

Satellitenüberwachung der Verformungen von Staumauern und Staudämmen

Seit 2014 beobachtet der Satellit Sentinel-1A des ESA-Erdbeobachtungsprogramms Copernicus die Erdoberfläche. Die mit Hilfe der Persistent-Scatterer-Interferometrie erhobenen Daten werden durch den BodenBewegungsdienst Deutschland zur Verfügung gestellt. An Staumauern und Staudämmen können so mögliche Bewegungen überwacht werden. Im Vergleich mit trigonometrischen Messungen und Lotmessungen an der Möhnestaumauer zeigt sich, dass die Genauigkeit der Satellitendaten für die Überwachung einer Staumauer noch nicht ausreicht. Für Staudämme bieten sie jedoch die erforderliche Präzision.

Volker Bettzieche

1 Erdbeobachtung mit den Sentinel-Satelliten

Am 3. April 2014 startete der Satellit Sentinel-1A in die Erdumlaufbahn, als erster Satellit des Erdbeobachtungsprogramms Copernicus. Der baugleiche Satellit Sentinel-1B startete am 25. April 2016. Die Radarinstrumente dieser beiden Sentinel-Satelliten (Sentinel deutsch: Wächter) ermöglichen die Überwachung der Erdoberfläche, unabhängig von Tageslicht und Wolkenbedeckung. Die Satelliten umkreisen die Erde in 700 km Höhe und tasten einen Streifen von bis zu 400 km Breite ab, in dem sie Objekte ab 5 m Größe erkennen können.

Das wichtigste Instrument beider Satelliten ist ein Radar vom Typ SAR (Synthetic Aperture Radar), dessen Strahlen durch die Vegetation bis zum Erdboden dringen können.

Wesentliche Beobachtungsziele sind Eisbeobachtungen in den Polarregionen, vulkanische Aktivitäten, Erdbeben, Erdbeben, Überschwemmungen, das Aufspüren von Bodensenkungen und -hebungen sowie das Beobachten von Meeresoberflächen. Beide Satelliten zusammen können jeden Punkt der Erde alle sechs Tage kartieren. Falls benötigt, können die Daten anschließend innerhalb von einer Stunde zur Verfügung gestellt werden.

Die Missionsdauer von Sentinel-1A und -1B ist jeweils auf sieben Jahre ausgelegt. Der mitgeführte Treibstoff würde jedoch Verlängerungen um bis zu fünf Jahre ermöglichen [3].

2 Auswertungen des BodenBewegungsdienst Deutschland

Seit November 2019 stellt nun die Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR) den BodenBewegungsdienst Deutschland (BBD) zur Verfügung, der mit dem Ziel entwickelt wurde, Deformationen der Erdoberfläche darzustellen und Ursachen und Prozesse zu erkunden. Die Informationen sind öffentlich zugänglich. Das BBD-Portal enthält Persistent-Scatterer-Interferometrie-Daten (PSI deutsch etwa: ständige Rückstreuungsmessung mit Wellenüberlagerung) der gesamten Fläche der Bundesrepublik Deutschland. Die PSI-Technologie ermöglicht

präzise Messungen von Deformationen der Erdoberfläche im Bereich von Millimetern [4].

Die Rückstreuung erfolgt nicht an diskreten Messpunkten. Stattdessen werden die Rückstreuungen bestehender Strukturen, zum Beispiel von Hausdächern oder Gesteinsoberflächen genutzt. Aus diesem Grund sind auch die Daten im Wesentlichen in städtischen Gebieten oder an großen Bauwerken von guter Qualität, während beispielsweise in Waldgebieten kaum Daten erhoben werden können. Die Auswertung erfolgt über die Mittelung mehrerer Messungen, aus denen eine Zeitreihe berechnet wird. Als Ergebnis steht eine Bewegungsgeschwindigkeit zur Verfügung, die in Millimeter/Jahr angegeben wird.

Der BBD nutzt die Daten von Sentinel-1. Der Satellit sendet mittels seiner SAR-Antenne (Synthetic Aperture Radar) ein Radarsignal. Dieses Signal wird von der entsprechenden Fläche an der Erdoberfläche reflektiert, wobei eine Streuung entsteht. Die zurückerhaltene Signalstärke sowie eine mögliche Phasenverschiebung werden gemessen und ausgewertet. Die räumliche Auflösung an der Erdoberfläche beträgt im Mittel 5 m x 20 m.

Durch den Vergleich von zwei Phasen, die an unterschiedlichen Zeitpunkten aufgenommen wurden, kann die Änderung der Entfernung zur Satellitenposition bestimmt werden. Hierbei müssen Störungen, wie atmosphärische Bedingungen usw. berücksichtigt werden. Mit einer statistischen Auswertung einer Zeitreihe mit einer Vielzahl von Messungen können Entfernungsänderungen oder deren zeitliche Variabilität mit guter Genauigkeit ermittelt werden.

Kompakt

- Mit Hilfe der Satelliten des ESA-Programms Copernicus können Bewegungen der Erdoberfläche beobachtet werden.
- Die vom BodenBewegungsdienst Deutschland aufbereiteten Daten eignen sich zur Überwachung von Staudämmen. Für Staumauern muss das Verfahren noch verbessert werden.

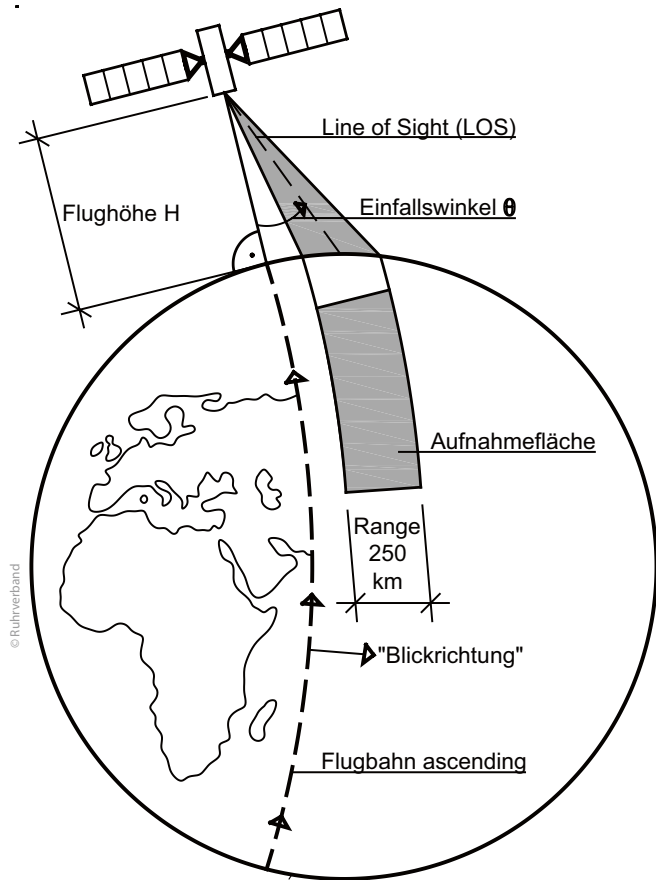


Bild 1: Flugbahn der Satelliten und Aufnahmefläche

Bild 1 gibt einen Überblick über die Beobachtungssituation der Satelliten. Sie umrunden die Erde auf einer Flugbahn, die nahe an Nord- und Südpol verläuft. Hierbei ist die „Blickrichtung“ nach rechts ausgerichtet. Auf dem Weg von Süden nach Norden (ascending, **Bild 1**) blickt der Satellit also nach Osten. Die Blicklinie LOS (Line of Sight) deckt dabei unter dem Einfallswinkel θ eine Breite (Range) von 250 km ab. Beim Rückweg von Nord nach Süd (descending) blickt er dann in der gleichen Weise nach Westen.

Die beobachteten Bewegungen folgen also in ihrer Richtung der LOS. Daher werden keine direkten Setzungen oder Verschiebungen beobachtet, sondern nur der summierte Anteil in LOS-Richtung.

Auf der Internetseite <https://bodenbewegungsdienst.bgr.de/> stellt der BBD einen Zugang zu den Satellitendaten zur Verfügung. Vor einer Deutschlandkarte oder entsprechenden Luftbildern werden die ausgewerteten Punkte dargestellt. Nach Auswahl eines Punktes wird eine Zeitreihe der Verformungen dargestellt. Neben der Punktnummer werden zudem eine mittlere Bewegungsgeschwindigkeit pro Jahr, die Kohärenz der Daten, die Blickrichtung des Satelliten und der Blick-Einfallswinkel angegeben. Mit diesen Informationen kann sofort abgelesen werden, ob sich ein Punkt in der Blickrichtung des Satelliten bewegt und welche Sicherheit (Kohärenz) diese Aussage hat. Die bedeutend größte Anzahl von Punkten zeigt allerdings keine Verformungen.

3 Anwendung bei der Überwachung der Verformungen von Absperrbauwerken

Die Aussage, dass die meisten Punkte keine Verformungen zeigen, ist für die Überwachung von Staudämmen und Stau-mauern von großem Interesse. Ist es doch genau dieses Ergebnis, das sich die Bauwerksüberwachung für jeden Staudamm wünscht. Für Stau-mauern ist die typische Jahresganglinie mit ebenfalls keiner dauerhaften Verschiebung wünschenswert. So stellen sich nun die Fragen,

- ob aus den Daten des BBD für Absperrbauwerke solche Aussagen über mögliche Trends gewonnen werden können,
- für welche Anzahl von Punkten auf den Absperrbauwerken Auswertungen erfolgen können und
- wie genau diese Aussagen sind.

3.1 Anwendung bei Staumauern

Zu den grundsätzlichen Bewegungen, Verschiebungen und Verformungen von Staumauern liegen umfangreiche Kenntnisse und Veröffentlichungen vor. Von besonderem Interesse ist die Verschiebung der Staumauerkrone, die wesentlich von der Stauhöhe in der Talsperre und der Umgebungstemperatur beeinflusst wird [1]. Zur Beobachtung sind gemäß dem aktuellen Regelwerk verschiedene Messeinrichtungen vorzusehen [2].

Mit Hilfe der in der Bauwerksüberwachung gewonnenen Daten kann geprüft werden, ob auch die Daten des BBD für die Überwachung herangezogen werden können.

Dies soll beispielhaft an der Staumauer der Möhnnetalsperre des Ruhrverbands untersucht werden. Die 1912 errichtete Bruchstein-Staumauer ist 40 m hoch und 650 m lang. Sie ist, neben anderen Messeinrichtungen, mit einer trigonometrischen Lage-messung und einem Pendellot ausgerüstet (**Bild 2**). Die seit 1955 erhobenen trigonometrischen Daten sowie die 1977 eingerichtete Lotmessung zeigen den typischen Jahresverlauf der Bewegungen einer Staumauer unter dem Wechsel des Stauspiegels und der Lufttemperaturen.

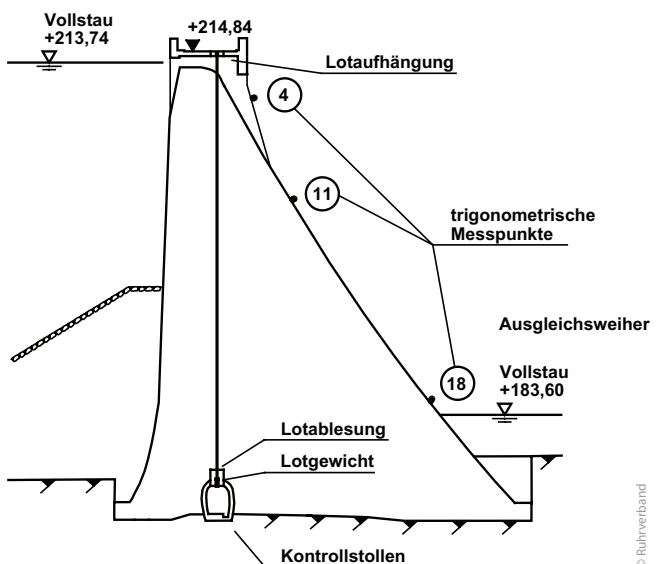


Bild 2: Querschnitt der Möhnestaumauer mit Messausstattung

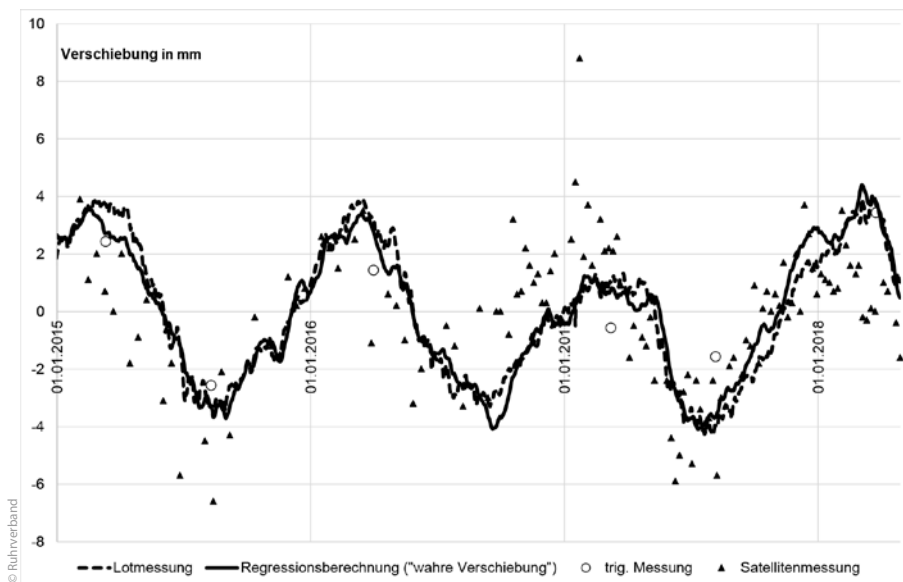


Bild 3: Lagemessungen an der Krone der Möhnestaumauer

Der BBD identifiziert 8 Messpunkte (Persistent Scatterer) entlang der Staumauer. Die öffentlich verfügbaren Daten liegen für den Zeitraum vom 5.12.2014 bis zum 30.04.2018 vor. Die Genauigkeit dieser Daten soll mit der trigonometrischen Messung und der Lotmessung verglichen werden.

Als Bezug für den Vergleich ist die „wahre Verschiebung“ der Staumauer zu wählen. Da diese nicht bekannt ist, wird zunächst anhand einer klassischen Berechnung der multiplen Regression ein Zeitverlauf der Verschiebung erstellt [1]. Grundlage bilden als Wirkgrößen die Zeitverläufe der Stauhöhe und der Temperatur, aus denen die Verformung der Staumauerkrone an der Lotaufhängung errechnet wird. Diese Kurve wird als „wahre Verschiebung“ interpretiert (**Bild 3**).

Nun kann die Abweichung zwischen der „wahren Verschiebung“ mit der Lotmessung verglichen werden.

Die Genauigkeit einer elektronischen Lotmessung liegt im Allgemeinen bei 0,5 mm. Dies zeigt auch die Auswertung der Lotmessung an der Möhnestaumauer in **Tabelle 1**, in der sich der Vertrauensbereich von 90 % zu +/-1 mm ergibt.

Für eine trigonometrische Überwachung liegt der Vertrauensbereich einer Messung erfahrungsgemäß bei +/-3 mm. Die Ergebnisse der nur sechs Messungen im Betrachtungszeitraum sind als mit +/-1,35 mm als sehr gut zu bezeichnen.

Die vergleichende Bewertung der Satellitenbeobachtung des BBD ist zunächst mit der Schwierigkeit behaftet, dass die Richtung der beobachteten Bewegung entlang der Sichtlinie des Satelliten (LOS) nicht der typischen Bewegungsrichtung der Staumauer von der Luftseite zur Wasserseite entspricht. Durch eine Normierung kann die Kurve jedoch in die Kurve der „wahren Verschiebung“ eingehängt werden. Rein visuell ergibt sich in **Bild 3**, dass die Daten der Satellitenmessung der Verformungskurve der Staumauer folgen. Sie sind allerdings erwartungsgemäß schlechter als die Ergebnisse der klassischen Messungen.

Die normierten Werte geben aber einen Anhalt für die Genauigkeit der Beobachtung. Ein Vertrauensbereich von +/-4 mm bei einer Bandbreite der Messergebnisse von 8 mm ist verhältnismäßig groß. Es ergibt sich, dass mit diesen Größenordnungen die Bewegungen einer Staumauer nicht ausreichend überwacht werden können.

3.2 Anwendung bei Staudämmen

Die Verschiebungen von Staudämmen unterliegen im Allgemeinen keinen signifikanten jahreszeitlichen Schwankungen. Temperaturunterschiede reichen nicht weit in den Dammkörper, so dass im Inneren eines hohen Damms ständig gleiche Temperaturen herrschen. Hieraus ergibt sich, dass auch keine temperaturverursachten Bewegungen auftreten.

Aus diesem Grund wird von den Regelwerken auch nur die trigonometrische Überwachung im Jahresrhythmus verlangt, eine Lotanlage ist unüblich.

Die Anforderungen an die erforderliche Genauigkeit der Überwachungen der Verformungen von Staudämmen liegen erheblich unter den Ansprüchen bei Staumauern. Gesamtverformungen von Staudämmen in ihrer bisherigen Betriebszeit von mehreren Dezimetern sind bekannt, ohne dass Sicherheitsbedenken erhoben werden mussten. Daher kann auch die Genauigkeit der Überwachung weiter gefasst werden. Unter bestimmten Umständen können Messgenauigkeiten von 1 cm bzw. 10 mm ausreichend sein.

Tabelle 1: Statistische Auswertung der Messverfahren an der Möhnetaisperre (Quelle: Ruhrverband)

	Lotmessung	trigonom. Messung	Satellitenmessung
Anzahl Messwerte	1 247	6	132
mittlere Abweichung [mm]	0,43	0,46	1,66
Standardabweichung [mm]	0,54	0,69	2,10
90%-Bereich [mm]	1,06	1,35	4,12

Für diesen geringeren Anspruch eignet sich die für die Satellitenbeobachtung an der Möhnetalsperre errechnete Genauigkeit hervorragend. Mit einem Vertrauensbereich von ± 4 mm lässt sich die Verschiebung einer Dammkrone ausreichend genau überwachen.

Voraussetzung ist jedoch, dass die Dammkrone vom Satelliten erkannt wird, was mangels einer signifikanten Oberfläche oft schwierig ist. Nur in Einzelfällen können signifikante Objekte auf der Dammkrone identifiziert werden.

4 Radarreflektoren

Zur Verbesserung der Sichtbarkeit und zur Identifizierung konkreter Punkte können sogenannte Radar- oder Corner-Reflektoren dienen. Diese dreiseitigen „Spiegel“ reflektieren den SAR-Strahl, so dass der Reflektor vom Satellit eindeutig wiedergefunden werden kann (**Bild 4**). Mit Kantenlängen von mehreren Dezimetern sind die Reflektoren allerdings vergleichsweise groß.

5 Wertung und Ausblick

Mit Hilfe der Sentinel-Satelliten ergibt sich ein völlig neuer „Blick“ auf die Staumauern und Staudämme. Es scheint möglich, die Überwachung der Bauwerke mit Hilfe der Persistent-Scatterer-Interferometrie zu verbessern und perspektivisch zu vereinfachen. Hierzu ist noch weitere Forschungsarbeit notwendig, die zum Beispiel folgende Fragen vertieft:

- Ist die Genauigkeit der Persistent-Scatterer-Interferometrie zu verbessern?
- Kann die „Objekterkennung“ verbessert werden, so dass mehr „Punkte“ auf Damm oder Mauer beobachtet werden können?
- Sind die 3 Richtungen $x/y/z$ interpretierbar, z. B. durch zusätzliche Beobachtung auf der Descending-Flugbahn?
- Auf welchem Weg sind für einen Talsperrenbetreiber aktuelle Werte verfügbar und was kosten sie?
- Kann die Datenabfrage und -auswertung automatisiert und an ein Talsperren-Überwachungssystem angeschlossen werden?

Der Ruhrverband beabsichtigt, diesen Fragen in Kooperation mit dem Lehrstuhl für Fernerkundung im Institut für Geographie der Friedrich-Schiller-Universität Jena weiter nachzugehen.

Volker Bettzieche

Satellite monitoring of the deformations of dams

Since 2014, the Sentinel-1A satellite from ESA's Copernicus earth observation program is observing the surface of the earth. The data collected using Persistent Scatterer Interferometry is made available by the BodenBewegungsdienst Deutschland. Possible movements of dams can be monitored this way. In comparison with trigonometric and plumb measurements on the Möhne dam, it can be shown that the accuracy of the satellite data is not yet sufficient to monitor a masonry dam. However, they offer the required precision for embankment dams.

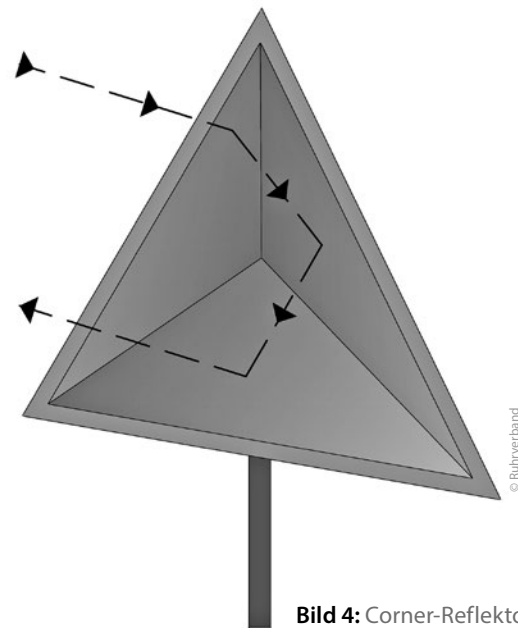


Bild 4: Corner-Reflektor

Es besteht die Hoffnung, hier eine neue Möglichkeit zu entwickeln, aufwändige trigonometrische Messungen zu reduzieren oder auch schwer erreichbare Anlagen (z. B. im alpinen Bereich) zu überwachen.

Autor

Prof. Dr.-Ing. Volker Bettzieche

Ruhrverband
Kronprinzenstr. 37
45128 Essen
vbe@ruhrverband.de

Literatur

- [1] Bettzieche, V.: Mathematisch-statistische Analyse von Messwerten der Talsperrenüberwachung. In: WasserWirtschaft 94 (2004), Heft 1-2.
- [2] DWA (Hrsg.): Bauwerksüberwachung an Talsperren. In: DWA-Merkblätter (2011), M 514.
- [3] ESA (Hrsg.): United space in Europe (www.esa.int/Space_in_Member_States/Germany/Sentinel-1_Erste_Mission_fuer_Copernicus, Abruf 06.03.2020).
- [4] Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (Hrsg.): Nutzungshinweise BBD WebGIS (www.bgr.bund.de/DE/Themen/GG_Fernerkundung/Downloads/nutzungshinweise-bbd-webgis.pdf, Abruf 06.03.2020).

 Springer Professional

Fernerkundung 

De Lange, N.: Einführung in die Fernerkundung und digitale Bildverarbeitung. In: Geoinformatik in Theorie und Praxis. Berlin Heidelberg: Springer Spektrum, 2020.
www.springerprofessional.de/link/17762000

Komma, J.; Parajka, J.; et al.: Schneedaten aus der Fernerkundung in der hydrologischen Modellierung – Anwendungsbeispiele in Österreich. In: Österreichische Wasser- und Abfallwirtschaft, Ausgabe 11-12/2015. Wien: Springer, 2015.
www.springerprofessional.de/link/12041756