

Kali und Steinsalz



Knudsen

Mengen-Lehre – Rahmenbedingungen des Vergaberechts bei der Beschaffung von Auftausalz

Balduf, Handke

Die Welt des weißen Goldes

Wilsnack, Rössel, Grafe

Kabellose Datenübertragung im Salinar

Alwast, Riemann, Schulte

Bewertung der mittel- bis langfristigen Perspektiven von UTV und UTD in Deutschland für die Entsorgung von Abgasreinigungsrückständen

Debelle

Salt use in the production of chlorine

Kabellose Datenübertragung im Salinar



Dr.-Ing. Th. Wilsnack,
IBeWa-Ingenieur-
partnerschaft, Freiberg



Dipl. Ing. A. Rössel,
RCS-Technik,
Freiberg



Dr. rer. nat. F. Grafe,
IBeWa-Ingenieur-
partnerschaft, Freiberg

Die messtechnische Überwachung von Prozessen bis hin zum langfristigen Monitoring in verwahten Gruben bzw. Grubenbereichen ist ein Erfordernis im Salzbergbau und der Endlagerung. Die derzeit verfügbare Messtechnik beruht vielfach auf einem Datenübertragungskonzept, welches über Kabelverbindungen realisiert wird, und oftmals auch eine Stromversorgung über ein untertägig vorhandenes Stromnetz voraussetzt. Dies steht im Widerspruch zu einer häufig angestrebten strömungstechnischen Dichtheit von Bauwerken bzw. der Integrität von strömungstechnischen Barrieren sowie dem bergtechnischen Aufwand zur Offenhaltung von zu überwachenden Grubenräumen. Unter Ausnutzung der Funkwellenausbreitung im weitgehend trockenen Salinargebirge wurde ein Konzept für die kabellose Datenübertragung entwickelt und erfolgreich an verschiedenen Referenzstandorten getestet. Das Messkonzept ermöglicht eine Übertragung von Messdaten unterschiedlicher physikalischer Parameter im trockenen Salinargebirge. In Abhängigkeit von der Messaufgabe (z.B. Messtaktfrequenz) sind aktuell Messeinsätze von Jahrzehnten denkbar.

1. Motivation

Die Nutzung von elektromagnetischen Wellen zur Erkundung geologischer Strukturen in salinaren Gesteinsformationen ist seit vielen Jahrzehnten Stand der Technik (z.B. Georadar). Die Ausnutzung des physikalischen Prozesses der Wellenausbreitung für die Datenübertragung wird definiert durch die elektromagnetischen Eigenschaften des Gesteinskörpers, seines Porengefüges und den darin enthaltenen Fluiden.

Im Salzbergbau ist die messtechnische Überwachung von Prozessen (Monitoring) eine wesentliche Grundlage für die Bergbauplanung, Optimierung und das langfristige Folgemonitoring. Für die Bedingungen im untertägigen und übertägigen Bergbau stellt die Installation der dafür erforderlichen messtechnischen Infrastruktur eine wichtige Komponente dar. Die messtechnische Überwachung von strömungstechnisch abzudichtenden Räumen schließt in der Regel eine kabelgebundene Datenübertragung aus, da diese eine potentielle hydraulische Verbindung darstellt. In dieser Situation sind Messkonzepte, die eine kabellose Datenübertragung nutzen, eine wichtige Alternative.

Für die kabellose Übertragung von Daten in Salinarformationen wurde im Rahmen des Projektes Zerstörungsfreie in situ-Permeabilitätsmessung [1] ein Konzept für die Datenübertragung entwickelt und erfolgreich getestet.

Eine kurze Vorstellung des physikalischen Grundprinzips, einschließlich der Anwendung für die

Datenübertragung sowie die Darstellung der Konzeptumsetzung und Nutzungsmöglichkeiten sind Gegenstand dieser Publikation.

2. Grundlagen

Die Anforderungen an die kabellose Datenübertragung werden durch die Messaufgabe bestimmt und sind damit erfahrungsgemäß vielfältig. Dies beginnt bei der Variabilität der Eingangssignale der Messsensoren, ihrem Stromverbrauch, der Mess- und Übertragungsfrequenz, der Variabilität der Mess- und Sendefrequenz sowie den Erfordernissen der externen Steuerung des Messprozesses und gegebenenfalls der Einbindung von Regelprozessen. Für eine Erläuterung der erforderlichen Bausteine kann der vollständige Mess- und Übertragungszyklus unterteilt werden in die Übertragung des Messregimes (Programmierung des Sensors), die eigentliche messtechnische Erfassung der physikalischen Größen (z.B. Druck, Spannung, Temperatur, Feuchte), die Sendung der Daten und den Empfang einschließlich der Signalverarbeitung und Datenspeicherung. Für den eigentlichen Messprozess der physikalischen Parameter stehen eine Vielzahl unterschiedlicher Messkonzepte und Sensoren zur Verfügung. Diese sind in der Regel hinsichtlich ihrer elektrischen und datentechnischen Eigenschaften detailliert dokumentiert.

Die Nutzung kabelloser Datenübertragung ist in erster Linie für das Monitoring von Prozessen in unzugänglichen Räumen über lange Zeiträume konzipiert. Dies

führt dazu, dass die verwendete Sensortechnik für entsprechende Messaufgaben geeignet sein und diesbezüglich ausgewählt werden muss. Dies gilt im Besonderen für Kenntnisse zur zeitabhängigen Veränderung des Messsignals (Langzeitstabilität) und die Beeinflussung durch die thermodynamischen Randbedingungen (z.B. Temperaturkompensation, Batteriealterung). Die genannten Sachverhalte fließen bereits in die Konzipierung der Messung und Übertragung ein. Im Ergebnis der Messung liegt ein analoges Signal vor, das über einen Analog-Digitalwandler in eine digitale Datenstruktur mit einer Auflösung von 16 Bit gewandelt wird. Diese Daten werden im Frequenzband 433 MHz (ISM-Band) in kurzen Impulsen versendet. Das ISM-Band beinhaltet einen Frequenzbereich von 433,05 MHz bis 434,79 MHz. Die Nutzung von ISM-Frequenzbändern wird weltweit durch die Artikel 5138 und 5150 der VO-Funk geregelt. Das ISM-Band bei 433 MHz ist als SRD für die Region 1 (u.a. Europa, Afrika, Russland, Teile Asiens) für industrielle, wissenschaftliche, medizinische und private Datenübertragungsanwendungen freigegeben. Die Freigabe und Nutzung ist dabei maßgeblich auf die übertägige Anwendung ausgerichtet. Für die Anwendung im Untertagebereich ist eine Störung oder Überlagerung mit anderen Übertragungsvorgängen im Sinne der VO-Funk auf Grund der begrenzten Reichweite wenig bzw. gar nicht relevant. Im Grubenfunk können laut Allgemeinzuteilung von Frequenzen

zur Nutzung unter Tage (Grubenfunk) [5] u.a. auch Frequenzen in den Bereichen von 410 MHz bis 470 MHz (Grubensprechfunk und -alarmfunk) bzw. von 433 MHz bis 470 MHz (Grubenfernwerkfunk) verwendet werden. Um eine funktentechnische Beeinflussung von vorn herein auszuschließen, sind daher die verwendeten Funkparameter standortbezogen mit dem Verantwortlichen für den Grubenfunk abzustimmen.

Für den Sendevorgang des kabellosen Sensors kommt in der Regel eine Stabantenne mit angepasster Länge zum Einsatz. Die Wellenausbreitung wird bestimmt von geoelektrischen Eigenschaften des Gebirges. In einem Gestein, bestehend aus Korngerüst (Minerale/Kristalle) und gefülltem Porenraum (Fluid, z.B. Gas und/oder Flüssigkeit), ist die Ausbreitung der Wellen das Ergebnis der dielektrischen Leitfähigkeit der einzelnen Bestandteile sowie der Polarisations- und Reflektionseffekte an den Grenzflächen zwischen den einzelnen Phasen. Die Reichweite der Datenübertragung wird bestimmt von der Frequenz, der Sendeleistung, der Abstrahlungscharakteristik der Antenne (Antennengewinn), der Dielektrizitätskonstante (Permittivität bzw. dielektrische Leitfähigkeit des Gesteins bzw. der Gesteinszusammensetzung), dem daraus resultierenden, standort- und gesteinsabhängigen Dämpfungsfaktor sowie der Informationsbandbreite (bit/s). Im Zusammenhang mit den im Abschnitt 4 vorgestellten Beispielmessungen wird auf die genannten Einflussprozesse und ihre standortbezogene Ermittlung und Relevanz nochmals eingegangen. Da

die Sendefrequenz im ISM-Band festgelegt und die Steigerung der elektrischen Sendeleistung mit dem Ziel der Minimierung des Stromverbrauchs begrenzt ist, steht für die Optimierung des Übertragungsprozesses in erster Linie die Verbesserung der Antennenleistung (Antennengewinn) für die Sende- und Empfangsantenne zur Verfügung.

Bezüglich der geoelektrischen Eigenschaften der Gesteine kann generell davon ausgegangen werden, dass die Ausbreitung der Funkwellen sich mit zunehmender elektrischer Leitfähigkeit und zunehmendem Flüssigkeitsgehalt im Porenraum reduziert. Für kompakte, trockene Salzgesteine mit Wassergehalten in der Größenordnung von $\leq 0,02$ Ma % [2] und Dämpfungskonstanten in der Größenordnung von z. B. 0,7–2,4 dB/m (Steinsalz Südharz-Kalirevier) [4] bestehen damit gute Bedingungen für die Wellenausbreitung. Für eine Vielzahl von Salinargesteinen liegen einzelne Erfahrungswerte bzw. Messwerte zu den Dämpfungskonstanten vor. Die Erfahrungen in den bisherigen Anwendungen haben gezeigt, dass eine Messung der standortbezogenen Übertragungsbedingungen im Vorfeld eine detaillierte Planung der Mess- und Übertragungseinrichtung ermöglicht.

Der Empfang der auf unterschiedlichen Kanälen sendenden Sensoren erfolgt in Abhängigkeit von den Standort- und Empfangsbedingungen mit Stab- oder Richtantennen. Zur bidirektionalen Kommunikation gehört zu jedem kabellosen Funksensor eine von einem Mikrocontroller gesteuerte Empfangsstation. Der Sende- und

Empfangsprozess sind so organisiert, dass ein Datenverlust im Sendeprozess ausgeschlossen ist. Kann zeitweilig kein Kontakt zwischen Sensor und Empfangsstation hergestellt werden, erfolgt eine Zwischenspeicherung in einem persistenten Speicher. Dadurch ist es möglich, autarke Messungen (Monitoring) durch die Sensoren ohne ständigen Kontakt zu Empfangsstationen zu realisieren. Das Auslesen erfolgt dann zu einem späteren Zeitpunkt.

Nach dem protokollgesicherten Empfang der Daten werden diese seriell über ein RS485-Bussystem zu einem Datenspeichergerät geleitet. Damit können mehrere Funksensoren gleichzeitig angesteuert werden. Am Datenspeichergerät können die Messdaten per USB- oder über eine kabellose Schnittstelle ausgelesen werden.

3. Hardware

In Abbildung 1 wird eine Übersicht der für die bisherigen Untersuchungen genutzten kabellosen Sensoren gegeben. Die unterschiedlichen Bauformen zeigen die Möglichkeit und die Notwendigkeit der erforderlichen konstruktiven Anpassung der Gehäuse der kabellosen Sensoren an die Mess- und Standortbedingungen. Die Größe der kabellosen Sensoren wird dabei wesentlich von der erforderlichen Stromversorgung (Batterieleistung) in Abhängigkeit von dem Stromverbrauch der Messsensoren und der Sendehäufigkeit bestimmt.

Bedingt durch den bisherigen Einsatz der kabellosen Sensoren in Bohrungen mit einem Durchmesser von 70 mm wurden die Empfangs- und Sendeantennen als Stabantennen ausgeführt. In

Abhängigkeit von den Platzbedingungen und den Möglichkeiten der Positionierung der Empfangseinheit ist auch der Einsatz von Richtantennen denkbar.

Das elektronische Innenleben des kabellosen Sensors besteht im Wesentlichen aus folgenden Komponenten: Sensoreinheit, Mikrocontroller, hochwertige Wandler-, Verstärker- und Speichereinheit, Funkmodul, Stromversorgungseinheit. Sowohl die elektronischen Bauteile als auch die Sende-/Empfangsroutine wurden energieoptimiert, um lange Einsatzzeiten zu erreichen.

Angepasst an die jeweiligen Messaufgaben können die Gehäuse der Sensoren und Antennen korrosions- und druckstabil sowie wasserdicht ausgeführt werden. In den bisherigen Tests und Anwendungen wurden Gehäuse aus Edelstahl und korrosionsbeständigem Kunststoff verwendet. Die im Rahmen des Forschungs- und Entwicklungsvorhabens entwickelten kabellosen Funksensoren sowie die kabellose Datenübertragung durch trockene Feststoffe (z.B. Salinar) sind im Sinne des deutschen Patentrechtes geschützt.

4. Testung und Einsatz

Mit den in Abbildung 1 dargestellten Sensoren wurden Funktions- und Reichweitentests für unterschiedliche Gesteine und Einbaubedingungen durchgeführt. Neben der Testung in unterschiedlichen Salinargebirgen erfolgten ebenfalls Übertragungsversuche in Locker- und Festgesteinsformationen mit höheren Flüssigkeitsgehalten.

Die Ergebnisse der Reichweitentests in Tabelle 1 machen schnell den dämpfenden Einfluss von

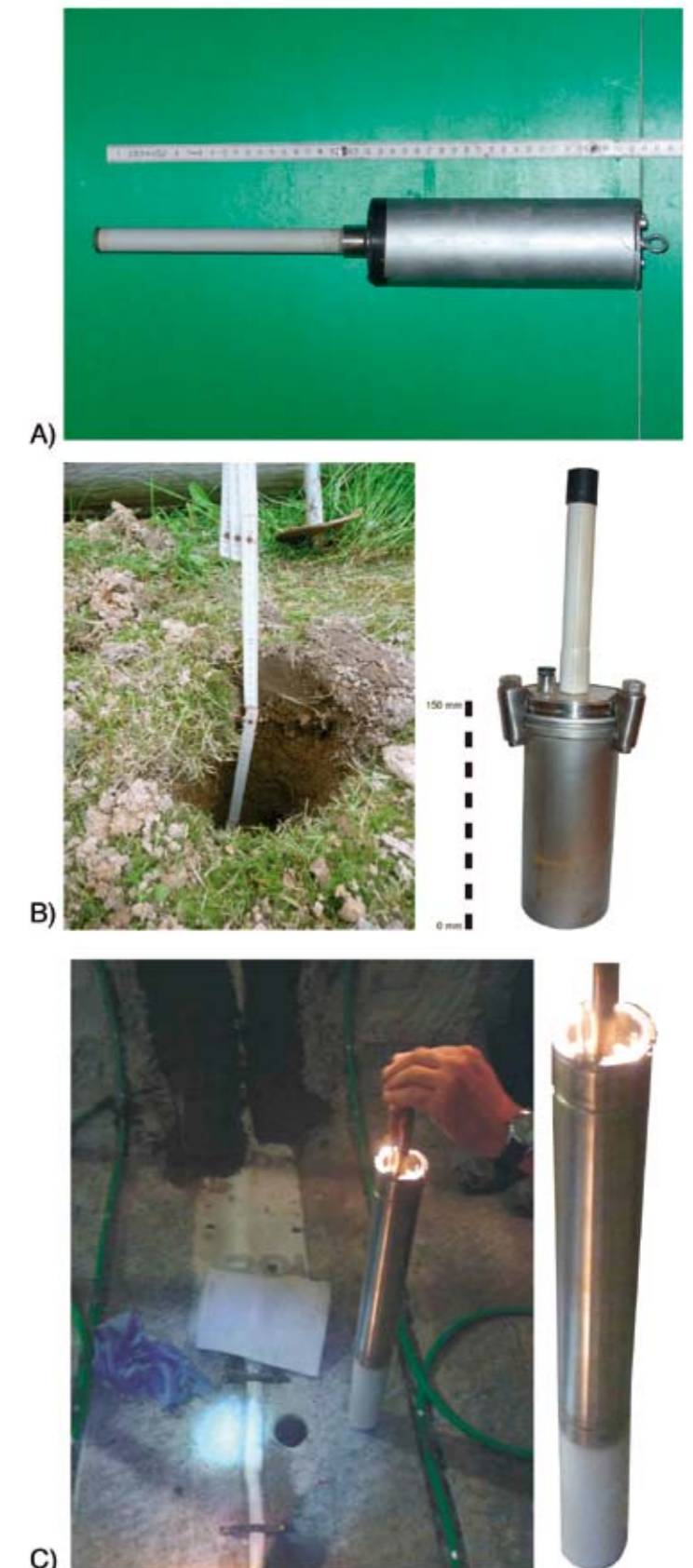


Abb. 1: Verschiedene Bauformen der bisher getesteten Funksensoren / different designs of tested radio sensors

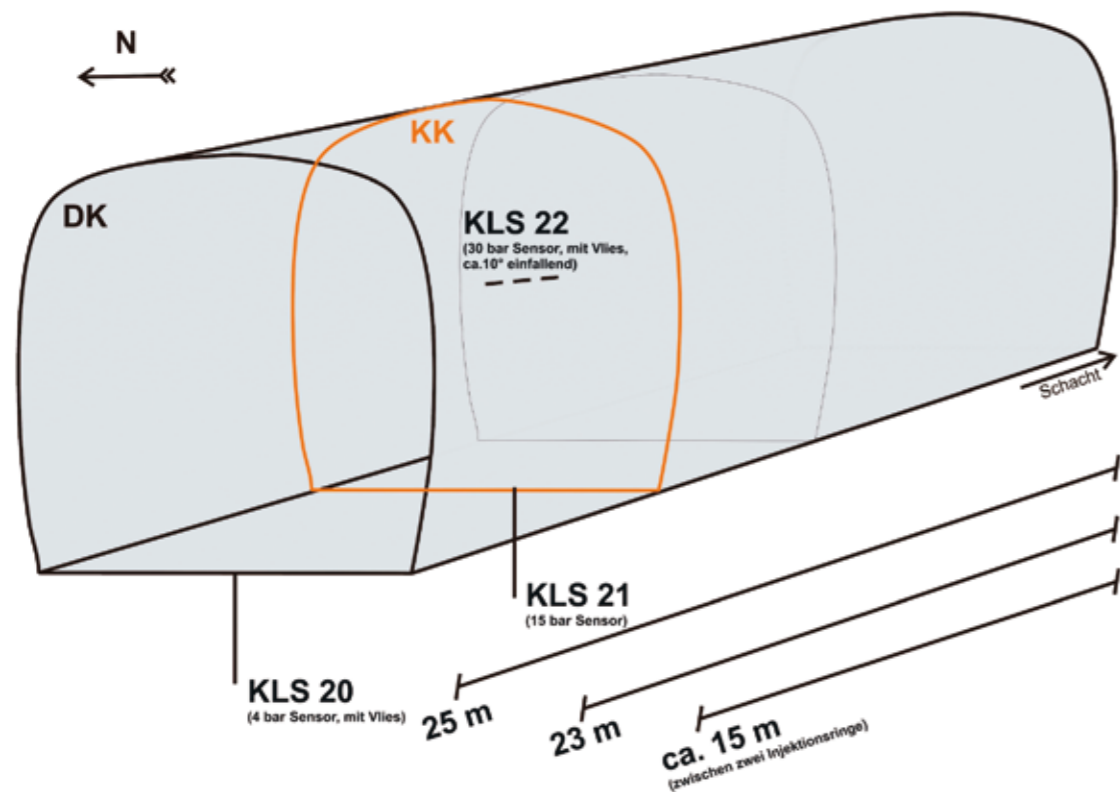


Abb. 2: Lage der Funksensoren im Verschlussbauwerk aus Beton / position of radio sensors within the concrete gallery sealing

Feuchtigkeit im Porenraum auf die Wellenausbreitung deutlich. Der Wassergehalt im Freiburger Gneis und im gewachsenen Boden dämpfen erwartungsgemäß die Funkwellen auf eine Reichweite von m bis wenigen dm. Im Steinsalz mit Lösungsgehalten in der Größenordnung von $\leq 0,02 \text{ Ma} \%$ [2] und im Carnallitgebirge werden Reichweiten von bis zu 200 m nachgewiesen. Um die Beschränkung der kabellosen Datenübertragung auf trockenes Gebirge zu überwinden, wird gegenwärtig die Kopplung des Übertragungskonzeptes mit einem weiteren Verfahren, welches die Übertragung über feuchtes Gebirge ermöglicht, geprüft.

Ausgehend von diesen Funktionstests wurden im Steinsalz drei kabellose Sensoren für ein Monitoring von Prozessparametern in einem Verschlussbauwerk aus hyd-

raulisch abbindendem Material, welches näher in [3] beschrieben wird, eingesetzt. Abbildung 2 zeigt schematisch die Anordnung der kabellosen Sensoren in der Kontur des Standortes. Um Temperatureffekte auf die Lebensdauer der verwendeten Lithium-Primärbatterien auf ein Minimum zu reduzieren und die Antennenlage zu optimieren, wurden die kabellosen Sensoren in Bohrungen radial zum Bauwerkstandort eingebaut.

Abbildung 1C zeigt beispielhaft einen der Sensoren unmittelbar vor dem Einbau. Die Messsensoren sind direkt im Kontaktbereich Baustoff/Gebirge positioniert. Alle drei Sensoren messen und übertragen seit dem Einbau im November 2010 beschreibende Prozessparameter des Versuchsverlaufs und der Bauwerkstestung mit Gas und Flüssigkeit. Die Abbildung 2 zeigt die

Lage der Sensoren in Bezug auf das Bauwerk. Die Sensoren 20 und 21 sind in der Sohle, der Sensor 22 in dem südlichen Stoß des Bauwerkes positioniert.

Die Messfrequenz der Sensoren wurde in diesem Zeitraum mehrfach zwischen 1 Hz bis $1,2 \cdot 10^{-5}$ Hz geändert. Die Abbildung 3 gibt eine Übersicht der kontinuierlich erfassten Messwerte (ca. 160000 Einzelmesswerte bei ca. 8000 Übertragungen je KLS). Über den Zeitraum der Messungen von aktuell ca. 600 d ergibt sich ein Energieverbräuche von ca. 10 Wh. Bei den Batteriekapazitäten der verschiedenen, getesteten KLS ergibt sich aktuell ein relativer Energieverbrauch von ca. 8 % (KLS21 und KLS22) bis ca. 12 % (KLS20). Vorausgesetzt das Messregime (Häufigkeit der Messungen) bleibt erhalten, können theoretisch noch ca. 18 a (KLS21 und KLS22)

bzw. ca. 11 a (KLS20) weiter Daten erfasst werden. Alterungsprozesse der Batterien durch häufige und große Temperaturschwankungen können auf Grund der Standortbedingungen weitgehend ausgeschlossen werden. Das Langzeitverhalten der verwendeten Batterien kann auf Grund der aktuellen Erfahrungen noch nicht abschließend beurteilt werden.

Zur Beurteilung der die Wellenausbreitung im Gebirge bestimmenden Dämpfungseigenschaften des Bauwerkes und des Gebirges wurden am Standort Messungen zur Feldstärke/Strahlungsleistung der einzelnen Sensoren durchgeführt und das Dämpfungsmaß ermittelt. Abbildung 4 zeigt beispielhaft die Messungen der Feldstärke/Strahlungsleistung für den KLS20.

Die zu mehreren Bauzuständen durchgeführten Messungen weisen einen deutlichen Einfluss sowohl der Feuchtigkeitsverteilung auf das Dämpfungsmaß als auch der Orientierung der Sendeantennen

Gebirge	Versuchsort	Ergebnis
Werra-Steinsalz (Na1)	Grube Merkers	Distanzen bis 200 m
Kaliflöz-Staßfurt (K2)	Grube Teutschenthal	Distanzen bis 100 m
tonig, grusiger Boden	Freiberg	Distanzen bis 15 m
Freiberger Kerngneis (PR3F)	Grube Reiche Zeche, Freiberg	Distanzen bis 3 m

Tab. 1: Ergebnisse von Reichweitentests in unterschiedlichen Gesteinen / results of range tests within different lithologies

in Bezug auf den feuchten Baustoff nach. Die Messungen ermöglichen damit eine nachträgliche, standortbezogene Beurteilung der Wellenausbreitung im Gebirge, die Ermittlung der gesteinsbezogenen Dämpfungskonstante und Schlussfolgerungen für die Positionierung der Empfangsantenne. Für künftige Anwendungen schafft die vorlaufende Durchführung entsprechender Leistungsmessungen die Möglichkeit einer Optimierung

und Dimensionierung der Sensorpositionierung und Konfigurierung der erforderlichen Sendeantennen und Sendeleistung.

Ausgehend von einer homogenen geologischen Situation und der unterschiedlichen Lage der Messpunkte zu den kabellosen Sensoren wird die Signaldämpfung maßgeblich von dem Verschlussbauwerk beeinflusst.

5. Leistungsoptionen kabellose Sensoren im Salinar

Die aktuell erreichte Funktionalität und das Leistungsspektrum des Übertragungssystems lassen sich in folgender Weise zusammenfassen:

- bidirektionale Kommunikation zwischen Sender und Empfänger mit Steuerungsmöglichkeiten für Messtakt- und Übertragungsfrequenz,
- operative Anbindung von Messsensoren mit Spannung oder Stromstärke als Ausgangssignal für individuelle Messaufgaben (ggf. Anpassung möglich) → Anwendungsoptionen: Überwachung Grubenwetter (Luftfeuchte, Temperatur, CO₂-Ge-

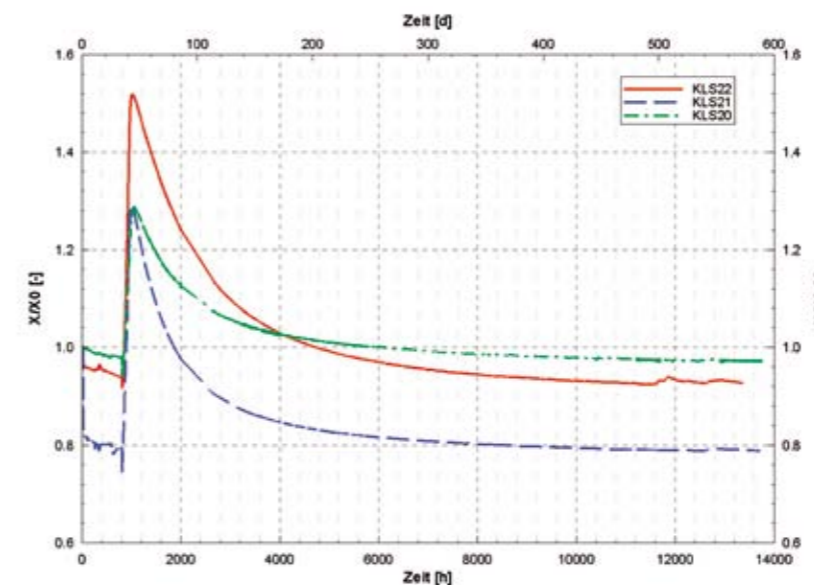


Abb. 3: Normierte Parametereganglinien der kabellosen Sensoren / normalised load curve of a parameter measured by the radio sensors

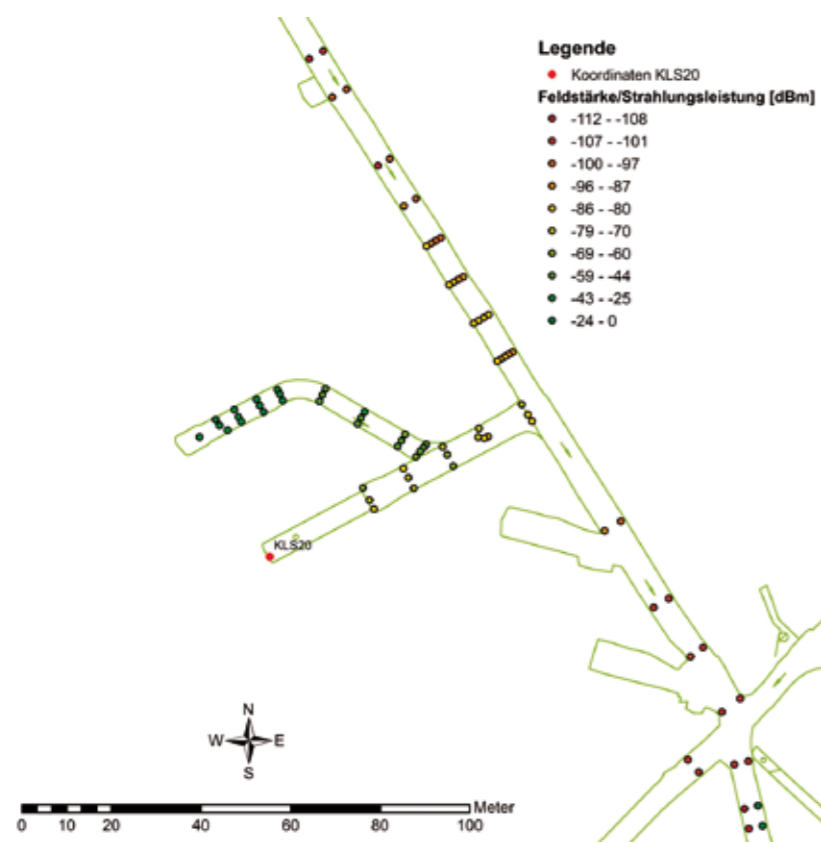


Abb. 4: Messungen der Feldstärke/Strahlungsleistung am Standort für KLS20 / measurement of transmitter field intensity for sensor KLS20 at the test site

- halt); Monitoring Konvergenz und mechanische Einspannung durch Gebirgs-/Versatzkonvergenz; Monitoring Fluiddruck, Materialfeuchte, Kapillardruck)
- Reichweite gebirgs- und geologieabhängig; im Steinsalz werden Reichweiten bis ca. 200 m erreicht,
- Erweiterung der Reichweite der Datenübertragung möglich (z.B. durch Einsatz von Relaisstationen),
- Sendedauer wird bestimmt von den Standortgegebenheiten, den Messparametern bzw. dem Stromverbrauch der dafür erforderlichen Sensoren sowie von Messtakt und Datenübertragungsfrequenz,

- Einbindung der Messwerte über GSM-Modem in Online-Datenbank und kontinuierliche Visualisierung möglich,
- Kopplung mit anderen Konzepten zur kabellosen Datenübertragung individuell möglich.

Die bisherigen Erfahrungen aus der Testung und Anwendung des Messkonzeptes haben gezeigt, dass, in Abhängigkeit von der Messaufgabe und den Standortbedingungen, eine individuelle Anpassung der verwendeten Sensortechnik sowie der Sende- und Empfangskomponenten erforderlich ist. Dies macht im Vorfeld eine Konzipierung, Planung, gegebenenfalls Testmessung am Standort sowie fachliche

Koordinierung erforderlich. Die im Ergebnis mögliche kabellose Übertragung von Daten über lange Zeiträume rechtfertigt diesen vorbereitenden Aufwand.

6. Zusammenfassung

Im Salzbergbau stellt die messtechnische Überwachung von Prozessen in langfristig nicht mehr oder nur sehr begrenzt zugängigen Grubenbereichen auf Grund der erforderlichen mess- und installationstechnischen Schwierigkeiten eine Herausforderung dar. Vielfach steht die Datenübertragung über Messkabel im Widerspruch zu einer angestrebten strömungstechnischen Dichtheit von Bauwerken. Vor diesem Hintergrund wurde ein Konzept für die kabellose Datenübertragung in Salinarformationen entwickelt und erfolgreich über einen Zeitraum von derzeit ca. 600 d (knapp 1 3/4 a) für drei kabellose Sensoren getestet.

Das Datenübertragungskonzept beruht auf der Nutzung des ISM-Frequenzbandes für die bidirektionale Kommunikation zwischen individuell konfigurierbaren, kabellosen Sensoren und der kombinierten Empfangs- und Messwerterfassungseinrichtung. In Abhängigkeit von der Messaufgabe und den Standortbedingungen ist das Datenübertragungskonzept individuell anpassbar und auf der Basis von standortbezogenen Messungen dimensionierbar. Testmessungen an unterschiedlichen Standorten für unterschiedliche Gebirgsbedingungen haben Reichweiten bis ca. 200 m nachgewiesen. Die Erfahrungen aus der Testung und Anwendung des Datenübertragungskonzeptes zeigen die Notwendigkeit einer individuellen

Anpassung des Übertragungskonzeptes an die Messaufgabe und die Standortbedingungen. Dies resultiert im Wesentlichen aus der Prozessvielfalt und der daraus resultierenden Sensorik sowie den geoelektrischen Eigenschaften und Standortgegebenheiten der unterschiedlichen Gesteinsformationen.

Für eine Erweiterung des Einsatzspektrums wird gegenwärtig die Kombination der vorgestellten Funkdatenübertragung mit einem Datenübertragungssystem für feuchtes Gebirge untersucht.

Danksagung

Das der Entwicklung des Messkonzeptes zu Grunde liegende Forschungsvorhaben wurde mit öffentlichen Mitteln des Bundesministeriums für Wirtschaft und Technologie (Förderkennzeichen: 02E10447) gefördert. Für diese wichtige Unterstützung sowie die gute administrative und fachliche Begleitung des Vorhabens danken wir den Mitarbeitern des Projektträgers Wassertechnologie und Entsorgung am Karlsruher Institut für Technologie.

Die Durchführung der in situ-Referenzanwendungen an unterschiedlichen Standorten war nur mit Unterstützung des Bundesamtes für Strahlenschutz, der DBE GmbH, GTS GmbH & Co KG, der TU-Bergakademie Freiberg und der KALI GmbH möglich. Für die Bereitschaft und unkomplizierte Hilfe bei der Realisierung der Messungen möchten wir allen Beteiligten auf diesem Weg danken.

7. Quellen

[1] IBeWa-1 (2012): Zerstörungsfreie in situ-Permeabilitätsmessung. IBeWa-Ingenieurpartnerschaft geför-

dert durch Bundesministeriums für Wirtschaft und Technologie, FKZ: 02E10447, laufendes Vorhaben [2] Keller, S. (2007): Langzeitsicherheitsanalyse für ein HAW-Endlager im Salz – Geologisches Referenzmodell für einen HAW-Endlagerstandort im Salz. Technischer Bericht (Beitrag für das Projekt ISIBEL), Bundesanstalt für Geologie und Rohstoffe, Hannover, 79 S.

[3] Mauke, R.; Stahlmann, J.; Mohlfeld, M. (2012): In situ-Verification of a Drift Seal System in Rock Salt – Operating Experience and Preliminary Results. SaltMech7, 16th–19th April 2012, Paris, France, Bundesamt für Strahlenschutz (BfS)

[4] Mehlhorn, H. (1983): Dämpfungskonstante für elektromagnetische Wellen im Salzgestein. KDT-Richtlinie, Juli 1983

[5] RegTP (2004): Allgemeinverteilung von Frequenzen zur Nutzung unter Tage (Grubenfunk). Amtsblatt 7, Regulierungsbehörde für Telekommunikation und Post, Bonn, 31.03.2004

8. Abkürzungen

DK: Druckkammer
ISM: industrial, scientific and medical band
K2: Kaliflöz-Staßfurt
KK: Kontrollkammer
KLS: kabelloser Sensor
Na1: Werra-Steinsalz
PR3F: Freiburger Kerngneis
SRD: short range devices
VO: Vollzugsordnung