

BetonKalender 2025

Inhaltsverzeichnis

Sensorik und Langzeitmonitoring im Tunnelbau

Werner Lienhart, Christoph Monsberger, Johannes Flecki-Ernst und Bernd Moritz

1 Einleitung

Monitoring hat im Tunnelbau eine lange Tradition und ist integraler Bestandteil der Neuen Österreichischen Tunnelbaumethode (NÖT). Für die NÖT sind regel- mäßige 3D-Verschiebungsmessungen essenziell, da mit den erfassten Messdaten ein ständiger Vergleich mit dem prognostizierten Systemverhalten aus der Interaktion Ausbau – Gebirge erfolgt. Aufbauend auf den vorliegenden Informationen einschließlich der geologischen Dokumentation werden die geplanten Maßnahmen für Ausbruch und Stützung (Abschlagslänge, Anzahl von Anker, Dicke der Spritzbetonschale etc.) für den weiteren Vortrieb festgelegt. Es liegt somit ein Regelkreis zwischen visueller und messtechnischer Beobachtung – Auswertung und Interpretation – Vortrieb vor. In vielen Fällen sind die Grundlagen für die geotechnische Interpretation manuelle Messungen mit Totalstationen zu Bireflexzielen, welche in Problembereichen (z. B. Störungszonen) durch automatisierte punktuelle Sensoren, z. B. Schwingsaitensensoren, ergänzt werden. Teilweise werden auch linienhafte Sensoren, z. B. verteilte faseroptische Sensoren, verwendet, um eine kontinuierliche Messung in einem dichten Messintervall und eine vollständigere räumliche Verteilung zu erhalten. Im Gegensatz dazu beschränkt sich das Langzeitmonitoring meist auf visuelle Inspektionen, welche anlass- bezogen durch Messungen ergänzt werden. Hier findet derzeit ein Umdenken statt und Regelwerke werden für das Langzeitmonitoring entwickelt. Ziel des modernen Langzeitmonitorings ist es einerseits, laufend Informationen über die Tragfähigkeit und Zuverlässigkeit des Bauwerks zu erhalten und so- mit einen sicheren Betrieb des Tunnels jederzeit sicherzustellen. Andererseits soll durch die systematisch durchgeführten Messungen eine hohe Auslastung der Tunnelschale mit sich anbahnenden Überbeanspruchungen (Risse, Abplatzungen) frühzeitig erkannt werden. Dies dient dazu, Schäden im Frühstadium zu sanieren, in welchem dies noch mit vergleichsweise geringem Aufwand möglich ist, um im Optimalfall auch die Nutzungsdauer des Tunnels zu verlängern. Das Monitoring ermöglicht auch die rechtzeitige Planung von Sanierungsmaßnahmen, welche aufgrund der hohen Verkehrsauslastung der Straßen- und Eisenbahntunnel immer wichtiger wird. Tunnelsperren sind rechtzeitig und sorgfältig einzuplanen, um die volkswirtschaftlichen Auswirkungen, verursacht durch Staus, längere Fahrzeiten aufgrund von Umleitungen etc., minimal zu halten und somit die Anlagenverfügbarkeit möglichst hoch zu halten. Im Bauwerksmonitoring (engl. Structural Health Monitoring – SHM) haben sich dazu die Begriffe „zustandsbasierte Instandhaltung“ (engl. condition based maintenance) und „vorbeugende Instandhaltung“ (engl. predictive maintenance) etabliert. In diesem Beitrag wird zuerst auf den Zusammenhang von Messgröße und Messsystem eingegangen. In weiterer Folge wird der Stand der Technik vorgestellt und einzelne Messverfahren werden genauer erläutert. Schließlich werden Herausforderungen spezifisch für das Langzeitmonitoring diskutiert. Es wird auch gezeigt, dass das Langzeitmonitoring bereits bei der Tunnelplanung ins Design miteinbezogen werden muss, um funktionsfähige und dauerhaft nutzbare Messungen zu erhalten.

2 Messgrößen und Messsysteme

3 Messkonfigurationen

3.1 Messungen in Querschnittsrichtung

3.2 Messungen in Tunnellängsrichtung

4 Langzeitmonitoring mit geodätischen Sensoren

4.1. 3D-Verschiebungsmessungen von Einzelpunkten mit Totalstationen und Nivellement

4.2 Oberflächenerfassung

4.2.1 Laserscanning

4.2.2 Bildbasierte Messverfahren

4.2.3 Radarmessungen InSAR

5 Langzeitmonitoring mit eingebetteten geotechnischen Sensoren

6 Spezielle Aspekte im Langzeitmonitoring

6.1 Genauigkeit und Präzision von Sensoren

6.2 Datenverfügbarkeit

6.3 Verifikation von Messergebnissen

6.3.1 Kalibrierung von Sensoren

6.3.2 Verifikation ohne zusätzlichen Sensor

6.3.3 Verifikation mit Sensor des gleichen Typs

6.3.4 Verifikation mit zusätzlichen Sensoren mit gleicher Messgröße, aber anderem Messprinzip

6.3.5 Verifikation mit zusätzlichen Sensoren mit unterschiedlicher Messgröße

6.3.6 Externe Bestimmung von Langzeiteffekten

6.3.7 Überblick der Verifikationsmöglichkeiten

Fortsetzung, siehe nächste Seite

BetonKalender 2025

Inhaltsverzeichnis

Sensorik und Langzeitmonitoring im Tunnelbau

Werner Lienhart, Christoph Monsberger, Johannes Flecki-Ernst und Bernd Moritz

7 Zusammenfassung

Mit In diesem Beitrag wurde dargelegt, wie sich Monitoring im Tunnelbau in den letzten Jahren weiter- entwickelt hat. Messtechnische Beobachtungen sind weiterhin ein Kernelement, insbesondere bei Anwendung der Neuen Österreichischen Tunnelbaumethode (NÖT), bei welcher auf Basis der Evaluierung und Interpretation der Messergebnisse die Ausbruch- und Stützmaßnahmen im weiteren Vortrieb gesteuert wer- den. Tunnel sind Infrastrukturbauten mit sehr langen Lebenszeiten von 100 Jahren und mehr. Hierzu hat bezüglich des Monitorings ein Umdenken stattgefunden. Statt wie bisher nur anlassbezogene Messungen durchzuführen, werden lebensbegleitende Messprogramme bereits während der Errichtung von Tunneln in Gebirgszonen mit außergewöhnlichen Verschiebungsverhalten schon während des Tunnelvortriebs mitangedacht (z. B. in Störungszonen, Gebirge mit Potenzial zu Quellen/Schwellen) und Sensoren für das Langzeitmonitoring bereits beim Bau des Tunnels miteingebaut. Dies ermöglicht eine zuverlässige Erfassung des Nullzustands des Tunnels, auf welchen nachfolgende Messungen referenziert werden können. Es besteht dadurch aber auch die Herausforderung, dass die eingesetzten Messsysteme robust und über die lange Lebenszeit auch funktionsfähig sein müssen. Folgende Empfehlungen können für die Langzeitzustandsbeurteilung von Tunneln gegeben werden Schaffung von Zeitreihen seit Errichtung der Außenschale. Der zeitliche Abstand zwischen Messungen in der Außenschale und der Innenschale sollte möglichst kurz gehalten werden. In der Außenschale eingebettete Sensoren sollen nach Möglichkeit auch weiter gemessen werden können. Die Datenreihe der Oberflächenmessungen der Tunnelschale (Totalstationen und Prismen) sollte fortgesetzt werden. Sobald der Innenausbau abgeschlossen ist, sollte ei- ne vollständige Aufnahme der Innenschale erfolgen. Dies dient als Referenz (Geometrie, Rissbild etc.) für einen späteren Vergleich. Das Deformationsbild der Außenschale sollte für die Verteilung der Sensoren in der Innenschale berücksichtigt werden (d. h. nicht immer symmetrische Anordnung der Messziele und Sensoren, sondern abgestimmt auf das Verschiebungsmuster aus dem Tunnelvortrieb). Zur Sicherstellung einer Redundanz und einer Funktionsbeurteilung von eingebetteten Sensoren sind entweder zusätzliche unabhängige eingebettete Sensoren, welche die gleiche Messgröße erfassen, aber auf einem anderen Messprinzip beruhen, und/oder unabhängige Sensoren, welche auch eine andere Messgröße erfassen, einzusetzen. Die Position von eingebetteten Sensoren und die Kabelführung müssen dokumentiert sein, um eine Beschädigung bei späteren Bohrungen zu verhindern. Zur Beurteilung der Langzeitstabilität der eingesetzten Messsysteme sollten Laboraufbauten eingerichtet werden. Ziel ist die Bestimmung von Langzeitdriften unter konstanten Bedingungen und die Schaffung von Referenzbasen, um evtl. Sprünge bei einem Tausch von Messgeräten fest- zustellen. Die geodätische Messplanung sollte bereits vor einer Begehung vor Ort mit 3D-Modellen durchgeführt werden, um Visurlinien kontrollieren und Konflikte vermeiden zu können. Die Art der Datenabgabe muss bei der Ausschreibung von Messleistungen Aspekte der Langzeitnutzung beinhalten. Eine zentrale Person beim Bauwerkseigentümer sollte für die Koordination und Betreuung des Langzeitmonitoring eingesetzt werden. Dies beinhaltet Datenmanagement: Langzeitspeicherung und Langzeitnutzbarmachung der Daten, Datenaufnahme: Sicherstellung der Langzeitaufnahme und des Langzeitdatentransfers (Betriebssysteme, IT-Sicherheit etc.), Koordination der gesamtheitlichen Zustandsbeurteilung aus den Messdaten der unterschiedlichen Messsysteme.

6 Literatur

(Änderungen vorbehalten)