

Hydrostatische Laser-Präzisionsschlauchwaage – Echtzeit-Bauwerks-Monitoring zur hochpräzisen Neigungs- und Setzungsmessung

Frank Kubisch¹, Jörg Benndorf¹, Clemens Schuwerack²,
Michael Möser², Hubert Böhme³, Maren Oldenettel⁴

¹TU Bergakademie Freiberg, Institut für Markscheidewesen und Geodäsie, Freiberg, Deutschland

²TU Dresden, Geodätisches Institut, Dresden, Deutschland

³FPM Holding GmbH, Freiburger Präzisionsmechanik, Freiberg, Deutschland

⁴STORAG ETZEL GmbH, Fachbereich Markscheidewesen, Friedeburg, Deutschland

Kurzfassung

Im Bauwerks-Monitoring werden zur Ermittlung von Setzungen i. d. R. hydrostatische Nivellements sowie Beschleunigungssensoren oder Inklinometer zur Neigungsmessung verwendet. Bisherige Schlauchwaagen-Messinstrumente werden mechanisch, elektrisch, magnetisch oder automatisiert eingesetzt. Alle mechanisch bewegten Komponenten in den klassischen Setzungs- oder Neigungsinstrumenten unterliegen einem starken Verschleiß und müssen aufwendig instandgesetzt werden. Mit der Neuentwicklung der hydrostatischen, optisch-elektronischen Laser-Präzisionsschlauchwaage (LSW) ist es erstmalig möglich, die zwei Messaufgaben Setzung und Neigung in einem hochpräzisen Messinstrument zu kombinieren. Mit der LSW können Setzungen, Neigungen und Temperaturen in Echtzeit in diskreten Abständen von beispielsweise 1 s, 10 s oder 6 h automatisiert ermittelt werden. Die relativen Höhendifferenzen (Setzungen) werden mit einer Standardabweichung von 0,1 mm bis 0,2 mm im vertikalen Messbereich von ca. 200 mm bestimmt.

Generally hydrostatic levellings are used for the determination of settlements as well as accelerometers or inclinometers for the inclination measuring in the structural monitoring. Previous hose levelling measuring instruments are mechanical, electrical, magnetic or mostly automated. All mechanically moved components in the traditional instruments for settlements and inclinations are exposed to particularly heavy wear and they have to be repaired extensively. Due to the development of the hydrostatic, optical electronic laser precision hose levelling instrument (LSW), it's possible to combine the two tasks of measuring settlement and inclination in one highly accurate instrument. With the new LSW, changes in settlements, inclinations, temperatures can be determined automatically in real-time at discrete intervals for example of 1 sec, 10 sec or 6 hours. The relative differences in height (settlements) were determined with a standard deviation of 0.1 mm to 0.2 mm in the vertical measuring range of approx. 200 mm.

1. Einleitung

Zur Gewährleistung der Stand- und Funktionssicherheit von Bauwerken sind Langzeitmessungen von Setzungen und Neigungen zwingend zu überwachen. Deformations-Überwachungsmessungen werden in Staudämmen, Talsperren, Brücken, Türmen, historischen Gebäuden, Halden- oder Rutschungsgebieten, wie Bergbaufolgelandschaften, angewandt.

Zum Nachweis von präzisen Setzungen werden im Bauwerksmonitoring vorrangig hydrostatische Nivellements, wie klassische Schlauchwaagensysteme, eingesetzt. Konstruktiv können diese rein mechanisch, elektrisch, magnetisch oder automatisiert aufgebaut sein. Für die Ermittlung des Flüssigkeitsspiegels ergeben sich bei den Schlauchwaagen folgende Messmöglichkeiten [1]:

- mechanische Abtastung mit Messspitze,
- schwimmergesteuerte Wegaufnehmer,

- interferometrische Abtastung,
- berührungslose Abtastung mit kapazitiven Sensoren sowie
- Abstandsmessung mit Ultraschall.

Um Neigungsänderungen an Bauwerken ermitteln zu können, werden Beschleunigungssensoren, Gyroskope, Inklinometer oder Lotungsverfahren eingesetzt. Zur Bestimmung der vertikalen Biegelinie in Bauwerken (Stauanlagen, Türme) werden optische Zenit- und Nadirlote verwendet, die mit Laserlotung oder mit mechanischen Verfahren mit Pendel- und Schwimmlot messen. [2]

In dieser Veröffentlichung soll die Neuentwicklung einer hydrostatischen, optisch-elektronischen Laser-Präzisionsschlauchwaage (LSW) vorgestellt werden, die erstmalig die zwei Messaufgaben Setzung und Neigung in einem hochpräzisen Messinstrument kombiniert.

Mit der Förderung durch das BMWK ZIM AiF Kooperationsprojekt (04/2021 bis 03/2023) konnte in Zusammenarbeit mit der TU Dresden, der FPM Holding GmbH,

mit dem Unterauftragnehmer Electronic Renaissance Dresden sowie mit der TU Bergakademie Freiberg das Messsystem bis zur Industriereife evaluiert werden. Dabei wurde die LSW in den folgenden drei Anwendungsgebieten umfangreich untersucht [3]:

- Förderschachtanlage „Alte Elisabeth“ Freiberg,
- Kirchen-Monitoring Dresden Leubnitz-Neuostra und
- Fundament-Überwachung im Fernsehturm Dresden.

In diesem Beitrag werden nach der Beschreibung des konstruktiven Systemaufbaus und der Funktionsweise, die Validierung in weiteren drei Anwendungsgebieten vorgestellt:

- WEV Tunnelsegment-Monitoring unter der Zentraldeponie Leipzig (Untertage),
- Langzeitüberwachung der Halde „Reiche Zeche“ mit Multisensor-Geomonitoring-Station in Freiberg sowie
- Bodenbewegungs-Monitoring auf dem Kavernenspeicher K122 der STORAG Etzel GmbH in Friedeburg (Energiespeicher, Übertage).

2. Laser-Präzisionsschlauchwaage (LSW)

Mit der automatisierten, hydrostatischen und optisch-elektronischen LSW können Setzungen, Neigungen und Temperaturen mit einem hochgenauen Messinstrument in diskreten Abständen von z. B. 1 s, 10 s, 1 min oder 6 h registriert werden. Die relativen Höhendifferenzen (Setzungen) werden mit hoher Messgenauigkeit und einer Standardabweichung von 0,1 mm bis 0,2 mm im vertikalen Messbereich von ca. 200 mm bestimmt. In jeder LSW sind Beschleunigungssensoren integriert, die Neigungsmessungen in X- und Y-Richtung mit einer Messgenauigkeit von 0,02° gewährleisten. Der in der Messflüssigkeit eingebettete Temperatursensor besitzt eine Messgenauigkeit von 0,1 K. Die Verifizierung der Robustheit des Messsystems wurde durch Langzeituntersuchungen in der Kälte- und Wärmekammer der Freiburger Präzisionsmechanik im Temperaturbereich von -20°C bis +50°C erfolgreich durchgeführt. Die Registrierung und Auswertung der erzeugten Messdaten wird in einem Gesamtmesssystem „HYDRO-LaWa“, bestehend aus LSW, Hardware- und Softwarekonzept, verwirklicht. Dieses kann als Bestandteil in ein größeres Geo-Sensornetzwerk integriert werden. [4]

In Abb. 1 wird die industriereife „FG-LSW-V2“ mit Gehäuse (links) und mit optischem Laserstrahlengang (rechts, ohne Gehäuse) dargestellt [5].



Abb. 1: Hydrostatische Laser-Präzisionsschlauchwaage (LSW) nach Kubisch, Lorenz, WEV 2023 [5]

Das „HYDRO-LaWa“-Gesamtmesssystem und die LSW wurden innerhalb von zwei Jahren in drei Entwicklungsstufen (Versuchsaufbau, Prototyp 1 und 2) konstruiert und gefertigt. In den unter Punkt 1 beschriebenen drei Anwendungsgebieten konnte die LSW erfolgreich evaluiert werden [3].

In Abb. 1 ist das Logo der Freiburger Präzisionsmechanik mit der Höhenbolzenaufnahme für die Wandbefestigung zu erkennen. Jede LSW kann mit dieser Wandaufnahme direkt am Mauerkugelbolzen montiert und über zwei 60°-Röhrenlibellen in X- und Y-Richtung über Stellerschrauben justiert und horizontalisiert werden.

Der 1 mW Punktlaser (Abb. 1, rechts) wird mit einer Wellenlänge von 650 nm (rot) coaxial durch die Messflüssigkeitssäule in einem abgedichteten konzentrischen Glasrohr geführt. Nach den physikalischen Gesetzen der Totalreflektion, wird durch das Neigen der Flüssigkeitssäule der ca. 2 mm große Laserstrahldurchmesser bei einem horizontalen Anstellwinkel zwischen 40,5° und 44° an der Flüssigkeitsgrenzschicht totalreflektiert. Anschließend wird der Laserstrahl durch das Glasrohr geführt und mit Hilfe einer Zylinderstabilinse in eine elliptische Laserstrahllinie geformt. Die Laserlinie wird in der Umgebungsluft (im geschlossenen LSW-Gehäuse) auf die CMOS-Scanzeilen gelenkt. Diese Scanzeilen mit 400 dpi sind longitudinal zur Glasrohrachse nebeneinander auf einer Hauptplatte mit integriertem Mikroprozessor angeordnet und elektronisch verbunden. Die erzeugte Laserlinie wird auf den CMOS-Scanzeilen als umgerechneter Höhenmesswert in Form eines Messsignals ausgegeben.

Die Mikroprozessoren jeder LSW übertragen die Messdaten der Temperaturen, Neigungen und Höhenmesswerte über eine Steuerbox in die Schnittstellensoftware „HYDRO-LaWa 3.0“ zur anschließenden Auswertung auf einen PC oder einem Notebook. Die prozessierten Sensordaten der LSW werden im csv-Dateiformat gespeichert und stehen dem Anwender für die nutzerspezifische Implementierung zur Verfügung (s. Abb. 2). [4]

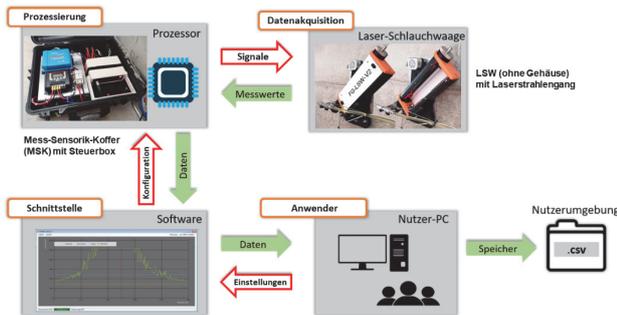


Abb. 2: „HYDRO-LaWa“-Gesamt-Messsystem mit LSW, Hardware- und Softwarekonzept, WEV 2023 [3] [5]

Die erzeugten Messdaten können in bestehende Sensornetze eingebunden werden und bilden die Basis für 3D-Monitoring-Messsysteme mit Neigungs- und Setzungsänderungen im weiten Anwendungsgebiet der Deformationsüberwachung von Bauwerken.

Die Signalauswertung des Laserstrahlengangs mit Hilfe der Fast-Fourier-Transformation, die Berechnungen des Neigungswinkels und des Brechungsindex, die Untersuchung der Messflüssigkeiten, die Setzungs- und Neigungsbestimmung sowie die Korrekturberechnungen des LSW-Messinstrumentes werden ausführlich in den Veröffentlichungen Markscheidewesen, Ausgabe 1/2023 sowie avn, Ausgabe 5/2023 beschrieben. [3] [4]

3. Validierung in Anwendungsgebieten

Die Einsatz- und Funktionsfähigkeit des Gesamt-Messsystems „HYDRO-LaWa“ mit ihren LSW-Entwicklungsstufen wurde ausführlich in den unter Punkt 1 aufgelisteten drei Anwendungsgebieten innerhalb des BMWK geförderten AiF Kooperationsprojektes nachgewiesen [3].

Des Weiteren wurde ein viertes Anwendungsgebiet mit dem Haldenböschung-Monitoring auf dem Außengelände „Reiche Zeche“ der TU Bergakademie Freiberg untersucht und bewertet [4]. Der autarke Messaufbau setzte sich dabei aus den folgenden Komponenten zusammen: zwei LSW, die mobil an Fußstativ und Beton-Gehwegplatte in 8 m Entfernung befestigt waren, einem Solarpanel, einem Mess-Sensorik-Koffer (MSK) mit Steuerbox, Mini-PC, LTE-Router, Batterie, Gleichstrom- und Wechselrichter [4].

Um die Richtigkeit bzw. die fehlerfreie Langzeitmessung des neuen Echtzeit-Messprinzips zu gewährleisten, erfolgte die Validierung der Messkombination zur Bestimmung von Setzungen und Neigungen in weiteren komplexen Anwendungsgebieten. Mit Unterstützung des geförderten BMBF-Verbundprojektes „CLEAR“ und dem Industriepartner STORAG Etzel GmbH sowie mit dem geförderten Krügerstiftungsprojekt „MONDIS“ und dem Industriepartner Westsächsische Entsorgungs- und Verwertungsgesellschaft mbH (WEV), konnten für die TU Bergakademie Freiberg essentielle Anwendungsgebiete aus der Praxis untersucht und analysiert werden.

3.1. Tunnel-Monitoring, WEV, Zentraldeponie Leipzig

Die Zielstellung im Krügerstiftungsprojekt „MONDIS“ ist die technische Validierung der innovativen Messkombination, die simultan und hochpräzise drei unterschiedliche Aufgaben der Deformationsmessung (Neigung, Distanz und Setzung) erfüllt. Zur Sicherung der Nachnutzungsinfrastruktur auf Tagebaukippen, Deponien oder Haldengebieten wurde als „Transformation Bergbaufolge“ bei der Westsächsischen Entsorgungs- und Verwertungsgesellschaft mbH (WEV) unter der Zentraldeponie Leipzig (Cröbern) eine Tunnel-Langzeituntersuchung durchgeführt. Der 850 m lange Kontrolltunnel erstreckt sich unterhalb der Deponie über die gesamte Längsachse. Er wird einerseits zur Setzungsüberwachung sowie zur regelmäßigen Reinigung der Sickerwassersammelrohre eingesetzt. [5]



Abb. 3: Tunnel-Monitoring unter Zentraldeponie Leipzig mit LSW- und Radar-Messungen, WEV 2023 [5]

In Abb. 3 ist zu erkennen, dass die zwei 8 m langen, 4 m quadratischen Betonblöcke 107 und 106 in diesem Tunnelbereich (800 m von 850 m) zueinander geneigt und verschoben sind. Für die Untersuchungen im Tunnel wurde der kritische Bereich zwischen den Blöcken 107 und 106 instrumentalisiert. Die Setzungs-, Neigungs- und Temperatur-Echtzeitmessungen wurden im Messzyklus à 10 s im Zeitraum vom 03.07.2023 bis 27.08.2023 durchgeführt. Diese Untertage-Messungen wurden mit zwei ca. 2 m entfernten LSW, einem Mess-Sensorik-Koffer (MSK) mit integriertem Steuergerät und Mini-PC ermittelt. Des Weiteren wurden Radar-Distanzmessungen mit Indurad-Sensor und Triple-Corner-Reflektor am 21./ 23./ 28.08.2023 in einem Abstand von ca. 1,90 m durchgeführt (Abb. 3).

In diesem Kapitel soll der Fokus der Betrachtung auf die Neigungs- und Setzungsmessung mit den LSWs dargestellt werden. Das HYDRO-LaWa-Messsystem, mit den zwei an den Betonsegmenten 107 und 106 montierten LSWs, erzielte eine Gesamt-Messzeit von 30 Tagen, 13 Std. und 2 min. Der Temperaturbereich im Tunnel lag bei min. +19,5°C bis max. +22,8°C. Die Temperaturdifferenzen (LSW 02 – 01) wurden mit min. 0,1 K, max. 0,8 K

und i.d.R. 0,3 K in dem 2-monatigen Messzeitraum ermittelt. Die Temperaturen beider LSWs korrelierten zeitlich miteinander.

In Abb. 4 werden die Setzungsänderungen mit +2 mm bis -1,7 mm dargestellt. Die Betonsegmente heben und senken sich ständig zueinander, schwanken sich jedoch etwa um die Null-Achse ein, was auf eine stetige Belastung der Deponie zurückzuführen sein könnte. Die Setzungsbeträge werden an beiden Blöcken nach einer bestimmten Zeit x den gleichen Betrag haben (Ausgleichsphase).

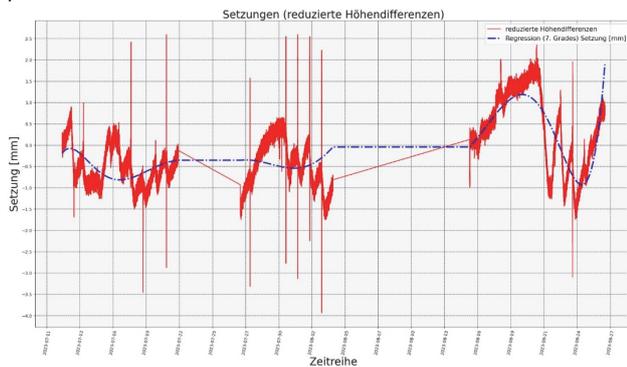


Abb. 4: Tunnel-Monitoring, Bereich 800 m von 850 m mit Setzungsänderungen, WEV 2023 [5]

In Abb. 5 werden die reduzierten X-Neigungen visualisiert. Die Maximalwerte der reduzierten X-Neigung sind +1,4° am Tunnelsegment 107 (LSW 01, grün) und +0,7° / -0,4° am Segment 106 (LSW 02, orange). Die Maximalwerte der reduzierten Y-Neigungen sind -1,2° am Segment 107 und -0,6° am Segment 106.

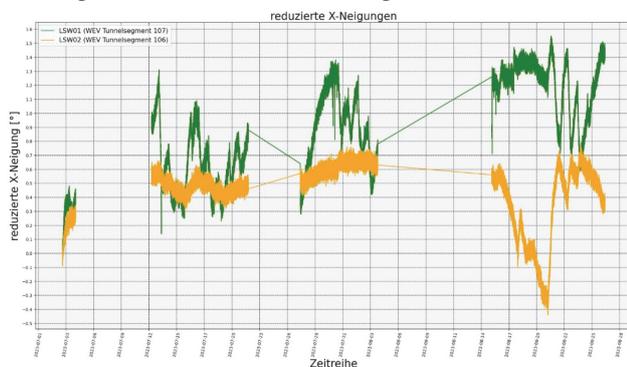


Abb. 5: Tunnel-Monitoring, Bereich 800 m von 850 m mit reduzierten X-Neigungen, WEV 2023 [5]

Die Setzungserscheinungen sowie Neigungsänderungen im kritischen Tunnelbereich 107 und 106 sind aufgrund ihrer geringen Bewegungsraten als vernachlässigbar klein zu betrachten. Dennoch ist eine kontinuierliche Langzeitmessung des gesamten Kontrolltunnels mit alternativen Messverfahren, wie das Nivellement, das Laserscanning oder mechanische Messwertaufnehmer, im täglichen bzw. wöchentlichen Messzyklus dringend zu empfehlen.

3.2. Geomonitoring-Station auf Halde „Reiche Zeche“ Freiberg

Mit der im August / September 2023 neu errichteten Multisensor-Geomonitoring-Station ist es möglich, auf der Halde des Forschungs- und Lehrbergwerks „Reiche

Zeche“ in Freiberg, hochpräzise Bodenbewegungen dauerhaft zu erfassen. Mit der Station können Setzungen, Neigungen, Lage- und Höhendifferenzen mit folgenden Messinstrumenten ermittelt werden: Doppel-Corner-Reflektor für satellitengestützte Radarinterferometrie, LSW, GNSS-Monitoring, Präzisionsnivellement und ein Aufsatzkreiselinstrument, das auf einer betonierten Messsäule zur Schachtlotung eingesetzt werden kann.



Abb. 6: Multisensor-Geomonitoring-Station mit LSW 02 (links) [6], Steigerhaus, KG-Labor mit LSW 01, PC, Steuerbox (rechts)

In der Abb. 6 (links) wird die Multisensor-Geomonitoring-Station mit GNSS, Doppel-Corner-Reflektor, Messsäule und Brunnenschacht, mit 1,20 m Schachtdeckel-Durchmesser und 1,50 m Schachttiefe, dargestellt. In dem Schacht wird die LSW 02 direkt am Betonfundament der Geomonitoring-Station montiert. Somit ist es möglich terrestrische Bodenbewegungen der Halde „Reiche Zeche“ mit der gesamten Betoneinheit zu ermitteln.

In der Abb. 6 (rechts) wird das Labor im Kellergeschoss (KG) des Steigerhauses „Reiche Zeche“ mit der Referenz-LSW 01 dargestellt. Diese ist am Höhenbolzenstativ an der ca. 70 cm starken Wand befestigt.

Die große Entfernung der zwei LSW zueinander beträgt 50 m. Die verbindenden Schlauchleitungen (1x Messflüssigkeit, 1x Luftdruckausgleich) wurden innerhalb von PE-Rohren unterirdisch und horizontal mit einer Höhendifferenz von +/- 1 cm verlegt. Zur Datenerfassung wurden im Steigerhaus ein Mini-PC mit Monitor und eine Steuerbox zur Datenregistrierung im Messzyklus à 10 s installiert (Abb. 6, rechts).

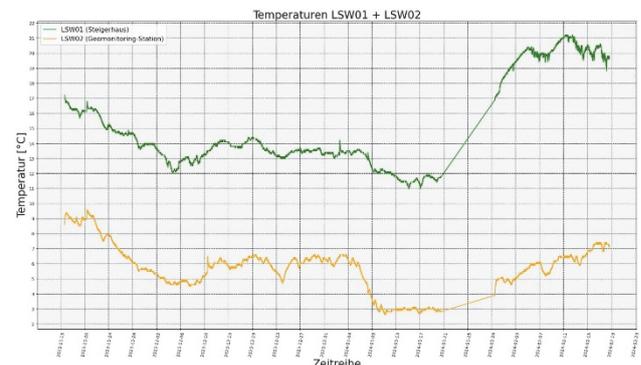


Abb. 7: Geomonitoring-Station (LSW 02, orange), Steigerhaus (LSW 01, grün) mit Temperaturverläufe

Die 3-monatige Messung wurde im Zeitraum vom 16.11.2023 ... 19.02.2024 mit dem Gesamt-Messsystem „HYDRO-LaWa“ auf der Halde „Reiche Zeche“ aufgezeichnet. In Abb. 7 werden die Temperaturverläufe der Referenz-LSW 01 (grün) im Steigerhaus sowie der LSW 02 (orange) an der Geomonitoring-Station visualisiert.

Im Steigerhaus wurden Temperaturen von +11°C ... +21°C und in der Geomonitoring-Station von +2,7°C ... +9,6°C gemessen. Es ergaben sich trotz der „relativen“ zeitlichen Korrelation der Temperaturkurven extrem starke Temperaturdifferenzen von 6,7 K bis max. 15 K (LSW 02 – 01).

In Abb. 8 werden die Setzungsänderungen mit max. +4,3 mm / -3,0 mm dargestellt. Dabei ist die größte Setzungserscheinung am 21.12.2023 höchstwahrscheinlich auf starke Regen-Niederschläge und der damit resultierenden Halden-Bodenbewegung (Sackung) zu erklären.

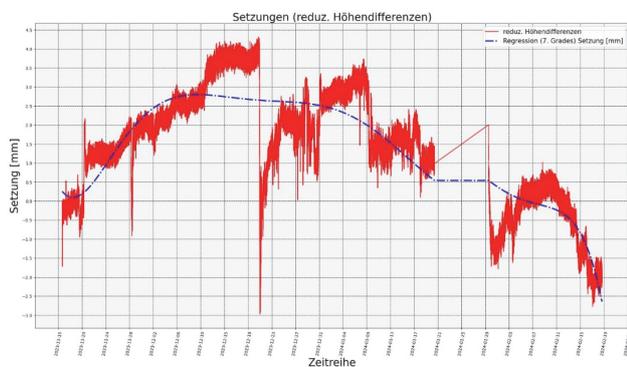


Abb. 8: Geomonitoring-Station (LSW 02), Steigerhaus (LSW 01) mit Setzungsänderungen

In Abb. 9 werden die reduzierten X-Neigungen der LSW im Steigerhaus (grün) und an der Geomonitoring-Station (orange) veranschaulicht. Im Steigerhaus gibt es nahezu keine Neigungen in X-Richtung, sondern ein deutliches Messrauschen mit etwa +/-0,1° um die Nullachse, welches auf die hohe Statik der Kellerwand des Steigerhauses zurückzuführen ist. Die reduzierten X-Neigungen der Geomonitoring-Station erzielen Maximalwerte von -0,3°...+2,2°, wobei am 21.12.2023 ebenfalls die größte Bewegungsänderung festgestellt wurde.

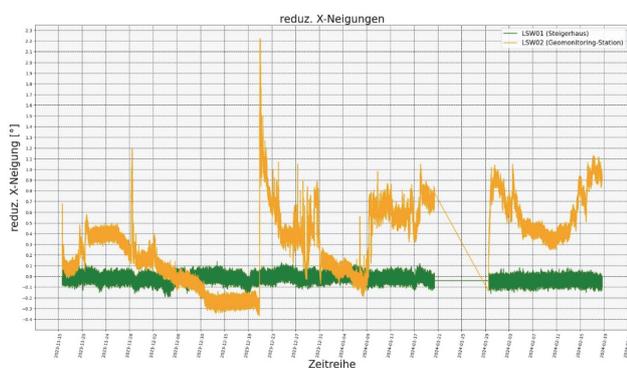


Abb. 9: Geomonitoring-Station (LSW 02, orange), Steigerhaus (LSW 01, grün) mit reduzierten X-Neigungen

Die reduzierten Y-Neigungen im Steigerhaus waren mit max. -0,1°...+0,3° stabil. Die reduzierten Y-Neigungen an

der Geomonitoring-Station reichten von max. -0,9°...+0,7°. Die Maximalwerte waren ebenfalls am 21.12.2023 deutlich zu erkennen.

Die Setzungs-, Neigungs- und Temperaturmessungen mit dem LSW-Gesamtsystem werden für das Bodenbewegungs-Monitoring auf der Halde „Reiche Zeche“ fortgeführt. Die ermittelten Daten werden mit den Werten der Wetterstation (Temperatur, Niederschläge) sowie mit den GNSS-Daten (Lage-, Höhenänderung) bis zum Sommer 2024 verifiziert und bewertet.

3.3. Kavernen-Monitoring K122, STORAG Etzel GmbH

Die Umwidmung von Gaskavernen für die Wasserstoffspeicherung ist ein aktuelles Thema bei Betreibern von Kavernen. So wurde mit Unterstützung des BMBF-Verbundprojekts „CLEAR“ in Kooperation mit der TU Wroclaw, der TU Bergakademie Freiberg, Info Solutions Warschau und der FPM Holding GmbH (Freiberger Präzisionsmechanik) ein terrestrisches und satellitengestütztes Bodenbewegungs-Monitoring Konzept entwickelt, indem am Beispiel der Gaskaverne K122 die LSW untersucht und validiert wurde.

Mit dem CLEAR-Industriepartner STORAG ETZEL GmbH in Friedeburg (Ostfriesland, Nordsee) wurde seit dem 27.09.2023 eine komplette Messanlage mit Online-LTE-Funkübertragung zur Datenübermittlung auf der Grünfläche der Gaskaverne K122 in Betrieb genommen (Abb. 10).



Abb. 10: Gesamt-Messaufbau zum LSW-Monitoring auf Gaskaverne K122, STORAG Etzel GmbH [9]

Die Teufenlage der Gaskaverne K122 ist in etwa 900 m bis 1500 m Tiefe im etwa 250 Mio. Jahre alten Salzstock Etzel (ca. 12 km lang, ca. 5 km breit, ca. 4 km hoch). Die Kaverne K122 mit ca. 600 m Höhe, erreicht mittlere Durchmesser von ca. 30 ... 50 m und besitzt ein Gesamthohlraumvolumen von mehr als 440.000 m³. [7] [8]

In Abb. 11 wird die Messstelle mit den zwei Höhenfestpunkten und den daran montierten 2 m entfernten LSWs auf der Gaskaverne K122 der STORAG Etzel GmbH dargestellt. [9]



Abb. 11: Gaskavernen-Monitoring K122, Messaufbau mit zwei LSW und Mess-Sensorik-Koffer, STORAG Etzel GmbH [9]

Dabei ist die LSW 01 am ersten Höhenfestpunkt P1 (Tiefe 25 m) fest verbunden. Der zweite Höhenfestpunkt P2 mit montierter LSW 02 ist für das Bodenbewegungs-Monitoring 8 m tief gesetzt (Abb. 11, v. re.). Der Mess-Sensorik-Koffer (MSK) mit integriertem Steuergerät, Mini-PC, LTE-Mobilfunkrouter und der Stromanschluss ist in Abb. 11, (v. li.) dargestellt. Um die LSW-Messanlage im tragfähigen Baugrund zu befestigen, wurde mit Unterstützung der FPM Holding GmbH, der TU Bergakademie Freiberg, Firma TBD und der STORAG ETZEL GmbH eine Rammstab-Vermarkung durchgeführt. Drei Edelstahlhauben wurden robust an jeweils drei Rammstäben zum Schutz vor extremen Wetterbedingungen der Nordsee über die Gesamt-Messeinheit (LSW 01, LSW 02 und MSK) installiert (s. Abb. 10 und 11). Die annähernde 5-monatige Messung wurde im Zeitraum vom 27.09.2023 bis 19.02.2024 im Messzyklus à 10 s durchgeführt.

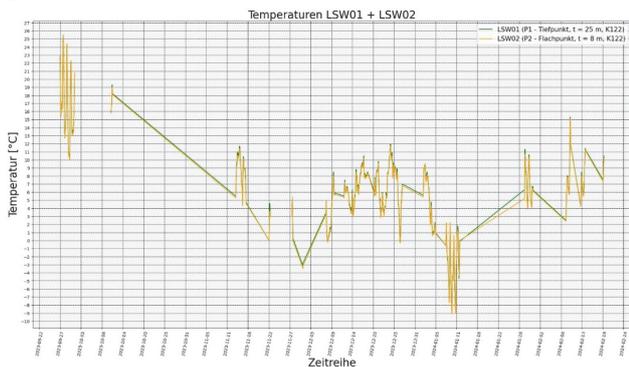


Abb. 12: LSW-Kavernen-Monitoring K122, Zeitraum 27.09.2023 bis 19.02.2024 mit Temperaturverläufe

In Abb. 12 sind die zeitlich korrelierten Temperaturverläufe zw. LSW 01 (P1, grün) und LSW 02 (P2, orange) deutlich zu erkennen. Die Temperatur-Differenzen (LSW 02 – 01) bestätigen die Korrelation von max. -1,2 K...+0,9 K. Die Höchsttemperatur wurde zu Beginn des Messzeitraums Ende Sept. 2023 mit +25,5°C ermittelt. Die tiefste Temperatur wurde mit -9°C Anfang Januar 2024 gemessen.

In Abb. 13 werden die reduzierten Höhendifferenzen (Setzungen) im 1-monatigen Zeitraum vom 07.12.2023

bis 11.01.2024 veranschaulicht. Die Maximalwerte wurden mit -0,6 mm Anfang Dez. 2023 und +2 mm bis +2,2 mm Anfang Januar 2024 registriert.

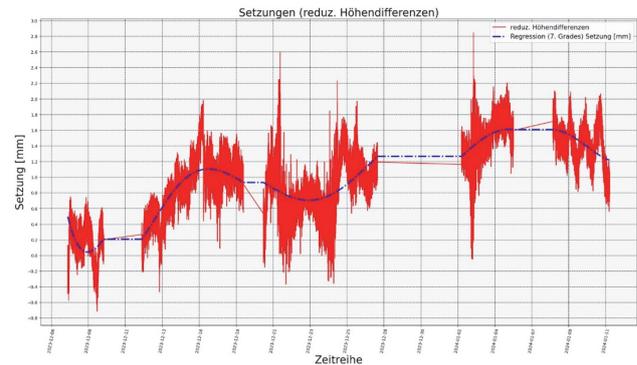


Abb. 13: LSW-Kavernen-Monitoring K122, Zeitraum 07.12.2023 bis 11.01.2024 mit Setzungsänderungen

Abb. 14 zeigt den 1-monatigen Messzeitraum vom 07.12.2023 ... 11.01.2024 der reduzierten Neigungen in X-Richtung an dem Höhenfestpunkt P1 (LSW 01, grün) mit +0,9° bis -0,05° und am Flachpunkt P2 (LSW 02, orange) mit +0,5° bis -0,8°. Die reduzierten Y-Neigungen wurden bei P1 mit +0,25° bis -0,5° und am P2 mit max. -0,7° für den gleichen 1-Monatszeitraum gemessen.



Abb. 14: LSW-Kavernen-Monitoring K122, Zeitraum 07.12.2023 bis 11.01.2024 mit reduzierten X-Neigungen

Die Setzungs- und Neigungsänderungen auf der Gaskaverne K122 sind aufgrund ihrer geringen Bodenbewegungsraten aktuell als vernachlässigbar klein zu betrachten. Bis mindestens April 2024 wird für die Gaskaverne K122 die Setzungs-, Neigungs- und Temperatur-Langzeit-Überwachung per LTE-Online-Fernzugriff fortgeführt und evaluiert, sodass die Ein- und Ausspeicherung der Gaskaverne mit einbezogen werden können.

4. Zusammenfassung

Das „HYDRO-LaWa“-Gesamt-Messsystem mit Hardware-, Softwarekonzept sowie mit der hochpräzisen, hydrostatischen, optisch-elektronischen LSW, zur simultanen Echtzeitmessung von Setzungen, Neigungen und Temperaturen, wurde in dieser Veröffentlichung umfangreich beschrieben. Die Funktionsweise und Evaluierung konnte innerhalb des BMWK AiF Kooperationsprojekts „HYDRO-LaWa“ in der Bergwerkschacht-Anlage

„Alte Elisabeth“ Freiberg, in der Kirche Leubnitz-Neuostra Dresden sowie im Fundament des Fernsehturms Dresden nachgewiesen werden [3].

Dieser Beitrag beschreibt, wie die Validierung der industriereifen LSW in drei extremen Anwendungsgebieten langzeitstabil und erfolgreich umgesetzt werden konnte:

- WEV Tunnelsegment-Monitoring unter der Zentraldeponie Leipzig, Untertage, Messzeitraum: ca. 2 Monate, 03.07.2023...27.08.2023
- Langzeitüberwachung der Haldenböschung „Reiche Zeche“ mit Multisensor-Geomonitoring-Station in Freiberg, Außeneinsatz mit Schachtabdeckung, Messzeitraum: 3 Monate, 16.11.2023...19.02.2024
- Bodenbewegungs-Monitoring auf der Gaskavernen-Anlage K122 der STORAG Etzel GmbH in Friedeburg, Extremwetterbedingungen, Edelstahlabdeckungen, Messzeitraum: ca. 5 Monate, 27.09.2023...19.02.2024

Die Robustheit und Langzeitstabilität des hochgenauen Echtzeit-Messsystems wurde mit automatisierten Messungen in den drei Anwendungsgebieten über Monate nachgewiesen. Zudem konnten, auch bei großen Temperaturschwankungen und extremen Wetterbedingungen mit starken Niederschlägen, die hohen Messgenauigkeiten bei geringen Standardabweichungen von 0,1 mm...0,2 mm mit der LSW-Messkombination erzielt werden.

Literaturverzeichnis

- [1] Möser, M.; Hoffmeister, H; Müller, G.; Schlemmer, H.; Staiger, R.; Wanninger, L. (2012): *Handbuch Ingenieurgeodäsie – Band Grundlagen*, 4. Auflage, Berlin/Offenbach: Wichmann Verlag, S. 329 ff.
- [2] Möser, M.; Müller, G.; Schlemmer, H. (2016): *Handbuch Ingenieurgeodäsie – Band Ingenieurbau*, 2. Auflage, Berlin/Offenbach: Wichmann Verlag, S. 301 ff.
- [3] Kubisch, F.; Schuwerack, C.; Böhme, H.; Möser, M.; Benndorf, J. (2023): Hydrostatische Laser-Präzisions-schlauchwaage zur hochgenauen Ermittlung von Neigungen und Setzungen, in: *Markscheidewesen, Ausgabe: 1/2023*, Jg. 130, S. 14 – 31.
- [4] Kubisch, F.; Schuwerack, C.; Möser, M.; Benndorf, J.; Böhme, H. (2023): Ein neues Echtzeit-Messprinzip zur Bestimmung von Setzungen und Neigungen mit einer hydrostatischen Laser-Präzisionsschlauchwaage, in: *avn (allgemeine vermessungsnachrichten), Ausgabe: 5/2023*, Jg. 130, S. 173 – 184.
- [5] Kubisch, F.; Benndorf, J.; Pokrandt, M.; Kramer, D. (2023): Inbetriebnahme Tunnel-Monitoring unter Zentraldeponie Leipzig mit FG-LSW-V2 „HYDRO-LaWa“ Messsystem, Westsächsische Entsorgungs- und Verwertungsgesellschaft mbH (WEV Sachsen) und TU Bergakademie Freiberg.
- [6] Müller, Detlev (Pressefotograf im Auftrag der TU Bergakademie Freiberg Pressestelle) (2023): <https://www.picdrop.com/presseerzgebirgsfoto.de/aBP2e98xN9> [01.11.2023].
- [7] Presse- und Öffentlichkeitsarbeit, STORAG ETZEL GmbH (2017): Kavernen Speicher Etzel – Versorgungssicherheit für Erdgas und Erdöl, Brune-Mettcker Druck- und Verlags-GmbH Wilhelmshaven, S. 11 – 15.
- [8] SOCON – Sonar Control Kavernenvermessung GmbH (05.09.2022): ECHO – LOG, Bericht über die Ergebnisse der echometrischen Hohlraumvermessung in der Kaverne Etzel K 122, Berichtsnummer: 221 141, STORAG ETZEL GmbH, Friedeburg
- [9] Kubisch, F.; Oldenettel, M., Böhme, H., Speck, I. (2023): Inbetriebnahme Kavernen-Monitoring auf Gaskavernen-anlage K122 mit FG-LSW-V2 „HYDRO-LaWa“ Messsystem, STORAG ETZEL GmbH, Firma TBD, FPM Holding GmbH und TU Bergakademie Freiberg.

Danksagung

Das Projekt wurde durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) im Rahmen des Zentralen Innovationsprogramms Mittelstand (ZIM) über die AiF Projekt GmbH gefördert und gemeinsam von der Technischen Universität Dresden (KK5291401BA1), der Technischen Universität Bergakademie Freiberg (KK5281201BA1) und der FPM Holding GmbH „Freiberger Präzisionsmechanik“ (KK5280701 BA1) mit dem Unterauftragnehmer Electronic Renaissance Dresden im Zeitraum von April 2021 bis März 2023 erfolgreich entwickelt.

Mit Unterstützung des Dr. Erich Krügerstiftungsprojektes „MONDIS“ (Laufzeit Oktober 2022 bis September 2025) wurden die Anwendungsgebiete WEV Tunnel-Monitoring unter der Zentraldeponie Leipzig sowie die Errichtung einer neuen Multisensor-Geomonitoring-Station auf der Halde des Forschungs- und Lehrbergwerks „Reiche Zeche“ in Freiberg realisiert.

Mit Hilfe des BMBF-Verbundprojektes „CLEAR“ (Laufzeit Juli 2022 bis Juni 2025) wird in Kooperation mit der Wrocław University of Science and Technology, der TU Bergakademie Freiberg, Info Solutions Warschau, der FPM Holding GmbH sowie dem Industriepartner der STORAG ETZEL GmbH ein terrestrisches und satellitengestütztes Umweltmonitoring auf Kavernenspeicher untersucht und validiert.