

**Prognose der Senkungen und
weiterer Bodenbewegungs- und
Bodenverformungsgrößen für
die Kavernenanlage Etzel mit
99 Kavernen**

Gutachten

Hannover, Oktober 2016

**Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe
Hannover**

**Prognose der Senkungen und weiterer
Bodenbewegungs- und
Bodenverformungsgrößen für die
Kavernenanlage Etzel mit 99 Kavernen**

Gutachten

- | | |
|----------------------|---|
| 1. Autoren: | Eickemeier, Ralf
Schäfers, Annika |
| 2. Auftraggeber | STORAG ETZEL GmbH (ehemals: IVG Caverns GmbH)
Beim Postweg 2
26446 Friedeburg |
| 3. Datum: | 31.10.2016 |
| 4. Geschäftszeichen: | B3.5/B50221-01/2016-0006/001 |
| 5. PSP-Element: | 05-1016-09 |

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	4
1.1	Historie des Standortes „Kavernenanlage Etzel“	4
1.2	Auftrag, Randbedingungen und Arbeitsumfang	5
1.3	Gültigkeitsrahmen	6
2	Verwendetes Prognosemodell	8
2.1	Senkungen und abgeleitete Bodenverformungen	8
2.1.1	Einflussfunktion	9
2.1.2	Konvergenzvolumen	10
2.2	Subvertikale Übertragung des Konvergenzvolumens an die Geländeoberfläche	11
2.3	Horizontalverschiebungen und abgeleitete Bodenverformungen	12
2.4	Nichtlineare Regressionsanalyse und Regressionsgüte	14
2.5	Software und Visualisierung der Ergebnisse	14
3	Eingangsdaten	15
3.1	Datengrundlage	15
3.1.1	Rahmendaten	15
3.1.2	Konvergenzraten	16
3.2	Plausibilitätsprüfung	17
4	Modellkalibrierung	22
4.1	Parameterbestimmung der Einflussfunktion	22
4.2	Gegenüberstellung gemessener und berechneter Senkungen	24
5	Ergebnisse der Senkungsprognose	31
5.1	Senkungen	31
5.1.1	Isokatabasendarstellungen von 2015 bis 2317	31
5.1.2	Senkungen in Schnitten	31
5.2	Schief lagen	34
5.3	Krümmungen und Krümmungsradien	35
5.4	Horizontalverschiebungen	35
5.5	Horizontale relative Längenänderungen (Zerrungen / Pressungen)	35
5.6	Zusammenfassung der Ergebnisse	36

6 Zusammenfassung	37
Literaturverzeichnis	38
Abbildungsverzeichnis	40
Tabellenverzeichnis	41
A Anhang Modellkalibrierung	42
B Anhang Ergebnisse	48

1 Einleitung

Am Standort Etzel werden seit rund 40 Jahren soltechnisch erstellte Kavernen im Salzgestein für die Speicherung fossiler Brennstoffe genutzt. Aufgrund der charakteristischen Eigenschaften des Salzgesteins treten bei der Kavernenspeicherung mit der Zeit – auch unter konstanten Betriebsbedingungen – Volumenverringerungen der einzelnen Kavernen auf. Das so genannte Konvergenzvolumen wird durch Verschiebungen im Gebirge bis an die Geländeoberfläche übertragen, so dass eine Senkungsmulde entsteht. Die sich mit der Zeit verändernde Senkungsmulde kann Auswirkungen auf die Schutzgüter¹ haben. So ist z. B. eine Beeinflussung der Hydrologie und Hydrogeologie durch das absinkende und sich neigende Gelände möglich. Bodenverformungen können Beanspruchungen an Gebäuden hervorrufen, die potenziell zu Schäden führen können. Um die Auswirkungen der induzierten Senkungsmulde hinsichtlich ihrer Bergschadensrelevanz zu beurteilen, ist eine Prognose der zu erwartenden Bodenbewegungen und Bodenverformungen² erforderlich. Die mit diesem Gutachten vorgelegte Prognose der Bodenbewegungen und –verformungen für den Standort Etzel stellt die Grundlage für die Auswirkungsanalyse für die Schutzgüter dar.

1.1 Historie des Standortes „Kavernenanlage Etzel“

Die Bundesregierung beauftragte im Jahre 1971 die Industrieverwaltungsgesellschaft mbH (IVG), im Salzstock Etzel einen Kavernenspeicher zur Lagerung der strategischen Erdölreserve Deutschlands gemäß Erdölbevorratungsgesetz (ErdölBevG³) anzulegen. Nach geologischen Vorerkundungen (Auswertung bestehender Aufschlussdaten, Oberflächenseismik und Vorbohrungen) waren im Zeitraum von 1971 bis 1973 fünf Bohrunternehmen im Einsatz, um 33 Kavernenbohrungen in Teufenbereiche bis zu 1 900 m niederzubringen. Zeitgleich zum Bohrbetrieb wurden die erforderlichen Betriebsanlagen und die Rohrleitungsinfrastruktur gebaut. In den Jahren 1974 – 1978 wurden 33 Kavernen auf ein geometrisches Volumen zwischen 200 000 und 550 000 m³ gesolt. Bereits während des Solbetriebs wurden die Kavernen teilbefüllt. Die Einlagerungen wurden nach dem Solende fortgesetzt und bis zum Herbst 1981 war die Bundesrohölreserve eingelagert. Der Bestand von anfänglich 33 Ölspeicherkavernen wurde im Laufe der Betriebszeit um sieben Kavernen ergänzt. Seit 1993 wird der Standort nach dem Bau entsprechender Übertagebetriebsanlagen (Abb. 1.1) und Versorgungsleitungen durch Statoil / Etzel Gas-Lager-Konsortium (EGL) sowie der Umrüstung von Ölkavernen auf Gasbetrieb durch die IVG Caverns GmbH (ab 2016: STORAG ETZEL GmbH) auch zur Erdgasspeicherung genutzt. Eine entscheidende Wende

¹Schutzgüter gemäß §2 UVPG: Mensch, Tiere und Pflanzen, Boden, Wasser, Luft, Klima, Landschaft, Kulturgüter und sonstige Sachgüter.

²Definitionen gemäß DIN 21917 (Feb. 1999).

³BGBI. I 2012 S. 74.



Abbildung 1.1: Übertagebetriebsanlagen des Kavernenspeichers Etzel (Quelle: STORAG ETZEL GmbH).

für den Ölspeicher Etzel trat 1997 mit dem Beschluss der Bundesregierung ein, die Bundesrohölreserve auszulagern und zu verkaufen. Die Auslagerung erfolgte in mehreren Einzelschritten im Zeitraum von 1997 bis 2001. Seit 2006 wurden bedingt durch die starke Nachfrage nach Untertagespeichervolumina mehr als 30 neue Gaskavernen im sogenannten Nordfeld der Kavernenanlage im Teufenbereich von ca. 1 200 bis 1 600 m gebaut. Heute umfasst der Standort mit 49 Gas- und 24 Ölkavernen insgesamt 73 Kavernen, zwei Kavernen befinden sich im Solbetrieb und werden bis 2017 fertiggestellt. Der Kavernenspeicher Etzel zählt mit seiner Kapazität zurzeit zu den größten Rohöl- und Gasspeichern Europas. Weitere bis zu 24 Kavernen stehen als Ausbaureserve bei Bedarf zur Verfügung, insgesamt sind 99 Kavernen genehmigt (Stand März 2016).

1.2 Auftrag, Randbedingungen und Arbeitsumfang

Am 30. April 2015 beauftragte die STORAG ETZEL GmbH die Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR) mit der Erstellung einer Senkungsprognose für das Kavernenfeld Etzel unter Annahme einer Feldeserweiterung auf 99 Kavernen. Grundlage für sämtliche Arbeiten sind die von der STORAG ETZEL GmbH an die BGR übermittelten Ist- und Planungszustände der Kavernenanlage Etzel vom 29.04.2015 und die während der Bearbeitungszeit durchgeführten Ergänzungen und Aktualisierungen dieser Daten. Gemäß den Planungen der STORAG ETZEL GmbH wird davon ausgegangen, dass die Kavernen jeweils maximal 100 Jahre betrieben werden. Nach Betriebsende der einzelnen Kavernen erfolgt

die sukzessive Verwahrung der Kavernen, bis 2117 die letzte Kaverne in die Verwahrung genommen wird. Das Prognoseende wird festgelegt auf den Zeitpunkt 200 Jahre nach Verwahrung der letzten Kaverne und entspricht damit dem Jahr 2317. Für die Erstellung der Senkungsprognose wurden von der STORAG ETZEL GmbH umfangreiche Daten zur Verfügung gestellt:

- Kavernenstammdaten,
- Kavernenhistorie und Volumenentwicklung,
- Konvergenzraten,
- Nivellementdaten und
- vom Markscheider ermittelte Muldenvolumina.

Nach der Übermittlung der Daten wurden diese von der BGR gesichtet, aufbereitet und auf Plausibilität geprüft.

1.3 Gültigkeitsrahmen

Der Senkungsprognose liegen bestimmte Daten und Annahmen zugrunde, die den Gültigkeitsrahmen bestimmen. Dazu zählen die o. g. Annahmen zur geplanten Erweiterung und Betriebsdauer des Kavernenfeldes ebenso wie die Annahme, dass sich die Senkungsmulde bruch- und versatzlos ausbildet. Untersuchungen zur Standsicherheit und Integrität der hangenden Steinsalz- und Deckgebirgsschichten sind nicht Gegenstand dieses Gutachtens.

Besondere Bedeutung kommt den angenommenen Betriebsbedingungen und dem daraus resultierenden Konvergenzverhalten der Kavernen zu. Während für die Konvergenzraten der Südfeldkavernen bereits über mehrere Dekaden empirische Mittelwerte vorliegen, gibt es für die Kavernen des noch jungen Nordfeldes (Solung der Kavernen ab 2007, Betrieb ab 2011) bisher nur einzelne messtechnische Belege, die auf erhöhte Konvergenzraten hinweisen.

Weiterführende Untersuchungen von dritter Seite zum Konvergenzverhalten der Nordfeldkavernen dauern zurzeit an. Die hier zugrunde gelegten Annahmen bzgl. des Konvergenzverhaltens der Nordfeldkavernen und damit auch die Ergebnisse dieser Senkungsprognose gelten daher vorbehaltlich neuer Erkenntnisse aus den o. g. laufenden Untersuchungen. Zu gegebener Zeit sind die getroffenen Annahmen zu überprüfen und ggf. zu aktualisieren.

Nach der Verwahrung der Kavernen werden rechnerisch abgeschätzte Konvergenzraten nach LINDERT (2012b) angesetzt. Diese Abschätzung entspricht dem augenblicklichen Stand von Wissenschaft und Technik.

Die prognostizierten Horizontalverschiebungen sowie die daraus abgeleiteten Zerrungen und Pressungen der Geländeoberfläche sind mit großen Unschärfen behaftet, da keine Möglichkeit der Validierung mit

Messdaten gegeben ist. Die prognostizierten Horizontalverschiebungen und die daraus abgeleiteten Zerrungen und Pressungen sind demzufolge als vorläufig zu betrachten. Hier besteht seitens der STORAG ETZEL GmbH die Planung, entsprechende Messungen in das jährliche Messprogramm aufzunehmen.

2 Verwendetes Prognosemodell

2.1 Senkungen und abgeleitete Bodenverformungen

Das verwendete Senkungsprognosemodell beschreibt die Senkung $v_z(r, t)$ zum Zeitpunkt t im Abstand r von der Kavernenachse über einer einzelnen Kaverne als dreigliedrigen Produktansatz (Gl. (2.1)) gemäß EICKEMEIER (2005).

$$v_z(r, t) = a \cdot f(r) \cdot V_{Conv}(t) \quad (2.1)$$

Benutzte Symbole und ihre Bedeutung:

- $v_z(r, t)/\text{m}$ - Senkung im Abstand r vom Kavernenzentrum einer einzelnen Kaverne zum Zeitpunkt t ,
- a - Volumenübertragungsfaktor ($0 < a \leq 1$),
- $f(r) / (\text{m}/\text{m}^3)$ - Einflussfunktion, die die Senkung (negativ) je m^3 Konvergenzvolumen im Abstand r angibt,
- $V_{Conv}(t)/\text{m}^3$ - zeitlich veränderliches Konvergenzvolumen.

Der Volumenübertragungsfaktor a ($0 < a \leq 1$) ist dabei ein Maß für den Anteil des in die Senkungsmulde umgewandelten Konvergenzvolumens. Die Funktion $f(r)$ ist die Einflussfunktion und gibt die Senkung ($v_z(r, t) < 0$) je m^3 Konvergenzvolumen in beliebiger Entfernung r von der Kavernenachse an. $V_{Conv}(t)$ ist das sich zeitabhängig entwickelnde Konvergenzvolumen gemäß Gleichung (2.11).

Jede Kaverne wird als einzelnes Volumenelement simuliert. Zunächst werden die durch jede einzelne Kaverne verursachten Teilsenkungen berechnet. Die Gesamtsenkungsmulde ergibt sich aus der Superposition der Teilsenkungen aller Kavernen des Feldes. Ebenso wird bei den anderen Bodenbewegungs- und den daraus abgeleiteten Bodenverformungsgrößen verfahren. Die Gültigkeit des Superpositionsgesetzes wird dabei für alle Bodenbewegungs- und Bodenverformungsgrößen angenommen.

Die Berechnung der Schief lagen $v'_z(r, t)$ und Krümmungen $v''_z(r, t)$ erfolgt aus den Senkungen $v_z(r, t)$ über die Gleichungen (2.2) und (2.3). Der Krümmungsradius $\rho_K(r, t)$ ergibt sich als Kehrwert der Krümmung $v''_z(r, t)$ gemäß Gleichung (2.4).

$$v'_z(r, t) = \frac{\partial v_z(r, t)}{\partial r} \quad (2.2)$$

$$v''_z(r, t) = \frac{\partial^2 v_z(r, t)}{\partial r^2} \quad (2.3)$$

$$\rho_K(r, t) = 1/v''_z(r, t) \quad (2.4)$$

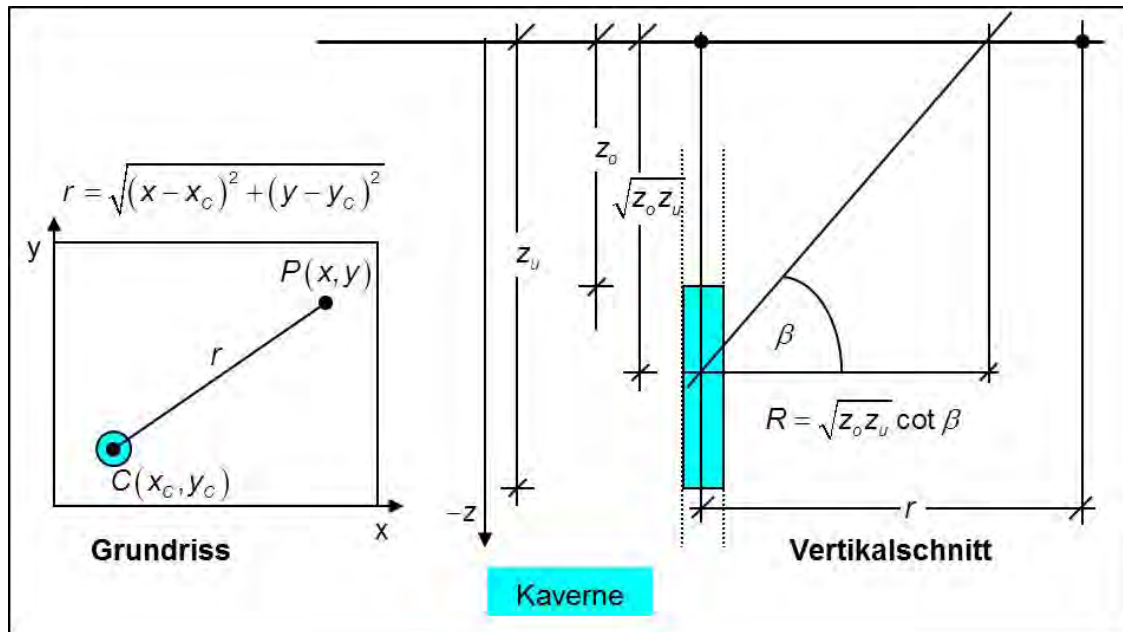


Abbildung 2.1: Kavernengeometrie für eine Geländeoberkante bei $z_{GOK} = 0$.

2.1.1 Einflussfunktion

Als Einflussfunktion wird die erweiterte Gauß'sche Glockenkurve in Polarkoordinaten gemäß Gleichung (2.5) verwendet.

$$f(r) = -\frac{\psi \delta}{2\pi^{(1-\frac{\delta}{2})} R^2 \Gamma(\frac{2}{\delta})} \exp\left(-\pi \psi^{\frac{\delta}{2}} \left(\frac{r}{R}\right)^{\delta}\right) \quad (2.5)$$

Dabei sind:

- ψ - Parameter zur Berücksichtigung von Zeiteffekten,
- δ - Formparameter,
- r/m - horizontaler Abstand vom Kavernenzentrum (Gl. (2.6)),
- R/m - Vollflächenradius (Gl. (2.7)),
- $\Gamma(x)$ - Gammafunktion (BRONSTEIN ET AL., 1997).

Der horizontale Abstand r eines beliebigen Punktes vom Kavernenzentrum und der Vollflächenradius R sind in Abb. 2.1 veranschaulicht.

$$r = \sqrt{(x - x_C)^2 + (y - y_C)^2} \quad (2.6)$$

$$R = (z - z_C) \cdot \cot \beta \quad (2.7)$$

Dabei sind:

- $x/m, y/m$ - Lagekoordinaten eines beliebigen Punktes P an der Geländeoberfläche,
 $x_C/m, y_C/m, z_C/m$ - charakteristische Raumkoordinaten des Kavernenvolumens,
 $\beta/^\circ$ - Parameter, der die räumliche Ausdehnung und die maximale Senkung der Senkungsmulde festlegt.

In Gleichung (2.7) entspricht z der z -Koordinate der Geländeoberfläche (z_{GOK}). z_C ist der z -Wert des betrachteten Kavernenvolumens (normalerweise ein negativer Wert). Wird z_{GOK} als z -Koordinate der Geländeoberfläche, z_u als z -Wert der Kavernensohle und z_o als z -Wert der Kavernenfirste angesetzt, gilt:

$$z_C = -\sqrt{(z_{GOK} - z_u) \cdot (z_{GOK} - z_o)} \quad (2.8)$$

Dabei sind:

- z_u/m - z -Koordinate der Kavernensohle,
 z_o/m - z -Koordinate des Kavernendachs,
 z_{GOK}/m - z -Koordinate der Geländeoberkante.

2.1.2 Konvergenzvolumen

Das Konvergenzvolumen $V_{Conv}(t)$ wird für die Berechnung der Senkungen nach Gleichung (2.1) benötigt und entspricht dem aus der Konvergenz resultierenden Verlustvolumen der Kaverne. Folgende weitere kavernenbezogene Volumina spielen bei der Berechnung des durch Volumenbilanzierung bestimmbaren Konvergenzvolumens $V_{Conv}(t)$ eine Rolle:

- das Kavernenvolumen $V_{Cav}(t)$,
- das Produktionsvolumen $V_P(t)$, das das mit der Sole nach übertage geförderte Salzvolumen darstellt, wobei vereinfachend eine konstante Produktionsrate ($\dot{V}_{Prod}$) unterstellt wird (Gl. (2.9)),
- das in der Sole gelöste Salzvolumen $V_S(t)$ und
- das Extraktionsvolumen $V_{Ex}(t)$, das dem aus dem Gebirgskörper extrahierten Salzvolumen entspricht, also auch als Summe des in der Sole gelösten Salzvolumens $V_S(t)$ und des Produktionsvolumens $V_P(t)$ dargestellt werden kann.

$$V_P(t) = V_{P,0} + \dot{V}_{Prod} \cdot t \quad (2.9)$$

Zur Berücksichtigung des in Lösung gehenden Steinsalzes werden die Salzkonzentration der Sole ($C/(\text{kg}/\text{m}^3)$) und die Dichte des Steinsalzes ($\rho/(\text{kg}/\text{m}^3)$) als zusätzliche Parameter benötigt. Es gilt:

$$f_{Conc} = 1 - C/\rho.$$

Nach VAN EIJS ET AL. (2000) ergibt sich das Kavernenvolumen zu:

$$V_{Cav}(t) = V_{Cav,0} - \left(V_{Cav,0} - \frac{\dot{V}_{Prod}}{k} \right) \cdot \left(1 - e^{-\frac{k \cdot t}{f_{Conc}}} \right) \quad (2.10)$$

Die Formeln für die zeitliche Entwicklung des Konvergenzvolumens $V_{Conv}(t)$ und des Extraktionsvolumens $V_{Ex}(t)$ lassen sich bei Berücksichtigung der Randbedingungen ($V_{Ex}(t=0) = V_{Ex,0}$ und $V_{Conv}(t=0) = V_{Conv,0}$) wie folgt angeben:

$$V_{Conv}(t) = V_{Conv,0} + \dot{V}_{Prod} \cdot t + f_{Conc} \cdot \left(V_{Cav,0} - \frac{\dot{V}_{Prod}}{k} \right) \cdot \left(1 - e^{-\frac{k \cdot t}{f_{Conc}}} \right) \quad (2.11)$$

$$V_{Ex}(t) = V_{Ex,0} + \dot{V}_{Prod} \cdot t - (1 - f_{Conc}) \cdot \left(V_{Cav,0} - \frac{\dot{V}_{Prod}}{k} \right) \cdot \left(1 - e^{-\frac{k \cdot t}{f_{Conc}}} \right) \quad (2.12)$$

Die Gleichungen (2.9) bis (2.12) gelten allgemein, so dass sie für Sol- und Speicherphasen gleichermaßen nutzbar sind.

Abschnitte, in denen eine Kavernensolung simuliert wird, werden mit $C \neq 0$ und $\dot{V}_{Prod} \neq 0$ berechnet. Abschnitte, in denen keine Solung erfolgt, also sämtliche Öl- und Gasspeicherphasen sowie Phasen, in denen sich zwar Sole in der Kaverne befindet, aber kein Solfortschritt erfolgt, werden mit $C = 0$ und $\dot{V}_{Prod} = 0$ berechnet.

Eine zeitliche Verzögerung zwischen dem Eintreten der Konvergenz und der Übertragung der Volumenverluste an die Geländeoberfläche wird nicht berücksichtigt. In Abbildung 2.2 sind beispielhaft die zeitlichen Verläufe der unterschiedlichen Volumina für eine fiktive Kaverne dargestellt. In Abschnitt 1 findet die soltechnische Erstellung der Kaverne über einen Zeitraum von drei Jahren statt. Anschließend folgen Speicherphasen mit unterschiedlichen Konvergenzraten. In Phase 5 erfolgt eine Nachsolung über vier Jahre. Danach findet in den Abschnitten 6 und 7 eine Speicherung mit unterschiedlichen Konvergenzraten statt.

2.2 Subvertikale Übertragung des Konvergenzvolumens an die Geländeoberfläche

Die Interpretation des jährlichen Feinnivellements der Geländeoberfläche legt die Vermutung nahe, dass im Kavernenfeld Etzel eine subvertikale Übertragung des Konvergenzvolumens an die Geländeoberfläche stattfindet, so dass die Senkungsmulde horizontal versetzt ausgebildet wird. Eine mögliche Ursache für diese Anomalie könnte eine Konturstufe entlang der Südostflanke des Salzstocks Etzel sein. In Abbildung 2.3 sind die Teufenlinien der Salzstockkontur zwischen -2000 m und -700 m dargestellt. Während die Konturlinien im Nordwesten auf eine relativ flache Salzstockflanke hinweisen, wird durch die teilweise sehr dichte Anordnung der Konturlinien im Südosten ein steiler Höhengsprung entlang der Konturstufe sichtbar. Ob dieser ursächlich für den horizontalen Versatz der Senkungsmulde an der Geländeoberfläche

ist, könnte durch gebirgsmechanische Modellberechnungen (z. B. nach der Finite-Elemente-Methode) untersucht werden. Um die in situ beobachtete subvertikale Übertragung der Senkungen an die Geländeoberfläche auch im Prognosemodell berücksichtigen zu können, werden zwei zusätzliche Parameter $\alpha_0(t)$ und $\xi(t)$ eingeführt, die als Freiwerte zusätzlich zu den Formparametern der Einflussfunktion zu bestimmen sind. Es gilt:

$$\Delta x(t) = (z_{GOK} - z_{TopMax}) \cdot \tan(\xi(t)) \cdot \cos(\alpha_0(t)) \quad (2.13)$$

$$\Delta y(t) = (z_{GOK} - z_{TopMax}) \cdot \tan(\xi(t)) \cdot \sin(\alpha_0(t)) \quad (2.14)$$

mit $z_{TopMax} = \max(z_{Top,1}, \dots, z_{Top,n_{Cav}})$.

2.3 Horizontalverschiebungen und abgeleitete Bodenverformungen

Für die Berechnung der Horizontalverschiebungen wird folgender Ansatz verwendet:

$$v_r(r, t) = m \cdot \frac{r}{z_{GOK} - z_C} \cdot v_z(r, t) \quad (2.15)$$

Die Verzerrungen werden über die Gleichungen (2.16) und (2.17) berechnet.

$$\varepsilon_r(r, t) = \frac{\partial v_r(r, t)}{\partial r} \quad (2.16)$$

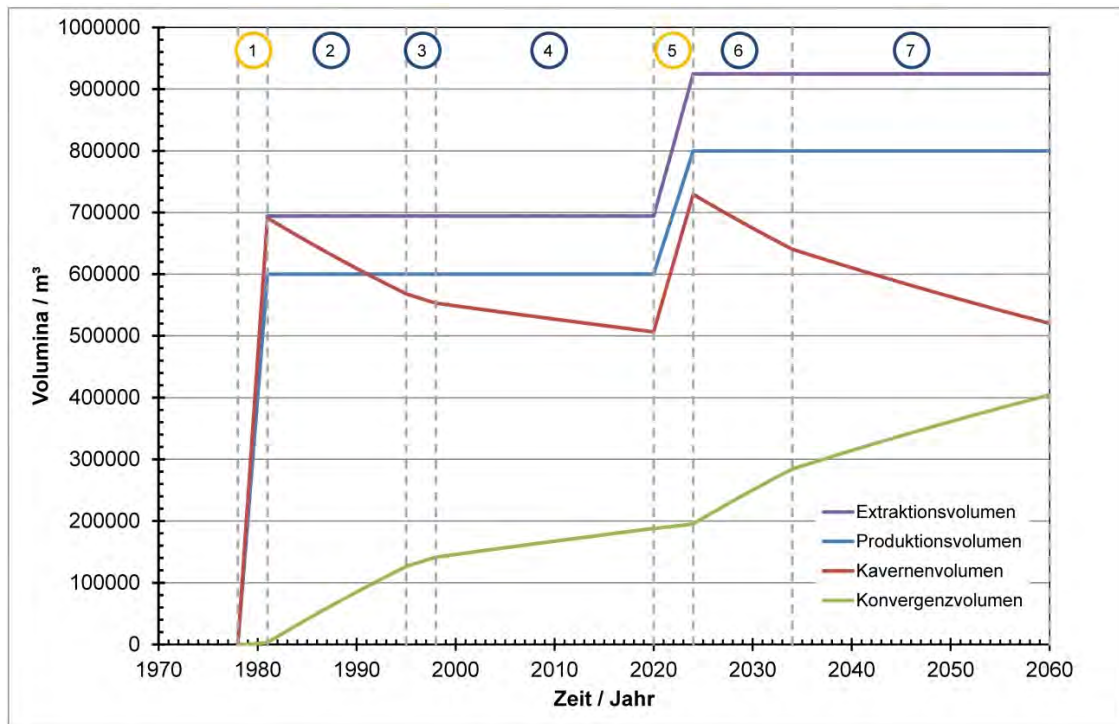


Abbildung 2.2: Zeitliche Entwicklung spezifischer Volumina einer fiktiven Kaverne.

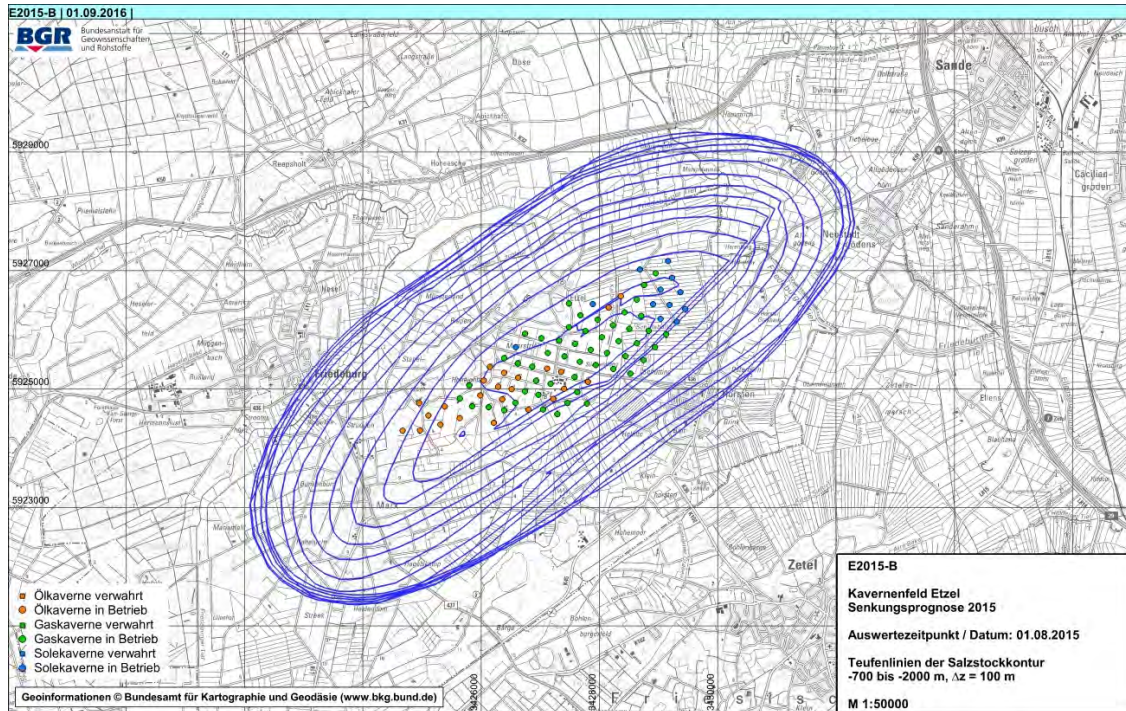


Abbildung 2.3: Kavernenfeld Etzel im Jahr 2015 mit Teufenlinien der Salzstockkontur von -2000 bis -700 m (unmaßstäblich).

$$\varepsilon_{\varphi}(r, t) = \frac{v_r(r, t)}{r} \quad (2.17)$$

Im Vergleich zu den Vertikalverschiebungen ist die Berechnung der Horizontalverschiebungen mit stärkeren Unschärfen und Ungewissheiten behaftet. Dies liegt an der spärlichen Verfügbarkeit von Lageänderungsmessungen, so dass eine Validierung der Horizontalverschiebungsansätze bislang nicht möglich ist. QUASNITZA (1988) beschreibt für das Kavernenfeld Etzel die Beobachtung größerer Horizontalverschiebungen an der Geländeoberfläche als bis dato allgemein angenommen. Er kommt zu dem Schluss, dass sie etwa den 2,5-fachen Wert seines Ansatzes $\left(v_r = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \cdot R \cdot v'_z \approx 0,4 \cdot R \cdot v'_z\right)$ erreichen, also $v_r \approx 1,0 \cdot R \cdot v'_z$. Damit ergeben sich für die Verschiebungen an der Geländeoberfläche größere Maximalwerte als für die Senkungen selbst. Um die von QUASNITZA (1988) beschriebenen Verhältnisse näherungsweise abbilden zu können, ist in Gleichung (2.15) $m \approx 3$ zu setzen.

Es sei an dieser Stelle erwähnt, dass diese Annahme bisher aufgrund fehlender aktueller und quantitativ belastbarer Messdaten nicht validiert werden konnte. Die BGR hat jedoch nach Abstimmung mit der STORAG ETZEL GmbH diesen Ansatz verwendet, um die Verschiebungen sowie die daraus abgeleiteten Zerrungen und Pressungen an der Geländeoberfläche berechnen zu können. Die prognostizierten Horizontalverschiebungen und die daraus abgeleiteten Zerrungen und Pressungen sind demzufolge als vorläufig zu betrachten und zukünftig mit den Ergebnissen der geplanten Messungen zu validieren.

2.4 Nichtlineare Regressionsanalyse und Regressionsgüte

Die Modellparameter werden anhand einer nichtlinearen Regressionsanalyse an gemessenen Senkungen bestimmt. Zur Abschätzung der Regressionsgüte werden die Residualvarianz S^2 und das bereinigte Bestimmtheitsmaß $\bar{R}^2$ zu jedem Anpassungszeitpunkt bestimmt.

Die Residualvarianz S^2 wird berechnet als:

$$S^2 = \frac{1}{n - p - 1} \cdot \sum_{i=1}^n (Y_i - \hat{Y}_i)^2 \quad (2.18)$$

Das bereinigte Bestimmtheitsmaß $\bar{R}^2$ ist definiert als:

$$\bar{R}^2 = R^2 - (1 - R^2) \cdot \frac{p}{n - p - 1} \quad (2.19)$$

mit

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Y_i - \hat{Y}_i)^2}{\sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y})^2} \quad (2.20)$$

und

$$\bar{Y} = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n Y_i \quad (2.21)$$

Die verwendeten Formelzeichen haben folgende Bedeutung:

- n - Anzahl der Messungen,
- p - die Anzahl der freien Parameter,
- Y_i - die Messwerte,
- $\bar{Y}$ - der Mittelwert der Messwerte,
- $\hat{Y}_i$ - die Regressionswerte,
- R^2 - das unbereinigte Bestimmtheitsmaß.

2.5 Software und Visualisierung der Ergebnisse

Das zuvor beschriebene Prognoseverfahren wurde in zwei Computerprogramme implementiert: Mit dem Programm FitPar_v50 (Fit Parameters, Vers. 5.0) werden die Modellparameter anhand einer nichtlinearen Regressionsanalyse an gemessenen Senkungen bestimmt. Die eigentliche Senkungsprognose erfolgt anschließend mit dem Programm ProSub_50 (Professional Subsidence Calculation, Vers. 5.0).

Die berechneten Ergebnisse wie Senkungen, Senkungsraten, Schief lagen, Horizontalverschiebungen, Zerrungen und Pressungen werden mit der kommerziellen Software Tecplot (TECPLOT, 2013) ausgewertet und dargestellt. Zur Weiterverarbeitung und Einbindung in externe Geoinformationssysteme werden dem Auftraggeber die Ergebnisse im GRID-Format (originäres Tecplot-Format, *.dat) zur Verfügung gestellt.

3 Eingangsdaten

3.1 Datengrundlage

3.1.1 Rahmendaten

Die Daten, die der Erstellung der Senkungsprognose zugrunde liegen, wurden vom Auftraggeber in einer EXCEL-Abfrage-Datei vollständig erfasst. Einzelne Daten und Quellen, die nicht direkt in das EXCEL-Format eingepflegt werden konnten, wurden als „Extern abgelegte Daten“ aufgelistet. Die Datengrundlage setzt sich zusammen aus:

- historischen Daten (Koordinaten und Teufenlage; Daten Solung, Erstbetrieb, Nachsolungen und Umrüstung) und
- Plandaten für die zukünftige Erstellung, Nutzung und Verwahrung der Kavernen.

Da zukünftige Umschläge in den Ölkavernen mit gesättigter Sole durchgeführt werden sollen, sind für die Ölkavernen in der Senkungsprognose keine Nachsolungen zu berücksichtigen. Nachsolungen der Sole- und Gaskavernen werden zu den geplanten Zeiten und mit den geplanten Nachsolvolumina berücksichtigt. Einige Kavernen wurden bzw. werden im Laufe ihrer Nutzungszeit auf ein anderes Speichermedium umgerüstet. Die zukünftigen Umrüstungen sind modellhaft angenommen und es liegen dafür teilweise keine konkreten Planungen vor. In der Prognose werden folgende Umrüstungen berücksichtigt:

- neun Kavernen der 1. Umrüstungsphase von Öl auf Gas (1993 bis 1997: K120, K121, K122, K126, K127, K128, K129, K130, K131),
- zehn Kavernen der 2. Umrüstungsphase von Öl auf Gas (2005 bis 2008: K101, K103, K105, K107, K111, K112, K114, K117, K118, K124),
- zwei Kavernen von Sole auf Öl (2028 bis 2031: K301 und K335),
- sowie sechs Kavernen von Sole auf Gas (in verschiedenen Zeitabschnitten von 2014 bis 2038: K339, K352, K358, K359, K360, K365).

Neben dem Datum des Endes der Umrüstung wurde auch das nach Umrüstung vorhandene Kavernenvolumen vom Auftraggeber vorgegeben.

3.1.2 Konvergenzraten

Die Konvergenzraten wurden für die verschiedenen Nutzungsarten von STORAG ETZEL GmbH empirisch ermittelt (Tab. 3.1 und Tab. 3.2) und sind bei der Erstellung der Senkungsprognose als Eingangsdaten in das Modell eingeflossen.

Die Konvergenzraten der Südfeldkavernen definieren einen charakteristischen Kavernenbetrieb, der auch für die Zukunft unterstellt wird (Tab. 3.1). Abweichungen in der zukünftigen Betriebsweise der Kavernen führen gegebenenfalls zu anderen Konvergenzraten, die wiederum die Ausprägung der zukünftigen Senkungen beeinflussen. Derartige Abweichungen sind heute nicht abschätzbar, so dass empfohlen wird, die Gültigkeit der Prognose zukünftig in regelmäßigen Abständen zu überprüfen. Bei größeren Abweichungen ist eine Aktualisierung der Senkungsprognose zu erstellen.

Für die Kavernen des noch jungen Nordfeldes (Solung der Kavernen ab 2007, Betrieb ab 2011) wird in einem für die STORAG ETZEL GmbH erstellten und der BGR als Datenbasis zur Verfügung gestellten Dritt-Gutachten für das erste Jahr des Gasspeicherbetriebs eine Konvergenzrate von 2,0 bis 2,5 %/Jahr empfohlen, anschließend eine Konvergenzrate von 1,0 %/Jahr. Aufgrund der geringen Betriebsdauer gibt es für diese Kavernen bisher nur einzelne messtechnische Belege zum Konvergenzverhalten. Aus aufeinander folgenden Sonarvermessungen lassen sich für Messzeiträume zwischen 2012 und 2015 für einige Gaskavernen (K313, K316, K321, K329 und K330) große Konvergenzraten zwischen 2,2 und 3,1 %/Jahr ableiten. Nur für die K306 ergibt sich ein kleinerer Wert von 1,2 %/Jahr. Als Mittelwert lässt sich für die sechs vorgenannten Kavernen eine Konvergenzrate von 2,4 %/Jahr berechnen. Aufgrund der Abweichungen zwischen den aus den Messungen abgeleiteten mittleren Konvergenzraten und den Empfehlungen des o.g. Gutachtens wurde von der BGR die Annahme höherer Konvergenzraten (2,5 %/Jahr in den ersten drei Jahren, danach drei Jahre mit 1,5 %/Jahr und ab dem 7. Jahr 1,0 %/Jahr) für die Kavernen des Nordfeldes empfohlen. Die Annahmen wurden von der STORAG ETZEL GmbH am 11.08.2016 schriftlich bestätigt¹, mit Verweis auf die Aussagen von Prof. Lux:

„Das angesetzte Konvergenzratenprofil mit dem gewählten Verteilungsmuster über die ersten 8 Betriebsjahre und ff ist aus meiner derzeitigen Sicht im Rahmen der derzeitig zugelassenen Betriebsfahrweise als konservative Einschätzung anzusehen.“

Zur Bearbeitung dieser Senkungsprognose wurde abschließend festgelegt, die Annahmen konservativer zu gestalten. So werden für sämtliche Gaskavernen des Nordfeldes konservativ Konvergenzraten von 2,5 %/Jahr für die ersten sechs Jahre und 1,5 %/Jahr für die folgenden sechs Jahre im Gasspeicherbetrieb angesetzt. Ab dem 13. Jahr wird eine auf Normalmaß abklingende Konvergenzrate von 1,0 %/Jahr unterstellt (Tab. 3.1). Das in der Senkungsprognose angesetzte Konvergenzratenprofil ist somit „ungünstiger“ als das von Prof. Lux als „konservative Einschätzung“ bestätigte Profil. Da die Konvergenzraten der Gaskavernen des Nordfeldes zurzeit noch Gegenstand von Untersuchungen durch Dritte sind, gelten diese Annahmen sowie die Ergebnisse dieser Senkungsprognose vorbehaltlich neuer Erkenntnisse aus

¹E-Mail der STORAG ETZEL GmbH an die BGR vom 11.08.2016.

Tabelle 3.1: Angenommene Konvergenzraten für die verschiedenen Nutzungsarten.

Nutzung Kavernen	Konvergenzrate $k/(\%/a)$
Solung und Nachsolung	0,30
Ölspeicherung	0,26
Solespeicherung	0,23
Gasspeicherung Südfeld	0,80
Gasspeicherung Nordfeld 1. bis 6. Betriebsjahr	2,50
Gasspeicherung Nordfeld 7. bis 12. Betriebsjahr	1,50
Gasspeicherung Nordfeld ab 13. Betriebsjahr	1,00

Tabelle 3.2: Konvergenzraten in der Nachbetriebsphase (LINDERT, 2012b).

Alle Kavernen	Von 0 bis 10 Jahre nach Einstellung des Betriebes	von... bis... Jahre nach Verwahrung	0 1	1 5	5 10	10 50	50 100	100 200	200 300
Konvergenzrate $k/(\%/a)$	0,23		0,100	0,015	0,006	0,0016	0,0006	0,0005	0,0004

den laufenden Untersuchungen. Zu gegebener Zeit sind die getroffenen Annahmen zu überprüfen und ggf. zu aktualisieren.

Nach Einstellung des Betriebes werden die Kavernen zunächst mit Sole geflutet. Anschließend stehen sie zwecks Temperatenausgleich zwischen Sole und Gebirge zehn Jahre lang unter Betriebsbedingungen, wie sie bei Solungen / Nachsolungen herrschen, so dass eine Konvergenzrate von 0,23 %/Jahr für diesen Zeitraum unterstellt wird. Anschließend werden die Kavernen verwahrt. In der Folge stellen sich nach heutigem Stand von Wissenschaft und Technik Druckverhältnisse ein, die die Konvergenzraten rasch abklingen lassen (LINDERT, 2012a,b). Die in Tabelle 3.2 zusammengestellten Konvergenzraten für die Nachbetriebsphase sind LINDERT (2012b) entnommen und werden als Eingangsdaten in der Senkungsprognose zugrunde gelegt.

3.2 Plausibilitätsprüfung

Die von STORAG ETZEL GmbH angegebenen empirischen Konvergenzraten werden bzgl. der Entwicklung der Kavernenvolumina und des Muldenvolumens auf Plausibilität untersucht. Dazu werden durch Sonarvermessungen ermittelte Kavernenvolumina den berechneten Werten gegenübergestellt. Zum anderen werden markscheiderisch ermittelte Muldenvolumina als integrales Maß mit den berechneten Muldenvolumina verglichen.

In Abbildung 3.1 bis Abbildung 3.4 sind exemplarisch die Entwicklungen der berechneten und aus Sonarvermessungen bestimmten Kavernenvolumina für vier Kavernen gegenüberstellt.

In Abbildung 3.1 ist die Entwicklung des Kavernenvolumens für eine Ölkaverne des Südfeldes dargestellt, die seit 1978 zur Speicherung von Öl genutzt wird. Von 1984 bis 1985 und von 1999 bis 2010 sind Volumenzuwächse belegt, die durch entsprechende Nachsolungen im Modell berücksichtigt werden. Zu Beginn der Verwahrung im Jahr 2079 wird durch Einleiten von Frischwasser ein zusätzliches Volumen geschaffen, das ca. 15 % des dann vorhandenen aktuellen Kavernenvolumens beträgt.

In Abbildung 3.2 ist die Entwicklung des Kavernenvolumens für eine Ölkaverne dargestellt, die im Rahmen der 1. Umrüstungskampagne (UK1: 1993 – 1997) auf Gasspeicherbetrieb umgerüstet wurde. Nach einer Nachsolung im Jahr 1989 fand von 1993 bis 1994 die Gaserstbefüllung statt. Seither befindet sie sich im regulären Speicherbetrieb. Von 2037 bis 2039 ist eine Nachsolung geplant, bei der 25 % des bei der Endvermessung nach Umrüstung gemessenen Kavernenvolumens nachgesolt werden soll. Zu Beginn der Verwahrung im Jahr 2079 wird durch Einleiten von Frischwasser ein zusätzliches Volumen geschaffen, das ca. 15 % des dann vorhandenen aktuellen Kavernenvolumens beträgt.

In Abbildung 3.3 ist die Entwicklung des Kavernenvolumens für eine Ölkaverne dargestellt, die seit 1981 für die Ölspeicherung genutzt wurde. Von 1982 bis 1988 und von 1999 bis 2000 sind Volumenzuwächse vorhanden, die durch entsprechende Nachsolungen im Modell berücksichtigt werden. Im Rahmen der 2. Umrüstungskampagne (UK2: 2005 – 2008) wurde sie dann auf Gasspeicherbetrieb umgerüstet. Nach einer Nachsolung im Jahr 2005 fand von 2007 bis 2009 die Gaserstbefüllung statt. Ab diesem Zeitpunkt befindet sich die Kaverne im regulären Speicherbetrieb. Von 2044 bis 2046 ist eine Nachsolung geplant, bei der 25 % des bei der Endvermessung nach Umrüstung der Kaverne gemessenen Kavernenvolumens nachgesolt werden soll. Zu Beginn der Verwahrung im Jahr 2079 wird durch Einleiten von Frischwasser ein zusätzliches Volumen geschaffen, das ca. 15 % des dann vorhandenen aktuellen Kavernenvolumens beträgt.

In Abbildung 3.4 ist die Entwicklung des Kavernenvolumens für eine Gaskaverne des Nordfeldes dargestellt, die im Jahre 2011 erstmals mit Gas befüllt wurde. Seitdem befindet sie sich im regulären Gasspeicherbetrieb. Von 2062 bis 2064 ist eine Nachsolung geplant, bei der 25 % des bei der Endvermessung nach Herstellung der Kaverne gemessenen Kavernenvolumens nachgesolt werden soll. Zu Beginn der Verwahrung im Jahr 2113 wird durch Einleiten von Frischwasser ein zusätzliches Volumen geschaffen, das ca. 15 % des dann vorhandenen aktuellen Kavernenvolumens beträgt.

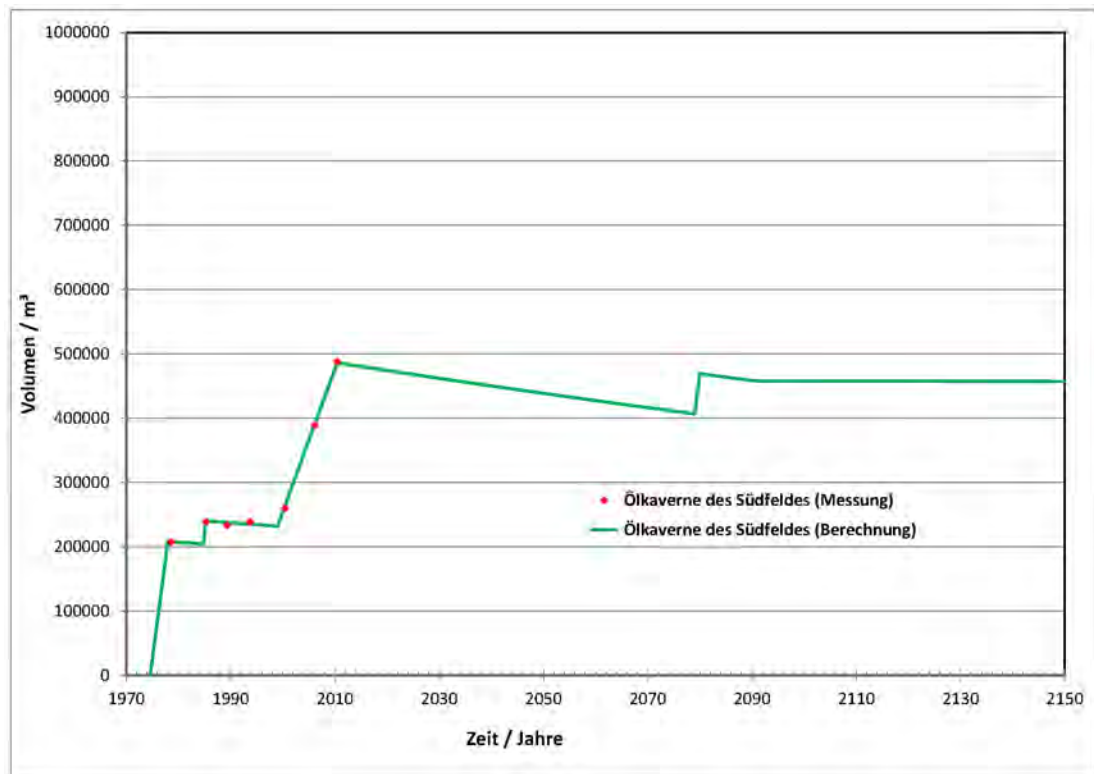


Abbildung 3.1: Entwicklung des Kavernenvolumens einer Ölkaverne des Südfeldes (Ölspeicherbetrieb ab 1978).

Die gemessenen und berechneten Kavernenvolumina stimmen gut überein und bestätigen somit die im Modell angesetzten Konvergenzraten für die betrachteten Kavernen innerhalb des analysierten Zeitraums.

Das vom Markscheider aus den Nivellementmessungen abgeleitete und das berechnete Muldenvolumen erlaubt durch Gegenüberstellung eine Validierung der integral auf empirischem Wege ermittelten Konvergenzen. Wird unterstellt, dass 95 % des Konvergenzvolumens ohne wesentlichen Zeitverzug an die Geländeoberfläche übertragen werden, ergeben sich die in Abbildung 3.5 dargestellten Verläufe der gemessenen und berechneten Muldenvolumina. Die Messwerte der Muldenvolumina werden durch den berechneten Verlauf der Muldenvolumina im Mittel sehr gut angenähert. Für die Jahre 2012 und 2013 liegen die berechneten Muldenvolumina rechnerisch 1,4 bzw. 3,0 % unterhalb, für die Jahre 2014 und 2015 8,5 bzw. 9,0 % oberhalb der aus den Nivellementmessungen abgeleiteten Muldenvolumina.

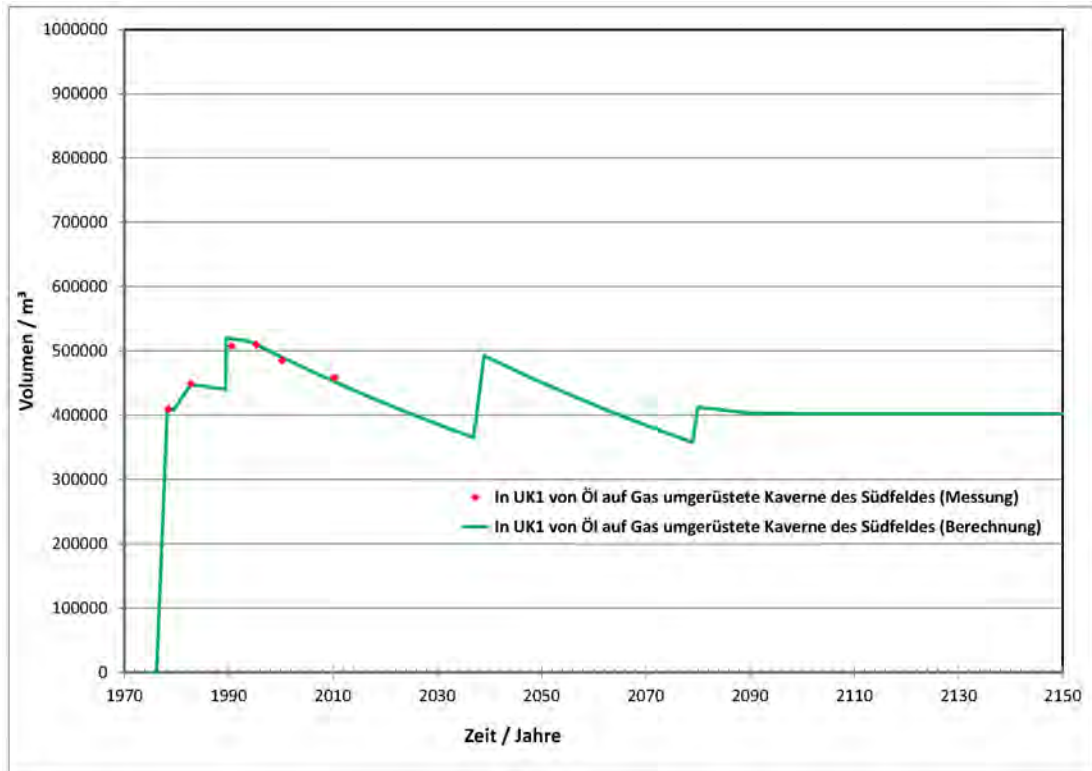


Abbildung 3.2: Entwicklung des Kavernenvolumens einer in UK1 von Öl auf Gas umgerüsteten Kaverne des Südfeldes (Gasspeicherbetrieb ab 1994).

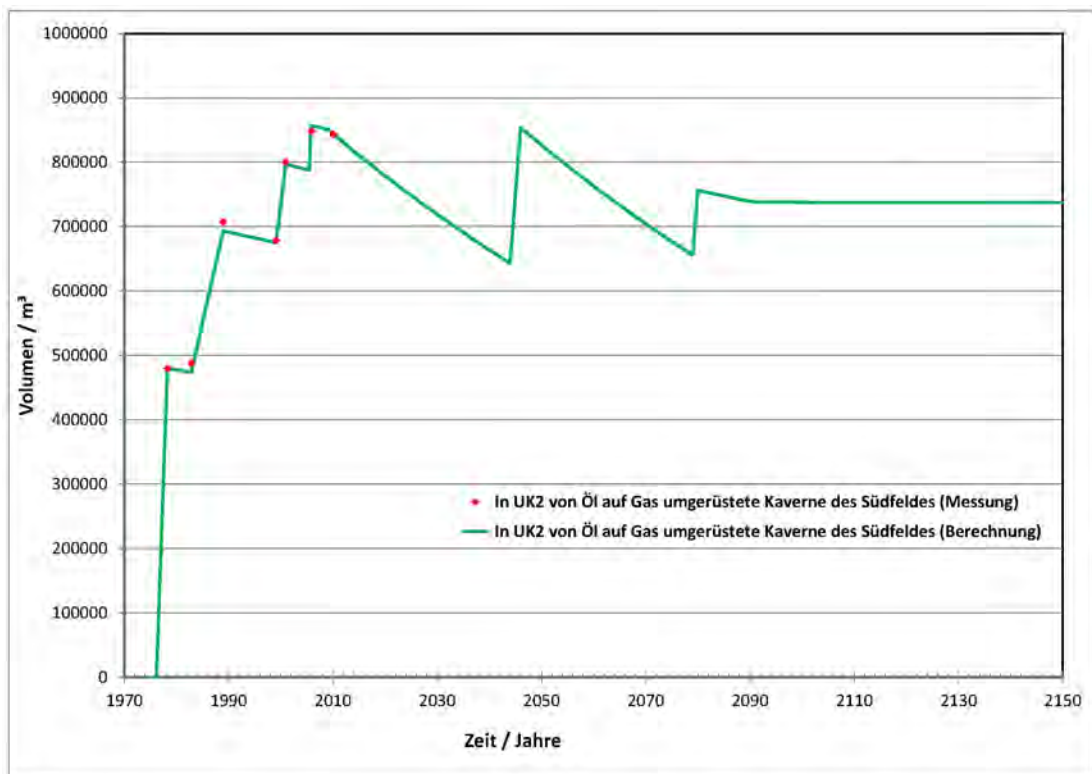


Abbildung 3.3: Entwicklung des Kavernenvolumens einer in UK2 von Öl auf Gas umgerüsteten Kaverne des Südfeldes (Gasspeicherbetrieb ab 2009).

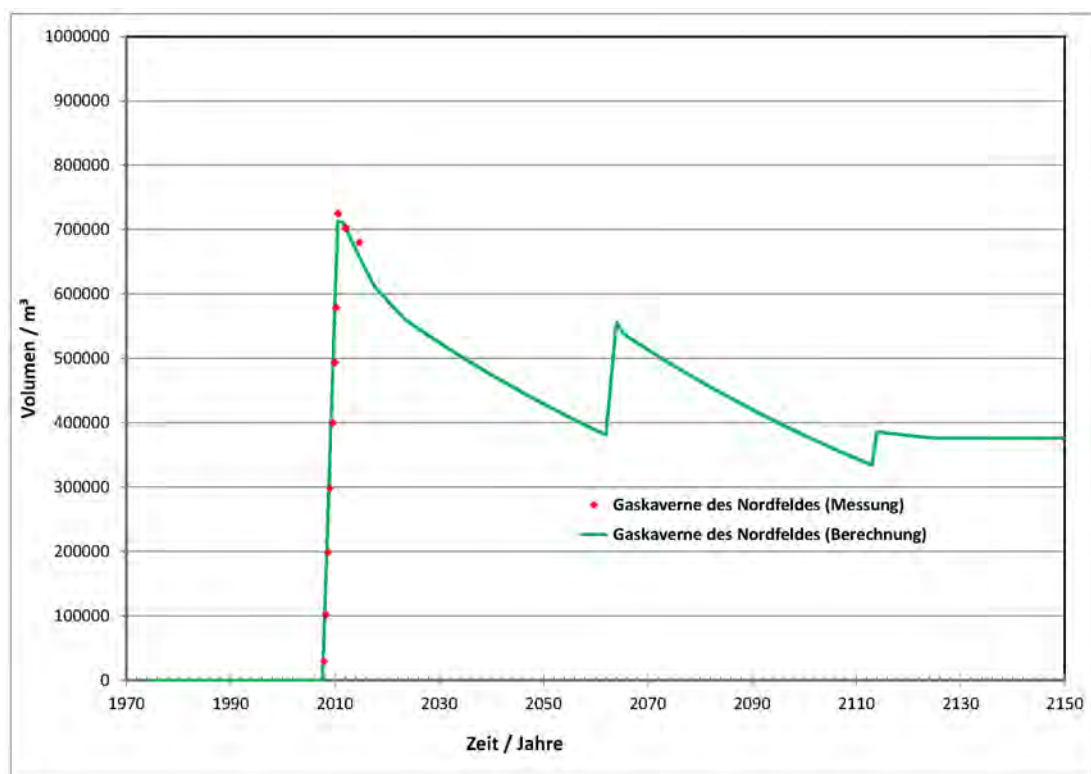


Abbildung 3.4: Entwicklung des Kavernenvolumens einer Gaskaverne des Nordfeldes (Gasspeicherbetrieb ab 2011).

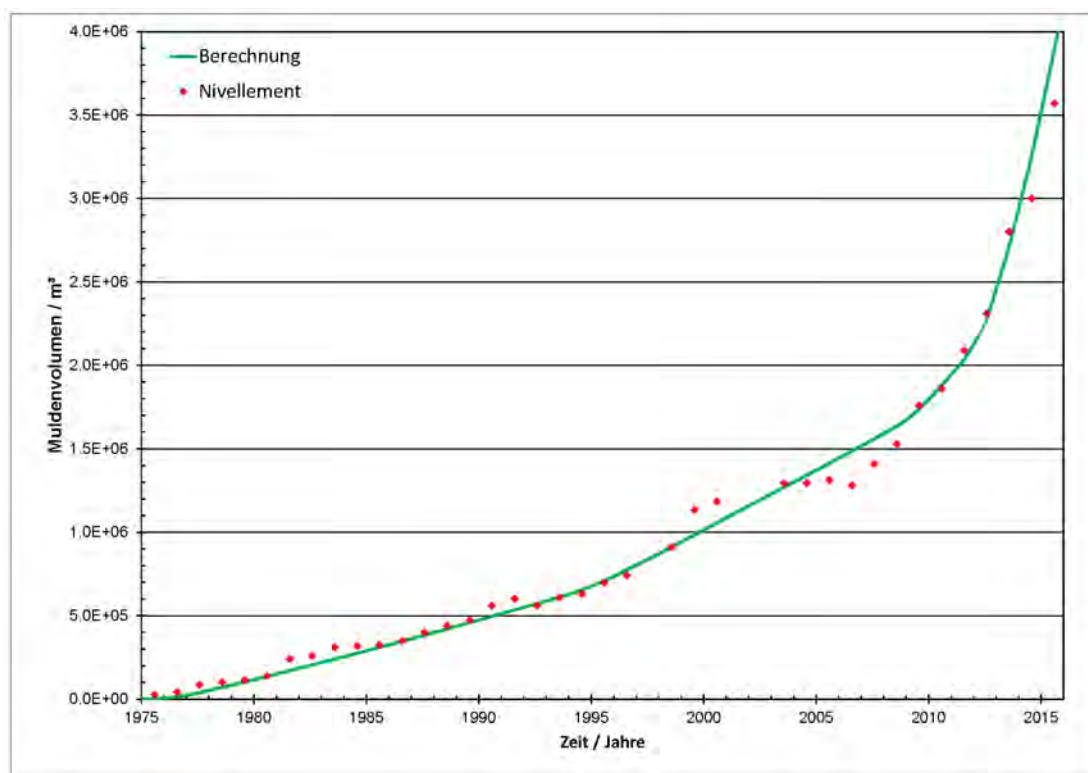


Abbildung 3.5: Vergleich des gemessenen und berechneten Muldenvolumens.

4 Modellkalibrierung

4.1 Parameterbestimmung der Einflussfunktion

Die Parameter der Einflussfunktion werden mittels einer nichtlinearen Regressionsanalyse ermittelt. Die Kalibrierung erfolgt für alle Messkampagnen des Feinnivellements der Geländeoberfläche (1975 – 2015), so dass auch eine zeitliche Veränderung der Parameter nachvollzogen werden kann. Die auswertbaren Nivellementpunkte des Jahres 2015 sind in Abbildung 4.1 dargestellt. Angesichts der großen Datenmenge der in allen Messkampagnen gemessenen Senkungen wird auf die Berichte des Markscheiders verwiesen.

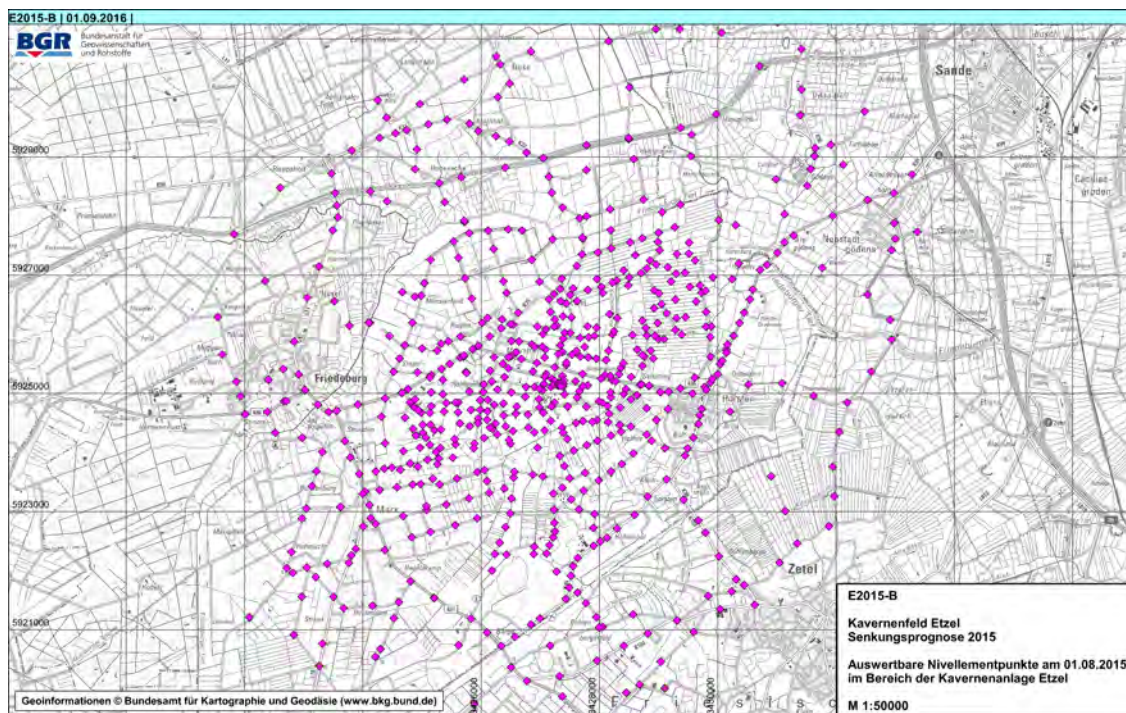


Abbildung 4.1: Auswertbare Nivellementpunkte am 01.08.2015 (unmaßstäblich).

Durch die Schaffung zusätzlicher Kavernen im Nordfeld findet etwa ab 2010 eine Veränderung des geomechanischen Systems statt. Dieser Prozess wird durch die Änderung einzelner Anpassungsparameter erfasst. Die weitere Entwicklung sollte zukünftig auf der Grundlage von In-situ-Messungen weiter analysiert werden.

Um die Prognose der zukünftigen Senkungsentwicklung abzusichern, sollten die vorgelegten Senkungsprognoseergebnisse in ca. fünf Jahren anhand der Messungen überprüft werden. Werden größere Abweichungen festgestellt, ist ein Update der Senkungsprognose anzustreben. Dazu sind die hier getroffenen Annahmen mit dem tatsächlichen Kavernenbetrieb abzugleichen.

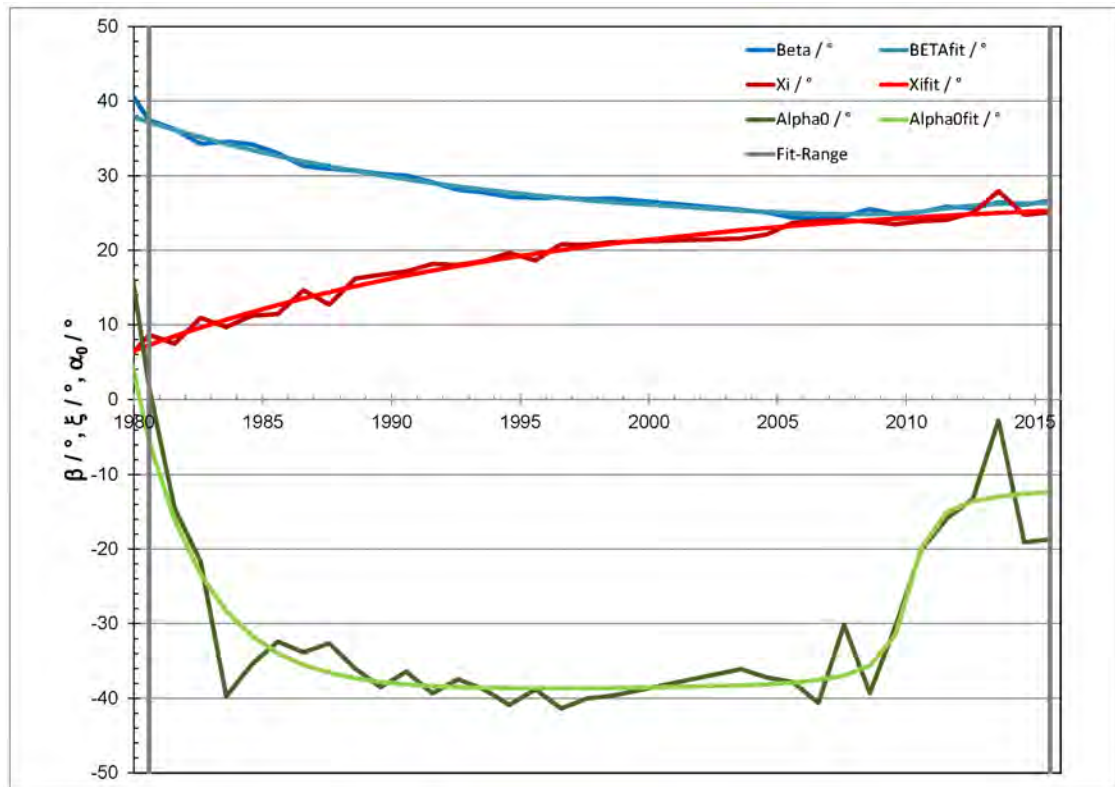


Abbildung 4.2: Zeitlicher Verlauf der Modellparameter (Regressionsergebnisse und Modellansatz).

Der zeitliche Verlauf der mittels nichtlinearer Regressionsanalyse bestimmten Parameter ist in Abbildung 4.2 dargestellt. Für das Prognosemodell werden die Parameter wie folgt angesetzt:

$$\delta = 2$$

$$\psi = 1$$

$$\beta(t) / ^\circ = 23,994 + 21,344 \cdot \exp(-0,074 \cdot (t - 1975,584)) \\ + 0,01810 \cdot \arctan(0,558 \cdot (t - 2011,365))$$

$$\alpha_0(t) / ^\circ = -25,238 + 225,257 \cdot \exp(-0,382 \cdot (t - 1975,584)) \\ + 0,15476 \cdot \arctan(1,546 \cdot (t - 2010,166))$$

$$\xi(t) / ^\circ = 27,754 \cdot (1 - \exp(-0,061 \cdot (t - 1975,584)))$$

Die beiden Parameter $\alpha_0(t)$ und $\xi(t)$ bestimmen die in Abschnitt 2.2 beschriebene subvertikale Übertragung des Konvergenzvolumens an die Geländeoberfläche. Es gilt:

$$\Delta x(t) / \text{m} = 818,0 \cdot \tan(\xi(t)) \cdot \cos(\alpha_0(t))$$

$$\Delta y(t) / \text{m} = 818,0 \cdot \tan(\xi(t)) \cdot \sin(\alpha_0(t))$$

Abbildung 4.3 veranschaulicht die zeitliche Entwicklung des im Modell angesetzten Versatzes an der Geländeoberfläche. Der Versatz bildet sich mit der Zeit bis zum Jahr 2006 Richtung Südosten aus, also normal zur weiter oben beschriebenen Konturstufe. Anschließend ändert sich die Versatzrichtung in Richtung Ostsüdost und danach nur noch marginal. Aufgrund der starken Oszillationen und der noch

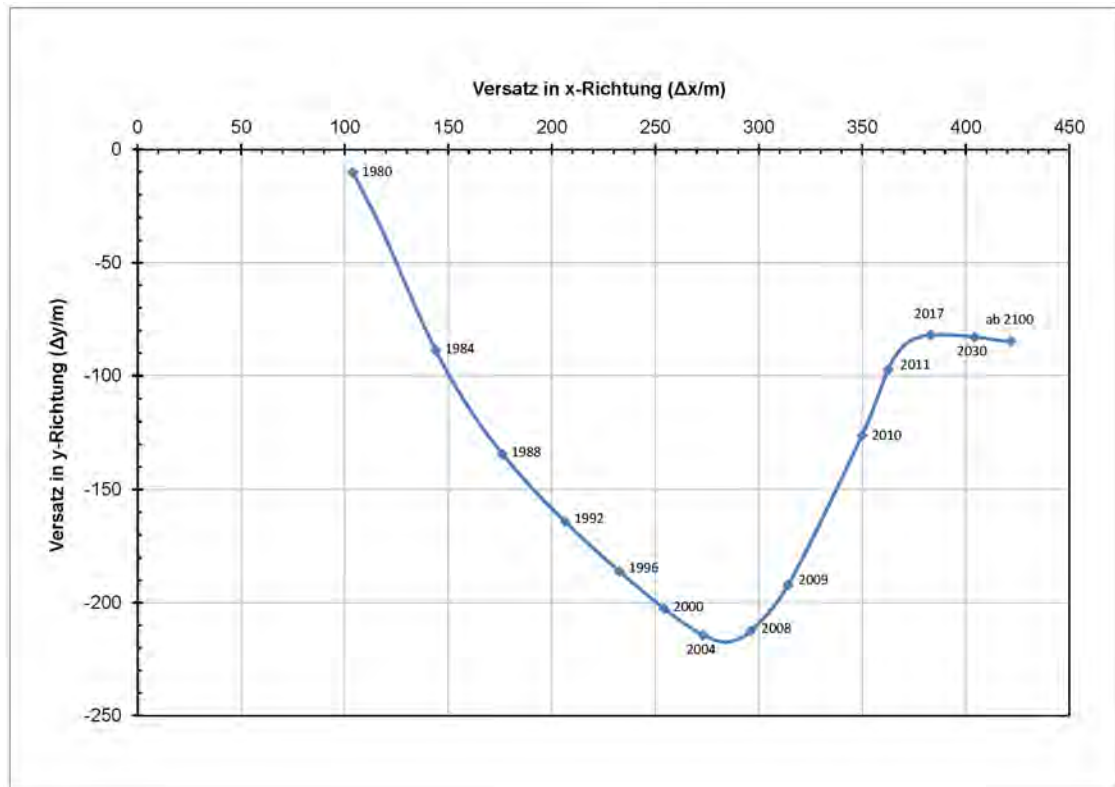


Abbildung 4.3: Zeitliche Entwicklung des im Modell angesetzten räumlichen Versatzes der Senkungsmulde an der Geländeoberfläche.

Tabelle 4.1: Kennwerte der Regressionsgüte für die Modellkalibrierung 1981 – 2015.

	S^2/m^2	$\bar{R}^2$
Minimalwert	3,0E-05	0,80
Median	1,1E-04	0,92
Maximalwert	5,5E-04	0,98

geringen Anzahl der Nivellementmessungen ab 2010 (vgl. Abb. 4.2) ist der extrapolierte Verlauf des Parameters α_0 mit relativ großen Unschärfen behaftet.

Der Median der Residualvarianzen S^2 beträgt $1,1E-04 \text{ m}^2$ (Tab. 4.1). Der Median des bereinigten Bestimmtheitsmaßes $\bar{R}^2$ ist 0,92. Die Kalibrierung ist somit insgesamt als sehr gut einzustufen.

4.2 Gegenüberstellung gemessener und berechneter Senkungen

Zur Veranschaulichung der Anpassungsgüte werden berechnete und gemessene Senkungen gegenübergestellt. Die gemessenen Daten haben ihren Ursprung in den jährlich in den Monaten August / September durchgeführten Feinnivellements des Markscheiders. In den Abbildungen A.1 bis A.5 (Anhang A) sind die vom Markscheider interpretierten den berechneten Isokatabasen zu den Zeitpunkten der jeweils durchge-

fürten Feinnivellements in den Jahren 2011 bis 2015 gegenübergestellt. Die berechneten Isokatabasen werden mit dicken, die vom Markscheider interpretierten Isokatabasen mit dünnen Linien dargestellt. Die vom Markscheider interpretierten Isokatabasen werden durch die Berechnung für alle Zeitpunkte gut angenähert. Für die Jahre 2013 und 2015 deuten die Messdaten darauf hin, dass die Senkungen sich verstärkt nach Nordosten hin ausbreiten. Dies wird in den Berechnungen nicht erfasst (Abb. A.3 und A.5). Es wird vermutet, dass die Ursache für diese Abweichungen geringere Kaverneninnendrucke in den jungen Nordfeldkavernen von 08/2012 bis 08/2013 und von 08/2014 bis 08/2015 sind, die nicht den in der Senkungsprognose angesetzten mittleren Betriebsbedingungen entsprechen.

Zusätzlich zum vorangegangenen räumlichen Vergleich der Senkungen werden nachfolgend für ausgewählte Nivellementpunkte (Abb. 4.4) gemessene und berechnete Senkungen in ihrem zeitlichen Verlauf verglichen. Da die Senkungen im Messpunkt 220 in den letzten Jahren maximale Werte zeigten, wird dieser Punkt als Orientierungspunkt in den eingebetteten Kartenausschnitten der folgenden Abbildungen durch einen blauen Kreis markiert, der jeweils dargestellte Messpunkt mit einem roten Kreis.

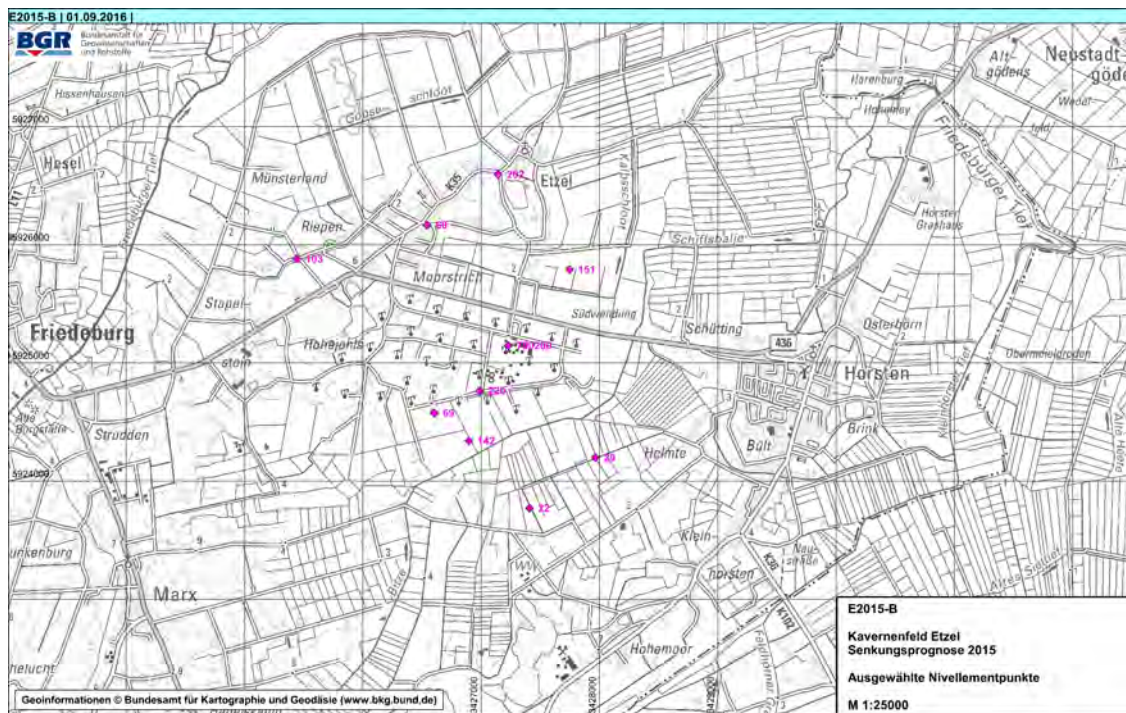


Abbildung 4.4: Ausgewählte Nivellementpunkte (unmaßstäblich).

Gemessene und berechnete Senkungen von Messpunkt 220 (Abb. 4.5) weisen teilweise größere Abweichungen auf. Im Jahr 2015 beträgt der Unterschied zwischen Messung und Berechnung ca. 4 cm. Die berechneten und gemessenen Senkungen der letzten Jahre nähern sich mit der Zeit an, so dass für die Zukunft eine zunehmende Übereinstimmung erwartet wird. Sämtliche nachfolgend dargestellten Messpunkte (Abb. 4.6 bis Abb. 4.14) zeigen gute bis sehr gute Übereinstimmungen der berechneten und gemessenen Werte. Für die Mehrzahl der dargestellten Punkte werden für die letzten Jahre größere Senkungen berechnet als gemessen.

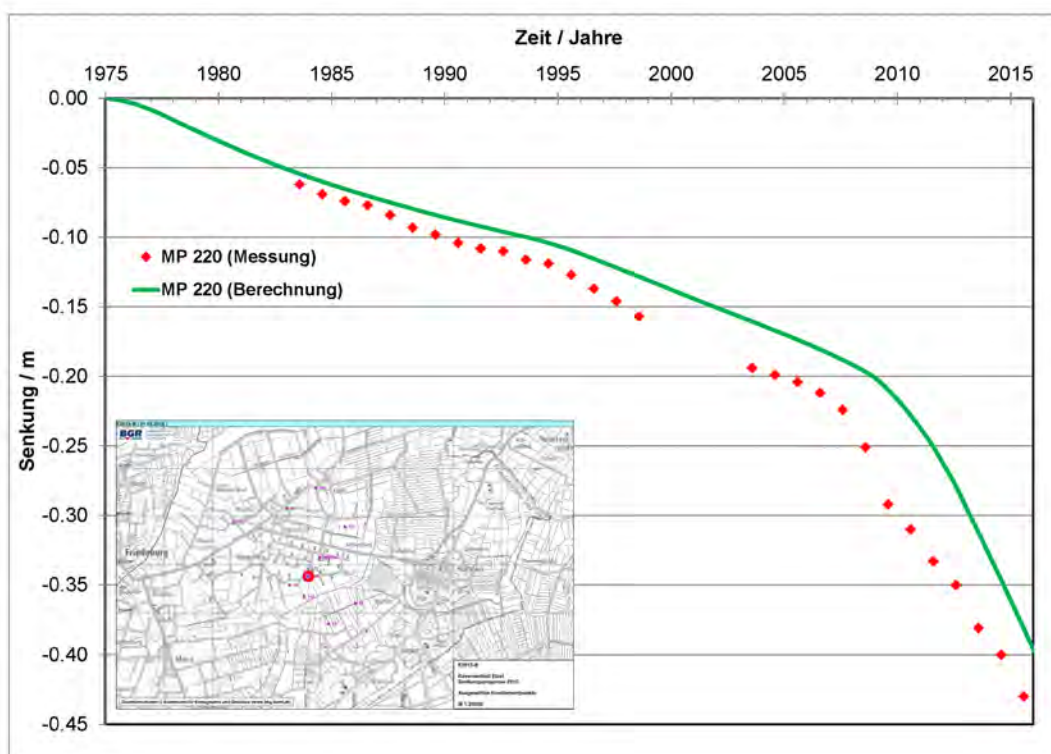


Abbildung 4.5: Vergleich der gemessenen und berechneten Senkungen im MP 220.

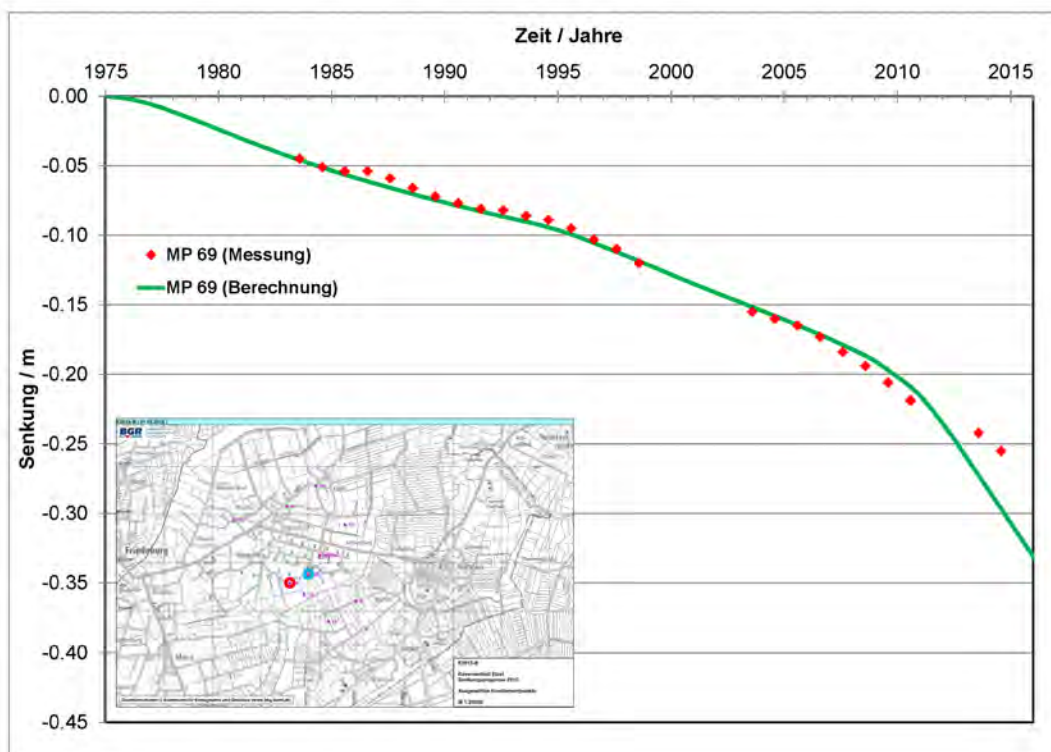


Abbildung 4.6: Vergleich der gemessenen und berechneten Senkungen im MP 69.

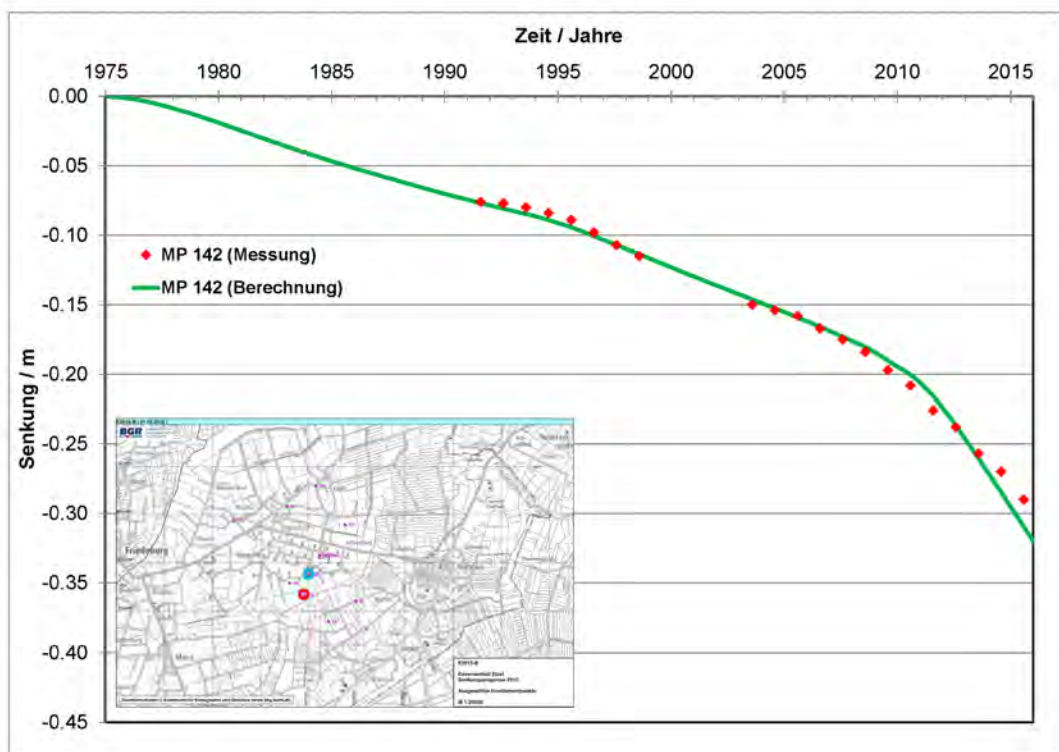


Abbildung 4.7: Vergleich der gemessenen und berechneten Senkungen im MP 142.

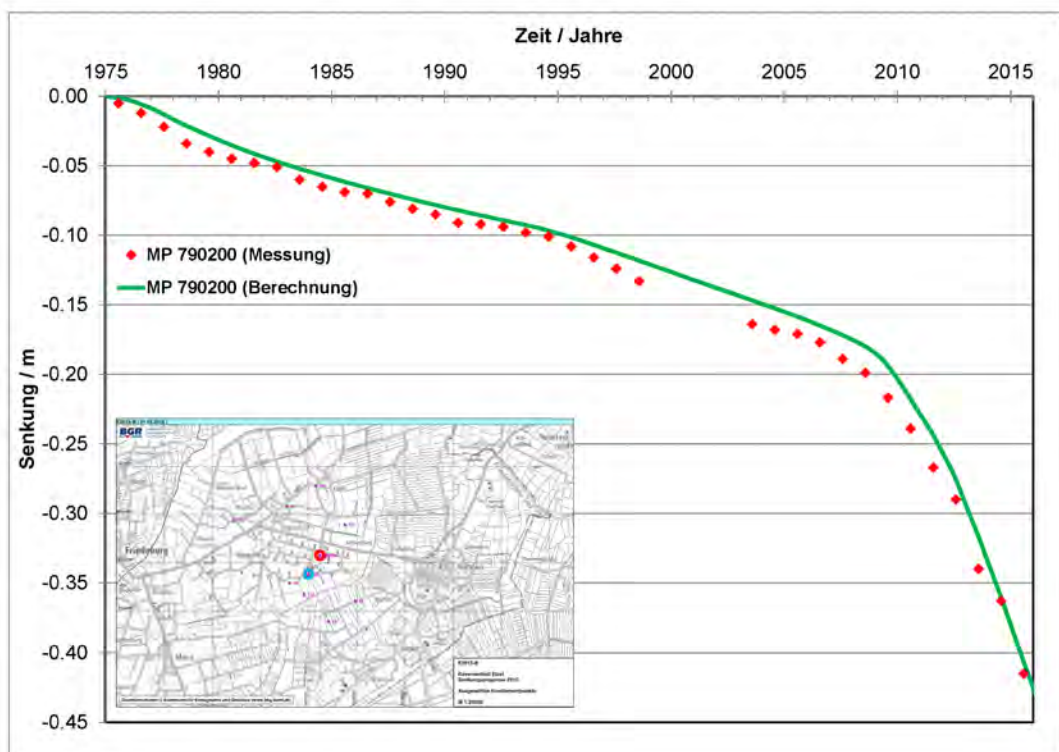


Abbildung 4.8: Vergleich der gemessenen und berechneten Senkungen im MP 790200.

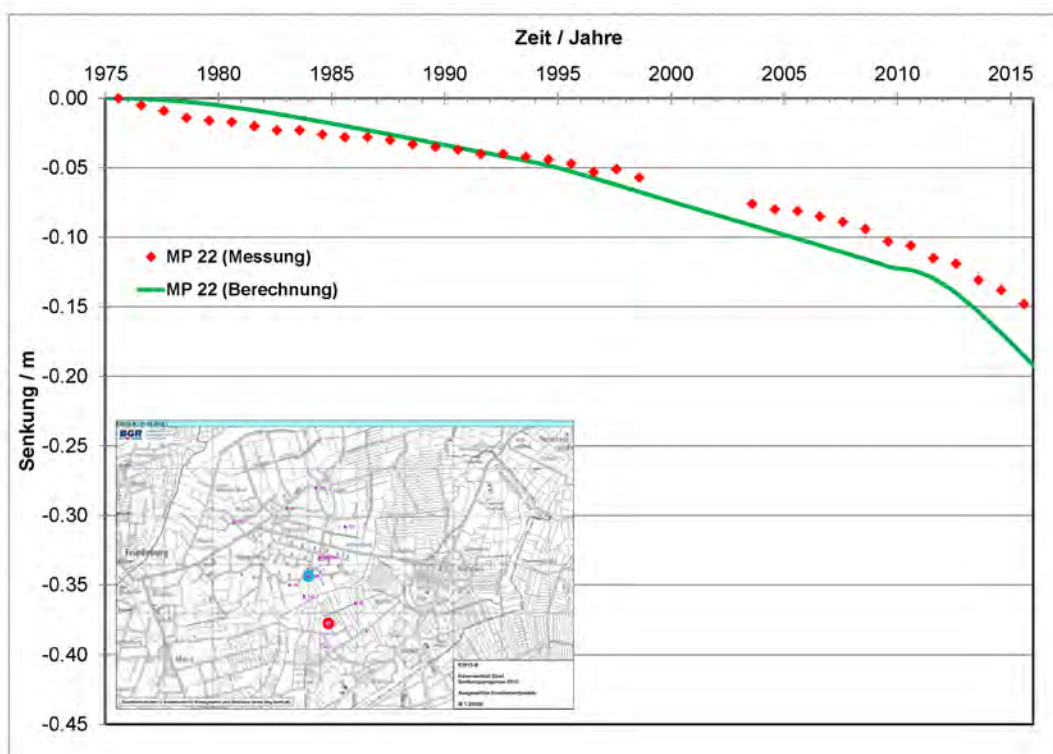


Abbildung 4.9: Vergleich der gemessenen und berechneten Senkungen im MP 22.

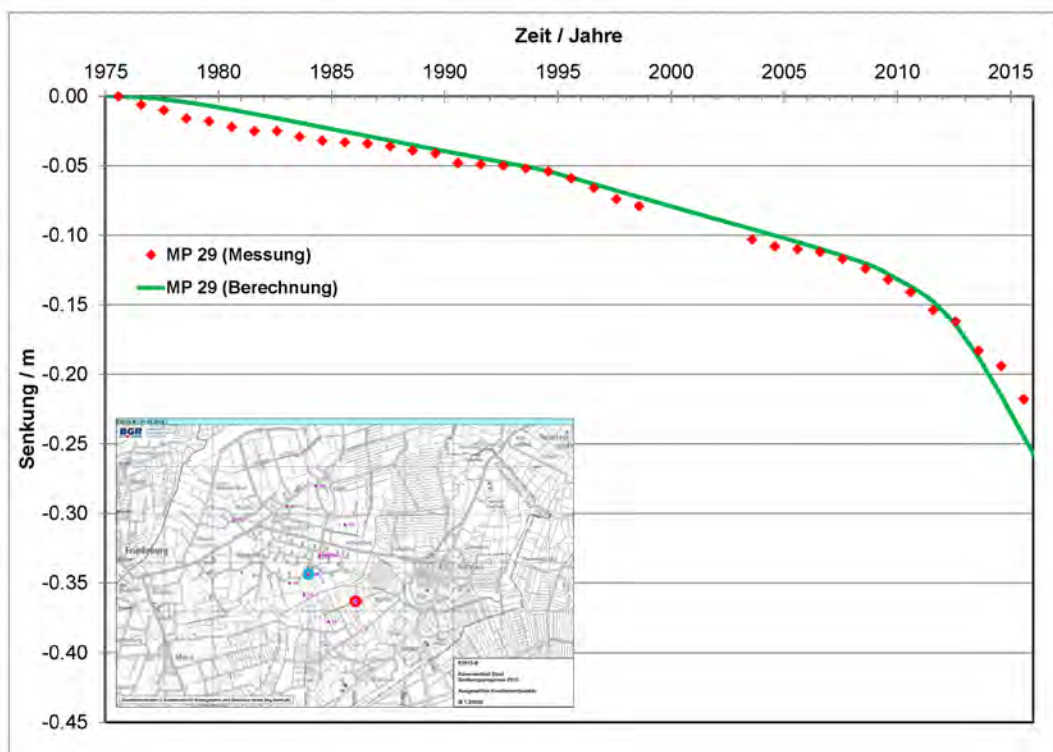


Abbildung 4.10: Vergleich der gemessenen und berechneten Senkungen im MP 29.

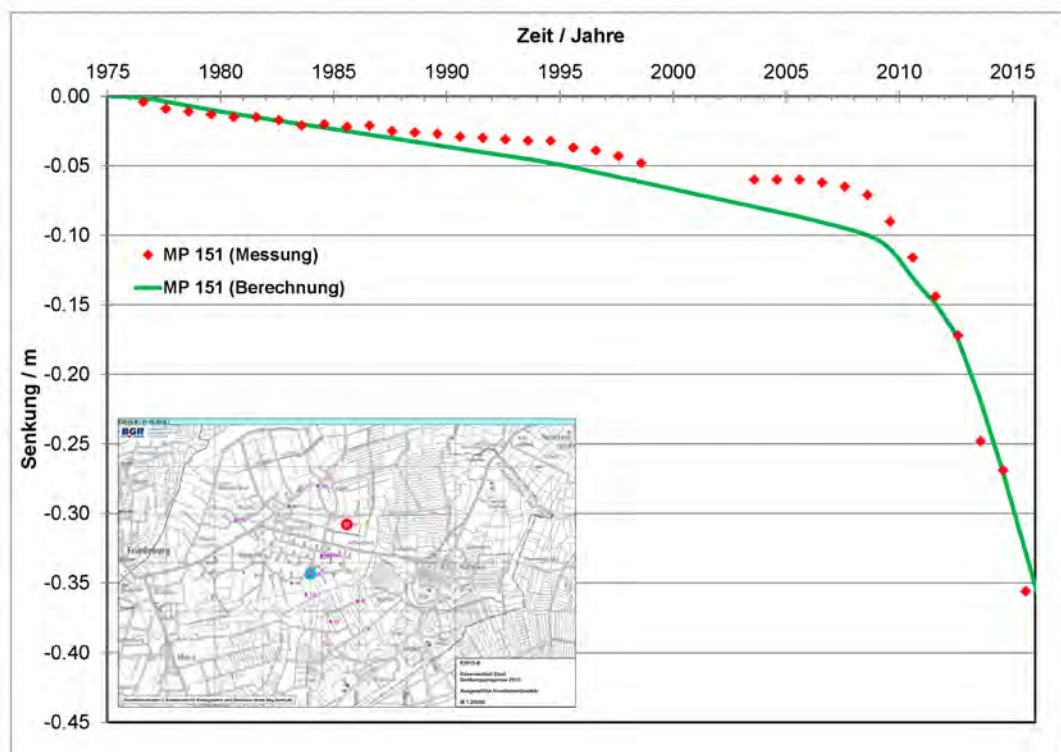


Abbildung 4.11: Vergleich der gemessenen und berechneten Senkungen im MP 151.

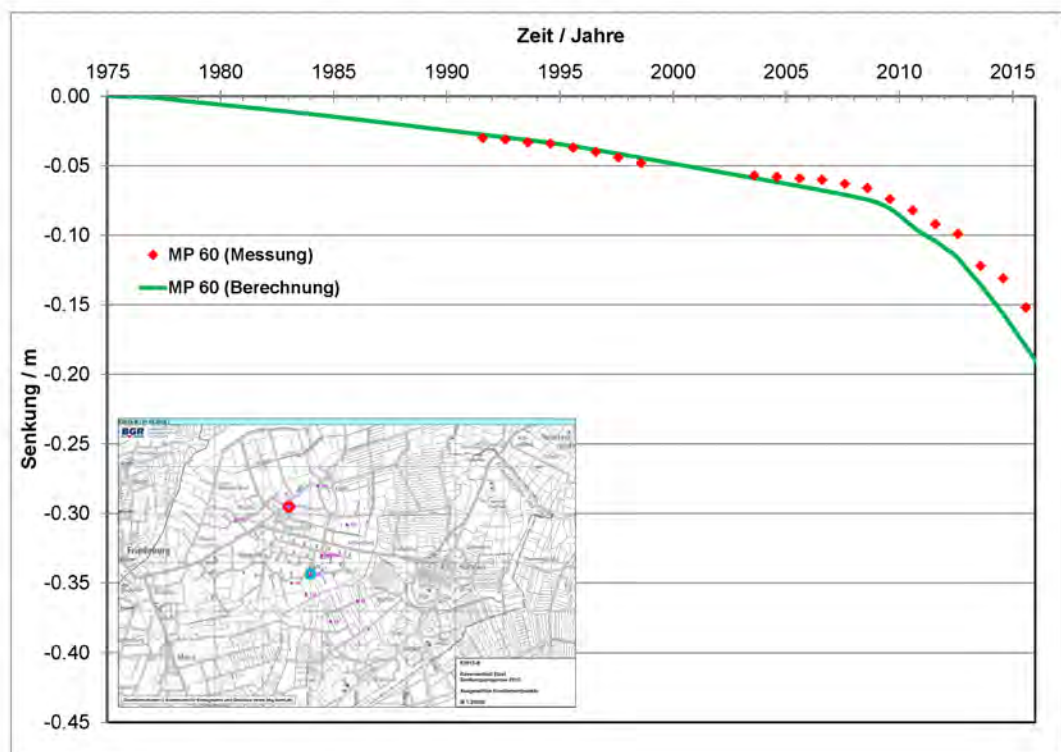


Abbildung 4.12: Vergleich der gemessenen und berechneten Senkungen im MP 60.

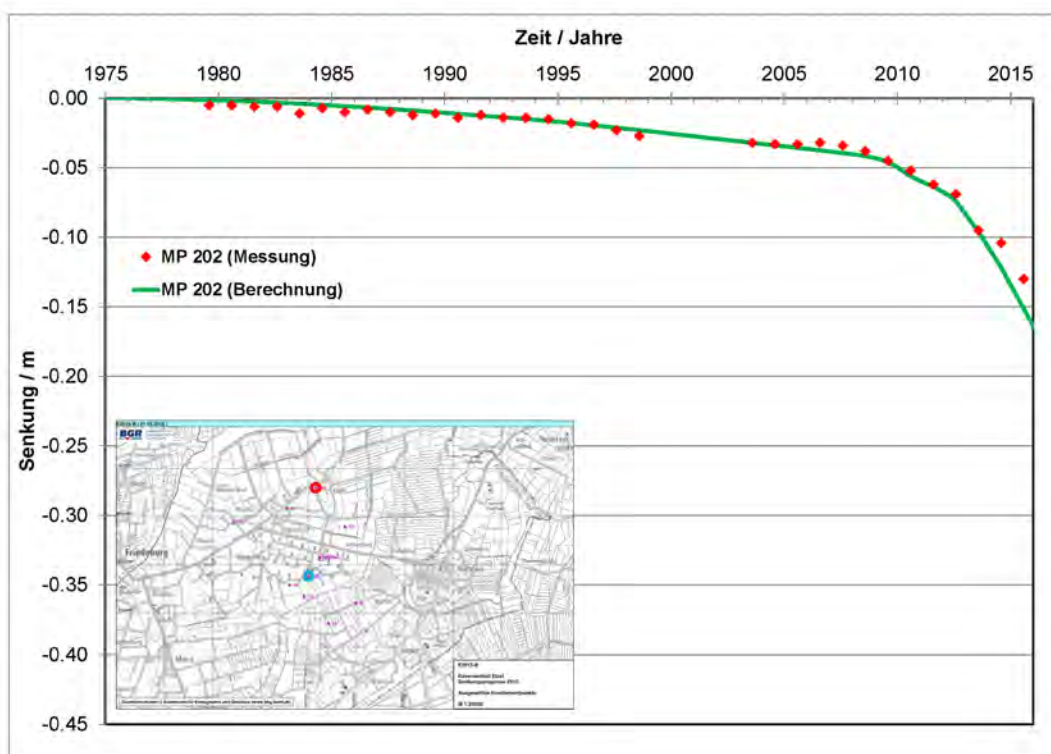


Abbildung 4.13: Vergleich der gemessenen und berechneten Senkungen im MP 202.

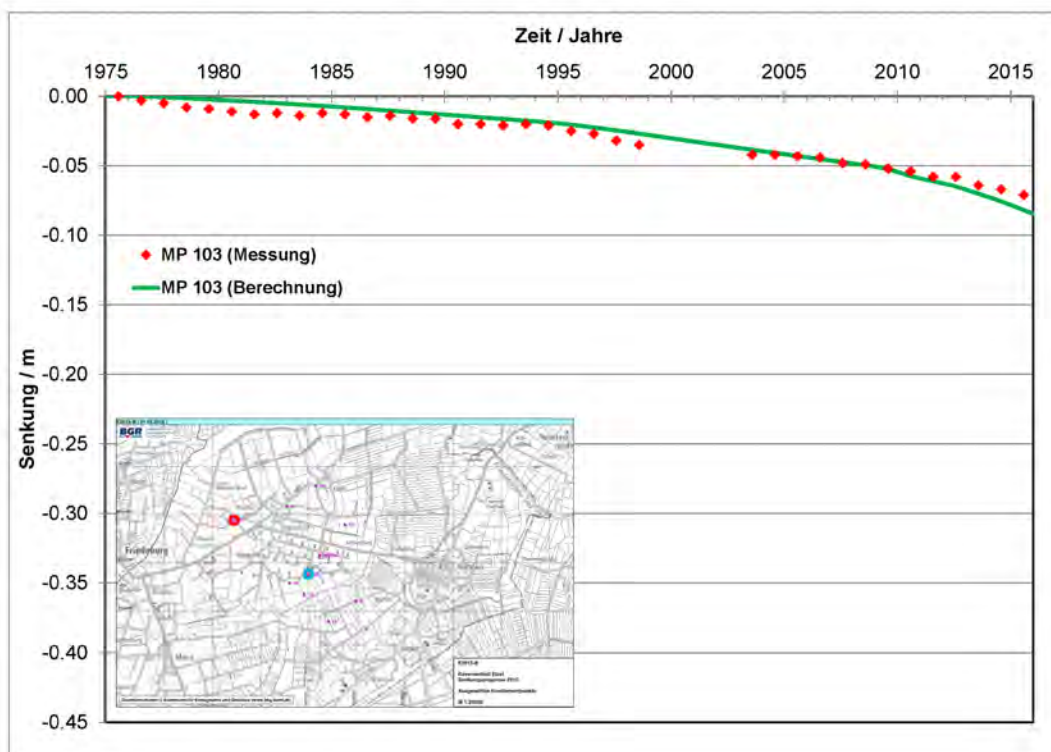


Abbildung 4.14: Vergleich der gemessenen und berechneten Senkungen im MP 103.

5 Ergebnisse der Senkungsprognose

Im Anhang B sind die Ergebnisse der Senkungsprognose für den Zeitraum von 2015 bis 2317 dargestellt. Auf den Karten des Anhangs werden die Kavernen mit farbigen Symbolen gekennzeichnet. Ölkavernen werden orange, Gaskavernen grün und Solekavernen blau markiert. Solange die Kavernen gesolt bzw. betrieben werden, werden sie mit Kreissymbolen gekennzeichnet. Nach Verwahrung wechselt das Symbol von einem Kreis zu einem Quadrat gleicher Farbfüllung. Bei umgerüsteten Kavernen wechselt die Kennzeichnung entsprechend der aktuellen Nutzung. Während der Solung bzw. Nachsolung wird die Kennzeichnung nicht geändert, sondern entspricht der Nutzung nach dem Solprozess.

5.1 Senkungen

5.1.1 Isokatabasendarstellungen von 2015 bis 2317

In den Abbildungen B.1 bis B.8 sind die Isokatabasen für die Jahre 2015, 2020, 2040, 2060, 2080, 2100, 2120 und 2317 dargestellt. Für das Jahr 2015 werden maximale Senkungen südlich der Bundesstraße B436 im Bereich des Betriebsgeländes der STORAG ETZEL GmbH mit bis zu 0,41 m berechnet. Das Senkungsmaximum wandert - der Erweiterung des Kavernenfeldes im Nordfeld folgend - Richtung Nordosten und befindet sich 2020 südlich der Bundesstraße B436. Im Jahr 2040 beträgt die Maximalsenkung 1,13 m und liegt jetzt nördlich der Bundesstraße B436. In der Folge nehmen die Senkungen weiter zu, ohne dass sich der Ort des Maximums wesentlich verändert. Die Maximalwerte steigen in den folgenden Jahren weiter an (2060: 1,58 m, 2080: 2,06 m, 2100: 2,36 m) und erreichen im Jahr 2120 nach kompletter Betriebseinstellung Maximalsenkungen von 2,55 m. In der Nachbetriebsphase nehmen die Senkungen nur noch wenig zu und erreichen zum Prognoseende im Jahr 2317 Maximalwerte von 2,57 m.

5.1.2 Senkungen in Schnitten

Zur Veranschaulichung der zeitlichen Entwicklung der Senkungen eignen sich Schnittdarstellungen, in denen die Senkungen zu unterschiedlichen Zeitpunkten überhöht dargestellt werden. Abbildung 5.1 zeigt die Lage der ausgewählten Schnitte mit Geländemarken, die in den jeweiligen Schnittdarstellungen zur besseren Orientierung ebenfalls gekennzeichnet sind. Die Schnitte 1-1 und A-A kreuzen sich orthogonal in ostnordöstlicher Entfernung von ca. 1 km vom Firmengelände der STORAG ETZEL GmbH nördlich der Bundesstraße B436. Schnitt B-B verläuft von Nordwesten nach Südosten und enthält die Geländemarken „Kirche Etzel“ und „Kirche Horsten“.

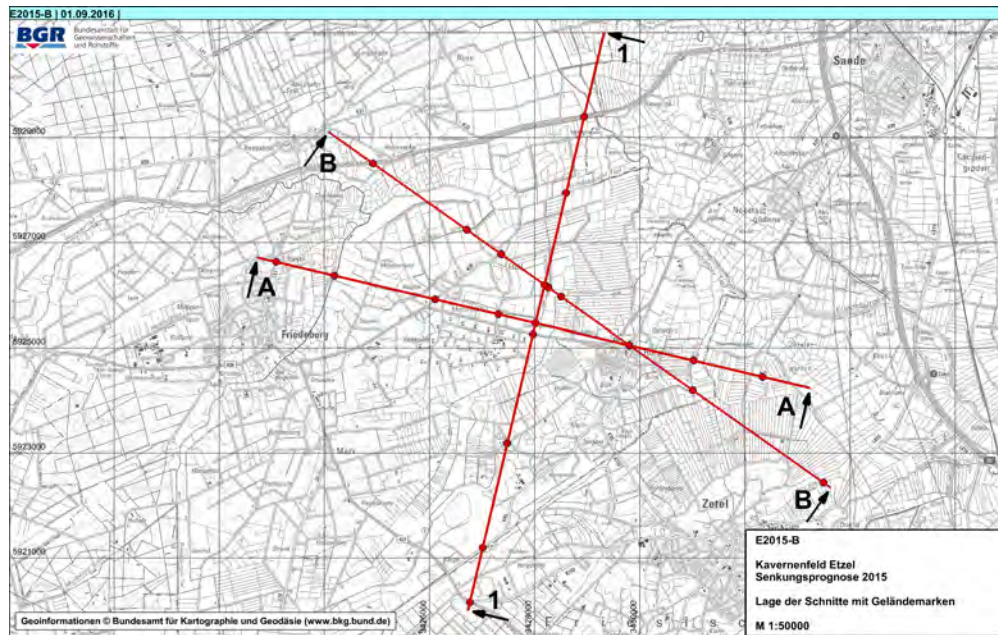


Abbildung 5.1: Lage der Schnitte mit Geländemarken (nicht maßstabsgetreu).

In Abbildung 5.2 ist die Senkungsentwicklung im Schnitt 1-1 von 2010 bis 2317 in ca. 3000-facher Überhöhung dargestellt. Ausgehend vom Jahr 2010 wird jeweils alle zehn Jahre eine Kurve bis zum Jahr 2120 dargestellt. Abschließend folgen die Senkungen für das Jahr 2317. Die Senkungen nehmen als Folge der in den ersten Betriebsjahren schneller konvergierenden Kavernen des Nordfeldes von 2010 bis 2020 schneller zu als in den folgenden Dekaden und das Senkungsmaximum verschiebt sich entlang des Schnittes um ca. 400 m nach Nordnordosten. In der Folge nehmen die Senkungen bis zum Jahr 2080 mit gleicher Rate zu. Die Senkungen nehmen ab 2080 aufgrund der sukzessiven Außerbetriebnahme und Verwahrung der Kavernen mit abnehmenden Raten weiter zu. Nach Verwahrung der letzten Kaverne im Jahre 2117 nehmen die Senkungen bis zum Jahr 2317 nur noch gering zu. Das Senkungsmaximum wird von 2020 bis 2120 entlang des Schnittes noch einmal um ungefähr 400 m nach Nordnordosten verschoben, bleibt aber danach in seiner Lage stabil.

In Abbildung 5.3 ist die Senkungsentwicklung im orthogonal zum Schnitt 1-1 verlaufenden Schnitt A-A von 2010 bis 2317 in ca. 3000-facher Überhöhung dargestellt. Die Senkungen nehmen als Folge der in den ersten Betriebsjahren schneller konvergierenden Kavernen des Nordfeldes von 2010 bis 2020 schneller zu als in den folgenden Dekaden und das Senkungsmaximum verschiebt sich entlang des Schnittes um ca. 600 m nach Ostsüdosten. In der Folge nehmen die Senkungen bis zum Jahr 2080 mit gleicher Rate zu. Die Senkungen nehmen ab 2080 aufgrund der sukzessiven Außerbetriebnahme und Verwahrung der Kavernen mit abnehmenden Raten zu. Nach Verwahrung der letzten Kaverne im Jahre 2117 steigen die Senkungen bis zum Jahr 2317 nur noch gering an. Das Senkungsmaximum wird von 2020 bis 2120 entlang des Schnittes noch einmal um ungefähr 270 m nach Ostsüdosten verschoben, bleibt aber danach in seiner Lage stabil.

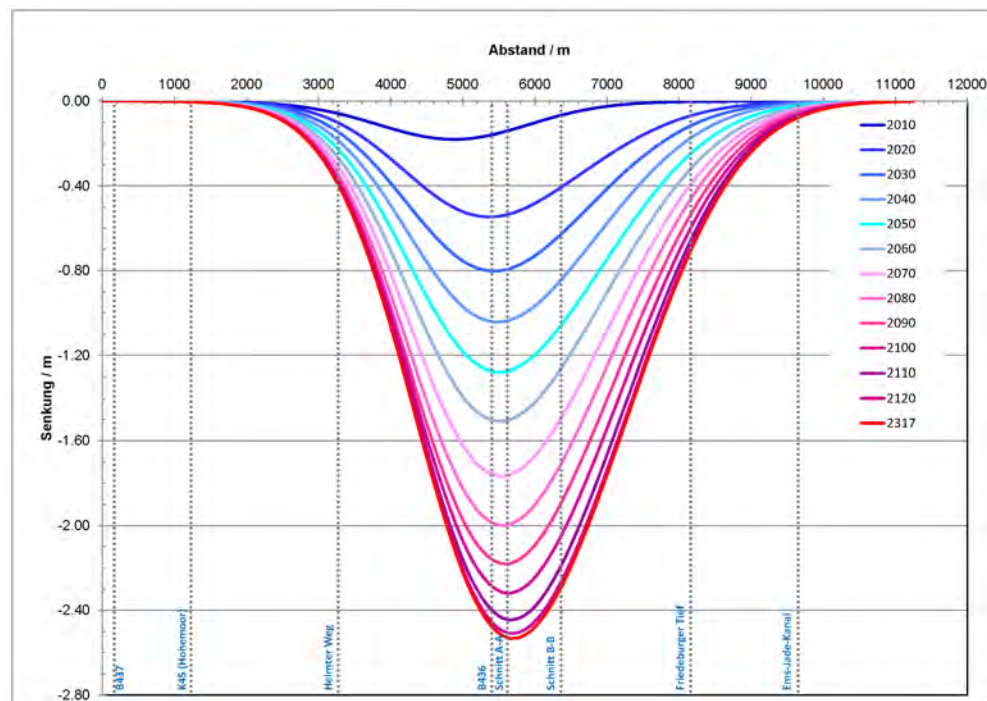


Abbildung 5.2: Senkungen im Schnitt 1-1 von 2010 bis 2317 (ca. 3000-fach überhöht).

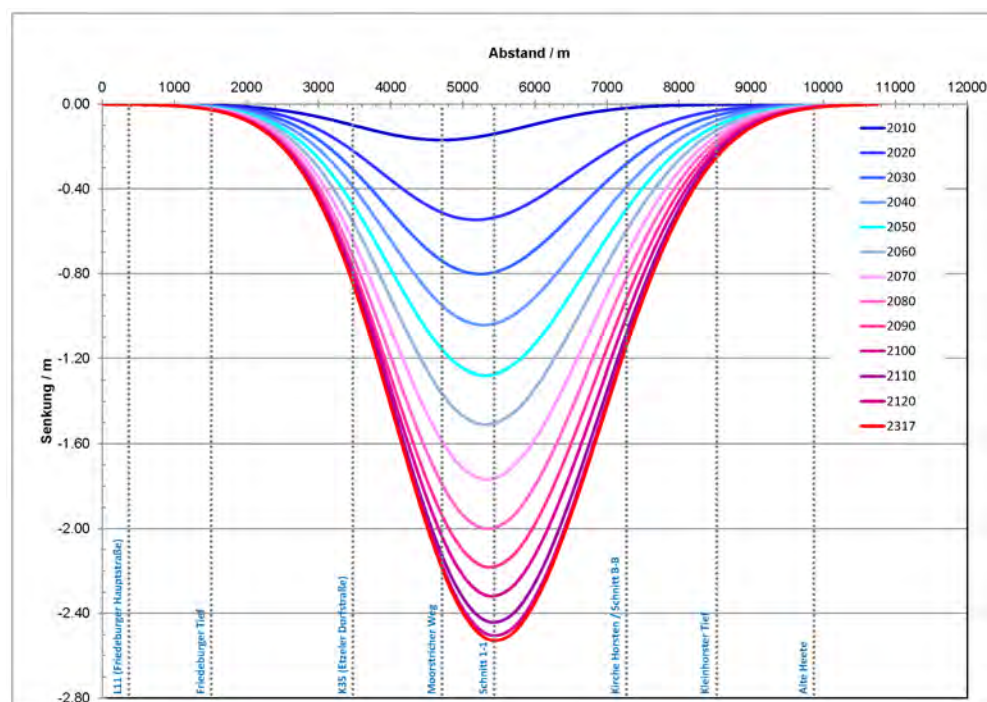


Abbildung 5.3: Senkungen im Schnitt A-A von 2010 bis 2317 (ca. 3000-fach überhöht).

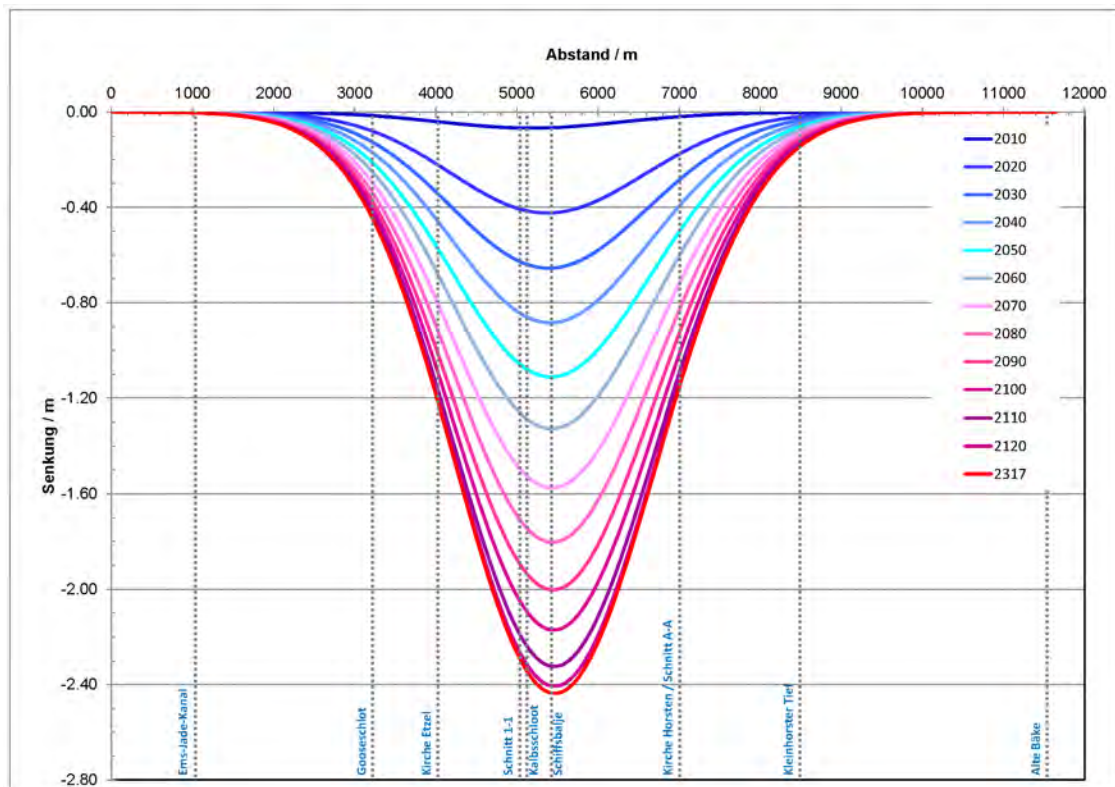


Abbildung 5.4: Senkungen im Schnitt B-B von 2010 bis 2317 (ca. 3000-fach überhöht).

In Abbildung 5.4 ist die Senkungsentwicklung im von Nordwesten nach Südosten verlaufenden Schnitt B-B von 2010 bis 2317 in ca. 3000-facher Überhöhung dargestellt. Für das Jahr 2010 werden im Senkungsmaximum dieses Schnittes nur geringe Senkungen berechnet, da sich der Schnitt zu diesem Zeitpunkt noch am Rande der aktuell ausgebildeten Senkungsmulde befindet. Erst mit dem Ausbau des Nordfeldes werden größere Senkungen induziert, so dass von 2010 bis 2020 ein erheblicher Senkungszuwachs auftritt. Das Senkungsmaximum verschiebt sich entlang des Schnittes um ca. 250 m nach Südosten. In der Folge nehmen ab 2020 die Senkungen bis zum Jahr 2080 mit gleicher Rate zu. Danach nehmen die Senkungen mit abnehmenden Raten weiter zu. Die Ursachen dafür sind die gleichen wie bereits für die Schnitte 1-1 und A-A (Abb. 5.2 und Abb. 5.3) beschrieben. Das Senkungsmaximum wird von 2020 bis 2120 entlang des Schnittes noch einmal um ungefähr 50 m nach Südosten verschoben, verharrt danach aber an dieser Stelle.

5.2 Schieflagen

In den Abbildungen B.9 bis B.12 sind die Isolinien der prognostizierten Hauptwerte der Schieflagen für die Jahre 2015, 2060, 2120 und 2317 dargestellt. Die maximalen Schieflagen treten in den Flankenbereichen der Senkungsmulde auf. Sie steigen von 0,24 mm/m im Jahr 2015 über 0,86 mm/m im Jahr 2060 auf 1,33 mm/m im Jahr 2120 an. Anschließend findet ein geringer Anstieg des Maximalwertes der Schieflage auf 1,34 mm/m im Jahr 2317 statt.

5.3 Krümmungen und Krümmungsradien

Die Verteilung der Hauptkrümmungen v''_{z1} und v''_{z2} ist als Tensorplot in Abbildung B.13 exemplarisch für das Jahr 2317 beigefügt (Maßstab 1:25 000). Zu diesem Zeitpunkt werden die größten Krümmungswerte erwartet. Sie betragen maximal 0,0019 /km. Der kleinste Krümmungsradius beträgt demzufolge mehr als 500 km.

5.4 Horizontalverschiebungen

Die Horizontalverschiebungen werden in Anlehnung an QUASNITZA (1988) berechnet (vgl. Abschnitt 2.3). Da sie aufgrund fehlender Messwerte nicht validiert werden konnten, sind die prognostizierten Horizontalverschiebungswerte als vorläufig zu betrachten. In den Abbildungen B.14 bis B.17 sind die Isolinien der prognostizierten Hauptverschiebungen für die Jahre 2015, 2060, 2120 und 2317 dargestellt. Die Maximalwerte der Horizontalverschiebungen treten genauso wie die Maximalwerte der Schief lagen in den Flankenbereichen der Senkungsmulde auf. Im Jahr 2015 beträgt der Maximalwert der Horizontalverschiebungen 0,56 m. Dieser Wert steigt bis 2060 auf 2,26 m an. Im Jahr 2120 beträgt der Maximalwert der Horizontalverschiebungen 3,62 m und erreicht bis zum Prognoseende im Jahr 2317 einen nur wenig erhöhten Wert von 3,66 m.

5.5 Horizontale relative Längenänderungen (Zerrungen / Pressungen)

Da die horizontalen relativen Längenänderungen aus den Verschiebungen berechnet werden, sind diese ebenfalls als vorläufig zu betrachten (vgl. Abschnitt 2.3). Die horizontalen relativen Längenänderungen werden als Hauptwerte mehrfach visualisiert, da unterschiedliche Darstellungen schwerpunktmäßig andere Informationsgehalte besitzen: Aus den Isoliniendarstellungen der beiden Hauptwerte ε_1 und ε_2 lässt sich die Größe der Zerrungen / Pressungen sehr gut ablesen, es fehlen jedoch gänzlich die Informationen zur Orientierung. Diese erschließt sich besser in einem Tensorplot der beiden Hauptwerte. Die Größe der Zerrungen / Pressungen ist in Tensordarstellungen jedoch nicht so gut zu erfassen. Nachfolgend werden daher die drei unterschiedlichen Darstellungen für die Jahre 2015, 2060, 2120 und 2317 zusammengestellt. Die ersten Hauptwerte der horizontalen Längenänderungen sind abhängig vom Ort des Auftretens entweder als Pressungen oder Zerrungen ausgebildet (Abb. B.18 bis B.21). Die zweiten Hauptwerte der horizontalen Längenänderungen sind ausschließlich Pressungen. Ihre Isolinien sind in den Abbildungen B.22 bis B.25 dargestellt. In den Abbildungen B.26 bis B.29 werden beide Hauptwerte in Tensordarstellung visualisiert. Im Jahr 2015 treten maximale Zerrungen von 0,39 mm/m auf. Sie wachsen in der Folge von 1,47 mm/m im Jahr 2060 über 2,29 mm/m im Jahr 2120 auf einen Wert von 2,31 mm/m im Jahr 2317 an. Im Jahr 2015 betragen die Maximalwerte der Pressungen 0,90 mm/m. Sie steigen in der

Folge von 3,26 mm/m im Jahr 2060 über 5,09 mm/m im Jahr 2120 auf einen Wert von 5,13 mm/m im Jahr 2317.

5.6 Zusammenfassung der Ergebnisse

Die zuvor beschriebenen Ergebnisse der Bodenbewegungen und Bodenverformungen sind in Tabelle 5.1 zusammengefasst. Sämtliche Ergebnisse erreichen Maximalbeträge zum Prognoseende im Jahr 2317. Eine Ausnahme bildet die Senkungsrate, die im Jahr 2015 den größten Betrag aufweist, da die Nordfeldkavernen zu diesem Zeitpunkt schneller konvergieren. Nachfolgend konvergieren sie langsamer (vgl. Abschnitt 3.1.2), sodass insgesamt auch die Senkungsraten abnehmen.

Tabelle 5.1: Maximalwerte der berechneten Bodenbewegungen und Bodenverformungen.

Jahr	Senkung v_z/m	Schiefelage $v'_z/(\text{mm/m})$	Senkungsrate $\dot{v}_z/(\text{mm/a})$	Horizontal- verschiebung v_1/m	Zerrung $\varepsilon_1/(\text{mm/m})$	Pressung $\varepsilon_2/(\text{mm/m})$
2015	-0,41	0,24	-61,7	0,56	0,39	-0,90
2020	-0,62	0,35	-36,8	0,87	0,58	-1,30
2040	-1,13	0,61	-23,0	1,61	1,05	-2,33
2060	-1,58	0,86	-21,4	2,26	1,47	-3,26
2080	-2,06	1,10	-20,5	2,94	1,90	-4,22
2100	-2,36	1,25	-15,9	3,37	2,15	-4,77
2120	-2,55	1,33	-4,9	3,62	2,29	-5,09
2317	-2,57	1,34	-0,0	3,66	2,31	-5,13

6 Zusammenfassung

Im vorliegenden Gutachten werden Senkungen, Senkungsraten, Schieflagen, Verschiebungen, horizontale relative Längenänderungen und Krümmungen an der Geländeoberfläche der Kavernenanlage Etzel prognostiziert. Die von der BGR vorgelegte Senkungsprognose ist nur für die im Gutachten definierten Randbedingungen gültig. Die Ergebnisse der Prognose besitzen Mittelwertcharakter und stellen einen fundierten, realistischen Rahmen der zu erwartenden Bodenbewegungen und -verformungen dar. Die Prognose basiert auf der Annahme, dass sich die Senkungsmulde bruch- und versatzlos ausbildet. Untersuchungen zur Standsicherheit und Integrität der hangenden Steinsalz- und Deckgebirgsschichten sind nicht Gegenstand dieses Gutachtens.

Es werden insgesamt 99 Kavernen mit teilweise sich über die Zeit ändernder Nutzung berücksichtigt. Es wird davon ausgegangen, dass die Kavernen jeweils maximal 100 Jahre betrieben werden. Vor Beginn der Verwahrung existieren 61 Gas- und 32 Ölspeicherkavernen sowie sechs Solekavernen. Alle Kavernen werden jeweils zum Ende ihres Betriebes (nach maximal 100 Betriebsjahren) verwahrt, d. h. mit Sole gefüllt und druckdicht verschlossen. Der Betrachtungszeitraum für die Senkungsprognose endet 200 Jahre nach Verwahrung der letzten Kaverne im Jahr 2317.

Die Senkung der Oberfläche korreliert direkt mit dem Hohlraumverlust der Kavernen durch Konvergenz. Das Speichermedium bestimmt dabei in Verbindung mit der Betriebsweise wesentlich die Entwicklung des Konvergenzvolumens und damit auch die induzierten Senkungen. Für die Senkungsprognose wird eine bestimmte Betriebsweise der Kavernen und damit auch ein bestimmtes Konvergenzverhalten zugrunde gelegt. Die empirisch ermittelten Konvergenzraten für die Gas- und Ölspeicherkavernen des Südfeldes nähern bei Postulierung eines Volumenübertragungsfaktors von $a = 0,95$ das gemessene Muldenvolumen bis zum Jahr 2012 im Mittel sehr gut an, so dass diese Konvergenzraten als validiert gelten können.

Für die neuen ab 2013 betriebenen Gasspeicherkavernen des Nordfeldes werden gemäß eines für die STO-RAG ETZEL GmbH erstellten und der BGR als Datenbasis zur Verfügung gestellten Dritt-Gutachtens höhere Konvergenzraten angesetzt, da die Konvergenzraten für diesen Teil des Kavernenfeldes noch nicht empirisch abgesichert werden konnten. Da die Konvergenzraten der Gaskavernen des Nordfeldes zurzeit noch Gegenstand von Untersuchungen sind, wurden die hier zugrunde gelegten Konvergenzraten nochmals konservativer angesetzt. Diese Annahmen sowie die Ergebnisse dieser Senkungsprognose gelten vorbehaltlich neuer Erkenntnisse aus den laufenden Untersuchungen.

Unter Annahme dieser Randbedingungen kommt die vorliegende Senkungsprognose u. a. zu dem Ergebnis, dass im Jahr 2120 (kurz nach dem angenommenen Betriebsende im Jahr 2117) im Zentrum der Senkungsmulde maximale Senkungen von 2,55 m zu erwarten sind. Das Senkungsmaximum liegt nördlich der Bundesstraße B436 zwischen Etzel und Horsten (Südwendung). Die Senkungen klingen bis

zu den Ortsrandlagen Etzel und Horsten im Mittel auf ungefähr $2/3$ der Maximalwerte ab. Die prognostizierten maximalen Schieflagen im Flankenbereich der Senkungsmulde betragen zu diesem Zeitpunkt $1,33 \text{ mm/m}$. Zum Ende des Prognosezeitraums im Jahr 2317 beträgt die berechnete maximale Senkung $2,57 \text{ m}$ und die maximale Schieflage $1,34 \text{ mm/m}$.

Für die Horizontalverschiebungen existieren keine aktuellen und quantitativ belastbaren Messdaten, so dass derzeit keine Validierungsmöglichkeit besteht. Die BGR hat nach Abstimmung mit der STORAG ETZEL GmbH eine erste Abschätzung der Verschiebungen sowie die daraus abgeleiteten Zerrungen und Pressungen an der Geländeoberfläche vorgenommen. Die prognostizierten Horizontalverschiebungen und die daraus abgeleiteten Zerrungen und Pressungen sind als vorläufig zu betrachten. Für die Horizontalverschiebungen werden für das Jahr 2120 (kurz nach dem angenommenen Betriebsende im Jahr 2117) maximale Werte von ca. $3,62 \text{ m}$ im Flankenbereich der Senkungsmulde berechnet. Daraus ergeben sich maximale Pressungen von ca. $5,09 \text{ mm/m}$ im zentralen Bereich sowie Maximalwerte der Zerrungen von ca. $2,29 \text{ mm/m}$ im Flankenbereich der Senkungsmulde. Zum Ende des Prognosezeitraums im Jahr 2317 beträgt die berechnete maximale Horizontalverschiebung $3,66 \text{ m}$, die maximale Pressung $5,13 \text{ mm/m}$ und die maximale Zerrung $2,31 \text{ mm/m}$.

Um die Prognose der zukünftigen Senkungsentwicklung abzusichern, sollten die vorgelegten Senkungsprognoseergebnisse in ca. fünf Jahren anhand von Nivellementmessungen überprüft werden. Werden größere Abweichungen zwischen den Ergebnissen der Nivellementmessungen und den prognostizierten Werten festgestellt, ist eine Aktualisierung der Senkungsprognose anzustreben. Dazu sind die hier getroffenen Annahmen mit dem tatsächlichen Kavernenbetrieb abzugleichen.

Literaturverzeichnis

- BRONSTEIN, I.N.; SEMENDJAJEW, K.A.; MUSIOL, G. & MÄHLIG, H. (1997): *Taschenbuch der Mathematik*. Thun (Harri Deutsch), Frankfurt am Main, 3. Aufl.
- EICKEMEIER, R. (2005): Senkungsprognosen über Kavernenfeldern - Ein neues Modell -. In: 34. *Geomechanik-Kolloquium Leipzig*.
- VAN EIJS, R.; PÖTTGENS, J.; BREUNSE, J. & DUQUESNOY, A. (2000): High convergence rates during deep salt solution mining in the northern part of The Netherlands. In: *8th World Salt Symposium*, S. 237–242, Elsevier, Amsterdam.
- LINDERT, A. (2012a): *Stand der Kavernenverwahrung - internationale und eigene Untersuchungen*. Techn. Ber. Bestell-Nr. 23134, Auftrag DEEP. Underground Engineering, Bad Zwischenahn.
- LINDERT, A. (2012b): *Stand der Kavernenverwahrung - internationale und eigene Untersuchungen*. Techn. Ber. Nr. 32/636/45301525, Auftrag WINGAS GmbH & Co. KG.
- QUASNITZA, H. (1988): *Eine Strategie zur Kalibrierung markscheiderischer Bewegungsmodelle und zur Prädiktion von Bewegungselementen*. Dissertation, Fakultät für Bergbau, Hüttenwesen und Maschinenwesen der Technischen Universität Clausthal.
- TEC PLOT (2013): *Tecplot 360 2013 User's Manual*. Tecplot, Inc., Bellevue, WA.

Abbildungsverzeichnis

1.1	Übertagebetriebsanlagen des Kavernenspeichers Etzel (Quelle: STORAG ETZEL GmbH).	5
2.1	Kavernengeometrie für eine Geländeoberkante bei $z_{GOK} = 0$.	9
2.2	Zeitliche Entwicklung spezifischer Volumina einer fiktiven Kaverne.	12
2.3	Kavernenfeld Etzel im Jahr 2015 mit Teufenlinien der Salzstockkontur von -2 000 bis -700 m (unmaßstäblich).	13
3.1	Entwicklung des Kavernenvolumens einer Ölkaverne des Südfeldes (Ölspeicherbetrieb ab 1978).	19
3.2	Entwicklung des Kavernenvolumens einer in UK1 von Öl auf Gas umgerüsteten Kaverne des Südfeldes (Gasspeicherbetrieb ab 1994).	19
3.3	Entwicklung des Kavernenvolumens einer in UK2 von Öl auf Gas umgerüsteten Kaverne des Südfeldes (Gasspeicherbetrieb ab 2009).	20
3.4	Entwicklung des Kavernenvolumens einer Gaskaverne des Nordfeldes (Gasspeicherbetrieb ab 2011).	20
3.5	Vergleich des gemessenen und berechneten Muldenvolumens.	21
4.1	Auswertbare Nivellementpunkte am 01.08.2015 (unmaßstäblich).	22
4.2	Zeitlicher Verlauf der Modellparameter (Regressionsergebnisse und Modellansatz).	23
4.3	Zeitliche Entwicklung des im Modell angesetzten räumlichen Versatzes der Senkungsmulde an der Geländeoberfläche.	24
4.4	Ausgewählte Nivellementpunkte (unmaßstäblich).	25
4.5	Vergleich der gemessenen und berechneten Senkungen im MP 220.	26
4.6	Vergleich der gemessenen und berechneten Senkungen im MP 69.	26
4.7	Vergleich der gemessenen und berechneten Senkungen im MP 142.	27
4.8	Vergleich der gemessenen und berechneten Senkungen im MP 790200.	27
4.9	Vergleich der gemessenen und berechneten Senkungen im MP 22.	28
4.10	Vergleich der gemessenen und berechneten Senkungen im MP 29.	28
4.11	Vergleich der gemessenen und berechneten Senkungen im MP 151.	29
4.12	Vergleich der gemessenen und berechneten Senkungen im MP 60.	29
4.13	Vergleich der gemessenen und berechneten Senkungen im MP 202.	30
4.14	Vergleich der gemessenen und berechneten Senkungen im MP 103.	30
5.1	Lage der Schnitte mit Geländemarken (nicht maßstabsgetreu).	32
5.2	Senkungen im Schnitt 1-1 von 2010 bis 2317 (ca. 3000-fach überhöht).	33

5.3	Senkungen im Schnitt A-A von 2010 bis 2317 (ca. 3000-fach überhöht).	33
5.4	Senkungen im Schnitt B-B von 2010 bis 2317 (ca. 3000-fach überhöht).	34
A.1	Vergleich der gemessenen und berechneten Isokatabasen (2011).	43
A.2	Vergleich der gemessenen und berechneten Isokatabasen (2012).	44
A.3	Vergleich der gemessenen und berechneten Isokatabasen (2013).	45
A.4	Vergleich der gemessenen und berechneten Isokatabasen (2014).	46
A.5	Vergleich der gemessenen und berechneten Isokatabasen (2015).	47
B.1	Isokatabasen (2015).	49
B.2	Isokatabasen (2020).	50
B.3	Isokatabasen (2040).	51
B.4	Isokatabasen (2060).	52
B.5	Isokatabasen (2080).	53
B.6	Isokatabasen (2100).	54
B.7	Isokatabasen (2120).	55
B.8	Isokatabasen (2317).	56
B.9	Isolinien der Schieflagen (2015).	57
B.10	Isolinien der Schieflagen (2060).	58
B.11	Isolinien der Schieflagen (2120).	59
B.12	Isolinien der Schieflagen (2317).	60
B.13	Tensordarstellung der Hauptkrümmungen (2317).	61
B.14	Isolinien der Hauptverschiebungen (2015).	62
B.15	Isolinien der Hauptverschiebungen (2060).	63
B.16	Isolinien der Hauptverschiebungen (2120).	64
B.17	Isolinien der Hauptverschiebungen (2317).	65
B.18	Isolinien des 1. Hauptwertes der horizontalen relativen Längenänderung (2015).	66
B.19	Isolinien des 1. Hauptwertes der horizontalen relativen Längenänderung (2060).	67
B.20	Isolinien des 1. Hauptwertes der horizontalen relativen Längenänderung (2120).	68
B.21	Isolinien des 1. Hauptwertes der horizontalen relativen Längenänderung (2317).	69
B.22	Isolinien des 2. Hauptwertes der horizontalen relativen Längenänderung (2015).	70
B.23	Isolinien des 2. Hauptwertes der horizontalen relativen Längenänderung (2060).	71
B.24	Isolinien des 2. Hauptwertes der horizontalen relativen Längenänderung (2120).	72
B.25	Isolinien des 2. Hauptwertes der horizontalen relativen Längenänderung (2317).	73
B.26	Tensordarstellung der horizontalen relativen Längenänderungen (2015).	74
B.27	Tensordarstellung der horizontalen relativen Längenänderungen (2060).	75
B.28	Tensordarstellung der horizontalen relativen Längenänderungen (2120).	76
B.29	Tensordarstellung der horizontalen relativen Längenänderungen (2317).	77

Tabellenverzeichnis

3.1	Angenommene Konvergenzraten für die verschiedenen Nutzungsarten.	17
3.2	Konvergenzraten in der Nachbetriebsphase (LINDERT, 2012b).	17
4.1	Kennwerte der Regressionsgüte für die Modellkalibrierung 1981 – 2015.	24
5.1	Maximalwerte der berechneten Bodenbewegungen und Bodenverformungen.	36

A Anhang Modellkalibrierung

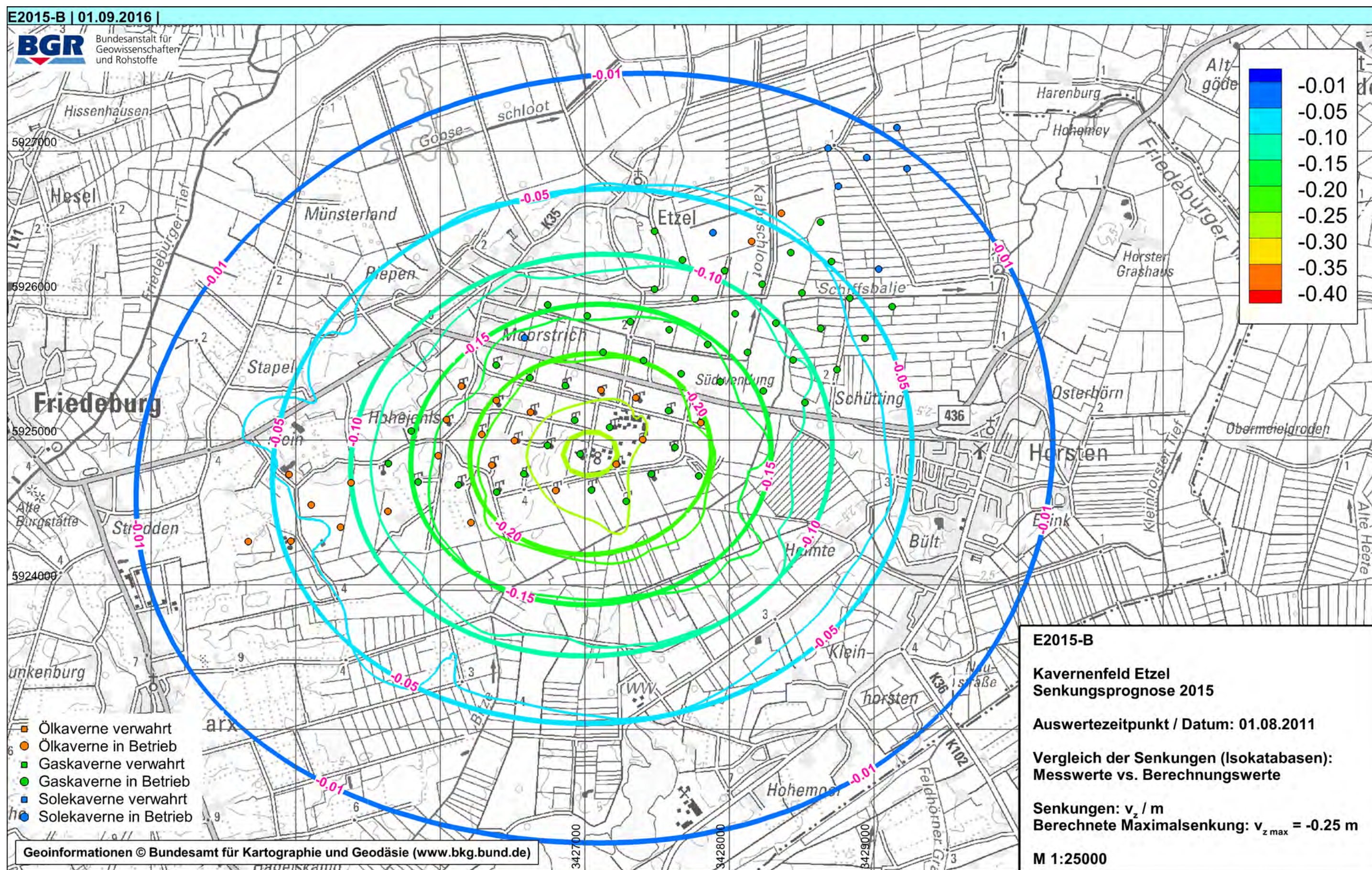


Abbildung A.1: Vergleich der gemessenen und berechneten Isokatabasen (2011).

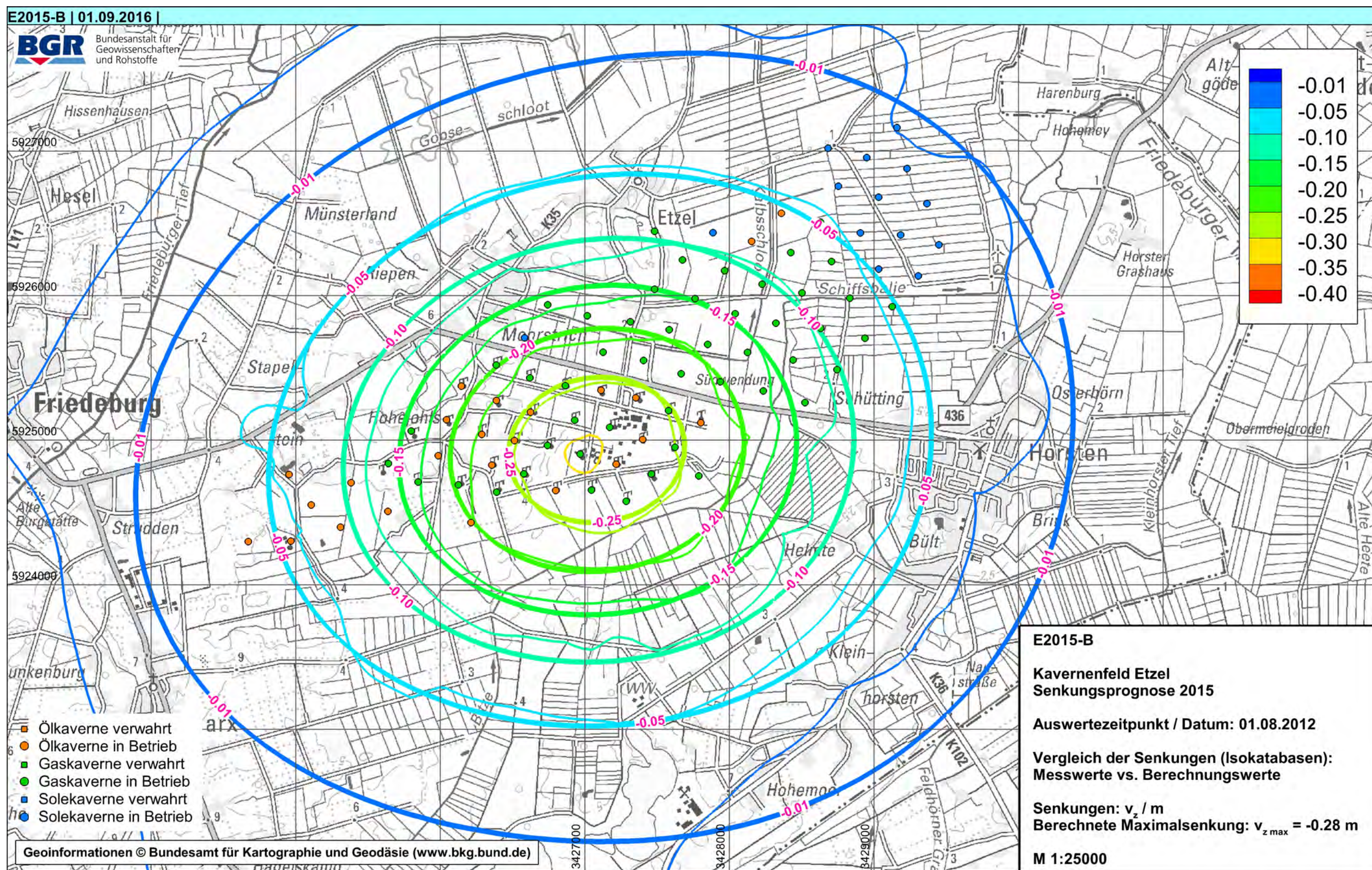


Abbildung A.2: Vergleich der gemessenen und berechneten Isokatabasen (2012).

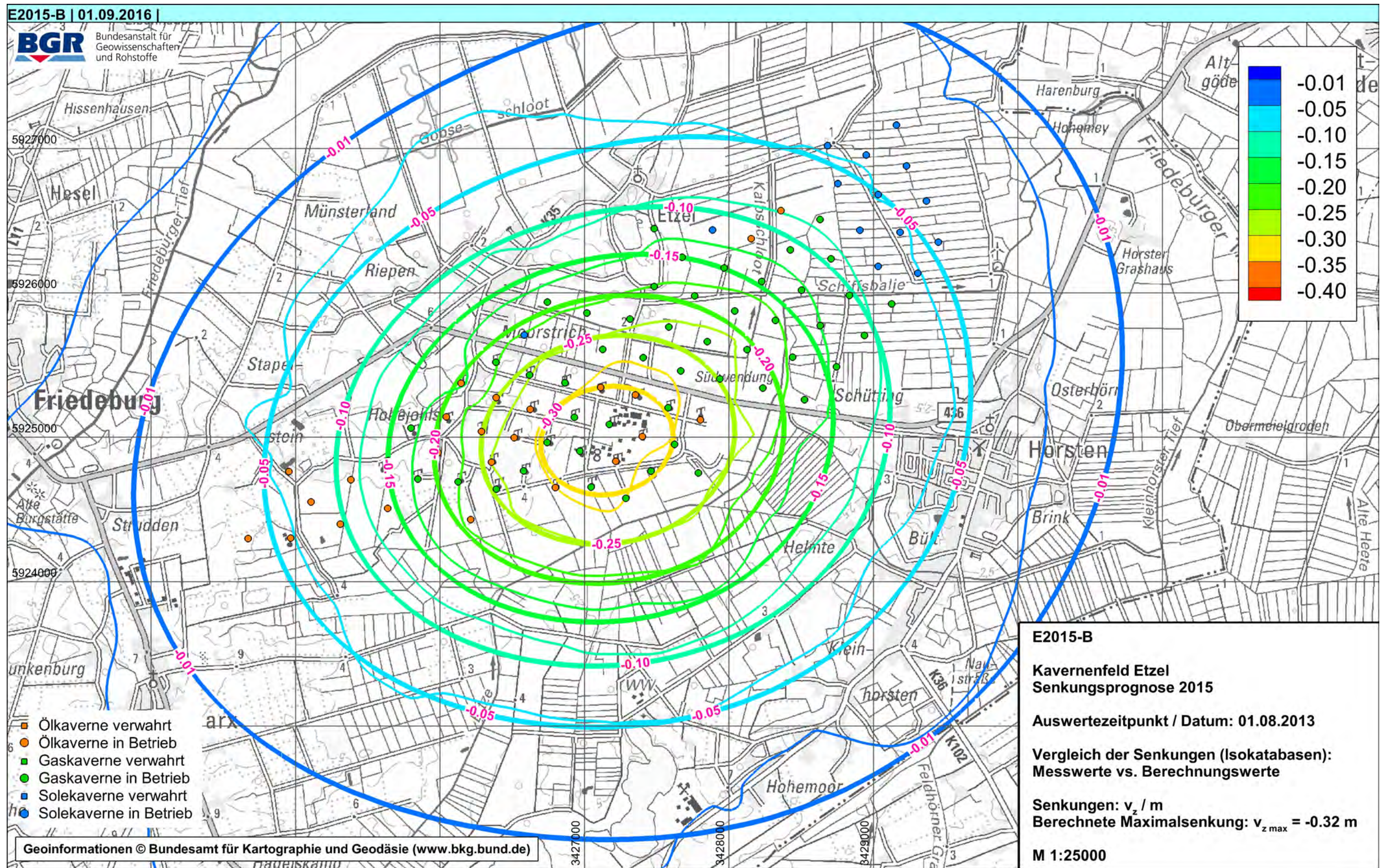


Abbildung A.3: Vergleich der gemessenen und berechneten Isokatabasen (2013).

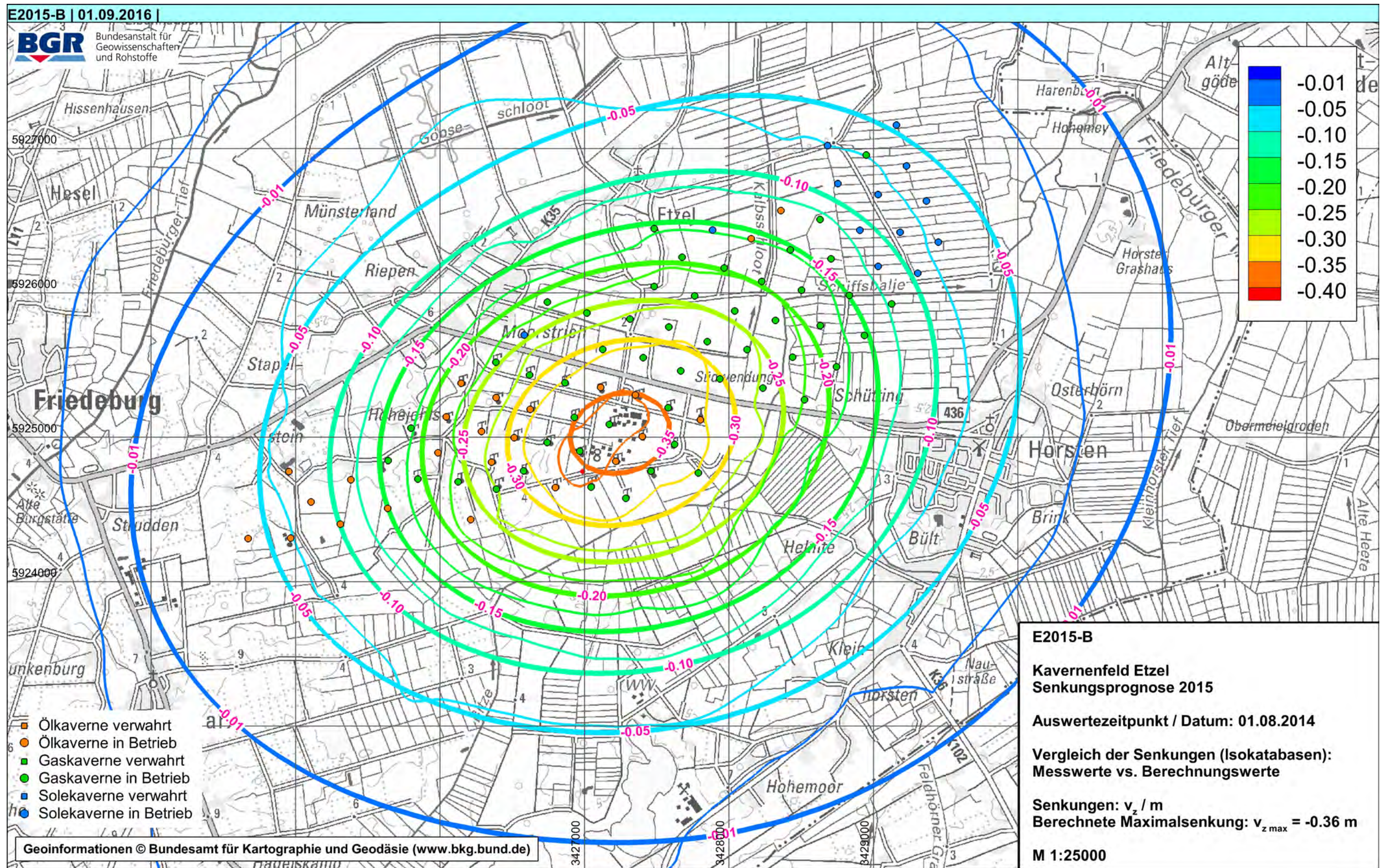


Abbildung A.4: Vergleich der gemessenen und berechneten Isokatabasen (2014).

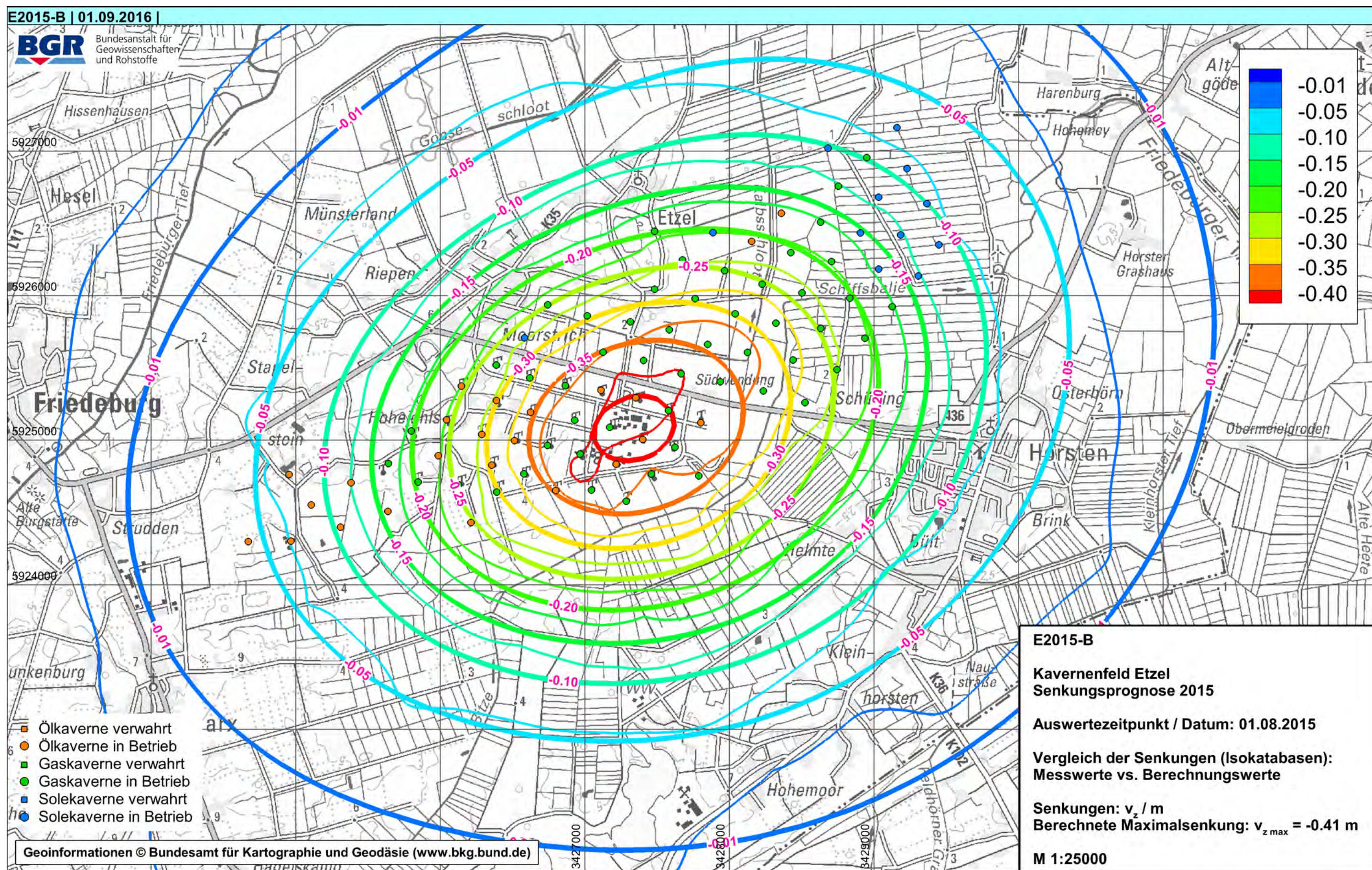


Abbildung A.5: Vergleich der gemessenen und berechneten Isokatabasen (2015).

B Anhang Ergebnisse

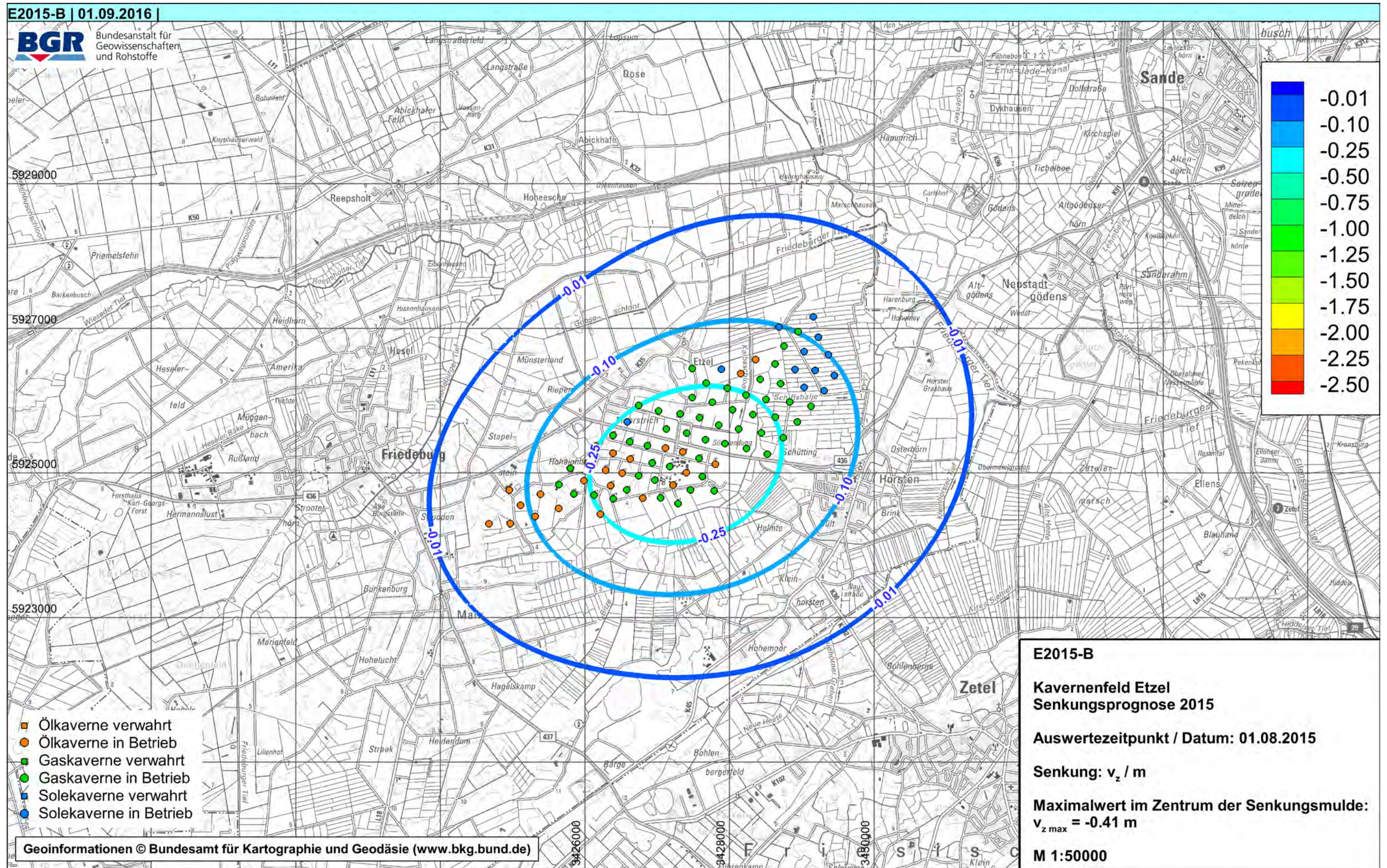


Abbildung B.1: Isokatabasen (2015).

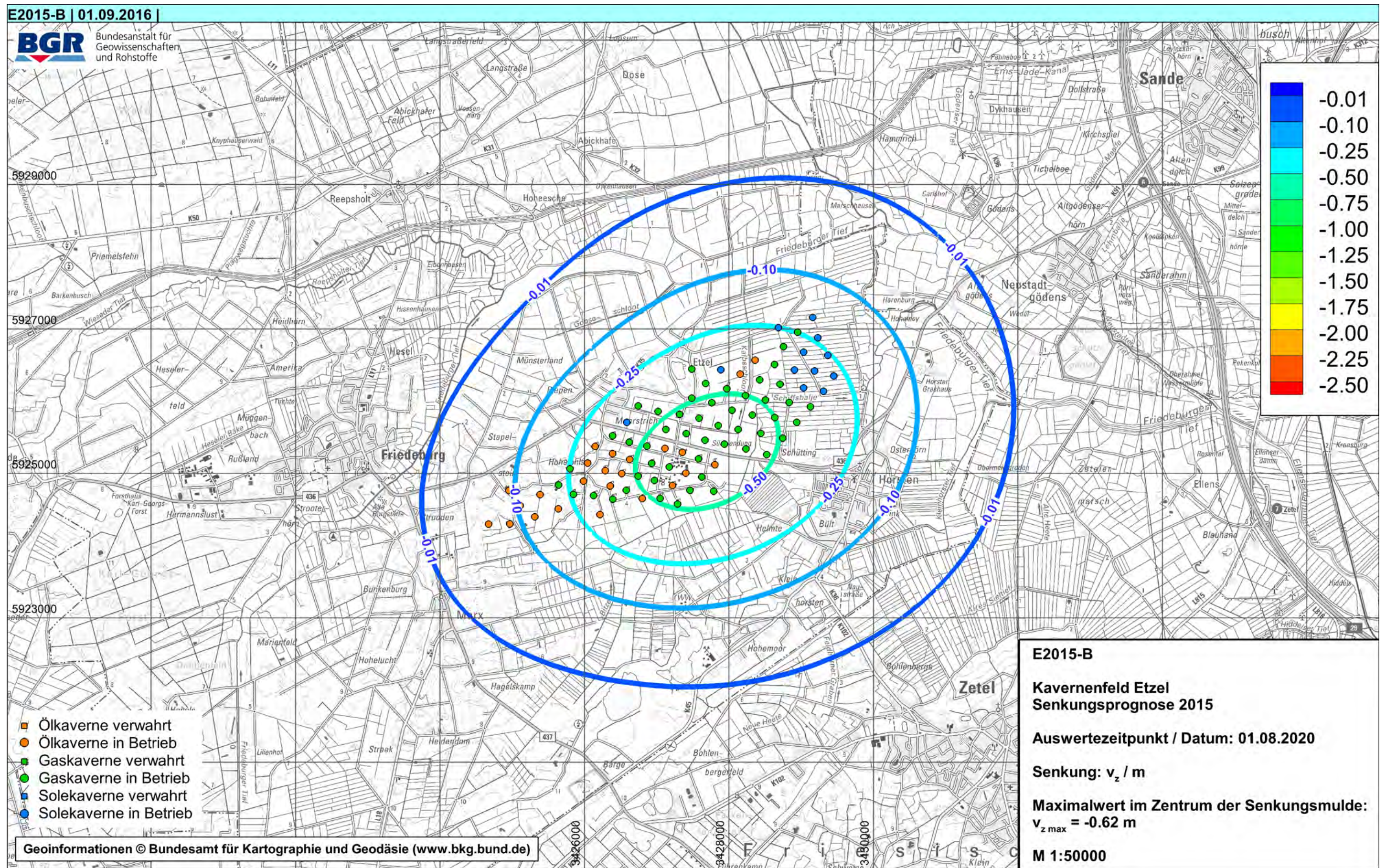


Abbildung B.2: Isokatabasen (2020).

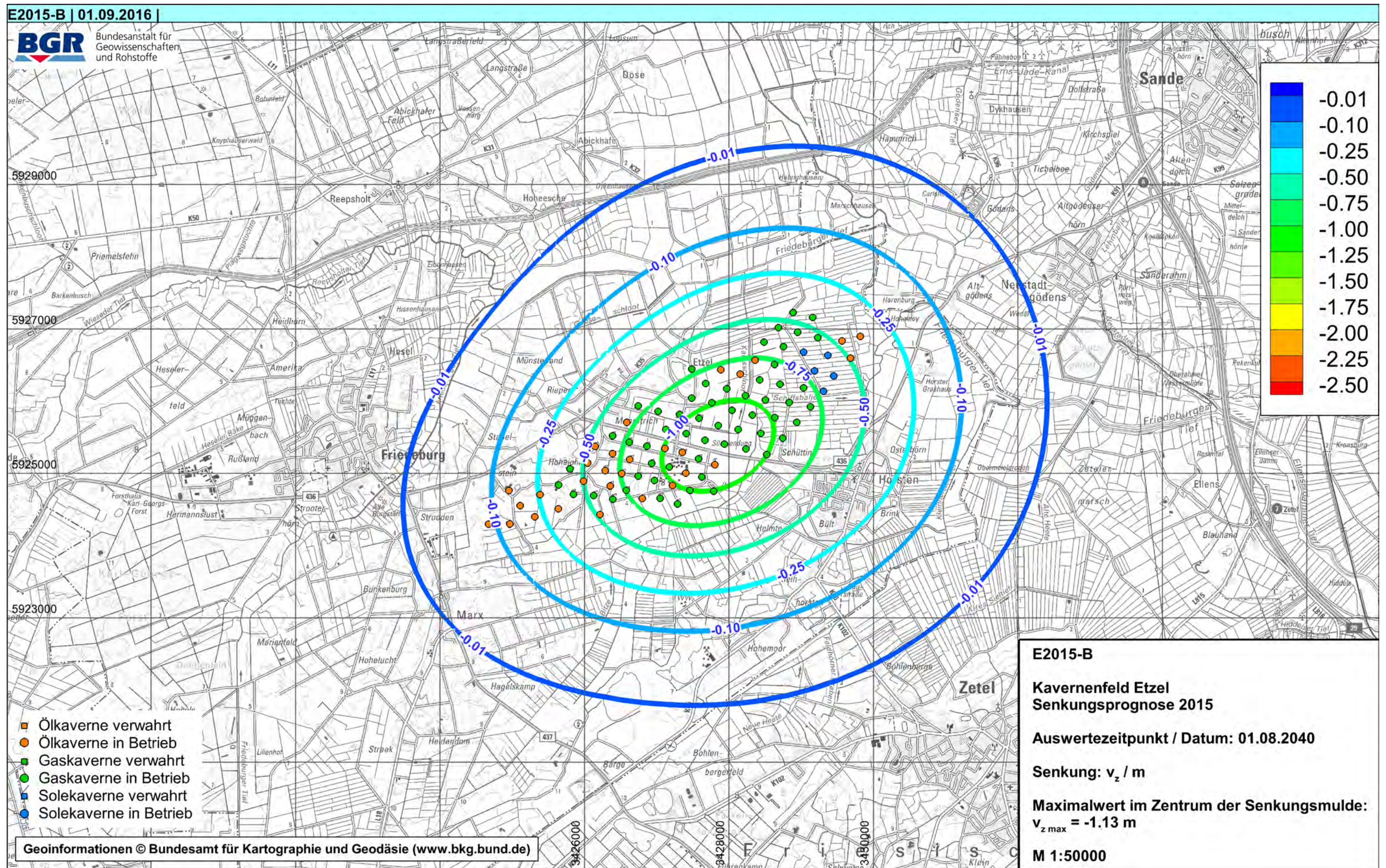


Abbildung B.3: Isokatabasen (2040).

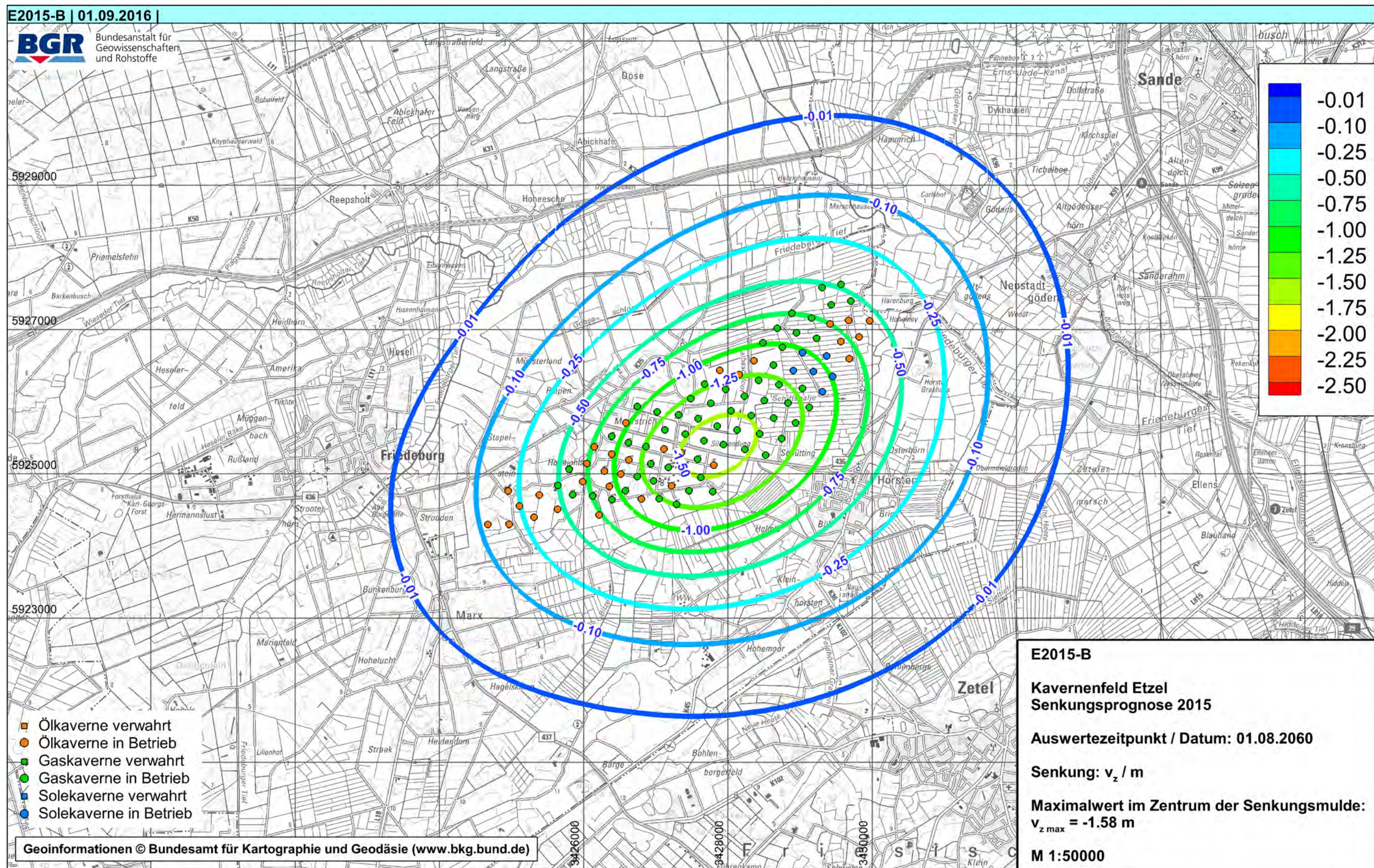


Abbildung B.4: Isokatabasen (2060).

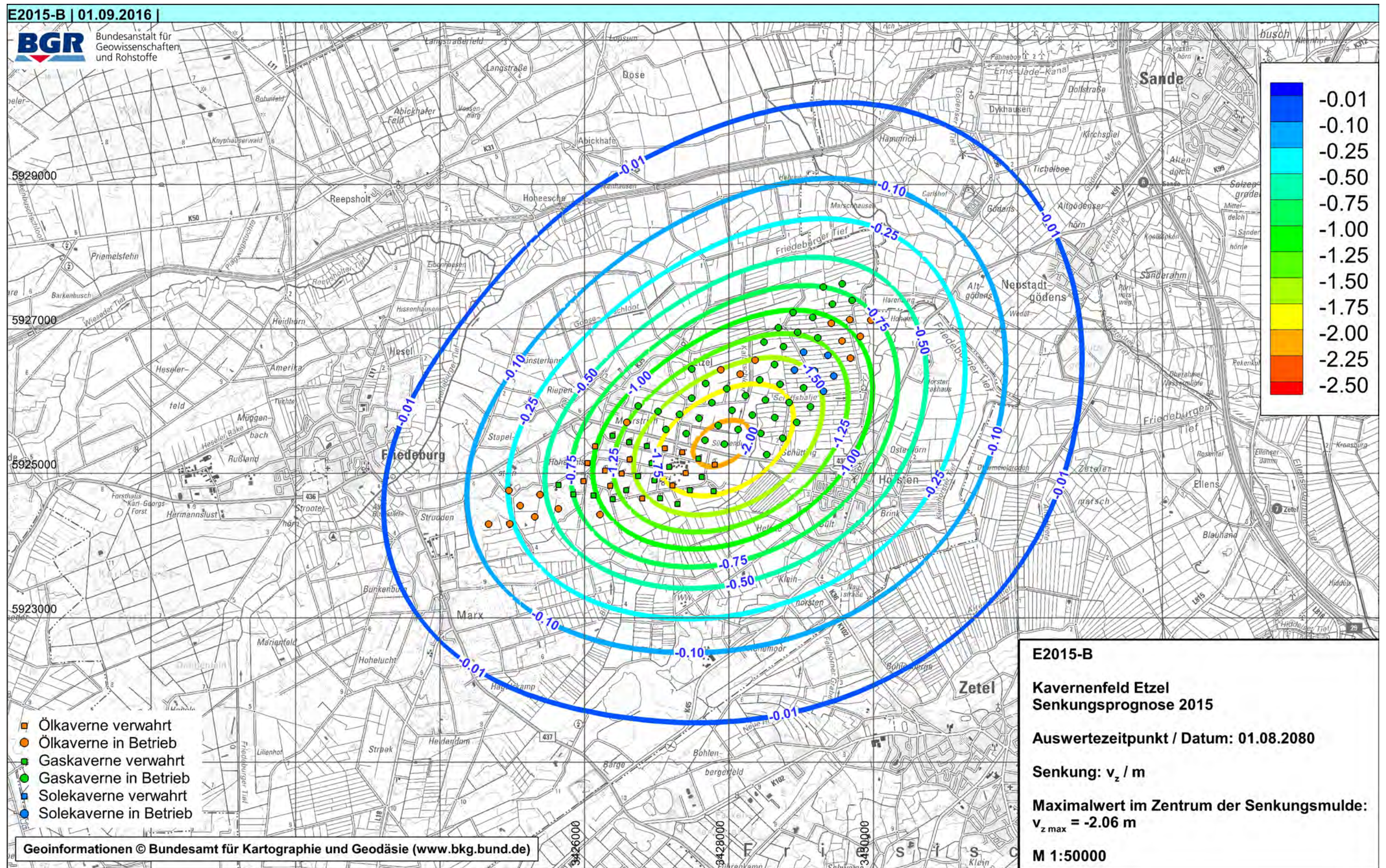


Abbildung B.5: Isokatabasen (2080).

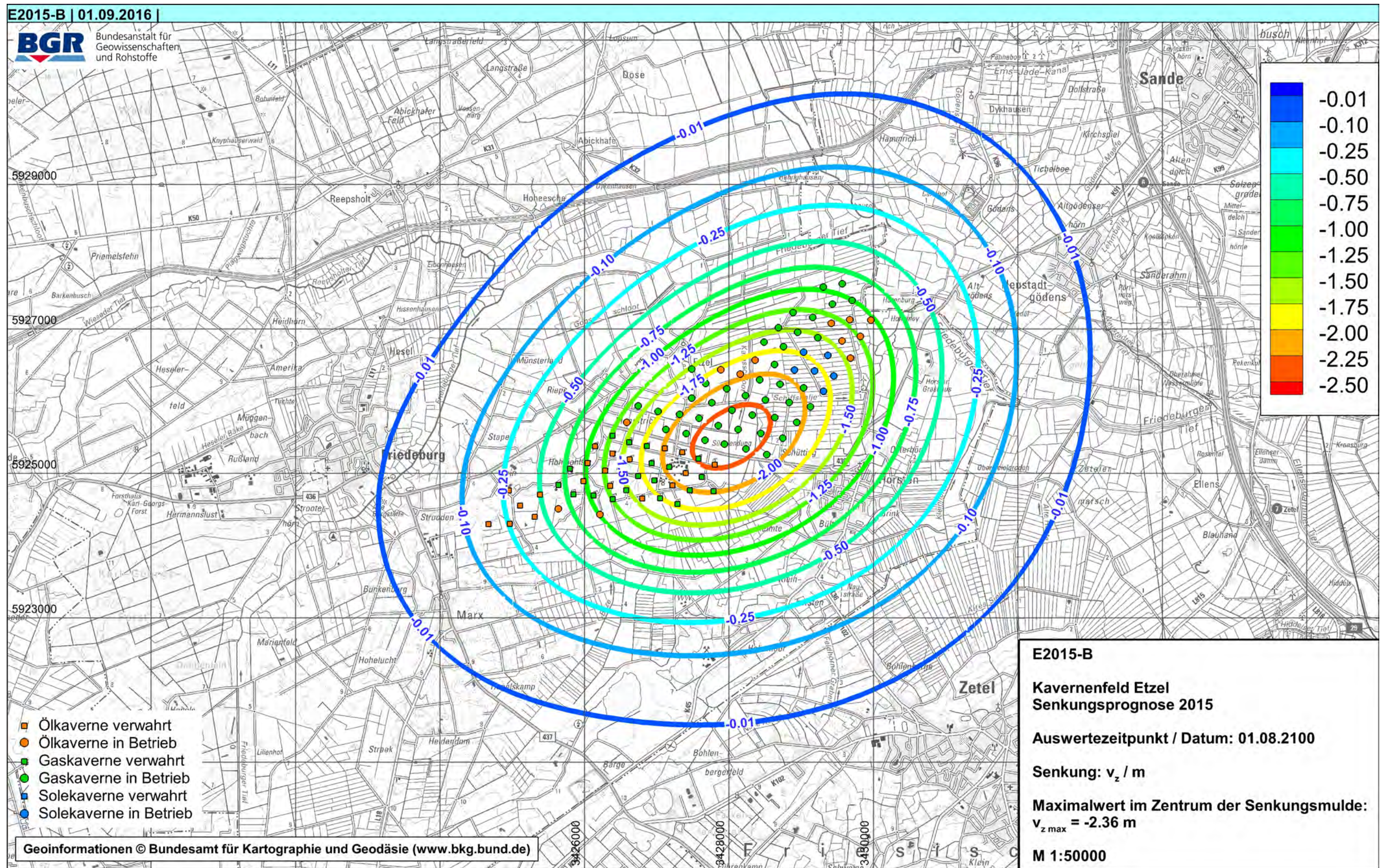


Abbildung B.6: Isokatabasen (2100).

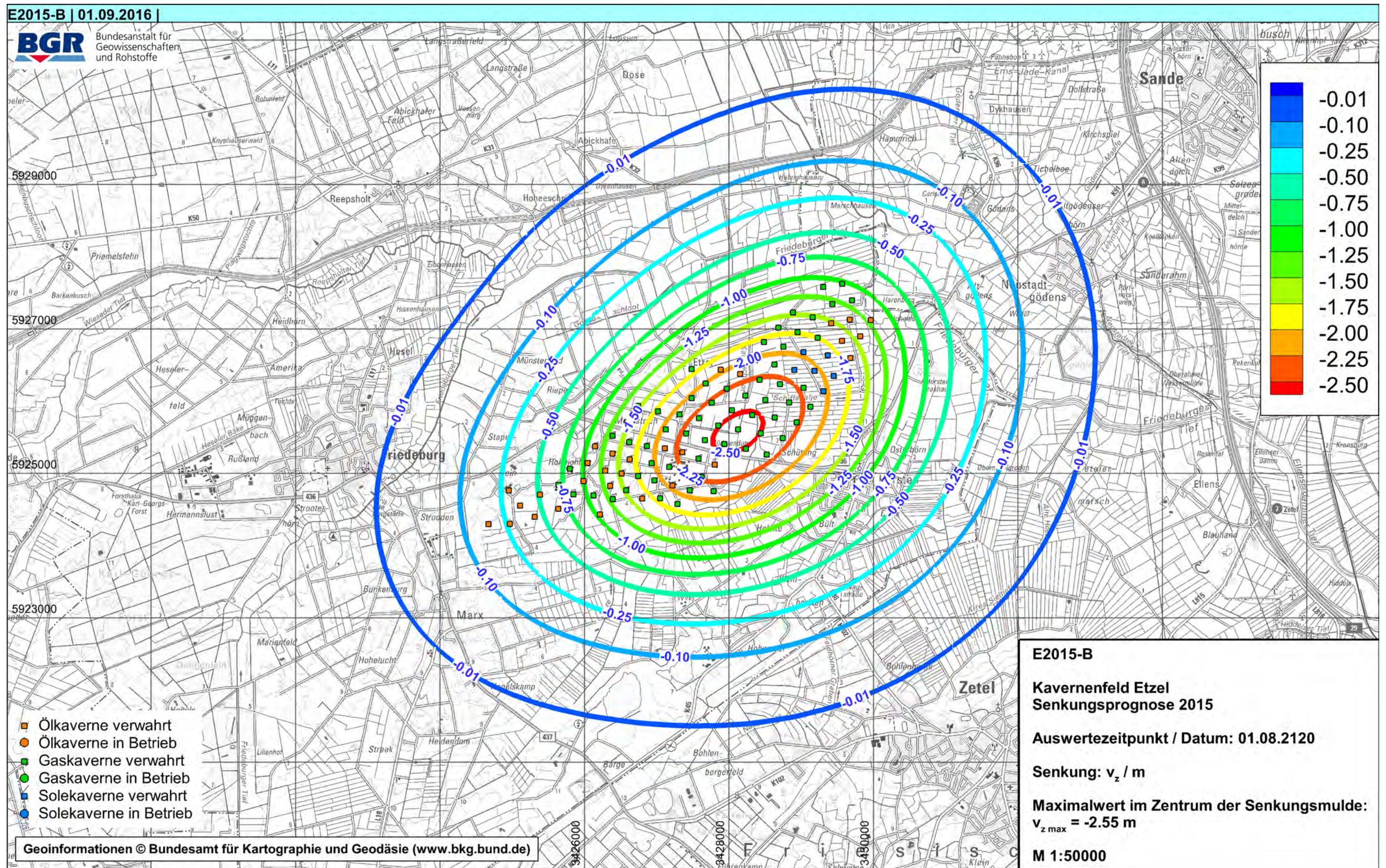


Abbildung B.7: Isokatabasen (2120).

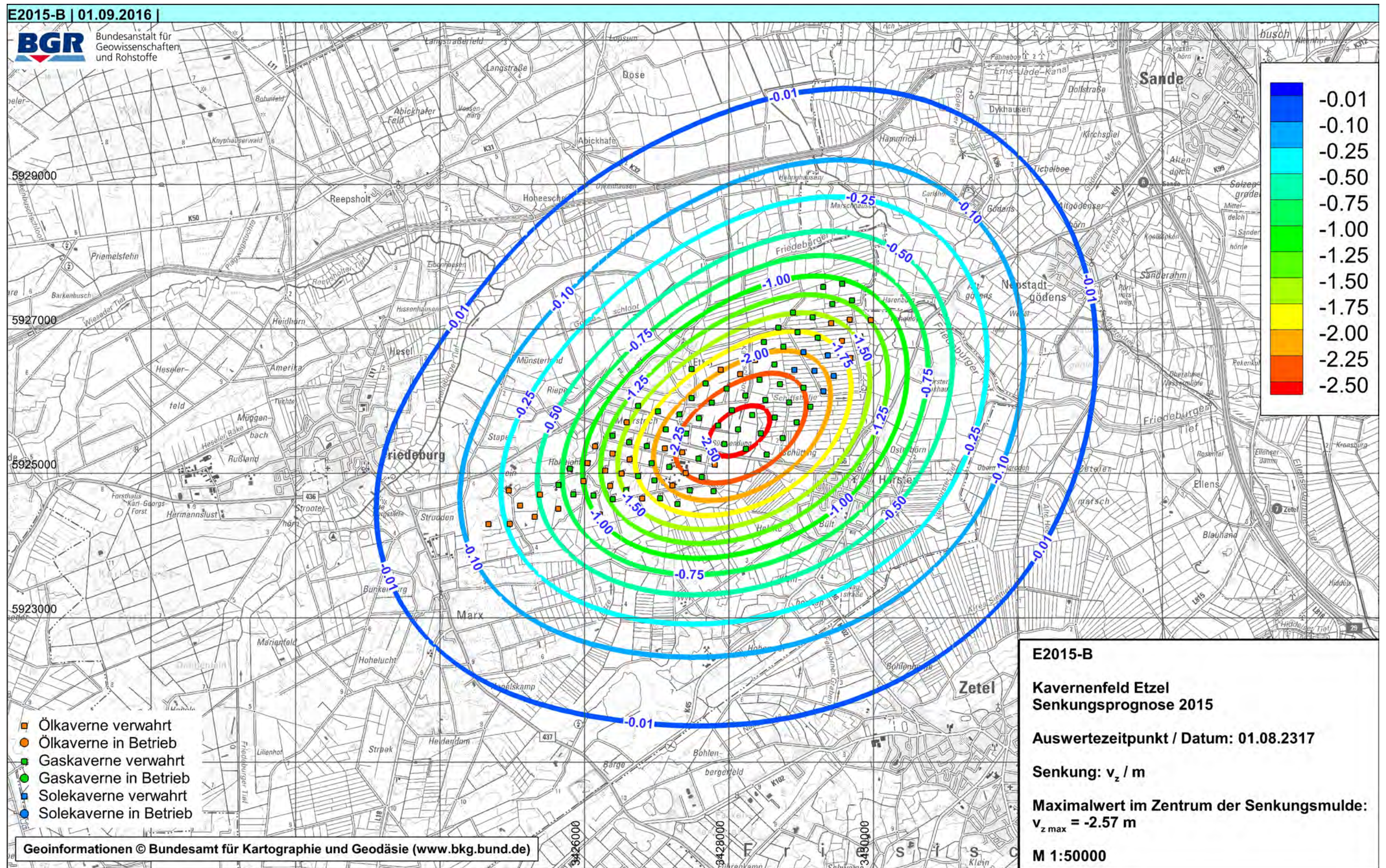


Abbildung B.8: Isokatabasen (2317).

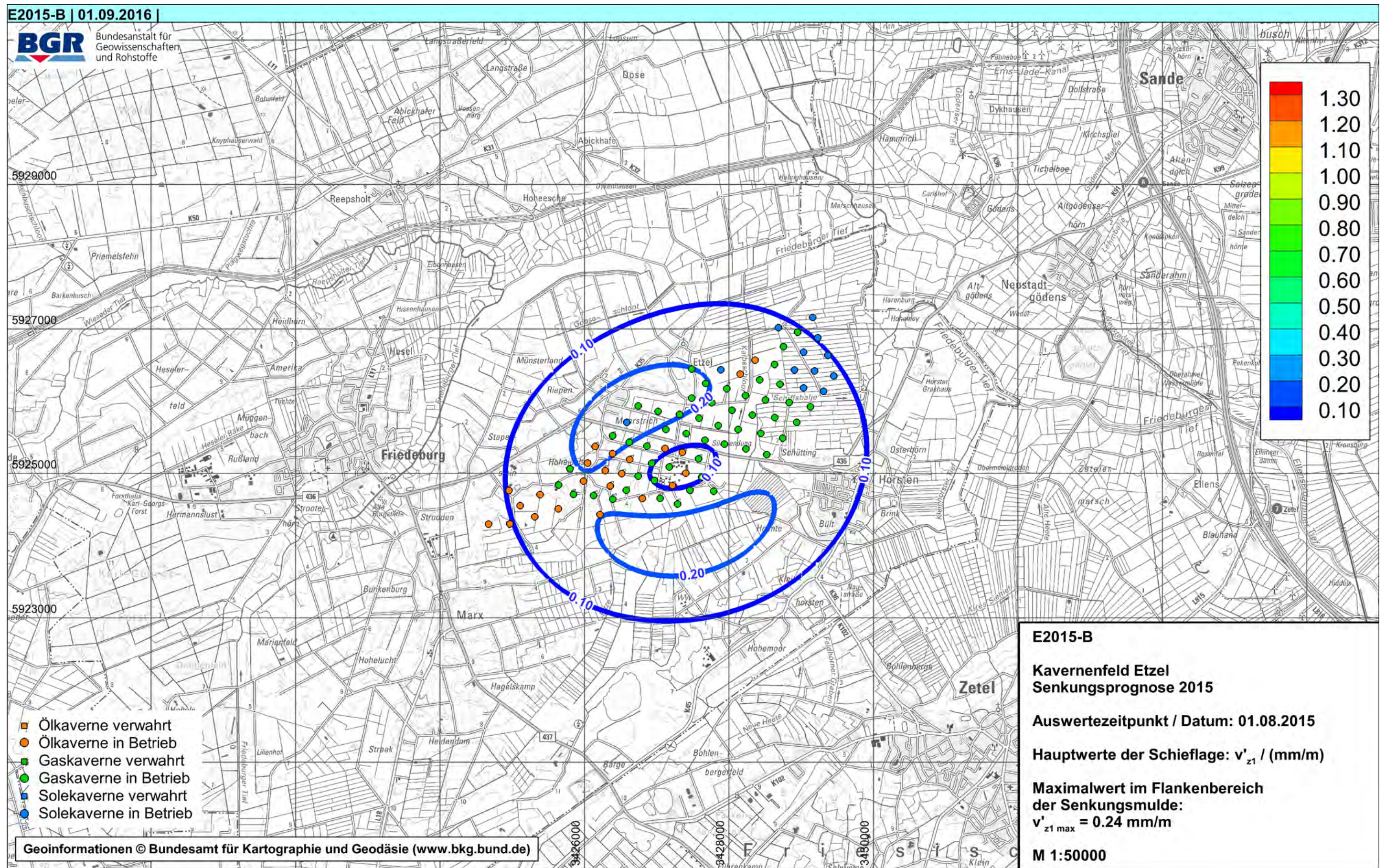


Abbildung B.9: Isolinen der Schieflagen (2015).

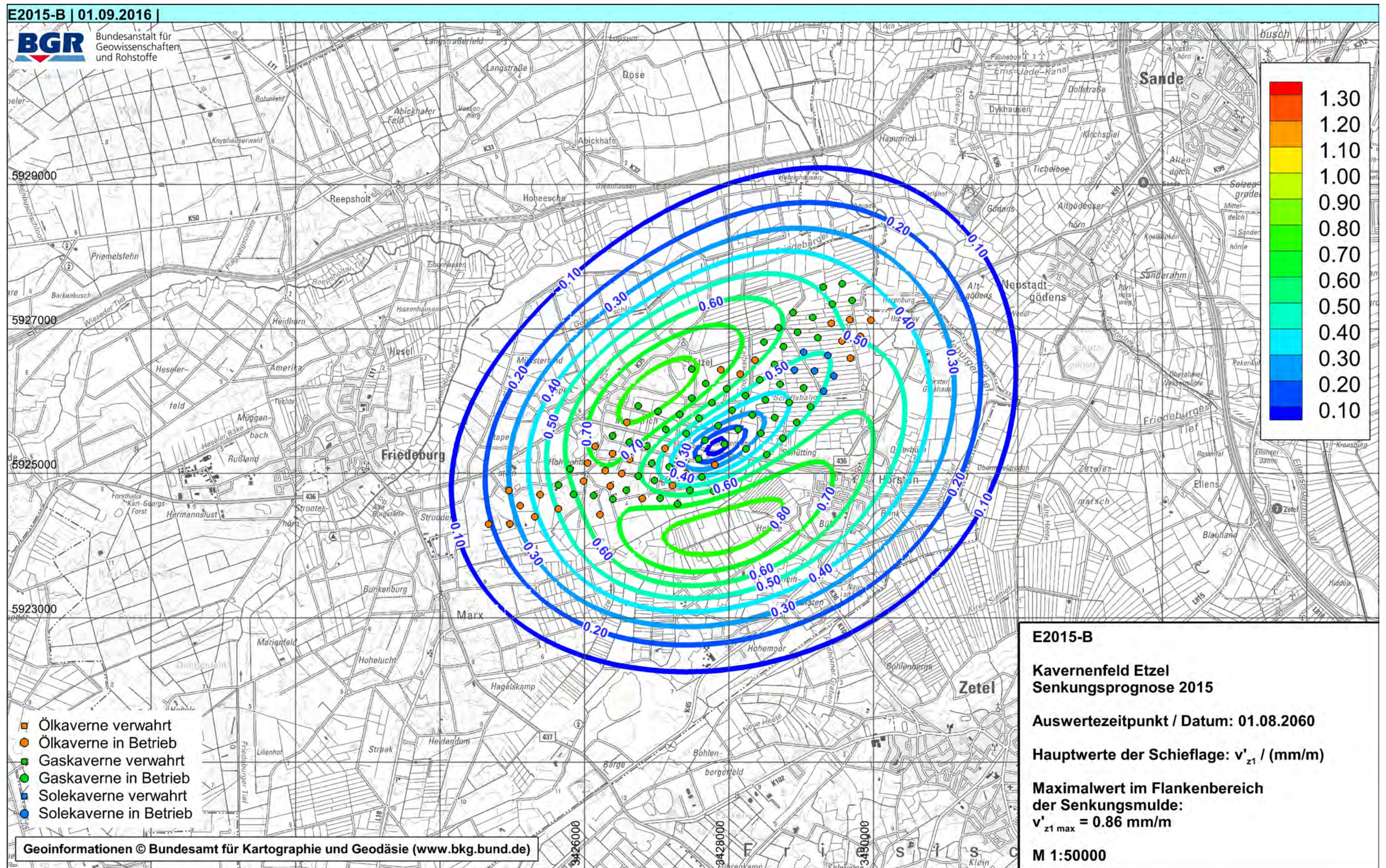


Abbildung B.10: Isolinien der Schieflagen (2060).

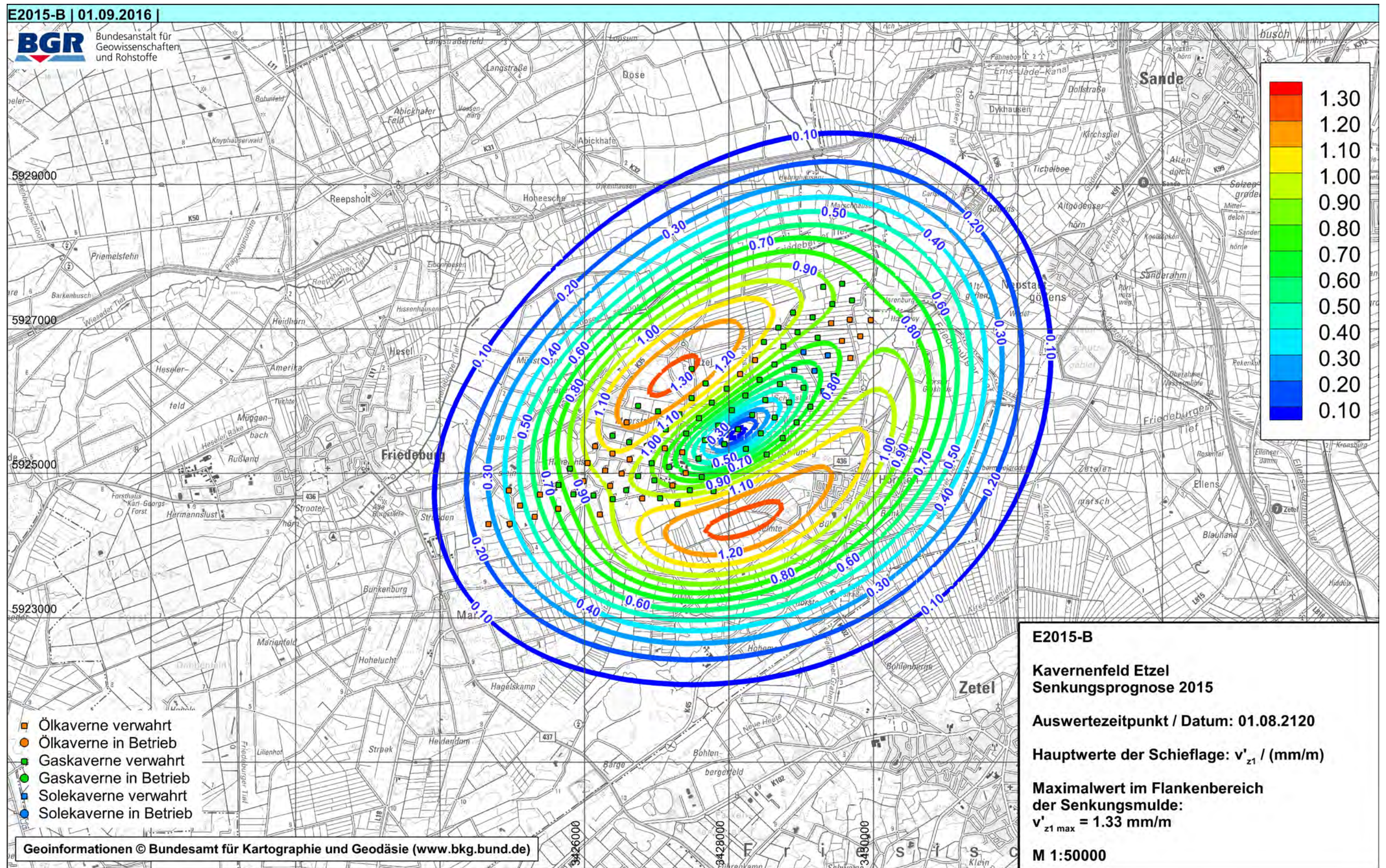


Abbildung B.11: Isolinien der Schieflagen (2120).

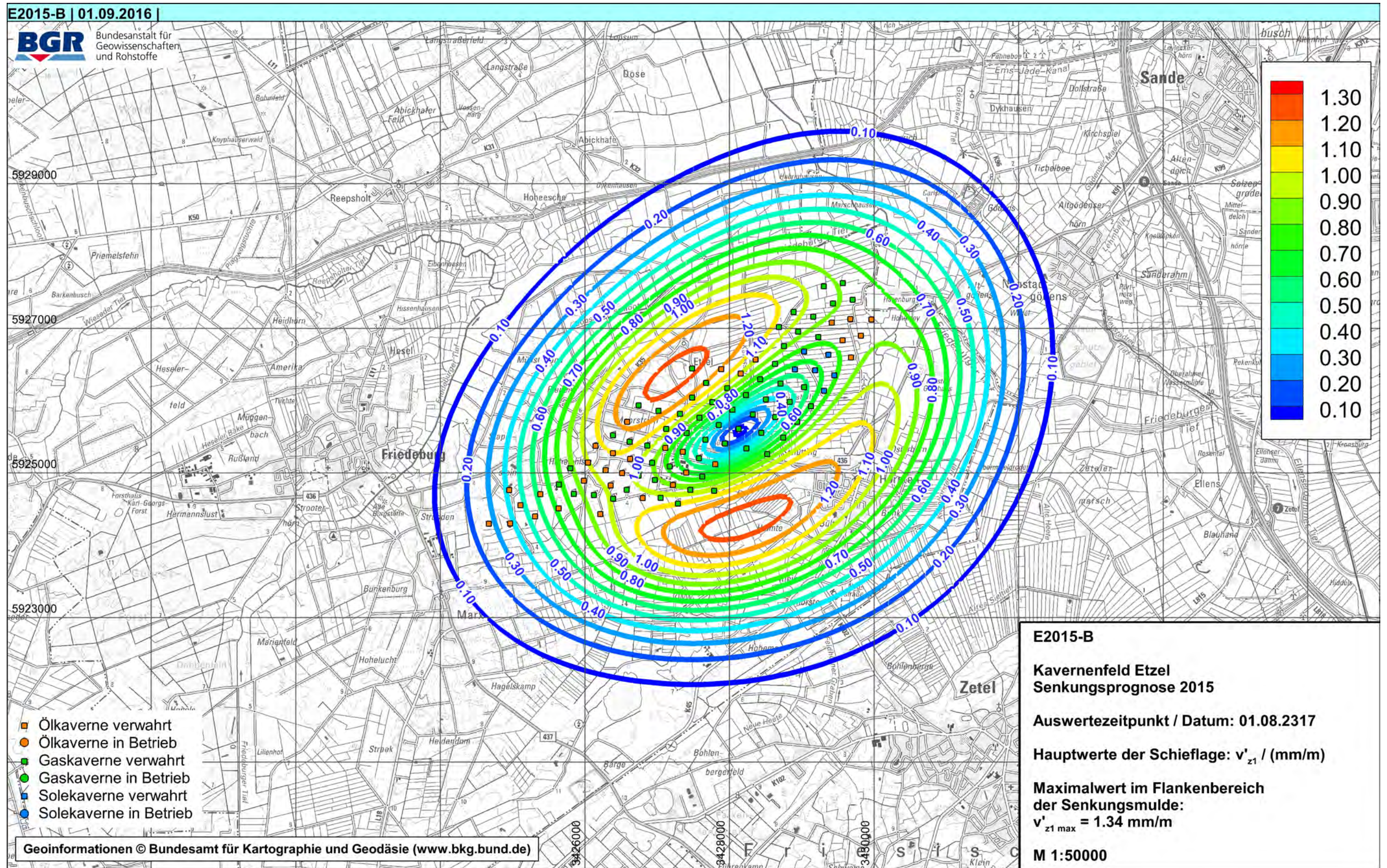


Abbildung B.12: Isolinien der Schieflagen (2317).

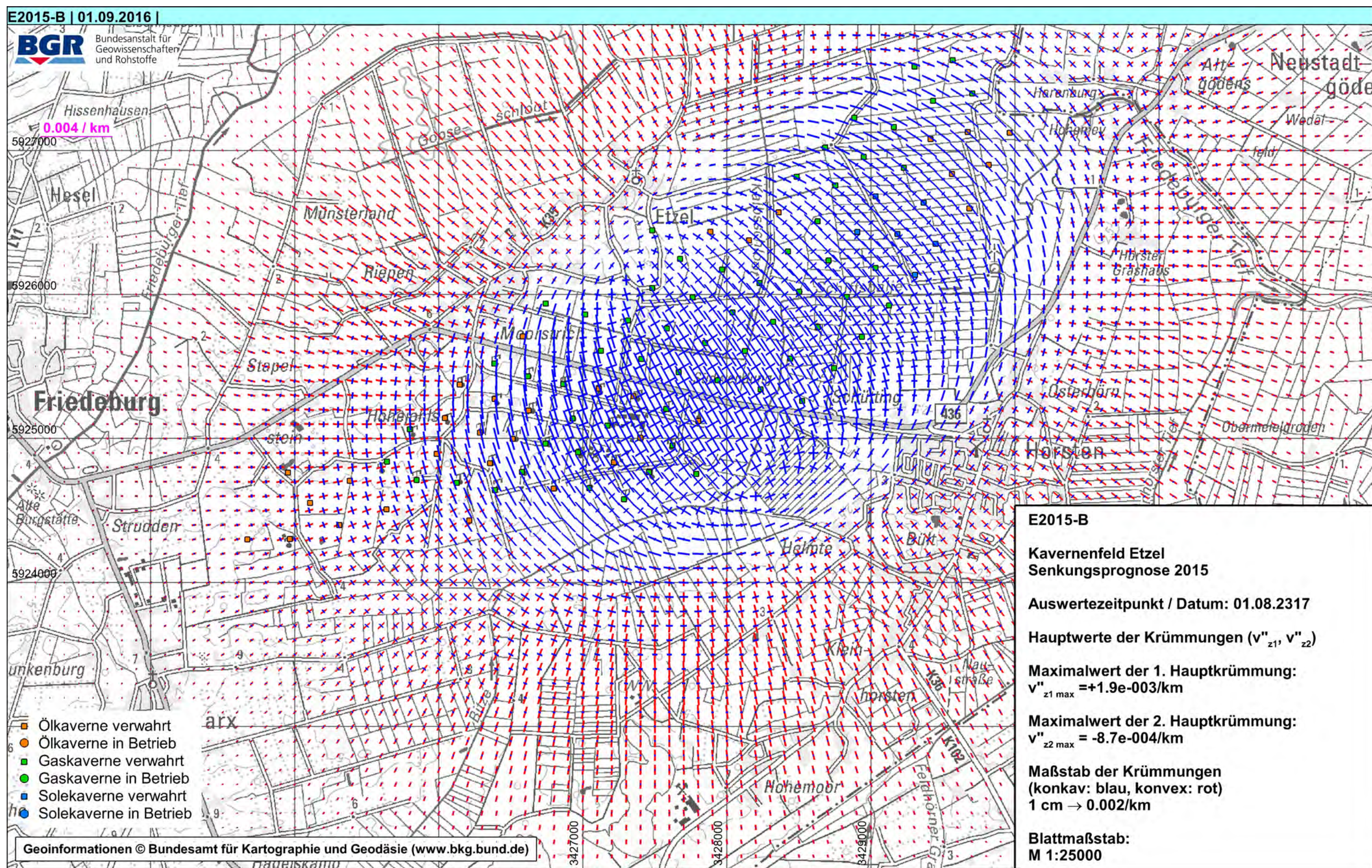


Abbildung B.13: Tensor Darstellung der Hauptkrümmungen (2317).

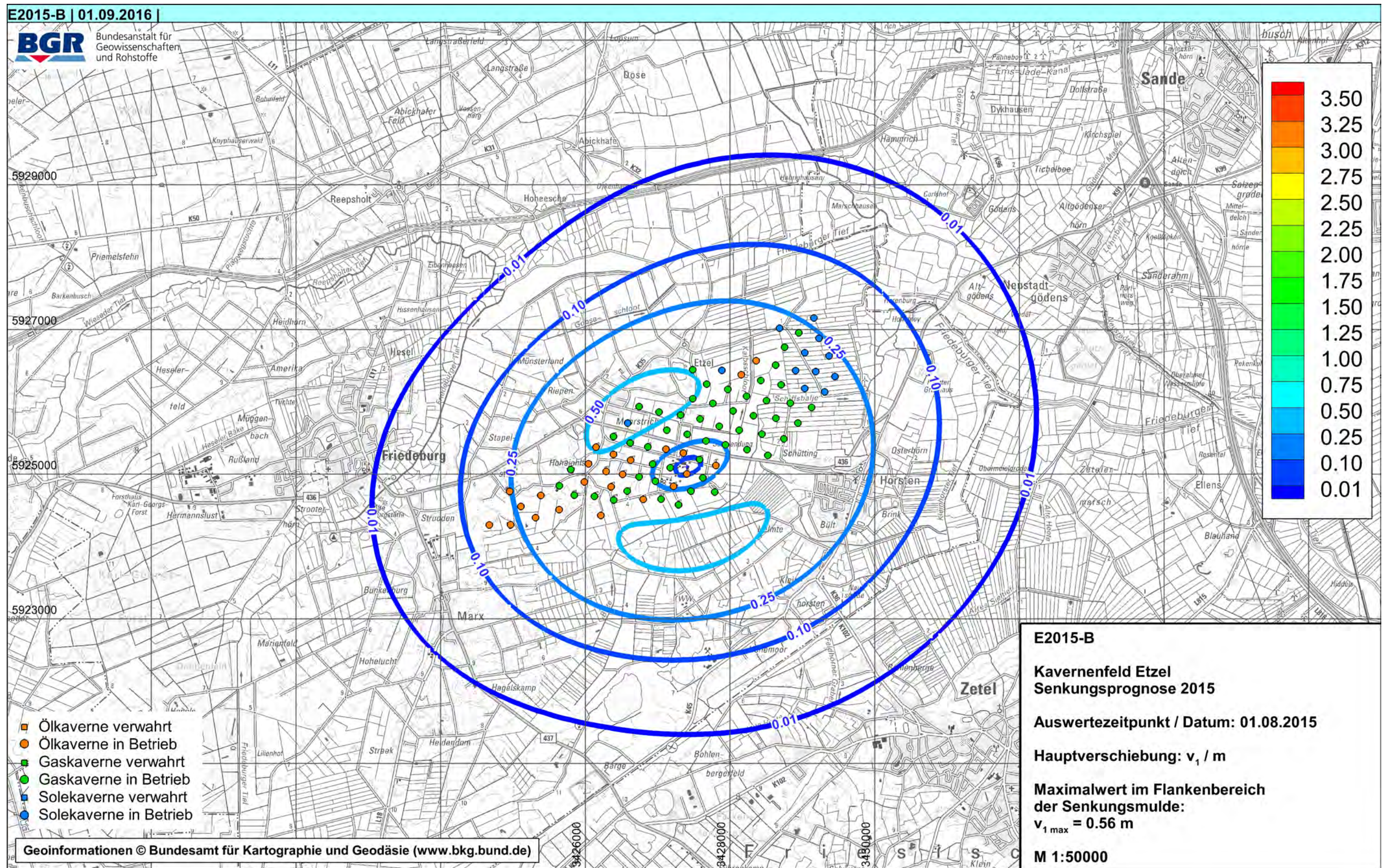


Abbildung B.14: Isolinien der Hauptverschiebungen (2015).

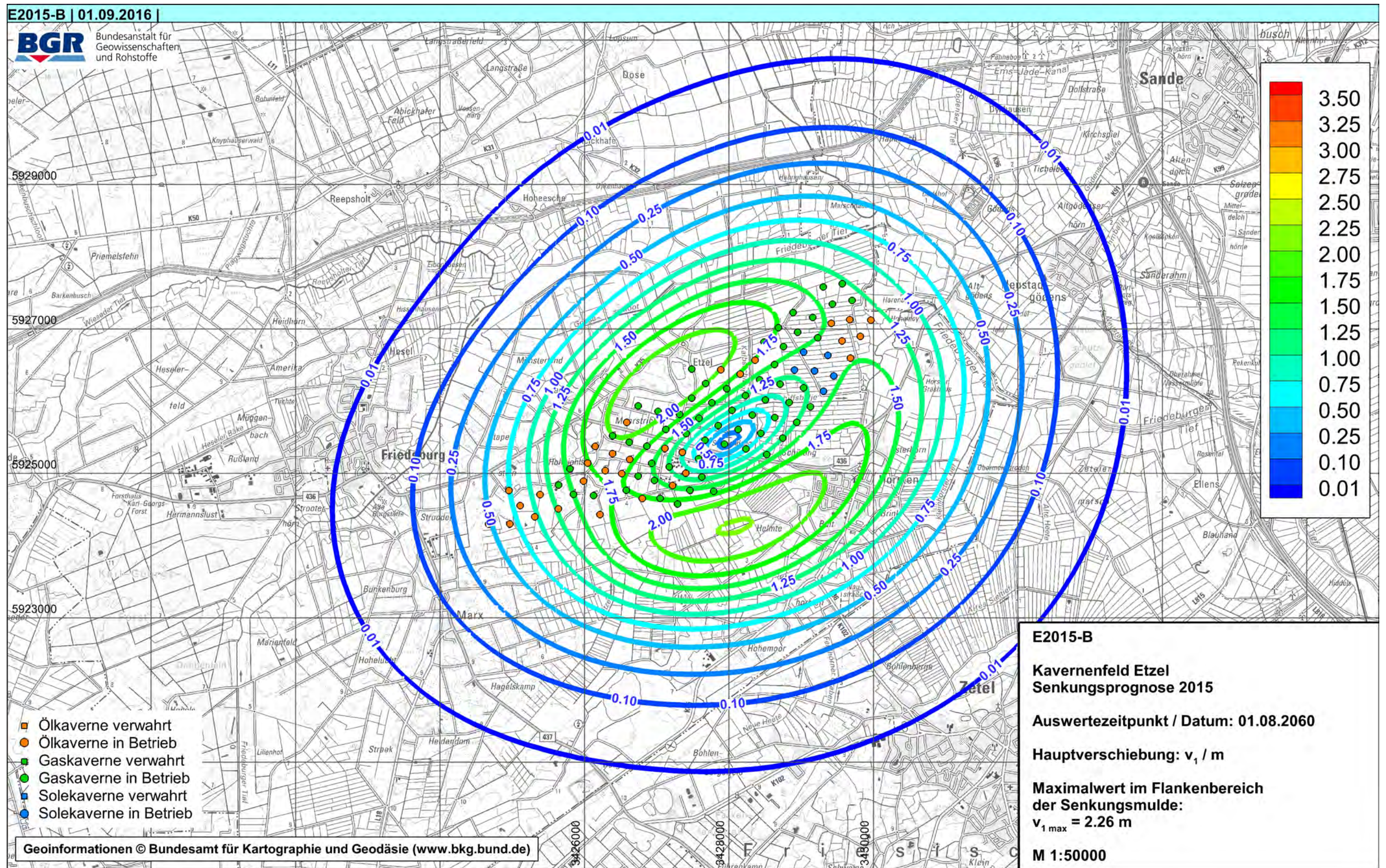


Abbildung B.15: Isolinien der Hauptverschiebungen (2060).

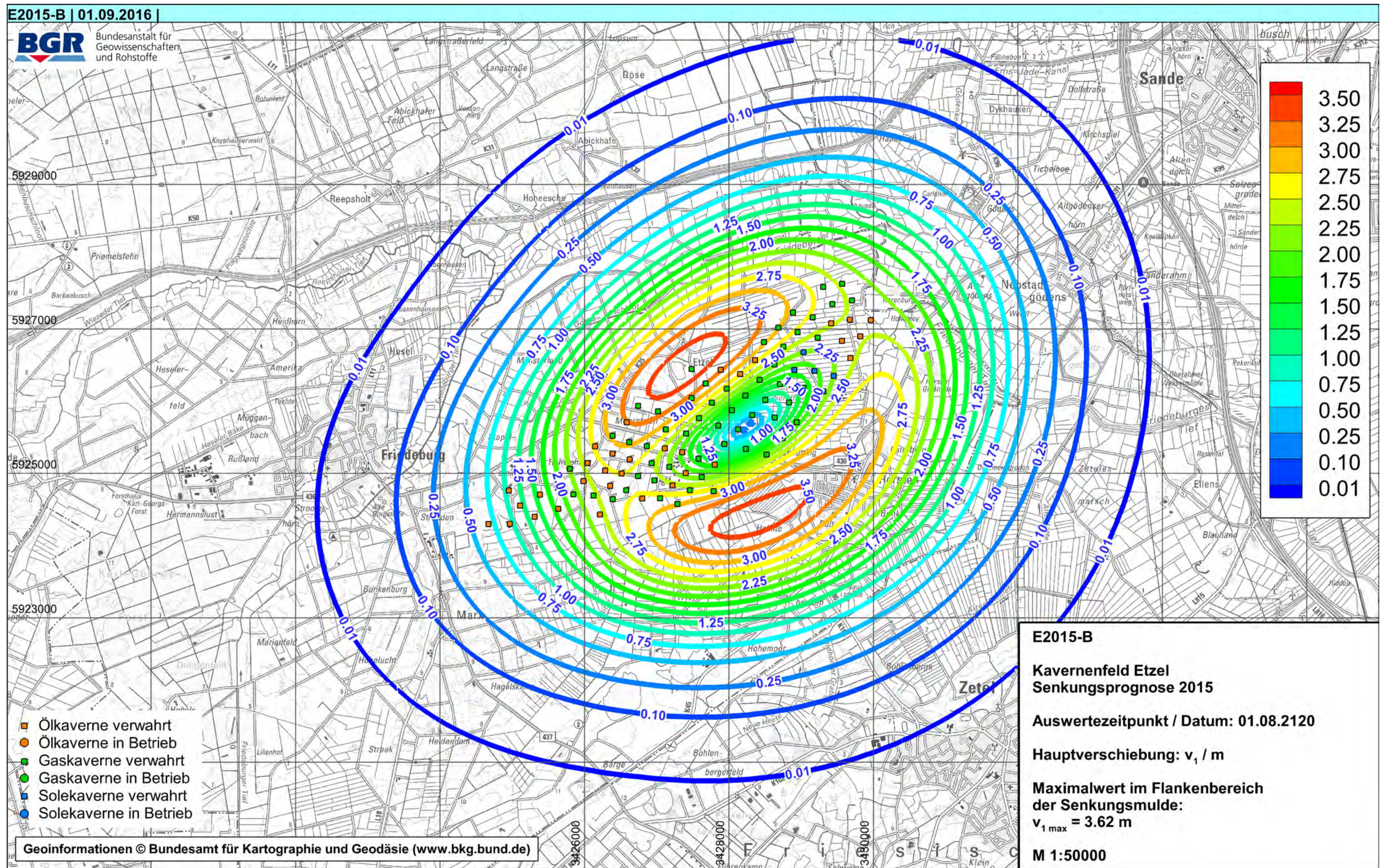


Abbildung B.16: Isolinien der Hauptverschiebungen (2120).

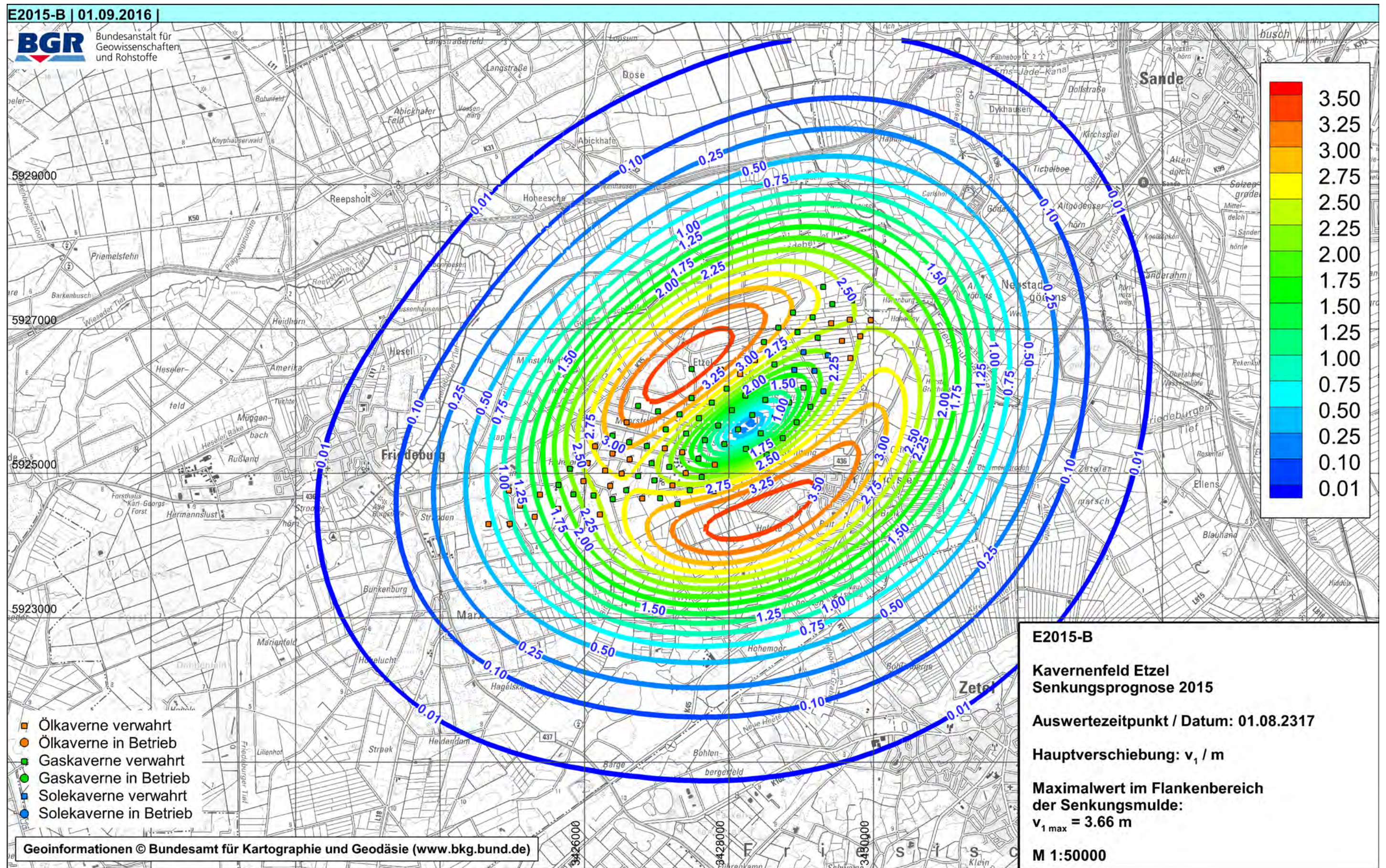


Abbildung B.17: Isolinien der Hauptverschiebungen (2317).

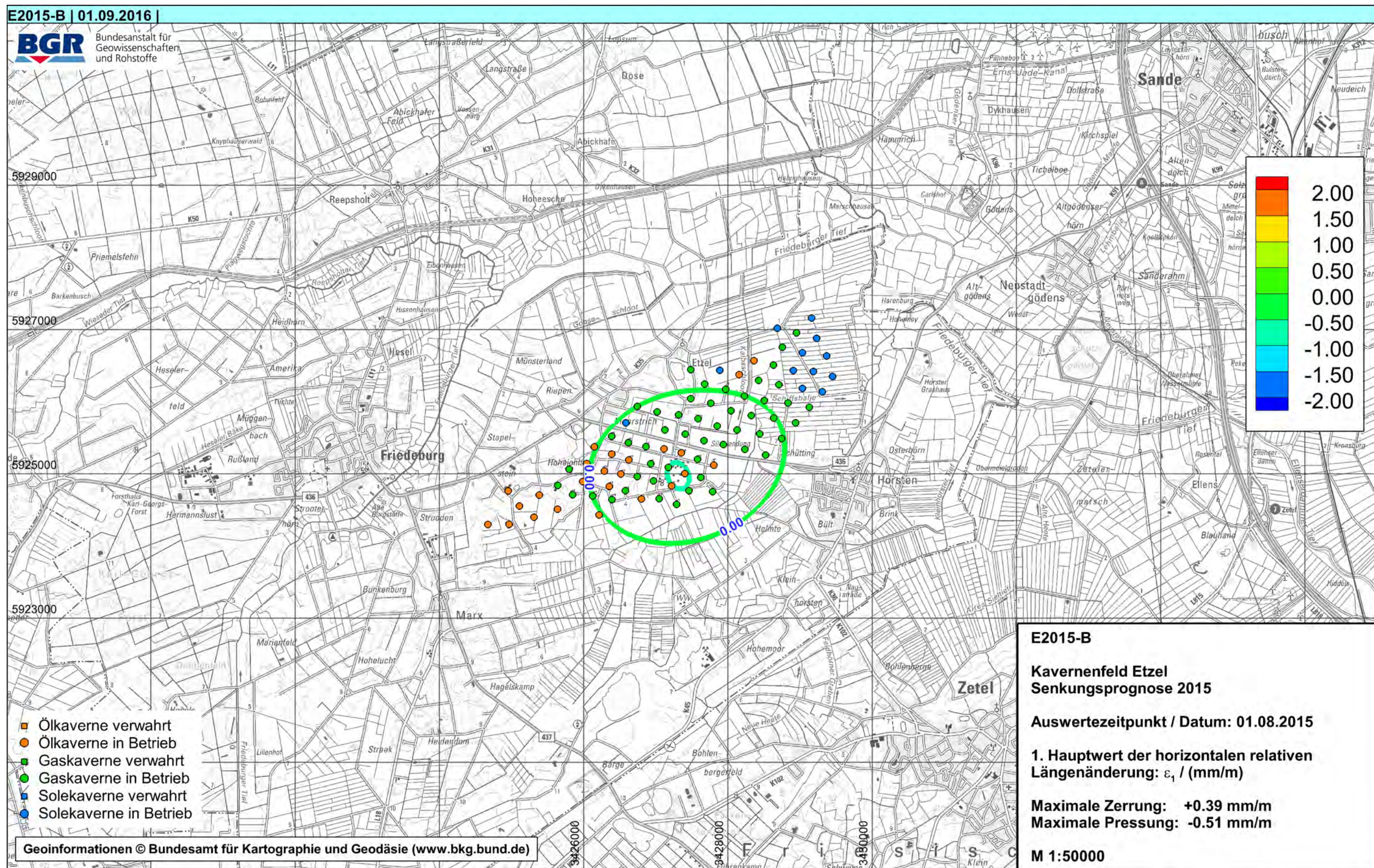


Abbildung B.18: Isolinien des 1. Hauptwertes der horizontalen relativen Längenänderung (2015).

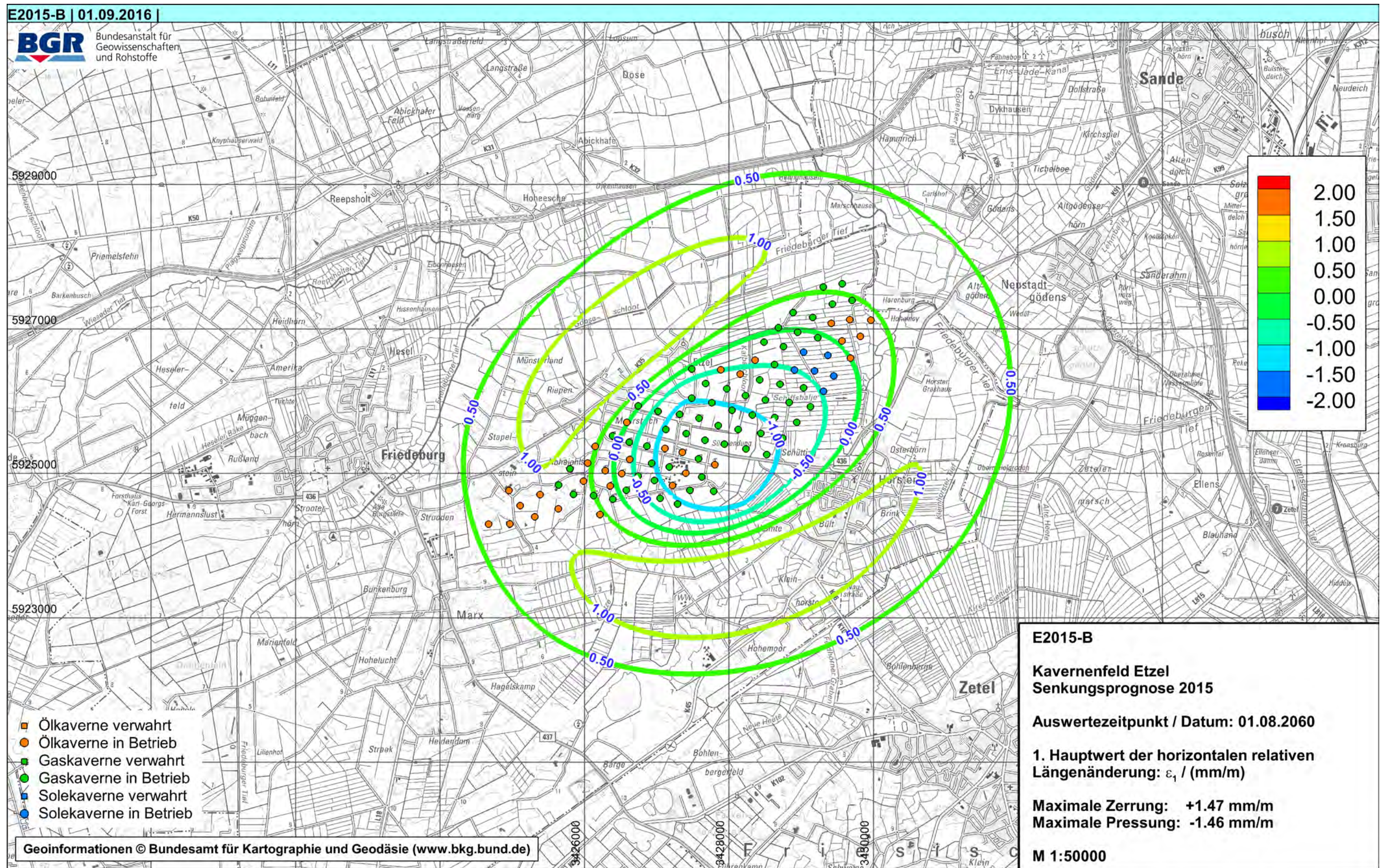


Abbildung B.19: Isolinien des 1. Hauptwertes der horizontalen relativen Längenänderung (2060).

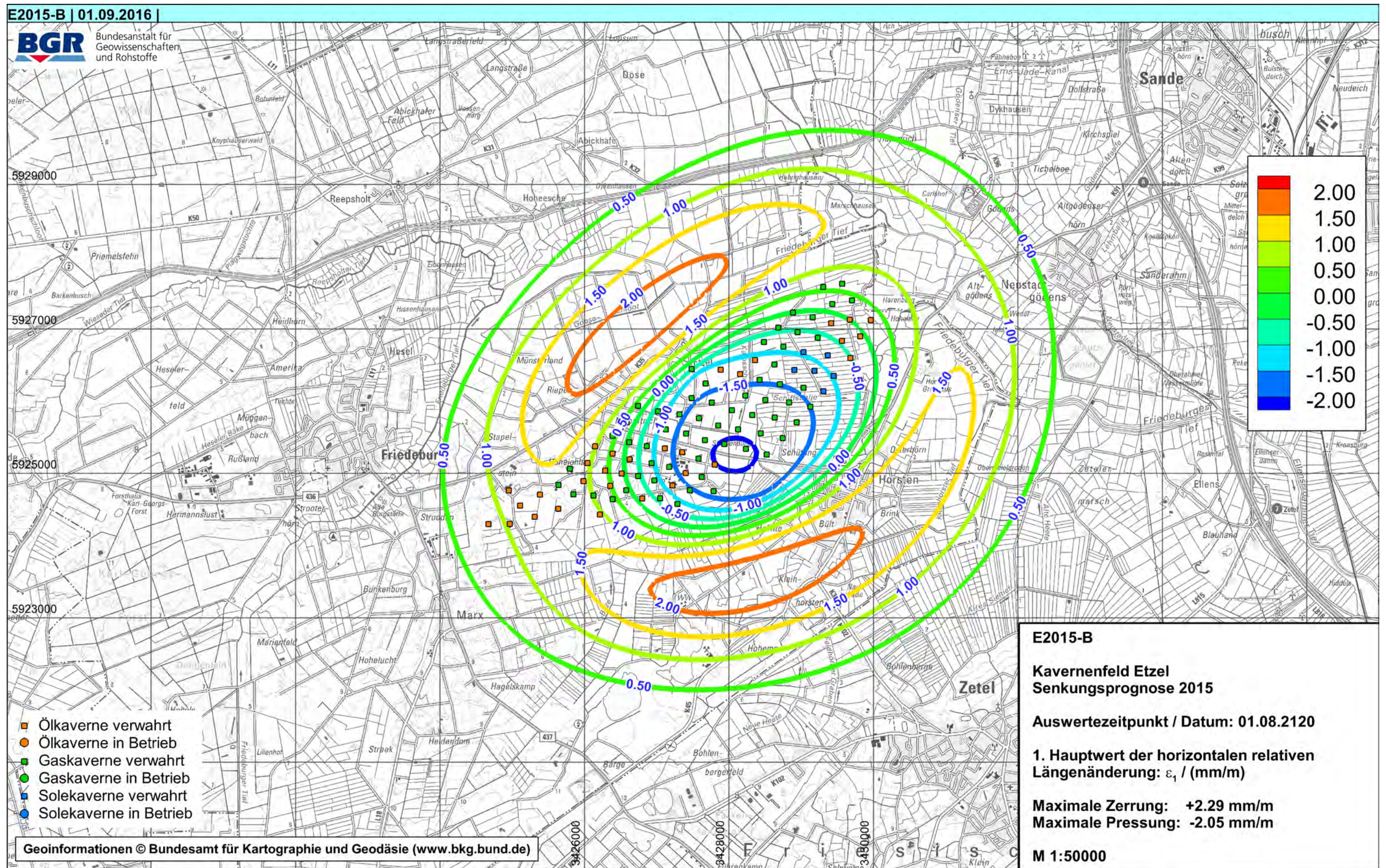


Abbildung B.20: Isolinien des 1. Hauptwertes der horizontalen relativen Längenänderung (2120).

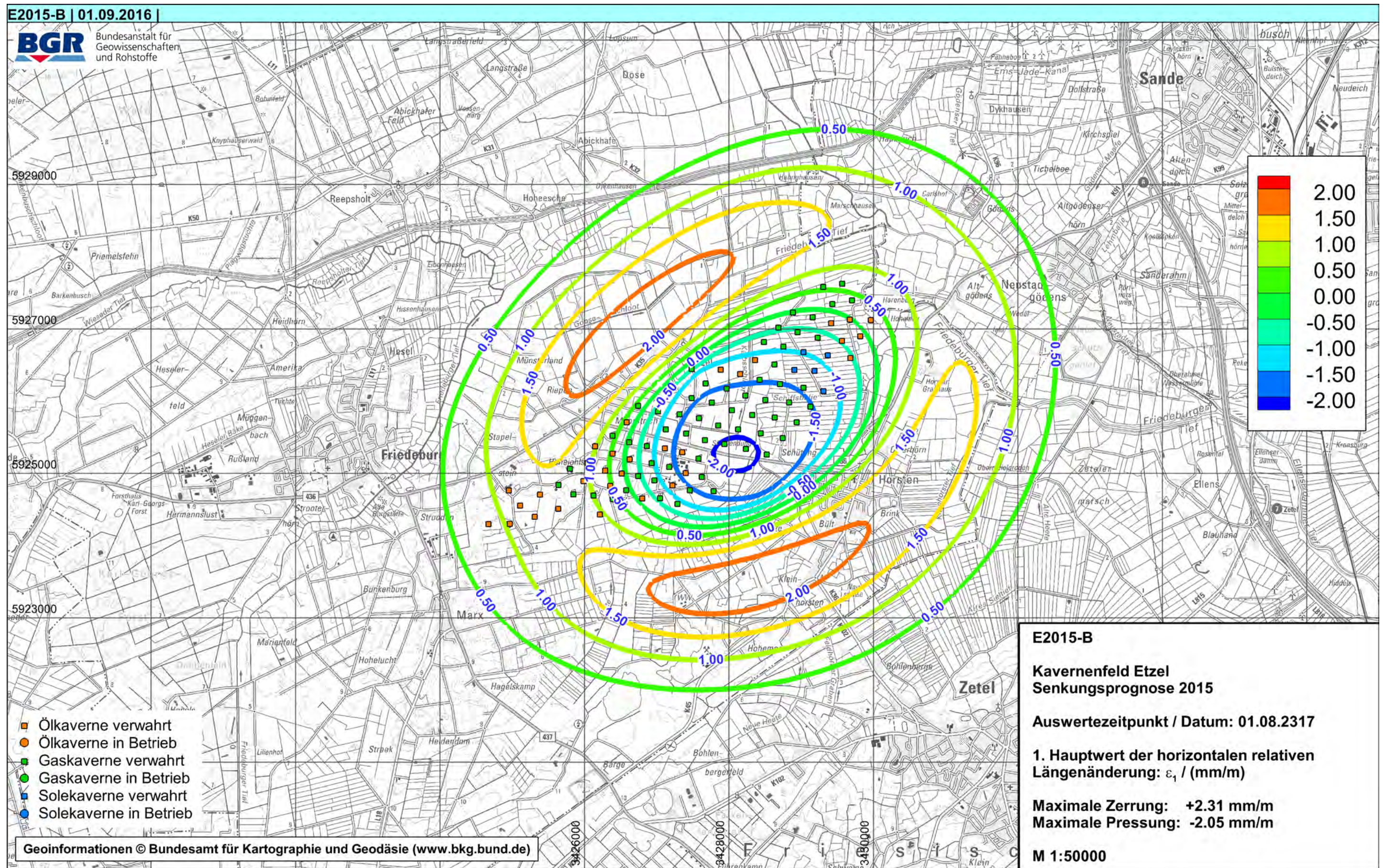


Abbildung B.21: Isolinien des 1. Hauptwertes der horizontalen relativen Längenänderung (2317).

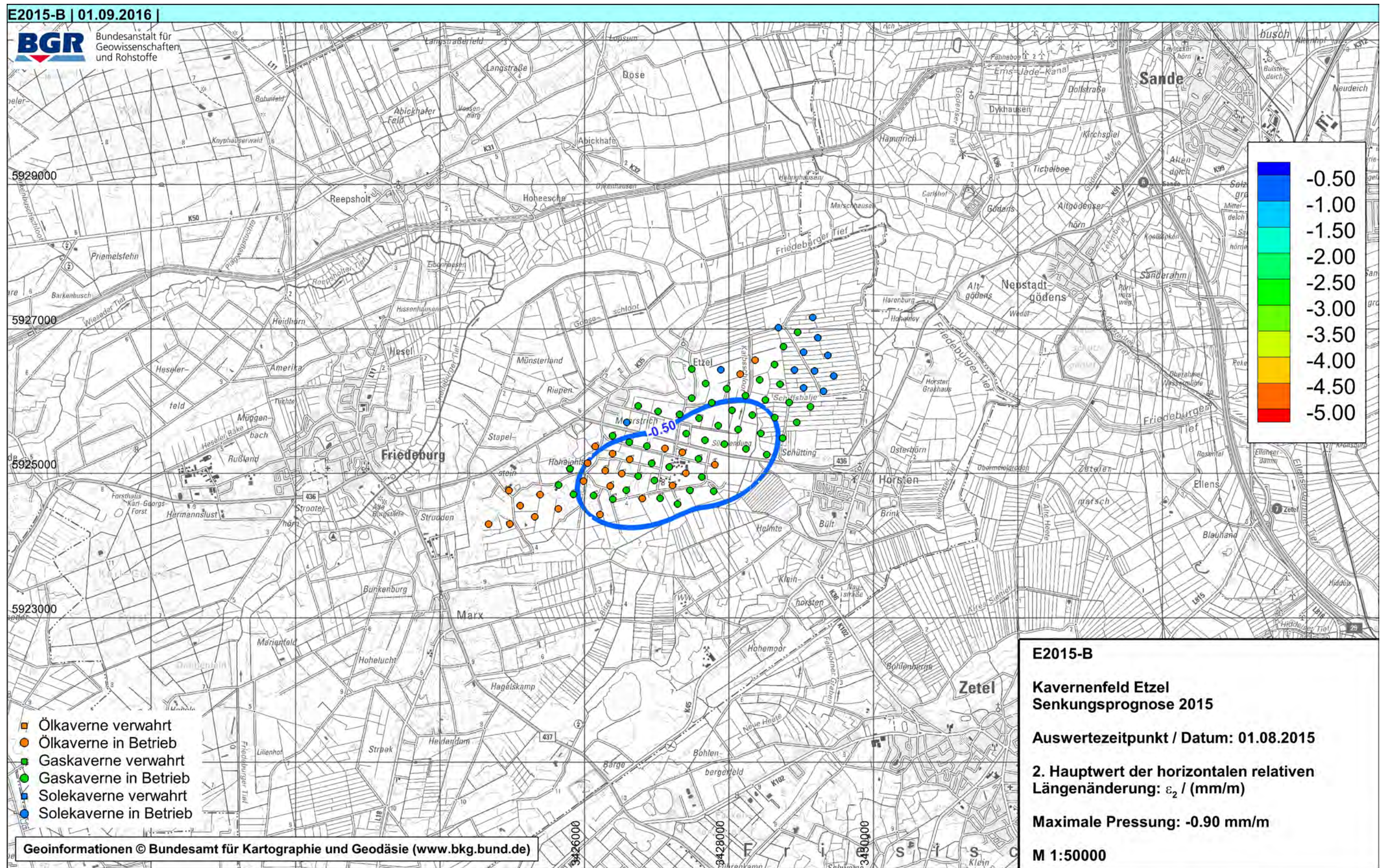


Abbildung B.22: Isolinien des 2. Hauptwertes der horizontalen relativen Längenänderung (2015).

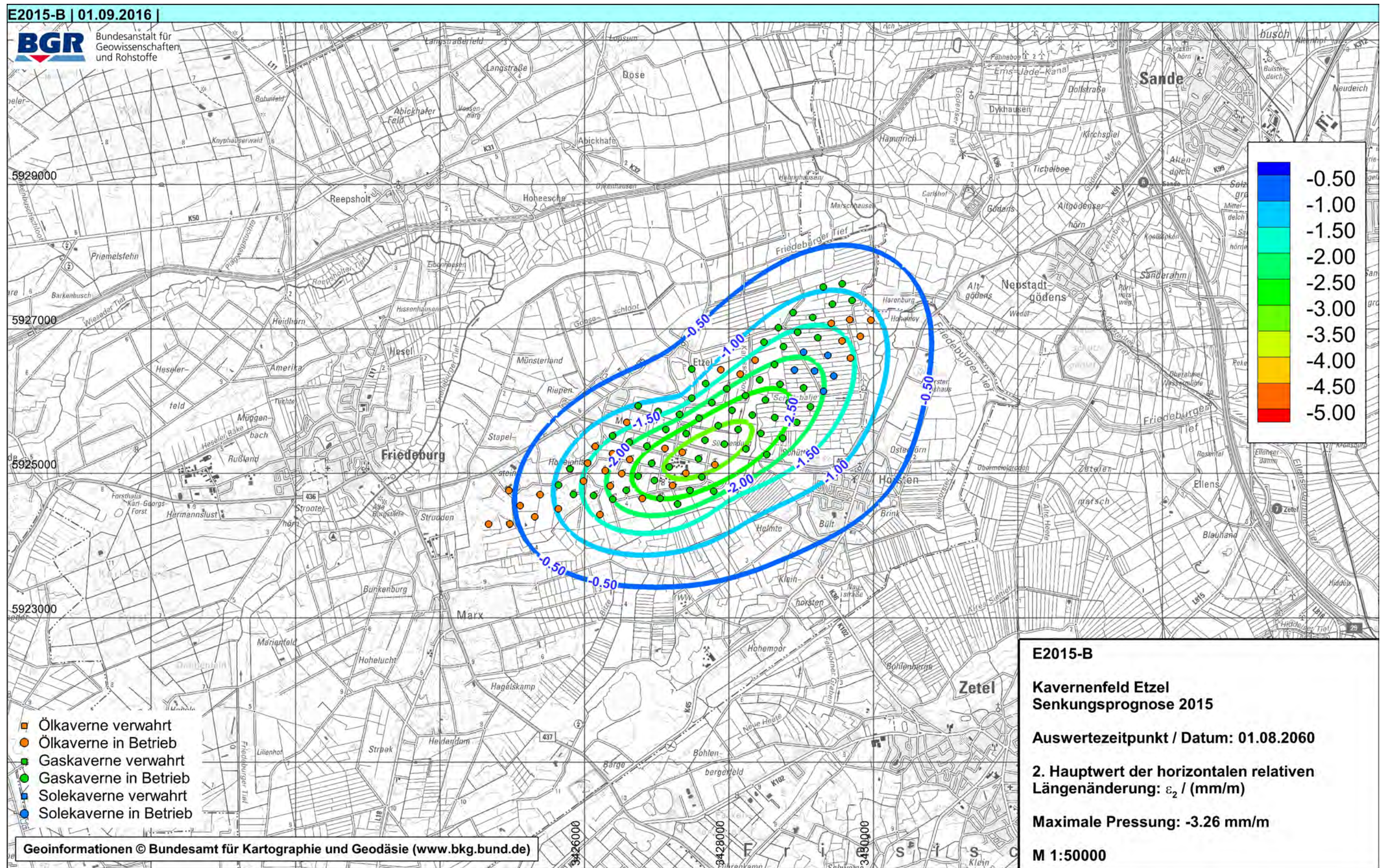


Abbildung B.23: Isolinien des 2. Hauptwertes der horizontalen relativen Längenänderung (2060).

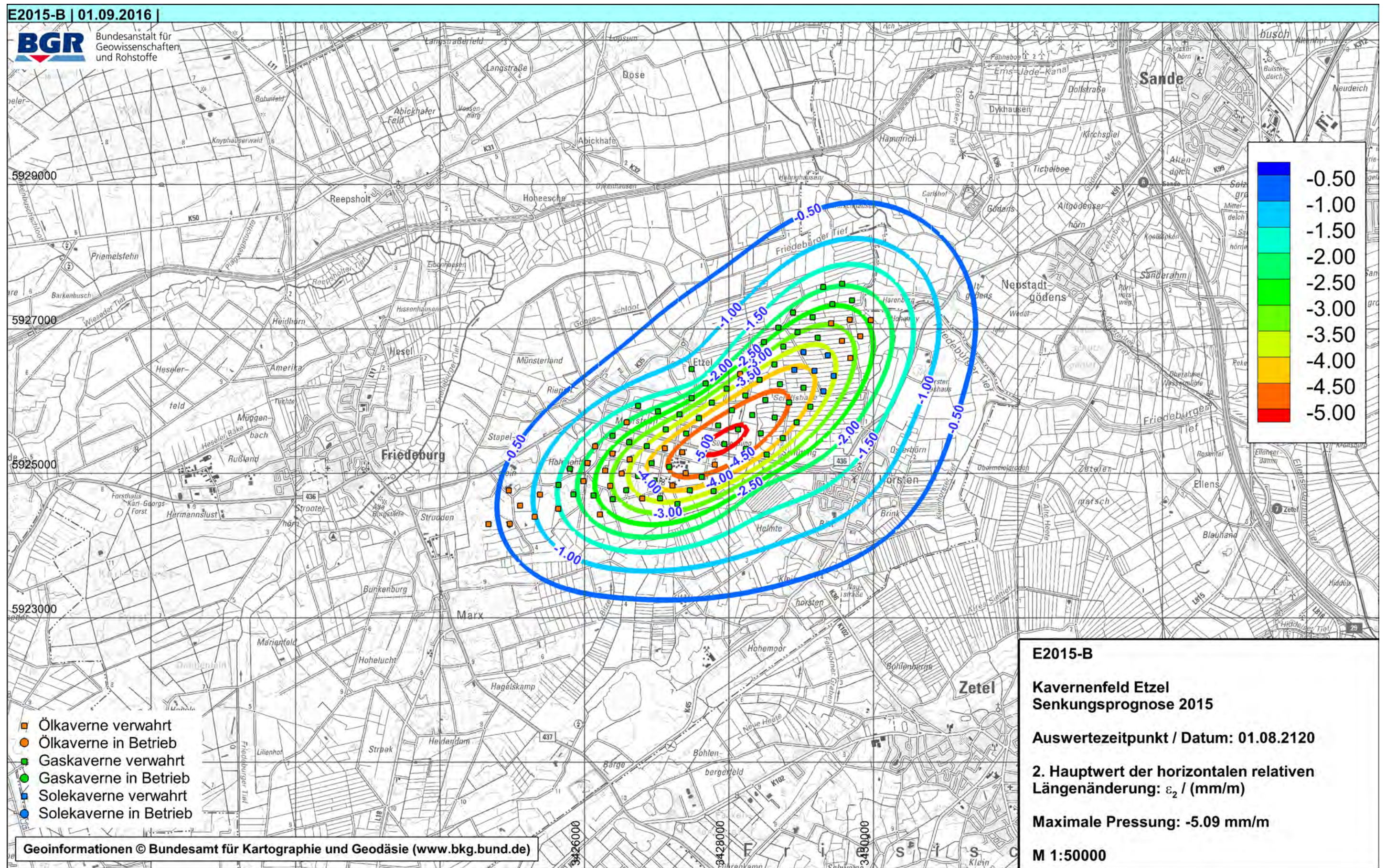


Abbildung B.24: Isolinien des 2. Hauptwertes der horizontalen relativen Längenänderung (2120).

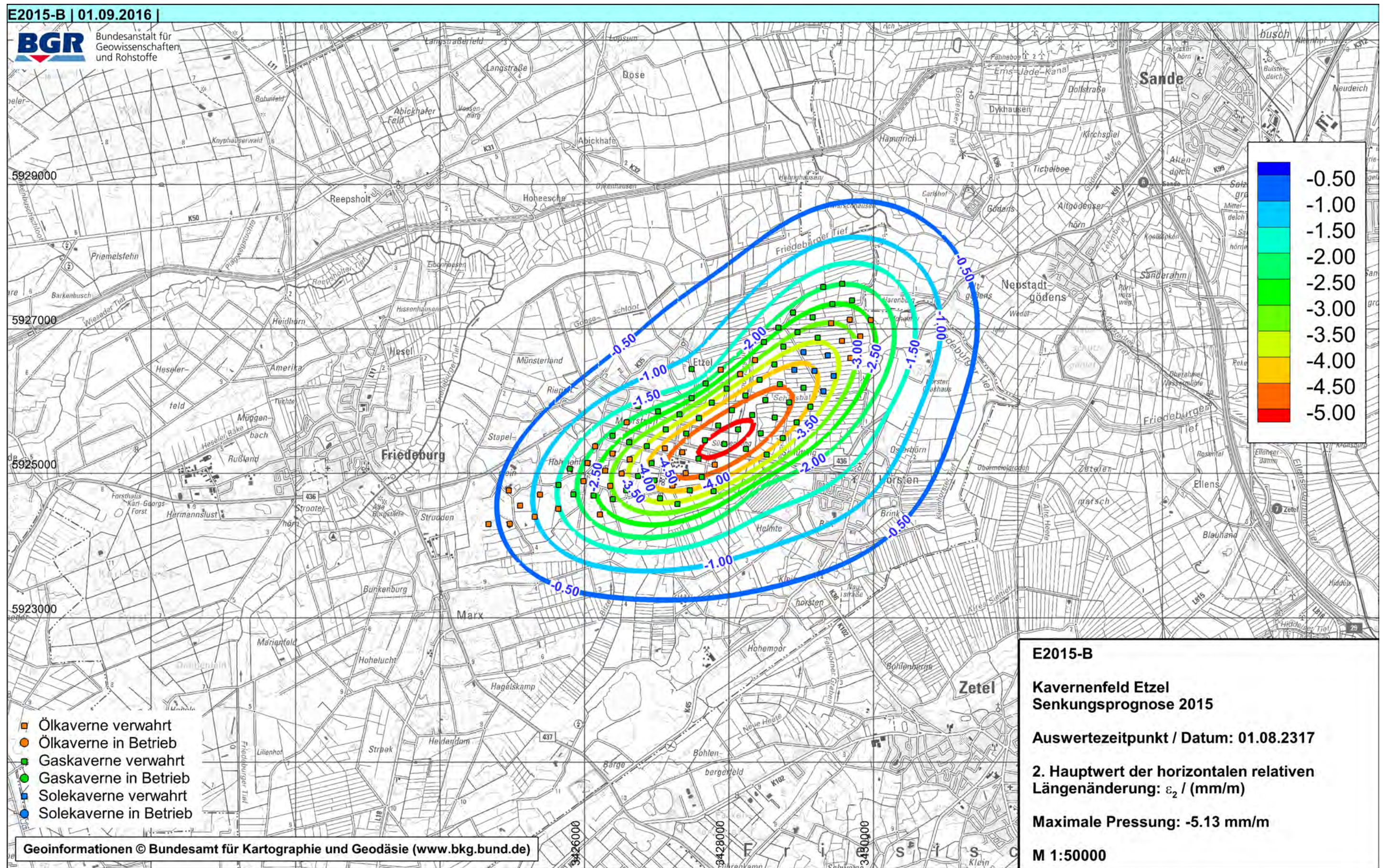


Abbildung B.25: Isolinien des 2. Hauptwertes der horizontalen relativen Längenänderung (2317).

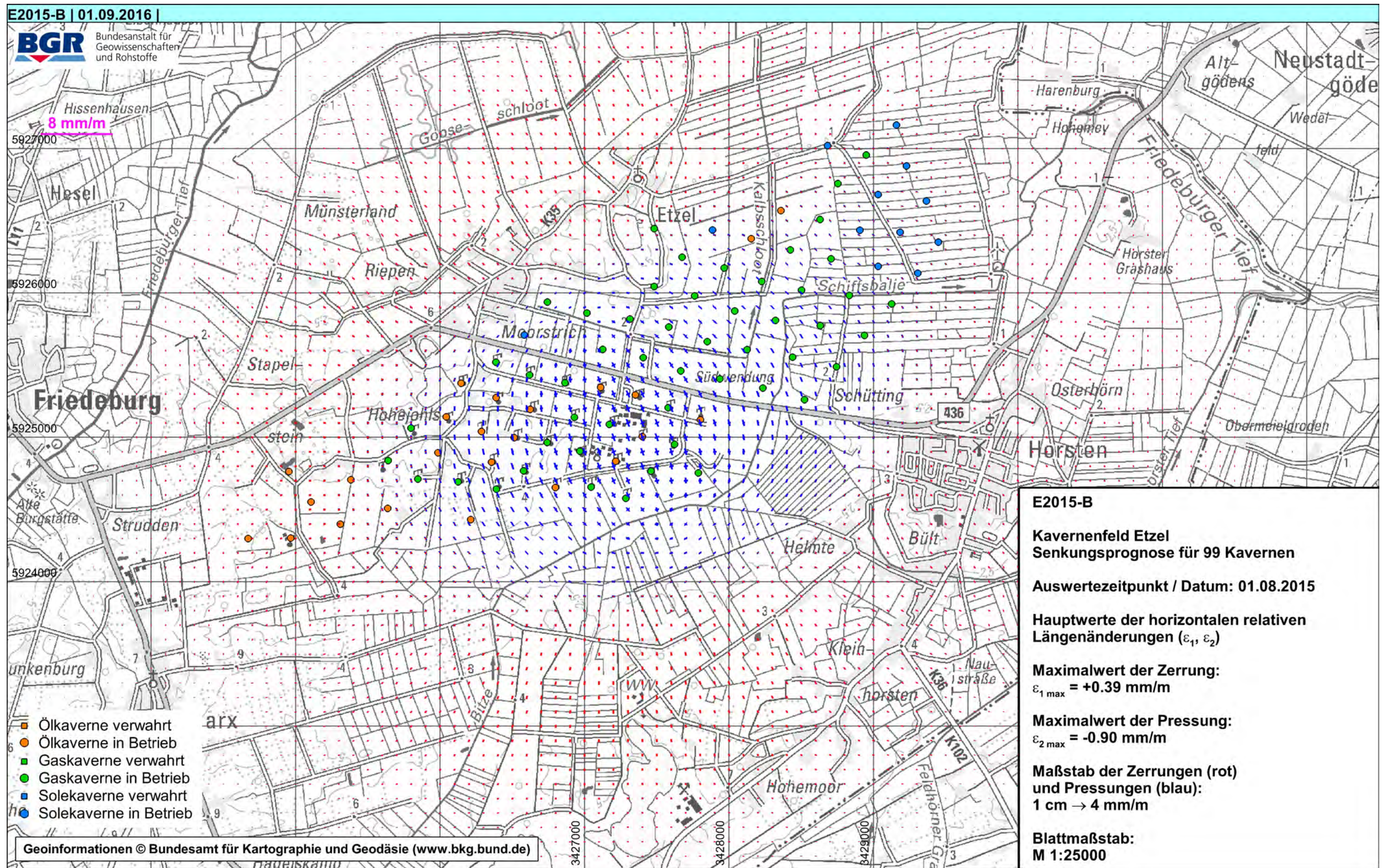


Abbildung B.26: Tensordarstellung der horizontalen relativen Längenänderungen (2015).

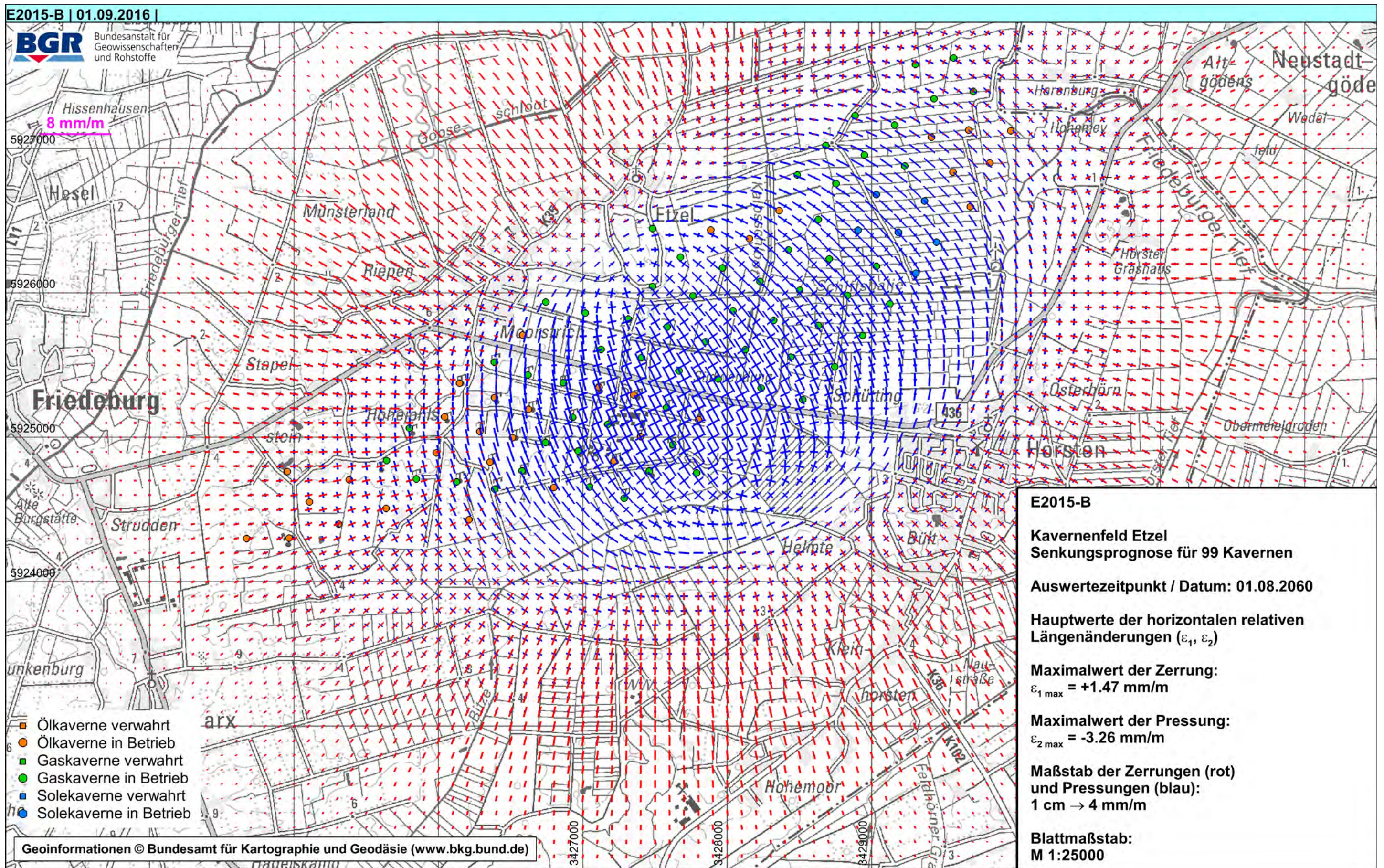


Abbildung B.27: Tensordarstellung der horizontalen relativen Längenänderungen (2060).

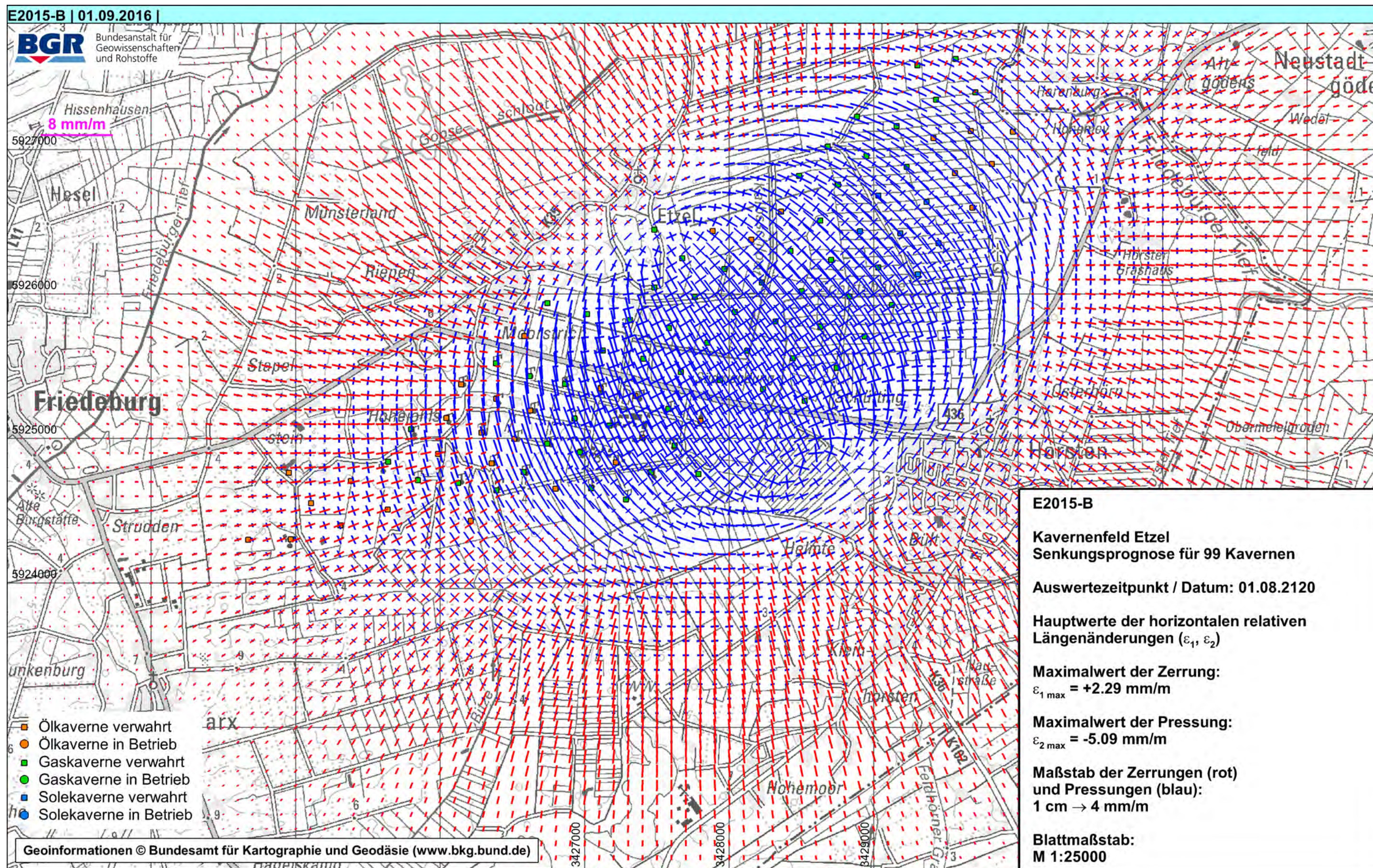


Abbildung B.28: Tensor Darstellung der horizontalen relativen Längenänderungen (2120).

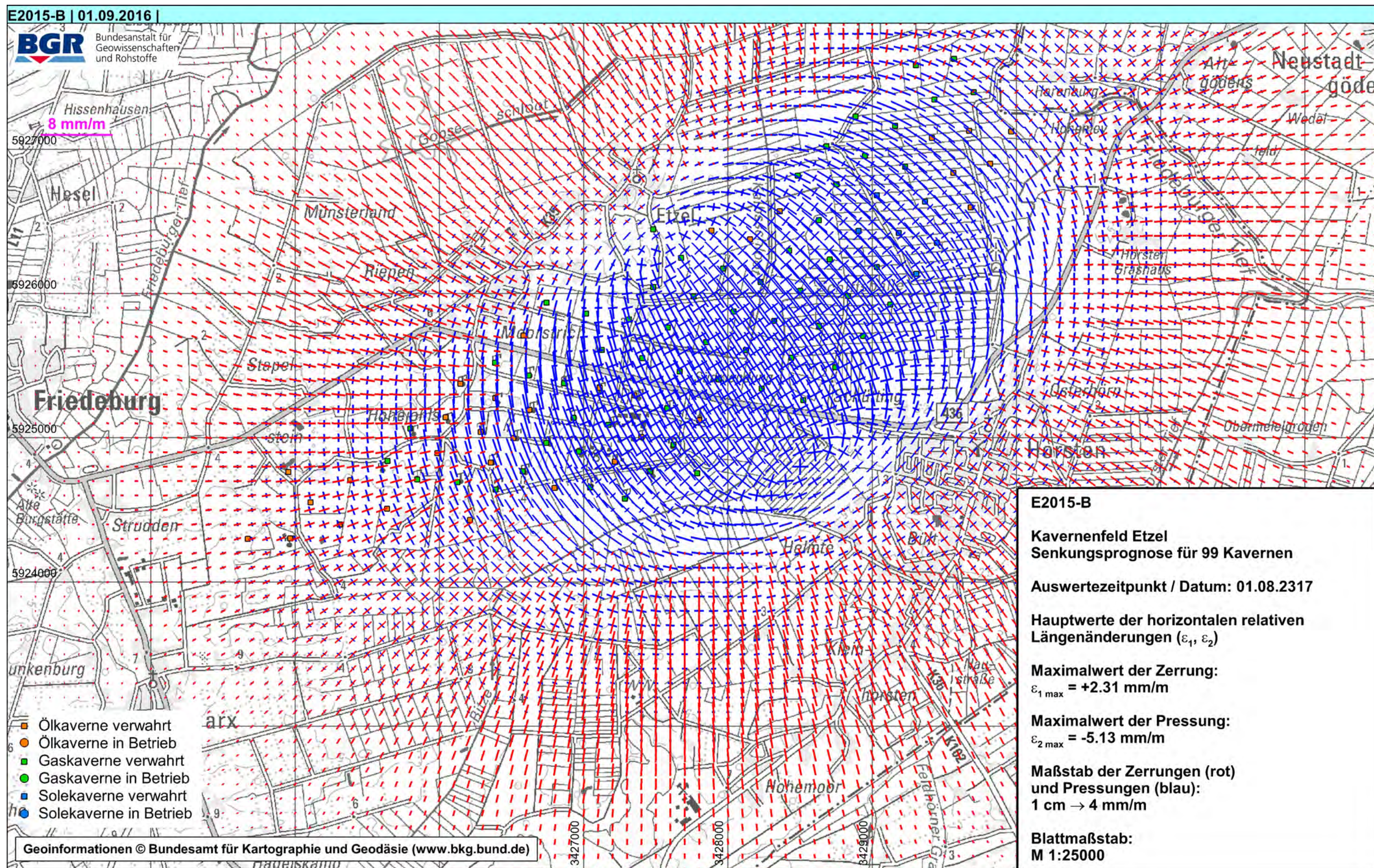


Abbildung B.29: Tensor Darstellung der horizontalen relativen Längenänderungen (2317).