

1/2023

130. Jahrgang ISSN 0174-1357

Deutscher Markscheider-Verein e. V.

www.dmv-ev.de · geschaeftsstelle@dmv-ev.de

Oskar-Niemczyk-Stiftung

Markscheidewesen

Bergbauplanung
Genehmigungsverfahren
Raumordnung
Lagerstättenmanagement
Erneuerbare geogene Energien
Bergvermessung
Bergmännisches Risswerk
Geoinformation
Boden- und Gebirgsbewegungen
Bergschäden
Bergbauliche Umweltauswirkungen
Altbergbau und Stilllegungen

*Mine Planning
Authorization Procedures in Mining
Regional and Area Planning
Mineral Resources Management
Unconventional Geogenic Energies
Mine Surveying
Mine Plans
Geographic Information
Ground and Rock Movements
Mining-induced Subsidence Damages
Mining and Environmental Impacts
Abandoned Mines and Mine Closures*

- ▶ **Rudolph, Goerke-Mallet, Homölle, Mütterthies, Perrevort, Teuwsen, Tomlik, Yang:**
Öffentliche Beteiligung im Geomonitoring – Das Fallbeispiel aus dem Kavernenfeld Epe
- ▶ **Kubisch, Schuwerack, Böhme, Möser, Benndorf:**
Hydrostatische Laser-Präzisionsschlauchwaage zur hochgenauen Ermittlung von Neigungen und Setzungen
- ▶ **Merkel, Benndorf, John:**
Datenunterstützte Prognose der Eigensetzung von Tagebaukippen unter Nutzung der satellitengestützten Radarinterferometrie
- ▶ **Hager:**
Integrierte Bewertung altbergbaulicher Risikoobjekte des Steinkohlenbergbaus der RAG Aktiengesellschaft

Öffentliche Beteiligung im Geomonitoring – Das Fallbeispiel aus dem Kavernenfeld Epe

Prof. Dr. Tobias Rudolph¹, Prof. Dr. Peter Goerke-Mallet¹, Andre Homölle⁴,
Dr. Andreas Mütterthies², Holger Perrevort³, Sebastian Teuwsen², Carmen Tomlik¹,
Dr. Chia-Hsiang Yang²

¹ Forschungszentrum Nachbergbau (FZN) der Technischen Hochschule Georg Agricola (THGA),
Herner Str. 45, 44787 Bochum, www.nachbergbau.org, tobias.rudolph@thga.de

² EFTAS Fernerkundung Technologietransfer GmbH Oststraße 2, 48145 Münster

³ Bürgerinitiative Kavernenfeld Epe e.V. (BI-K), Kottiger Hook, 48599 Gronau

⁴ Stadt Gronau (Westf.), Neustraße 31, 48599 Gronau

Einleitung

Die Bereitstellung von Georessourcen stellt einen Eingriff in die Natur und Umwelt dar, bei dem der Eingriff und die Folgen an der Tagesoberfläche sichtbar werden. Insbesondere im Bohrlochbergbau und

der untertägigen Speicherung von Rohstoffen ist der eigentliche Prozess nur teilweise sichtbar und nachvollziehbar. Die markscheiderische Überwachung sowie das Geo- und Umweltmonitoring dienen hierbei der

Das integrierte Geo- und Umweltmonitoring bei der Bereitstellung von Georessourcen stellt eine hochdimensionale Herausforderung (Lage, Höhe/Tiefe, Zeit, Sensor) dar. Dieser Prozess ist bereits für Expert:innen herausfordernd, stellt aber eine Vielzahl an Beteiligten und Betroffenen vor große Probleme, hier ein vollständiges Prozessverständnis aufzubauen. Die Forschungskooperation Epe hat das Ziel die Bodenbewegung am Kavernenspeicher Epe mit einem öffentlichen Beteiligungsprozess erklärbar zu machen und Transparenz in der Bodenbewegungen aufzubauen.

Hierzu wurde die Forschungskooperation aus der Stadt Gronau, der Bürgerinitiative Kavernenfeld Epe e.V., der Firma EFTAS GmbH, Münster und dem Forschungszentrum Nachbergbau der Technischen Hochschule Georg Agricola, Bochum gegründet. Zusätzlich wird dieses Vorhaben durch die Betreiber im Kavernenfeld unterstützt. In der Forschungskooperation werden der markscheiderische Höhenfestpunktriss mit den Ergebnissen der flächigen Radarinterferometrie (SBAS-Methode) und mit den verfügbaren öffentlichen Geodaten fusioniert. So wird ein integriertes Verständnis aufgebaut. Gleichzeitig werden diese technischen Arbeiten mit einem öffentlichen Beteiligungsprozess begleitet.

Die Ergebnisse zeigen, dass neben der bergbaulich induzierten Bodenbewegung weitere Prozesse die Bewegung der Tagesoberfläche, insbesondere am Rand des bergbaulichen Einwirkungsbereiches, beeinflussen. Die wissenschaftlich-neutrale Forschungskooperation stellt somit eine direkte Zusammenführung unterschiedlichster Beteiligter in einem bergbaulichen Projekt dar. Mit den angewendeten Werkzeugen entwickelt sich die markscheiderisch-technische Überwachung hin zu einem integrierten Geo- und Umweltmonitoring mit dem Aufbau eines erweiterten, transparenten Prozessverständnisses

Public Participation in Geomonitoring – The Case Study from the Epe Cavern Field

Integrated geo- and environmental monitoring in the provision of geo-resources represents a high-dimensional challenge (location, altitude/depth, time, sensor). This process is already challenging for experts, but poses great problems for a multitude of participants and stakeholders to build up a complete understanding of the process. The Epe research cooperation aims to make the ground movement at the Epe cavern storage facility explainable with a public participation process and to build up transparency in the ground movement.

To this end, the research cooperation was founded by the city of Gronau, the citizens' initiative Kavernenfeld Epe e.V., the company EFTAS GmbH, Münster, and the Research Center of Post-Mining at the Technische Hochschule Georg Agricola, Bochum. In addition, this project is supported by the operators in the cavern field. In the research cooperation, the mine survey is merged with the results of areal radar interferometry (SBAS method) and with the available public geodata. In this way, an integrated understanding is built up. At the same time, this technical work is accompanied by a public participation process.

The results show that in addition to mining-induced ground motion, other processes influence the movement of the day surface, especially at the edge of the mining impact area. The scientifically neutral research cooperation thus represents a direct bringing together of the most diverse participants in a mining project. With the applied tools, the mine survey is developing into an integrated geo- and environmental monitoring with the development of an extended, transparent process understanding.



Rudolph

© Volker Wiciok, Lichtblick
– Visuelle Medien



Goerke-Mallet

© Volker Wiciok, Lichtblick
– Visuelle Medien



Yang



Mütterthies

Schlagworte Keywords

Kavernenspeicher
Cavern Storage

Radarinterferometrie
Radar-interferometry

SBAS
SBAS

offene Geodaten
public geodata

Risswerk
mine survey

öffentliche Beteiligung
public participation

technischen Überwachung des Bereitstellungsprozesses und dem Aufbau eines Prozessverständnisses und unterstützt damit die Beteiligung der Öffentlichkeit. Dieser öffentliche Beteiligungsprozess geht über die einfache Kommunikation („Mitteilung von Ergebnissen“) hinaus und stellt eine multilaterale Beteiligung der unterschiedlichen Stakeholder dar. Vor allem in der aktuellen Energiewende, der Frage zur nachhaltigen Energieversorgung u.a. mit Wasserstoff und den Problemen zur Versorgungssicherheit ist es notwendig, dass verschiedene Beteiligungsformate genutzt werden.

Das Kavernenfeld Epe

Das Kavernenfeld Epe liegt im Nordwesten von Nordrhein-Westfalen im deutsch-niederländischen Grenzgebiet von Gronau (D) und Enschede (NL). Am 24. Juli 1964 wurde die Bohrung Epe-1 an der Landstraße von Gronau nach Graes abgeteuft (Abbildung 1).

Das Ziel war die mögliche Erkundung nach Erdgas, denn es hatte zu dieser Zeit erste vielversprechende Gasfunde, unter anderem in den Niederlanden, gegeben. Aber anstelle von Erdgas wurden mehrere Steinsalz-Folgen der Zechstein-Formation gefunden, was zu diesem Zeitpunkt noch nicht bekannt war [1] [2]. Daraufhin erfolgte die Erschließung der Salzabfolgen und dient heute der untertägigen Solegewinnung und der Produktspeicherung in bis zu ca. 400 m mächtigen Zechsteinfolgen.

Die primären Gewinnungsrechte und die bergrechtliche Verantwortung für den Solbetrieb liegen bei der Salzgewinnungsgesellschaft Westfalen mbH & Co. KG (SGW). Die SGW ist auch das zentrale Unternehmen, welches die markscheiderische Überwachung am Standort durchführt. Die bergrechtliche Verantwortung zur untertägigen Speicherung liegt bei den verschiedenen Speicherbetreibern (Tabelle 1).

Bis zum jetzigen Zeitpunkt sind über weit 100 Bohrungen geteuft und 114 Kavernen gesolt worden. Insgesamt erstreckt sich das Kavernenfeld östlich der Siedlung Gronau-Epe auf einer Fläche von etwa 5 km mal 5 km und hat ein Erweiterungsgebiet in Richtung der niederländischen Grenze. Im sogenannten Alt-feld, dem östlichen Teil des Kavernenfeldes, sind die Bohrplätze und die untertägigen Kavernen in einer Art regelmäßigem Raster mit einem seitlichen Abstand von ca. 300 m angelegt. Der westliche, neue Teil des Kavernenfeldes umfasst Sammelbohrplätze mit mehreren abgelenkten Bohrungen.

Insgesamt hat die untertägige Raumnutzung die Entwicklung einer übertägigen Senkungsmulde ausgelöst, die zentral durch die Markscheiderei der SGW überwacht wird (Abbildung 1). Diese bergbaulich induzierten Bodenbewegungen im Kavernenfeld laufen sehr langsam und gleichmäßig ab, wobei eine saisonale Überprägung mit der Art der Ein- und Aus-speicherung (u.a. Winter mit geringen Temperaturen) erkennbar ist (Abbildung 2). Auch zeigt sich, dass die Kavernenbetreiber mit wenigen Kavernen eine höhere zeitliche Schwankungsbreite in den Arbeitsgasfüllständen haben.

An der Tagesoberfläche ist das Gebiet im östlichen Teil geprägt durch die landwirtschaftliche Nutzung und eine Streusiedlung, dem Kottiger Hook. Zwischen dieser Streusiedlung und dem Ortsteil Gronau-Epe fließt der Fluss Dinkel, der den überregionalen Vorfluter für die kleineren Fließgewässer darstellt (Abbildung 1). An der Dinkel hat es vom 27. August 2010 bis zum 29. August 2010 ein Hochwasser gegeben, welches Teile des Stadtgebietes von Epe überflutet und zu einem Rückstau in die lokalen Vorfluter geführt hat [6] [7]. Der westliche Teil des Gebietes ist geprägt durch zwei Moor- und Naturschutzgebiete, dem Amtsvenn und dem Hündfelder Moor. Beide Moorgebiete haben nicht

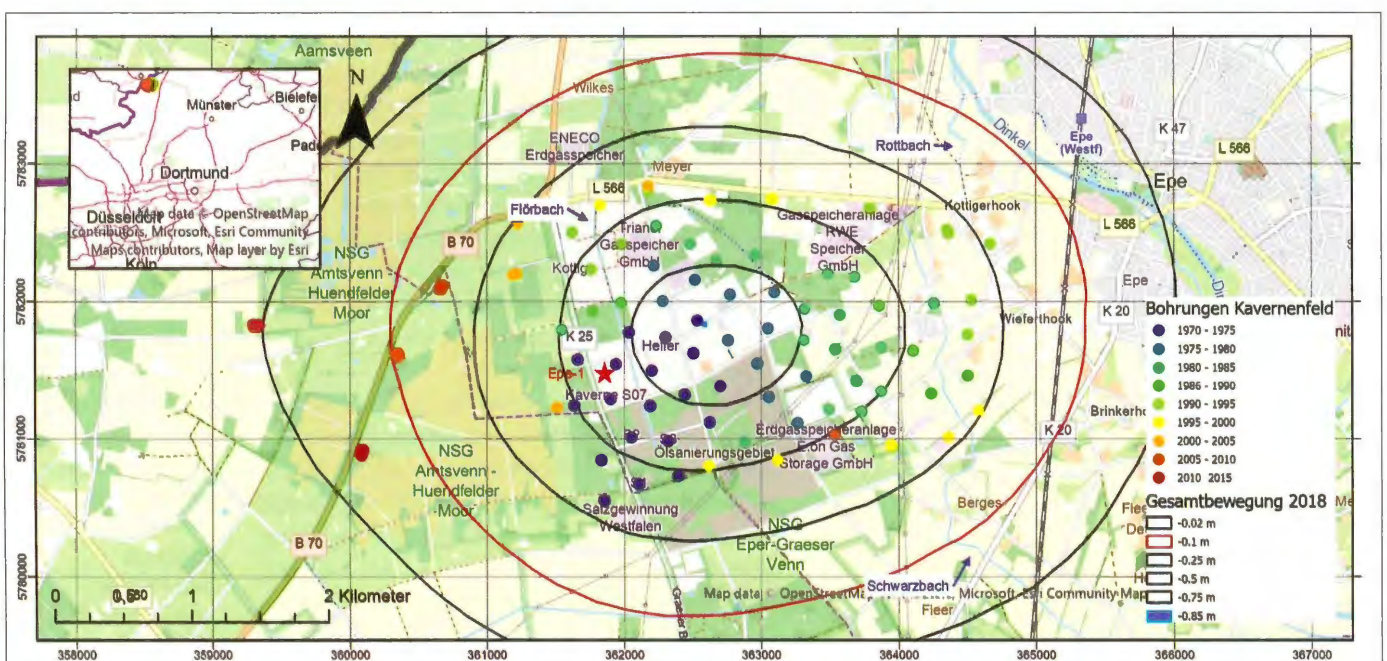


Abb. 1: Karte des Kavernenfeld Epe und Darstellung der Senkungsmulde für 2018 [nach 23] (Kartengrundlage ESRI ArcGIS, Open Street Maps 2022) [3].

Tabelle 1: Anzahl der Betreiber im Kavernenfeld Epe mit der Anzahl an Kavernen und den Speicherprodukten [4].

Betreiber/ Eigentümer	Anzahl Kavernen	Gesamtvolumen (Mio. m3)	max. nutzbares Arbeitsgas (Mio m3)	Produkt
Salzgewinnungsgesellschaft Westfalen mbH & Co. KG	32	---	---	Sole
Salzgewinnungsgesellschaft Westfalen mbH & Co. KG	5	---	---	Rohöl
Air Liquide Maritime	1	---	---	Helium
ENECO Gasspeicher GmbH	2	132	94	Erdgas
KGE - Kommunale Gasspeichergeres. Epe mbH & Co. KG	4	241	186	Erdgas
NUON Epe Gasspeicher GmbH	7	410	300	Erdgas
RWE H-Gas Storage West GmbH	10	509	388	Erdgas
RWE L-Gas Storage West GmbH	4	246	178	Erdgas
RWE NL-Gas Storage West GmbH	6	388	296	Erdgas
Trianel Gasspeicher Epe GmbH & Co. KG	4	249	190	Erdgas
Uniper Energy Storage GmbH (H-Gas, L-Gas)	29-H/10-L	2.408	1.916	Erdgas
Gesamtsumme	114	4.583	3.548	

mehr die ursprüngliche, natürliche Ausdehnung, da hier in der Vergangenheit eine große, flächige Abtorfung erfolgt ist. Aktuell werden die beiden Mooregebiete wieder re-naturiert und damit auch wieder vernässt.

In dem Betrieb des Kavernenfeldes hat es am 12. April 2014 einen gravierenden, betrieblichen Unfall gegeben, bei dem es zu einer Schädigung von Natur und Umwelt gekommen ist [8]. Bei dem Versagen der untertägigen Rohrtour in einer Kaverne im Altfeld des Kavernenfeldes ist es zu einem Austritt des Speichermediums Rohöl gekommen. Dieser Unfall hat eine breite öffentliche Diskussion zur Überwachung von Kavernenspeichern ausgelöst. Seit diesem Zeitpunkt steht insbesondere die Bodenbewegung an der Tagesoberfläche im Fokus [9] [10] [11]. In diesem Kontext sind auch die Arbeiten der lokalen Bürgerinitiative Kavernenfeld zu nennen [12].

Um ein weitergehendes Verständnis zu den Bodenbewegungen im Kavernenfeld zu erreichen, ist die Verwaltung der Stadt Gronau durch einen Ratsbeschluss vom 7. Oktober 2020 aufgefordert worden eine unabhängige Setzungsmessung im Bereich des Kavernenfeldes durchzuführen [13]. Diese Entscheidung wurde durch mehrere Meldungen im WDR-Fernsehen, im WDR-Radio und lokale Zeitung begleitet [10] [11] [14].

Das Ziel der Forschungsk Kooperation Epe

Aus dieser öffentlichen Diskussion heraus entstand die „Forschungskoope ration Epe“ mit den Kooperationspartnern Stadt Gronau, BI-Kavernenfeld e.V. (BI-K), EFTAS GmbH, Münster und dem Forschungszentrum Nachbergbau (FZN) der Technischen Hochschule Georg Agricola (THGA), Bochum. Hierzu erfolgte

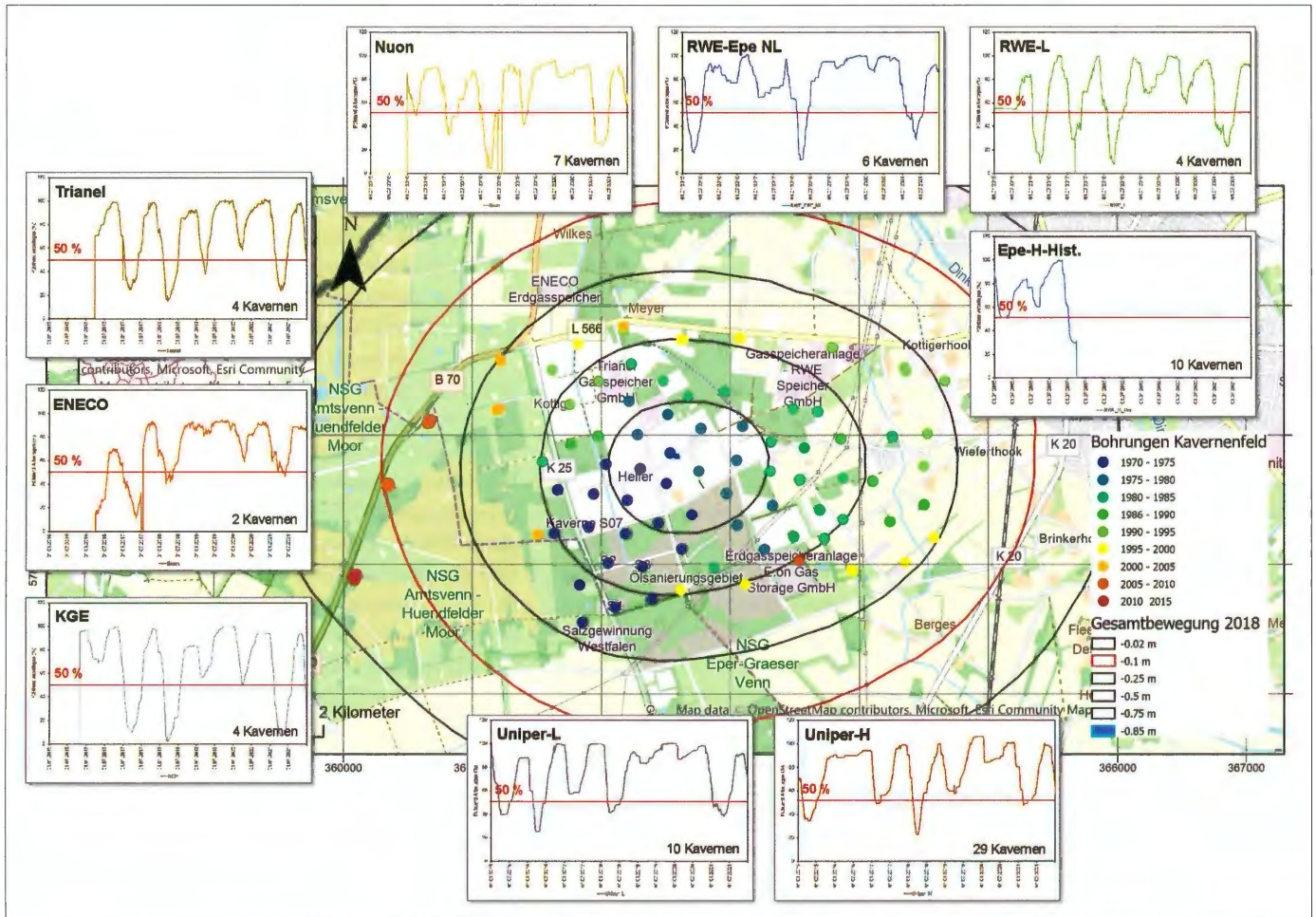


Abb. 2: Darstellung der Arbeitsgas Füllstände der unterschiedlichen Kavernen für den Zeitraum 1. Januar 2011 bis zum 1. März 2022 pro Betreiber mit einer groben räumlichen Zuordnung [5] [4] (Kartengrundlage nach ESRI ArcGIS und Open Street Maps 2022).

ein Beschluss des Ausschusses für Mobilität, Umwelt und Klimaschutz (A-MUK), der einstimmig von den Vertretern angenommen wurde [15] [14]. Die Kooperation dient der Aufarbeitung mehrerer Frage- und Aufgabenstellungen:

1. Vertiefung eines technischen Verständnisses zum Bohrlochbergbau und zur Untertagespeicherung im Kontext der Bodenbewegung und zur Bestimmung des Einwirkungsbereiches
2. Nutzung von Methoden der Radar-Satellitenfernerkundung (EU-Copernicus Programm) zur Erhöhung der flächigen Überwachungsfrequenz sowie der retrospektiven Zeitreihenanalyse unter Nutzung des markscheiderischen Risswerkes, GNSS Messungen von Geobasis NRW, offenen Geodaten (u.a. Geobasis NRW, Geoportal NRW) sowie vor-Ort Analysen
3. Aufbau eines integrierten Verständnisses zu Bodenbewegungen am Rande der Senkungsmulde
4. Aufbau eines Verständnisses zur hydrologischen und hydrogeologischen Entwicklung des Kavernenfeldes, insbesondere vor dem Gesichtspunkt des Hochwasserschutzes
5. Zusammenführung der Kompetenzen und Beteiligten und Bürger für die vor-Ort Analyse und Wissenschaftstransfers
6. Wissenschaftlich-technische und unabhängige Bearbeitung der Fragestellungen

Zur Sicherstellung transparenter Kommunikation und Beteiligung wurde zeitgleich zur Forschungskoope-
 ration ein Lenkungsausschuss eingerichtet, der aus Vertre-
 tern der Politik, der Kommunal- und Kreisverwaltung
 sowie der Bürgerinitiative bestand. Die SGW und die
 verschiedenen Betreiber der Untergrundgasspeicher im
 Kavernenfeld haben von dem Angebot der direkten
 Mitwirkung abgesehen, um der Forschungskoope-
 ration eine umfängliche und unvoreingenommene
 Bearbeitung der Fragestellungen zu ermöglichen.
 Durch die SGW wurde das Risswerk, insbesondere
 der Höhenfestpunktriss (Bodenbewegungsriss) und
 weitere technische Geodaten zur Verfügung gestellt.

Der Prozess der öffentlichen Beteiligung

Gesellschaftliches Vertrauen – insbesondere in die Wis-
 senschaft – ist ein hohes Gut, das in wissenschaftlich-
 technischen Projekten aufgebaut und kontinuierlich
 aufrechterhalten werden sollte. Dies gilt insbesondere
 in Projekten des bergbaulichen Lebenszyklus, bei
 denen ein Eingriff in die Natur und Umwelt und
 gleichzeitig eine Veränderung der gesellschaftlichen
 Wahrnehmung, u.a. über schnelle Verfügbarkeit von
 Informationen (u.a. Internet, soziale Medien) erfolgt.
 Diese machte es erforderlich, Transfermaßnahmen
 aktiv aufzubauen, um einerseits Verständnis für die
 wissenschaftliche Arbeitsweise und die erarbeiteten
 Ergebnisse zu generieren und andererseits, um dadurch
 das gesellschaftliche und subjektive Vertrauen der
 Bürgerinnen und Bürger in dem Untersuchungsgebiet
 aufrechtzuerhalten.

Die Herausforderungen lagen primär in der Ver-
 mittlung wissenschaftlich-technischer Inhalte an die
 Zielgruppe der Bürgerinnen und Bürger im Unter-
 suchungsgebiet, die unterschiedliche Anforderungen
 sowie Erfahrungen mitbrachten und zudem über eine
 bereits feststehende Meinung verfügten. Das sekun-
 däre Ziel war es einen Verständnisprozess anzuregen,
 der eine faktenbasierte Bewertung der vergangenen,
 gegenwärtigen und zukünftigen Entwicklungen der
 Kavernennutzung möglich macht.

Die ersten Schritte der Wissenschaftskommuni-
 kation umfassten den Aufbau einer gemeinsamen,
 wissenschaftlichen Basis, eines sog. Wissenskorpus (Ab-
 bildung 3). Hierzu wurden aufbauend auf den markt-
 scheiderischen Aufgaben, die verschiedenen Aspekte
 des bergbaulichen Lebenszyklus, die Arbeitsweisen des
 Geo- und Umweltmonitorings sowie die Einsatzberei-
 che der modernen Satelliten-Fernerkundung erläutert.

Zusätzlich wurde eine Webseite (www.monitoring-epe.de) aufgebaut um die Termine, Inhalte und Ergeb-
 nisse der Forschungskoope-
 ration offen an die interes-
 sierte Öffentlichkeit zu bringen. Diese Webseite ist das
 essentielle Bindeglied in der Beteiligung und bietet die
 Möglichkeit mit dem Team der Forschungskoope-
 ration in Kontakt zu treten. Beispielweise wurden so die
 Ergebnisse der Befahrungen und die entsprechenden
 Fotodokumentationen hier bereitgestellt. Somit wird
 Transparenz für die bergbaulichen Maßnahmen erreicht
 und Vertrauen aufgebaut. Als wichtiges Werkzeug der
 Beteiligung umfasste die Webseite ein WebGIS mit
 öffentlich verfügbaren und amtlichen Geodaten. Somit
 kann die interessierte Öffentlichkeit selbständig die
 Ergebnisse nachvollziehen und einen eigenen Einblick
 in die vor-Ort Situation erhalten.

Auch wurde über die Webseite eine Umfrage für die
 Öffentlichkeit publiziert. Diese Umfrage diente dazu,
 zusätzlich die Interessen und Bedürfnisse, die Ängste
 und Sorgen, aber auch die Ideen für weiterführende For-
 schungsfragen zu ermitteln und diese unmittelbar in die
 Bearbeitung der Forschungskoope-
 ration einzubeziehen.

Zusätzlich wurden Verbände, Unternehmen und
 Behörden angesprochen und über die Aktivitäten in-
 formiert. Über die Gespräche mit den im Kavernenfeld
 aktiven Unternehmen wurden Geodatenätze für die
 Arbeit zur Verfügung gestellt. Aufgrund der bergrecht-
 lichen Fragestellungen der Forschungskoope-
 ration ist die Bezirksregierung Arnsberg – Abteilung 6, Bergbau
 und Energie in NRW direkt eingebunden worden.
 Für die vermessungstechnischen Aspekte sind direkte
 Kontakte zu den Behörden auf Kreis- und Landesebene,
 namentlich zu Bezirksregierung Köln – GeoBasis NRW
 und zum Kreis Borken – FB62 Geoinformation und
 Liegenschaftskataster aufgebaut worden.

Um in der interessierten Bevölkerung ein Verständ-
 nis für die oftmals wissenschaftlich-technisch kom-
 plexen Vorgänge herzustellen, führte die Forschungs-
 kooperation regelmäßig Informationsveranstaltungen
 durch, die von Expertinnen und Experten aus der
 hochschulischen Wissenschaftskommunikation beglei-
 tet wurden (Abbildung 3). In den fünf, öffentlichen
 Informationsveranstaltungen, die u. a. im Ratssaal

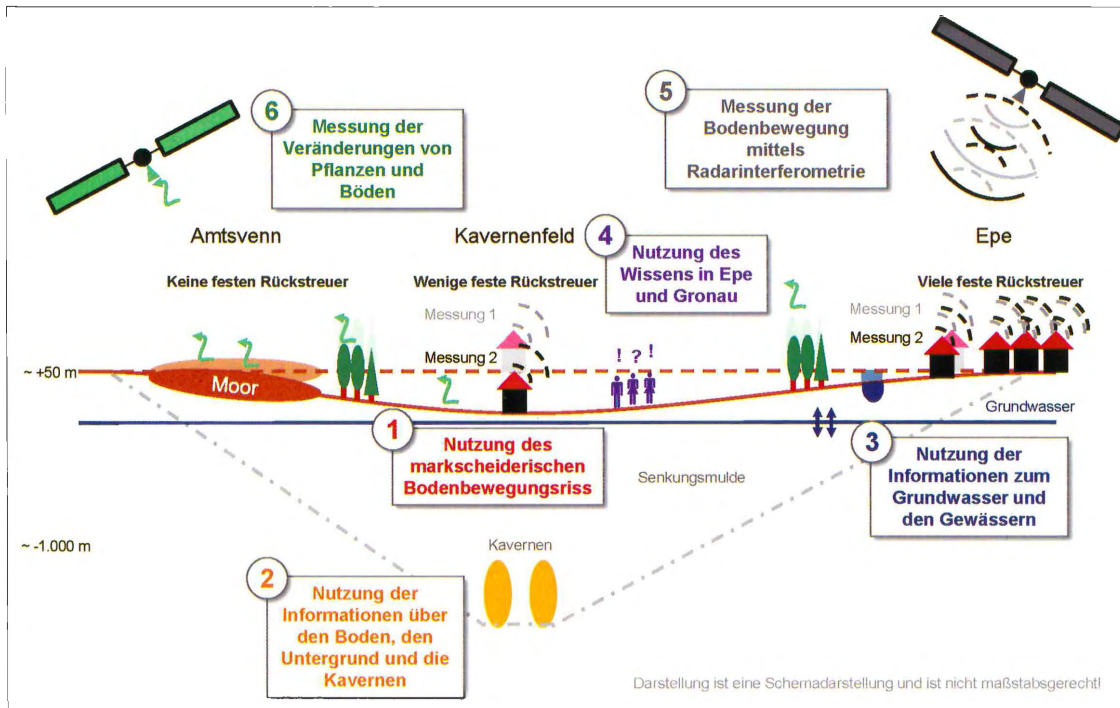


Abb. 3: Basis des technischen Dialogprozesses.

der Stadt Gronau durchgeführt wurden (Dauer ca. 2 Stunden), ging es inhaltlich um:

1. Einführung in den Kavernenbetrieb: Der Bohrlochbergbau im Eper Amtsvonn und seine Auswirkungen unter Bezugnahme einer 3D Untergrunddarstellung
2. Bergrecht, Bergschäden, Bergschadenkunde
3. Fahrradexkursion Kavernenbetrieb
4. Die Zukunft des Kavernenbetriebs im Eper Amtsvonn
5. Umwelt- und Geomonitoring von Bergwerkstandorten

Die Fahrradexkursion durch den Kavernenbetrieb ermöglichte eine ganz besondere Form der Partizipation und der Transparenz: Bürgerinnen und Bürger hatten die Chance, vor Ort ihre Fragen zu stellen, die von den Expertinnen und Experten der Forschungskoooperation direkt „am Objekt“ erklärt werden konnten. Darüber hinaus erfolgte eine Vernetzung aller beteiligten Akteure in einer lockeren, vertrauensfördernden Atmosphäre.

Zusätzlich wurden in der studentischen Ausbildung in mehreren Lehrveranstaltungen Einzelaspekte wie beispielsweise die Hydrogeologie aufgearbeitet und so eine weitere wissenschaftlich-neutrale Bearbeitung durchgeführt [16]. Die Ergebnisse wurden direkt von der Forschungskoooperation aufgenommen.

Die vor-Ort Befahrungen

Die Auswertung der verfügbaren, öffentlichen Geodaten von GeoBasis NRW und aus dem Geoportal NRW sowie eine umfangreiche Internet- und Literaturrecherche zeigten, dass es im Gebiet des Kavernenfeldes Epe zu einer Überlagerung verschiedener Effekte kommt, die eine Bodenbewegung auslösen können. Hierbei spielen auch die Folgen des Klimawandels eine wichtige Rolle. Als Auslöser der Bodenbewegung und möglicher Gebäudeschäden sind zu nennen:

1. Der untertägige Kavernenbetrieb
2. Das Restmoor Amtsvonn und Hündfelder Moor mit den z.T. abgetorften und landwirtschaftlich genutzten Flächen
3. Starke Schwankungen des Grundwasserspiegels
4. Zersetzung von Biomasse durch Luftzufuhr in den Boden
5. Ehemaligen Auengebiete entlang von Vorflutern mit Wasserspiegelschwankungen
6. Lokal sehr unterschiedlich ausgebildete, setzungsempfindliche Böden mit einer starken Neigung der Bildung von Staunässe
7. Alte Streusiedlungen mit einem Alter der Errichtung von zum Teil >60 Jahren und einer modernen Inwertsetzung der Gebäudehüllen und -erweiterungen

Aufgrund dieses Zusammenspiels der unterschiedlichen Komponenten der Bodenbewegung wurden die verfügbaren Geodaten als Zeitreihe ausgewertet und fast monatliche Befahrungen durchgeführt. Sämtliche Daten wurden in einem geographischen Informationssystem umgesetzt (Abbildung 4).

Somit wurde in einem ersten Schritt auf Basis des Höhenfestpunktrisses alle verfügbaren geodätischen Datensätze zusammengeführt und bewertet (Abbildung 4, A-E). Neben der Auswertung der Füllstände des Untergrundspeichers wurde eine bergschadenkundliche Befahrung durchgeführt um die Effekte an der Tagesoberfläche zu verstehen (Abbildung 4, F, G). Für die ausgewählten Objekte wurde eine Dokumentation und Einschätzung der Bodenbewegungen sowie der Interaktion mit der Gebäudeinfrastruktur bewertet. Die drei Objekte sind durch die BI-K ausgewählt worden. Es wurde ein Gebäudekomplex im Senkungsmaximum, ein Gebäude im Senkungsrandbereich, an der 10 cm Senkungslinie und ein Gebäude im Senkungsrandbereich, aber im Auenbereich des großen Vorfluters Dinkel befahren.

Zusätzlich ein einfaches Untergrundmodell aufgebaut, um den Einfluss der Kavernen, der tieferen geologischen Schichten und der Tektonik auf die Tagesoberfläche bewerten zu können (Abbildung 4, H). In der weiteren raumzeitlichen Auswertung wurden die Ergebnisse zu den Deckschichten insbesondere auf Ausbreitung des ehemaligen Moorgebietes, Bodentypen, -eigenschaften und zur Hydro-(geo-)logie sowie Bodenfeuchte ausgewertet (Abbildung 4, I-N). Auch erfolgte eine Bewertung der verfügbaren Geodaten zu Hochereignissen (Abbildung 4, O).

Bei den unterschiedlichen Befahrungen wurden zusätzlich 14 weitere Objekte, die über das gesamte Kavernenfeld verteilt sind und ebenfalls durch die BI-K ausgewählt worden waren, in der Außenansicht dokumentiert, um eine Detailauswertung der Ergebnisse des Geo- und Umweltmonitoring mit den Radar-Satellitenfernerkundungsdaten durchzuführen.

Die Radar-Satellitenfernerkundung

Die Radar-Satellitenfernerkundung bietet die Möglichkeit aus dem Vergleich einer Zeitreihe von Datensätzen Bodenbewegungen abzuleiten. Hierbei handelt es sich um die Radarinterferometrie (InSAR = Interferometric Synthetic Aperture Radar). Dabei wird zumeist die sog. Persistent-Scatterer-Interferometrie (PSI) angewendet, die jedoch auf das Vorhandensein stabiler Rückstreuer

(PS) für das Radarsignal wie z. B. Gebäude angewiesen ist [25] [26] [27]. Bei der Anwendung der Radarinterferometrie für ein ländlich geprägtes Gebiet, wie das Kavernenfeld Epe, muss jedoch eine Methode gewählt werden, die trotz einer sehr geringen Bebauungsdichte eine möglichst flächendeckende Darstellung der Bodenbewegungen ermöglicht. Eine für diesen Zweck geeignete Methode ist Small-Baseline-Subset (SBAS) [28] [29]. Die ausgeführten radarinterferometrischen Analysen basieren daher primär auf SBAS. Zusätzlich wurde die Persistent-Scatterer-Interferometrie unter der Nutzung fester Rückstreuer angewendet. Die Ergebnisse sind jedoch wegen der unterschiedlichen Verfahren nicht redundant und nicht direkt vergleichbar. Vielmehr stellen sie sich ergänzende Informationen dar. Während PSI die Bewegung von Gebäuden als stabile Rückstreuer des Radarsignals abbildet, jedoch keine Informationen der Bodenbewegungen des Umfeldes dieser Objekte enthält, stellt SBAS auch die Bodenbewegungen unbebauter Flächen dar. Bei der Analyse und Interpretation der Ergebnisse sind diese Unterschiede zu berücksichtigen und können einen Mehrwert für die Differenzierung der Ursachen der Bodenbewegungen darstellen. So kann SBAS auch die durch Veränderungen der Bodenfeuchte induzierten Bewegungen des Oberbodens abbilden [30] [31], während die durch PSI ermittelten Bewegungen der Gebäude bei ausreichend tiefer Gründung der Gebäude stärker die durch den Kavernenbetrieb verursachten Bodenbewegungen

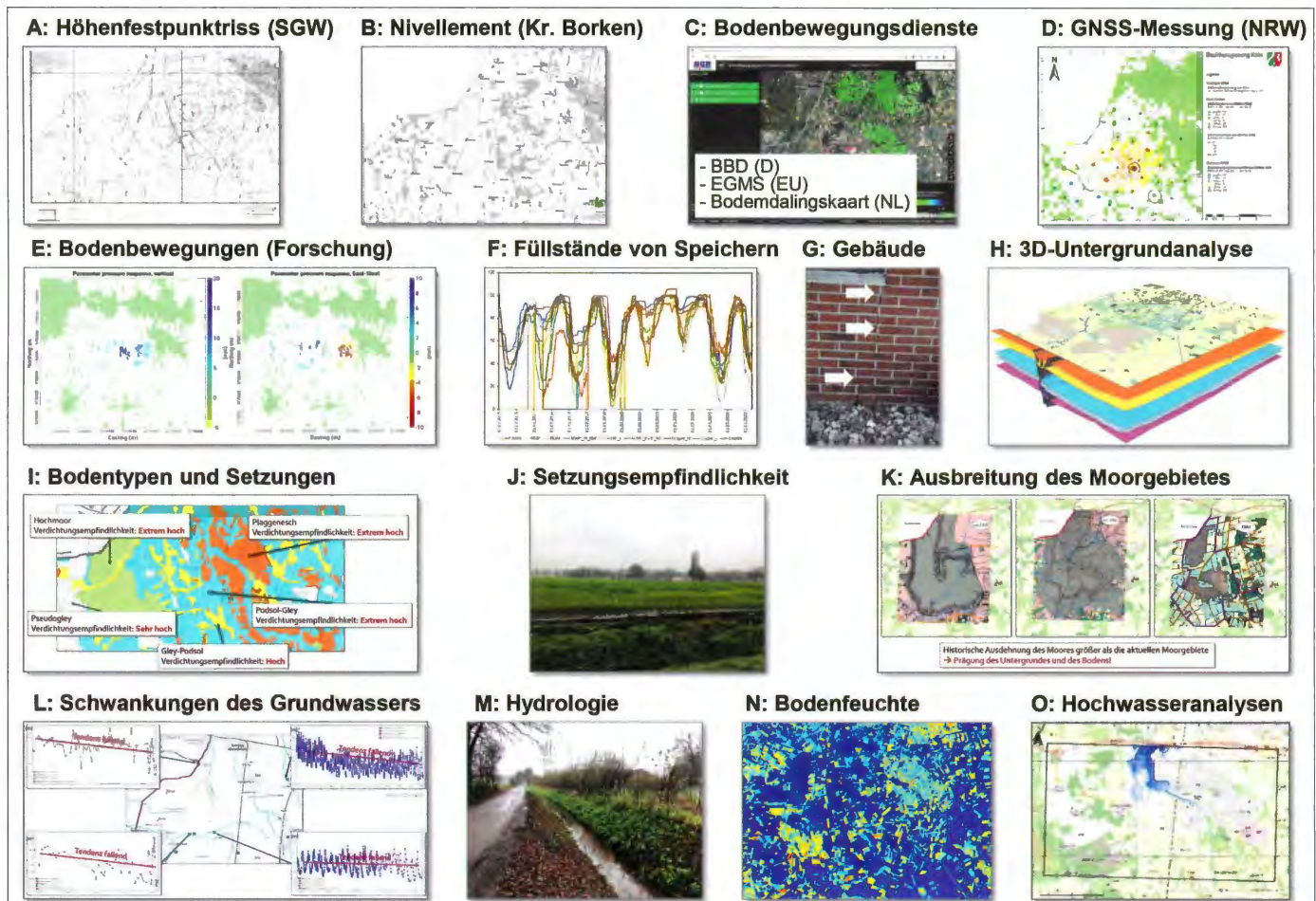


Abb. 4: Darstellung der Ergebnisse der Geodatenfusion [5] [17] [18] [19] [20] [21] [22] [23] [3] [24] [9].

abbilden dürften. Zur genaueren Differenzierung dieser Prozesse sind jedoch weitere Arbeiten notwendig.

Der Bodenbewegungsdienst Deutschland (BBD) (<https://bodenbewegungsdienst.bgr.de/>), welcher durch die Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR) bereitgestellt wird, zeigte zu Beginn der Forschungskoooperation die Bodenbewegung nur als Bewegung in Richtung des Sensors (line-of-sight) und nicht als vertikale Bewegung. Dies hatte bei den beteiligten Parteien zu Verständnisproblemen geführt. Außerdem wurden die Ergebnisse im Webportal des BBD nur als Persistent-Scatter-Interferometry (PSI) dargestellt. Der europäische Bodenbewegungsdienst (European Ground Motion Service, EGMS) (<https://egms.land.copernicus.eu/>) wurde im Verlauf der Forschungskoooperation freigeschaltet und zeigt die vertikale Bewegung von Persistent-Scatterer-Elementen. Das niederländische Äquivalent, der Bodemdalingskaart (<https://bodemdalingskaart.portal.skygeo.com/>) stellt die Bodenbewegungen ebenfalls vertikal dar. Bei diesem Dienst ist aber zu berücksichtigen, dass das Kavernenfeld Epe im Randbereich der Auswertung, also außerhalb der Kernbetrachtung, liegt. Hierdurch können Randeffekte die Interpretation beeinflussen.

Daher war es notwendig für das Kavernenfeld Epe eine dezidierte radarinterferometrische Auswertung durchzuführen. In der Bearbeitung wurden folgende Datensätze mit den Eigenschaften genutzt:

- 650 Szenen Sentinel-1
- Bodenauflösung 30 m * 30 m
- Zeitspanne vom 20.11.2015 bis 28.12.2021
- Ascending + Descending Orbit
- Polarisation VV

Die mittels der SBAS Methode berechneten Bodenbewegungen wurden als kartenbasierte Zeitreihendarstellung umgesetzt und zusätzlich explizit für die 17 Objekte im Kavernenfeld im Detail betrachtet.

Das Ergebnis der Fusion der Geodaten

Die Komplexität der Forschungskoooperation liegt in der Zusammenführung und Bewertung der multisensorellen und -temporalen Datensätze und der Validierung mit den vor-Ort Beobachtungen. Auch ist hierbei zu berücksichtigen, dass die zu beobachtenden Effekte der Bodenbewegungen im Verhältnis zu anderen bergbaulich geprägten Gebieten (u.a. Ruhrgebiet) überschaubar sind und sich wechselseitig überlagern können.

Der Prozess der öffentlichen Beteiligung in der Forschungskoooperation war sehr erfolgreich. So zeigte die initial durchgeführte Umfrage über die Webseite der Forschungskoooperation den hohen Bedarf an Information und das sehr weitreichende, technische Fragstellungen vorlagen (Abbildung 5). Des Weiteren wurde die Arbeit der Forschungskoooperation durch mehrere Artikel in Zeitungen und Zeitschriften begleitet [31] [32] [33] [34] [35]. Auch konnte die Arbeit auf einer Reihe von Konferenzen präsentiert und hierzu Veröffentlichungen eingereicht werden. Insgesamt konnte so die öffentliche Wahrnehmung zur Frage der öffentlichen Beteiligung im Geo- und Umweltmonitoring gesteigert werden [36] [37] [38] [39].

Die Auswertung der Daten der Radar-Satellitenfernerkundung lieferte für das Kavernenfeld erstmalig eine flächige Darstellung der Bodenbewegungen von 17.1.2016 bis 28.12.2021. Diese flächige Auswertung stellt eine deutliche Erweiterung zu den bereits ver-

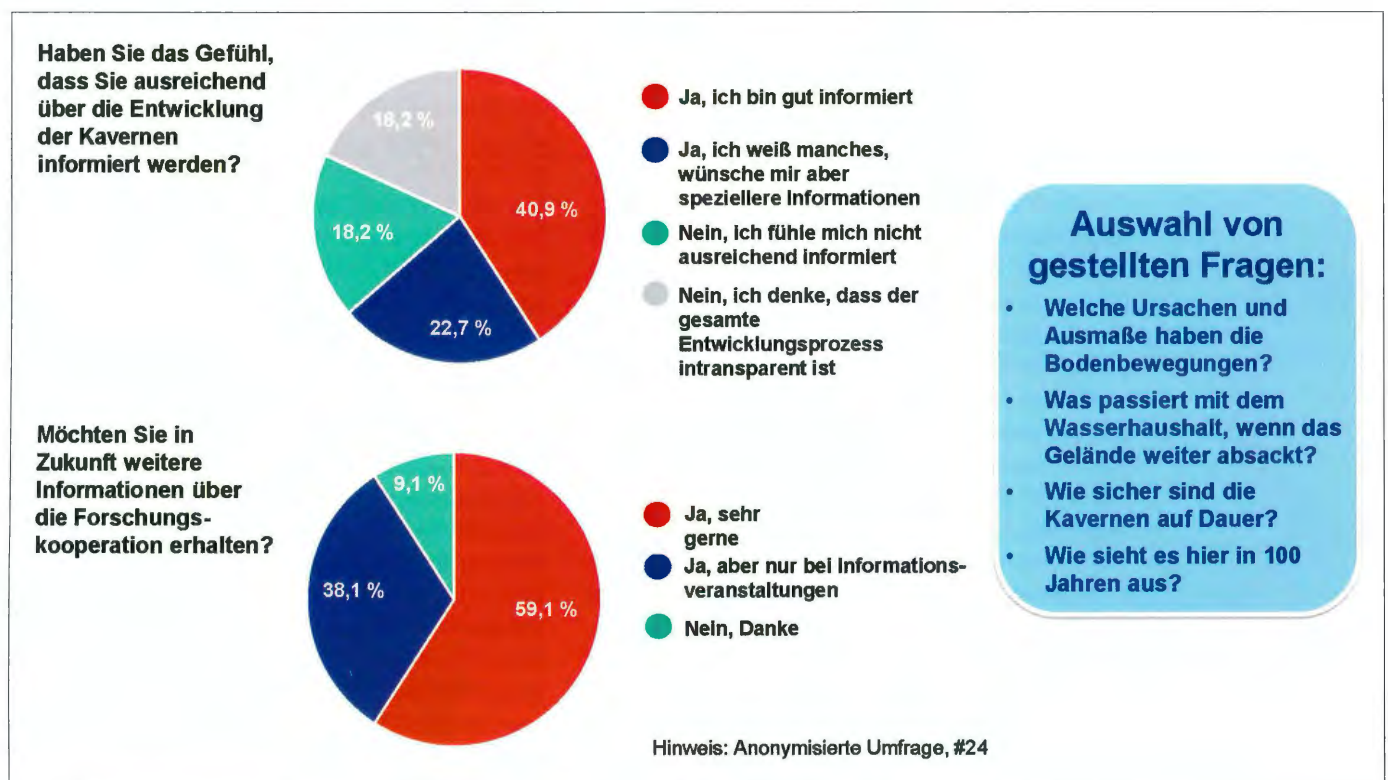


Abb. 5: Darstellung der Umfrage über die Webseite der Forschungskoooperation.

fügbaren, öffentlichen Bodenbewegungsdaten dar (Abbildung 6 A). Die Ergebnisse dieser Auswertung zeigen zwar deutlich die bergbauliche Beeinflussung, dennoch ist die gesamte Bodenbewegung nicht gleichmäßig. Dies ist insbesondere in den Randbereichen hin zum Moorgebiet und hin zur Dinkel auffällig (Abbildung 6 B). Somit stellen diese flächigen Ergebnisse der Radar-Satellitenfernerkundung eine wichtige Erweiterung und Ergänzung zum Höhenfestpunktriss dar. Dies ist insbesondere für die Bereiche im Umfeld der wiederholt eingemessenen Festpunkte wichtig.

Die jährlich durchgeführten Bodenbewegungs-nivellements liefern punktuelle Informationen und die Radar-Satellitenfernerkundung liefert zeitlich und räumlich hoch aufgelöste Bodenbewegungen. Insofern wird angeregt die Daten der Radarinterferometrie im Sinne „fremder Unterlagen“ gemäß §8 der Markscheider Bergverordnung dem Risswerk beizufügen [40]. Der beschriebene Prozess dieser Forschungskoope-ration kann als Einstieg in die Überprüfung der Ergebnisse der Radar-Satellitenfernerkundung bezüglich Plausibilität gewertet werden. Die ist zu vergleichen mit Daten zur Geologie und Geophysik gemäß §8, Abs. 3 [40].

Die bergschadenskundliche Befahrung an ausgewählten Objekten zeigte ein differenziertes Bild. Bei den dokumentierten Objekten waren keine typischen Schieflagen und keine Ausbildungen von Absätzen oder Rissen auf den großen gepflasterten Flächen der Hofstellen festzustellen. Auch waren die Rissbildungen in den Fassaden/Außenhüllen der Gebäude meist nicht mit Rissen in den Innenwänden sowie Kellern und/oder Bodenplatte zu korrelieren. Die dokumentierten Schäden sind vermutlich ein Zusammenspiel natürlicher, lokaler Bodenbewegung mit anthropogenen Faktoren zum Teil ohne bergbauliche Beeinflussung.

Die Begehungen des Kavernenfeldes zeigten sehr vielfältige Ergebnisse. Die geologische und bodenkundliche Kartierung bestätigte, dass die Verbreitung der Moorfolge und der humosen Schichten über die Grenzen des heutigen Naturschutzgebietes hinausgehen (Abbildung 6 B). Dies konnte sehr deutlich an den dunklen, humushaltigen Böden, welche landwirtschaftlich genutzt werden, festgestellt werden [37] [38]. Hierbei zeigte sich auch sehr deutlich das Problem der Staunässebildung nach längeren Regenereignissen (Abbildung 4). Gleichzeitig konnten aber keine Einflüsse aus dem Deckgebirge, wie geologischen Unstetigkeiten, kartiert werden.

Die hydro-(geo-)logische Kartierung zeigte die nach Norden entwässernden Vorfluter und die effluenten Verhältnisse des Grundwasserleiters in die Vorfluter. Die eigenen Flurabstandsmessungen zeigten Flurabstände zwischen 0,5 m bis 1 m. Auch zeigten die drei größeren Vorfluter in den niederschlagsstarken Perioden einen fehlenden Bewuchs auf der Gewässersohle, welcher auf saisonal konstante Abflussbedingungen hinweist, da es zu keiner Verkrautung kommt. Erst zu Zeiten des Niederabflusses/Stillstandes des Abflusses tritt die Verkrautung ein [37] [38]. Diese Verkrautungen werden aber jährlich entfernt. Auch zeigten die Flurabstandsmessungen, dass die beobachtete Staunässe entkoppelt vom Grundwasserleiter ist.

Die Zeitreihenauswertung der öffentlichen hydro-(geo-)logischen Daten gab einen wichtigen Einblick über die Veränderungen des Grundwasserstandes und die möglichen Implikationen für die Tagesoberfläche. Neben den saisonalen Schwankungen des Grundwasserspiegels zeigte sich auch sehr deutlich der Einfluss des Klimawandels in der Veränderung der Niederschlagsmengen (Abbildung 7). Insbesondere nach dem ersten Trockensommer 2017 ist es verzögert in den Trockensommern der Jahre 2018 und 2019 zu einem Absinken der Grundwasserspiegel gekommen, wobei hier speziell die minimalen Grundwasserstände zu berücksichtigen sind. Die Auswertung der Hydrologie, vor allem der Hochwasserkarten [19] und einfache Modellierungen weiterer potentieller Ausbreitungsszenarien auf Basis der zukünftigen Senkungsmulde zeigten, dass die Morphologie des Geländes die Ausbreitung teilweise behindert. Das Szenario, dass die Senkungsmulde bei einem Hochwasserereignis flächig überflutet wird, scheint nicht plausibel zu sein. Es sind hier aber weitere Untersuchungen und Modellierungen notwendig.

Die ganzheitliche Bewertung der kartierten geologischen, bodenkundlichen und hydro-(geo-)logischen Bedingungen zeigte somit, dass die Bodentypen an der Tagesoberfläche in ihrem Verhalten sehr stark abhängig vom Wassergehalt sind. Die Schwankungen im Grundwasserflurabstand führen zu einem Auftriebsverlust und zu irreversiblen Zersetzungen im Boden. Hierdurch entwickelt sich eine sekundäre Bodenbewegung, die entkoppelt von der primären, bergbaulich indizierten Bodenbewegung ist.

Die Austrocknung der Böden lässt sich auch über die Satellitenfernerkundungsdaten erkennen. Hierbei stellt die Anwendung des Normalized Difference Moisture Index (NDMI) die Möglichkeit dar, den Wasserstress in Pflanzen zu visualisieren (Abbildung 4). Für das Gebiet der Forschungskoope-ration ist sichtbar, dass grundsätzlich ein ausreichendes Wasserdargebot vorliegt, jedoch zeigt sich in den Trockensommern (2018, 2019) vor allem im Umfeld der verbliebenen Moorflächen, dass dort ein Trockenstress auftritt [19] [20]. Dies kann darauf hindeuten, dass das (Grund-) Wasserdargebot für die Vegetation nicht voll oder in ausreichender Menge zur Verfügung steht.

Die Bodenbewegungen zeigen die für einen Kavernenspeicher typischen, treppenartigen saisonalen Bodenbewegungsverlauf (Abbildung 7 A1, A2). Hierbei handelt es sich um die zeitlich leicht versetzten Senkungen im Zeitraum der Ausspeicherung von Erdgas im Herbst/Winter und die Verlangsamung der Senkung im Zeitraum der Einspeicherung von Erdgas im Frühjahr/Sommer. In den Zeiträumen der Sommer 2017 und 2018 zeigt sich die Treppenstruktur nicht so deutlich und die Bodenbewegung ist kontinuierlicher (Abbildung 7 B1, B2). Die Korrelation mit den Bodenkarten und Klimadaten zeigt hier eine direkte Abhängigkeit. So ist die gleichmäßige Bodenbewegung in Bereichen mit setzungsempfindlichen Böden (organische Böden) anzutreffen (Abbildung 7 B1, BP12). Die gleichzeitige Verschneidung der dokumentierten Bodenbewegung

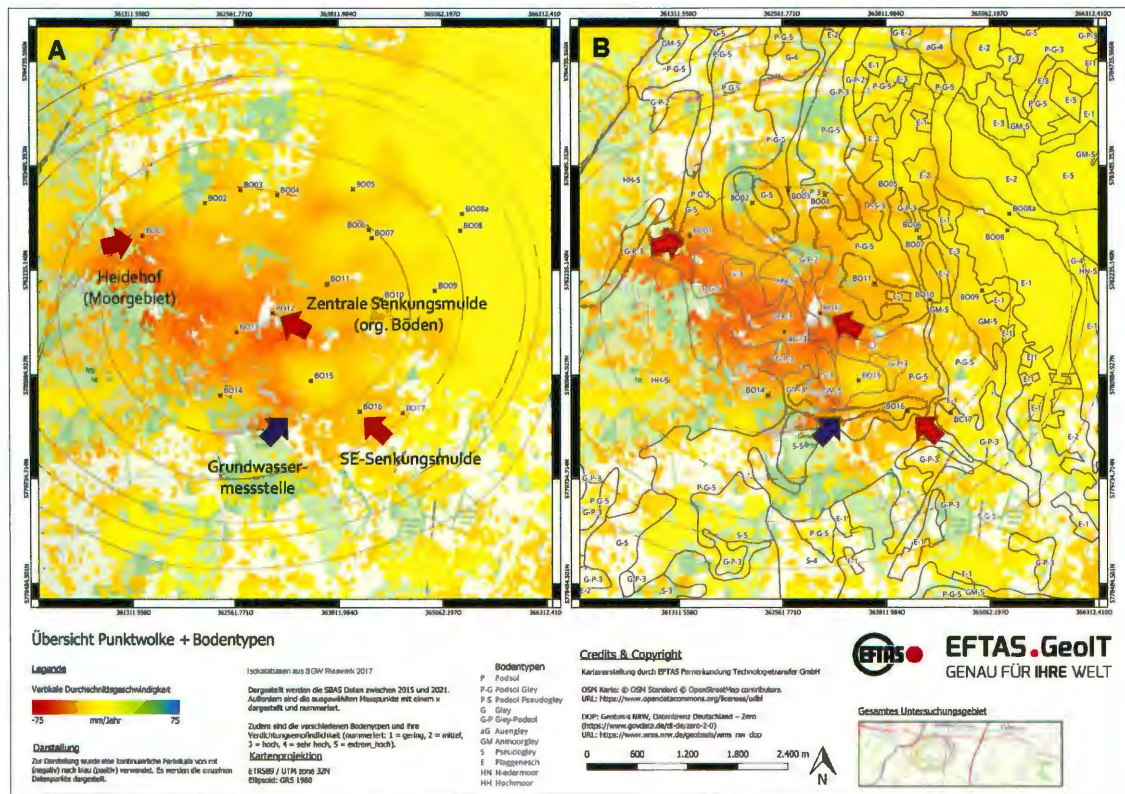


Abb. 6: Flächige Darstellung der Ergebnisse aus der Auswertung der Radarinterferometrie (A) im Vergleich mit der Karte der lokalen Bodentypen (B).

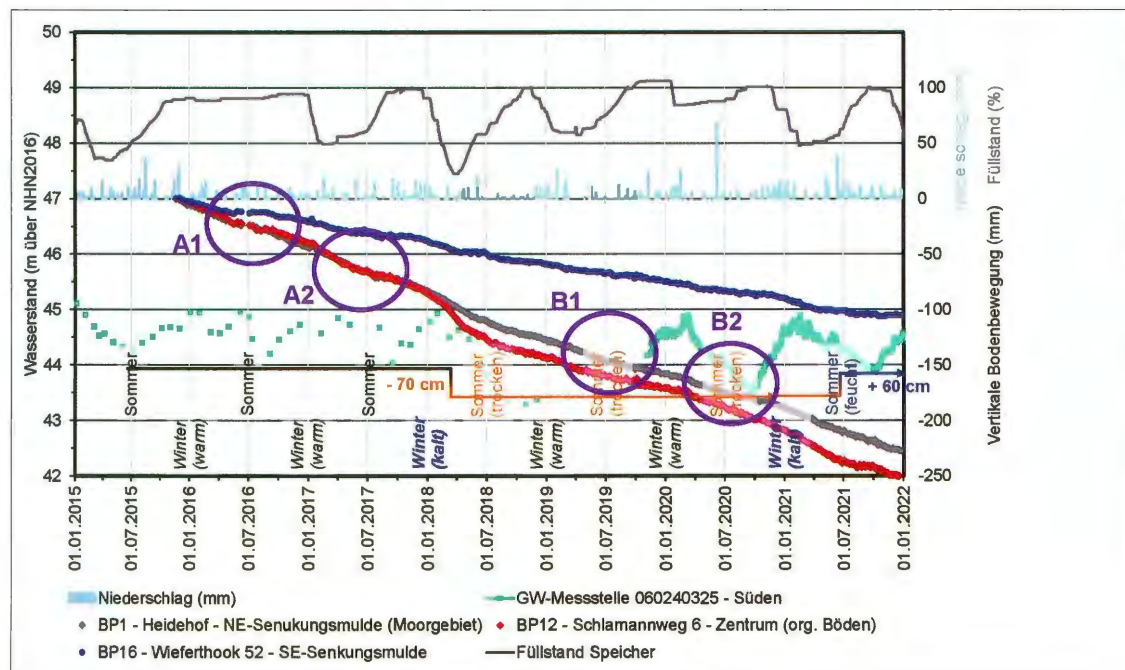


Abb. 7: Darstellung der vertikalen Bodenbewegung an ausgewählten Punkten im Kavernenfeld im Vergleich zu dem Füllstand des Speichers, einer Grundwasserganglinie und dem Niederschlag (Lage der Punkte in Abbildung 6) [19] [41].

mit Niederschlagsdaten zeigt, dass es sich bei den Zeiträumen um niederschlagsarme Phasen handelt, die daher zu einer Absenkung des Grundwasserspiegels geführt haben. Hier ist vor allem der Zeitraum der Sommer 2018, 2019 und 2020 beachtenswert, da die Speicher hohe Füllstände aufweisen und es so eigentlich zu einer Verlangsamung der Bodenbewegung hätte kommen müssen.

Aus dieser Zusammenführung der Geodaten zeigt sich auch, dass eine Vorhersage der Bodenbewegungen und damit der Aufbau eines Prognosemodells hier nicht möglich ist, da eine Vielzahl an nicht modellierbaren Faktoren Einfluss haben. So sind die operativen Fahr-

weisen der Kavernen abhängig von der Tagesnutzung (Speichermedium, Füllstand pro Kaverne, Rate der Ausspeicherung, Rate der Einspeicherung, Standzeiten), ebenso spielen zeitgleich auch Veränderungen von setzungsempfindlichen Böden/Untergrund, das Grundwasser und das Klima betreffend eine Rolle.

Zusammenfassung

Die Produktion von Sole und die untertägige Speicherung von Produkten Erdgas, Helium und Rohöl stellt einen Eingriff in die Natur und Umwelt dar und hat somit einen unmittelbaren Einfluss auf die Tagesober-

fläche. Hierbei stellen untertägige Gewinnungsbetriebe des Bohrlochbergbaus eine Besonderheit dar, da die Prozesse untertägig und somit nicht sichtbar ablaufen. Nur die übertägigen Auswirkungen wie Bodenbewegungen stellen einen sichtbaren Effekt dar, der unmittelbare Veränderungen an Gebäuden und Infrastruktur bzw. auch an Gewässern auslösen kann.

Die Veränderungen in der Art der öffentlichen Wahrnehmung, der Klimawandel, aber auch die veränderte Notwendigkeit die Versorgungssicherheit für Deutschland sicherzustellen, machen neben der klassischen, markscheiderischen Überwachung ein erweitertes Geo- und Umweltmonitoring sowie intensive Beteiligungsformate notwendig. Diese öffentliche Beteiligung ermöglicht Transparenz in diese komplexen geowissenschaftlich-technischen Prozesse zu bringen, um die untertägige Raumnutzung belastbarer zu gestalten.

So zeigt die Auswertung der verfügbaren Geodaten für das Kavernenfeld Epe, dass hier eine komplexe geowissenschaftlich-technische Situation vorliegt. Ein Teil des Kavernenfeldes ist mit einem Moorgebiet und Böden mit einem hohen organischen Anteil bedeckt. Die Böden sind sehr setzungsempfindlich. Gleichzeitig ist der Grundwasserflurabstand sehr gering und die starken Grundwasserspiegelschwankungen führen zum Auftriebsverlust und Zersetzung im Boden, welcher wieder Bodenbewegungen auslöst.

Die Anwendung der flächigen Radar-Satellitenfernerkundung stellt hierbei eine wichtige Ergänzung für den markscheiderischen Bodenbewegungsrisso dar. Denn die Anwendung dieser Methode liefert räumlich und zeitlich hoch aufgelöste Bodenbewegungen und ermöglicht für das Kavernenfeld Epe die Einflussgrößen der Bodenbewegung deutlich zu trennen. So zeigen die Ergebnisse der Zeitreihenanalyse den direkten Einfluss der veränderten Niederschläge und der Bodentypen.

Die Befahrungen über den Jahreslauf der Forschungskoooperation haben die saisonalen Veränderungen aufgezeigt und hierbei auch die Interaktion mit dem Einfluss des Klimawandels (verminderter Niederschlag) und den vorherrschenden hydro-(geo-)logischen Verhältnissen aufgezeigt. Diese grundlegenden Erkenntnisse sind wichtig, um zukünftig die Ergebnisse aus der Radar-Satellitenfernerkundung zu bewerten und den Höhenfestpunktriss (Bodenbewegungsrisso) hiermit zu erweitern.

Die Forschungskoooperation Epe mit seinen Partnern stellt im deutschen Bergbau ein modernes und innovatives Format zur Vertrauensbildung dar. Nur durch die direkte und offene sowie wissenschaftlich-neutrale Zusammenarbeit konnte hier ein vertieftes Verständnis bei allen Beteiligten im Bereich des Bohrlochbergbaus am Kavernenstandort Epe erzielt werden. Diese Fusion der markscheiderischen Überwachung, der Nutzung der Radarinterferometrie, von Geodaten und Erfahrungen hin zu einem integrierten Geo- und Umweltmonitoring konnte den Prozess der Bodenbewegung am Kavernenstandort Epe erklärbar machen. Die Komplexität und die Herangehensweise an die Bearbeitung zeigen, dass eine zukünftige Weiterführung der Fragestellungen

auch an anderen Standorten, an denen Georessourcen bereitgestellt werden, für die Entwicklung der gesellschaftlichen Betreiberverantwortung notwendig ist.

Danksagung

Die Autoren danken der Stadt Gronau, hier insbesondere dem Bürgermeister Herrn Rainer Doetkotte, dem Stadtbaurat Herrn Ralf Groß-Holtick und den weiteren Kolleg:innen in der Verwaltung und im Rat für die Unterstützung und den fachlichen Austausch (Vertrag 23.7.2021). Der Bezirksregierung Arnsberg, Abteilung 6, Bergbau und Energie in NRW, der Bezirksregierung Köln, GeoBasis NRW sowie dem Kreis Borken – FB62 Geoinformation und Liegenschaftskataster sei für die Begleitung im Prozess gedankt. Dem Vorsitzenden des Ausschusses für Mobilität, Umwelt und Klimaschutz im Rat der Stadt Gronau Herrn Josef Krefter und dem stellvertretenden Vorsitzenden Herrn Wolfgang Rövekamp ist für die Zusammenarbeit im Lenkungsausschuss gedankt. Ein besonderer Dank gilt der Herrn Markscheider Stefan Meyer von der Salzgewinnungsgesellschaft Westfalen mbH für den fachlichen Austausch, die Bereitstellung von Datensätzen und die Befahrung der Anlage. Den verschiedenen Betreibern von Gasspeichern im Kavernenfeld und Ihren Mitgliedern in der Betreiberrunde sei ebenfalls für die vielfältigen Diskussionen gedankt. Insbesondere gilt hier der Dank Herrn Jost Müller und seinen Kolleg:innen von Uniper Energy Storage GmbH für die Möglichkeit der Befahrung der Kavernenanlage.

Interessenerklärung

Die Autoren erklären, dass sie keine konkurrierenden Interessen haben.

Literaturverzeichnis

1. SGW, „Salzbergwerk Epe / Untergrundspeicher – Bodenbewegungsrisso Gesamtsenkung 1972 – 2018. Karte im Maßstab 1:10.000,“ Salzgewinnungsgesellschaft Westfalen mbH, Gronau-Epe, 2018.
2. H.-D. Hilden, Geologie im Münsterland, Krefeld: Geologischer Dienst NRW, 1995.
3. P. Wittkamp, „Salzbergbau sowie Öl- und Gasspeicher im westlichen Münsterland,“ *Westfalen Regional*, p. 2, 2014.
4. LBEG, „Untertage Gasspeicherung in Deutschland,“ Nr. <https://doi.org/10.19225/211101>, 2021.
5. Feuerwehr Gronau, „Großschadenslage durch Hochwasser in Gronau und Epe,“ 2010. [Online]. Available: <https://feuerwehr-gronau.de/einsatz/grossschadenslage-durch-hochwasser-in-gronau-und-epe-2/>. [Zugriff am 3 1 2023].
6. THW Gronau, „Tief „Cathleen“ beschert Rekord-Hochwasser,“ 2010. [Online]. Available: <https://www.thw-gronau.de/aktuelles/aktuelle-meldungen/artikel/tief-cathleen-beschert-rekord-hochwasser/>. [Zugriff am 3 1 2023].
7. AGSI+, „Aggregated Gas Storage Inventory – Remit Storage Data,“ 2022. [Online]. Available: <https://agsi.gie.eu/#/>. [Zugriff am 3 1 2023].
8. Bezirksregierung Arnsberg, „Jahresbericht 2014 der Bergbehörden des Landes Nordrhein-Westfalen,“ 2015. [Online]. Available: <https://www.bra.nrw.de/system/files/media/>

- document/file/jahresbericht_2014_berg.pdf. [Zugriff am 3 1 2023].
9. Theis, K-P, „Bodenbewegung im Bereich der SGW in Gronau Epe - 17.08.2020 Ausschuss für Verkehr, Energie und Tierschutz der Stadt Gronau,“ 2020. [Online]. Available: https://gronau.ratsinfomanagement.net/tops/?__=UGhVM0hpd2NXNFdFcExjZX-c0a0xSEAOm-cl7Mb_AOOg. [Zugriff am 3 1 2023].
 10. *Lokalzeit Münsterland vom 16. Oktober 2020 um 19.30h mit dem Thema „Neue Studie zu Bodenbewegungen in Epe.* [Film]. WDR, 2020.
 11. *Nachrichten vom 8. Oktober 2020 – Lokalnachrichten um 7:30h.* [Film]. Deutschland: WDR2, 2020.
 12. Bürgerinitiative Kavernenfeld Epe e.V., „Bürgerinitiative Kavernenfeld Epe e.V.,“ 2022. [Online]. Available: <https://bik-epe.jimdo.com/>. [Zugriff am 3 1 2023].
 13. Rat der Stadt Gronau, „72. Ratssitzung,“ 2022. [Online]. Available: https://gronau.ratsinfomanagement.net/tops/?__=UGhVM0hpd2NXNFdFcExjZXWoAEFGHz81QgR412T2Yc. [Zugriff am 3 1 2023].
 14. Westfälische Nachrichten, „Forscher und Anlieger kooperieren – Untersuchungen nach Bodenbewegungen im Kavernenfeld Epe,“ Westfälische Nachrichten, 2021. [Online]. Available: <https://www.wn.de/muensterland/kreis-borken/gronau/forscher-und-anlieger-kooperieren-2286373?pid=true>. [Zugriff am 3 1 2023].
 15. [15] Stadt Gronau - Ausschuss für Mobilität, Umwelt und Klima (A-MUK), „4. Sitzung,“ 2022. [Online]. Available: https://gronau.ratsinfomanagement.net/tops/?__=UGhVM0hpd2NXNFdFcExjZTZxJt2VemQthf91fu0yk74. [Zugriff am 3 1 2023].
 16. [16] P. Bösel, M. Nguéyep Nguembou, C. Narz und V. Vorholz, „Hydrologie und Hydrogeologie des westlichen Eper Kavernenfeld (u.a. Amtsvenn und Hüntfelder Moor),“ unveröffentlichte Studienarbeit an der THGA, Bochum, 2022.
 17. Biologische Station Zwillbrock, „Schutz für Moor und Heide – Die Naturschutzgebiete Amtsvenn und Hüntfelder Moor,“ 2010. [Online]. Available: <https://www.bs-zwillbrock.de/fileadmin/dateiverzeichnis/wir/publikationen/amtsvennflyer.pdf>. [Zugriff am 17 3 2010].
 18. Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, „Bodenbewegungsdienst Deutschland,“ 2023. [Online]. Available: <https://bodenbewegungsdienst.bgr.de/>. [Zugriff am 3 1 2023].
 19. ELWAS, „Fachinformationssystem ELWAS für die Wasserwirtschaftsverwaltung in NRW,“ 2022. [Online]. Available: <https://www.elwasweb.nrw.de/elwas-web/index.xhtml>. [Zugriff am 3 1 2023].
 20. EO Browser, „Sentinel Hub,“ 2022. [Online]. Available: <https://apps.sentinel-hub.com/eo-browser/>. [Zugriff am 3 1 2023].
 21. GeoBasis NRW, „Produkte und Dienstleistungen,“ 2022. [Online]. Available: https://www.bezreg-koeln.nrw.de/brk_internet/geobasis/wir-ueber-uns/index.html. [Zugriff am 3 1 2023].
 22. Geoportale NRW, „Webservice Geodaten NRW,“ 2022. [Online]. Available: <https://www.geoportale.nrw/>; 3. Januar 2023. [Zugriff am 3 1 2023].
 23. B. Haske, T. Rudolph, B. Bernsdorf und J. Benndorf, „Sustainability in Energy Storage - How Modern Geoscience Concepts can Improve Underground Storage Monitoring,“ *Int J Earth Environ Sci*, Bd. 199, 2022.
 24. SUBI, „SUBI - Safety of Underground Gas Storage Sites - Sicherheit von Untertagespeichern bei zyklischer Belastung: Funktionalität, Integrität und Überwachung von Speichern und Bohrungen,“ 2022. [Online]. Available: <https://www.subi-ugs.de/index.php>. [Zugriff am 3 1 2023].
 25. M. Crosetto, O. Monserrat, M. Cuevas-González, N. Devanthéry und B. Crippa, „Persistent Scatterer Interferometry: A review,“ *ISPRS J. Photogramm. Remote Sens.*, Nr. 115, pp. 78-99, 2016.
 26. A. Ferretti, A. Fumagalli, F. Novali, C. Prati, F. Rocca und A. Rucci, „A New Algorithm for Processing Interferometric Data-Stacks: SqueeSAR,“ *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, Bd. 49, Nr. 9, p. 3460–3470, 2011.
 27. A. Ferretti, C. Prati und F. Rocca, „Permanent Scatterers in SAR Interferometry,“ *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, Bd. 39, Nr. 1, pp. 8-20, 2001.
 28. R. Lanari, F. Casu, M. Manzo, G. Zeni, P. Berardino, M. Manunta und A. Pepe, „An Overview of The Small Baseline Subset Algorithm: A DInSAR Technique for Surface Deformation Analysis,“ *Pure Appl. Geophys.*, Bd. 164, Nr. 4, pp. 637-661, 2007.
 29. R. Lanari, O. Mora, M. Manunta, J. J. Mallorqui, P. Berardino und E. Sansosti, „A Small-baseline Approach for Investigating Deformations on Full-resolution Differential SAR Interferograms,“ *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, Bd. 42, Nr. 7, p. 1377–1386, 2004.
 30. C. H. Yang und A. Mütterthies, „Modelling and prediction of precipitation and soil movement based on ADINSAR,“ *ISPRS Ann. Photogramm. Remote Sens. Spat. Inf. Sci.*, Bd. 3, pp. 179-184, 2020.
 31. C. H. Yang und A. Mütterthies, „Monitoring of Time-series soil moisture based on advanced DInSAR,“ *ISPRS Ann. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci.*, pp. 51-55, 2021.
 32. GEOExPro, „The deep subsurface is not always to blame - Solution mining in Germany leads to subsidence, but cannot solely be held responsible for damage to property, study shows,“ 2023. [Online]. Available: <https://geoexpro.com/the-deep-subsurface-is-not-always-to-blame/>. [Zugriff am 3 1 2023].
 33. Westfälische Nachrichten, „Forschungskooperation Epe: Informationsveranstaltungen und Befahrungen - Geo-Ressourcen nachhaltig nutzen,“ *Westfälische Nachrichten*, 31 3 2022.
 34. Westfälische Nachrichten, „Forschungskooperation Epe informierte über Messungen der Bodenbewegungen im Amtsvenn - Hartnäckiges Nachbohren,“ *Westfälische Nachrichten*, 11 4 2022.
 35. Westfälische Nachrichten, „Radexkursion auf den Spuren der Salzgewinnung - Mit „Glück auf“ ins Amtsvenn,“ *Westfälische Nachrichten*, 13 8 2022.
 36. Westfälische Nachrichten, „Informationsveranstaltung der Forschungsgruppe Monitoring Epe - Wenn die Kavernen nicht mehr benötigt werden,“ *Westfälische Nachrichten*, 12 9 2022.
 37. T. Rudolph, M. Poplawski und P. Goerke-Mallet, „Das „Puzzle Bodenbewegung“ im Kavernenfeld Epe,“ *GeoMint-Köln 2022*, pp. 11-15, 2022.
 38. T. Rudolph, P. Goerke-Mallet, A. Homölle, M. Poplawski, A. Mütterthies, H. Perrevort, S. Teuwsen und C. H. Yang, „Das „Puzzle Bodenbewegung“ im Kavernenfeld Epe - Teil 1 – Wie eine Forschungskooperation die Puzzelteile zu einem Bild zusammensetzt,“ *EEK*, Bd. 138, Nr. 10, pp. 42-52, 2022.
 39. T. Rudolph, P. Goerke-Mallet, A. Homölle, M. Poplawski, A. Mütterthies, H. Perrevort, S. Teuwsen und C. H. Yang, „Das „Puzzle Bodenbewegung“ im Kavernenfeld Epe - Teil 2 – Wie eine Forschungskooperation die Puzzelteile zu einem Bild zusammensetzt,“ *EEK*, Bd. 138, Nr. 11, pp. 46-52, 2022.
 40. T. Rudolph, P. Goerke-Mallet, M. Poplawski, A. Mütterthies, S. Teuwsen und C. H. Yang, „Monitoring Ground Movement – The big jigsaw of the cavern gasstorage Epe, Germany,“ *3rd EAGE Global Energy Transition Conference & Exhibition*, p. 4, 2022.
 41. MarkscheidBergV, „Verordnung über markscheiderische Arbeiten und Beobachtungen der Oberfläche (Markscheiderbergerverordnung - MarkscheidBergV),“ 2020. [Online]. Available: <https://www.gesetze-im-internet.de/markscheidbergv/>, 3. Januar 2023. [Zugriff am 3 1 2023].
 42. Wetterkontor, „Monats- und Jahreswerte für Ahaus,“ 2022. [Online]. Available: <https://www.wetterkontor.de/de/wetter/deutschland/monatswerte-station.asp?id=10309>. [Zugriff am 3 1 2023].