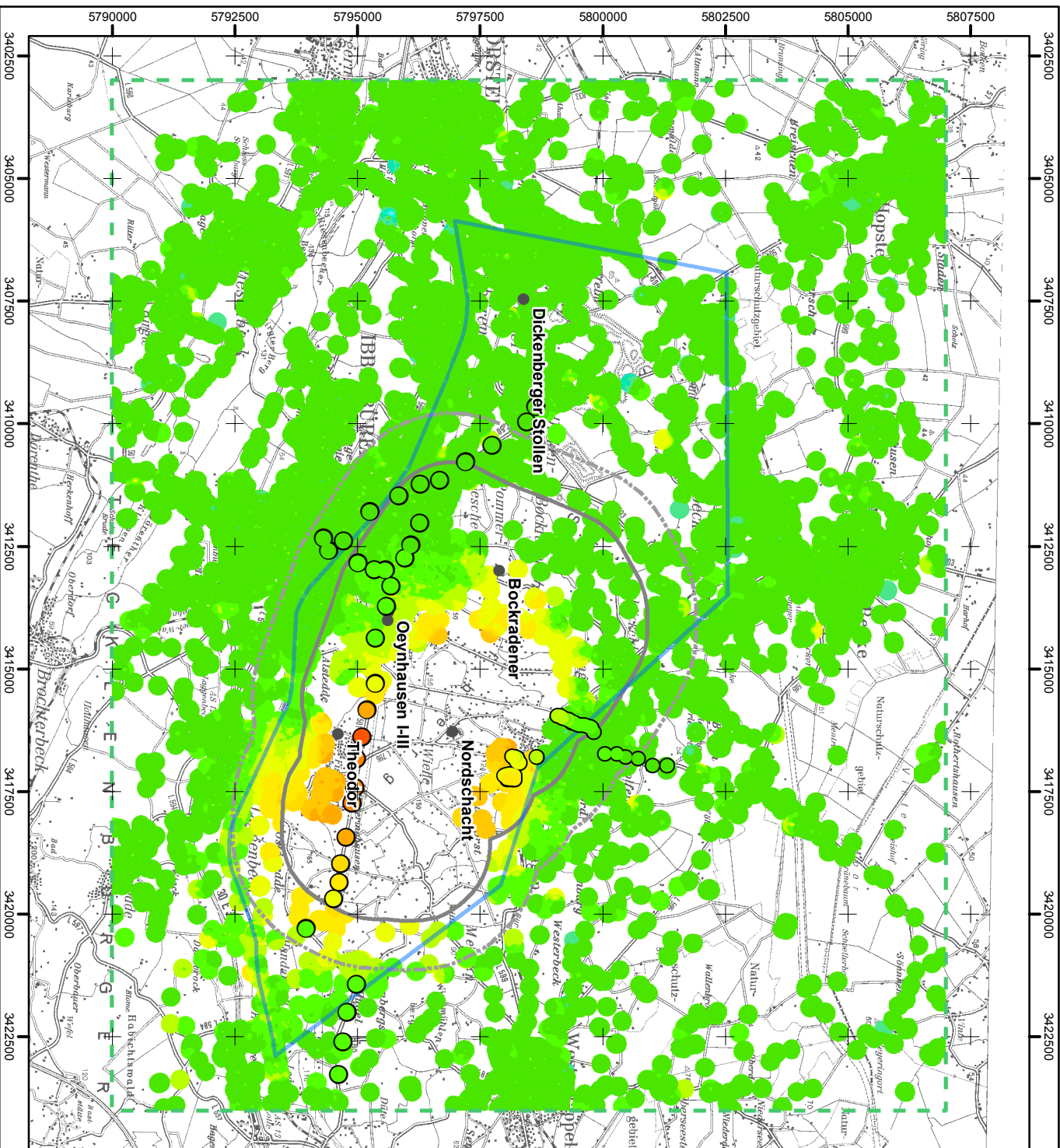
Höhenänderungen [mm]



Title:	

Analyse von Senkungserscheinungen außerhalb prognostizierter Einwirkungsbereiche aktiver und in jüngerer Zeit stillgelegter Steinkohlenbergwerke der RAG AG

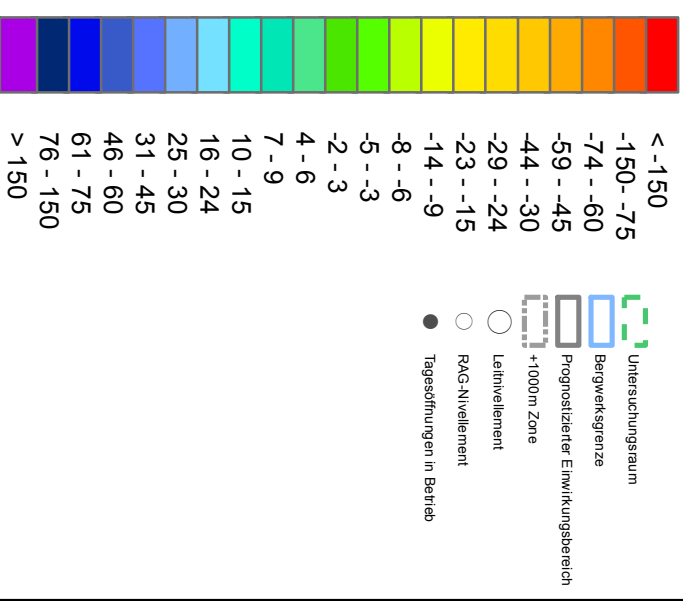
Bearbeitung:	Datum:	Abbildung:
--------------	--------	------------



TU Clausthal
Institut für Geotechnik und Marscheldewesen

Legende

Höhenänderungen [mm]



PS-Ergebnis
 EV-Bereiche, Bergwerksgrenze und Tagesöffnungen © Bezirksregierung Arnsberg, 2015
 Leithnelement © Geobasis NRW, 2015
 RAG-Nivelement © RAG AG, 2015
 1:100 © Geobasis NRW, 2012
 1:100 1,25 2,5 5
 Kilometer

Untersuchungsgebiet: **Bergwerk Ibbenbüren**

Titel
Nivelliertisch und flächeninterpolierte, radarinterferometrisch ermittelte Höhenänderungen (ENVISAT, 10/2007 - 10/2010)

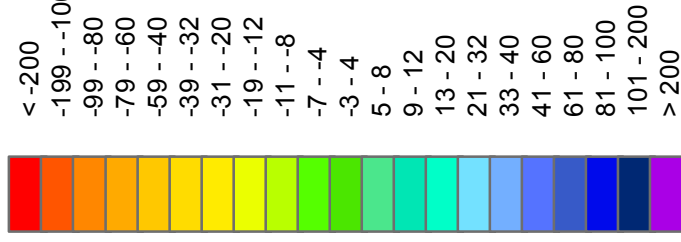
Bereiche aktiv und in jüngster Zeit stillgelegte Stollenoberbereiche der RAG AG
 Im Auftrag der Bezirksregierung Arnsberg, Abteilung Bergbau und Energie in NRW

Bearbeitung: **TU Clausthal** Datum: **03.12.2015** Abbildung: **60**



Legende

Höhenänderungen [mm]



- Untersuchungsraum
- Bergwerksgrenze
- Prognostizierter Einwirkungsbereich
- +1000m Zone
- Leitvinnelement
- Tagesöffnungen in Betrieb

PSI-Ergebnis
EV-Bereiche, Bergwerksgrenze und Tagesöffnungen
Leitvinnelement
TK100

© GMC, 2015
© Bezirksregierung Arnsberg, 2015
© Geobasis NRW, 2012



Untersuchungsgebiet:

Bergwerk Ibbenbüren

Titel

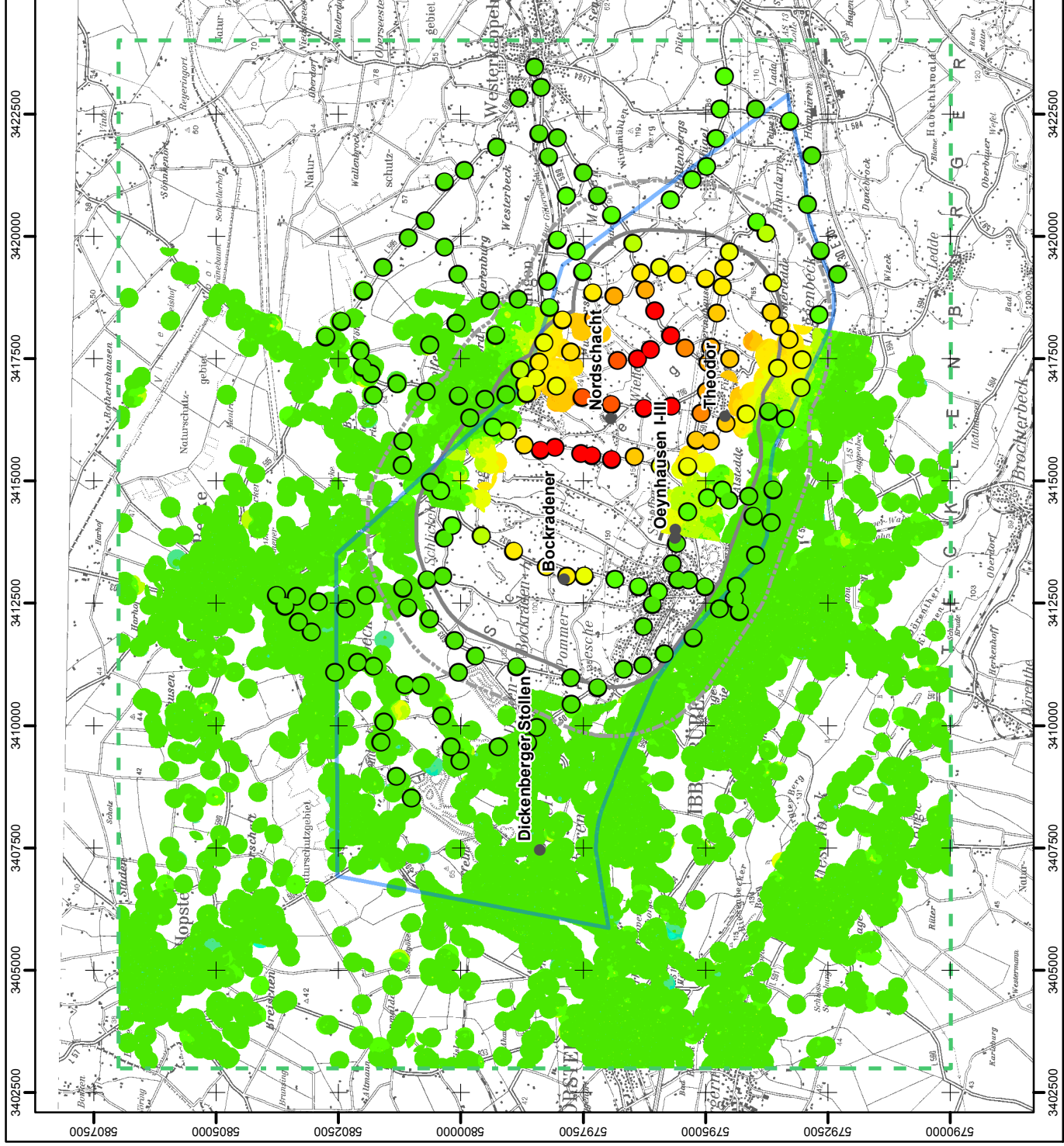
**Nivellistisch und flächeninterpolierte, radarinterferometrisch
ermittelte Gesamthöhenänderungen
(ENVISAT und Gadsat-2, 09/2007 - 10/2011)**

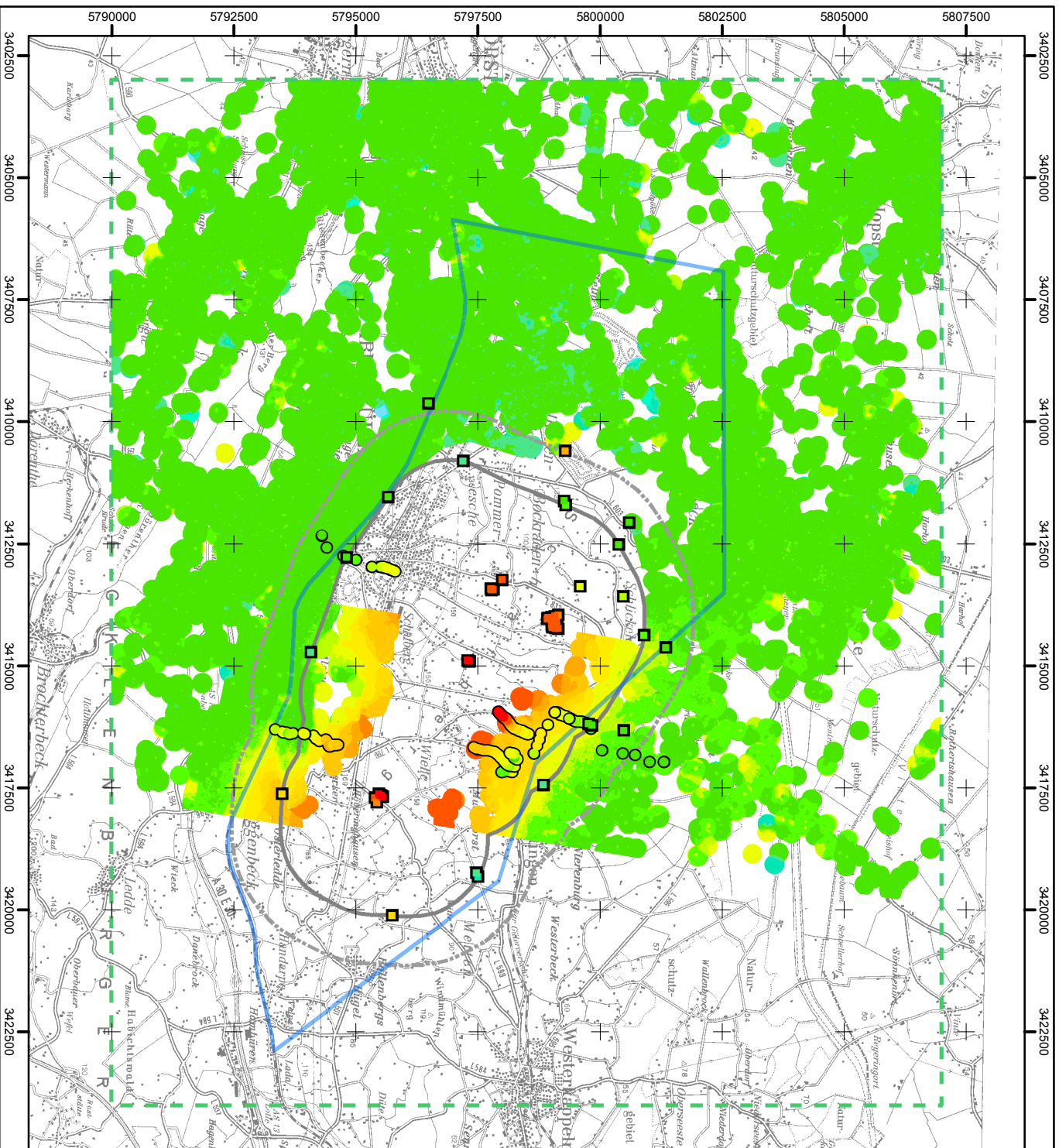
Analyse von Senkungserscheinungen außerhalb prognostizierter Einwirkungsbereiche aktiver und in jüngerer Zeit stillgelegter Steinkohlenbergwerke der RAG AG
Im Auftrag der Bezirksregierung Arnsberg, Abteilung Bergbau und Energie in NRW

Bearbeitung: TU Clausthal

Datum: 03.12.2015

Abbildung: **61**

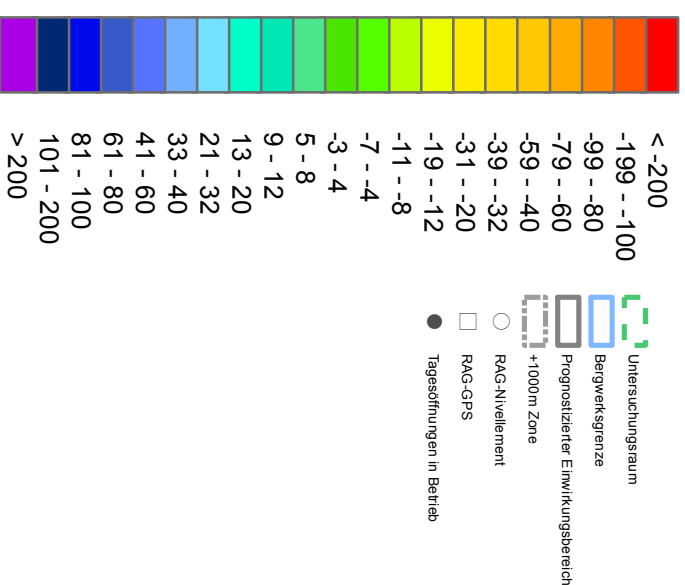




TU Clausthal
Institut für Geotechnik und Marschleidenwesen

Legende

Höhenänderungen [mm]



PS-Ergebnis
 EW-Bereiche, Bergwerksgrenze und Tagesöffnungen
 RAG-Nivelement-GPS
 TK100
 © IGMC, 2015
 © Bezirksregierung Arnsberg, 2015
 © RAG AG, 2015
 © Geobasis NRW, 2012

Untersuchungsgebiet: Bergwerk Ibbenbüren

Titel:
 Terrestisch (Nivelement, GPS) und flächeninterpolierte
 radarinferometrisch ermittelte Gesamthöhenänderungen
 (ENVISAT und Radarsat-2, 03/2009 - 04/2014)

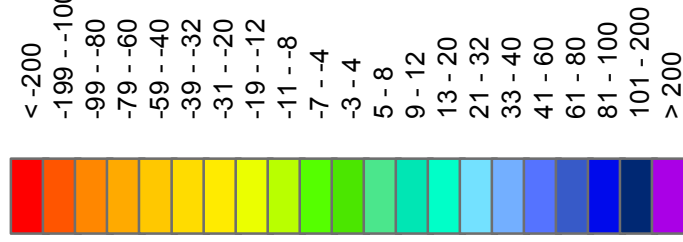
Analyse von Senkungserscheinungen außerhalb prognostizierter Einwirkungs-
 bereiche aktiver und in jüngster Zeit stillgelegter Steinkohlenbergwerke der RAG AG
 Im Auftrag der Bezirksregierung Arnsberg, Abteilung Bergbau und Energie in NRW

Bearbeitungs: TU Clausthal
 Datum: 03.12.2015
 Abbildung: 62



Legende

Höhenänderungen [mm]



- Untersuchungsraum
- Bergwerksgrenze
- Prognostizierter Einwirkungsbereich
- +1000m Zone
- RAG-Nivellement
- RAG-GPS
- Tagesöffnungen in Betrieb

PSI-Ergebnis
EV-Bereiche, Bergwerksgrenze und Tagesöffnungen
RAG-Nivellement/GPS
TK100

© GMC, 2015
© Bezirksregierung Arnsberg, 2015
© RAG AG, 2015
© Geobasis NRW, 2012



Untersuchungsgebiet:

Bergwerk Ibbenbüren

Titel:

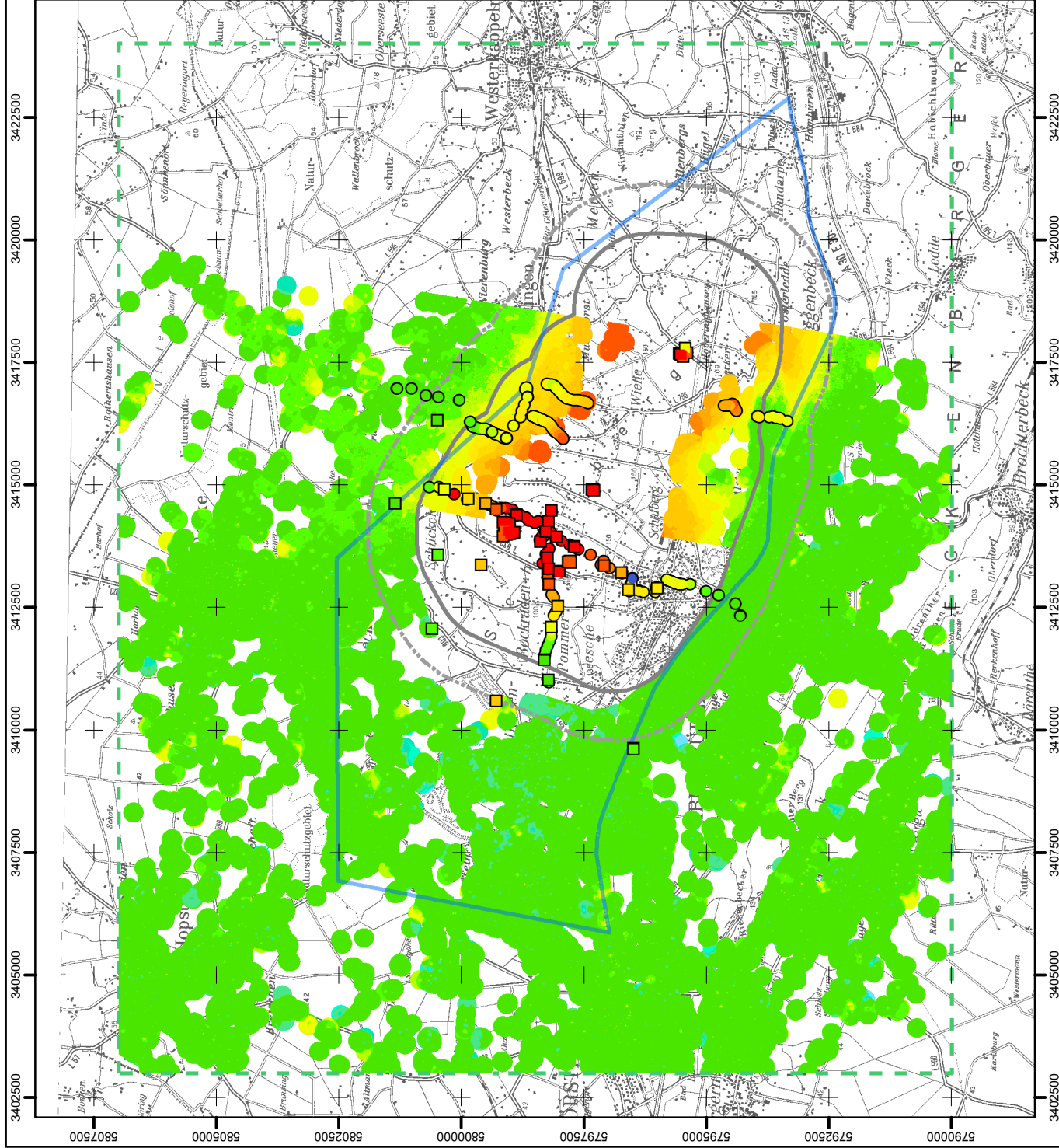
**Terrestrisch (Nivellement, GPS) und flächeninterpolierte
radarinterferometrisch ermittelte Höhenänderungen
(Radsat-2, 08/2011 - 10/2014)**

Analyse von Senkungserscheinungen außerhalb prognostizierter Einwirkungsbereiche aktiv und in jüngerer Zeit stillgelegter Steinkohlenbergwerke der RAG AG
Im Auftrag der Bezirksregierung Arnsberg, Abteilung Bergbau und Energie in NRW

Bearbeitung: TU Clausthal

Datum: 03.12.2015

Abbildung: **63**



6.3.3. Vergleich von nivellitisch und radarinterferometrisch bestimmten Höhenänderungszeitreihen (2003 – 2015)

Während die zuvor dargestellten flächenhaften Vergleiche zwischen nivellierten und radarinterferometrisch ermittelten Höhenänderungen in erster Linie Aufschlüsse über räumliche Zusammenhänge ermöglichen, können Vergleiche mit Hilfe von Höhenänderungszeitreihen an ausgewählten Punkten Übereinstimmungen oder Unterschiede im Trend und Betrag über den Betrachtungszeitraum aufzeigen. Entsprechende Vergleiche mit nivellitisch gemessenen Höhenänderungen können natürlich nur erstellt werden, wenn PS-Punkte in geringem Abstand zu den Nivellementspunkten vorliegen.

Da im Hinblick auf den Untersuchungsschwerpunkt Gebiete am Rande und außerhalb des prognostizierten Einwirkungsbereiches von Interesse sind, wurden Nivellementspunkte in diesen Gebieten ausgewählt, sofern für den Vergleich mit radarinterferometrisch ermittelten Höhenänderungen je nach Sensor eine Umrechnung der LOS-Bewegungen in Höhenänderungen möglich war. Aufgrund dieser Sensorabhängigkeit werden diese Vergleiche für folgende Zeiträume durchgeführt:

- Zeitraum 12/2003 – 10/2010 (ENVISAT-Zeitreihe),
- Zeitraum 12/2003 – 02/2015 (aus ENVISAT- und Radarsat-2 Zeitreihen zusammengefügte Gesamtzeitreihe).

Wegen der zuvor erläuterten Umrechnungsprobleme der LOS-Bewegungen der Radarsat-2-Daten in Höhenänderungen in den westlichen und östlichen Teilgebieten des Einwirkungsbereiches werden Radarsat-2-Daten nur im mittleren Bereich des Einwirkungsbereiches zusammen mit den ENVISAT-Daten in Gesamtzeitreihen den nivellitisch ermittelten Höhenänderungen gegenübergestellt.

Bei den Zeitreihenvergleichen in den folgenden Abbildungen sind in der jeweiligen topographischen Übersicht die ENVISAT PS-Punkte mit magenta-farbenen Kreuzen dargestellt, die Radarsat-2 PS-Punkte mit grünen Kreuzen, die Leitnivellements mit gelben, schwarz-umkreisten Punkten, und die RAG-Tagesnivellements mit blauen, schwarz-umkreisten Punkten.

■ ZEITRAUM 2003 – 2010 (ENVISAT-ZEITREIHE)

Obwohl der Untersuchungszeitraum für das BW Ibbenbüren erst 2008 beginnt, wurden zur Erhöhung der Aussagekraft für diese Vergleiche Nivellementsergebnisse über den gesamten Zeitraum einer ENVISAT-Zeitreihe ab 12/2003 verwendet.

GEBIET WESTERKAPPELN

Abbildung 64 zeigt die topographische Lage der in diesem Gebiet (östlicher Teilbereich des prognostizierten Einwirkungsbereiches) vorhandenen und zum Vergleich herangezogenen Nivellementspunkte.

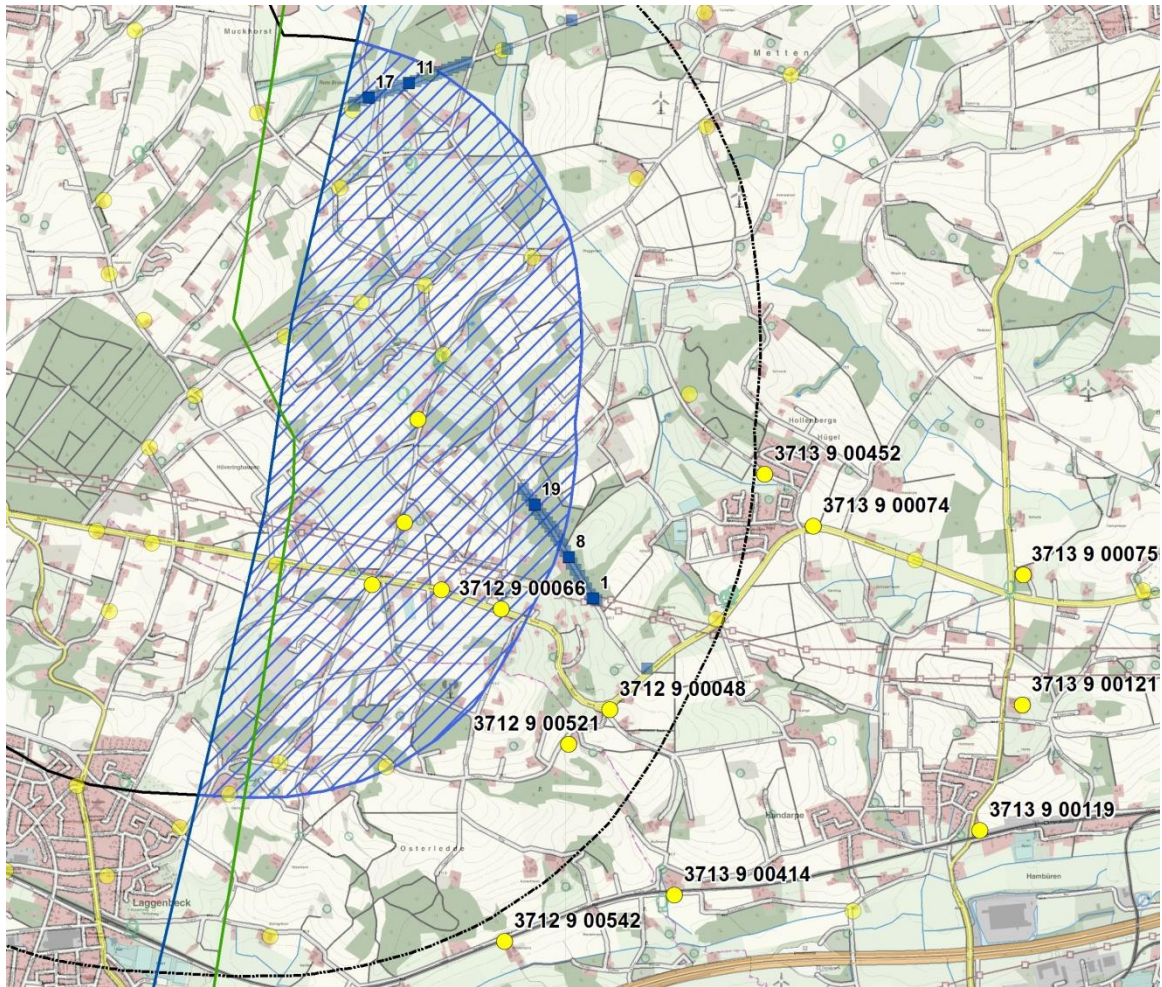
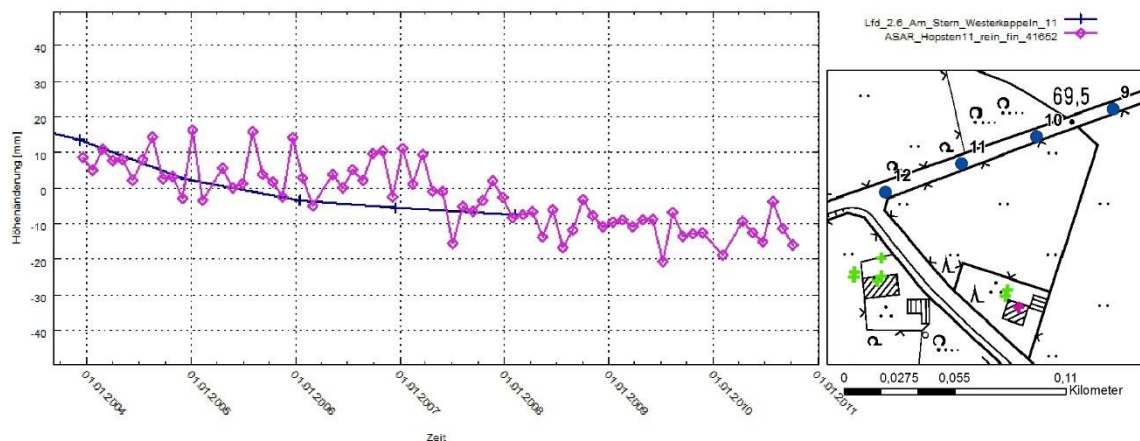


Abbildung 64: Topographische Lage der zum Vergleich benutzten Nivellementspunkte (gelbe Punkte: Leitnivellement © Geobasis NRW 2015; dunkelblaue Punkte: RAG-Beobachtungslinien Am Stern/Westerkappeln und Mühlenweg/Westerkappeln © RAG AG 2015); Bereich potentiell nicht aus den LOS-Bewegungsdaten ableitbarer Höhenänderungen (blau-schraffierte Fläche) sowie Grenze des prognostizierten Einwirkungsbereiches (schwarze Linie) und +1000 m Linie (schwarze Strichlinie) (© Bezirksregierung Arnsberg 2014); Hintergrund DLM50 © Geobasis NRW 2013



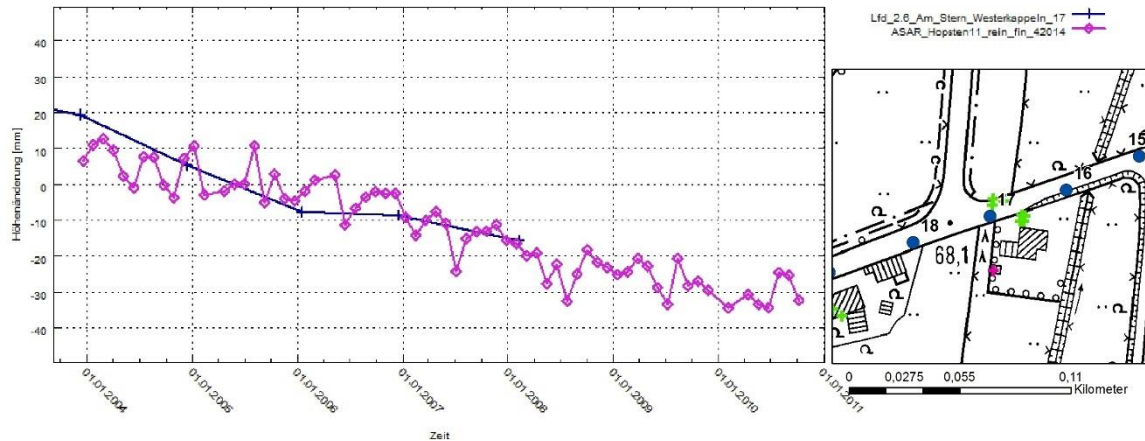
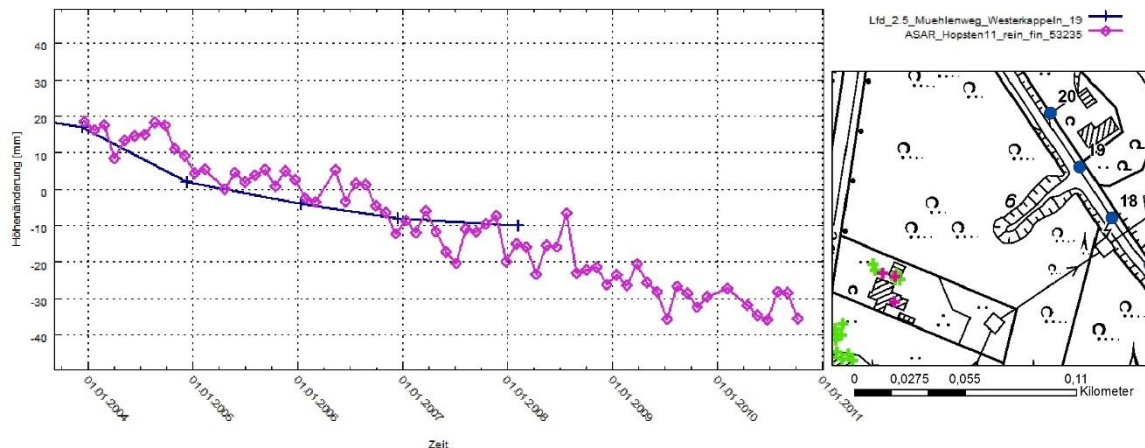


Abbildung 65: Zeitreihen nivellitisch und radarinterferometrisch bestimmter Höhenänderungen an ausgewählten Nivellementspunkten der Beobachtungslinie „Am Stern/Westerkappeln“ der RAG (Ortslagen der Nivellementspunkte in Abbildung 64); Hintergrund DGK5 © Geobasis NRW 2013

Die zwei exemplarisch ausgewählten Zeitreihen gegenüberstellungen (Abbildung 65) weisen eine gute Übereinstimmung zwischen den bis Frühjahr 2008 vorliegenden nivellitisch und den radarinterferometrisch abgeleiteten Höhenänderungen auf. Dieses Ergebnis bestätigt auch die u. a. in Kapitel 6.1 erläuterten Zusammenhänge zwischen den radarinterferometrisch gemessenen PS-Punktbewegungen in LOS-Richtung und den dreidimensionalen Bodenbewegungen, da in diesem Bereich die Auswirkungen (Anteile) möglicher Horizontalbewegungen auf die abgeleiteten Höhenänderungen sehr gering sind. Somit dürfen auch die über 2008 hinausgehenden Senkungen als realitätsnah angesehen werden.

Gemäß den Abschätzungen in u. a. Kapitel 6.1 nimmt der Anteil durch Horizontalbewegungen an berechneten Vertikalbewegungen in Gebieten zu, in denen Horizontalbewegungen in LOS-Richtung auftreten. Abbildung 66 lässt diesen Einfluss, der in diesem Bereich zu einer Überschätzung radarinterferometrisch abgeleiteter Höhenänderungen führen kann, vermuten, insbesondere an dem im Einwirkungsbereich liegenden Punkt 19. Besonders deutlich zeigt sich dieser Einfluss in Abbildung 67 für den Leitnivellementspunkt 3712 9 00066 innerhalb des prognostizierten Einwirkungsbereiches, aber auch für zwei Leitnivellementspunkte außerhalb des prognostizierten Einwirkungsbereiches (Abbildung 68).



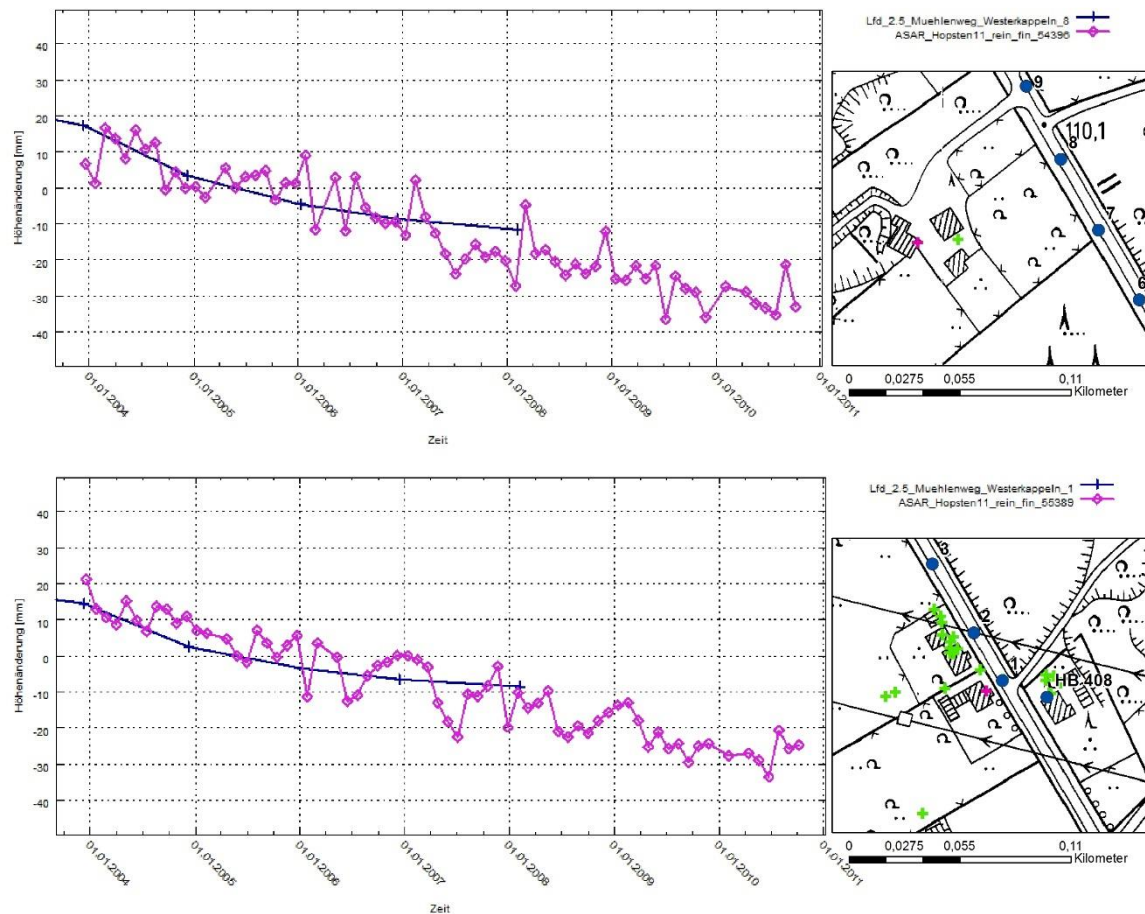


Abbildung 66: Zeitreihen nivellitisch und radarinterferometrisch bestimmter Höhenänderungen an ausgewählten Nivellementspunkten der Beobachtungslinie „Mühlenweg/Westerkappeln“ der RAG (Ortslagen der Nivellementspunkte in Abbildung 64); Hintergrund DGK5 © Geobasis NRW 2013

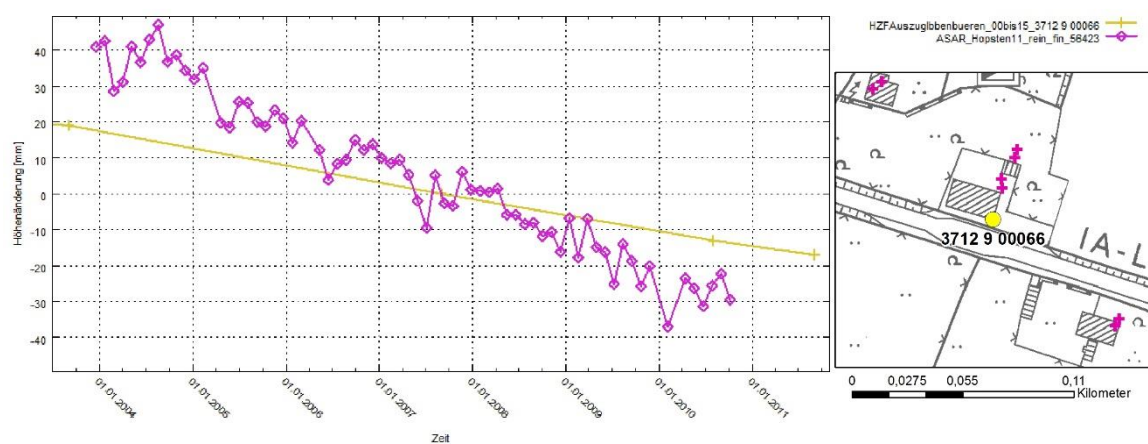


Abbildung 67: Zeitreihen nivellitisch und radarinterferometrisch bestimmter Höhenänderungen am Leitnivellementspunkt 3712 9 00066 innerhalb des prognostizierten Einwirkungsbereiches (Ortslage des Nivellementspunkte in Abbildung 64); Hintergrund DGK5 © Geobasis NRW 2013

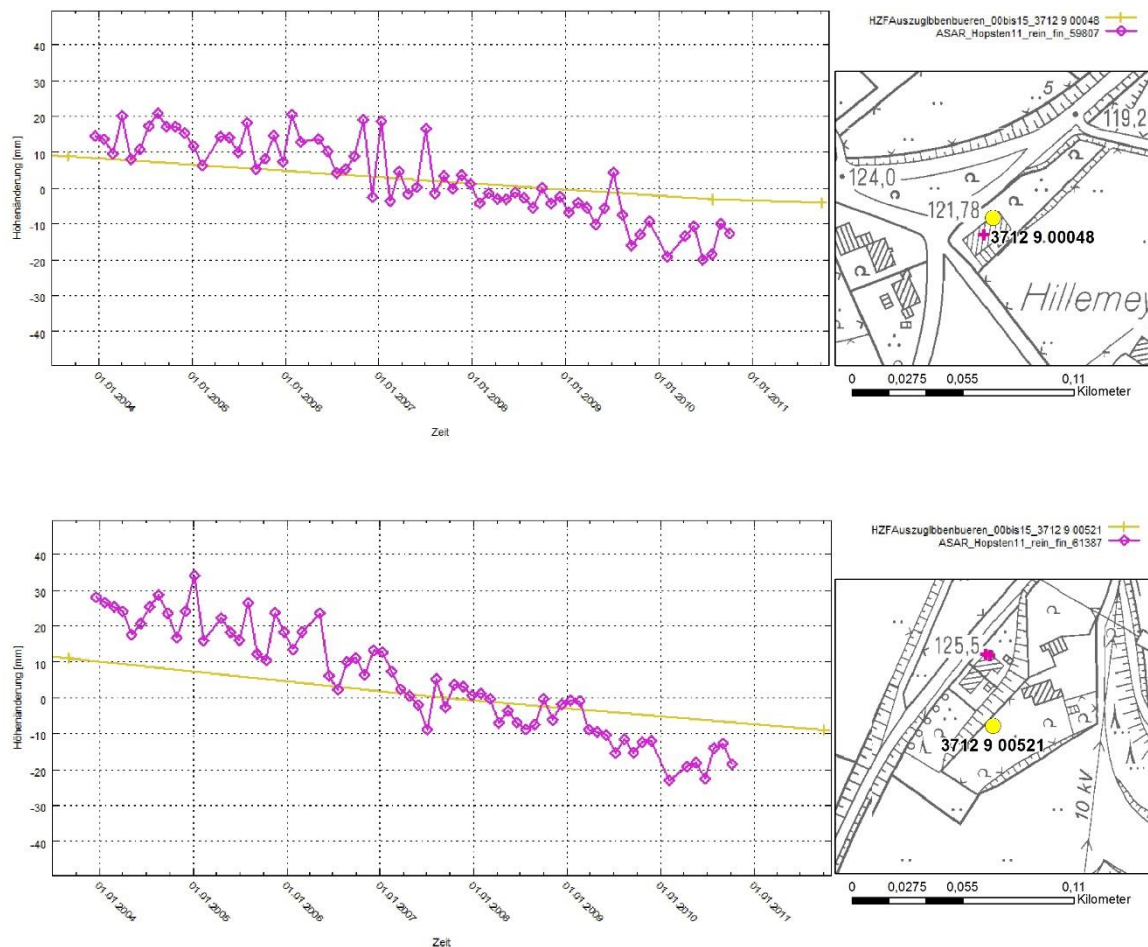
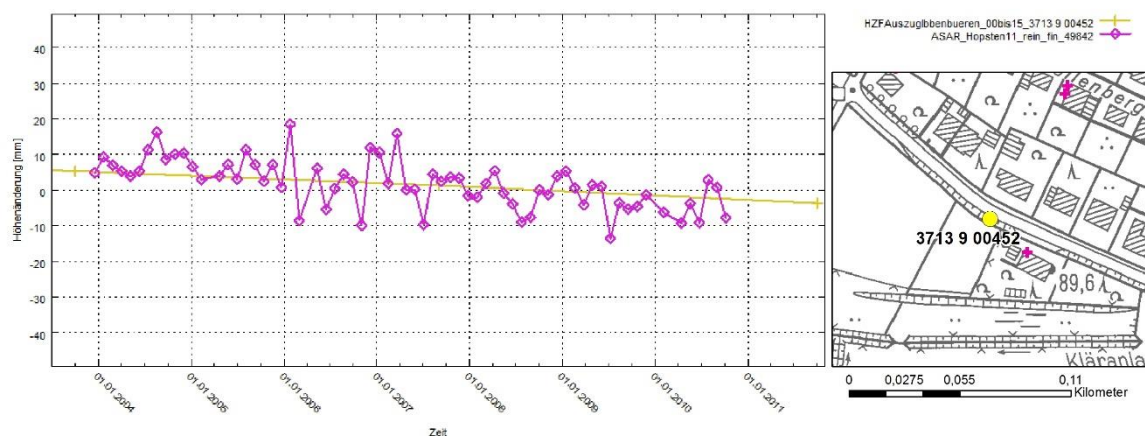


Abbildung 68: Zeitreihen nivellitisch und radarinterferometrisch bestimmter Höhenänderungen an ausgewählten Leitnivelelementspunkten außerhalb des prognostizierten Einwirkungsbereiches (Ortslagen der Nivellementspunkte in Abbildung 64); Hintergrund DGK5 © Geobasis NRW 2013

Da mit zunehmendem Abstand vom Einwirkungsbereich (in den folgenden Beispielen mehr als 1000 m, Abbildung 69) die Bodenbewegungen und somit auch mögliche Horizontalbewegungen abnehmen, ergeben sich gute Übereinstimmungen der nivellitisch abgeleiteten mit den aus den ENVISAT-LOS-Bewegungsdaten berechneten Höhenänderungen.



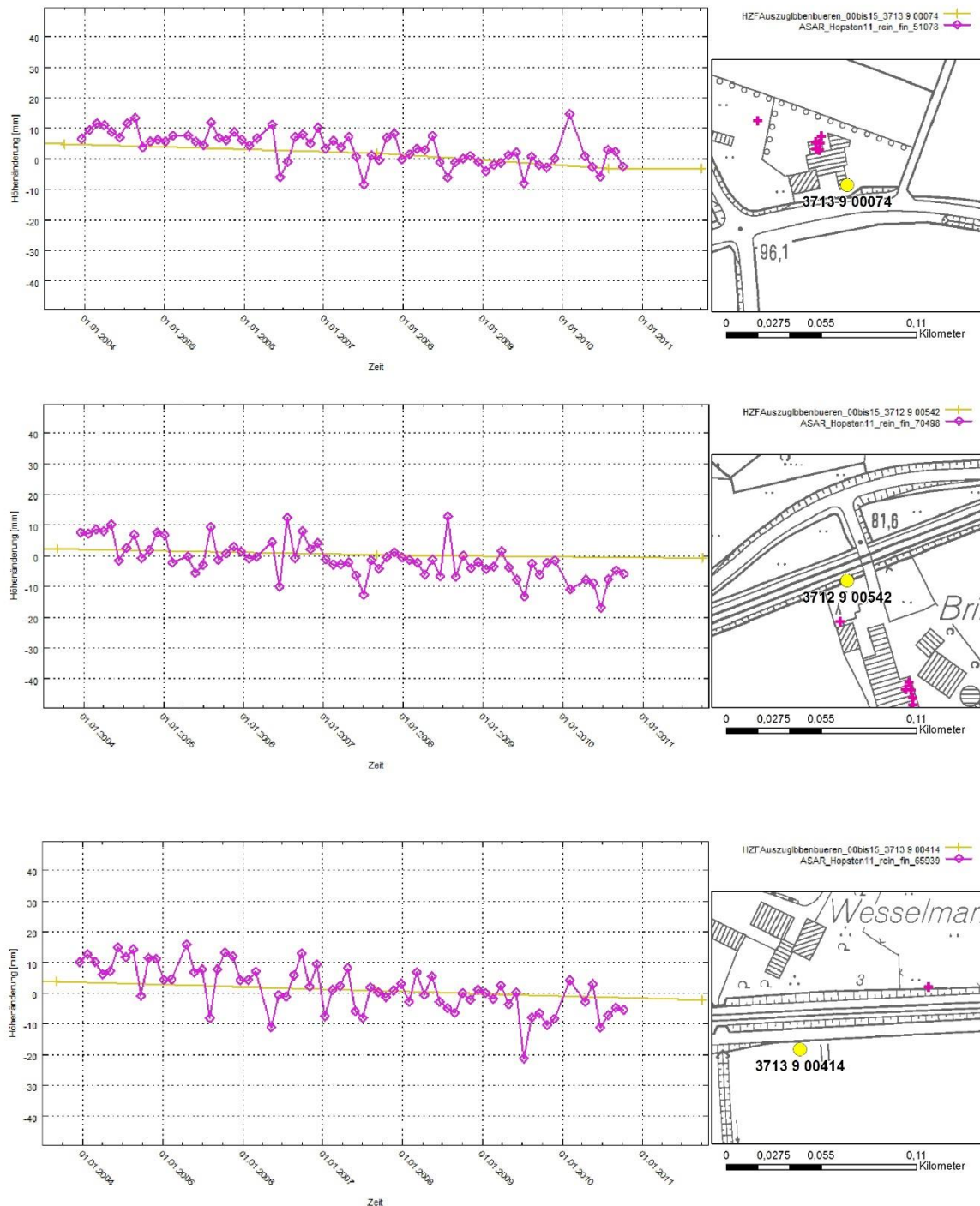


Abbildung 69: Zeitreihen nivellitisch und radarinterferometrisch bestimmter Höhenänderungen an ausgewählten Leitnivellementspunkten außerhalb des prognostizierten Einwirkungsbereiches (Ortslagen der Nivellementspunkte in Abbildung 64); Hintergrund DGK5 © Geobasis NRW 2013

Stellvertretend für die Leitnivellementspunkte 3713 9 00075 und 3713 9 00121 in der Nachbarschaft des Leitnivellementspunktes 3713 9 00119 (Abbildung 70), die alle etwa 3 km von der Grenze des prognostizierten Einwirkungsbereiches entfernt liegen, zeigt der Vergleich der nivellitisch und radarinterferometrisch bestimmten Höhenänderungen (Größenordnung etwa ≥ 5 mm über den gesamten Zeitraum) eine sehr gute Übereinstimmung auf.

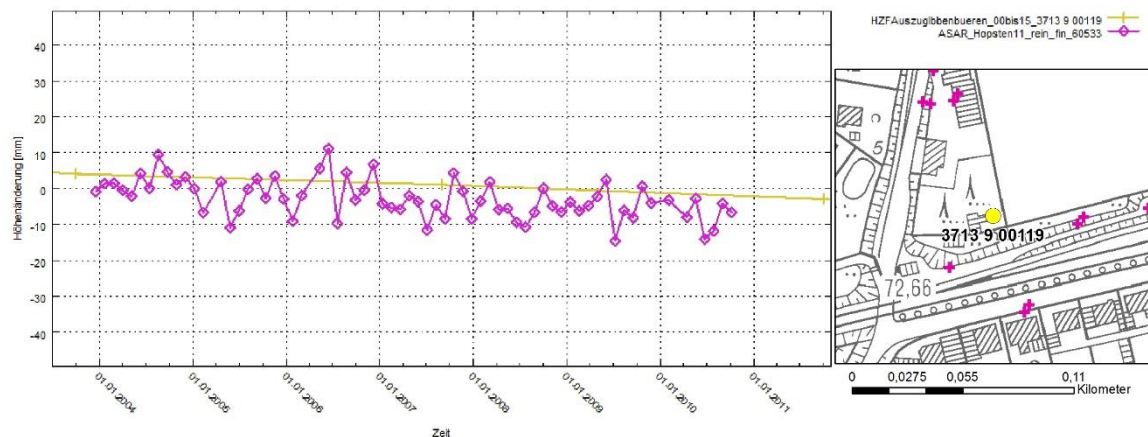


Abbildung 70: Zeitreihen nivellitisch und radarinterferometrisch bestimmter Höhenänderungen am Leitnivellementspunkt 3713 9 00119 außerhalb des prognostizierten Einwirkungsbereiches (Ortslagen der Nivellementspunkte in Abbildung 64); Hintergrund DGK5 © Geobasis NRW 2013

GEBIET ÖSTLICH DES ORTSTEILS DICKENBERG

Für einen Vergleich nivellitisch und radarinterferometrisch bestimmter Höhenänderungen über den Zeitraum der ENVISAT-Zeitreihe standen im Gebiet östlich des Ibbenbürener Ortsteils Dickenberg Messungen an 5 Leitnivellementspunkten außerhalb der Grenze des prognostizierten Einwirkungsbereiches zur Verfügung. Abbildung 71 zeigt die topographische Lage dieser Punkte. In Abbildung 72 sind die Zeitreihen nivellitisch und radarinterferometrisch bestimmter Höhenänderungen dargestellt.

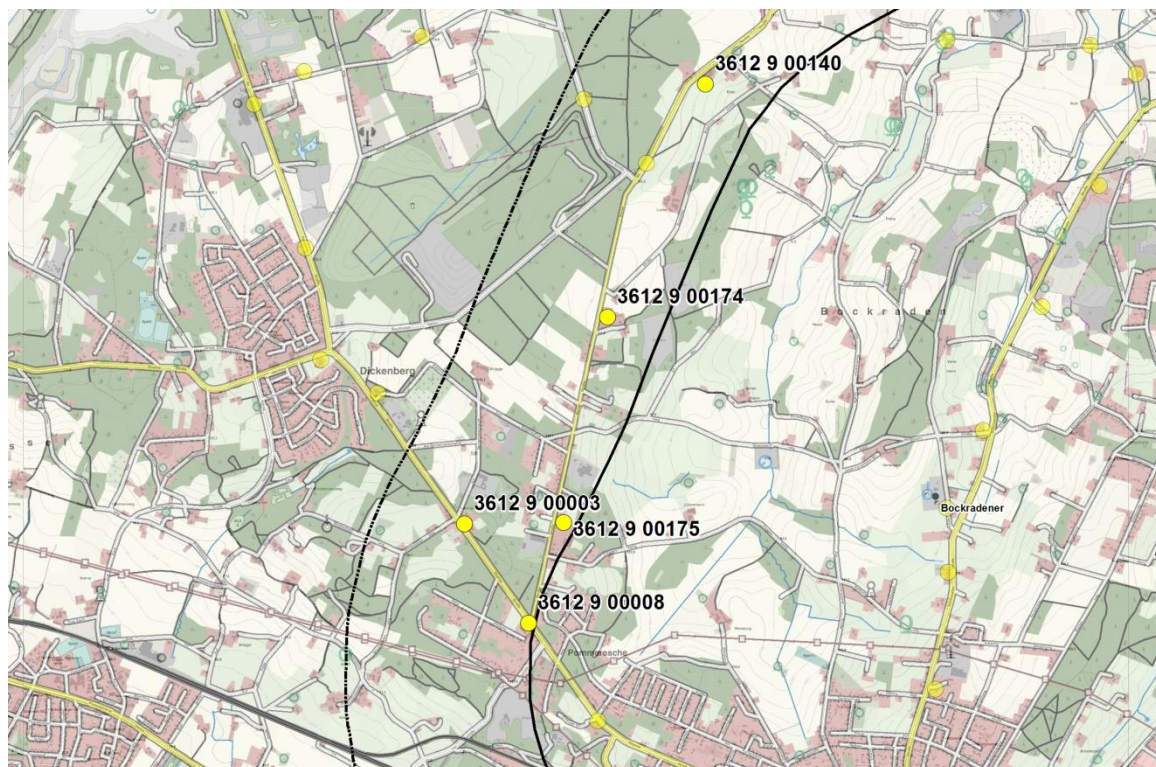
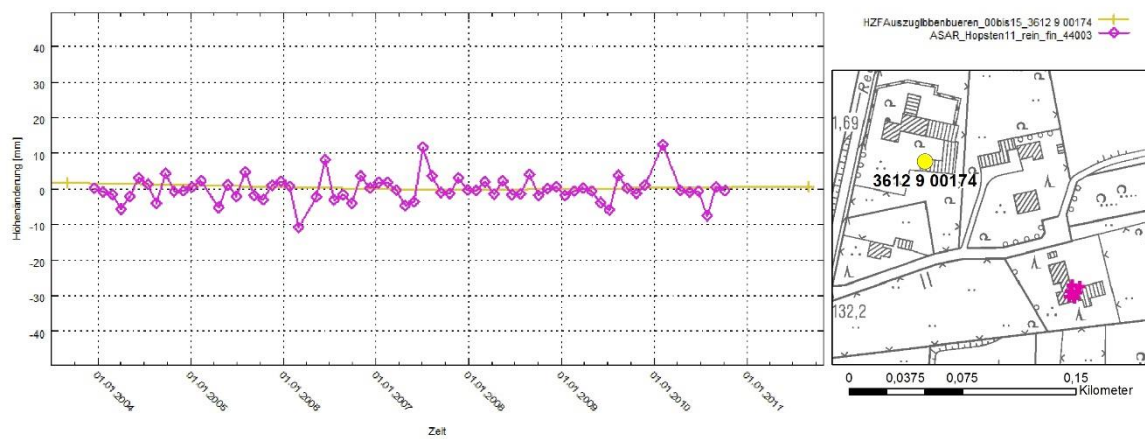
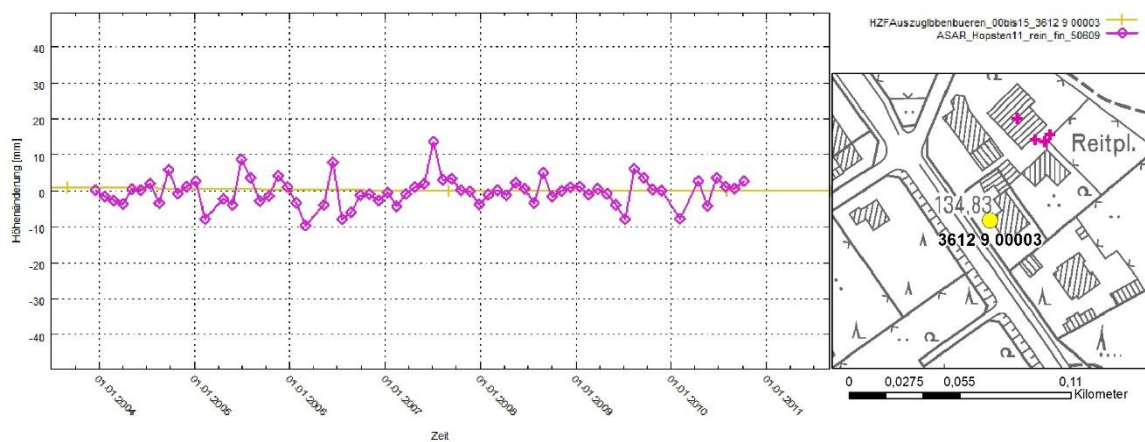
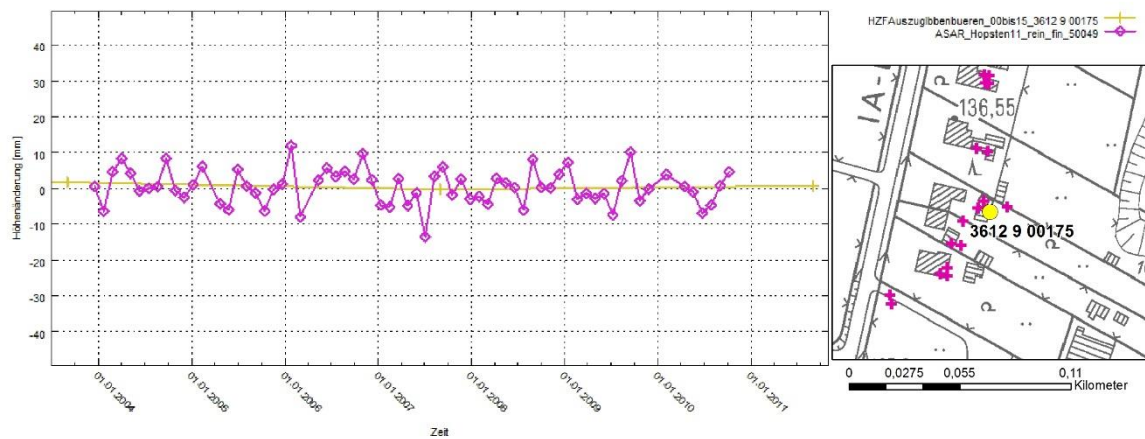
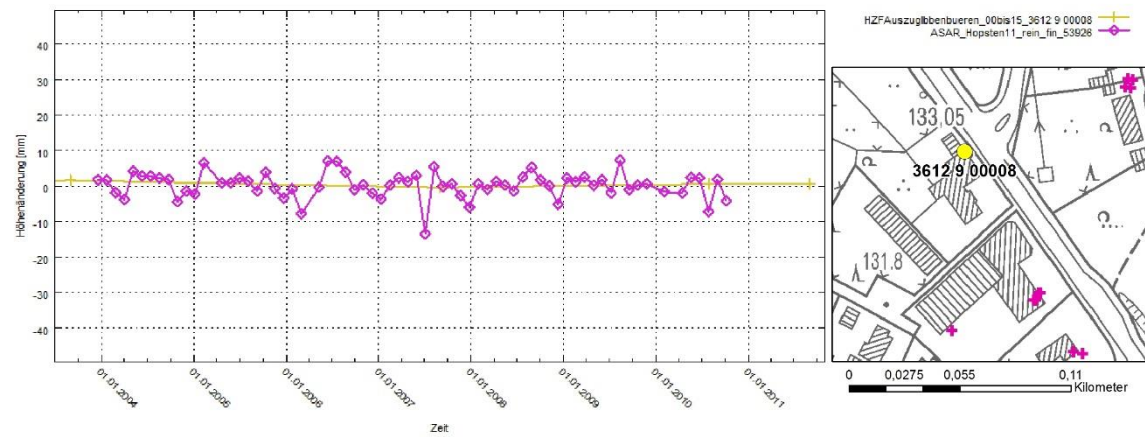


Abbildung 71: Topographische Lage der zum Vergleich benutzten Nivellementspunkte (gelbe Punkte: Leitnivellement © Geobasis NRW 2015) sowie Grenze des prognostizierten Einwirkungsbereiches (schwarze Linie) und +1000 m Linie (schwarze Strichlinie) (© Bezirksregierung Arnsberg 2014); Hintergrund DLM50 © Geobasis NRW 2013



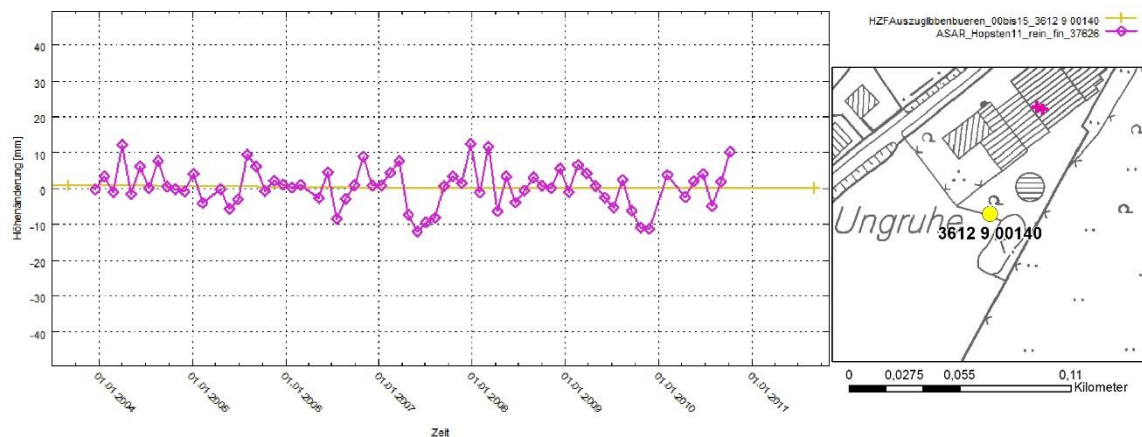


Abbildung 72: Zeitreihen nivellitisch und radarinterferometrisch bestimmter Höhenänderungen an ausgewählten Leitnivellementspunkten außerhalb des prognostizierten Einwirkungsbereiches (Ortslagen der Nivellementspunkte in Abbildung 71); Hintergrund DGK5 © Geobasis NRW 2013

Die vergleichenden Darstellungen der mit der beiden Methoden unabhängig bestimmten Höhenänderungen weisen eine sehr gute Übereinstimmung auf.

GEBIET IBBENBÜREN

Im Bereich des Stadtgebietes Ibbenbüren konnten eine Reihe von Leitnivellementspunkten sowie die Ergebnisse von Nivellements der RAG (innerhalb des Einwirkungsbereiches) für einen Vergleich genutzt werden. Abbildung 73 zeigt die topographische Lage dieser Punkte, von denen in diesem Abschnitt lediglich die im Umfeld der prognostizierten Einwirkungsgrenze liegenden Leitnivellementspunkte genutzt wurden.

Die entsprechenden Gegenüberstellungen der Zeitreihen nivellitisch und radarinterferometrisch bestimmter Höhenänderungen an den ausgewählten Leitnivellementspunkten finden sich in Abbildung 74.

Die vergleichenden Darstellungen der mit beiden Methoden unabhängig bestimmten Höhenänderungen weisen eine sehr gute Übereinstimmung für den Zeitraum der ENVISAT-Zeitreihe auf.

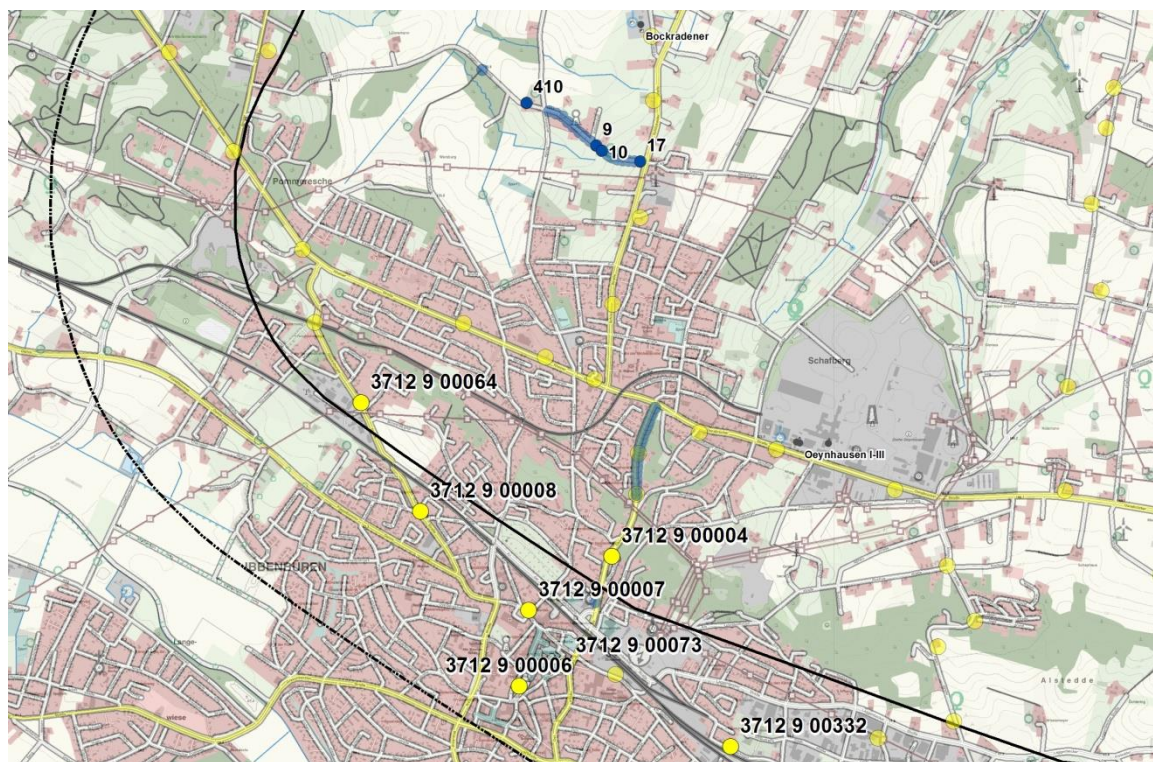
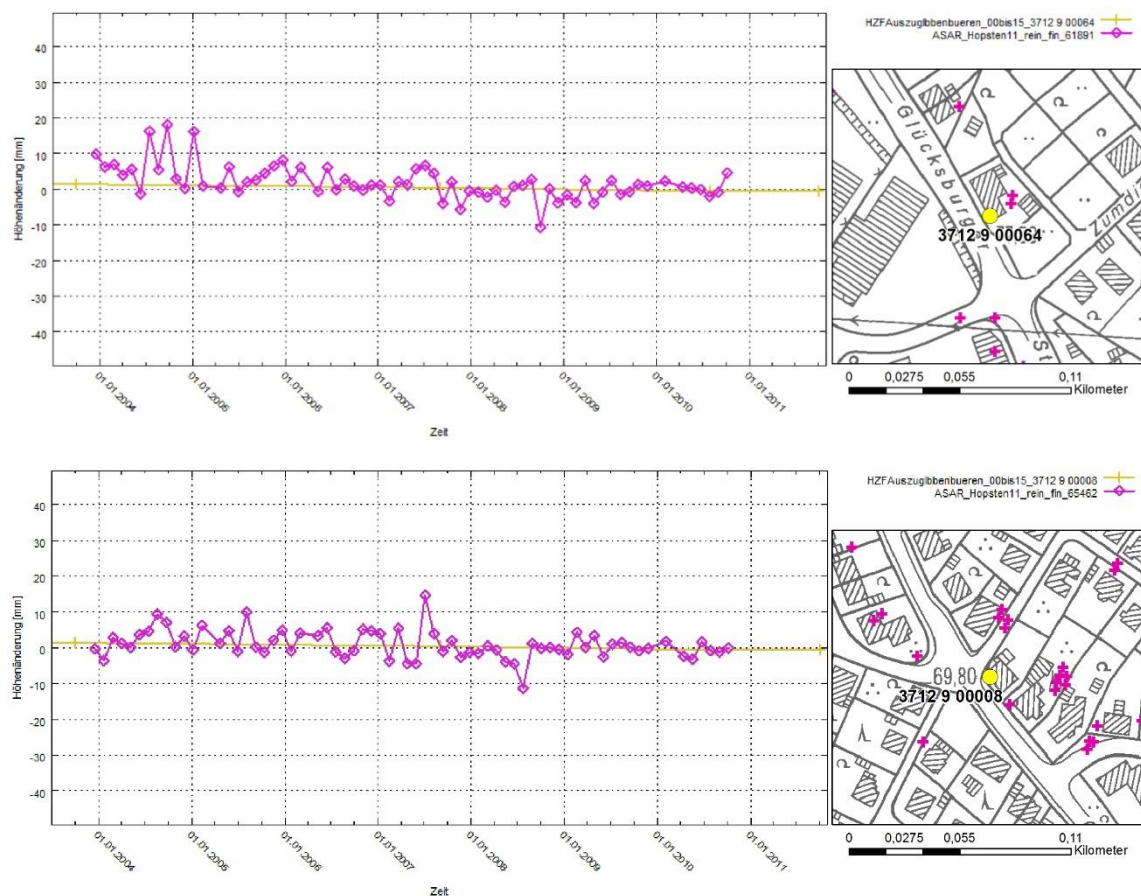
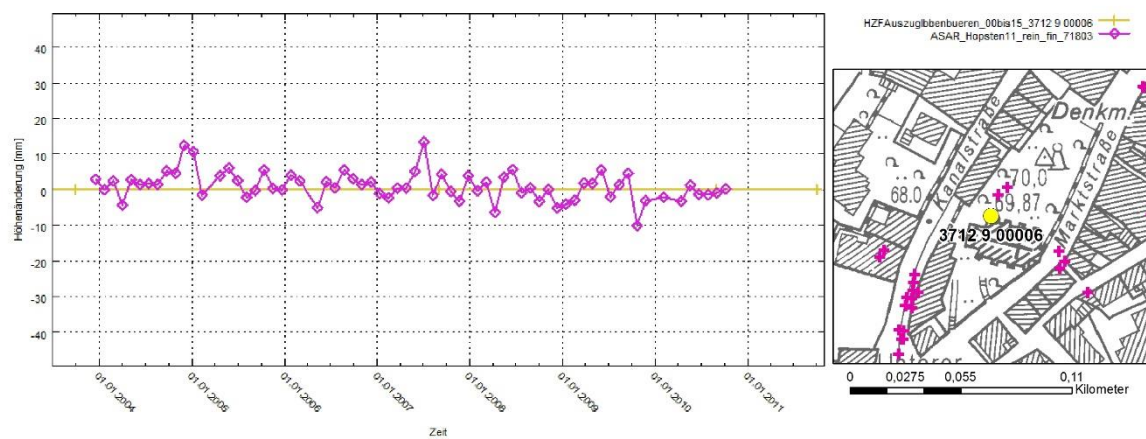
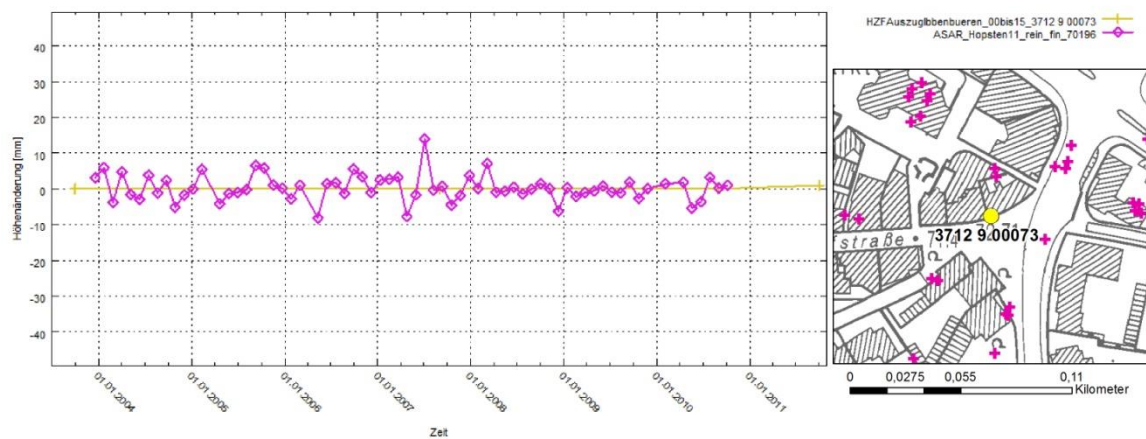
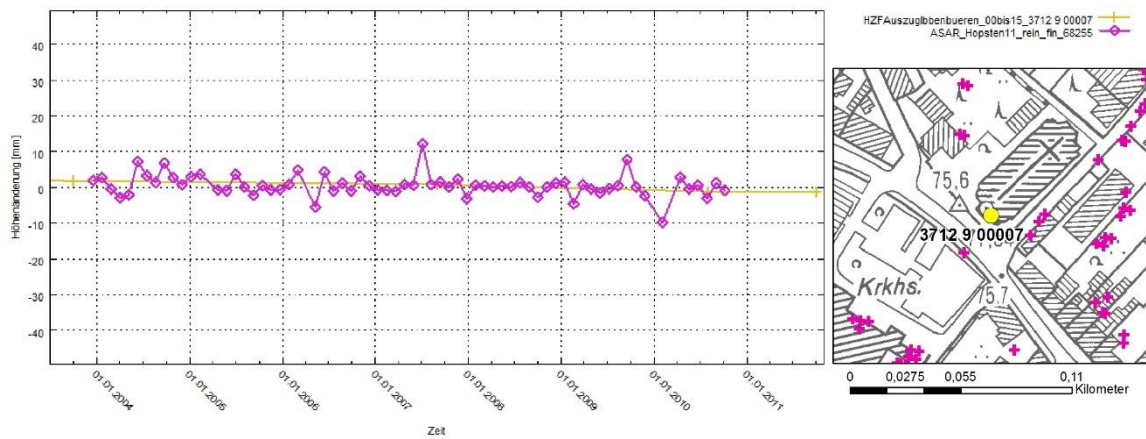
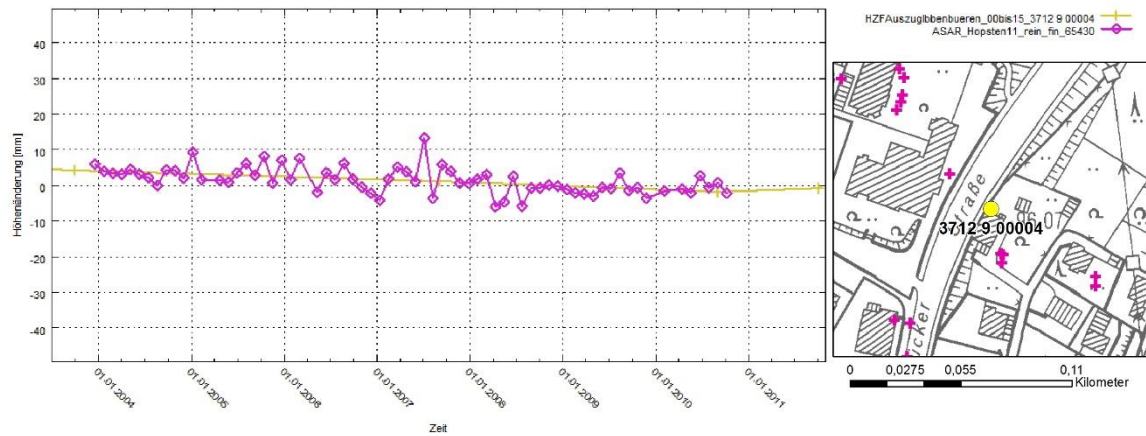


Abbildung 73: Topographische Lage der zum Vergleich benutzten Nivellementspunkte (gelbe Punkte: Leit-nivellement © Geobasis NRW 2015; dunkelblaue Punkte: RAG-Beobachtungsline Wetkampstraße/Ib-benbüren © RAG AG 2015) sowie Grenze des prognostizierten Einwirkungsbereiches (schwarze Linie) und +1000 m Linie (schwarze Strichlinie) (© Bezirksregierung Arnsberg 2014); Hintergrund DLM50 © Geobasis NRW 2013





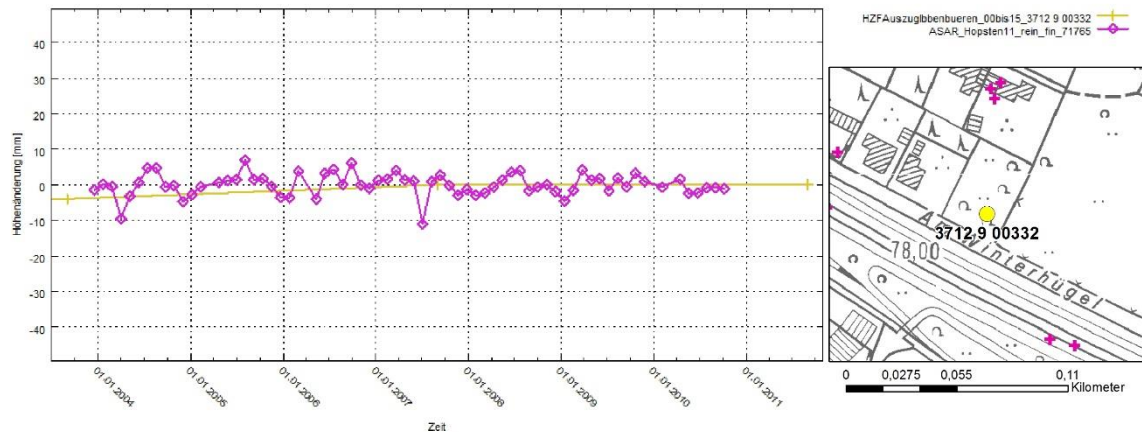
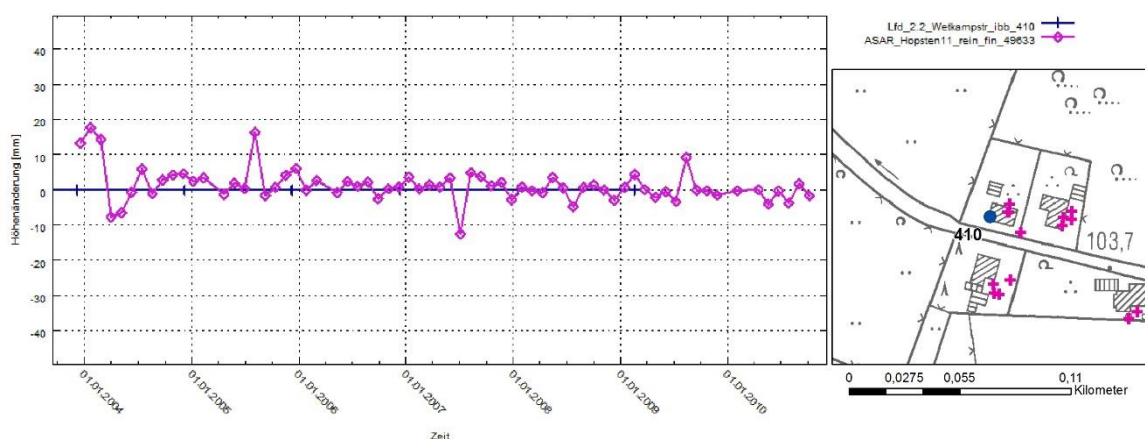


Abbildung 74: Zeitreihen nivellistisch und radarinterferometrisch bestimmter Höhenänderungen an ausgewählten Leitnivelementspunkten innerhalb und außerhalb des prognostizierten Einwirkungsbereiches (Ortslagen der Nivellementspunkte in Abbildung 73); Hintergrund DGK5 © Geobasis NRW 2013

BEOBACHTUNGSLINIE WETKAMPSTRAßE/IBBENBÜREN

Obwohl innerhalb des Einwirkungsbereiches liegend, sollen bis Frühjahr 2009 nivellistisch ermittelte Höhenänderungen entlang einer RAG-Beobachtungslinie am nördlichen Stadtrand von Ibbenbüren für einen Vergleich herangezogen werden. Die topographische Lage dieser Nivellementspunkte ist Abbildung 73 zu entnehmen.

Die Zeitreihenvergleiche in Abbildung 75 weisen eine gute Übereinstimmung auf. Am Punkt 10 (drittes Zeitreihendiagramm) kann darüber hinaus über den gesamten Zeitraum bis Oktober 2010 eine fortlaufende Senkung aus dem radarinterferometrischen Höhenänderungsverlauf bis zu etwa 30 mm abgeleitet werden.



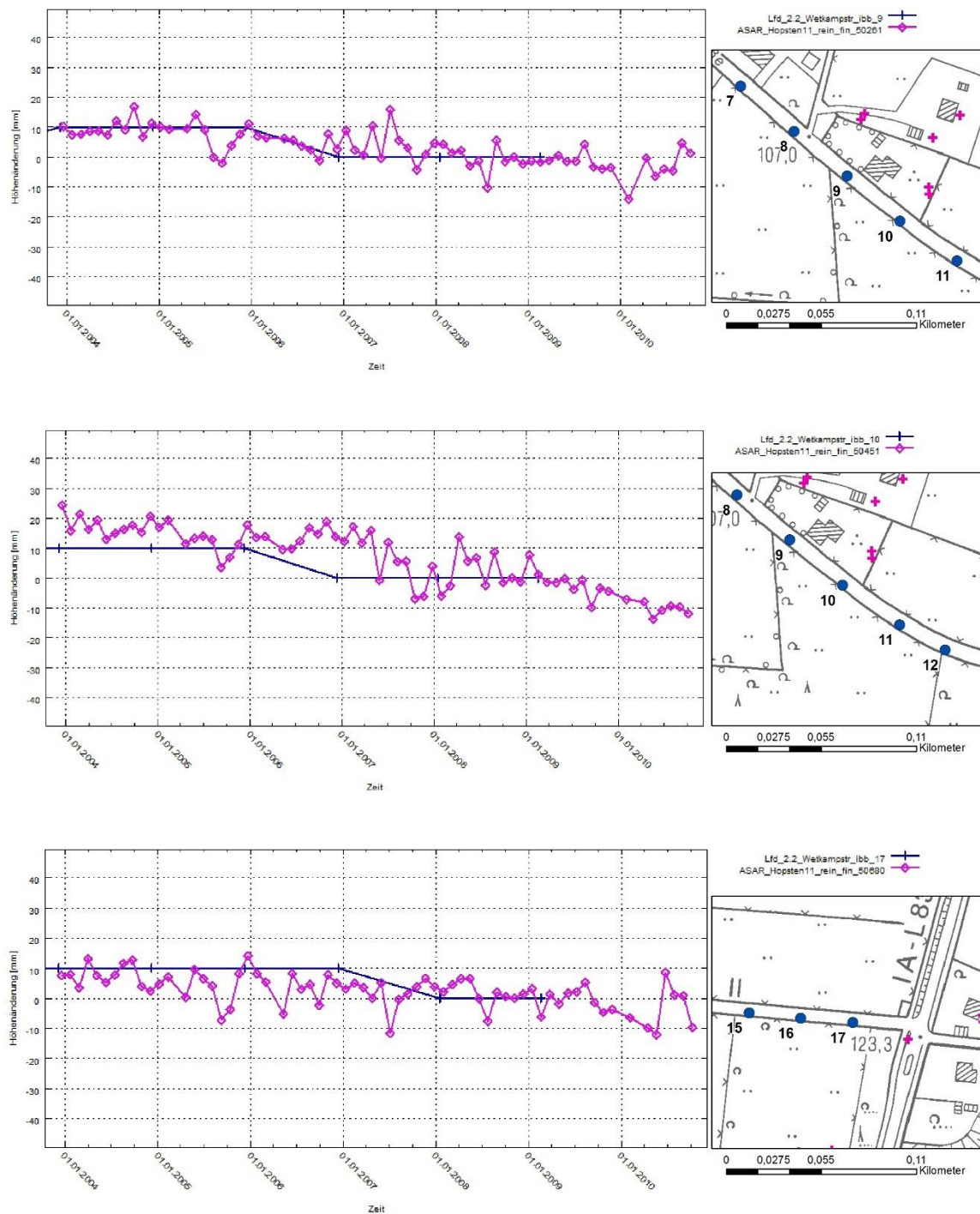


Abbildung 75: Zeitreihen nivellitisch und radarinterferometrisch bestimmter Höhenänderungen an ausgewählten Nivellementspunkten der RAG-Beobachtungslinie „Wetkampstraße/Ibbenbüren“ innerhalb des prognostizierten Einwirkungsbereiches (Ortslagen der Nivellementspunkte in Abbildung 73); Hintergrund DGK5 © Geobasis NRW 2013

■ ZEITRAUM 2003 – 2015 (AUS ENVISAT- UND RADARSAT-2 ZEITREIHEN ZUSAMMEN-
GEFÜGTE GESAMTZEITREIHEN)

BEOBSACHTUNGSLINIE SCHLEPPBAHN/IBBENBÜREN-LAGGENBECK

Im östlich von Ibbenbüren gelegenen Ortsteil Laggenbeck stehen für einen Vergleich die Ergebnisse eines von der RAG durchgeführten Nivellements zur Verfügung. Die exemplarisch ausgewählten Punkte der Beobachtungslinie „Schleppbahn/Ibbenbüren-Laggenbeck“ und ihre topographische Lage ist in Abbildung 76 ersichtlich.

Die Zeitreihenvergleiche in Abbildung 77 beginnen im Süden (außerhalb der prognostizierten Einwirkungsgrenze) am Punkt 509 und folgen dem Verlauf der Linie nach Norden.

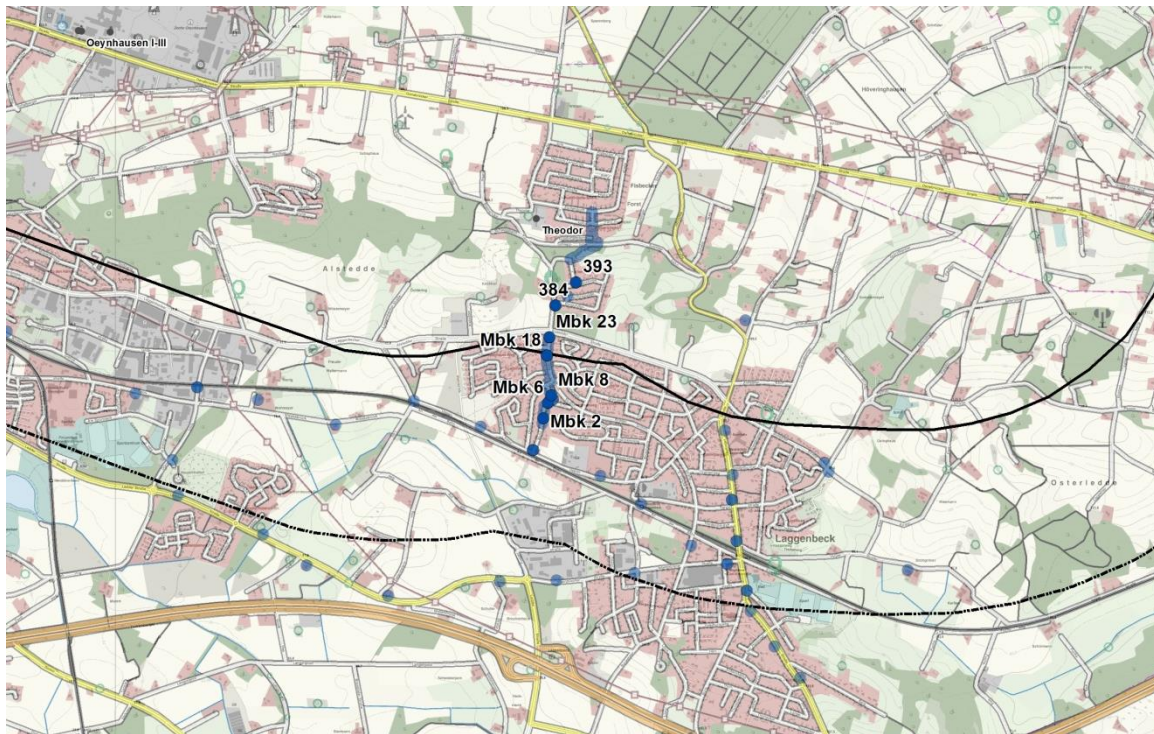
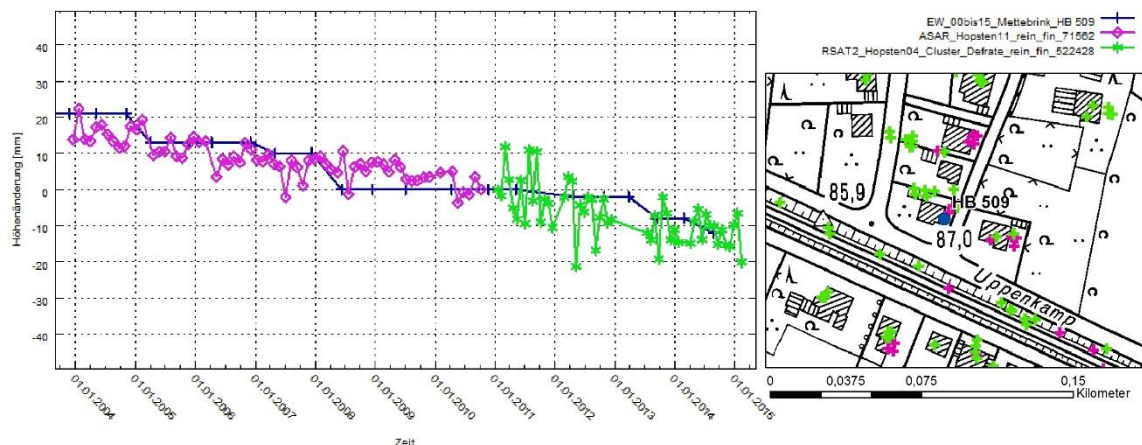
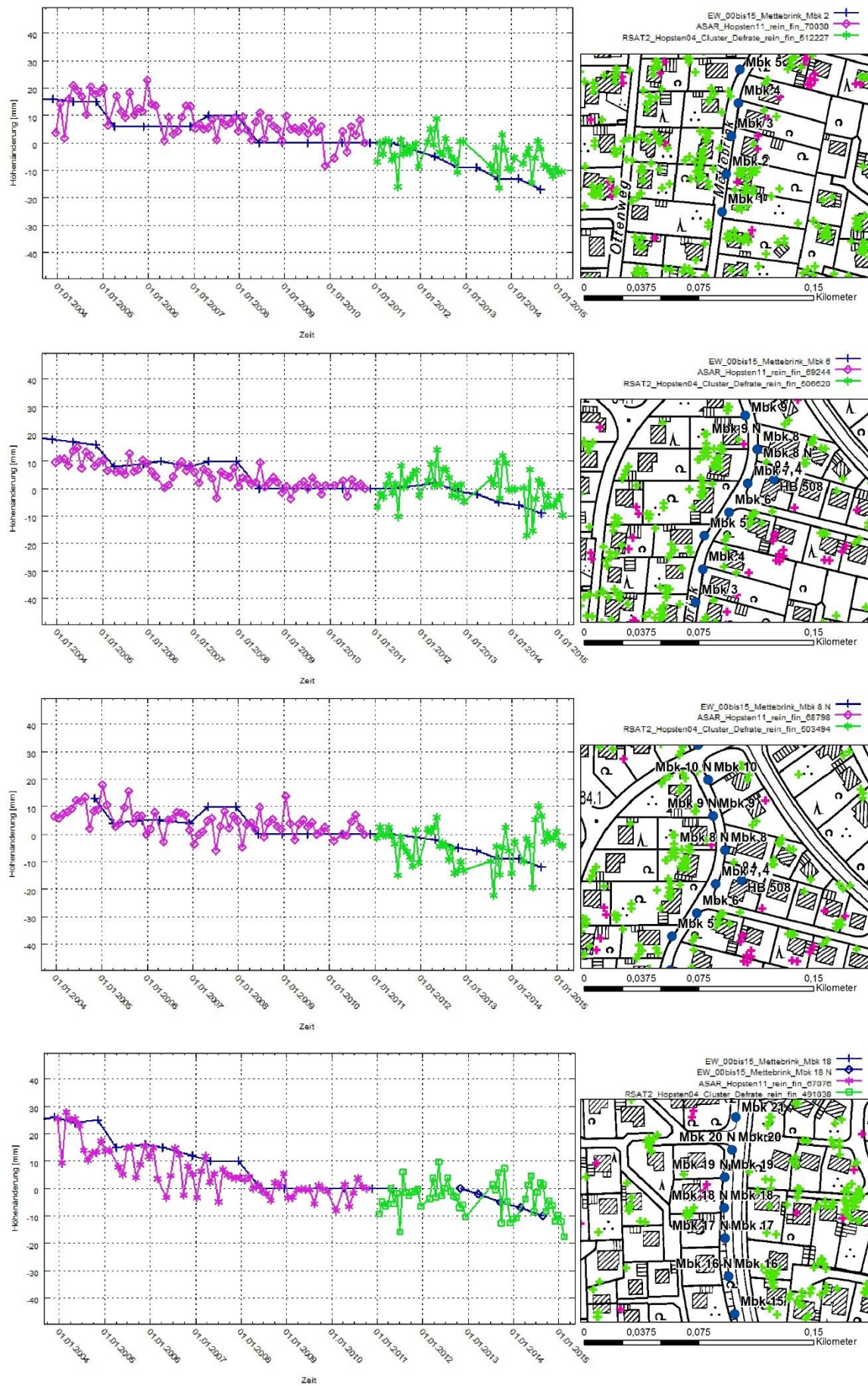


Abbildung 76: Topographische Lage der zum Vergleich benutzten Nivellementspunkte (dunkelblaue Punkte: RAG-Beobachtungslinie Schleppbahn/Ibbenbüren-Laggenbeck © RAG AG 2015) sowie Grenze des prognostizierten Einwirkungsbereiches (schwarze Linie) und +1000 m Linie (schwarze Strichlinie) (© Bezirksregierung Arnsberg 2014); Hintergrund DLM50 © Geobasis NRW 2013





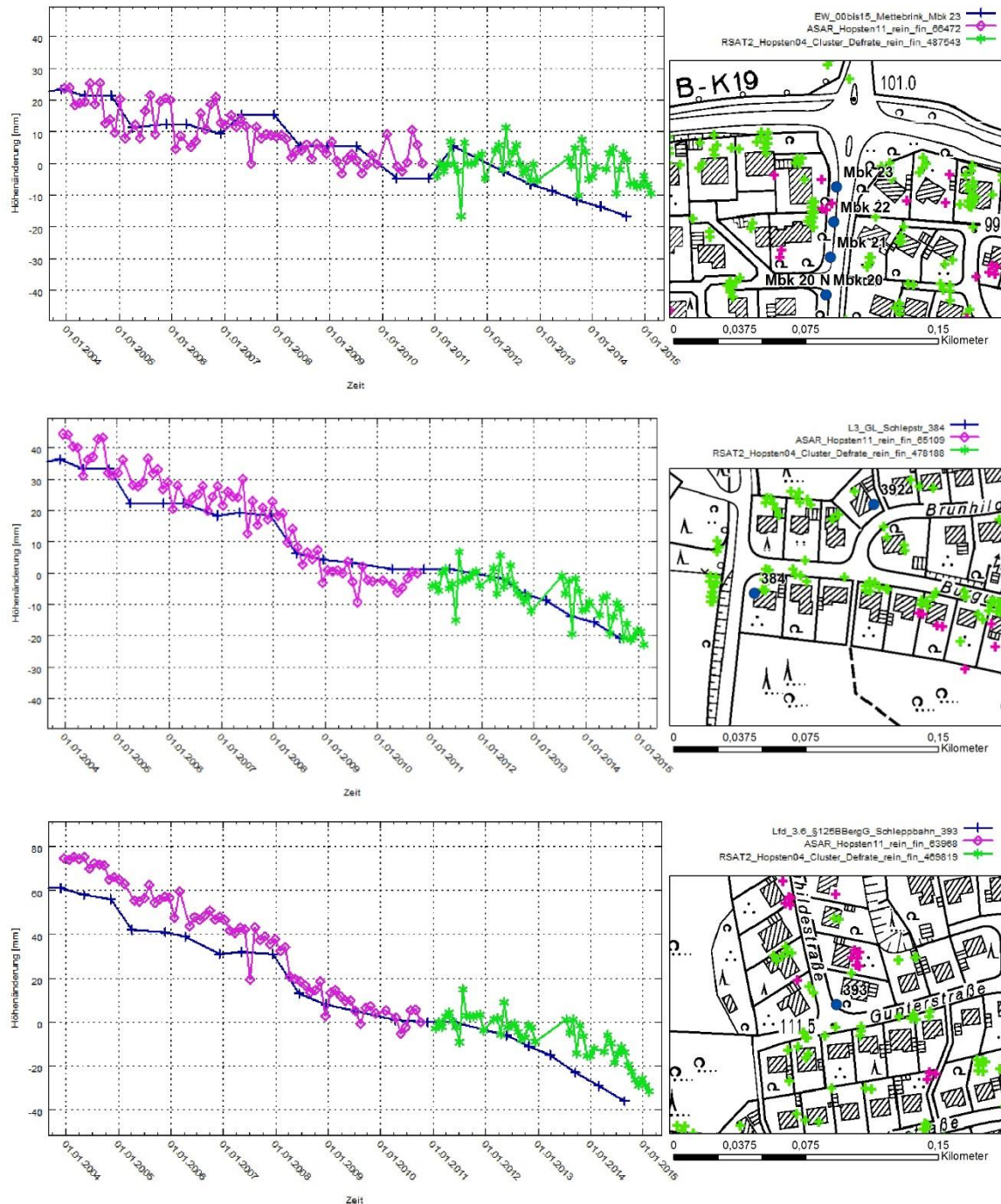


Abbildung 77: Zeitreihen nivellistisch und radarinterferometrisch bestimmter Höhenänderungen an ausgewählten Nivellementspunkten der RAG-Beobachtungslinie „Schleppbahn/Ibbenbüren-Laggenbeck“ innerhalb und außerhalb des prognostizierten Einwirkungsbereiches (Ortslagen der Nivellementspunkte in Abbildung 76); Hintergrund DGK5 © Geobasis NRW 2013

Unter Berücksichtigung kleiner Unsicherheiten (Offsetunsicherheiten) beim Zusammenfügen der radarinterferometrischen und nivellistischen Zeitreihen zeigen die Vergleiche eine zufriedenstellende Übereinstimmung der unabhängig voneinander ermittelten Höhenänderungszeitreihen.

GEBIET METTINGEN

Am westlichen Rand von Mettingen stehen für einen Vergleich die Ergebnisse der von der RAG durchgeführten Nivellements zur Verfügung. Die exemplarisch ausgewählten Punkte und ihre topographische Lage sind in Abbildung 78 dargestellt.

Die Zeitreihenvergleiche in Abbildung 79 beginnen im Norden (außerhalb der prognostizierten Einwirkungsgrenze) am Punkt 387 und folgen dem Verlauf der Punkte nach Süden.

Unter Berücksichtigung kleiner Unsicherheiten (Offsetunsicherheiten) beim Zusammenfügen der radarinterferometrischen und nivellitischen Zeitreihen zeigen die Vergleiche eine zufriedenstellende Übereinstimmung der unabhängig voneinander ermittelten Höhenänderungszeitreihen.

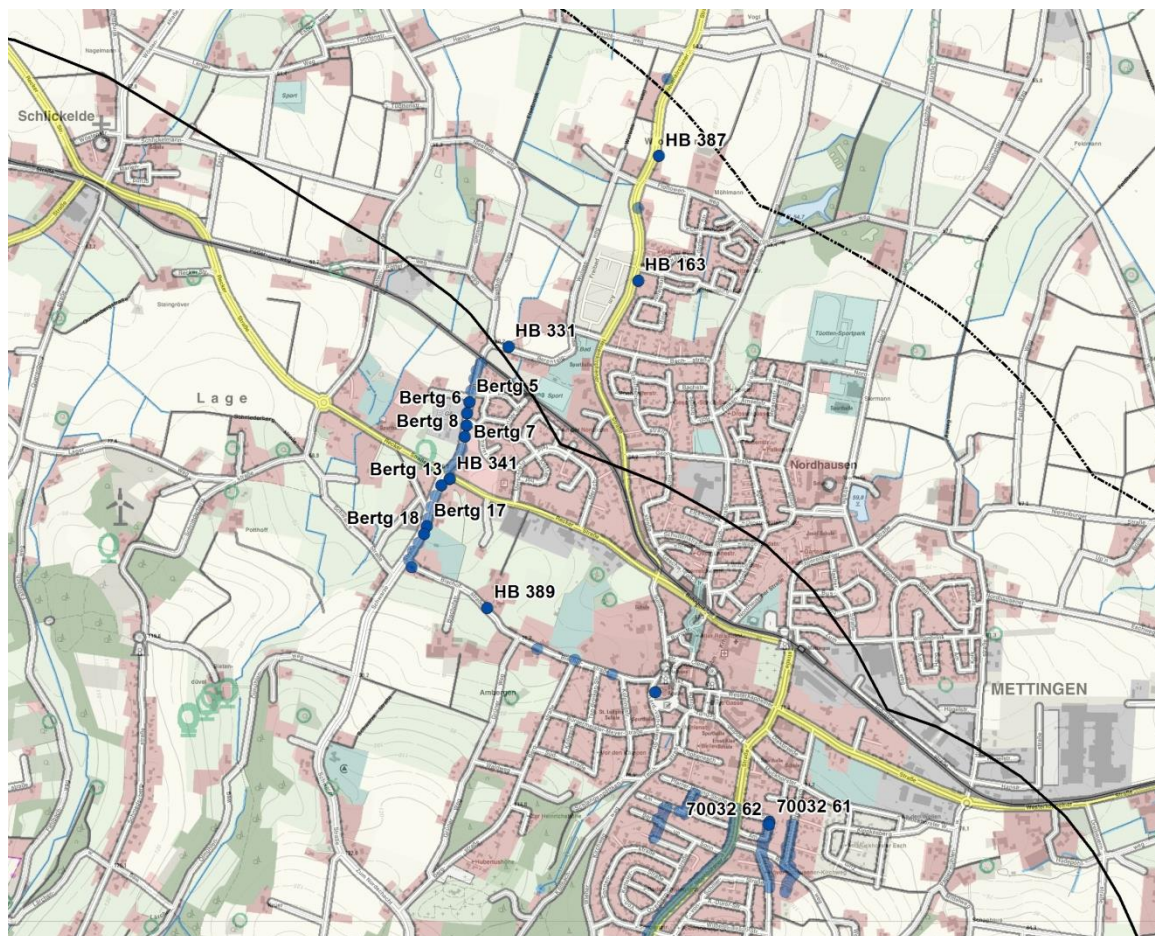
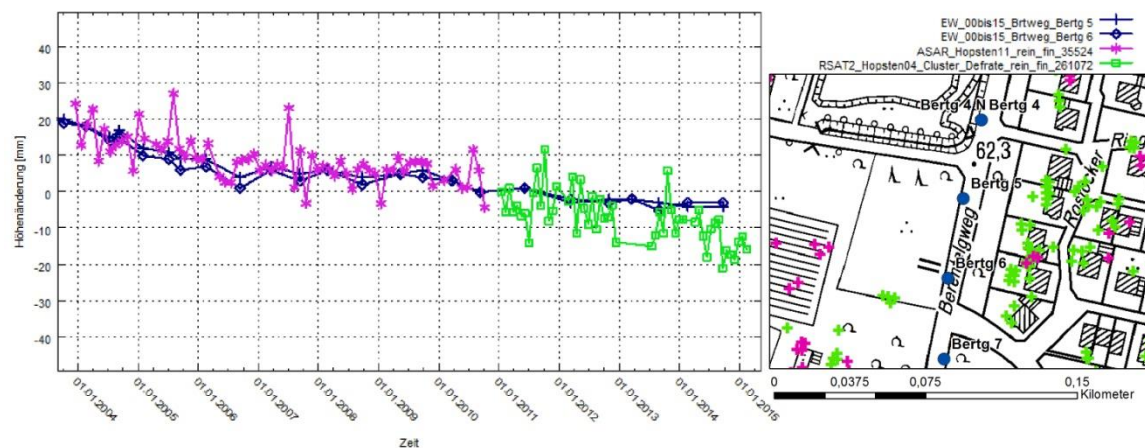
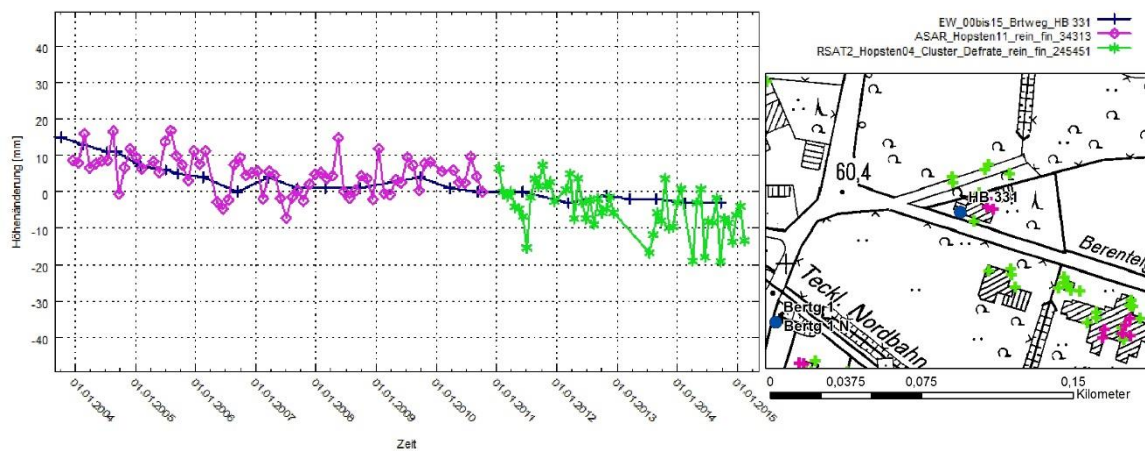
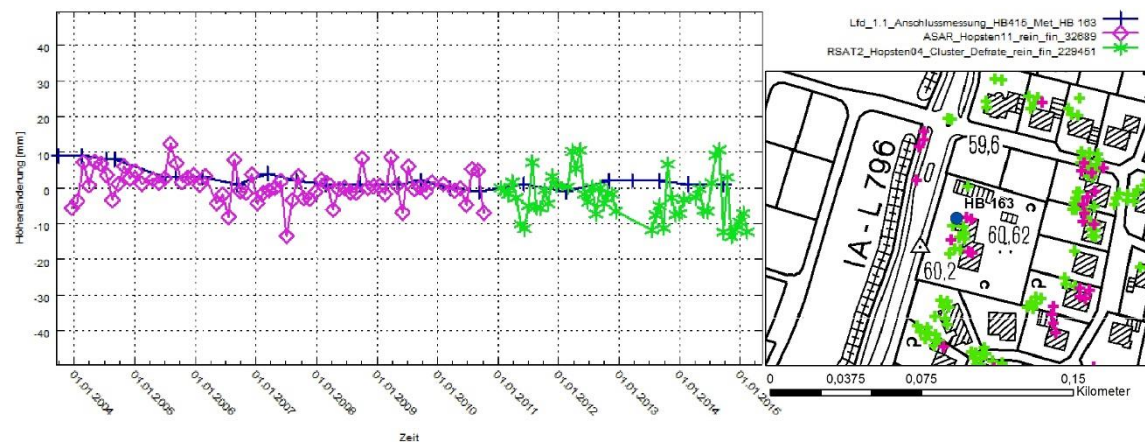
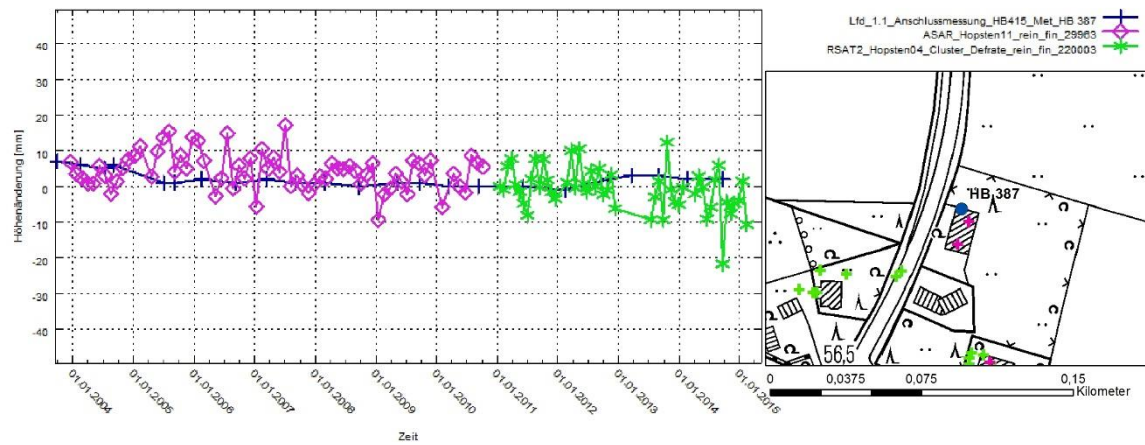
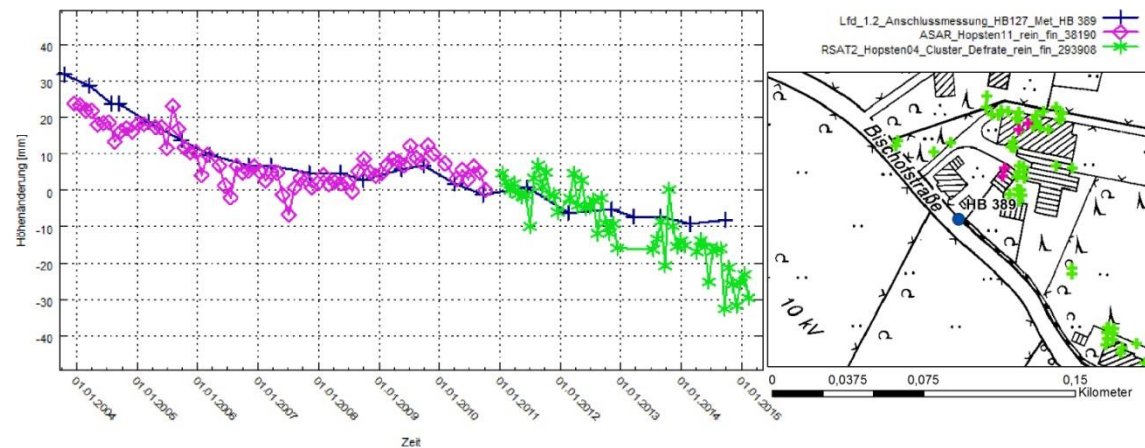
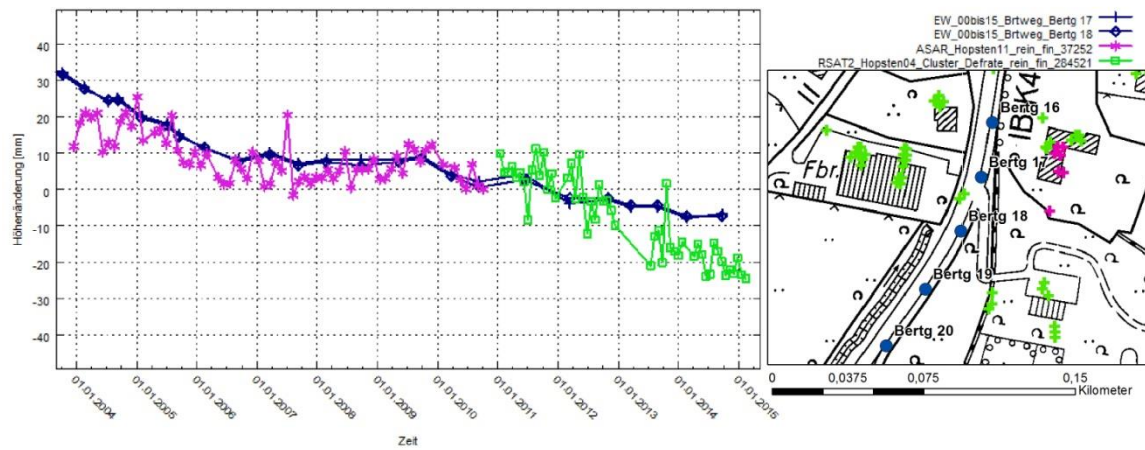
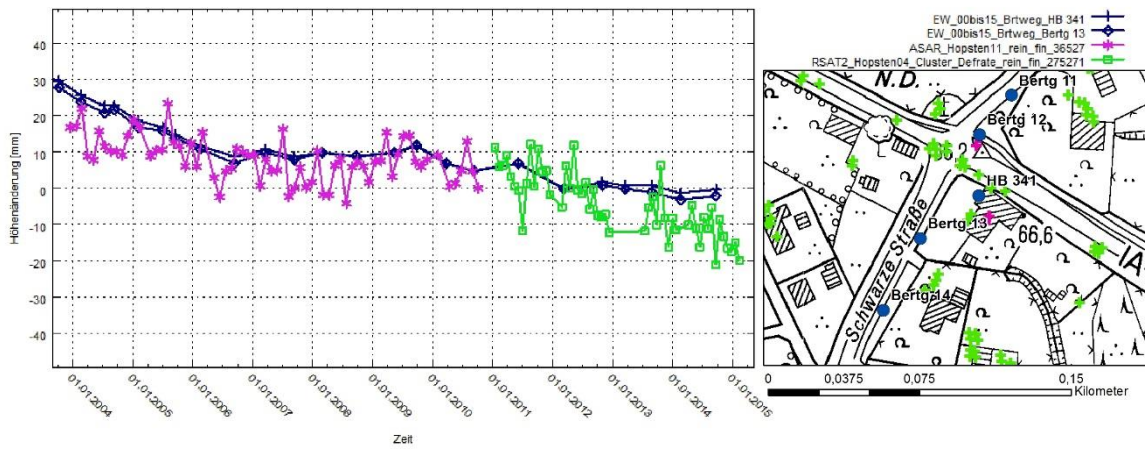
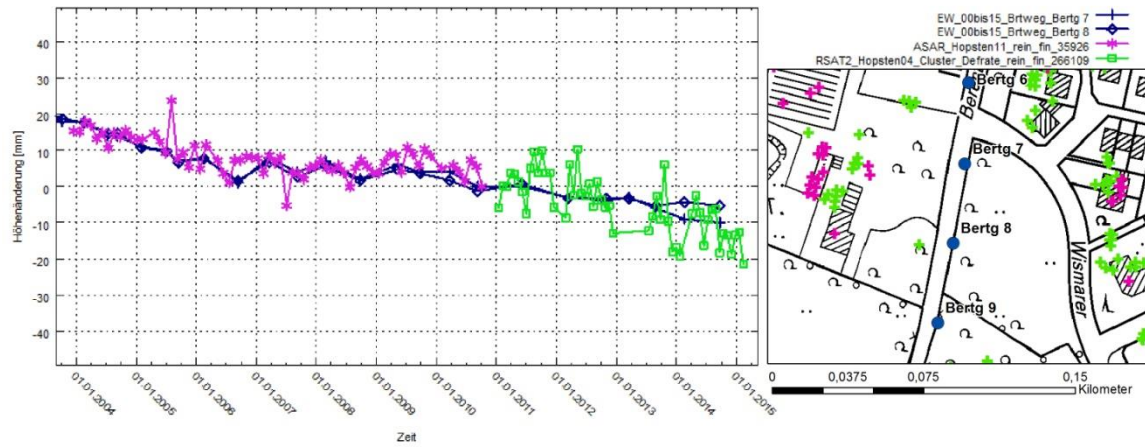


Abbildung 78: Topographische Lage der zum Vergleich benutzten Nivellementspunkte (dunkelblaue Punkte: RAG-Beobachtungslinien Berentelweg/Mettingen und weitere in Mettingen © RAG AG 2015) sowie Grenze des prognostizierten Einwirkungsbereiches (schwarze Linie) und +1000 m Linie (schwarze Strichlinie) (© Bezirksregierung Arnsberg 2014); Hintergrund DLM50 © Geobasis NRW 2013





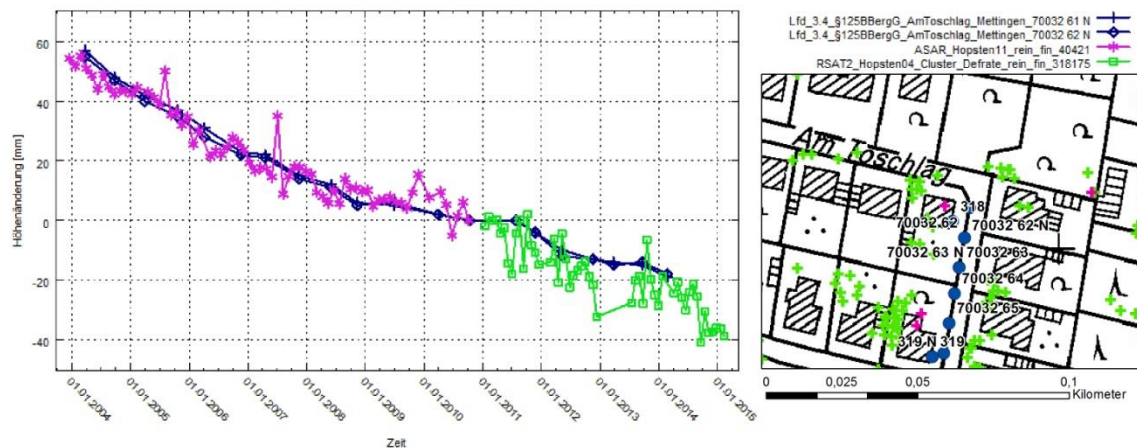


Abbildung 79: Zeitreihen nivellitisch und radarinterferometrisch bestimmter Höhenänderungen an ausgewählten Nivellementspunkten der RAG-Beobachtungslinien „Berentelgweg/Mettingen sowie weiterer RAG-Beobachtungspunkte innerhalb und außerhalb des prognostizierten Einwirkungsbereiches (Ortslagen der Nivellementspunkte in Abbildung 78); Hintergrund DGK5 © Geobasis NRW 2013

6.4. Abgrenzung von Gebieten mit Bodenbewegungen

6.4.1. Gebiete mit signifikanten Höhenänderungen

Eine vollständige, flächendeckende Abgrenzung von Gebieten mit signifikanten Höhenänderungen im gesamten Betrachtungszeitraum und im Umfeld der prognostizierten Einwirkungsgrenze ist aufgrund der Datenlage nicht möglich. Als Datengrundlage werden die bereits in Kapitel 6.2.2 erläuterten und dargestellten flächeninterpolierten Gesamthöhenänderungen für den Zeitraum Dezember 2008 bis Februar 2015 verwendet. Die Abgrenzung der Gebiete mit radarinterferometrisch ermittelten Höhenänderungen (unabhängig von ihrer Ursache) erfolgt mit Hilfe von ArcGIS-Tools durch Konstruktion einer Linie gleicher Höhenänderung. Die Festlegung eines „signifikanten“ Höhenänderungswertes für diese Linie erfolgt auf Grundlage der nachfolgend erläuterten Betrachtungen.

Zur Berechnung der Höhenänderungsdifferenzen (Kapitel 6.2.2) werden die Funktionswerte (jeweils erster und letzter ausgeglichener Höhenänderungswert einer Zeitreihe) der Trendfunktionen für die ENVISAT- und Radarsat-2-Zeitreihen benutzt. Da sie die numerische Grundlage für alle weiteren Berechnungen darstellen, ist im Hinblick auf eine Signifikanzabschätzung der Gesamthöhenänderungen auch ihre Genauigkeit zu ermitteln. Die Standardabweichung einer Höhenänderungsdifferenz ergibt sich mit dem Fehlerfortpflanzungsgesetz auf Grundlage der Standardabweichungen der beiden ausgeglichenen Höhenänderungswerte (= Funktionswerte). Die Anwendung einer programmtechnischen Umsetzung ergab getrennt für alle ENVISAT und Radarsat-2 PSI-Zeitreihenmodellierungen die in Abbildung 80 dargestellten Standardabweichungen der Höhenänderungsdifferenzen.

Die Histogramme in Abbildung 80 zeigen zum einen die Standardabweichungen der Höhenänderungsdifferenzen für alle PS-Punkte im Untersuchungsraum (blaue Histogramme in Abbildung 80) sowie nur für die PS-Punkte, innerhalb des nicht ausmaskierten Untersuchungsbereiches, d. h. dem mittleren Gebietsstreifen in Abbildung 81, der im weiteren als GHÄ-Bereich (Gesamthöhenänderungs-Bereich) bezeichnet wird. Außerhalb des GHÄ-Bereiches können die PS-

Punkte fehlerhaft abgeleitete Höhenänderungswerte aufgrund möglicher nicht zu vernachlässigender Horizontalbewegungseinflüsse aufweisen (Kapitel 6.1).

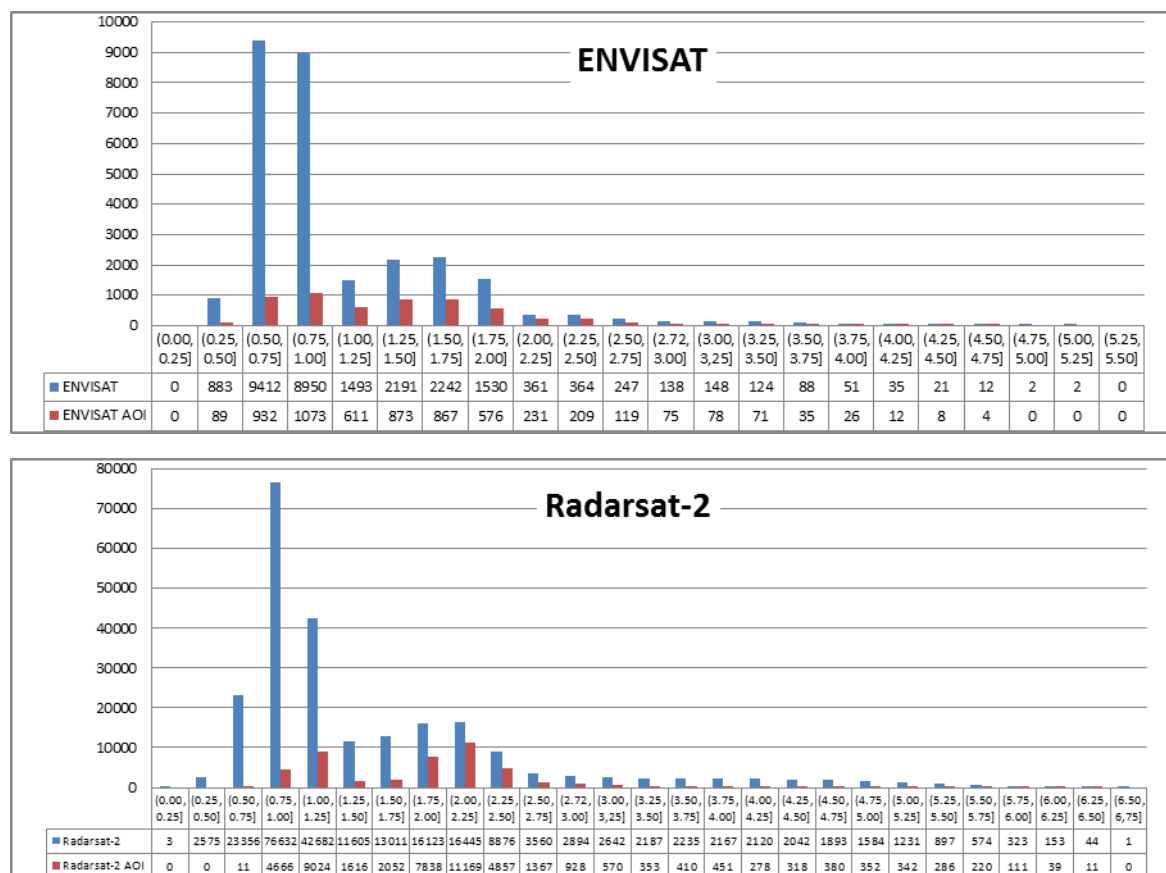


Abbildung 80: Standardabweichungen der Höhenänderungsdifferenzen (oben: ENVISAT; unten: Radarsat-2) für den gesamten Untersuchungsraum (blaue Balken) bzw. den nicht ausmaskierten Bereich (rote Balken); abgeleitet aus dem jeweils ersten und letzten Funktionswert der Trendfunktion einer Zeitreihe und ihren Standardabweichungen

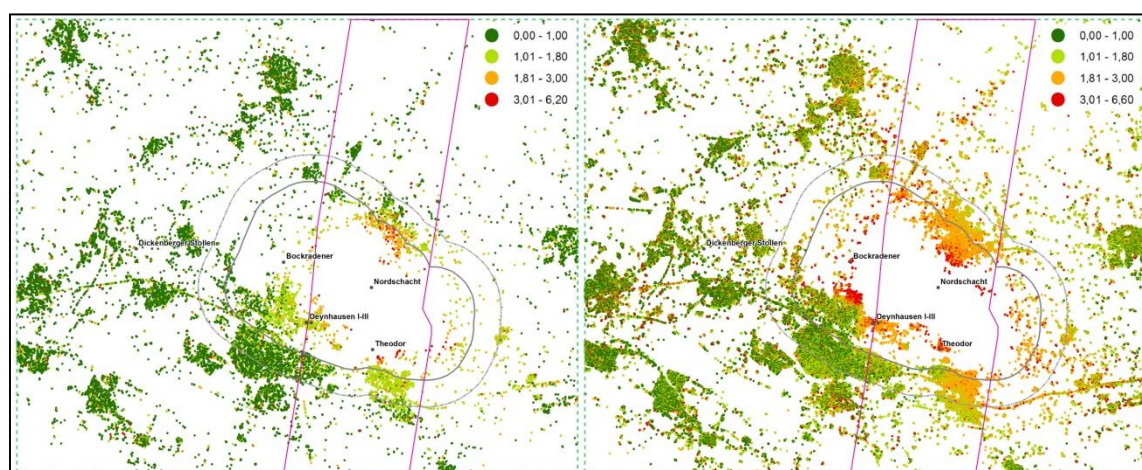


Abbildung 81: Räumliche Verteilung der Standardabweichungen der Höhenänderungsdifferenzen [mm] (links: ENVISAT; rechts: Radarsat-2); GHÄ-Bereich: lila umrandet

Im Mittel ergibt sich für die Standardabweichungen der Höhenänderungsdifferenzen von ENVISAT-Zeitreihen ein Wert von ca. 1,0 mm (GHÄ: 1,4 mm) und für die Radarsat-2-Zeitreihen ein

Wert von kleiner gleich 1,5 mm (GHÄ: 2,0 mm). Die räumliche Verteilung dieser Genauigkeitsmaße ist der Abbildung 81 zu entnehmen.

Die Signifikanz einer berechneten Höhenänderungsdifferenz kann mit Hilfe des Quotienten aus der Höhenänderungsdifferenz und seiner Standardabweichung berechnet werden. Bei Festlegung einer Signifikanzschwelle von 99 % sollte der Betrag des Quotienten größer 2,57 sein, damit die Höhenänderungsdifferenz als signifikant bezeichnet werden kann. Die Anwendung dieses Tests auf alle Zeitreihen ergab, dass nur ca. 614 PS-Punkte (2,2 %) (GHÄ: 204 PS-Punkte, 3,5 %) der ENVISAT-Zeitreihen nicht signifikante Höhenänderungsdifferenzen aufweisen und 20711 PS-Punkte (8,7 %) (GHÄ: 2432 PS-Punkte, 5,1 %) der Radarsat-2-Zeitreihen.

Um näherungsweise und lediglich größenordnungsmäßig die Mindestgröße der Gesamthöhenänderungsdifferenz (für den Zeitraum 2008 bis 2015, durch Addition der ENVISAT- und Radarsat-2-Höhenänderungsdifferenz im nicht ausmaskierten Bereich) abschätzen zu können, die als signifikant bezeichnet werden könnte, ist das Fehlerfortpflanzungsgesetz auf die Summe der beiden Teil-Höhenänderungsdifferenzen unter Berücksichtigung ihrer mittleren Standardabweichungen anzuwenden. Geht man von den oben genannten Standardabweichungen von 1,4 mm (für ENVISAT) und 2,0 mm (für Radarsat-2) aus, so ergibt sich eine Standardabweichung von ca. 2,4 mm für die Gesamthöhenänderung (2008 – 2015) im GHÄ-Bereich. Für den gesamten Untersuchungsraum ergibt sich ein Wert von ca. 1,8 mm. Unter Berücksichtigung einer Signifikanzschwelle von 99 % müsste eine so ermittelte „signifikante“ Gesamthöhenänderung größer als 6,2 mm (GHÄ-Bereich) bzw. 4,6 mm (Untersuchungsraum) sein. Aus diesen Abschätzungen könnte der Schluss gezogen werden, als Mindestgröße des Wertes einer Linie gleicher Gesamthöhenänderung „5-7 mm“ zu verwenden.

Im letzten Teil dieser vorangegangenen Betrachtungen bleibt der tatsächlich angewendete Rechenweg über die IDW-Interpolation, Rasterbildung und Rasteraddition unberücksichtigt. Um die Unsicherheiten, auch infolge von „Verschmierungseffekten“ sowie die nicht erfolgte Extrapolation für die Zeitlücke von 3 Monaten zwischen der ENVISAT- und Radarsat-2 Zeitreihe, bei diesen Berechnungen sowie auch bei der Linieninterpolation zu berücksichtigen und letztlich somit zu einer belastbaren Angabe zu kommen, wird ein Wert von „10 mm“ als kleinster Wert einer Linie gleicher Gesamthöhenänderungen (12/2008 – 02/2015) für die Abgrenzung von Gebieten mit signifikanten Senkungen festgelegt. Dieser Wert entspricht über den Betrachtungszeitraum einer durchschnittlichen Höhenänderungsrate von 1,6 mm/a.

Aus den flächeninterpolierten Gesamthöhenänderungen (Kapitel 6.2.2) wurden die in Abbildung 82 dargestellten Linien gleicher Gesamthöhenänderungen (-10 mm, -20 mm, -30 mm) für die nicht ausmaskierten Bereiche (GHÄ-Bereich) mittels ArcGIS abgeleitet.

Zusammengefasst kann festgestellt werden, dass auf Basis der radarinterferometrischen Daten für den Zeitraum Dezember 2008 bis Februar 2015 zwei Höhenänderungsgebiete zuverlässig (signifikant) detektiert werden können:

- **Senkungsgebiet Mettingen** (im Norden) und
- **Senkungsgebiet Ibbenbüren-Laggenbeck** (im Süden).

Diese Bodenbewegungsgebiete weisen außerhalb des prognostizierten Einwirkungsbereiches des RBP signifikante Höhenänderungen (unabhängig von ihrer Ursache) von größer als 10 mm auf.

6.4.2. Gebiete radarinterferometrisch ermittelter Höhenänderungen und Bodenbewegungen

In Abbildung 83 sind die in Kapitel 5.7 ermittelten LOS-Bewegungsgebiete der Ergebnisse von Radarsat-2 (-8 mm, 01/2011 – 02/2015, gelborange Linien) zusammen mit der über den gesamten Betrachtungszeitraum (12/2008 – 02/2015) abgeleiteten -10 mm Isolinie der Gesamthöhenänderungen (rote Linien) dargestellt. Ergänzt wurde die Darstellung um eine aus dem ENVISAT IDW-Ergebnis (Abbildung 56) abgeleitete -5 mm - Höhenänderungslinie für den Zeitraum 12/2008-10/2010 (blaue Linien).

Die gemeinsame Darstellung der Linien zeigt im östlichen Teilgebiet eine deutliche Vergrößerung des aus den LOS-Ergebnissen abgeleiteten Bodenbewegungsgebietes im Radarsat-2-Zeitraum gegenüber dem ENVISAT-Zeitraum, was sicherlich auch durch den doppelt so großen Betrachtungszeitraum der Messungen mit Radarsat-2 zu erklären ist. Dies weist aber auch darauf hin, dass sich weitere Bodenbewegungen in LOS-Richtung im Zeitraum ab 01/2011 eingestellt haben. Festzustellen ist für dieses Gebiet ferner, dass in dem kurzen Zeitraum 12/2008-10/2010 Senkungen bis 5 mm am Rand der +1000 m Zone eingetreten sind (blaue Linien in Abbildung 83). Diese Senkungen werden bestätigt durch die Ergebnisse der Leitnivellements (Abbildung 69, Abbildung 70) und setzen sich bis zur letzten vorliegenden Leitnivellements-messung im Herbst 2011 fort.

Der Verlauf der -10 mm Gesamthöhenänderungslinie (rote Linien in Abbildung 82 und Abbildung 83), die aus bekannten Gründen nur in dem mittleren Streifen ableitbar ist, beschreibt Senkungen außerhalb des prognostizierten Einwirkungsbereiches für die Bereiche Mettingen und Ibbenbüren-Laggenbeck im Zeitraum 12/2008 - 02/2015. Auffallend sind im Bereich Ibbenbüren-Laggenbeck der Verlauf dieser Senkungslinie und der Abstand von bis zu 1000 m von der prognostizierten Nulllinie.

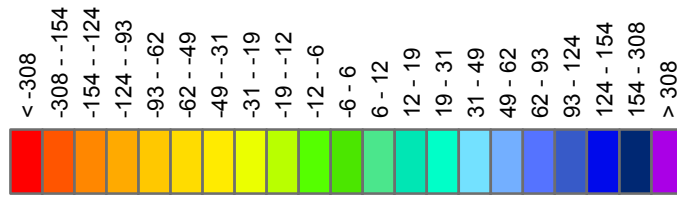
Im westlichen Teilbereich des Betrachtungsraumes ergaben sich für den Zeitraum ab 12/2008 bis 10/2010 aus den ENVISAT-Ergebnissen keine Höhenänderungen außerhalb des prognostizierten Einwirkungsbereiches (Abbildung 56). Eine Aussage, die nicht nur durch die Leitnivellements-messungen bestätigt wird, sondern auch für den Zeitraum bis Herbst 2011 erweitert werden kann (Abbildung 72).

Aus den Ergebnissen der Radarsat-2-Zeitreihe (Abbildung 43, Abbildung 48) kann abgeleitet werden, dass im westlichen Teilbereich des Untersuchungsraumes nach 2011 bis Februar 2015 Bodenbewegungen auch außerhalb des prognostizierten Einwirkungsbereiches eingetreten sind. Jedoch ist eine sichere räumliche Abgrenzung nicht möglich. Die in Abbildung 83 enthaltene gestrichelte braune Linie ist manuell und aufgrund der Abschätzungen in Kapitel 6.1 erstellt worden. Sie soll lediglich verdeutlichen, dass in diesem Gebiet wahrscheinlich Bodenbewegungen aufgetreten sein müssen, ohne dass eine quantitative Aufteilung in eine Vertikal- und Horizontal-komponente möglich ist.



Legende

Höhenänderungen [mm]



- Isolinie [-30 mm]
- Isolinie [-20 mm]
- Isolinie [-10 mm]
- Bergwerksgrenze
- Untersuchungsraum
- Prognostizierter Einwirkungsbereich
- +1000m Zone

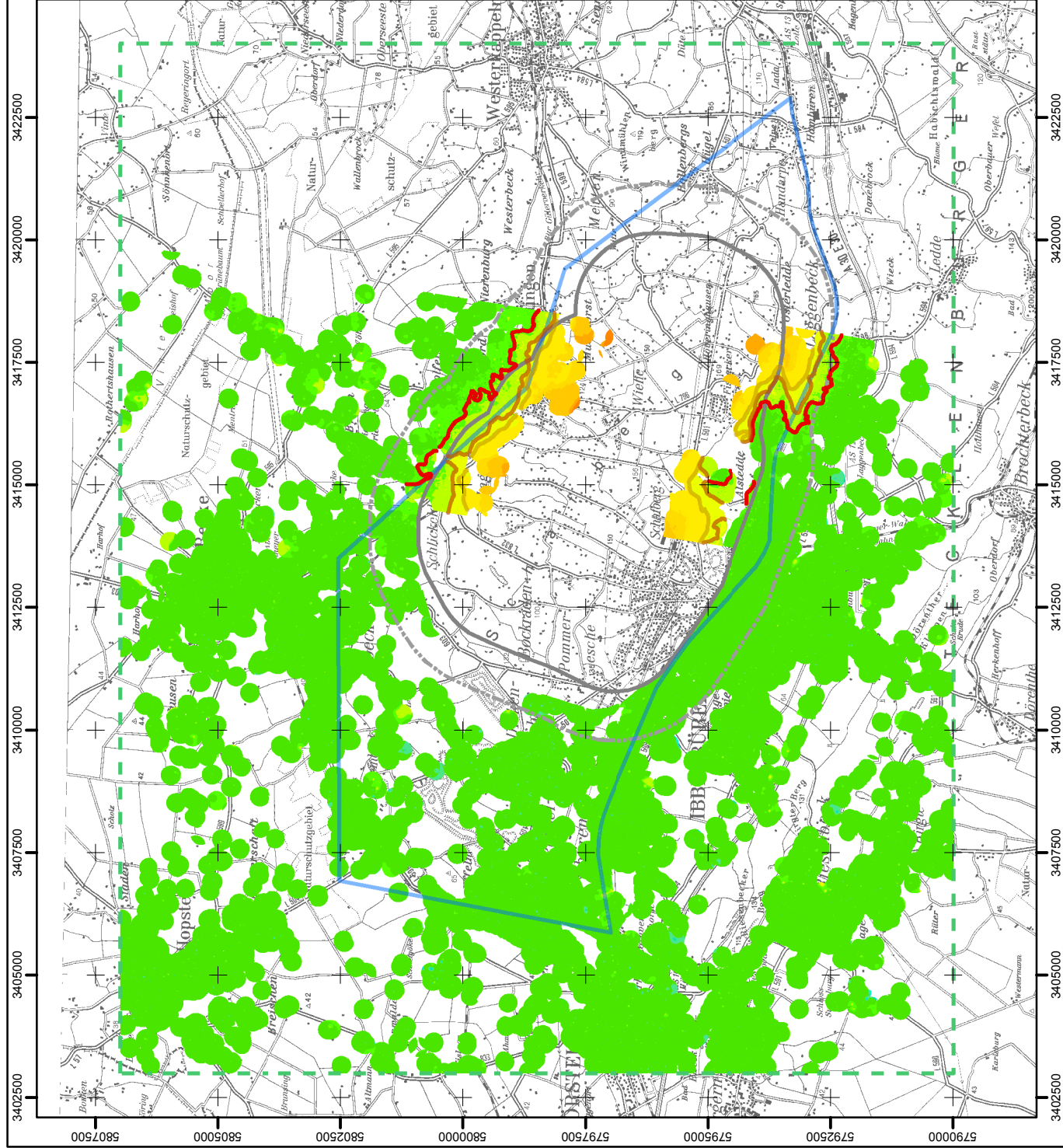
PSI-Ergebnis, Isolinien
Bergwerksgrenze, EW-Bereiche
TK100
© IGMC, 2015
© Bezirksregierung Arnsberg, 2015
© Geobasis NRW, 2012

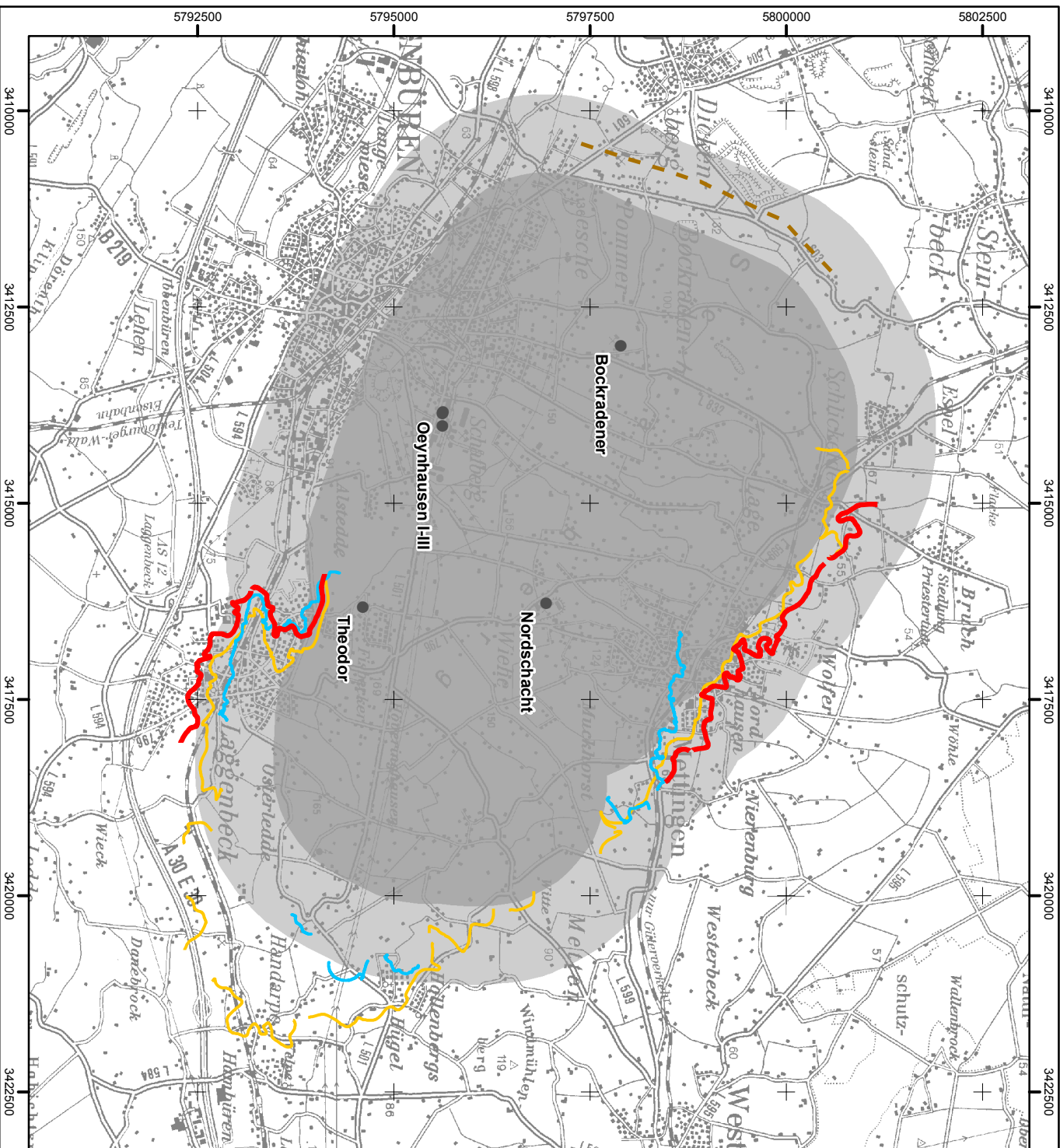
0 1,25 2,5 5 Kilometer

N

Untersuchungsgebiet: Bergwerk Ibbenbüren

Titel	
Flächeninterpolierte, radarinterferometrisch abgeleitete Gesamthöhenänderungen (12/2008 – 02/2015) und abgeleitete Isolinien [-10, -20, -30 mm] in den nicht ausmaskierten Bereichen	
Analyse von Senkungsserscheinungen außerhalb prognostizierter Einwirkungs- bereiche aktiver und in jüngerer Zeit stillgelegter Steinkohlengrubenwerke der RAG AG Im Auftrag der Bezirksregierung Arnsberg, Abteilung Bergbau und Energie in NRW	
Bearbeitung:	Abbildung: 82
TU Clausthal	Datum: 01.12.2015





TU Clausthal
Institut für Geotechnik und Marschleidenwesen

Legende

ENWISAT (12/2008 - 10/2010)

Isolinie Höhenänderung [-5 mm]

Radarsat-2 (01/2011 - 02/2015)

Isolinie LOS-Bewegung [-8 mm]

manuell konstruierte Isolinie positiver LOS-Bewegung

Gesamt betrachtungsz Zeitraum (12/2008 - 02/2015)

Isolinie Gesamthöhenänderung [-10 mm]

Tagesöffnungen in Betrieb

Prognostizierter Einwirkungsbereich

+1000m Zone

Isolinien
Tagesöffnungen, EW-Bereiche und Bergwerkskategorie
TK100
© GIMC, 2015
© Bezirksregierung Arnsberg, 2015
© Geobasis NRW, 2012

0 0,75 1,5 3 Kilometer

Untersuchungsgebiet: Bergwerk Ibendorf

**Isolinien der Höhenänderungen und LOS-Bodenbewegungen
abgeleitet aus den interpolierten PS-Ergebnissen
zwischen 2008 und 2015**

Analyse von Senkungserscheinungen außerhalb prognostizierter Einwirkungsbereiche
aktiver und in jüngerer Zeit stillgelegter Steinkohlenbergwerke der RAG AG
Im Auftrag der Bezirksregierung Arnsberg, Abteilung Bergbau und Energie in NRW

Bearbeitung: TU Clausthal Datum: 05.02.2016 Abbildung: 83

7. STATISTISCHE BEWERTUNG ZUR SIGNIFIKANZ PROGNOTIZIERTER BERGBAUBEDINGTER BODENBEWEGUNGEN

7.1. Vorbemerkung

Die Untersuchungen, die in diesem Kapitel beschrieben sind, dienen der Abgrenzung der möglichen bergbaubedingten Ursachen von Bodenbewegungen außerhalb des prognostizierten Einwirkungsbereiches gegenüber anderen Ursachen. In Kapitel 7.2 erfolgt zunächst eine unabhängige Vorausberechnung der im Rahmenbetriebsplan (RBP) angegebenen prognostizierten Senkungsnulllinie des BW Ibbenbüren mit der von der Firma 4GIS entwickelten Software und Verwendung der in 2007/2008 für den RBP verwendeten Eingangsdaten und -parameter sowie Nutzung des identischen Ruhrkohle-Vorausberechnungsverfahrens (kurz: Ruhrkohle-Verfahren). Dieser Schritt ist notwendig, um die in Kapitel 7.5 beschriebenen statistischen Analysen zur Bewertung der Signifikanz der prognostizierten Senkungsnulllinie durchführen zu können. Die Signifikanzberechnung basiert auf den Unsicherheiten der Modellparameter, die zunächst bestimmt werden mussten. Zur Ermittlung der Variabilität der Modellparameter wurden Ergebnisse aus geodätischen Messungen herangezogen und im Kapitel 7.4 mit theoretischen Berechnungen verglichen. Außerdem erfolgte die Ableitung eines für das Untersuchungsgebiet repräsentativen Zeitfaktors (Kapitel 7.3), aufgrund der in Kapitel 7.2 ermittelten Abweichungen zwischen der prognostizierten Senkungsnulllinie des RBP von 2008 und der in Kapitel 7.2 von 4GIS neu ermittelten prognostizierten Senkungsnulllinie. Alle beschriebenen Analysen in Kapitel 7.2 bis 7.5 basieren auf den Soll-Abbaudaten, d. h. geplanten Bauhöhen des RBP des BW Ibbenbüren für den Zeitraum 1.8.2008 bis 31.12.2030 sowie weiteren Eingangsdaten, wie sie in den jeweiligen Kapiteln beschrieben sind.

Zur Unterstützung bei der Beurteilung der im Untersuchungszeitraum verursachten bergbaubedingten Höhenänderungen erfolgt im Kapitel 7.6 die Ergebnisdarstellung der Senkungsnachberechnung mit den Ist-Abbaudaten der vom 1.1.2009 bis 28.02.2015 aufgefahrenen Abbauhöhen.

Alle Voraus- bzw. Nachberechnungen der bergbaubedingten Senkungen berücksichtigen keine indirekten Ursachen, wie z. B. die Entwässerung des Gebirges. Alle Soll- und Ist-Abbaudaten, die von der Bezirksregierung Arnsberg, Abteilung Bergbau und Energie in NRW und der RAG AG im ABB-Format (Dateiformat der Bauhöhendateien der Software CadBERG) zur Verfügung gestellt worden sind (Anhang A1), wurden sorgfältig geprüft und in die Datenbank des Rechenprogramms über eine hierfür programmierte Schnittstelle importiert.

7.2. Eingangsdaten und Vorausberechnung der Senkungsnulllinie

Zu Beginn der Untersuchungen wurde das Rechenprogramm der Firma 4GIS für das Ruhrkohle-Vorausberechnungsverfahren vorbereitet, überprüft und getestet. Der entwickelte Algorithmus basiert auf sog. Abbauelementen, die es erlauben, beliebige Formen der Abbaufelder darzustellen und in die Vorausberechnung einzubeziehen. Damit ist das entwickelte Programm ähnlich dem bei der RAG AG verwendeten Vorausberechnungsprogramm CadBERG.

Zunächst erfolgte die Vorausberechnung mit den Soll-Abbaudaten, d. h. den geplanten Abbauen laut RBP des BW Ibbenbüren vom 2.12.2008 (Aktenzeichen 61.05.2-2005-12). Als Ausgangspunkt wurden analog zu der vom Bergwerk vorgelegten Senkungsvorausberechnung die geplanten Bauhöhen für den Zeitraum des RBP 01.01.2009 – 31.12.2018, die Abbaustrebe zwischen dem

1.5.2008 und 31.12.2008 und die ursprünglich geplanten Abbaue für den Zeitraum ab 2019 bis zum 31.12.2030 berücksichtigt. Insgesamt fanden somit 55 Soll-Bauhöhen Eingang in die Berechnung. Die Abbaue wurden für Teufen von etwa 1083 m bis 1524 m und mit Abbaumächtigkeiten von 1,00 m bis 2,90 m geplant. Als Eingangsparameter der Vorausberechnung wurden die 2007 vom Bergwerk verwendeten Parameter genutzt. Die benutzten Grenzwinkel entsprechen den Werten, die in den gelieferten Abbaudateien angegeben waren (d. h. 50 gon und 60 gon). Für den Abbaufaktor wurde $\alpha = 0,9 - 1,0$ als Eingangsparameter angegeben und für den Zeitfaktor $c = 4,1 \text{ a}^{-1}$. Die Ermittlung des Zeitfaktors erfolgte entsprechend den Beschreibungen in Kapitel 7.3. Aus den Ergebnissen der mit diesen Parameterwerten neu durchgeführten Senkungsvorausberechnung wurden prognostizierte Senkungsnulllinien für die Werte 1 mm und 10 mm durch Interpolation mit dem Kriging-Algorithmus bestimmt. Die 1 mm-Linie ist in Abbildung 84 in Orange zusammen mit der von der RAG AG berechneten Nulllinie dargestellt.

Von der RAG AG bzw. dem BW Ibbenbüren wurde, wie bereits in Kapitel 4.3.1 beschrieben, für die Berechnung des planfestgestellten Einwirkungsbereiches zusätzlich die gesamte Fläche des Baufeldes Beustfeld herangezogen, so dass ein vergrößerter Einwirkungsbereich bestimmt wurde. Da hierzu entsprechende Daten dem Gutachterteam nicht bereitgestellt werden konnten, war es der Firma 4GIS nicht möglich, den „planfestgestellten Einwirkungsbereich“, der in Abbildung 84 in schwarz mit grauer Flächenfärbung dargestellt ist, mit den exakt gleichen Eingangsdaten, die die RAG AG 2007 verwendet hatte, zu berechnen. In den meisten der folgenden Darstellungen des Kapitel 7 ist somit zusätzlich der von der RAG AG berechnete Einwirkungsbereich aus den geplanten Bauhöhen in blau mit dargestellt.

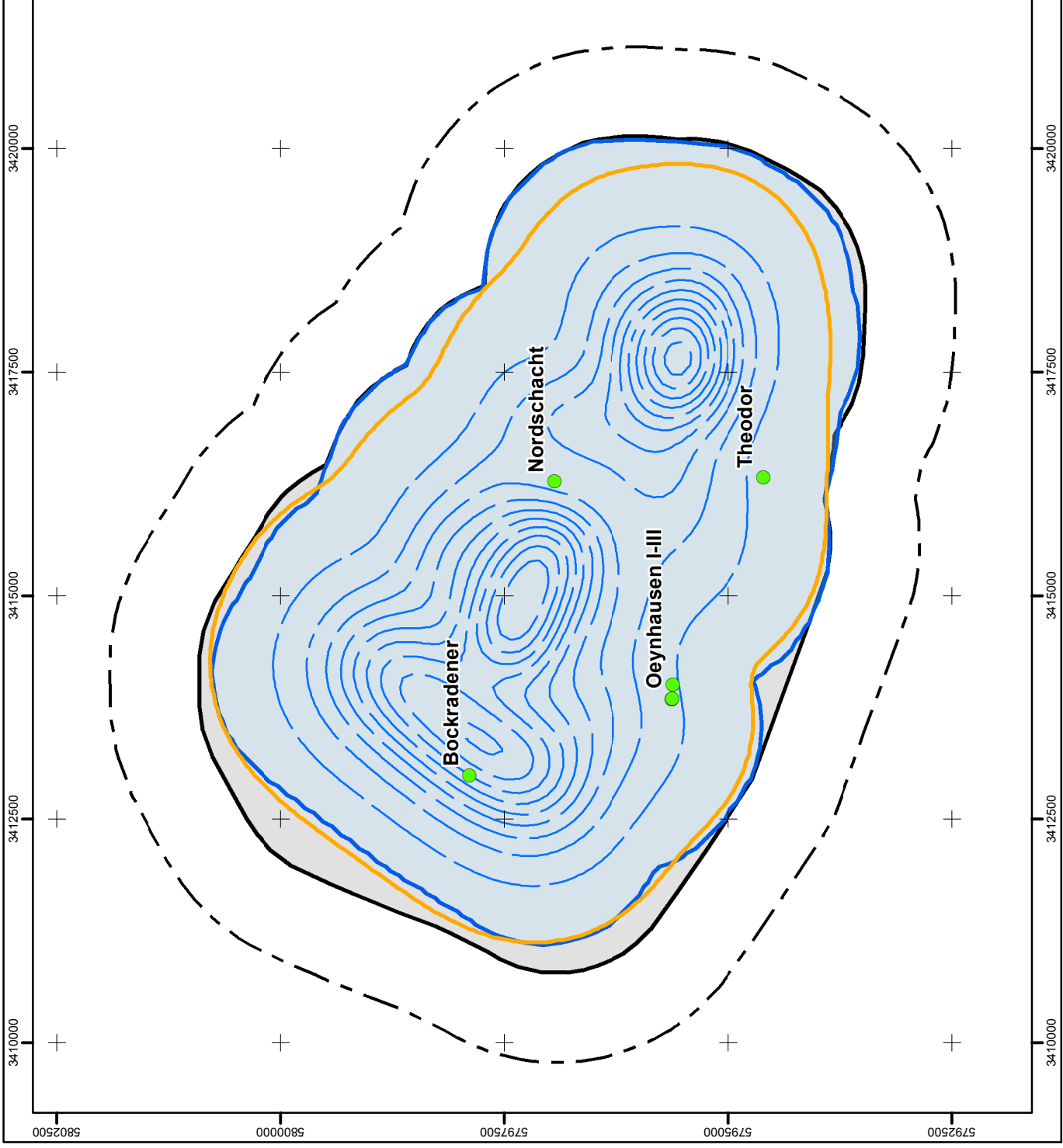
Der Vergleich der von 4GIS berechneten 1 mm-Senkungslinie (orange Linie) mit der der von der RAG AG berechneten Einwirkungsgrenze der geplanten Bauhöhen (blaue Linie) in Abbildung 84 zeigt, dass die 1 mm-Senkungslinie insbesondere im nordöstlichen und südöstlichen Bereich bis zu 450 m innerhalb des RAG-Einwirkungsbereiches verläuft. Im Nordwesten verläuft sie dagegen bis zu 130 m außerhalb der blauen RAG-Einwirkungsgrenze. Im Vergleich zur planfestgestellten Nulllinie (schwarze Linie) liegt die von 4GIS berechnete 1 mm-Senkungslinie stets innerhalb des prognostizierten Bereiches, ausgenommen von einer kleinen Ecke südlich des Theodor-Schachts mit einer maximalen Abweichung von 30 m. Die Gründe für die Abweichungen liegen mit hoher Wahrscheinlichkeit nicht im gewählten Rechenverfahren (Ruhrkohle-Verfahren), sondern könnten auf die als Eingangsparameter verwendeten Grenzwinkel zurückzuführen sein. Deshalb wurde eine weitere Vorausberechnung durchgeführt, bei der für alle geplanten Bauhöhen ein Grenzwinkel von 50 gon angenommen wurde. Die ermittelte 1 mm-Linie sowie die 10 mm-Linie sind in Abbildung 85 in Rot dargestellt (durchgezogene Linie: 1 mm; gestrichelte Linie: 10 mm). Die mit dem Grenzwinkel 50 gon ermittelte 1 mm-Linie weist eine weitgehende Übereinstimmung mit der blauen Linie auf, d. h. der von der RAG berechneten Einwirkungsgrenze aus den geplanten Bauhöhen. Die Abweichungen betragen maximal $\pm 180 \text{ m}$.

Die Übereinstimmung der mit den geplanten Bauhöhen vorausberechneten blauen Einwirkungslinie der RAG und der roten 1 mm-Linie von 4GIS lässt den Schluss zu, dass die vom Bergwerk durchgeführte Vorausberechnung mit einem Grenzwinkel von 50 gon für alle Bauhöhen erfolgt sein könnte. Die Abweichungen zur planfestgestellten Nulllinie (schwarze Linie) im Westen und Nord-Westen können darauf zurückgeführt werden, dass das Bergwerk bei der Vorausberechnung die gesamte Fläche des Baufeldes Beustfeld berücksichtigt hat, was jedoch aufgrund der gelieferten Abbaudaten und den damit durchgeführten Berechnungen von 4GIS im Rahmen dieses Gutachtens nicht nachvollzogen werden konnte.



Legende

- Prognostizierter planfestgestellter EW-Bereich
- +1000m Zone
- EW-Bereich aus den geplanten Bauhöhen (RAG)
- Senkungsisolinien aus den geplanten Bauhöhen (RAG)
- Vorausberechnung 1mm, gamma=50, 60gon (4GIS)
- Tagesöffnungen in Betrieb



EW-Bereiche RAG, Abbaue, Schächte © Bezirksregierung Arnsberg, 2015
1mm-Linie © 4GIS, 2015



Untersuchungsgebiet:

Bergwerk Ibbenbüren

Titel:

**Theoretische Senkungsnulllinie (1 mm) berechnet
mit den Soll-Abbaue, gamma=50 bzw. 60 gon und $c=4,1a^1$**

Analyse von Senkungserscheinungen außerhalb prognostizierter Einwirkungsbereiche aktiver und in jüngere Zeit stillgelegter Steinkohlenbergwerke der RAG AG
Im Auftrag der Bezirksregierung Arnsberg, Abteilung Bergbau und Energie in NRW

Bearbeitung:

4GIS

Datum:

02.02.2016

Abbildung:

84

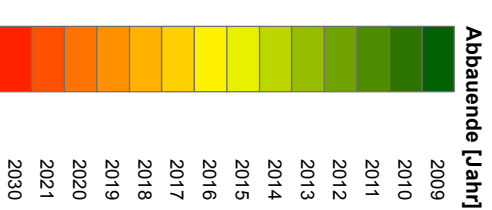


TU Clausthal
Institut für Geotechnik und Marscheldewesen

Legende

- Prognostizierter planfestgestellter EW-Bereich
- +1000m Zone
- EW-Bereich aus den geplanten Bauhöhen (RAG)
- Vorausberechnung 1mm, $\gamma_{\text{mma}}=50\text{g}$ on (4GIS)
- Vorausberechnung 10mm, $\gamma_{\text{mma}}=50\text{g}$ on (4GIS)
- Tagesöffnungen in Betrieb

Soll-Abbaue



EW-Bereiche RAG, Abbaue, Schächte
1mm und 10mm-Linie
0 0,75 1,5 3
Kilometer



Untersuchungsgebiet:

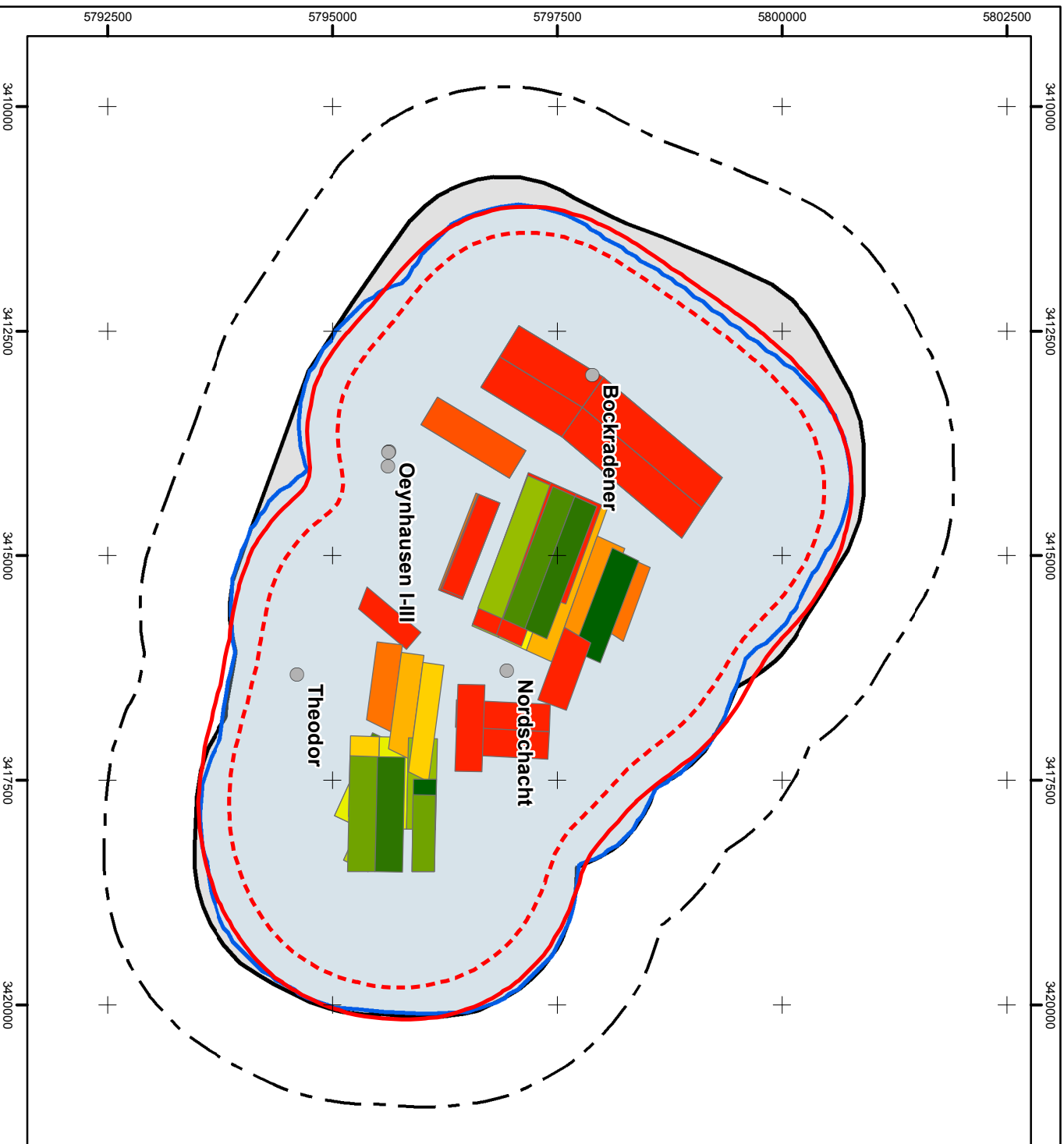
Bergwerk Ibbenbüren

Titel:

**Theoretische Senkungsnulllinie (1 mm, 10 mm)
berechnet mit den Soll-Abbaue, $\gamma_{\text{mma}}=50\text{g}$ on und $c=4,1 \text{ a}^{-1}$**

Analyse von Senkungserscheinungen außerhalb prognostizierter Einwirkungs-
bereiche aktiver und in jüngster Zeit stillgelegter Steinkohlenbergwerke der RAG AG
Im Auftrag der Bezirksregierung Arnsberg, Abteilung Bergbau und Energie in NRW

Bearbeitung: 4GIS Datum: 02.02.2016 Abbildung: **85**





Legende

- Prognostizierter planfestgestellter EW-Bereich
- +1000m Zone
- EW-Bereich aus den geplanten Bauhöhen (RAG)
- Vorausberechnung 1mm, gamma=50gon (4GIS)
- Tagesöffnungen in Betrieb

Soll-Abbaue

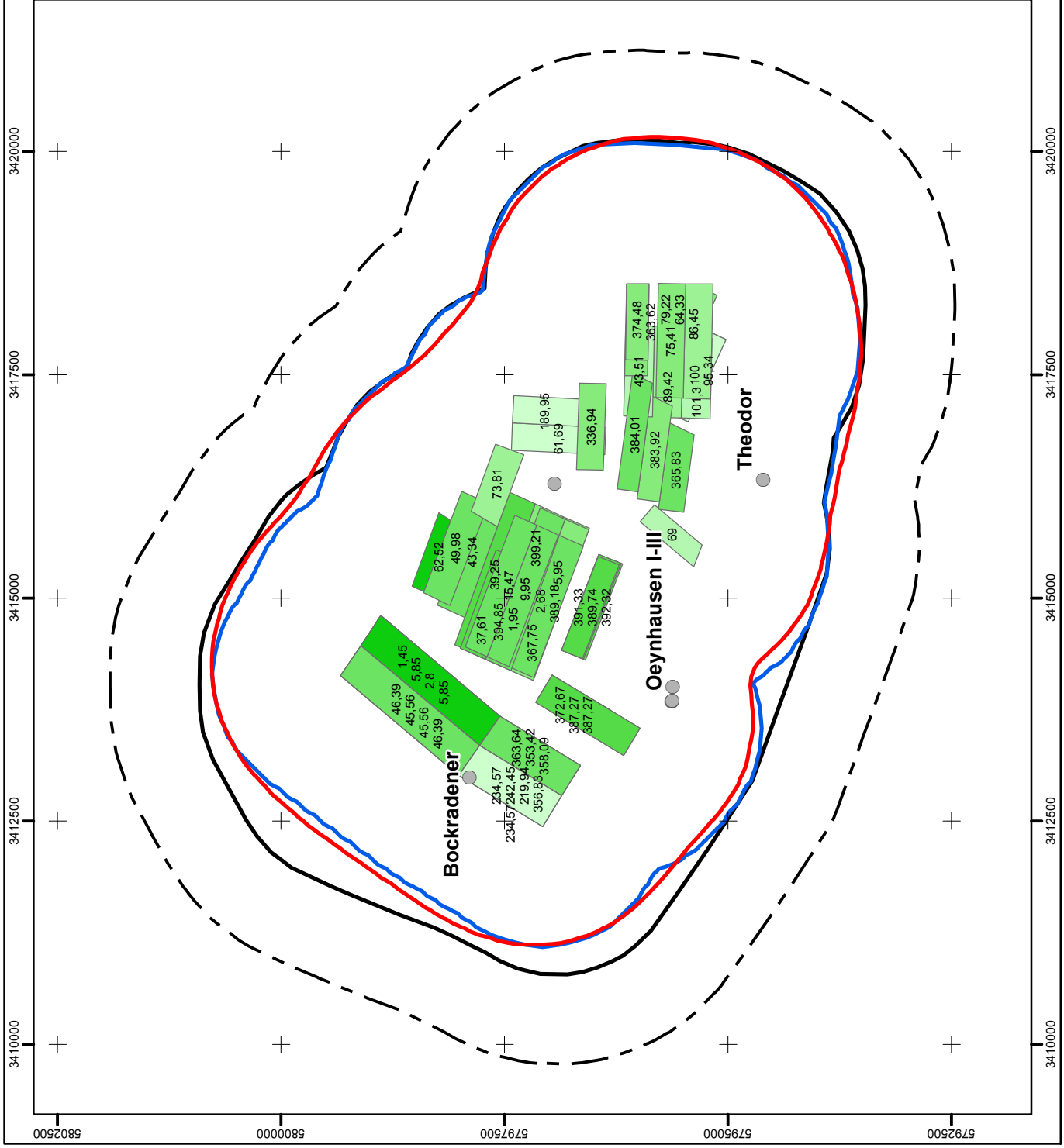
Einfallswinkel [gon]



EW-Bereiche RAG, Abbaue, Schächte © Bezirksregierung Amsberg, 2015
1mm-Linie © 4GIS, 2015

0 0.75 1.5 3 Kilometer

Untersuchungsgebiet: Bergwerk Ibbenbüren			
Titel: Einfallswinkel der Soll-Abbaue (grüner Farbgradient) und Einfallswinkel (Zahlenangaben in [gon])			
Analyse von Senkungserscheinungen außerhalb prognostizierter Einwirkungsbereiche aktiver und in jüngerer Zeit stillgelegter Steinkohlenbergwerke der RAG AG im Auftrag der Bezirksregierung Amsberg, Abteilung Bergbau und Energie in NRW			
Bearbeitung: 4GIS	Datum: 02.02.2016	Abbildung: 86	



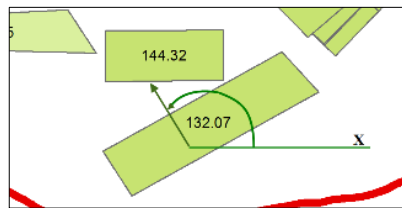


Abbildung 87: Definition des Einfallswinkels für die Vorausberechnung im Programm von 4GIS

Die Richtung des Einfallens wurde für rechnerische Zwecke als Winkel entgegen dem Uhrzeigersinn bezogen auf den Rechtswert (X-Achse) berechnet (Abbildung 87). Die zur Vorausberechnung herangezogenen Bauhöhen besitzen geringe Einfallswinkel mit 0 gon bis 8 gon, wie in Abbildung 86 zu erkennen ist. Die Ablenkung, die vom Einfallen der Soll-Abbauhöhen in Richtung des Einfallens stattgefunden hat, wurde in allen Berechnungen berücksichtigt.

7.3. Ermittlung des Zeitfaktors

Da die Vorausberechnung von Senkungen im RBP mit Abbauhöhen vorheriger Zeitepochen zur Berücksichtigung zu erwartenden Restsenkungen erfolgte, ist es sinnvoll, den Zeitfaktor zu ermitteln, der das spezifische Verzögerungsverhalten im lokal betrachteten Gebirge des BW Ibbenbüren beschreibt.

Zur Ableitung des Zeitfaktors wurden zunächst Nivellementsunkte aus den RAG-Beobachtungslinien „Gasleitungen“ Lfd. Nr. 3.1, 3.3 und 3.4 in Mettingen, die Objektbeobachtungen „Barbara-Schule/Mettingen“ Lfd. Nr. 3.9, die GPS-Punkte der Lfd. Nr. 5.0, 6.0 und 7.0 sowie die Gasleitungspunkte in Ibbenbüren-Laggenbeck der Lfd. Nr. 3.6 (Bezeichnung siehe Anhang A1) untersucht, für die möglichst viele Messwerte im Untersuchungszeitraum vorlagen und die zudem Auswirkungen einer Vielzahl von Abbauen aufgrund ihrer Lage wiedergeben. Die Brauchbarkeit dieser Messpunkte und ihrer Messwerte zur Ermittlung des Zeitparameters ist sehr unterschiedlich und hängt sowohl von der Anzahl der Messungen als auch von der Lage der Punkte im Baufeld ab. Aus der Vielzahl von analysierten Messpunkten konnten vier als geeignet bewertet werden. Diese Punkte gehören alle zur Beobachtungsline mit der Lfd. Nr. 3.3 (Linie „Ibbenbürener Straße/Mettingen“) und sind in Abbildung 88 blau gekennzeichnet.

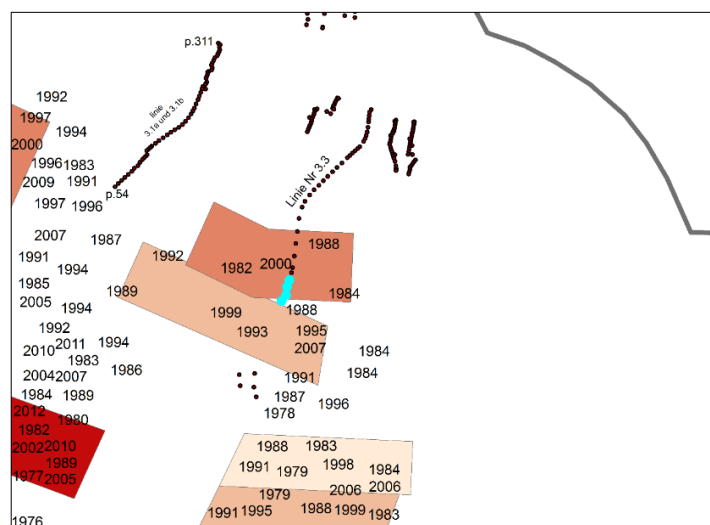


Abbildung 88: Lage der im Untersuchungsraum ausgewählten Messpunkte (hellblau markiert) zur Ermittlung des Zeitfaktors

Die ausgewählten Messpunkte 182, 183, 184 und 185 der Beobachtungslinie Nr. 3.3 (Anhang A1), liegen relativ nah beieinander und befinden sich im Nordosten innerhalb des Einwirkungsbereiches. Für die Ermittlung des Zeitfaktors wurde eine bestimmte Zeitepoche gewählt, die für das Bewegungsphänomen repräsentativ ist (Abbildung 89). Für die gewählten Punkte erwies sich nur die Messepoche vom 21.11.2000 bis 16.4.2002 als geeignet (Abbildung 89, grün markierter Bereich).

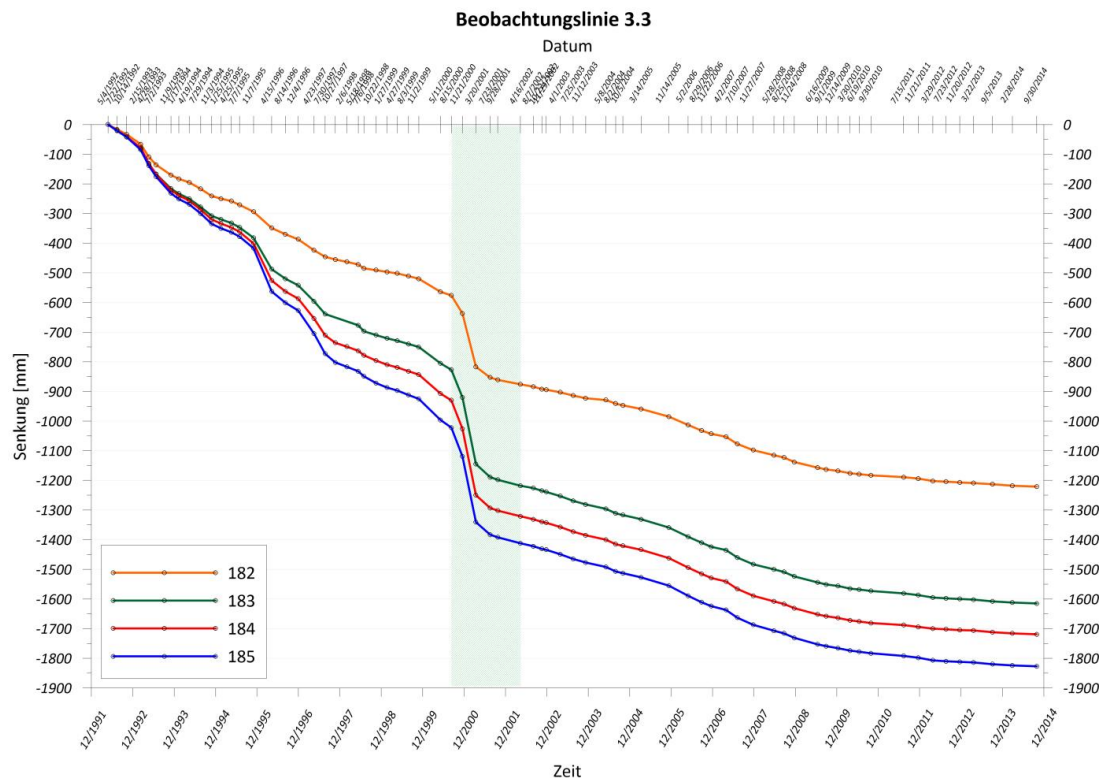


Abbildung 89: Analyse der Zeitepochen zur Ermittlung des Zeitfaktors

Zur Ableitung eines „best-angepassten“ Wertes für den Zeitfaktor c wurde den Berechnungen eine in dem Ruhrkohle-Verfahren benutzte Zeitfunktion zugrunde gelegt:

$$S_t = S_k(1 - e^{-c(t-t_0)}) \quad (1)$$

mit

S_t – Senkungen im Zeitraum $t - t_0$ [m],

S_k – endgültige Senkung [m],

c – Zeitfaktor [a^{-1}] und

$t - t_0$ – Zeitraum zwischen dem Abbaubeginn t_0 und dem Zeitpunkt der Vorausberechnung t [a];

Berechnung für $t_0 = 0$.

Die Berechnungen wurden iterativ durchgeführt, auf Grundlage einer genauen Lösung für die Methode der kleinsten Quadrate unter Nutzung der Software von 4GIS.

Im Ergebnis ergeben sich für jeden Nivellementspondpunkt ein Zeitfaktor und seine Standardabweichung. In Abbildung 90 und im Anhang A4 sind für die ausgewählten Nivellementspondpunkte die Anpassungskurven dargestellt. Zur Ableitung wurde zunächst ein Anfangswert gewählt (graue Linie in Abbildung 90). Je näher der Anfangswert am Optimalwert (blau gestrichelte Linie) liegt, desto geringer ist die Anzahl der erforderlichen Iterationen.

■ MESSPUNKT 182 – BEOBACHTUNGSLINIE 3.3

Durch Nivellements bestimmte Höhenänderungen am Punkt 182 liegen ab 1992 vor. Die Bestimmung des Zeitfaktors c war aus den für die Zeit vom 21.11.2000 bis zum 16.04.2002 registrierten Höhenänderungen möglich. Ausschließlich in diesem Zeitraum ließ es der Geländeabsenkungsprozess zu, die theoretische Kurve anzupassen (Abbildung 90). Der geschätzte Parameterwert für Messpunkt 182 betrug:

$$c=4,23 \pm 0,21 [a^{-1}]$$

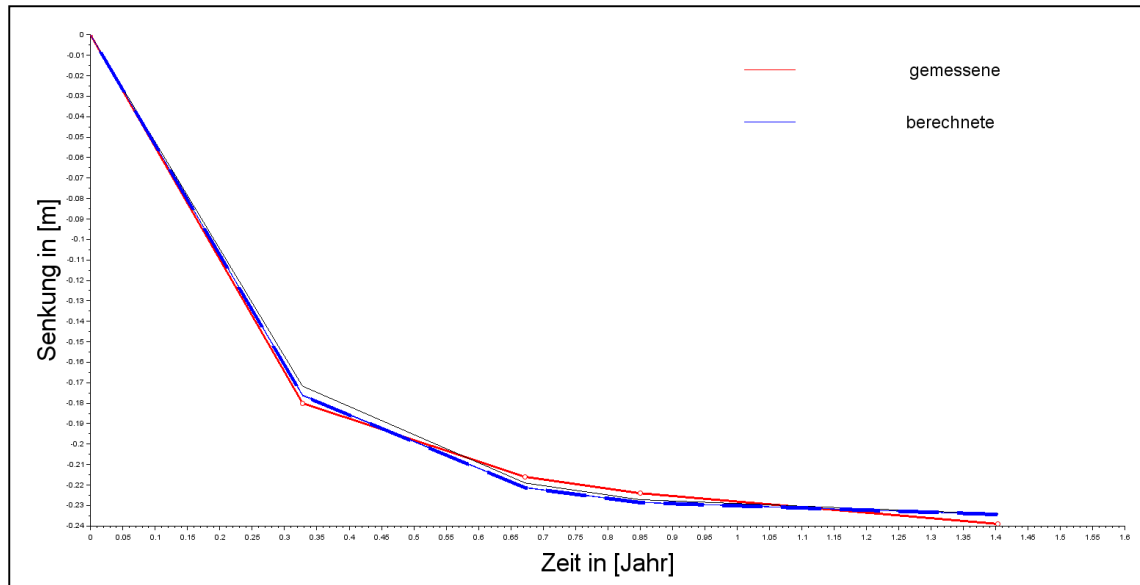


Abbildung 90: Anpassung der theoretischen Senkungskurve für den Messpunkt 182 der Beobachtungslinie der Lfd. Nr. 3.3 für den Zeitraum vom 21.11.2000 bis zum 16.04.2002

■ MESSPUNKT 183 UND 184 – BEOBACHTUNGSLINIE 3.3

Für denselben Zeitabschnitt ergab sich für den Messpunkt 183 entsprechend Abbildung 154 ein Zeitfaktor von

$$c=4,03 \pm 0,23 [a^{-1}]$$

und für den Messpunkt 184 (Abbildung 155) von

$$c=4,14 \pm 0,23 [a^{-1}].$$

■ MESSPUNKT 185 – BEOBACHTUNGSLINIE 3.3

Der Messpunkt 185 liegt näher an den Abbaufeldern als die anderen ausgewählten Punkte. Die Messungen zwischen dem 21.11.2000 bis zum 07.08.2002 erwiesen sich als am geeignetsten zur Parameterermittlung. Für diesen Zeitabschnitt wurde entsprechend Abbildung 156 folgender Parameterwert ermittelt:

$$c=4,16 \pm 0,31 [a^{-1}]$$

Im Mittel ergibt sich somit für den Zeitfaktor ein gerundeter Parameterwert von:

$$c=4,1 \pm 0,2 [a^{-1}]$$

Es wird davon ausgegangen, dass der angegebene Wert des Zeitfaktors für das Abbaugebiet des BW Ibbenbüren repräsentativ ist. In Abbildung 91 wird die Bedeutung des Zeitfaktors in der allgemeinen Zeitfunktion dargestellt. Der Abbildung kann entnommen werden, dass innerhalb von einem Jahr fast 100 % der Senkungen an der Tagesoberfläche erscheinen werden. Die ermittelten Werte, die um $\pm 0,2 \text{ [a}^{-1}\text{]}$ variieren, weisen keine bedeutenden zeitlichen Einflüsse auf.

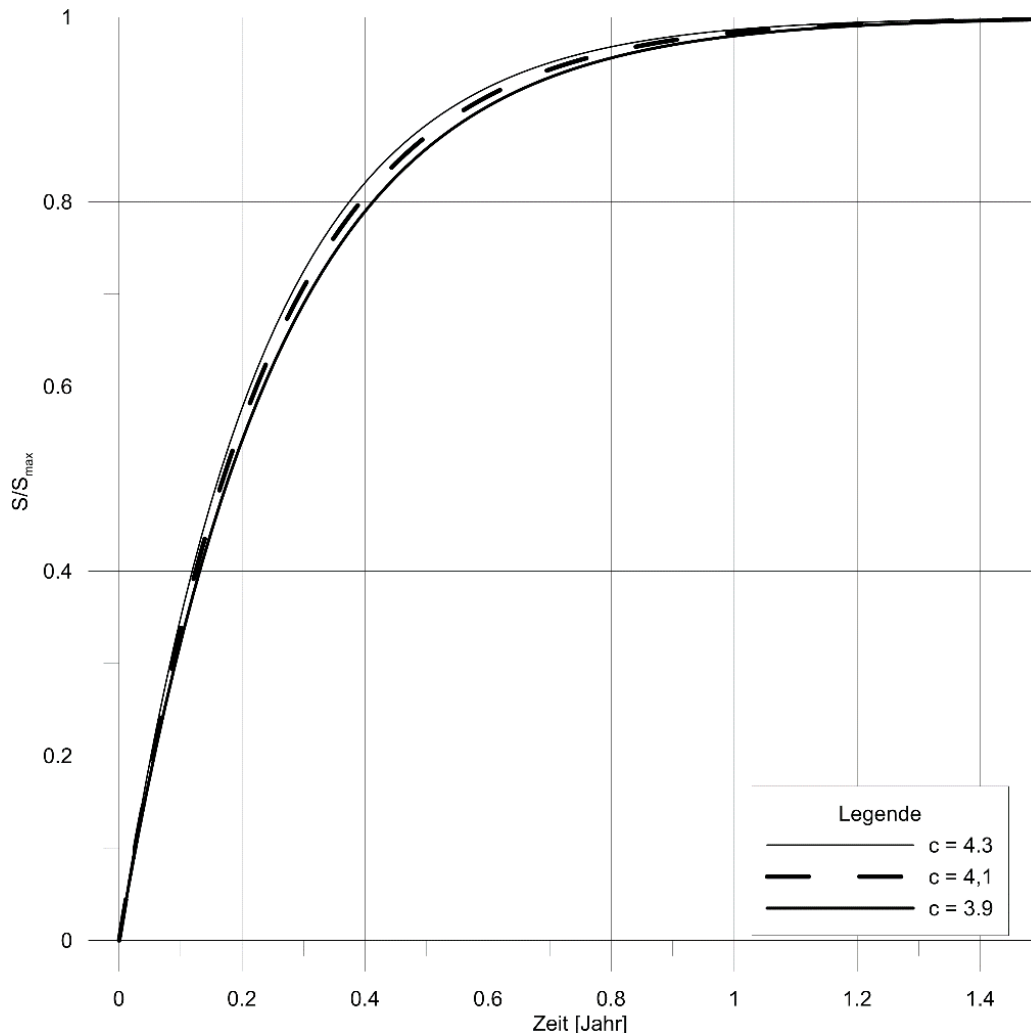


Abbildung 91: Zur Bedeutung des Zeitfaktors $c \text{ [a}^{-1}\text{]}$

7.4. Parametrisierung des Rechenmodells

In diesem Kapitel werden die beiden Parameter, der Abbaufaktor α und der Grenzwinkel γ , des Berechnungsmodells ermittelt. Die strengen Schätzalgorithmen der Modellparameter basieren auf Daten der stationären Abläufe des Deformationsprozesses an der Tagesoberfläche.

Nach einer genauen Analyse der Möglichkeiten zur Nutzung der Messdaten wurden drei Beobachtungslinien (Linie der Lfd. Nr. 3.1, 3.3 in Mettingen und Lfd. Nr. 3.6 in Ibbenbüren-Laggenbeck, Abbildung 92) herangezogen, die sich relativ weit innerhalb des prognostizierten Einwirkungsbereiches befinden. Weitere Messpunkte im Untersuchungsbereich erwiesen sich für die Parameterschätzung als unbrauchbar, und zwar aufgrund der ungeeigneten Messzeiträume bzw. der zu geringen Anzahl an Höhenmesswerten im Untersuchungszeitraum.

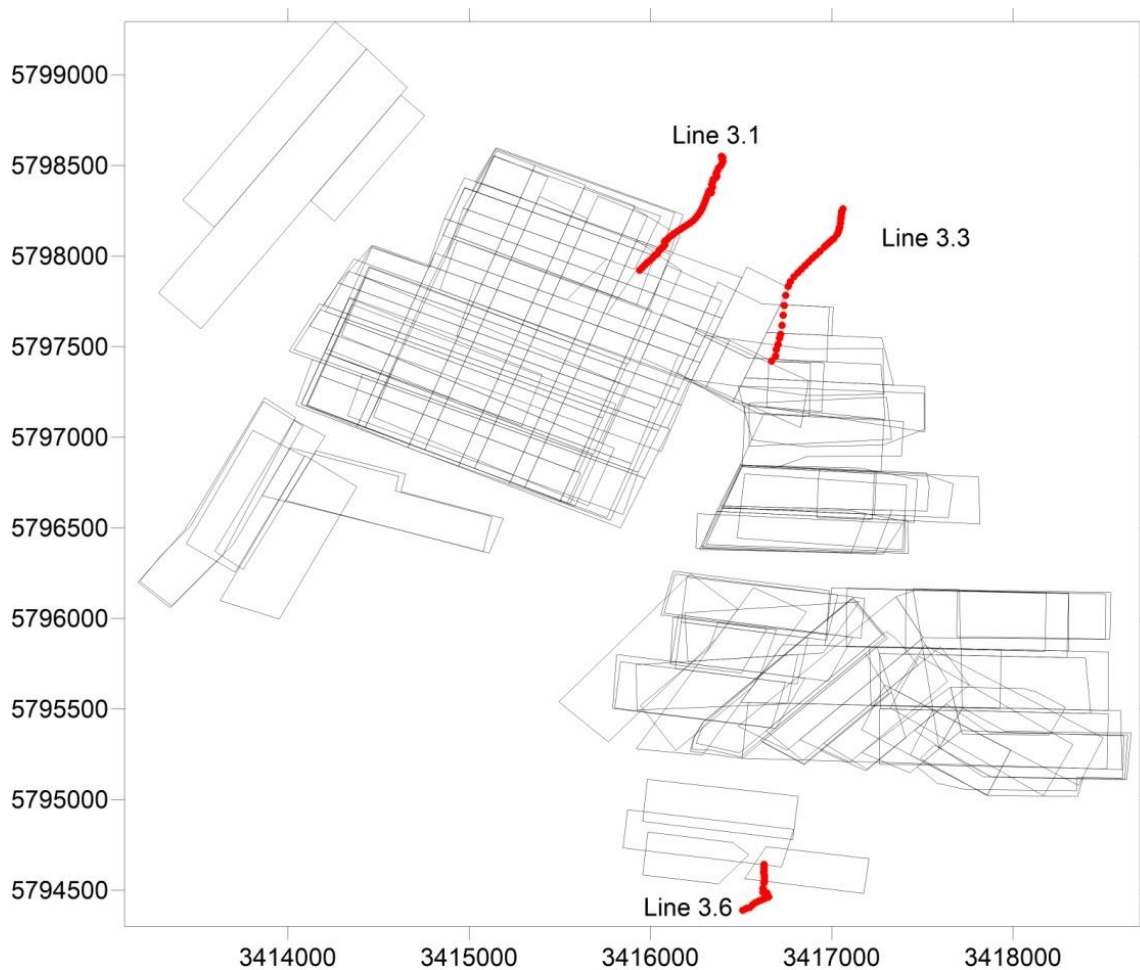


Abbildung 92: Lage der Messpunkte der RAG-Beobachtungslinien mit Lfd. Nr. 3.1, 3.3, 3.6, die zur Ermittlung der Modellparameter genutzt wurden © RAG AG

Zur Analyse der Messdaten wurden entlang von zwei Beobachtungslinien Zeit-Senkungsdiagramme erstellt, die deutlich die lokal unterschiedliche Zunahme der Senkungen mit fortschreitender Zeitdauer zeigen (Abbildung 93, Abbildung 95).

Für die Zeit-Senkungsprofile entlang der Beobachtungslinie mit der Lfd. Nr. 3.1 wurden die Messpunkte Nr. 311 bis 54 herangezogen, deren Höhen zwischen dem 30.09.2004 und 25.09.2014 (10 Jahre) ca. 2-mal pro Jahr eingemessen worden waren, so dass ungefähr etwa 20 Messungen pro Punkt vorliegen (Abbildung 93). Für eine entsprechende Analyse aus Daten der Beobachtungslinie mit der Lfd. Nr. 3.6 dienten Messungen, die für die Punkte 1 bis 22 im Zeitraum vom 13.05.1993 bis 27.08.2014 drei Mal pro Jahr ermittelt wurden (Abbildung 95).

Für die Messpunkte 150 bis 185 der Beobachtungslinie mit der Lfd. Nr. 3.3 sind die für den Zeitraum vom 04.05.1992 bis 30.09.2014 aus den Nivellementsergebnissen (2 Messungen pro Jahr) berechneten Senkungen in Abbildung 94 dargestellt.

Aus der Analyse ergibt sich, dass nur die Ergebnisse der Beobachtungslinien mit der Lfd. Nr. 3.1. und 3.3. zur Ermittlung der Modellparameter geeignet sind, da sie eine typisch abbaubedingte Senkungsrate aufweisen. Dagegen zeigen die Zeit-Senkungsprofile entlang der Beobachtungslinie mit der Lfd. Nr. 3.6 neben einer Zunahme der Senkungen örtlich unterschiedliche Senkungen, die nicht der klassischen Modellvorstellung entsprechen und deshalb nicht zur Ableitung der Modellparameter herangezogen wurden. Offensichtlich wird die Variation der Senkungen entlang der Messlinie nicht alleine von dem Abbau der dargestellten Bauhöhen beeinflusst sondern durch lokal wirkende, möglicherweise geologisch-tektonische Ursachen überlagert.

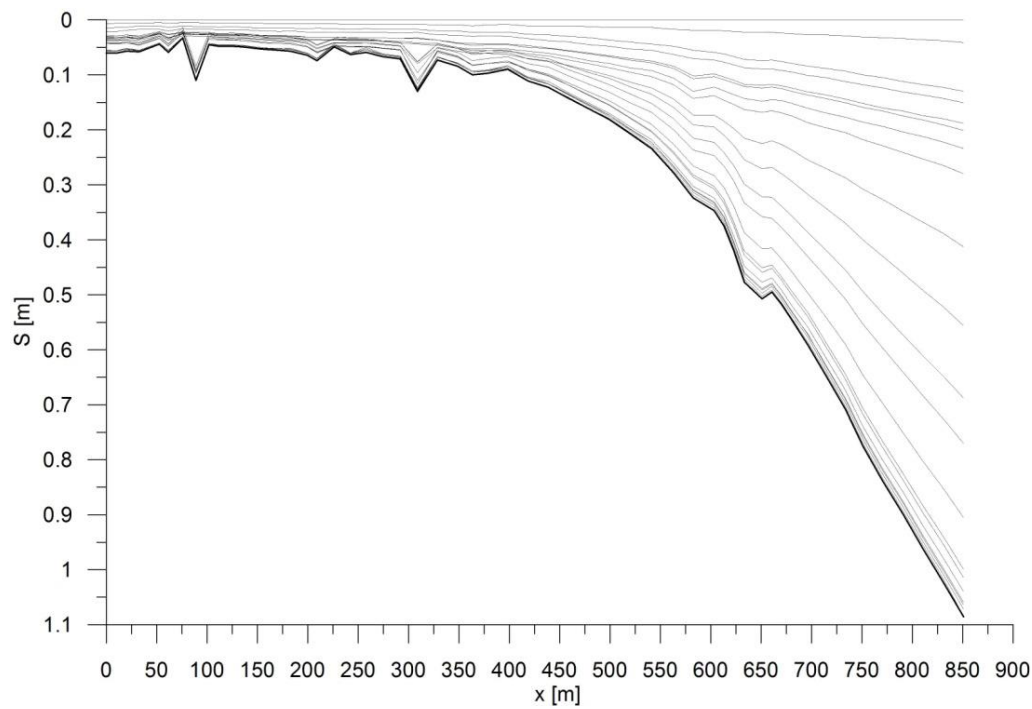


Abbildung 93: Zeit-Senkungsprofile entlang der Beobachtungslinie der Lfd. Nr. 3.1 zwischen den Punkten 311 und 54 über den Zeitraum September 2004 bis September 2014

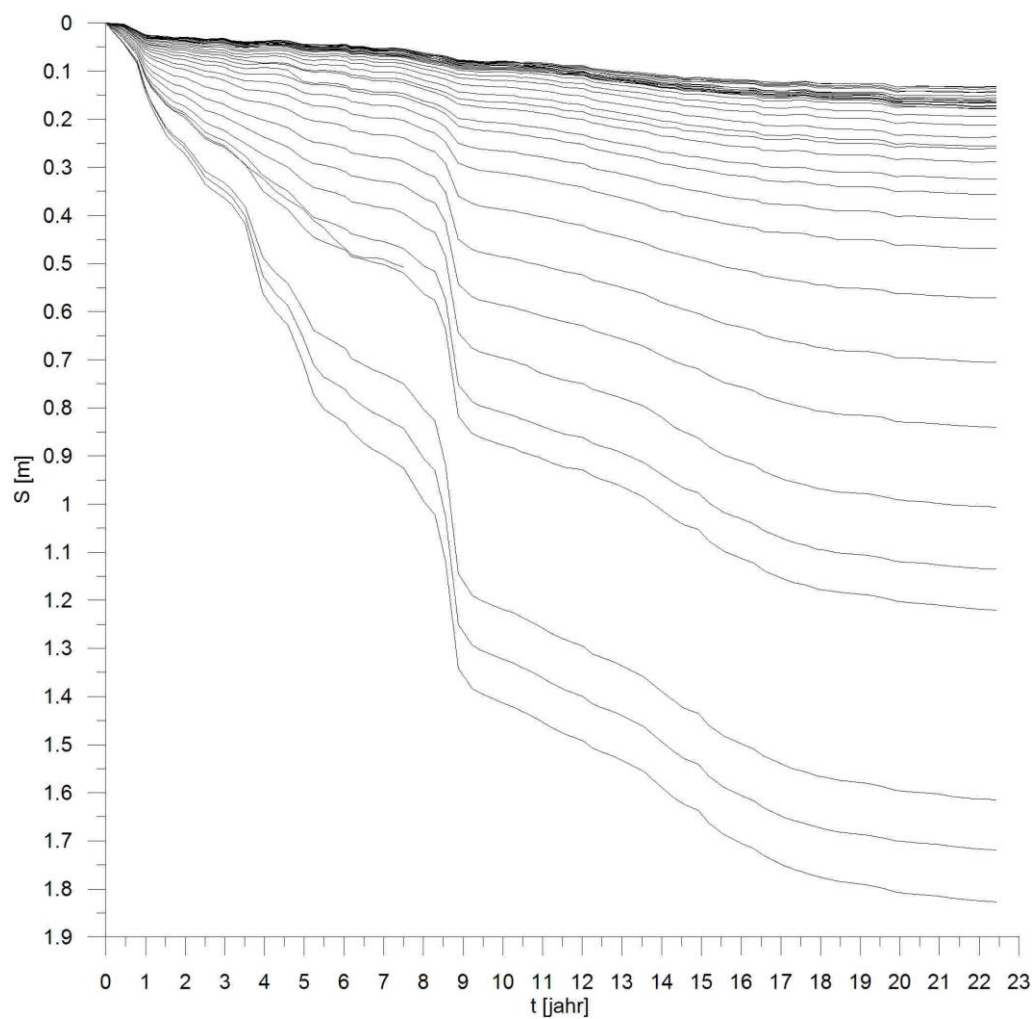


Abbildung 94: Senkungen [m] der Punkte 150 bis 185 der Beobachtungslinie der Lfd. Nr. 3.3 zwischen dem 4.5.1992 (t=0 Jahre) und dem 30.9.2014 (t=22,4 Jahre)

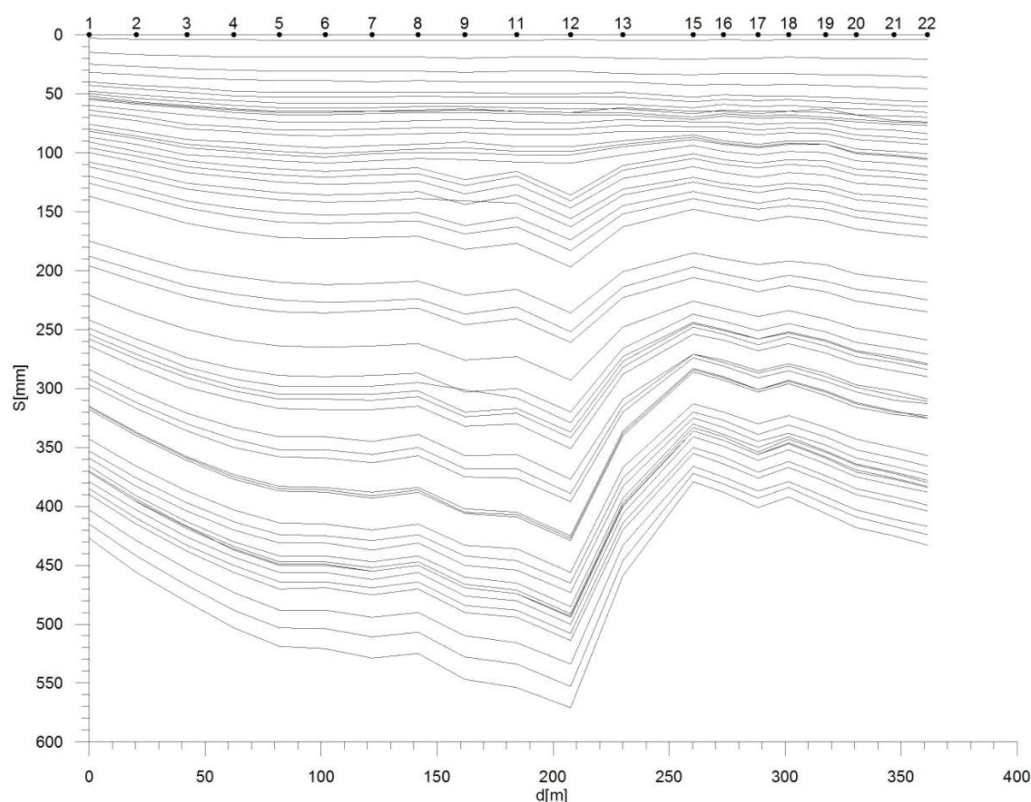


Abbildung 95: Zeit-Senkungsprofile entlang der Beobachtungslinie der Lfd. Nr. 3.6 zwischen den Punkten 1 und 22 über den Zeitraum Mai 1993 bis August 2014

Zur Ermittlung des Abbaufaktors a und des Grenzwinkels γ wurde zuerst für die Beobachtungslinie der Lfd. Nr. 3.3 der größtmögliche Messzeitraum zwischen den Messepochen 1992 und 2014 herangezogen. Die auf Grundlage der ausgewählten Messpunkte und des Messzeitraums ermittelten Abbaufelder bzw. Bauhöhen, die zu Senkungen an den ausgewählten Messpunkten geführt haben könnten, sind in Abbildung 92 ersichtlich.

Eine erste Berechnung erfolgte mit den Standardwerten ($a = 0,9$ und $\gamma = 50$ gon), wie sie für die Senkungsvorausberechnung im BW Ibbenbüren benutzt worden waren. Die Ergebnisse dieser Berechnung (Abbildung 96) zeigen eine sehr schlechte Übereinstimmung.

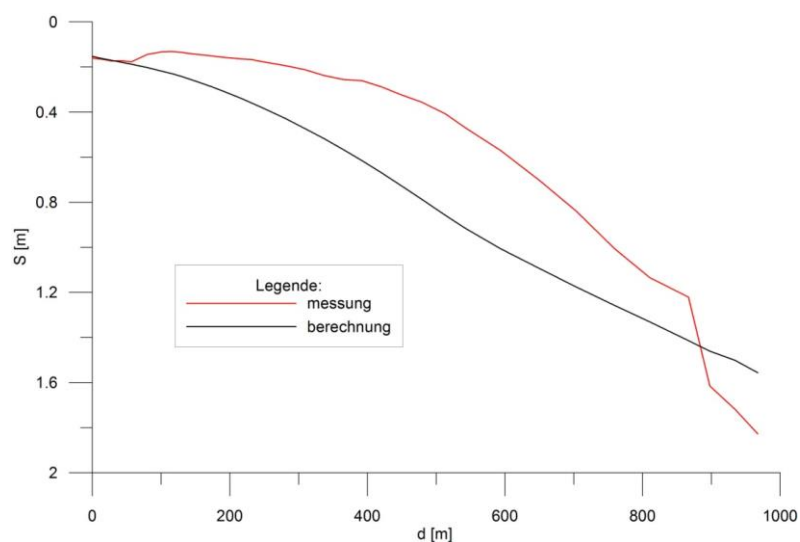


Abbildung 96: Vergleich des gemessenen Senkungsprofils der Messlinie Lfd. Nr. 3.3. – Messung 2014 (rote Kurve) und des berechneten (schwarze Kurve) für die Parameter $a = 0,9$, $\gamma = 50$ gon und $c = 4,1 a^{-1}$

Die weiteren Berechnungen wurden deshalb mittels einem sog. interaktiven Verfahren durchgeführt (KWINTA 2010). Als Ergebnis ergeben sich folgende Werte für die Modellparameter:

$$\gamma = 73,7 \text{ gon} \pm 1,47 \text{ gon}$$

$$a = 0,43 \pm 0,12$$

Die Abbildung 97 zeigt die gute Anpassung der mit diesen Parametern berechneten theoretischen Senkungsmulde an die gemessene Senkungsmulde, was auf eine gute Ermittlung des Grenzwinkels hindeutet. Der untere Teil der gemessenen Senkungsmulde ist jedoch nicht durch den berechneten Parameter a erklärbar. Das bedeutet, dass der ermittelte Wert des Parameters a im Folgenden nicht weiter betrachtet wird.

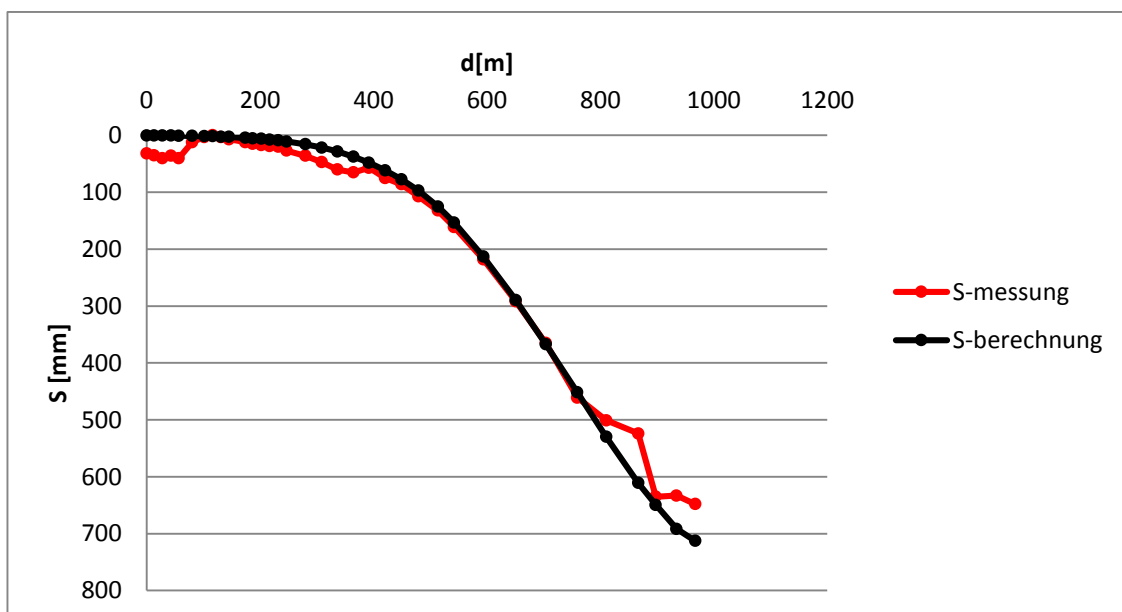


Abbildung 97: Gegenüberstellung der gemessenen Senkungsmulde auf der Beobachtungslinie der Lfd. Nr. 3.3 und der theoretischen Senkungsmulde auf Grundlage der ermittelten Modellparameter

Wie bei der Beobachtungslinie der Lfd. Nr. 3.3 wurde die Ermittlung der Modellparameter auf Grundlage der vorliegenden Ergebnisse für die Beobachtungslinie Nr. 3.1 durchgeführt. Aus einer ersten Berechnung mit den Standardwerten für die Parameter ergab sich die in Abbildung 98 dargestellte Senkungsmulde. Die deutlich größere Neigung der Muldenflanke für die gemessenen Werte (schwarze Linie) deutet darauf hin, dass die Werte des Parameters γ erhöht werden müssen.

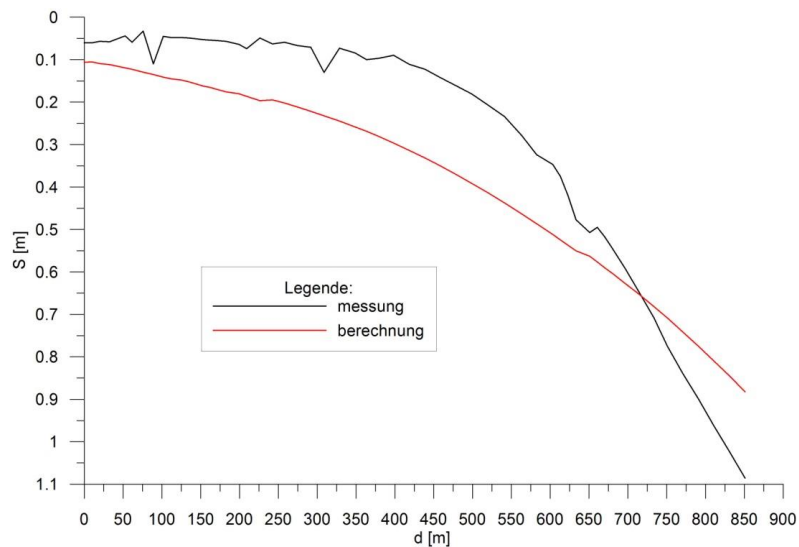


Abbildung 98: Vergleich des gemessenen Senkungsprofils der Beobachtungslinie Lfd. Nr. 3.1. – Messung 2014 (schwarze Kurve) und des berechneten (rote Kurve) für die Parameter $a = 0,9$, $\gamma = 50$ gon und $c = 4,1 \text{ a}^{-1}$

Eine genauere Betrachtung der Abbildung 93 zeigt, dass auf den ersten 250 m entlang der Beobachtungslinie eine gleichmäßige Absenkung von etwa 6 cm im Zeitraum bis 2014 messtechnisch ermittelt wurde. Diese räumliche Erstreckung sowie die zeitliche Entwicklung dieser Senkungen (Abbildung 93) deuten auf eine eigenständige Ursache hin. Nach Erfahrungen der Firma 4GIS treten solche Senkungsverläufe oft durch Setzungen infolge Entwässerung der unteren Gebirgsschichten auf. Um eine solche Ursache allerdings belegen zu können, müssten Daten von tieferen Piezometern vorliegen. Nach weiteren Berechnungen mittels einem sog. interaktiven Verfahren wurden folgende optimalen Parameterwerte ermittelt:

$$\gamma = 78,4 \text{ gon} \pm 1,55 \text{ gon}$$

$$a = 0,94 \pm 0,08$$

Eine mit diesen Parametern berechnete Senkungsmulde zeigt eine sehr gute Übereinstimmung der gemessenen Senkungsmulde (Abbildung 99).

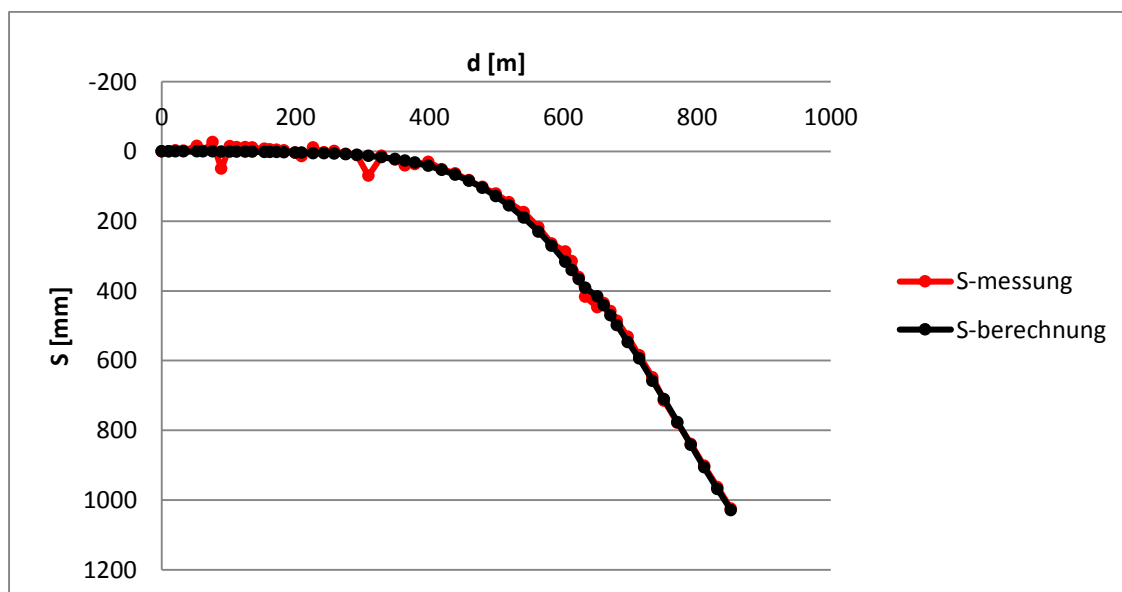


Abbildung 99: Anpassung der theoretischen und gemessenen Senkungsmulde auf der Beobachtungslinie der Lfd. Nr. 3.1 für ermittelte Modellparameter

Die für die beiden Beobachtungslinien der Lfd. Nr. 3.1 und 3.3 ermittelten Grenzwinkel und Abbaufaktoren machen deutlich, wie unterschiedlich die Auswirkungen der Abbaue auf die Tagesoberfläche im Untersuchungsgebiet sind und wie ungenügend die Verwendung einheitlicher Parameter bei der Modellrechnung ist. Für den nördlichen Einwirkungsbereich oberhalb der Abbaukanten kann ein mittlerer Grenzwinkel von $\gamma = 76,05 \text{ gon}$ angenommen werden. Für den Bereich unmittelbar am prognostizierten Einwirkungsbereich lagen nicht ausreichend Messdaten aus den Beobachtungslinien vor. Für die Nachberechnung im Kapitel 7.6 werden daher radarinterferometrisch abgeleitete Bodenbewegungen zur Ermittlung geeigneter Modellparameter am prognostizierten Nullrand herangezogen.

Die für die betrachteten Beobachtungslinien ermittelten Abbaufaktoren sind, wie bereits erwähnt, ebenfalls sehr unterschiedlich. Die Ermittlung dieses Faktors für die Linie mit der Lfd. Nr. 3.3 wird als nicht repräsentativ angesehen, so dass der ermittelte Wert für die Beobachtungslinie Nr. 3.1 von $a = 0,94$ als plausibler betrachtet werden soll. Da bei der Ermittlung der Modellparameter keine Messwerte aus dem Muldentiefsten der Senkungsmulde zur Verfügung standen, kann aber auch dieser Wert des Abbaufaktors als nicht repräsentativ für die Abbaue des BW Ibbenbüren angenommen werden. In einem solchem Fall lässt sich aus der Erfahrung heraus ein Wert von $0,95$ mit einer Standardabweichung von $0,045$ als plausibel für das Senkungsverhalten im BW Ibbenbüren annehmen.

Für die statistischen Analysen im nachfolgenden Kapitel 7.5 sind die ermittelten Standardabweichungen für die beiden Modellparameter a und γ die entscheidenden Größen. Somit werden die von der RAG verwendeten Modellparameter in Kombination mit den hier ermittelten Standardabweichungen zur Signifikanzanalyse verwendet:

$$\gamma = 50^{\text{gon}} \pm 1,5^{\text{gon}}$$

$$a = 0,95 \pm 0,045$$

7.5. Signifikanz der prognostizierten Senkungsnulllinie

7.5.1. Methodische Vorgehensweise

Jedes mathematische Modell einer Bodenbewegungsvorausberechnung sollte zwei grundlegende Bedingungen erfüllen:

- die Gebirgs- und Bodenbewegungen realitätsnah wiedergeben und
- möglichst einfach sein, d. h. mit wenigen Parametern.

Die zwei o. g. Bedingungen stehen zueinander im klaren Widerspruch. Bei der Vorausberechnung von abbaubedingten Gebirgs- und Bodenbewegungen wird normalerweise versucht, diese beiden gegensätzlichen Bedingungen zu erfüllen und ein Optimum zu finden. Aus diesem Grund spielen die sog. stochastischen Modelle von Knothe und Ehrhardt & Sauer bis heute weltweit eine bedeutende Rolle (KNOTHE 1953; EHRHARDT & SAUER 1961). Das Ruhrkohle-Verfahren wurde ebenfalls auf solchen theoretischen Grundlagen entwickelt. Die Parametrisierung dieser Verfahren basiert auf wenigen, gut definierten physikalischen Größen. Die Parameter des Ruhrkohle-Verfahrens sind der

Abbaufaktor a , der Grenzwinkel γ und der Zeitfaktor c . Wenige Parameter bedeuten eine eindeutige Ermittlung der Parameterwerte anhand von gemessenen Senkungen. Das Modell wird entsprechend stabil, d. h. nicht übersteuert (DE WALL et al. 2012). Weitere Eingangsgrößen, die der Vorausberechnungsalgorithmus benötigt sind u. a. die Abbaumächtigkeiten, die Abbaugeometrien, die Einfallswinkel und Einfallstrichtungswinkel der Bauhöhen sowie die Abbauteufen.

Ein Ziel der Vorausberechnung ist, wie auch im Rahmen dieses Gutachtens, die Ermittlung der Lage und Ausdehnung des Senkungstrogens. Zur Beurteilung der Gefährdung von Bauobjekten an der Tagesoberfläche ist die Genauigkeit der Prognose von besonderer Bedeutung. Die Frage nach der Genauigkeit und Signifikanz der vorausberechneten Senkungen bezieht sich auf die Unsicherheit des Rechenmodells. Insbesondere hinsichtlich der Senkungsmuldenränder, wo kleine Senkungswerte zu erwarten sind, spielt diese Unsicherheit eine wichtige Rolle.

Ist die Unsicherheit des Modells bekannt, können Aussagen zur Qualität der Vorausberechnungen erfolgen. Die Modellunsicherheit ergibt sich aus der Unsicherheit der Modellparameter, der Eingangsgrößen und der Vereinheitlichung des durch ein Modell beschriebenen Gebirgskörpers. Der zuletzt genannte Faktor führt meist zu den geringsten Unsicherheiten, da die geologischen Informationen infolge der aufgefahrenen Grubenbaue und den angetroffenen Schichten stetig verbessert werden. Insbesondere für ältere Bergwerke wie das BW Ibbenbüren sollten diese Daten von sehr hoher Qualität sein.

Im Folgenden soll die Unsicherheit der Modellparameter a und γ gemeinsam bestimmt werden, um im Ergebnis die Signifikanz der prognostizierten Senkungsnulllinie zu ermitteln.

7.5.2. Variabilität der Parameter

Die Ermittlung des Abbaufaktors und des Grenzwinkels erfolgt gewöhnlich anhand markscheiderischer Messdaten, die in früheren Abbaubereichen an der Tagesoberfläche erfasst worden sind. Bei der Planung zukünftiger Abbaufelder werden zur Vorausberechnung mittlere Parameterwerte genutzt, die für das Abbaurevier üblich sind. Für das BW Ibbenbüren wurden in den letzten Jahren für die meisten Abbaue die Werte $a = 0,9$ und $\gamma = 50$ gon angenommen.

Diese Parameter variieren im Allgemeinen örtlich, z. B. aufgrund der Geologie des Gebirges, der Anisotropie der Gebirgsschichten und der Abbauführung, was zumeist nicht in der Vorausberechnung berücksichtigt wird. Dies kann dazu führen, dass die Gefährdung für Bauobjekte und auch die Lage der Einwirkungslinie des Senkungstrogens unter- oder überschätzt werden. Diese Variabilität der Modellparameter wird oft fälschlicherweise als Unsicherheit bezeichnet. Jedoch wird die Unsicherheit anhand der Standardabweichung beschrieben, wobei angenommen wird, dass der analysierte Wert sich mit einer bestimmten statistischen Wiederholbarkeit beobachten und somit mittels statistischer Verfahren ermitteln lässt.

Die Ermittlung der Modellparameter bzw. Untersuchungen in denen die Standardabweichungen diskutiert werden, finden sich in verschiedenen Veröffentlichungen (z. B. KOWALSKI 1985; NAWORYTA 2004). Nach geostatistischen Untersuchungen der Abbaudaten und der Ermittlung der Modellparameter unter Berücksichtigung der vollständigen Kovarianzmatrix konnte Naworyta in seiner Dissertation als Standardabweichung für den Grenzwinkel $\Delta\gamma = \pm 3,9$ gon und für den Abbaufaktor $\Delta a = \pm 0,03$ ermitteln (NAWORYTA 2004).

Aus den Betrachtungen, die für das BW Ibbenbüren im Rahmen dieses Gutachtens durchgeführt wurden (Kapitel 7.4), ergaben sich folgende Variabilitäten der Modellparameter:

- Grenzwinkel $\Delta\gamma = \pm 1,5^{gon}$
- Abbaufaktor $\Delta a = \pm 0,045$

Diese Werte werden als vergleichbar mit den von NAWORYTA (2004) ermittelten Werten angesehen, auch wenn der Variabilitätswert für den Grenzwinkel etwa der Hälfte des von Naworyta bestimmten Wertes entspricht. Die o. g. Werte werden für die weiteren statistischen Betrachtungen genutzt.

7.5.3. Einsatz des Monte-Carlo-Verfahrens

Durch die Firma 4GIS wurde ein Algorithmus zur Senkungsvorausberechnung und Nutzung variierender Parameterwerte vorbereitet und getestet. Auf Grundlage des Monte-Carlo-Verfahrens wurde angenommen, dass die statistische Verteilung der Senkungen aus minimal 100 Wiederholungsrechnungen erfolgen soll. Für die Normalverteilung der Parameterwerte wurde ein nach der Box-Muller-Methode entwickelter Zufallsgenerator eingesetzt, der es erlaubt, für beide Variablen a und γ gleichzeitig die pseudo-zufälligen Werte zu generieren. Im Ergebnis wurden die Werte nach Formel (5) generiert:

$$(\mu, \sigma) = \mu + \sigma N(0,1) \quad (5)$$

Mit:

μ – Mittelwert,

σ – Standardabweichung.

Die Berechnung der beiden pseudo-zufälligen Werte erfolgt in zwei Schritten. Zunächst werden die zufälligen Werte y_1 und y_2 mit einer einheitlichen Verteilung für den Bereich $[0, 1]$ generiert. Die Berechnung dieser Werte wird anhand der Formeln (6) und (7) durchgeführt.

$$x_1 = \sqrt{-2 \cdot \ln y_1} \cos(2\pi y_2) \quad (6)$$

$$x_2 = \sqrt{-2 \cdot \ln y_1} \sin(2\pi y_2) \quad (7)$$

Die statistischen Berechnungen erfolgten für die Soll-Abbaudaten. Darüber hinaus wurde der ermittelte Zeitfaktor $c = 4,1 \text{ a}^{-1}$ verwendet (Kapitel 7.3). Die Ergebnisse des Zufallsgenerators sind in Abbildung 100 und Abbildung 101 dargestellt.

Anhand der Histogramme in Abbildung 101 mit den sich ergebenden statistischen Parametern wird die Richtigkeit der durchgeführten Zufallsberechnung für die variierenden Werte beider Modellparameter gezeigt. Es ist zu feststellen, dass bei mehr als 100 Berechnungen, die Histogramme eine gleichmäßigere Verteilung aufweisen. Jedoch ist aus Untersuchungen mit dem Monte-Carlo-Verfahren bekannt, dass eine Erhöhung der Anzahl der Berechnungen kaum Einfluss auf das Endergebnis hat, während der Rechenaufwand enorm ansteigen würde. Somit wurde auf weitere Berechnungen verzichtet.

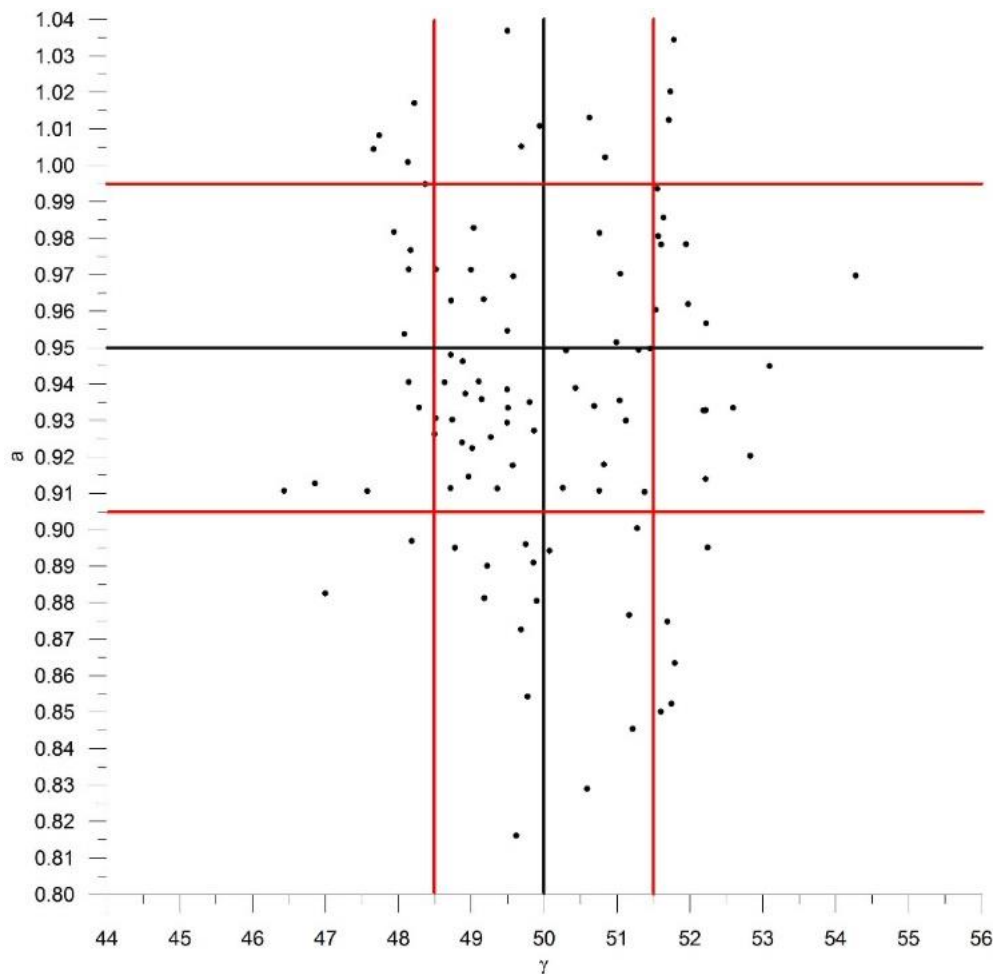


Abbildung 100: Ergebnisverteilung des Zufallsgenerators (schwarze Punkte) mit Darstellung der Variabilitätsgrenzen der Parameter (rote Linien)

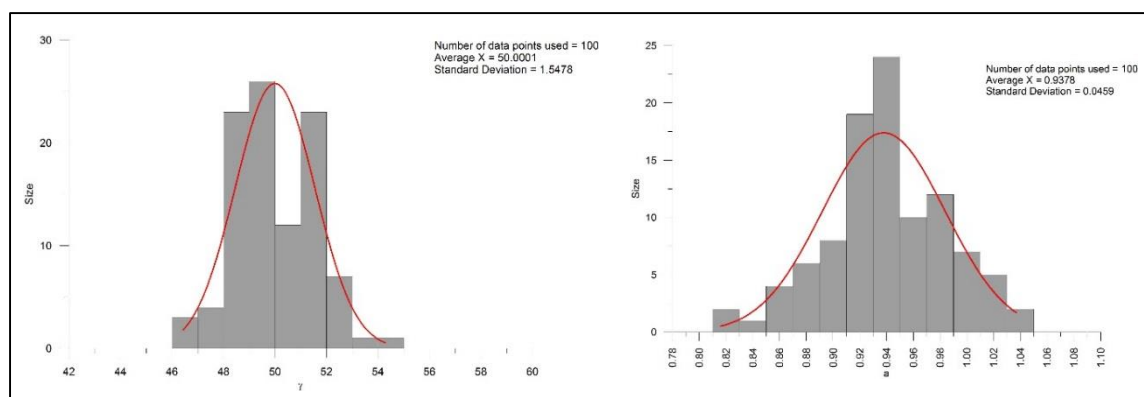


Abbildung 101: Histogramme der generierten Zufallswerte für den Grenzwinkel (links) und den Abbau-faktor (rechts)

7.5.4. Ergebnisse der Modellierung mit dem Monte-Carlo-Verfahren

Als Schwell- bzw. Grenzwert der Senkungen wurde die Isolinie mit einem Wert von 1 mm heran-gezogen und im Folgenden als Null-Isolinie bezeichnet. Die Annahme eines Werts von $S_{gr} = 0,0$ m ist, aufgrund von nicht zu vernachlässigbaren Interpolationsfehlern, unsinnig (Kapitel 7.2). Außer-dem ist darauf hinzuweisen, dass sich die Isolinie der Null-Absenkungen in der RAG-Prognose ebenfalls nicht auf den Wert $S_{gr} = 0,0$ m bezogen haben kann (Kapitel 4.3.1 und 7.2). Für 100

Rechensimulationen wurde der Verlauf der Isolinie mit einem Wert von 1 mm interpoliert. Im Ergebnis wurden 100 Verläufe der 1 mm-Linie in Form von Vektordateien generiert. Im Zusammenhang mit den zufällig variierenden Parametern (α und γ) erwies sich der Verlauf der Isolinie innerhalb einer bestimmten räumlichen Zone als veränderlich (Variabilitätszone). Die Ergebnisse aller Simulationen wurden in ein Raster übertragen und anschließend entsprechend der Booleschen-Werte neu klassifiziert. Die Zone, in der die Senkungs-Isolinie mit einem Wert von 1 mm verlief, wurde der Wert 1 und den übrigen Rasterzellen der Wert 0 über eine Klassifizierung zugewiesen. Über die Rasterdarstellung des Nulllinienverlaufs konnte die Häufigkeit, mit der diese Linie auftritt, ermittelt werden. Auf Grundlage von 100 neu klassifizierten Verlaufsrastern dieser Isolinie wurde eine räumliche Verteilung der Häufigkeit der Null-Isolinie generiert (Abbildung 102).

Die Ergebnisse der kumulierten Häufigkeit dieser Isolinie wurden einer statistischen Betrachtung unterzogen. Dabei wurde die Verteilung der Profile untersucht, die die Variabilitätszone der Nulllinie schneiden. Quer zur Einflusszone wurden mehrere Profile definiert (Abbildung 103). Auf Basis der Profildaten erfolgte die statistische Bearbeitung der Simulationsergebnisse. Die Variable, die die Verteilung dieser Daten abbildet, wurde als X bezeichnet (Abbildung 103).

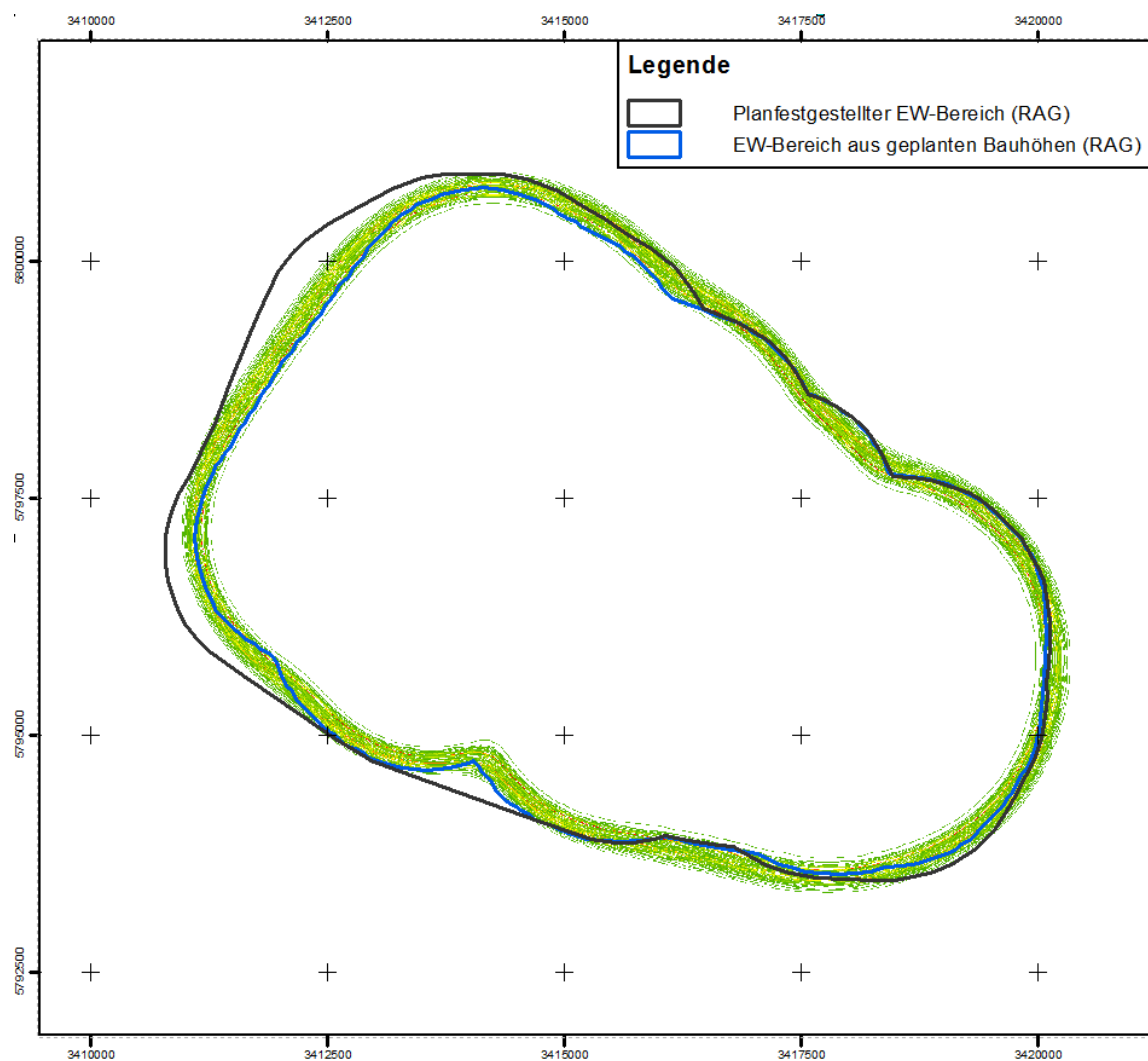


Abbildung 102: Kumulierte Häufigkeit der aus 100 Simulationen generierten Senkungsnulllinie 1 mm

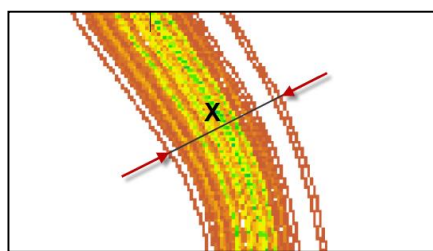


Abbildung 103: Eine beispielhafte Profillinie durch die Zone der Variabilität der Nullrandlinie

7.5.5. Räumlich statistische Analyse des Nulllinienverlaufes

Eine statistische Analyse der Häufigkeitsverteilung der Null-Isolinie (= 1 mm-Linie) hat ergeben, dass es sich um eine Normalverteilung handelt. Dies wurde durch den Shapiro-Wilk-Test bestätigt (Abbildung 104). Wie das Normalverteilungsschaubild zeigt (Abbildung 104, rechts), treten Abweichungen zwischen dem Normalverteilungsverlauf (rote Linie) und der Häufigkeit der Nulllinie im Bereich 0 m bis ca. 100 m und im Bereich 450 m bis 600 m auf.

Die maximale Reichweite X der Variabilitätszone der Verlaufsverteilung der Null-Isolinie (Abbildung 103) beträgt etwa 574 m, der Durchschnittswert für diese Zone etwa 253 m. Die Standardabweichung liegt bei 85,07 m (Tabelle 13).

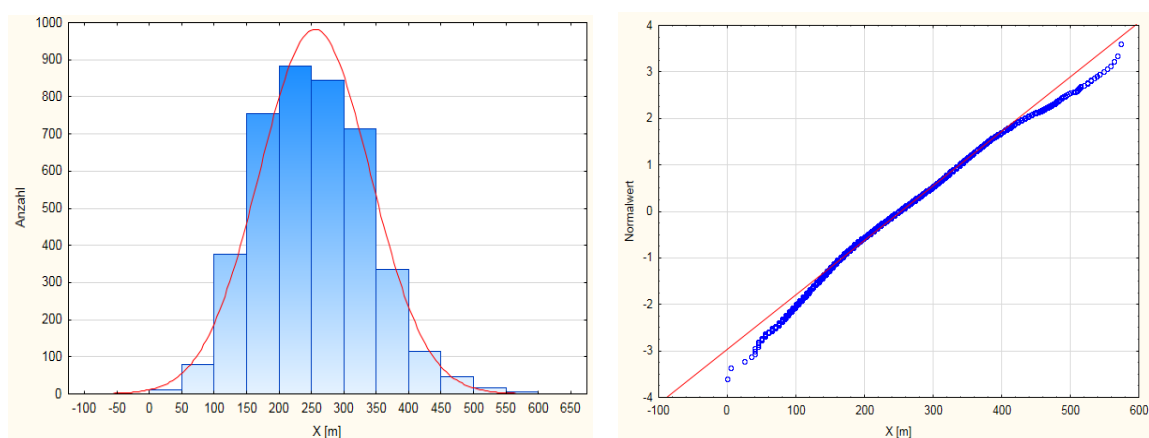


Abbildung 104: Histogramm der Häufigkeitsverteilung der Null-Isolinie (links) und Ergebnis des Shapiro-Wilk-Tests auf Normalverteilung (rechts)

Tabelle 13. Statistik für die Variabilität der Verlaufsverteilung der Null-Isolinie

Kenngröße	Wert
Zahl der Beobachtungen	4189
Durchschnitt [m]	253.336
Median [m]	249.549
Minimaler Wert [m]	0
Maximaler Wert [m]	574.359
Varianz	7238.359
Standardabweichung [m]	85.0676
Schiefte	0.29500
Fehler der Schiefe	0.03783
Kurtosis (Wölbung)	0.01603
Fehler der Kurtosis	0.07565

Die statistische Analyse der kumulierten Häufigkeit der Null-Isolinie ergab:

- Eine zufällige Änderung der Parameter α und γ zieht eine normale Häufigkeitsverteilung der Senkungsnulllinie 1 mm nach sich.
- Die Häufigkeitsverteilung der Null-Isolinie weist eine minimale Asymmetrie mit einer Schiefe von 0,295 m nach rechts auf.

Die Untersuchungsergebnisse ermöglichen die Festlegung der Reichweite der Null-Isolinie bei einem angenommenen Grenzwert für die Absenkungen der Geländeoberfläche von $S_{gr} = 1$ mm. Durch die Annahme von durchschnittlichen Modellparametern für das jeweilige Gebiet ergibt sich ein mittlerer Verlauf (average) der Isolinie im Absenkungsbereich (Abbildung 105, Abbildung 106). Die innere und äußere Grenzlinie der Absenkungen ergibt sich aus der halben Reichweite der Nulllinien-Zone (range).

In Tabelle 14 sind die ermittelten Werte für unterschiedliche, vorläufig angenommene Vertrauensbereiche angegeben. Beispielsweise beträgt bei einem Signifikanzgrad von 95 % und unter Berücksichtigung der Unsicherheit der beiden Parameter α und γ , die Reichweite der Einwirkungszone der Senkungen vom durchschnittlichen Verlauf etwa 166,7 m. Dies bedeutet, dass lediglich eine Wahrscheinlichkeit von 5 % besteht, dass außerhalb der oberen Grenze (max-Wert) eine größere Senkung der Tagesoberfläche als 1 mm auftritt. In Abbildung 107 sind die unteren und oberen Grenzen der Zone, d. h. inneren und äußeren Linien der Senkungsnulllinie 1 mm für die verschiedenen Vertrauensbereiche im Vergleich zur durchschnittlichen „Grenzisolinie“ dargestellt. In Abbildung 108 ist eine zusammenfassende Darstellung zur Signifikanz der vorausgerechneten Nulllinien im Vergleich zur prognostizierten Nulllinie des RBP und zur Topographie zu sehen. Die Nulllinien ergaben sich durch Berechnungen mit dem in Kapitel 7.3 neu ermittelten Zeitfaktor und den in Kapitel 7.4 gegebenen Werte und ermittelten Unsicherheiten für den Abbaufaktor und Grenzwinkel. Der ermittelte Verlauf des statistischen Mittelwerts der Nulllinie stimmt meistens sehr gut mit der prognostizierten RBP-Senkungsnulllinie überein.

Die Ergebnisse in Tabelle 14 und Abbildung 108 zeigen deutlich, dass bei einem Vertrauensbereich von 99 % die Abweichungen vom durchschnittlichen Verlauf der ermittelten 1 mm-Linie, die nur im nordöstlichen und teilweise südlichen Untersuchungsbereich außerhalb der prognostizierten Senkungsnulllinie des RBP liegt, mit maximal ca. 219 m relativ klein sind. Die maximale Abweichung zur prognostizierten Nulllinie beträgt im Bereich Ibbenbüren-Laggenbeck 373 m und im Bereich Mettingen etwa 330 m.

Tabelle 14. Die Zonen der Null-Isolinie (1 mm) für verschiedene Vertrauensbereiche

Vertrauensgrad	68%	90%	95%	99%
Durchschnitt [m]	253.336			
Reichweite der Nulllinien-Zone [m]	169.192	279.847	333.458	438.240
Untere Grenze der Zone [m] (innere Linie)	168.740	113.413	86.607	34.216
Obere Grenze der Zone [m] (äußere Linie)	337.932	393.260	420.065	472.456
Abweichung der Grenzeinwirkungen vom Durchschnittswert [m]	84.596	139.924	166.730	219.120

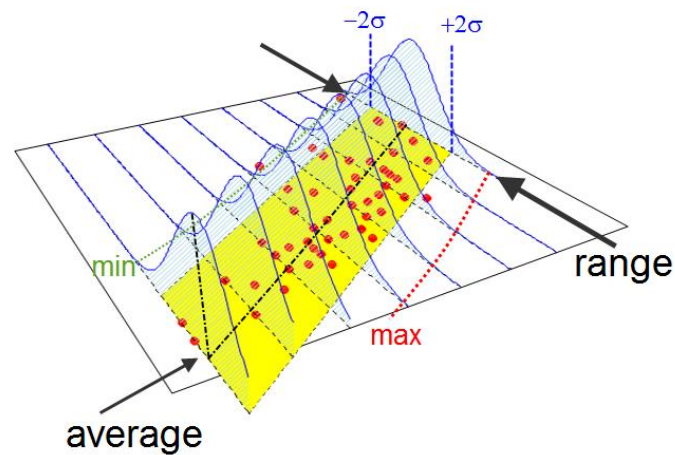


Abbildung 105: Veranschaulichung des durchschnittlichen (average), inneren (min) und äußeren (max) Verlaufs der Senkungsnulllinie sowie die Reichweite der Nulllinien-Zone (range=max-min)

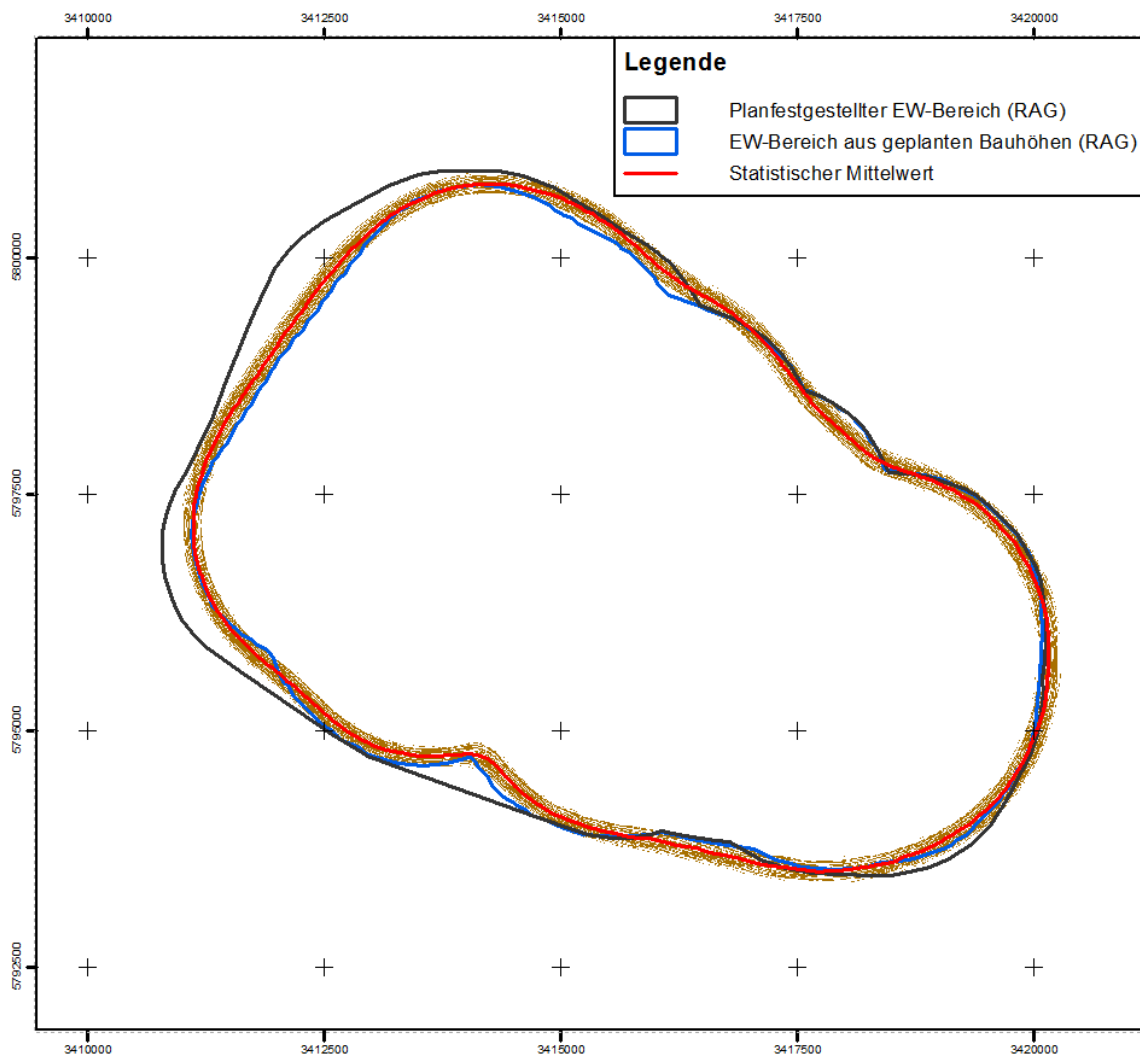


Abbildung 106: Durchschnittlicher Verlauf der Null-Isolinie (1 mm) (rote Linie) innerhalb der Zone der ermittelten Nulllinien (braune Linien)

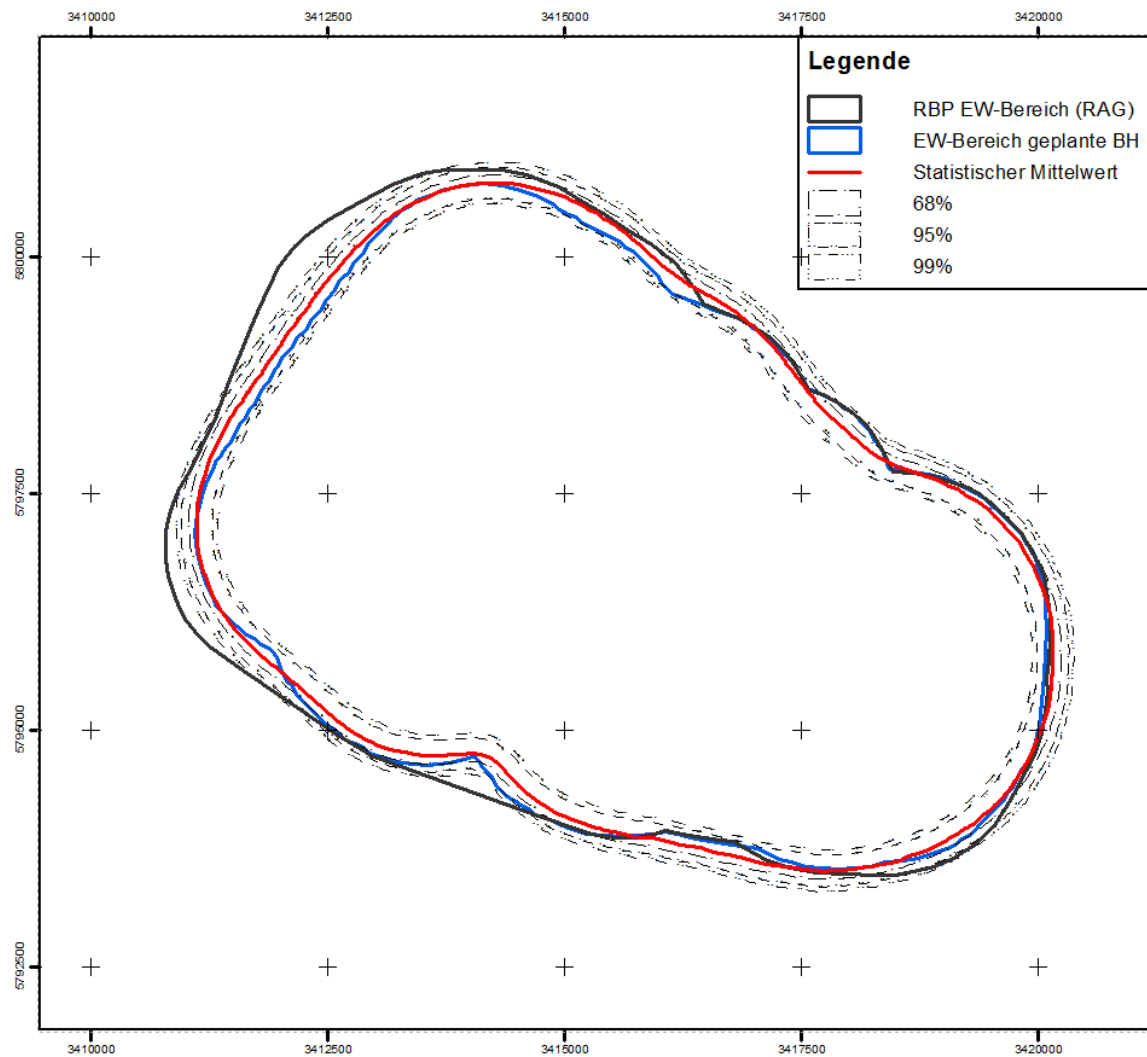
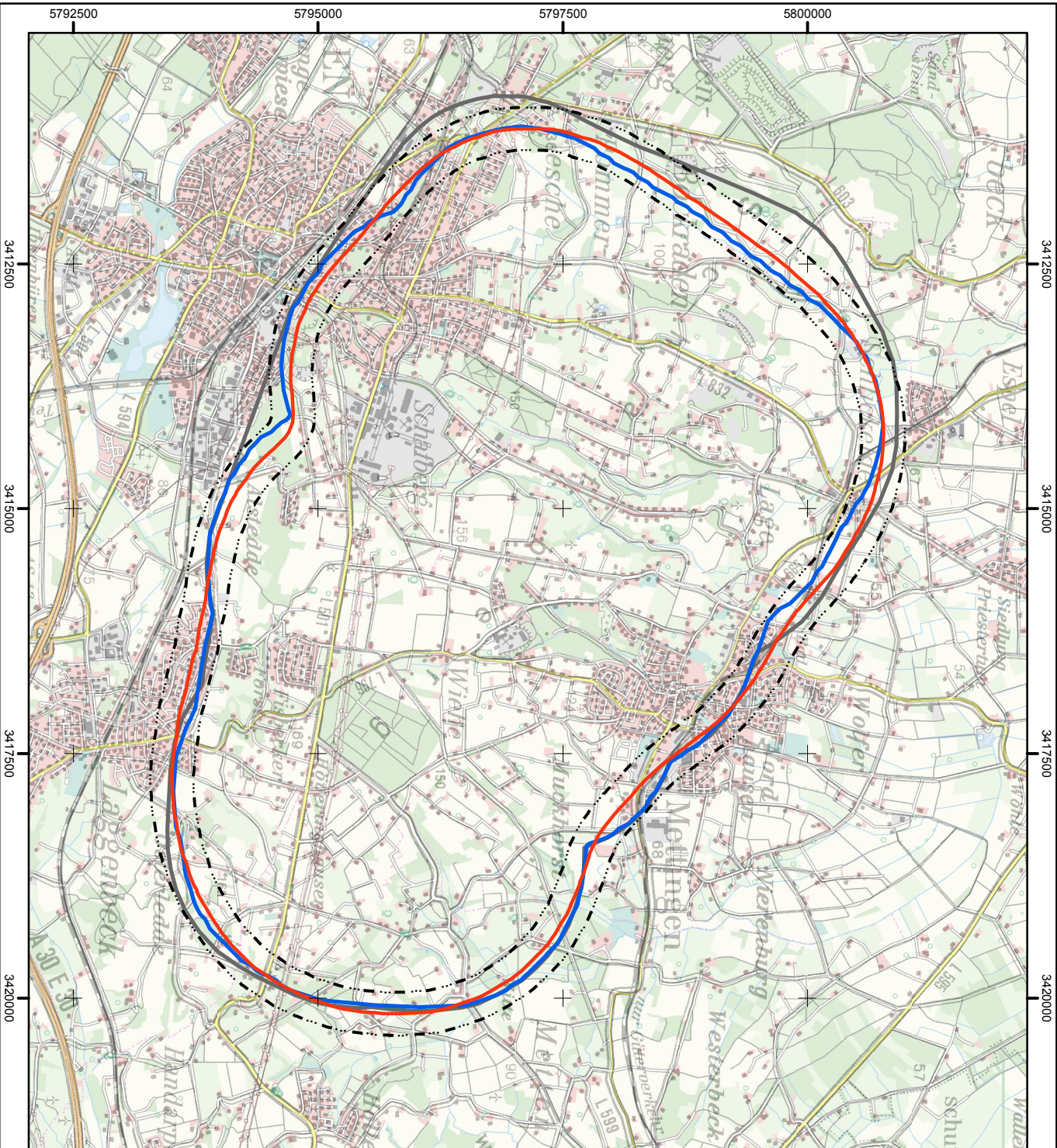


Abbildung 107: Innere und äußere Grenzverläufe der Senkungsnulllinie $S_{gr} = 1 \text{ mm}$ für verschiedene Vertrauensbereiche (graue Linien) im Vergleich zum durchschnittlichen Verlauf (rote Linie)



TU Clausthal
Institut für Geotechnik und Marschdeiwesen

Legende

- Prognostizierter Einwirkungsbereich (RAG)
- Einwirkungsbereich aus geplanten Baubüden (RAG)
- Statistischer Mittelwert
- 99%

Senkungslinien
EW-Bereiche
DLM50, TK100

© 4GIS, 2015
© Bezirksregierung Amsberg, 2015
© Geodass NRW, 2012



Untersuchungsgebiet: **Bergwerk Ibbenbüren**

Titel:

**Theoretische Senkungsnulllinien 1 mm
für den Vertrauensbereich 99%**

Analyse von Senkungsrechnungen außerhalb prognostizierter Einwirkungsbereiche aktiver und in jüngerer Zeit stillgelegte Steinkohlenbergwerke der RAG AG
Im Auftrag der Bezirksregierung Amsberg, Abteilung Bergbau und Energie in NRW

Bearbeitung:	4GIS	Datum:	26.01.2016	Abbildung:	108
--------------	------	--------	------------	------------	------------

7.6. Senkungsnachberechnung mit IST-Abbaudaten

In diesem Kapitel wird überprüft, welchen Einfluss die bis zum 12.02.2015 tatsächlich aufgefahrenden Bauhöhen (Ist-Abbaue) des BW Ibbenbüren theoretisch auf die Tagesoberfläche ausgeübt haben müssten. Die Überprüfung erfolgt anhand einer sog. Nachberechnung der Senkungen mit dem Programm der Firma 4GIS und dem Ruhrkohle-Verfahren unter Berücksichtigung des in Kapitel 7.3 neu ermittelten Zeitfaktors und den von der RAG gelieferten Ist-Abbaudaten. Dabei wurden auch Abbauhöhen mit Restsenkungen, d. h. vor Beginn des RBP und in Abhängigkeit der Zeitfunktion, mit in die Berechnungen einbezogen, sowie das Einfallen der Bauhöhen und die abgebauten Mächtigkeiten.

Mit der Nachberechnung wurden gleichzeitig die Interpolationsparameter analysiert, da wichtig ist, für welchen Grenzwert die Nullrandlinie berechnet wird. Als Abbaufaktor sind für die Ist-Bauhöhen, die von der RAG verwendeten Werte in die Nachberechnung eingegangen, d. h. $a=0,9$; $0,95$ bzw. $1,0$. Durch die lokalen Änderungen des Abbaufaktors im Rechenmodell werden die unterschiedlichen Durchbauungsgrade berücksichtigt. Für Zonen, in denen der Durchbauungsgrad größer ist, wird ein höherer Wert für a angenommen (maximal $1,0$). Bei Verwendung des Standardwertes $a = 0,9$ werden sehr geringe Zuwachsraten der Senkungen als Wirkung des Durchbauungsgrades angenommen. Aufgrund der Zusammensetzung des Gebirges und der großen Abbauteufen von über 1000 m besteht trotz des Bruchbaus ein sehr geringes zusätzliches Senkungspotential.

Der Grenzwinkel begrenzt laut Definition den sog. Einwirkungsbereich der abbaubedingten Bodenbewegungen, wobei lediglich 99% des Senkungsvolumens innerhalb dieses Bereiches auftreten. Der Rest des Senkungspotentials liegt außerhalb des Einwirkungsbereiches. Wie im Senkungsprofil in Abbildung 93 zu sehen ist, liegt eine gewisse Asymmetrie der Senkungsmulde vor. Im inneren Bereich der Senkungsmulde ist die Flanke steiler als im äußeren Bereich. Da der mittlere Grenzwinkel $\gamma = 76,05$ gon in Kapitel 7.4 mittels der im inneren Bereich liegenden Messlinien 3.1 und 3.3 bestimmt wurde, ist dieser Grenzwinkel auch nur für diesen Bereich repräsentativ. Im äußeren Bereich des Einwirkungsbereiches standen nicht ausreichend terrestrische Messdaten für die Berechnung weiterer Grenzwinkel zur Verfügung. Aus diesem Grund wurden im Laufe der gutachterlichen Bearbeitung und nach Bereitstellung der radarinterferometrischen Ergebnisse weitere Höhenänderungsprofile aus den PSI-Ergebnissen des Satelliten Radarsat-2 analysiert. Hierauf aufbauend wurden theoretische Berechnungen mit verschiedenen Grenzwinkeln zwischen 43 gon und 58 gon durchgeführt, um wie in Abbildung 97 jeweils eine optimale Anpassung zu finden. Dabei stellte sich heraus, dass keine der theoretisch berechneten Senkungsprofile die mittels der Radarinterferometrie gemessenen Höhenänderungen von der Abbaukante bis zum äußeren Rand erklärt. Die berechneten Senkungsprofile besitzen im äußeren Bereich meist deutlich geringere Senkungsbeträge im Vergleich zu den radarinterferometrisch ermittelten Höhenänderungen, wie beispielhaft die zwei Profile mit „optimaler“ Anpassung in Abbildung 109 zeigen. Die Ursachen für die Abweichungen werden in Kapitel 9 ausführlich diskutiert. Die optimale Anpassung (mit jedoch weiterhin großen Abweichungen) lag im Mittel bei ca. 50 gon. Für die Nachberechnung der Senkungen im äußeren Bereich der Senkungsmulde mittels der Ist-Abbaudaten kann daher eventuell ein Grenzwinkel von 50 gon als optimal angenommen werden.

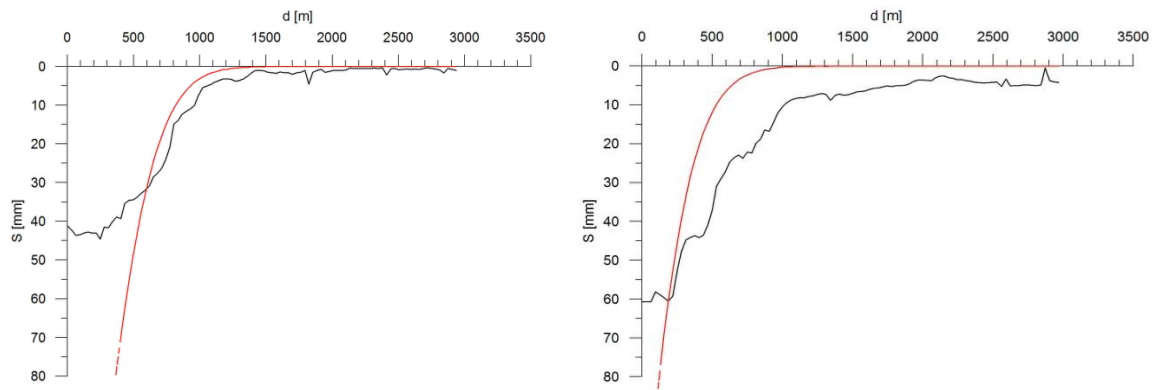


Abbildung 109: Gegenüberstellung der Höhenänderungsprofile der PSI-Ergebnisse von Radarsat-2 für den Zeitraum 01/2011 – 02/2015 mit den berechneten theoretischen Profilen mit optimaler Anpassung; links: $\gamma=48$ gon (N-S-Profil, Lage: Ibbenbüren); rechts: $\gamma=54$ gon (S-N-Profil, Lage westlich von Mettingen)

Es wurden zwei Nachberechnungen mit unterschiedlichen Grenzwinkeln durchgeführt, die erste mit $\gamma = 76,05$ gon und die zweite mit $\gamma = 50$ gon. Die Ist-Abbaudaten über die tatsächlich erfolgten Abbaue wurden von der RAG geliefert. In die Nachberechnung gingen 20 Bauhöhen aus den Jahren 2009 bis 2015 ein, sowie 7 Abbaue aus den Jahren 2008 bis 2009 (Abbildung 110). Abbaue vor 2008 sollten keinen Einfluss mehr auf die Senkungen haben. Für das Jahr 2015 wurden nur Abbaue bis zum 12.02.2015 berücksichtigt, um die Ergebnisse mit den radarinterferometrischen Beobachtungen vergleichen zu können.

In Abbildung 110 ist die mit den Ist-Abbaue 2009-2015 und mit einem Grenzwinkel von 76 gon ermittelte 1 mm-Senkungslinie in Orange dargestellt, im Vergleich zur prognostizierten Nulllinie des RBP in schwarz. Die für den Grenzwinkel von 50 gon ermittelte 1 mm-Senkungslinie ist ebenfalls in Abbildung 110, jedoch in Rot dargestellt. Wie der Abbildung 110 zu entnehmen ist, liegen die beiden nachberechneten, theoretischen Senkungsnulllinien fast zu 100 % innerhalb des prognostizierten Einwirkungsbereiches des RBP. Nur im Bereich Ibbenbüren-Laggenbeck verläuft die mit dem Grenzwinkel 50 gon berechnete 1 mm-Senkungslinie leicht außerhalb der prognostizierten Nulllinie in einem Abstand von maximal 60 m.



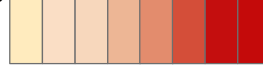
Legende

- Prognostizierter Einwirkungsbereich (RAG)
- Nachberechnung 1mm, gamma=50gon (4GIS)
- Nachberechnung 1mm, gamma=76gon (4GIS)
- Tagesöffnungen in Betrieb

Abbauflächen

Anfangsdatum der Teilfläche [Jahr.Monat.Tag]

- 2008.10.01-2009.11.01
- ab 2010.01.01
- ab 2011.01.01
- ab 2012.01.01
- ab 2013.01.01
- ab 2014.01.01
- 2015.01.01
- 2015.02.01



1mm-Senkungslinien
Abbaue
EV-Bereiche, Schächte
DUM50, TK100

© 4GIS, 2015
© RAG AG, 2015
© Bezirksregierung Arnsberg, 2015
© Geobasis NRW, 2012



Untersuchungsgebiet:

Bergwerk Ibbenbüren

Titel:

Theoretische 1mm-Senkungslinien der Nachberechnung
($c=4,1a^{-1}$; Ist-Abbaue; Zeitraum 01/2009 - 02/2015)

Analyse von Senkungserscheinungen außerhalb prognostizierter Einwirkungsbereiche aktiv und in jüngerer Zeit stillgelegter Steinkohlenbergwerke der RAG AG
Im Auftrag der Bezirksregierung Arnsberg, Abteilung Bergbau und Energie in NRW

Bearbeitung:

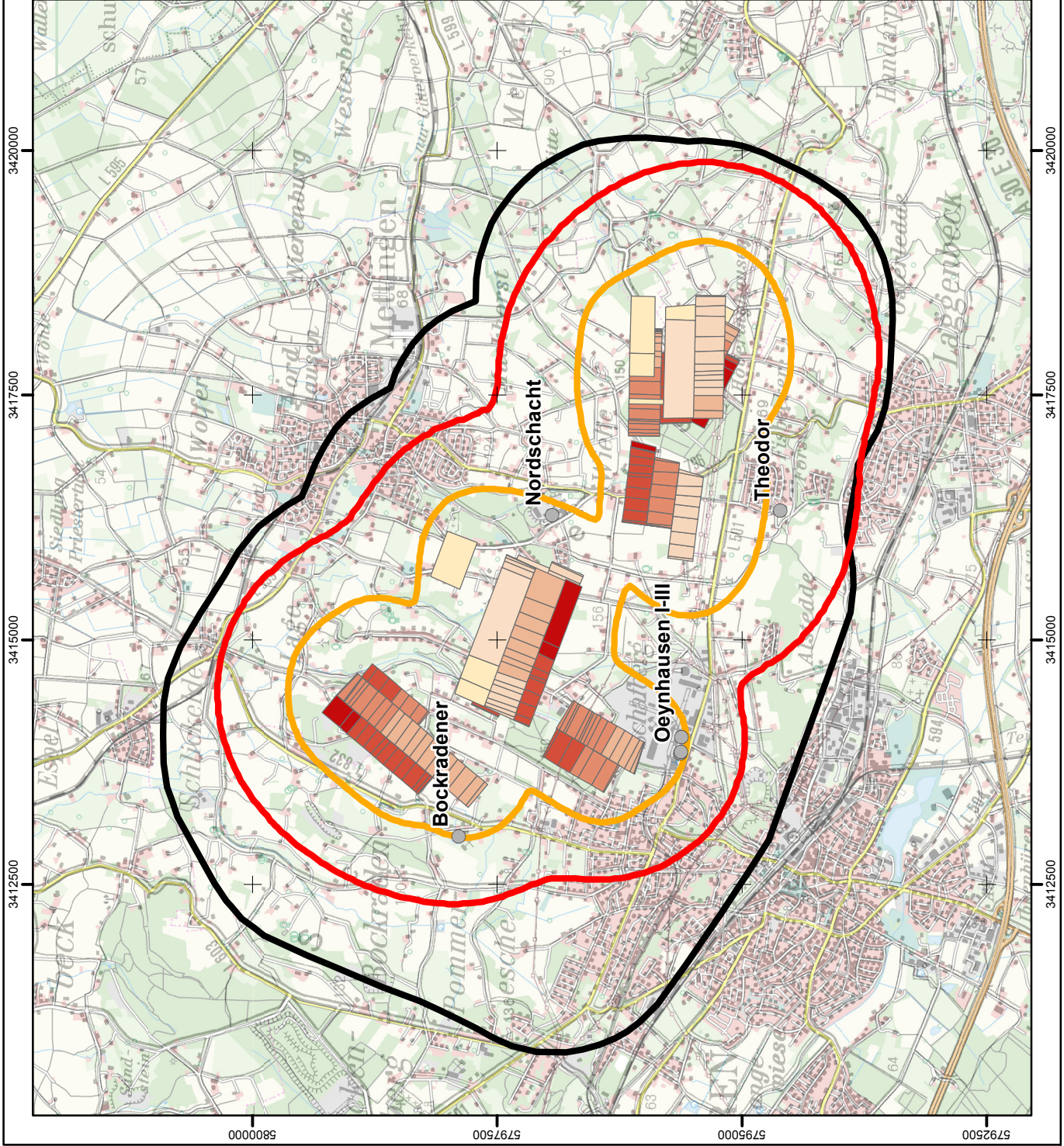
4GIS

Datum:

03.02.2016

Abbildung

110



8. HYDROGEOLOGISCHE UNTERSUCHUNGEN

8.1. Räumliche Auswertung von Grundwasserstandsänderungen

Die hier untersuchten Grundwasserstandsdaten beziehen sich auf den Betrachtungszeitraum vom 01.01.2009 bis zum 28.02.2015. Die Auswertungen der erfassten Daten werden in Form von Grundwasserganglinien, bezogen auf die absolute Höhe über Normalhöhennull in m NHN, dargestellt und interpretiert.

Die Grundwasserganglinien bilden die Veränderungen einer Grundwasserhöhe für das Nahfeld einer Grundwassermessstelle auf dieser Fläche in Zeitreihen ab. Ohne lokale Eingriffe in den Grundwasserhaushalt ist die Bewegung der Grundwasseroberfläche in einem Betrachtungszeitraum in allen Punkten von denselben natürlichen witterungsbedingten Einflüssen abhängig. Dabei sind die Intensität, mit der einzelne Faktoren einwirken sowie der Anteil einer stochastischen Komponente unterschiedlich (CREMER & MEßER 2010). Die natürliche Entwicklung der Grundwasseroberfläche kann durch anthropogene Einflüsse beeinflusst werden. Mögliche Einflussfaktoren sind z. B. Grundwasserentnahmen für die private bzw. öffentliche Trinkwasserversorgung sowie Absenkungsmaßnahmen im Bereich der oberflächennahen Lagerstätten-gewinnung zwecks Abbau.

Die bereitgestellten Grundwasserstandsdaten sind in Kapitel 4.3.4 erläutert. Es wurden für alle geeigneten Grundwassermessstellen Ganglinien der Grundwasserhöhen erstellt und hinsichtlich der zeitlichen Entwicklung ausgewertet. Der Verlauf einer rein witterungsbedingten Grundwasserganglinie ist in Abbildung 111 anhand der Grundwassermessstelle TE/24 – ESPEL ersichtlich, die sich zwischen den Orten Recke und Schlickelde befindet (Karte 5).

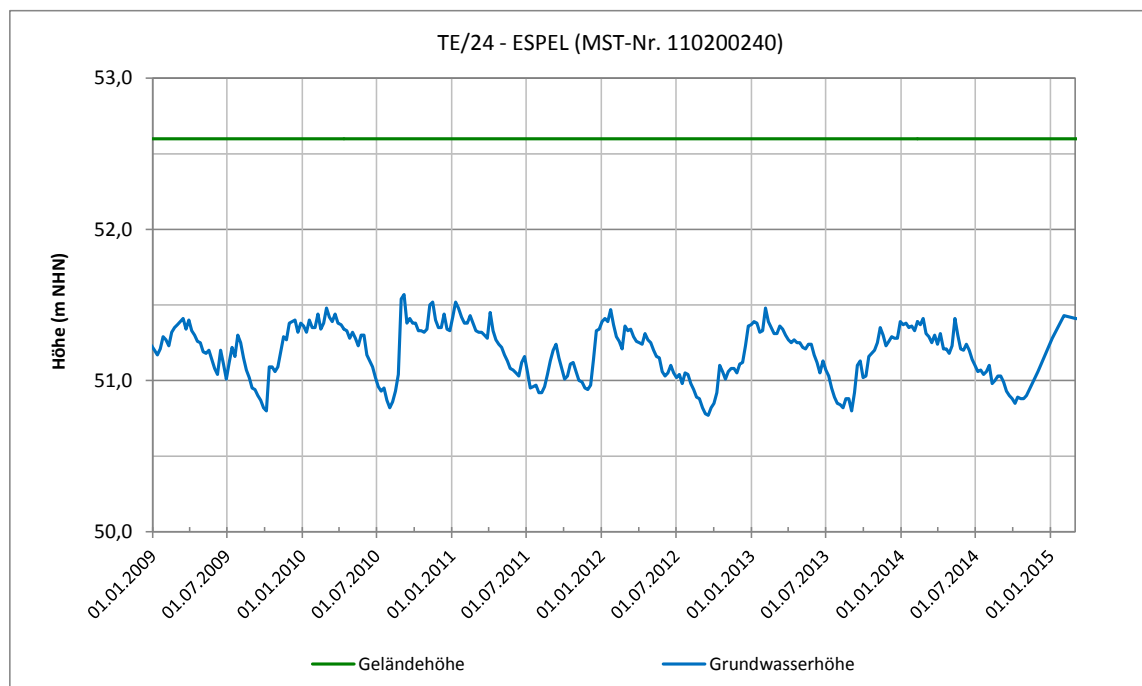


Abbildung 111: Grundwasserganglinie der unbeeinflussten LANUV-Messstelle TE/24 – ESPEL (MST-Nr. 110200240) außerhalb des Senkungsnullrandes

Die Grundwasserschwankungen zeigen jahreszeitliche Einflüsse und lassen keine Hinweise auf anthropogene Einflüsse erkennen. Die Grundwasserganglinie zeigt einen Höchststand nach dem Starkregenereignis im August 2010, nach dem der Grundwasservorrat nur allmählich wieder aufgebraucht wird. Im folgenden Sommerhalbjahr 2011 werden daher die höchsten Grundwasserniedrigstände im Betrachtungszeitraum beobachtet. Der Flurabstand, d. h. der Abstand der Grundwasserhöhe zur Geländeoberfläche, beträgt im gesamten Betrachtungszeitraum ca. 1,5 m und ist relativ konstant. Die Auswertung der radarinterferometrischen Messdaten zeigt keine Bodenbewegungen im Betrachtungszeitraum im Bereich der Messstelle TE/24 – ESPEL außerhalb des prognostizierten Einwirkungsbereiches.

Auf Grundlage der radarinterferometrischen Auswertungen wurden in Kapitel 6.4 zwei Teilgebiete (Mettingen, Ibbenbüren-Laggenbeck) mit signifikanten Höhenänderungen außerhalb des prognostizierten Einwirkungsbereiches festgestellt. Zusätzlich wird im Kapitel 6.4.2 auch deutlich, dass das ermittelte Bodenbewegungsgebiet im westlichen Bereich, d. h. im Bereich des Bockradener Grabens, bis mindestens an die prognostizierte Einwirkungsgrenze heranreicht und im Osten des Untersuchungsraums deutlich darüber hinausgeht. In den folgenden Unterkapiteln werden deshalb drei Teilgebiete bzgl. des Einflusses veränderter hydrogeologischer Bedingungen untersucht. Die hydrogeologischen Betrachtungen zum Senkungsgebiet Ibbenbüren-Laggenbeck beinhalten auch das Gebiet südwestlich der Siedlung Hollenbergs Hügel.

8.1.1. Untersuchungs-Teilgebiet Bockradener Graben

Die Grundwassermessstellen (überwiegend Brunnen), deren Daten von der RAG Anthrazit Ibbenbüren GmbH zur Verfügung gestellt wurden, befinden sich hauptsächlich im Bereich des Bockradener Grabens. Diese Messstellen wurden eingerichtet, um den bergbaulichen Einfluss auf die hydrologischen Verhältnisse zu dokumentieren. Aus diesem Grund wurden diese nahe der Vorfluter im Bockradener Graben – den westlichen Strootbach und den östlichen Polkenbach – eingerichtet (Abbildung 112). Ein Großteil der Grundwassermessstellen ist relativ flach und innerhalb der Schichten des Quartär verfiltert. Zwei untersuchte Grundwassermessstellen (G 343 Moriß und G 348 Neyer) sind in größerer Tiefe in den Sandsteinen des Karbon verfiltert.

Aufgrund der Nähe zu den Vorflutern ist der Flurabstand generell relativ gering und beträgt im Mittel ca. 0,5 - 1,5 m. Nach der Regeneration des Grundwasserkörpers im hydrologischen Winterhalbjahr steht das Grundwasser oftmals nur wenige Zentimeter unterhalb der Geländeoberfläche. Aufgrund der mächtigen Quartär-Ablagerungen im Bockradener Graben, die einen gut durchlässigen Porengrundwasserleiter ausbilden, sind einerseits jahreszeitliche Schwankungen der Grundwasserhöhen sowie andererseits eine deutliche Abhängigkeit von den Vorflutern in diesem Bereich erkennbar. Die Grundwasserhöhen in den Messstellen G 56, G 85, G 175 und G 352 schwanken zumeist im Bereich von ca. 0,5 – 1 m (Abbildung 113 bis Abbildung 116). Vereinzelt können auch stärkere jahreszeitliche Schwankungen der Grundwasserhöhen von bis zu 2,5 m auftreten, wie es die Daten der Messstelle G 175 zeigen (Abbildung 115). Im Bereich der Bäche sind die jahreszeitlichen Schwankungen vermindert, da Wasser aus den oberirdischen Gewässern in den Grundwasserkörper eintreten kann (influyente Verhältnisse). Insgesamt zeigen die Grundwasserhöhen in den Messstellen G 56, G 85, G 175 und G 352 im Betrachtungszeitraum witterungsbedingte Verläufe. Signifikante Veränderungen der Grundwasserhöhen durch anthropogene Einflüsse sind nicht zu erkennen. Ein ursächlicher Zusammenhang zwischen den natürlichen

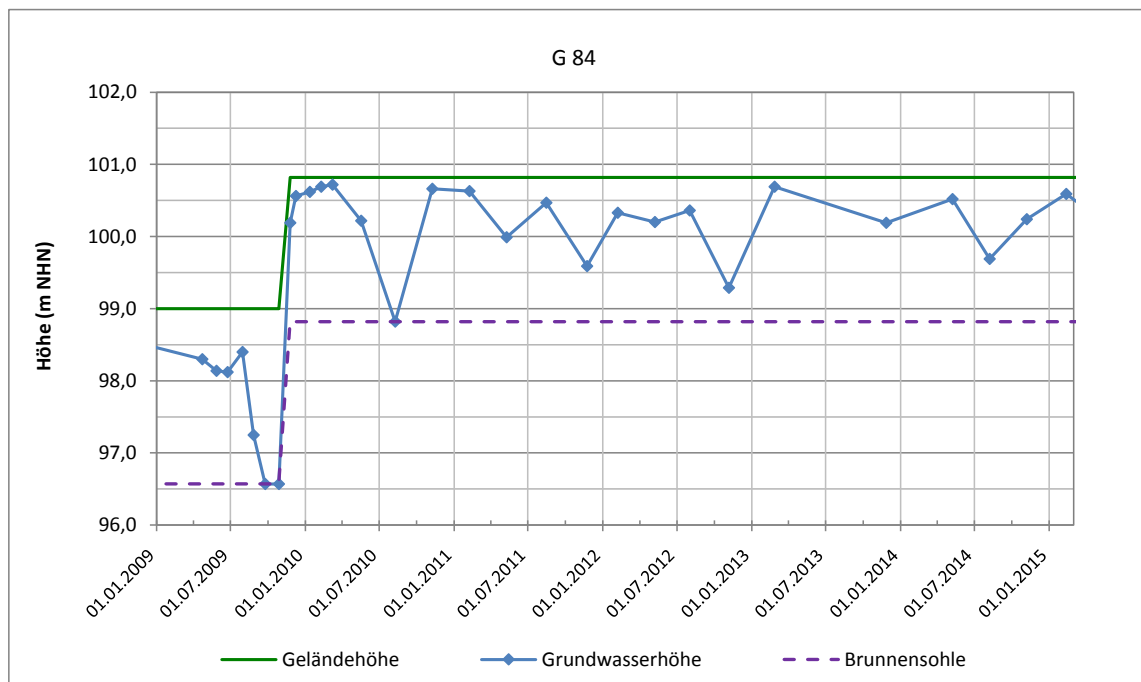


Abbildung 114: Darstellung der Grundwasserstände in der RAG-Messstelle G 84

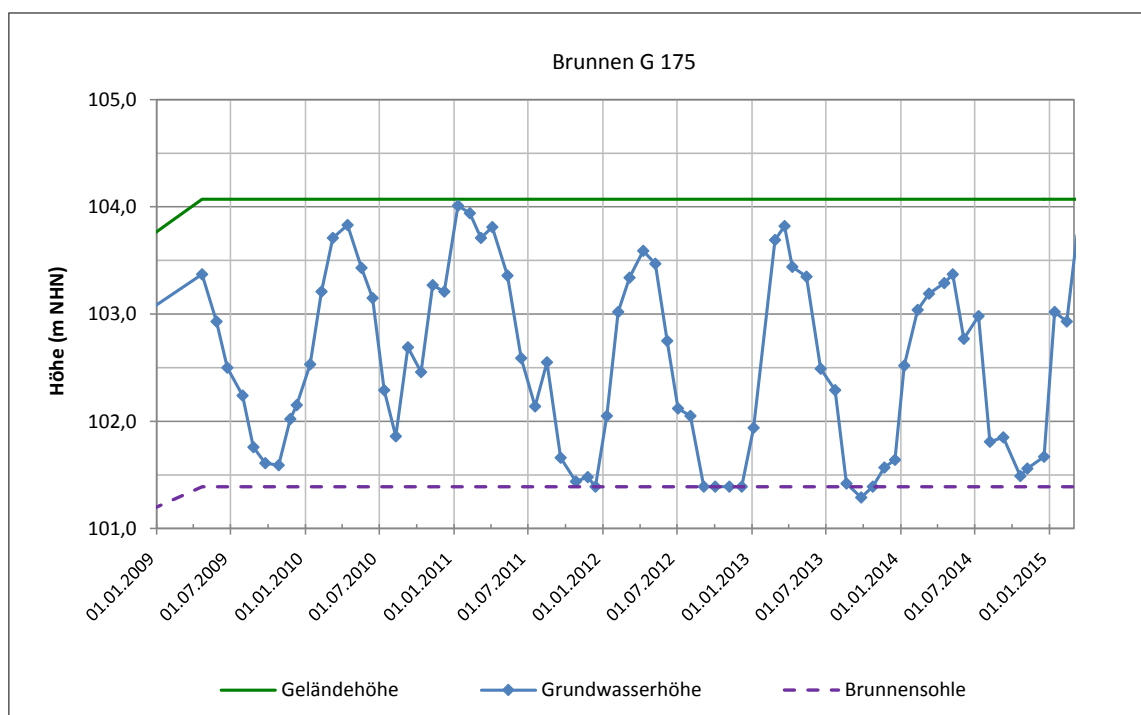


Abbildung 115: Darstellung der Grundwasserstände in der RAG-Messstelle G 175

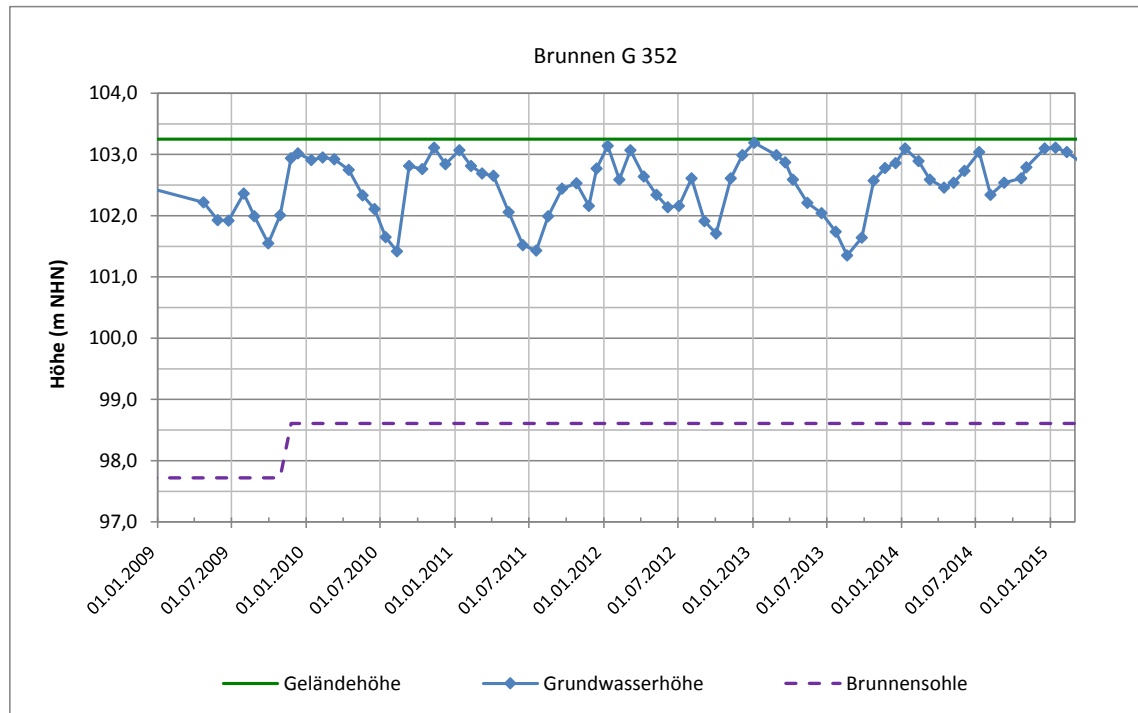


Abbildung 116: Darstellung der Grundwasserstände in der RAG-Messstelle G 352

Bemerkenswert ist, dass teilweise Erhöhungen der Messpunkthöhen an den Grundwassermessstellen im Bockradener Graben nach den letzten Höhenmessungen im Herbst 2009 auftraten (Abbildung 114, Abbildung 116, Abbildung 118), deren Ursache nicht dokumentiert ist. Besonders deutlich ist diese Erhöhung am Beispiel der Grundwassermessstelle G 84 (Abbildung 114), die dort mit 1,82 m seit der letzten Höhenmessung im Jahre 1974 bestimmt wurde. Aufgrund dieser Korrektur der Messpunkthöhe ist der scheinbare Grundwasseranstieg um ca. 4 m teilweise erklärbar.

Im Bereich des Bockradener Grabens befinden sich außerdem zwei landwirtschaftliche Betriebe, die zur Bewässerung Wasser aus eigenen Brunnen fördern. Für die kontinuierliche Beobachtung der Grundwasserhöhen wurden die Förderbrunnen von der RAG Anthrazit GmbH mit Datenloggern ausgestattet. Die Grundwasserstände der Grundwassermessstellen G 348 (Landwirtschaftsbetrieb Neyer im zentralen Bereich des Bockradener Grabens) und G 343 (Obstplantage Moriß im nördlichen Bereich des Bockradener Grabens) sind in der Abbildung 117 und der Abbildung 118 dargestellt. Beide Ganglinien zeigen einen vergleichbaren Verlauf der Grundwasserhöhen, wobei in beiden Grundwassermessstellen jahreszeitliche Schwankungen um ca. 2,0 bis 2,5 m auftreten. Das Starkregenereignis im August 2010 (Abbildung 15) ist in beiden Darstellungen als deutliches Maximum, mit einer Erhöhung der Grundwasserhöhen um über 1 m gegenüber dem Vorjahreswert, erkennbar. Die tendenzielle Verringerung der Grundwasserniedrigstände der folgenden Jahre wird durch das relativ niederschlagreiche Jahr 2014 abgemildert. Insgesamt zeigt die Grundwasserhöhe in der Messstelle G 348 (Neyer, Abbildung 117) im Betrachtungszeitraum einen witterungsbedingten Verlauf. Signifikante Veränderungen der Grundwasserhöhen durch anthropogene Einflüsse sind nicht zu erkennen. Ein ursächlicher Zusammenhang zwischen den natürlichen Schwankungen der Grundwasserhöhen sowie den durch die Auswertung der radarinterferometrischen Messdaten festgestellten Bodenbewegungen ist im Betrachtungszeitraum nicht erkennbar.

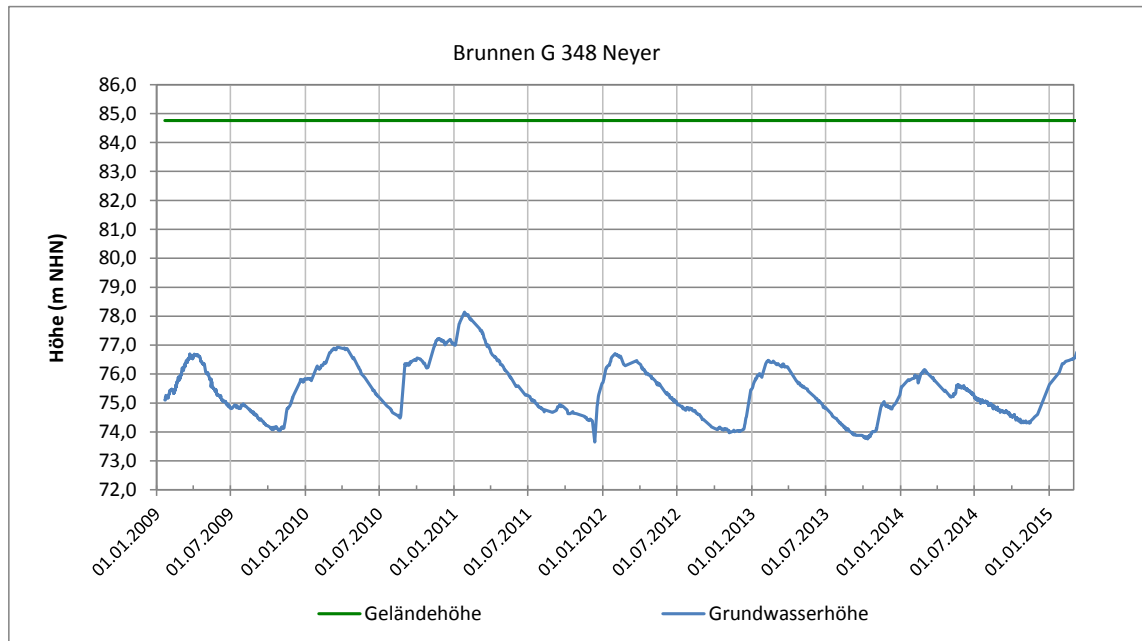


Abbildung 117: Darstellung der Grundwasserstände in der RAG-Messstelle G 348 Neyer

Die Grundwasserhöhe in der Messstelle G 343 (Moriß, Abbildung 118), im nördlichen Bereich des Bockradener Grabens, hat sich in der zweiten Hälfte des Betrachtungszeitraumes (Jahre 2012 bis 2014), um ca. 1 m gegenüber den Werten zu Beginn der Betrachtungszeitraumes verringert. Inwieweit es sich hierbei um eine temporäre Veränderung, bzw. eine lang anhaltende Entwicklung handelt, lässt sich im begrenzten Betrachtungszeitraum nicht festlegen. Zum Ende des Betrachtungszeitraumes ist aufgrund der erhöhten Niederschläge keine weitere Abnahme der Grundwasserhöhen zu verzeichnen.

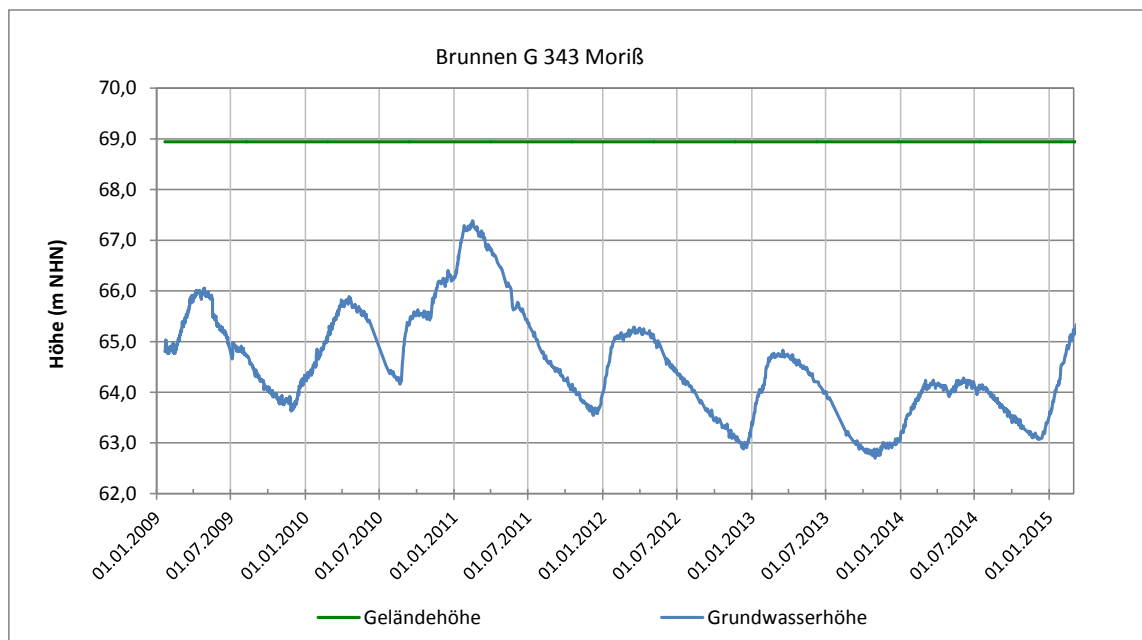


Abbildung 118: Darstellung der Grundwasserstände in der RAG-Messstelle G 343 Moriß

Eine vergleichbare Tendenz der Grundwasserhöhen ab dem Jahr 2011 lässt sich auch in weiteren Grundwassermessstellen im nördlichen Bereich des Bockradener Grabens feststellen. Die

Grundwassermessstelle G 341 (Abbildung 119) zeigt ebenfalls eine tendenzielle Verringerung der Grundwasserhöhen im Betrachtungszeitraum um ca. 0,5 m bis maximal 1 m. Ein vergleichbares Verhalten zeigt die Grundwassermessstelle G 147 (Abbildung 120) im nordöstlichen Bereich des Bockradener Grabens. Insgesamt zeigen die Grundwassermessstellen im nördlichen Bereich des Bockradener Grabens einen witterungsbedingten Verlauf der Grundwasserhöhen, der von einer Absenkung um bis zu 1 m überprägt ist. Veränderungen der Grundwasserhöhen durch anthropogene Einflüsse sind im Betrachtungszeitraum nicht zu erkennen.

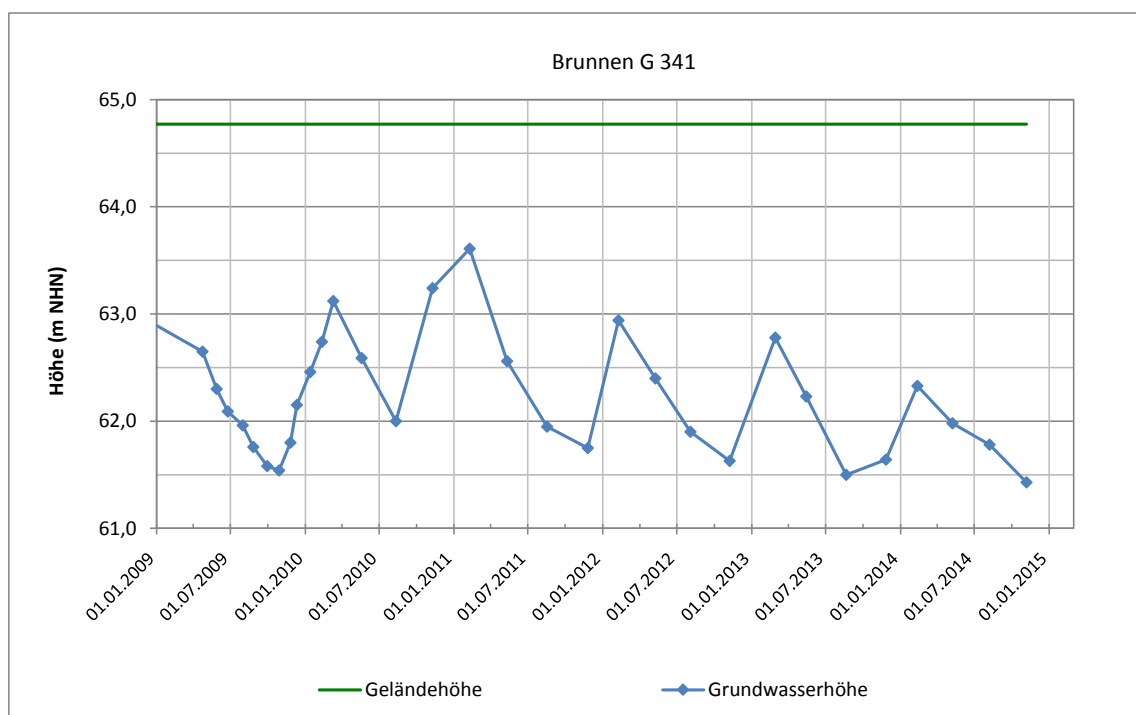


Abbildung 119: Darstellung der Grundwasserstände in der RAG-Messstelle G 341

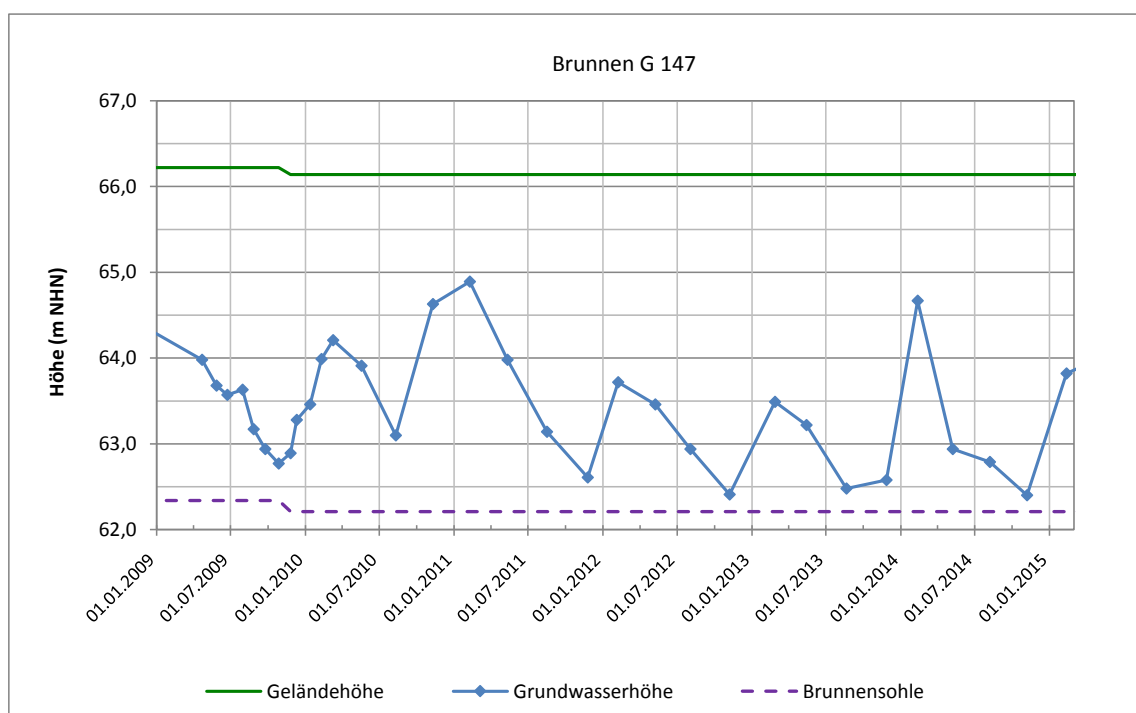


Abbildung 120: Darstellung der Grundwasserstände in der RAG-Messstelle G 147

Anhand der untersuchten Grundwasserstandsmessungen lassen sich im Bereich des Bockradener Grabens keine anthropogene Einflüsse auf das Grundwasser erkennen, die auf bergbauliche Einflüsse oder auf eine Grundwasserförderung für landwirtschaftliche Zwecke hindeutet. Die Grundwasserhöhen zeigen generell einen witterungsbedingten Einfluss. Eine tendenzielle Veränderung der Grundwasserhöhen ist im zentralen Bereich des Bockradener Grabens über den Betrachtungszeitraum nicht erkennbar. Im nördlichen Bereich des Bockradener Grabens weisen die dargestellten Grundwassermessstellen (G 147, G 341 und G 343) tendenziell eine Verringerung der Grundwasserhöhen im Betrachtungszeitraum im Bereich von ca. 0,5 m bis ca. 1 m auf. Anthropogene Einflüsse für die abnehmenden Grundwasserhöhen im Betrachtungszeitraum sind nicht bekannt.

8.1.2. Untersuchungs-Teilgebiet Mettingen

Im Untersuchungs-Teilgebiet Mettingen wurden Grundwasserstandsdaten an der südlichen Ortsrandlage der Stadt Mettingen durch Grundwassermessstellen der RAG Anthrazit Ibbenbüren GmbH (H 64, H 101, L 133, L 151) erhoben. Die Lage der Messstellen ist aus Abbildung 112 ersichtlich.

Am westlichen Ortsausgang, südlich der Landstraße L 599, wurden Grundwassermessungen in der Messstelle H 64 bis zum April 2013 durchgeführt (Abbildung 121). Da der Eigentümer den Brunnen verfüllt hat, steht dieser heute nicht mehr zur Verfügung. Das Grundwasser weist einen niedrigen Flurabstand von durchschnittlich ca. 1 m auf. Im jahreszeitlichen Verlauf der Grundwasserhöhen schwanken die Grundwasserhöhen um teilweise über 1 m. Im Zeitraum vom Frühjahr 2009 bis zum Herbst 2011 ist eine Verringerung der Grundwassertiefststände, bei relativ konstanten Grundwassermaxima, zu erkennen. Dieser Trend ist in den Folgejahren jedoch nicht weiter festzustellen. Insgesamt zeigt die Grundwasserhöhe in der Messstelle H 64 im Betrachtungszeitraum einen witterungsbedingten Verlauf. Signifikante Veränderungen der Grundwasserhöhen infolge anthropogener Einflüsse sind nicht zu erkennen. Ein ursächlicher Zusammenhang zwischen den natürlichen Schwankungen der Grundwasserhöhen sowie den durch die Auswertung der radarinterferometrischen Messdaten festgestellten Bodenbewegungen ist im Betrachtungszeitraum nicht erkennbar.

Ungefähr 500 m in südöstlicher Richtung werden seit Juni 2011 Grundwassermessungen in der Messstelle H 101 durchgeführt, wodurch eine Fortführung der Grundwasserbeobachtungen westlich von Mettingen möglich ist (Abbildung 122).

Das Grundwasser weist einen Flurabstand von ca. 3 m auf. Aufgrund des relativ trockenen Sommers im Jahre 2013, gefolgt von einem überdurchschnittlich niederschlagsreichem Sommer im Jahr 2014 (Abbildung 15), können die Schwankungen der Grundwasserhöhe bis zu 2 m betragen. Insgesamt ist in dem kurzen Zeitraum der Messungen in der Grundwassermessstelle H 101 weder ein anthropogener Einfluss, noch ein langfristiger Trend der Grundwasserhöhen zu verzeichnen. Es ist für den Betrachtungszeitraum kein ursächlicher Zusammenhang zwischen den durch die Auswertung der radarinterferometrischen Messdaten festgestellten Bodenbewegungen und den natürlichen Schwankungen der Grundwasserhöhen erkennbar.

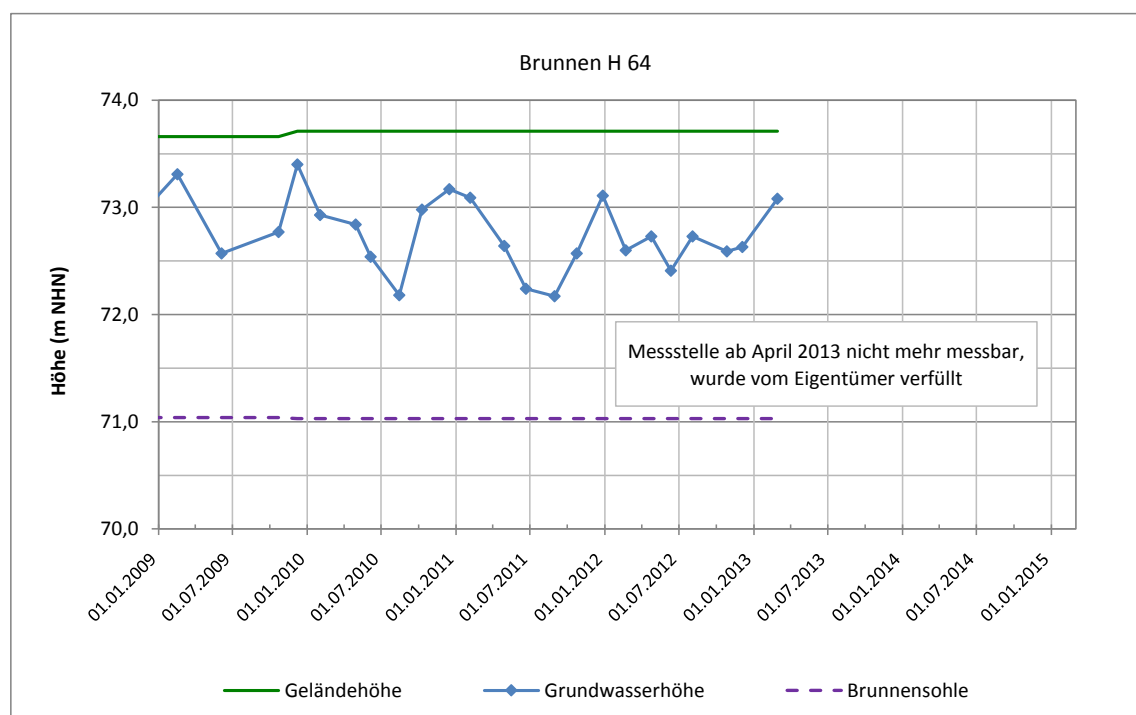


Abbildung 121: Darstellung der Grundwasserstände in der RAG-Messstelle H 64

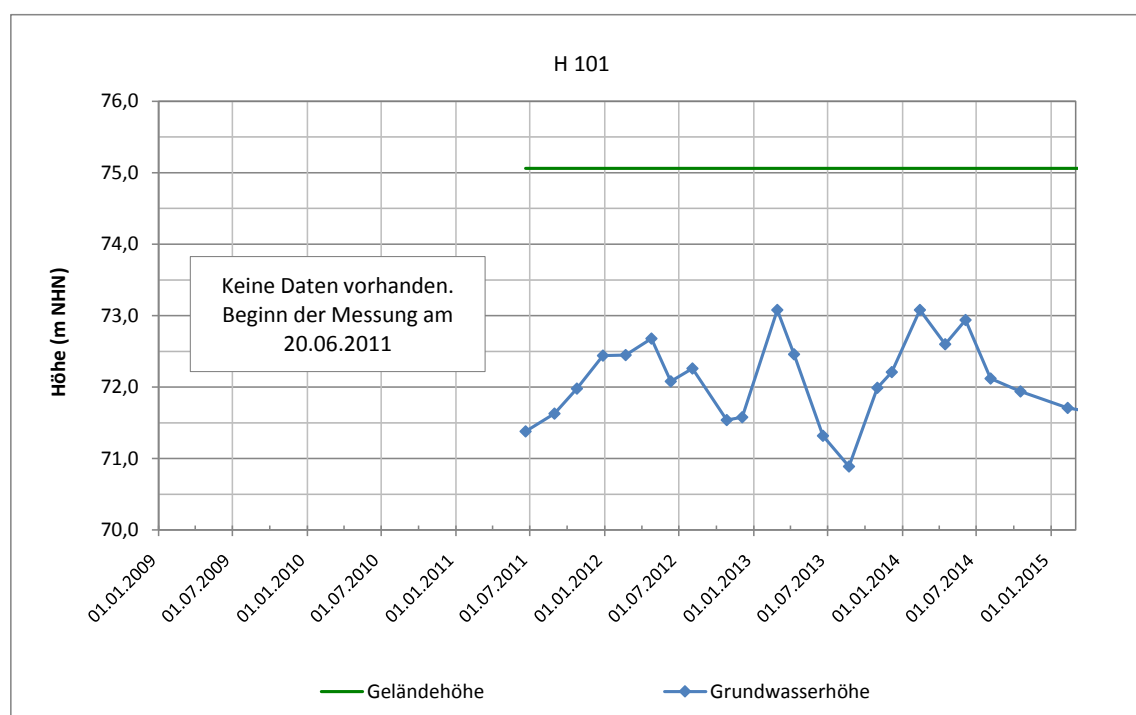


Abbildung 122: Darstellung der Grundwasserstände in der RAG-Messstelle H 101

Die Grundwassermessstelle L 133 der RAG Anthrazit Ibbenbüren GmbH weist über den gesamten Betrachtungszeitraum nur relativ geringe Schwankungen der Grundwasserhöhen auf. Diese zeigen, im Vergleich zu den übrigen Grundwassermessstellen, keine Beeinflussung durch die Witterungsverhältnisse und weisen bei einem Flurabstand von ca. 3,5 m nur geringe Schwankungen um wenige Dezimeter auf (Abbildung 123). Aus diesem Grund ist zu vermuten, dass die Messstelle L 133 defekt ist. Daher kann für den südwestlichen Bereich der Stadt Mettingen über den Betrachtungszeitraum keine Aussage getroffen werden.

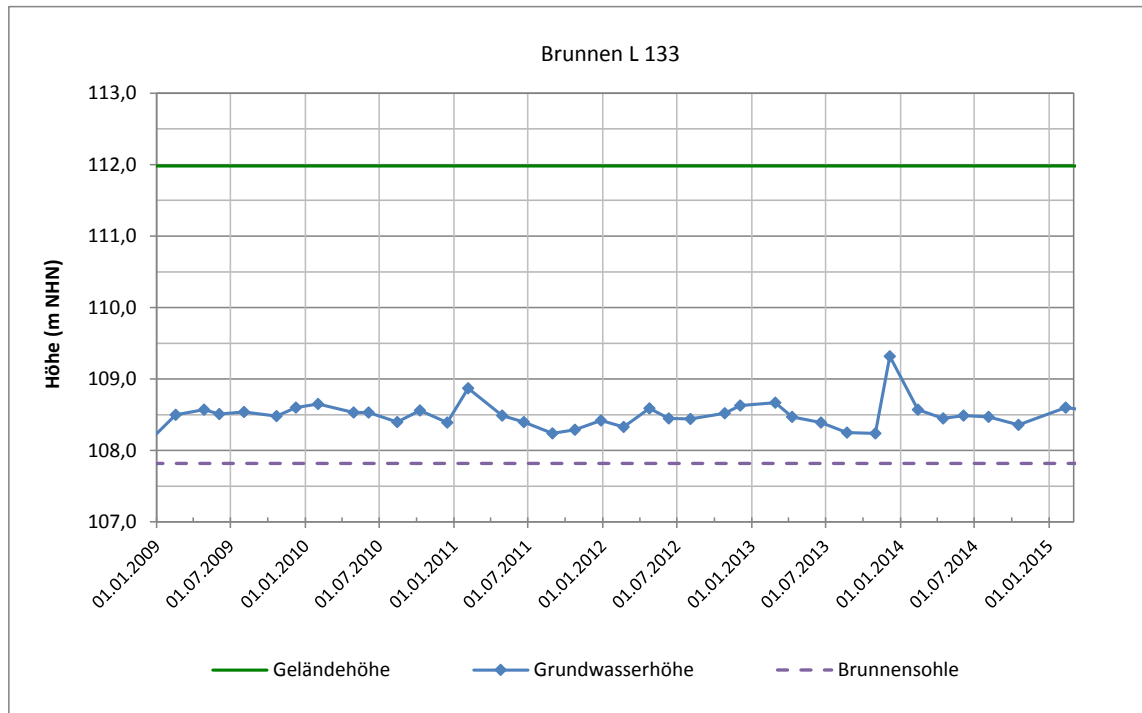


Abbildung 123: Darstellung der Grundwasserstände in der RAG-Messstelle L 133

Die Grundwasserhöhe in der Messstelle L 151 der RAG Anthrazit Ibbenbüren GmbH, die sich südöstlich der Stadt Mettingen befindet, weist über den gesamten Betrachtungszeitraum sehr ausgeprägte jahreszeitliche Schwankungen um ca. 4 m bis 5 m auf (Abbildung 124). Die Ganglinie zeigt eine ausgeprägte periodische Schwankung, deren Höhe durch die Niederschlagsverhältnisse bedingt ist (Abbildung 15). Diese jahreszeitlichen Schwankungen der Grundwasserhöhen, die den sommerlichen Aufbrauch des Grundwasservorrats sowie dessen Regeneration in den Wintermonaten deutlich nachzeichnen, zeigen keinen langfristigen Trend. Insgesamt zeigen die Grundwasserhöhen in der Messstelle L 151 im Betrachtungszeitraum einen witterungsbedingten Verlauf. Signifikante Veränderungen der Grundwasserhöhen durch anthropogene Einflüsse sind nicht zu erkennen. Ein ursächlicher Zusammenhang zwischen den natürlichen Schwankungen der Grundwasserhöhen sowie den durch die Auswertung der radarinterferometrischen Messdaten festgestellten Bodenbewegungen ist im Betrachtungszeitraum nicht erkennbar.

Insgesamt spiegeln die Grundwasserhöhen im Untersuchungs-Teilbereich Mettingen die natürlichen witterungsbedingten Einflüsse wider. Signifikante Veränderungen der Grundwasserhöhen durch anthropogene Einflüsse sind nicht zu erkennen. Die Grundwasserhöhen in diesem Bereich sind im langjährigen Verlauf insgesamt stabil und lassen keinen bergbaulichen Einfluss erkennen, welche die durch die Auswertung der radarinterferometrischen Messdaten festgestellten Bodenbewegungen im Betrachtungszeitraum erklären.

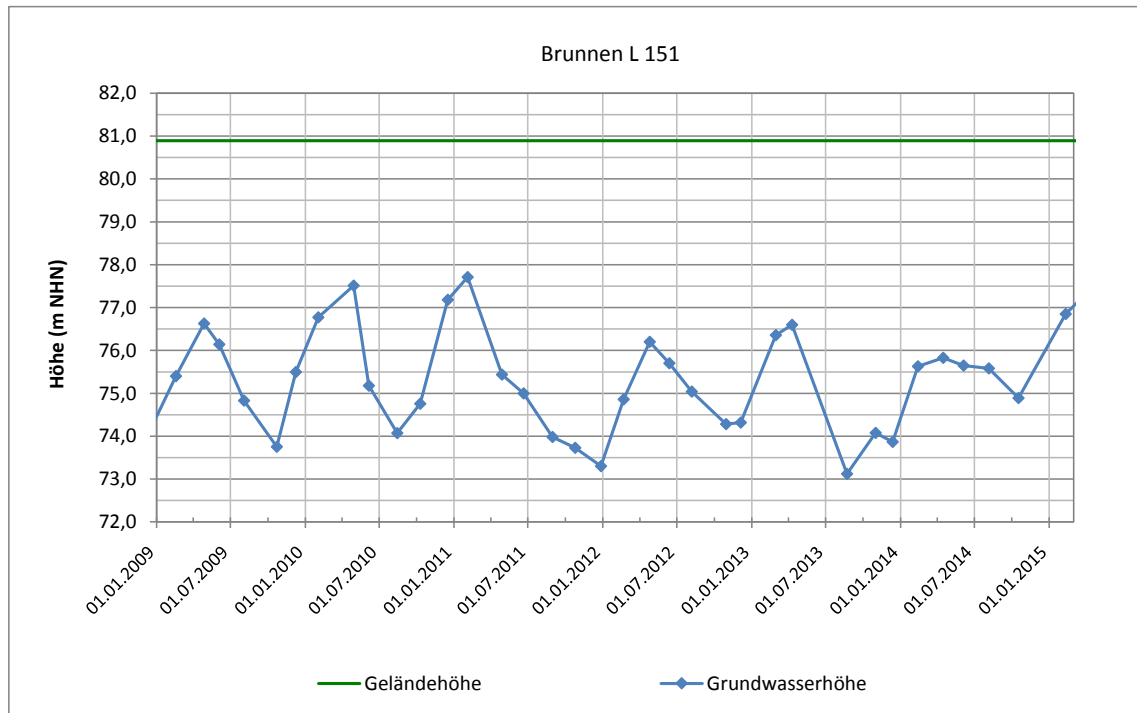


Abbildung 124: Darstellung der Grundwasserstände in der RAG-Messstelle L 151

8.1.3. Untersuchungs-Teilbereich Ibbenbüren-Laggenbeck

Entlang der Bundesautobahn A30 zwischen Ibbenbüren und dessen Stadtteil Laggenbeck werden die Grundwasserverhältnisse in Messstellen des LANUV durch regelmäßige Höhenmessungen mittels Datenloggern aufgezeichnet. Die Grundwassermessstellen befinden sich südlich der Osning-Überschiebung im Verbreitungsgebiet der Jura-Schichten, die durch glazigene Ablagerungen des Quartär überdeckt sind (Abbildung 125).

Die jahreszeitlichen Schwankungen spiegeln generell die regionalen Witterungsbedingungen im Untersuchungsraum wider. Die Grundwasserhöhen in der Messstelle TE/14 – LEHEN (Abbildung 126) weisen relativ ausgeglichene jahreszeitliche Schwankungen bis zum Frühjahr 2011 auf. Nach dem Starkregenereignis im August 2010 folgen relativ niederschlagsarme Sommer (Abbildung 15), die zu einer Verringerung der Grundwassertiefststände in den Sommermonaten der folgenden Jahre führen. Aufgrund des niederschlagsreichen Sommers des Jahres 2014 sind die jahreszeitlichen Schwankungen der Grundwasserhöhen am Ende des Betrachtungszeitraumes vermindert. Die Grundwasserhöhen in der Messstelle TE/14 – LEHEN spiegeln insgesamt einen witterungsbedingten Verlauf wider und geben keine Hinweise auf anthropogene Einflüsse. Eine ähnliche Entwicklung der Grundwasserhöhen zeigt sich auch im Bereich westlich des Stadtteils Laggenbeck, durch Messungen in der Grundwassermessstelle TE/46 – LAGGENBECK (Abbildung 127).

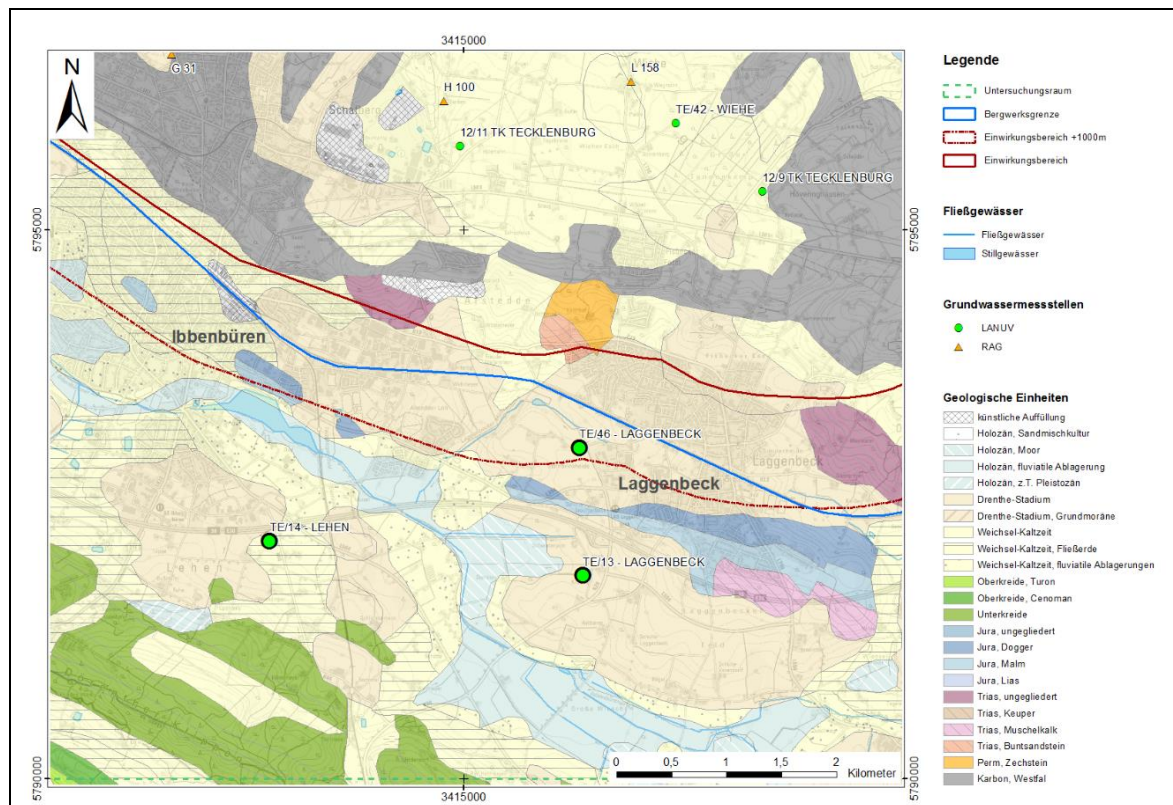


Abbildung 125: Lage der Grundwassermessstellen und Verbreitung der stratigraphischen Einheiten im Bereich Ibbenbüren-Laggenbeck (im Text dargestellte Grundwassermessstellen sind hervorgehoben); Hintergrund GÜK 200 (© BGR 2007) und TK50 (© Geobasis NRW 2013)

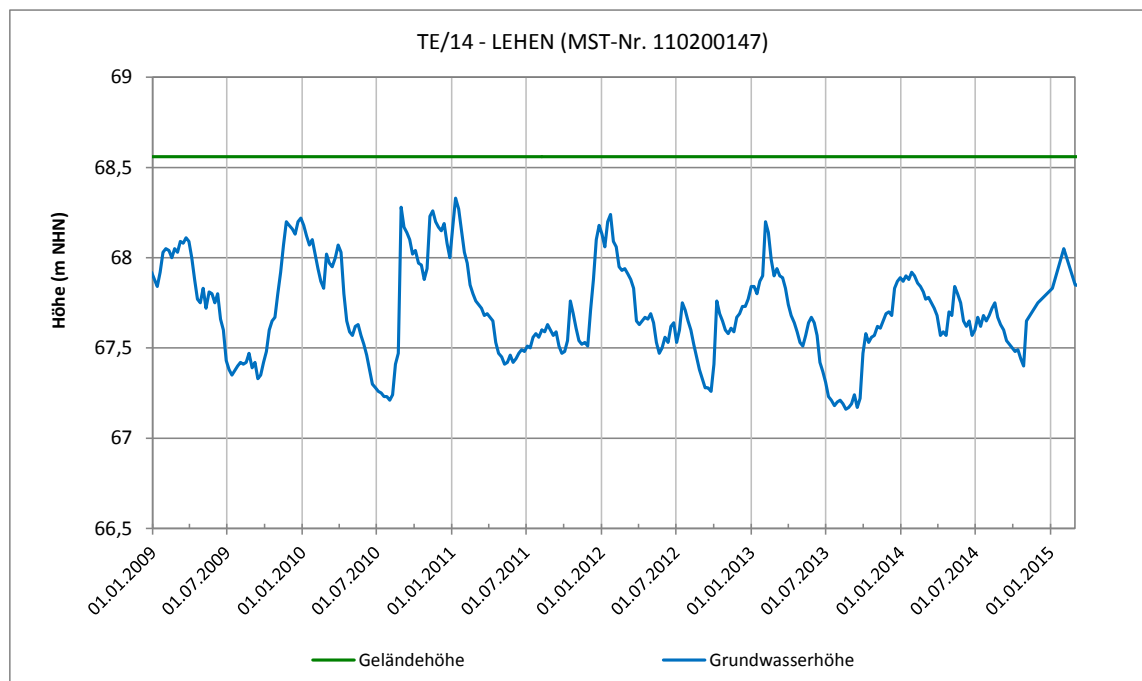


Abbildung 126: Darstellung der Grundwasserhöhen in der LANUV-Messstelle TE/14 -LEHEN (MST-Nr.: 110200147)

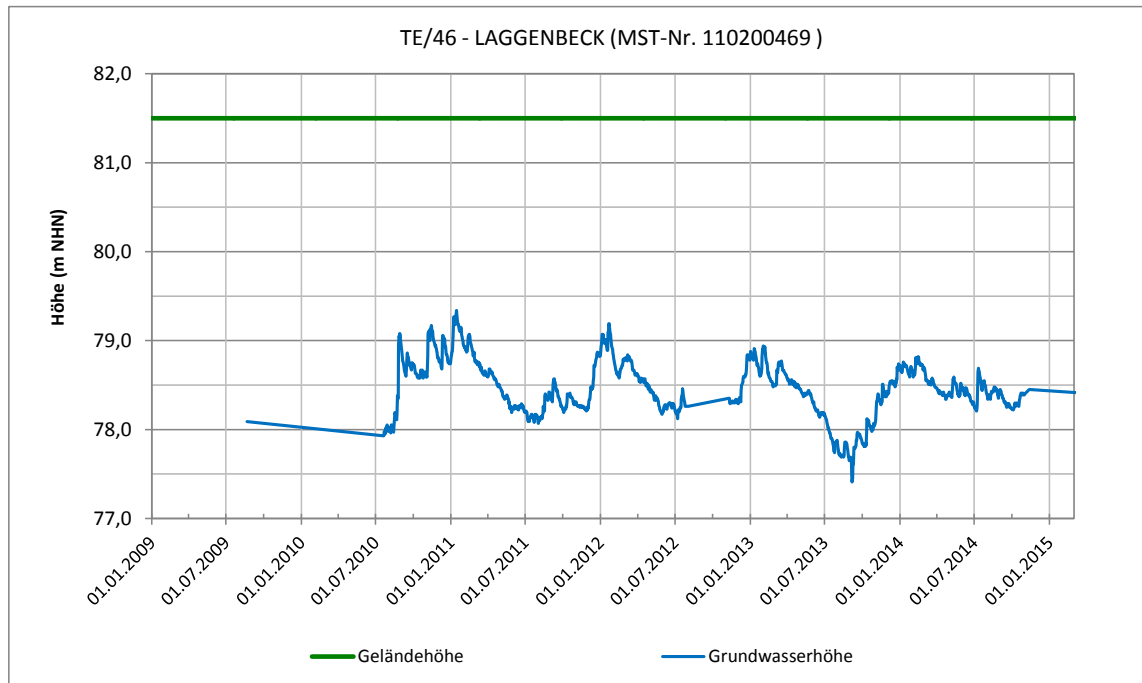


Abbildung 127: Darstellung der Grundwasserhöhen in der LANUV-Messstelle TE/46 - LAGGENBECK (MST-Nr.: 110200469)

Im Gegensatz zu den oben genannten Grundwassermessstellen ist in der Messstelle TE/13 – LAGGENBECK (Abbildung 128) ab dem Jahr 2011 eine anhaltende Verringerung der Grundwasserhöhen erkennbar. Diese Entwicklung wird auch durch den niederschlagsreichen Sommer 2014 nicht abgeschwächt und setzt sich bis zum Ende des Betrachtungszeitraumes fort. Im gesamten Betrachtungszeitraum verringert sich die Grundwasserhöhe um ca. 0,5 m und ist damit vergleichbar mit der Grundwasserentwicklung im nördlichen Bereich des Bockradener Grabens. Signifikante Veränderungen der Grundwasserhöhen durch anthropogene Einflüsse sind nicht zu erkennen. Insgesamt zeigt die Grundwasserhöhe in der Messstelle TE/13 – LAGGENBECK im Betrachtungszeitraum einen witterungsbedingten Verlauf. Trotz dieser Verringerung der Grundwasserhöhen gibt die Auswertung der radarinterferometrischen Messdaten im Bereich der Grundwassermessstelle TE/13 - LAGGENBECK keine Hinweise auf Bodenbewegungen im Betrachtungszeitraum. Ein Zusammenhang zwischen der Verringerung der Grundwasserhöhen und der zu erwartenden Bodenbewegungen ist hier nicht zu beobachten.

Der stark altbergbaulich geprägte Bereich östlich von Ibbenbüren-Laggenbeck ist durch Grundwassermessstellen nur unzureichend abgedeckt. Südwestlich der Siedlung Hollenbergs Hügel, außerhalb des Einwirkungsbereiches des BW Ibbenbüren, im östlichsten Bereich der Bergwerksgrenze, werden Grundwassermessungen in der Messstelle 13/10 TK HASBERGEN (Abbildung 129, Karte 5) halbjährlich durchgeführt. Die Messreihe weist für die Jahre 2009 bis 2010 eine Lücke auf. Damit ist für diesen Zeitraum keine Aussage möglich. Ab dem Oktober 2010 ist tendenziell eine Erhöhung der mittleren Grundwasserstände um bis zu 1 m festzustellen. Der Maximalwert der Aufzeichnungen wird zum Ende des Betrachtungszeitraumes noch nicht erreicht. Insgesamt zeigt die Grundwasserhöhe in der Messstelle 13/10 TK HASBERGEN im Betrachtungszeitraum einen witterungsbedingten Verlauf. Signifikante Veränderungen der Grundwasserhöhen durch anthropogene Einflüsse sind nicht festzustellen.

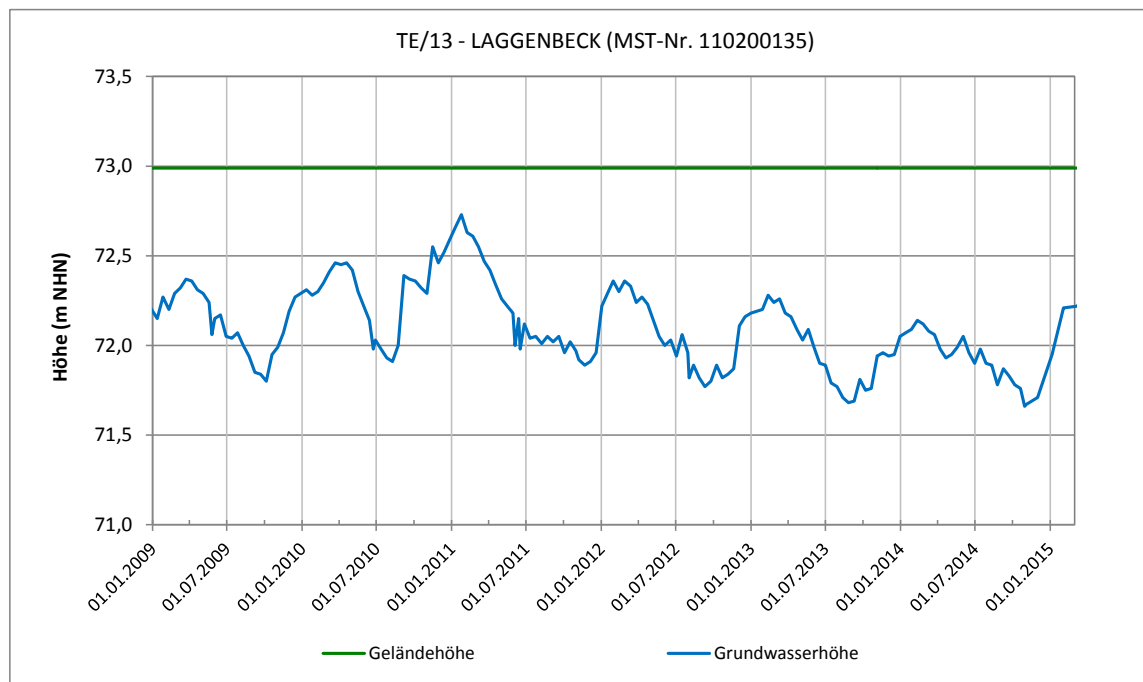


Abbildung 128: Darstellung der Grundwasserhöhen in der LANUV-Messstelle TE/13 - LAGGENBECK (MST-Nr. 110200135)

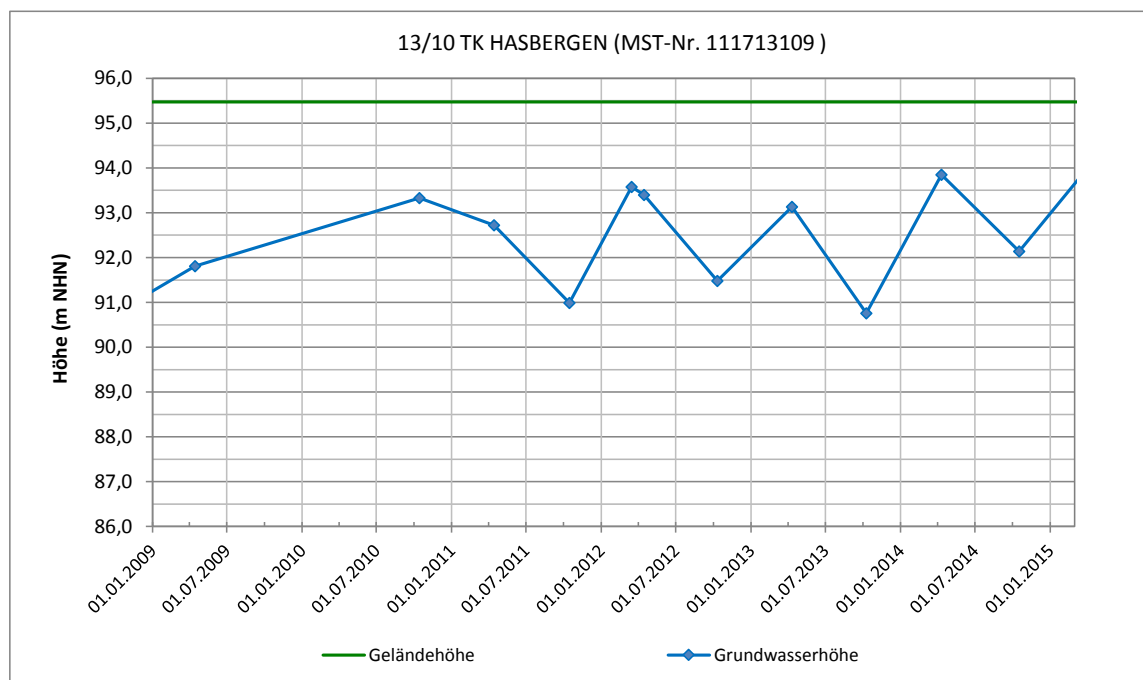


Abbildung 129: Darstellung der Grundwasserhöhen in der LANUV-Messstelle 13/10 TK HASBERGEN (MST-Nr. 111713109)

8.2. Zusammenfassende Bewertung der grundwasserbedingten Ursachen

Die Untersuchung der Grundwasserstandsdaten zeigt im Bereich des Ibbenbürener Hochplateaus generell relativ geringe Grundwasserflurabstände von ca. 0,5 m bis zu 3 m. Die Grundwasser leitenden Schichten des Hochplateaus werden aus den Sandsteinen des Oberkarbon aufgebaut, die von einer relativ geringmächtigen Quartär-Decke bedeckt sind. Aufgrund dieser geologischen

Verhältnisse zeigt die Grundwasserhöhe in diesem Bereich einen ausgeprägten jahreszeitlichen Verlauf sowie eine deutliche Reaktion auf die Witterungsverhältnisse.

Im Bereich des Bockradener Grabens existieren eine Vielzahl von Hausbrunnen, die von der RAG Anthrazit Ibbenbüren GmbH für das Grundwassermonitoring genutzt werden. Über die derzeitige Nutzung der Hausbrunnen liegen keine Informationen vor. Generell sind private Grundwasserentnahmen relativ gering, so dass sie keine signifikanten Veränderungen der Grundwasserhöhen bewirken. Anhand der untersuchten Grundwasserstandsmessungen im Bereich des Bockradener Grabens ergeben sich keine Hinweise auf anthropogene Einflüsse auf das Grundwasser. Die Grundwasserhöhen zeigen einerseits einen langfristigen witterungsbedingten Verlauf und andererseits, aufgrund der geringen Flurabstände, kurzzeitige Reaktionen auf Niederschlagsereignisse. Eine tendenzielle Veränderung der Grundwasserhöhen ist im südlichen und zentralen Bereich des Bockradener Grabens für den Betrachtungszeitraum nicht erkennbar. Im Bereich der landwirtschaftlichen Betriebe Neyer und Moriß ist keine Beeinflussung der Grundwasserhöhen durch Grundwasserentnahmen zu Bewässerungszwecken festzustellen. Insgesamt lassen sich im Bereich des zentralen Bockradener Grabens im Betrachtungszeitraum keine signifikante Veränderungen der Grundwasserhöhen feststellen, die als Ursache für die radarinterferometrisch festgestellten Bodenbewegungen angesehen werden können.

Im nördlichen Bereich des Bockradener Grabens weisen die Grundwassermessstellen (G 341, G 343, G 147) tendenziell eine Verringerung der Grundwasserhöhen im Betrachtungszeitraum um ca. 0,5 m bis 1 m auf. Eine anthropogene Ursache für eine Verringerung der Grundwasserhöhen ist nicht bekannt. Da sich die Grundwassermessstellen im Bereich des Bockradener Grabens innerhalb des im Rahmenbetriebsplan festgelegten Einwirkungsbereiches befinden, ist der Anteil einer grundwasserbedingten Ursache an den radarinterferometrisch festgestellten Bodenbewegungen im Betrachtungszeitraum und außerhalb der prognostizierten Nulllinie schwer abzuschätzen.

Im Untersuchungs-Teilgebiet Mettingen zeigen die Grundwasserhöhen im Betrachtungszeitraum einen witterungsbedingten Verlauf. Signifikante Veränderungen der Grundwasserhöhen durch anthropogene Einflüsse treten nicht auf. Ein ursächlicher Zusammenhang zwischen den natürlichen Schwankungen der Grundwasserhöhen sowie den in den radarinterferometrischen Messdaten festgestellten Bodenbewegungen ist im Betrachtungszeitraum nicht erkennbar.

Im Untersuchungs-Teilgebiet Ibbenbüren-Laggenbeck, am Südrand der Bergwerksgrenzen des BW Ibbenbüren, zeigen sich ebenfalls keine signifikanten Veränderungen der Grundwasserhöhen, die einen Zusammenhang mit den beobachteten Bodenbewegungen im Betrachtungszeitraum zulassen. Eine tendenzielle Verringerung der Grundwasserhöhen lässt sich in der Grundwassermessstelle TE/13 – LAGGENBECK ab dem Jahr 2011 feststellen. Trotz dieser Verringerung der Grundwasserhöhen, weist die Auswertung der radarinterferometrischen Messdaten in diesem Bereich auf keine Bodenbewegungen im Betrachtungszeitraum hin. Ein ursächlicher Zusammenhang zwischen einer Abnahme der Grundwasserhöhen und den zu erwartenden Bodenbewegungen kann nicht beobachtet werden. Für eine weitere Beurteilung des grundwasserbedingten Einflusses auf Bodenbewegungen an der südöstlichen Bergwerksgrenze fehlen Grundwassermessstellen.

9. RÄUMLICHE ABGRENZUNG BERGBAUBEDINGTER BODENBEWEGUNGEN UND HÖHENÄNDERUNGEN

9.1. Problematik der Abgrenzbarkeit

Generell ist eine Abgrenzung von Gebieten mit ausschließlich durch aktiven Bergbau im Betrachtungszeitraum verursachten dreidimensionalen Bodenbewegungen aus messtechnisch ermittelten Lage- und Höhenänderungen mit 100%iger Sicherheit nicht möglich. Dies gilt in gleicher Weise für die Abgrenzung von Gebieten mit ausschließlich durch aktiven Bergbau verursachten Senkungen aus Höhenänderungsmessungen. Die Ursachen hierfür sind sehr vielschichtig. Generell ist zu beachten, dass die verschiedenen in Kapitel 3 benannten potentiellen Ursachen größtenteils zeitverzögerte Auswirkungen haben, wodurch sich die Aufdeckung eines kausalen Zusammenhanges z. B. mit gemessenen Höhenänderungen erschwert. Ferner ist zu bedenken, dass an der Tagesoberfläche Einflüsse verschiedener und lokal unterschiedlicher Ursachen zur Wirkung kommen und sich überlagern können. Eine Ursachenermittlung alleine aus Bodenbewegungsmessungen an der Tagesoberfläche wird somit erschwert, wenn nicht sogar unmöglich. Zur quantitativen Trennung von Ursachenauswirkungen müssten vielmehr speziell darauf ausgerichtete Messungen geplant und durchgeführt werden. Hinzu kommt, dass die bisher in der Praxis eingesetzten geodätischen und radarinterferometrischen Messverfahren eine unterschiedliche zeitliche und räumliche Auflösung sowie Messgenauigkeit besitzen. Die signifikante Abgrenzung von Anteilen verschiedener Ursachen wird im Hinblick auf die unterschiedliche Größe, aber auch auf die Vorzeichen der hervorgerufenen Bodenbewegungen oder Höhenänderungen nicht nur schwierig sondern in der Praxis kaum möglich sein. Ferner basieren alle Verfahren auf Messungen an der Tagesoberfläche, entweder an i. d. R. nicht tief vermarkten Punkten, wie z. B. beim Nivellement oder bei GPS-Messungen, bzw. an aufstehenden Objekten, die über ein Fundament mit dem Untergrund verbunden sind. Dies kann lokal, in Abhängigkeit von den Ursachen sowie den durch sie hervorgerufenen Senkungen oder Hebungen, dazu führen, dass sich z. B. Senkungsanteile addieren oder sich gleichzeitig (oder zeitversetzt) wirksame Senkungen und Hebungen „kompensieren“ bzw. ein dominanter Bewegungsanteil verringert wird. Gerade diese nicht auszuschließenden Möglichkeiten zeigen die Schwierigkeiten und Grenzen einer Trennung von Bodenbewegungsanteilen unterschiedlicher Ursachen und damit der Abgrenzung eines Gebiets mit ausschließlichem Bergbaueinfluss auf.

9.2. Festlegung der Betrachtungsgebiete

Das Ziel der Untersuchungen liegt in der Feststellung und Bewertung von Senkungen außerhalb der prognostizierten Einwirkungsgrenze des Bergwerks Ibbenbüren infolge der während der Gültigkeitsdauer des Rahmenbetriebsplanes erfolgten Abbaue. Aufgrund dieser Zielsetzung besteht die Gefahr, alle Gebiete außerhalb der Einwirkungsgrenze, in denen vor dem Rahmenbetriebsplan z. B. Bergbau umging, wegen eines in der Größe unbekannten und damit nicht „abtrennbaren“ Senkungsanteils von dieser Untersuchung auszuschließen. Diesem gedanklichen Ansatz wurde hier nicht gefolgt, da ansonsten entweder die zu untersuchenden „Restflächen“ nur noch eine nicht mehr repräsentative Größe besäßen (und damit die Aussage nicht repräsentativ wäre) oder im z. B. benachbarten Altbergbau durch den aktiven Bergbau hervorgerufene „Reaktivierungseinflüsse“ unerkannt blieben.

Das weitere Vorgehen basiert deshalb vorrangig auf den für das Untersuchungsgebiet radarinterferometrisch ermittelten, flächeninterpolierten Höhenänderungen (Kapitel 6.2.2 und 6.4.2) sowie Bodenbewegungen in LOS-Richtung (Kapitel 5.7). Diese zeigen

a) im Gesamtbetrachtungszeitraum 12/2008 - 02/2015

zwei Senkungsschwerpunkte außerhalb der prognostizierten Einwirkungsgrenze:

1. Mettingen,
2. Ibbenbüren-Laggenbeck,

b) im Zeitraum 12/2008 - 10/2010

einen Senkungsschwerpunkt außerhalb der prognostizierten Einwirkungsgrenze:

3. Östliches Teilgebiet (Gebiet Westerkappeln),

c) im Zeitraum 01/2011 - 02/2015

zwei Bodenbewegungsschwerpunkte außerhalb der prognostizierten Einwirkungsgrenze:

4. Östliches Teilgebiet (Gebiet Westerkappeln),
5. Westliches Teilgebiet (östlich des Ibbenbürener Ortsteils Dickenberg).

Während die genannten Gebiete 1 - 3 auch durch die Nivellementsergebnisse als Senkungsgebiete in den jeweiligen Betrachtungszeiträumen außerhalb der Einwirkungsgrenze bestätigt werden, können für die Gebiete 4 und 5 keine quantitativen Senkungsangaben für den Zeitraum 01/2011 - 02/2015 ermittelt werden. Ursache hierfür sind fehlende qualitativ nutzbare Nivellementsergebnisse sowie fehlende radarinterferometrisch abgeleitete Höhenänderungen aus den in den Kapiteln 5.1 und 6.1 dargelegten Gründen. Jedoch ermöglichen die radarinterferometrisch ermittelten Ergebnisse in LOS-Richtung die Aussage, dass in diesen Gebieten und in dem Zeitraum Bodenbewegungen aufgetreten sind und deshalb nicht auszuschließen ist, dass auch Senkungen (als vertikale Komponente der Bodenbewegungen) auftraten.

9.3. Räumlich-zeitlicher Zusammenhang zu den Abbauaktivitäten

Ein erster Ansatz zur Klärung eines möglichen Bodenbewegungseinflusses durch den aktiven Bergbau ergibt sich aus der Überlegung, dass die räumliche und zeitliche Verlagerung der Abbauaktivitäten auch zu räumlich-zeitlichen Veränderungen der gemessenen Höhenänderungen und LOS-Werte führen sollte.

Dieser Ansatz lässt sich dank der radarinterferometrisch ermittelten Höhenänderungszeitreihen an den PS-Punkten für die im Kapitel 9.2 aufgeführten Gebiete 1 - 3 umsetzen. In Anlehnung an die Zeitabstände vorhandener aufeinanderfolgender Nivellements wurden dazu aus den Höhenänderungszeitreihen ab Dezember 2008 bis Dezember 2014 die entsprechenden flächeninterpolierten Höhenänderungsdifferenzen für verschiedene Zeitintervalle berechnet. Diese sind in Abbildung 130 bis Abbildung 135 zusammen mit den verfügbaren nivellistisch bestimmten Höhenänderungen sowie den in den betrachteten Zeiträumen aktiven Abbauen dargestellt.

Ein Vergleich dieser Darstellungen zeigt die Heterogenität möglicher Zusammenhänge zwischen den räumlich-zeitlichen Höhenänderungen und der räumlichen Verlagerung der Abbauschwerpunkte in den einzelnen Jahresscheiben. Um den Einfluss des aktiven Bergbaus im Betrachtungszeitraum auf außerhalb des prognostizierten Einwirkungsbereiches erfasste Senkungen zu ermitteln, werden deshalb die detektierten Senkungs- und Bodenbewegungsgebiete im Vergleich mit den Abbauaktivitäten in den nachfolgenden Kapiteln näher untersucht.

Höhenänderungen [mm]



Bergwerk Ibbenbüren

Bergwerk Ibbenbüren

Flächeninterpolierte radarinterferometrisch und
nivellistisch ermittelte Höhenänderungen (12/2008 – 10/2009)
sowie Abbaue vor und in diesem Zeitraum

Analyse von Senkungserscheinungen außerhalb prognostizierter Einwirkungsbereiche aktiver und in jüngerer Zeit stillgelegter Steinkohlenbergwerke der RAG AG

Abbildung: ...

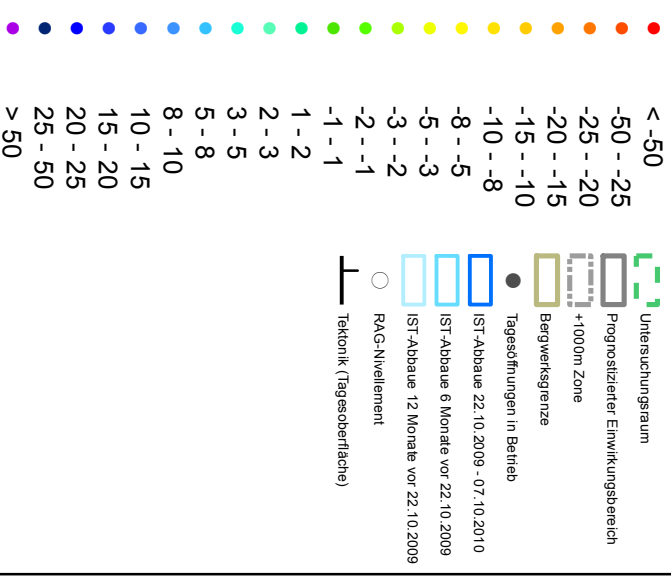
Abbildung: ...



TU Clausthal
Institut für Geotechnik und Marschseidewesen

Legende

Höhenänderungen [mm]



PSI-Ergebnis
EW-Bereiche, Bergwerksgrenze und Tagesöffnungen
RA-G-Nivelement, Tektonik
TK100
© IGMC, 2015
© Bezirksregierung Arnsberg, 2015
© RA-G AG, 2015
© Geobasis NRW, 2012

Untersuchungsgebiet: Bergwerk Ibbenbüren

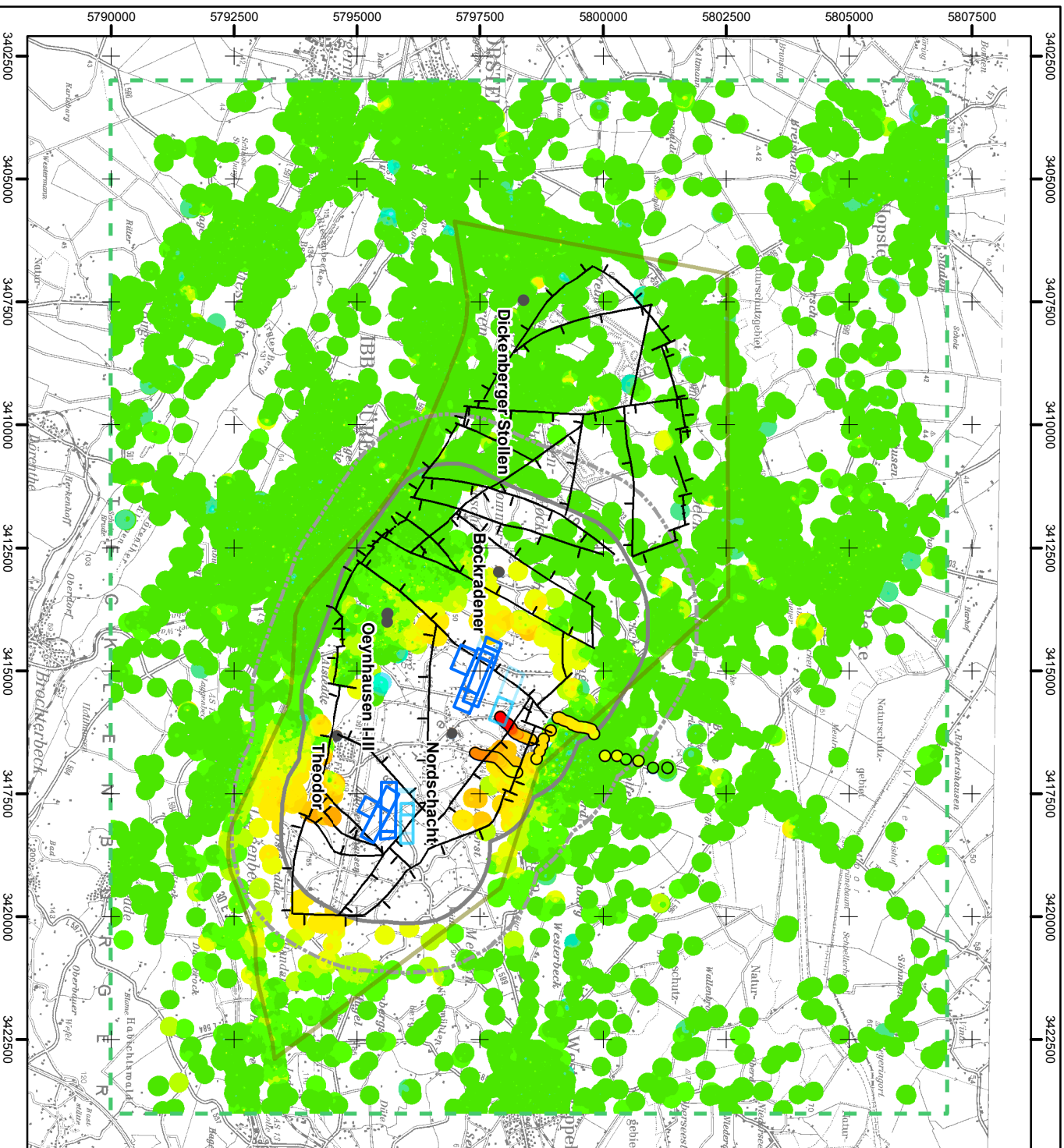
Titel: Flächeninterpolierte radarinterferometrisch und nivellistisch ermittelte Höhenänderungen (10/2009 – 10/2010) sowie Abbaue vor und in diesem Zeitraum

Analyse von Senkungsscheinungen außerhalb prognostizierter Einwirkungsbereiche aktiver und in jüngster Zeit stillgelegter Steinkohlenbergwerke der RA-G AG
Im Auftrag der Bezirksregierung Arnsberg, Abteilung Bergbau und Energie in NRW

Bearbeitung: TU Clausthal

Datum: 05.02.2016

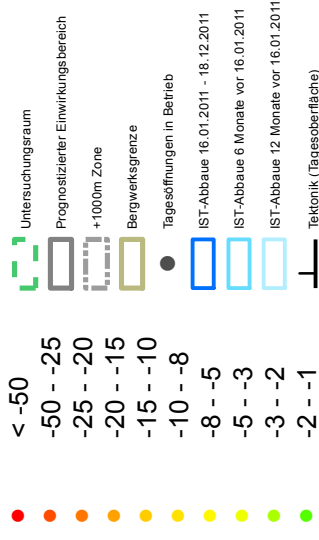
Abbildung: 131





Legende

Höhenänderungen [mm]



PSI-Ergebnis
EV-Bereiche, Bergwerksgrenze und Tagesöffnungen
Tektonik
TK100

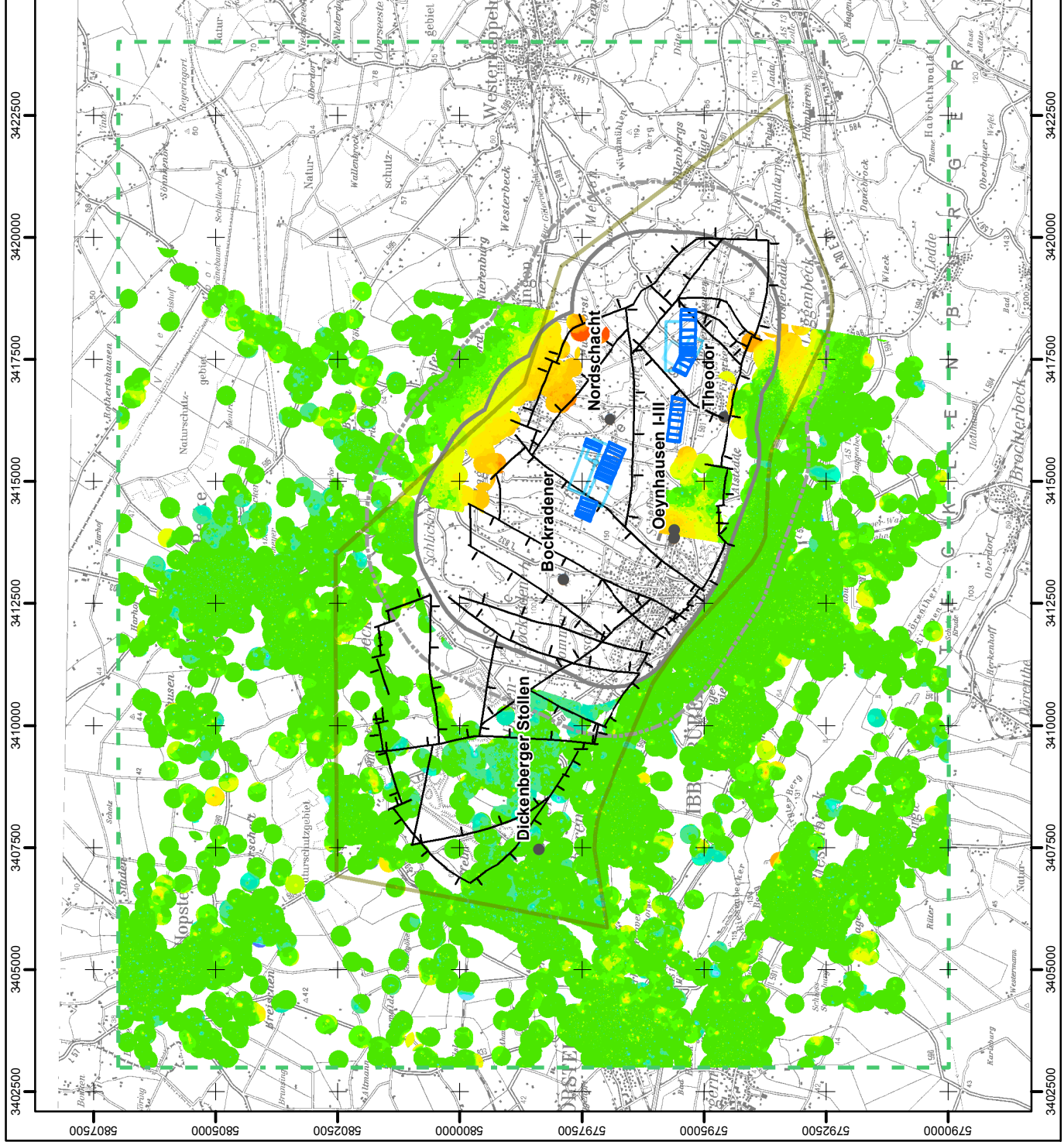
© GMC, 2015
© Bezirksregierung Arnsberg, 2015
© RAG AG, 2015
© Geobasis NRW, 2012

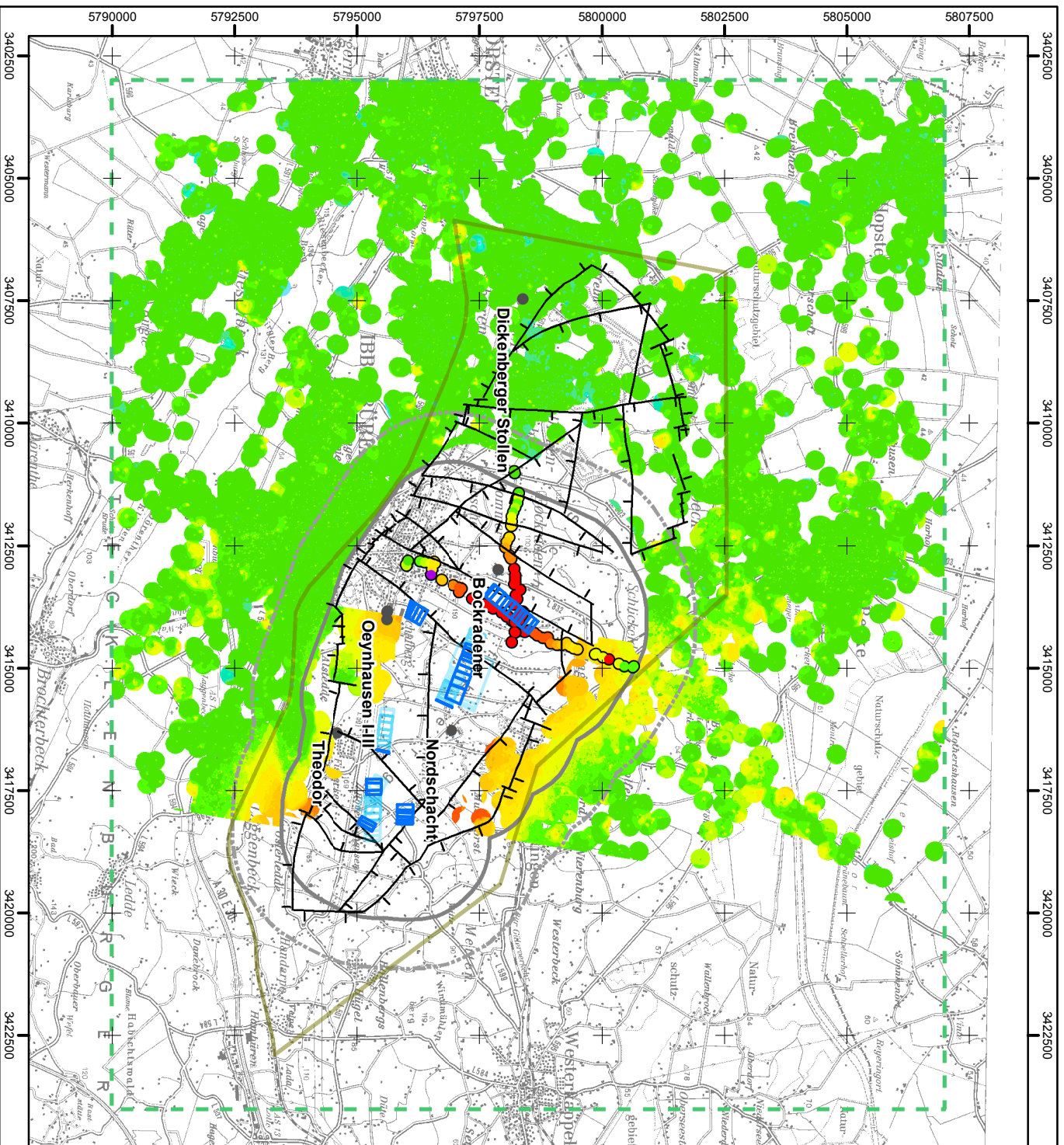
0 1,25 2,5 5 Kilometer

N

Untersuchungsgebiet: Bergwerk Ibbenbüren

Titel	
Flächeninterpolierte radarinterferometrisch ermittelte Höhenänderungen (01/2011 – 12/2011) sowie Abbaue vor und in diesem Zeitraum	
Analyse von Senkungerscheinungen außerhalb prognostizierter Einwirkungsbereiche aktiv und in jüngerer Zeit stillgelegter Steinkohlengrubenwerke der RAG AG im Auftrag der Bezirksregierung Arnsberg, Abteilung Bergbau und Energie in NRW	
Bearbeitung: TU Clausthal	Datum: 05.02.2016
	Abbildung: 132

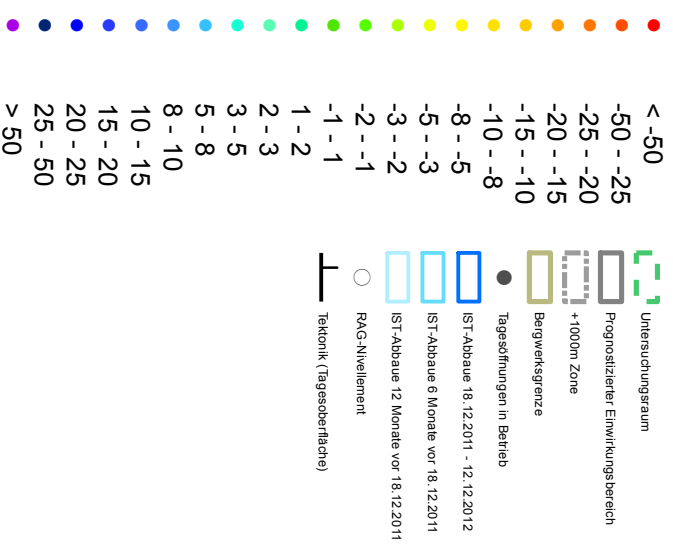




TU Clausthal
Institut für Geotechnik und Marschsedewesen

Legende

Höhenänderungen [mm]



PSI-Ergebnis	© GfM, 2015
EW-Bereiche, Bergwerksgrenze und Tagesöffnungen	© Bezirksregierung Arnsberg, 2015
RAG-Nivellament, Tektonik	© RAG AG, 2015
TK100	N
	© Geobasis NRW, 2012

Untersuchungsgebiet:
Berawerk Ibbenbüren

Flächeninterpolierte radarinterferometrisch und nivellistisch ermittelte Höhenänderungen (12/2011 – 12/2012) sowie Abbaue vor und in diesem Zeitraum

Analyse von Senkungserscheinungen außerhalb prognostizierter Einwirkungsbereiche aktiver und in jüngerer Zeit stillgelegter Steinkohlenbergwerke der RAG AG

Im Auftrag der Bezirksregierung Amsberg, Abteilung Bergbau und Energie in NRW

Bearbeitung:	Datum:
TU Clausthal	05.02.2016

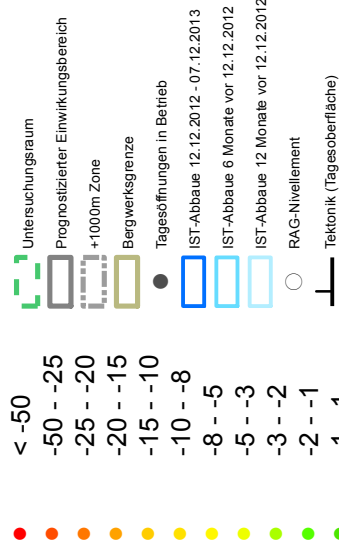
Datum: 05.02.2016

133



Legende

Höhenänderungen [mm]

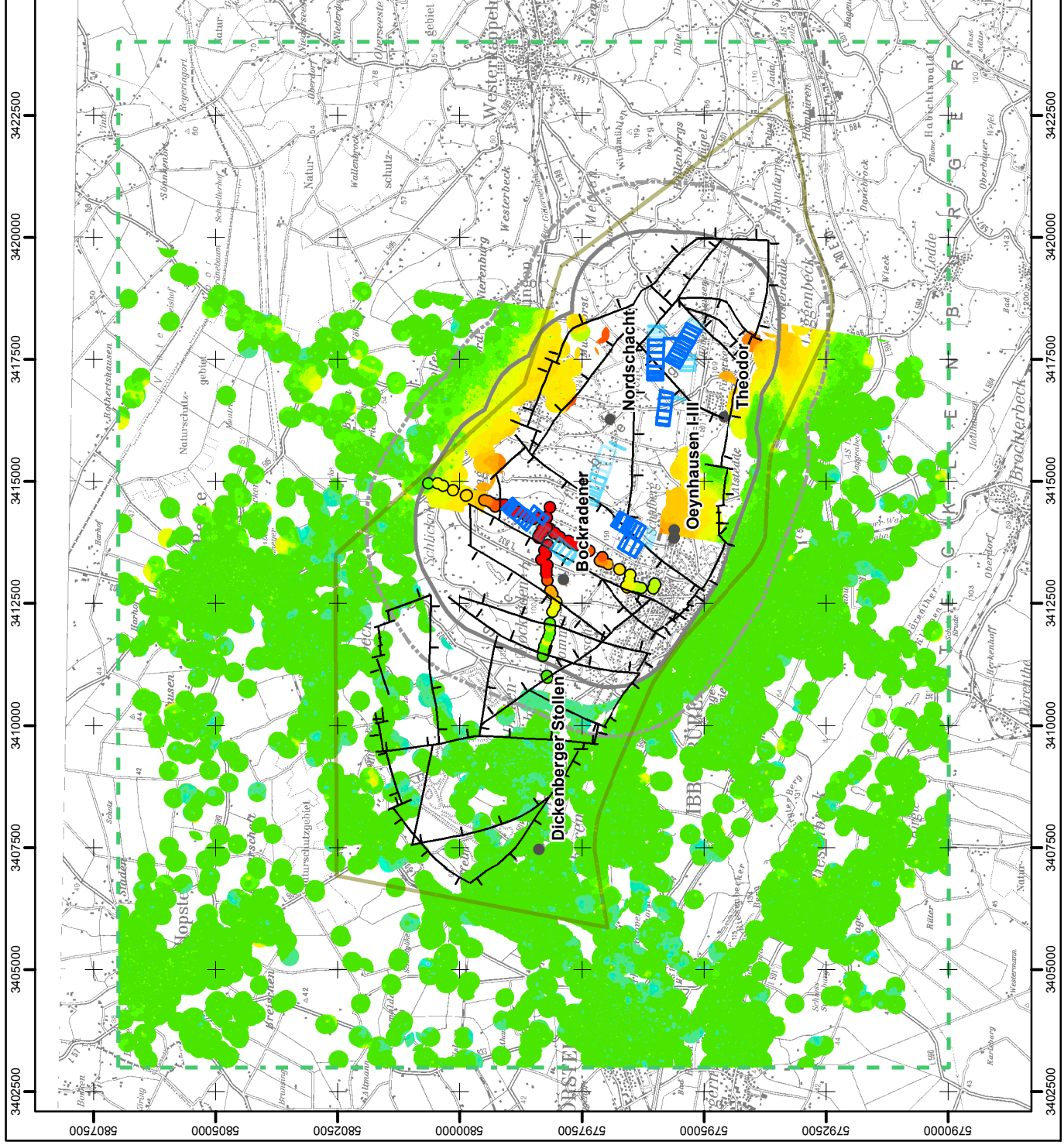


PSI-Ergebnis
EV-Bereiche, Bergwerksgrenze und Tagesöffnungen
RAG-Nivellament, Tektonik
TK100

© GMC, 2015
© Bezirksregierung Arnsberg, 2015
© RAG AG, 2015
© Geobasis NRW, 2012



Untersuchungsgebiet:	Bergwerk Ibbenbüren		
Titel:	Flächeninterpolierte radarinterferometrisch und nivellistisch ermittelte Höhenänderungen (12/2012 – 12/2013) sowie Abbaue vor und in diesem Zeitraum		
Analyse von Senkungerscheinungen außerhalb prognostizierter Einwirkungsbereiche aktiv und in jüngerer Zeit stillgelegter Steinkohlengrubenwerke der RAG AG Im Auftrag der Bezirksregierung Arnsberg, Abteilung Bergbau und Energie in NRW			
Bearbeitung:	TU Clausthal	Datum:	05.02.2016
		Abbildung:	134

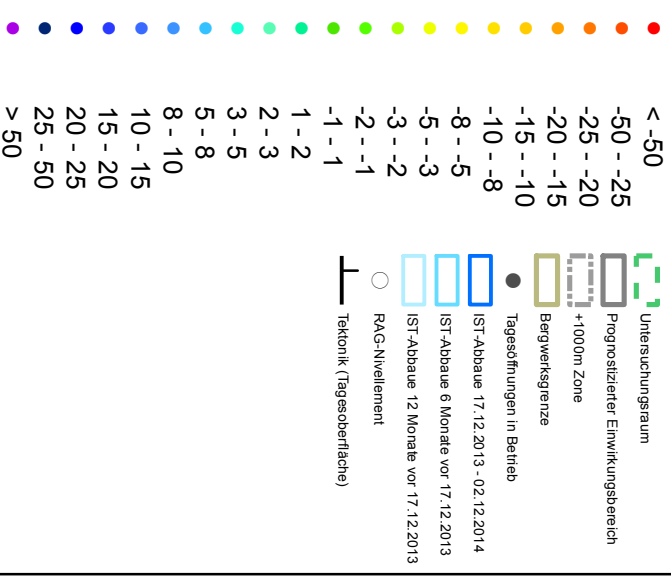




TU Clausthal
Institut für Geotechnik und Marschleidenwesen

Legende

Höhenänderungen [mm]



PSI-Ergebnis
EW-Bereiche, Bergwerksgrenze und Tagesöffnungen
TK100
© IGMC, 2015
© Bezirksregierung Arnsberg, 2015
© RA-G, 2015
© Geobasis NRW, 2012

Untersuchungsgebiet: Bergwerk Ibbenbüren

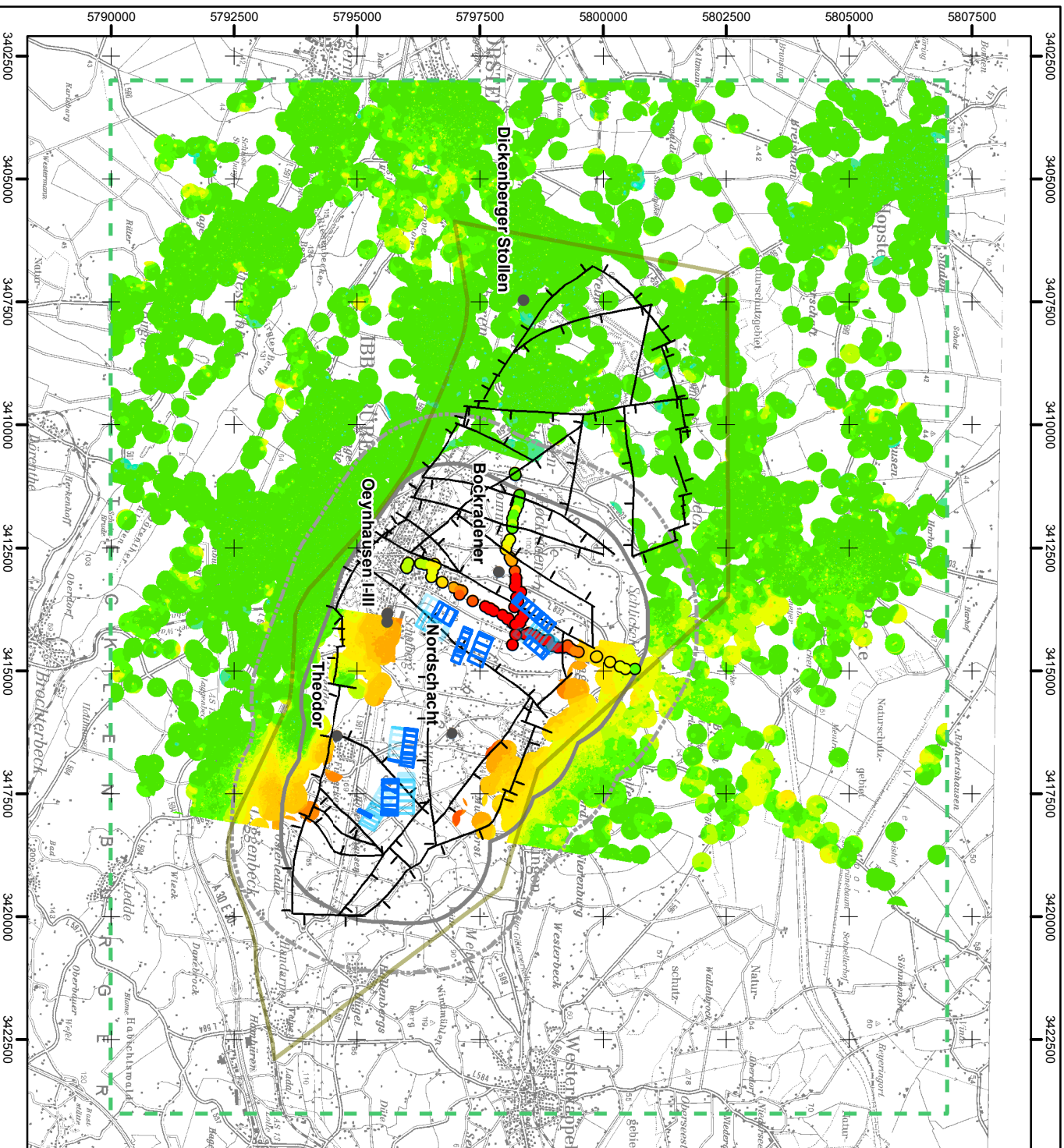
Titel: Flächeninterpolierte radarinterferometrisch und nivellistisch ermittelte Höhenänderungen (12/2013 - 12/2014)

Analysen von Senkungserscheinungen außerhalb prognostizierter Einwirkungsbereiche aktiver und in jüngster Zeit stillgelegter Steinkohlenbergwerke der RA-G AG
Im Auftrag der Bezirksregierung Arnsberg, Abteilung Bergbau und Energie in NRW

Bearbeitung: TU Clausthal

Datum: 05.02.2016

Abbildung: 135



9.3.1. Senkungsgebiet Mettingen

Die in Abbildung 136 in Ein-Jahres-Schritten (10 - 12 Monate) dargestellten räumlichen Veränderungen der ermittelten Senkungen und der für die jeweiligen Zeitschnitte relevanten Abbaue lassen eine Abhängigkeit erkennen, die offensichtlich je nach temporärer Lage der Abbauschwerpunkte auch zu Senkungen außerhalb der Nulllinie führen.

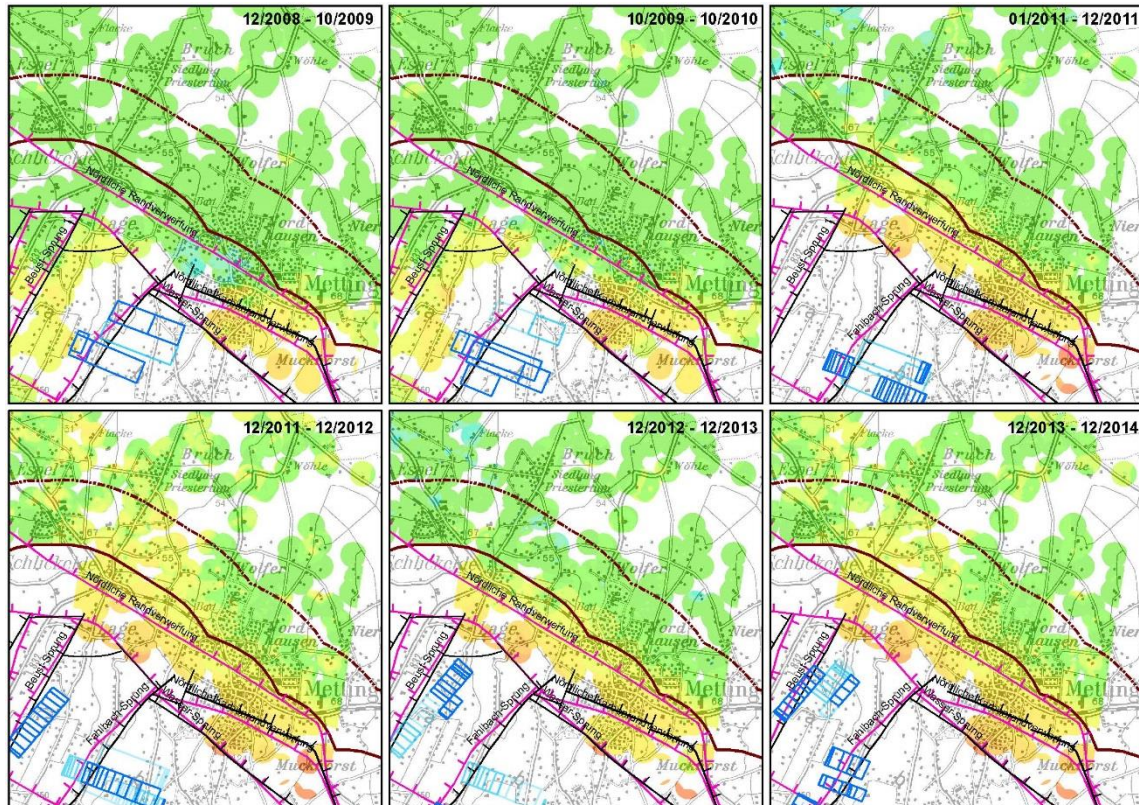


Abbildung 136: Flächeninterpolierte radarinterferometrische Höhenänderungen für verschiedene Zeiträume zusammen mit den zeitlich entsprechenden Abbauen mit Farbgebung wie in Abbildung 130 ff (© RAG AG 2015), der Tektonik an der Tagesoberfläche (schwarz; © RAG AG 2015) und der Tektonik im Niveau vom Flöz Glücksburg (magenta; nach DROZDZEWski 1985); Hintergrund TK100 © Geobasis NRW 2012

Da sich durch veränderte Abbautätigkeiten auch die damit korrelierten Senkungsmulden in ihrer Lage, Ausdehnung und der Größe der Senkungen (auch an den Trogrändern) über die Zeit verändern müssen, wurden zur weiteren Untersuchung der oben geäußerten Vermutung drei Senkungsprofile mit zeitlichen Abständen von 10 - 12 Monaten entlang den in Abbildung 137 dargestellten Profilsuren abgeleitet.

Die sich für die Profilsuren ergebenden Zeit-Senkungs-Profile sind in Abbildung 138 bis Abbildung 140 dargestellt. Grundlage hierfür sind flächeninterpolierte radarinterferometrisch ermittelte Höhenänderungen für unterschiedliche Zeiträume, jeweils bezogen auf den 11.12.2008. Die Bezeichnungen in den Legenden haben folgende Bedeutungen:

- toYYYYMMTT: Höhenänderung zwischen 11.12.2008 und Datum TT.MM.YYYY
- Nullrand: Grenze des prognostizierten Einwirkungsbereiches
- +1000 Zone: +1000 m erweiterter Betrachtungsraum
- GOK_Randverwerfung: Nördliche Karbonrandverwerfung an der Tagesoberfläche
- KAR_Randverwerfung: Nördliche Karbonrandverwerfung an der Karbon-Oberfläche

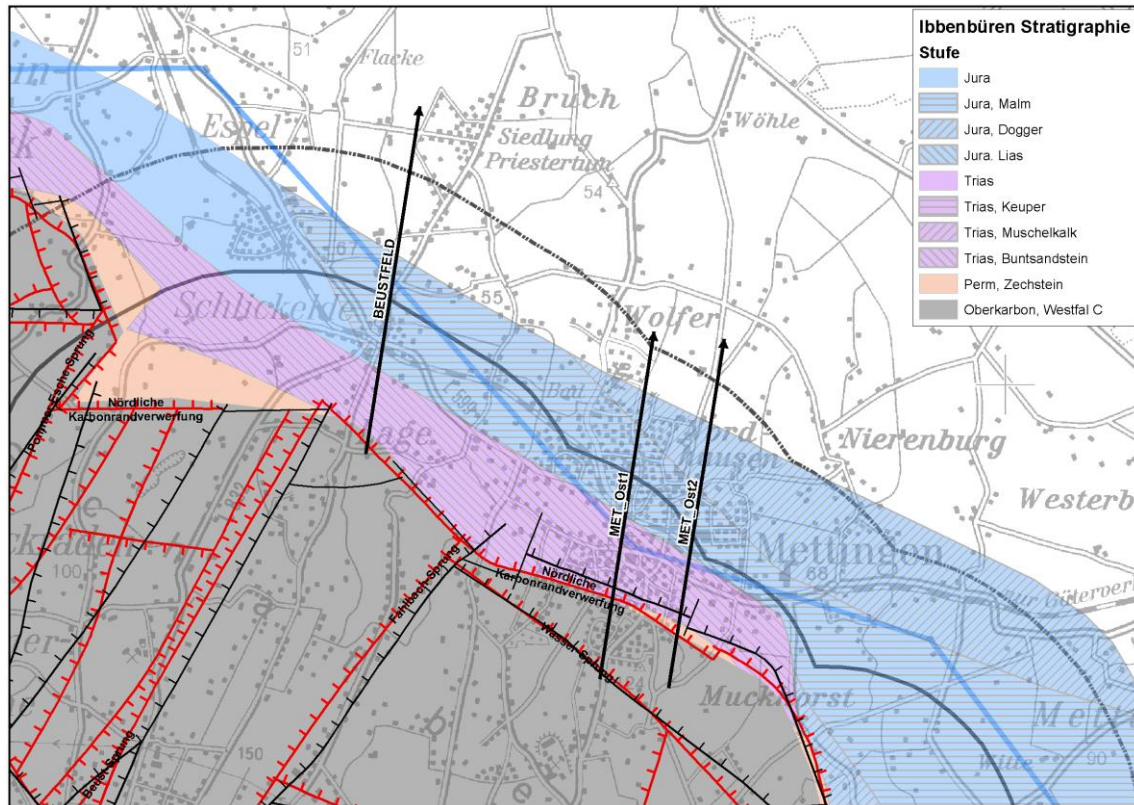


Abbildung 137: Lage der Profilsuren im Bereich Mettingen; inkl. der prognostizierten Einwirkungsgrenze und den um +1000 m erweiterten Betrachtungsraum (© Bezirksregierung Arnsberg 2015), die stratigraphischen Einheiten (nach DROZDZEWSKI 1985) sowie die Tektonik an der Tagesoberfläche (schwarz; © RAG AG 2015) und an der Karbon-Oberfläche (rot; HÄDICKE 1972); Hintergrund TK100 © Geobasis NRW 2012

Auffallend ist nach 2011 (Abbildung 138) die Zunahme der Steilheit der innerhalb der Einwirkungsgrenze liegenden Senkungstrogflanke. Sie korreliert mit einer Zunahme der Abbautätigkeit in der Nachbarschaft zur Profilsur MET_Ost1 (Abbildung 136) und wird ggf. durch den Wasser-Sprung beeinflusst. Da sich die Profilsur MET_Ost2 etwas weiter von diesem beeinflussenden Abbau befindet, nicht bis an den Wasser-Sprung heranreicht und gegenüber dem Senkungstrog anders orientiert ist, zeigt sich dieser Einfluss in dem entsprechenden Senkungsprofil (Abbildung 139) nicht so deutlich. Beide Abbildungen zeigen darüber hinaus, dass in diesem Gebiet der Trogrand in verschiedenen Bereichen unterschiedliche Neigungen aufweist, die von innen nach außen immer kleiner werden und vom Abbaugeschehen deutlich beeinflusst werden. Im Bereich der prognostizierten Einwirkungsgrenze betragen die Senkungen über den Betrachtungszeitraum 12/2008 – 02/2015 ca. 15 - 20 mm und besitzen ca. 250 - 300 m außerhalb der prognostizierten Einwirkungsgrenze noch eine Größe von ca. 10 mm.

Ein vergleichbares Ergebnis zeigt das in Abbildung 140 dargestellte Zeit-Senkungsprofil für die weiter westlich von Mettingen gelegene Profilsur BEUSTFELD. Hier tritt eine deutliche Zunahme der Senkungsgeschwindigkeit ab 2012 ein, was aus den begonnenen Abbautätigkeiten im Beustfeld resultieren dürfte.

Zusammengefasst darf festgestellt werden, dass die im Raum Mettingen außerhalb der prognostizierten Einwirkungsgrenze detektierten Senkungen sehr wahrscheinlich durch den aktiven Steinkohlenabbau hervorgerufen sind.

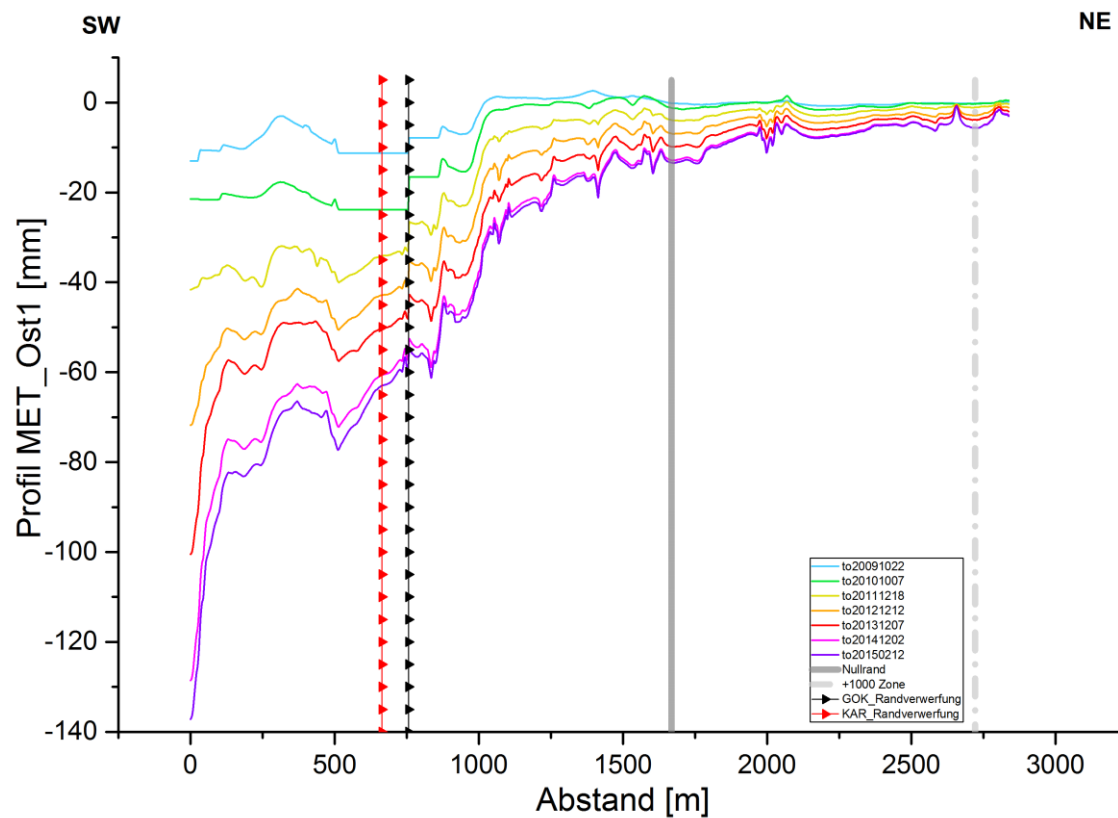


Abbildung 138: Höhenänderungen [mm] entlang der Profilsur MET_Ost1 bezogen auf den 11.12.2008

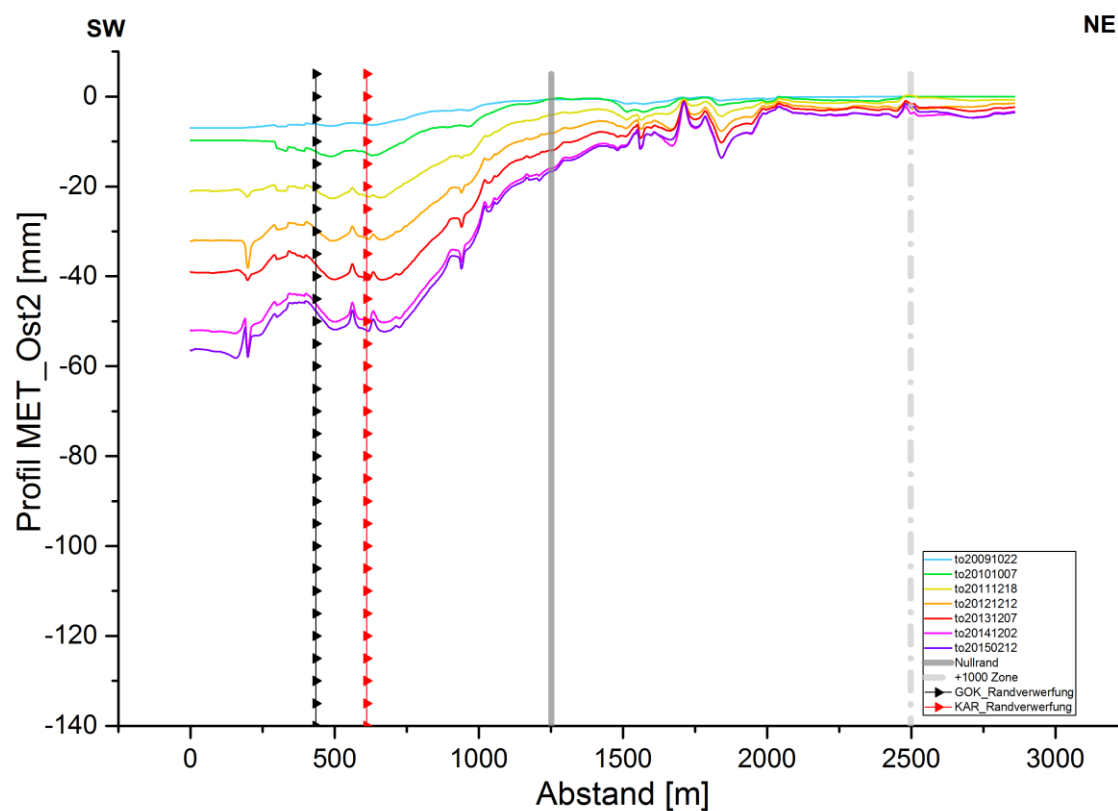


Abbildung 139: Höhenänderungen [mm] entlang der Profilsur MET_Ost2 bezogen auf den 11.12.2008

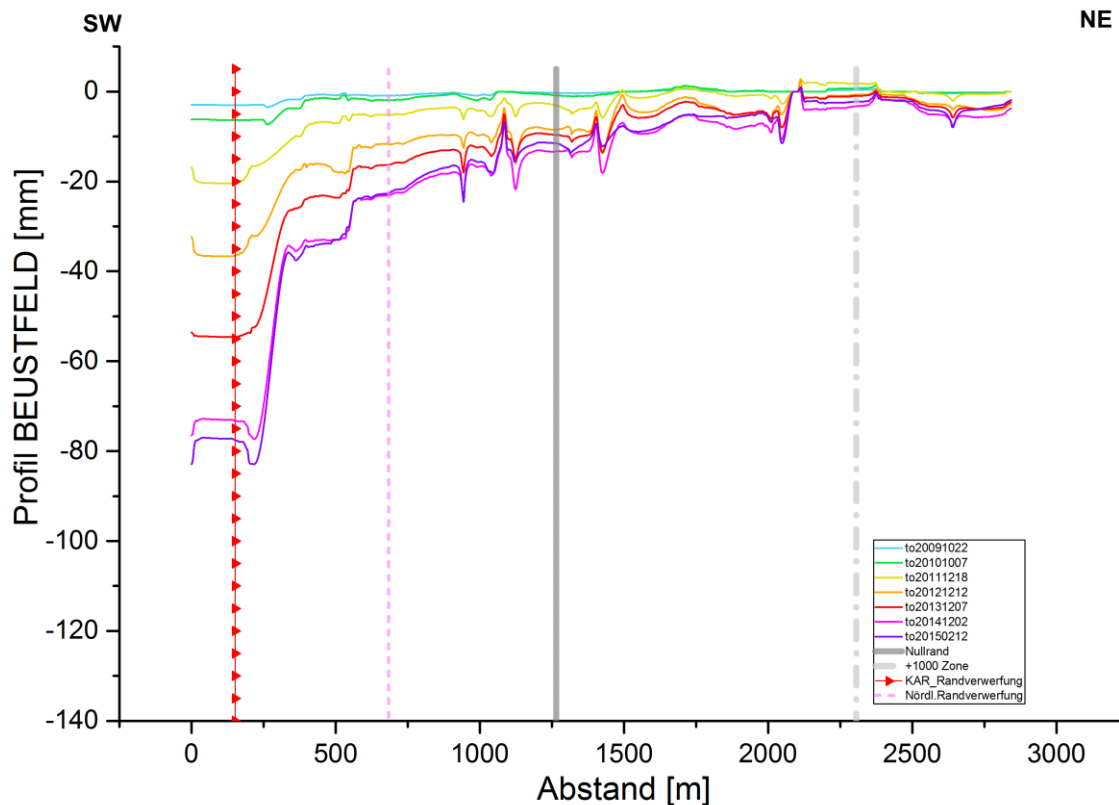


Abbildung 140: Höhenänderungen [mm] entlang der Profils pur Beustfeld bezogen auf den 11.12.2008

9.3.2. Senkungsgebiet Ibbenbüren-Laggenbeck

Die Abbildung 130 bis Abbildung 135 sowie Abbildung 141 zeigen in diesem Gebiet innerhalb des prognostizierten Einwirkungsbereiches die typischen Senkungsreaktionen auf die räumlich und in ihrer Intensität variierenden Abbautätigkeiten. Außerhalb des prognostizierten Einwirkungsbereiches ergaben sich südlich vom Schacht Theodor, im westlichen Teil dieses Senkungsgebietes, tendenziell nur kleine Senkungen mit konstanter Geschwindigkeit für die Zeiträume 2003 bis Ende 2007, die sich auch örtlich und in ihrer Charakteristik bis Ende 2014 nicht ändern. Ab 2011 ist in den Abbildungen für dieses Teilgebiet deutlich eine scharfe, zur Einwirkungsgrenze parallele Abgrenzung eines nahezu senkungsfreien Gebietes innerhalb des Einwirkungsbereiches zu erkennen (was auch an der höheren Bodenauflösung der Radarsat-2-Daten und damit größeren PS-Punktdichte liegen dürfte). Diese Erscheinung sowie die bereits in Abbildung 81 auffallende Ausprägung und Form des Senkungsgebietes sowie die Größe der detektierten Senkungen (Abbildung 130 bis Abbildung 135, Abbildung 141) legten es nahe, mehrere Senkungsprofile, verteilt über dieses Senkungsgebiet, zur Aufklärung ihrer Ursachen abzuleiten. Deshalb wurden entlang den in Abbildung 142 dargestellten Profilsuren Zeit-Senkungsprofile auf Grundlage flächeninterpolierter radarinterferometrisch ermittelter Höhenänderungen für unterschiedliche Zeiträume, jeweils bezogen auf den 11.12.2008, abgeleitet.

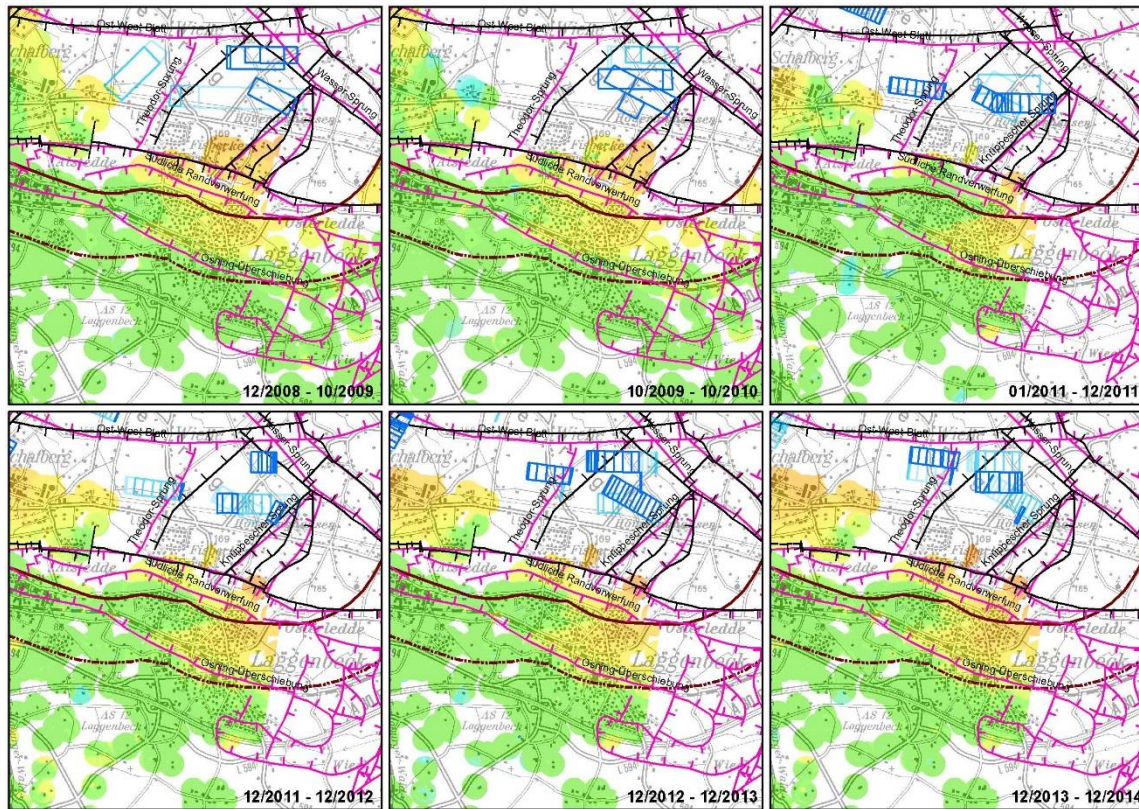


Abbildung 141: Flächeninterpolierte radarinterferometrische Höhenänderungen für verschiedene Zeiträume zusammen mit den zeitlich entsprechenden Abbauen mit Farbgebung wie in Abbildung 130 ff (© RAG AG 2015), der Tektonik an der Tagesoberfläche (schwarz; © RAG AG 2015) und der Tektonik im Niveau vom Flöz Glücksburg (magenta; nach DROZDZEWSKI 1985); Hintergrund TK100 © Geobasis NRW 2012

Da in diesem Gebiet unterschiedliche geologische Schichten und tektonische Elemente dokumentiert sind, wurden die hierzu vorliegenden Informationen zur Interpretation des räumlich-zeitlichen Senkungsverhaltens innerhalb und außerhalb des prognostizierten Einwirkungsbereiches in die Zeit-Senkungsprofile aufgenommen. Die Profile reichen etwa von der Südlichen Karbonrandverwerfung im Norden (innerhalb des prognostizierten Einwirkungsbereiches) bis über den +1000 m erweiterten Betrachtungsbereich im Süden hinaus. Lediglich das Profil LAG_Ost 3 reicht nicht bis an die Verwerfung heran, da radarinterferometrische Höhenänderungsangaben in diesem Bereich fehlen.

Die sich für die verschiedenen Profilsuren ergebenden Zeit-Höhenänderungs-Profile sind in der Abbildung 143 bis Abbildung 148 dargestellt. Die Bezeichnungen in den Legenden haben folgende Bedeutungen:

- toYYYYMMTT: Höhenänderung zwischen 11.12.2008 und Datum TT.MM.YYYY
- Nullrand: Grenze des prognostizierten Einwirkungsbereiches
- +1000 Zone: +1000 m erweiterter Betrachtungsraum
- GOK_Randverwerfung: Südliche Karbonrandverwerfung an der Tagesoberfläche
- KAR_Randverwerfung: Südliche Karbonrandverwerfung an der Karbon-Oberfläche

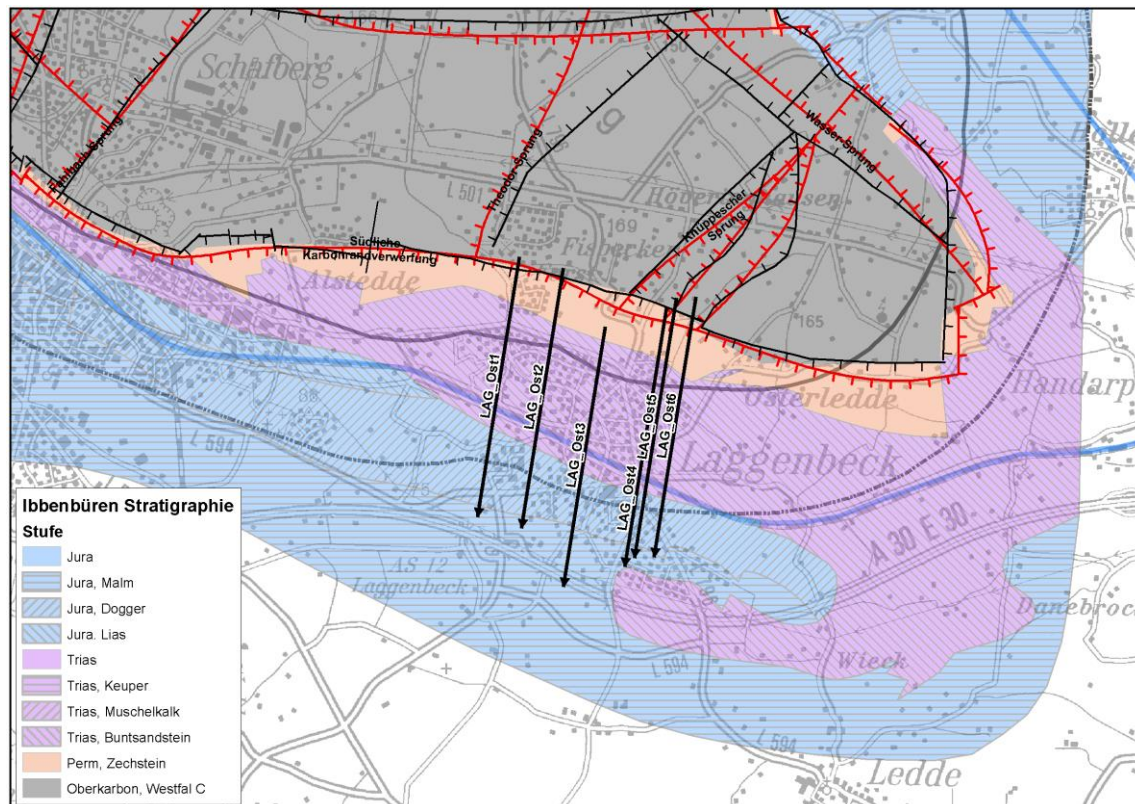


Abbildung 142: Lage der Profilsuren im Bereich Ibbenbüren-Laggenbeck; inkl. der prognostizierten Einwirkungsgrenze und den um +1000 m erweiterten Betrachtungsraum (© Bezirksregierung Arnsberg 2015), die stratigraphischen Einheiten (nach DROZDZEWSKI 1985) sowie die Tektonik an der Tagesoberfläche (schwarz; © RAG AG 2015) und an der Karbon-Oberfläche (rot; HÄDICKE 1972); Hintergrund TK100 © Geobasis NRW 2012

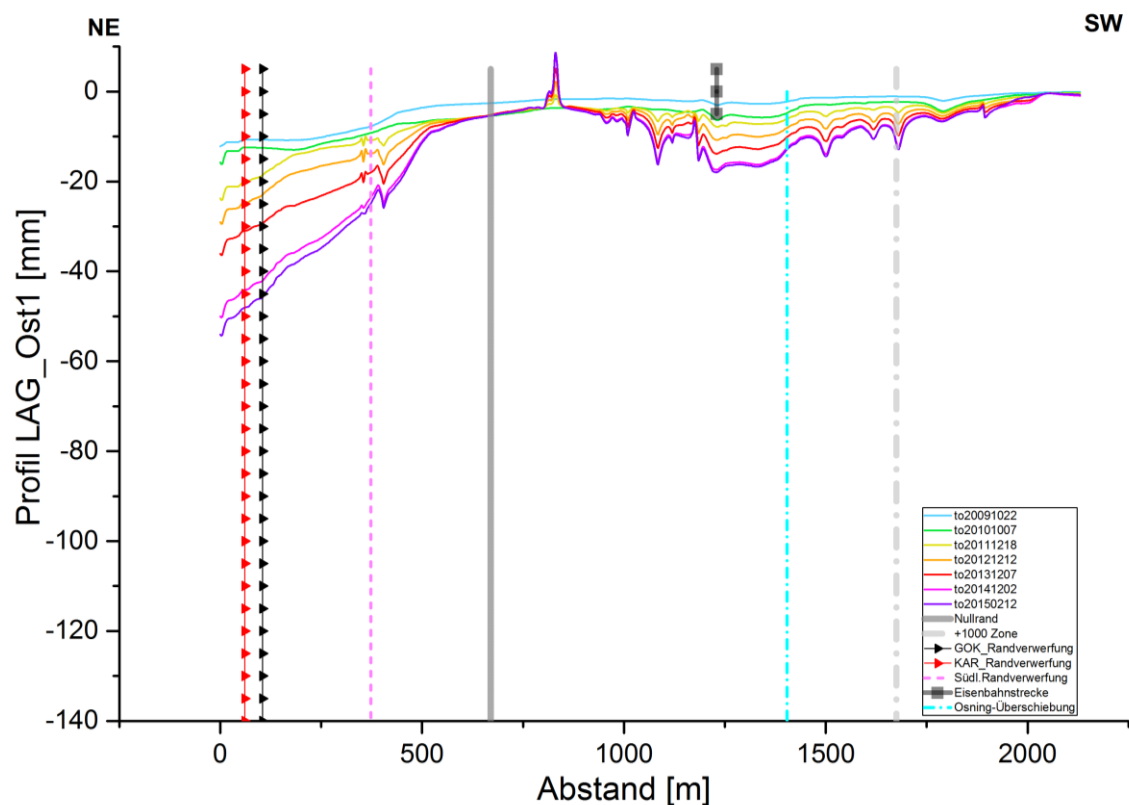


Abbildung 143: Höhenänderungen [mm] entlang der Profilsur LAG_Ost1 bezogen auf den 11.12.2008

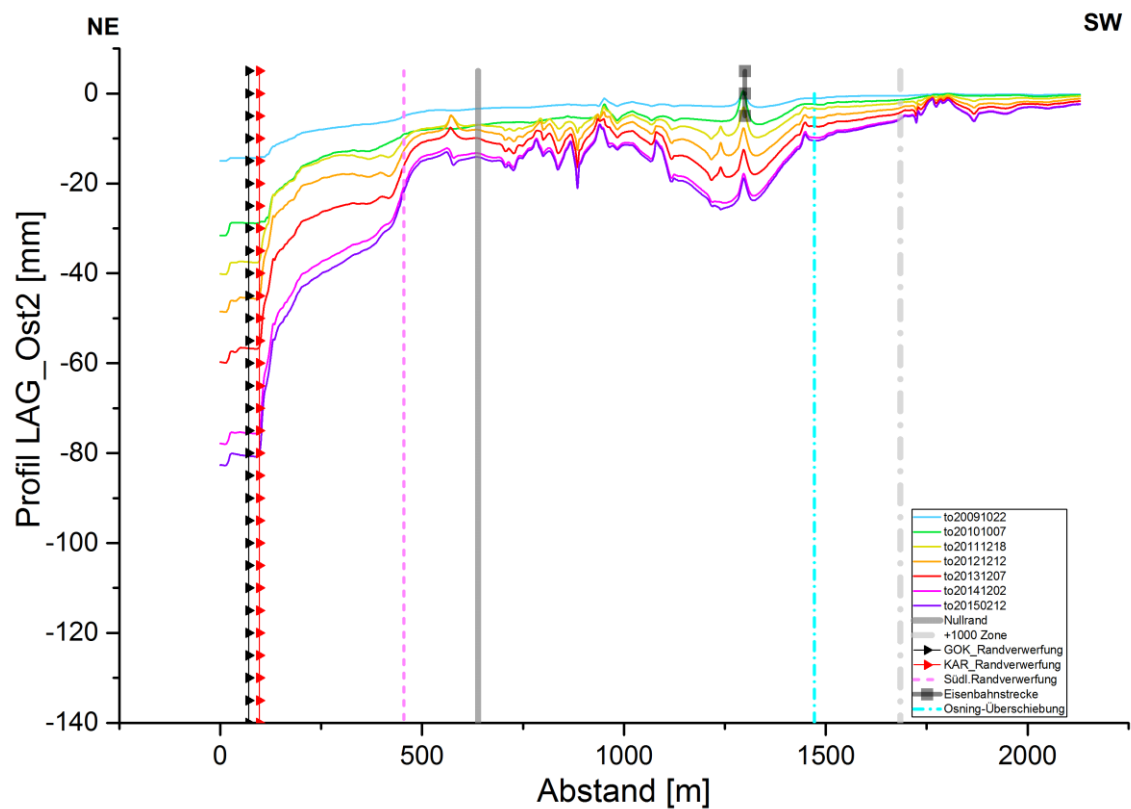


Abbildung 144: Höhenänderungen [mm] entlang der Profilsur LAG_Ost2 bezogen auf den 11.12.2008

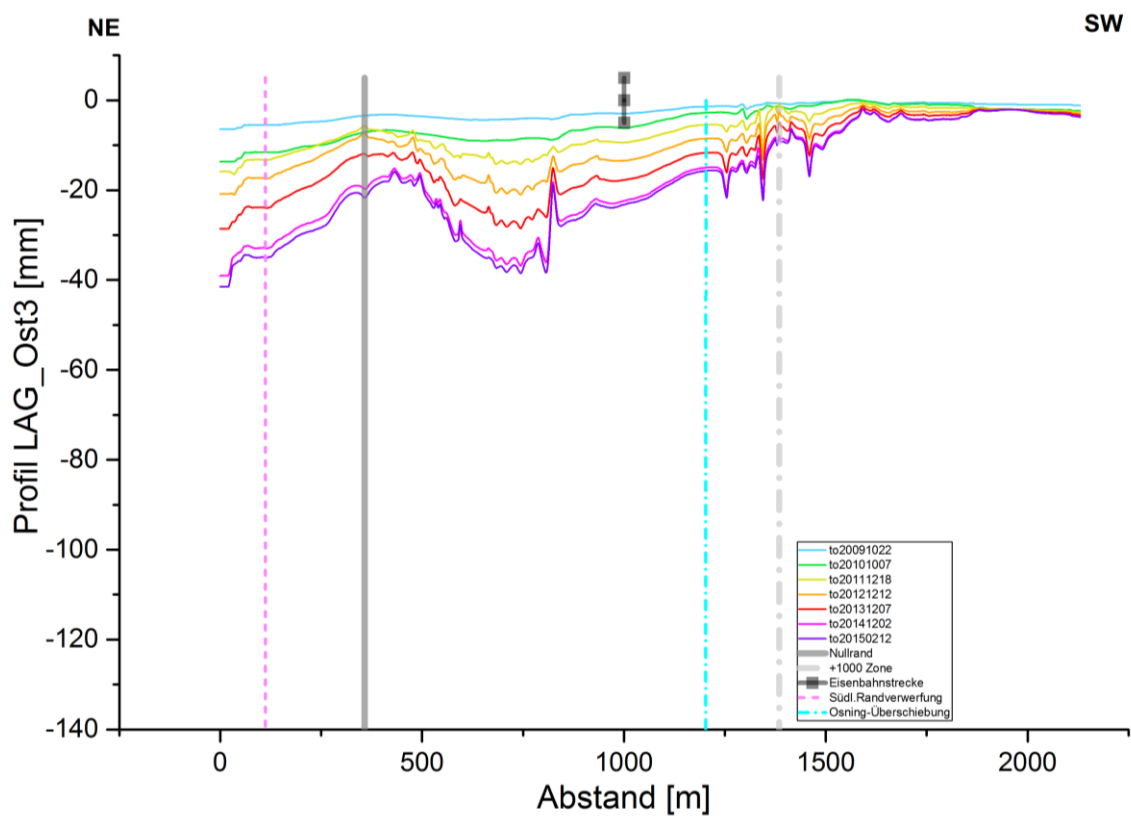


Abbildung 145: Höhenänderungen [mm] entlang der Profilsur LAG_Ost3 bezogen auf den 11.12.2008

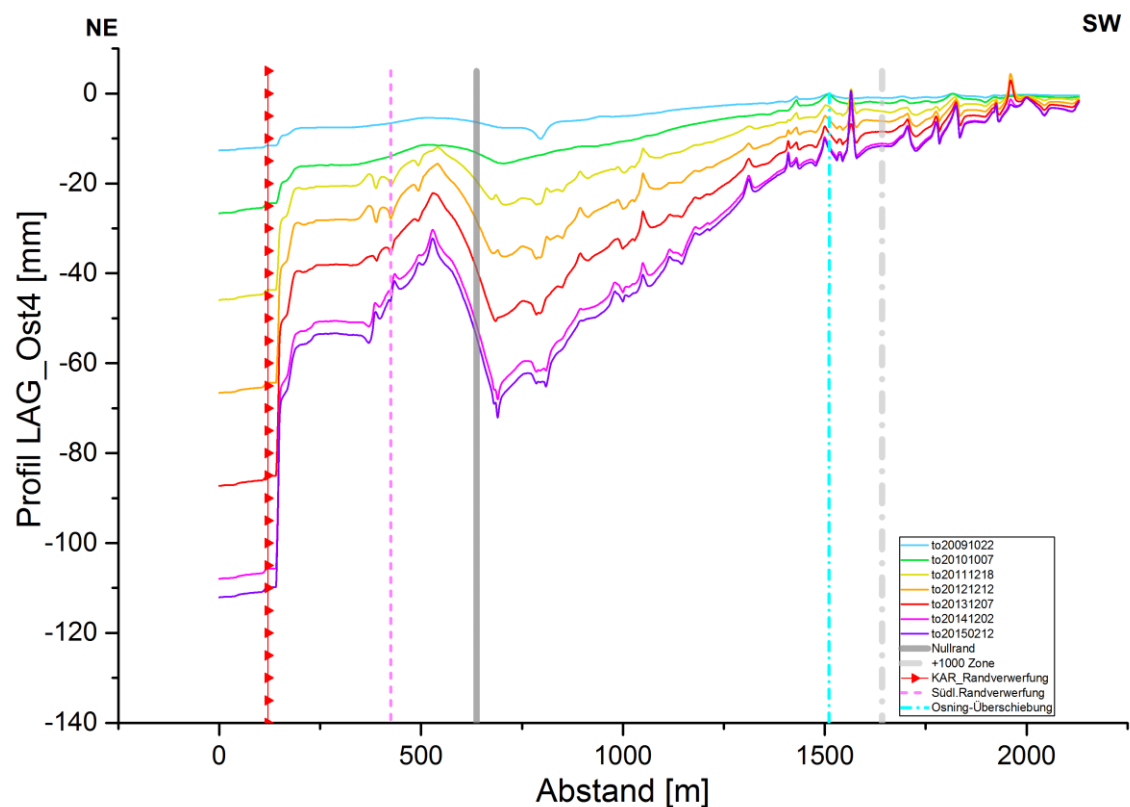


Abbildung 146: Höhenänderungen [mm] entlang der Profilsur LAG_Ost4 bezogen auf den 11.12.2008

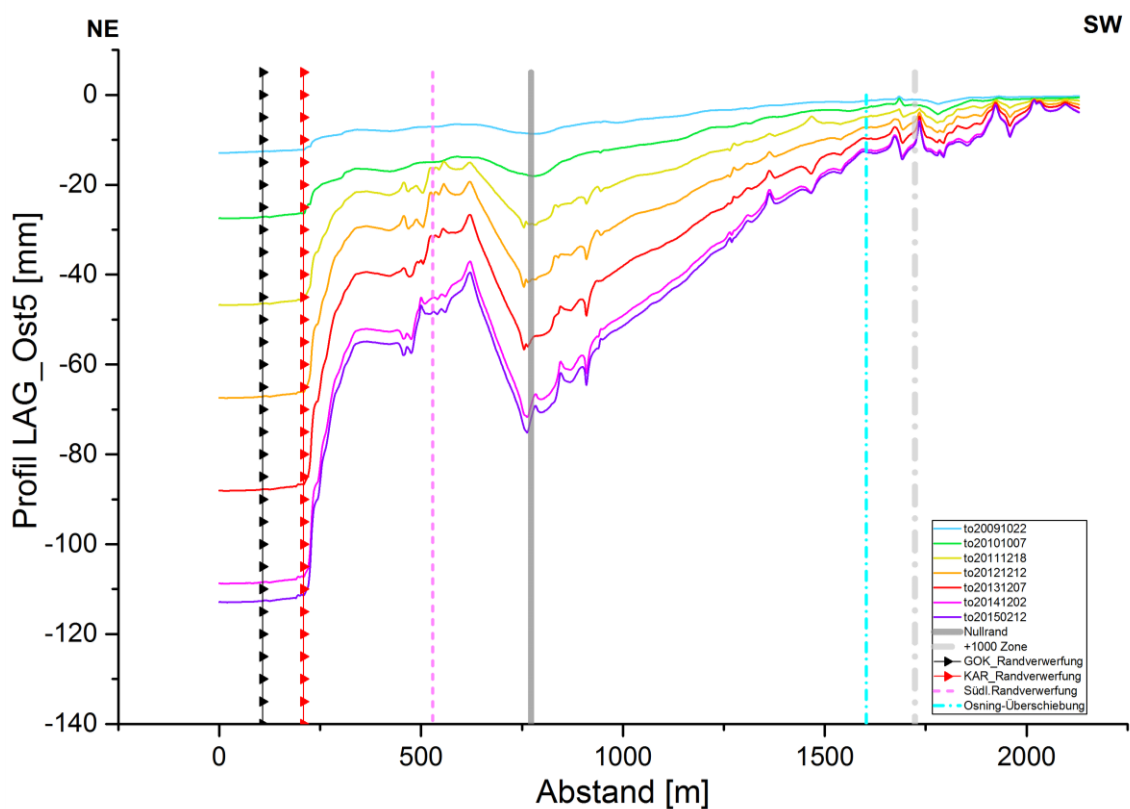


Abbildung 147: Höhenänderungen [mm] entlang der Profilsur LAG_Ost5 bezogen auf den 11.12.2008

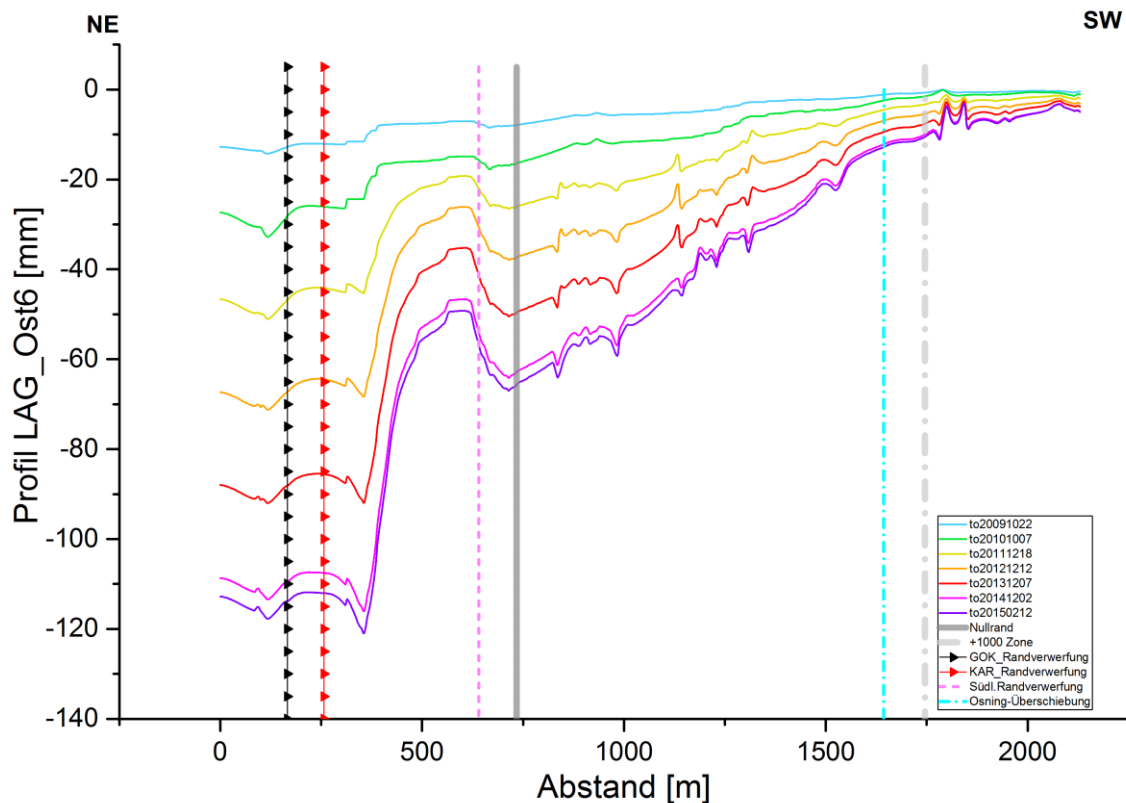


Abbildung 148: Höhenänderungen [mm] entlang der Profilspur LAG_Ost6 bezogen auf den 11.12.2008

Aus allen Profilen (Abbildung 143 bis Abbildung 148) ist eine Zunahme der Senkungen innerhalb des prognostizierten Einwirkungsbereiches über den gesamten Untersuchungszeitraum 12/2008 - 02/2015 zu erkennen. Diese stetige, weitgehend gleichmäßige Senkungszunahme pflanzt sich, lokal und betragsmäßig unterschiedlich, über die Grenze des Einwirkungsbereiches hinaus fort. Im Bereich des um 1000 m erweiterten Betrachtungsraums erreichen die Senkungen etwa einen Betrag von -10 mm bis -20 mm im Zeitraum von ca. 5 Jahren. Besonders auffallend ist jedoch der räumlich stark variierende Verlauf dieser Senkungsprofile. Ursache hierfür können tektonische Elemente, wie die Südliche Karbonrandverwerfung, die Südliche Randverwerfung oder auch die Osning-Überschiebung sein. So ist, bis auf das Profil LAG_Ost1 (Abbildung 143) deutlich erkennbar, dass im Untersuchungsgebiet offensichtlich die Südliche Karbonrandverwerfung den räumlichen Verlauf der Senkungskurven charakteristisch beeinflusst. So tritt südlich der Verwerfung eine deutliche, fast scharfkantige, Reduktion der Senkungen um bis zu 40 % auf, jedoch mit einer Senkungszunahme (wenn auch betragsmäßig geringer), die sich über die Zeit auch südlich der Verwerfung fortsetzt.

Im Umfeld der prognostizierten Einwirkungsgrenze des westlich gelegenen Profils LAG_Ost1 (Abbildung 143) zeigen die gemessenen Senkungen nahezu Bodenruhe an. Einen vergleichbaren charakteristischen Verlauf nahezu gleichbleibender Senkungen (allerdings auf einem Niveau von bis -20 mm) über einen Bereich von ca. 500 m lässt Profil LAG_Ost2 (Abbildung 144) erkennen. Die in diesen Profilen optisch deutlich erkennbaren „Spitzen“ können, wie detaillierte Untersuchungen ergaben, auch durch das Eigenverhalten einzelner rückstreuender topographischer Objekte (z. B. Häuser oder eine lagemäßig eingetragene Bahnlinie) hervorgerufen sein.

In den östlich davon liegenden Profilen nimmt von Südwesten nach Nordosten die Senkung an der Einwirkungsgrenze immer mehr zu (von kleiner 20 mm bis fast 70 mm über den Betrachtungszeitraum). Die entlang der Profilspur sichtbare charakteristische Abnahme und insbesondere die nach Südwesten sich anschließende Zunahme der Senkungen um bis zu 20 mm (deutlich erkennbar in den Profilen LAG_Ost3 bis LAG_Ost5, aber auch in den Profilen LAG_Ost1 und LAG_Ost2) konnte durch geologische Ursachen nicht eindeutig erklärt werden. Im weiteren Verlauf nach Südwesten nehmen die Senkungen in allen Profilen sukzessive ab, bis sie z. B. in einer Entfernung von +1000 m außerhalb der Einwirkungsgrenze einen Betrag von durchschnittlich 10 - 20 mm über den Untersuchungszeitraum erreichen.

Auch wenn der räumliche Verlauf der Senkungen entlang der Profilsuren durch geologische Strukturen beeinflusst ist, zeigt generell die Zunahme der Senkungen über die gesamte Zeit, dass offensichtlich hierfür eine über die Zeit anhaltende Ursache verantwortlich sein muss. Da die außerhalb der Einwirkungsgrenze zunehmenden Senkungen einer charakteristisch bergbaubedingten Senkungszunahme innerhalb des Einwirkungsbereiches folgen, liegt die Vermutung nahe, dass für die Senkungen außerhalb der prognostizierten Einwirkungsgrenze ein bergbaulicher Einfluss verantwortlich ist.

9.3.3. Östliches Senkungsgebiet (Gebiet Westerkappeln)

Bereits im Kapitel 6.3.3 konnte für den Zeitraum ab 2003 bis Oktober 2010 (ENVISAT-Zeitreihe) bzw. bis Herbst 2011 (Leitnivellement) nachgewiesen werden, dass in diesem Bereich latent Senkungen außerhalb der prognostizierten Einwirkungsgrenze auftreten. So ergaben sich hier für den etwa zweijährigen Zeitraum ab Ende 2008 bis Oktober 2010 Senkungen von ≥ 10 mm innerhalb des um 1000 m erweiterten Betrachtungsbereiches. Die bis Herbst 2011 vorliegenden Nivellementsergebnisse sowie die Radarsat-2-LOS-Ergebnisse bis Februar 2015 zeigen an, dass dieses Senkungsgeschehen andauert. Da bereits vor 2009 nachweislich Senkungen vergleichbarer Größenordnung auftraten, ist ein bergbaulicher Einfluss wegen der lang andauernden Bergbauaktivitäten im südöstlichen Mittelfeld nicht gänzlich auszuschließen, da auch dieser offensichtlich für Senkungen im Bereich Ibbenbüren-Laggenbeck verantwortlich ist. Unter Umständen führt der Knüppesche Sprung (sowie ggf. ein östlicher Ausläufer des Wasser-Sprungs bzw. die Nördliche Randverwerfung) ähnlich wie die Südliche Randverwerfung (im Bereich Ibbenbüren-Laggenbeck) zu einer sehr flachen Senkungsmulde südlich und östlich vom Knüppeschen Sprung. Eine Untersuchung (analog zum Senkungsgebiet Ibbenbüren-Laggenbeck) der zeitlichen Korrelation zwischen den Abbautätigkeiten nach 2012 im südöstlichen Mittelfeld und Senkungen im Bereich Westerkappeln war leider wegen nicht ableitbarer Höhenänderungen aus radarinterferometrisch ermittelten LOS-Ergebnissen unmöglich.

9.3.4. Bodenbewegungsgebiete

Aus den Ergebnissen der PSI-Auswertung der Radarsat-2-Zeitreihe für den Zeitraum Januar 2011 bis Februar 2015 lassen sich zwei Gebiete außerhalb des prognostizierten Einwirkungsbereiches mit Messwertänderungen in LOS-Richtung ableiten (Abbildung 83), in denen somit dreidimensionale Bodenbewegungen in diesem Zeitraum aufgetreten sein müssen. Da, wie an anderen

Stellen in diesem Gutachten erläutert, eine Ableitung von Höhenänderungen nicht möglich ist, kann lediglich versucht werden, Hinweise über einen Verursacher dieser Bodenbewegungen zu finden.

■ ÖSTLICHES BODENBEWEGUNGSGEBIET (GEBIET WESTERKAPPELN)

Dieses Gebiet entspricht dem in Kapitel 9.3.3 untersuchten Senkungsgebiet. Die für den etwa vierjährigen Untersuchungszeitraum ermittelten LOS-Ergebnisse (Abbildung 43, Abbildung 48) weisen, auch im Vergleich zu den ENVISAT-LOS-Ergebnissen (Zeitraum 2003 - 2010) (Abbildung 40, Abbildung 47), auf eine Fortsetzung der Bodenbewegungen hin. Wegen der lang andauernden Bergbauaktivitäten im südöstlichen Mittelfeld kann, wie auch in Kapitel 9.3.3 dargelegt, eine bergbauliche Ursache nicht gänzlich ausgeschlossen werden.

■ WESTLICHES BODENBEWEGUNGSGEBIET (ÖSTLICH DES ORTSTEILS DICKENBERG)

Die Analyse der aus der ENVISAT-PSI-Auswertung abgeleiteten Höhenänderungen (Abbildung 56, Kapitel 6.3.3) sowie der Nivellementsergebnisse ergab, dass bis Oktober 2010 bzw. bis Herbst 2011 im Gebiet östlich des Ibbenbürener Ortsteils Dickenberg, außerhalb der prognostizierten Einwirkungsgrenze, keine Senkungen aufgetreten sind. Die Ergebnisse der PSI-Auswertung der Radarsat-2-Zeitreihe für den Zeitraum Januar 2011 bis Februar 2015 zeigen jedoch auch außerhalb des prognostizierten Einwirkungsbereiches Messwertänderungen in LOS-Richtung (Abbildung 48). Hieraus darf der Schluss gezogen werden, dass in diesem Gebiet, neben Horizontalbewegungen auch „kleine“, in Ihrer Größe unbekannte, vertikale Höhenänderungen aufgetreten sind.

Da diese Bodenbewegungen in LOS-Richtung erst nach 2011 entstanden sind und im Beustfeld nach 2012 der Abbau einsetzte und anhielt, ist, wie auch durch GPS-Messungen belegt ist, ein ursächlicher Einfluss dieser Bergbauaktivität nicht auszuschließen.

9.4. Einflüsse durch den Altbergbau

In Abbildung 149 und Abbildung 150 erfolgt eine visuelle Gegenüberstellung der radarinterferometrisch ermittelten Höhenänderungen für die Zeiträume 12/2008 - 10/2010 und 01/2011 - 02/2015 im Vergleich zu den bekannten Steinkohlenabbauen im oberen Lagerstättenabschnitt ab ca. 1800 bis 1979 (blaue Polygone) sowie im tieferen Lagerstättenabschnitt ab 1973 (lila Polygone) bis ca. 1 Jahr vor den genannten Beobachtungszeiträumen. Die graue Fläche begrenzt das Oberkarbon (Westfal C) im Niveau des Flöz Glücksburg entsprechend Karte 2. Zusätzlich sind die im jeweiligen Satellitenbeobachtungszeitraum aufgefahrenen Abbaue als blaue Flächen und bis 1 Jahr vorher als hellblaue Flächen dargestellt. Die schwarzen Punkte markieren die bekannten Tagesöffnungen entsprechend Abbildung 24. Die Lage der generalisierten Gebiete des oberflächen- und tagesnahen Altbergbaus ist Abbildung 24 zu entnehmen. Abbildung 149 und Abbildung 150 zeigen, dass innerhalb der Ibbenbürener Karbonscholle intensiv Steinkohle auch vor dem RBP 2009 - 2018 abgebaut wurde. Jedoch ist kein unmittelbarer räumlicher Zusammenhang zwischen den radarinterferometrisch ermittelten Senkungen und den Abbauen vor 2008, den Altabbauen bis ca. 1800 und den bekannten Tagesöffnungen erkennbar. Die als signifikant ermittelten Senkungen reichen teilweise weit bis außerhalb der Karbonscholle und damit auch außerhalb des prognostizierten Einwirkungsbereiches, jedoch bis maximal etwa 1500 m von den jeweils äußersten Abbaukanten (aller bekannten Abbaue).

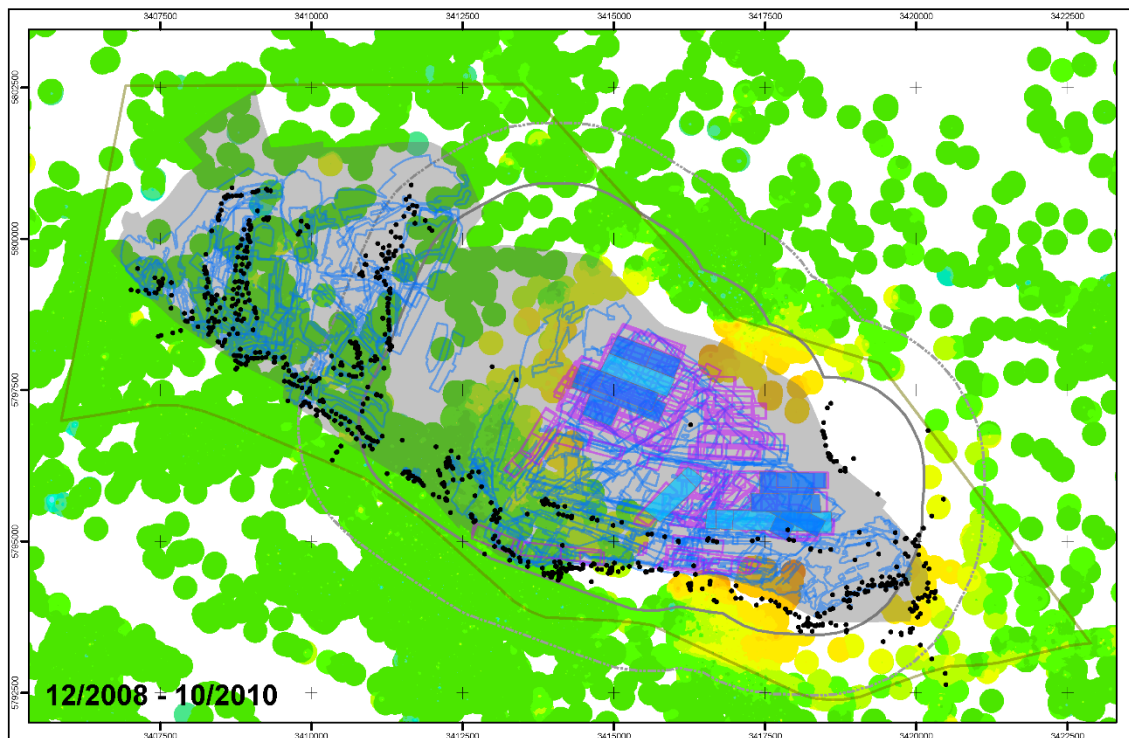


Abbildung 149: Flächeninterpolierte radarinterferometrische Höhenänderungen von ENVISAT (12/2008 – 10/2010) überlagert mit den bekannten Steinkohlenabbauen des oberen Lagerstättenabschnitts ab ca. 1800 bis 1997 (blaue Polygone), des tieferen Lagerstättenabschnitts ab 1973 bis 12/2007 (lila Polygone), den Abbauen zwischen 12/2007- 12/2008 (hellblaue Flächen) und 12/2008 – 10/2010 (blaue Flächen) (© RAG AG) sowie den bekannten Tagesöffnungen (schwarze Punkte; © Bezirksregierung Arnsberg) innerhalb und außerhalb des Bereiches der Karbonscholle (nach DROZDZEWSKI 1985)

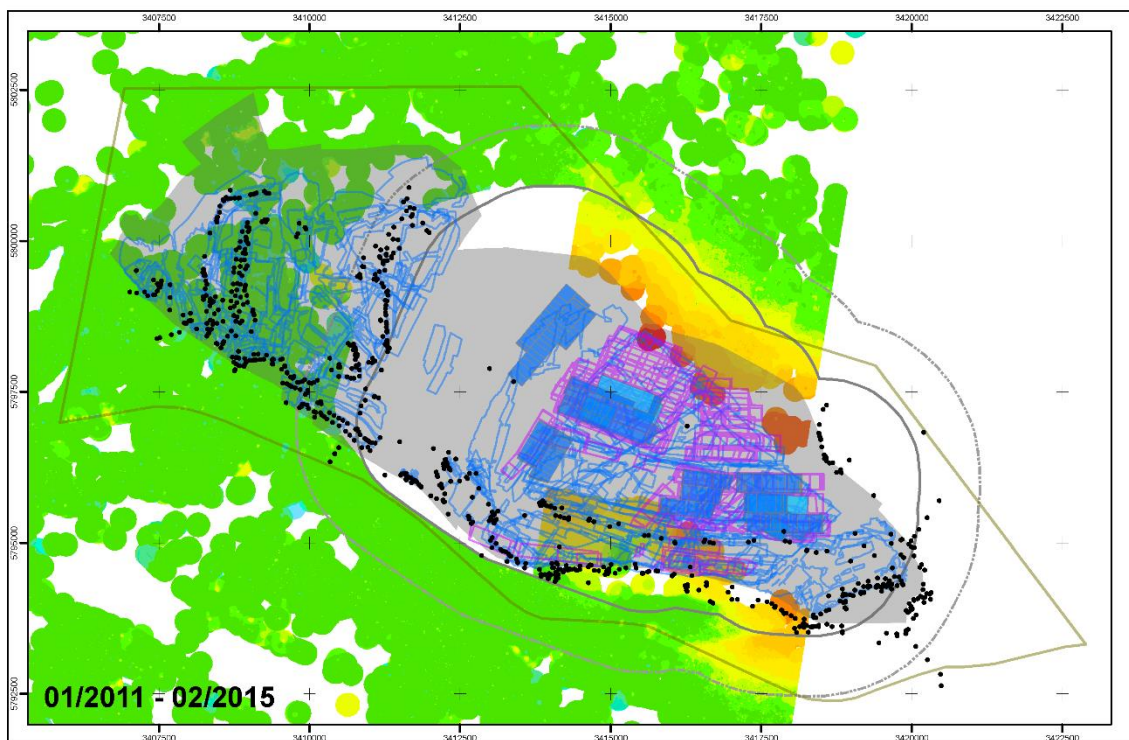


Abbildung 150: Wie in Abbildung 149 jedoch mit den Ergebnissen von Radarsat-2 (01/2011 – 02/2015) und den Abbauen ab 1973 – 01/2010 (lila Polygone), 01/2010 – 01/2011 (hellblaue Flächen) und 01/2011 – 02/2015 (blaue Flächen) (© RAG AG)

9.5. Sonstige Einflüsse

Die radarinterferometrisch ermittelten Höhenänderungsbereiche außerhalb des prognostizierten EW-Bereiches wurden hinsichtlich weiterer potentieller Ursachen, wie sie in Kapitel 3 für den Untersuchungsraum aufgelistet sind, untersucht.

Wie bereits in Kapitel 8.2 zusammengefasst, ergaben die hydrogeologischen Untersuchungen keine signifikanten Veränderungen der Grundwasserhöhen, die im Zusammenhang mit den radarinterferometrisch festgestellten Höhenänderungen stehen.

In den Bereichen mit in Betrieb befindlichen übertägigen Abgrabungen (Karte 4, rote und Flächen), die außerhalb des prognostizierten EW-Bereiches bzw. in unmittelbarer Nähe liegen, konnten keine signifikanten Höhenänderungen (Abbildung 82) erfasst werden, die sich ggf. aus einer Überlagerung verschiedener Einflüsse ergeben. Die im Bereich der Bergehalde Rudolfschacht zwischen 01/2011 und 02/2015 ermittelten Höhenänderungen ca. 1000 m außerhalb des prognostizierten EW-Bereiches (Abbildung 151) stehen in keinem Zusammenhang mit den Abbauaktivitäten des BW Ibbenbüren, wie die räumliche Trennung klar zeigt. Es handelt sich vermutlich um Setzungserscheinungen, da die Halde sich teilweise noch in Schüttung befindet bzw. im Betrachtungszeitraum befunden hat. Dabei muss jedoch beachtet werden, dass es sich um Höhenänderungen an nur zwei PS-Punkten handelt (schwarze PS-Punkte in Abbildung 151), die nur durch die IDW-Interpolation zu flächig erscheinenden Höhenänderungen führten.

Im Bereich der in Karte 4 in lila dargestellten Aufschüttungsfläche in Ibbenbüren-Laggenbeck konnte kein PS-Punkt in den Radarauswertungen ermittelt werden, so dass mögliche sich überlagernde Setzungserscheinungen innerhalb des radarinterferometrisch ermittelten Höhenänderungsbereiches nicht messbar sind. Des Weiteren konnten keine Auffälligkeiten in den ermittelten Höhenänderungen im Bereich der Tagesbrüche (Karte 4) sowie sonstige räumliche und zeitliche Zusammenhänge zu anderen Ursachen festgestellt werden.

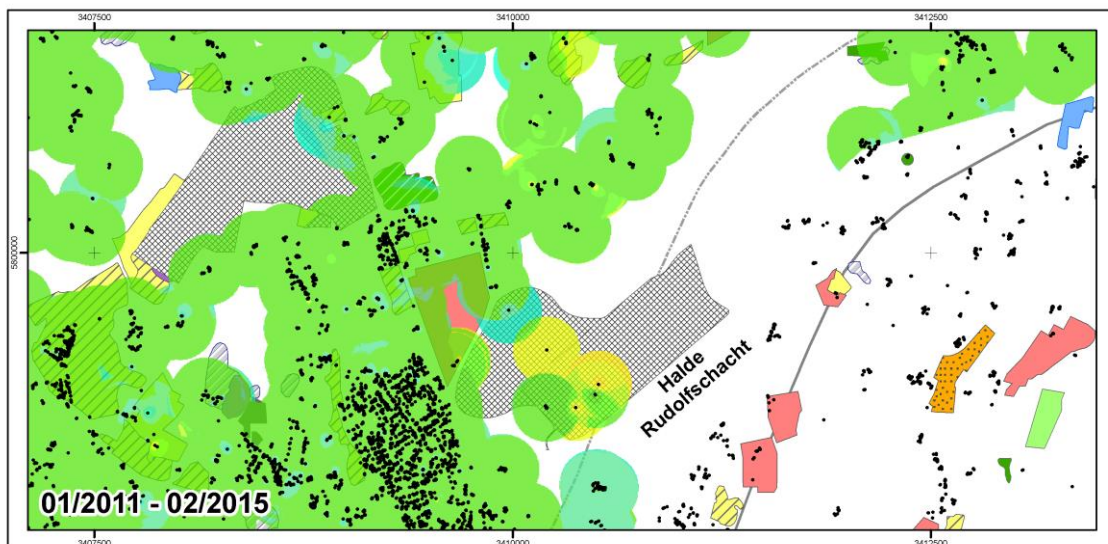


Abbildung 151: Künstlich veränderte Flächen aus Karte 4 (farbige Flächen; © Geologischer Dienst NRW 2015, Bezirksregierung Arnsberg 2015, Kreis Steinfurt 2015) überlagert mit den flächeninterpolierten radarinterferometrischen Höhenänderungen ermittelt aus Radarsat-2 (01/2011 – 02/2015) entsprechend Abbildung 57 und den für die IDW-Interpolation verwendeten PS-Punkte der Radarsat-2-Auswertung (schwarze Punkte)

10. BERGSCHADENSRELEVANZ AUßERHALB DES PROGNOTIZIERTEN EINWIRKUNGSBEREICHES

10.1. Grundlagen zur Bergschadensrelevanz

Gemäß der Definition im Bundesberggesetz (§114) wird von einem Bergschaden gesprochen, wenn infolge einer bergbaulichen Tätigkeit eine Sache beschädigt wird. Ob ein Schaden, z. B. an einem Gebäude, ein Bergschaden ist, setzt folglich die Kenntnis über eine bergbauliche Ursache voraus. Eine Untersuchung der Bergschadensrelevanz außerhalb des planfestgestellten Einwirkungsbereiches erfordert somit die Festlegung einer Grenze bergbaulicher Einflüsse. Obwohl im Rahmen dieses Gutachtens eine solche Grenze (außerhalb des prognostizierten Einwirkungsbereiches) für das Bergwerk Ibbenbüren nicht eindeutig ermittelt werden konnte, beziehen sich die nachfolgenden Betrachtungen auf den Bereich zwischen der Nulllinie (Grenze des prognostizierten Einwirkungsbereiches) und der aus PSI-Ergebnissen abgeleiteten 10 mm-Linie gleicher Senkungen (Kapitel 6.4). Diese Erweiterung des Betrachtungsraumes für diese Untersuchung ist bei der Interpretation der Ergebnisse zu beachten.

Üblicherweise und gemäß geltender Lehrmeinung treten im Randbereich einer abbaubedingten Senkungsmulde Schieflagen, Zerrungen und Pressungen mit zunehmender Entfernung vom Abbauschwerpunkt mit immer kleiner werdenden Beträgen [mm/m] auf. Somit sollten über den prognostizierten Einwirkungsbereich hinaus keine Bergschadensprobleme auftreten, insbesondere keine sog. schweren Bergschäden. Eine Ausnahme davon ist jedoch denkbar, wenn außerhalb oder im Bereich der Einwirkungsgrenze entgegen der Modellvorstellung größere Senkungen auftreten und damit auch bergschadensrelevante Schieflagen sowie Zerrungen nicht auszuschließen sind. In einem solchen Fall könnten auch schwere Bergschäden auftreten, jedoch nur dann, wenn Unstetigkeitszonen im Randbereich vorhanden wären.

Der Einfluss von abbaubedingten Senkungen und Verformungen auf Gebäude und technische Infrastruktureinrichtungen war die Hauptursache zur Entwicklung der Bergschadenkunde. Die Zusammenhänge zwischen den Bereichen, wo Pressungen und Zerrungen in ihren maximalen Werte in der Senkungsmulde auftreten, hat sehr umfangreich Kratzsch in seinen Büchern dargestellt und dokumentiert (KRATZSCH 1997).

Diese grundsätzlichen Zusammenhänge sind durch vielfältige Messungen bekannt und bei der Prognose der Gefährdung in Bergbaurevieren berücksichtigt worden. Es gibt jedoch einige technische Details, die bisher auf ihre Lösung warten oder wegen verschiedener, ortsbezogener Regelungen unterschiedlich interpretiert werden. Aufgrund mehrjähriger Untersuchungen und Betrachtungen gibt es eindeutige Feststellungen über den Einfluss von Zerrungen und Schieflagen in Bereichen die sich nah am Rand der Senkungsmulde befinden. Aufgrund von Studien im Ruhrrevier hat man 2002 ein Verfahren zur Beurteilung von Bauwerken hinsichtlich ihrer technischen Empfindlichkeit gegenüber bergbauinduzierten Bodenbewegungen entwickelt (POHL 2002). In dieser Dissertation wurden einige europäische Verfahren diskutiert. Inzwischen wurde auch das polnische und russische Verfahren beschrieben (BUDRYK & KNOTHE 1950; KWIATEK 2007). In Grunde genommen beruht das Verfahren nach Pohl auf einem Vergleich der Empfindlichkeit des Bauobjektes gegenüber den prognostizierten Bodenbewegungskomponenten. Aufgrund seiner Studien an bestimmten Bauobjekten in Ruhrrevier hat Pohl einige Grenzwerte vorgeschlagen, die das Quantifizieren von Bauobjekten zu bestimmten Gefährdungskategorien ermöglichen. Die Diagrammkurven nach Pohl deuten darauf hin, dass unter einem Grenzwert von 0,5 mm/m keine

Bergschäden zu erwarten sind, obwohl eine Begehung oder bei sehr empfindlichen, historischen Bauwerken ein globaler Untersuchungsbedarf besteht. Unter einem Wert von 0,2 mm/m besteht gar kein weiterer Handlungsbedarf.

Grenzwerte, die eine Gefährdungszone kennzeichnen, sollen gemäß dem Verfahren nach Pohl durch folgende Werte benannt werden. Bei einem Wert für Längenänderungen von

$$|\varepsilon_{max}| \leq 0,50 \text{ mm/m},$$

sollen Gebäude keine Bergschäden erfahren. Ähnliches gilt, wenn der folgende Grenzwert für Schief lagen unterschritten wird:

$$|T_{max}| \leq 0,50 \text{ mm/m}.$$

Wie man sieht, sind diese Werte so klein, dass ihr Überschreiten außerhalb des Einwirkungsbereiches ausgeschlossen werden könnte. Dies muss jedoch überprüft und bewiesen werden. Da die oben genannten Werte aus mehrjährigen Erfahrungen resultieren, ist es kaum wahrscheinlich, dass Bergschäden im Sinne des sog. „Moers-Kapellen-Urteils“ des Bundesverwaltungsgerichtes von 1989, in dem hier zu betrachtenden Außenbereich einer Senkungsmulde entstanden sein könnten. In Polen sind die o. g. Grenzwerte der Pressungen/Zerrungen kleiner und betragen etwa 0,30 mm/m.

Sehr bekannt sind Bergschäden über sog. dynamischen Senkungsmulden und infolge dynamischer abbaubedingter Auswirkungen an Bauobjekten, was umfangreich u. a. von Kratzsch, Gilles, Sroka in den 90er Jahren diskutiert worden ist (KRATZSCH 1994; GILLES 1982; SROKA 1993). Diese Auswirkungen betreffen jedoch nur Bauobjekte, die sich über dem Abbaustreb befinden und mit Hochleistungsstreben unterbaut werden. In diesem Gutachten sind jedoch nur Gebiete zu betrachten, die sich weit außerhalb der Abbaustrebe befinden, und somit nicht diesen dynamischen Einflüssen des Bergbaus unterliegen.

Im „Moers-Kapellen-Urteil“ von 1989 wurden indirekt die wichtigsten Bedingungen für die Entstehung der sog. schweren Bergschäden definiert, indem man die unverhältnismäßige Beeinträchtigung des Eigentums rechtlich festgelegt hat. Mit einer unverhältnismäßigen Beeinträchtigung „kann im Bereich von Erdstufen, bei sehr hohen bergbaubedingten Schief lagen oder bei besonders gelagerten Einzelfällen gerechnet werden“. Zu den sehr hohen bergbaubedingten Schief lagen hat man Werte von etwa über 30 mm/m gerechnet. Zu schweren Bergschäden wurden auch industrielle Anlagen gezählt, die aufgrund einer unverhältnismäßigen Beeinträchtigung, ihre Gewinnverluste gegenüber den Bergschäden aufrechnen.

Hier gilt es zu prüfen, ob die durch das „Moers-Kapellen-Urteil“ definierten schweren Bergschäden im Bereich außerhalb der prognostizierten Einwirkungsgrenze des Bergwerkes Ibbenbüren eingetreten sein könnten.

10.2. Möglichkeit des Auftretens von Bergschäden außerhalb der Nullrandlinie

10.2.1. Methodische Vorgehensweise

In erstem Schritt ist ein Verfahren zu entwickeln, um die Schief lagen bzw. Zerrungen außerhalb der Einwirkungsgrenze feststellen zu können. Eine Möglichkeit besteht darin, die Schief lagen

aufgrund der Senkungsisolinien zu ermitteln. Die (maximale) Schiefelage in der Senkungsmulde (Abbildung 152) wird dann aus folgendem Zusammenhang berechnet:

$$T_{i,i+1} = 10^3 \cdot \frac{S_{i+1} - S_i}{d_{i,i+1}} \quad (8)$$

Mit:

$T_{i,i+1}$ = Schiefelage [mm/m]

S_i = Senkung des Punktes auf der Isolinie i [m]

S_{i+1} = Senkung des Punktes auf der Isolinie i+1 [m],

$d_{i,i+1}$ = räumlicher Abstand der beiden Isolinien i und i+1 [m].

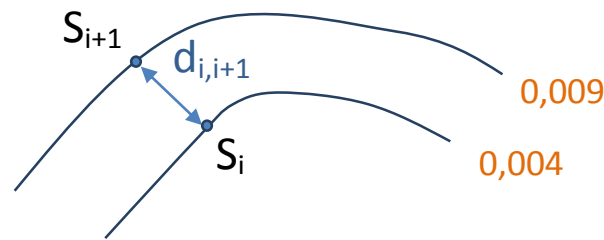


Abbildung 152: Benachbarte Isolinien, die zur Ermittlung der Schiefelage genutzt werden

Auf ähnliche Weise können die Krümmungen K [km⁻¹] aus drei benachbarten Isolinien in Richtung der Gradienten berechnet werden.

$$K_{i+1} = 2 \frac{T_{i,i+1} - T_{i+1,i+2}}{d_{i,i+1} + d_{i+1,i+2}} \quad (9)$$

Bei gleichem Abstand zwischen benachbarten Isolinien lässt sich die Formel (9) vereinfachen zu:

$$K_{i+1} = \frac{T_{i,i+1} - T_{i+1,i+2}}{d} \quad (10)$$

wobei d ein mittlerer Wert des Abstandes der Isolinien ist.

Ein anderes Verfahren lässt sich für Rasterdaten ableiten, da die flächeninterpolierten, radarinterferometrisch ermittelten Gesamtsenkungen (2005 - 2015) im Rasterformat zumindest für Teilbereiche des Untersuchungsraums vorliegen. Ausgehend von den Gesamtsenkungen S [mm] pro Rasterzelle sind ebenfalls die Neigungen/Schiefagen einer Teilfläche mittels der Rasterarithmetik bestimmt. Diese Schiefagen ergeben sich hier als Gradient einer Senkungsfläche. Dieser Schiefagengradient einer Fläche aus vier benachbarten Zellen (in x- und y-Richtung) berechnet sich gemäß folgender Formel für eine mittlere Rasterzelle:

$$T_{max} = \sqrt{\left(\frac{S_{i+1} - S_{i-1}}{2l}\right)^2 + \left(\frac{S_{j+1} - S_{j-1}}{2l}\right)^2}, \quad (11)$$

Mit:

i = Nummer der Rasterzelle in Richtung der X-Achse,

j = Nummer der Rasterzelle in Richtung der Y-Achse,

l = Breite der Rasterzelle [m].

Die Berechnung der Krümmung basiert auf Formel (11), wobei zusätzlich noch der Richtungswinkel der maximalen Krümmung bestimmt werden muss. Auf die Ableitung der Formeln wird hier verzichtet, da sie Bestandteil von Rasterberechnungsfunktionalitäten in verschiedenen Rechenprogrammen sind. Die weiteren Betrachtungen berücksichtigen die Besonderheiten der flächeninterpolierten, radarinterferometrisch ermittelten Gesamtsenkungen. Dazu wurden folgende Annahmen/Voraussetzungen definiert:

- Die rasterbasierten, flächeninterpolierten, radarinterferometrisch ermittelten Senkungsdaten liegen nicht für die gesamte Tagesoberfläche außerhalb des RBP-Einwirkungsgebietes vor.
- Die Rasterzellen besitzen eine Größe von 5 m x 5 m.
- Die Standardabweichung der radarinterferometrisch ermittelten Senkungen beträgt etwa 1 mm.

Aus den o. g. Annahmen ergibt sich, dass die Ermittlung von Schiefen und Krümmungen mit Unsicherheiten belastet ist, die auf die Interpolation und Extrapolation zurückzuführen sind.

Da für diese Untersuchungen nur Informationen über Höhenänderungen vorliegen, sollen mit der sog. Aviershin-Gleichung (AVIERSHIN 1947) aus den Krümmungen die Zerrungen/Pressungen berechnet werden. Die Proportionalität zwischen den horizontalen und vertikalen Deformationskomponenten wird über den Parameter der horizontalen Verschiebungen („B“) ausgedrückt. Die Formel wurde von Aviershin in folgender Form präsentiert:

$$\frac{\partial u}{\partial x} = -B \cdot \frac{\partial^2 S}{\partial x^2} \quad (12)$$

Diese Formel ist identisch mit der folgenden Gleichung:

$$\varepsilon_x = -B \cdot K_x \quad (13)$$

Mit:

ε_x = Pressung, Zerrung entlang der X-Abszisse [mm/m],

K_x = Krümmung entlang der X-Abszisse [km⁻¹],

B = Parameter der horizontalen Verschiebungen nach Aviershin [m],

$$B = \frac{R}{\sqrt{2k}} \quad (14)$$

k = Konstante, $k = -\ln(0,01)$,

R = Einwirkungsradius im Ruhrkohle-Verfahren, $R = H \cdot \cot(\gamma)$,

H = mittlere Abbauteufe [m],

γ = Grenzwinkel [gon].

Die Formel (13) kann auch allgemein, unabhängig von der Richtung, wie folgt geschrieben werden:

$$\varepsilon = -B \cdot K \quad (15)$$

Zur Ableitung der Genauigkeit der Verformungen wird das Fehlerfortpflanzungsgesetz auf Formel (15) angewendet:

$$m_{\varepsilon} = \pm \sqrt{(K^2 \cdot m_B^2) + (B^2 \cdot m_K^2)} \quad (16)$$

Aus der Standardabweichung des Grenzwinkels, die in Kapitel 7.4 angegeben wurde, lässt sich die Standardabweichung des Einwirkungsgrenzradius berechnen. Weiterhin kann die Standardabweichung m_B des Parameters B mit Hilfe von Formel (17) berechnet werden:

$$m_B^2 = \left(\frac{1}{\sqrt{2k}}\right)^2 m_R^2 \quad (17)$$

$$m_B = \frac{1}{2k} m_R \quad (18)$$

$$m_B = \pm 4,3 [m] \quad (19)$$

Bei einer angenommenen mittleren Abbauteufe von $H = 1300$ m ergibt sich der Wert des Faktors B nach Formel (14) zu $B = 359,4$ m, aufgrund der vorliegenden Messdaten. Es sei darauf hingewiesen, dass sich dieser Wert bei Vorliegen anderer Messdaten, ebenso wie andere Modellparameterwerte, ändert.

Der Grenzwert der Verformung $\varepsilon_{Gr} = 0,3 \text{ mm/m}$ wird dann erreicht, wenn nach Formel (15), Krümmungen von etwa $K = 0,0008 \text{ km}^{-1}$ auftreten. Signifikant kleinste, bergschadensplausible Grenzwerte der Verformungen ergeben sich erst dann, wenn die Genauigkeit der Verformungsberechnung aus den Rasterdaten dreifach kleiner ist als der bestimmte Wert:

$$m_{\varepsilon_{Gr}} \leq \frac{\varepsilon_{Gr}}{3} \quad (20)$$

Mit einem Wert für $m_{\varepsilon_{Gr}} \leq 0,1 \frac{\text{mm}}{\text{m}}$ kann aus Formel (16) der minimale Wert für die Krümmungsgenauigkeit berechnet werden:

$$m_{K_{max}} \leq \pm \frac{1}{B} \sqrt{m_{\varepsilon_{Gr}}^2 - K^2 \cdot m_B^2} \quad (21)$$

$$m_{K_{max}} \leq \pm 0,00026 [1/\text{km}] \quad (22)$$

Aus diesen Betrachtungen ergibt sich, dass solche Genauigkeiten nur in Gebieten zu erreichen sind, für die flächendeckend radarinterferometrisch ermittelte Höhenänderungen vorliegen, da nur dann der Einfluss von Interpolationsfehlern vernachlässigbar ist.

10.2.2. Praktischer Ansatz

Grundsätzlich können Krümmungen und Verformungen nur in Bereichen hervorgerufen werden in denen auch Senkungen auftreten. Dies gilt auch für Bereiche außerhalb einer prognostizierten Nulllinie, in denen Senkungen gemessen wurden, und für die die Frage beantwortet werden soll, ob die dort auftretenden Verformungen und Schief lagen schädlich für Gebäude, etc. sein können. Hierzu wird die in Kapitel 10.2.1 abgeleitete Vorgehensweise benutzt.

Die Verformungsberechnung ist entweder auf Grundlage vorliegender Senkungs isolinien außerhalb der prognostizierten Einwirkungsgrenze oder auf Grundlage der flächeninterpolierten, radarinterferometrisch ermittelten Senkungs-Rasterdaten möglich. Die markscheiderischen Messungen in diesem Gebiet wurden analysiert, und es wurde festgestellt, dass die Vermessungen

nur in Teilbereichen und in ausgewählten Zeiträumen zwischen 2003 und 2015 durchgeführt worden sind. Somit stehen andere Datenquellen als die Radarinterferometrie für die Ableitung des langjährigen Senkungsverlaufs in diesen Bereichen nicht zur Verfügung.

Die Anwendung der in Kapitel 10.2.1 genannten Beziehungen auf Basis von Rasterdaten für Gebiete außerhalb der Einwirkungslinie des RBP ergab, dass es keine Gebiete gibt, in denen die Verformungen die untere Grenze der Gefährdungszone nach Pohl überschritten haben (POHL 2002). Es wurden ebenso keine Gebiete gefunden, in denen die Krümmungen größer als $K = 0,0008 \text{ km}^{-1}$ sind und Schiefungen sowie Verformungen über $0,5 \text{ mm/m}$. Im Gebiet von Ibbenbüren-Laggenbeck, außerhalb des prognostizierten Einwirkungsbereiches, betragen die kleinsten Krümmungsradien etwa 80 km . Die Pressungen betragen somit weniger als $-0,25 \text{ mm/m}$, so dass keine Bergschäden zu erwarten sind.

Die Genauigkeit des im Kapitel 10.2.1 entwickelten Verfahrens bezieht sich ebenso auf folgende Fehler bzw. Unsicherheiten:

- Interpolationsfehler der Senkungen außerhalb der Nullrandlinie aus radarinterferometrischen Ergebnissen,
- Abweichung des Proportionalitätsfaktor B (dessen Wert nicht ermittelt sondern angenommen wurde).

Die Interpolationsfehler der Senkungen sind in Gebieten von Bedeutung, in denen radarinterferometrisch ermittelte Senkungen nicht flächendeckend vorliegen. Daher wurden die Verformungen ausschließlich in Gebieten mit hoher Datendichte berechnet. Die Abweichung des B-Parameters von einem lokal best-angepassten Wert kann zu einer maximal 20%igen Änderung der Verformungswerte führen. Diese Unsicherheiten haben jedoch keinen entscheidenden Einfluss auf die aus Rasterdaten ermittelten Verformungen, da die ermittelten Werte deutlich kleiner sind als der mögliche Einfluss der o. g. Unsicherheit selbst, wie oben beschrieben ist.

10.2.3. *Unstetigkeitszonen*

Wie oben bereits erwähnt, können sog. schwere Bergschäden außerhalb des Einwirkungsbereiches nur in solchen Bereichen auftreten, in denen Unstetigkeitszonen festgestellt werden. Angaben zu Unstetigkeitszonen lagen nur innerhalb des prognostizierten Einwirkungsbereiches vor. Sowohl außerhalb der prognostizierten Nulllinie, als auch in der Nähe der mittels der Radarinterferometrie als Bodenbewegungsgebiet gekennzeichneten Linie in Abbildung 83 sind keine Unstetigkeiten bekannt. Daher kann die Möglichkeit des Auftretens von sogenannten schweren Bergschäden ausgeschlossen werden.

10.2.4. *Fazit*

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass aufgrund der vorliegenden Daten und Betrachtungen in den Gebieten außerhalb des für den RBP vorausgerechneten Einwirkungsbereiches des Bergwerkes Ibbenbüren keinerlei Bergschäden zu erwarten gewesen sind. Die Analysen haben gezeigt, dass die unteren Grenzwerte der Deformationskomponente, die für mögliche Bergschäden charakteristisch sind, in dem Untersuchungsgebiet nicht erreicht wurden. Auswirkungen von Unstetigkeiten konnten aufgrund der zur Verfügung stehenden Daten außerhalb des Einwirkungsbereiches des RBP nicht festgestellt werden.

11. ZUSAMMENFASSUNG UND SCHLUSSFOLGERUNGEN

Im Rahmen dieses Gutachtens sollte in erster Linie festgestellt werden, ob außerhalb des im planfestgestellten Rahmenbetriebsplan definierten prognostizierten Einwirkungsbereiches für das Bergwerk Ibbenbüren bergbaubedingte Senkungen im Zeitraum vom 1. Januar 2009 bis 28. Februar 2015 aufgetreten sind. Ferner war die statistische Signifikanz des auf Grundlage der geplanten Abbaue prognostizierten Einwirkungsbereiches bergbaubedingter Bodenbewegungen sowie die Bergschadensrelevanz von außerhalb des prognostizierten Einwirkungsbereiches ermittelten, als bergbaubedingt erkannte Senkungen zu untersuchen.

Zur Ableitung bergbaubedingter Senkungen waren zunächst Höhenänderungen auf Grundlage von radarinterferometrischen PSI-Auswertungen zu ermitteln, aus denen, nach einem Vergleich mit terrestrisch (Nivellements, GPS-Messungen) bestimmten Höhenänderungen, mittels extern bereitgestellten Fachinformationen auf Bereiche mit nicht-bergbaubedingten Höhenänderungen geschlossen werden sollte. Zur Bestimmung der Höhenänderungen standen aus unterschiedlichen Quellen nivellitisch und mittels GPS gewonnene Höhenänderungen (punktweise, für verschiedene Zeiträume und in unterschiedlich großen zeitlichen und räumlichen Abständen) sowie Radardaten der Satelliten ENVISAT für den Zeitraum von Dezember 2003 bis Oktober 2010 und Radarsat-2 für den Zeitraum von Januar 2011 bis Februar 2015 zur Verfügung.

Nach einer umfangreichen, multikriteriellen Datenbereinigung und Trendanalyse der PSI-Zeitreihen, der Umrechnung der satellitenspezifischen LOS-Messwerte in Höhenänderungswerte für Bereiche in denen keine bzw. vernachlässigbar kleine Horizontalbewegungen aufgetreten waren, erfolgte die Ableitung von Höhenänderungen für den gesamten Betrachtungszeitraum 1. Januar 2009 bis 28. Februar 2015. Diese Gesamthöhenänderungen wurden mittels der IDW-Interpolationsmethode in ein Rasterdatenformat umgewandelt und so eine flächenhafte Darstellung der Gesamthöhenänderungen erzeugt. Auf Grundlage einer statistischen Signifikanzabschätzung und mittels GIS-Berechnungen konnten für zwei Teilbereiche des Untersuchungsraums Linien signifikanter Höhenänderungen abgeleitet werden. Zur Abgrenzung von Gebieten mit signifikanten Höhenänderung erfolgte die Darstellung einer 10 mm-Senkungslinie. Zur Verifizierung der terrestrisch und radarinterferometrisch bestimmten Höhenänderungen dienten umfangreiche Vergleiche beider Datensätze innerhalb und außerhalb der prognostizierten Einwirkungsgrenze. Insgesamt konnte in allen Bereichen eine gute Übereinstimmung zwischen den Ergebnissen der unterschiedlichen Messmethoden festgestellt werden. Kleinere Abweichungen, insbesondere im östlichen und westlichen Untersuchungsbereich sind vermutlich auf unberücksichtigte (aufgrund fehlender Lagemessungen) Horizontalbewegungen zurückzuführen, die sich fehlerhaft auf die Ergebnisse der radarinterferometrischen Höhenänderungsmessung ausgewirkt haben könnten. Weitere Ursachen für Abweichungen zwischen den Messungen könnten unterschiedliche Messgenauigkeiten sowie lokale Effekte sein.

Auf Basis der radarinterferometrischen Daten konnten für den Zeitraum Dezember 2008 bis Februar 2015 zwei Höhenänderungsgebiete mit Auswirkungen außerhalb der prognostizierten Einwirkungsgrenze zuverlässig (signifikant) detektiert werden:

- das Senkungsgebiet Mettingen,
- das Senkungsgebiet Ibbenbüren-Laggenbeck.

Zusätzlich konnte für den Zeitraum ab 2003 bis Oktober 2010 mittels der ENVISAT-Daten bzw. bis Herbst 2011 mittels der Leitnivelements nachgewiesen werden, dass im östlichen Untersuchungsbereich (Gebiet Westerkappeln) ebenfalls Senkungen größer/gleich 10 mm innerhalb des um 1000 m erweiterten Betrachtungsbereiches aufgetreten sind.

Die radarinterferometrischen LOS-Ergebnisse liefern zudem zusätzliche Informationen über Bereiche mit Bodenbewegungen, in denen größere Horizontal- als Vertikalbewegungen wahrscheinlich sind. Jedoch ist aufgrund fehlender Lagemessungen und damit der unbekannten Richtung des Bewegungsvektors, keine Ableitung von Höhenänderungen möglich. Somit konnte festgestellt werden, dass im Zeitraum Januar 2011 bis Februar 2015 kleine Bodenbewegungen außerhalb der westlichen Grenze des prognostizierten Einwirkungsbereiches (östlich des Ibbenbürener Stadtteils Dickenberg) aufgetreten sein müssen, jedoch mit unbekanntem Höhenänderungsanteil. Auch an der östlichen Grenze des EW-Bereiches (Gebiet Westerkappeln) sind Bodenbewegungen in LOS-Richtung des Sensors Radarsat-2 bis ca. 2000 m außerhalb der prognostizierten Grenze nachweisbar (Abbildung 83).

Durch die Abbauprodukte des BW Ibbenbüren wurden im Zeitraum 1. Januar 2009 bis 28. Februar 2015 Senkungen erzeugt, die mindestens bis an die prognostizierte Einwirkungsgrenze des RBP 2009-2018 reichen. Darüber hinaus wurden in Teilbereichen auch Senkungen und allgemein Bodenbewegungen außerhalb der prognostizierten Einwirkungsgrenze gemessen, die aufgrund der zeitlichen Korrelation der Verlagerung von Abbauschwerpunkten und den Senkungsgebieten sehr wahrscheinlich durch den aktiven Steinkohlenbergbau hervorgerufen wurden. Dies betrifft sowohl das Senkungsgebiet Mettingen als auch Ibbenbüren-Laggenbeck. Im östlichen Bodenbewegungsgebiet (Gebiet Westerkappeln) sowie im westlichen Bodenbewegungsgebiet (östlich des Ibbenbürener Stadtteils Dickenberg) kann bei den außerhalb des prognostizierten Einwirkungsbereiches festgestellten Bodenbewegungen nicht gänzlich ausgeschlossen werden, dass diese ebenfalls durch den aktiven Steinkohlenbergbau verursacht wurden.

Im Rahmen der gutachterlichen Untersuchungen konnten keine unmittelbaren Zusammenhänge und/oder räumlich-zeitliche Überlagerungen zwischen den ermittelten Höhenänderungen im Untersuchungsraum und altbergbaulichen, hydrogeologischen und sonstigen Einflüsse im Untersuchungszeitraum festgestellt werden. Somit kann zusammengefasst festgestellt werden, dass die detektierten Senkungen und Bodenbewegungen außerhalb des prognostizierten Einwirkungsbereiches als wahrscheinlich bergbaubedingt bezeichnet werden können. Eine räumliche Begrenzung dieser Senkungen lässt sich durch die 10 mm-Senkungslinie in ihrem Verlauf außerhalb des prognostizierten Einwirkungsbereiches angeben.

Die für den Zeitraum 1.1.2009 bis 31.12.2030 auf Grundlage der Soll-Abbaue und einer Signifikanzanalyse berechnete 1 mm-Senkungslinie (als Mittelwert aus verschiedenen statistischen Realisierungen) weist lediglich in zwei Bereichen einen Verlauf außerhalb der prognostizierten Einwirkungsgrenze des Rahmenbetriebsplans mit einem Abstand von maximal 180 m auf (Abbildung 85). Diese befinden sich im Bereich Mettingen und im Bereich Ibbenbüren-Laggenbeck. Dieser Verlauf der vorausberechneten 1 mm-Senkungslinie könnte ein weiteres Indiz für die wahrscheinliche bergbauliche Ursache der in diesen Gebieten radarinterferometrisch festgestellten Höhenänderungen sein. In allen anderen Bereichen ist die, aus den Soll-Abbaue ermittelte 1 mm-Senkungslinie mit der prognostizierten Einwirkungsgrenze weitgehend identisch oder liegt innerhalb

dieser Grenze (in einigen Bereichen mit einem Maximum von kleiner gleich 500 m). Dabei muss jedoch berücksichtigt werden, dass bei der Berechnung der prognostizierten Einwirkungsgrenze durch die Firma 4GIS nicht das gesamte Baufeld Beustfeld einbezogen werden konnte, da diese Daten nicht zur Verfügung standen. Somit konnte nur ein direkter Vergleich mit der von der RAG berechneten Einwirkungsgrenze aus den geplanten Bauhöhen erfolgen. Zur Berechnung der theoretischen Senkungen wurde, aufgrund von Messdaten aus RAG-Beobachtungslinien, ein Zeitfaktor von etwa $c = 4,1 \text{ a}^{-1}$ ermittelt. Der vom Bergwerk Ibbenbüren verwendete Grenzwinkel $\gamma = 50 \text{ gon}$ erwies sich im Randbereich des Einwirkungsbereiches am geeignetsten (trotz der weiterhin großen Abweichungen), wie Untersuchungen entlang von Profilen mit den radarinterferometrischen Messungen ergaben. Für den inneren Bereich der gesamten Senkungsmulde wurde ein mittlerer Grenzwinkel von $\gamma = 76 \text{ gon}$ ermittelt.

Eine Nachberechnung der auf Grundlage der bis Februar 2015 tatsächlich erfolgten Abbaue, den für die Berechnungen angenommen Parametern $c = 4,1 \text{ a}^{-1}$ (Zeitfaktor), $a = 0,95$ (Abbaufaktor) und $\gamma = 50 \text{ gon}$ bzw. 76 gon (Grenzwinkel), zeigt in fast allen Bereichen den Verlauf der 1 mm-Senkungslinie innerhalb der prognostizierten Einwirkungsgrenze. Nur im Bereich Ibbenbüren-Lagenbeck verläuft die mit dem Grenzwinkel 50 gon berechnete 1 mm-Senkungslinie leicht außerhalb der prognostizierten Nulllinie.

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass entsprechend der statistischen Bewertung der Signifikanz der vorausberechneten Nulllinie direkte bergbaubedingte Bodenbewegungen außerhalb des prognostizierten Einwirkungsbereiches nicht ausgeschlossen sind, jedoch anhand der Modellrechnungen nur bis ca. 370 m außerhalb des EW-Bereiches begründbar sind.

Die Analyse der Bergschadensrelevanz außerhalb der prognostizierten Einwirkungsgrenze festgestellten Senkungen lässt keinerlei Bergschäden erwarten.

12. SCHRIFTENVERZEICHNIS

12.1. Literatur

AVERSHIN, S. G. (1954): Gornyje raboty pod sooruzheniami i wodoemami, Ugletiechzdat, Moskwa.

BEZREG (1998): *Richtlinien für die Ausführung des Leitnivelements im Bezirk des Landesoberbergamtes Nordrhein-Westfalen*. Herausgegeben vom Landesoberbergamt NRW und Landesvermessungsamt NRW am 23.12.1998.

BOJE, R., GSTIRNER, W., SCHULER, D. & SPATA, M. (2008): *Leitnivelements in Bodenbewegungsgebieten des Bergbaus - eine langjährige Kernaufgabe der Landesvermessung in Nordrhein-Westfalen*. – NÖV NRW 3/2008: 33-42, 6 Abb., 2 Tab.; Düsseldorf.

BUDRYK, W. & KNOTHE, S. (1950): *Einfluss des Untertage-Abbaus auf die Erdoberfläche vom Gesichtspunkt der Sicherung der Objekte (Gebäude)*. Przegląd Gorniczy, Bd. VI, 1950, Nr 10, S. 554-557.

BÄSSLER, R. (1968): *Hydrogeologie und Grundwassernutzung im zentralen Bereich des Schafberges bei Ibbenbüren/Westfalen*. – Keller-Festschrift, Beih. Ber. Naturh. Ges., 5: 93-108, 7 Abb.; Hannover.

BÄSSLER, R. (1970): *Hydrogeologische, chemische und Isotopenuntersuchungen der Grubenwässer des Ibbenbürener Steinkohlenreviers*. – Z. deutsch. geol. Ges., Sonderh. Hydrogeol. Hydrogeochem.; 209-286, 28 Abb., 1 Tab.-Anh., Hannover.

BALDSCHUHN, R. & KOCKEL, F. (1999): *Das Osning-Lineament am Südrand des Niedersachsen-Beckens*. – Z. dt. geol. Ges., 150(4): 673-695, 15 Abb., Stuttgart.

BERGWERK AUGUSTE VICTORIA (2015): *Bergwerk Auguste Victoria – Analyse von Senkungserscheinungen außerhalb des prognostizierten Einwirkungsbereiches*. Gutachten des Instituts für Geotechnik und Markscheidewesen der TU Clausthal vom 15.10.2015; erstellt im Auftrag der Bezirksregierung Arnsberg, Abteilung Bergbau und Energie in NRW (Vergabe-Nr. 12.21-90-13-166) durch W. Busch, D. Walter, F. Xi, X. Yin, W. G. Coldewey, D. Wesche, R. Hejmanowski, A. A. Malinowska, A. Kwinta und W. T. Witkowski.

BUSCH, W. & LINKE, J. (2014): *Räumliche Höhenänderungsanalyse auf Grundlage einer automatisierten Ausgleichung massenhaft vorliegender PSI-Zeitreihen mittels Orthogonaler Polynome*. In: AVN Allgemeine Vermessungs-Nachrichten 121 (2014), Heft 8/9, S. 298-310.

BUSCH, W., PEREZ, S. R., ENGEL, T. & LINKE, J. (2015): *Automatisierte Integration von sich zeitlich überlappenden PSI-Zeitreihen*. In: Tagungsband Bergbau, Energie und Rohstoffe 2015, 7.-9. Oktober 2015, Freiberg, Wagner Digitaldruck, Nossen, S. 196-208.

COLDEWEY, W.G., KRUSE, B. & BANNING, A. (2007): *Hydrologische, hydrogeologische und geologische Voruntersuchungen im Bockradener Graben sowie Empfehlungen für ein Wasserhaushaltsmonitoring zum Rahmenbetriebsplan 2009-2020*. - Gutachten im Auftrag der DSK-Anthrazit Ibbenbüren GmbH: 23 S., 3 Abb., 1 Tab., 6 Anl.; Münster.

CRAMER, W. (1940): *Anfänge des Kohlen- und Eisenerzbaues und der Industrie bei Ibbenbüren*. - Archiv für Landes- und Volkskunde von Niedersachsen, Bd. 3: 117-130; Oldenburg.

CREMER & MEßER (2010): *Messdatenauswertung – Datenanalyse mit dem Wiener-Filter.* – wwt-Special, 04/2010: 18-21, 8 Abb., München (Huss-Verlag).

DEUTSCHER WETTERDIENST (2015): *WESTE Wetterdaten und -statistiken express.* – Niederschlagshöhen der Wetterstation Hörstel im Zeitraum 01.01.2009 bis 01.03.2015, Erstelldatum: 28.10.2015; Offenbach (DWD).

DE WAAL, J. A., ROEST, J.P.A., FOKKER, P.A., KROON2, I.C., BREUNESSE, J.N., MUNTENDAM-BOS, A.G., OOST, A.P. & VAN WIRDUM, G. (2012): *The effective subsidence capacity concept: How to assure that subsidence in the Wadden Sea remains within defined limits?* Netherlands Journal of Geosciences — Geologie en Mijnbouw 91 – 3, S. 385 – 399, 2012.

DEUTSCHER WETTERDIENST (2015): *WESTE Wetterdaten und -statistiken express.* – Niederschlagshöhen der Wetterstation Hörstel im Zeitraum 01.01.2009 bis 01.03.2015, Erstelldatum: 28.10.2015; Offenbach (DWD).

DIN 18130-1 (1998): *Baugrund, Untersuchung von Bodenproben - Bestimmung des Wasserdurchlässigkeitsbeiwerts - Teil 1: Laborversuche.* – 20 S., 11 Abb., 11 Tab.; Berlin (Beuth).

DOMALSKI, R.F. (1988): *Bergmännische Wasserwirtschaft der Steinkohlenbergwerke Preussag AG Kohle/Ibbenbüren und Gewerkschaft Sophia-Jacoba/Hückelhoven – Ein Vergleich –.* – Mitteilungen der Westfälischen Berggewerkschaftskasse, H. 60: 174 S., 12 Abb., 18 Tab. + 40 Tab. im Anh., 48 Anl.; Bochum (WBK).

DROZDZEWSKI, G. (1985): *Tiefentektonik der Ibbenbürener Karbonscholle.* - Beiträge zur Tiefentektonik westdeutscher Steinkohlenlagerstätten: Tafel 27.; Krefeld (GLA).

DROZDZEWSKI, G. (2003): *Geologische Entwicklung und tektonischer Bau.* – In: GD NRW (2003): *Geologie im Weser- und Osnabrücker Bergland.* – 16-30, 6 Abb.; Krefeld.

DSK ANTHRAZIT IBBENBÜREN GMBH (2007): *Kurzcharakteristik des Untersuchungsraumes.* – In: Umweltverträglichkeitsuntersuchung zum Rahmenbetriebsplan 2009 – 2020, Kap. 5.1: 9 S., 1 Abb.; Ibbenbüren.

EBERT, A. (1954): *Geologie der Ibbenbürener Karbonscholle.* - Beih. Geol. Jb., 14: 11 S., 23 Abb., 6 Taf., 2 Tab.; Hannover.

EHRHARDT, W. & SAUER, A. (1961): *Die Vorausberechnung von Senkung, Schiefelage und Krümmung über dem Abbau in flacher Lagerung.* Bergbauwissenschaften 8 (1961), Heft 18.

ENGEL, T. & BUSCH, W. (2015): *Nächste-Nachbar-Strategie zur Bestimmung von identen Persistent Scatterern aus sich zeitlich und räumlich überlappenden PSI-Auswertungen.* In: Tagungsband GeoMonitoring 2015, (Hrsg: Busch, W., Knospe), GeoMonitoring Tagung, 5. bis 6. März 2015, Clausthal-Zellerfeld, S. 105 – 121.

FRICKE, K. (1954): *Die Lagerstätten und ihre Bewirtschaftung, 3. Abteilung: Die Unterirdischen Lagerstätten.* – Niedersächsisches Amt für Landesplanung und Statistik [Hrsg.]: *Geologie und Lagerstätten Niedersachsens*, Reihe A 1, Band 5, 3. Abteilung: 187 S., 26 Abb.; Bremen-Horn (Walter Dorn Verlag).

GILLES, K.-P. (1982): *Untersuchungen über Einflüsse des Abbaugeschehens auf die Kinematik der Bodenbewegungskomponenten beim konzentrierten Abbau flachgelagerter Lagerstättenbereiche im westlichen Ruhrkarbon.* Dissertation, RWTH Aachen, 1982.

GOERKE-MALLET, P. (2000): *Untersuchungen zu raumbedeutsamen Entwicklungen im Steinkohlenrevier Ibbenbüren unter besonderer Berücksichtigung von Wechselwirkungen von Bergbau und Hydrologie*. - 226 S., 92 Abb., 25 Tab.; Aachen (Verlag Mainz).

GOERKE-MALLET, P. (2015): Persönliches Gespräch am 19.10.2015 über die geologischen, hydrogeologischen und wasserwirtschaftlichen Bedingungen im Steinkohlenrevier Ibbenbüren. – Münster.

HÄDICKE, M. (1972): *Titelblatt 1 (Blatt 1) des Bergmännischen Risswerks der Steinkohlenbergwerke Ibbenbüren*. Inhalt: Geologische Übersicht, Hauptschichtenschnitt, Chronik, Topographische Übersicht und Blatteinteilung. Angefertigt im Februar 1972, unterzeichnet von Markscheider Manfred Hädicke, Nachtragsstand von 1/99, Behördenausfertigung.

HANSSEN, R. F. (2001): *Radar Interferometry: Data Interpretation and Error Analysis*. Remote Sensing and Digital Image Processing. Kluwer Academic Publisher, Dordrecht, Boston, London.

HEITMANN, ST., HOVEKAMP, A., KLEIN, W., MENGEDE, ST., MUSIEDLAK, J. (2012): *Die Ermittlung von Bodenbewegungsgebieten in Nordrhein-Westfalen*. In: NÖV 2/2012, S. 24-27, Ministerium für Inneres und Kommunales des Landes Nordrhein-Westfalen, Düsseldorf.

KELLER (1953): *Der Schafberg bei Ibbenbüren und sein Verhältnis zur Osningtektonik*. – Geotekt. Forschungshefte, 9/10: 100-115, 7 Abb., 1 Tab., Stuttgart.

KNOTHE, S. (1953): Równanie profili ostatecznie wykształconej niecki osiadania (polnisch). *Gleichung der Profile einer endgültig gebildeten Senkungsmulde*. Archives of Mining Sciences H1, S. 50-62.

KNOTHE, S. (2005): *Asymmetric function of distribution of mining exploitation influences in the medium with changing properties*. Archives of Mining Sciences, vol. 50, Issue 4, S. 401-415.

KOWALSKI, A. (1985): Zmienność parametru zasięgu wpływów głównych w górotworze (polnisch). Über die Variabilität des Einwirkungswinkels im Gebirge. Ochrona Terenów Górniczych Nr 72/2, S. 17-23.

KRATZSCH, H. (1994): *Geringe Bergschäden durch langsamen Abbau?* Das Markscheidewesen, Nr. 3, 1994.

KRATZSCH, H. (1997): *Bergschadenkunde*. 2. Auflage: 844 S.; Deutscher Markscheider-Verein e.V., Bochum. - ISBN 3-00-001661-9.

KUNZ, J., CLOSTERMANN, M., SCHANZ, T. & HEIMER, S. (2014): *Untertägige Bauwerke unter Gebirgsbewegung – ein Herausforderung an die konstruktive Durchbildung*. – Bergbau, 65(11): 486-490, 9 Abb; Essen (Ring Deutscher Bergingenieure e.V.).

KWIATEK J. (2007): Bauobjekte in Bergbaugebieten. (Obiekty budowlane na terenach górniczych.) – polnisch. Wydaw. GIG. Wydanie II, Katowice 2007

KWINTA, A. (2010): *Application of the least squares method in determination of the Knothe deformation prediction theory parameters*. Archives of Mining Sciences, Vol. 56, Issue 2, Kraków str. 319-329.

LEISTUNGSBESCHREIBUNG (2014): Leistungsbeschreibung mit Karten (Anlage 2). Vergabeunterlagen: Gutachterliche Stellungnahme zum Thema „Analyse von Senkungserscheinungen außerhalb prognostizierter Einwirkungsbereiche aktiver und in jüngerer Zeit stillgelegter Steinkohlbergwerke der RAG AG“, Vergabe-Nr. 12.21-90-13-166, Bezirksregierung Arnsberg, Abteilung Bergbau und Energie in NRW.

LOTZE, F., SEMMLER, W., KÖTTER, K. & MAUSOLF, F. (1962): *Hydrogeologie des Westteils der Ibbenbürener Karbonscholle*. – Forschungsberichte des Landes Nordrhein-Westfalen, Nr. 999: 113 S., 45 Abb., 8 Tab.; Köln und Opladen (Westdeutscher Verlag).

NAWORYTA, W. (2004): *Gebirgskinematische Analyse unter Nutzung der Räumlichen Statistik*. Dissertation. TU Bergakademie Freiberg.

OBERMANN, P. (1968): *Hydrologische Karte des Ibbenbürener Steinkohlenbezirks, Maßstab 1:10 000*. – Westfälische Berggewerkschaftskassen zu Bochum [Hrsg.]: Erläuterungen zum Blatt Mettingen, Nr. 33: 72 S., 4 Abb., 8 Tab.; Bochum.

POHL, F. W. (2002): *Beurteilung von Bauwerken hinsichtlich ihrer bautechnischen Empfindlichkeit gegenüber bergbauinduzierten Bodenbewegungen an der Tagesoberfläche des Ruhrreviers*. Dissertation. TU Bergakademie Freiberg. Verlag Glückauf GmbH. Essen.

RADEMACHER, K. (2012): *RAG Anthrazit Ibbenbüren GmbH - Wasserwirtschaftsbericht 2012 zum Rahmenbetriebsplan 2009-2018*. – Gutachten der Ingenieurgruppe Schmelzer: 67 S., 44 Abb., 4 Tab., 8 Anl.; Ibbenbüren.

RADEMACHER, K., NIEHAUS, S. & VETTERICK, S. (2013): *RAG Anthrazit Ibbenbüren GmbH – Wasserwirtschaftsbericht 2013 zum Rahmenbetriebsplan 2009-2018*. – Gutachten der Ingenieurgruppe Schmelzer: 75 S., 50 Abb., 4 Tab., 8 Anl.; Ibbenbüren.

RADEMACHER, K., NIEHAUS, S. & VETTERICK, S. (2014): *RAG Anthrazit Ibbenbüren GmbH – Wasserwirtschaftsbericht 2014 zum Rahmenbetriebsplan 2009-2018*. – Gutachten der Ingenieurgruppe Schmelzer: 71 S., 50 Abb., 4 Tab., 9 Anl.; Ibbenbüren.

RAG AG (2014): *Konzept zur langfristigen Optimierung der Grubenwasserhaltung der RAG Aktiengesellschaft für Nordrhein-Westfalen gemäß §4 Erblastenvertrag zur Bewältigung der Ewigkeitslasten des Steinkohlenbergbaus der RAG AG im Rahmen der sozialverträglichen Beendigung des subventionierten Steinkohlenbergbaus in Deutschland vom 14.08.2007*. – 29 S., 8 Abb., 1 Tab.; Herne (RAG AG).

RAG ANTHRAZIT IBBENBÜREN GMBH (2015): *Wassergewinnung im Schacht Bockraden ab 2009*. – Persönliche Mitteilung von Markscheider H.-D. Pollmann vom 11.12.2015.

RÖMHILD, G. (1974): *Die Forst- und Industrielandschaft des Dickenberger Bergbaubezirkes bei Ibbenbüren. Wandel und räumliche Differenzierung unter besonderer Berücksichtigung berg- und steinwirtschaftlicher Zustände sowie raumordnerischer Maßnahmen*. – Diss. Univ. Münster: 341 S., 43 Abb., 43 Kt.; Münster.

RÖMHILD, G. (1976): *Der Ibbenbürener Steinkohlenbezirk*. – Geographische Rundschau, 28(11): 445-453; Braunschweig.

RÖHRS, H. (1987): *Der frühe Erzbergbau und die Hüttenindustrie im Tecklenburger Land*. – 2. Aufl.: 134 S., 89 Abb., 5 Tab., 10 Anl.; Ibbenbüren.

SROKA, A. (1993): *Zum Problem der Abbaugeschwindigkeit aus bergschadenkundlicher Sicht*. Polnische Akademie der Wissenschaften. Krakow, 1993.

THIERMANN, A. (1975): *Zur Geologie der Erdfälle des „Heiligen Feldes“ im Tecklenburger Land/Westfalen*. – Mitt. Geol.-Paläont. Inst. Univ. Hamburg, 44: 517-530, 8 Abb.; Hamburg.

THIERMANN, A. & KOCH, M. (1987): *Geologische Karte von Nordrhein-Westfalen 1:100 000 - Erläuterungen zu Blatt Rheine C 3910*. – 68 S., 14 Abb., 2 Tab.; Krefeld (GLA NRW).

THIERMANN, A., mit Beitr. von BRAUN, F.J., KALTERHERBERG, J., REHAGEN, H.-W., SUCHAN, K.H., WILL, K.-H. & WOLBURG, J. (1975): *Geologische Karte von Nordrhein-Westfalen 1:25 000 – Erläuterungen zu Blatt 3611 Hopsten*. – 214 S., 21 Abb., 9 Tab., 5 Taf.; Krefeld.

THIERMANN, A., mit Beitr. von DUBBER, H.-J., KALTERHERBERG, J., REHAGEN, H.-J. & SUCHAN, K.H. (1980): *Geologische Karte von Nordrhein-Westfalen 1:25 000 - Erläuterungen zu Blatt 3612 Mettingen*. – 200 S., 23 Abb., 12 Tab., 2 Taf.; Krefeld.

WALTER, D. (2012): *Systematische Einflüsse digitaler Höhenmodelle auf die Qualität radarinterferometrischer Bodenbewegungsmessungen*. Dissertation, TU Clausthal, Papierflieger Verlag GmbH, Clausthal-Zellerfeld, ISBN 978-3-86948-224-8, 2012.

WEHR, M. (2009): *RAG Anthrazit Ibbenbüren GmbH – Wasserwirtschaftsbericht 2009 zum Rahmenbetriebsplan 2009-2018*. – Gutachten der Ingenieurgruppe Schmelzer: 21 S., 13 Abb., 3 Tab., 4 Anl.; Ibbenbüren.

WEHR, M. (2010): *RAG Anthrazit Ibbenbüren GmbH – Wasserwirtschaftsbericht 2010 zum Rahmenbetriebsplan 2009-2018*. – Gutachten der Ingenieurgruppe Schmelzer: 39 S., 21 Abb., 2 Tab., 4 Anl.; Ibbenbüren.

WEHR, M. (2011): *RAG Anthrazit Ibbenbüren GmbH – Wasserwirtschaftsbericht 2011 zum Rahmenbetriebsplan 2009-2018*. – Gutachten der Ingenieurgruppe Schmelzer: 70 S., 43 Abb., 6 Tab., 10 Anl.; Ibbenbüren.

WEGNER, Th. (1913): *Der Erdfall bei Hopsten vom 14. April 1913*. – Petermanns Geogr. Mitteilungen, 59(2): 69-71, 2 Abb., 1 Kt.; Gotha (Justus Perthes).

WOLTERS, R., THOME, K. & MEINICKE, K. (1958): *Gutachten des Geologischen Landesamtes Nordrhein-Westfalen über die Baugrundverhältnisse im Bereich des geplanten Flugplatzes Hopsten*. – Ber. Arch. Geol. L.-Amt, 25 S., 11 Anl.; Krefeld. – [unveröff., zitiert in THIERMANN 1975]

XI, F., BUSCH, W. & ZHANG, C. (2015): *Multikriterielle Clusteranalysen zur Detektion von Ausreißern in flächenhaft vorliegenden PSI-Ergebnissen zur Bestimmung von Bodenbewegungen*. In: Tagungsband Bergbau, Energie und Rohstoffe 2015, 7.-9. Oktober 2015, Freiberg, Wagner Digitaldruck, Nossen, S. 209-220.

YIN, X., BUSCH, W. & WALTER, D. (2015): *Detektion von sprunghaften Messwertänderungen in PSI-Zeitreihen zur Bestimmung von Bodenbewegungen*. In: Tagungsband Bergbau, Energie und Rohstoffe 2015, 7.-9. Oktober 2015, Freiberg, Wagner Digitaldruck, Nossen, S. 181-195.

12.2. Karten

LANDESAMT FÜR NATUR, UMWELT UND VERBRAUCHERSCHUTZ NORDRHEIN- WESTFALEN (2012): *Geplante und festgesetzte Trinkwasserschutzgebiete und Heilquellenschutzgebiete in Nordrhein- Westfalen*. – Stand: 23.10.2012; Düsseldorf (LANUV) – [online abrufbar unter: http://www.lanuv.nrw.de/fileadmin/lanuv/wasser/pdf/uebersichtskarte_300%20000_23_10_2012.pdf, zuletzt abgerufen am 06.11.2015].

BUNDESANSTALT FÜR GEOWISSENSCHAFTEN UND ROHSTOFFE (2007): *Geologische Übersichtskarte der Bundesrepublik Deutschland 1:200.000 (GÜK200) - CC 3910 Bielefeld; Hannover (BGR)*. – [Online abrufbar unter: <https://produktcenter.bgr.de/terraCatalog/DetailResult.do?fileIdentifier=C3CFBA70-9306-4255-8ADE-3A33EA56BCAA>, zuletzt abgerufen am 12.08.2015].

13. ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS

AdV	Arbeitsgemeinschaft der Vermessungsverwaltungen
ALK	Automatisierte Liegenschaftskarte
AP	Arbeitspaket
ASAR	Advanced Synthetic Aperture Radar
ATKIS	Amtliche Topographisch-Kartographische Informationssystem
BBergG	Bundesberggesetz
BH	Bauhöhen
BID	Bürgerinformationsdienst der RAG
BK	Bodenkarte
BRA	Bezirksregierung Arnsberg
BW	Bergwerk
CSA	Canadian Space Agency
DABO	Datenbank Aufschlüsse und Bohrungen
DGK	Deutsche Grundkarte
DGPS	Differential Global Positioning System
DHDN	Deutsches Hauptdreiecksnetz
DHM	Digitales Höhenmodell
DLM	Digitales Landschaftsmodell
DOM 1L	Digitales Oberflächenmodell 1m Laser
DOP	Digitales Orthophoto
DTK	Digitale Topographische Karte
DWD	Deutscher Wetterdienst
E	Osten
ELWAS	Elektronisches wasserwirtschaftliches Verbundsystem für die Wasserwirtschaftsverwaltung in NRW
ENVISAT	Environmental Satellite
ESA	European Space Agency (Europäische Raumfahrtagentur)
ETRS	European Terrestrial Reference System
EW	Einwirkungs- (z. B. EW-Bereich)
GD	Geologischer Dienst NRW
GHÄ	Gesamthöhenänderung
GOK	Geländeoberkante
GPS	Global Positioning System
GW	Grundwasser
GWM	Grundwassermessstelle
HK	Hydrogeologische Karte
HÜK	Hydrogeologische Übersichtskarte
IBB	Bergwerk Ibbenbüren
IDW	Inverse Distance Weighting (Inverse Distanzwichtung)
IGMC	Institut für Geotechnik und Markscheidewesen der TU Clausthal
InSAR	Interferometric Synthetic Aperture Radar
IS	Informationssystem
KvF	Künstlich veränderte Flächen
LANUV	Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz NRW

Leitniv	Leitnivellement
LOBA	Landesoberbergamt NRW, Dortmund (heute: BRA)
LOS	Line of Sight (Blickrichtung)
LVermA	Landesvermessungsamt NRW (heute: Geobasis NRW der Bezirksregierung Köln)
MDA	McDonald Dettwiler and Associates Ltd., Richmond, Kanada
MUNLV	Ministerium für Klimaschutz, Umwelt, Landwirtschaft, Natur- und Verbraucherschutz des Landes NRW
N	Norden
NHN	Normalhöhennull
Niv	Nivellement
NN	Normalnull
NRW	Nordrhein-Westfalen
PS	Persistent Scatterer
PSI	Persistent Scatterer Interferometrie
RAG	RAG Aktiengesellschaft, Herne
RBP	Rahmenbetriebsplan
RK	Rohstoffkarte
RÜK	Rohstoffübersichtskarte
S	Süden
SATÖB	System zur Auskunft über Tagesöffnungen des Bergbaus
TK	Topographische Karte
W	Westen
WMS	Web Map Service

ANHANG A1 – ÜBERSICHT BEREITGESTELLTER BASIS- UND FACHDATEN FÜR DAS BERGWERK IBBENBÜREN

Im Folgenden sind die von den jeweiligen Behörden, Verwaltungen und Unternehmen bereitgestellten Basis- und Fachdaten aufgelistet. Datensätze, die für das gesamte Ruhrgebiet geliefert wurden, jedoch keine entsprechenden Informationen bzw. Angaben für den Untersuchungsraum (Tabelle 1) enthielten, wurden mit dem Kürzel k. A. und grauer Schriftfarbe gekennzeichnet. Daten, die angefordert wurden, jedoch nicht lieferbar oder bei der angefragten Stelle nicht vorhanden oder bekannt waren, sind mit dem Kürzel n. v. und grauer Schriftfarbe markiert.

Bezirksregierung Arnsberg - Abteilung Bergbau und Energie in NRW, Dezernat 65

- Prognostizierter EW-Bereich des Rahmenbetriebsplan des BW IBB +1000 m Zone
- Zeitschnitte Geobasis NRW Bodenbewegungsgebiet Ibbenbüren 2007 - 2011
- Berechtsame aktiver Steinkohlenbergwerke
- Unter Bergaufsicht befindliche betriebliche Flächen
- Bekannter tages- und oberflächennaher Bergbau (generalisiert)
- Bekannte Tagesöffnungen (stillgelegte & in Betrieb befindliche)
- Auszug aus der SATÖB-Datenbank (unzureichend gesicherte Schächte)
- Bekannte Tagesbrüche
- Titelblatt 1 (Blatt 1) des Bergmännischen Risswerks vom BW Ibbenbüren; Angefertigt im Februar 1972 mit Nachtragsstand von 1/99 (HÄDICKE 1972)
- Soll-Abbaudaten des IBB-Rahmenbetriebsplans 1.1.2009 – 31.12.2018 (inkl. Zusatzinfos)
- Wasserwirtschaftsberichte 2009 – 2014 als Statusberichte zum RBP 2009-2018 inkl. Anlagen; erstellt durch die Firma „SCHMELZER – Die Ingenieure“, Ibbenbüren (jährlich) (Wehr 2009, 2010, 2011; Rademacher 2012; Rademacher et al. 2013, 2014)

Bezirksregierung Köln, Geobasis NRW (Abteilung 7)

- Leitnivellement Ibbenbüren (1949 - 2011)
- Digitales Oberflächenmodell DOM 1L (First-Pulse-Laser-Rohdaten + Aufgefüllte Wasserflächen)

Geologischer Dienst NRW, Krefeld

- DABO-Bohrungskopfdaten
- Informationssystem Rohstoffkarte 1:50.000 (IS RK 50)
- Tektonische Störungen der Oberkreide
- Künstlich veränderte Flächen von 2005 (nicht verifiziert!)

RAG AG (Herne) und RAG Anthrazit Ibbenbüren GmbH

- Bergwerksgrenze des Bergwerks IBB
- Baufelder des BW IBB
- Bekannte Unstetigkeiten an der Tagesoberfläche
- Tektonik an der Tagesoberfläche
- Übersichtsriß Flöz 54 inkl. Tektonik
- Informationen zur Wasserhaltung im Westfeld des BW Ibbenbüren
- Umweltverträglichkeitsuntersuchung zum Rahmenbetriebsplan 2009 – 2020 der DSK Anthrazit Ibbenbüren GmbH
- Grundwasserstandsmessungen für den gesamten Untersuchungsraum (86 Messstellen)

Abbaudaten und Vorausberechnungsdaten:

- Abbaubereiche (<1800 – 1976 Ostfeld, <1600 – 1979 Westfeld) → Früher gebaute Flöze im oberen Lagerstättenabschnitt
- Ist-Abbaudaten 1972 – 2015 (inkl. aller vorhandenen Abbauinformationen z. B. Abbauflächen, Höhenpunkte, Mächtigkeiten, Strebstände (monatlich ab 2013), Abbaurichtungen, Begleitstrecken, etc.)
- Modellparameter der Nachberechnungen 1972 – 2015

Vermessungsdaten:

(Lfd. Nr. entsprechend der Bereitstellung der Daten durch die RAG AG)

Beobachtungslinien (durch TUC teilweise aufbereitet):

- **Lfd. Nr. 1.1:** Beobachtungslinie „Anschlussmessung Bischofstraße HB415/Mettingen“ (Höhen, 03/1982 – 09/2014, 69 Messungen, 2-3mal pro Jahr) → ab 01/1999 aufbereitet
- **Lfd. Nr. 1.2:** Beobachtungslinie „Anschlussmessung St. Agatha Kirche HB127/Mettingen“ (Höhen, 10/1980 – 09/2014, 67 Messungen, 1-3mal im Jahr) → ab 01/1999 aufbereitet
- Beobachtungslinien „Einwirkungsbereich RBP 2000 – 2015“ (6 Messlinien, Höhen) → ab 12/2000 bis 01/2001 aufbereitet
 - **Lfd. Nr. 2.1:** Linie „Berentelgweg/Mettingen“ (12/2000 – 9/2014, 33 Messungen)
 - **Lfd. Nr. 2.2:** Linie „Wetkampstraße/Ibbenbüren“ (12/2000 – 2/2009, 9 Messungen)
 - **Lfd. Nr. 2.3:** Linie „Osnabrücker Straße/Ibbenbüren“ (10/2000 – 9/2014, 17 Messungen)
 - **Lfd. Nr. 2.4:** Linie „Mettebrink/Ibbenbüren-Laggenbeck“ (11/2000 – 8/2014, 23 Messungen)
 - **Lfd. Nr. 2.5:** Linie „Mühlenweg/Westerkappeln“ (12/2000 – 2/2008, 8 Messungen)

- **Lfd. Nr. 2.6:** Linie „Am Stern/Westerkappeln“ (12/2000 – 2/2008, 8 Messungen)
- Beobachtungslinien „Gasleitungen“ nach §125 BBergG (6 Messlinien, Höhen, Einmessung 2-4mal im Jahr) → ab Anfang 1999 aufbereitet
 - **Lfd. Nr. 3.1:** Linie Bergstraße/Mettingen (07/1987 – 09/2014, 79 Messungen)
 - **Lfd. Nr. 3.2:** Linie Am Lütken Esch/Mettingen (07/1987 – 02/2014, 78 Messungen)
 - **Lfd. Nr. 3.3:** Linie Ibbenbürener Straße/Mettingen (04/1989 bzw. 05/1992 – 09/2014, 72 Messungen)
 - **Lfd. Nr. 3.4:** Linie Am Toschlag/Mettingen (07/1987 – 02/2014, 77 Messungen)
 - **Lfd. Nr. 3.5:** Linie Westeresch/Mettingen (07/1987 – 02/2014, 77 Messungen)
 - **Lfd. Nr. 3.6:** Linie Schleppbahn/Ibbenbüren-Laggenbeck (05/1993 – 08/2014, 55 Messungen)
- Beobachtungslinien „Ibbenbüren – Laggenbeck – Osterfedde“ (Höhen, 1mal pro Jahr) → komplett aufbereitet
 - **Lfd. Nr. 9.1:** Linie „HB 6 - HB 914 - HB 319 Ibbenbüren-Laggenbeck“ (06/2013 – 07/2014, 2 Messungen)
 - **Lfd. Nr. 9.2:** Linie „HB 901 Dörnebrink – HB 243 Laggenbeck“ (06/2013 – 08/2014, 2 Messungen)
 - **Lfd. Nr. 9.3:** Linie „Mettinger Straße/Ibbenbüren-Laggenbeck“ (06/2013 – 07/2014, 2 Messungen)
- Beobachtungslinie „Beustfeld Nord-Süd“ (Höhen, 11/2011 – 09/2015, halbjährlich)
- Beobachtungslinie „Beustfeld West-Ost“ (Höhen, 11/2011 – 09/2015, halbjährlich)

Beobachtungslinie (nicht aufbereitet):

- **Lfd. Nr. 8.1-8.7:** Beobachtungslinien „Erweiterter Betrachtungsraum des RBP 2009 – 2018“ (Höhen, 7 Messlinien, aktuell nur Nullmessungen aus 09/2014)

Beobachtungspunkte (durch TUC vollständig aufbereitet):

- GPS-Beobachtungspunkte „Einwirkungsbereich RBP 2009 – 2018“ (Höhe + Lage)
 - **Lfd. Nr. 4.0:** Nullrandmessungen (03/2009 – 5/2012 jährlich, danach halbjährlich bis 11/2014, 9 Messungen, 13 GPS-Punkte)
 - **Lfd. Nr. 5.0** Senkungsschwerpunkte (03/2009 – 04/2014, jährlich, 7 Messungen, 3 Gebiete „Schlickelder Str./Ibbenbüren“, „Leischultenliet/Mettingen“, „Tannenkamp/Mettingen“)
- **Lfd. Nr. 7.0:** GPS-Beobachtungspunkte „Siedlung Nießingskamp/Mettingen“ (Höhe + Lage, GPS- und Tachymetermessungen 06/2008 – 11/2014, halbjährlich, 14 Messungen)
- GPS-Punkte Beustfeld (Höhe + Lage, 11/2011 – 04/2014, halbjährlich)

Beobachtungspunkte (nicht aufbereitet):

- **Lfd. Nr. 6.0:** GPS-Beobachtungspunkt „Bockradener Schacht/Ibbenbüren“ (Höhe + Lage, 01/2012 – 02/2015, 38 Messungen an einem Punkt, ca. 9-16mal pro Jahr)
- Beobachtungspunkte an Objekten nach §125 BBergG (3 Objekte, Höhen + Längen, 2mal pro Jahr)
 - **Lfd. Nr. 3.7:** St.Agatha Kirche/Mettingen (4 Messpunkte, 08/2002 – 11/2014, 26 Messungen)
 - **Lfd. Nr. 3.8:** Evangelische Kirche/Mettingen (4 Messpunkte, 08/2002 – 11/2014, 26 Messungen)
 - **Lfd. Nr. 3.9:** Barbara-Schule/Mettingen (5 Messpunkte, 08/2002 – 11/2014, 26 Messungen)

Kreis Steinfurt

- Nicht nach Bergrecht genehmigte Steine- und Erden-Gewinnungsbetriebe mit Zuständigkeit des Kreises inklusive der genehmigten Abbauflächen
- Höhenmessungen (n. v.)

Stadt Recke

- Altablagerungen und Altstandorte im Bereich der Stadt Recke (Stand: 14.12.1990)
- Höhenmessungen (n. v.)

Stadt Ibbenbüren

- Höhenmessungen (n. v.)
- Künstliche Aufschüttungsflächen (n. v.)

Stadt Mettingen

- Kanal-Kataster Bestandshöhen (unbrauchbar, da keine Höhenzeitfolgedaten verfügbar)

Stadt Tecklenburg

- Höhenmessungen (n. v.)
- Künstliche Aufschüttungsflächen (n. v.)

Stadt Westerkappeln

- Höhenmessungen (n. v.)
- Künstliche Aufschüttungsflächen (n. v.)

Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz NRW (LANUV)

- Grundwasserstandsmessungen für den gesamten Untersuchungsraum (40 Messstellen)

ANHANG A2 – ÜBERSICHTEN ZU DEN GELIEFERTEN RADARSZENEN

In den folgenden Tabellen sind die beschafften Radarsatellitendaten bzw. Radarszenen aufgelistet unter Angabe des jeweiligen Aufnahmedatums, dem zeitlichen Abstand Δt und der räumlichen Basislinie im Orbit ΔB_{perp} sowie der Dopplerschwerpunktverschiebung Δf_{DC} in Bezug zur ausgewählten Referenzszene der Koregistrierung eines Datenstapels, die jeweils fett markiert ist in den nachfolgenden Tabellen. Zusätzliche sind die Genauigkeiten der Koregistrierung einer jeden Szene in Range- und Azimut-Richtung bezogen auf die Referenzszene angegeben. Die Werte sollten unter 0,2 bzw. besser unter 0,1 Pixel liegen, um das prozessbedingte Phasenrauschen in den Interferogrammen zu minimieren. Radarszenen, die, z.B. wegen starker atmosphärischer Einflüsse, aus den PSI-Auswertungen ausgeschlossen werden mussten, sind in der Spalte „Nr.“ mit einem „-“ markiert.

Tabelle 15. Radarszenen ENVISAT ASAR

Nr.	Aufnahmedatum	Δt [Tage]	ΔB_{perp} [m]	Δf_{DC} [Hz]	Koregistrierungsgenauigkeit	
					Range [Pixel]	Azimut [Pixel]
1	18.12.2003	-1785	-611,9409	20,569	0,0780	0,1369
2	22.01.2004	-1750	-320,4307	36,848	0,0745	0,1456
3	26.02.2004	-1715	-748,5181	20,481	0,0785	0,1446
4	01.04.2004	-1680	733,7389	16,901	0,0876	0,1401
5	06.05.2004	-1645	-967,2943	23,146	0,0732	0,1330
6	10.06.2004	-1610	76,0268	24,661	0,0626	0,1102
7	15.07.2004	-1575	-126,2609	16,579	0,0659	0,1198
8	19.08.2004	-1540	-346,8647	17,948	0,0690	0,1248
9	23.09.2004	-1505	-981,9742	19,996	0,0730	0,1571
10	28.10.2004	-1470	62,5129	20,801	0,0610	0,1151
11	02.12.2004	-1435	171,2661	18,847	0,0659	0,1350
12	06.01.2005	-1400	252,4095	23,132	0,0625	0,1230
13	10.02.2005	-1365	-421,8182	21,303	0,0659	0,1346
14	21.04.2005	-1295	52,2556	25,429	0,0712	0,1133
15	26.05.2005	-1260	-112,397	27,153	0,0501	0,0955
16	30.06.2005	-1225	412,884	28,402	0,0684	0,1365
17	04.08.2005	-1190	-89,7845	20,041	0,0655	0,1285
18	08.09.2005	-1155	-329,2609	135,603	0,0628	0,1245
19	13.10.2005	-1120	-291,0764	5,159	0,0637	0,1276
20	17.11.2005	-1085	209,5672	2,65	0,0593	0,1120
21	22.12.2005	-1050	334,4897	0,218	0,0667	0,1310
22	26.01.2006	-1015	-1088,6665	7,236	0,0812	0,1425
23	02.03.2006	-980	-21,0872	2,016	0,0675	0,1339
24	11.05.2006	-910	-246,1063	7,461	0,0607	0,0988
25	15.06.2006	-875	-137,5969	6,798	0,0517	0,1044
26	20.07.2006	-840	545,1801	9,217	0,0652	0,1331
27	24.08.2006	-805	461,3319	3,305	0,0665	0,1403
28	28.09.2006	-770	-887,867	7,274	0,0703	0,1436
29	02.11.2006	-735	-677,6138	5,144	0,0659	0,1438
30	07.12.2006	-700	81,2419	5,333	0,0623	0,1166
31	11.01.2007	-665	595,858	3,21	0,0685	0,1305
32	15.02.2007	-630	-363,5025	7,617	0,0668	0,1293
33	22.03.2007	-595	486,7837	3,617	0,0692	0,1215
34	26.04.2007	-560	-331,1828	2,854	0,0609	0,0928
35	31.05.2007	-525	-196,7376	4,006	0,0560	0,1162
36	05.07.2007	-490	-120,9769	6,354	0,0558	0,1201
37	09.08.2007	-455	-205,7978	10,311	0,0614	0,1179
38	13.09.2007	-420	277,2418	3,572	0,0617	0,1183
39	18.10.2007	-385	-221,039	3,164	0,0600	0,1075
40	22.11.2007	-350	34,5606	6,873	0,0555	0,1044

41	27.12.2007	-315	-476,2478	8,691	0,0673	0,1233
42	31.01.2008	-280	37,0769	4,347	0,0598	0,1047
43	06.03.2008	-245	-441,446	5,996	0,0655	0,1373
44	10.04.2008	-210	337,8715	7,962	0,0599	0,1086
45	15.05.2008	-175	-225,9432	3,22	0,0606	0,1321
46	19.06.2008	-140	1,5317	5,443	0,0566	0,1162
47	24.07.2008	-105	41,2876	0,351	0,0483	0,0972
48	28.08.2008	-70	47,6621	4,061	0,0486	0,0872
49	02.10.2008	-35	-321,6332	4,208	0,0502	0,0696
50	06.11.2008	0	0,0000	0,000	0,0000	0,0000
51	11.12.2008	35	-548,8939	5,791	0,0299	0,0410
52	15.01.2009	70	129,2833	7,78	0,0428	0,0543
53	19.02.2009	105	-177,6908	11,767	0,0620	0,0978
54	26.03.2009	140	485,0342	9,426	0,0435	0,0848
55	30.04.2009	175	-205,0513	12,395	0,0449	0,0774
56	04.06.2009	210	-51,3179	9,296	0,0537	0,0932
57	09.07.2009	245	-134,2891	1,914	0,0539	0,1006
58	13.08.2009	280	-74,6044	7,862	0,0615	0,1255
59	17.09.2009	315	342,3278	0,151	0,0516	0,0984
60	22.10.2009	350	-237,5773	1,631	0,0541	0,0903
61	26.11.2009	385	119,3745	5,897	0,0740	0,1422
-	31.12.2009	420	-443,3945	16,414	0,0783	0,1328
62	04.02.2010	455	365,3451	13,165	0,0601	0,0973
63	15.04.2010	525	208,24	7,929	0,0479	0,0932
64	20.05.2010	560	-13,3986	19,737	0,0554	0,1157
65	24.06.2010	595	-92,9712	10,837	0,0629	0,1349
66	29.07.2010	630	-451,7419	5,93	0,0616	0,1012
67	02.09.2010	665	-43,7947	11,425	0,0618	0,1298
68	07.10.2010	700	317,0053	4,926	0,0780	0,1369

Tabelle 16. Radarszenen Radarsat-2

Nr.	Aufnahmedatum	Δt [Tage]	ΔB_{perp} [m]	Δf_{dc} [Hz]	Koregistrierungsgenauigkeit	
					Range [Pixel]	Azimet [Pixel]
1	16.01.2011	-648	52,8261	16,791	0,1057	0,0935
2	09.02.2011	-624	-105,5978	6,307	0,0970	0,0779
3	05.03.2011	-600	20,8489	5,865	0,0939	0,0777
4	29.03.2011	-576	-3,1551	64,732	0,0958	0,0746
5	22.04.2011	-552	-3,1891	86,271	0,0685	0,0804
6	16.05.2011	-528	194,2748	34,917	0,0636	0,0898
7	09.06.2011	-504	311,0602	107,082	0,0630	0,0830
8	03.07.2011	-480	267,6283	83,301	0,0605	0,0826
9	27.07.2011	-456	120,69	107,265	0,0634	0,0791
10	20.08.2011	-432	9,743	91,217	0,0566	0,0737
11	13.09.2011	-408	-47,0572	29,774	0,0524	0,0764
12	07.10.2011	-384	-74,6283	5,653	0,0541	0,0809
13	31.10.2011	-360	-46,1027	17,565	0,0523	0,0718
14	24.11.2011	-336	73,9861	20,216	0,0656	0,0716
15	18.12.2011	-312	87,0168	35,225	0,0713	0,0777
-	04.02.2012	-264	91,635	0,023	0,0892	0,0717
16	28.02.2012	-240	-9,0182	7,443	0,0885	0,0851
17	23.03.2012	-216	52,4902	10,84	0,0811	0,0731
18	16.04.2012	-192	-84,6333	114,238	0,0726	0,0763
19	10.05.2012	-168	497,3323	57,277	0,0615	0,0771
20	03.06.2012	-144	233,2037	92,867	0,0621	0,0758
21	27.06.2012	-120	55,9012	94,518	0,0491	0,0669
22	21.07.2012	-96	45,982	79,379	0,0531	0,0684
23	14.08.2012	-72	5,8333	86,85	0,0525	0,0709
24	07.09.2012	-48	-198,9863	48,383	0,0507	0,0644
25	01.10.2012	-24	-15,3901	23,602	0,0423	0,0697
26	25.10.2012	0	0,0000	0,000	0,0000	0,0000

27	18.11.2012	24	12,0672	6,965	0,0649	0,0720
28	12.12.2012	48	314,0529	32,104	0,0730	0,0796
29	29.05.2013	216	116,5484	108,934	0,0598	0,0768
30	22.06.2013	240	337,7565	41,683	0,0667	0,0724
31	16.07.2013	264	91,7344	43,481	0,0739	0,0779
32	09.08.2013	288	138,7254	16,72	0,0652	0,0731
33	02.09.2013	312	84,6144	7,248	0,0713	0,0791
34	26.09.2013	336	124,3624	36,483	0,0564	0,0751
35	20.10.2013	360	141,4792	66,775	0,0627	0,0823
36	13.11.2013	384	110,151	27,737	0,0721	0,0824
37	07.12.2013	408	256,3524	16,812	0,0753	0,0754
38	31.12.2013	432	351,5799	13,976	0,0726	0,0795
39	24.01.2014	456	108,4404	34,885	0,0634	0,0771
40	06.04.2014	528	88,1623	18,752	0,0712	0,0786
41	30.04.2014	552	261,4084	27,469	0,0876	0,0883
42	24.05.2014	576	203,5743	24,221	0,0874	0,0816
43	17.06.2014	600	297,0584	43,48	0,0844	0,0792
44	11.07.2014	624	312,9469	31,813	0,1044	0,0852
45	04.08.2014	648	229,9315	20,545	0,0748	0,0724
46	28.08.2014	672	177,7523	1,368	0,1007	0,0899
47	21.09.2014	696	145,7177	12,893	0,0554	0,0714
48	15.10.2014	720	39,6847	27,899	0,0648	0,0895
49	08.11.2014	744	200,5141	59,991	0,0665	0,0786
50	02.12.2014	768	168,2426	19,852	0,0756	0,0880
51	26.12.2014	792	269,5622	23,021	0,0814	0,0865
52	19.01.2015	816	595,4215	44,541	0,0738	0,0835
53	12.02.2015	840	52,8261	90,613	0,1057	0,0935

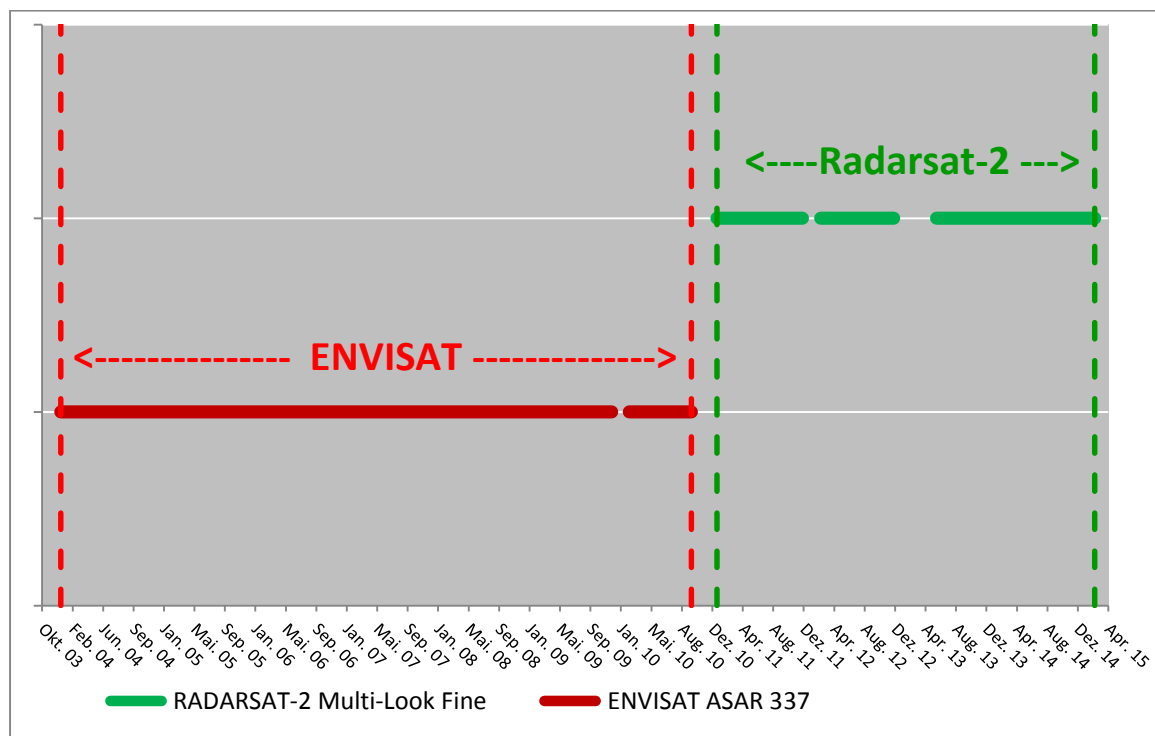
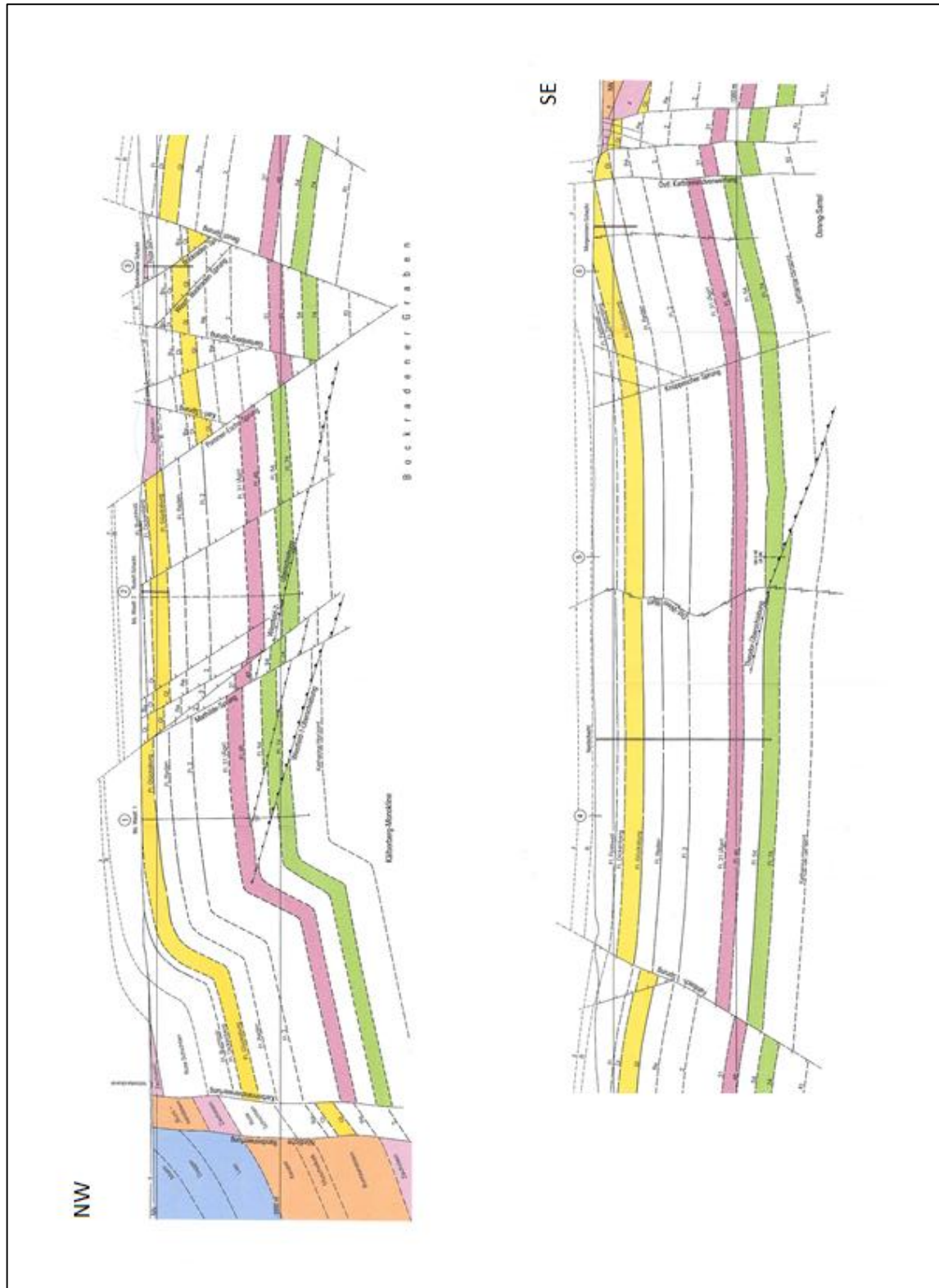


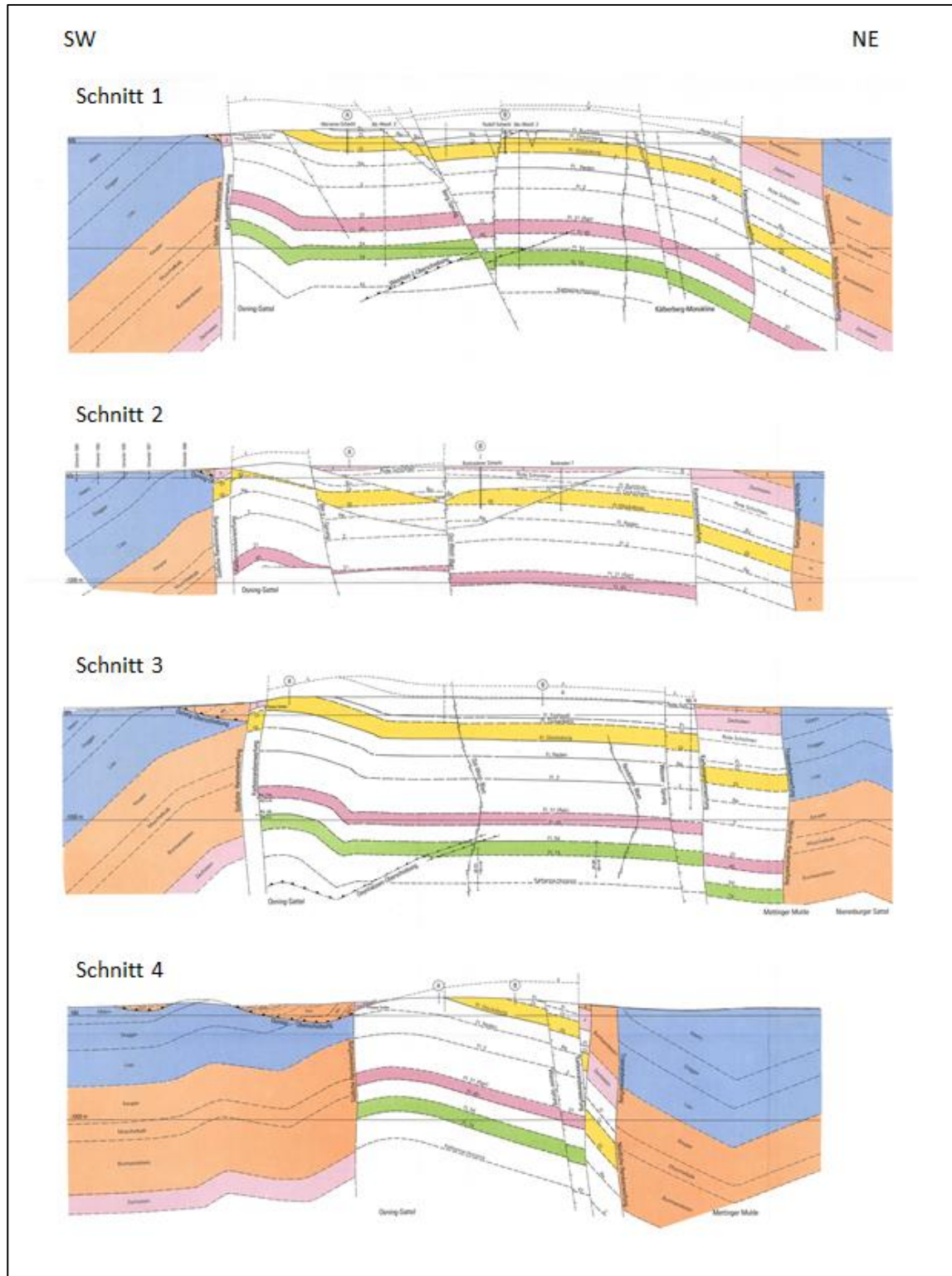
Abbildung 153: Zeitliche Abdeckung anhand des ENVISAT- und Radarsat-2-Datenstapels

ANHANG A3 – GEOLOGISCHE SCHNITTE

A3.1 GEOLOGISCHER NW-SE-SCHNITT DURCH DIE LAGERSTÄTTE (LÄNGSSCHNITT, DROZDZEWSKI 1985)



A3.2 GEOLOGISCHER NE-SW-SCHNITTE DURCH DIE LAGERSTÄTTE (NACH DROZDZEWSKI 1985)



ANHANG A4 – ERMITTLUNG DES ZEITFAKTORS

Die folgenden Abbildungen sind ergänzend zu Kapitel 7.3 erstellt worden und zeigen die Anpassungskurven zur Ermittlung der Zeitfaktors für die in Abbildung 88 ausgewählten Nivellements-punkte. In grau dargestellt ist die Senkungskurve, die mit dem Anfangswert für den Zeitfaktor berechnet wurde, in blau die iterativ angenäherten Senkungskurven und blau gestrichelt die optimal angepasste Kurve.

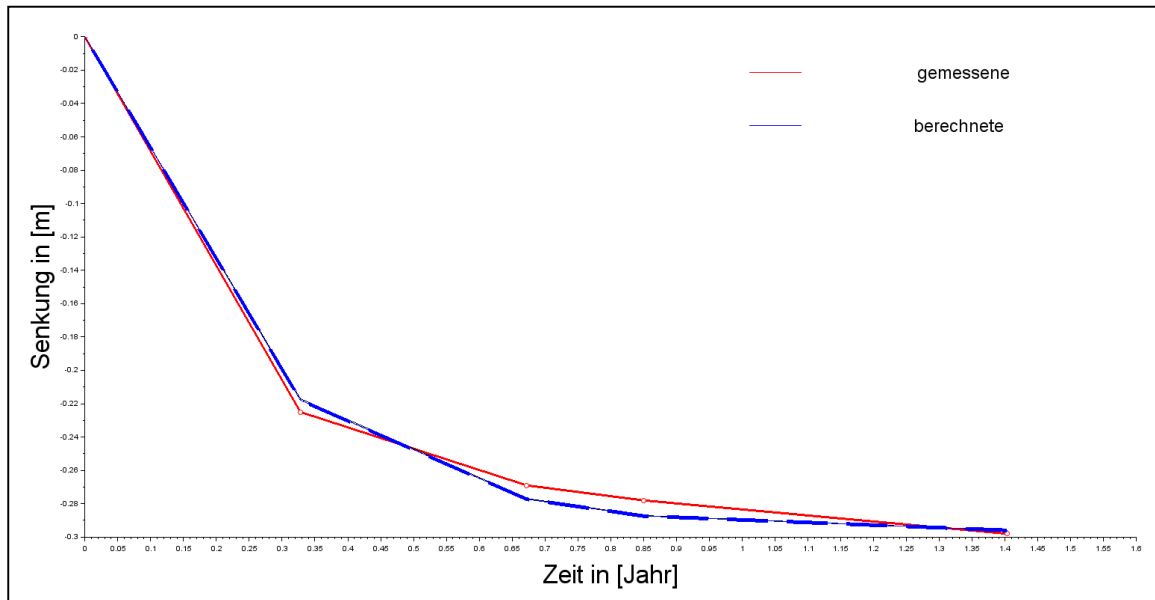


Abbildung 154: Anpassung der theoretischen Senkungskurve für den Messpunkt 183 der Beobachtungs-linie der Lfd. Nr. 3.3 für den Zeitraum vom 21.11.2000 bis zum 16.04.2002

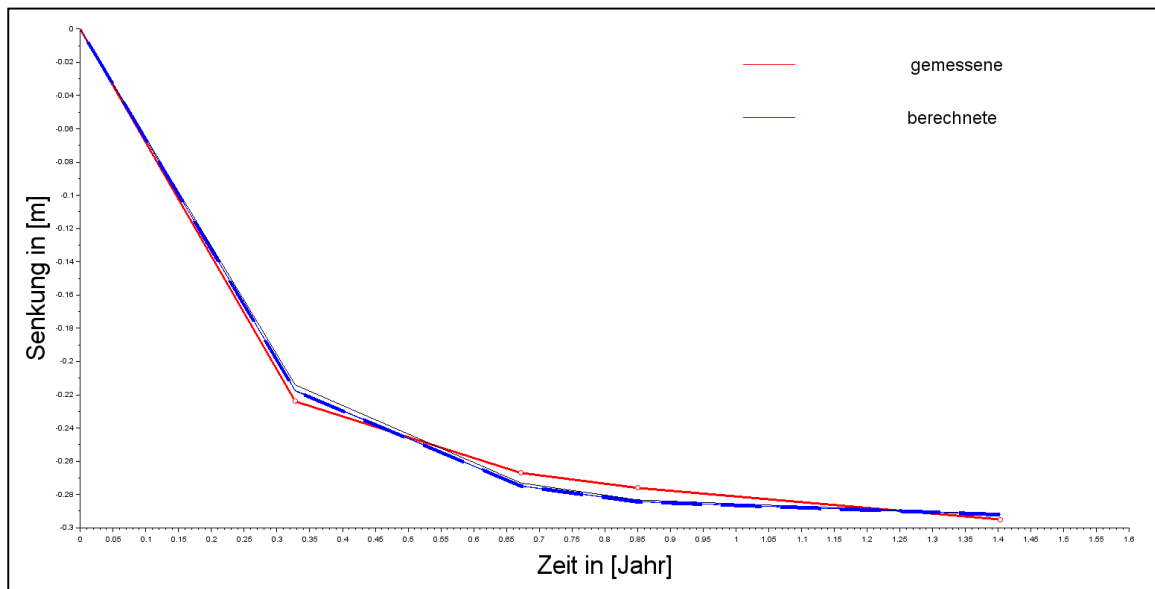


Abbildung 155: Anpassung der theoretischen Senkungskurve für den Messpunkt 184 der Beobachtungs-linie der Lfd. Nr. 3.3 für den Zeitraum vom 21.11.2000 bis zum 16.04.2002

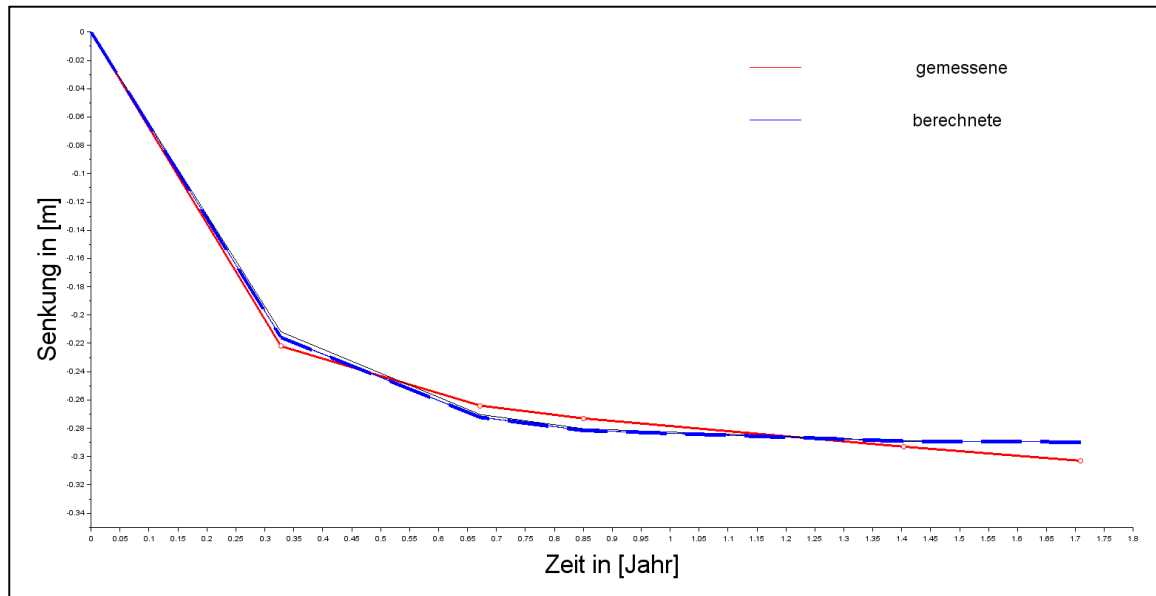


Abbildung 156: Anpassung der theoretischen Senkungskurve für den Messpunkt 185 der Beobachtungslinie der Lfd. Nr. 3.3 für den Zeitraum vom 21.11.2000 bis zum 07.08.2002

ANHANG B1 – BEGRIFFSBESTIMMUNG BODENBEWEGUNG

Der Begriff „Bodenbewegung“ taucht in vielfältigen fachlichen Zusammenhängen auf. Der Begriff „Boden“ wird im bautechnischen Sinne als branchenübliche Sammelbezeichnung aller Lockergesteine und lockergesteinsartig verwitterter Festgesteine definiert (PRINZ & STRAUß 2011). Der Bodenkörper kann sich im Sinne der Festkörpermechanik verformen und bewegen (verschieben). Insbesondere durch den Einfluss untertägigen Bergbaus tritt vor allem eine Verformung (Deformation) der Grenzschicht (der sog. Tagesoberfläche) zwischen der festen Erde und der Atmosphäre auf. Dagegen kann eine gleichmäßige „Verschiebung“ (Translation in vertikaler oder/und horizontaler Richtung) eines vollständigen, begrenzten Ausschnittes der Tagesoberfläche im engen Sinne nur an Störungsflächen auftreten.

Durch die Verformung der Tagesoberfläche und eine damit verbundene Translation lokaler Bereiche der Tagesoberfläche bewegen sich die darauf befindlichen Objekte und damit die „Punkte“ im Allgemeinen dreidimensional (und über die Zeit). Diese dreidimensionalen „Punktbewegungen“ werden üblicherweise in eine horizontale und vertikale Komponente aufgeteilt. Während die vertikale Komponente eine (über die Lotrichtung) definierte Richtung besitzt, wird die horizontale Komponente über eine zweidimensionale ebene Richtungsangabe definiert. Unterschiede in den Bewegungsrichtungen und der Bewegungsbeträge benachbarter Punkte können zu Zerrungen oder Pressungen an der Tagesoberfläche führen.

Für die hier anstehende Aufgabenstellung hat die Vertikalkomponente (= Höhenänderung) in der Regel die größte Bedeutung oder wird (auch aus Gründen der „einfacheren“ messtechnischen Erfassbarkeit) vorrangig betrachtet. Da neben dem Einfluss des „Bergbaus“ auch andere Ursachen Bodenbewegungen erzeugen, sind einige weitere in diesem Zusammenhang für die Vertikalkomponente auftauchende Fachbegriffe im Folgenden zu definieren.

Die Bodenbewegungen infolge Belastungsänderungen oder aufgrund von Erschütterungen werden in der Geotechnik und Bodenmechanik generell als Setzungen bezeichnet. Belastungsänderungen können auch durch Schwankungen des Grundwasserspiegels auftreten und zu lang andauernden Setzungen, bzw. Hebungen führen (DIN 4107, 1978) und können sowohl groß- als auch kleinräumig auftreten. Die lotrechte Verformungskomponente des Untergrundes kann phänomenologisch differenziert werden (SCHMIDT 2006):

- **Senkung:** Verschiebung einer ganzen Bodenschicht in Richtung der Schwerkraft infolge Materialverlagerung bzw. -entzugs, z. B. durch Erosions-, Subrosions- und Suffosionsvorgänge oder durch untertägige Rohstoffgewinnung (Bergsenkungen). Senkungen können in Abhängigkeit von den geologischen und tektonischen Untergrundverhältnissen, der Mächtigkeit der abgebauten Schichten und dem gewählten Abbauverfahren mehr als 10 m erreichen und sich über mehrere Jahre erstrecken.
- **Setzung:** Lotrechte Verformungen des Baugrunds infolge aufgebrachter äußerer Lasten, bzw. durch Erschütterungen. Setzungen entstehen bei ausreichender Grundbruchsicherheit überwiegend durch Kompression des Korngerüsts. Auch horizontale Spannungen sowie Schwankungen des Grundwasserspiegels können Setzungen verursachen. Bei nichtbindigen Böden erfolgen Setzungen nahezu vollständig zum Zeitpunkt der Lastaufbringung, während bei bindigen Böden der Verlauf der Setzungen durch die Zeit bestimmt wird, die für die Verdrängung des Porenwassers erforderlich ist und die je nach Durchlässigkeit des Bodens lange über die Bauzeit hinausreichen kann. Dieser zeitabhängige

Setzungsvorgang wird Konsolidierung genannt. Setzungen können elastische und bleibende Verformungsanteile enthalten. Gleichmäßige Setzungen und Senkungen gefährden die Standsicherheit eines Bauwerks im Allgemeinen nicht (DIN 1054).

- **Sackung:** Vertikalverschiebung der Oberfläche durch Zusammenbrechen des Korngerüsts durch Eigengewicht oder erstmalige Sättigung in einem Teilbereich des Bodens, dessen Struktur gegenüber Änderungen des Spannungszustands oder der Grundwassersättigung instabil ist. Sackungen entstehen nach KÉZDI (1964) durch den Verlust der sogenannten scheinbaren Kohäsion, die durch die Haftkräfte des Porenwinkelwassers (Wassergehalt) bewirkt wird. Infolge der äußeren Belastung kann sich durch Kornbewegungen eine dichtere Lagerung einstellen. Sackungen treten besonders im Löß und in körnigen kohäsionslosen Böden auf.
- **Schrumpfung:** Volumenverminderung durch Kapillarspannungen, die in bindigen Böden durch Abnahme des Wassergehaltes, bei zunehmender Feinporigkeit auftreten. Das Ausmaß der Senkungen durch Schrumpfungen ist abhängig von der Wassergehaltsabnahme sowie der Mächtigkeit und Feinporigkeit des Bodens. Schrumpfungen treten besonders bei tonigen Böden (> 20 % Tonanteil) oder Böden mit organischen Beimengungen auf (PRINZ & STRAUß 2011).
- **Hebung:** Lotrechte Verschiebung entgegen der Richtung der Schwerkraft, häufig infolge einer Spannungsabnahme durch Reduzierung der Auflast oder Schwellung des Bodens (z. B. Ton).

Ursache für die Setzung infolge der Entnahme von Fluiden ist die Verminderung des Auftriebes des Korngerüsts sowie von im Fluid gegründeten Objekten. Bei Entnahme von festen Rohstoffen wie Kohle, Salz und Erz kommt es dagegen zum Konvergieren bzw. Zusammenbrechen der Gebirgsschichten in Richtung des Hohlraumes. Die Verformung der darüber liegenden Schichten setzt sich bis an die Tagesoberfläche fort. Weitere Erklärungen zu bergbaulich verursachten Bodenbewegungen finden sich z. B. in (KRATZSCH 2013).

ANHANG B2 – URSACHEN VON BODENBEWEGUNGEN

B2.1 GENERELLE URSACHEN

Bodenbewegungen an der Geländeoberfläche können generell verursacht werden durch:

- großtektonische und seismische Ereignisse (z. B. Platten-/Schollenbewegungen, Erdbeben, Erschütterungen),
- Erosions-, Subrosions- und Suffosionsprozesse (z. B. Senkungen durch Salzauslaugung und Verkarstung),
- Aufbringung und Verringerung glazigener Auflasten (z. B. Senkungen und Hebungen an Eisschilden),
- hydrogeologische und hydrologische Veränderungen (z. B. Senkungen durch Grundwasserentzug, Hebungen durch Grubenwassereinstau in aufgegebenen Grubenbauten und den Nebengesteinen),
- geologische und gebirgsmechanische Spannungsänderungen in der Erdkruste (z. B. Rohstoffgewinnung im Tagebau und Tiefbau).

Bodenbewegungen können durch die Natur (geogen) oder durch den Menschen (anthropogen) verursacht sein. Manche Ursachen für Bodenbewegungen durch Verminderung bzw. Wegfall der Stützung im Gebirgskörper können durch den Entzug von Material einerseits anthropogen, z. B. durch Rohstoffgewinnung, oder andererseits geogen, z. B. durch Auslaugung von Gesteinen, verursacht sein. Die genannten anthropogenen und geogenen Ursachen bewirken Spannungsänderungen.

B2.2 GEOGENE URSACHEN

B2.2.1 Klima

Zu den geogenen Ursachen zählt auch das Klima bzw. seine Veränderungen als exogener Faktor, der quantitative Einwirkungen auf den Wasserkreislauf haben kann (Abbildung 157).

Niederschlag, der auf die Geländeoberfläche trifft, versickert nur zu einem geringen Teil im Boden und führt dort zu einer Neubildung des Grundwassers. Über die Interzeption (I) und Transpiration (T) von Pflanzen und der Verdunstung von der unbewachsenen Geländeoberfläche (E), zusammengefasst als Evapotranspiration (ET), wird ein Großteil des Wassers zurück in die Atmosphäre geleitet. Dieser Anteil nimmt mit steigender Temperatur zu, sodass der Teil des im Boden versickernden Wassers verringert wird.

Die Annahme, dass ein erhöhter Niederschlag dieses Defizit ausgleichen kann, trifft nicht zu. Dies kann durch Wasserdefizite in der Wachstumsperiode von Pflanzen belegt werden (LANUV 2010). Somit wird dem Boden bei einer Temperaturerhöhung auf lange Sicht Wasser entzogen.

Folge dieser Klimaänderung sind somit „Veränderungen der Bodentemperatur, des Bodenwasserhaushaltes und des Bodengefüges“ (LANDESAMT FÜR NATUR-, UMWELT- UND VERBRAUCHERSCHUTZ NORDRHEIN-WESTFALEN 2010). Diese Veränderungen bewirken Senkungs- und Setzungsprozesse des Bodens.

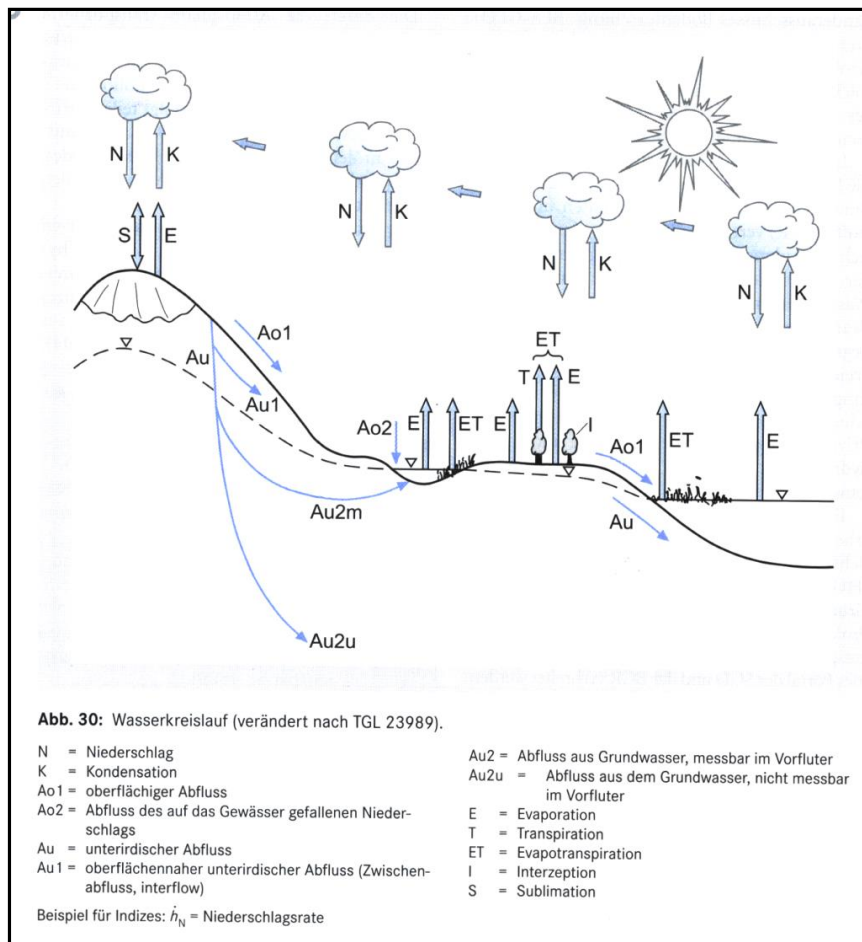


Abbildung 157: Wasserkreislauf (Hölting & Coldewey 2013).

B2.2.2 Pflanzenbewuchs

Auch durch die Durchwurzelung des Bodens durch größere Bäume kann es zu lokal begrenzten Geländehebungen kommen, wie von HARTGE et al. (2014) wie folgt beschrieben wird. Durch das radiale Wurzelwachstum in horizontaler oder vertikaler Richtung stößt die Pflanze auf einen unterschiedlichen Erdwiderstand. Daher gewinnen die Wurzeln den notwendigen Raum vorrangig durch Hochpressung des Bodens. Dieser Effekt ist umso stärker ausgeprägt, je größer der Verformungswiderstand unter den Wurzeln ist. Wenn infolge fehlenden Widerlagers nach oben hin das Bodenmaterial nicht komprimiert wird, führt dies zu einer Aufwölbung der Bodenoberfläche. Die dabei auftretenden Kräfte können Straßendecken zerstören und Stützmauern anheben. Weil durch den Boden auch ein Erdwiderstand auf die nach den Seiten wachsenden Wurzeln ausgeübt wird, führt dieser Bruch in einem relativ breiten Bereich zu Lockerungen. Wird das angehobene und gelockerte Bodenmaterial wegtransportiert, wachsen die Wurzeln aus dem Boden heraus. Zonen lockeren Bodenmaterials im Bereich starker Baumwurzeln können auch als Folge von Spannungen entstehen, welche die durch den Winddruck auf die Baumkrone erzeugt und auf den Boden übertragen werden (HINTIKKA 1972).

Das Wurzeldickenwachstum trägt zur Lockerung des Oberbodens bei. Das Ausmaß dieser Verlagerungsprozesse kann man in deutlich geschichteten Sedimenten daran erkennen. Dass die Schichtung zum Oberboden hin zunehmend verschwindet. Als Sammelbezeichnung für diese

Vorgänge wird der Begriff Bioturbation verwendet. Diese sind in deutlich geschichteten Ausgangsgesteinen unter Umständen das erste sichtbare Zeichen beginnender Bodenentwicklung (HARTGE et al. 2014).

B2.2.3 Tektonik

Weitere geogene Ursachen stellen endogene Faktoren dar, die sich aus der Tektogenese ergeben. Laut HOLTRUP (1999) setzt sich die tektonisch sehr aktive Phase des Känozoikums, besonders des Holozän, bis in die heutige Zeit fort. An Störungen treten zumeist Sprünge (Abschiebungen) und Wechsel (Überschiebungen) sowie Blätter (horizontale Verschiebungen) auf, so dass das Gebirge in Horste, Gräben und Staffeln zerblockt wird. Die sich dabei ergebenden Krustenblöcke können auch heute von tektonisch bedingten Absenkungen, Hebungen oder auch Kippungen betroffen sein. Diese Bewegungen sind nicht nur auf einzelne Krustenblöcke begrenzt, sondern können auch im großtektonischen Maßstab die gesamte Nordwestdeutsche Teilscholle betreffen. Vorgänge an Schollenrandverwerfungen müssen nicht zwangsweise auf ihre inneren Teilschollen übertragen werden, da diese phasenweise auch oszillierende Bewegungen aufzeigen und so z. B. einem Senkungstrend entgegenwirken können (HOLTRUP 1999).

Es ist grundsätzlich schwierig die Bewegungsraten einzelner Teilschollen genau zu bestimmen, da Überlagerungen mit anthropogen verursachten Bodenbewegungen stattfinden können. Um Aussagen über tektonisch bedingte Bodenbewegungen zu treffen, lassen sich geologische (z. B. fein-stratigraphische) und geophysikalische Untersuchungsmethoden anwenden. Des Weiteren kommen geodätische Präzisionsmessverfahren in Frage, mit denen sich Bewegungsraten $< 1 \text{ mm/a}$ bestimmen lassen.

Als Sonderfall der tektonischen Ursachen kann ein Versatz von Grundwasserleitern und Grundwassernichtleitern an einer Störung auftreten, der den durchflusswirksamen Bereich der Störungszone verändert. Hierdurch kann es zu einer Veränderung der geohydraulischen Verhältnisse und damit zu einem Druckanstieg an der Störung kommen.

B2.2.4 Erosion

Als Erosion wird die mechanische linienhafte oder flächenhafte Vertiefung der Erdoberfläche durch Wasser, Eis oder Wind und der damit verbundene Abtransport von Feststoffen in diesen Medien verstanden. Die Wirkung der Erosion endet an der Erosionsbasis, die allgemein dem Meeresspiegel entspricht. Örtlich können auch Seen oder Ebenen eine Erosionsbasis darstellen (DEUTSCHE GESELLSCHAFT FÜR ERD- UND GRUNDBAU E.V. 1982).

B2.2.5 Subrosion

Als Subrosion wird die Entstehung von Einsturztrichtern (Dolinen) oder Senken durch Auslaugung von Salzen (Chloride und Sulfate) unter der Erdoberfläche bezeichnet (DEUTSCHE GESELLSCHAFT FÜR ERD- UND GRUNDBAU E.V. 1982). Analog zu den künstlich geschaffenen Hohlräumen des Steinkohlenbergbaus kann die Auslaugung von Salzen im Untergrund zu einem Einbrechen des überlagernden Deckgebirges führen. Dieser Senkungsvorgang setzt sich bis an die Tagesoberfläche fort.

Aufgrund von Auslaugungsvorgängen oder Kohlensäureverwitterung kann es in Gebieten mit auslaugungsfähigen Gesteinen zu großflächigen Subrosionssenken, mit der für solche Karstgebiete typischen Morphologie, kommen. Voraussetzung dafür sind verkarstungsfähige Gesteinsgruppen wie Evaporite (Steinsalz, Gips, Anhydrit) oder Karbonatgesteine (Kalk, Dolomit) und unter bestimmten Bedingungen auch Quarzite (BÖGLI 1978).

Karsterscheinungen in den Sedimenten der Oberkreide (Cenoman und Turon) sind am Südrand des Münsterländer Beckens beschrieben (ERLEMEYER & WREDE 1999, WREDE et al. 2010). Hier kann es durch Einspülung von hangenden Lockergesteinen in Karsthohlräume zu Geländeabsenkungen kommen.

B2.2.6 Suffosion

Als Suffosion bezeichnet man die Umlagerung von Teilchen der feineren Kornfraktion eines ungleichförmigen nichtbindigen Bodens, welcher das Bodenskelett bildet, durch die Grundwasserströmung (Busch & Luckner 1972). Die Matrix des Bodens bleibt hierbei unverändert.

Durch die Suffosion werden die Porosität n und der Durchlässigkeitsbeiwert k_f erhöht, während die Dichte ρ des Bodenkörpers abnimmt. Von der Suffosion sind insbesondere ungleichförmige Böden (z. B. Geschiebe und Moränenmaterial) betroffen.

Generell können drei Arten der Suffosion unterschieden werden (Abbildung 158, BUSCH & LUCKNER 1972):

- innere Suffosion,
- äußere Suffosion,
- Kontaktsuffosion.

Bei der inneren Suffosion handelt es sich um eine relativ kurzzeitige Umlagerung der Bodenpartikel. Sofern dieser Prozess nicht durch eine äußere Suffosion bzw. eine Kontaktsuffosion aufrecht erhalten wird, ist der Transport der Teilchen relativ begrenzt. Die äußere Suffosion findet unabhängig von der Richtung der unterirdischen Wasserbewegung an der freien Wasseroberfläche statt. Sie verursacht die innere Suffosion bzw. beschleunigt diese (BUSCH & LUCKNER 1972). Bei der Kontaktsuffosion wandern die bewegten Teilchen der feinen Kornfraktion in die Poren des gröberen Kornmaterials. Dort setzt sich dieser Prozess als innere Suffosion, seltener als Kolmation, fort. Die Kolmation stellt die Umkehrung der Suffosion dar und bezeichnet die Ablagerung von in der Grundwasserströmung transportierten Teilchen im vorhandenen Porenraum des Bodenskeletts (BUSCH & LUCKNER 1972). Ähnlich wie bei der Suffosion ist zwischen innerer und äußerer Kolmation sowie einer Kontaktkolmation zu unterscheiden. Entsprechend der Suffosion verringern sich bei der Kolmation die Porosität n und der Durchlässigkeitskoeffizient k_f , während die Lagerungsdichte des Bodens zunimmt.

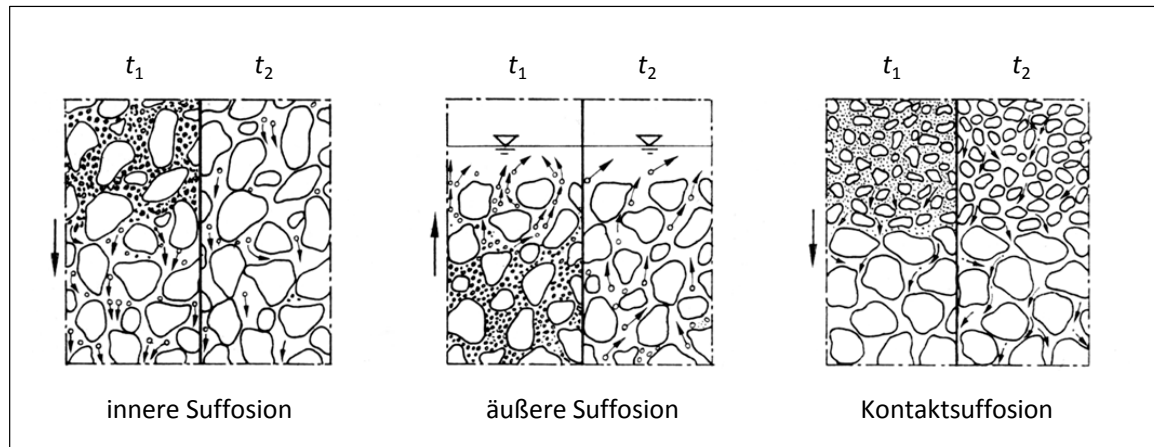


Abbildung 158: Schematische Darstellung der Suffosionsvorgänge in ungleichförmigen Böden (BUSCH & LUCKNER 1972).

B2.3 ANTHROPOGENE URSACHEN

B2.3.1 Übertägige Rohstoffgewinnung

Durch die übertägige Gewinnung von Rohstoffen kommt es zu einem Materialentzug an der Geländeoberfläche. Werden diese Abgrabungen im Anschluss an die Rohstoffgewinnung nicht wieder verfüllt, so wird die Geländeoberfläche dauerhaft erniedrigt.

Von großem wirtschaftlichem Interesse sind Sande und Kiese, die oberflächennah im Bereich von Flüssen und Tiefebene abgelagert wurden und damit leicht durch Auskiesungen zu fördern sind. Diese mineralischen Rohstoffe besitzen sowohl für die Herstellung von Baumaterialien, als auch für die Herstellung feuerfester Erzeugnisse eine große Bedeutung. Die Gewinnung von Sanden und Kiesen wird in Nordrhein-Westfalen durch das „Gesetz zur Ordnung von Abgrabungen des Landes Nordrhein-Westfalen vom 23.11.1979“ (Abgrabungsgesetz) gesetzlich geregelt (BEZIRKSREGIERUNG DÜSSELDORF 2011). Die Genehmigung dieser Abgrabungen liegt in der Zuständigkeit der Kreise und kreisfreien Städte.

Bei Abgrabungen werden grundsätzlich zwei Arten unterschieden (BEZIRKSREGIERUNG DÜSSELDORF 2011):

- Nassabgrabungen sind solche, bei denen durch die Auskiesung Grundwasser freigelegt wird und somit der sogenannte Baggersee entsteht.
- Trockenabgrabungen sind Abgrabungen, bei denen kein Grundwasser freigelegt wird und somit kein See entsteht.

Um das ursprüngliche Geländeniveau und damit das Landschaftsbild wieder herzustellen, werden Trockenabgrabungen teilweise wieder mit Bodenaushub verfüllt. Die Veränderung der Geländeoberfläche ist damit temporär, bzw. kann nach Verfüllung mit Bodenaushub eine Differenz zur ursprünglichen Geländehöhe – sowohl als Absenkung als auch als Erhöhung – bestehen. Weiterhin können durch eine nicht sachgerechte Verdichtung des Verfüllmaterials, bzw. bei der Belastung des Bodens durch eine nachfolgende Bebauung, Senkungen an der Geländeoberfläche entstehen.

Neben dem Auffüllen der Abgrabungsbereiche mit Bodenaushub können diese geschaffenen Hohlräume als Deponiestandorte (z. B. Bauschutt-, Hausmüll-, oder Bodendeponien) genutzt

werden. Die Gesamtheit aller Abgrabungs- und Deponieflächen wird zusammenfassend als sogenannten „Künstlich veränderte Flächen“ (KVF) bezeichnet. Künstlich veränderte Flächen stellen somit Bereiche mit möglichen Veränderungen der Geländeoberfläche dar.

B2.3.2. Untertägige Rohstoffgewinnung

B2.3.2.1 Auffahrung von Hohlräumen

Durch die untertägige Gewinnung von Rohstoffen, wie z. B. Kohle, Salz und Erz, aus den oberen Schichten der Erdoberfläche (Gebirge) entstehen Hohlräume, die sich über kurz oder lang unter dem Gebirgsdruck der überlagernden Gebirgsschichten schließen. Dieser Vorgang wird in der Geologie als Verbruch, der entstehende restliche Grubenraum wird bergmännisch als Bruch bezeichnet. Durch eine vollständige bzw. teilweise Verfüllung der Hohlräume durch Versatz oder Teilversatz kann der Verbruch der überlagernden Schichten vermindert werden. Die Schließung eines Hohlraumes kann entweder durch Konvergenz des umgebenden Gesteins (z. B. Salzgewinnung im Kammerpfeiler-Verfahren) erfolgen oder durch Verformung und Verbruch der Deckgebirgsschichten (z. B. Kohlegewinnung im Strebbau-Verfahren). Die Absenkung bewirkt eine Veränderung der Geländemorphologie, indem die nicht mehr voll unterstützen Schichten unter der Fremd- und Eigenlast nachgeben und sich auf die schon abgesunkenen Schichten auflegen. Da das Auflager für die oberen überlagernden Schichten immer wieder entzogen wird, setzt sich dieser Prozess von Schicht zu Schicht fort und reicht meist bis an die Tagesoberfläche (KRATZSCH 1997). Bedingung hierfür ist, dass der Abbauhohlraum so breit ist, dass er vom hangenden Gebirge nicht mehr überbrückt wird. Mit zunehmender Abbautiefe setzen sich die Auswirkungen immer weiter ins Vorfeld fort, was jedoch u. a. vom Aufbau des Deckgebirges abhängig ist. Dabei können die einzelnen Schichten ein unterschiedliches Verhalten aufweisen, vom Durchbiegen bis zum Abreißen und elastischen bis plastischen Senkungsverhalten. Die Auswirkungen der Gebirgsverformungen sind an der Tagesoberfläche sehr unterschiedlich und reichen von einer Senkungsmulde über ein scherbruchartiges Senkungsbecken bis zu Tagesbrüchen. Nach KRATZSCH (1997) ist die Ausbildung einer breiten, flachen Senkungsmulde, wie sie typisch für den untertägigen Steinkohlenbergbau ist, hinsichtlich ihrer Form sowie deren zeitlicher Entstehung von folgenden Faktoren abhängig:

- Geologischer und tektonischer Aufbau des Deckgebirges,
- Teufe, Mächtigkeit, Einfallen und der Ausdehnung der abgebauten Schichten,
- Abbauführung und -geschwindigkeit, Versatz, Durchbauungsgrad des Gebirges infolge Mehrflözabbau und Nähe zu benachbarten Flözbauten.

Die Ausbildung der Senkungsmulde wird durch vertikale und horizontale Bodenbewegungskomponenten bestimmt, basierend auf der Trogtheorie nach LEHMANN (1919). Die Punkte an der Tagesoberfläche führen normalerweise unterschiedliche Bewegungen aus, was abhängig von ihrer relativen Lage zum Abbau ist. Die maximale Senkung erfährt der Bodenpunkt direkt über dem Abbaufeld, der sich im Einwirkungszentrum befindet. Der Senkungsbetrag ist abhängig von der Teufe, Mächtigkeit, Einfallen und der Ausdehnung der abgebauten Schichten sowie dem Versatz. Die Bewegungen der Bodenpunkte laufen zumeist stetig ab. Aufgrund der Geologie und Tektonik kann es jedoch auch zu räumlichen und zeitlichen Unstetigkeiten an der Tagesoberfläche kommen (KRATZSCH 1997).

Die Vorausberechnung der Absenkung, verursacht durch bergbaubedingte Bodenbewegungen, basiert auf empirischen, gebirgsmechanischen oder stochastischen Modellvorstellungen. Letztere werden aufgrund der Vielzahl unbekannter Größen in einem Bewegungsprozess, den nicht beschreibbaren Vorgängen zwischen den einzelnen Elementen und der Unkenntnis über den genauen strukturellen Aufbau des Gebirges für die Vorausberechnungen der Absenkungen in der Praxis am häufigsten genutzt.

Die Auswirkungen von z. B. Altbergbau auf die Prognose von Senkungsmulden in zukünftigen Abbaufeldern ist in der Literatur mehrfach beschrieben, u. a. bei KRATZSCH (1997). Aufgrund der Relevanz für dieses Gutachten wird im Folgenden näher auf einige Faktoren eingegangen, die die Form einer Senkungsmulde erheblich verändern können.

■ DURCHBAUUNGSGRAD INFOLGE ALTBERGBAU

Der Fachbegriff Durchbauungsgrad ist auf die Anzahl der untereinander abgebauten Flöze und den unvollständigen Verhieb der Flöze zurückzuführen (KRATZSCH, 2013). Bergbauggebiete die schon in vorigen Jahrhunderten genutzt wurden, werden auch heutzutage weiter durchörtert, so dass der Durchbauungsgrad des Gebirges hierdurch erhöht wird. Die Vorhersage von Senkungsmulden kann dann nicht mehr durch einen einfachen Ansatz der Rechenmodelle erfolgen (SROKA & SCHÖBER 1985).

Das Deckgebirge wird bei den meisten Rechenmodellen als ungestört, flach gelagert und topographisch homogen betrachtet. Bei einer vorhergehenden Durchbauung des Gebirges ist aber eine Beanspruchung des Gebirges vorauszusetzen. Wird zum Beispiel unter zwei abgebauten Flözen nochmals Abbau betrieben, so verschieben sich die Zerrungszonen in Richtung des Senkungsmaximums. Die wiederholte Beanspruchung des Gebirges führt zu Rissen in davor lediglich durchbogenen Gesteinsschichten (KLOY & SCHRÄMM 2003).

Auch stehengelassene Pfeiler im Altbergbau beeinflussen die errechneten Senkungen und Verschiebungen. Durch Pfeiler wird das Deckgebirge weiter gestützt und die Senkungen fallen geringer aus als vorausberechnet. Dafür treten möglicherweise an anderer Stelle größere Senkungen und Verschiebungen auf, um die wirkenden Kräfte im Gestein dennoch aufzunehmen (KIRSCH 2002).

■ EINFALLEN DER GEBIRGSSCHICHTEN

Bergbau in einfallenden Kohleflözen oder sonstigen geneigten Lagerstätten ist nicht ungewöhnlich. Meist sind aufgrund der Genese auch die Deckgebirgsschichten entsprechend geneigt. Dieses Einfallen führt zu anisotropen Senkungen und Ausprägungen der Senkungsmulde und kann analytisch in dem Rechenmodell zur Senkungsvorausberechnung angesetzt werden (SROKA et al. 1988; HEJMANOWSKI 1993; HÖBELBARTH & SROKA 2006).

■ TEKTONIK UND GEOLOGIE

Störungen im Gebirge oder ungleichmäßige Lagerung der geologischen Schichten beeinflussen die Form der Senkungsmulde. An Störungskanten verstärken sich Senkungen auf der hangenden Seite oder Krümmungen werden beim Durchlaufen einer Störung abgeschwächt. Tektonische Störungen und deren Auswirkungen auf Senkungen werden bei KRATZSCH (2013) umfassend beschrieben.

Mehrere Analysen wurden in den 70er und 80er Jahren im oberschlesischen Abbaurevier durchgeführt. Abbildung 159 zeigt ein Beispiel von TYRAŁA et al. (1975), bei dem sich Anomalien im Senkungsverlauf im Bereich des Sprunges ausbilden. Die Einwirkungen wurden durch die Störung eindeutig verkürzt, weil der Abbau in Gegenrichtung zur Sprungebene durchgeführt wurde.

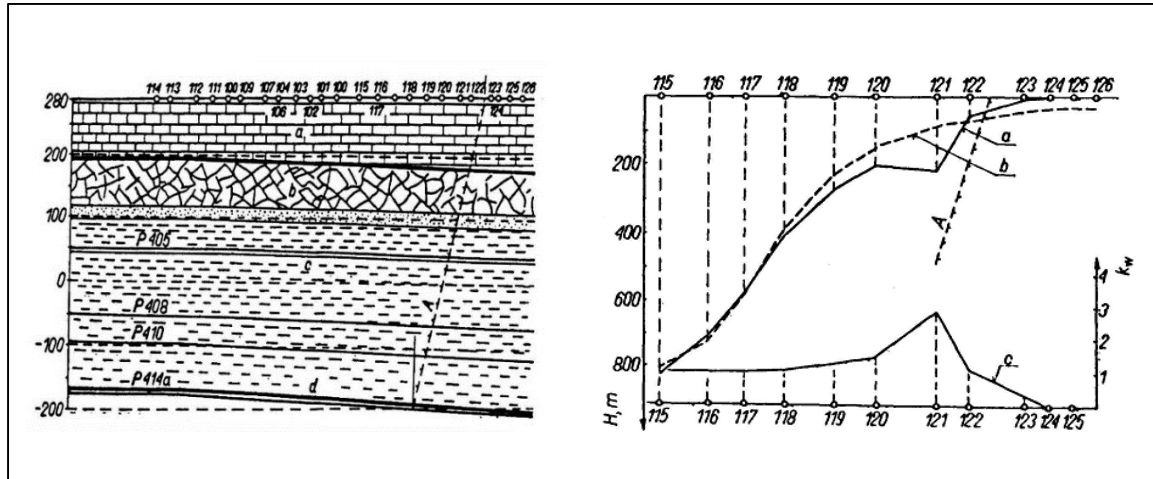


Abbildung 159: Links: Geologischer Schnitt entlang einer Messlinie; Rechts: Zusammenstellung der gemessenen (a) und berechneten (b) Senkungen und der Anomalie (c) im Bereich des tektonischen Sprunges (TYRAŁA 1975).

Aus mehreren Fällen ergibt sich, dass die Auswirkungen von Störungen folgende Möglichkeiten im Verlauf der Senkungen aufweisen können:

- tektonische Sprünge mit großem Einfallswinkel (67 bis 100 gon) haben einen größeren Einfluss auf die Beschränkung der Senkungsmulde. Diese Anmerkung gilt besonders beim Abbau in einem Flügel des Sprunges;
- Die Richtung der Sprungebene in Bezug auf die Richtung des Abbaus ist von besonderer Bedeutung für die Senkungseinwirkungen und zwar:
 - a) Bei der Übereinstimmung der Abbaurichtung mit der Sprungrichtung werden die Senkungen durch die Sprunglinie begrenzt.
 - b) Wenn die Richtung des Abbaus gegen die Sprungrichtung verläuft, erstrecken sich die Senkungen weit nach außen.

Auch Lockergesteinsschichten können die Prognoseergebnisse einfacher Methoden verfälschen. Lockergesteinsschichten reagieren anders als Festgesteine nicht nur mit Zerrungen und Pressungen sondern verschieben sich ineinander und lagern sich um. So entstehen mehrere Gegenstufen, die größere Senkungen an der Geländeoberfläche bewirken können. Wenn Unstetigkeiten im geologischen Profil vorliegen, müssen diese bei der Bearbeitung und Vorhersage von Bergsenkungen berücksichtigt werden.

Der Wiederanstieg des Grundwassers nach Beendigung des Bergbaus führt manchmal zu einer Reaktivierung bereits beanspruchter Gebirgszonen. Störungen und Erdstufen können an der Geländeoberfläche nicht immer erkannt werden. Auf bebautem Gebiet können Stufen im Lockergestein nicht sicher bestimmt werden, auf unbebautem Gelände führen Niederschläge

meist schon kurzfristig zum Verschließen von Risse. Dadurch sind auch großräumige Zerrungsrisse nicht immer erkennbar. Dass diese unverkennbar zum Problem werden können hat Baglikow in seiner Dissertation beschrieben (BAGLIKOW 2010).

Der Abbau mehrerer Flöze oder Baufelder nebeneinander über einen längeren Zeitraum kann im Zusammenhang mit spezieller Tektonik zu nicht vorhergesehenen Gebirgsreaktionen führen. Die Senkungsmulden der einzelnen Abbaufelder beeinflussen und überlagern sich dann gegenseitig und beanspruchen das Gebirge in tektonisch geprägten Zonen vielfältig. Es können sich an der Geländeoberfläche in kurzer Zeit große Dehnungsrisse zeigen, auch in Gebieten in denen die Prognose kleine Senkungen und Verschiebungen vorhersagte (BRANDT et al. 2005).

B2.3.2.2 Druckentlastungen im Fluidbergbau

Bei der Gewinnung von Fluiden und gasförmigen Rohstoffen (Erdöl und Erdgas) erfolgt die Rohstoffentnahme aus z. B. einem Speichergestein, bei dem der Lagerstättendruck im Porenraum dem Gebirgsdruck der überlagernden Schichten entgegenwirkt. Hierdurch kommt es zu einer Druckentlastung und damit zur Kompaktion des Speichergesteins (HOLTRUP 1999). Durch die Verminderung der Stützung im Gebirgskörper entstehen Senkungen an der Tagesoberfläche.

B2.3.3 Veränderungen von Grundwasserhöhen

B2.3.3.1 Grundlagen der bodenmechanischen Verhältnisse

Generell bewirkt jede Änderung der Grundwasserhöhen (hydrostatische Drücke) Spannungsänderungen im Gebirge, die sich sowohl durch Senkungen, als auch durch Hebungen an der Tagesoberfläche bemerkbar machen können.

Die Absenkung des freien Grundwassers bzw. die Entspannung von gespanntem Grundwasser führen durch eine Verminderung der Auftriebskraft zu einer Erhöhung der effektiven Spannungen, die ihrerseits Senkungen an der Geländeoberfläche bewirken können. Während in den nichtbindigen Grundwasserleitern die Senkungen unmittelbar mit der Grundwasserabsenkung erfolgen, treten die Senkungen in den bindigen Grundwassernichtleitern bzw. -hemmern zeitverzögert und über lange Zeiträume (teilweise mehrere Jahrzehnte) auf (ZIEGLER et al. 2009).

Die Absenkung des Grundwasserspiegels und der anschließende Grundwasserwiederanstieg im Rahmen von Grundwasserentnahmen werden begleitet von Veränderungen des hydrostatischen Druckes, der verschiedenen Spannungszustände und der Auftriebskräfte. Diese Vorgänge wurden von HOLTRUP (1999) und ZIEGLER (2009, 2010) ausführlich abgehandelt.

Druck kann in den meisten Fällen als Ergebnis einer senkrecht auf eine Fläche wirkenden Kraft definiert werden; sie stellt damit den Quotienten aus der Kraft und der Fläche dar. Im Sinne der Elastizitätstheorie ist der Druck eine Normalspannung und somit ein Spezialfall der mechanischen Spannung.

Unter mechanischer Spannung versteht man die innere Kraft eines Körpers bezogen auf die beanspruchte Querschnittsfläche (KABUS 2013). In einem Zwei- bzw. Dreiphasensystem (Feststoff, Wasser, ggf. Luft) werden drei Spannungen unterschieden (PRINZ & STRAUB 2011):

- **Totale Spannung σ :** Die Gesamtspannung aus der Masse des Bodens, des Wassers sowie der Auflast des hangenden Gebirges wird als totale Spannung bezeichnet (N/m^3). Diese wird durch die effektive Spannung σ' und die neutrale Spannung u (Porenwasserdruck) an der oberen Grenzfläche des gespannten Grundwasserleiters ausgeglichen: $\sigma = \sigma' + u$
- **Neutrale Spannung u (Porenwasserdruck):** Der Wasserdruck in den Poren eines wassergesättigten Bodens, der vom Porengerüst abgetragen wird, wird als neutrale Spannung (Porenwasserdruck) bezeichnet (N/m^3 , DIN 1080-6, 1980). Er ergibt sich aus dem Produkt der Wichte des Wassers γ_w und der Höhe des Grundwasserstandes h (hydrostatischer Druck): $u = \gamma_w \cdot h$
- **Effektive Spannung σ' :** Die effektive (wirksame) Spannung wird von der Festsubstanz aufgenommen. Sie ergibt sich als Differenz der totalen Spannung und dem Porenwasserdruck (N/m^3) und wird vereinfacht auf die rechnerische Fläche bezogen: $\sigma' = \sigma - u$

Der Porenwasserdruck wirkt allseitig und entspricht unter Normalbedingungen dem hydrostatischen Druck (Höhe des Grundwasserstands). In bindigen Gesteinen mit geringer Wasserdurchlässigkeit kann es bei einer auf den Boden aufgetragenen Belastung zu einem *Porenwasserüberdruck* kommen. Der Gleichgewichtszustand zwischen dem Porenwasserdruck und dem entstandenen Porenwasserüberdruck wird durch eine instationäre Porenwasserströmung wiederhergestellt. Ein Porenwasserüberdruck kann auch durch gespanntes Grundwasser verursacht werden (DEUTSCHE GESELLSCHAFT FÜR ERD- UND GRUNDBAU E.V. 1982).

Eine Änderung der Grundwasserspiegellhöhen und damit der hydrostatischen Drücke bewirkt grundsätzlich Bodenbewegungen, da die Auftriebskraft der Bodenkörner verändert wird. Die Auftriebskraft ist eine der Schwerkraft entgegenwirkende Kraft, die ein in eine Flüssigkeit eingetauchter Körper erfährt (DEUTSCHE GESELLSCHAFT FÜR ERD- UND GRUNDBAU e.V. 1982). Die Auftriebskraft entsteht dadurch, dass der Druck des Wassers mit der Tiefe linear zunimmt und somit an der Unterseite eines Körpers (p_u) ein größerer Druck wirkt als an dessen Oberseite (p_o) (Abbildung 160, ZIEGLER 2010). Der resultierende Druck ist gleich der Differenz aus dem von unten und von oben auf den Körper wirkenden Drücken:

$$\Delta p = p_u - p_o = \gamma_w \cdot (z_u - z_o)$$

mit: Δp = Druckdifferenz (N/m^2)

p_u = von unten wirkender Druck (N/m^2)

p_o = von oben wirkender Druck (N/m^2)

γ_w = Wichte des Wassers (N/m^3)

z_u = Abstand zwischen der Unterseite des Körpers und der Wasseroberfläche (m)

z_o = Abstand zwischen der Oberseite des Körpers und der Wasseroberfläche (m)

Die resultierende Auftriebskraft F_A ergibt sich aus der Gewichtskraft des verdrängten Flüssigkeitsvolumens und ist senkrecht nach oben gerichtet (Archimedes, um 220 v. Chr.):

$$F_A = \rho_{\text{Fl}} \cdot g \cdot V_K = \gamma_w \cdot V_K$$

mit: F_A = Auftriebskraft (N)

ρ_{Fl} = Dichte des Fluids (kg/m^3)

g = örtliche Fallbeschleunigung ($= 9,81 \text{ m/s}^2$)

V_K = Volumen des Körpers (entspr. verdrängtem Flüssigkeitsvolumen) (m^3)

Nach einer Grundwasserabsenkung werden durch eine Verminderung der Auftriebskraft die Kontaktflächen der Bodenkörner stärker beansprucht. Diese Verminderung bewirkt pro Meter Grundwasserabsenkung eine Belastung von 1MN/m^3 (KÖRNER 1927), was nahezu zwangsläufig zu Bodensenkungen führt. Bei diesem Vorgang sind die bodenphysikalischen Eigenschaften des anstehenden Gebirges von großer Bedeutung. Bei einem späteren Grundwasserwiederanstieg wird die Auftriebskraft hingegen wieder erhöht, was zu Hebungen an der Geländeoberfläche führt (ZIEGLER 2010).

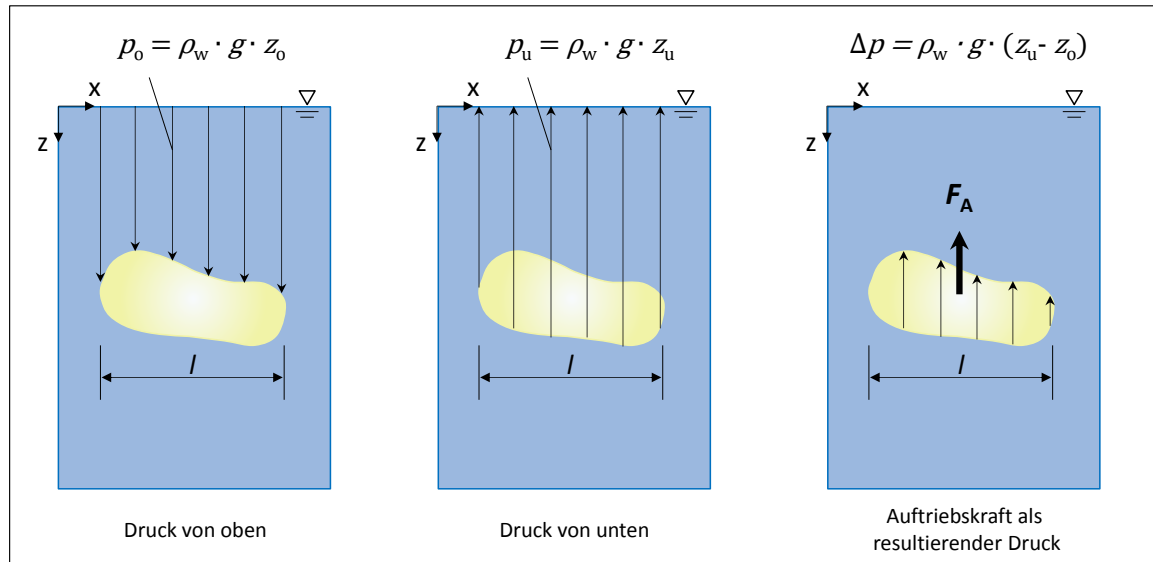


Abbildung 160: Entstehung des Auftriebskraft eines Bodenkornes (nach ZIEGLER 2010).

Die Wichte wird für Lastannahmen zur Berechnung von Erdaufasten, Erddruck, Grundbruch, Senkungen und Massenverlagerungen verwendet und stellt damit eine wichtige Größe für die Beurteilung von Spannungszustände im Untergrund dar. Die Wichte wird in der Physik heute kaum noch verwendet, findet aber in der Technik, besonders in der Geotechnik und dem Bauingenieurwesen Verwendung (DIN 1080-6, DIN 1306). Die Wichte γ ist die volumenbezogene Gewichtskraft, die ein Körper mit der Dichte ρ (kg/m^3) aufgrund der örtlichen Fallbeschleunigung g ($= 9,81 \text{ m/s}^2$) ausübt (DIN 1306 (1984), PRINZ & STRAUß 2011):

$$\gamma = \frac{G}{V} = \rho \cdot g$$

mit:

- γ = Wichte (N/m^3)
- G = Gewichtskraft (N)
- V = Volumen (m^3)
- ρ = Dichte (kg/m^3)
- g = örtliche Fallbeschleunigung ($= 9,81 \text{ m/s}^2$)

Man unterscheidet zwischen folgenden Wichten (Abbildung 161):

- Feuchtwichte γ

$$\gamma = (1 - n) \cdot (1 + w) \cdot \gamma_s = \frac{1 + w}{1 + e} \cdot \gamma_s$$

- Trockenwichte des Bodens γ_d

$$\gamma_d = (1 - n) \cdot \gamma_s = \frac{1}{1 + e} \cdot \gamma_s$$

- Wichte bei Wassersättigung γ_r

$$\gamma_r = (1 - n) \cdot \gamma_s + n \cdot \gamma_w = \frac{\gamma_s + e \cdot \gamma_w}{1 + e}$$

- Wichte unter Auftrieb γ'

$$\gamma' = (1 - n) \cdot (\gamma_s - \gamma_w) = \gamma_r - \gamma_w = \frac{\gamma_s - \gamma_w}{1 + e}$$

mit:

- n = Porenanteil (1)
- w = Wassergehalt (1)
- e = Porenzahl (1)
- γ = Feuchtwichte (N/m³)
- γ_s = Kornwichte (N/m³)
- γ_w = Wichte des Wassers (N/m³)
- γ_r = Wichte bei Wassersättigung (N/m³)

B2.3.3.2 Veränderung der geohydraulischen Verhältnisse

■ GRUNDWASSERGEWINNUNG

Anthropogene Bodenbewegungen haben häufig ihre Ursache im Grundwasserentzug durch die Gewinnung von Trink- und Brauchwasser. Dies betrifft zum einen die Wasserförderung für die überregionale und industrielle Nutzung, aber auch die Einzelwasserversorgung in den ländlichen Siedlungsgebieten.

Eine Folge von Grundwasserentnahmen und den damit verbundenen Grundwasserabsenkungen sind Senkungen der Geländeoberfläche. Bei einem Wiederanstieg des Grundwassers kann es zu einer Hebung der Geländeoberfläche kommen. Der Betrag dieser Geländehebungen ist jedoch wesentlich geringer, als der Betrag der Geländesenkungen.

Die mit der Grundwassergewinnung verbundenen Bodenverformungen können Bauwerkschäden hervorrufen, die mit Schäden aus dem untertägigen Bergbau vergleichbar sind. Sie werden daher in der Bergschadenkunde als sog. Pseudobergschäden bezeichnet (SEMMLER 1947, 1961, NENDZA 1975, KRATZSCH 1997).

■ DRAINIERUNG UND BEWÄSSERUNG LANDWIRTSCHAFTLICHER FLÄCHEN

Einen negativen Einfluss auf den Grundwasserhaushalt besitzen im Allgemeinen auch Drainagesysteme auf landwirtschaftlichen Nutzflächen. Versickernder Niederschlag wird hierbei oberflächennah gesammelt und über Drainageleitungen den Vorflutern zugeführt. Als Folge kann die natürliche Grundwasserneubildung in den betroffenen Bereichen herabgesetzt werden, was zu einer Verminderung des Grundwasservorrates und damit zu Setzungen führen kann. Des Wie-

teren kann es durch die Wiesenbewässerung (sog. Flößen) zu einer Veränderung der Geländeoberfläche durch die Sättigung bindiger Schichten kommen. Diese Methode wird allerdings nur noch selten angewandt.

■ NICHT FACHGEMÄß AUSGEFÜHRTE BOHRUNGEN

Nicht fachgemäß ausgeführte Bohrungen können durch Umläufigkeiten und dem damit verbundenen Abtransport von Feinmaterial zu weiträumigen Bodensenkungen führen. Dieser Vorgang führt insbesondere bei artesischem Grundwasser zu großen Schäden und ist technisch nur aufwendig zu beherrschen.

Bei einem solchen hydraulischen Kurzschluss kann gespanntes Grundwasser aus unter Druck stehenden Schichten austreten und in andere Grundwasserstockwerke fließen. Bei umgekehrten Druckverhältnissen kann Grundwasser aus höheren Stockwerken in darunter liegende Stockwerke abfließen. Hierdurch wird der Druck in dem wasserführenden Stockwerk abgebaut, und somit die Auftriebskraft für das überlagernde Gebirge vermindert. Es kommt zu einer großräumigen Senkung der Geländeoberfläche. Des Weiteren kann es durch Ringraum-Umläufigkeiten im Bohrloch zu ungewollten Grundwasserabsenkungen und damit verbunden zur Verminderung der Auftriebskräfte und damit zu Senkungen kommen.

Seit einigen Jahren gewinnen die Erdwärmenutzungen und die damit verbundenen Bohraktivitäten an Bedeutung. Zu unterscheiden sind hierbei die oberflächennahe Geothermie und die Tiefengeothermie. Bei der oberflächennahen Geothermie wird bis 400 m Tiefe der Boden zur Wärmeengewinnung genutzt, die Tiefengeothermie hingegen nutzt Bohrungen in größeren Teufen. Ein spektakulärer Schadensfall im Ruhrgebiet trat in jüngster Zeit in Kamen-Wasserkurl auf. Hier kam es durch das Ausspülen von Feinmaterial in Karsthohlräume des unteren Kreide-Grundwasserleiters zu einer Senkung an der Geländeoberfläche (WREDE et al. 2010, AD-HOC ARBEITSGRUPPE GEOLOGIE 2011). Generell muss bei der Durchführung der zahlreichen Geothermiebohrungen darauf geachtet werden, dass die Gesteinsschichten im Untergrund nicht hydraulisch verbunden werden.

Eine mögliche weitere Schadensursache ist der Grundwasserzufluss in Anhydrit-Schichten. Tritt Grundwasser in solche Schichten ein, wird der Anhydrit unter Wassereinfluss zu Gips umgewandelt. Dies führt zu einer Volumenzunahme, verbunden mit einer Hebung der Geländeoberfläche. Im Jahr 2007 traten in einem Schadensfall in Süddeutschland Hebungen dieser Art auf, als durch Geothermiebohrungen artesisch gespanntem Grundwasser im Liegenden einer Gipskeuper-Schicht angebohrt wurde. Dies führte zu anfänglichen Hebungsraten der Tagesoberfläche von bis zu 1 cm pro Monat (LANDESAMT FÜR GEOLOGIE, ROHSTOFFE UND BERGBAU BADEN-WÜRTTEMBERG 2010).

B2.3.3.3 Veränderung der bodenmechanischen Verhältnisse

■ SÜMPFUNGEN

Für die Rohstoffgewinnung in Tage- und Tiefbauen wird das Grundwasser häufig aus Sicherheitsgründen abgesenkt (Sümpfung). Hierdurch entsteht ein Absenkungstrichter, der über den Abbaubereich hinaus reicht, dessen Größe von den hydrogeologischen Eigenschaften der beeinflussten Gesteinsschichten und der Pumprate abhängt. Generell wird versucht, diesen

Einflussbereich so gering wie möglich zu halten, um großflächige Auswirkungen zu vermeiden. Eine hydraulische Beeinflussung der wasserführenden Schichten – auch über diesen Einflussbereich hinaus – ist bis zu einem gewissem Maße nicht zu vermeiden. Der Absenkungstrichter kann anhand verschiedener Verfahren berechnet werden, wobei eine solche Berechnung nur eine Annäherung an den tatsächlichen Zustand darstellt und diesen niemals exakt abbildet.

Wird z. B. nach Beendigung der Rohstoffgewinnung die Grundwasserhaltung eingestellt und der Anstieg des Grundwasserstandes auf das ursprüngliche Niveau zugelassen, so erreichen die Hebungsbeträge nicht die ursprünglichen Senkungsbeträge. So erreichen bei der Entlastung die Hebungsbeträge je nach Bodenart aufgrund der zuvor erhöhten Steifigkeit nur einen Bruchteil der entsprechenden Setzungsbeträge bei erstmaliger Grundwasserabsenkung (ZIEGLER et al. 2009).

Die Bewegungen der Geländeoberfläche infolge großflächiger Grundwasserabsenkung sowie einem anschließenden Wiederanstieg lassen sich beispielhaft durch die Änderung der Spannungszustände im Boden zu drei unterschiedlichen Zeitpunkten skizzieren (ZIEGLER 2010):

1. vor der Grundwasserabsenkung (Zeitpunkt 1, Abbildung 161),
2. nach der Grundwasserabsenkung
 - unmittelbar nach der Grundwasserabsenkung (Zeitpunkt 2a, Abbildung 162)
 - zeitverzögerte Auswirkungen im bindigen Grundwassernichtleiter (Zeitpunkt 2b, Abbildung 163),
3. nach teilweisem Grundwasseranstieg (Zeitpunkt 3, Abbildung 164).

In dem Beispiel wird ein Untergrund, bestehend aus einem kiesigen Sand mit eingelagerter mittelplastischer Tonschicht, angenommen.

Zum Zeitpunkt 1 – vor der Grundwasserabsenkung – mit unbeeinflussten Spannungszuständen befindet sich die angenommene Grundwasseroberfläche dicht unter der Geländeoberfläche (Abbildung 161). Die totale Spannung σ ergibt sich aus der Trockenwichte und der grundwassererfüllten Mächtigkeit wie folgt:

$$\sigma = \gamma_d \cdot h$$

mit: σ = totale Spannung (N/m²),
 γ_d = Trockenwichte des Bodens (N/m³),
 h = grundwassererfüllten Mächtigkeit (m).

Der hydrostatisch wirkende Porenwasserdruck u (neutrale Spannung) nimmt linear mit der Tiefe zu. Die effektive Spannung σ' ist die Differenz der totalen Spannung σ und der neutralen Spannung u :

$$\sigma' = \sigma - u$$

mit: σ' = effektive (wirksame) Spannung (N/m²),
 σ = totale Spannung (N/m²),
 u = neutrale Spannung (Porenwasserdruck, N/m²).

Generell treten Senkungen zunächst im Boden nach der Sedimentation aufgrund des Eigengewichtes der Kornpartikel auf. Nach Abklingen dieser natürlichen Senkungen sind bei unveränderten Untergrundverhältnissen, wie in Abbildung 161 für den Zeitpunkt 1 dargestellt, keine senkungserzeugenden Spannungen $\Delta\sigma'$ zu verzeichnen (ZIEGLER 2010).

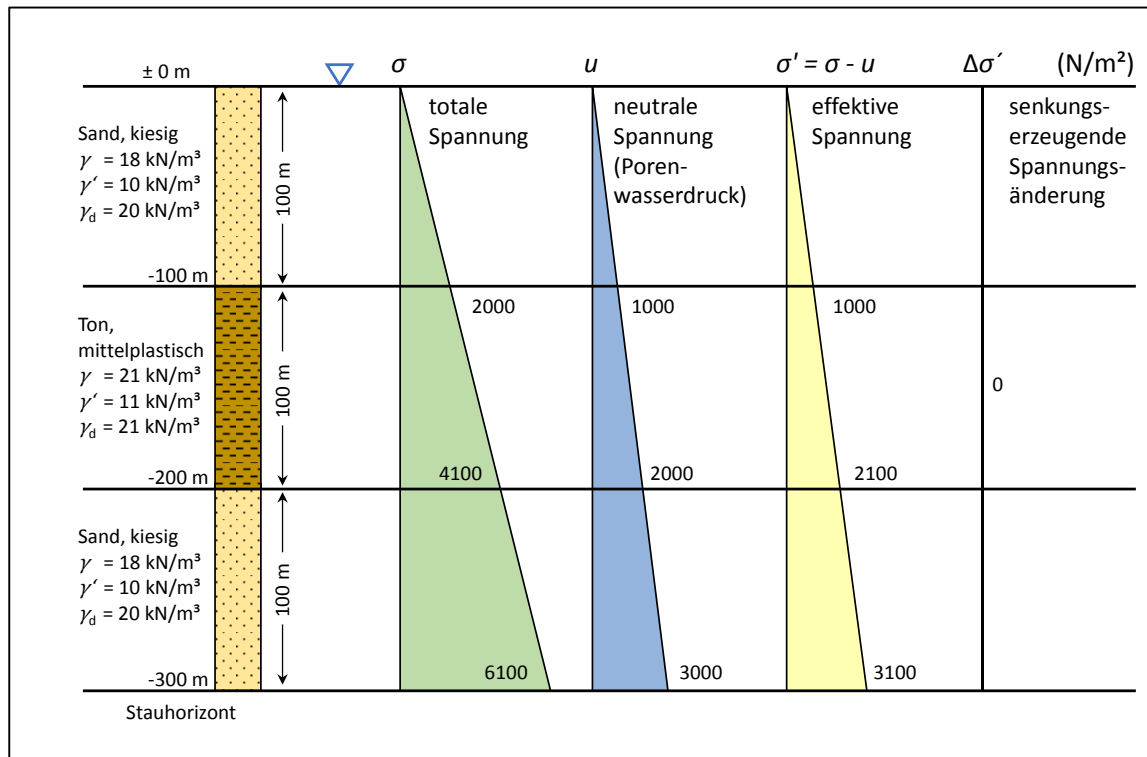


Abbildung 161: Zeitpunkt 1 - Spannungszustände vor der Grundwasserabsenkung (nach ZIEGLER 2010).

Zum Zeitpunkt 2a – unmittelbar nach der Grundwasserabsenkung – wird durch Verringerung der Auftriebskraft im ungesättigten Bereich der Druck im Korngerüst erhöht (Abbildung 162). Durch diese Auflast wird die totale Spannung σ erhöht (HOLTRUP 1999). Der Porenwasserdruck u geht im entwässerten Bereich auf null zurück. Das Korngerüst ist nicht mehr in der Lage die Auflast zu tragen. Dies ist der Grund für die Senkungen im entwässerten Bereich. Es handelt sich hierbei im Allgemeinen um eine elastische Verformung, die bei einem Wiederanstieg des Grundwassers umkehrbar ist. Im freien Grundwasser tritt eine merkliche Senkung bei größeren Grundwasserleiter-Mächtigkeiten und entsprechenden Grundwasserabsenkungen ein. Bei der Grundwasserabsenkung unterhalb der Tonschicht verringert sich die totale Spannung entsprechend der Differenz der Wichte bei Wassersättigung und der Feuchtwichte. Diese Spannungsabnahme entspricht dem Porenwasserdruck u (Abbildung 162). Da in den nichtbindigen Schichten der Porenwasserdruck durch die Grundwasserabsenkung schlagartig auf null abfällt, werden die effektiven und damit auch senkungserzeugenden Spannungen ($\Delta\sigma'$) entsprechend erhöht; es kommt zu Setzungen. In der bindigen Schicht bleibt der Porenwasserdruck zunächst erhalten, da die Wasserabgabe aufgrund der geringen Wasserdurchlässigkeit nur langsam erfolgt. Der Gleichgewichtszustand zwischen dem Porenwasserdruck und dem entstandenen Porenwasserüberdruck wird durch eine instationäre Porenwasserströmung wiederhergestellt. Der Porenwasserdruck der Tonschicht wird in dieser Phase nur um den Rückgang der totalen Spannung reduziert. Da sich hierdurch die effektiven Spannungen nicht ändern, treten in der bindigen Schicht keine unmittelbaren Senkungen auf (Zeitpunkt 2a, Abbildung 162).

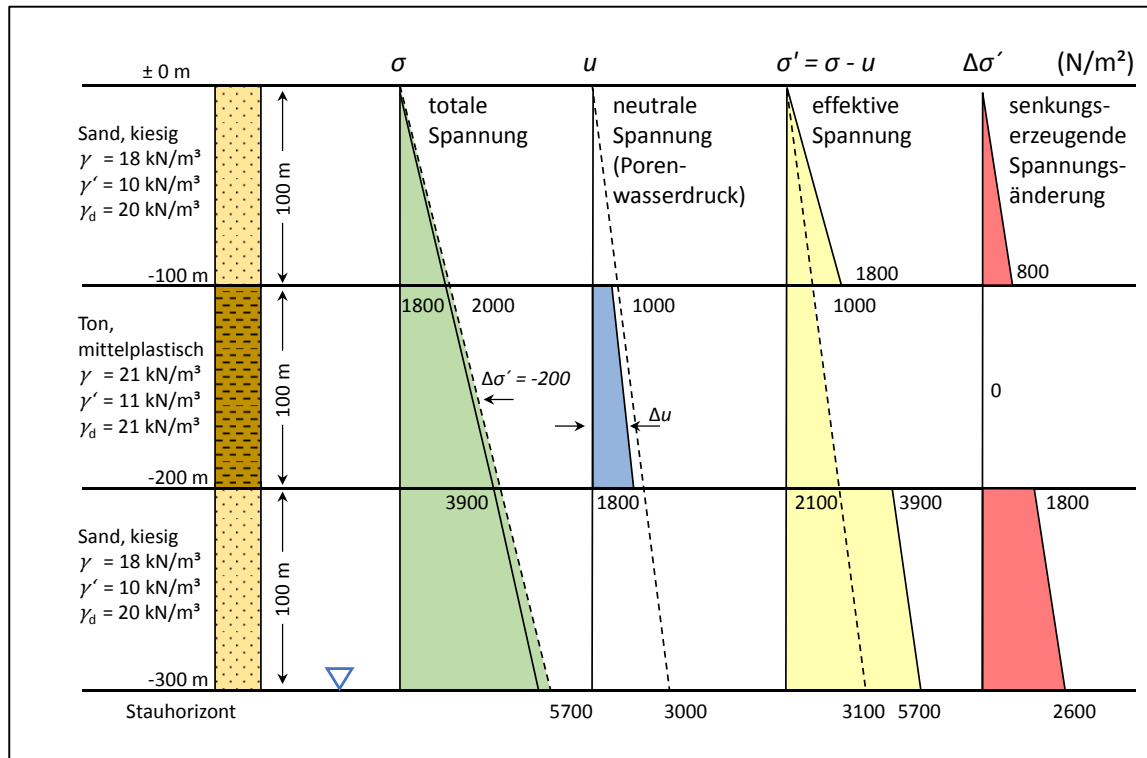


Abbildung 162: Zeitpunkt 2a - Spannungszustände unmittelbar nach der Grundwasserabsenkung (nach ZIEGLER 2010).

Zum Zeitpunkt 2b – nach einer Grundwasserabsenkung – herrscht in der bindigen Schicht gegenüber den über- und unterlagernden nichtbindigen Schichten ein Porenwasserüberdruck. Dieser Porenwasserüberdruck führt dazu, dass in der bindigen Schicht zunächst keine Volumenverminderung eintritt. Es kommt daher zunächst zu keiner Setzung. Die Konsolidierung der bindigen Schicht tritt erst zeitverzögert durch den Abbau des Porenwasserüberdrucks durch eine instationäre Porenwasserströmung an den Grenzbereichen zu den nichtbindigen Schichten ein, wodurch in diesen Bereichen die effektive Spannung (σ') erhöht wird (Zeitpunkt 2b, Abbildung 163). Diese senkungserzeugenden Spannungsänderungen führen bei anhaltender Grundwasserabsenkung zu einer langfristigen Konsolidierung der bindigen Schicht und damit zu Bodensenkungen. Dieser Prozess der Volumenabnahme der bindigen Schicht kann in Abhängigkeit der Schichtmächtigkeit über Zeiträume von mehreren Jahren bis Jahrzehnten erfolgen (NENDZA 1975, ZIEGLER 2010).

Zum Zeitpunkt 3 – nach einem teilweisen Grundwasserwiederanstieg – gerät der Boden wieder unter Auftrieb (Abbildung 164). Da die totale Spannung unverändert bleibt, verringert sich die effektive Spannung um den Betrag des sich während des Grubenwasseranstiegs wieder aufbauenden Porenwasserdrucks. Aufgrund dieses Vorganges treten in dieser Schicht Hebungen auf. Im Bereich der Grundwasserdruckfläche wird ein zusätzlicher Porenwasserdruck aufgebaut, der sich mit dem noch bestehenden Porenwasserdruck in der bindigen Schicht überlagert (Zeitpunkt 3, Abbildung 164), wodurch es hier zu einem sprunghaften Anstieg der effektiven Spannung und zu Hebungsvorgängen kommt. Oberhalb des wieder angestiegenen Grundwasserspiegels herrscht aber weiterhin der aus der Grundwasserabsenkung stammende Porenwasserüberdruck, der noch nicht vollständig ist und weiter zu Setzungen führt. Hierdurch entsteht die widersprüchliche Situation, dass an der Geländeoberfläche trotz teilweiser Entlastung und Hebungen durch den

Grundwasserwiederanstieg in den tieferen Schichten insgesamt noch Setzungen registriert werden (ZIEGLER 2010).

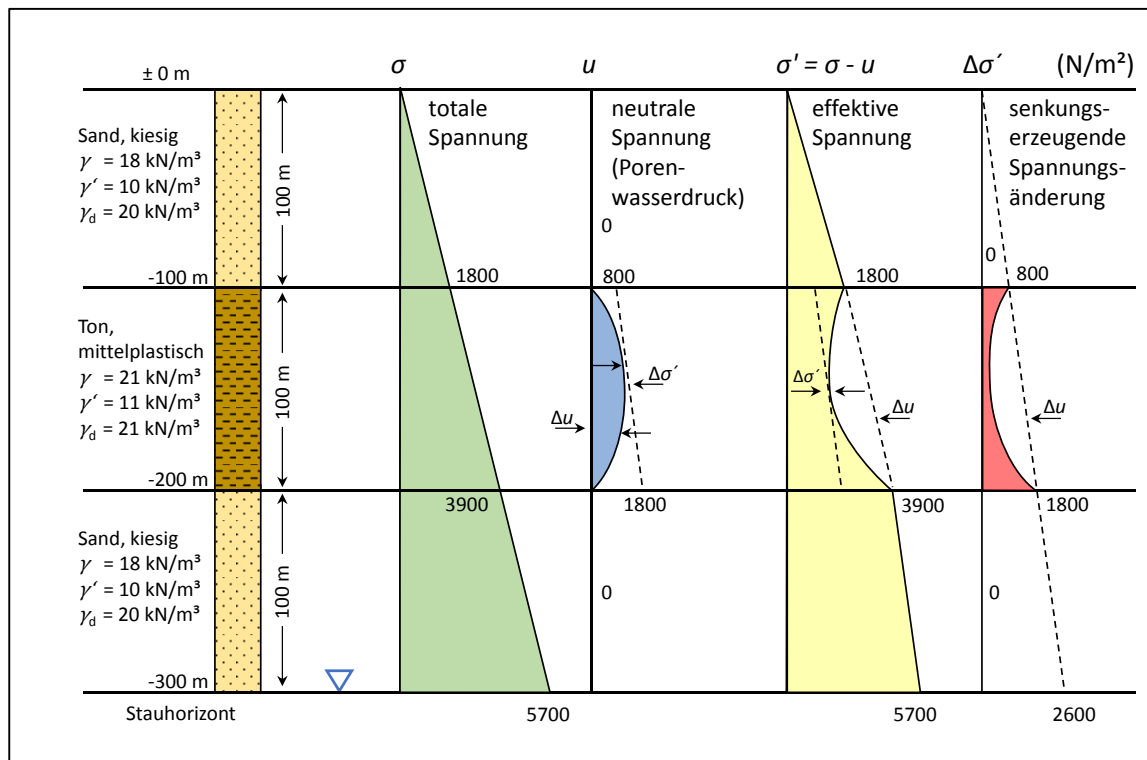


Abbildung 163: Zeitpunkt 2b - Spannungszustände in dem bindigen Grundwassergeringleiter nach einer Grundwasserabsenkung (nach ZIEGLER 2010).

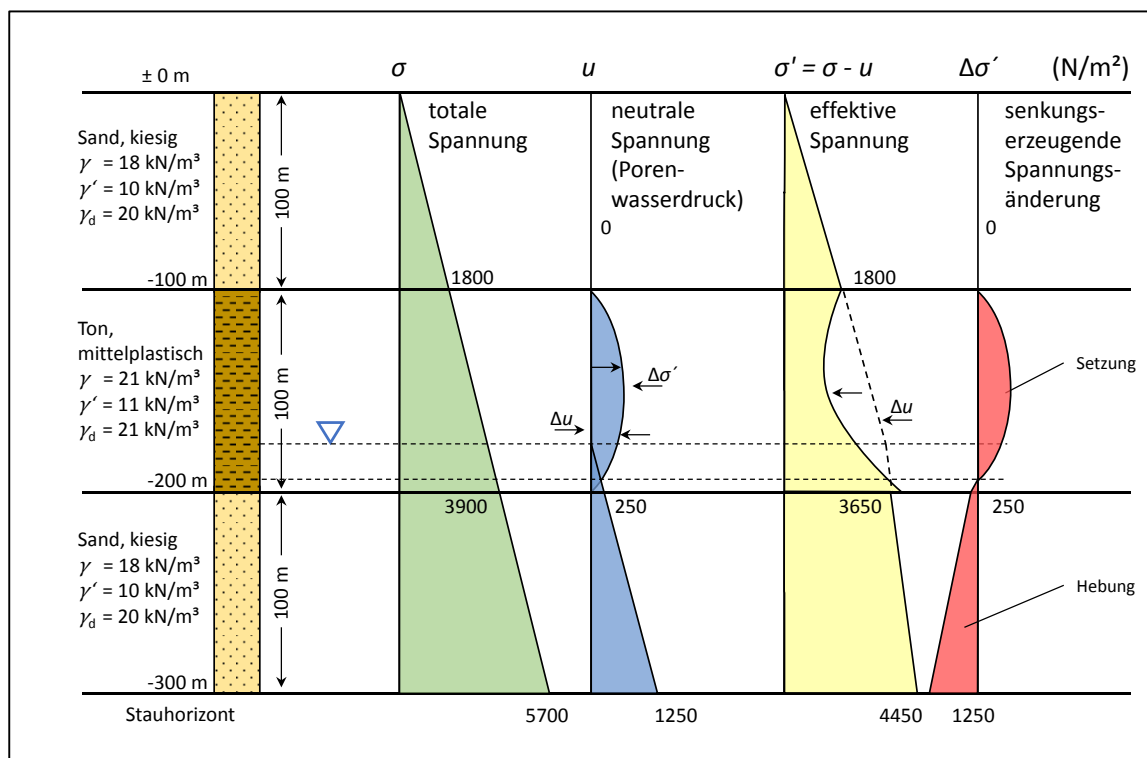


Abbildung 164: Zeitpunkt 3 - Spannungszustände nach teilweiseem Grundwasseranstieg (nach ZIEGLER 2010).

■ BODENMECHANISCHE VERÄNDERUNGEN BINDIGER BÖDEN

Eine Verringerung der Mächtigkeit von bindigen Böden (Ton und Schluff) kann durch zwei unterschiedliche Prozesse ausgelöst sein. Generell führt eine Entnahme von Grundwasser zu einem wachsenden Druckgradienten, wodurch die Konsolidation der Bodenpartikel verstärkt wird. Die Verformung, die hierbei auftritt, ist plastisch, d. h. sie ist generell irreversibel. Im Gegensatz zu der elastischen Verformung in gut durchlässigen Grundwasserleitern kann die Konsolidierung von Tonen je nach Mächtigkeit und Druckgradient mehrere Jahrzehnte andauern (HOLTRUP 1999).

■ SCHRUMPUNG BINDIGER BÖDEN

Einen weiteren Setzungsprozess stellt die oberflächennahe Schrumpfung von Tonen dar, die oberflächennah auftritt und durch die Verdunstung der Bodenluft bewirkt wird. Dadurch trocknen die Tone langsam aus. Alle im Wasser sedimentierten Böden schrumpfen, wenn sie erstmalig entwässert werden (HARTGE 1978). Bei Auftreten von Tonen, Mudden und teilweise Schluffen ist dieser Effekt besonders augenfällig, wenn die Volumenveränderung groß ist und Schrumpfrisse an der Geländeoberfläche erhalten bleiben. Dieser dreidimensionale Austrocknungsvorgang wird durch Rissbildung in den Tonen zeitlich beschleunigt. PLACZEK (1982) untersuchte das Schrumpfungsverhalten bindiger Böden und stellte fest, dass bei einer grobkörnigen Überdeckung des Tones, z. B. durch Sande, die Schrumpfung der Tone verlangsamt oder sogar ganz verhindert wird. Bestehen die überlagernden Schichten jedoch ebenfalls aus feinkörnigem Material, wird die Schrumpfung durch einen erhöhten Wasserentzug begünstigt. Auch die Mächtigkeit der Deckschichten ist ein entscheidender Faktor für das Ausmaß der Schrumpfungen. Je mächtiger die Überdeckung ist, umso größer ist die Zeitverzögerung, mit der sich die Schrumpfungen an der Tagesoberfläche bemerkbar machen.

Die Kontraktion des Bodens hängt eng mit dem kapillaren Aufstieg zusammen, denn die Druckdifferenz wirkt allseitig und zieht deshalb die Kapillarwände zusammen. Aufgrund der sehr hohen Hohlraumanteile in feinkörnigen Sedimenten ist dieses Phänomen viel deutlicher ausgeprägt als in grobkörnigen Sedimenten. Hinzu kommt noch, dass sowohl Ton- als auch Muddeböden infolge ihrer stark von der Kugel abweichenden Kornform einen sehr großen Hohlraumanteil besitzen (HARTGE 1978).

Der Prozess der Schrumpfung von Tonböden ist ein reversibler Prozess. Kommen die ausgetrockneten Tone wieder in Kontakt mit Wasser, tritt durch die Einlagerung von Wasser in die einzelnen Lagen des Korngerüsts von Tonen eine Schwellung auf. Dieser Vorgang bewirkt eine Ausdehnung der Tone. Generell werden jedoch die Schrumpfungsbeträge nicht vollständig durch die Hebungsbeträge der nachfolgenden Schwellung ausgeglichen.

■ ENTWÄSSERUNG VON TORFEN

Torfböden können aufgrund ihrer besonderen Eigenschaften ebenfalls zu starken Verformungen des Untergrundes führen. Hierbei sind drei Faktoren zu nennen:

- Das Korngerüst mit seiner geringen Dichte und lockeren Struktur ist generell stark kompressibel.
- Durch Verringerung des Wassergehaltes können naturgemäß Schrumpfungen im Torf auftreten.
- Mikroorganismen und Luftzufuhr können die im Torf enthaltenen organischen Bestandteile zersetzen.

Im Zusammenhang mit Grundwasserabsenkungen in torfhaltigen Böden treten folgende Effekte auf:

- Durch Verminderung der Auftriebskraft kommt es zu einer Erhöhung der Spannung und damit zu einer Schrumpfung des Bodens.
- Durch Sauerstoffzufuhr wird der Zersetzungsprozess verstärkt.

Das als „Torfverzehr“ bekannte Phänomen der Materialzersetzung (Mineralisierung) tritt in der Regel im Bereich von künstlich entwässerten Moorflächen auf, um diese einer landwirtschaftlichen Nutzung zuzuführen. Dieser Vorgang wird durch einen gasförmigen Massenausstrag begleitet.

B2.3.4 Technische Verdichtung

Durch den Einsatz schwerer technischer Geräte in der Landwirtschaft findet eine Verdichtung des Untergrundes statt, die sich in Form von Senkungen auf den Untergrund auswirkt. Die Größenzunahme der Arbeitsgeräte und der damit verbundenen Masse verstärken diesen Prozess im Laufe der technischen Entwicklung. Während früher relativ kleine Traktoren und Zugmaschinen eingesetzt wurden, kommen heute hochmoderne Geräte zum Einsatz, die den Boden mit mehreren Tonnen Gewicht belasten. Hiermit verbunden ist auch eine Zunahme der aufgebrachten Druckspannungen zur Tiefe hin. Aus diesem Grund kann ein überkonsolidierter Zustand des Bodens als unausweichliche Folge menschlicher Tätigkeiten gesehen werden.

Der Einsatz moderner Traktoren und hoch spezialisierter Erntemaschinen fordert hohe Auslastungsgrade, teilweise auch zu ungünstigen Witterungsbedingungen, und stoßen damit allzu oft an die Grenzen einer bodenschonenden Befahrbarkeit. Während trockene Böden eine hohe Tragfähigkeit haben und weniger empfindlich gegen Raddruck sind, zeigen insbesondere feuchte Böden bei hoher Bodenfeuchte eine starke Druckempfindlichkeit mit großer Spurtiefe (BRUNOTTE & LORENZ 2015).

Eine hohe Lagerungsdichte des Bodens kann jedoch auch bautechnisch erforderlich sein, z. B. bei der Verwendung von Erdbaumaterial für Dämme, Fahrbahnen oder als Dichtungsmaterial unter auf Halten und Deponien. Auch dieser Verdichtungs Vorgang führt zu Geländesenkungen.

ANHANG B3 – LITERATUR ZUM ANHANG B

AD-HOC ARBEITSGRUPPE GEOLOGIE (2011): *Fachbericht zu bisher bekannten Auswirkungen geothermischer Vorhaben in den Bundesländern*. – Informationen aus den Bund/Länder-Arbeitsgruppen der Staatlichen Geologischen Dienste: 58 S., 17 Abb., 4 Anl.; Wiesbaden. – Online im Internet: http://www.infogeo.de/dokumente/download_pool/FS2011_Top_6.2_Anlage_PK_Geothermie_Bericht.pdf (abgerufen am 23.06.2015).

BAGLIKOW, V. (2010): *Schadensrelevante Auswirkungen des Grubenwasseranstiegs im Erkelenzer Steinkohlenrevier*. Dissertation, Schriftenreihe Institut für Markscheidewesen, Bergschadenkunde und Geophysik im Bergbau an der RWTH Aachen, Hrsg. A. Preuße, Heft 1-2010.

BEZIRKSREGIERUNG DÜSSELDORF (2011): *Wissenswertes zu Abgrabungen*. – Stand 15.08.2011, online im Internet: http://www.brd.nrw.de/umweltschutz/abgrabungen/Wissenswertes_zu_Abgrabungen750.html (abgerufen am 03.08.2015).

BÖGLI, A. (1978): *Karsthydrographie und physische Speläologie*. – 292 S., 160 Abb., 59 Tab., 12 Taf.; Berlin, Heidelberg (Springer).

BRUNOTTE, J. & LORENZ, M. (2015): *Anpassung der Lasteinträge landwirtschaftlicher Maschinen an die Verdichtungsempfindlichkeit von Böden – Wunschtraum oder Realität?* – in: Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft (BMEL) [Hrsg.]: Tagungsband „Jahr des Bodens“ - Schwere Maschienen, enge Fruchtfolgen, Gärreste – Eine Gefahr für die Bodenfruchtbarkeit?: 11-17, 5 Abb., 1 Tab.; Bonn (BMEL).

BUSCH, K.-F. & LUCKNER, L. (1972): *Geohydraulik*. – 442 S., 277 Abb., 59 Tab.; Leipzig (VEB Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie).

DEUTSCHE GESELLSCHAFT FÜR ERD- UND GRUNDBAU E. V. (1982) [Hrsg.]: *Grundbegriffe der Felsmechanik und Ingenieurgeologie*. – 2. Aufl., 426 S., 46 Abb.; Essen (Verlag Glückauf).

DIN 1054 (2010): *Baugrund - Sicherheitsnachweise im Erd- und Grundbau – Ergänzende Regelungen zu DIN EN 1997-1*. – Berlin (Beuth)

DIN 1080-6 (1980): *Begriffe, Formelzeichen und Einheiten im Bauingenieurwesen, Bodenmechanik und Grundbau*. – Berlin (Beuth).

DIN 1306 (1984): *Dichte; Begriffe, Angaben*; Beuth (Berlin).

DIN 4107-1 (2011): *Geotechnische Messungen – Teil 1: Grundlagen*; Berlin (Beuth).

DIN 4107 (1978): *Baugrund; Setzungsbeobachtungen an entstehenden und fertigen Bauwerken*; Beuth (Berlin).

ERLEMEYER, M. & WREDE, V. (1999), mit einem Beitrag von LANSER, K.D.: *Höhlen in den Plänerkalksteinen des Hellwegs bei Anröchte (Münsterländer Kreidebecken)*. – scriptum, 4: 5-33, 25 Abb.; Krefeld (GLA NRW).

HARTGE, K.H. (1978): *Einführung in die Bodenphysik*. – 364 S., 134 Abb., 16 Tab.; Stuttgart (Enke).

HARTGE, K.-H., HORN, R., BACHMANN, J., PETH, S. (2014): *Einführung in die Bodenphysik*. – 4. Aufl.: 372 S., 186 Abb., 24 Tab.; Stuttgart (Schweizerbart).

HEJMANOWSKI, R. (1993): *Zur Vorausberechnung Förderbedingter Bodensenkungen über Erdöl- und Erdgaslagerstätten*. Dissertation, TU Clausthal.

HINTIKKA, V. (1972): *Wind-induced movement of forest trees*. – Communications Inst. Forest. Fenn., 76: 1-56.

HOLTRUP, O. (1999): *Der Einfluß von Grundwasserabsenkungen auf Bewegungen an tektonischen Verwerfungen im Süden der Venloer Scholle (Niederrhein, Nordrhein-Westfalen)*. – scriptum - Arbeitsergebnisse aus dem Geologischen Landesamt Nordrhein-Westfalen, H. 5: 5-47, 20 Abb., 4 Tab.; Krefeld (GLA).

HÖLTING, B. & COLDEWEY, W. G. (2013): *Hydrogeologie – Einführung in die Allgemeine und Angewandte Hydrogeologie*. - 8. Auflage, 438 S., 137 Abb., 92 Tab.; Heidelberg (Spektrum).

Höbelbarth, D. & Sroka, A. (2006): *Ein Beitrag zur Vorausberechnung abbaubedingter vertikaler Bodenbewegungen*. In: Tagungsband 7. Geokinematischer Tag, 11. und 12. Mai 2006. Schriftenreihe des Institutes für Markscheidewesen und Geodäsie an der TU Bergakademie Freiberg, Heft 2006-1, S. 308-318, VGE Verlag GmbH, Essen.

KABUS, K. (2013): *Mechanik und Festigkeitslehre*. – 7. Aufl., 352 S., 527 Abb.; München (Carl Hanser Verlag).

KÉZDI, A. (1964): *Bodenmechanik, Bd. 1*. – 424 S., 354 Abb., 35 Tab.; Berlin (VEB Verlag für Bauwesen).

KIRSCH, F.-J. (2002): *Bodenbewegungsvorausberechnungen in der täglichen Praxis*. In: Tagungsband 3. Geokinematischer Tag, 16.-17. Mai 2002, Freiberg, Schriftenreihe des Institutes für Markscheidewesen und Geodäsie der TU BA Freiberg, Hrsg.: A. Sroka, R. Wittenburg, Heft 2002-1, Verlag Glückauf GmbH, Essen.

KLOY, G. & SCHRAMM, H.-G. (2003): *Zur Prognose von Bergschäden bei Unterbauung von alten Abbauflächen*. In: Tagungsband 4. Geokinematischer Tag, 15.-16. Mai 2003, Freiberg, Schriftenreihe des Institutes für Markscheidewesen und Geodäsie der TU BA Freiberg, Hrsg.: A. Sroka, R. Wittenburg, Heft 2003-1, Verlag Glückauf GmbH, Essen.

KÖRNER, B. (1927): *Bodensetzungserscheinungen bei Grundwasserabsenkungen*. – Die Bautechnik, H. 42: 614-615, 2 Abb.; Berlin (Ernst & Sohn).

KRATZSCH, H. (1997): *Bergschadenkunde*. 2. Auflage: 844 S.; Deutscher Markscheider-Verein e.V., Bochum. - ISBN 3-00-001661-9.

KRATZSCH, H. (2013): *Bergschadenkunde*. 6. Auflage: 948 S.; Deutscher Markscheider-Verein e.V., Bochum. - ISBN 3-00-001661-9.

LANDESAMT FÜR NATUR, UMWELT UND VERBRAUCHERSCHUTZ NORDRHEIN-WESTFALEN (2010): *Klima und Klimawandel in Nordrhein-Westfalen – Daten und Hintergründe*. – LANUV-Fachbericht 27: 57 S., 34 Abb., 3 Tab.; Recklinghausen (LANUV).

LANDESAMT FÜR GEOLOGIE, ROHSTOFFE UND BERGBAU BADEN-WÜRTTEMBERG (LGRB, 2010): *Geologische Untersuchungen von Baugrundhebungen im Bereich des Erdwärmesondenfeldes beim Rathaus in der historischen Altstadt von Staufen i. Br.* – Sachstandsbericht AZ.: 94-4763//10-563, 01.03.2010. – 304 S., 159 Abb., 37 Tab., 25 Anl., Freiburg (LGRB). – online im Internet: <http://lgrb-bw.de/geothermie/staufen> (abgerufen am 26.05.2015).

LEHMANN, K. (1919): *Bewegungsvorgänge bei der Bildung von Pingen und Trögen*. - Glückauf, 55 (48): 933-942, 10 Abb.; Essen.

NENDZA, H. (1975): *Pseudobergschäden durch Grundwasserabsenkung*. - Glückauf-Forschungshefte, 36 (1):27-29, 7 Abb.; Essen (VGE).

PLACZEK, D. (1982): *Untersuchungen über das Schwindeverhalten bindiger Böden bei der Trocknung unter natürlichen Randbedingungen*. - Mitteilungen aus dem Fachgebiet Grundbau und Bodenmechanik, H. 3: 204 S., 80 S., 13 Tab.; Essen.

PRINZ, H. & STRAUß, R. (2011): *Ingenieurgeologie*. - 5. Aufl., 671 S., 403 Abb., 90 Tab.; Heidelberg (Elsevier).

SCHMIDT, H.-H. (2006): *Grundlagen der Geotechnik*. - 3. Auflage, 720 S., 537 Abb., 91 Tab.; Wiesbaden (Teubner).

SEMMLER, W. (1947): *Die Bedeutung der geologischen Verhältnisse für die Beurteilung von Bergschäden und scheinbaren Bergschäden*. - Saarbrücker Bergmannskalender, 68-77: 27 Abb.; Saarbrücken.

SEMMLER, W. (1961): *Die Trockenheit des Jahres 1959/60 als scheinbarer Bergschaden*. - Bergfreiheit - Zeitschr. für d. deutschen Bergbau, 11/1961: 9 S., 5 Abb., 1 Tab.; Herne.

SROKA, A., SCHÖBER, F. (1985): *Ein Beitrag zur Erfassung der Durchbauung*. Proceedings, VI. Int. Congr. Mine Surv., Harrogate/England, S. 634-644, 1985.

SROKA, A. , SCHÖBER, F., SROKA, T. (1988): *Vorausberechnung von Gebirgsbewegungen bei geneigten flözartigen Lagerstätten unter Berücksichtigung anisotroper Gebirgseigenschaften, des Durchbauungsgrades und des zeitlichen Konvergenz- und Verzögerungsverhaltens des Gebirges*. Abschlussbericht zum Forschungsvorhaben Ha 526/15-1, Technische Universität Clausthal, 1988 – unveröffentlicht.

TYRAŁA, A., SZKULASKI, S., SZWEDZICKA, M. (1975): *Klasyfikacja uskoków tektonicznych w badaniach nad ich oddziaływaniem na proces deformacji powierzchni*. (in polnisch; Klassifizierung der tektonischen Störungen in den Untersuchungen über deren Einfluss auf die abbaubedingten Bodenbewegungen.) Prace Głównego Instytutu Górnictwa. Komunikat, Główny Instytut Górnictwa, 1975, Ausgabe 652.

WREDE, V., STEUERWALD, K., DÖLLING, M., LENZ, A., HIRß, M., SCHÄFER I., HEUSER, H. & LEHMANN, K. (2010): *Die Bohrungshavarie Kamen-Wasserkurl aus geowissenschaftlicher Sicht*. - Schr.-R. GDMB, 123: 53 – 67, 4 Bilder, 2 Abb.; Clausthal-Zellerfeld.

ZIEGLER, M. (2010): *Bodenbewegungen infolge Grundwasserabsenkung bzw. -wiederanstieg*. - Tagungsband RWE Bergschadensforum 2010: 15-25, 15 Abb.; Niederzier (RWE-Power).

ZIEGLER, M., GIESE, S., FORKEL, CH., & SCHAEFER, W. (2009): *Prognose von Bodenbewegungen infolge Sumpfungsmaßnahmen im Rheinischen Braunkohlerevier*. - Bergbau, 60(10): 439-443, 7 Abb.; Essen (Ring Deutscher Bergingenieure).

ANLAGEN (KARTEN)

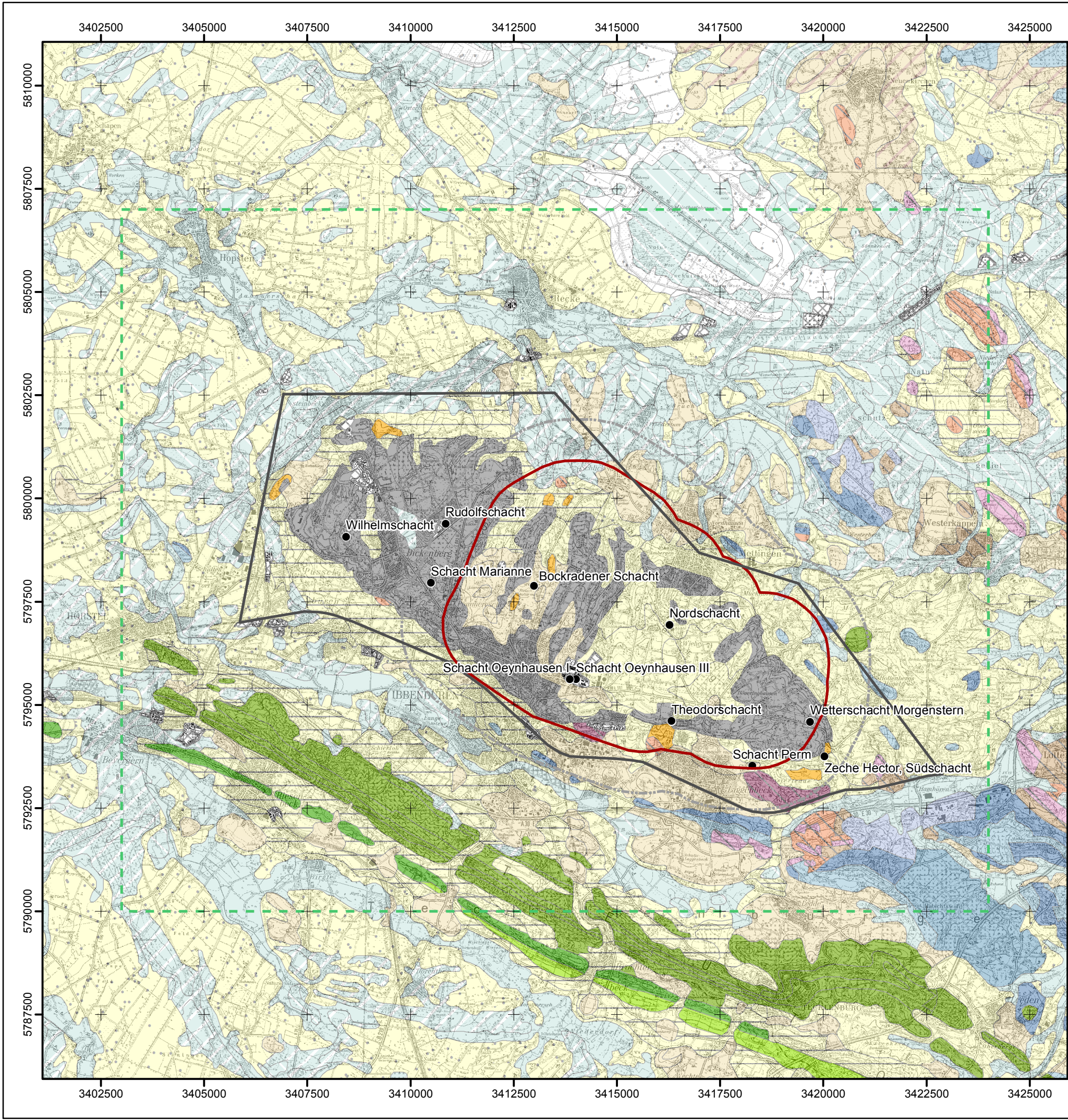
Karte 1: Geologische Karte der oberflächennahen Gesteinseinheiten

Karte 2: Tektonische Karte der Ibbenbürener Karbonscholle

Karte 3: Rohstoffkarte

Karte 4: Künstlich veränderte Flächen, offene Wasserflächen und bekannte Tagesbrüche

Karte 5: Grundwassermessstellen und Wasserschutzgebiete im Untersuchungsbereich



TU Clausthal
Institut für Geotechnik und Markscheidewesen

Legende

- Untersuchungsraum
- Bergwerksgrenze
- Prognostizierter Einwirkungsbereich
- +1000m Zone
- Schacht

Geologische Einheiten

- künstliche Auffüllung
- Holozän, Sandmischkultur
- Holozän, Moor
- Holozän, fluviatile Ablagerung
- Holozän, z.T. Pleistozän
- Drenthe-Stadium
- Drenthe-Stadium, Grundmoräne
- Weichsel-Kaltzeit
- Weichsel-Kaltzeit, Fließerde
- Weichsel-Kaltzeit, fluviatile Ablagerungen
- Oberkreide, Turon

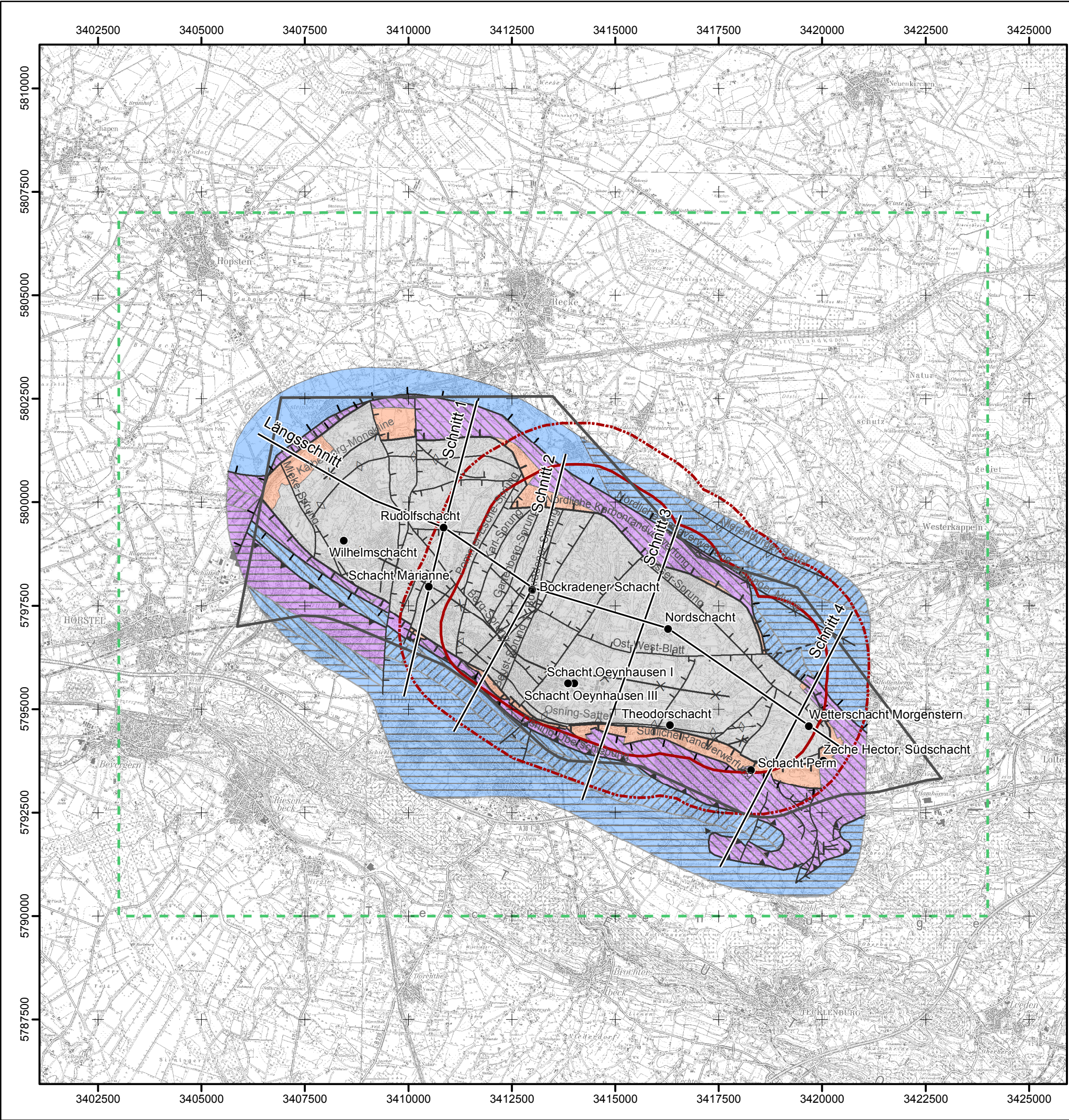
- Oberkreide, Cenoman
- Unterkreide
- Jura, ungegliedert
- Jura, Dogger
- Jura, Malm
- Jura, Lias
- Trias, ungegliedert
- Trias, Keuper
- Trias, Muschelkalk
- Trias, Buntsandstein
- Perm, Zechstein
- Karbon, Westfal

Grenzen, Schächte
Geologische Übersichtskarte (GÜK 200)
Vektordaten
TK50

© Bezirksregierung Arnsberg 2015
© BGR 2007
© IGMK 2015
© Geobasis NRW 2013



Untersuchungsgebiet: Bergwerk Ibbenbüren		
Titel: Geologische Karte der oberflächennahen Gesteinseinheiten		
Analyse von Senkungserscheinungen außerhalb prognostizierter Einwirkungsbereiche aktiver und in jüngerer Zeit stillgelegter Steinkohlenbergwerke der RAG AG Im Auftrag der Bezirksregierung Arnsberg, Abteilung Bergbau und Energie in NRW		
Bearbeitung: Prof. Dr. Coldewey GmbH	Datum: 20.01.2016	Karten-Nr.: 1



TU Clausthal
Institut für Geotechnik und Markscheidewesen

Legende

- Untersuchungsraum
- Bergwerksgrenze
- Prognostizierter Einwirkungsbereich
- +1000m Zone
- Schacht

Stratigraphische Einheiten

- Jura
- Jura, Malm
- Jura, Dogger
- Jura, Lias
- Trias
- Trias, Keuper
- Trias, Muschelkalk
- Trias, Buntsandstein
- Perm, Zechstein
- Oberkarbon, Westfal C

Tektonik

- Abschiebung
- Randverwerfung
- Randüberschiebung
- Blatt
- Falten**
- Mulde
- Sattel

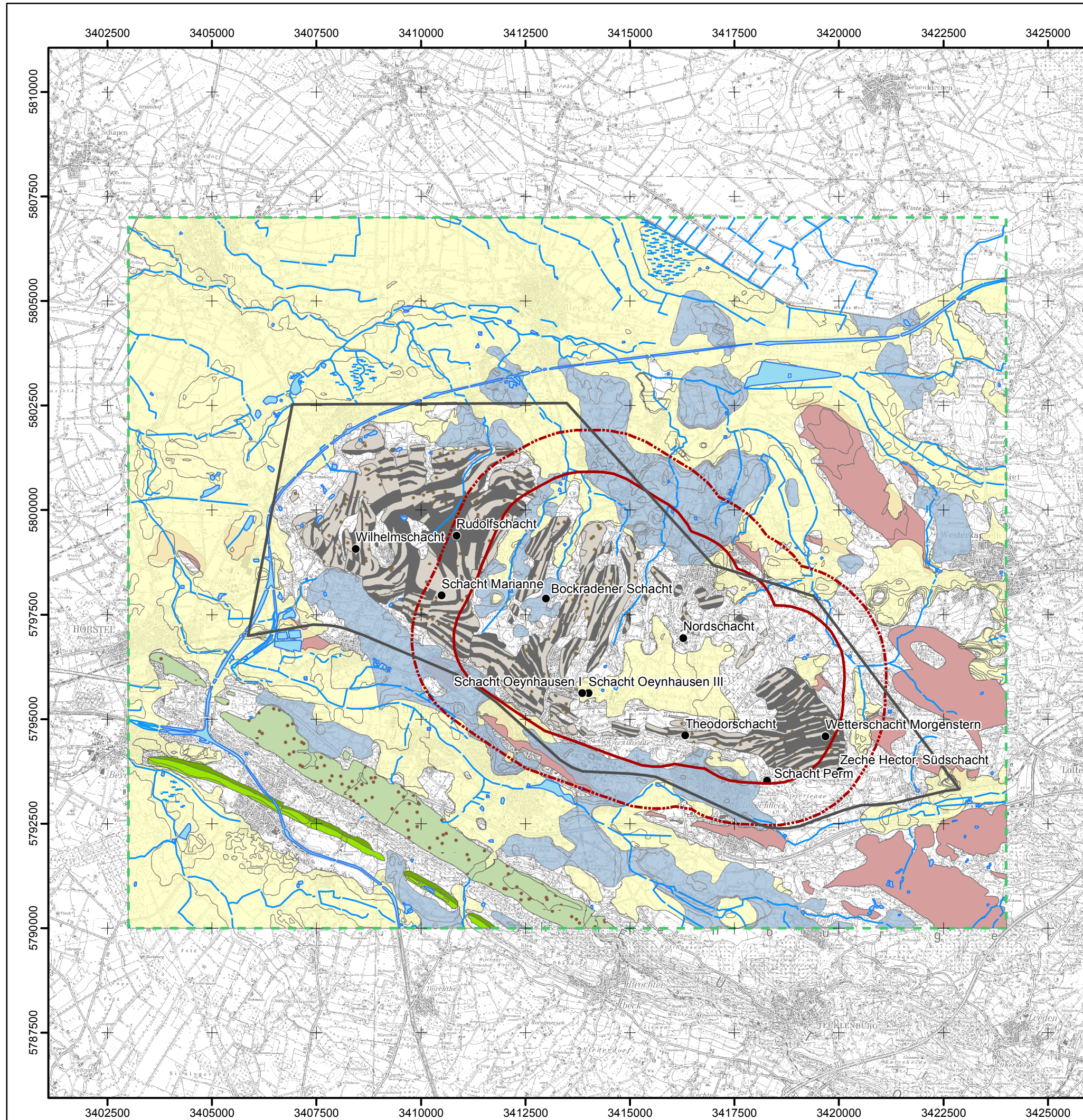
Die dargestellten geologischen Schnitte sind im Anhang des Gutachtens dargestellt

Grenzen, Schächte
Geologie, Tektonik
Vektordaten
TK50

© Bezirksregierung Amsberg 2015
© Drozdowski 1985
© IGMC 2015
© Geobasis NRW 2013



Untersuchungsgebiet: Bergwerk Ibbenbüren		
Titel: Tektonische Karte der Ibbenbürener Karbonscholle dargestellt im Niveau von Flöz Glücksburg (Westfal C) (außerhalb der Randverwerfungen an der Quartärbasis)		
Analyse von Senkungserscheinungen außerhalb prognostizierter Einwirkungsbereiche aktiver und in jüngerer Zeit stillgelegter Steinkohlenbergwerke der RAG AG Im Auftrag der Bezirksregierung Amsberg, Abteilung Bergbau und Energie in NRW		
Bearbeitung: Prof. Dr. Coldewey GmbH	Datum: 20.01.2016	Karten-Nr.: 2



TU Clausthal
Institut für Geotechnik und Markscheidewesen

Legende

- Untersuchungsraum**
Bergwerksgrenze
Prognostizierter Einwirkungsbereich
+1000m Zone
Schacht
- Oberflächengewässer**
Stillgewässer
Fließgewässer

Rohstoffe

Lockergesteine

- Ton/Schluff-Überlagerung (inkl. Grundmoräne bzw. Löss)
Sand-Überlagerung

Festgesteine

- Cenoman-Kalk
Cenoman-Pläner
Osning-Sandstein
Tonsteine des Jura
Ibbenbürener Sandstein
Tonsteine des Ibbenbürener Oberkarbons

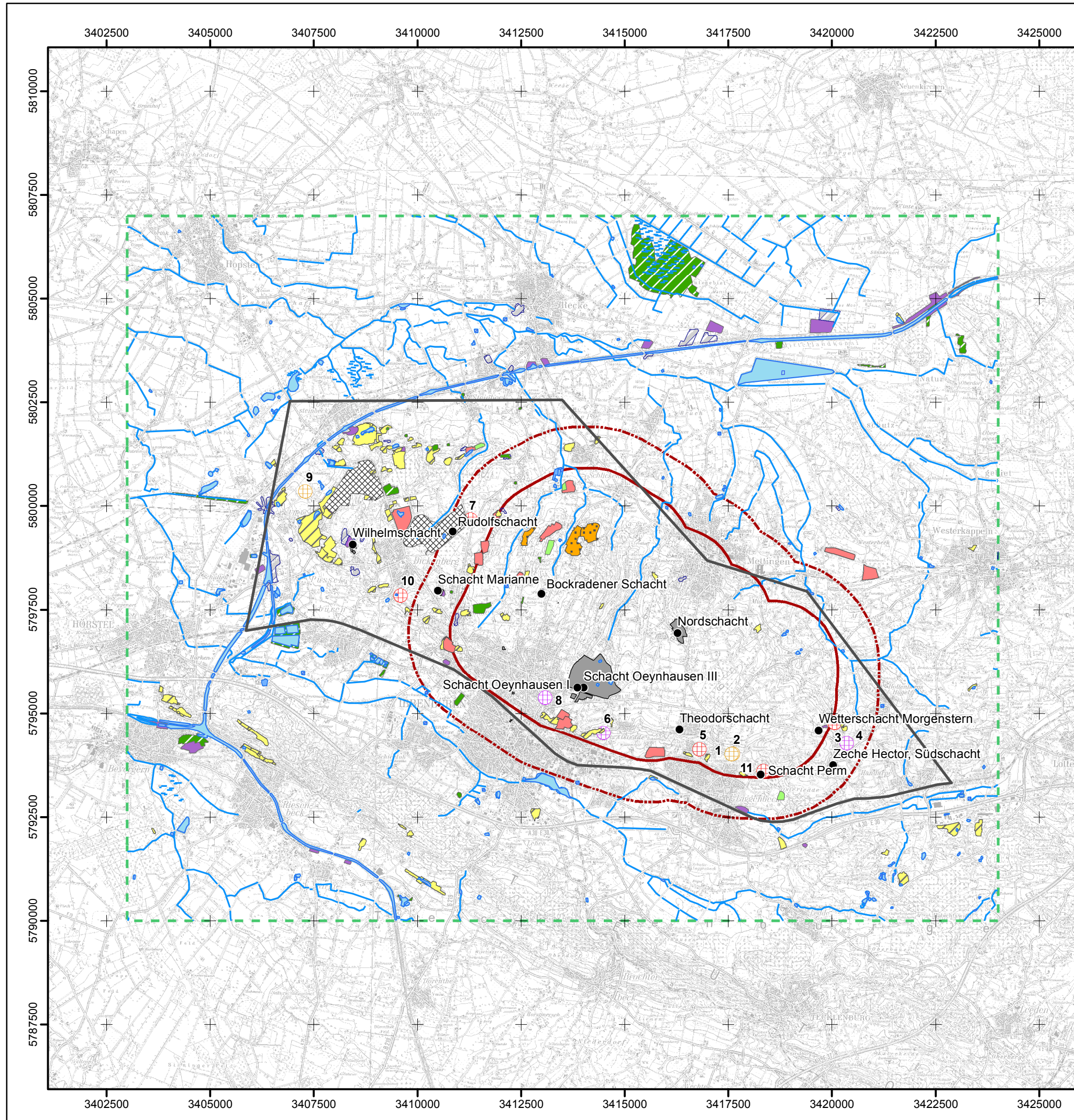
Grenzen, Schächte
Rohstoffe
Gewässer
TK50

© Bezirksregierung Arnsberg 2015
© Geologischer Dienst NRW 2015
© IGMC 2015
© Geobasis NRW 2013

0 2 4 8
Kilometer



Untersuchungsgebiet: Bergwerk Ibbenbüren		
Titel: Rohstoffkarte (Informationssystem Rohstoffkarte von NRW 1:50.000)		
Analyse von Senkungserscheinungen außerhalb prognostizierter Einwirkungsbereiche aktiver und in jüngerer Zeit stillgelegter Steinkohlenbergwerke der RAG AG Im Auftrag der Bezirksregierung Arnsberg, Abteilung Bergbau und Energie in NRW		
Bearbeitung: Prof. Dr. Coldewey GmbH	Datum: 20.01.2016	Karten-Nr.: 3

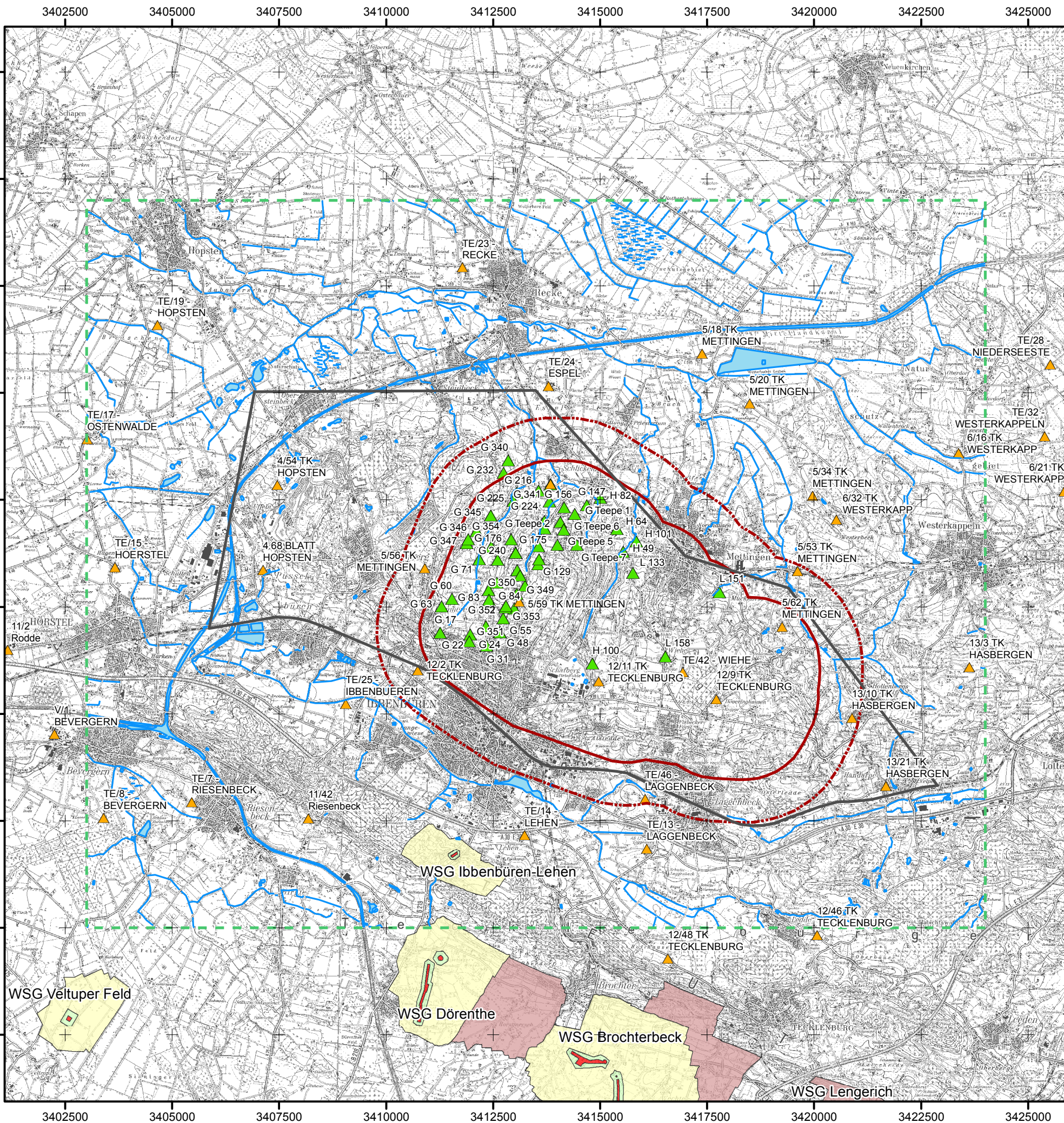


TU Clausthal
Institut für Geotechnik und Markscheidewesen

Legende

- Untersuchungsraum**
Bergwerksgrenze
Prognostizierter Einwirkungsbereich
+1000m Zone
Schacht
- Oberflächengewässer**
Stillgewässer
Fließgewässer
- Künstlich veränderte Flächen**
Abgrabungen, in Betrieb
Abgrabung, offene Wasserfläche
Abgrabung, unverfüllt
Abgrabung, teilverfüllt bzw. verfüllt
Abgrabungen, rekultiviert
Aufschüttung
Bergehalde
Künstlich veränderte Fläche
Künstlich veränderter Boden
Steine- und Erden-Gewinnungsbetrieb
Steinkohlengewinnungsbetrieb
k. A.
- Tagesbrüche**
bergbaulich bedingt
bergbauliche Ursache nicht auszuschließen
nicht bergbaulich bedingt
- Grenzen, Schächte
Künstl. veränderte Flächen
- Tagesbrüche
Gewässer
TK50
- © Bezirksregierung Arnsberg 2015
© Bezirksregierung Arnsberg 2015,
Geologischer Dienst NRW, Krefeld 2015,
Kreis Steinfurt 2015, Stadt Recke 1990
© Bezirksregierung Arnsberg 2015
© IGM 2015
© Geobasis NRW 2013
- 0 2 4 8 Kilometer

Untersuchungsgebiet: Bergwerk Ibbenbüren		
Titel: Künstlich veränderte Flächen, offene Wasserflächen und bekannte Tagesbrüche		
Analyse von Senkungserscheinungen außerhalb prognostizierter Einwirkungsbereiche aktiver und in jüngerer Zeit stillgelegter Steinkohlenbergwerke der RAG AG Im Auftrag der Bezirksregierung Arnsberg, Abteilung Bergbau und Energie in NRW		
Bearbeitung: Prof. Dr. Coldewey GmbH	Datum: 20.01.2016	Karten-Nr.: 4



TU Clausthal
Institut für Geotechnik und Markscheidewesen

Legende

- Untersuchungsraum
- Bergwerksgrenze
- Prognostizierter Einwirkungsbereich
- +1000m Zone

Grundwassermessstellen

- Landesamt für Natur-, Umwelt und Verbraucherschutz NRW
- RAG Anthrazit Ibbenbüren GmbH

Oberflächengewässer

- Fließgewässer
- Stillgewässer

Wasserschutzgebiete

- Schutzzone I
- Schutzzone II
- Schutzzone III A
- Schutzzone III B

Grenzen
Grundwassermessstellen
Wasserschutzgebiete
Vektordaten
TK50

© Bezirksregierung Arnsberg 2015
© RAG 2015, LANUV 2015
© Bezirksregierung Münster 2015
© IGMC 2015
© Geobasis NRW 2013

0 2 4 8 Kilometer



Untersuchungsgebiet: Bergwerk Ibbenbüren		
Titel: Grundwassermessstellen und Wasserschutzgebiete im Untersuchungsbereich		
Analyse von Senkungserscheinungen außerhalb prognostizierter Einwirkungsbereiche aktiver und in jüngerer Zeit stillgelegter Steinkohlenbergwerke der RAG AG Im Auftrag der Bezirksregierung Arnsberg, Abteilung Bergbau und Energie in NRW		
Bearbeitung: Prof. Dr. Coldewey GmbH	Datum: 20.01.2016	Karten-Nr.: 5