

# Gebirgsmechanische Ursachen der Risse an Gebäuden und Straßen der Stadt Staufen im Breisgau

Rock mechanics leading to the damages to buildings and infrastructure in Staufen, Germany

Ulrich Burbaum<sup>1</sup>, Ingo Sass<sup>2</sup>

<sup>1</sup> DMT GmbH & Co. KG, Essen, Deutschland

<sup>2</sup> Technische Universität Darmstadt, Darmstadt, Deutschland

## Zusammenfassung

Die Risse an Gebäuden und Straßen der Stadt Staufen nehmen, trotz der eingeleiteten Maßnahmen, kontinuierlich zu und haben an einigen Stellen mehrere Dezimeter erreicht. Allerdings hat sich die Geschwindigkeit der Hebungen von ca. 10 mm/Monat (bis etwa Sommer 2010) auf derzeit ca. 4 mm / Monat verringert. Ursächlich für die Risse sind nicht nur unterschiedliche Hebungsbeträge im Gebirge und unterschiedliche Gründungen und Eigengewichte der Gebäude, sondern auch durch Querdehnungen begründete horizontale Zugspannungen, deren Abbau zu horizontalen Rissen führt. Baugrunderkundungen haben mittlerweile ergeben, dass ein durch Geothermiebohrungen ausgelöster Quellprozess im anhydritführenden Gebirge ursächlich für diese Hebungen und die Risse ist. Das Abpumpen des Gebirgswassers aus Brunnen hat möglicherweise zur Verringerung der Hebungsgeschwindigkeit beigetragen, die Messergebnisse lassen aber auch Subsidenzen infolge einer Gipslösung als Interpretation zu. Im Beitrag werden gebirgsmechanische Zusammenhänge, die für die Rissbildung ursächlich sind, vorgestellt und bewertet.

**Schlüsselworte:** Staufen, Schäden, Risse, Gebirgsmechanik, Anhydritquellen, Anthropoge Karstifikation

## Abstract

Though measurements already applied, damages to the historic town of Staufen im Breisgau, Germany, are still increasing continuously. The uplift is up to some decimeters. The rate of uplift decreased from ca. 10 mm/month (up to summer 2010) down to currently ca. 4 mm/month. Damages to the buildings and utilities are caused by differences in uplift, heterogenous foundation conditions and differences in dead weight of buildings. Damages are also caused by the effects of horizontal tension stresses which occur due to differences in uplift. The uplift of the ground surface is caused by swelling of anhydritic rock which was initiated through drillings for geothermal heat exchangers. Pumping of groundwater has potentially reduced the rate of uplift, but subsidences due to the effect of anthropogenic karstification could provide explanation for this, too. The paper presents rock mechanical aspects of the process.

**Keywords:** Staufen, Damages, Fissures, Rock mechanics, Swelling of Anhydrite, Anthropogenic Karstification

## 1 Situation

In Staufen wurden anhydrithaltige Schichten des Gipskeupers hydraulisch mit artesischem Grundwasser durch Bohrungen für Erdwärmesonden kurzgeschlossen. Dadurch wurde ein vereinfacht als Quellprozess bezeichneter Vorgang in Gang gesetzt, der zu großflächigen Hebungen an der Geländeoberfläche und zu Rissen im Boden, an Gebäuden und an der Infrastruktur führt. Über den Vorgang ist bereits verschiedentlich ausführlich berichtet worden (Sass et al. 2009, Sass & Burbaum, 2010 A und B und 2012; Goldscheider & Bechtel, 2009; LGRB, 2010).

Es wird davon ausgegangen, dass der artesische Grundwasserleiter hydraulisch direkt über eine oder mehrere Bohrungen oder/und indirekt über das Trennflächengefüge und die Bohrungen mit dem verkarsteten Muschelkalkaquifer in Verbindung steht. Es ist möglich, dass durch den Quellprozess, wie im Folgenden gezeigt wird, auch Grundwasser aus dem oberflächennahen Aquifer durch die Risse dem an-

hydrithaltigen Gebirge zufließt. Zusätzlich ist die hydraulische Verbindung aus dem Liegenden über wasserwegsame Klüfte und Störungen auf indirektem Wege wahrscheinlich.

Die Situation wird durch die Lage von Staufen auf einer Randscholle des Oberrheingraben und der dadurch begründeten komplexen tektonischen Situation erheblich problematischer (Abb. 1).

## 2 Ursache der Hebungen

Die Umwandlungsreaktion von Anhydrit mit Wasser zu Gips ist mit einer Zunahme des Volumens von etwa 61 % verbunden (Abb. 2). Die Quellvorgänge führen zu Gefügeveränderungen, die die Wasserwegsamkeit lokal verringern, aber auch deutlich erhöhen können (Sass & Burbaum, 2012).

Wenn die mit der Kristallisation des Gipses einhergehende Dehnung des Gebirges behindert wird, bilden sich entsprechende Quelldrücke aus. Der Zusammenhang zwischen



Spannung (Quelldruck) und Quelldehnung wird durch das Quellgesetz von Grob anhand eines Quellversuches nach Huder/Amberg beschrieben. Zur vollständigen Behinderung der Quelldehnung ist ein bestimmter Druck erforderlich. Dieser wird als auch als maximaler Quelldruck  $\sigma_0$  bezeichnet. Verringert man diesen Druck, treten Quelldehnungen auf. Bei maximaler Quelldehnung ist kein Quelldruck mehr vorhanden. Dieser Zusammenhang ist in Abbildung 3 dargestellt.

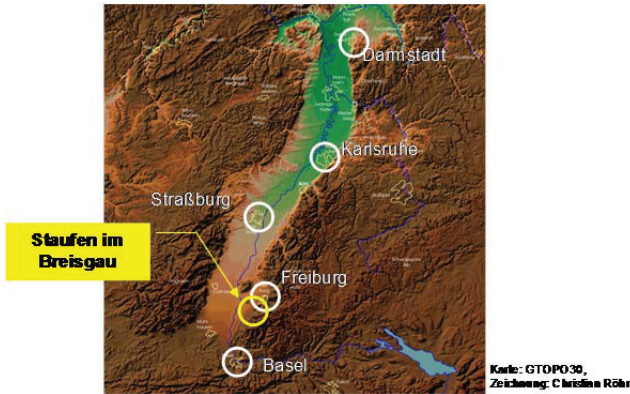


Abb. 1: Staufen im Breisgau am Rand des Oberrheingrabens.  
Fig. 1: Location of Staufen im Breisgau at the rim of the Upper Rhine Graben.

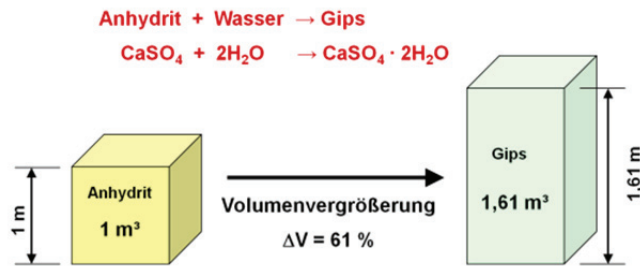


Abb. 2: Umwandlung von Anhydrit in Gips.  
Fig. 2: Alteration of Anhydrit to Gypsum

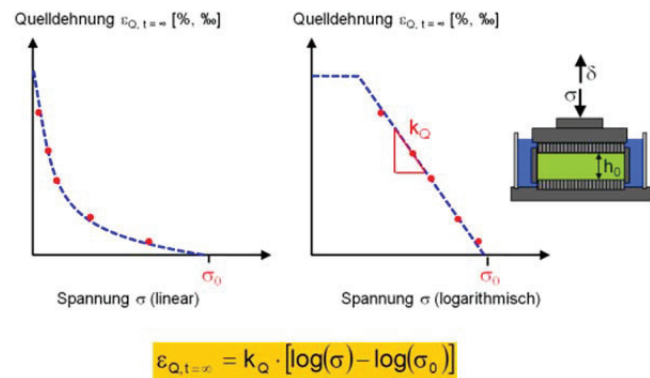


Abb. 3: Spannungs-Quelldehnungsverhalten  
Fig. 3: Stress – Swelling strain behaviour

Das bedeutet, dass Quelldehnungen solange auftreten, bis sich ein Gleichgewichtszustand zwischen dem Quelldruck und den Quellhebungen eingestellt hat.

Übertragen auf die Situation in Staufen, bedeutet dieses, dass Hebungen an der Geländeoberfläche infolge Quelldehnungen dann auftreten, wenn der Druck des den reagierenden Bereich überlagernden Gebirges geringer ist als der maximale Quelldruck.

In verschiedenen Untersuchungen für Tunnelprojekte, bei denen es durch Quellprozesse zu Schäden gekommen ist, wurden maximale Quelldrücke zwischen 1,7 und 4,7 MPa gemessen (Steiner 1989, 1993, 2007).

Der Anhydritspiegel wurde durch die zweite Erkundungsbohrung (EKB 2) des Landesamtes für Geologie und Rohstoffe des Landes Baden-Württemberg in etwa 62 m Tiefe erkundet (LGRB, 2010). In Abb. 4 ist dargestellt, dass der Überlagerungsdruck des Gebirges in dieser Tiefe etwa 1,5 MPa beträgt. Er ist damit kleiner als die potenziellen Quelldrücke und reicht somit nicht aus, um die Quelldehnungen zu verhindern. Es kommt so zu den bekannten Hebungen an der Geländeoberfläche.

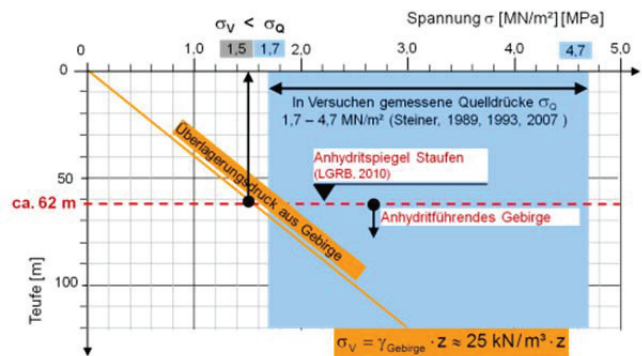


Abb. 4: Überlagerungsdruck vs. Quelldruck  
Fig. 4: Overburden vs. swelling pressure

Derzeit liegen dieser Studie keine fallbezogenen Untersuchungen oder Erkenntnisse zum Spannungs-Quelldehnungsverhalten des Gebirges in Staufen vor. Eine rechnerische Abschätzung der Quelldehnungen ist daher derzeit nicht möglich.

### 3 Ausdehnung der Schäden

Die von den Hebungen betroffene Fläche umfasst ein Gebiet von mehr als 6 ha (Sass & Burbaum, 2009 und 2010). Diese Hebungen dauern an, wobei die Hebungsrate bis zum Sommer 2010 ca. 10 mm/Monat betrug. Derzeit ist die maximale Hebungsrate auf etwas weniger als ca. 4 mm/Monat gesunken (Stand: September 2012). Dies kann durch eine Abdichtung des Gebirges mittels Injektionen aus den Erdwärmesondenrohren heraus erreicht worden sein (LGRB, 2010). Die Erkenntnisse reichen derzeit jedoch noch nicht für eine Bewertung aus. Einige Messungen (September 2011) zeigten sogar Senkungen am Rand des bisherigen Hebungsgebietes.

Das Gesamtschadensbild orientiert sich in etwa an den Richtungen der geologischen Strukturen, d.h. an dem Verlauf von tektonischen Störungen und den an der Streichrichtung der Schichten und Klüfte (Abb. 5). Parallel zur SW-NE streichenden Hauptstörungsrichtung werden nach LGRB (2010) die sog. Haupttrisslinien beobachtet.



Abb. 5: Gebäudeschäden, Richtung der Hauptstörungen und Haupttrisslinien (Haupttrisslinien nach LGRB, 2010)

Fig. 5: Damages to buildings, direction of main faults and main fissures (main fissures after LGRB, 2010)

## 4 Ursachen der Rissbildung

### 4.1 Mechanismen

Die gebirgsmechanischen Ursachen der Risse resultieren aus drei wesentlichen Mechanismen:

- Unterschiedliche Beträge der Quelldehnungen infolge der Heterogenität des Gebirges
- Unterschiedliche Gründungen der Gebäude und unterschiedliche Gebäudelasten
- Querzugspannungen infolge von Abweichungen der Hauptrichtungen des Quelldruckes von der Vertikalen

### 4.2 Unterschiedliche Beträge der Quelldehnungen infolge der Heterogenität des Gebirges

Die Risse an den Gebäuden werden u.a. durch unterschiedliche Hebungsbeträge an den Gebäuden erzeugt. Diese sind zum einen durch die heterogenen geologischen Verhältnisse im Stadtgebiet von Staufen begründet. Durch die verschiedenen Erkundungsarbeiten wurden zahlreiche Störungszonen mit einem vertikalen Versatz der Schichten von teilweise mehreren 10er Metern nachgewiesen bzw. postuliert. Dadurch kommt es kleinräumig zu differentiellen Hebungen durch das jeweils verschiedene Quellpotenzial und des

Eigengewichtes des überlagernden Baugrundes in den durch die Störungszonen begrenzten Gebirgsbereichen (Abb. 6, 7).

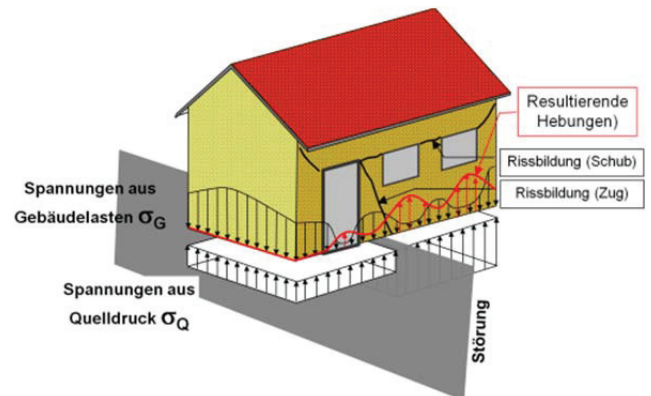


Abb. 6: Risse durch unterschiedlich hohe Quelldrücke infolge der Heterogenität des Gebirges

Fig. 6: Damages mainly caused through heterogenities in ground conditions



Abb. 7: Risse am Bauamt der Stadt Staufen

Fig. 7: Fissures at a building in Staufen

### 4.3 Unterschiedliche Gründungen der Gebäude und unterschiedliche Gebäudelasten

Ein anderer wesentlicher Grund für die Entstehung der Risse sind Hebungsunterschiede infolge unterschiedlicher Gründungen und Gründungslasten der Gebäude. So werden die Hebungsbeträge unter höher belasteten Einzel- und Streifenfundamenten geringer sein als im Bereich von geringer belasteten Einzel- und Streifenfundamenten oder gering belasteten Bodenplatten. Dabei ist die räumliche Tragwirkungen bzw. Lastausbreitung von Bedeutung. Das Prinzip ist in Abb. 8 veranschaulicht. Im Bereich der nicht durch Fenster- und Türöffnungen unterbrochenen Giebelwand wirken in der Gründungssohle größere Spannungen aus Eigengewicht als im Bereich der Fensterwand, die wegen der Öffnungen geringer und wesentlich unterschiedlicher belastet ist.

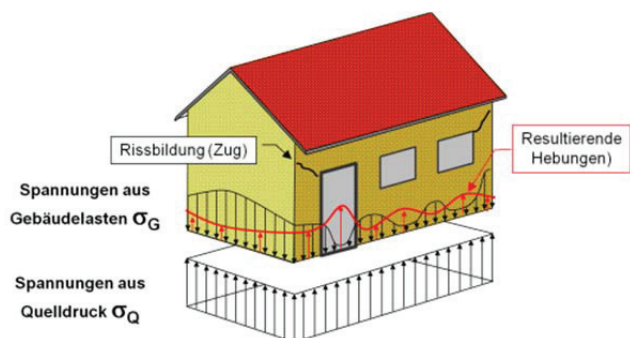
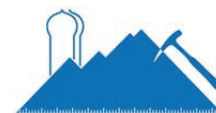


Abb. 8: Risse durch unterschiedlich hohe Spannungen in der Gründungssohle durch unterschiedliche Gebäudelasten

Fig. 8: Damages caused through differences in structures

#### 4.4 Querzugspannungen infolge Abweichungen der Hauptrichtungen des Quelldruckes von der Vertikalen

Eine weitere Ursache für die Rissbildung ist durch den Abbau von Querzugspannungen im Gebirge begründet, die durch die unterschiedliche Hauptrichtungen des Quelldruckes bzw. den daraus resultieren Hebungsunterschieden entstehen. Der gebirgsmechanische Zusammenhang ist in Abb. 9a und 9b anhand einer geologischen Karte und eines NW-SE Schnittes sowie der zu dem Schnitt zugehörigen Hebungen an der Geländeoberfläche dargestellt. Die geologische Karte und der Schnitt basieren auf den Angaben von LGRB (2010) und werden an dieser Stelle unkommentiert als Arbeitshypothese übernommen.

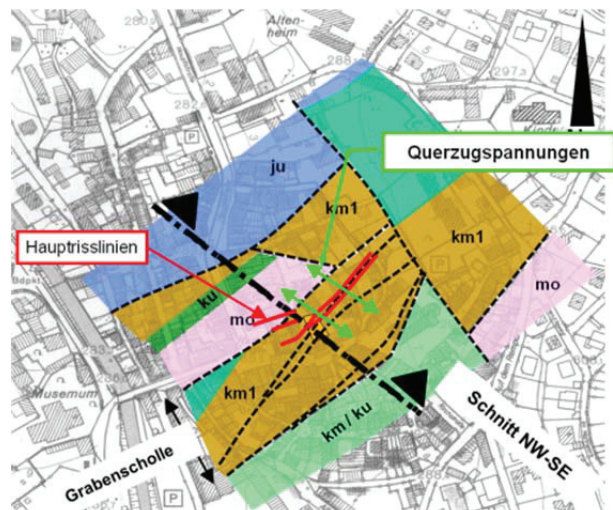


Abb. 9a: Querzugspannungen und Haupttrisslinien. Grundlage: Abgedeckte Geologische Karte, nach LGRB (2010), verändert da Karte eine Projektion auf 50 m. u. GOF darstellt und ergänzt.

Fig. 9a: Tension stresses and main fissures. Based upon geological mapping in 50 m depth after LGRB, 2010, altered and amended

Danach ist im Bereich des Erdwärmesondenfeldes in dem NW-SE Schnitt mit zwei Hochschollen und dazwischen einer Grabenscholle zu rechnen. Der quellende Gebirgsbereich befindet sich im Wesentlichen unterhalb von ca. 62 m Tiefe in der Grabenscholle. Die größten Hebungen werden allerdings nordwestlich der Grabenscholle im Bereich der Hochscholle gemessen. Dies ist durch die Richtung des

Hauptquelldruckes nach NW bzw. SE entsprechend den Lagerungsverhältnissen der Schichten begründet. Durch die unterschiedliche Größe und Richtungen des Quelldruckes entstehen zwangsläufig Querzugspannungen, die durch Rissbildung im Gebirge abgebaut werden. Dementsprechend sind genau an der Stelle der größten Unterschiede der Richtungen und der Größe der Quelldruckspannungen (bzw. der größten Unterschiede der vertikalen Hebungen) Horizontalrisse zu erwarten, die senkrecht zu dem gezeigten Schnitt verlaufen. Genau solche Risse werden auch beobachtet, in dem Lageplanausschnitt werden diese als „Haupttrisslinien“ bezeichnet.

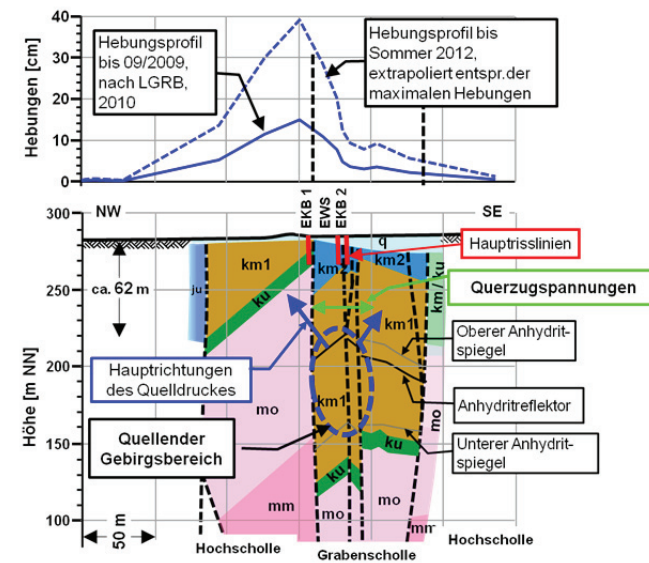


Abb. 9b: Querzugspannungen und Haupttrisslinien im Querschnitt NW-SE, Grundlage: Geologischer Schnitt nach LGRB (2010), verändert und ergänzt.

Fig. 9b: Tension stresses and main fissures in cross section NW-SE, based upon geological cross section after LGRB, 2010, altered and amended



Abb. 10: Horizontalriss in einer Bodenplatte aus Beton.

Fig. 10: Horizontal fissure in a concrete foundation raft

Besteht oberhalb dieser Haupttrisslinien ein Gebäude oder andere bauliche Anlagen, werden diese dadurch auf Zug beansprucht. Wird nun die Zugfestigkeit der beanspruchten Bauteile dabei überschritten, kommt es zur Rissbildung. Solche Risse wurden z.B. in Bodenplatten von Gebäuden oder im Straßenpflaster beobachtet (Abb. 10). Auch kann die Lagerung von horizontalen Trägern, wie z.B. Deckenbalken, so verändert werden, dass die Lagersicherheit beeinträchtigt wird oder nicht mehr gegeben ist.

Die Größenordnung der Horizontalrisse kann mit der Überlegung abgeschätzt werden, dass die Hauptrichtung der Verschiebung normal zu den Schichtflächen orientiert ist. Zur Abschätzung wird die Stelle der größten Vertikalverschiebungsunterschiede in Abb. 9b betrachtet. Der Hebungsunterschied ergibt sich aus dem Betrag der größten Hebungen etwa nordwestlich der Grabenscholle (etwa 40 cm, vgl. Abb. 9b und 11) und der kleinsten Hebung etwa südwestlich der EKB 2 (etwa 10 cm, vgl. Abb. 9b und 11). Die Entfernung zwischen diesen beiden Punkten beträgt etwa 35 m.

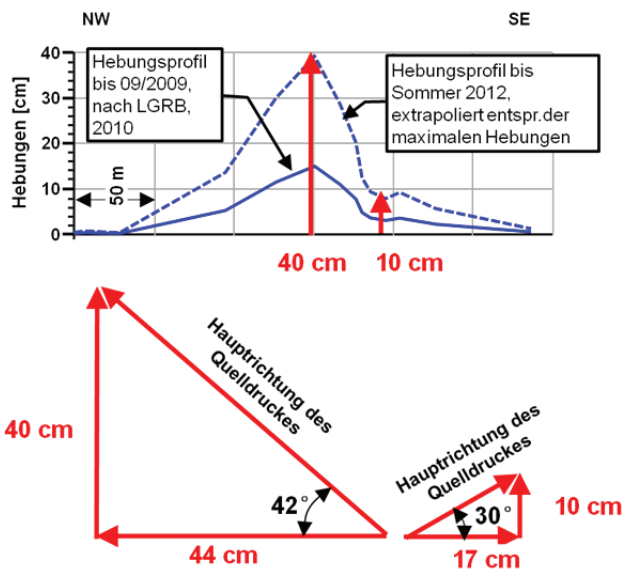


Abb. 11: Abschätzung der Horizontalkomponenten der Verschiebungen aus den Vertikalkomponenten.

Fig. 11: Derivation of horizontal displacements from vertical uplift

Aus dem geologischen Profil ergibt sich, dass die Hauptrichtung des Quelldruckes im Zentrum des betrachteten Bereiches wechselt. Nordwestlich des Zentrums ist die Hauptrichtung Nordwest, südwestlich des Zentrums ist die Hauptrichtung genau entgegengesetzt. Nordwestlich des Zentrums des betrachteten Bereiches fallen die Schichtflächen nach LGRB (2010) im Mittel etwa mit 42° nach Nordwesten ein. Angaben für den Fallwinkel für die nach Südwesten einfallenden Schichten fehlen. Aus dem geologischen Profil werden im Rahmen dieser Betrachtung ca. 30° abgeschätzt.

Die Hauptrichtung der Verschiebungen kann vektoriell in eine vertikale und in eine horizontale Komponente zerlegt werden. Davon ausgehend, dass die gemessene vertikale Hebung der vertikalen Komponente entspricht, kann die horizontale Komponente über die Winkelfunktionen be-

stimmt werden (Abb. 11). Sie beträgt bei einer maximalen vertikalen Verschiebung von 40 cm etwa 44 cm in nordwestlicher Richtung und etwa 17 cm in südwestlicher Richtung; zusammen also etwa 61 cm. Dieser Wert ergibt sich aus der aus dem geologischen Profil abgeleiteten gegenläufigen Bewegungsrichtungen nach Nordwest bzw. Südost (Abb. 9b). Selbst wenn eine gleichsinnige Bewegungsrichtung nach Nordwest angenommen wird, ergibt sich noch eine Horizontalverschiebung von etwa 27 cm. Diese Größenordnung stimmt mit den Beobachtungen der Größe der Risse in etwa überein. Messungen der Horizontalverschiebungen wurden bisher allerdings nicht vorgenommen.

Die sich aus dieser Betrachtung heraus ergebende Dehnungen betragen etwa zwischen

$$\varepsilon = \frac{0,44\text{ m} + 0,17\text{ m}}{35\text{ m}} = 1,7\%$$

für eine gegenläufige Bewegungsrichtung und

$$\varepsilon = \frac{0,44\text{ m} - 0,17\text{ m}}{35\text{ m}} = 0,8\%$$

für eine gleichläufige Bewegungsrichtung.

Diese Größenordnung der Dehnungen kann allenfalls nur von bindigen Böden im plastischen Konsistenzbereich schadlos, d.h. rissfrei aufgenommen werden. Die oberflächennah anstehenden Böden und die Festgesteine im tieferen Untergrund können solche Dehnungen nicht aufnehmen, es muss daher zu Rissen kommen.

Diese Horizontalrisse treten allerdings nicht nur an der Geländeoberfläche auf. Sie erfassen vielmehr den gesamten Bereich des Gebirges oberhalb des Anhydritspiegels, wobei die Rissbreite mit zunehmender Tiefe geringer werden dürfte. Auf diese Weise können Wasserwegsamkeiten entstehen, die den oberen Grundwasserleiter hydraulisch mit dem anhydritführenden Gebirge verbinden.

## 5 Perspektive

Der Quellprozess wird solange andauern, bis

- der Zufluss von Grundwasser in das anhydrithaltige Gebirge durch natürliche Vorgänge aufhört,
- der Zufluss von Grundwasser in das anhydrithaltige Gebirge durch technische Maßnahmen eingestellt wird oder
- der in der Gipskeuperschicht enthaltene, hydraulisch erreichbare Anhydrit zu Gips umgewandelt ist.

Als zusätzliches Problem könnte sich die Auslaugung des Gebirges, also die Verkarstung durch die Lösung des nun entstandenen Gipses darstellen. Durch das Abpumpen des Grundwassers wird der Druckspiegel im tieferen grundwasserführenden Gebirge abgesenkt. Dadurch entstehen nach unten gerichtete hydraulische Gradienten, die zu einer Grundwasserströmung aus dem oberen Verkarstungsbereich führen. Dadurch können einerseits Klüfte freigespült werden und andererseits Lösungsprozesse in Gang gesetzt wer-



den, die so eine Verkarstung des Gebirges zur Folge haben. Durch die Gipslösung wird der Durchfluss weiter erhöht, was den gesamten Verkarstungsprozess weiter beschleunigt.

Es kann in der Folge zu Hohlraumbildung im Gebirge kommen, die sich je nach Standsicherheit der Hohlräume ggf. auch bis an die Tagesoberfläche durch Bildung von Dolinen auswirken können. Derartige anthropogene Verkarstungsprozesse sind bereits aus anderen Schadensfällen bekannt (Garcia-Moreno & Mateos, 2011, Geysel, 2002).

Wie bereits erwähnt zeigen jüngste Messungen (ab September 2011) Senkungen am Rand des bisherigen Hebungsbeereiches. Ob diese Senkungen bereits erste Anzeichen für die wahrscheinlich anschließenden Verkarstungsprozesse sind, kann derzeit noch nicht beurteilt werden.

## Literatur

- GOLDSCHIEDER, N.; BECHTEL, T.D. (2009): Editors' message: The housing crisis from underground damage to a historic town by geothermal drillings through anhydrite, Staufen, Germany, *Hydrogeology Journal*, 17(3), 491-493.
- LGRB – LANDESAMT FÜR GEOLOGIE, ROHSTOFFE UND BERGBAU (2010): Geologische Untersuchungen von Baugrundhebungen im Bereich des Erdwärmesondenfeldes beim Rathaus in der historischen Altstadt von Staufen i. Br. Stuttgart: Umweltministerium Baden-Württemberg.
- LANDESVERMESSUNGSAMT BADEN-WÜRTTEMBERG (1999): Geologische Karte von Baden-Württemberg, Blatt 8112: Staufen im Breisgau, M 1:25.000, 2., überarbeitete, vorläufige Ausgabe, Stand Juli 1999
- LANDESANSTALT FÜR UMWELTSCHUTZ BADEN-WÜRTTEMBERG (2005): Geotope im Regierungsbezirk Freiburg, 1. Auflage, Oktober 2005
- GARCIA-MORENO, I.; MATEOS, R. M. (2011): Sinkholes related to discontinuous pumping: susceptibility mapping based on geophysical studies. The case of Crestatx (Majorca, Spain), *Environmental Earth Sciences*, 64: 523–537.
- SASS, I.; BURBAUM, U. (2012): Geothermische Bohrungen in Staufen i. Br.: Schadensursachen, Sanierungsoptionen und deren Grundlagen, *Geotechnik* 35 (3): 198 – 205
- SASS, I.; BURBAUM, U. (2010) A: Damage to the historic town of Staufen (Germany) caused by geothermal drillings through anhydrite-bearing formations. *Acta Carsologica*, 39 (2), in press
- SASS, I.; BURBAUM, U. (2010) B: Perspektiven der Sanierung der Stadt Staufen im Breisgau, 17. Darmstädter Geotechnik-Kolloquium, Darmstadt, 18. März 2010
- SASS, I., BURBAUM, U.; PETRAT, L. (2009): Staufen im Breisgau: Artesisches Grundwasser, Anhydrit und Karst im Konflikt mit geothermischen Bohrungen, 17. Tagung für Ingenieurgeologie, Zittau, 6.-9. Mai 2009.
- STEINER, W. (1989): Wisenbergtunnel.- Sonderdruck aus Tagungsbericht D037 der Fachgruppe für Untertagbau des SIA, S. 69-80.
- STEINER, W. (1993): Swelling Rock in Tunnels: Rock Characterization, Effect of Horizontal Stresses and Construction Procedures. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, 30(4), S. 361-380.
- STEINER, W. (2007): Einfluss der Horizontalspannungen auf das Quellverhalten von Gipskeuper. *Felsbau*, 25(1), S. 15-22.