



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Bundesamt für Strassen ASTRA

DOKUMENTATION

TECHNOLOGIEN ZUR ÜBERWACHUNG DER INFRASTRUKTUR

TEILBERICHT TUNNEL

*Ausgabe 2024 V1.00
ASTRA 84012*

Impressum

Autoren / Arbeitsgruppe

Christian Gammeter	ASTRA N-SSI, Vorsitz
Dimitrios Papastergiou	ASTRA N-SSI
Susanne Rust	ASTRA N-SSI
Patrick Beeler	Lombardi AG
Sara Zingg	Lombardi AG
Tobias Stauber	Lombardi AG
Hans-Heini Utelli	IMPULS AG
Régis Blin	Smartec SA
Rade Hajdin	IMC GmbH
Frank Schiffmann	IMC GmbH

Sounding Board

Daia Zwicky	HTA-FR
Dirk Proske	BFH
Erich Pimentel	IGT ETH Zürich
Fabrizio Moro	VersuchsStollen Hagerbach AG
Felix Lau	BMDV Deutschland
Giovanni Putignano	Google Cloud - Public Sector Switzerland
Martin Käser	ASTRA I-Ost FU F4/F5
Robert Braber	infralab SA
Sara Montani	Emch+Berger AG
Thomas Moser	ASFINAG Österreich
Tobias Kellenberger	swisstopo

Originalsprache

Deutsch

Diese Dokumentation ist Teil eines Gesamtdokuments, welches in folgenden Berichten veröffentlicht wird.

Teil Syn	ASTRA 84010 Synthesebericht Technologien zur Überwachung
Teil K	ASTRA 84011 Teilbericht Kunstbauten
Teil TU	ASTRA 84012 Teilbericht Tunnel
Teil TR	ASTRA 84013 Teilbericht Trasse

Herausgeber

Bundesamt für Strassen ASTRA
Abteilung Strassennetze N
Standards und Sicherheit der Infrastruktur SSI
3003 Bern

Bezugsquelle

Das Dokument kann kostenlos von www.astra.admin.ch heruntergeladen werden.

© ASTRA 2024

Abdruck - ausser für kommerzielle Nutzung - unter Angabe der Quelle gestattet.

Inhaltsverzeichnis

Impressum	2
Inhaltsverzeichnis	5
1 Einleitung	9
1.1 Zweck der Dokumentation	9
1.2 Geltungsbereich	9
1.3 Adressaten	9
1.4 Inkrafttreten und Änderungen	9
2 Ausgangslage	11
2.1 Relevante Infrastrukturobjekttypen im Fachgebiet Tunnel	12
2.2 Kontext der Überwachung während Projektierung, Realisierung und Betrieb	15
2.3 Überwachungsaufgaben betr. Tunnelanlagen des ASTRA	17
2.4 Abgrenzungen	18
2.5 Auftrag	18
3 Anforderungen	20
3.1 Gesetzliche Grundlagen, relevante Normen und Standards	20
3.2 Rahmenbedingungen	22
4 Grundlagen	23
4.1 Forschungsberichte	24
4.2 Bestehende Monitoring-Anwendungen	25
5 Methodisches Vorgehen	27
5.1 Grundsatz	27
5.2 Grundlage der Technologiebeschreibung	29
5.3 Überblick über die Bewertungsmethodik	29
5.4 Verallgemeinerung durch Klassifizierung	30
5.5 Evaluation von Technologien	33
5.6 Literaturverzeichnis	34
6 Evaluierte Technologien und Datenquellen für die Überwachung im Überblick	36
6.1 Übersichtstabellen – Legende	36
6.2 Evaluierte Technologien – Übersicht in Bezug auf Anwendungsfälle	43
7 Bewährte Technologien	44
A Bauwerksentkoppelte Überwachung	48
A 1 Baugrundverformungen	48
7.1 Terrestrische Radarinterferometrie	49
7.2 Satellitengestützte Radarinterferometrie	53
7.3 Laserscanning	58
7.4 Geodätische Aufnahmen (Tachymeter)	62
7.5 Sondenextensometer	65
7.6 Inklinometer	69
7.7 Extensometer	72
7.8 Schlauchwaage	76
7.9 Nivellement	79
7.10 Faseroptische Sensoren	82
A 2 Massenbewegungen (Steinschlag, Murgänge, Lawinen, Rutschhang, etc.)	89
7.11 Doppler-Radar	91
7.12 Geophone	94
7.13 Pegel-Radar	97
7.14 Infrasond	99
7.15 Wetterstation	101
7.16 Laserscanning	103
7.17 Reissleinen	103
7.18 Kapazitive Drucksensoren	106
7.19 Piezoelektrische Drucksensoren	109
7.20 Terrestrische Radarinterferometrie	112
7.21 Satellitengestützte Radarinterferometrie	112
7.22 Langzeitüberwachung mit Deformationskameras	113
7.23 Geodätische Aufnahmen (Tachymeter)	116

7.24	Nivellement	116
7.25	Fugen- und Rissmessgeräte.....	117
7.26	Distometer.....	120
7.27	Neigungsänderungen (Clinometer).....	122
7.28	Faseroptische Sensoren	125
A 3	Berg- / Grundwasser.....	126
7.29	Piezometer	127
7.30	Porenwasserdruckgeber	130
7.31	Grundwasserströmungsmessung	135
7.32	Wassertemperatursensoren.....	140
7.33	Durchflussmessung	144
7.34	Durchlässigkeitsversuche	149
7.35	Leitfähigkeitssensoren	154
B	Überwachung Baugrund Tunnelnahbereich	157
B 1	Baugrundveränderung (Entfestigung, Volumenänderung, Auflockerung, etc.)	157
7.36	Sondenextensometer.....	158
7.37	Inklinometer	158
7.38	Extensometer	158
7.39	Faseroptische Sensoren	158
7.40	Reverse-Head-Extensometer	158
7.41	Bohrlochdilatometer	159
7.42	Bohrlochscan	162
B 2	Belastungsänderungen (Quelldruck, druckhaftes Gebirge, etc.)	165
7.43	Messanker	166
7.44	Kraftsensoren / Kraftmessdose	169
7.45	Faseroptische Drucksensoren	172
7.46	Dehnungsmessstreifen	175
7.47	Schlitzpressenmessungen	179
7.48	Druckkissen	182
B 3	Berg- / Grundwasserveränderungen	184
7.49	Piezometer	184
7.50	Porenwasserdruckgeber	184
7.51	Wassertemperatursensoren.....	184
7.52	pH-Wert.....	185
7.53	Leitfähigkeitssensoren	188
C	Überwachung Verkleidung und Zwischendecke	189
C 1	Bewehrungskorrosion.....	189
7.54	Potentialfeldmessung.....	190
7.55	Chloridgehaltsmessungen	192
C 2	Betonspannungen	194
7.56	Druckmessdosen	194
7.57	Dehnungsmessstreifen	194
7.58	Faseroptische Dehnungsmessungen	194
7.59	Faseroptische Drucksensoren	194
7.60	Druckkissen	194
C 3	Verformungen	195
7.61	Laserscanning.....	196
7.62	Geodätische Aufnahmen (Tachymeter).....	196
7.63	Schlauchwaage.....	196
7.64	Faseroptische Dehnungsmessungen	196
7.65	Neigungsänderungen (Clinometer).....	196
7.66	Distometer.....	196
7.67	Nivellement	196
7.68	Fugen- und Rissmessgeräte.....	196
D	Bergwasserdrainage.....	197
D 1	Überwachung	197
7.69	Durchflussmessung	197
7.70	Wassertemperatursensoren.....	197
7.71	pH-Wert.....	197
7.72	Versinterungspotenzial (Kalk-Kohlensäure-Gleichgewicht).....	198
7.73	Leitfähigkeitssensoren	201

7.74	Kanal-TV	201
E	Überwachung Belag und Foundation	204
E 1	Längsebenheit	204
7.75	Richtlatte (4 m)	206
7.76	Planograf	209
7.77	Goniograph	211
7.78	Lasersensoren	213
7.79	Laserscanner	216
7.80	Triangulationssensoren	221
E 2	Querebenheit	225
7.81	Richtlatte (4 m)	226
7.82	Lasersensoren	228
7.83	Laserscanner	231
7.84	Lichtschnittverfahren	234
E 3	Querneigung	237
7.85	Neigungsmesser	239
7.86	Inertiales Kreiselssystem	243
7.87	Laserscanner	245
8	Aufstrebende Technologien	248
8.1	Kamera-basiert / Daedalus	248
8.2	CV/KI basierte Schadensdetektion	253
8.3	Verteilte akustische Erfassung (DAS)	258
8.4	Mobile Mapping Systeme	263
9	Technologiebewertung	267
9.1	Relevante Gefährdungen im Teilsystem	267
9.2	Bewertung von einzelnen Technologien	271
A	Bauwerksentkoppelte Überwachung	272
B	Überwachung Baugrund Tunnelnahbereich	279
C	Überwachung Verkleidung und Zwischendecke	285
D	Bergwasserdrainage	290
E	Überwachung Belag und Foundation	292
9.3	Erstellen und Bewertung von Überwachungskonzepten	300
	Glossar	303
	Auflistung der Änderungen	304

1 Einleitung

1.1 Zweck der Dokumentation

Dieser erste Teil der Dokumentation fasst für die Überwachung der Tunnel im Nationalstrassennetz vorhandene Technologien zusammen. Er ist die Basis für die zu erarbeitenden Grundlagen neuer – noch nicht am Markt verfügbarer - Technologien. Die Dokumentation bietet nach Vorliegen aller Teile die Möglichkeit des direkten Vergleichs von zurzeit noch sehr wenig bekannten, mit den verschiedenen bisher bereits verfügbaren Überwachungsmöglichkeiten.

1.2 Geltungsbereich

Der Geltungsbereich umfasst alle in Bezug auf den Bau, den Betrieb und Erhalt der Tunnel im schweizerischen Nationalstrassennetz anwendbaren Technologien und Methoden.

1.3 Adressaten

Adressaten sind die Verantwortlichen für Überwachung und Erhaltung der Infrastruktur im ASTRA sowie deren Auftragnehmer.

1.4 Inkrafttreten und Änderungen

Dieses Dokument tritt am 24.05.2024 in Kraft. Die "Auflistung der Änderungen" ist auf Seite 304 dokumentiert.

2 Ausgangslage

Mit zunehmender Alterung der Strasseninfrastruktur steigt der Bedarf an zuverlässigen Überwachungsmethoden, deren Ergebnisse eine belastbare Entscheidungsfindung in Bezug auf die Erhaltung sicherstellen. Darüber hinaus ist die Strasseninfrastruktur immer öfter Beanspruchungen ausgesetzt, die über das ursprünglich vorgesehene Mass hinausgehen (extremere Witterungsbedingungen, zunehmender (Schwer-)Verkehr, übergewichtige Sondertransporte usw.).

In einigen mit konkreten Fragestellungen behafteten Infrastrukturen der Nationalstrassen, insbesondere bei Kunstbauten und Tunneln, weniger beim Trasse, sind bereits Überwachungssysteme integriert, die (zum Teil bei Bedarf) Messdaten liefern und vereinzelt an Alarmierungssysteme gekoppelt sind. Einsatz und Funktionsweise sind in den Überwachungsplänen geregelt. Die erhobenen Messdaten werden jedoch nicht zentral aufgezeichnet und analysiert.

Die derzeitige Praxis mit periodischen Inspektionen bzw. Zustandserfassungen (für Kunstbauten und Tunnel meist in einem 5-Jahres-Zyklus, für das Trasse in einem 4-Jahres-Zyklus) sowie Überprüfungen auf Veranlassung hat sich zur Gewährleistung der Sicherheit und einer effizienten Erhaltungsplanung bisher bewährt. Sie erlaubt aber keine Echtzeit-Diagnose über den Zustand und das Bauwerksverhalten. Eine häufigere oder gar permanente Überwachung wichtiger Objekte der Strasseninfrastruktur gewinnt bei erhöhten Risiken an Bedeutung. Darunter fallen beispielsweise Infrastrukturen, die kritische und nicht direkt inspizierbare Bauwerksteile aufweisen wie die tragende erdseitige Bewehrung in der Arbeitsfuge einer Winkelstützmauer. Zudem bieten die Digitalisierung, die Verfügbarkeit von immer mehr Daten und die rasch voranschreitenden technologischen Entwicklungen ganz neue Möglichkeiten für eine ganzheitliche und permanente Überwachung der Strasseninfrastruktur.

In Frage kommen dafür neue Systeme, die benötigte Informationen zum Zustand und zur Beanspruchung von Bauwerken in Echtzeit bereitstellen und für ein modernes Erhaltungsmanagement geeignet sind. Es handelt sich dabei um Überwachungssysteme, die verschiedene Arten von Sensoren für eine temporäre, periodische oder permanente Überwachung verwenden. Im Weiteren ist zu prüfen, ob neue Technologien zielführende Möglichkeiten für die Überwachung der Strasseninfrastrukturen und die Planung ihrer Erhaltung bieten können. Und schliesslich stellt sich die Frage, ob weitere verfügbare Daten wie Witterungsdaten oder Fahrzeugdaten für die umfassendere Überwachung der Strasseninfrastruktur genutzt werden können.

Die Dokumentation liefert eine Sichtung und Wertung der bestehenden und künftig absehbar nutzbaren Technologien zur Überwachung der Infrastruktur, zeigt die mögliche Anwendung bereits bestehender Technologien im ASTRA auf und definiert die nötigen Strukturen sowie Prozesse für das frühzeitige Erkennen und Nutzbarmachen neuer technologischer Möglichkeiten zur Überwachung der Strasseninfrastruktur unter Berücksichtigung des Kosten-Nutzen-Verhältnisses.

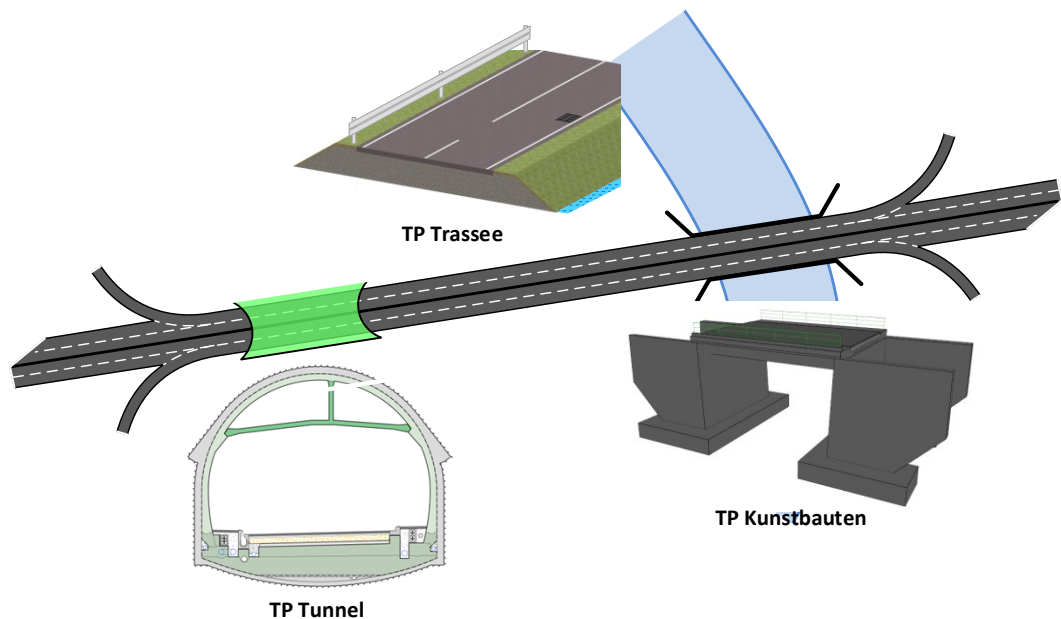


Abb. 2.1 Fokus im Gesamt-Projekt NTech

Die vorliegende Dokumentation wurde im Rahmen des Teilprojekts Tunnel erstellt und im Verlauf des Projekts NTech ergänzt und vervollständigt. Gegebenenfalls werden die Schnittstellen mit den in den Bereichen Kunstbauten und Trassee angewandten Überwachungstechnologien, die in separaten Berichten behandelt werden, näher erläutert.

Die Dokumentation hat zum Ziel, den beteiligten Stellen einen Überblick über die derzeit verfügbaren Technologien im Zusammenhang mit der Überwachung von Tunneln zu geben. Die Zusammenfassung deckt sowohl die eher standardmässig angewandten als auch die weniger häufig genutzten Technologien ab, die jedoch ausgereift genug sind, um übernommen zu werden. Sie soll die Grundlagen für die Identifizierung vielversprechender neuer Technologien und die Einführung von Richtlinien und Standards für die Überwachung der Strasseninfrastruktur schaffen.

2.1 Relevante Infrastrukturobjekttypen im Fachgebiet Tunnel

Aus Unterschieden in der Bauweise von Untertagebauwerken folgen entsprechend unterschiedliche Anforderungen für die Überwachung. Das gilt zunächst im Hinblick auf die Planungs- und Bauphasen aber auch für eine vorausschauende Planung von für das fertige und in Betrieb befindliche Bauwerk vorzusehenden Überwachungsdetails.

In dieser Dokumentation werden Tunnel einerseits aufgrund ihrer Herstellungsweise in bergmännische Tunnel sowie Tagbautunnel und andererseits hinsichtlich der Relevanz der Bauwerksteile unterteilt.

Für die an die Bauphase anschliessenden Überwachungen während der Betriebsphase werden keine weiteren Unterteilungen für allfällige Überwachungsaufgaben getroffen. Diese können einige während der Bauphase eingesetzten Überwachungen fortsetzen, orientieren sich im Betrieb aber vor allem an den betriebsbedingten Beeinflussungen durch die Nutzungsarten und -intensitäten resp. deren Einflüsse auf die erstellten Strukturen.

2.1.1 Bergmännische Tunnel

Zu den 'Bergmännischen Tunneln' zählen vorliegend alle untertage erstellten, also anthropogenen Hohlräume. Bergmännische Tunnel können je nach Tiefenlage und Umgebungsverhältnissen in unterschiedlicher Weise von resultierenden Beeinflussungen aus dem Untergrund, wie auch aus dem oberirdischen Umfeld betroffen sein. Daneben können bergmännisch erstellte Hohlräume auch Einfluss auf die nähere und selten auch auf die weitere Umgebung haben; einige dieser Auswirkungen sind lediglich während der

Bauphase relevant – andere können jedoch auch weit über die Anfänge der Betriebsphase hinaus von Bedeutung sein.

2.1.2 Tagbautunnel

Unter dem Begriff 'Tagbautunnel' sind Konstruktionen zusammengefasst, welche in offener Bauweise erstellt und anschliessend wieder überdeckt oder durch weitere Bauwerke überbaut werden. Tagbautunnel können je nach den projektspezifischen Gegebenheiten in einer vorgängig erstellen Baugrube als Rahmen- oder Gewölbetragwerk oder mit der sogenannten Deckelbauweise erstellt werden. Die auf gleiche Weise gegen Naturgefahren erstellten Schutzgalerien werden von der Bauweise her gleich betrachtet. Die für Tagbautunnel erforderlichen Baugruben oder Voreinschnitte, welche die Lage des bergmännischen Portals definieren, werden im vorliegenden Bericht berücksichtigt.

2.1.3 Kavernen, Stollen und Schächte

In Abhängigkeit der Tunnellänge, der Anzahl Tunnelröhren sowie der Anforderungen an die Tunnellüftung sind häufig ergänzende unterirdische Bauwerke in Form von Kavernen, Stollen und Schächten erforderlich.

'Kavernen' sind grosse, aber vergleichsweise kurze Hohlräume untertage, wo im Strasseninfrastrukturbau v.a. Technikzentralen und sonstige untertage erstellte Nebenträume untergebracht. Kavernen werden auch im sonstigen Infrastrukturbau zur Unterbringung von grossräumigen technischen Installationen genutzt (z.B. Kavernenkraftwerke der Wasserkraft; Speicherkavernen für Öl oder Gas; Kavernen für sensible militärische Anlagen; Kavernen zur Endlagerung radioaktiver Stoffe).

Im Zusammenhang mit den Sicherheitsanforderungen und betrieblichen Aufgaben sind häufig Sicherheits-, Flucht- sowie und Werkleitungsstollen erforderlich, wobei der Begriff 'Stollen' typischerweise für ein Tunnelbauwerk von vergleichweisem kleinen Ausbruchsquerschnitt im Verhältnis zur Länge angewandt wird.

'Schächte' schliesslich bezeichnen Hohlräume mit hauptsächlich vertikaler Ausdehnung. Sie sind in komplexen Tunnelanlagen erforderlich für die Betriebslüftung, für die Frischluftzufuhr oder die Fortluft im Normalbetrieb oder Brandfall. Schächte können v.a. bei geringer Überlagerung auch als Fluchtweg ausgebaut werden. Die im vorliegenden Bericht behandelten Messtechnologien können sinngemäss zu den Fragestellungen von bergmännischen Tunneln auch in den hier ergänzend genannten, unterirdischen Bauwerken angewendet werden.

2.1.4 Klassifizierung der Hauptelemente

Für die Klassifizierung der relevanten Bauwerksteile von Tunneln wird eine stark reduzierte Verallgemeinerung in Anlehnung an die KUBA-Datenbank gemäss Tab. 2.1 und Abb. 2.2 betrachtet.

Neben den generalisierten Bauwerksteilen ist zusätzlich auch der Einflussbereich des Bauwerks mit Auswirkungen auf den Baugrund, die Terrainoberfläche und anderen Infrastrukturprojekte aufgenommen worden.

Tab. 2.1 Generalisierte Bauwerksteiltypen

Gliederung Bauwerk in generalisierte Bauwerksteile									Einflussbereich Bauwerk			
Bergmännische Tunnel			Tagbautunnel, Galerien inkl. Portalbereich			Drainagelei- tungen und Strassenkörper						
Verkleidung - Gewölbe	Verkleidung - Sohlgewölbe	Zwischendecke	Verkleidung - Gewölbe	Verkleidung - Sohlgewölbe	Zwischendecke	Baugruben, Einschnitt	Bergwasserdrainageleitungen	Fahrbahnbelag	Fundationsschicht	Baugrund	Terrainoberfläche	andere Infrastrukturobjekte

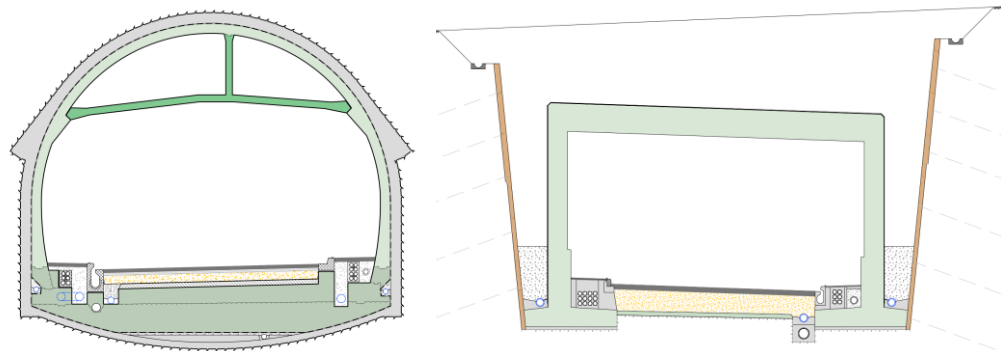


Abb. 2.2 Illustration von charakteristischen Bauwerksteiltypen

2.1.5 **Ergänzende 'Infrastrukturobjekttypen' und Überwachungsaufgaben aus dem Fachgebiet Geotechnik**

Die unter dem übergeordneten Begriff 'Geotechnik' betrachteten Inventartypen sind nicht allein auf Tunnelbauwerke bezogen, sondern stellen mit dem direkten Bezug zum eigentlichen Untergrund eine für ober- wie unterirdisch liegende Bauwerke grundlegende Gruppe von 'Inventartypen' dar. Zu dieser Gruppe zählen:

Stützbauwerke

Als Stützbauwerke werden hier die zur Aufnahme der eigentlichen Infrastruktur 'Strasse' erstellten Konstruktionen betrachtet. Sie umfassen beispielsweise Stützmauern (z.B. rückverankerte Stützmauern, Winkelstützmauern, Pfahlwände etc.), Böschungs- und Dammschüttungen mit Stützfunktionen oder Vorkehrungen gegen gravitative Naturgefahren wie Steinschlagschutznetze, die typischerweise in Kombination mit Stützbauwerken erstellt werden.

Technologien zur Überwachung von Stützbauwerken werden generell im Bericht Begleitbericht Kunstbauten (Teil 1-K) behandelt.

Dämme / Böschungssicherungen

Dämme und Böschungsstrukturen im Zuständigkeitsbereich des ASTRA haben nicht allein Aufnahme- und Stützfunktion für den Verkehrsweg, sondern dienen lokal auch dem Schutz der Strassennutzer vor Naturgefahren – sowohl gegen Wasser (u.a. Überschwemmung bis zu Murgängen oder auch Erosionsprozesse) wie auch gegen Lawinen und gravitative Ereignisse aus dem Festgesteinsbereich mit Stein- oder Blockschlag. Dämme haben zum Teil auch Lärmschutzfunktionen.

Überwachungstools von Dämmen und Böschungssicherungen werden im Bericht Trasse (Teil 1-TR) behandelt.

Wasserbauliche Schutzbauwerke

In, an oder im Nahbereich zu Flussläufen oder Überschwemmungsgebieten oder auch an weiteren durch Strömungen stark beanspruchten Stellen werden die Infrastrukturobjekte durch Kolkschutz-Bauwerke vor Erosionsereignissen geschützt.

Wasserbauliche Schutzbauwerke sind relevant für Kunstbauten und werden entsprechend im Begleitbericht Kunstbauten (Teil 1-K) behandelt.

2.1.6 Schnittstellen Naturgefahren

Wie im Kapitel 2.1.2 erwähnt werden vorliegend ausschliesslich die wichtigsten gravitativen Naturgefahren, welche in den Portalbereichen Einwirkungen auf Tunnel haben können, beschrieben. Unter gravitativen Naturgefahren werden in diesem Bericht im Wesentlichen die Gefahren aus Massenbewegungen (Schnee, Eis, Wasser, Fels, Boden; Sturz, Rutschungen, Absenkungen) verstanden, welche die Infrastrukturobjekte im betroffenen Gebiet beeinträchtigen können.

Erdbeben werden im vorliegenden Bericht nicht behandelt, da sie in der Regel für Tunnelbauwerke in der Schweiz nicht kritisch für die Tragsicherheit sind.

2.1.7 Schnittstellen Umwelt

In der Schnittstelle mit dem Fachbereich Umwelt werden die relevanten Einwirkungen aus der Umwelt auf das Tunnelbauwerk beschrieben.

- Temperatur;
- Feuchtemessung;
- Bergwasserzutritte (Menge initial bis dauernd, Durchfluss in Leitungen, Chemismus).

Die Schnittstelle bezieht sich ferner auf die Überwachung von Auswirkungen, welche sich aufgrund folgender Einflüsse bemerkbar machen:

- Alkali-Aggregat-Reaktion (AAR);
- Korrosive Umgebungen.

2.1.8 Schnittstellen Kunstbauten und Trasse

Die Technologien, die bei der Überwachung von Tunneln eingesetzt werden, sind oft identisch mit den Überwachungstechnologien, die in den weiteren Teilsystemen Kunstbauten und Trasse eingesetzt werden. Um Verwirrung zu vermeiden, wird, wenn solche Technologien gemeinsam eingesetzt werden, eine ähnliche Beschreibung in den verschiedenen Dokumentationen Tunnel, Kunstbauten und Trasse verwendet.

Die wichtigsten Grundsätze, die die Funktion und den Einsatz von Technologien zur kontinuierlichen Überwachung (SHM) und zerstörungsfreier Prüfung (ZfP) bestimmen, gelten auch für die Teilsysteme Kunstbauten und Trasse. Die Art der Anwendung kann unterschiedlich sein, insbesondere in Bezug auf die Montage von Sensoren. Der lokale Einsatz von zerstörungsfreien oder zerstörungsarmen Prüfmethoden dagegen wird unabhängig vom Teilsystem ähnlich angewendet.

2.2 Kontext der Überwachung während Projektierung, Realisierung und Betrieb

Im vorliegenden Bericht ist der Einsatz der vorgestellten Überwachungstechnologien an potenzielle Fragestellungen gekoppelt, welche in den verschiedenen Phasen ab Projektierung über Bau bis zum Betrieb auftreten können. Der Einsatz jeder Technologie basiert dabei immer auf objektspezifischen Gefährdungsbildern, insbesondere der potenziellen Mechanismen, welche ein Tragwerksversagen auslösen können, und den darauf basierenden Grenzwerten aus dem Überwachungsplan.

Die geologischen, hydrogeologischen und geotechnischen Verhältnisse haben einen entscheidenden Einfluss auf das Projektkonzept und die Bauverfahren aller Tunnelbauten. Die geotechnische Beurteilung des Baugrunds, der Erstellung eines Baugrundmodells und die Identifizierung der Gefährdungen während der Bau- und Betriebsphase sind wesentliche Bestandteile während der Projektierung. Auf Basis der konkreten Gefährdungsbilder und der erwarteten Boden-Tragwerks-Interaktion werden die Einwirkungen auf das Tragwerk bestimmt, sowie einerseits die Massnahmen zur Beherrschung der Gefährdungen, und andererseits aufgrund der durchgeführten statischen Nachweise die Grenzwerte für zulässige Beanspruchungen oder Verformungen definiert. Für die projektierten Vortriebs- und Ausbruchssicherungsmittel der Bauphase, ebenso wie für die vorgesehene Nutzung der Betriebsphase, wird gefährdungsbasiert (Mechanismus und Wirkung) je ein Messkonzept erstellt, um die Tragsicherheit und die Gebrauchstauglichkeit zu überwachen.

Somit sind bei der Wahl einer Messtechnologie zur Überwachung einer physikalischen Grösse, welche durch die Interaktion zwischen Gebirge und Tragwerk beeinflusst wird, immer die objektspezifischen Baugrundmodelle, Gefährdungsbilder, Einwirkungen sowie zulässige Beanspruchungen oder Verformungen des Tragwerks zu berücksichtigen. Nur im Rahmen dieses Gesamtkontextes kann die gewählte Messtechnologie in einem objektspezifischen Messkonzept auch die relevanten Resultate liefern, um daraus allfällige Schlussfolgerungen für weitere Massnahmen zur Sicherstellung der Tragsicherheit und Gebrauchstauglichkeit ziehen zu können.

Die für das Tragwerk der Tunnelschale kritischen Einwirkungen aus dem Baugrund wie Quelldruck resp. Quellhebungen oder druckhaftes Gebirge entwickeln sich in der Regel eher langsam, jedoch mehrere Jahrzehnte andauernd. Das Messkonzept und die eingesetzten Technologien müssen diesem Umstand Rechnung tragen. Bei der Wahl der geeigneten Messtechnologie sind folgende Aspekte gemäss dem objektspezifischen Messkonzept zu berücksichtigen:

- Installation: Erreichbarkeit (Lage, Zu- und Wegfahrten, Platzverhältnisse, etc.), Zugänglichkeit zu Bauwerksteil, Einschränkungen aus Tunnelbetrieb sowie erforderliche Versorgung (Strom, Wasser, etc.); ergänzende bauliche Vorbereitungen (z.B. Bohrungen, Schneidarbeiten, etc.);
- Inbetriebnahme: Systemtest und allfällige Bereinigung von Fehlermeldungen / Mängel, Nullmessung inkl. Datenauswertung, Freigabe;
- Messdauer (Monate, Jahre, Jahrzehnt);
- Lokalisation Messresultate: Aufgrund der Gefährdungsbilder und Mechanismen ist festzulegen, ob punktuelle, lineare oder flächenbezogene Messresultate erforderlich sind;
- Messrhythmus (kontinuierlich, monatlich, jährlich) mit entsprechend rascher Verfügbarkeit der Resultate, Sicherstellung der Kontinuität der Datenmessreihen mit entsprechendem Mess- und Datenmanagement;
- Messgenauigkeit;
- Definition der Alarmierung (Aufmerksamkeits-, Alarm- und Grenzwerte);
- Auswertung mit Vorgabe zur Darstellung (Einzelmessung, Folgemessungen) und Abgabe bzw. Umgang mit Rohdaten (Aufbereitung, Speicherung, Verteilung).
- Vergleich der Messergebnisse mit Prognosemodelle und ggf. Anpassung des Messprogramms oder des Prognosemodells;
- Kosten und Unterhalt.

Im Bereich der Naturgefahren ist ebenfalls ein objektspezifisches Messkonzept zu erstellen, wobei bei zeitlich sich schnell aufbauenden Gefahrensituationen (z. B. Lawinen, Murgang, Steinschlag) aufgrund der unmittelbaren Gefährdung von Strasseninfrastruktur und Verkehrsteilnehmern folgende Aspekte besonders wichtig sind:

- Ausreichendes Prozessverständnis über die relevanten auslösenden Prozessfaktoren und mögliche Ereignisabläufe;

- Robustheit und Redundanz der Systeme und deren automatische Kontrolle (Datenerfassung, Energieversorgung, Datenübertragung, Datenauswertung und Alarmierung);
- Kontinuierliche und rasche Verfügbarkeit der Daten und deren Auswertung;
- Klar definierte Aufmerksamkeits- und Alarmgrenzwerte;
- Klar definierte Notfallplanung im Falle einer Alarmierung mit vorbehaltenen Entscheidungen und Einsatzplanung.

2.3 Überwachungsaufgaben betr. Tunnelanlagen des ASTRA

Tunnelbauwerke sind äusserlich den Einflüssen aus dem Baugrund, innerlich den Einflüssen aus Nutzung und Klima ausgesetzt und müssen dabei ein garantiertes Mass an Tragsicherheit, Gebrauchstauglichkeit und Betriebssicherheit aufweisen.

Vor und während der Bauphase stehen Mess- und Überwachungsaufgaben im Vordergrund, mit denen zunächst die Planung unterstützt werden kann, gleichzeitig aber auch bereits erste Installationen für die spätere Nutzung während der Bauphase – wie z.B. im Zusammenhang mit Beweissicherungsaufgaben – und teilweise über die Bauphase hinaus bis weit in die Betriebsphase fortgesetzt von Interesse bleiben können.

Der Zustand von Bauwerken und die Funktion der Strassentunnel werden durch regelmässige Inspektionskampagnen in festgelegten Zeitabschnitten beurteilt, während welcher unterschiedliche Bauwerksteile und Einrichtungen den notwendigen Kontrollen unterzogen werden.

Die visuelle Inspektion ist die bislang gebräuchlichste Bauwerksüberwachungsmethode. Sie ermöglicht ein frühzeitiges Erkennen eines nicht erwarteten Bauwerksverhaltens (z.B. Rissbildung, Verformungen, Wassereintritte) und ist daher unverzichtbar. Der offensichtliche Nachteil ist, dass nur das festgestellt werden kann, was mit blossen Auge sichtbar ist. Darüber hinaus unterliegen die Beobachtungen der Interpretation und Bewertung des Inspektors. Basierend auf den Befunden der visuellen Inspektion können ergänzende, objektive Überwachungstechnologien (Sensoren) für die Überwachung des Bauwerks angeordnet werden.

2.3.1 Überwachungsaufgaben vor der Bauphase

Tunnel sind in der Regel grössere und komplexe Bauwerksanlagen, die neben dem zu erstellenden Hohlraum im Gebirge auch übertägige Eingriffe in den Baugrund erfordern. Es entsteht immer eine Wechselwirkung zwischen Baugrund und Bauwerk.

Im Rahmen der Projektierungsarbeiten steht als wesentliche Grundlage die Beschreibung des Gebirges im Fokus. Die Messtechnologien sowie Sondierungs- und Erkundungsmassnahmen für das Erfassen des Gebirges im Untertagbau gemäss SIA Norm 199 sind nicht Bestandteil dieses Berichts.

Oft sind aufgrund einer erforderlichen Beweissicherung vorgängig zur Bauphase Mess- und Überwachungskampagnen erforderlich. Insbesondere in der Nähe von bestehenden Bauten aller Art (Gebäude, sensible oder relevante Infrastruktur, Staudämme, etc.) gilt es, frühzeitig den Einflussbereich des zukünftigen Untertagbaus in Bezug auf Baugrundverformungen, Auswirkungen auf die Terrainoberfläche sowie Beeinflussung der Berg- und Grundwasserhaushalte abzuklären und zu überwachen. Die zugehörigen Messtechnologien zur Überwachung werden in der Regel frühzeitig installiert und über die gesamte Bauzeit und bei Bedarf bis in die Betriebsphase aufrechterhalten. Der Fokus liegt hier insbesondere auf:

- Deformationen: vor – während – nach dem Bau;
- Grundwasserinteraktionen: vor – während – nach dem Bau;
- Naturgefahren: je nach Situation und Lage Wasser, Lawinen, Rutschung, Sackung, Steinschlag etc.

2.3.2 Überwachungsaufgaben während der Bauphase

Die Überwachung während der Bauphase fokussiert bei bergmännischen Tunneln auf die Überwachung des zu erstellenden Hohlraums und die Auswirkungen auf die Terrainoberfläche inklusive umliegender Bauten. Im Bereich der Tagbautunnel ist die Überwachung der Baugruben und Voreinschnitte hinsichtlich Baugrundverformungen und Gesamtstabilität zentral.

Die hydrogeologischen Verhältnisse werden durch den Tunnelbau beeinflusst, sei es durch Wasserzutritte, geänderten (Poren-)Wasserdruckverhältnisse oder Veränderungen in den Grundwasserströmen, und sind je nach Sensitivität der Umgebung zu überwachen. Oberflächennah gilt der Überwachungsfokus oft den Veränderungen der Schüttmengen von Quellen sowie grundwasserabsenkungsbedingten Setzungen inkl. zugehöriger Stabilitäts- und Deformationsüberwachung der Einschnitte und Oberflächen.

Tunnelbauwerke in anspruchsvollen geotechnischen Verhältnissen können je nach Bauverfahren während der Bauphase eine intensive Überwachung erfordern (z.B. bei Anwendung von Gefrierverfahren, systematischen Baugrundinjektionen, quelfähigem oder druckhaftem Gebirge mit (teil-)nachgiebigen Ausbausystemen). Insbesondere die bauwerksferne Überwachung (z.B. Oberflächensetzungen, Schüttmengen von Quellen) wird oft in der Betriebsphase nahtlos weitergeführt.

2.3.3 Überwachungsaufgaben während der Betriebsphase

Die Überwachungsaufgaben während der Betriebsphase reichen von – in eher seltenen Fällen – anhaltenden geotechnischen und hydrogeologischen Überwachungen des Umfelds bis hin zu sporadisch erforderlichen Überwachungsaufgaben an den relevanten Bauwerksteilen der sicherheitsrelevanten Tunnelstruktur (Sohlgewölbe, Gewölbe, Zwischendecke), der Fahrbahn und den Drainageleitungen.

In seltenen Fällen, insbesondere, wenn Einbauten in den Untergrund zu Interaktionen mit dem Grundwasser oder weiteren Infrastrukturen führen, können geotechnische Überwachungsaufgaben infolge Tunnelbau als Anforderungen aus dem / an das Umfeld resultieren.

2.4 Abgrenzungen

Im vorliegenden Dokument werden ausschliesslich der Fachbereich Tunnel sowie damit verknüpfte Themen aus den Bereichen Geotechnik, Naturgefahren und Umwelt behandelt. Überwachungstechnologien im Zusammenhang mit den Fachbereichen Kunstbauten und Trasse sind Teil der weiteren Dokumentationen (vgl. Kapitel 3.2). Tunnel-Monitoring für das Verkehrsmanagement sowie die gesamte BSA sind ebenfalls nicht Teil dieses Projekts. Im Einzelnen nicht Bestandteil des Projekts sind daher:

- Die technologischen Möglichkeiten für die Überwachung der Betriebs- und Sicherheitsausrüstung (BSA). Für sie existieren bereits spezifische Überwachungslösungen, die standardmässig eingesetzt werden.
- Die langfristige Umsetzung insbesondere einer zentralen Datenbewirtschaftung sowie eines zentralen Echtzeit-Überwachungssystems für die Infrastruktur.
- Die Konzeption und die Durchführung von Pilotanwendungen.

2.5 Auftrag

Mit diesem Gesamt-Projekt NTech wird im ersten Schritt in den drei Fachbereichen Trasse, Kunstbauten und Tunnel eine Übersicht der zur Verfügung stehenden Überwachungstechnologien erstellt. Das Resultat sind drei Teilberichte 1-A (TR, K und TU).

In einem zweiten Schritt werden erfolgversprechende Ansätze zu neuen, noch nicht für die Überwachung der Infrastruktur genutzten oder noch nicht marktreifen Technologien dokumentiert. Das Resultat sind drei Teilberichte 1-B, welche in die Teilberichte 1-A integriert werden.

Diese beiden ersten Ergebnisse werden in einem dritten Schritt analysiert und bewertet hinsichtlich ihrer Anwendbarkeit für die Überwachung der Infrastruktur in den genannten Fachbereichen. Das Resultat sind drei Teilberichte 2 mit den Ergebnissen der Analyse- und Bewertung der Technologien.

Das ASTRA stellt in einem dritten Schritt Strukturen und Vorgaben für die Durchführung von Pilotprojekten zusammen.

Im vierten Schritt wird die Synthese der vorangehenden Arbeiten pro Fachbereich erstellt und daraus werden Empfehlungen für mögliche Pilotprojekte, für Forschungsthemen und für erforderliche ASTRA-Standards abgeleitet. Die Resultate sind ein übergreifender Synthesebericht über alle Teilberichte und Berichte mit Empfehlungen pro Fachbereich zur Lancierung von Pilotprojekten, dem vorhandenen Forschungsbedarf und zur Formulierung von Standards.

3 Anforderungen

Die vorliegende Dokumentation basiert auf den im ASTRA definierten hierarchisch gegliederten Grundlagen (vgl. Abb. 3.3). Diese sind im vorliegenden Kapitel fokussiert auf die relevanten gesetzlichen Grundlagen, Normen und Standards im Bereich Tunnel aufgeführt. Zusätzlich werden die Rahmenbedingungen aufgeführt, unter welchen diese Dokumentation erarbeitet wurde. Weitere Grundlagen für die vorliegende Dokumentation liefern Forschungs- und Monitoring-Projekte (vgl. Kapitel 4).

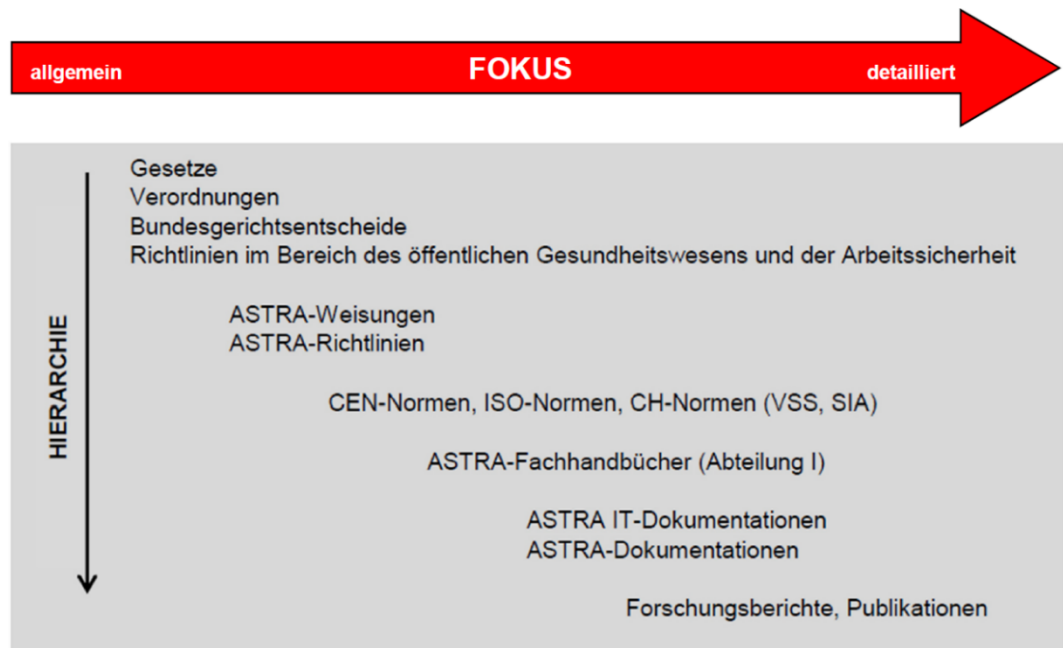


Abb. 3.3 Definition der Hierarchie von Veröffentlichungen im Geltungsbereich des Bundesamts für Strassen ASTRA

3.1 Gesetzliche Grundlagen, relevante Normen und Standards

Gesetze und Verordnungen

Grundlagen für die Überwachung der Nationalstrassen-Infrastruktur sind das NSG mit Artikel 49 und die NSV mit Artikel 46. In diesem Zusammenhang gelten die folgenden Gesetze und Verordnungen auch als Vorgehensvorschriften.

- SR 725.11 Bundesgesetz über die Nationalstrassen (NSG) vom 8. März 1960 (Stand am 1. Januar 2018)
- SR 725.111 Nationalstrassenverordnung (NSV) vom 7. November 2007 (Stand am 1. Januar 2020)
- SR 725.13 Bundesgesetz über den Fonds für die Nationalstrassen und den Agglomerationsverkehr (NAFG) vom 30. September 2016 (Stand am 1. Januar 2018)
- SR 235.1 Bundesgesetz über den Datenschutz (DSG) vom 19. Juni 1992 (Stand am 1. März 2019)
- SR 235.11 Verordnung zum Bundesgesetz über den Datenschutz (VD SG) vom 14. Juni 1993 (Stand am 16. Oktober 2012)
- SR 741.01 Strassenverkehrsgesetz (SVVG) vom 19. Dezember 1958 (Stand am 1. Januar 2020)
- SR 741.11 Verkehrsregelverordnung (VRV) vom 13. November 1962 (Stand am 1. Februar 2019)

Normen

Die folgenden Normen dienen als Grundlagen im Bereich der zur Überwachung der Infrastruktur anwendbaren Technologien:

- EN ISO 14688: Geotechnische Erkundung und Untersuchung
- EN ISO 18674 (1 - 10): Normen für die geotechnische Überwachung und Instrumentierung
- SIA 118-198: Allgemeine Bedingungen für Untertagebau
- SIA 197: Projektierung Tunnel - Grundlagen
- SIA 197/2: Projektierung Tunnel - Strassentunnel
- SIA 198: Untertagebau - Ausführung
- SIA 267: Geotechnik
- SIA 269: Grundlagen der Erhaltung von Tragwerken
- SIA 269/1: Erhaltung von Tragwerken – Einwirkungen
- SIA 269/2: Erhaltung von Tragwerken – Betonbau

Standards des ASTRA:

Weisungen, Richtlinien, Fachhandbücher und Dokumentationen

Das ASTRA hat im Zusammenhang mit den Überwachungsaufgaben zum Erhalt und Unterhalt der Infrastruktur im Fachbereich Tunnel / Geotechnik die folgenden Standards entwickelt und in Kraft gesetzt, auf welche in diesem Bericht bei den Angaben zu aktuellen Anwendungen von Überwachungstechnologien auch Bezug genommen werden kann:

Weisungen

- ASTRA 74001 Sicherheitsanforderungen an Tunnel im Nationalstrassennetz

Richtlinien

- ASTRA 12001 Projektierung und Ausführung von Kunstbauten der Nationalstrassen (2005; 20.12.2006)
- ASTRA 12002 Überwachung und Unterhalt der Kunstbauten der Nationalstrassen (2005; 19.12.2006)
- ASTRA 12005 Boden- und Felsanker (2007 V3.12; 16.08.2019)
- ASTRA 12014 Berechnung und Bemessung von Tagbautunnels (2013 V1.00; in Französisch; 14.02.2013)
- ASTRA 13001 Lüftung der Strassentunnel (2008 V2.03; 28.05.2014)
- ASTRA 13004 Branddetektion in Strassentunneln (2007 V2.10; 04.12.2008)
- ASTRA 13013 Struktur und Kennzeichnung der Betriebs- und Sicherheitsausrüstungen (AKS CH) (2014 V2.54; 11.02.2021)
- ASTRA 1b001 Inventarobjekte

IT-Dokumentationen

- ASTRA 62011-62016 zu KUBA 5.0

Dokumentationen

- ASTRA 84002 Gefahrguttransport in Strassentunneln - Analyse und Beurteilung der Personenrisiken (2011 V1.02) (ZIP, 16 MB, 10.06.2021)
- ASTRA 82013 Alkali-Aggregat-Reaktion (AAR) (2007 V1.01) (PDF, 6 MB, 16.07.2007)

Fachhandbücher

- ASTRA 24001 Fachhandbuch Tunnel / Geotechnik
- ASTRA 2B010 Handbuch Erhaltungsplanung

3.2 Rahmenbedingungen

In der vorliegenden Dokumentation werden alle Technologien und weitere Möglichkeiten zur Überwachung der Nationalstrassen-Infrastruktur im Bereich Tunnel betrachtet (vgl. Kapitel 6 - 9). Parallel dazu existieren 2 weitere Dokumentationen der Bereiche Kunstbauten und Trasse. Eine Synthese ist diesen 3 Dokumentationen vorangestellt. Zur Erarbeitung wurde ein Projekt "NTech - Nutzung neuer Technologien zur Überwachung der Infrastruktur" lanciert. Die Grundlagen zur Beschreibung und Bewertung der Technologien werden einführend erläutert (vgl. Kapitel 2 - 5).

Der Umfang der genannten Dokumentationen erstreckt sich bis zur Bereitstellung einer bewerteten Technologieübersicht mit Erstellung von Empfehlungen an die zuständigen Fachbereiche. Betrachtet wird der aktuelle Wissenstand weltweit betreffend diese Technologien. Die Ableitungen von Handlungsempfehlungen und notwendigen Forschungsarbeiten und Pilotanwendungen erfolgen konkret auf den Bedarf für Betrieb und Erhaltung des Nationalstrassennetzes. Bereits vorhandene Grundlagen hierzu finden sich in Kapitel 4. Die Erkenntnisse aus den laufenden Pilotanwendungen im ASTRA wurden berücksichtigt. Die grundlegende Methodik zur Bewertung der Technologien ist in Kapitel 5 beschrieben.

4 Grundlagen

Die Grundlagen für den in Kapitel 2.5 definierten Auftrag bilden der aktuelle Stand der Technik zum Einsatz bewährter und neuer Überwachungstechnologien sowohl in der schweizerischen als auch in der internationalen Praxis und Forschung im Bereich der Verkehrsinfrastruktur. Hierbei liegt der Fokus auf den einzelnen Teilsystemen Kunstbauten, Tunnel und Trasse sowie auf den Querschnittsthemen Umwelt, Naturgefahren und Geotechnik. Die im vorliegenden Bericht behandelten Überwachungstechnologien basieren damit auf Forschungen in den Bereichen der Sensormessung in direktem Kontakt und der berührungsfreien Messung (z.B. Laser-oder Radarmessung im Nahfeld bzw. Fernerkundungen).

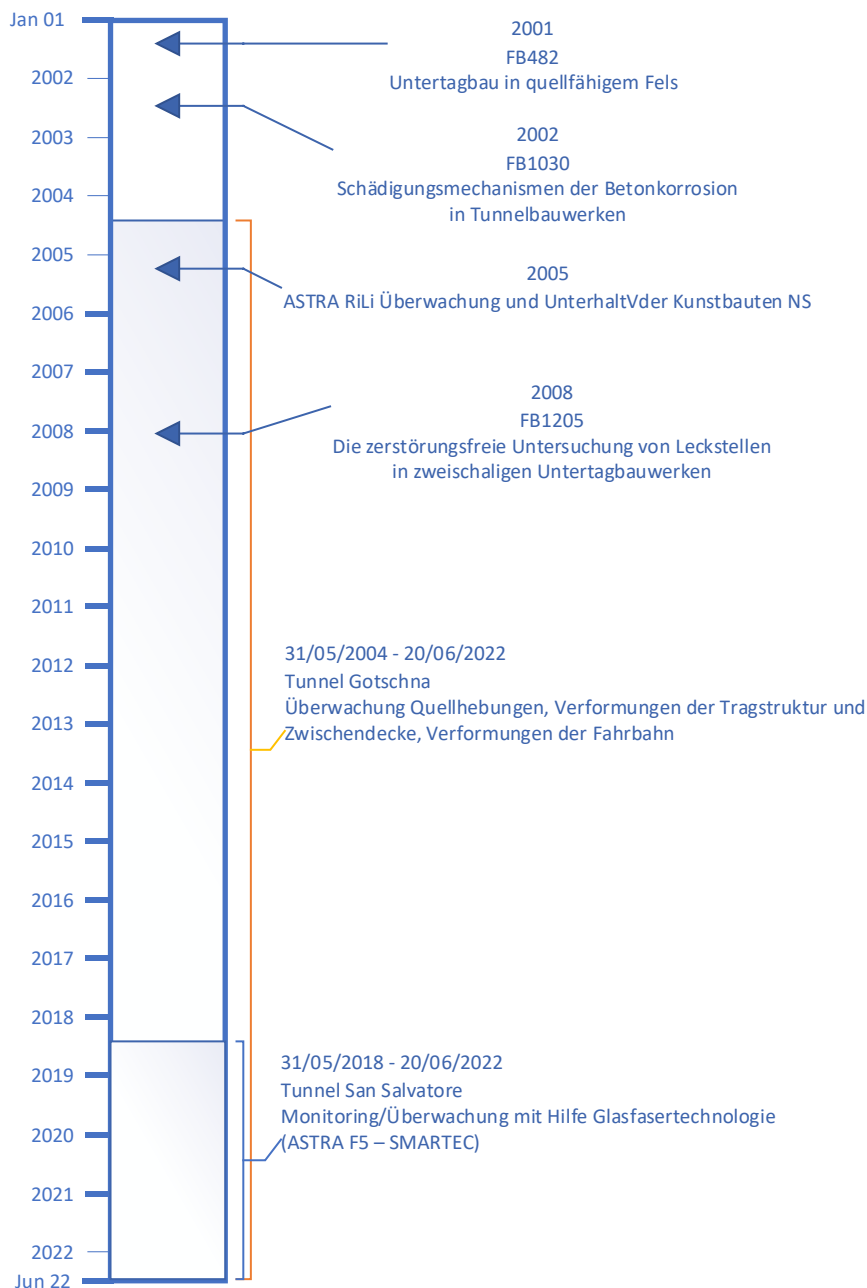


Abb. 4.4 Zeitliche Einordnung relevanter Forschungs- und Monitoring-Projekte TP Tunnel

Abb. 4.4 zeigt die zeitliche Einordnung von relevanten Forschungs- und Monitoring-Projekten für den vorliegenden Bericht im Fachbereich Tunnel. Auf wichtige Ergänzungen hierzu weisen die Kapitel 4.1 und 4.2 hin. Eine umfassende Übersicht für Tunnel bietet das Literaturverzeichnis, welches am Ende dieses Berichts zu finden ist. Zusätzlich sind relevante sonstige Literatur bzw. Forschungsberichte am Ende der jeweiligen Technologiekapitel zu finden.

4.1 Forschungsberichte

Die nachfolgende Tabelle zeigt die wichtigsten Forschungsberichte des ASTRA im Kontext dieses Projekts für Tunnelbauten. Der Forschungsbericht ASTRA 59/88 (FB205) bildet den Stand der Technik der flächenhaften Erfassung des baulichen Zustands von Tunnelbauwerken ab. Der Bericht ASTRA 1994/145 (FB482) zum Untertagbau in quelfähigem Fels stellt eine kohärente Sicht des Wissensstands in diesem Spezialgebiet des Tunnelbaus dar (weitere ASTRA-Berichte zu quelfähigem Gestein insbesondere am Tunnel Belchen sind online frei zugänglich über www.mobilityplatform.ch). Neben den Grundlagen, einem geschichtlichen Rückblick mit Beobachtungen und Hypothesen werden auch die konkreten Ingenieuraufgaben in der Praxis beleuchtet.

ASTRA 1999/145 untersucht die vielfältigen und komplizierten Schädigungsmechanismen, welche bei der Interaktion von Tunnelbauwerken mit Grundwasser zu Betonkorrosion führen. Mögliche Massnahmen zur Erhöhung der Dauerhaftigkeit werden in ASTRA 2005/016 (FB 683) beschrieben; die Tunnelabdichtungssysteme werden in 2004/001 (FB 1490) diskutiert; spezifisch auf Karbonatisierungsvorgänge konzentriert sich AGB 2013/005 (FB 696). ASTRA 2000/463 (FB1243) liefert Kostensätze zur Abschätzung der betrieblichen Unterhaltskosten von Strassenanlagen. In AGT 2014/001 (FB 1579) wird ein Initialprojekt zum Erhaltungsmanagement von bergmännischen Tunneln gestartet, das u.a. die Grundsatzfragen zur Diagnostik aufwirft. Mit dem Forschungsprojekt ASTRA FGU2004/001 (FB1205) wurde die Lokalisierung von Leckstellen in vollflächigen Tunnelabdichtungen bei bestehenden zweischaligen Tunnelgewölben untersucht. Dabei würde der Einsatz von Thermographie zuverlässige Untersuchungen zerstörungsfrei ermöglichen. Der Bericht ASTRA 2005/001 (FB1260) zeigt den Testeinsatz der Methodik "Indirekte Vorauserkundung von wasserführenden Zonen mittels Temperaturdaten" anhand der Messdaten des Lötschberg-Basistunnels auf. Mit dem Forschungsprojekt ASTRA 2012/011 (FB 692) wurde die automatisierte Erfassung des Korrosionszustand von Stahlbetontragwerken mittels Potentialfeldmessroboter für die Bauwerksinspektion betrachtet.

Tab. 4.2 Wichtigste ASTRA Forschungsberichte im Kontext dieses Projektes

ASTRA 59/88 (FB205)	Stand der Technik flächenhafte Erfassung des baulichen Zustands von Tunnelbauwerken
ASTRA 1994/017 (FB482)	Untertagbau in quelfähigem Fels
ASTRA 1999/145 (FB1030)	Schädigungsmechanismen der Betonkorrosion in Tunnelbauwerken
ASTRA 2005/016 (FB 683)	Massnahmen zur Erhöhung der Dauerhaftigkeit
ASTRA 2004/002 (FB 1490)	Langzeitbeständigkeit von Tunnelabdichtungssystemen aus Kunststoffen
AGB 2013/005 (FB 696)	Karbonatisierung von Beton und Korrosionsgeschwindigkeiten der Bewehrung im karbonatisierten Beton
ASTRA 2000/463 (FB1243)	Kosten des betrieblichen Unterhaltes von Strassenanlagen
AGT 2014/001 (FB 1579)	Erhaltungsmanagement von bergmännischen Tunneln - Initialprojekt
ASTRA FGU2004/001 (FB1205)	Die zerstörungsfreie Untersuchung von Leckstellen in zweischaligen Untertagbauwerken
ASTRA 2005/001 (FB1260)	Testeinsatz der Methodik "Indirekte Vorauserkundung von wasserführenden Zonen mittels Temperaturdaten" anhand der Messdaten des Lötschberg-Basistunnels
ASTRA 2012/011 (FB 692)	Potentialfeldmessroboter für die Bauwerksinspektion –Automatisierte Erfassung des Korrosionszustandes von Stahlbetontragwerken

4.2 Bestehende Monitoring-Anwendungen

4.2.1 Allgemein

Durch Messungen kann ein ungewöhnliches Verhalten eines Bauwerks oder das Überschreiten von festgelegten Grenzwerten frühzeitig erfasst werden.

Die Art und der Umfang dieser Messungen werden fallweise bestimmt und im Überwachungsplan festgehalten. Dazu sind die notwendigen Einrichtungen vorzusehen.

4.2.2 Wichtigste Anwendungen im Kontext des Projektes

In der nachfolgenden Tabelle sind ausgewählte Projekte aus der Schweiz im Fachbereich Tunnel sowie Naturgefahren zusammengestellt, wo ein Monitoring mit verschiedenen (permanenten) Überwachungstechnologien installiert ist.

Tab. 4.3 Anwendungsfälle im Kontext dieses Projektes innerhalb der Schweiz

Objekt	Zielgrösse	Überwachungs-Technologien	Ref.
Tunnel			
Gotthard Strassentunnel (seit ca. 1990)	Überwachung Zustand der Zwischendecke (Risse, Schwingungen, Verformungen), Überwachung Bewehrung, Überwachung dynamische Druckverhältnisse im Tunnel, Überwachung Verformungen Gewölbe, Überwachung Verformungen und Hebungen der Fahrbahn, Überwachung Klimaverhältnisse im Tunnel	Distometer, Rissmessgeräte, Rissbildaufnahmen, Potentialfeldmessungen, Beschleunigungsaufnehmern, Drucksensoren, Induktiven Wegaufnehmern, Konvergenzmessungen, Datenmesslogger für die Aufzeichnung der relativen Luftfeuchtigkeit und der Lufttemperatur, Geodätische Lagemessungen, Nivellement, Gleitmikrometer	
Tunnel Seelisberg (seit 1985)	Überwachung der Quellhebungen, Überwachung der Bewegungen der Tübbinge, Überwachung der Zwischendecke, Verformungen der Fahrbahn	Ankerkraftmessungen, Gleitmikrometer, Extensometer, Distometer, Clinometer, Laserscanning, geodätische Aufnahmen, Nivellement	
Tunnel Belchen (seit 1960er Jahren, während Bau)	Überwachung der Quellhebungen; Verformungen der Verkleidung, Fahrbahn, Schlitzrinnen und Bankette sowie Kalotte und Zwischendecke inkl. Trennwänden; Zustandsüberwachung (Rissweiten, Abplatzungen) der ganzen Tragstruktur, Belastungszustand der Verkleidung	Gleitmikrometer; Nivellement Konvergenzmessungen; Kraftmessung in Verkleidung mit Kraftmessdosen; Klimat (rel. Luftfeuchtigkeit, Lufttemperatur), Laserscanning; Radarmessungen der Verkleidungsstärke, Laborbeprobung Bohrkerne (Druck, Sulfat, AAR)	
Tunnel Chienberg (seit 2002, während Bau)	Überwachung Quellhebungen im Normalprofil und an der Oberfläche, diverse Konvergenzmessungen im Profil, Ankerkräfte, Stauchung der Fahrbahnplatte infolge seitlichen Quelldruck	Präzisionsnivellement, Distometer, Kraftmessdose, Tachymeter, Clinometer, Inklinometer, Sondenextensometer (Inkrementalextensometer, Gleitmikrometer, komb. Messsonden), Dehnungsmessungen, Druckkissen	
Tunnel Gotschna (Seit 2004, während Bau)	Überwachung der Quellhebungen, Verformungen der Tragstruktur und Zwischendecke, Verformungen der Fahrbahn	Ankerkraftmessungen, Gleitmikrometer, Extensometer, Distometer, Clinometer, Laserscanning, geodätische Aufnahmen, Nivellement	
Tunnel San Salvatore (seit 2017)	Überwachung Verschiebungen, Wassertemperatur, Erschütterungen, etc.	Faseroptische Sensoren	
Naturgefahren			
Axenstrasse	Überwachung Felssturz, Murgang, Erschütterungen, Bewegungen, Niederschlag	Steinschlagradare, Kameras, Pluviometer, Georadar, Kombibewegungssensoren	

Tab. 4.3 Anwendungsfälle im Kontext dieses Projektes innerhalb der Schweiz

Brünig	Überwachung Felssturz	terrestrisches interferometrisches Radar; Extensometer; Geodätische Aufnahmen / Tachymeter, Handmessstellen	
Lawinen Brienzersee	Überwachung und Alarmierung (automat. Sperrung Strasse) Lawinen	Pendel an Drahtseil; Geophone, Lawinenradar; mit Rücknahmesystem unten an der Strasse	
Brienz (GR)	Überwachung der Rutschung und der Felssturzgefährdung, Oberfläche	Steinschlagradar, Tachymeter, Georadar, Photogrammetrie, Satellitenmessverfahren (GNSS)	
Geotechnik			
Kriech-/ Rutschhang Brattas, St. Moritz	Überwachung Kriech-/Rutschhang sowie Kirche inkl. zahlreiche Lokalüberwachungen bei Privaten	Geodätische Messungen, hydraulische Messungen inkl. Infrarotaufnahmen, 82 m langes GFK-Kabel im bebauten Gebiet, lokale Ankerkraftmessungen, Gleitmikrometer, Inklinometer	
Kriech-/ Rutschhang Ischenwald	Überwachung Kriech-/Rutschhang oberhalb Lehenviadukt der A2, Beckenried	Niederschlagsmonitoring sowie Abflussganglinien / Schüttmessungen und Befahrungen der installierten Drainagen, geodätische Messungen, Inklinometer, Mehrfach-Extensometer, terrestrisches interferometrisches Radar	

5 Methodisches Vorgehen

5.1 Grundsatz

Mit der Erhaltung der Nationalstrassen-Infrastruktur erfüllt das Bundesamt für Strassen ASTRA seine hoheitliche Aufgabe, die Anforderungen hinsichtlich Sicherheit, Zuverlässigkeit, Verfügbarkeit, Nachhaltigkeit und einen entsprechenden Fahrkomfort auf dem Strassennetz für die Nutzer bzw. den strassengebundenen Personen- und Güterverkehr sicherzustellen. Die Grundlagen für die dafür notwendige transparente Entscheidungsfindung erarbeitet das Erhaltungsmanagement.

Die Überwachung sowie weitergehende Untersuchungen an der Strasseninfrastruktur bilden eine gute Grundlage für das Erhaltungsmanagement. Hierfür hat das ASTRA diverse Richtlinien und Handbücher ausgearbeitet, welche eine systematische Überwachung und Zustandsbewertung unterstützen. Im Weiteren werden bei Bedarf die Informationen zum aktuellen Zustand der Strasseninfrastruktur stufenweise gewonnen. Dies bedeutet, falls keine zuverlässige Aussage zu aktuellem Zustand der Infrastrukturobjekte mit einfachen (und günstigen) Mitteln möglich ist, auf aufwendigere (und kostspielige) Untersuchungen zurückgegriffen wird.

Diese Herangehensweise hat sich durchaus bewährt und dies beweist auch der Zustand der Nationalstrassen, welcher im internationalen Vergleich die Spitzenposition einnimmt (vgl. [1]). Dennoch beobachten die Infrastrukturbetreiber die Entwicklungen im Bereich der Überwachung, in welchem bedeutende Fortschritte erzielt wurden. Gewisse neuartige Methoden können u. U. im Rahmen von regelmässigen (d. h. kostengünstigen) Inspektionen eingesetzt werden, während die anderen nur im Rahmen der tiefgreifenden (d. h. kostspieligen) Untersuchungen verwendet werden sollten.

Es ist zu erwarten, dass aufgrund des steigenden Alters der Bauwerke tiefgreifende Untersuchungen häufiger eingesetzt werden müssen, da gewisse Schadensprozesse, mit einfachen Inspektionen nicht offengelegt werden können. Neue Technologien können hierfür nutzbringend eingesetzt werden. Für einen effizienten und effektiven Einsatz ist es notwendig, zunächst Technologien zu bewerten, dies einmal in Bezug auf deren Potentiale bei der Gewinnung von Informationen, aber auch auf deren Nutzen durch die mögliche Aussagekraft und Verwendung der Informationen im Entscheidungsprozess.

Die vorliegende Dokumentation hält einen Werkzeugkoffer bereit, mit welchem der Informationsgehalt neuer Überwachungsmethoden und deren Kosten und Nutzen in einer ersten Näherung bestimmt werden können, ohne bereits einen Hinweis auf ein betroffenes Bauwerk sowie die örtlichen Randbedingungen und Gefährdungen zu berücksichtigen. Die Methodik geht vom Ansatz des Werts einer Information aus, welche eine Technologie im Rahmen der Überwachung liefern kann. Als Überwachungskonzept wird in diesem Kontext der Einsatz einer bzw. mehrerer Technologien zur Abdeckung eines Informationsbedürfnisses an einem Infrastrukturobjekt bezeichnet.

Die Grundlage hierfür bildet die Wissenspyramide nach [2]. Obwohl die Technologien mit der Erhebung von Überwachungsdaten grundsätzlich Kosten für z.B. Einrichtung und Durchführung von Messungen neben anderen verursachen, stellen diese in einem Kontext als strukturierte Daten bereits Informationen mit einem definierten Wert dar. Sie entfalten ihren realen Nutzen – und damit den realen Wert der Information – aber erst durch ein Rückschliessen, die Entscheidungsfindung und das daraus abgeleitete effektive Handeln (vgl. Abb. 5.5).

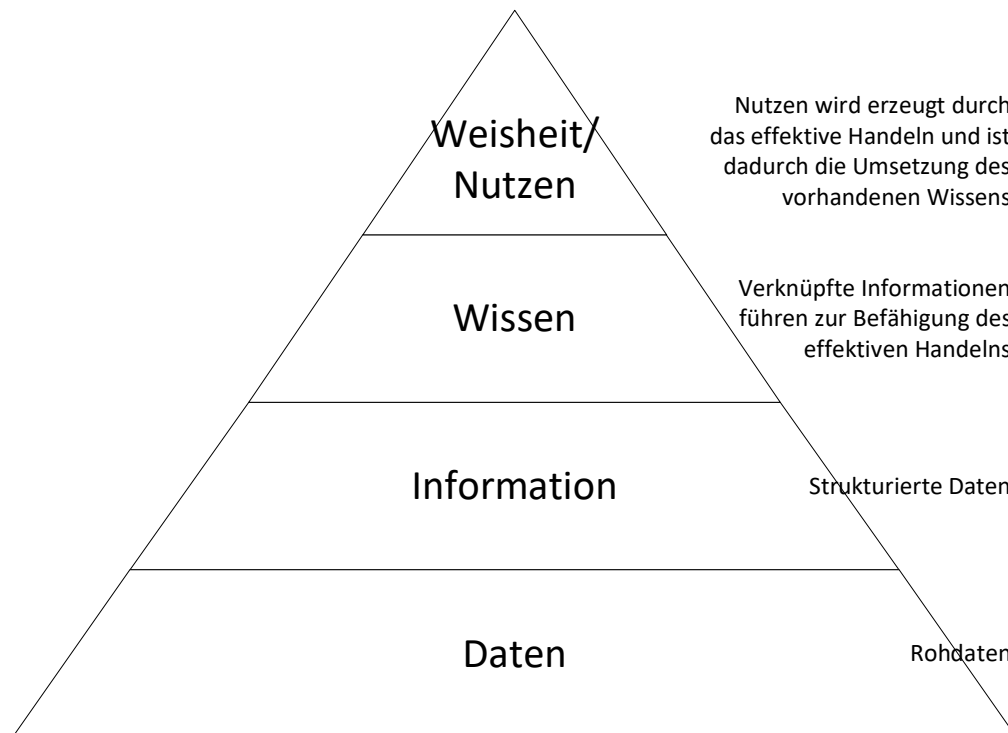


Abb. 5.5 Wissenspyramide (vgl. [2])

Um den Wert einer Information ermitteln zu können, sind Handlungsszenarien zu bilden. Ein Handlungsszenario im Infrastrukturmanagement stellt eine langfristige Massnahmenstrategie über einen definierten Betrachtungszeitraum dar. Da sich ein absoluter Nutzen für solche Szenarien nicht erfassen lässt (vgl. [3], [4] und [5]), wird stattdessen ein relativer Nutzen ermittelt.

$$\text{Rel. Nutzen} = \text{Szenario NTech} - \text{Szenario Ref}$$

mit

- | | | |
|-----------------------|---|--|
| <i>Rel. Nutzen</i> | – | relativer Nutzen als Differenz aus beiden Szenarien |
| <i>Szenario NTech</i> | – | Szenario unter der zusätzlichen Verwendung der Informationen neuer Technologien neben den bestehenden Inspektionsdaten |
| <i>Szenario Ref</i> | – | Szenario unter Verwendung der bestehenden Inspektionsdaten |

Der Wert der Information wird somit als ein relativer Nutzen aus der Differenz der langfristigen Kosten zweier Handlungsszenarios, d.h. eines mit Vorhandensein und eines ohne diese Information, definiert. Die langfristigen Kosten stellen dabei die gesamtwirtschaftlich erwarteten Kosten inklusive monetarisierter Risiken für alle Anspruchsgruppen, d.h. Betreiber, Nutzer, Dritte und die Umwelt, dar. Dies umfasst alle Massnahmen, welche im Rahmen des jeweiligen Szenarios langfristig über einen definierten Zeitraum stattfinden.

Als Definition des Nutzens können neben einer Kosten-Nutzen-Analyse auch Alternativen Verwendung finden. Hierfür werden im Kontext des Verkehrswesens oft auch Kosten-Wirkungsanalysen eingesetzt (vgl. [6]). Dabei wird der Nutzen als eine relative Differenz der Veränderungen einer definierten Kenngrösse (z.B. Veränderung des Risikos / der Performance / des Zustands usw.) zwischen zwei Szenarios über einen definierten Zeitraum definiert.

Die spezifischen Gefährdungen an Infrastrukturen stehen mit den örtlichen Randbedingungen der vorhandenen Umgebung in einem Zusammenhang. Die Bewertung einer Technologie ist somit nur unter Einbezug der unterschiedlichen objektspezifischen Randbedingungen sinnvoll. Die Methodik wird im Folgenden dargestellt und erläutert.

5.2 Grundlage der Technologiebeschreibung

Im Rahmen dieser Dokumentation erfolgt eine Auslegeordnung vorhandener Technologien, mit welcher zuerst die relevanten Technologien zusammengetragen und deren Potential beschrieben werden. Zusätzlich werden relevante artfremde Technologien sowie Datenquellen analysiert. Hierbei liegt der Fokus auf der Beschreibung sowie der Bewertung des Nutzungspotentials dieser Technologien für die Integration in das Erhaltungsmanagements des ASTRA.

Grundsätzlich wird oft bei der Überwachung der Strasseninfrastruktur zwischen der zerstörungsfreien bzw. -armen Prüfung (ZfP) und Structural Health Monitoring (SHM) differenziert. Obwohl es keine formale Abgrenzung gibt, versteht man unter ZfP einmalige oder in grösseren Zeitabständen durchgeführte Aktivitäten, bei welchen Geräte genutzt werden, die nicht zum Infrastrukturobjekt gehören. Demgegenüber versteht man unter SHM mehr oder weniger kontinuierliche Messungen mit den Geräten, welche am Infrastrukturobjekt montiert sind. Weitere Klassifikationen umfassen den Einsatzzweck, die Zuverlässigkeit, das TRL (Technology Readiness Level) und die langfristigen Kosten.

5.3 Überblick über die Bewertungsmethodik

Ausgangspunkt der Bewertung sind Kosten und Nutzen der Technologie bzw. Technologien innerhalb eines Überwachungskonzepts und der damit resultierenden Überwachungsinformation. Dies ist in Abb. 5.6 dargestellt.

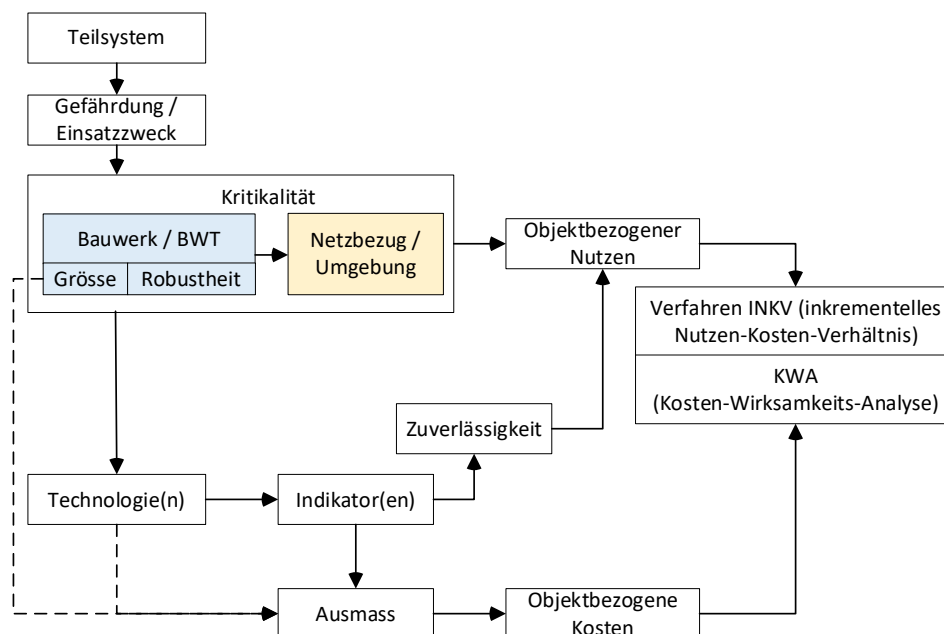


Abb. 5.6 Konzept der Bewertung der Technologien am Wert der Information

Dabei wird auf die in Kapitel 6 aufgezeigte Struktur der Technologiedaten abgestützt. Die Technologien werden in den einzelnen Teilsystemen einerseits in Bezug auf die vorhandenen Gefährdungen und daraus abgeleiteten Einsatzzweck unterteilt. Andererseits sind die Technologien relevanten Bauwerksteilen zugeordnet (vgl. Kapitel 6). Die bestimmten Kosten und Nutzen dienen dann zur Auswahl der jeweiligen Technologie.

Die Methodik der Technologiebewertung soll Nutzern der vorliegenden Dokumentation ein Werkzeug für die Entscheidungsfindung bei der Planung der Überwachungstätigkeiten zur Verfügung stellen. Die Methodik dient ebenfalls einer Bewertung der einzelnen Technologien im Kontext der Teilsysteme (vgl. Kapitel 9). Dabei soll die Bewertung sowohl in beiden Bewertungsebenen, der Technologiebewertung und der Bewertung zur Entscheidungsfindung am Einzelobjekt, als auch in allen drei Teilsystemen, mit Kunstbauten, Tunnel und Trasse, stringent Anwendung finden.

5.4 Verallgemeinerung durch Klassifizierung

Grundsätzlich ist der Wert der Information an einem Infrastrukturobjekt nicht unabhängig von den Gefährdungen und deren Konsequenzen (vgl. Kapitel 9) ermittelbar. Am Einzelobjekt sollten alle relevanten Aspekte des Bauwerks, der Umgebung und der örtlich vorhandenen Gefährdungen sowie deren Konsequenzen direkt in die Bewertung mit einfließen. Stehen jedoch keine ausreichenden Informationen der örtlichen Randbedingungen zur Verfügung, müssen hierfür Annahmen getroffen werden. Dies wird in der Technologiebewertung für jedes Teilsystem durch eine grobe Klassifizierung relevanter Aspekte berücksichtigt. Im vorliegenden Kapitel wird dies grob generisch aufgezeigt. Die konkrete Klassifizierung im Teilsystem ist dem Kapitel 9 zu entnehmen.

5.4.1 Kritikalität eines Bauwerks oder eines seiner Bauwerksteile

Die Kritikalität eines Bauwerks bzw. eines seiner Bauwerksteile (BWT) wird durch das Bauwerk an sich und seine Umgebung bzw. seine Einbindung in das Strassennetz definiert. Sie hat Auswirkungen auf die Auswahl der Technologien und deren Kosten als auch einen Einfluss auf den Nutzen durch den Netzbezug. Dabei ist gerade für die Bewertung am Einzelobjekt der Einsatz von Computermodellen (z.B. [7]) für die Simulation von Szenarien, z.B. zur Wahrscheinlichkeit des Versagens oder der resultierenden Konsequenzen, sinnvoll. Zum Teil ist dies die einzige Möglichkeit, konkrete Aussagen für das Einzelobjekt machen zu können.

Bauwerksgrösse

Die Bauwerksgrösse hat je nach Technologieauswahl einen kostenbestimmenden Einfluss. Dies ist jedoch nicht zwingend. Bei einem punktuellen Einsatz der Technologien ist die Bauwerksgrösse eher nicht von Bedeutung. Für die überschlägige Technologiebewertung ist bei Bedarf eine einfache qualitative Klassifizierung je nach Teilsystem zu wählen.

Robustheit

Die Robustheit eines Bauwerks gibt Aufschluss über die Wahrscheinlichkeit eines Versagens des Bauwerks oder eines seiner BWT. Hierbei sind einerseits der Bauwerkstyp sowie andererseits dessen Gefährdungen relevant. Am konkreten Bauwerk, dessen Gefährdungen und den vorhandenen örtlichen Randbedingungen können Tragwerksmodelle durch Szenarienbildung Aufschlüsse über das Versagen geben. Ohne einen konkreten Bezug auf ein existierendes Bauwerk mit seinen Randbedingungen hilft eine Klassifizierung, um diese in eine überschlägige Bewertung einzubeziehen. Eine einfache qualitative Klassifizierung zeigt Abb. 5.7 auf.

Bauwerk	Teilsystem	
Robustheit	Kategorie	Bauwerkstyp (Konstruktion)
	3	gering
	2	mittel
	1	gross

Abb. 5.7 Einfache qualitative Klassifizierung der Robustheit

Netzbezug

Der Netzbezug ermöglicht es, die Konsequenzen eines Versagens von Bauwerken zu bestimmen. Dabei werden die zu erwartenden Konsequenzen addiert. Ein wesentlicher Teil von Konsequenzen eines Versagens bei Bauwerken der Strasseninfrastruktur kann aus der existierenden Verkehrsbelastung auf dem Bauwerk selbst und dem umgebenden Strassennetz abgeleitet werden. Hierbei helfen Szenariensimulationen am Verkehrsmodell. Für eine überschlägige Bewertung ohne konkrete Ansätze müssen analog zur Robustheit relevante Klassen gebildet werden. Eine einfache qualitative Klassifizierung zeigt Abb. 5.8 auf.

Netzbezug		Konsequenzen aus
Konsequenz	Kategorie	Netzbelastung / Umgebung
	1	gering
	2	mittel
	3	gross

Abb. 5.8 Einfache qualitative Klassifizierung des Netzbezugs

Durch die Kombination der Klassen von Robustheit und Netzbezug in einer groben Risikomatrix bietet die Kritikalität bei der überschläglichen Technologiebewertung auch die Möglichkeit einer Reduktion von Kombinationen (vgl. Abb. 5.9). In der Einzelbewertung am Infrastrukturobjekt sollte für die Bestimmung des Nutzens in diesem Rahmen eine quantitative Risikobewertung durchgeführt werden. Wie schon aufgezeigt, bieten Verkehrsmodelle hierbei die Möglichkeit einer quantitativen Risikobewertung.

Robustheit	Kritikalität				Kategorie
gering					1
mittel					2
gross					3
	gering	mittel	gross		
	Konsequenzen des Versagens				

Abb. 5.9 Klassifizierung der Kritikalität zur Verwendung bei der einfachen qualitativen Technologiebewertung

5.4.2 Objektbezogener Nutzen

Für die Quantifizierung des Nutzens werden langfristige Handlungsszenarien gebildet, für welche die gesamtwirtschaftlichen Kosten aller Anspruchsgruppen, d.h. Betreiber-, Nutzerkosten und Kosten Dritter, erfasst werden (vgl. Kapitel 5.1). Bei der Quantifizierung sollten im Rahmen eines Überwachungskonzepts auch Kombinationen von Technologieanwendungen berücksichtigt werden (vgl. Kapitel 9.3), um durch zusätzliche Informationen die Aussagekraft bzw. die Zuverlässigkeit in Bezug auf relevante Gefährdungen für die Entscheidungsfindung zu erhöhen.

Der objektbezogene Nutzen wird im Rahmen der qualitativen Bewertung der Technologien gebildet aus der Kritikalität und der Zuverlässigkeit von Überwachungstechnologien. Dabei bezieht sich die Zuverlässigkeit einerseits auf die Technologie selbst und andererseits auf die Aussagekraft der daraus zugehörigen Indikatoren.

Zuverlässigkeit

Die Zuverlässigkeit kann zum Beispiel in einer ersten groben Klassifizierung dadurch gekennzeichnet sein, dass man bei neuen Technologien zuerst noch Erfahrungen mit den gemessenen Indikatoren und mit Rückschlüssen auf die Entscheidungsfindung sammeln muss (vgl. Abb. 5.10). Dies steht in Verbindung mit Pilot- oder Forschungsprojekten, welche sich unter anderem beim ASTRA in Durchführung befinden oder eventuell lanciert werden sollten.

Zuverlässigkeit		
ZV1	Kategorie	Technologieakzeptanz
	1	Forschung notwendig
	2	Pilotprojekt notwendig
	3	im Einsatz

Abb. 5.10 Klassifizierung der Zuverlässigkeit in Bezug zur Akzeptanz der Technologie

Ein weiterer Aspekt ist die Aussagekraft der resultierenden Indikatoren aus den Technologien. Die Indikatoren können eine grosse Aussagekraft in Bezug auf die Gefährdung haben oder eben weniger. Dies kann mit einer weiteren einfachen Klassifizierung grob überschlagen werden (vgl. Abb. 5.11).

Zuverlässigkeit		
ZV2	Kategorie	Aussagekraft Indikator für Gefährdung
	1	klein
	2	mittel
	3	gross

Abb. 5.11 Klassifizierung der Zuverlässigkeit in Bezug zur Aussagekraft der Indikatoren auf eine spezifische Gefährdung

Zusätzlicher Nutzen in Abhängigkeit des Ausmasses

Für eine einfache qualitative Technologiebewertung ist im Gegensatz zur Nutzenbestimmung am konkreten Bauwerk mit dessen Randbedingungen nicht eindeutig bestimmbar, welches Ausmass der Technologieinstallation am Bauwerk relevant ist. Hierfür müssen Annahmen in Form einer Bandbreite mit oberer und unterer Grenze gebildet werden. Diese Skalierung hilft, den Nutzen in einer Bandbreite zwischen z.B. wenigen, punktuellen Messungen und ausgedehnten Messbereichen durch einen zusätzlichen Nutzen analog der aufgeführten Klassifizierung in Abb. 5.12 aufzuzeigen (vgl. auch Bandbreite Kosten). Den Hintergrund hierfür bildet der Wert einer Information an einem Bauwerk. Einzelinformationen, z.B. ein erfasster Wert einer einzelnen Messstelle, lassen zum Teil nur wenige Rückschlüsse in Bezug auf eine vorhandene Gefährdung zu. Mehrere Messstellen in einem grösseren Perimeter bzw. viele Messungen über ein grösseres Ausmass erzeugen höhere Kosten, resultieren aber durch ihre umfassendere Aussagekraft im Gefährdungskontext auch in einem höheren Nutzen.

Ausmass		
zN	Kategorie	zusätzlicher Nutzen bei grossem Ausmass
	1	gering
	2	klein
	3	mittel
	4	gross
	5	sehr gross

Abb. 5.12 Klassifizierung des zusätzlichen Nutzens bei grossem Ausmass

Darstellung eines Mehrfachnutzens

Zusätzlich haben Technologien, welche mehrere Gefährdungen abdecken, einen Mehrfachnutzen, welcher in die Bewertung mit einfließen sollte. Für die einfache qualitative Technologiebewertung sollte der Mehrfachnutzen trotz fehlender konkreter Bauwerksdefinition zumindest dargestellt werden. In der Einzelbewertung am Infrastrukturobjekt muss dies mit Kosten und quantifizierten Nutzen in der Szenariensimulation (vgl. Kapitel 5.1) Berücksichtigung finden.

5.4.3 Objektbezogene Kosten

Die objektbezogenen Kosten ergeben sich aus der Wahl der Technologie und des Indikators oder eines Überwachungskonzepts mit mehreren Technologien. Hierbei wirkt sich das Ausmass der Installation am Bauwerk aus. Im Einzelfall kann dies bereits durch die Klassifizierung der Grösse des Bauwerks für die grobe Technologiebewertung abgeschätzt werden. Je nach Fragestellung und verfügbarer Technologie kann das Ausmass aber auch unabhängig vom Bauwerk sein.

Für die Ermittlung der objektbezogenen Kosten am konkreten Fall ist eine Bestimmung der Kosten über das konkrete Ausmass in Abhängigkeit zur Gefährdung und des Bauwerks mit seinen Randbedingungen möglich. Für eine grobe Technologiebewertung sollte sich auf die Angaben im Bericht gestützt werden. Zusätzlich müssen in Bezug zum Ausmass analog zum Nutzen Annahmen in Form einer Bandbreite mit oberer und unterer Grenze erfolgen.

5.5 Evaluation von Technologien

Für die Evaluation von Technologien in einem Überwachungskonzept lassen sich mit dem jeweiligen objektspezifischen Nutzen und dafür anfallenden Kosten im Rahmen eines Auswahlverfahrens die besten Varianten finden. Zusätzlich lassen sich die Technologien grob untereinander vergleichend bewerten.

5.5.1 Einfache qualitative Technologiebewertung

Im Rahmen der Technologiebewertung kann vereinfacht das Nutzen-Kosten-Verhältnis qualitativ aufgezeigt werden. Durch eine leichte Anpassung im Vorgehen (vgl. Abb. 5.13), können die Technologien direkt ohne den Bezug zu einem Einzelbauwerk und seiner Umgebung bewertet werden. Hierfür werden die Nutzen- und Kostenkenngrössen qualitativ bestimmt. Für die grobe Bewertung sollten dafür sinnvolle überschlägige Klassifizierungen gebildet werden, um unterschiedliche relevante örtliche Randbedingungen grob zu unterscheiden. Dies wurde im Kapitel 5.4 für die jeweiligen Aspekte beispielhaft aufgezeigt und muss für jedes Teilsystem separat betrachtet und sinnvoll definiert werden.

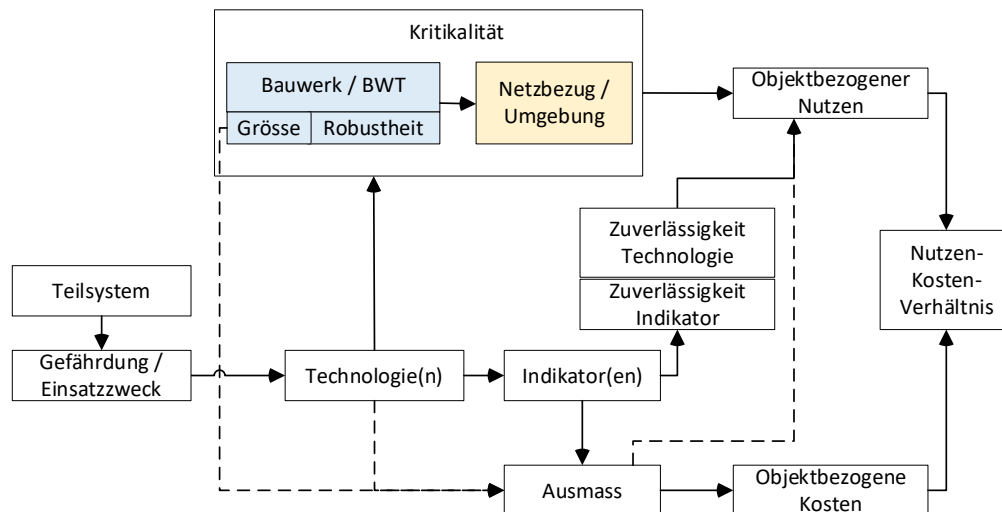


Abb. 5.13 Ablauf zur einfachen qualitativen Bewertung ausgehend von den im Teilsystem vorhandenen Technologien

Qualitative Ermittlung des objektbezogenen Nutzens

Für die Ermittlung des objektbezogenen Nutzens im Rahmen der einfachen qualitativen Technologiebewertung sind notwendige Angaben zum Bauwerk und zum vorhandenen Netzbezug nicht vorhanden. Hierfür wurden in Kapitel 5.4.1 drei Kategorien der Kritikalität *Krit* eingeführt. Diese bilden eine Bandbreite von gering kritischen Bauwerken (Kategorie 1 – untere Grenze) bis zu hoch kritischen Bauwerken (Kategorie 3 – obere Grenze) ab.

Für die gewählten Technologien mit einem spezifischen Indikator lässt sich qualitativ die Zuverlässigkeit aus ZV1 und ZV2 ermitteln. Zusätzlich existiert ein zusätzlicher Nutzen zN , wenn die Aussagekraft im Gefährdungskontext durch ein grösseres Ausmass erhöht wird (vgl. Kapitel 5.4.2). Damit wird der objektbezogene Gesamtnutzen GN wie folgt ermittelt:

$$GN = ZV1 \cdot ZV2 \cdot Krit + zN$$

Die Berechnung und vergleichende Darstellung zwischen den unterschiedlichen Technologien für die Gefährdung bzw. Einsatzzwecke an unterschiedlichen relevanten Bauwerks- teilen wird für das jeweilige Teilsystem in Kapitel 9 konkret aufgezeigt.

5.5.2 Einzelbewertung am Infrastrukturobjekt

Für die Einzelbewertung am Infrastrukturobjekt sind die spezifischen örtlichen Randbedingungen über eine Risikobetrachtung konkret zu analysieren. Dabei können Computermodelle helfen, die Wahrscheinlichkeit eines Versagens (z.B. Tragwerksmodelle linear, flächenbezogen oder FEM) oder dessen Konsequenzen (z.B. Verkehrssimulationen mit [7]) zu quantifizieren.

Für die Evaluation können anhand der quantifizierten Nutzen- und Kostenkenngrößen mit Hilfe von Optimierungsverfahren optimale Technologie-Varianten gefunden werden. Vorgeschlagen wird hierfür das klassische Verfahren des Inkrementellen Nutzen-Kosten-Verhältnisses (INKV). Dabei wird das Überwachungskonzept bzw. die Technologie mit dem grössten Nettonutzen durch die Einhüllende gewählt (vgl. Abb. 5.14, [4] und [8]).

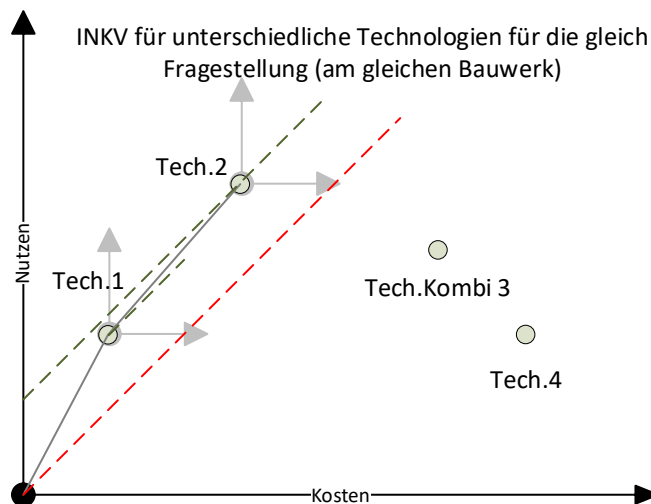


Abb. 5.14 Verfahren des Inkrementellen Nutzen-Kosten-Verhältnisses (INKV)

Hintergrund der Bewertung ist der Wert der Information (vgl. Kapitel 5.1). Diesen Nutzen erhält man durch die Differenz zum Referenzszenario. Das Referenzszenario stellt die Massnahmenplanung am Objekt über einen definierten Betrachtungszeitraum (z.B. 20 oder 50 Jahre) unter der Verwendung der klassischen Überwachungstätigkeit, d.h. bei der Durchführung der im jeweiligen Jahresrhythmus (je nach Teilsystem 4-5 Jahre) durchgeführten Inspektionen bzw. Zustandserfassung, dar. Kommen durch die Verwendung neuer Technologien oder eines Monitorings einerseits zusätzliche Informationen hinzu oder wird andererseits eventuell auch der Rhythmus der Inspektionen bzw. Zustandserfassung in der Zukunft dadurch beeinflusst, ändern sich die Werte von Kosten und Nutzen im jeweiligen betrachteten Planungsszenario der Überwachung (resp. NTech-Szenario Xi). Damit können der Wert der Information und auch der Nutzen des Überwachungskonzept an einem Bauwerk mit den örtlichen Randbedingungen und vorhandenen Gefährdungen für einen Vergleich mit anderen Varianten ermittelt werden.

5.6 Literaturverzeichnis

Sonstige Literatur / Forschungsberichte

- [1] Schiffmann, Frank; Büchel, Beda; Botzen, Matthias; Hajdin, Rade und Weninger-Vycudil (2017) Gutachten zum internationalen Vergleich des Zustands von Strassen. unveröffentlichtes Gutachten, Bundesanstalt für Strassen BAST, Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur BMVI, Bonn
- [2] Ackoff, R. L. (1989): From Data to Wisdom. In Journal of Applied Systems Analysis 16 (16), pp. 3–9.
- [3] Lüking, Jost; Herrmann, Thomas; Schindele, Nadine; Adey, Bryan Tyrone; Hajdin, Rade (2008): Gesamtnutzen und Nutzen-Kosten-Verhältnis von standardisierten Erhaltungsmassnahmen. Schlussbericht VSS 2004/714. Strassen, Bundesamt für. Bern (Schriftenreihe, 1244).
- [4] van Linn, Andreas; Welte, Urs; Hajdin, Rade; Adey, Bryan (2009): Sicherheit des Verkehrssystems Strasse und dessen Kunstbauten; Effektivität und Effizienz von Massnahmen. AGB 2005/104. Bundesamt für Strassen AST-RA (Schriftenreihe Brückenforschung, FB620).

-
- [5] Adey, Bryan; Hajdin, Rade; van Linn, Andreas; Welte, Urs (2009): Sicherheit des Verkehrssystems Strasse und dessen Kunstbauten; Effektivität und Effizienz von Massnahmen bei Kunstbauten. AGB 2005/109. Bundesamt für Strassen ASTRA (Schriftenreihe Brückenforschung, FB625).
-
- [6] SN 641 820 (2019): Kosten-Nutzen-Analysen im Strassenverkehr, Grundnorm. Swiss Code. Zürich: Schweizerischer Verband der Strassen- und Verkehrsfachleute (VSS) (SN 640 820).
-
- [7] ARE (2020) Nationales Personenverkehrsmodell NPVM 2017. Eidgenössisches Departement für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK, Bundesamt für Raumentwicklung ARE, Bern 2020
-
- [8] Rafi, Ali; Hajdin, Rade; Welte, Urs (2005): Optimierungsprozesse im Management der Strassenerhaltung (MSE). Edited by Ve. Bern (Schriftenreihe, 1109).
-

6 Evaluierte Technologien und Datenquellen für die Überwachung im Überblick

6.1 Übersichtstabellen – Legende

Die evaluierten Technologien werden im Folgenden in einer Tabelle je nach möglichem Einsatz-/Verwendungszweck zusammengefasst dargestellt. Einzelne Technologien können auch an unterschiedlichen Orten mehrfach genannt werden, wenn sie für unterschiedliche Messziele einsetzbar sind.

Im Anschluss folgt in Kapitel 7 die jeweils detailliertere Tabellendarstellung der einzelnen Technologien mit einer ersten Übersichtseinstufung nach Nutzungen während der verschiedenen Life-Cycle-Phasen, in denen sie eingesetzt/eingebaut werden. Unabhängig davon soll der Fokus in allen Fällen auf die Phase Betrieb /Unterhalt gesetzt werden.

Die gelb hinterlegten Zellen erläutern im Sinn einer Datenlegende die jeweiligen Symbole oder erwarteten Feldinhalte.

Es wird darauf hingewiesen, dass die Einstufung auf der Grundlage des Anwendungspotenzials jeder Technologie erfolgt und nicht auf der Grundlage des Ausmasses, in dem diese bereits eingesetzt wird. Dies entspricht dem Zweck dieses Dokuments, dessen Ziel es ist, den Ingenieur mit dem Potenzial der verfügbaren Überwachungstechnologien vertraut zu machen und ihre Anwendung zu fördern.

Tab. 6.4 Legende

Übergeordnete Gruppe		Bauwerksentkoppelte Überwachung		Technologie		Fragestellung	
Fragstellung		Baugrundverformungen		Fragestellung			
Gängige Bezeichnung der Technologien				Name		"ID"	
				Terrestrische Radarinterferometrie		TRL_	
				Satellengestützte Radarinterferometrie		SRL_	
				Laserscanning		LSC_	
				Geodätische Aufnahmen (Tachymeter)		TAC_	
				Sondertextensometer		SXT_	
				Inklinometer		IKN_	
				Extensometer		EXT_	
				Schlauchwaage		SWA_	
				Nivellament		NIV_	
		Faseroptische Sensoren		FOS_			
ID: 3 Buchstaben ohne Nummerierung				ZIP / ZaP / ZP (NDT/PDT/DT)		Lokalisation Messresultat (P, L, F)	
Art des Prüfverfahrens							
Lokalisation Messresultate							
Einsatzfachbezogen				Fachgebiet -->		Einsatz in Fachgebieten	
				Tunnel		Geotechnik	
				Naturgefahren		Umwelt	
				Umwelt			
				Umwelt			
				Umwelt			
				Umwelt			
				Umwelt			
				Umwelt			
				Umwelt			
Einsatzbauwerksbezogen				Verkleidung - Gewölbe		Verkleidung - Sohlgewölbe	
				Zwischendecke		Verkleidung - Gewölbe	
				Verkleidung - Sohlgewölbe		Zwischendecke	
				Baugruben, Einschnitt		Bergwasserdrainageleitungen	
				Fahrbahnbelag		Fundationsschicht	
				Baugrund		Terrainoberfläche	
				andere Infrastrukturobjekte			
Einsatzzeitpunkt: vor (V) / während (W) / nach (N) Bau				Einsatz-/Durchführungs-Zeitpunkt		Phasen	
Verweis Detailbeschrift				Detaildaten (Links zu) Kapitel(n)		weitere Erläuterungen (Links zu Quellenverzeichnis)	
Weitere Referenzen							

Die nachfolgende Tabelle zeigt einen Auszug aus der Übersicht der evaluierten Technologien, worin im Sinne einer Lesehilfe ein konkretes Beispiel für die Anwendung dargestellt ist:

1. Relevantes Bauwerk / Bauwerksteil → z.B. Baugrube
2. Spezifische Fragestellung → z.B. Baugrundverformung
3. Evaluierte Messtechnologien inkl. Bewertung für relevantes Bauwerksteil.
4. Weitere Informationen (Art der Prüfung, Lokalisation Messresultat, Anwendungen in anderen Fachbereichen, sinnvoller Einsatzzeitpunkt) zu jeder Technologie.

Tab. 6.5 Lesehilfe zur Übersicht der evaluierten Technologien

Bauwerksentkoppelte Überwachung										2. Baugrundverformung									
Massenbewegungen (Steinschlag, Murgänge, Lawinen, Rutschhang, etc.)										Baugrundverformungen									
Technologie										Fragestellung									
Name										ID									
Terrestrische Radarinterferometrie T/TL										ZIP / ZaP / ZP (NDT/PDT/DT)									
Satellitengestützte Radarinterferometrie S/TL										(zerstörungsfrei/zerstörungsarm/zerstörende Prüfung)									
Laserscanning LSC										Lokalisation Messresultat (P, L, F)									
Geodätische Aufnahmen (Tachymetrie) TAC										(Punktuell, Linear, Flächenbezogen)									
Sondennixtensometrie SXT																			
Extensometrie EXT																			
Schlauphysik SWA																			
Nebenelement NNE																			
Faseroptische Sensoren FOS																			
Bewegungs-Radar (Doppleradar) BWR																			
Geophone ENG																			
Piezo-Radar PRA																			
Infrasound IFS																			
Wellenstation WTS																			
Laserscanning LSC																			
Reisstehen RSL																			
Kapazitive Drucksensoren DSK																			
Piezoelektrische Drucksensoren DSP																			
Terrestrische Radarinterferometrie T/TL																			
Satellitengestützte Radarinterferometrie S/TL																			
Deformationskameras DFK																			
Geodätische Aufnahmen (Tachymetrie) TAC																			
Nivellierung NIV																			
Fugen- und Rissmessgeräte FUG																			
Distometer DIS																			
Neigungswandungen (Chromometer) CIL																			
Faseroptische Sensoren FOS																			
4. Lokalisation Messresultat																			
Fachgebiet -->										Einsatz in									
Tunnel																			
Geotechnik										4. Weitere Fachbereiche									
Naturgefahren																			
Umwelt																			
--- bauwerksbezogen																			
Verkleidung - Gewölbe										Bergmännische Tunnel									
Verkleidung - Sohlgewölbe																			
Zwischendecke																			
Verkleidung - C										1. Baugrube									
Verkleidung - Sohlgewölbe																			
Zwischendecke										Baugruben, Einschnitt									
Bergwasserdrainageleitungen																			
Fahrbahnbelag																			
Fundationsschicht																			
Baugrund																			
Terrainoberfläche																			
andere Infrastrukturobjekte																			
Einsatz-/Durchführungszeitpunkt										4. Einsatzzeitpunkt									
Detaildaten (Links zu z) Kapitel(n)																			
weitere Erläuterungen (Links zu Quellenverzeichnis)																			

Tab. 6.6 Übersicht der evaluierten Technologien nach Einsatzzweck

Technologie		Fragestellung		
Name	"ID"	ZfP / ZaP / ZP (NDT/PDT/DT)		
		Lokalisation Messresultat (P, L, F)		
Bauwerksentkoppelte Überwachung		Baugrundverformungen		
Massenbewegungen (Steinschlag, Murgänge, Lawinen, Rutschhang, etc.)	Terrestrische Radarinterferometrie	TRL	ZfP	F
	Satellitengestützte Radarinterferometrie	SRL	ZfP	F
	Laserscanning	LSC	ZfP	F
	Geodätische Aufnahmen (Tachymeter)	TAC	ZfP	P
	Sondenextensometer	SXT	ZaP	L
	Inklinometer	IKN	ZaP	L
	Extensometer	EXT	ZaP	L
	Schlauchwaage	SWA	ZfP	P
	Nivellement	NIV	ZfP	P
	Faseroptische Sensoren	FOS	ZfP	L
	Bewegungs-Radar (Dopplerradar)	BWR	ZfP	F
	Geophone	EMG	ZfP	P
	Pegel-Radar	PRa	ZfP	P
	Infrasound	IFS	ZfP	F
	Wetterstation	WTS	ZfP	P
	Laserscanning	LSC	ZfP	F
	Reissleiten	RSL	ZfP	P
	Kapazitive Drucksensoren	DSK	ZfP	P
	Piezoelektrische Drucksensoren	DSP	ZfP	P
	Terrestrische Radarinterferometrie	TRL	ZfP	F
	Satellitengestützte Radarinterferometrie	SRL	ZfP	F
	Deformationskameras	DFK	ZfP	F
	Geodätische Aufnahmen (Tachymeter)	TAC	ZfP	P
	Nivellement	NIV	ZfP	P
	Fugen- und Rissmessgeräte	FUG	ZfP	P
	Disometer	DIS	ZfP	P
	Neigungsänderungen (Clinometer)	CLN	ZfP	P
	Faseroptische Sensoren	FOS	ZfP	L

Einsatz in Fachgebieten	Querschnitts-themen	Gliederung Bauwerk in generalisierte Bauwerksteile										Einflussbereich Bauwerk	Phasen																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																									
		Bergmännische Tunnel		Tagbautunnel, Galerien inkl. Portalbereich		Drainage-leitungen und Strassenkörper		Baugrund		Terrainoberfläche				andere Infrastrukturobjekte																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																								
Tunnel	Geotechnik	Naturgefahren	Umwelt	<--- bauwerksbezogen										Verkleidung - Gewölbe	Verkleidung - Sohlgewölbe	Zwischendecke	Verkleidung - Gewölbe	Verkleidung - Sohlgewölbe	Zwischendecke	Baugruben, Einschnitt	Bergwasserdrainageleitungen	Fahrbahnbelag	Fundationsschicht	Baugrund	Terrainoberfläche	andere Infrastrukturobjekte	Einsatz-/Durchführungs-Zeitpunkt	Detaildaten (Links zu) Kapitel(n) weitere Erläuterungen (Links zu Quellenverzeichnis)																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																										
2	2	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Überwachung Baugrund Tunnelnahbereich			Bauwerkskoppel te Überwachung
Berg- / Grundwasser veränderunge n	Belastungsän derungen (Quelldruck, Druckhaftes)	Baugrundverändere ng (Entfestigung, Volumen-änderung, Auflockerung, etc.)	Berg- / Grund- wasser
Fragestellung			
Name			
ZfP / ZaP / ZP (NDT/PDT/DT) (zerstörungsfrei/zerstörungsarm/zer-störende Prüfung)			
Lokalisation Messresultat (P, L, F) (Punktuell, Linear, Flächenbezogen)			
Fachgebiet -->			
Einsatz in Fachgebieten			
Querschnitts-themen			
Tunnel			
Geotechnik			
Naturgefahren			
Umwelt			
<--- bauwerksbezogen			
Verkleidung - Gewölbe			
Verkleidung - Sohlgewölbe			
Zwischendecke			
Verkleidung - Gewölbe			
Verkleidung - Sohlgewölbe			
Zwischendecke			
Baugruben, Einschnitt			
Bergwasserdrainageleitungen			
Fahrbahnbelag			
Fundationsschicht			
Baugrund			
Terrainoberfläche			
andere Infrastrukturobjekte			
Einsatz-/Durchführungs-Zeitpunkt			
Detaildaten (Links zu) Kapitel(n)			
weitere Erläuterungen (Links zu Quellenverzeichnis)			

Technologie			
Fragestellung		Name	
ZfP / ZaP / ZP (NDT/PDT/DT) (zerstörungsfrei/zerstörungsarm/zer-störende Prüfung)		Lokalisation Messresultat (P, L, F) (Punktuell, Linear, Flächenbezogen)	
Fachgebiet -->		Einsatz in Fachgebieten	
Tunnel		Querschnitts- them en	
Geotechnik			
Naturgefahren			
Umwelt			
<--- bauwerksbezogen			
Verkleidung - Gewölbe		Bergmännische Tunnel	
Verkleidung - Sohlgewölbe		Tagbautunnel, Galerien inkl. Portalbereich	
Zwischendecke		Drainage- leitungen und Strassenkörper	
Verkleidung - Gewölbe			
Verkleidung - Sohlgewölbe			
Zwischendecke			
Baugruben, Einschnitt			
Bergwasserdrainageleitungen			
Fahrbahnbelag			
Fundationsschicht			
Baugrund		Einflussbereich Bau werk	
Terrainoberfläche			
andere Infrastrukturobjekte			
Einsatz-/Durchführungs- Zeitpunkt		Phasen	
Detaildaten (Links zu) Kapitel(n)			
weitere Erläuterungen (Links zu Quellenverzeichnis)			

Bergwasser- drainage		Überwachung Verkleidung und Zwischendecke	
Überwachung		Verformungen	
Betonspan- nungen		Bewe- h- rungs- korro- sion	
Potentialfreidmessung Chloridgehaltsmessungen		ELP_ ZaP	P
Kapazitive Drucksensoren		DSP_ ZaP	P
Piezelektrische Drucksensoren		DSP_ ZaP	P
Dehnungsmessstreifen		DMS_ ZaP	P
Faseroptische Dehnungsmessungen		FOS_ ZaP	L
Faseroptische Drucksensoren		FOD_ ZaP	P
Druckkissen		DKS_ ZaP	F
Laserscanning		LSC_ ZaP	P
Geodätische Aufnahmen (Tachymeter)		TAC_ ZaP	P
Schlauchw aage		SWA_ ZaP	P
Faseroptische Dehnungsmessungen		FOS_ ZaP	L
Neigungsmänderungen (Clinometer)		CLL_ ZaP	P
Distometer		DIS_ ZaP	P
Nivelliermt		NIV_ ZaP	P
Fugen- und Rissmessgeräte		FUG_ ZaP	P
Durchflussmessung		DFM_ ZaP	P
Wassertemperatursensoren		WTP_ ZaP	P
pH-Wert		PHW_ ZaP	P
Versäuerungs potenzial (kohlen säure-Kalk)		VSP_ ZaP	P
Leitfähigkeitssensoren		LFK_ ZaP	P
Kanal-TV		KTV_ ZaP	L

Überwachung Belag und Fundation														
Quer- neigung	Quer- ebenheit	Längsebenheit	Fragestellung		Technologie									
			Name	"ID"	ZfP / ZaP / ZP (NDT/PDT/DT) (zerstörungsfrei/zerstörungsarm/zer-störende Prüfung)		Lokalisation Messresultat (P, L, F) (Punktuell, Linear, Flächenbezogen)							
					</									

6.2 Evaluierte Technologien – Übersicht in Bezug auf Anwendungsfälle

Die Evaluation der Technologien erfolgte gruppiert nach der jeweiligen Fragestellung des Einsatzes der Technologie. Zur verbesserten Übersicht wurden die verschiedenen Fragestellungen in folgende übergeordnete Gruppen zusammengefasst:

Bauwerksentkoppelte Überwachung

In der Gruppe der bauwerksentkoppelten Überwachung werden die Fragestellungen zu Baugrundverformungen, welche entkoppelt vom Tunnelbauwerk auftreten können, sowie den Massenbewegungen aus Naturgefahren, welche für die Portalbereiche relevant sind, zusammengefasst. Im Weiteren werden auch die Fragestellungen zur Überwachung des Grund- bzw. Bergwasser darin behandelt.

Überwachung Baugrund Tunnelnahbereich

Die Überwachung des Baugrunds im Tunnelnahbereich, d.h. rund den Einflussbereich in einem Abstand von einem bis zwei Tunneldurchmesser, beinhaltet die Fragestellungen zu Baugrundveränderungen (z.B. infolge Entfestigung, Auflockerung, etc.), Belastungsänderungen (z.B. aus Quelldruck, druckhaftem Gebirge, etc.) oder Einflüssen aus dem Grund- und Bergwasser.

Überwachung Verkleidung und Zwischendecke

Die Überwachung des Tunneltragwerks bestehend aus der Verkleidung (Gewölbe und Sohlgewölbe) und der Zwischendecke zeichnet sich durch relevante Fragestellungen hinsichtlich Betonspannungen, Verformungen und Bewehrungskorrosion aus.

Bergwasserdrainage

Eine dauerhaft sichergestellte Drainage des Bergwassers hat sowohl für die Tragsicherheit als auch für den Betrieb und Unterhalt einen hohen Stellenwert. In dieser übergeordneten Gruppe werden die relevanten Messtechnologien zu dieser Fragestellung beschrieben.

Überwachung Belag und Foundation

Die Fahrbahnfläche als eigentliche Hauptnutzungsfläche durch den Strassenverkehr gilt es ebenfalls zu überwachen. Im Tunnelbereich sind die Fragestellungen zu Längs- und Querebenheit, der Querneigung sowie der Griffbarkeit relevant.

7 Bewährte Technologien

Die Beschreibung der verfügbaren Technologien auf dem Gebiet der Tunnelbauwerke gliedert sich in zwei Ebenen.

- Die erste Ebene strukturiert das spezifische Umfeld von Tunneln mit der Beeinflussung des umliegenden Baugrunds sowie den spezifischen Bauwerksteilen im Tunnel. Die Beeinflussung des Umfelds wird in einen bauwerksentkoppelten Bereich in grösserer Entfernung vom Tunnel sowie den Tunnelnahbereich unterteilt. Bauwerkspezifisch werden dann die relevanten Bauwerksteile von Tunneln mit Sohlgewölbe, Gewölbe und Zwischendecke sowie die Drainageleitungen und die Fahrbahn unterschieden.
- Die zweite Ebene der Kategorisierung bezieht sich auf konkrete Fragestellungen, welche bei Tunnelbauwerken häufig auftreten. Zu jeder Fragestellung sind die möglichen Technologien aufgeführt.

Tab. 7.7 Kategorisierung der Überwachungstechnologien.

Übergeordnete Gruppe	Fragestellung
A Bauwerksentkoppelte Überwachung	A1 Baugrundverformungen
	A2 Massenbewegungen (Steinschlag, Murgänge, Lawinen, Rutschhang, etc.)
	A3 Berg-/Grundwasser
B Überwachung Baugrund Tunnelnahbereich	B1 Baugrundveränderungen (Entfestigung, Volumen-änderung, Auflockerung, etc.)
	B2 Belastungsänderungen (Quelldruck, druckhaftes Gebirge)
	B3 Berg-/Grundwasserveränderungen
C Überwachung Verkleidung und Zwischendecke	C1 Bewehrungskorrosion
	C2 Betonspannungen
	C3 Verformungen
D Bergwasserdrainage	D1 Überwachung
E Überwachung Belag und Foundation	E1 Längsebenheit
	E2 Querebenheit
	E3 Querneigung

Die detaillierte Kategorisierung der aktuell breit verfügbaren Technologien wie bereits in Ziffer 6.2 angezeigt befindet sich in Tab. 7.8.

Tab. 7.8 Kategorisierung der Überwachungstechnologien nach ihrer übergeordneten Gruppe, Fragestellung und dem Messprinzip.

	Fragestellung	Technologie				Detaildaten (Links zu Kapitel(n))	weitere Erläuterungen (Links zu Quellenverzeichnis)
		Name	"ID"	ZfP / ZaP / ZP (NDT/PDT/DT) (zerstörungsfrei/zerstörungsarm/zerstörende Prüfung)	Lokalisation Messresultat (P, L, F) (Punktuell, Linear, Flächenbezogen)		
Bauwerksentkoppelte Überwachung	Baugrundverformungen	Terrestrische Radarinterferometrie	TRL_	ZfP	F	7.01	
		Satellitengestützte Radarinterferometrie	SRL_	ZfP	F	7.02	
		Laserscanning	LSC_	ZfP	F	7.03	
		Geodätische Aufnahmen (Tachymeter)	TAC_	ZfP	P	7.04	
		Sondenextensometer	SXT_	ZaP	L	7.05	
		Inklinometer	IKN_	ZaP	L	7.06	
		Extensometer	EXT_	ZaP	L	7.07	
		Schlauchwaage	SWA_	ZfP	P	7.08	
		Nivellement	NIV_	ZfP	P	7.09	
		Faseroptische Sensoren	FOS_	ZfP	L	7.10	
	Massenbewegungen (Steinschlag, Murgänge, Lawinen, Rutschhang, etc.)	Bewegungs-Radar (Dopplerradar)	BWR_	ZfP	F	7.11	
		Geophone	EMG_	ZfP	P	7.12	
		Pegel-Radar	PRA_	ZfP	P	7.13	
		Infrasound	IFS_	ZfP	F	7.14	
		Wetterstation	WTS_	ZfP	P	7.15	
		Laserscanning	LSC_	ZfP	F	7.03	
		Reissleinen	RSL_	ZfP	P	7.17	
		Kapazitive Drucksensoren	DSK_	ZfP	P	7.18	
		Piezoelektrische Drucksensoren	DSP_	ZfP	P	7.19	
		Terrestrische Radarinterferometrie	TRL_	ZfP	F	7.01	
		Satellitengestützte Radarinterferometrie	SRL_	ZfP	F	7.02	
		Deformationskameras	DFK_	ZfP	F	7.22	
		Geodätische Aufnahmen (Tachymeter)	TAC_	ZfP	P	7.04	
		Nivellement	NIV_	ZfP	P	7.09	
		Fugen- und Rissmessgeräte	FUG_	ZfP	P	7.25	
		Distometer	DIS_	ZfP	P	7.26	
		Neigungsänderungen (Clinometer)	CLI_	ZfP	P	7.27	
		Faseroptische Sensoren	FOS_	ZfP	L	7.10	
	Berg- / Grundwasser	Piezometer	PIM_	ZaP	P	7.29	
		Porenwasserdruckgeber	PWD_	ZaP	P	7.30	
		Grundwasserströmungsmessung	GWS_	ZaP	P	7.31	
		Wassertemperatursensoren	WTP_	ZfP	P	7.32	
		Durchflussmessung	DFM_	ZfP	P	7.33	
		Durchlässigkeitsversuche	DLK_	ZaP	P	7.34	
		Leitfähigkeitssensoren	LFK_	ZfP	P	7.35	

	Fragestellung	Technologie				Detaildaten (Links zu Kapitel(n))	weitere Erläuterungen (Links zu Quellenverzeichnis)
		Name	"ID"	ZfP / ZaP / ZP (NDT/PDT/DT) (zerstörungsfrei/zerstörungsarm/zerstörende Prüfung)	Lokalisation Messresultat (P, L, F) (Punktuell, Linear, Flächenbezogen)		
Überwachung Baugrund Tunnelnahbereich	Baugrundveränderung (Entfestigung, Volumen-änderung, Auflockerung, etc.)	Sondenextensometer	SXT_	ZaP	L	7.05	
		Inklinometer	IKN_	ZaP	L	7.06	
		Extensometer	EXT_	ZaP	L	7.07	
		Faseroptische Sensoren	FOS_	ZfP	L	7.10	
		Reverse-Head-Extensometer	RHE_	ZaP	L	7.40	
		Bohrlochdilatometer	BLD_	ZP	P	7.41	
		Bohrlochscan	BLS_	ZaP	L	7.42	
	Belastungsänderungen (Quelldruck, Druckhaftes)	Messanker	MAK_	ZaP	L	7.43	
		Kraftmessdose	KMD_	ZfP	P	7.44	
		Faseroptische Drucksensoren	FOD_	ZfP	L	7.45	
		Dehnungsmessstreifen	DMS_	ZfP	P	7.46	
		Schlitzpressenmessungen	SPM_	ZaP	P	7.47	
		Druckkissen	DKS_	ZaP	P	7.48	
	Berg- / Grundwasser veränderungen	Piezometer	PIM_	ZaP	P	7.29	
		Porenwasserdruckgeber	PWD_	ZaP	P	7.30	
		Wassertemperatursensoren	WTP_	ZfP	P	7.32	
		pH-Wert	PHW_	ZfP	P	7.52	
		Leitfähigkeitssensoren	LFK_	ZfP	P	7.35	
Überwachung Verkleidung und Zwischendecke	Bewehrungskorrosion	Potentialfeldmessung	ELP_	ZfP	P	7.54	
		Chloridgehaltsmessungen	CGM_	ZaP	P	7.55	
	Betonspannungen	Kapazitive Drucksensoren	DSK_	ZfP	P	7.18	
		Piezoelektrische Drucksensoren	DSP_	ZfP	P	7.19	
		Dehnungsmessstreifen	DMS_	ZfP	P	7.46	
		Faseroptische Dehnungsmessungen	FOS_	ZfP	L	7.10	
		Faseroptische Drucksensoren	FOD_	ZfP	L	7.45	
		Druckkissen	DKS_	ZaP	P	7.48	
	Verformungen	Laserscanning	LSC_	ZfP	F	7.03	
		Geodätische Aufnahmen (Tachymeter)	TAC_	ZfP	P	7.04	
		Schlauchwaage	SWA_	ZfP	P	7.08	
		Faseroptische Dehnungsmessungen	FOS_	ZfP	L	7.10	
		Neigungsänderungen (Clinometer)	CLI_	ZfP	P	7.27	
		Distometer	DIS_	ZfP	P	7.26	
		Nivelllement	NIV_	ZfP	P	7.09	
		Fugen- und Rissmessgeräte	FUG_	ZfP	P	7.25	

	Fragestellung	Technologie				Detaildaten (Links zu Kapitel(n))	weitere Erläuterungen (Links zu Quellenverzeichnis)
		Name	"ID"	ZfP / ZaP / ZP (NDT/PDT/DT) (zerstörungsfrei/zerstörungssarm/zerstörende Prüfung)	Lokalisation Messresultat (P, L, F) (Punktuell, Linear, Flächenbezogen)		
Bergwasser- drainage	Überwachung	Durchflussmessung	DFM_	ZfP	P	7.33	
		Wassertemperatursensoren	WTP_	ZfP	P	7.32	
		pH-Wert	PHW_	ZfP	P	7.52	
		Versinterungspotenzial (Kohlensäure-Kalk)	VSP_	ZfP	P	7.72	
		Leitfähigkeitssensoren	LFK_	ZfP	P	7.35	
		Kanal-TV	KTV_	ZfP	L	7.74	
Überwachung Belag und Fundation	Längsebene	Richtlatte	Lla_	ZfP	P	7.75	
		Planograf	LPI_	ZfP	L	7.76	
		Goniograph	LGo_	ZfP	P	7.77	
		Lasersensor	LLS_	ZfP	L	7.78	
		Laserscanner	LLC_	ZfP	L	7.79	
		Triangulationsensor	LTr_	ZfP	L	7.80	
	Quer- ebene	Richtlatte	Lla_	ZfP	P	7.81	
		Lasersensor	LLS_	ZfP	L	7.82	
		Laserscanner	LLC_	ZfP	L	7.83	
		Lichtschnittverfahren	QLi_	ZfP	L	7.84	
	Quer- neigung	Neigungsmesser	QnN_	ZfP	P	7.85	
		inertiales Kreiselssystem	QnK_	ZfP	P	7.86	
		Laserscanner	LLC_	ZfP	L	7.87	

A

Bauwerksentkoppelte Überwachung

A 1

Baugrundverformungen

Tab. 7.9 Baugrundverformungen - Übersicht

Fragestellung		A1 Baugrundverformungen				
Kurzbeschreibung Fragestellung		Durch den Ausbruch (bergmännischer Tunnel) bzw. Aushub und Verfüllung (Tagbautunnel) für die Erstellung eines Tunnelbauwerks und/oder infolge einer Veränderung des Berg-/Grundwasserregimes können Verformungen des Baugrunds auftreten. Diese Baugrundverformungen können insbesondere in überbautem Umfeld zu Schäden an der bestehenden Infrastruktur führen. Typischerweise sind bereits vor Baubeginn frühzeitig Überwachungsmaßnahmen zur Beweissicherung erforderlich.				
Überwachungstechnologie		Terrestrische Radarinterferometrie	Satellitengestützte Radarinterferometrie	Laserscanning	Geodätische Aufnahmen (Tachymeter)	Sondenextensometer
Typisierung		TRI_	SRI_	LSC_	TAC_	SXT_
Messgrößen und -genauigkeit	a. Messprinzip	1 direkt	1 direkt	1 direkt	1 direkt	1 direkt
	b. Datenerfassung	10 radar	10 radar	7 laseroptisch	2 elektrisch	2 elektrisch
	c. Datenspeicher	1 digital	1 digital	1 digital	2 analog (Datenschreiber)	2 analog (Datenschreiber)
	d. Lokalisation	4 flächenbezogen	4 flächenbezogen	4 flächenbezogen	1 punktuell	3 tiefenbezogen
	e. Raumbezug					
f. Zustand		3 nicht zerstörend	3 nicht zerstörend	3 nicht zerstörend	3 nicht zerstörend	2 zerstörend (Bohrung)
Tunnel	Größen	Deformationen	Deformationen	Deformation	Deformationen	Deformationen
	Untersuchungs-/Tiefenbereich	-	-	bis 5 km Horizontal 360° Vertikal ca. 50°	bis 10 km	bis 200 m
	Auflösung	1x 4.4 m	1-100 m	3 mm, 0.1°	0.1°	0.001mm
	Genauigkeit	0.5 - 2 mm	2-8 mm	1mm + 10 mm/km, 10°	1mm + 15 mm/km, 0.5°	± 0.002mm
	Bemerkungen	-	-	3D Punktgenauigkeit ca. 2 mm @ 1m, 5mm @ 10m	-	Messbereich ± 10 mm/m
Tunnel		2	2	4	4	4
Geotechnik		2	2	3	4	3
Naturgefahren		3	3	3	3	2
Umwelt		0	2	0	1	0
Einsatzzeitpunkt		W	V	V	V	W
Entwicklungsstand		●	●	●	●	●
Kosten	initial / einmalig	●	●	●	●	●
	wiederkehrend	●	●	●	●	●

Fragestellung						
Kurzbeschreibung Fragestellung						
Überwachungstechnologie		Inklinometer	Extensometer	Schlauchwaage	Nivellement	Faseroptische Sensoren
Typisierung		IKN_	EXT_	SWA_	NIV_	FOS_
Messgrößen und -genauigkeit	a. Messprinzip	1 direkt	1 direkt	1 direkt	1 direkt	2 indirekt
	b. Datenerfassung	2 elektrisch	2 elektrisch	2 elektrisch	5 optisch	6 faseroptisch/photonisch
	c. Datenspeicher	2 analog (Datenschreiber)	3 analog (Ablesung)	2 analog (Datenschreiber)	3 analog (Ablesung)	1 digital
	d. Lokalisation	3 tiefenbezogen	3 tiefenbezogen	1 punktuell	1 punktuell	2 streckenbezogen
	e. Raumbezug					
f. Zustand		2 zerstörend (Bohrung)	2 zerstörend (Bohrung)	3 nicht zerstörend	3 nicht zerstörend	3 nicht zerstörend
Tunnel	Größen	Deformationen	Deformationen	Setzungen / Hebungen	Setzungen / Hebungen	Deformationen
	Untersuchungs-/Tiefenbereich	bis 100 m	bis 100 m	-	bis 100 m	100 m bis zu 30 km
	Auflösung	0.002 mm/m	0.01mm	0.001-0.1mm	-	-
	Genauigkeit	± 0.2 mm/m	± 0.001mm/m	± 0.01-0.3 mm	± 0.2 - 2 mm / km	bis 0.001mm/m
	Bemerkungen	Messbereich ± 30°	Messbereich bis 250 mm	Messbereich bis 1000 mm	-	verteilt / quasi-kontinuierlich
Tunnel		4	4	3	3	2
Geotechnik		4	3	2	3	2
Naturgefahren		3	2	1	3	1
Umwelt		0	0	0	1	1
Einsatzzeitpunkt		W	W	W	W	W
Entwicklungsstand		●	●	●	●	●
Kosten	initial / einmalig	●	●	●	●	●
	wiederkehrend	●	●	●	●	●

7.1 Terrestrische Radarinterferometrie

7.1.1 Beschrieb der Technologie

Terrestrische Radarinterferometrie (auch Interferometrisches Georadar genannt) eignet sich für die grossflächige Überwachung von unbekannten Fels- oder Gletscherinstabilitäten und liefert wertvolle Einsichten über instabile Zonen. Radar steht für 'radio detection and ranging' und bezieht sich auf verschiedene Detektions- und Ortungsverfahren. Ein Radargerät sendet gebündelte elektromagnetische Wellen im Mikrowellenbereich aus, welche an einem Objekt reflektieren, vom Gerät empfangen und nach unterschiedlichen Kriterien (Laufzeit, Amplitude, Phase) ausgewertet werden. Dazu sind keine Installationen im Gelände (Reflektoren etc.) nötig.

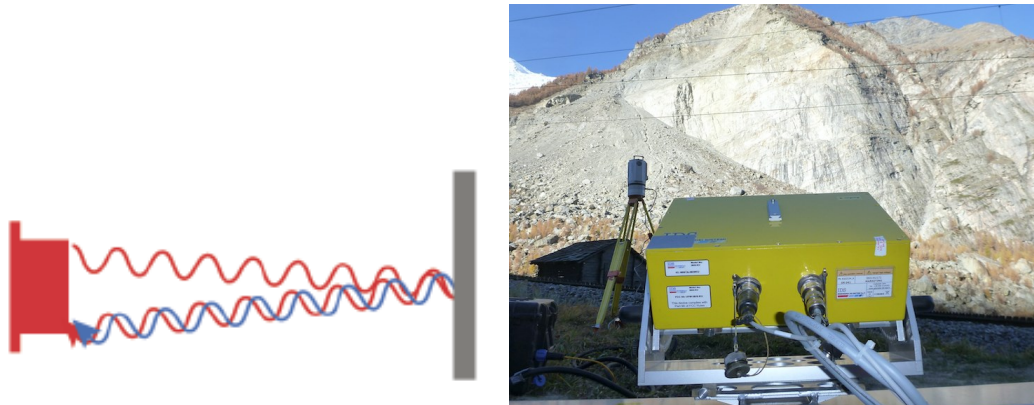


Abb. 7.15 links: Schema-Skizze zweier Radarmessungen mit verschobenen Phasen = Deformation in Blickrichtung des Radars [10]. Rechts: Für eine periodische Messung installierter terrestrischer Georadar bei Randa (VS) [11].

Verschiebungen können nur relativ innerhalb des aufgenommenen Bildes bestimmt werden, da keine absoluten Phasen zwischen Interferometer und Ziel gemessen werden können. Abb. 7.16 verdeutlicht diesen Sachverhalt: Vegetation selbst bewegt sich zu stark, als dass hier Aussagen getroffen werden können. Über Wald etc. dekorreliert die Phase. Felsbereiche innerhalb des Waldes erscheinen kohärent und die differentielle Phase kann hier interpretiert werden. Löst sich z.B. ein Teil des Felspaketes (d_{local}) relativ zum Rest mit einer geringen Bewegung ab, so kann diese Bewegung, bzw. die Bewegungskomponente entlang der Sichtlinie (line-of-sight / LOS) detektiert und quantifiziert werden. Bewegt sich nun aber das gesamte im Wald sichtbare Felspaket (d_{global}), so kann infolge fehlender stabiler Referenz (Fels "schwimmt" in einem durch Vegetation dekorreliertem Gebiet) diese Bewegung nicht detektiert werden.

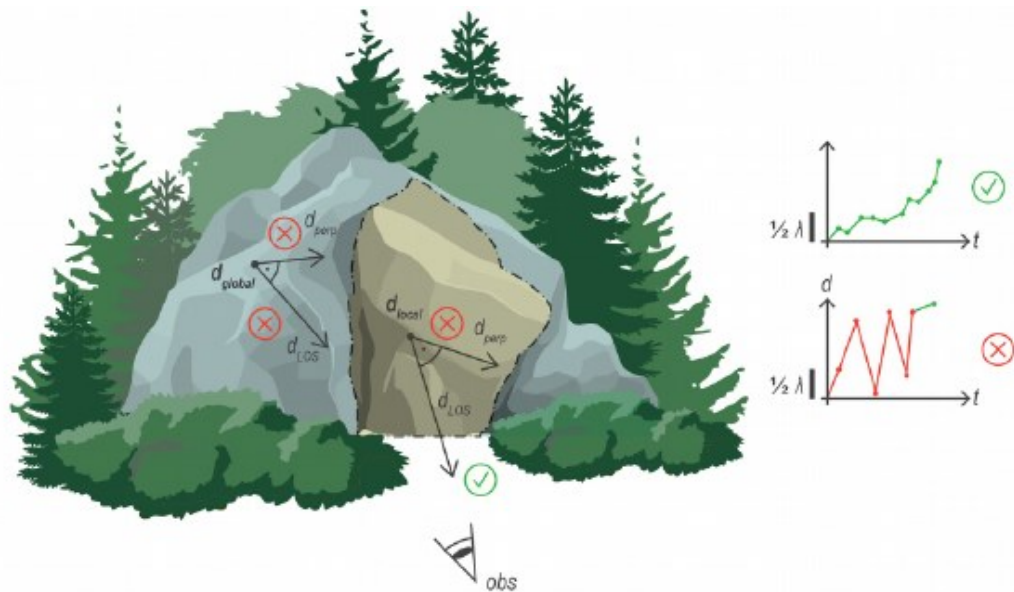


Abb. 7.16 Schematische Darstellung der Detektion von Bewegung mittels Radar-Interferometrie von einem Beobachtungsstandort (obs) aus. Lokale Ablösungen (d_{local}), können erfasst werden, wenn auf mindestens einer Seite ein kohärentes Gebiet ist (z.B. Fels). Die Gesamtbewegung eines isolierten, "schwimmenden" Bereichs (d_{global}) hingegen kann nicht bestimmt werden, da eine stabile Referenz im Bild fehlt [12].

In der Regel wird die globale Bewegung durch die atmosphärischen Korrekturen im Post-Processing entfernt und auf Null gesetzt, ausser es liegen unabhängige absolute Messungen (z.B. aus geodätischen Beobachtungen vor). Mittels Radar-Interferometrie können Bewegungen nur in Blickrichtung (LOS) erfasst werden. Terrestrische Radarinterferometrie bietet meist die Möglichkeit der Standortwahl, so dass entlang der erwarteten Bewegungsrichtung aufgestellt und gemessen werden kann. Die Aufstellung muss nicht exakt in Bewegungsrichtung geschehen, da auch eine leicht schräge Aufnahme in der Regel bereits eine genügend grosse Vektorkomponente entlang der Blickrichtung aufweist. Jedoch werden senkrecht zur Blickrichtung gerichtete Bewegungen (d_{perp}) nicht detektiert und erscheinen als stabil. Bei bekannter Richtung z.B. aus redundanten Beobachtungen, oder aus der Kombination von mindestens zwei Aufnahmen aus unterschiedlichen Richtungen, lässt sich die effektive Bewegung rechnerisch bestimmen. Falls Bewegungen auftreten, sollten diese - um die vollständige Bewegung zu erfassen - zwischen zwei Beobachtungen nicht eine halbe Wellenlänge ($\frac{1}{2} \lambda$) überschreiten. Ansonsten wird die Bewegung unterschätzt. In der Regel wird das Messintervall auf die Grössenordnung der zu erwartenden Bewegung abgestimmt.

Es ist eine permanente oder periodische Messung möglich. Auf ruhigen Oberflächen wie Fels sind sehr gute Ergebnisse bei jedem Wetter und zu jeder Tageszeit möglich. Auf losem Untergrund wie Geröll oder Vegetation geht Kohärenz und damit die Vergleichbarkeit von Messungen verloren. Dabei funktioniert Radar unabhängig von den herrschenden Sichtbedingungen, bei Tag / Nacht, Nebel oder Schneefall. Die Auflösung ist unter anderem abhängig von der Distanz zwischen dem Radar und der zu überwachenden Fläche sowie von atmosphärischen Einflüssen: Die Atmosphäre (Luftfeuchte, Luftdruck, Temperatur, Wind) beeinflussen die Propagation von elektromagnetischen Wellen. Aufgrund der Wellenlänge von Radar kann der Atmosphären-Einfluss zu Fehlern von mehreren Millimetern führen. Mit dem Abgleich an stabilen Gebieten können diese jedoch grösstenteils korrigiert werden. Bei optimalen Bedingungen sind Reichweiten von bis zu 4 km möglich.

7.1.2 Fragestellungen in den Fachbereichen

Fragestellung im Bereich Naturgefahren

Geländeverschiebungen im Fels sind im Gelände von Auge oft nicht oder nur anhand lokaler Phänomene erkennbar und kaum quantifizierbar. Um das Verhalten von solchen

instabilen Gebieten zu überwachen und Veränderungen in der Geschwindigkeit und somit Beschleunigungen zu erfassen, sind messtechnische Überwachungen notwendig. Somit können sich abzeichnende Abbrüche von grossen Instabilitäten frühzeitig erkannt und - unter günstigen Umständen - auch vorhergesagt werden.

Flächige Überwachungsmethoden bieten den Vorteil, dass die Bewegungen in der gesamten instabilen Masse erfasst werden können und damit die geologische Modellbildung massgeblich unterstützt wird.

Limitierend für die Anwendung von Terrestrischer Radarinterferometrie kann unter anderem sein, dass

- es keine geeigneten stabilen und geschützten Gerätestandorte mit direkter Sichtlinie (möglichst in Bewegungsrichtung) von der Station zur Instabilität gibt,
- die potenzielle Instabilität zu klein ist (siehe Bildauflösung),
- Vegetation, Schneebedeckung die Einsicht verhindern,
- unterschiedliche atmosphärische Bedingungen die Messgenauigkeit einschränken, oder
- bei der Einbindung in ein Alarmsystem die Vorlaufzeit zwischen Ereignisdetektion und Alarmierung zu kurz ist.

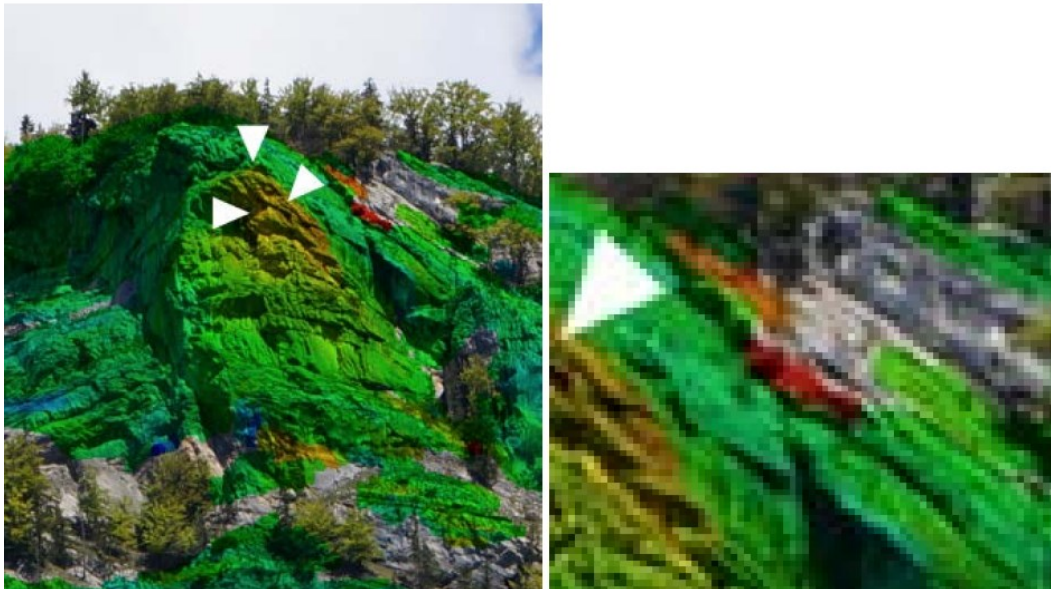


Abb. 7.17 Überwachung eines Felspfeilers mittels terrestrischer Radarinterferometrie. In grün und blau sind diejenigen Bereiche eingefärbt, die keine Bewegungen zeigen. Gelb und orange eingefärbt sind Gebiete, die schwache Bewegungen zeigen, in rot ist eine Felsschuppe erkennbar, welche sich seit der letzten Messung markant bewegt hat oder schon abgebrochen ist. [13].

Fragestellung im Bereich Tunnel

Terrestrische Radarinterferometrie eignet sich zur Langzeitüberwachung unkritischer grosser Instabilitäten in Fels und Eis im Einzugsgebiet von Tunnelportalen, unabhängig von Wetter und Tageszeit. Sie können auch zur permanenten Überwachung z. B. bei Baustellen verwendet werden, wenn die Transitstrecke zwischen Ausbruchgebiet und Baustelle genügend gross und damit genügend Vorwarnzeit gegeben ist.

7.1.3 Datenerfassung, Raumbezug, Messgrössen und – Genauigkeit

- Je nach Dringlichkeit der Gefahr sind permanente oder periodische Messungen möglich. Die Rasterdaten werden vom Radar entweder via Kabel oder kabellos über GSM oder Funk an einen Server des Betreibers übermittelt. Dort erfolgt eine Analyse der Rasterdaten. Eine Einbindung in ein Alarmsystem ist möglich. Das Analyseintervall ist

flexibel wählbar (täglich, zweitäglich, wöchentlich, saisonal). Die Berechnung der Deformation erfolgt anhand des Vergleichs zweier Phasenmessungen.

- Bei der Terrestrischen Radarinterferometrie handelt es sich um eine flächige Überwachungstechnologie. Der Raumbezug ist gegeben durch den Standort des Radars und der Blickrichtung.
- Gemessen wird die Laufzeit der reflektierten Mikrowellen anhand der Phase.
- Die räumliche Auflösung beträgt bei einem Bodenradar mit 17 GHz Frequenz rund 1 m x 4.4 m. Die Genauigkeit der Deformationsanalyse beträgt in diesem Fall 0.5 - 2 mm in Blickrichtung. Je nach verwendeter Frequenz des Radars variiert Auflösung und Genauigkeit.

7.1.4 Entwicklungsstand, Anwendungsgrenzen, Kosten

Mit der Terrestrischen Radarinterferometrie ist eine permanente oder periodische, wetterunabhängige Überwachung kleinster Deformationen möglich (Millimeter pro Tag bis mehrere Jahre). Eine Einbindung in ein Alarmsystem ist möglich.

Bedeckung wie z.B. Vegetation, Schutznetze, Schnee ist für den Radar nicht transparent und stört die Messung. Es ist nur die Bewegungskomponente in Radarstrahlrichtung messbar. Zudem ist für die Einbindung in ein Alarmsystem eine gewisse Vorwarnzeit nötig: Dabei darf die Zeitdauer zwischen der Ereigniserfassung, der Datenübertragung und der Auslösung des Alarmsignals die Zeitdauer, welche das Ereignis vom Standort der Erfassung bis zum Schadenpotential hat, nicht übersteigen.

Für Überwachungssysteme dieser Art ist es sehr schwierig, generische Preise zu nennen. Sie sind stark abhängig von den lokalen Begebenheiten (Stromanschluss, abzudeckendes Gebiet, permanente oder periodische Messung, Einbindung in ein Alarmsystem, Anforderungen an Redundanz). Die Anschaffungskosten für eine Überwachung mit einem terrestrischen Georadar liegen in der oberen Preisklasse (mehrere CHF 10'000 bis über CHF 100'000). Die Kosten für die Einbindung in ein Alarmsystem sowie die Betriebskosten sind sehr variabel und können nicht generisch aufgeführt werden.

7.1.5 Ergänzende Ausschreibungsanforderungen

Als Basis für die zu definierenden Anforderungen an die Ausschreibung dient ein objektspezifisches Messkonzept (siehe Kapitel 3.2), welches die spezifischen Gegebenheiten des Objekts entweder für Tunnel oder Naturgefahren berücksichtigt.

Mit Berücksichtigung dieser aufgeführten Themen können zusammen mit den vorgängig unter Datenerfassung, Raumbezug, Messgrössen und -Genauigkeit die entsprechenden Ausschreibungsanforderungen spezifisch vervollständigt werden.

7.1.6 Literaturverzeichnis

Sonstige Literatur / Forschungsberichte

-
- [9] Sättele M., Bründl M. (2015) Praxishilfe für den Einsatz von Frühwarnsystemen für gravitative Naturgefahren, WSL-Institut für Schnee- und Lawinenforschung SLF, Bundesamt für Bevölkerungsschutz / BABS, Bern
-
- [10] Bundesamt für Umwelt (BAFU): Überwachungssysteme für gravitative Naturgefahren – Handbuch. Bern, 34 Seiten.
-
- [11] Webseite von Geopraevent, <https://www.geopraevent.ch/technologien/alarm>, (Zugriff 10.05.2022).
-
- [12] GAMMA REMOTE SENSING AG: Off_GPRI_BruenigSuedrampe_Impuls_20210813, 13.08.2021.
-
- [13] Kellerhals + Haefeli AG (2019): Brünigpassstrasse - Blocks Schlag Tschuggenfluh vom 17.10.2019, im Auftrag des Bundesamts für Strassen (ASTRA), Filiale F2, Thun. Radar-auswertung durch GAMMA REMOTE SENSING AG.
-

7.2 Satellitengestützte Radarinterferometrie

7.2.1 Beschrieb der Technologie

Satellitengestützte Radarinterferometrie (auch InSAR für 'interferometric synthetic aperture radar' genannt) eignet sich für die Überwachung von grossflächigen, unbekannten Fels-, Hang- oder Gletscherinstabilitäten und liefert wertvolle Einsichten über instabile Zonen. Radar steht für 'radio detection and ranging' und bezieht sich auf verschiedene Detektions- und Ortungsverfahren. Bei der satellitengestützten Radarinterferometrie sendet ein satellitengestütztes Radargerät gebündelte elektromagnetische Wellen aus, welche an einem Objekt reflektieren, vom Gerät empfangen und nach unterschiedlichen Kriterien ausgewertet werden. Mit dem Vergleich zweier Phasenmessungen kann die Deformation in Blickrichtung des Radars berechnet werden.

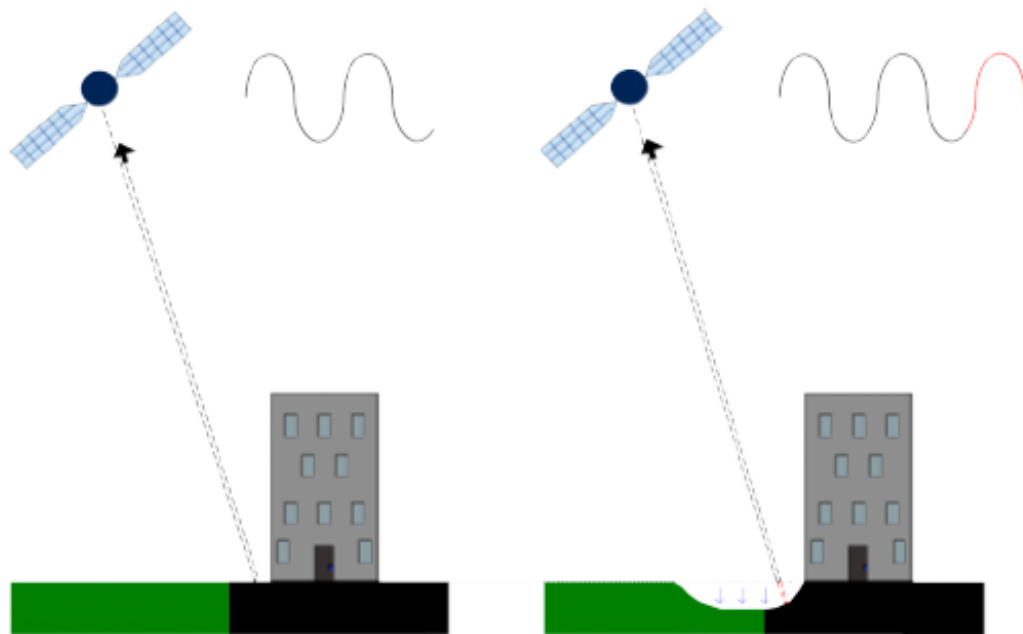


Abb. 7.18 Schemaskizze der satellitengestützten Radarinterferometrie [17]. Aus der Phasenverschiebung der reflektierten Radarstrahlen kann eine Deformation berechnet werden.

Radar-Satelliten befinden sich im Weltall auf Umlaufbahnen um die Erde in einer Höhe von 500-800 km und bewegen sich mit einer Geschwindigkeit von rund 7.5 km/s vorwärts. Sie scannen die Erdoberfläche in Streifen und wiederholen denselben Kreis nach einer gewissen Anzahl Tagen. Diese Wiederkehrperiode ist je nach Satelliten unterschiedlich und beträgt zwischen 6 und 46 Tagen. Aufgrund der Erdrotation und der Umlaufbahn des Satelliten sowie dessen Blickrichtung wird derselbe Standort von Süd nach Nord ('ascending orbit') sowie von Nord nach Süd ('descending orbit') überflogen. Der Blickwinkel der Satelliten beträgt 20 oder 40 Grad respektive zur Vertikalen und in der Flugrichtung nach rechts. Daher sind West- und Osthänge besser einsehbar als Nord- und Südexpositionen.

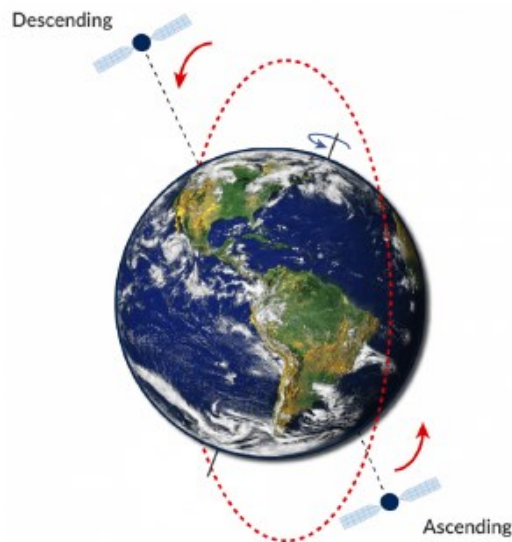


Abb. 7.19 Umlaufbahn eines Satelliten und Ansicht desselben Standorts, einmal von Süd nach Nord ('ascending') und einmal von Nord nach Süd ('descending') [20].

Nicht alle Objekte an der Erdoberfläche reflektieren Radarwellen gleich gut zurück zum Satelliten. Eckige Objekte wie Häuser und andere feste Infrastruktur reflektieren am besten, wohingegen eine windstille Wasseroberfläche wie ein Spiegel wirkt und praktisch kein Signal zurück zum Satelliten sendet.

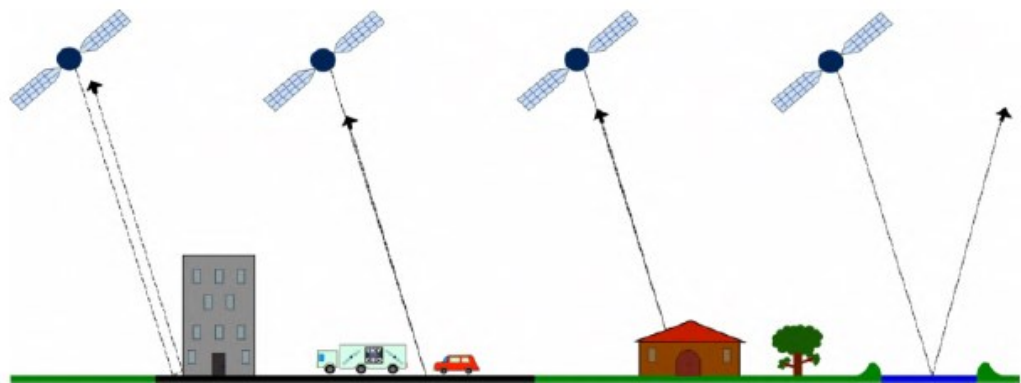


Abb. 7.20 Radarwellen werden nicht von allen Objekten an der Erdoberfläche gleich gut zum Satelliten reflektiert [17].

Je nach verfügbaren Satelliten und Region ist es möglich, tausend bis zehntausend Messpunkte pro Quadratkilometer zu erhalten. Die räumliche Auflösung beeinflusst die Genauigkeit der Messung, der Lokalisation des Messpunkts sowie die Genauigkeit der errechneten Bewegung:

Tab. 7.10 Genauigkeit satellitengestützte Radarinterferometrie

	Genauigkeit der Einzelmessung	Genauigkeit Lokalisation des Messpunkts	Genauigkeit der errechneten Bewegung
Standard Auflösung	6 - 8 mm	X, Y: 2 - 3 m Z: 2 - 2.5 m	1-2 mm/Jahr
Hoh Auflösung	2 - 3 mm	X, Y: 1 - 2 m Z: 1 - 1.5 m	< 1 mm/Jahr

Verschiebungen werden mithilfe sogenannter Interferogramme ermittelt: Ein Interferogramm resultiert aus der Phasensubtraktion zweier SAR Bilder derselben Ansicht ('ascending orbit' / 'descending orbit'). In einem Interferogramm wird der Phasenunterschied mit der Pixelfarbe dargestellt. Die Anzahl sich wiederholender Farbabfolgen ist identisch mit der Anzahl zusätzlicher oder abzüglicher Wellenlängen, je nachdem ob es sich bei der Verschiebung um eine Senkung oder Hebung handelt. Zusammen mit der genau bekannten Wellenlänge kann die Verschiebung berechnet werden.

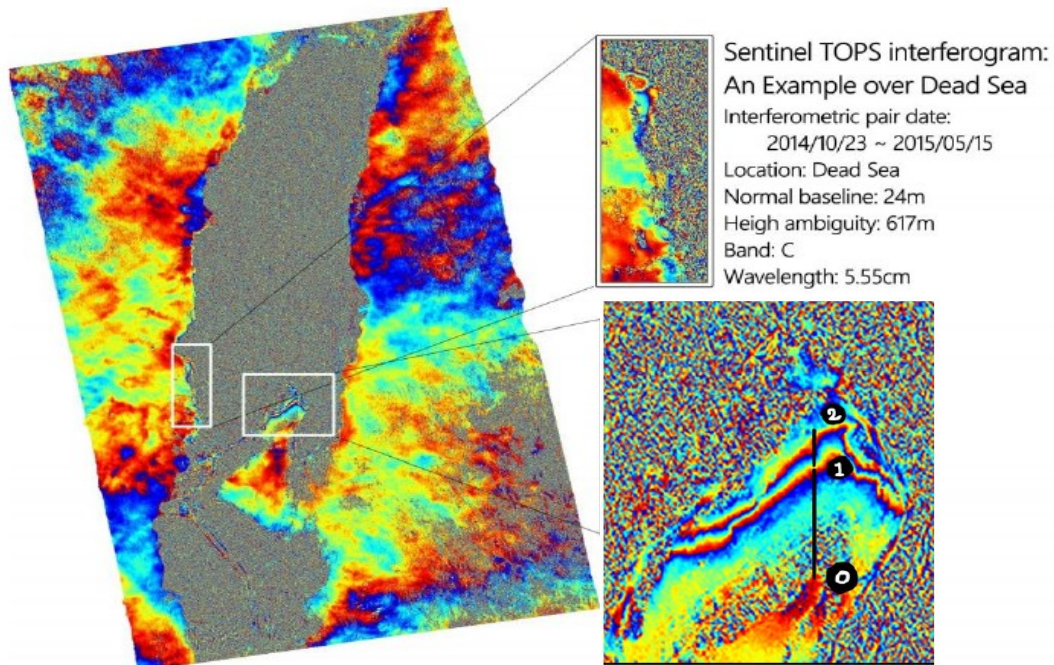


Abb. 7.21 Beispiel eines Interferogramms: Dieselbe Farbabfolge (rot- blau-rot) wiederholt sich dreimal in Richtung zusätzlicher Wellenlängen. Daraus kann geschlossen werden, dass sich dieser Bereich um die dreifache Wellenlänge verschoben hat [21].

Atmosphärische Einflüsse (Luftfeuchte, Luftdruck, Temperatur, Wind) stören die Bewegung der Radarwellen vom Satelliten zur Erde und zurück. Sie sind einerseits abhängig von der Lokalität (über dem Äquator z.B. kommt es aufgrund der höheren Luftfeuchte zu grösseren Turbulenzen als über den Polen), andererseits hat auch die Tageszeit (resp. der Sonnenstand und damit Temperatur und Luftfeuchte) einen Einfluss. Die atmosphärischen Einflüsse können mit sogenannten 'Kalibrationspunkten' herausgefiltert und minimiert werden. Als Kalibrationspunkte werden Orte verwendet, welche als stabil erachtet werden oder welche sich perfekt linear bewegen.

7.2.2 Fragestellungen in den Fachbereichen

Fragestellung im Bereich Naturgefahren

Geländeverschiebungen im Fels- und Lockermaterial sind im Gelände von Auge oft nicht oder nur anhand lokaler Phänomene erkennbar und kaum quantifizierbar. Um das Verhalten von solchen instabilen Gebieten zu überwachen und Veränderungen in der Geschwindigkeit und somit Beschleunigungen zu erfassen, sind messtechnische Überwachungen notwendig. Somit können sich abzeichnende Abbrüche von grossen Instabilitäten frühzeitig erkannt und - unter günstigen Umständen - auch vorhergesagt werden.

Flächige Überwachungsmethoden bieten den Vorteil, dass die Bewegungen in der gesamten instabilen Masse erfasst werden können und damit die geologische Modellbildung massgeblich unterstützt wird.

Limitierend für die Anwendung von Satellitengestützter Radarinterferometrie kann unter anderem sein, dass:

- die Bewegungsrichtung der Instabilität ungünstig ist (Hauptbewegungsrichtung Nord-Süd)
- Vegetation die Interpretation dauerhaft verhindert.
- Schneebedeckung die Interpretation der Daten temporär behindert
- die potenzielle Instabilität zu klein ist.

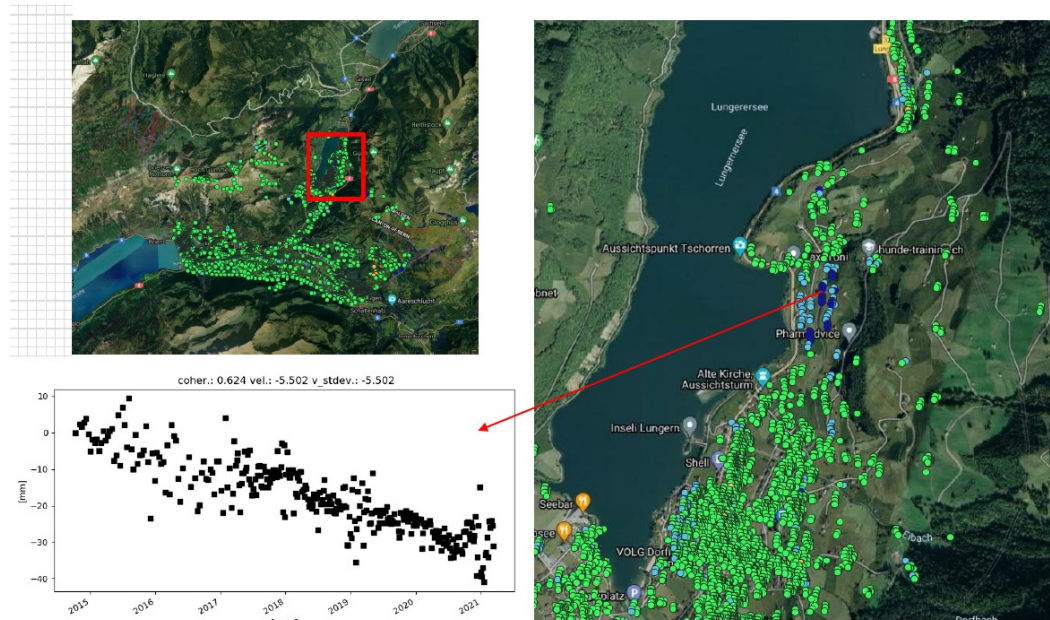


Abb. 7.22 Anwendung Satellitengestützter Radarinterferometrie in der Zentralschweiz. Die meisten analysierten Punkte zeigen keine Bewegung (grün). Bei einigen Punkten ist eine Bewegung erkennbar (blaue Farben). Diese repräsentieren ein bekanntes Rutschungsgebiet. Die Daten erlauben eine erste räumliche Abgrenzung der Rutschung. Für jeden Punkt innerhalb der Rutschung kann die Zeitlinie der Bewegungen ausgewertet und analysiert werden (unten links). Über die Auswertung mehrerer Punkte innerhalb der Rutschung können durchschnittliche Bewegungsraten und auch Phasen erhöhter Geschwindigkeiten bestimmt werden [22].

Eine weitere Anwendung ist die Beobachtung und Überwachung von Gebieten mit Senkungen und Hebungen. Diese können u. a. durch Erdbeben, durch Änderungen im Grundwasserspiegel, Oxidation von Mooren, unterirdische Erosion, Unterkolkung von Trassen an Fließgewässern, Quellungen etc. hervorgerufen werden. Diese vertikalen Bewegungen in Gebieten mit schwacher Topografie sind flächenmässig einfacher zu beobachten.

Fragestellung im Bereich Tunnel

Die Überwachung mit satellitengestützter Radarinterferometrie eignet sich zur Langzeitüberwachung von aktuell unkritischen, grossen Instabilitäten in Fels, Rutschmassen und Eis mit unbekanntem zukünftigem Bewegungsverhalten. Dies kann bei der Planung eines Tunnels und insbesondere bei der Platzierung der Tunnelportale helfen. Sie können auch während des Betriebs im Einzugsgebiet von Tunnelportalen, unabhängig von Wetter und Tageszeit, Einsichten zu grossen Massenbewegungen gewährleisten und so als Langzeitüberwachung / Frühwarnsystem dienen.

7.2.3 Datenerfassung, Raumbezug, Messgrössen und – Genauigkeit

- Die Rasterdaten werden vom Satelliten an einen Server des Betreibers übermittelt. Dort erfolgt eine Analyse der Rasterdaten mithilfe von Interferogrammen. Das Messintervall ist abhängig von der Umlaufzeit der verwendeten Satelliten. Das Analyseintervall ist flexibel wählbar (zweiwöchentlich, monatlich, saisonal,

jährlich). Die Berechnung der Deformation erfolgt anhand des Vergleichs zweier berechneter Punktwolken.

- Bei der Satellitengestützten Radarinterferometrie handelt es sich um eine flächige Überwachungstechnologie. Der Raumbezug ist gegeben durch die Umlaufbahn des verwendeten Satelliten und den Standort des 'Point of Interest'.
- Gemessen wird die Phasenverschiebung der reflektierten Radarwellen.
- Die räumliche Auflösung ist je nach Satelliten unterschiedlich und kann zwischen 1 m und ca. 100 m betragen. Die Genauigkeit der Deformationsanalyse liegt im Millimeter-Bereich (Verschiebungen von < 1 mm/Jahr sind messbar).

7.2.4 Entwicklungsstand, Anwendungsgrenzen, Kosten

Satellitengestützte Radarinterferometrie stellt ein innovatives Werkzeug zur Überwachung von grossflächigen Instabilitäten in Fels, Eis und Lockergestein dar. Sie kann helfen, Untergrunduntersuchungen besser zu fokussieren oder als Überwachung während des Baus oder des Betriebs dienen. Bislang gehört satellitengestützte Radarinterferometrie jedoch noch nicht zu den Standardmethoden in geotechnischen Projekten und es gibt noch keine formalen Richtlinien zur Information von Ingenieuren, Planern und Infrastrukturbetreibern.

Bedeckung wie z.B. Vegetation oder Schnee stört die Messung. Auch Felswände und steile Hänge, insbesondere nord- oder südexponiert, können oft nur ungenügend abgedeckt werden.

Neue Entwicklungen verwenden InSAR Sensoren auf einer mobilen Plattform (z.B. Strassenfahrzeug) für die Erfassung und Überwachung von grossflächigen Instabilitäten (vgl. Kap. 8.4).

Für Überwachungssysteme dieser Art ist es sehr schwierig, generische Preise zu nennen. Sie sind stark abhängig von den Anforderungen (Analyseintervall, abzudeckende Fläche). Die Kosten für eine Überwachung mit satellitengestützter Radarinterferometrie (Datenbeschaffung und Auswertung) liegen jedoch in der hohen Preisklasse (mehrere CHF 10'000 bis über CHF 100'000 pro Jahr).

7.2.5 Ergänzende Ausschreibungsanforderungen

Siehe Kapitel 7.1.5

7.2.6 Literaturverzeichnis

Sonstige Literatur / Forschungsberichte

-
- [14] Sättele M., Bründl M. (2015) Praxishilfe für den Einsatz von Frühwarnsystemen für gravitative Naturgefahren, WSL-Institut für Schnee- und Lawinenforschung SLF, Bundesamt für Bevölkerungsschutz / BABS, Bern
-
- [15] Bundesamt für Umwelt (BAFU): Überwachungssysteme für gravitative Naturgefahren – Handbuch. Bern.
-
- [16] Webseite von Geopraevent, <https://www.geopraevent.ch/technologien/alarm>, (Zugriff 10.05.2022).
-
- [17] Sky Geo. InSAR technical background: Explaining the basics of InSAR, v2.2.
-
- [18] Bundesamt für Landestopografie swisstopo, Präsentationsunterlagen 'Radarinterferometrie für die Schweiz, 27.04.2018.
-
- [19] Kristina J. Reinders et al (2022): Proving compliance of satellite inSAR technology with geotechnical design codes, Transportation Geotechnics 33 (2022).
-
- [20] Ozer, I. & Van Leijen, Freek & Jonkman, S.N. & Hanssen, Ramon. (2018). Applicability of Satellite Radar Imaging to Monitor the Conditions of Levees. Journal of Flood Risk Management. 12. e12509. 10.1111/jfr3.12509.
-
- [21] Y. Qin & D. Perissin, (2016) "Sentinel-1a TOPS Interferometry Application over the Dead Sea," in Proc. of IGARSS 2016
-
- [22] SarMap (2021): Monitoring and measurements of land displacements on the road network F2 and surrounding landscape using satellite differential SAR interferometry. Interim Report. October 2021.
-

7.3 Laserscanning

7.3.1 Beschrieb der Technologie

Laserscanner erfassen mittels modulierten oder gepulsten Laserstrahls und einer Ablenkeinheit (Spiegelsystem) die Umgebung. Ein Laserstrahl wird im Messgerät durch ein Spiegelsystem in Richtung Messpunkt gesendet und durch die Reflexion an diesem wieder im Messgerät detektiert. Die Bestimmung der Schrägdistanz zwischen Messgerät und Messpunkt erfolgt nach dem Puls-Laufzeit- oder nach dem Phasenvergleichsverfahren. Die horizontale und vertikale Richtung zum Messpunkt wird durch das bewegliche Spiegelsystem vorgegeben und digital bestimmt. Die Erfassung von mehreren Messpunkten / Messoberfläche erfolgt durch eine nicht zielgerichtete, punktförmige und flächendeckende Abtastung. Die Distanzerfassung erfolgt berührungslos, benötigt keine Reflektoren und basiert auf elektromagnetischen Wellen im optischen Frequenzbereich. Aus den aufgenommenen Messdaten (Distanz, Richtung und auch Intensität) können dreidimensionale Punktwolken erstellt werden.

Das Messverfahren Laserscanning kann je nach verwendeter Plattform in boden- (terrestrisch) und luftgestütztes (auch satellitengestütztes) Laserscanning unterteilt werden. LiDAR (light detection and ranging) ist eine Methode des Laserscannings (terrestrisch und luftgestützt) zur optischen Abstands- und Geschwindigkeitsmessung.

Die Erfassung der Umgebung mit einem stationären terrestrischen Laserscanner erfolgt für einen sphärischen Bereich um den Scanner, wobei der Standpunkt des Geräts ausgespart wird. Der Raumbezug der räumlichen Punktwolken erfolgt durch die Georeferenzierung des Messgeräts. Neben stationären Laserscanner können auch mobile terrestrische Laserscanner (Mobile Mapping Laserscanner System) verwendet werden. Dabei erfolgt die Abtastung mittels Laserscanner nur in einer räumlichen Ebene. Durch die Bewegung des Messgeräts auf einem Fahrzeug können die Daten zu einer dreidimensionalen Punktwolke zusammengesetzt werden. Voraussetzung für das zusammensetzen ist eine hochgenaue Positionierungssystem für das Fahrzeug.

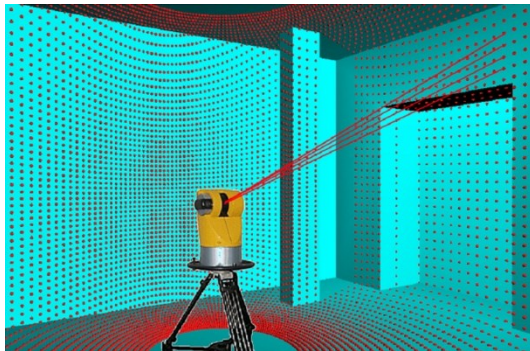


Abb. 7.23 Funktionsprinzip eines stationären, terrestrischen Laserscanners [23].

Mit luftgestütztem Laserscanning erfolgt die Erfassung der Geländeoberfläche aus einem Luftfahrzeug (Flugzeug, Helikopter, Drohne). Die Erfassung mittels Laserscan erfolgt gleichartig wie beim Mobile Mapping nur in einer räumlichen Ebene. Durch die hochgenaue Positionierung und Ausrichtung des Luftfahrzeuges können die einzelnen Messaufnahmen zu einer dreidimensionalen Aufnahme der Geländeoberfläche in einem übergeordneten Koordinatensystem zusammengesetzt werden. Für eine flächige Aufnahme der Oberfläche werden mehrere, parallel versetzte Überflüge durchgeführt.

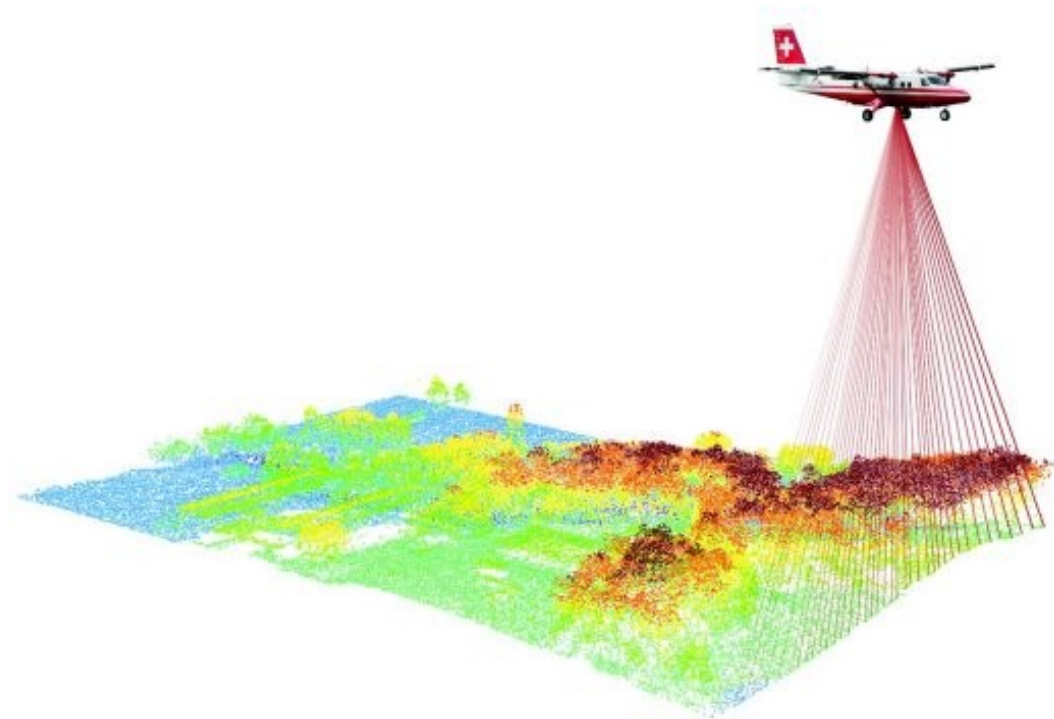


Abb. 7.24 Luftgestütztes Laserscanning mit einem Flugzeug [24].

7.3.2 Fragestellung in den Fachbereichen

Fragestellungen im Bereich Tunnel

Terrestrische Laserscanner eignen sich besonders für die flächige Überwachung von Oberflächen (Baugrund oder Bauwerke). Durch die flächigen Aufnahmen können ebenfalls Volumenänderungen überwacht werden. Der Raumbezug von Messungen im Tunnel erfolgt durch Georeferenzierung zu Fixpunkten im Portalbereich und auch im Tunnel. In Tunnelbauwerken können ebenfalls mobile Laserscanner für die Überwachung von Bauwerksverformungen verwendet werden. Luftgestützte Laserscanner werden im Bereich der Baugrundüberwachung von der Oberfläche aus angewendet.

Im Allgemeinen kommen Laserscanner im Tunnelbau für folgende Einsatzzwecke zum Einsatz:

- Kurz- und Langzeitüberwachung von Bauwerksverformungen (z.B. Verformung Ausbruchsicherung oder Tunnelverkleidung);
- Kurz- und Langzeitüberwachung von Baugrundverformungen (z.B. Setzungen / Hebungen Geländeoberfläche);
- Überwachung / Kontrolle der Tunnelgeometrie (z.B. Tunnelprofil, Lichtraumprofil);

Fragestellungen im Bereich Naturgefahren

- Geotechnik / Böschungsüberwachung: Oberflächenverlaufsentwicklung über die Zeit und somit Rückschluss auf Stabilitäts- und Deformationsverhalten von Böschungen, Rutschhängen und Felsinstabilitäten.

7.3.3 Datenerfassung, Raumbezug, Messgrößen und – Genauigkeit

- Die Messdaten Erfassung erfolgt digital vor Ort. Die Auflösung ist abhängig vom Typ und Anforderungen an die Messpunktdichte. Je nach Anforderungen an die Kontinuität können automatisierte Messungen mit einem stationären, terrestrischen Laserscanner erfolgen.
- Für die Aufnahmen von Oberflächen muss eine direkte Sichtlinie mit dem Messgerät vorhanden sein. Die Erfassung von Messdaten ist unabhängig von der Tageszeit

- (Tag/Nacht), jedoch Wetter abhängig (Messungen bei Nebel, Wolken, Regen oder Schnee teilweise nicht möglich) [25].
- Mehrere überschneidende Punktwolken können zu grossen 3D Punktwolken und folglich zu 3D Modellen zusammengefasst werden.
 - Für einen Raumbezug in einem übergeordneten Koordinatensystem müssen zusätzliche Referenzpunkte mit bekannten Koordinaten eingemessen werden oder eine Positionierung des Messgeräts über geodätische Aufnahmen erfolgen.
 - Wiederholte Messungen ein Vergleich der Oberflächen und die Bestimmung Deformationen
 - Die Genauigkeit (XYZ) der georeferenzierten Punktwolke hängt von den Festpunkten ab. Normalerweise werden Festpunkte durch GNSS-Messungen ermittelt.
 - Die Messung mittels Laserscanner erfolgt zerstörungsfrei.

Der Messbereich eines stationären Laserscanner beträgt einen Winkelbereich von 360° horizontal und bis zu ca. 150° vertikal. Bei einem mobilen Laserscanner erfolgt die Messung in einem Winkelbereich von mehr als 350°. Bei einem luftgestützten Laserscanner erfolgen die Aufnahmen von einer Höhe über Grund (AGL) von wenigen Meter (Drohne) bis zu ca. 6'000 m (Flugzeug). Die Messungen erfolgen über einen Winkelbereich je nach Typ von ca. 20° oder bis zu 60°. (Flugzeug).

Die maximale Messentfernung liegt in einem Bereich zwischen ca. 50 m bis 350 m. Mit speziellen Typen und geeigneten Oberflächen (grosser Reflektivität) können Messentfernungen von ca. 6 km bis 8 km erreicht werden. Die Messdatenerfassung / Scanrate erfolgt mit Geschwindigkeiten von bis zu 2 Mio. Messungen pro Sekunde. Die räumliche Auflösung eines stationären Systems liegt bei ca. 3 mm bei einer Distanz von 10 m. Die Winkelgenauigkeit der Messungen liegt in einem Bereich zwischen ca. 10" bis ca. 20" und die Reichweitengenauigkeit bei ca. 1 mm + 0.01 mm/m. Die resultierende räumliche Punktgenauigkeit liegt dabei entsprechend bei ca. 1.9 mm (bei 10 m) und ca. 5 mm (bei 100 m).

Die Genauigkeiten und Messwertdichte eines luftgestützten Systems sind stark abhängig von der Höhe über Grund und der Geschwindigkeit des Luftfahrzeugs. Die vertikale Genauigkeit liegt in einem Bereich von ca. < 5 cm und die horizontale Genauigkeit in einem Bereich von ca. < 10 cm.

Tab. 7.11 Messbereich / Genauigkeit eines stationären, terrestrischen Laserscanner

Messgrösse	Messbereich	Auflösung	Genauigkeit
Distanzmessung	ca. 1.0 m – 8'000 m	ca. 3 mm (bei 10 m)	1 mm + 0.01 mm / m
Winkelmessung (Horizontal / Vertikal)	360° / ca. 150°	0.1"	ca. 10" – 20"
3D-Punktgenauigkeit	-	-	ca. 1.9 mm (bei 10 m) ca. 5 mm (bei 100 m)

7.3.4 Entwicklungsstand, Anwendungsgrenzen, Kosten

Mittels terrestrischem Laserscanning können grössere Flächen schnell und effizient überwacht werden. Die Erfassung von Messdaten ist unabhängig von der Tageszeit (Tag/Nacht), jedoch wetterabhängig (Messungen bei Nebel, Wolken, Regen oder Schnee sind teilweise nicht möglich, Wasser auf Oberflächen ist schlecht für die Reflexion/Genauigkeit) [25]. Für die flächige Aufnahmen von Oberflächen wird eine direkte Sichtlinie mit dem Messgerät benötigt. Der Einfluss von Vegetation auf die Messung einer dahinterliegen Oberfläche kann teilweise herausgefiltert werden [25]. Mittels Laserscanning können ebenfalls wenige Meter Wassersäule durchdrungen werden und somit eine Vermessung von z.B. Flachwasserzonen erfolgen [26]. Auswertung und Vergleich von mehreren Punktwolken erfolgen automatisiert mittels Algorithmus. Die Qualität der Ergebnisse ist daher ebenfalls von diesem Algorithmus abhängig [25].

Neue Messgeräte erfassen das ganze reflektierte Signal des Laserstrahls. Bei "Volumenstreuern" (z.B. Baumkronen) erfolgt eine teilweise Durchdringung des Laserstrahls und Informationen zum Streuer und der dahinter liegenden Oberfläche können erfasst werden [27]. Die Auswertung der Punktwolken erfolgt mittels Algorithmus und es findet eine Klassifikation (z.B. Vegetation, Geländeoberfläche oder Gebäude bei luftgestützten Laserscannern) aufgrund unterschiedlicher Merkmale (z.B. Intensität, reflektiertes Signal etc.) statt.

Zusammen mit der Messung einer räumlichen Punktwolke können moderne Laserscanner je nach Modell und Ausstattung mit ergänzenden Sensoren noch zusätzliche Messdaten (Farbbilder, Thermalbilder etc.) erfassen. Dies ermöglicht eine vertiefte Auswertung und Interpretation der Messdaten entsprechend spezifischen Anwendungsgebieten (z.B. Bauwerksinspektion mittels Thermalbilder [28]).

Die Kosten für die Messung mit einem stationären, terrestrischen Laserscanner belaufen sich auf ca. 50 CHF bis ca. 500 CHF pro Messung. Die Auswertung der Daten verursacht zusätzliche Kosten, was stark abhängig vom Anwendungsbereich ist. Wiederkehrende Kosten für eine kontinuierliche Überwachung mittels Laserscanner entstehen für den Unterhalt, die laufende Auswertung und Interpretation der Messdaten. Für ein mobiles terrestrisches Laserscanning entstehen Kosten im Bereich von ca. 5'000 CHF / km bis ca. 10'000 CHF / km für die Messung. Die Kosten für ein luftgestütztes Laserscanning sind schwierig zu verallgemeinern und abhängig von der Fläche sowie dem Betrieb bzw. der Flugzeit des Luftfahrzeuges, welche stark abhängig vom Typ und der Entfernung zwischen Einsatzort und Landeplatz liegen.

7.3.5 Ergänzende Ausschreibungsanforderungen

Siehe Kapitel 7.1.5

7.3.6 Literaturverzeichnis

Sonstige Literatur / Forschungsberichte

-
- [23] Akademie der Wissenschaften und der Literatur, Was ist Terrestrisches Laserscanning?, <http://www.spatialhumanities.de/ibr/technologie/terrestrisches-laserscanning.html>, (Zugriff 28.06.2022)
-
- [24] Bundesamt für Landestopografie, Beschaffung von LiDAR-Daten, <https://www.swisstopo.admin.ch/de/wissen-fakten/geoinformation/lidar-daten.html#ui-collapse-766>, (Zugriff 28.06.22)
-
- [25] Bundesamt für Umwelt BAFU (2020), Überwachungssysteme für gravitative Naturgefahren – Handbuch, Bern, 34 Seiten
-
- [26] Institut für Seenforschung der LUBW, Laserscanning – Hoch und Scharf, <https://tiefenschaerfe-bodensee.info/Laserscanning/>, (Zugriff 28.06.2022)
-
- [27] Stilla Uwe, Jutzi Boris, Reitberger Josef, Yao Wie, Krzystek Peter. (2009). Full Waveform Laserscanning - Auswertemethoden und Anwendungen. 49-67.
-
- [28] Hoegner Ludwig, Stilla Uwe (2017) Fusion von TLS-Punktwolken mit Thermalbilder zur Inspektion von Bauwerken, In: DVW e.V. (Hrsg.): Terrestrisches Laserscanning 2017 (TLS 2017). DVW-Schriftenreihe, Band 88, Augsburg, 2017, S. 73–84.
-

7.4 Geodätische Aufnahmen (Tachymeter)

7.4.1 Beschrieb der Technologie

Tachymeter messen die Horizontalrichtung, den Vertikalwinkel und die Distanz (Schrägstrecke) zwischen dem Messgerät und einem Zielpunkt. Für die Durchführung der Messung muss zwischen dem Messgerät und dem Zielpunkt eine geradlinige Sichtverbindung bestehen. Der Tachymeter ist eine Weiterentwicklung des klassischen Theodolits (optische Winkelmessung) und wird auch als Totalstation bezeichnet. Für die Messung werden elektrooptische Distanzmesser (EDM) und elektronische Winkelmesser verwendet. Die Winkelmessung erfolgt dabei durch elektronisches Abtasten der codierten Teilung des Horizontal- und Vertikalkreises. Das Messgerät muss für die Messung horizontal positioniert werden. Als Zielpunkte für die Messung werden an einem Messbolzen befestigte Reflektoren (Prismen) verwendet, wobei heutige Geräte auch eine reflektorlose Distanzmessung mittels Laser erlauben.

Die gemessenen Messgrößen des Zielpunktes (Horizontalwinkel, Vertikalwinkel und Distanz) sind gleichbedeutend mit den Polarkoordinaten in Relation zum Tachymeter. Für die Bestimmung des Zielpunktes in einem übergeordneten Koordinatensystem (z.B. LV95) muss die Position des Tachymeters in diesem bestimmt werden. Einerseits kann der Tachymeter direkt auf einem Referenzpunkt mit bekannten Koordinaten stationiert werden; andererseits kann der Tachymeter frei stationiert und die Position durch die Messung von Referenzpunkten berechnet werden. Mit der Messung von mehreren Referenzpunkten erhöht sich die Positionsgenauigkeit des Tachymeters und folglich auch der Zielpunkte. Die räumliche Verschiebung eines Messpunktes kann durch zeitlich gestaffelte Messungen erfasst werden.

Die Messdatenerfassung erfolgt punktuell für einzelne Messpunkte. Die Daten werden im Gerät gespeichert und gegebenenfalls direkt in ein Koordinatensystem umgerechnet. Mittels automatisierter Zielerfassung und Ausrichtung können moderne Tachymeter für die automatisierte Erfassung von mehreren Messpunkten verwendet werden. Der Tachymeter wird dabei stationär verwendet und die Messdaten können digital übermittelt werden. Für die Sicherstellung der stationären Positionierung müssen neben den Messpunkten auch die Referenzpunkte wiederholt vermessen werden.

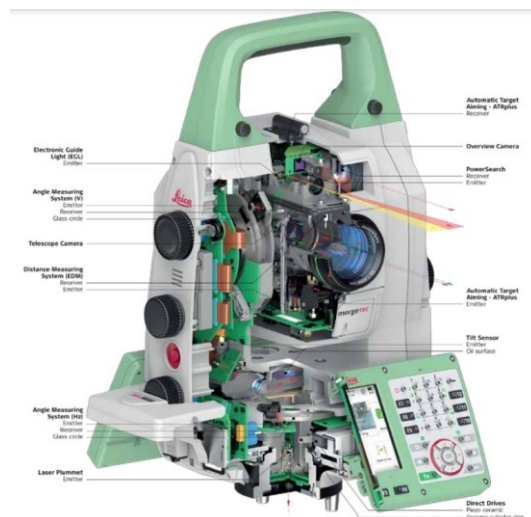


Abb. 7.25 Tachymeter / Totalstation [29].

7.4.2 Fragestellungen in den Fachbereichen

Fragestellungen im Bereich Tunnel

Geodätische Aufnahmen mit Tachymeter eignen sich für die punktuelle Überwachung von beliebigen Oberflächen (Baugrund oder Bauwerke). Durch ein vorgegebenes Raster lassen sich flächenhafte Messungen des Tunnelprofils oder Baugrubenabschlusses

erstellen und überwachen. Messungen können von der Oberfläche aus oder direkt im Tunnel erfolgen. Aufgrund der fehlenden Referenzpunkte im Tunnel erfolgt die Bestimmung der Position des Tachymeters im Tunnel über einen Polygonzug von Messungen, welche auf Referenzpunkten im Portalbereich aufbauen.

Geodätische Aufnahmen mit Tachymeter werden im Tunnelbau für folgende Einsatzzwecke verwendet:

- Kurz- und Langzeitüberwachung von Bauwerksverformungen (z.B. Verformung Ausbruchsicherung oder Baugrubenabschluss);
- Kurz- und Langzeitüberwachung von Baugrundverformungen (z.B. an der Baugrundoberfläche oder in angrenzenden Bauwerken);
- Überwachung / Kontrolle der Tunnelgeometrie (z.B. Tunnelprofil) oder Positionierung von Spezialgeräten (z.B. Lafette eines Rohrschirmbohrgeräts);

Fragestellungen im Bereich Naturgefahren

- Geotechnik / Böschungsüberwachung: Oberflächenverlaufsentwicklung über die Zeit und somit Rückschluss auf Stabilitäts- und Deformationsverhalten von Böschungen, Rutschhängen und Felsinstabilitäten.

7.4.3 Datenerfassung, Raumbezug, Messgrößen und – Genauigkeit

- Die Messdaten-Erfassung erfolgt bei einem Tachymeter vor Ort. Mit einem stationären, motorisierten Tachymeter können die Messdaten automatisiert erfasst und digital übertragen werden. Das Messintervall bei einem automatisierten System kann den Anforderungen angepasst werden.
- Die Zielpunkte werden über die Messdaten in Polarkoordinaten zur Position des Tachymeters lokalisiert. Für einen Raumbezug im übergeordneten Koordinatensystem müssen zusätzliche Referenzpunkte mit bekannten Koordinaten eingemessen werden. Mittels wiederholter Messungen können die Verformungen der Zielpunkte als räumliche Verschiebungsvektoren aufgezeigt werden.
- Abgesehen von der Befestigung der Reflektoren (sofern erforderlich) erfolgen die Messungen zerstörungsfrei.

Der Messbereich von einem Tachymeter für die Distanzmessung liegt mit einem Reflektor als Zielpunkt in einem Bereich mit 1.0 m bis zu 3'500 m. Mit speziellen Langstreckenmoden können Distanzen bis zu 10'000 m erreicht werden. Ohne Reflektor beschränkt sich die Reichweite auf maximal knapp 1'000 m bei optimalen Verhältnissen. Die Genauigkeit der Distanzmessung liegt in ohne Reflektor bei rund 2 - 4 mm + 2 mm / km. Mit einem Reflektor verbessert sich die Genauigkeit der Distanzmessung auf rund 1 mm + 1.5 mm / km. Die Winkelmessung erfolgt mit einer Genauigkeit je nach Modell von 0.5" (0.15 mgon) bis 5" (1.5 mgon). Die Auflösung beträgt rund 0.1" (0.01 mgon). Zum Erreichen grosser Genauigkeiten müssen mittels Kontroll- und Mehrfachmessungen Messgerätfehler und äussere Einflüsse korrigiert werden.

Tab. 7.12 Messbereich / Genauigkeit von geodätischen Aufnahmen mit Tachymeter

Messgrösse	Messbereich	Auflösung	Genauigkeit
Distanzmessung (Reflektor)	1.0 m – 10'000 m	-	1 mm + 1.5 mm / km
Distanzmessung (ohne Reflektor)	1.0 m – 2'000 m	-	2-4 mm + 2 mm / km
Winkelmessung (Horizontal & Vertikal)	360° (400 gon)	0.1" (0.01 mgon)	0.5" (0,15 mgon) – 5" (1.5 mgon)

7.4.4 Entwicklungsstand, Anwendungsgrenzen, Kosten

Tachymeter werden aufgrund ihrer flexiblen, erprobten Einsatzbereiche und der grossen Genauigkeit für detaillierte Überwachungen von Verformungen an Baugrunds- und Bauwerksflächen sowie für Vermessungsaufgaben verwendet. Für die Anwendung einer Messung muss ein direkter Sichtkontakt zwischen dem Messgerät und dem Zielpunkt vorhanden sein. Eingeschränkte Sichtverhältnisse (Nebel, Rauch) verschlechtern

besonders die Genauigkeit von Messungen ohne Reflektor. Die Oberfläche von reflektorlosen Zielpunkten wirkt sich ebenfalls auf die Genauigkeit und den maximalen Einsatzbereich aus. Für das Erreichen einer hohen Messgenauigkeit darf das Messgerät und der Zielpunkt zudem keinen Erschütterungen ausgesetzt sein.

Neuere Entwicklungen von Totalstationen ermöglichen ein Scannen von Oberflächen (rasches Messen von einem Raster von Zielpunkten ohne Reflektor). Integrierte Kameras ermöglichen zudem eine Bilddokumentation während der Messungen und das Anvisieren von Zielpunkten über digital verbundene Geräte (vgl. Kap. 8.1).

Die Installationspauschalen für einen stationären und automatisierten Tachymeter mit digitaler Datenübertragung belaufen sich je nach Gerätetyp auf ca. 10'000 – 40'000 CHF. Wiederkehrende Kosten bestehen im Unterhalt, der Auswertung und Interpretationen der erhaltenen Daten. Einzelne Vermessung mit einem mobilen Tachymeter verursachen Kosten im Bereich von ca. 5'000 – 25'000 CHF / Messeinsatz, abhängig von der Zugänglichkeit, der Anzahl Zielpunkte und dem Umfang der Datenauswertung.

7.4.5 Ergänzende Ausschreibungsanforderungen

Siehe Kapitel 7.1.5

7.4.6 Literaturverzeichnis

Sonstige Literatur / Forschungsberichte

[29] Leica Geosystems AG (2017), "Leica Nova MS60 White Paper", Hannes Maar, Hans-Martin Zogg

7.5 Sondenextensometer

7.5.1 Beschrieb der Technologie

Die Sondenextensometer sind eine Weiterentwicklung des Stangenextensometers. Mittels einer Messsonde werden die axialen Verschiebungen zwischen einzelnen Messmarken in einem Bohrloch vermessen. Die metallischen Messmarkierungen sind mit Teleskopkuppelungen jeweils mit Kunststoffrohren (teilweise auch rostfreie Stahlrohre bei Gleitmikrometer) verbunden und in einem Bohrloch einzementiert. Die Vermessung des Abstands zwischen den Messmarkierungen erfolgt mechanisch (Gleitmikrometer, Gleitdeformeter) oder elektromagnetisch (Inkrementalextensometer).

Bei einem Gleitmikrometer beruht die Messung auf dem Kugel-Kegel-Prinzip: Die kugelförmigen Messköpfe der Messsonde verspannen sich mit den kegelförmigen Anschlägen der Messmarkierungen und die Distanz wird in der Sonde über einen digitalen (früher induktive) Wegaufnehmer bestimmt (Mess-Position, Abb. 7.26). Dieser übermittelt ein digitales Signal über Kabel an das Ablesegerät / Datenspeicher. Die Basislänge zwischen den Messmarkierungen beträgt 1 m. Das Kugel-Kegel-Prinzip gewährleistet die Wiederholbarkeit der Messung.

Der Anschlag der Messmarkierungen und die Messköpfe der Messsonde weisen Ausparungen auf, welche ein Verschieben der Messsonde gegenüber den Messmarkierungen ermöglicht (Gleitposition, Abb. 7.26). Durch das schrittweise Versetzen und Verspannen der Sonde im Messrohr werden die einzelnen Distanzen zwischen den Messmarken bestimmt. Die differentiellen Deformationen entlang der Bohrlochachse können anschliessend unter Berücksichtigung einer Nullmessung für jeden Messabschnitt, und aufsummiert als integrierte Verschiebung über die gesamte Bohrlochtiefe, dargestellt werden. Bei Messungen in vertikalen Bohrungen bis ca. 50 m oder horizontalen Bohrungen bis ca. 100 m Länge erfolgt die Messung direkt mittels Bediengestänge, mit welchem die Sonde zwischen den Messmarken orientiert und verspannt werden kann. In tieferen Bohrungen wird die Sonde über ein reissfestes Elektrokabel abgesenkt, orientiert und verspannt. Der benötigte Bohrlochdurchmesser für einen Gleitmikrometer liegt je nach tiefe der Bohrung zwischen ca. 75 mm und 100 mm.

Auf dem gleichen Prinzip wie der Gleitmikrometer basiert die Messung der axialen Verschiebung in einem Bohrloch mit einem Gleitdeformeter. Im Vergleich zu einem Gleitmikrometer bestehen die Messmarkierungen nicht aus Metall, sondern aus Kunststoff. Die Messsonde misst die Distanz zwischen den Messmarkierungen mittels Linearpotentiometer. Der benötigte Bohrlochdurchmesser liegt in einem ähnlichen Bereich wie für einen Gleitmikrometer. Es können grössere Verformungen als mit einem Gleitmikrometer erfasst werden. Die Genauigkeit von Gleitdeformeter ist dabei jedoch schlechter (siehe Kapitel 7.5.3).

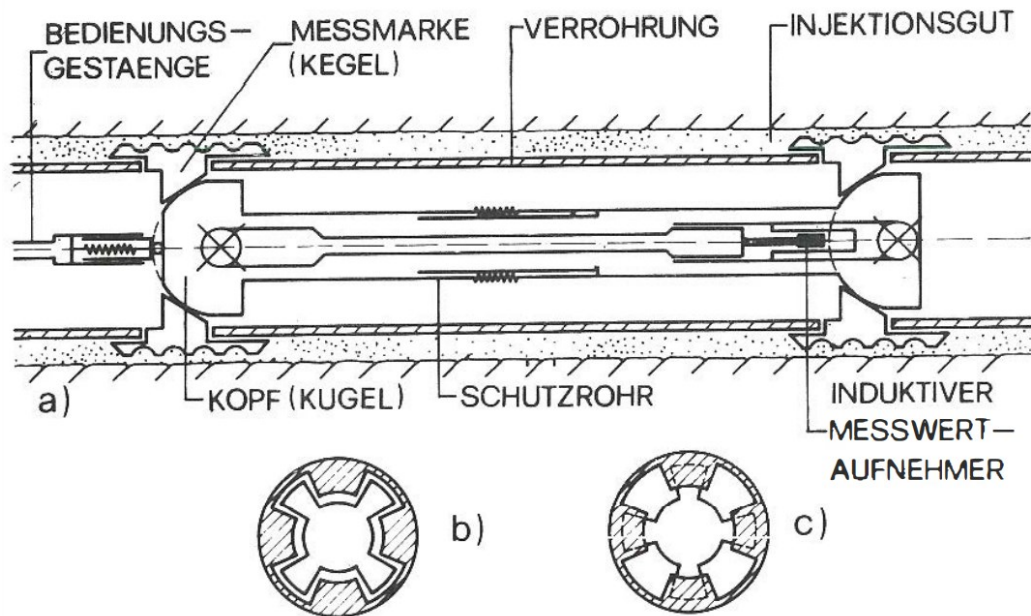


Abb. 7.26 Gleitmikrometer a) Funktionsschema, b) Kugel-Kegel-Prinzip in Gleitposition, c) Kugel-Kegel-Prinzip in Mess-Position [30].

Ein Inkrementalextensometer basiert auf der elektromagnetischen Induktion und die Messung erfolgt berührungslos. Die Messmarkierungen bestehen aus Metallringen an der Aussenseite des Messrohrs (Basisabstand 1 m). Die Messsonde besitzt zwei Magnetspulen in einem Abstand von 1 m. Die Messung erfolgt vom Bohrlochfuss nach oben und die Messsonde wird über ein Positionierungsgestänge exakt zwischen zwei Messmarkierungen positioniert. Durch die Induktion zwischen den Spulen und den Messringen wird ein elektrisches Signal erzeugt. Dieses Signal ist proportional zur Entfernung der Spulen zu den Metallringen. Anhang einer Nullmessung können die Deformationen entlang der Bohrlochachse bestimmt werden. Der benötigte Bohrlochdurchmesser für einen Inkrementalextensometer liegt in einem Bereich von ca. 120 mm.

7.5.2 Fragestellungen in den Fachbereichen

Fragestellungen im Bereich Tunnel

Sondenextensometer eignen sich für den Einsatz im Fels und Lockergestein. Sie dienen der kurzzeitigen oder langfristigen Überwachung des Baugrunds und werden direkt aus dem Tunnelbauwerk oder von der Oberfläche aus versetzt. Im Allgemeinen werden Sondenextensometermessungen im Tunnelbau für folgende Einsatzzwecke verwendet:

- Überwachung von Verformungen im Baugrund, von Oberflächensetzungen im Einflussbereich des Vortriebs oder bei angrenzenden Bauwerken;
- Kurz- oder Langzeitüberwachung von Baugrundverformungen im Tunnelnahbereich (während des Vortriebs und/oder während des Betriebs) z.B. infolge Auflockerungszonen oder Gebirgsdeformationen (druckhaftes oder quellfähiges Gebirge, Entfestigung);
- Überwachung des Deformationsverhaltens von Baugrubenwänden und Pfahlprüfungen.

Fragestellungen im Bereich Naturgefahren

- Geotechnik / Böschungsüberwachung: Deformationsverhalten von Böschungen, Überwachung des Verhaltens von Ablösungsflächen von mittel- bis tiefgründigen Rutschungen, Bestimmung der Tiefe von Gleitflächen

7.5.3 Datenerfassung, Raumbezug, Messgrößen und – Genauigkeit

- Zur Messung wird die Sonde mit einem Führungsgestänge in das Messrohr eingebracht und schrittweise zwischen zwei Aussparungen verspannt. Der Messstandort muss zugänglich sein.
- Die Messdatenerfassung erfolgt mit einem Ablesegerät bzw. Datenschreiber.
- Die erhaltenen Messwerte beziehen sich jeweils auf die Abstandsänderung zwischen jeweils zwei Messmarkierungen. Über die gesamte Messlinie erfolgt eine linienhafte Erfassung der Abstandsänderungen (differentiell zwischen zwei Messmarkierungen und integriert über die gesamte Länge).
- Die Messung ist lokalisiert und erfasst maximal eine Achse direkt. Der Raumbezug erfolgt über die Position des Bohrlochmunds, der Bohrlochachse und -tiefe. Die einzelnen Messungen sind als Messlinie aneinandergereiht.
- Abgesehen von der zu erstellenden Bohrung erfolgen die Messungen zerstörungsfrei.

Die Messsonde des Gleitmikrometers kann einen Messbereich von ± 10 mm (997.5 mm bis 1002.5 mm) abdecken. Die Genauigkeit der Sonde liegt bei ± 0.002 mm/m und die Auflösung bei 0.001 mm. Ein Gleitdeformeter kann einen Messbereich von ca. ± 50 mm (975 mm bis 1025 mm) abdecken. Die Genauigkeit der Sonde liegt bei ± 0.02 mm/m und die Auflösung bei 0.002 mm.

Ein Inkrementalextensometer kann einen Messbereich von ca. ± 20 mm (990 mm bis 1010 mm) abdecken. Die Genauigkeit der Sonde liegt bei ± 0.02 mm/m und die Auflösung bei 0.001 mm.

Tab. 7.13 Messbereich / Genauigkeit von Gleitmikrometer

Typ	Einbaulänge	Messbereich	Auflösung	Genauigkeit
Gleitmikrometer	200 m	± 10 mm	0.001 mm	± 0.002 mm
Gleitdeformeter	200 m	± 50 mm	0.002 mm	± 0.02 mm
Inkrementalextensometer	100 m	± 20 mm	0.001 mm	± 0.02 mm

7.5.4 Entwicklungsstand, Anwendungsgrenzen, Kosten

Gleitmikrometer werden aufgrund der grossen Messwertdichte, der Robustheit und der hohen Genauigkeit für detaillierte Überwachungen von Verformungen in Bohrlöchern verwendet und dienen der Identifizierung von Mechanismen. Aufgrund des kleinen Messbereichs ist ihre Anwendung in Bereichen mit grossen Deformationen nur bedingt möglich (z.B. Rutschhang) bzw. nur über einen beschränkten Zeitraum. Ein Gleitdeformeter ermöglicht die Messung von grösseren Deformationen aufgrund des Messbereichs der Messsonde. Die Genauigkeit der Messungen ist jedoch schlechter. Ein Inkrementalextensometer weist ähnliche Messgenauigkeiten wie ein Gleitdeformeter auf. Die einfache Ausführung der Messmarkierungen und die berührungslose Messung (keine mechanische Einklemmvorrichtung) ermöglichen einen einfachen Messvorgang. Aufgrund der Messmethodik der Sondenextensometer ist keine kontinuierliche Überwachung der Deformationen möglich und der Zugang zum Bohrloch muss für die Messung gewährleistet sein.

Mit Sondenextensometer können die axialen Deformationen in einem Bohrloch präzise aufgenommen werden. Für die Darstellung des kompletten räumlichen Verschiebungsvektors werden Sondenextensometer oft zusammen mit Inklinometer verwendet. Für die Anwendung im selben Bohrloch werden Führungsrillen im Messrohr für den Inklinometer benötigt. Ein Inklinometer Messrohr mit integrierten metallischen Messringen ermöglicht die Erfassung der axialen Deformationen mit einem Inkrementalextensometer. Mit einer kombinierten Messsonde (Inkrementalextensometer und Inklinometer) kann direkt in einem Messvorgang die axiale Deformation und die Neigungsänderung bestimmt werden. Als Weiterentwicklung des Gleitmikrometers und des Inklinometers wird eine Kombination beider Messmethoden in einer Messsonde verwendet. Diese Gleitmikrometer mit Neigungsmesser können in vertikalen Bohrlöchern die Neigungsänderungen und die axialen Deformationen zwischen den einzelnen Messmarken bestimmen. Es resultiert ein räumlicher Verschiebungsvektor über die gesamte Bohrlochtiefe.

Die Kosten pro m' der Kernbohrung für ein Stangenextensometer können mit Kosten von ca. 150 - 250 CHF / m'. für kürzere Bohrstrecken von ca. 50-100 m und bis zu 500 CHF / m' für Bohrtiefen von mehr als 100 m bis 200 m angesetzt werden. Die Installationspauschalen können je nach Zugänglichkeit und Aufwand in einem Rahmen von 5'000 bis 20'000 CHF liegen. Für die nötigen Einbauten (Messrohr, Injizieren) ist mit Kosten von ca. 200 - 300 CHF / m' zu rechnen. Wiederkehrende Kosten bestehen im Aufwand für die Bereitstellung des Vermessungsmaterials (Messsonde, Kabel, Ablesegerät), der Vermessung vor Ort sowie der Auswertung und Interpretation der aktuellen Verschiebungswerte.

7.5.5 Ergänzende Ausschreibungsanforderungen

Siehe Kapitel 7.1.5

Ergänzend zu den Anforderungen an die Messtechnologie sind auch die Anforderungen an die baulichen Massnahmen (z.B. Bohrungen, Schutz Einrichtung, etc.) zu definieren sowie die Zugänglichkeiten (z.B. Erreichbarkeit, Eigentümer, etc.) zu beachten.

7.5.6 Literaturverzeichnis

Sonstige Literatur / Forschungsberichte

-
- [30] Geotechnik Schweiz (1980), Heft 102, "Das Konzept der "Linien-Beobachtung" bei Deformationsmessungen", Kovari, K, Amstad, Ch, ETH Zürich
-

7.6 Inklinometer

7.6.1 Beschrieb der Technologie

Inklinometer messen die Neigungsänderung zwischen Messintervallen in einem Bohrloch. Ein Messrohr (Kunststoff oder Metall) mit Führungsrillen wird im Bohrloch versetzt und der Ringspalt mit Kies oder Zementmörtel verfüllt. Die Messsonde des Inklinometers besitzt eine Länge von 0.5 oder 1.0 m und wird jeweils über zwei gefederte Rollen an beiden Enden exakt in den Führungsrillen des Messrohrs gehalten. Die Führungsrillen ermöglichen ein Befahren des Messrohrs durch die Messsonde in zwei Messrichtungen (senkrecht zueinander). Als Neigungssensoren in der Messsonde werden Beschleunigungssensoren (Mikroelektromechanische Systeme) oder Winkelaufnehmer mit Pendelsystem und optischen Positionssensoren verwendet. Diese messen jeweils den Unterschied der Neigung im Vergleich zur Vertikalen.

Mit dem Durchfahren des Messrohrs mit der Messsonde wird die Neigung jeweils in definierten Intervallen von 0.5 m oder 1.0 m (abhängig von der Messsondenlänge) gemessen. Die Neigungsänderung resultiert aus einem Vergleich mit der Nullmessung an der jeweiligen Position im Messrohr. Das Aneinanderreihen der Neigungsänderungen zusammen mit den Intervallabständen ergibt eine Messreihe, welche die Deformationen normal zur Bohrlochachse in einer Messrichtung darstellen. Die Durchführung der Messungen in beiden Messrichtungen ergeben den Verschiebungsvektor normal zur Bohrlochachse. In der Regel werden die Führungsrillen im Messrohr so ausgerichtet, dass die Messrichtungen mit der zu erwartenden Hauptdeformationsrichtung übereinstimmt.

Für eine kontinuierliche Neigungsmessung kann in einem Bohrloch ein stationäres Ketteninklinometer / "In-place inclinometer (IPI)" installiert werden. Diese bestehen aus einer Reihe aneinandergereihter Inklinometer, welche verteilt über die ganze Länge des Bohrlochs die Neigungsänderungen aufzeichnen. Die Daten werden direkt über ein Kabel an einen Datenspeicher oder mobile Funkstation an der Oberfläche weitergeleitet. In der Regel werden Inklinometer in vertikalen Bohrlochern verwendet. Sie können jedoch auch in horizontalen Bohrlochern angewendet werden. Aufgrund der Funktionsweise der Neigungssensoren können dabei jedoch nur Neigungsänderungen in einer Achse (Abweichung gegenüber der Vertikalen) erfasst werden.

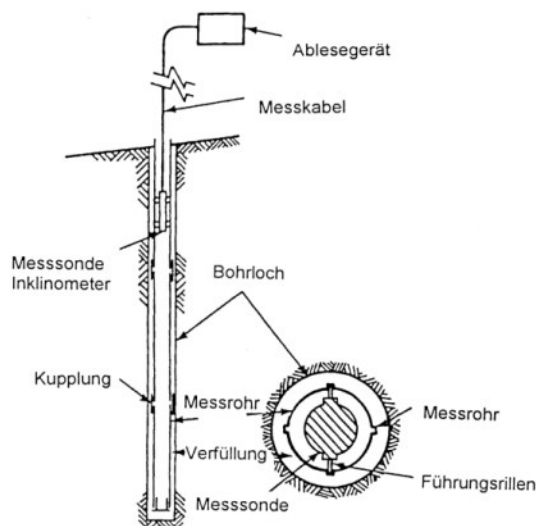


Abb. 7.27 Inklinometer im Bohrloch [31].

7.6.2 Fragestellungen in den Fachbereichen

Fragestellungen im Bereich Tunnel

Inklinometer eignen sich generell für den Einsatz im Fels und Lockergestein. Sie werden für die kurzzeitige oder langfristige Überwachung des Baugrunds eingesetzt und werden

direkt aus dem Tunnelbauwerk oder von der Oberfläche versetzt. Im Allgemeinen werden Inklinometermessungen im Tunnelbau für folgende Einsatzzwecke verwendet:

- Kurzzeitüberwachung von Baugrundverformungen im Tunnelnahbereich oder im Baugrubennahbereich: z.B. Neigungsänderungen in potenziellen Gleit-/Bruchkörpern einer Baugrube, differentielle Oberflächensetzungen im Einflussbereich eines Tunnelvortriebs.
- Langzeitüberwachung von Baugrundverformungen im Tunnelnahbereich oder Baugrubennahbereich z.B. infolge langfristigen Gebirgsdeformationen (druckhaftes oder quellfähiges Gebirge).
- Langzeitüberwachung von Bauwerkdeformationen z.B. Baugrubenabschluss.

Fragestellungen im Bereich Naturgefahren

- Geotechnik / Böschungsüberwachung: Deformationsverhalten von Böschungen, Überwachung des Verhaltens von Ablösungsflächen von mittel- bis tiefgründigen Rutschungen, Bestimmung der Tiefe von Gleitflächen.

7.6.3 Datenerfassung, Raumbezug, Messgrößen und – Genauigkeit

- Die Messdatenerfassung erfolgt bei einem Gleitmikrometer vor Ort mit einem Ablesegerät / Datenschreiber und muss daher für jede Ablesung zugänglich sein. Bei einem Ketteninklinometer kann eine automatisierte und digitale Erfassung der Messdaten erfolgen.
- Die erhaltenen Messwerte beziehen sich jeweils auf die Neigungsänderungen über die Länge der Sonde auf einer spezifischen Tiefe im Bohrloch. Über die gesamte Messlinie erfolgt eine linienhafte Erfassung der Neigungsänderungen.
- Die Messung ist lokalisiert und erfasst nur die Achsen normal zur Bohrlochachse (je nach Typ können eine oder beide Achsen direkt erfasst werden). Der Raumbezug erfolgt über die Position des Bohrlochmunds, Ursprüngliche Neigung des Bohrlochs und Tiefe. Die Einzelnen Messungen sind als Messlinie aneinandergereiht.
- Abgesehen von der zu erstellenden Bohrung erfolgen die Messungen zerstörungsfrei

Die Messsonde des Inklinometers kann einen Messbereich von $\pm 30^\circ$ abdecken. Die Genauigkeit der Sonde liegt bei $\pm 0.2 \text{ mm/m}$ und die Auflösung bei 0.002 mm/m . Die einzelnen Messrohre von jeweils 1 - 3 m lassen sich grundsätzlich beliebig ergänzen und werden bis max. 100 m verwendet.

Tab. 7.14 Messbereich / Genauigkeit von Inklinometer

Typ	Einbaulänge	Messbereich	Auflösung	Genauigkeit
Inklinometer	100 m	$\pm 30^\circ$	0.002 mm/m	$\pm 0.2 \text{ mm/m}$

7.6.4 Entwicklungsstand, Anwendungsgrenzen, Kosten

Inklinometer werden aufgrund der grossen Messwertdichte und der grossen Genauigkeit für detaillierte Überwachungen von Verformungen in Bohrlöcher verwendet. Aufgrund von Deformationen im Baugrund verformen sich die Messrohre ebenfalls. Für die Sicherstellung der Befahrbarkeit sollten in Bereichen mit grossen prognostizierten Verformungen Messrohre mit einem grösseren Durchmesser (bis 100 mm) verwendet werden. Bei einem nicht stationären Inklinometer wird für die Messung der Deformationen ein Zugang zum Bohrloch benötigt.

Ein Gleitmikrometer kann keine Deformationen in der Achse des Bohrlochs messen. Für die Erfassung des kompletten räumlichen Verschiebungsvektor können Inklinometer zusammen mit Gleitmikrometer im selben Bohrloch verwendet werden. Das Messrohr muss für diese Anwendung neben den Führungsrillen ebenfalls regelmässige Messmarkierungen für den Gleitmikrometer aufweisen. Eine Weiterentwicklung dazu ist die Kombination des Gleitmikrometers und Inklinometers in einer Messsonde. Mit zwei Neigungssensoren und einem Wegaufnehmer können die räumlichen Deformationen jeweils zwischen zwei Messmarkierungen im Messrohr direkt bestimmt werden.

Die Kosten pro m' der Kernbohrung für ein Inklinometer können mit Kosten von ca. 150 - 250 CHF / m'. für kürzere Bohrstrecken von ca. 50 m und bis zu 500 CHF / m' für Bohrtiefen von mehr als 50 m angesetzt werden. Die Installationspauschalen können je nach Zugänglichkeit und Aufwand in einem Rahmen zwischen 5'000 bis 20'000 CHF liegen. Für die nötigen Einbauten des Inklinometers (Messrohr, Injizieren) ist mit Kosten von ca. 200 - 300 CHF / m' zu rechnen. Wiederkehrende Kosten bestehen im Aufwand für die Bereitstellung des Vermessungsmaterials (Messsonde, Kabel, Ablesegerät), der Vermessung vor Ort sowie der Auswertung und Interpretation der aktuellen Verschiebungswerte.

7.6.5 Ergänzende Ausschreibungsanforderungen

Siehe Kapitel 7.1.5

Ergänzend zu den Anforderungen an die Messtechnologie sind auch die Anforderungen an die baulichen Massnahmen (z.B. Bohrungen, Schutz Einrichtung, etc.) zu definieren sowie die Zugänglichkeiten (z.B. Erreichbarkeit, Eigentümer, etc.) zu beachten.

7.6.6 Literaturverzeichnis

Sonstige Literatur / Forschungsberichte

- [31] Terradata SE AG (2016), Datenblatt Messung & Auswertung Inklinometer, <http://www.swissenvironment.ch/geot-messungen/inklinometer/> (Zugriff 16.05.2022)
-

7.7 Extensometer

7.7.1 Beschrieb der Technologie

Extensometer messen die axiale Verformung / Dehnung in einem Bohrloch zwischen zwei definierten Messpunkten (Ankerpunkt und Messkopf). Als Messmittel werden ein Draht (Drahtextensometer) oder ein Gestänge (Stangenextensometer; meist aus GFK, seltener aus Stahl) verwendet. Das Messmittel ist am Ankerpunkt einzementiert oder gelegentlich (z.B. in stark geklüftetem Fels) mittels Packer fixiert. Der Messkopf ist in der Regel am Bohrlochmund befestigt. Die Messmittel werden in einer Schutzhülle (Hüllrohr aus Kunststoff) im Bohrloch verlegt, welche ein freies Gleiten des Messmittels zwischen Anker und Messkopf gewährleistet.

Die Distanzänderung zwischen Messmittel und Messkopf ist gleichgesetzt mit der axialen Distanzänderung im Bohrloch zwischen Anker und Messpunkt (direktes Messprinzip). Zusammen mit der Nullmessung der Distanz zwischen Messpunkt und Anker kann die axiale Verformung / Dehnung zwischen diesen Punkten bestimmt werden. Die Distanz zwischen Messmittel und Messkopf kann vor Ort mittels digitaler Messuhr (analoges Ablesen) oder portablen elektrischen Wegaufnehmer (digital) bestimmt werden. Mit einem fest verbauten elektrischen Wegaufnehmer (induktiven Wegaufnehmer oder Schwingsaitensensor) kann eine automatisierte, kontinuierliche Beobachtung der axialen Verformung gewährleistet werden.

Bohrlöcher mit einer Messstrecke werden als Einfachextensometer bezeichnet; bei mehreren Messstrecken spricht man von Mehrfachextensometern. Ein Mehrfach-Stangenextensometer besteht z.B. aus bis zu 8 Messmitteln, welche Ankerpunkte auf unterschiedlicher Bohrlochtiefe haben, aber denselben Messkopf aufweisen (siehe Abb. 7.28). Durch die Messung der einzelnen Messstrecken kann die axiale Verformung einzelner Abschnitte im Bohrloch differenziert werden. Der benötigte Bohrl Lochdurchmesser für einen Mehrfachextensometer vergrößert sich mit der Anzahl Extensometer pro Bohrloch und liegt ca. zwischen 50 mm und 130 mm.

Eine weitere Variante ist der Kettenextensometer (Reverse Head Extensometer), wo mehrere Einzelextensometer mit Wegaufnehmer in einer Kette hintereinander angeordnet werden (der Messkopf einer Messstrecke ist dabei der Ankerpunkt für die Folgende). Dank Datenlogger im Bohrl ochtiefst erlaubt dieses System die kontinuierliche Messung während des Vortriebs und braucht weniger Bohrl ochdurchmesser als ein Mehrfachextensometer.

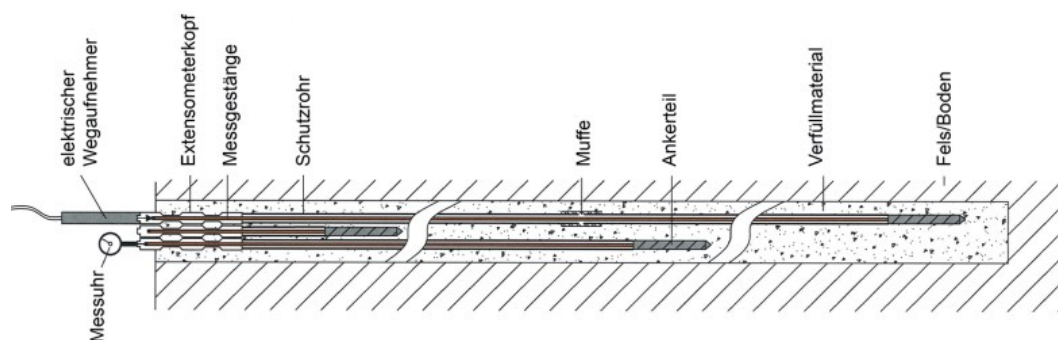


Abb. 7.28 Installation stationärer Mehrfach-Extensometer im Bohrloch [32].

Extensometer können ebenfalls zwischen zwei Messpunkten (Messkopf und Ankerpunkt) an der Oberfläche angewendet werden. Analog zur Anwendung im Bohrloch kann die axiale Distanzänderung zwischen dem Messpunkt (Messkopf) und dem Ankerpunkt bestimmt werden (vergleichbar mit Fugen- und Rissmessgeräte, Kapitel 7.25).

Für die Messung von grösseren Deformationen, insbesondere Setzungen werden Setzungspegel verwendet (teilweise auch "Grundpegel" oder Tell-Tale Extensometer bezeichnet). Ein Setzungspegel besteht aus einer Fussplatte und einem Messgestänge, welches

durch ein Hüllrohr geschützt ist (siehe Abb. 7.29). Aufgrund der festen Länge des Messgestänges kann durch die geodätische Messung, z.B. Nivellement (Kapitel 7.9) oder Tachymeter (Kapitel 7.4), des Messkopfes die Lage der Fussplatte bestimmt werden. Im Vergleich mit einer Nullmessung können die Setzungen/Hebungen des Fusspunktes und mittels Messung der Oberfläche des Schuttmaterials kann die Setzung/Hebung zwischen Kopf und Fusspunkt des Setzungspegels bestimmt werden. Die Installation erfolgt schrittweise durch Verlängerung des Messgestänges und Hüllrohrs während der Erstellung der Aufschüttung. Im festen Untergrund können auch Verankerungselemente für die Erstellung des Fusspunktes (analog normaler Extensometer) verwendet werden.

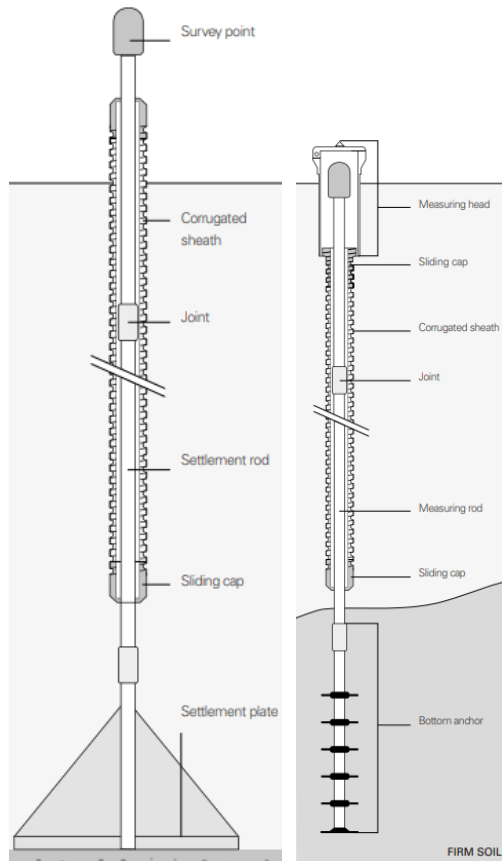


Abb. 7.29 Aufbau eines Setzungspegels mit Verankerung in losem (links) oder festem Baugrund (rechts) [33].

7.7.2 Fragestellungen in den Fachbereichen

Fragestellungen im Bereich Tunnel

Extensometer werden in Fels und Lockergestein für die kurzzeitige oder langfristige Überwachung des Baugrunds eingesetzt und werden dazu in Bohrlöchern direkt aus dem Tunnelbauwerk oder von der Oberfläche aus versetzt. Zur Bestimmung der Baugrundverformungen im Nahbereich des Tunnelbauwerks werden Bohrloch-Extensometer oft radial in der Querschnittsebene ab Tunnelrand angeordnet (siehe Abb. 7.30, links). Für die Bestimmung der Ortsbrustextrusion können Extensometer axial in Tunnellängsrichtung ab Ortsbrust angeordnet werden (siehe Abb. 7.30, rechts). Während des Tunnelvortriebs sind solche Reverse Head Extensometer nur für eine begrenzte Zeit verwendbar.

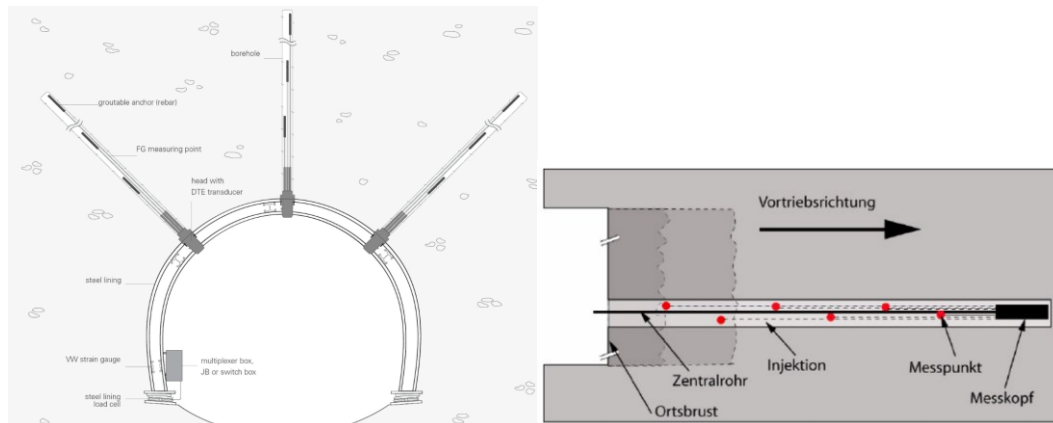


Abb. 7.30 Überwachung von Auflockerungszonen mittels Mehrfach Extensometer (links, [34]) oder der Ortsbrust mittels Reverse Head Extensometers (rechts, [35]).

Extensometer werden im Tunnelbau typischerweise für folgende Einsatzzwecke verwendet:

- Überwachung von Setzungen im Baugrund oder in angrenzenden Bauwerken (z.B. bebaute Oberflächen oberhalb des Tunnelvortriebs oder benachbarte, bestehende Tunnelbauwerke);
- Überwachung von Baugrundverformungen im Tunnelnahbereich (kurzzeitig während Vortrieb oder langfristig während Betrieb) z.B. infolge Auflockerungszonen oder Gebirgsdeformationen (druckhaftes oder quellfähiges Gebirge);
- Kontinuierliche Ortsbrustverformungen während des Tunnelvortriebs (Dehnungsmessung in Tunnellängsrichtung durch Verwendung von Kettenextensometer (Reverse Head Extensometer) mit Messkopf und Datenspeicher im Tiefpunkt der Bohrung; rechts in Abb. 7.30);
- Überwachung des Deformationsverhaltens von Baugrubenwänden, Pfahlprüfungen und Dämmen.

Fragestellungen im Bereich Naturgefahren

- Überwachung des Deformationsverhaltens von Ablöse- oder Gleitflächen bei mittel- bis tiefgründigen Rutschungen;
- Überwachung von Felsinstabilitäten an der Oberfläche.

7.7.3 Datenerfassung, Raumbezug, Messgrößen und – Genauigkeit

- Die Messdatenerfassung kann bei Stangen- oder Drahtextensometern entweder analog oder digital erfolgen – je nachdem wie zugänglich der Messkopf/Messort ist oder welche Ansprüche an die Kontinuität und Messwertdichte der Daten gestellt werden. Bei digitaler Ablesung sind neben remote-Verfügbarkeit der Messdaten auch eine digitale Messdatenaufzeichnung und/oder online-Zugriffe möglich;
- Die axiale Verformung wird direkt aus der Messung der Distanzänderung bestimmt.
- Die Messung ist lokalisiert und erfasst die Dehnung maximal einer Achse direkt. Der Raumbezug ist gegeben durch die Position des Messkopfes und die Richtung der Längsachse der Bohrung;
- Abgesehen von der zu erstellenden Bohrung erfolgen die Messungen zerstörungsfrei.

Mit der Technologie können je nach installiertem Typ Extensionen in einem Messbereich von 1 mm bis 250 mm erfasst werden. Je nach System und Hersteller kann der Messanschlag und damit der Messbereich nachträglich verstellt / verlängert werden. Messgenauigkeiten und Auflösung liegen im Bereich von rund 0.01 mm – jedoch stark abhängig von Produkt, Länge und Einbausituation. Erfasst werden diese Messgenauigkeiten über Einbaulängen zwischen 1 m und 100 m.

Bei einem Setzungspegel kann aufgrund der geodätischen Messverfahren ein deutlich grösserer Messbereich (> 1 m) abgedeckt werden. Die Messgenauigkeit ist für einen Setzungspegel abhängig vom geodätischen Messverfahren, z.B. Nivellement (Kapitel 7.9) oder Tachymeter (Kapitel 7.4).

Tab. 7.15 Messbereich und Genauigkeit von Extensometer

Typ	Einbaulänge	Messbereich	Auflösung	Genauigkeit
Stangen- und Drahtextensometer	1 m bis 100 m	bis 250 mm	~ 0.01 mm	± 0.001 mm/m

7.7.4 Entwicklungsstand, Anwendungsgrenzen, Kosten

Extensometer eignen sich aufgrund ihres einfachen Aufbaus und der erprobten Messmethodik für die Anwendung in unterschiedlichen Umfeldbedingungen und zur automatisierten Langzeitüberwachung. Durch eine Nachstellung des Messanschlages kann der Messbereich beschränkt vergrössert werden. Aufgrund der beschränkten Anzahl Messstrecken pro Bohrloch können Deformationen nur beschränkt lokalisiert werden und es ist eine geringe Auflösung über die Bohrlochlänge vorhanden.

Eine Weiterentwicklung der Stangen- und Drahtextensometer ist der Sondenextensometer bzw. Gleitmikrometer. Diese ermöglichen die Erfassung von axialen Deformationen in kleinen Abschnitten über die gesamte Länge der Bohrung. Ein kleinerer Messbereich beschränkt jedoch dessen Anwendung bei grossen Deformationen (siehe Kapitel 7.5).

Ein Setzungspegel wird zeitgleich mit den Arbeiten der Aufschüttung versetzt und verlängert. Während der Bauarbeiten muss eine Beschädigung verhindert werden.

Die Kosten pro m' der Kernbohrung für einen Extensometer können mit Kosten von ca. 150 - 250 CHF / m' für kürzere Bohrstrecken von ca. 50 m - 100 m und bis zu 500 CHF / m' für Bohrtiefen von mehr als 100 m bis 300 m angesetzt werden. Die Installationspauschalen können je nach Zugänglichkeit und Aufwand in einem Rahmen zwischen 5'000 bis 20'000 CHF liegen. Für die nötigen Einbauten des Draht- / Stangenextensometers (Hüllrohr, Injizieren, Messkopf und Messgestänge / Draht) ist mit Kosten von ca. 200 - 300 CHF / m' zu rechnen. Wiederkehrende Kosten bestehen im Aufwand für die Ablesung und Interpretation der aktuellen Verschiebungswerte oder für den Betrieb (und Installation) einer digitalen Lösung (Erfassung, Übermittlung und ggf. automatisierte Auswertung der Daten).

7.7.5 Ergänzende Ausschreibungsanforderungen

Siehe Kapitel 7.1.5

Ergänzend zu den Anforderungen an die Messtechnologie sind auch die baulichen Massnahmen (z.B. Bohrungen, Einbau und Schutz Einrichtung, etc.) zu definieren sowie die Zugänglichkeiten (z.B. Erreichbarkeit für Erstellung / Auslesen Daten, Eigentümer, etc.) zu beachten.

7.7.6 Literaturverzeichnis

Sonstige Literatur / Forschungsberichte

- | | |
|------|---|
| [32] | GEODATA Surveying and Monitoring Group, Datenblatt Stangenextensometer (2020), https://www.geodata.com/produkte/stangenextensometer/ , (Zugriff 16.05.2020) |
| [33] | SISGEO S.r.l. Datenblatt Setzungspegel / "Fixed Extensometer" (2019), https://www.sisgeo.com/de/produkte/extensometers/item/setzungspegel.html (Zugriff 08.09.2022) |
| [34] | SISGEO S.r.l. Datenblatt Mehrfach-Bohrlochehtensometer (2019), https://www.sisgeo.com/de/produkte/extensometers/item/mpbx-mehrfach-bohrlochehtensometer.html , (Zugriff 16.05.2022) |
| [35] | Solexperts AG, P. R. Steiner (2008), Kontinuierliche Verformungsmessung vor der Tunnelbrust mit dem RH-Extensometer (RHX) und dem Modularen RH-Extensometer (M-RHX). |

7.8 Schlauchwaage

7.8.1 Beschrieb der Technologie

Mit einer Schlauchwaage können die Höhendifferenzen zwischen mehreren Messpunkten bestimmt werden. Eine Schlauchwaagen Messung ist ein hydrostatisches Nivellement und funktioniert nach dem Prinzip der kommunizierenden Röhren. Mehrere Messpunkte sind über Röhren mit einem Referenzbehälter verbunden, welcher mit Flüssigkeit (in der Regel Wasser) gefüllt ist.

Bei einer Füllstandschlauchwaage ist an jedem Messpunkt ein Messgefäß angebracht. Aufgrund der Verbindungsröhren stellt sich in den Messgefäßen derselbe Flüssigkeitspegel wie im Referenzbehälter ein. Der Füllstand im Messgefäß entspricht der Höhendifferenz zwischen dem Messpunkt und dem Flüssigkeitspegel. Das Ablesen des Füllstands kann manuell oder über Füllstandssensoren erfolgen. Mit der Bestimmung der Höhenlage des Referenzbehälters in einem übergeordneten Koordinatensystem und dessen Füllstand kann über die gemessenen relativen Höhenunterschiede die absolute Höhe der Messpunkte bestimmt werden.

Bei einer Druckschlauchwaage ist an jedem Messpunkt eine Messzelle mit Drucksensor angebracht. Zusätzlich zum Referenzbehälter wird eine Referenzmesszelle eingebaut. In den Messzellen wird der hydrostatische Druck der Flüssigkeit über Drucksensoren ermittelt. Aus den Messwerten der Messzellen und dem spezifischen Gewicht der Flüssigkeit können die Höhendifferenzen im Vergleich zur Referenzmesszelle bestimmt werden. Durch die Bestimmung der Höhenlage der Referenzmesszelle in einem übergeordneten Koordinatensystem werden die Höhenangaben der einzelnen Messpunkte bestimmt.

Bei einer mobilen Schlauchwaage besteht das System nur aus einem Referenzbehälter und einer mobilen Messzelle / Messsonde, welche einen Drucksensor beinhaltet und über ein Hydraulikkabel mit dem Referenzbehälter verbunden ist. Die verschiebbliche Sonde kann die Druckdaten über Kabel an ein Anzeigegerät weiterleiten. Wie bei einer Füllstandschlauchwaage kann durch die Höhenkoordinaten des Referenzbehälters und dessen Füllstand die absolute Höhe der Sonde bestimmt werden.

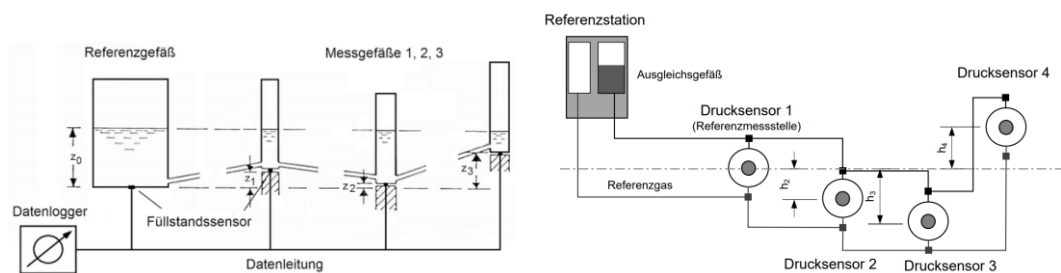


Abb. 7.31 Füllstandschlauchwaage (links, [36]) und Druckschlauchwaage (rechts, [37]).

7.8.2 Fragestellungen in den Fachbereichen

Fragestellungen im Bereich Tunnel

Geodätische Aufnahmen mit Schlauchwaagen eignen sich für die punktuelle Überwachung von Oberflächen (Baugrund oder Bauwerke). Es können sehr viele Messpunkte über einen längeren Zeitraum automatisiert überwacht werden. Messung können an der Oberfläche oder direkt im Tunnel erfolgen. Im Allgemeinen werden Schlauchwaagen im Tunnelbau für folgende Einsatzzwecke verwendet:

- Kurzzeitüberwachung von Baugrundverformungen z.B. Setzungen/Hebungen an der Baugrundoberfläche oder in angrenzenden Bauwerken während des Tunnelvortriebs oder infolge Massnahmen im Baugrund (z.B. Ausgleichsinjektionen).
- Langzeitüberwachung von Baugrundverformungen z.B. infolge langfristiger Gebirgsdeformationen oder langfristigen Setzungsverhalten im Baugrund.

- Überwachung von Deformationen / Setzungen von Dämmen und Stauanlagen.

Fragestellung im Bereich Naturgefahren

- Geotechnik / Böschungsüberwachung: Oberflächenverlaufsentwicklung über die Zeit und somit Rückschluss auf Stabilität- und Deformationsverhalten von Böschungen und Rutschhängen.

7.8.3 Datenerfassung, Raumbezug, Messgrößen und – Genauigkeit

- Die Messdaten Erfassung erfolgt bei Schlauchwaagen vor Ort. Bei einer automatisierten Datenerfassung kann die Übertragung digital erfolgen und ein kontinuierliches Aufzeichnen der Messungen ist möglich. Für die Messung mit Schlauchwaagen muss eine möglichst horizontale Rohrverbindung zwischen den einzelnen Messpunkten und dem Referenzbehälter vorhanden sein.
- Die Bestimmung der Höhe der einzelnen Messpunkte erfolgt für die Höhenlage der Referenzmessstelle. Veränderungen in der Höhe (Setzungen/Hebungen) der einzelnen Messpunkte können direkt aus dem Vergleich mit der Referenzmessstelle berechnet werden. Voraussetzung dazu ist jedoch eine stabile stationäre Lage der Referenzmessstelle (ausserhalb Setzungsbereich).
- Abgesehen von der Befestigung der Messbehälter / Messzellen erfolgen die Messungen zerstörungsfrei.

Der Messbereich von einer Schlauchwaage beträgt bis zu ca. 1'000 mm. Die Auflösung der Messung liegt in einem Bereich zwischen rund 0.1 mm bis zu 0.001 mm. Die Systemgenauigkeit ist abhängig vom Umfang des Messsystems und variiert zwischen rund +/- 0.3 mm bis zu +/- 0.01 mm. Die Messgenauigkeit ist abhängig vom Umfang des Messsystems (Anzahl Messpunkte, Länge der Leitungen) und der Messmethode. Für eine grössere Genauigkeit muss der Einfluss der Temperatur auf das spezifische Gewicht der Flüssigkeit für jede Messstelle berücksichtigt werden.

Tab. 7.16 Messbereich / Genauigkeit von Schlauchwaagen

Typ	Messbereich	Auflösung	Genauigkeit
Schlauchwaagen	bis 1'000 mm	0.1 mm bis 0.001 mm	+/- 0.3 mm bis +/- 0.01 mm

7.8.4 Entwicklungsstand, Anwendungsgrenzen, Kosten

Schlauchwaagen werden aufgrund der grossen Genauigkeit für detaillierte Überwachungen von Verformungen an Bauwerken und Baugrundoberflächen verwendet. Für die Anwendung muss eine möglichst horizontale Rohrverbindung zwischen den Messpunkten vorhanden sein. Erschütterungen im Bereich der Messstellen können durch Dämpfungsregelung teilweise kompensiert werden.

Die Installationskosten für eine automatisierte Schlauchwaage mit digitaler Datenübertragung belaufen sich auf ca. 5'000 – 15'000 CHF je nach Umfang der Messstellen und deren Abstand untereinander. Der geodätische Fixpunkt, von dem aus die relativen Verschiebungen ausgewertet werden, liegt ausserhalb des Einflussbereiches und ist geodätisch vorgängig einzumessen. Wiederkehrende Kosten bestehen im Unterhalt, der Auswertung und Interpretationen der erhaltenen Daten.

7.8.5 Ergänzende Ausschreibungsanforderungen

Siehe Kapitel 7.1.5

Ergänzend zu den Anforderungen an die Messtechnologie sind auch die Anforderungen an die baulichen Massnahmen (z.B. Konsolen, Befestigungen, etc.) zu definieren sowie die Zugänglichkeiten (z.B. Erreichbarkeit für Bau und Ablesen oder Auslesen der Daten, Eigentümer, etc.) zu beachten. Der geodätische Fixpunkt für die Bestimmung der Lage und Höhe der Schlauchwaagen muss ausserhalb des Setzungsbereichs liegen. Die Schlauchwaagen müssen periodisch von diesem Fixpunkt zur Kontrolle eingemessen werden.

7.8.6 Literaturverzeichnis

Sonstige Literatur / Forschungsberichte

-
- [36] Edwin Fecker (2018), Geotechnische Messgeräte und Feldversuche im Fels, 2. Auflage, Springer Spektrum Berlin, <https://doi.org/10.1007/978-3-662-57824-7>
-
- [37] Steffen Schindler (2014), Monitoringbasierte strukturelle mechanische Schadensanalyse von Bauwerken beim Tunnelbau, Ruhr-Universität Bochum, Dissertation
-

7.9 Nivellement

7.9.1 Beschrieb der Technologie

Mit dem Nivellement wird die Höhendifferenz zwischen zwei Messpunkten bestimmt. Für ein geometrisches Nivellement wird ein Nivellier-Messgerät und mindestens eine Nivellierlatte mit einer Höheneinteilung benötigt. Das Nivellier wird zwischen den beiden Messpunkten aufgestellt und horizontal ausgerichtet. Präzise Nivelliergeräte enthalten zudem einen Kompensator, welcher kleine Abweichungen in der horizontalen Lage kompensieren kann. Die Nivellierlatten werden lotrecht auf dem Messpunkt aufgestellt und die Latteneinteilung wird vom Nivellier aus auf horizontaler Höhe optisch abgelesen. Mit der Messung von zwei Messpunkten von der gleichen Position des Nivelliers kann der Höhenunterschied zwischen den Punkten bestimmt werden. Für das Nivellement müssen die zwei Nivellierlatten der Messpunkte im horizontalen Blickfeld des Nivellier-Messgeräts liegen. Ein Nivellier-Messgerät ermöglicht durch ein optisches Auslesen einer vorgegebenen Distanz auf der Nivellierlatte eine grobe Distanzmessung zwischen Messgerät und Nivellierlatte.

Durch die Bestimmung der Höhendifferenz zu einem bekannten Referenzpunkt kann die Höhe des Messpunktes im übergeordneten Koordinatensystem (z.B. LV95) bestimmt werden. Die Messung zwischen Referenzpunkt und Messpunkt muss gegebenenfalls aufgrund von Hindernissen, der Distanz oder zu grossem Höhenunterschied in mehrere Messschritte unterteilt werden. Von einem Anfangspunkt (Referenzpunkt) werden durch aneinandergereihte Messungen, mit jeweils einem gemeinsamen Messpunkt, die Höhendifferenz zum Endpunkt (Messpunkt) bestimmt. Eine solche Messkette wird auch Liniennivellement genannt. Durch das Messen dieser Messkette in umgekehrter Richtung erfolgt eine Kontrolle und Überprüfung der Messung (Doppelnivellement). Für die Bestimmung der vertikalen Verschiebung eines Messpunktes muss der Bezug zu einem stationären Referenzpunkt mit bekannter Höhe zu unterschiedlichen Zeitpunkten erfolgen.

In klassischen Nivelliergeräten werden die Höhenunterschiede auf der Nivellierlatte mit dem Messgerät optisch abgelesen und analog erfasst. Digitalnivelliergeräte erfassen die Höhe auf der Nivellierlatte durch eine elektronische Bildverarbeitung. Die Nivellierlatte muss dazu eine codierte Einteilung aufweisen und unterscheidet sich je nach Hersteller. Die Höhenunterschiede werden direkt im Gerät gespeichert. Mit einem motorisierten, digitalen Nivelliergerät lassen sich mehrere Messpunkte mit stationären Nivellierlatten überwachen. Die einzelnen Messpunkte können automatisiert anvisiert werden und die Datenübermittlung kann digital erfolgen.

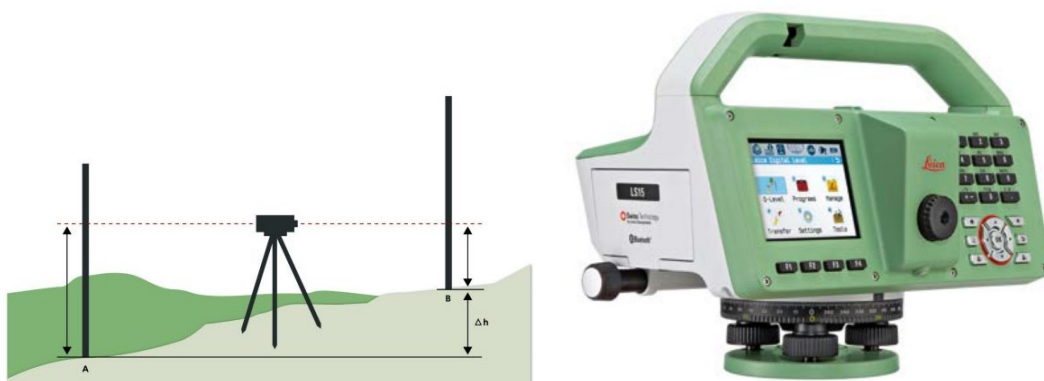


Abb. 7.32 Funktionsweise Nivellement (links,[38]) und digitales Nivelliergerät (rechts,[39]).

7.9.2 Fragestellungen in den Fachbereichen

Fragestellung im Bereich Tunnel

Geodätische Aufnahmen mit dem Nivellement eignen sich für die punktuelle Überwachung von Oberflächen (Baugrund oder Bauwerke). Durch ein Raster lassen sich zudem flächenhafte Messungen von Oberflächen erstellen und überwachen. Messung können an der Oberfläche oder direkt im Tunnel erfolgen. Aufgrund der fehlenden Referenzpunkte im

Tunnel erfolgt die Höhenbestimmung im Tunnel über ein Liniennivellement. Im Allgemeinen werden Geodätische Aufnahmen mit Nivellement im Tunnelbau für folgende Einsatzzwecke verwendet:

- Kurzzeitüberwachung von Baugrundverformungen z.B. Setzungen/Hebungen an der Baugrundoberfläche oder in angrenzenden Bauwerken während des Tunnelvortrieb.
- Langzeitüberwachung von Baugrundverformungen z.B. infolge langfristiger Gebirgsdeformationen (quellfähiges Gebirge).
- Überwachung / Kontrolle der Tunnelgeometrie (z.B. Höhenlage Fahrbahn, Bankett).

Fragestellung im Bereich Naturgefahren

- Geotechnik / Böschungsüberwachung: Oberflächenverlaufsentwicklung über die Zeit und somit Rückschluss auf Stabilitäts- und Deformationsverhalten von Böschungen und Rutschhängen.
- Überwachung von Felsinstabilitäten.

7.9.3 Datenerfassung, Raumbezug, Messgrössen und – Genauigkeit

- Die Messdatenerfassung erfolgt bei einem Nivellement vor Ort. Für die Messung muss eine direkte Sichtlinie zwischen Messgerät und Nivellierlatte vorhanden sein und beide Standorte müssen zugänglich sein.
- Für die Erstellung eines Raumbezugs des Messpunktes muss die Höhendifferenz im Vergleich zu einem Referenzpunkt mit bekannter Höhe ermittelt werden. Gegebenenfalls werden mehrere Messungen (Liniennivellement) benötigt.
- Abgesehen von der Befestigung von Messmarkierungen erfolgen die Messungen zerstörungsfrei.

Der Messbereich von einem Nivelliergerät liegt in einem Bereich von weniger als 1.0 m bis zu ca. 100 m. Die Genauigkeit der Messung ist abhängig vom Nivelliergerät und der Nivellierlatte und wird als Standardabweichung pro Kilometer Doppelnivellement angegeben. Ein Nivelliergerät erreicht je nach Typ zusammen mit einer Standard-Nivellierlatte eine Standardabweichung zwischen 1.0 – 2.0 mm / km. Mit hochpräzisen Nivellierlatten kann die Genauigkeit auf bis zu 0.2 mm / km erhöht werden. Für das Erreichen einer grossen Genauigkeit müssen mittels Kontrollmessungen die Messgerätefehler und äusseren Einflüsse korrigiert werden.

Tab. 7.17 Messbereich / Genauigkeit von Nivellement

Messgrösse	Messbereich	Genauigkeit
Höhenmessung	< 1.0 m – 100 m	0.2 mm / km – 2.0 mm / km
Distanzmessung	2 – 100 m	1 mm / m (> 10 mm)

7.9.4 Entwicklungsstand, Anwendungsgrenzen, Kosten

Nivellement wird aufgrund der grossen Genauigkeit für detaillierte Überwachungen von Verformungen an Baugrunds-Oberflächen sowie für Vermessungsaufgaben verwendet. Für die Anwendung einer Messung muss ein horizontaler Sichtkontakt zwischen dem Messgerät und der Nivellierlatte vorhanden sein. Eingeschränkte Sichtverhältnisse (Nebel, Rauch, Dunkelheit) verschlechtern die Genauigkeit von Messungen. Für das Erreichen einer grossen Messgenauigkeit darf das Messgerät und die Nivellierlatte keinen Erschütterungen ausgesetzt sein und die Nivellierlatte muss lotrecht auf dem Messpunkt aufgestellt sein.

Die Kosten für eine Vermessung mit einem Nivellement belaufen sich auf rund 2'000 – 10'000 CHF / Messung, abhängig von der Zugänglichkeit, der Anzahl Messpunkte und dem Umfang der Datenauswertung.

7.9.5 Ergänzende Ausschreibungsanforderungen

Siehe Kapitel 7.1.5.

Die Messlinie / Messpunkte des Nivellements müssen als fixe Punkte ausgebildet sein. Der Ausgangspunkt der Messlinie (Fixpunkt) muss ausserhalb des Setzungsbereichs liegen.

7.9.6 Literaturverzeichnis

Sonstige Literatur / Forschungsberichte

- [38] Bundesamt für Landestopografie, Nivellement, <https://www.swisstopo.admin.ch/de/wissen-fakten/geodaesie-vermessung/messverfahren/levelling.html>, (Zugriff 16.05.2022)
-
- [39] Leica Geosystems AG, Datenblatt Leica LS Digitalnivellier, <https://leica-geosystems.com/de-ch/products/levels/digital-levels/leica-ls15-and-ls10>, (Zugriff 16.05.2022)
-

7.10 Faseroptische Sensoren

7.10.1 Beschreibung der Technologie

Eine optische Faser besteht in der Regel aus einer Glas- oder Quarzfaser und einer Polymerbeschichtung. Sie ähnelt einer normalen Telekommunikationsfaser, auch wenn die Verwendung von Gittern eine spezielle Verarbeitung erfordert, und kann bis zu mehreren Kilometern lang sein und viele Messpunkte entlang ihrer Länge aufweisen. Wenn die faseroptischen Sensoren (FO) ordnungsgemäss an einem Strukturelement befestigt / eingebettet sind (z. B. über einen Klebstoff), kann auf die Dehnung und/oder Temperatur des Elements geschlossen werden. Die Messung ist unempfindlich gegenüber anderen physikalischen Veränderungen, wie z. B. elektromagnetischen Feldern und Feuchtigkeit. Es werden drei Hauptklassen von Messtechnologien unterschieden: optische Interferometrie, Faser-Bragg-Gitter und verteilte Dehnungssensoren.

Optische Interferometrie (FPI)

Das Funktionsprinzip ähnelt dem der optischen Drucksensoren (siehe Abschnitt 7.45). Interferometrische FO-Sensoren nutzen die Interferenz zwischen zwei Lichtstrahlen, die sich auf unterschiedlichen optischen Wegen durch eine oder zwei verschiedene Fasern ausbreiten. Einer der optischen Pfade ist so beschaffen, dass er für äussere Störungen empfindlich ist. Die physikalischen Änderungen der Messgrösse, wie Temperatur, Dehnung, Druck, Verschiebung, Brechungsindex (RI), werden mit Änderungen des optischen Signals (wie Wellenlänge, Phase, Intensität, Frequenz, Bandbreite) der beiden Lichtstrahlen korreliert [40]. Es gibt vier repräsentative Arten von faseroptischen Interferometern, nämlich das Fabry-Perot-Interferometer (FPI), das Mach-Zehnder-Interferometer, das Michelson- und das Sagnac-Interferometer. Wir konzentrieren uns auf das FPI, das in der Regel für die Messung von Dehnungen verwendet wird.

Ein FPI besteht im Allgemeinen aus zwei parallelen reflektierenden Flächen, die einen gewissen Abstand voneinander haben. Die Reflektoren können innerhalb (intrinsisch) oder ausserhalb (extrinsisch) der Fasern angebracht sein. Extrinsische Sensoren (Abb. 7.33a) beruhen auf der Verwendung eines Hohlraums für die Reflexion und können eine hohe Auflösung bieten, sind leicht herzustellen und kostengünstig. Sie haben jedoch auch Nachteile in Bezug auf die Kopplungseffizienz, die Ausrichtung und die Verpackung. Intrinsische FPI-Fasersensoren enthalten reflektierende Komponenten in der Faser selbst. Abb. 7.33b zeigt ein intrinsisches Fabry-Perot-Interferometer, bei dem die reflektierenden Oberflächen durch Faser-Bragg-Gitter (FBGs), chemisches Ätzen oder Mikrobearbeitung hergestellt werden können, was jedoch aufgrund des Herstellungsprozesses mit höheren Kosten verbunden ist. An parallelen Oberflächen treten Interferenzen auf, wenn reflektierte und transmittierte Lichtstrahlen überlagert werden. Wenn die Faser gedehnt wird, verschiebt sich das Wellenlängenspektrum um einen Betrag, der proportional zur Änderung der Dehnung ist.

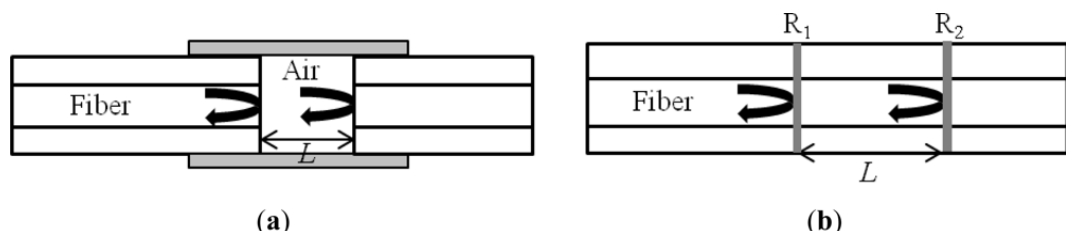


Abb. 7.33 a) Extrinsisches und b) intrinsisches Fabry-Perot Interferometer für Dehnungsmessung (Bild von [40]).

Faser-Bragg-Gitter (FBG) Sensoren

Faser-Bragg-Gitter sind periodische Strukturen, die durch starke ultraviolette (UV) Strahlung im Millimeterbereich direkt in den Kern von optischen Glasfasern eingeprägt werden, siehe Abb. 7.34. Vereinfacht ausgedrückt kann man sich die Faser als einen zylindrischen Abschnitt aus transparentem Material vorstellen, der entlang seiner Länge mehrere dünne Scheiben aufweist [43]. Wenn das Licht des Lasers auf dieses Muster trifft, werden

bestimmte Wellenlängen reflektiert, während andere durchgelassen werden. Die Materialinterferenzen, d. h. die "Scheiben", sind in bestimmten Abständen angeordnet. Wenn die Faser gedehnt oder gestaucht wird - also einer positiven oder negativen Dehnung unterworfen wird - ändern sich diese Abstände. Die Änderung ist proportional zur Änderung der Wellenlänge des Lichtstrahls, der sich in der Faser ausbreitet (Abb. 7.34).

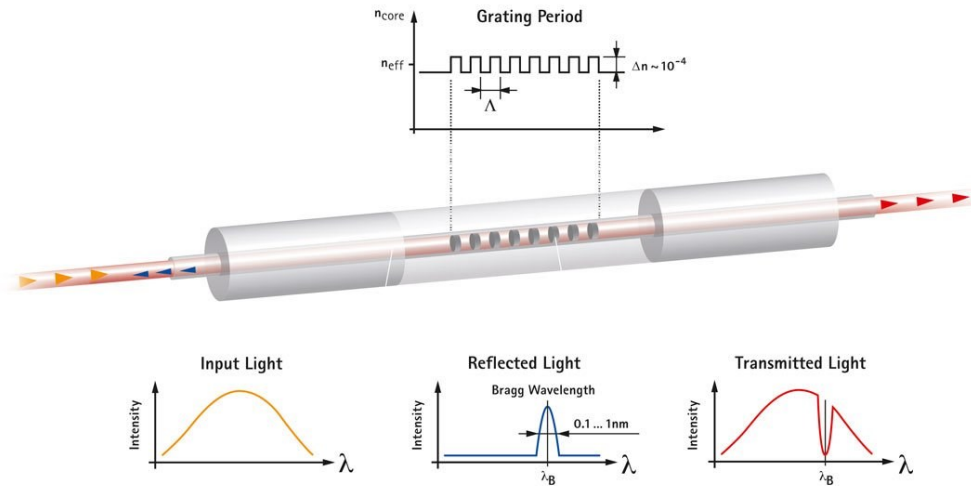


Abb. 7.34 Schema und Funktionsprinzip eines Faser-Bragg-Gitter (FBG)-Sensors (Bild wiederverwendet aus [43]).

Bei handelsüblichen FBG-Sensoren besteht der Sensor aus einem aktiven und einem passiven Teil. Der aktive Teil enthält die Messfaser und misst im Wesentlichen Verformungen zwischen ihren beiden Enden (gemittelt über eine aktive Länge, die von Zentimeter bis zu mehreren Metern variiert) und wandelt sie in eine Wellenlängenverschiebung des Faser-Bragg-Gitters um. Der passive Teil ist unempfindlich gegenüber Verformungen und dient zum Anschluss des Sensors an die Ausleseseinheit. In den passiven Teil des Sensors kann ein loses Faser-Bragg-Gitter zur Temperaturerfassung und -kompensation eingebaut werden. Die Sensoren sind in einseitiger, zweiseitiger und verketteter Konfiguration erhältlich. Es können bis zu sechs temperaturkompensierte Vollbereichssensoren angeschlossen werden.

Verteilte Dehnungssensoren – Distributed Strain Sensing (DSS)

Ein verteilter FO-Sensor besteht aus einer einzigen optischen Faser, die über ihre gesamte Länge empfindlich ist. Ein einziger verteilter FO-Sensor kann somit Tausende von diskreten Punktsensoren (wie FPIs und FBGs) ersetzen. Die geringe Faserdämpfung ermöglicht die Überwachung über extrem lange Strecken von bis zu 25 km, was für die Überwachung von Brückenaufbauten (z. B. Fahrbahnen) äusserst attraktiv ist. Die Entwicklung eines verteilten FO-Sensorsystems setzt eine bekannte und reproduzierbare Methode voraus, mit der die Messgrösse mit dem in der Faser wandernden Licht interagieren kann. Dies kann durch drei verschiedene Streuphänomene erreicht werden, nämlich Raman-, stimulierte Brillouin- und Rayleigh-Streuung.

Wie in [46] erläutert, entsteht die Raman-Streuung durch die thermische Vibration der Glasmoleküle im Faserkern, wenn das Licht durch die Faser wandert, und ist sehr empfindlich gegenüber Temperaturschwankungen. Die Brillouin-Streuung entsteht durch die Wechselwirkung von rückgestreutem Licht und akustischen Wellen, die bei Änderungen der Materialdichte infolge thermischer Effekte entstehen. Die Brillouin-Streuung reagiert empfindlich auf äussere Veränderungen sowohl der mechanischen Belastung als auch der Temperatur. Die Rayleigh-Streuung hingegen bezieht sich auf die elastische Verteilung des Lichts in alle Richtungen, die entsteht, wenn das Licht mit lokalen Inhomogenitäten im Faserkern interferiert, die kleiner als die Wellenlänge des Lichts selbst sind. Diese Inhomogenitäten werden durch Schwankungen in der Dichte und Zusammensetzung des Faserkerns verursacht, wodurch die Rayleigh-Streuung sowohl auf

mechanische Beanspruchung als auch auf Temperaturänderungen anspricht. Das Prinzip der Rayleigh-Rückstreuung lässt sich wie folgt zusammenfassen (Abb. 7.35).

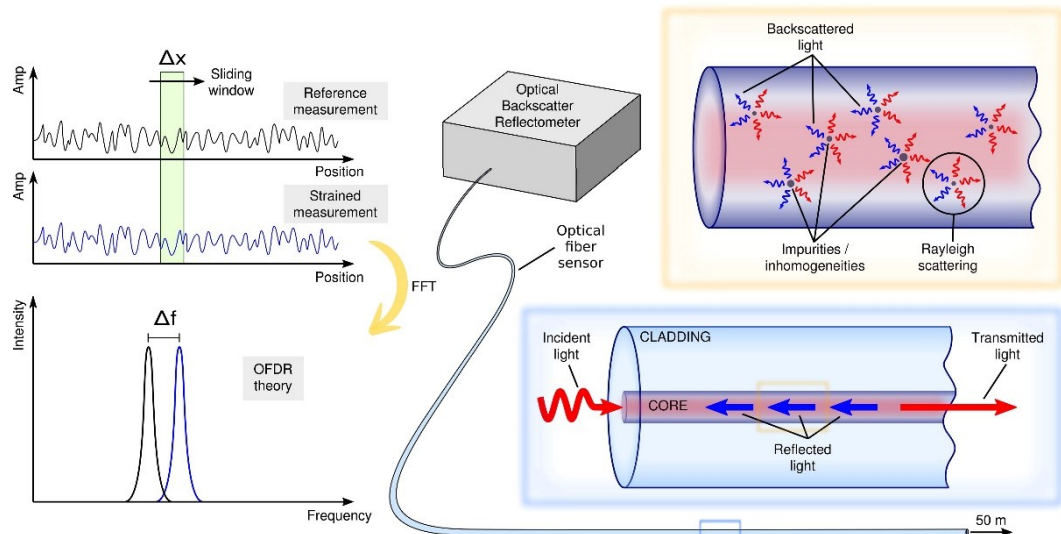


Abb. 7.35 Schema und Funktionsprinzip eines verteilten Dehnungssensors auf der Basis von Rayleigh-Rückstreuung (Bild wiederverwendet aus [46])

Wie in [46] beschrieben, ist die Brillouin-Streuung eine intrinsische Eigenschaft der Lichtausbreitung in dem Siliziumdioxidmaterial, aus dem die Sensorfaser besteht. Der Effekt der Brillouin-Streuung zeigt eine bekannte und reproduzierbare Reaktion auf externe Messgrößen wie Temperatur und Dehnung. Die Brillouin-Wechselwirkung führt zur Erzeugung von Streulicht, das eine etwas andere Wellenlänge hat als das ursprüngliche Licht, und die Abweichung von der ursprünglichen Wellenlänge ist direkt von der Dehnung und der Temperatur der Faser abhängig.

7.10.2 Fragestellungen in den Fachbereichen

Fragestellungen im Bereich Tunnel

Faseroptische Sensoren werden für die Überwachung des Baugrunds und von Bauwerksteilen im Tunnelbau angewendet. Dehnungsänderungen und/oder Temperaturänderungen können durch die punktuelle oder verteilte Messung erfasst werden. Faseroptische Sensoren können direkt in Bohrlöcher oder im Innern von Bauwerkselementen versetzt werden sowie an der Oberfläche von Bauwerksteilen. Falls die Faser fest mit metallischen Teilen (Ankerstab, Stahlbogen, Bewehrung) verbunden ist, kann aufgrund des elastischen Materialverhaltens des Trägers von der Dehnungen auf Spannungen geschlossen werden. Im Allgemeinen werden faseroptische Sensoren im Tunnelbau für folgende Einsatzzwecke verwendet:

- Kurz- und Langzeitüberwachung von Baugrundverformungen im Tunnelnabereich in Bohrlöcher (z.B. infolge Auflockerungszonen oder Gebirgsdeformationen: druckhaftes oder quellfähiges Gebirge), Verwendung analog Extensometer (siehe Kapitel 7.7);
- Kurz- und Langzeitüberwachung von Bauwerksverformungen im Tunnel (z.B. Ausbruchsicherung oder Verkleidung);
- Kurz- und Langzeitüberwachung von Anker (siehe auch Kapitel 7.43)
- Überwachung des Deformationsverhalten von Baugrubenwänden, Pfahlprüfungen und Dämmen;
- Kurz- und Langzeitüberwachung von Wassertemperaturen (siehe auch Kapitel 7.32).

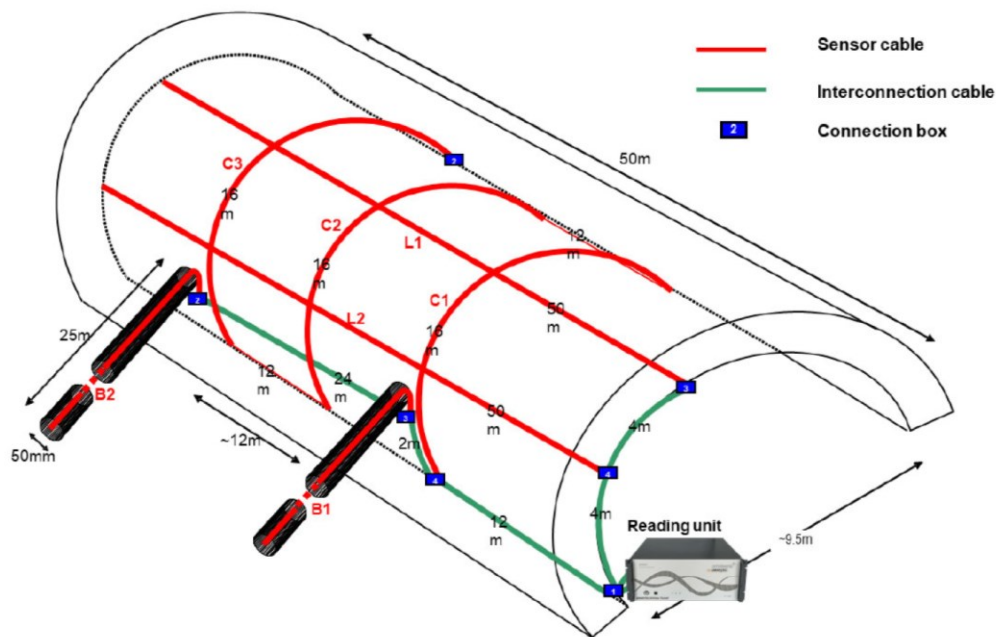


Abb. 7.36 Vorschlag für die Installation von faseroptischen Sensoren in einem Tunnel [53]

Fragestellungen im Bereich Naturgefahren

Faseroptische Sensoren wurden auch schon für die Überwachung von Rutschungen eingesetzt. Zur Überwachung von Felsinstabilitäten werden sie über die relevanten Trennflächen zwischen festem Fels und sich bewegender Felsmasse montiert.

7.10.3 Datenerfassung, Raumbezug, Messgrößen und – Genauigkeit

Das Datenerfassungsgerät für FO-Sensoren wird auch als Abfragesystem bezeichnet.

FBGs und FPIs

In diesem Fall sendet das Abfragegerät kontinuierlich Licht in verschiedenen Wellenlängen aus, so dass ein breites Spektrum abgedeckt wird. Das Licht breitet sich durch die Faser aus, wird an einem Punkt von einem FBG oder einem Luftpohlraum im FPI-Fall reflektiert und kehrt zum Abfragesystem zurück.

Dank der unterschiedlichen Perioden der einzelnen FBGs/FPIs ist es möglich, zwischen den Signalen der verschiedenen Sensoren zu unterscheiden. Der Rest des Lichts wird beim Erreichen des Faserendes gebrochen, so dass es die Messung nicht stört. Die tatsächliche Dehnung kann aus den rohen Lichtsignalen abgeleitet werden, die von den FBGs zurückkommen.

Darüber hinaus können diese Sensoren in Reihe (in einer Kette) geschaltet werden, indem Multiplexing-Verfahren verwendet werden, die im Wellenlängenbereich arbeiten, um die einzelnen Sensorsignale zu trennen. Die Genauigkeit typischer FBG-Sensoren, die bei Brückenarbeiten verwendet werden, kann je nach Abfrageeinheit $0,2 \mu\epsilon$ / $2 \mu\epsilon$ erreichen. Der Messbereich für die Dehnung reicht von 0,5 % bei der Verkürzung bis 0,75 % bei der Dehnung, was $-2500 \mu\epsilon$ bis $+3000 \mu\epsilon$ (für eine Kettenkonfiguration) entspricht. Die Sensoren funktionieren in einem Temperaturbereich von -40°C bis $+80^\circ\text{C}$.

Verteilte FO-Sensoren (Distributed Strain Sensing - DSS)

Die Ausleseeinheit ist mit dem proximalen Ende des Sensors verbunden und kann weit entfernt vom Messbereich platziert werden, da ein Abschnitt eines Glasfaserkabels verwendet werden kann, um die Ausleseeinheit ohne Leistungseinbußen mit dem Sensor selbst zu verbinden. Die Verwendung von optischen Verstärkermodule zur Reichweitenverlängerung ermöglicht die Überwachung einer Entfernung von bis zu 300 km mit einem einzigen Instrument [44].

Je nach ausgewählter optischer Faser kann die Technologie eine minimale Dehnung und Temperaturänderung von $1 \mu\epsilon$ bzw. $0,1 \text{ }^{\circ}\text{C}$ erkennen. Die räumliche Auflösung, die maximale Datenerfassungsrate und die maximale Messlänge können jeweils ca. 1 mm, 125 Hz und 50 m erreichen.

- Bei Systemen, die auf Brillouin-Streuung beruhen, kann der Messbereich bis zu mehr als 300 km betragen, allerdings ist die erreichbare räumliche Auflösung oft auf einige Zentimeter begrenzt.
- Systeme, die auf der Rayleigh-Streuung basieren, sind derzeit auf einen Messbereich von maximal 2 km beschränkt, bieten dafür aber eine beispiellose räumliche Auflösung, die bis in den submillimeter Bereich reichen kann und damit neue Möglichkeiten für die Entwicklung von Schadenserkennungssystemen bietet.

7.10.4 Entwicklungsstand, Anwendungsgrenzen, Kosten

FBGs und FPIs

Vorteile gemäss [45]

- FBGs (und FPIs) sind mit neuen Verbundwerkstoffen wie glas- oder kohlenstofffaser-verstärkten Verbundwerkstoffen kompatibel, die zur Verstärkung bei Kunstbauten verwendet werden. FBGs können direkt in Verbundwerkstoffe integriert oder direkt oder als Patches auf der Oberfläche des Prüfobjekts wie normale Dehnungsmessstreifen befestigt werden.
- FBGs können sehr hohe Dehnungen messen ($>10.000 \mu\epsilon$) und eignen sich daher sehr gut für hochbelastete Verbundtragwerke.
- FBGs sind klein und leicht.
- FBGs sind unempfindlich gegen elektromagnetische Störungen (sogar gegen Blitzeinschläge).
- FBGs sind inhärent passiv (keine elektrische Energie erforderlich) und können daher in rauen Umgebungen, wie z. B. in Hochspannungs- und explosionsgefährdeten Bereichen, eingesetzt werden.
- FBG-Signale sind nicht entfernungsabhängig (bis zu $>50 \text{ km}$ Verbindungslänge sind möglich).
- Auf einer einzigen Faser können viele Fiber Bragg Gratings in einer Reihe angeordnet werden ($>20 \text{ FBG}$; mit speziellen Abfragetechnologien bis zu $>100 \text{ FBG}$). Es wird keine Rücklauffaser benötigt. Aus Gründen der Redundanz wird jedoch häufig eine Rückleitfaser bevorzugt.
- Die langfristige Stabilität (Anwendung $> 10\text{-}20 \text{ Jahre}$ [54]) ist sehr hoch.
- FO-Sensoren haben eine gute Korrosionsbeständigkeit.
- Spezielle Versionen von FBGs können bei sehr hohen Temperaturen ($>700 \text{ }^{\circ}\text{C}$) eingesetzt werden.
- FBGs werden auch vorteilhaft in kryogenen Umgebungen eingesetzt, da die Wärmeleitfähigkeit der einzelnen Faser, die viele Sensoren speist, gering ist und die optischen Eigenschaften mit sehr geringen Resttemperaturabhängigkeiten nahe der Temperatur von flüssigem Helium stabil sind.
- Einfacher Einbau (Zeit, Verkabelung, Prüfung). Die Sensoren können schnell und einfach installiert werden, ohne den Bauablauf zu beeinträchtigen. Sie können direkt in Beton und Mörtel eingebettet oder auf der Oberfläche montiert werden.

Nachteile gemäss [45]

- FBGs und FPIs sind in Bezug auf Preis und Präzision nicht ganz konkurrenzfähig mit Dehnungsmessstreifen aus Metall.
- FBG zeigen eine hohe Temperaturabhängigkeit. Die Temperaturkompensation erfordert spezielle Konfigurationen und beruht in der Regel auf dem Auslesen von zwei FBG-Sensoren.
- FBG können keine Selbstkompensation der scheinbaren Dehnung bieten. Die Temperaturkompensation muss über separate Temperaturmesskanäle und entsprechende Berechnungen erfolgen.

- Die geringe Grösse von Dehnungsmessstreifen kann mit FBG-Patches nicht erreicht werden.
- Die Steifigkeit von FBG-Sensoren ist höher als die von Folien-Dehnungsmessstreifen, was zu einer höheren Parallelkraft auf die Probe führt.
- Der Sensorfaserkern befindet sich in einem grösseren Abstand zur Probenoberfläche. Dies kann zu Kalibrierungsfehlern führen, wenn das Pflaster auf gekrümmten Oberflächen angebracht wird.
- Der Radius der Faser sollte >10 mm betragen; FBG-Rosetten sind daher meist recht gross.
- Abfragegeräte für FBG-Sensoren sind kostenintensiv (bei vielen Sensoren pro Abfragegerät können die Kanalkosten einschliesslich der Installation jedoch niedriger sein als bei Folien-Dehnungsmessstreifen).

Der Preis eines Interrogators für diese FO-Technologie liegt im Bereich von 25'000 bis 30'000 CHF, je nach Anzahl der Kanäle und den dynamischen oder statischen Erfassungsmöglichkeiten. Die Sensoren selbst erfordern eine spezielle Vorbereitung und Konfiguration, was sie teurer macht als einfache optische Fasern. Die Kosten für einen typischen FBG-Single-Ended-Sensor (von 20 cm aktiver Länge) ohne Temperaturkompensation liegen bei ca. 700 bis 900 CHF. Die Verwendung von doppelendigen Sensoren erhöht die Kosten um etwa 200 bis 300 CHF, während die Verwendung eines Temperatursensors zur Temperaturkompensation die Kosten um 200 CHF erhöht.

Verteilte Dehnungssensoren (DSS)

Vorteile

- DSS haben den primären Vorteil, dass sie Dehnungen/Temperaturen entlang eines handelsüblichen FO-Sensors ohne Gitter messen können.

Beschränkungen/Nachteile

- Sie weisen eine Querempfindlichkeit zwischen Dehnung und Temperatur auf. Die Messung verteilter Temperaturen unter -20°C oder über 60°C erfordert ein spezielles Kabeldesign, insbesondere für Systeme mit Brillouin-Streuung.
- Die Abfragegeräte für diese Art von Technologie sind recht kostspielig und übersteigen 100'000 CHF für eine begrenzte Anzahl von Kanälen. Für kurzfristige Überwachungszeiträume gibt es jedoch Mietlösungen, deren Kosten je nach Anbieter variieren.
- Die Signalverarbeitung kann aufgrund der überwältigenden Menge an Daten, die erfasst und verarbeitet werden können, eine Herausforderung darstellen. Mit dem Raleigh-Rückstreu-DSS können Dehnung oder Temperatur alle 1,25 mm in einer 10 m langen Faser bei einer maximalen Erfassungsrate von 23,8 Hz oder alle 5 mm bis zu einer Länge von 10 m bei 100 Hz überwacht werden [55].
- Die maximal nachweisbare Dehnung beträgt typischerweise ca. 1,2 %, daher können extreme Dehnungen, z. B. über die Streckgrenze von Stahl hinaus, nicht gemessen werden.
- Die Faser selbst ist zerbrechlich. Fasern sind empfindlich auf Knicken, sehr dünn und übersehbar; Handling im harschen Baustellenumfeld ist nicht trivial. Besondere Vorsicht ist bei der Vorbereitung sowie bei der Einbettung, z.B. beim Giessen des Betons, geboten. Die Ausrichtung der Faser sollte berücksichtigt werden; wenn der Fasersensor unglücklicherweise in der Mitte beschädigt wird, verliert das entfernte Ende das Signal, während das Anschlussende noch funktionsfähig sein kann.

Der Preis eines Interrogators liegt im Bereich von 100'000 bis 150'000 CHF, abhängig von der Anzahl der Kanäle. Die Kosten für faseroptische Sensoren hängen davon ab, ob man vorgefertigte Sensorprodukte von einem Anbieter kauft oder ob man Fasersensoren aus den gekauften Rohfasern selbst herstellt. Die Kosten für vorgefertigte Sensoren liegen bei ca. 12'500 CHF / km. Die Kosten für Rohfasern liegen bei 400 CHF / km. Die Vorbereitung eines FO-Sensors benötigt ca. 20 - 30 Minuten für gut ausgebildetes Personal. Die Spleissmaschine kostet ca. 500 bis 1'000 CHF. Die Installation eines FO-Sensors dauert

10-60 Minuten, abhängig von der Länge des LWL-Sensors und der Stelle, an der er montiert bzw. geklebt wird.

7.10.5 Ergänzende Ausschreibungsanforderungen

Siehe Kapitel 7.1.5

Ergänzend zu den Anforderungen an die Messtechnologie sind auch die Anforderungen zum Schutz während der Montage bzw. Einbau (z.B. Schutz während Betonieren, Funktionsprüfung auf Baustelle vor Montage, etc.) zu definieren. Die Auswertung, Bereitstellung, Darstellung, Bewertung und Übergabe der Daten (z.B. Rohdaten, ausgewählte Daten, Format, etc.) muss zwingend definiert sein. Bei allfälliger Einrichtung von Aufmerksamkeits- und Alarmwerten muss in der Regel eine Testphase eingeplant werden, damit äussere Einflüsse wie Erschütterungen, Druck-/Sogeinwirkungen von Lastwagen etc. identifiziert und gefiltert werden können.

7.10.6 Literaturverzeichnis

Sonstige Literatur / Forschungsberichte

- [40] Lee, B.H.; Kim, Y.H.; Park, K.S.; Eom, J.B.; Kim, M.J.; Rho, B.S.; Choi, H.Y. (2012) Interferometric Fiber Optic Sensors. *Sensors*, 12, 2467-2486.
- [41] Gangopadhyay, T.K. Prospects for Fibre Bragg Gratings and Fabry-Perot Interferometers in fibre-optic vibration sensing, *Sensors and Actuators A: Physical*, Volume 113, Issue 1, 2004, pp 20-38, ISSN 0924-4247
- [42] ODiSi 6100 User Guide. <https://www.lunainc.com/sites/default/files/assets/files/resource-library/ODiSi%206100%20User%20Guide.pdf>
- [43] HBM Support - https://www.hbm.com/en/6827/article-how-does-an-optical-strain-gauge-actually-work/?product_type_no=How%20Does%20an%20Optical%20Strain%20Gauge%20Work
- [44] Inaudi, D., and Glisic, B. (December 9, 2009). Long-Range Pipeline Monitoring by Distributed Fiber Optic Sensing. *ASME. J. Pressure Vessel Technol.* February 2010; 132(1): 011701
- [45] Kreuzer, M., Inaudi, D., and Glisic, B. (December 9, 2009). "Long-Range Pipeline Monitoring by Distributed Fiber Optic Sensing." *ASME. J. Pressure Vessel Technol.* February 2010; 132(1): 011701, HBM Germany, http://micronoptics.ru/uploads/library/documents/FBGS_StrainMeasurement_mo.pdf
- [46] Berrocal, C.G., Fernandez, I., Rempling, R. (2021) Crack monitoring in reinforced concrete beams by distributed optical fiber sensors, *Structure and Infrastructure Engineering*, 17:1, 124-139
- [47] Andre Brault and Neil Hoult. Monitoring Reinforced Concrete Serviceability Performance Using Fiber-Optic Sensors. *International Concrete Abstracts Portal*: 116 (1), 2019.
- [48] Jaime Mata-Falcón, Severin Haefliger, Minu Lee, Tena Galkovski, Nicola Gehri. Combined application of distributed fibre optical and digital image correlation measurements to structural concrete experiments. *Engineering Structures* 225 (2020) 111309.
- [49] Grosso, Andrea E. Del and Agostino Pietrogrande. "Monitoring System for a Cable-Stayed Bridge using static and dynamic Fiber Optic Sensors." (2005).
- [50] Meier, U. Carbon Fiber Reinforced Polymer Cables: Why? Why Not? What If?. *Arab J Sci Eng* 37, 399–411 (2012). <https://doi.org/10.1007/s13369-012-0185-6>
- [51] Zhou Z, He J, Chen G, Ou J. A Smart Steel Strand for the Evaluation of Prestress Loss Distribution in Post-tensioned Concrete Structures. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*. 2009;20(16):1901-1912. doi:10.1177/1045389X09347021
- [52] S. Nakaue, K. Oshima, M. Oikawa, M. Nishino, Y. Matsubara, und M. Yamada, "SmART Strand" Prestressing Steel Strand with Optical Fiber for Tension Monitoring, *Sumitomo Electric Technical Review*, Number 92, 2021, https://sumitomoelectric.com/sites/default/files/2021-04/download_documents/E92-12.pdf
- [53] Marano, Giuseppe & Cimellaro, G. & Inaudi, Daniele & Casciati, Sara & Domaneschi, Marco & Catbas, Necati. (2020). Structural health monitoring of in-service tunnels. *International Journal of Sustainable Materials and Structural Systems*. 4. 268. 10.1504/IJSMSS.2020.10031279.
- [54] Smartec, Case Studies, Colle d'Isarco Viaduct (2017), <https://smartec.ch/en/colle-disarco-viaduct/> (Zugriff 11.10.2023)
- [55] Palmieri, L.; Schenato, L.; Santagiustina, M.; Galtarossa, A. Rayleigh-Based Distributed Optical Fiber Sensing. *Sensors* 2022, 22, 6811. <https://doi.org/10.3390/s2218681>

A 2 Massenbewegungen (Steinschlag, Murgänge, Lawinen, Rutschhang, etc.)

Tab. 7.18 Massenbewegungen - Übersicht

Fragestellung		A2 Massenbewegungen (Steinschlag, Murgänge, Lawinen, Rutschhang, etc.)					
Kurzbeschreibung Fragestellung		Mögliche Massenbewegungen (Steinschlag, Murgänge, Lawinen, Rutschhang, etc.) im Bereich von Infrastrukturen stellen für den Bau und Betrieb eine grosse Gefährdung dar. Die Erstellung eines Bauwerks kann zudem einen Einfluss auf bereits bestehende oder neue Massenbewegungen (z.B. Rutschhang) haben. Bereits vor dem Bau müssen mögliche Massenbewegungen erkannt und überwacht werden. Während dem Bau und ebenso während dem Betrieb kann eine Überwachung möglicher Massenbewegung mittels geeigneter Messtechnik erfolgen, welche häufig auch direkt in ein Alarmsystem eingebunden ist.					
Überwachungstechnologie		Bewegungs-Radar (Doppleradar)	Geophone	Pegel-Radar	Infrasound	Wetterstation	
Typisierung		BWR_	BMG_	PRA_	IFS_	WTS_	
Messgrößen und -genauigkeit	a. Messprinzip	1 direkt	1 direkt	1 direkt	2 indirekt	3 unbestimmt	
	b. Datenerfassung	10 radar	3 elektromagnetisch	10 radar	13 akustisch		
	c. Datenspeicher	1 digital	1 digital	1 digital	1 digital	1 digital	
	d. Lokalisation	4 flächenbezogen	1 punktuell	1 punktuell	4 flächenbezogen	1 punktuell	
	e. Raumbezug	3 nicht zerstörend	3 nicht zerstörend	3 nicht zerstörend	3 nicht zerstörend	3 nicht zerstörend	
	f. Zustand	3 nicht zerstörend	3 nicht zerstörend	3 nicht zerstörend	3 nicht zerstörend	3 nicht zerstörend	
Tunnel	Größen	Bewegung	Geschwindigkeit	Pegel	Schallwellen	Diverse	
	Untersuchungs-/Tiefenbereich	bis 5 km bis 10 km ²	-	-	3 - 5 km	-	
	Auflösung	-	0.0004 mm/s	-	-	-	
	Genauigkeit	-	-	< 1mm	-	-	
Bemerkungen		gewisse Ereignis-grösse/dauer erf.	Messbereich 0.1-200 mm/s	-	Messbereich 0.001-20 Hz	-	
Tunnel		1	3	2	1	2	
Geotechnik		1	2	1	1	1	
Naturgefahren		4	4	4	4	3	
Umwelt		0	4	1	0	4	
Einsatzzeitpunkt		W	W	W	W	W	
Entwicklungsstand		●	●	●	●	●	
Kosten	initial / einmalig	●	●	●	●	●	
	wiederkehrend	●	●	●	●	●	

Fragestellung							
Kurzbeschreibung Fragestellung							
Überwachungstechnologie		Laserscanning	Reisseilen	Kapazitive Drucksensoren	Piezoelektrische Drucksensoren	Terrestrische Radarinterferometrie	
Typisierung		LSC_	RSL_	DSK_	DSP_	TRI_	
Messgrößen und -genauigkeit	a. Messprinzip	1 direkt	1 direkt	2 indirekt	2 indirekt	1 direkt	
	b. Datenerfassung	7 laseroptisch	1 mechanisch	2 elektrisch	2 elektrisch	10 radar	
	c. Datenspeicher	1 digital	1 digital	1 digital	1 digital	1 digital	
	d. Lokalisation	4 flächenbezogen	1 punktuell	1 punktuell	1 punktuell	4 flächenbezogen	
	e. Raumbezug	3 nicht zerstörend	3 nicht zerstörend	3 nicht zerstörend	3 nicht zerstörend	3 nicht zerstörend	
	f. Zustand	3 nicht zerstörend	3 nicht zerstörend	3 nicht zerstörend	3 nicht zerstörend	3 nicht zerstörend	
Tunnel	Größen	Deformation	Kraft	Druck	Druck	Deformationen	
	Untersuchungs-/Tiefenbereich	km, Horizontal 360°, Vertikal ca.	Überschreitung vorgegeben Zugkraft	-	-	-	
	Auflösung	3 mm, 0.1°	-	-	-	1x 4.4 m	
	Genauigkeit	1mm + 0 mm/km, 10°	-	± 0.1%	± 1%	0.5 - 2 mm	
Bemerkungen		3D Punktingenauigkeit ca. 2 mm @ 10m, 5mm @ 100m	-	Messbereich 250 kPa bis 70 MPa	Messbereich 0.7 kPa bis 70 MPa	-	
Tunnel		4	1	2	2	2	
Geotechnik		3	1	2	2	2	
Naturgefahren		3	4	2	2	3	
Umwelt		0	0	3	1	0	
Einsatzzeitpunkt		V	W	V	V	W	
Entwicklungsstand		●	●	●	●	●	
Kosten	initial / einmalig	●	●	●	●	●	
	wiederkehrend	●	●	●	●	●	

Fragestellung						
Kurzbeschreibung Fragestellung						
Überwachungs-technologie		Satellitengestützte Radarinterferometrie	Deformationskameras	Geodätische Aufnahmen (Tachymeter)	Nivellement	Fugen- und Rissmessgeräte
"ID"		SRI_	DFK_	TAC_	NIV_	FUG_
Typisierung	a. Messprinzip	1 direkt	1 direkt	1 direkt	1 direkt	1 direkt
	b. Datenerfassung	10 radar	5 optisch	2 elektrisch	5 optisch	2 elektrisch
	c. Datenspeicher	1 digital	1 digital	2 analog (Datenschreiber)	3 analog (Ablesung)	1 digital
	d. Lokalisation	4 flächenbezogen	4 flächenbezogen	1 punktuell	1 punktuell	1 punktuell
	e. Raumbezug					
	f. Zustand	3 nicht zerstörend	3 nicht zerstörend	3 nicht zerstörend	3 nicht zerstörend	3 nicht zerstörend
Messgrößen und -genauigkeit	Größen	Deformationen	Deformation	Deformationen	Setzungen / Hebungen	Deformationen
	Untersuchungs-/Tiefenbereich	-	-	bis 10 km	bis 100 m	-
	Auflösung	1-100 m	2 x 2 m	0.1"	-	< 0.025%
	Genauigkeit	2 - 8 mm	1-10 cm	1mm + 15 mm/km, 0.5"	±/- 0.2 - 2 mm / km	±/- 0.1%
	Bemerkungen	-	-	-	-	Messbereich bis 300 mm
Tunnel		2	1	4	3	4
Geotechnik		2	1	4	3	2
Naturgefahren		3	3	3	3	3
Umwelt		2	0	1	1	0
Einsatzzeitpunkt		V	V	V	V	V
Entwicklungsstand		●	●	●	●	●
Kosten	initial / einmalig	●	●	●	●	●
	wiederkehrend	●	●	●	●	●

Fragestellung				
Kurzbeschreibung Fragestellung				
Überwachungs-technologie		Distometer	Neigungsänderungen (Clinometer)	Faseroptische Sensoren
"ID"		DIS_	CLI_	FOS_
Typisierung	a. Messprinzip	1 direkt	1 direkt	2 indirekt
	b. Datenerfassung	1 mechanisch	2 elektrisch	6 faseroptisch/phonisch
	c. Datenspeicher	3 analog (Ablesung)	1 digital	1 digital
	d. Lokalisation	1 punktuell	1 punktuell	2 streckenbezogen
	e. Raumbezug			
	f. Zustand	3 nicht zerstörend	3 nicht zerstörend	3 nicht zerstörend
Messgrößen und -genauigkeit	Größen	Distanzänderung	Neigungsänderung	Deformationen
	Untersuchungs-/Tiefenbereich	bis 50 m	-	100 m bis zu 30 km
	Auflösung	0.01mm	-	-
	Genauigkeit	±/- 0.02 mm	±/- 0.2 %	bis 0.001mm/mm
	Bemerkungen	Messbereich bis 100 mm	Messbereich ±/- 1°	verteilt / quasi-kontinuierlich
Tunnel		3	3	2
Geotechnik		2	2	2
Naturgefahren		1	1	1
Umwelt		0	0	1
Einsatzzeitpunkt		V	V	V
Entwicklungsstand		●	●	●
Kosten	initial / einmalig	●	●	●
	wiederkehrend	●	●	●

7.11 Doppler-Radar

7.11.1 Beschrieb der Technologie

Mit einem Doppler-Radar lassen sich automatisch Massenbewegungen wie Lawinen, Steinschlag, Murgänge oder auch generell sich bewegende Objekte bei jedem Wetter und bei jeder Sicht detektieren. Dabei überwacht ein Radargerät permanent einen vordefinierten Bereich. Der Doppler-Radar sendet elektromagnetische Wellen (mit einer Frequenz von 10 GHz), welche von Objekten reflektiert werden. Die reflektierte Strahlung von bewegten Objekten hat eine andere Frequenz als die gesendete Strahlung (Doppler-Effekt), welche zur Detektion von sich bewegenden Objekten genutzt wird. Die Daten werden zur Auswertung und Visualisierung auf einen Server übermittelt. Damit können Ereignisgrösse und Auslaufstrecke abgeschätzt werden. Die Radaranlage wird, wenn möglich im Tal oder am Gegenhang installiert.

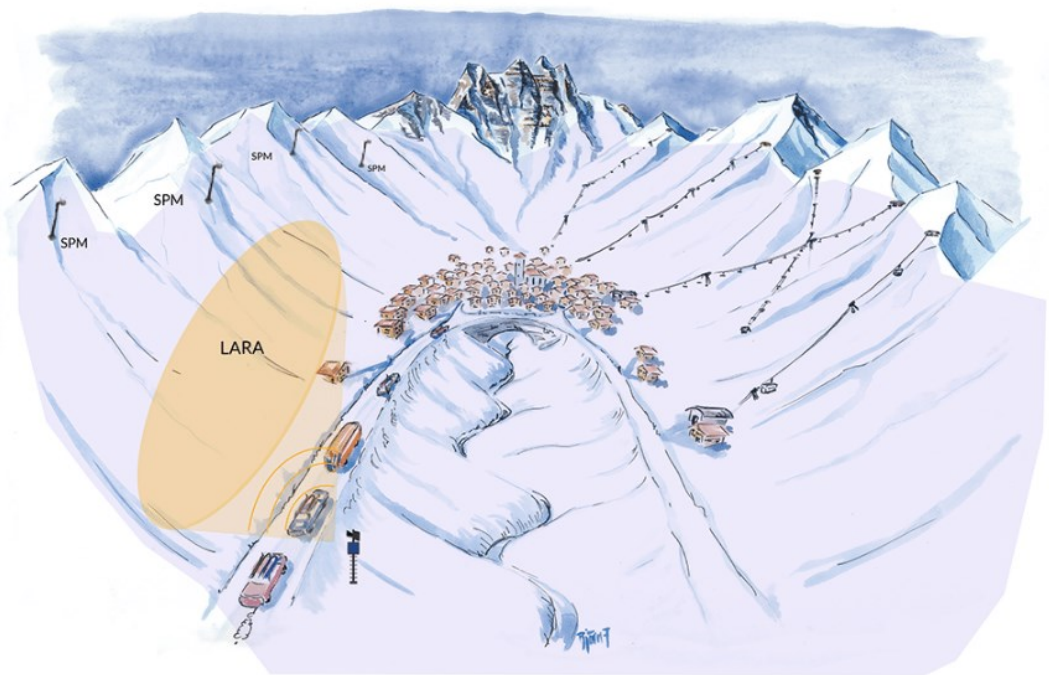


Abb. 7.37 Schema-Skizze eines Doppler-Radars zur Überwachung von Lawinenzügen oberhalb einer Strasse [59].

7.11.2 Fragestellungen in den Fachbereichen

Fragestellung im Bereich Naturgefahren

Das Dopplerradar eignet sich, um den Abgang von Lawinen, Steinschlag oder Murgänge zu detektieren und den Prozess während des Absturzes zu tracken. Bei genügender Vorwarnzeit können so bei einem Abgang Strassen und Bahnlinien innert Sekunden automatisch gesperrt und Personen im Gefahrengebiet alarmiert werden. Die Massnahme wird oftmals in Kombination mit anderen Sensoren (z. B. Erschütterungssensoren, Reissleinen, Webcams) eingesetzt, um redundante und genügend eindeutige Alarmierung zu erhalten.

Das Lawinenradar kann weiter zur automatischen Detektion von Lawinen in einem grösseren Raum (Reichweite von bis zu 5 km) verwendet werden. Damit kann die Lawinenaktivität in diesem Gebiet verfolgt und überwacht werden, was für einen Lawinenwarndienst oftmals sehr wertvolle Zusatzinformationen ergibt.

Das Lawinenradar wird des Weiteren bei künstlichen Lawinenauslösungen eingesetzt, um den Lawinenerfolg zu verifizieren. Dies ist insbesondere bei Dunkelheit oder schlechten Wetterbedingungen (Nebel, Schnee, Regen) ohne Radar schwer möglich.

Limitierend für die Anwendung dieser Technologie kann unter anderem sein, dass:

- zu wenig Vorlaufzeit besteht. Die Zeitdauer zwischen der Ereigniserfassung mit dem Radar, der Datenübertragung und der Auslösung des Alarmsignals darf die Zeitdauer, welche das Ereignis von der Erfassung bis zum Schadenpotential benötigt, nicht übersteigen.
- es keine geeigneten Gerätestandorte gibt, so dass eine direkte Sichtlinie (möglichst in Bewegungsrichtung) vom Radar zur Absturzbahn (Transitgebiet) besteht.
- die Ereignisgrösse zu klein ist, um detektiert zu werden.

Fragestellung im Bereich Tunnel

Doppler-Radare eignen sich zur permanenten Überwachung von Lawinen, Murgängen und Steinschlägen im Einzugsgebiet von Tunnelportalen. Eine Einbindung in ein Alarmsystem mit Lichtsignalen oder Schranken ist möglich, damit die Strassenteilnehmende in einem sicheren Warteraum zurückgehalten werden können. Auch können mit Doppler-Radaren vor einer kontrollierten Lawinensprengung Personen / Autos in einem Lawinenzug detektiert und entsprechend vorgewarnt werden.

7.11.3 Datenerfassung, Raumbezug, Messgrössen und – Genauigkeit

- Die Messdaten werden vom Sensor über ein Kabel in Echtzeit an die Auswerteeinheit geschickt und von dort über Mobilfunk oder Satellitenverbindung zum Server zur Datenverarbeitung oder für die automatische Benachrichtigung (SMS, E-Mail, Publikationen in Datenbanken). Die Stromversorgung der Anlage kann via Solarzelle, Netzanschluss oder einer Brennstoffzelle erfolgen.
- Mit einem Doppler-Radar können Bereiche von bis zu 10 km² überwacht werden. Der Raumbezug ist gegeben durch den Standort der Sensoren und die Ausrichtung der Sensoren.
- Die Reichweite beträgt rund 3 - 5 km (u. a. abhängig von der Ereignisgrösse, zur Detektion von Personen beträgt die Reichweite nur 1 km).

7.11.4 Entwicklungsstand, Anwendungsgrenzen, Kosten

Bei der Überwachung mit Doppler-Radaren handelt es sich um eine erprobte, sehr zuverlässige Detektionstechnologie von Lawinen, Murgängen und Steinschlägen aber auch von Personen.

Mit einem Doppler-Radar lassen sich nur Ereignisse im Zielgebiet des Radars erfassen, abgeschattete Gebiete können nicht eingesehen werden. Eine bestimmte Ereignisgrösse und -dauer (ein paar Sekunden) ist nötig, damit das Ereignis erfasst wird. Für die Einbindung in ein Alarmsystem ist eine gewisse Vorwarnzeit nötig: Dabei darf die Zeitdauer zwischen der Ereigniserfassung, der Datenübertragung und der Auslösung des Alarmsignals die Zeitdauer, welche das Ereignis vom Standort der Erfassung bis zum Schadenpotential hat, nicht übersteigen.

Für Überwachungssysteme dieser Art ist es sehr schwierig, generische Preise zu nennen. Sie sind stark abhängig von den lokalen Begebenheiten (Stromanschluss, abzudeckendes Gebiet, permanente oder periodische Messung, Einbindung in ein Alarmsystem, Anforderungen an Redundanz). Die Anschaffungskosten für ein Überwachungssystem mit Doppler-Radaren liegen in der mittleren Preisklasse (wenige CHF 10'000er). Die Kosten für die Einbindung in ein Alarmsystem sowie die Betriebskosten sind sehr variabel und können nicht generisch aufgeführt werden.

7.11.5 Ergänzende Ausschreibungsanforderungen

Siehe Kapitel 7.1.5

7.11.6 Literaturverzeichnis

Sonstige Literatur / Forschungsberichte

- [56] Sättele M., Bründl M. (2015) Praxishilfe für den Einsatz von Frühwarnsystemen für gravitative Naturgefahren, WSL-Institut für Schnee- und Lawinenforschung SLF, Bundesamt für Bevölkerungsschutz / BABS, Bern
-
- [57] Bundesamt für Umwelt (BAFU): Überwachungssysteme für gravitative Naturgefahren – Handbuch. Bern, 34 Seiten.
-
- [58] Webseite von Geopraevent, <https://www.geopraevent.ch/technologien/alarm>, (Zugriff 13.05.2022).
-
- [59] Webseite von Wyssen Avalanche Control AG, <https://www.wyssenavalanche.com/lawinendetektion/ida-infraschall-detektionssystem/>, (Zugriff 13.05.2022).
-

7.12 Geophone

7.12.1 Beschrieb der Technologie

Geophone sind elektro-mechanische Sensoren, welche die Messung der Schwinggeschwindigkeit bei Erschütterungen (i.d.R. Bodenbewegungen) erlauben.

Ein Geophon besteht im klassischen Fall aus einer Spule und einem Permanentmagneten, welche durch eine Feder gekoppelt sind. Erschütterungen verursachen eine Relativbewegung zwischen Spule und Magnet und erzeugen somit eine Spannung, die proportional zur Geschwindigkeit der Bewegung ist. Auf diese Weise werden Bodenschwingungen in elektrische Signale umgewandelt, welche registriert, ausgewertet und gegebenenfalls als Auslöser für ein Überwachungs- oder Alarmsystem angewendet werden können.

Charakterisiert werden Geophone durch den abgedeckten Messbereich (Amplitude und Frequenz) und durch den Anwendungsbereich, in welchen sie eingesetzt werden müssen. Ein einzelnes Geophon kann die Geschwindigkeit einer Schwingung in einer einzelnen Richtung messen. Durch die Kombination von zwei oder drei Geophonen separat oder im selben Gerät können zwei- oder dreidimensionale Schwingungen gemessen werden.

Zur präzisen Messung der Schwinggeschwindigkeit ist ein guter Verbund zwischen der Oberfläche des zu überwachenden Mediums und dem Geophon erforderlich. Die Bedeckung oder Dämpfung des Geophons kann die Messungen beeinträchtigen.



Abb. 7.38 Darstellung eines dreidimensionalen Geophons (links,[60]), Geophons für geophysische Untersuchungen (rechts oben, [61]), eindimensionale Geophons ohne Gehäuse, (rechts unten, [61]).

7.12.2 Fragestellungen in den Fachbereichen

Fragestellung im Bereich Tunnel

Geophone werden während des Baus zur Überwachung und Beweissicherung von Bauwerken im Tunnelnahbereich eingesetzt. Erschütterungen werden oft bei der Durchführung von Aushub – und Ausbrucharbeiten in den Portalbereichen, Erstellung von Baugruben, Abbrucharbeiten, Sprengungen, usw. erzeugt.

Die Geophone werden in der Regel im Bereich eines benachbarten Bauwerks (z.B. Foundation/Keller eines Gebäudes, Zwischendecke eines Tunnels) platziert und registrieren die Geschwindigkeit der Erschütterungen während der ganzen Bauzeit kontinuierlich. Anhand der registrierten Daten kann der Baustellenverantwortliche automatisch informiert werden, wenn die erzeugten Erschütterungen einen vordefinierten Grenzwert überschreiten. Dies ermöglicht eine Anpassung der Ausführungsweise der Bauarbeiten. Zu einem

späteren Zeitpunkt können die registrierten Daten als Grundlage für die Klärung der Verantwortlichkeit im Fall von Schäden an Nachbarbauwerken dienen.

Geophone können ebenfalls eingesetzt werden, um Erschütterungen aus Bergschlagereignissen während des Tunnelvortriebs zu erfassen und auszuwerten. Bei seismischen Vorauserkundungen werden Geophone verwendet, um die Reaktion des Baugrunds auf eingebrachte Erschütterungen zu messen. Dadurch lassen sich Informationen über mögliche Störzonen, Wassersättigung und Diskontinuitäten im Untergrund bestimmen.

Fragestellung im Bereich Naturgefahren

Erschütterungsmessungen werden auch zur Überwachung von offenen Strecken in Berggebieten eingesetzt, in welchen Murgänge und Lawinen die Verkehrssicherheit beeinträchtigen können. Im Fachbereich Tunnel ist dies besonders relevant im Portalbereich. Zu diesem Zweck werden die Geophone im Bereich der Sturzbahn im Erdreich installiert. Ebenfalls können Geophone gekoppelt mit Steinschlagnetzen für den Einsatz eines automatisierten Alarmsystems verwendet werden.

7.12.3 Datenerfassung, Raumbezug, Messgrössen

- Die Datenerfassung erfolgt automatisiert und quasi kontinuierlich. Das Messintervall kann eingestellt werden.
- Die Übertragung der Daten an einer Messstation erfolgt durch Kabel oder Funkantennen. Der Rechner muss an einer Witterungsgeschützte Stelle installiert werden;
- Der Raumbezug der Messung erfolgt über die Positionierung des Messgeräts;
- Die Messung erfolgt zerstörungsfrei.

Der Messbereich eines Geophons unterscheidet sich abhängig vom Verwendungszweck. Für die Erschütterungsmessungen zur Beweissicherung im Rahmen eines Bauvorhabens werden in der Regel Geophone mit einem Frequenzbereich zwischen 1 und 300 Hz und Geschwindigkeitsbereich (Amplitude) zwischen 0.01 und 200 mm/s.

Tab. 7.19 Messbereich / Genauigkeit von Erschütterungs-messungen mit Geophon

Messgrösse	Messbereich	Auflösung
Frequenz	1 – 300 Hz	-
Geschwindigkeit	0.1 – 200 mm/s	0.00004 mm/s

7.12.4 Entwicklungsstand, Anwendungsgrenzen, Kosten

Die Messung der Erschütterungen mittels Spulengeophone ist eine lang erprobte und etablierte Technologie. Entsprechend ist das Angebot für Spulengeophone für verschiedene Anwendungen gross. Immer häufiger kommen auch kapazitive und piezoresistive Sensoren (Beschleunigungssensoren) zum Einsatz, welche vor allem für Messungen in tiefen Frequenzbereichen Vorteile bieten können.

Geophone werden in der Regel von einem wetterbeständigen Gehäuse geschützt und können daher in alle Situation und Wetterlagen zum Einsatz kommen. Die Reichweite der Datenübertragung über Funk kann von der Sichtverbindung oder Installationshöhe beeinflusst werden.

Die Messung eines Geophons ist punktuell. Für eine flächige Messung müssen mehrere Geophone in eine Rasterkonfiguration platziert werden. Mehrere Geophone werden zudem benötigt, um die Redundanz des Überwachungssystems sicherzustellen, vor allem bei der Überwachung von Naturgefahren.

Die Auswertung der gemessenen Daten spielen bei der Erschütterungsmessung eine Entscheidende Rolle. Unerwünschte Erschütterungen können durch Menschen, Tiere, oder andere Aktivitäten erzeugt werden. Durch einen Auswertungsalgorithmus oder durch den Vergleich von mehreren Messgeräten müssen solche Erschütterungen erkannt

werden. Für den Einsatz in einem automatisierten Alarmsystem müssen die Signale in Echtzeit von einem Rechner automatisch erfasst, gefiltert und ausgewertet werden. Die Bestimmung der Pegelwerte hängt vom Einsatzzwecken ab. Nach heutigem Stand der Technik ist der Zugriff auf die Daten durch eine Web-Plattform und eine Alarmierung per E-Mail oder SMS bei Überschreitung der Pegelwerten üblich.

Diese Art von System wird in der Regel für eine bestimmte Zeitperiode (z.B. während des Baus) betrieben. Die Mietkosten für eine Erschütterungsmessanlagen (Annahme: 3 Messgeophone mit Aufzeichnungs- bzw. Auswertegerät) belaufen sich auf ca. 50 CHF / Tag. Weitere Kosten bestehen in der Installation, Unterhalt, Demontage, sowie in der Auswertung und Interpretation der erfassten Daten.

7.12.5 Ergänzende Ausschreibungsanforderungen

Siehe Kapitel 7.1.5

7.12.6 Literaturverzeichnis

Sonstige Literatur / Forschungsberichte

[60] Walesch Electronic GmbH, Technische Daten MST 7003, www.walesch.ch (Zugriff 13.06.2022)

[61] Sercel AG, "Geophones – Seismic Sensors", Produktkatalog 2022

7.13 Pegel-Radar

7.13.1 Beschrieb der Technologie

Mit einem Pegel-Radar lässt sich unabhängig vom herrschenden Wetter stets zuverlässig die Fliesshöhe eines Gewässers messen. Radar steht für 'radio detection and ranging' und bezieht sich auf verschiedene Detektions- und Ortungsverfahren. Ein Radargerät sendet kurze Radarimpulse (gebündelte elektromagnetische Wellen im Mikrowellenbereich, Frequenz: 24 GHz) aus, welche an der Wasser- oder Mur-Oberfläche reflektieren und vom Gerät wieder empfangen werden. Aus der Laufzeit berechnet sich der Abstand zur Oberfläche. Der Pegel-Radar kann z. B. unter einer Brücke oder an einem über dem Bachbett gespannten Stahlseil befestigt werden. Zur Abdeckung eines breiteren Flussbettes und aus Redundanzgründen wird die Installation von mindestens zwei Pegel-Radaren empfohlen.



Abb. 7.39 Der Pegel-Radar (rechts) misst die Distanz zur Wasseroberfläche. Die Webcam (links) liefert zusätzlich wertvolle Bilder [63].

7.13.2 Fragestellungen in den Fachbereichen

Fragestellung im Bereich Naturgefahren

Bei Hochwasser- und Murgangprozessen in einem Gerinne lässt sich unter günstigen Umständen entweder aus bestehenden Messreihen oder Modellierungen eine Beziehung zwischen erwarteten Fliesshöhen (an einem gegebenen Ort und bei einer gegebenen Eintretenswahrscheinlichkeit) und möglichen Ausbruchsszenarien aus dem Gerinne im Unterlauf herstellen. Besteht genügend Vorlaufzeit zwischen dem Ort der Pegelmessung und dem möglichen Ausbruchs- / Schadensort, so kann ein Pegelradar, welches die Fliesshöhe von Wasser (mit oder ohne Geschiebe) detektiert und misst, eingesetzt werden, um die verantwortlichen Stellen zu warnen und notwendige organisatorische Massnahmen (z. B. Strassensperrung, Geschiebebaggerung, Evakuierung) in die Wege zu leiten. Die Massnahme wird oftmals in Kombination mit anderen Sensoren (z. B. Laser, Drucksonden, Reissleinen, Webcams) und Prognosemodellen eingesetzt, um redundante und genügend eindeutige Warnungen zu erhalten.

Limitierend für die Anwendung dieser Technologie kann unter anderem sein, dass:

- die Beziehung zwischen Abflusshöhe und einem bestimmten Schaden- / Ausbruchsszenario zu wenig klar sind.
- zu wenig Vorlaufzeit besteht. Die Zeitdauer zwischen der Ereigniserfassung beim Pegel-Radar, der Datenübertragung und der Auslösung des Warn- oder Alarmsignals darf die Zeitdauer, welche das Ereignis vom Standort des Pegel-Radars bis zum Schadenpotential benötigt, nicht übersteigen.
- kein geeigneter Ort entlang des Gerinnes für die Montage gefunden werden kann.

- die Gerinnesohle nicht stabil ist.

Fragestellung im Bereich Tunnel

Im Bereich von Tunnelportalen können Pegel-Radare zum Schutz vor Flutwellen oder Murgängen in Warn- oder Alarmsysteme eingebunden werden. Strassenteilnehmende können mit Lichtsignalen, Schranken oder ähnlichem vor einem akuten Ereignis gewarnt und in einem sicheren Wartebereich zurückgehalten werden. Zudem können Pegel-Radare für die Abflussmessung von Bergwasser (siehe Kapitel 7.33) verwendet werden.

7.13.3 Datenerfassung, Raumbezug, Messgrössen und – Genauigkeit

- Die Messdatendaten werden vom Pegel-Radar über ein Kabel an die Auswerteeinheit übermittelt. Von dort kann eine automatisierte Alarmierung wie z. B. eine Strassenschliessung ausgelöst werden, wenn vordefinierte Schwellenwerte überschritten werden. Die Daten werden auch über Mobilfunk an den Server des Betreibers weitergeleitet.
- Die Messung ist punktuell. Der Raumbezug ist gegeben durch die Position des Pegel-Radar und der Prozessrichtung.
- Gemessen wird die Laufzeit eines Radarimpulses vom Gerät zur Wasseroberfläche und zurück. Daraus wird der Pegel berechnet. Die Genauigkeit des Pegelstands liegt im sub-Millimeter Bereich.

7.13.4 Entwicklungsstand, Anwendungsgrenzen, Kosten

Pegel-Radare sind die zuverlässigste Technologie zur Pegelmessung von turbulenten Oberflächen wie Murgänge oder Flutwellen. Sie funktionieren unabhängig von Wetter und Tageszeit. Eine permanente Messung und die Anbindung an ein Warn- oder Alarmsystem sind möglich.

Mit Pegel-Radaren werden nur Ereignisse im Zielgebiet des Radars erfasst. Bei einem Treffer durch Geschiebe oder andere externe Einflüsse wie Steinschlag kann es zur Zerstörung oder Verstellung des Radars kommen. Zudem ist für die Einbindung in ein Warn- oder Alarmsystem genügend Vorwarnzeit nötig: Die Stromversorgung des Radars sowie des Alarmsystems, und auch die Datenübertragung muss gewährleistet sein.

Für Überwachungssysteme dieser Art ist es sehr schwierig, generische Preise zu nennen. Sie sind stark abhängig von den lokalen Begebenheiten (Stromanschluss, abzudeckendes Gebiet, permanente oder periodische Messung, Einbindung in ein Alarmsystem, Anforderungen an Redundanz). Die Anschaffungskosten für eine Überwachung mit Pegel-Radaren liegt in der tiefen Preisklasse (ca. CHF 5'000). Die Kosten für die Einbindung in ein Alarmsystem sowie die Betriebskosten sind sehr variabel und können nicht generisch aufgeführt werden.

7.13.5 Ergänzende Ausschreibungsanforderungen

Siehe Kapitel 7.1.5

7.13.6 Literaturverzeichnis

Sonstige Literatur / Forschungsberichte

-
- [62] Sättele M., Bründl M. (2015) Praxishilfe für den Einsatz von Frühwarnsystemen für gravitative Naturgefahren, WSL-Institut für Schnee- und Lawinenforschung SLF, Bundesamt für Bevölkerungsschutz / BABS, Bern
-
- [63] Bundesamt für Umwelt (BAFU): Überwachungssysteme für gravitative Naturgefahren – Handbuch. Bern, 34 Seiten.
-
- [64] Webseite von Geopraevent, <https://www.geopraevent.ch/technologien/alarm>, (Zugriff 10.05.2022).
-

7.14 Infrasound

7.14.1 Beschrieb der Technologie

Mit Infrasound können durch Lawinen erzeugte Schallwellen gemessen werden. Infraschall-Wellen sind Wellen mit niedriger Frequenz (< 20 Hz), welche eine Geschwindigkeit von 340 m/s erreichen. Die Schallwellen bewegen sich innerhalb eines sehr schmalen Frequenzbandes (0.001 Hz - 20 Hz), welches für das menschliche Ohr nicht wahrnehmbar ist. Die Ausbreitung der Infraschall-Wellen in der Luft ist sehr gut und hat z. B. im Vergleich zu seismischen Wellen wenig Dämpfung. Die Sensoren haben einen Öffnungswinkel von 360° und können somit Lawinen rund um ihren Standort mit bis zu 3 – 5 km Reichweite messen. Infrasound eignet sich besonders, um bei schlechten Sichtverhältnissen eine Übersicht über die gesamte Lawinensituation zu erhalten. Zur Alarmierung wird Infrasound nicht empfohlen.



Abb. 7.40 Systemanlage Infrasound: vier Infraschall-Sensoren leiten ihre Messungen an eine zentrale Auswerteeinheit weiter [67].

7.14.2 Fragestellungen in den Fachbereichen

Fragestellung im Bereich Naturgefahren

Die Überwachung der Lawinenaktivität in einem grösseren Raum gibt für einen lokalen Lawinenwarndienst sehr wertvolle Informationen, dank welcher die erstellten Prognosen verifiziert werden können. Damit können die zukünftigen Prognosen z. B. für eine Streckensperrung präzisiert werden und der Zeitraum für eine Sperrung verkürzt werden. Eine Koppelung an ein Warn- oder Alarmsystem ist nicht vorgesehen.

Fragestellung im Bereich Tunnel

Infrasound eignet sich zur Aktivitätsüberwachung von Lawinen im Einzugsgebiet von Tunnelportalen.

7.14.3 Datenerfassung, Raumbezug, Messgrößen und – Genauigkeit

- Sensoren messen Infraschallwellen rund um ihren Standort. Die Messdaten werden via Kabel in Echtzeit zur Auswerteeinheit gesendet und von dort via Mobilfunk oder

Satellitenverbindung zum Server zur Datenverarbeitung oder für die automatische Benachrichtigung (SMS, E-Mail, Publikationen in Datenbanken). Die Stromversorgung der Anlage kann via Solarzelle, Netzanschluss oder einer Brennstoffzelle erfolgen.

- Bei Infrasound handelt es sich um eine flächige Überwachungstechnologie. Der Raumbezug ist gegeben durch den Standort der Sensoren.
- Die Reichweite beträgt rund 3 – 5 km (u. a. abhängig von der Lawinengrösse).

7.14.4 Entwicklungsstand, Anwendungsgrenzen, Kosten

Bei Infrasound handelt es sich um eine erprobte, grossflächige Überwachung der Lawinenaktivität.

Infrasound funktioniert auch bei schlechter Sicht. Starker Wind reduziert jedoch die Sensitivität. Auch erzeugen nicht alle Lawinentypen genügend Infraschall (z. B. Nassschneelawinen). Zur Alarmierung mit Lichtsignalen oder Schranken wird Infrasound nicht empfohlen.

Für Überwachungssysteme dieser Art ist es sehr schwierig, generische Preise zu nennen. Sie sind stark abhängig von den lokalen Begebenheiten (Stromanschluss, abzudeckendes Gebiet, Anforderungen an Redundanz). Die Anschaffungskosten für eine Überwachung mit Infrasound liegt in der mittleren Preisklasse (wenige CHF 10'000er). Die Betriebskosten (Wartung und Auswertung) sind sehr variabel und können nicht generisch aufgeführt werden.

7.14.5 Ergänzende Ausschreibungsanforderungen

Siehe Kapitel 7.1.5

7.14.6 Literaturverzeichnis

Sonstige Literatur / Forschungsberichte

-
- [65] Sättele M., Bründl M. (2015) Praxishilfe für den Einsatz von Frühwarnsystemen für gravitative Naturgefahren, WSL-Institut für Schnee- und Lawinenforschung SLF, Bundesamt für Bevölkerungsschutz / BABS, Bern
-
- [66] Bundesamt für Umwelt (BAFU): Überwachungssysteme für gravitative Naturgefahren – Handbuch. Bern, 34 Seiten.
-
- [67] Webseite von Wyssen Avalanche Control AG, <https://www.wyssenavalanche.com/lawinendetektion/ida-infraschall-detektionssystem/>, (Zugriff 13.05.2022).
-

7.15 Wetterstation

7.15.1 Beschrieb der Technologie

Eine Wetterstation ist eine Messplattform die mehrere Messtechnologien für Wettereinflüsse verbindet. Wetterstationen verbinden Anemometer, Wetterfahne, Barometer, Thermometer, Regenmesser und Hygrometer. Gelegentlich sind in Wetterstationen auch UV- und Lichtmessungen integriert. Der Zweck dieser kombinierten Messstation ist es, Informationen über verschiedene meteorologische Grössen wie Temperatur, Wind, Luftdruck Niederschlag, Feuchtigkeit und Lichtverhältnisse zu liefern.



Abb. 7.41 Beispiele für Wetterstationen auf Brücken. Bild (c) wiederverwendet aus [68].

7.15.2 Fragestellungen in den Fachbereichen

Fragestellung im Bereich Tunnel

Wetterstationen dienen im Fachbereich Tunnel vor allem für die Aufzeichnung der klimatischen Verhältnisse im Tunnel. Die relative Luftfeuchtigkeit sowie die Temperatur von Interesse und insbesondere die Unterschiede vom Portalbereich zur Tunnelmitte hin. Der Einfluss des Windes bzw. der lokalen Druckverhältnisse vor allem bei den Portalen (Föhnlagen, etc.) kann für die Tunnellüftung relevant sein. Aufzeichnung von Niederschlagswerten kann bei vorhandenen Wasserzutritten ein Hinweis auf den Anfall geben.

Fragestellung im Bereich Naturgefahren

Wetterstationen dienen im Bereich Naturgefahren zur Aufzeichnung der meteorologischen Verhältnisse. Für die Überwachung von Rutschhängen, Böschungen, Hochwasser und Murgängen und Felsinstabilitäten sind besonders die Niederschlagsmessung und gegebenenfalls die Temperatur- und Windmessung von Bedeutung. Die Überwachung von Gebieten mit Lawinengefahr ist besonders die Messung des Niederschlags, der Schneehöhe, des Windes und der Temperatur und untergeordnet der Beleuchtungsstärke (Strahlung) von Bedeutung.

7.15.3 Datenerfassung, Raumbezug, Messgrössen und Genauigkeit

Tab. 7.20 enthält eine Liste der meteorologischen Parameter, die mit den Wetterstationen auf der Brücke gemessen wurden. Die Abtastrate für Ultraschallanemometrie erreicht bis zu 32 Hz.

Tab. 7.20 Instrumentierung der Wetterstation.

Instrument	Messgrösse	Bereich
Anemometer (mechanisch oder mit Ultraschall)	Windgeschwindigkeit	0 bis 270 km/h
Anemometer (mechanisch oder mit Ultraschall)	Turbulenzintensität	
Wetterfahne	Windrichtung	

Tab. 7.20 Instrumentierung der Wetterstation.		
Barometer	Luftdruck	300 hPa bis 1'100 hPa (inHg, mmHG oder hPa) mit 0,1 hPa Auflösung
Thermometer	Lufttemperatur	-40°C bis + 60°C
Regenmesser	Regenblume	0 bis 9999 mm, Auflösung 0,3 mm (wenn Regenmenge < 1000 mm) oder 1 mm (wenn Regenmenge > 1000 mm)
Hygrometer	Relative Luftfeuchtigkeit	10% bis 99% (1% Auflösung)
Radiometer oder Optometer	UV-Index	1 bis 12
Beleuchtungsstärke-Messgerät	Lichtintensität in einem breiten Spektralbereich	0 bis 400 klx

7.15.4 Entwicklungsstand, Anwendungsgrenzen, Kosten

Es handelt sich um eine Technologie, die im Allgemeinen auch unter rauen Umweltbedingungen und insbesondere über längere Zeiträume sehr zuverlässige Ergebnisse liefert. Je nach (1) Anzahl und Art der Messwerte, (2) Strom- und Kommunikationsoptionen, (3) Art des Datenloggers und (4) wetterfesten Gehäusen liegen die Kosten für professionelle Wetterstationen zwischen 500 und 4'000 CHF. Je nach Anforderungen können mehrere Wetterstationen erforderlich sein.

Heutzutage werden die Daten über Datenverbindungen übertragen, die entweder für die drahtlose oder zellulare Kommunikation mit Gateways zu Standard-Cloud-Speichern und Dashboarding (Datenvisualisierung) konfiguriert sind. Hinzu kommen Installationskosten, die je nach Zugänglichkeit und Aufwand zwischen 2'000 und 4'000 CHF (drahtlose) oder zwischen 10'000 und 20'000 CHF (zellulare) betragen. Die wiederkehrenden Kosten bestehen hauptsächlich aus dem Aufwand für die regelmässige Kalibrierung einiger Instrumente und eventuell der Inspektion und Reinigung von Anemometern, Solarpanels (Stromquelle), etc.

7.15.5 Ergänzende Ausschreibungsanforderungen

Siehe Kapitel 7.1.5

7.15.6 Literaturverzeichnis

Sonstige Literatur / Forschungsberichte

[68]

Bart Peeters, G. Couvreur, O. Razinkov, C. Kündig, H. Van der Auweraer & G. De Roeck (2009) Continuous monitoring of the Øresund Bridge: system and data analysis, Structure and Infrastructure Engineering, 5:5, 395-405, DOI: 10.1080/15732470701478362

7.16 Laserscanning

Siehe Kapitel 7.3

7.17 Reissleinen

7.17.1 Beschrieb der Technologie

Reissleinen sind gespannte Stahlkabel, an deren Ende sich eine Sollbruchstelle befindet, welche ab einer bestimmten Zugkraft bricht. Diese Sollbruchstelle ist an einen Schalter gekoppelt, welcher ein elektrisches Signal an eine Auswertungseinheit sendet. Reissleinen können nur einmalig eingesetzt werden und müssen nach einem Ereignis mit entsprechender Zugkraft ersetzt werden. Die Reissleinen bestehen meist aus einem dünnen Drahtseil oder Metallstangen.



Abb. 7.42 Reissleinschalter zur Überwachung eines Murganggrabens [71].

7.17.2 Fragestellungen in den Fachbereichen

Fragestellung im Bereich Naturgefahren

Reissleinen können einerseits zur Detektion von Naturereignissen in der Sturzbahn, über einen Gewässerlauf oder über einen Lawinen- oder Murganggraben gespannt werden. Diese Reissleine wird beim Ereignisdurchgang durchtrennt und sendet so ein Signal. Besteht genügend Vorlaufzeit zwischen dem Ort der Reissleine und dem möglichen Schadensort, so kann die Reissleine, eingesetzt werden, um eine Strassensperrung auszulösen.

Die Massnahme wird oftmals in Kombination mit anderen Sensoren (z. B. Doppler-Radar, Erschütterungsmessungen, Pegelradar, Webcams) eingesetzt, um sichere und redundante Alarmierung zu erhalten.

Die Reissleine kann auch um eine mögliche Felsinstabilität montiert werden, so dass das Abbrechen einer grösseren Felsmasse detektiert werden kann. Bei Sturzprozessen kann so etwas Zeit gewonnen werden gegenüber Reissleinen, die in der Sturzbahn montiert sind. Weiter können Reissleinen auch zur Detektion von Sturz-Ereignissen in Steinschlagschutznetzen verwendet werden. Dabei werden sie so montiert, dass sie das

Anspringen der Bremsen in den Steinschlagschutzsystemen anzeigen. Damit werden grössere Ereignisse in den Schutzsystemen erkannt, ohne dass jemand vor Ort war und Reparaturarbeiten können zeitnah ausgelöst werden.

Limitierend für die Anwendung dieser Technologie kann unter anderem sein, dass:

- zu wenig Vorlaufzeit besteht. Die Zeitdauer zwischen der Ereigniserfassung mittels Reissleine, der Datenübertragung und der Auslösung des Alarmsignals darf die Zeitdauer, welche das Ereignis von der Erfassung bis zum Schadenpotential benötigt, nicht übersteigen.
- es keine geeigneten Standorte, um die Reissleine zu montieren.
- die Reissleine durch äussere Einflüsse, welche keine Gefährdung für das Schadenpotenzial darstellen, ausgelöst werden.

Fragestellung im Bereich Tunnel

Im Bereich von Tunnelportalen können Reissleinen zum Schutz vor Flutwellen, Murgängen, Lawinen oder Felsstürzen in Alarmsysteme eingebunden werden sowie zur Überwachung von Steinschlagschutznetzen verwendet werden. Strassenteilnehmende können mit Lichtsignalen, Schranken oder ähnlichem vor einem akuten Ereignis gewarnt und in einem sicheren Wartebereich zurückgehalten werden.

7.17.3 Datenerfassung, Raumbezug, Messgrössen und – Genauigkeit

- Die Reissleine, resp. die Sollbruchstelle fungiert als Sensor (mechanische Messung). Optimalerweise wird der Zustand der Reissleine permanent überwacht (permanente Kraftmessung). Bei einer Überschreitung der Zugkraft an der Sollbruchstelle erfolgt eine Alarmübermittlung vom Sensor zur Auswerteeinheit über eine geschützte Kabeleinheit. Die Datenübertragung vom Logger zur Alarmstelle (Lichtsignal, Schranke, Einsatzzentrale) kann via Kabel oder kabellos via GSM oder Funk erfolgen. Zur Alarmierung empfiehlt es sich aus Redundanzgründen, mindestens zwei Reissleinen entlang des zu überwachenden Gerinnes sowie zwei unabhängige Kommunikationskanäle zu verwenden.
- Die Messung ist punktuell. Der Raumbezug ist gegeben durch die Position der Reissleine und die Prozessrichtung.
- Gemessen wird ein Überschreiten einer vorgegebenen Zugkraft.

7.17.4 Entwicklungsstand, Anwendungsgrenzen, Kosten

Reissleinen sind wirtschaftliche, einfache Detektionsmethoden für Flutwellen, Lawinen, Murgänge und die Überwachung von Steinschlagschutznetzen. Sie funktionieren unabhängig von Wetter (Regen, Schnee, Nebel) und Tageszeit. Das automatische Auslösen eines Alarms ist in Echtzeit möglich (z. B. Strassensperrung mit Lichtsignalen oder Schranken).

Reissleinen werden bei einem Ereignis zerstört und müssen ersetzt werden. Ereignisse ohne Detektion sind möglich, z. B. wenn das Ereignis die Reissleine nicht zerstört (Verankerung wird herausgezogen, die Reissleine bleibt intakt) oder das Ereignis die Reissleine verfehlt. Fehlalarme aufgrund eines Ausziehens der Reissleine durch Tiere oder Personen, oder andere äussere Einflüsse wie Steinschlag sind möglich. Zudem ist für die Einbindung in ein Alarmsystem eine gewisse Vorwarnzeit nötig: Dabei darf die Zeitdauer zwischen der Ereigniserfassung an der Reissleine, der Datenübertragung und der Auslösung des Alarmsignals die Zeitdauer, welche das Ereignis vom Standort der Reissleine bis zum Schadenpotential hat, nicht übersteigen.

Für Überwachungssysteme dieser Art ist es sehr schwierig, generische Preise zu nennen. Sie sind stark abhängig von den lokalen Begebenheiten (Stromanschluss, abzudeckendes Gebiet, permanente oder periodische Messung, Einbindung in ein Alarmsystem, Anforderungen an Redundanz). Die Anschaffungskosten für eine Überwachung mit Reissleinen

sind jedoch sehr kostengünstig (ab CHF 2'000, je nach Anzahl und Ausführung der Reissleinen). Die Kosten für die Einbindung in ein Alarmsystem sowie die Betriebskosten sind sehr variabel und können nicht generisch aufgeführt werden.

7.17.5 Ergänzende Ausschreibungsanforderungen

Siehe Kapitel 7.1.5

7.17.6 Literaturverzeichnis

Sonstige Literatur / Forschungsberichte

-
- [69] Sättele M., Bründl M. (2015) Praxishilfe für den Einsatz von Frühwarnsystemen für gravitative Naturgefahren, WSL-Institut für Schnee- und Lawinenforschung SLF, Bundesamt für Bevölkerungsschutz / BABS, Bern
-
- [70] Bundesamt für Umwelt (BAFU): Überwachungssysteme für gravitative Naturgefahren – Handbuch. Bern, 34 Seiten.
-
- [71] Webseite von Geopraevent, <https://www.geopraevent.ch/technologien/alarm>, (Zugriff 10.05.2022).
-

7.18 Kapazitive Drucksensoren

7.18.1 Beschrieb der Technologie

Kapazitive Drucksensoren nutzen Änderungen der elektrischen Kapazität, um den ausgeübten Druck zu messen. Die Änderung der elektrischen Kapazität kann auf verschiedene Weise erzeugt werden: durch Veränderung der Fläche der Kondensatorplatten, der Dielektrizitätskonstante des dazwischen liegenden Materials oder, was am einfachsten und gebräuchlichsten ist, durch Veränderung des Abstands zwischen den Elektroden über ein Diaphragma. Zu diesem Zweck wird eine der Elektroden als feste Platte und die andere als Membran angenommen, die sich unter einem angelegten Druck durchbiegt (siehe Druckanschluss in Abb. 7.43), wodurch eine Abstandsänderung im System entsteht, die die Kapazität verändert. Die erzeugte Differenzkapazität wird dann in ein elektrisches Ausgangssignal umgewandelt. Die Membran, die das Sensorelement des Systems darstellt, kann eine flache Form haben oder aus einer zentralen Masse bestehen, und ihr Baumaterial kann aus Silizium, Keramik, Kunststoff oder Glas ausgewählt werden.

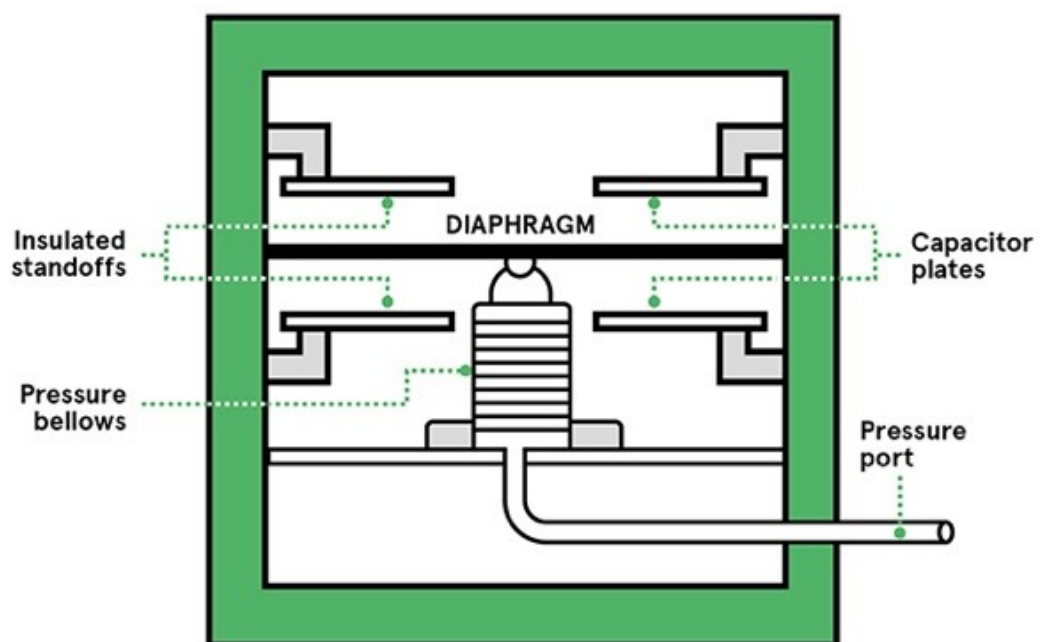


Abb. 7.43 Schematische Darstellung eines kapazitiven Drucksensors [72].

Bewährte Konstruktions- und Installationsverfahren für eine optimale Sensorleistung:

- Die Geometrie der Membran beeinflusst das Ansprechverhalten des Sensors. Kleinere Membranen führen zu schnelleren Reaktionen. Grosse Membranen liefern grosse Signale, allerdings auf Kosten eines begrenzten Betriebsfrequenzbereichs; grosse, aber dünne Membranen können unter vibrationsbedingtem Rauschen leiden.
- Die Sensoren können für zwei verschiedene Betriebsarten ausgelegt werden, die von der Konfiguration der Membran abhängen, wie in Abb. 7.44 dargestellt. Im normalen Modus muss die Membran von der Elektrode entfernt sein, während der Sensor im Berührungsmodus nur in dem Druckbereich arbeitet, in dem die Membran das Substrat berührt. Der zweite Ansatz bietet Vorteile in Form einer Redundanz der Streukapazitätseffekte, und einer höheren Empfindlichkeit, die um eine oder zwei Größenordnungen grösser als die des normalen Gegenstücks ist.
- Die Empfindlichkeit des Sensors gegenüber Temperaturschwankungen lässt sich durch das Material steuern, aus dem die Kondensatorplatten bestehen. Temperaturunempfindliche Geräte erhält man insbesondere durch die Wahl eines Materials mit geringer Wärmeausdehnung.
- Um parasitäre Kapazitäten zu reduzieren und zu vermeiden, müssen die elektronischen Elemente in der Nähe des Sensors positioniert werden.

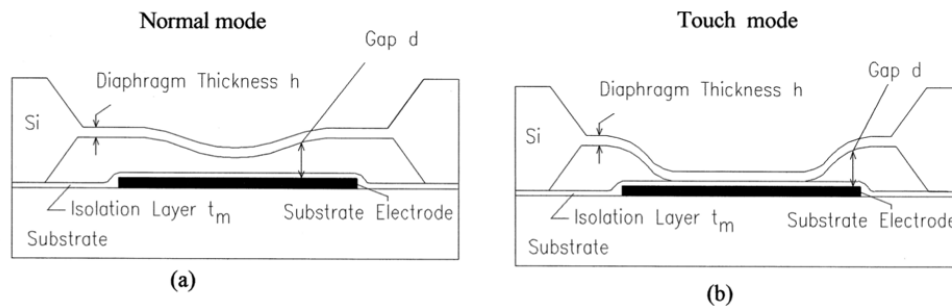


Abb. 7.44 Betriebsarten des Sensors: Normalmodus (links), Berührungsmodus (rechts) [73].

7.18.2 Fragestellungen in den Fachbereichen

Fragestellung im Bereich Tunnel

Kapazitive Drucksensoren können im Tunnelbau eingesetzt werden, um die Spannungen in der Verkleidung zu erfassen. Zudem werden sie in diversen Anwendungen für die Überwachung des Wasserdruckes verwendet.

Drucksensoren sind geeignet zur Ermittlung der Verkehrsbelastung und zur Messung der Radlast von Fahrzeugen. Die Ermittlung der stossartigen Belastung der Radlast ist im Tunnel nur untergeordnet von Bedeutung. Konkret interessant kann es für die Beurteilung der Tragsicherheit oder der Ermüdung bei aufgeständerten Fahrbahnplatten (z.B. Tunnel Seelisberg) sein.

Fragestellung im Bereich Naturgefahren

- Überwachung des Winddruckes bei Starkwind- und Sturmereignissen
- Überwachung des Wasserstands bei Überschwemmung

7.18.3 Datenerfassung, Raumbezug, Messgrößen und Genauigkeit

- Geeignet zur Messung von Absolut-, Relativ- oder Differenzdrücken und zur Verwendung als Manometer.
- Der Betriebsdruck reicht in der Regel von 250 Pa bis zu hohen Drücken von etwa 70 MPa.
- Die Bereiche des Betriebsdrucks und der Empfindlichkeit hängen von den Steifigkeits- und Festigkeitseigenschaften des für die Membrane gewählten Materials und seiner Geometrie ab. Hohe Drücke können durch Anpassung der Dicke dieses Elements erreicht werden.
- Die Ausgangsreaktion erfolgt in Form eines Gleichstromsignals und ist in der Regel nichtlinear in Bezug auf Eingangsänderungen.
- Die Kapazität liegt zwischen 50 und 100 Pa.
- Kapazitive Drucksensoren bieten hochpräzise Messungen mit einer Genauigkeit von 0,1% des Skalenendwerts des Sensors oder weniger und einem extrem niedrigen Fehlerbereich von 0,25% des Skalenendwerts des Sensors oder weniger.
- Das Messverfahren ist zerstörungsfrei.

7.18.4 Entwicklungsstand, Anwendungsgrenzen, Kosten

- Kapazitive Drucksensoren sind robuste Geräte mit geringem Stromverbrauch, da ihre Kondensatoren keinen direkten Stromfluss benötigen. Sie liefern langzeitstabile Messungen, auch in rauen Umgebungen oder bei vorübergehendem Überdruck. Sie werden durch elektromagnetische und hochfrequente Störungen kaum beeinträchtigt. Im Vergleich zu anderen Arten von Drucksensoren, sie sind für Messungen bei hohen Temperaturen geeignet, nicht besonders empfindlich gegenüber Temperaturschwankungen, sehr genau und weisen eine relativ einfache Mechanik auf. Sie zeichnen sich in der Regel durch eine geringe Hysterese aus, und eignen sich sowohl für die Messung niedriger als auch hoher Drücke.

- Der grösste Nachteil kapazitiver Drucksensoren ist ihre weitgehend nichtlineare Reaktion, die sich aus der umgekehrten Proportionalität zwischen der Sensorreaktion und dem Abstand zwischen den Elektroden ergibt. Diese Eigenschaft kann bei Geräten mit hoher Empfindlichkeit stärker ausgeprägt sein und lässt sich auf Kosten einer höheren Hysterese verringern. Im Vergleich zu anderen Sensoren, wie z. B. piezoelektrischen Sensoren, erfordern sie eine komplexere Kalibrierung und haben kompliziertere Signalaufbereitungsschaltungen. Ausserdem sind sie empfindlich gegenüber Vibrationen.
- Kapazitive Drucksensoren sind eine kostengünstige Technologie, deren Preis je nach Anwendung und Eigenschaften von wenigen CHF bis zu einigen hundert CHF reichen kann.

7.18.5 Ergänzende Ausschreibungsanforderungen

Siehe Kapitel 7.1.5

Ergänzend zu den Anforderungen an die Messtechnologie sind auch die Anforderungen zum Schutz während der Montage bzw. Einbau (z.B. Schutz während Betonieren, Funktionsprüfung auf Baustelle vor Montage, etc.) zu definieren.

7.18.6 Literaturverzeichnis

Sonstige Literatur / Forschungsberichte

[72] Avnet Abacus: Capacitive pressure sensors; <https://www.avnet.com>, (Zugriff 06.09.2022)

[73] Ko, W. H. and Wang, Q (1999): Touch mode capacitive pressure sensors. Sensors and Actuators A: Physical, 75(3), 242-251

7.19 Piezoelektrische Drucksensoren

7.19.1 Beschrieb der Technologie

Piezoelektrische Drucksensoren sind Geräte, die sich den piezoelektrischen Effekt zunutze machen, der darin besteht, aufgebrachte mechanische Spannungen in elektrische Ladungen umzuwandeln, um Druckschwankungen zu messen. Der ausgeübte Druck wird durch eine Membran auf einen internen piezoelektrischen Kristall übertragen, der aus Quarz oder Turmalin besteht und dessen Verformung verursacht. Aufgrund der geringen Auslenkung des Kristalls entstehen an seinen gegenüberliegenden Flächen zwei Ladungen, die proportional zum ausgeübten Druck sind und von einem externen oder internen Ladungsverstärker in eine Spannung umgewandelt werden. Diese elektrische Potentialdifferenz induziert einen elektrischen Stromfluss im angeschlossenen Stromkreis, die sogenannte Piezoelektrizität. Ein externes Gehäuse wird verwendet, um den Sensor vor äusseren Einflüssen (z. B. thermischen Schocks) zu schützen; es besteht häufig aus einem Gewinderohr, das die Installation des Geräts erleichtert.

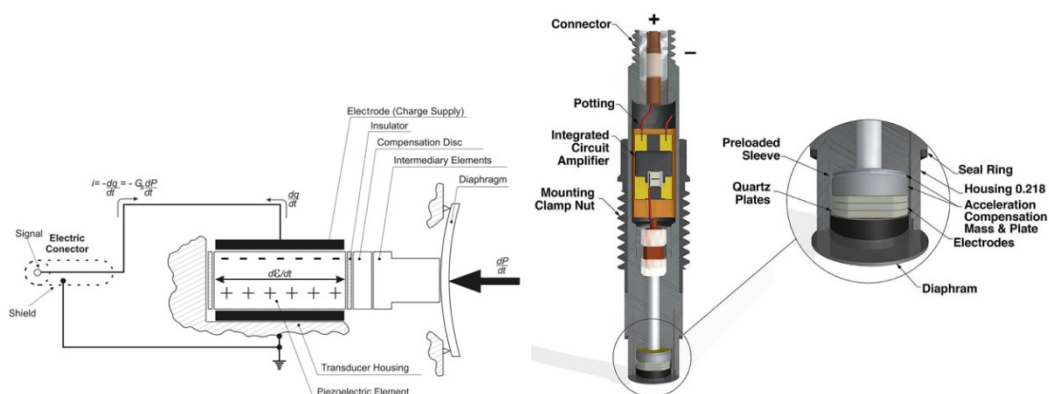


Abb. 7.45 Schematische Darstellung von piezoelektrischen Drucksensoren [74]

Bewährte Verfahren für eine optimale Sensorleistung:

- Um das Signal-Geräusch und die signalbedingten Fehler zu minimieren, sollte der Ladungsverstärker sowie die restlichen elektronischen Komponenten in der Nähe des Datenerfassungsgerätes platziert werden.
- Die Installation durch das eingebaute Gewinderohr soll vorsichtig ausgeführt werden, damit die Ausgangsempfindlichkeit des Geräts nicht beschädigt wird.
- Es wird empfohlen, das Gerät vor dem Einsatz mit der höchsten vorgesehenen Temperatur und dem höchsten erwarteten Druck zu betreiben, um einen Empfindlichkeitsverlust nach der ersten Exposition zu vermeiden.

7.19.2 Fragestellungen in den Fachbereichen

Fragestellung im Bereich Tunnel

Piezoelektrische Drucksensoren können im Tunnelbau eingesetzt werden, um die Spannungen in der Verkleidung zur erfassen. Zudem werden sie in diversen Anwendungen für die Überwachung des Wasserdruckes verwendet.

Drucksensoren sind geeignet zur Ermittlung der Verkehrsbelastung und zur Messung der Radlast von Fahrzeugen. Die Ermittlung der stossartigen Belastung der Radlast ist im Tunnel nur untergeordnet von Bedeutung. Konkret interessant kann es für die Beurteilung der Tragsicherheit oder der Ermüdung bei aufgeständerten Fahrbahnplatten (z.B. Tunnel Seelisberg) sein.

Fragestellung im Bereich Naturgefahren

- Überwachung des Winddruckes bei Starkwind- und Sturmereignissen
- Überwachung des Wasserstands bei Überschwemmung

7.19.3 Datenerfassung, Raumbezug, Messgrößen und Genauigkeit

- Messung der dynamischen relativen Druckschwankungen;
- Geeignet für die Messung verschiedener Arten von Kräften: Längskräfte, die parallel zur Kristallachse wirken, Querkkräfte, die quer zur Kristallachse wirken, oder Scherkräfte
- Piezoelektrische Drucksensoren geben ein Wechselstromsignal aus, das proportional zum Eingangsdruck ist. Die Signalantwort ist über einen weiten Temperatur- und Druckbereich linear, wobei der Referenzbereich zwischen 0,7 kPa und 70 MPa liegt
- Piezoelektrische Sensoren werden je nach dem gemessenen Druckbereich in drei Kategorien eingeteilt: Niederdrucksensoren (bis zu einigen Bar, wobei 1 bar = 100 kPa), Standardsensoren (bis zu mehreren hundert Bar), Hochdrucksensoren (über 1 kbar)
- Stabiles Ausgangssignal über ein breites Frequenzspektrum (nutzbarer Bereich in der Abbildung unten), das durch die Resonanzfrequenz des Sensors abgegrenzt ist, die normalerweise bei Hunderten von kHz auftritt. Die Grenze des Hochfrequenzverhaltens wird durch den Ansteuerstrom, die Kabelkapazität und die Länge bestimmt, während das Niederfrequenzverhalten vom Ladungsverstärker abhängt. Dieser Verstärker zeichnet sich durch eine Entladungszeitkonstante aus, die, wenn sie lang ist, die Messung niederfrequenter Ausgänge ermöglicht.
- Gängige piezoelektrische Drucksensoren funktionieren bei Temperaturen bis zu 200°C, in einigen Fällen sogar 250°C. Höhere Temperaturen erfordern spezielle piezoelektrische Wandler oder die Verwendung einer Wasserkühlung.
- Die typische Genauigkeit des Ausgangssignals beträgt 1% des Skalenendwerts.
- Die typische Messfrequenz ist jede Stunde
- Das Messverfahren ist zerstörungsfrei.

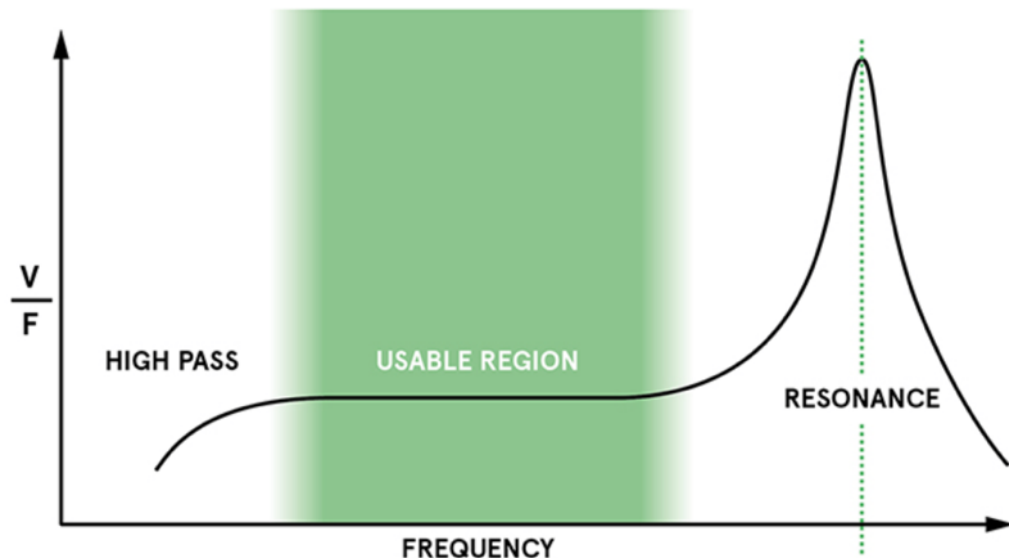


Abb. 7.46 Grafische Darstellung des piezoelektrischen Drucksensorausgangs im Frequenzbereich [75]

7.19.4 Entwicklungsstand, Anwendungsgrenzen, Kosten

Piezoelektrische Drucksensoren sind eine robuste Technologie, die zuverlässige Messungen in einem breiten Frequenzbereich und unter hohen Druckbedingungen oder in rauen Umgebungen ermöglicht. Sie sind für den Einsatz bei hohen Temperaturen geeignet und sind unempfindlich gegenüber Störungen durch elektrische und magnetische Felder und Strahlungen. Dank des starren und steifen Aufbaus des konstitutiven Kristalls reagieren sie sehr empfindlich auf kleine Druckänderungen und benötigen nur extrem geringe Verformungen, um ein zuverlässiges Ausgangssignal zu liefern. Sie sind kompakt und besitzen kleine Abmessungen und daher einfach einzuwenden. Darüber hinaus sind sie stromsparende Geräte, da sie keine externe Stromquelle benötigen.

Diese Drucksensoren sind für die Messung statischer und konstanter Drücke ungeeignet, da die Kristallladung im Laufe der Zeit aufgrund von Leckagen, die durch unzureichende Isolierung, Innenwiderstand oder andere damit zusammenhängende Faktoren verursacht werden, nachlässt.

Die Preisspanne bei piezoelektrischen Druckaufnehmern wird durch die Wahl des Materials für die Kristallkomponente bestimmt. Wählt man preiswerte Kristalle wie Quarz oder Turmalin, werden die Sensoren zu einer preiswerten Überwachungslösung. Die Kosten für einen piezoelektrischen Sensor können zwischen 10 und 100 CHF liegen.

7.19.5 Ergänzende Ausschreibungsanforderungen

Siehe Kapitel 7.1.5

7.19.6 Literaturverzeichnis

Sonstige Literatur / Forschungsberichte

[74] PCB Piezotronics: Introduction to dynamic pressure sensors; <https://www.pcb.com>

[75] Avnet Abacus: Capacitive pressure sensors; <https://www.avnet.com>, Zugriff am 06.09.2022

7.20 Terrestrische Radarinterferometrie

Siehe Kapitel 7.1

7.21 Satellitengestützte Radarinterferometrie

Siehe Kapitel 7.2

7.22 Langzeitüberwachung mit Deformationskameras

7.22.1 Beschrieb der Technologie

Der Einsatz von Deformationskameras unter Verwendung photogrammetrischer Auswertungsmethoden ist eine kosteneffiziente, flächendeckende Lösung zur Langzeitüberwachung unkritischer Instabilitäten in Fels und Eis. Mithilfe von vollautomatisierten Deformationsanalysen können Verschiebungen senkrecht zur Blickrichtung im Bereich von wenigen Zentimetern einfach festgestellt werden. Eine Situationsveränderung oder eine Beschleunigung kann somit detektiert werden. Die Bilder können je nach gewünschtem Intervall aufgenommen werden (stündlich, täglich, wöchentlich, ...). Für eine bessere Einsicht oder zur 3D Visualisierung ist auch eine Überwachung mit mehreren Kameras möglich. Die Auflösung ist unter anderem abhängig von der Distanz zwischen der Kamera und der zu überwachenden Fläche sowie von atmosphärischen Einflüssen: Mit dem Abgleich an stabil errichteten Gebieten kann der Fehler korrigiert werden, trotzdem kommt es zu Einbussen in der Genauigkeit der Deformationsanalyse.



Abb. 7.47 Deformationskamera mit Solarpanel zur Stromversorgung [57]

7.22.2 Fragestellungen in den Fachbereichen

Fragestellung im Bereich Naturgefahren

Geländeverschiebungen im Fels- und Lockermaterial sind vor Ort von Auge oft nicht oder nur anhand lokaler Phänomene erkennbar und kaum quantifizierbar. Um das Verhalten von solchen instabilen Gebieten zu überwachen und Veränderungen in der Geschwindigkeit und somit Beschleunigungen zu erfassen, sind messtechnische Überwachungen notwendig. Somit können sich abzeichnende Abbrüche von grossen Instabilitäten frühzeitig erkannt und - unter günstigen Umständen - auch vorhergesagt werden.

Flächige Überwachungsmethoden bieten den Vorteil, dass die Bewegungen in der gesamten instabilen Masse erfasst werden können und damit die geologische Modellbildung massgeblich unterstützt wird.

Limitierend für die Anwendung von Deformationskameras kann unter anderem sein, dass:

- es keine geeigneten stabilen und geschützten Gerätestandorte gibt, so dass eine direkte Sichtlinie (möglichst in Bewegungsrichtung) von der Kamera zur Instabilität besteht.
- die potenzielle Instabilität zu klein ist (siehe Bildauflösung).
- Vegetation, Schneebedeckung die Einsicht dauerhaft verhindern.
- Wolken und Nacht die Einsicht temporär verhindern.
- unterschiedliche atmosphärische Bedingungen die Messgenauigkeit einschränken.

Fragestellung im Bereich Tunnel

Die Methode mit Deformationskameras eignet sich zur Langzeitüberwachung / Frühwarnsystem unkritischer Instabilitäten in Fels und Eis im Einzugsgebiet von Tunnelportalen.

7.22.3 Datenerfassung, Raumbezug, Messgrößen und – Genauigkeit

- Die Rasterdaten werden von der Deformationskamera über GSM oder Funk an einen Server des Betreibers übermittelt. Dort kann eine manuelle oder automatische Analyse der Bilder erfolgen. Das Analyseintervall ist flexibel wählbar (täglich, zweitäglich, wöchentlich, saisonal). Die Berechnung der Deformation erfolgt anhand des Vergleichs zweier Bilder durch den Abgleich einzelner Pixelpakete und kann als farbliche Darstellung inklusive Richtungsangabe dargestellt werden.
- Bei der Langzeitüberwachung mit Deformationskameras handelt es sich um eine flächige Überwachungstechnologie. Der Raumbezug ist gegeben durch die Position der Deformationskamera(s) und die Blickrichtung(en).
- Die räumliche Auflösung beträgt rund 2 m x 2 m. Die Genauigkeit der Deformationsanalyse beträgt 1-10 cm in der Querebene zur Blickrichtung.

7.22.4 Entwicklungsstand, Anwendungsgrenzen, Kosten

Bei der Methode mit Deformationskameras handelt es sich um eine kosteneffiziente Langzeitüberwachung.

Die Methode funktioniert nur bei guten Sichtverhältnissen, das heisst bei Tag und bei gutem Wetter. Schneebedeckung, Vegetation und Niederschlag verunmöglichen eine Überwachung. Die Atmosphäre (Luftfeuchte, Luftdruck, Temperatur, Wind) beeinflusst die Propagation von elektromagnetischen Wellen. Aufgrund der kurzen Wellenlänge von sichtbarem Licht (380-780 nm) kann der Atmosphären-Einfluss zu Fehlern von mehreren Zentimetern führen. Die Methode eignet sich nicht für akute Instabilitäten und als Alarmsystem.

Neue Softwareentwicklungen erlauben die Verwendung von mobilen Kameraaufnahmen für die Erstellung von 3D Visualisierungen von Oberflächenverschiebungen. Anstelle eines fixen Kamerastandort werden dabei bekannte Fixpunkte in den Kameraaufnahmen benötigt und die Georeferenzierung zu gewährleisten.

Für Überwachungssysteme dieser Art ist es sehr schwierig, generische Preise zu nennen. Sie sind stark abhängig von den lokalen Begebenheiten (Stromanschluss, abzudeckendes Gebiet, permanente oder periodische Messung). Die Anschaffungskosten für eine Überwachung mittels Photogrammetrie liegt in der mittleren Preisklasse (wenige CHF 10'000er). Die Betriebskosten (Auswertung und Wartung) sind sehr variabel und können nicht generisch aufgeführt werden.

7.22.5 Ergänzende Ausschreibungsanforderungen

Siehe Kapitel 7.1.5

Ergänzend zu den Anforderungen an die Messtechnologie sind auch die Anforderungen an die baulichen Massnahmen (z.B. Konsolen, Befestigungen, etc.) zu definieren sowie die Zugänglichkeiten (z.B. Erreichbarkeit, Eigentümer, etc.) zu beachten.

7.22.6 Literaturverzeichnis

Sonstige Literatur / Forschungsberichte

- [76] Sättele M., Bründl M. (2015) Praxishilfe für den Einsatz von Frühwarnsystemen für gravitative Naturgefahren, WSL-Institut für Schnee- und Lawinenforschung SLF, Bundesamt für Bevölkerungsschutz / BABS, Bern
-
- [77] Bundesamt für Umwelt (BAFU): Überwachungssysteme für gravitative Naturgefahren – Handbuch. Bern, 34 Seiten.
-
- [78] Webseite von Geopraevent, <https://www.geopraevent.ch/technologien/alarm>, (Zugriff 10.05.2022).
-

7.23 Geodätische Aufnahmen (Tachymeter)

Siehe Kapitel 7.4

7.24 Nivellement

Siehe Kapitel 7.9

7.25 Fugen- und Rissmessgeräte

7.25.1 Beschreibung der Technologie

Schwingsaiten- (Vibration Wire, VW) Rissmessgeräte bestehen aus einem Sensor-Aussenrohr und einem inneren, frei gleitenden Stab, der am inneren Ende durch eine Feder mit einem Schwingsaiten-Sensor verbunden ist, siehe Abb. 7.48. Am Sensorende des Aussenkörpers und am äusseren Ende des Stabes sind Anker angebracht, die auf beiden Seiten eines zu überwachenden Risses befestigt werden können. Die Anker verfügen über Kugelgelenke, mit denen sie am Messgerät befestigt sind, um eine unterschiedliche Bewegung in Querrichtung auszugleichen und zu verhindern, dass sich der innere Stab im äusseren Gehäuse festsetzt.

Der Schwingsaitensensor arbeitet nach dem Prinzip, dass ein gespannte metallische Messsaite / Draht durch eine elektromagnetische Anregung in Schwingung versetzt wird. Um den Draht befindet sich eine Magnetspule, welche durch den schwingenden Draht induziert wird. Aus der Frequenz der induzierten Spannung kann die Eigenfrequenz des Drahts bestimmt werden. Die Eigenfrequenz des Drahts ist abhängig von dessen Material, Länge sowie der mechanischen Spannung und Temperatur. Eine Änderung des Abstands zwischen den Ankern, die durch das Öffnen oder Schliessen des Risses verursacht wird, führt dazu, dass sich der innere, frei gleitende Stab innerhalb des äusseren Körpers bewegt, wodurch sich die Spannung des Drahts ändert. Die veränderte Länge resp. Spannung des Drahts führt zu einer Änderung dessen Eigenfrequenz. Durch eine entsprechende Kalibrierung des Schwingsaitensensors kann damit die Längenänderungen bestimmt werden.



Abb. 7.48 Schwingsaiten- Rissmessgerät [79]

Dreidimensionale Rissmessgeräte überwachen die Verschiebung über Risse und Fugen in drei Richtungen. Der zentrale Referenzblock ermöglicht es den Schwingsaitenaufnehmern, sich unabhängig voneinander in alle drei Richtungen zu bewegen. Der 3D-Montagerahmen besteht aus zwei Armen und zwei verpressbaren Ankern sowie drei Schwingsaiten-Wegaufnehmern, wie in Abb. 7.49. Jede Bewegung in der überwachten Position führt zu einer relativen Veränderung zwischen den beiden Ankern, wodurch sich einer oder mehrere der Schwingungsdraht-Wandlerstäbe unabhängig voneinander bewegen, wodurch sich die Frequenz des jeweiligen Drahtes ändert. Diese Frequenzänderung wird umgerechnet, um die Bewegung in Millimetern anzuzeigen.



Abb. 7.49 3D-Rissmessgerät [80]

Für die Messung der Drehung bei Rissen gibt es eine Messvorrichtung, siehe Abb. 7.50 das zur Messung der Rotation, der Quer- und der Längsbewegung bestimmt ist. Das Gerät besteht aus einer überlappenden oberen Platte, die durchsichtig ist, mit einem roten Fadenkreuz. Die untere Platte ist weiss und mit einem Messgitter versehen. Es ermöglicht eine Feldbezugsüberwachung von Rissen im Bereich von 0,5 bis 20 mm horizontal und 10 mm vertikal.

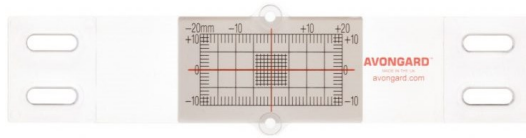


Abb. 7.50 Standard-Rissmonitor [81]

7.25.2 Fragestellungen in den Fachbereichen

Fragestellung im Bereich Tunnel

- Überwachen die Bewegung über gerissene Oberflächen, z. B. Betonrisse in einer Zwischendecke, Quer- und Längsrisse an der Innenseite einer Betonverkleidung sowie die Wölbung der Fahrbahndecke (Chienbergtunnel).
- Messen und Überwachen der Rissbreite.
- Langfristige Überwachung bestehender Risse zur Bestimmung des aktiven Mechanismus.

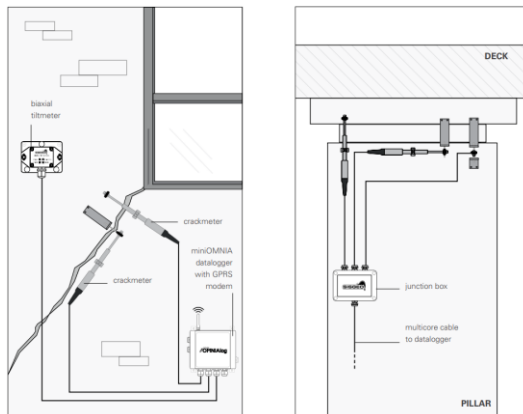


Abb. 7.51 Analoge drahtlose Rissüberwachung (links), 3D-Pfahllagerverschiebung (rechts) [82]

Fragestellung im Bereich Naturgefahren

- Überwachung von Felsinstabilitäten an der Oberfläche.

7.25.3 Datenerfassung, Raumbezug, Messgrößen und Genauigkeit

- Die Messdatenerfassung kann entweder analog oder digital erfolgen. Bei Risszählern kann die analoge Datenerfassung drahtlos über einen Datenlogger mit Netzwerkzugang erfolgen.
- Neben der Fernverfügbarkeit und Automatisierung der Messdaten ist auch eine digitale Messdatenaufzeichnung und/oder ein Online-Zugriff (cloudbasiertes Webportal) mit analoger und digitaler Auslesung über den WASP-Datenlogger möglich (Genauigkeit 0,1% und Kanalabtastrate von max. jeder Minute und Datenupload zweimal täglich).
- Die Messdatenerfassung des Rissmonitors kann digital mit einer Auflösung von 2,5 μm und bis zu 100 Hz erfolgen.

Tab. 7.21 Technische Daten

	Bereich	Auflösung	Genauigkeit	Nichtlinearität	Frequenzbereich	Nominaler Nullwert
VW Rissanzeiger	5, 12,5, 25, 50, 100, 150, 200, 300 mm	< 0,025% FS	± 0,1% FS	< 0,5% FS	1650-2700Hz	1850 Hz
3D-Rissanzeiger	12,5, 25 mm	< 0,025% FS	± 0,1% FS	< 0,5% FS	1650-2700Hz	1850 Hz

7.25.4 Entwicklungsstand, Anwendungsgrenzen, Kosten

Es handelt sich um eine Technologie, die in grossem Umfang zur Überwachung von Rissbreiten und deren Entwicklung eingesetzt wird. Vibrationsrissmessgeräte zeichnen sich durch ihre hohe Genauigkeit, ihre Widerstandsfähigkeit gegen Umwelteinflüsse und ihre langfristige Stabilität der Messungen aus und liefern zuverlässige Ergebnisse unter verschiedenen Umweltbedingungen und über lange Zeiträume. In Verbindung mit der Möglichkeit der ferngesteuerten und automatisierten Datenaufzeichnung kann eine grosse Anzahl von Daten verwaltet werden.

Rissmonitore sind ein leistungsfähiges Werkzeug zur Ergänzung der automatischen Überwachung, das zudem grosse wirtschaftliche Vorteile bietet, mit Kosten von etwa 20 CHF pro Einheit und geringem Aufwand für die Installation und das Ablesen der Ausgaben. Allerdings muss die Datenerfassung (wenn sie nicht mit einem digitalen Logger ausgestattet ist) visuell erfolgen, was den doppelten Nachteil hat, dass es zeitaufwändig ist und zu höheren Messfehlern führen kann. Digitale Logger sind ab ca. 400 CHF erhältlich.

7.25.5 Ergänzende Ausschreibungsanforderungen

Siehe Kapitel 7.1.5

7.25.6 Literaturverzeichnis

Sonstige Literatur / Forschungsberichte

- [79] Papworths Construction Testing Equipment (2022), Crack Meter
<https://www.pcte.com.au/crack-meter> (Zugriff 05.09.2022)
- [80] Geosense, VW 3D Crack Meter VWTCM-4600
<https://www.geosense.co.uk/products/vw-3d-crack-meter-vwtcm-4600/> (Zugriff 05.09.2022)
- [81] Avongard, Standard Tell-Tale, <https://www.avongard.com/product/standard-tell-tale/> (Zugriff 05.09.2022)
- [82] SISGEO S.r.l. Datenblatt Rissmeter und Fugenmesser (2019),
https://www.sisgeo.com/uploads/schede/D313_EN_14_electrical_and_vibrating_wire_crackmeters.pdf?bcs-agent-scanner=24eac680-dad3-a64e-8e4e-0d9b012b0ce6 (Zugriff 05.09.2022)
- [83] Edwin Fecker (2018), Geotechnische Messgeräte und Feldversuche im Fels, 2. Auflage, Springer Spektrum Berlin, <https://doi.org/10.1007/978-3-662-57824-7>
- [84] Thut, A. (2008): Grundbau -Taschenbuch Geotechnische Messverfahren; solexperts AG
- [85] PRINZ, H. & R. Strauss (2006): Abriss der Ingenieurgeologie. - 671 S., 4. Aufl., Elsevier GmbH (Spektrum Verlag).
- [86] Amstad, Chr. & Kováry (2001): Untertagbau in quellfähigem Fels; Forschungsauftrag 52/94, 5408.01 (Bundesamt für Strassen ASTRA)

7.26 Distometer

7.26.1 Beschrieb der Technologie

Mit dem Distometer werden mit Hilfe von Invardrähten Längen zwischen zwei gegenüberliegenden Punkten gemessen. Hierfür werden am Messobjekt Distometer-Messstrecken eingerichtet. Die Messstrecke zwischen den beiden Messpunkten muss frei sein. Abhängig vom Messziel wird in der Regel ein Messintervall bestimmt. Die Messergebnisse aus den zeitlich gestaffelten Messungen liefern dann die eingetretenen Distanzänderungen. Die Messung und die Aufzeichnung der Messergebnisse erfolgen manuell. Dieses Präzisionsmessgerät wurde an der Eidgenössischen Technischen Hochschule Zürich (ETHZ) entwickelt.

Die Distometer-Messkette besteht aus folgenden wesentlichen Komponenten, siehe Abb. 7.52. Die beiden Messbolzen (1) und (2) werden am Messobjekt angebracht und verankert. An den Messbolzen liegt je ein kardanisches Anschlussgelenk (3) an. Zwischen den Anschlussgelenken sind der Invardraht (4) mit den beiden Drahtkupplungen (6) und der Distometer (5) mit Kraftmessteil, Längenmessteil, kardanischem Anschlussgelenk (8) und dem Halter für Drahtkupplungen am Distometer (7) angeordnet.

Die Messbolzen definieren die Messstrecke und dienen zur Befestigung der kardanischen Anschlussgelenke während des Messvorganges. Es stehen verschiedene Typen von Messbolzen zur Verfügung. Je nach Beschaffenheit des Messobjektes können Messbolzen zum Einmörteln oder Einkleben in Beton, Mauerwerk oder zum Anschweißen an Stahlprofilen verwendet werden.

Das Kraftmessteil im Distometer mit einer hochpräzisen Kraft-Messfeder sorgt während des Messvorganges, dass im Invardraht die geforderte Zugspannung gehalten wird. Die Dehnung der Kraftmessfeder, welche ein Mass für die auf den Invardraht wirkende Zugkraft darstellt, wird an der Kraftmessuhr abgelesen. Damit kann die erforderliche Zugkraft bei jeder Messung exakt reguliert werden.

Mit der zweiten Messuhr wird die Längenveränderung der Messstrecke gemessen. Prinzipiell wird mit dieser Messuhr der Abstand zwischen dem Distometer und dem Invardrahtende bestimmt.

Der Invardraht weist bei einer konstanten Vorspannung eine gleichbleibende und weitgehend temperaturunabhängige Länge auf. Für die zu messende Strecke wird der Invardraht für jedes Messobjekt individuell an Ort auf die erforderliche Länge zugeschnitten und an beiden Enden mit Drahtkupplungen versehen.

Jeweils vor und nach einer Serie von Einzelmessungen erfolgt eine Kalibration des Distometers vor Ort. Dabei werden die Längenkonstanz des Distometers überprüft und mit Hilfe eines Gewichtes die Kraftmessfeder kalibriert. Die Kalibration erfolgt mit der Kalibrationsvorrichtung bestehend aus Invarstahlstangen.

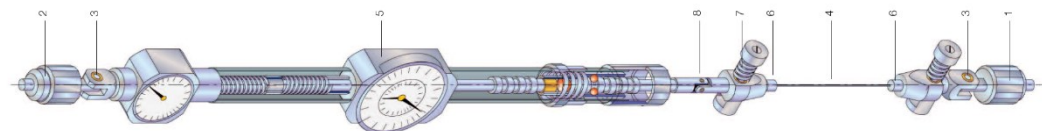


Abb. 7.52 Distometer [87]

7.26.2 Fragestellungen in den Fachbereichen

Fragestellung im Bereich Tunnel

Messungen von Distanzänderungen mit Hilfe des Distometers eignen sich für die punktuelle Überwachung von Bauwerken. Die Messpunkte können auf beliebigen Oberflächen angebracht werden, müssen jedoch über die Messdauer stets zugänglich

bleiben. Die Messstrecken können im Falle einer Verformung schnell eingerichtet werden. Distometermessungen werden im Tunnelbau für folgende Einsatzzwecke verwendet:

- Kurz- und Langzeitüberwachung von Bauwerksverformungen (z.B. Verformung an der Ausbruchsicherung und am Tunnelausbau oder Baugrubenabschluss);

Fragestellung im Bereich Naturgefahren

- Überwachung von Felsinstabilitäten an der Oberfläche.

7.26.3 Datenerfassung, Raumbezug, Messgrössen und – Genauigkeit

- Die Messdaten werden vor Ort manuell abgelesen und von Hand erfasst.
- Abgesehen von der Befestigung der Messpunkte erfolgen die Messungen zerstörungsfrei.

Distometermessungen werden für Messstrecken mit Distanzlängen von 1.0 m bis zu 50 m eingesetzt. Der Messbereich liegt zwischen 0 und 100 mm. Die Messempfindlichkeit beträgt ± 0.01 mm. Die Genauigkeit der Distometermessung liegt bis 20 m Distanzlänge bei ± 0.02 mm und über 20 m bei 1×10^{-6} .

Tab. 7.22 Messgenauigkeit Distometer

Messgrösse	Genauigkeit
Distanzlänge ≤ 20 m	± 0.02 mm
Distanzlänge > 20 m	Distanzlänge $\times 10^{-6}$

7.26.4 Entwicklungsstand, Anwendungsgrenzen, Kosten

Das Präzisionsmessgerät Distometer erlaubt Distanzmessungen von hoher Genauigkeit (um ein Vielfaches genauer als Tachymeter). Durch das geringe Gewicht des Messgerätes mit rund 2.5 kg und Kalibriervorrichtung mit Eichgewicht mit rund 12.5 kg ist die Messequipe mobil einsatzfähig. Die Messung erfolgt ohne Elektronik und es sind keine elektrischen Kabel nötig. Des Weiteren erlaubt die Distometermessung aufgrund der einfachen, übersichtlichen und jederzeit prüfaren Funktion / Kalibration eine hohe Messsicherheit. Für die Bestimmung der Querschnittsverformungen sind mehrere Messstrecken in einem Messquerschnitt erforderlich. Die Messungen mit einem Distometer führen in der Regel zu einer Behinderung der laufenden Arbeiten (Bauphase) resp. des laufenden Verkehrs (Betriebsphase).

Die Kosten für die Erstmessung Distometer mit Anschaffung des Invardrahtes belaufen sich auf ca. 3'000 – 8'000 CHF. Wiederkehrende Kosten bestehen im Unterhalt, der Auswertung und Interpretationen der erhaltenen Daten. Einzelne Vermessung verursachen Kosten im Bereich von ca. 1'000 CHF / Messung, abhängig von der Zugänglichkeit.

7.26.5 Ergänzende Ausschreibungsanforderungen

Siehe Kapitel 7.1.5

7.26.6 Literaturverzeichnis

Sonstige Literatur / Forschungsberichte

- [87] Solexperts AG, Dokumentation Distometer ETH,
https://www.solexperts.com/files/downloads/09_distometer_de.pdf (Zugriff 29.08.2022)

7.27 Neigungsänderungen (Clinometer)

7.27.1 Beschrieb der Technologie

Mit dem Clinometer werden mit Hilfe von Neigungssensoren Abweichungen der Stehachse des Instrumentes aus der Lotrichtung, bzw. die Abweichung einer Ebene aus der Horizontalen gemessen (Neigung). Für die Überwachung von Neigungsänderungen (z.B. um die Tunnellängsachse) werden am Messobjekt Clinometer-Messstellen eingerichtet. Abhängig vom Messziel wird in der Regel ein Messintervall bestimmt. Die Differenzbildung aus Messergebnissen der zeitlich gestaffelten Messungen liefern dann die eingetretenen Neigungsänderungen. Die Messung und die Aufzeichnung der Messergebnisse erfolgen manuell. Anhand der Neigungsänderungen lassen sich Deformationsgrößen wie Kippung, Drehung oder Rotation herleiten.

Die Messausrüstung besteht aus dem portablen Clinometer und aus der Messkonsole (Setzkonsole), welche auf der Messstelle bestehend aus zwei Bolzen eingehängt wird. Siehe hierzu Abb. 7.53. An der Messstelle des Bauwerks werden zwei Bolzen angebracht (im Beton mit Kleber befestigt). Das hochempfindliche Clinometer wird im Transportkoffer transportiert.

Das Clinometer wird jeweils nur für die Dauer einer Ablesung auf die am Bauwerk befestigte Messstelle aufgelegt. Durch die Verbindungsbolzen wird eine einwandfreie, statisch bestimmte und jederzeit genau reproduzierbare Lage des Clinometers gewährleistet. Ein jedem Punkt werden zwei Messungen durchgeführt durch Drehung des Gerätes um 180°. Die Werte können etwa 5 Sekunden nach dem Setzen des Instrumentes an der Anzeige direkt in mm/m abgelesen werden.

Es sind mechanische sowie als auch elektronische Messgeräte erhältlich. Nachfolgend wird die elektronische Messtechnik beschrieben. Der Weg oder die Kraft eines schwereabhängigen Sensors (Pendel) wird in Bezug auf das Instrumentengehäuse oder die Auflagefläche in eine elektrische Größe umgewandelt. Diese schwerkraftabhängigen Sensoren lassen sich nach ihrem Messprinzip in Flüssigkeits- und Pendelsysteme unterteilen. Für die Messung von Neigungen bzw. Neigungsänderungen muss die Bezugsrichtung mit hoher Sicherheit und Genauigkeit realisiert werden.

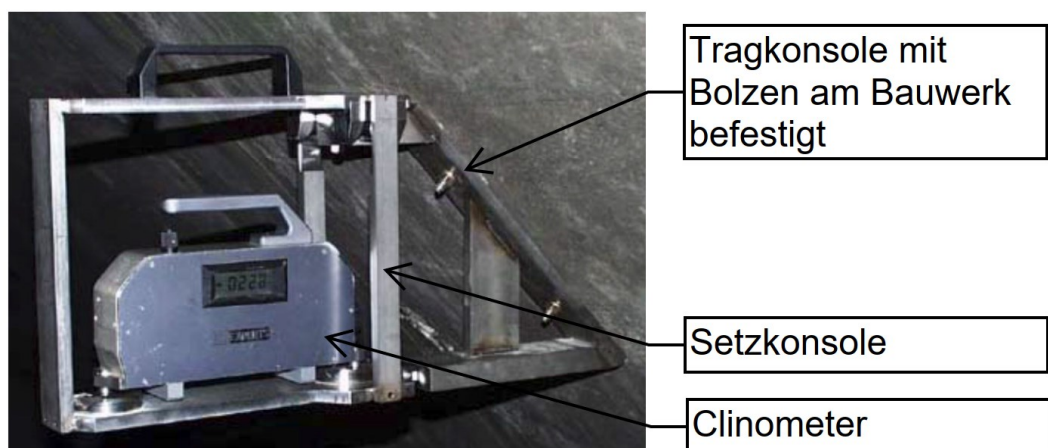


Abb. 7.53 Clinometer, Einsatzbeispiel Hauptinspektion Seelisbergtunnel, Abschnitt Huttegg [88]

Der Clinometer wird mit dem Kalibrator periodisch bzgl. Messempfindlichkeit, Linearität und Nullpunkt des Clinometers kontrolliert.

7.27.2 Fragestellungen in den Fachbereichen

Fragestellung im Bereich Tunnel

Messungen von Neigungsänderungen mit Hilfe des Clinometers eignen sich für die punktuelle Überwachung von Bauwerken. Die Messstellen können auf beliebigen Oberflächen angebracht werden, müssen jedoch über die Messdauer stets zugänglich bleiben. Die Messstellen können im Falle einer Verformung schnell eingerichtet werden. Clinometermessungen werden im Tunnelbau für folgende Einsatzzwecke verwendet:

- Kurz- und Langzeitüberwachung von Bauwerksverformungen (z.B. Verformung an der Ausbruchsicherung und am Tunnelausbau oder Baugrubenabschluss);
- Ausmessen von Schienenführungen

Fragestellung im Bereich Naturgefahren

- Überwachung von Felsinstabilitäten an der Oberfläche (z. B. Verkippen von grossen Blöcken oder Felspaketen).

7.27.3 Datenerfassung, Raumbezug, Messgrössen und – Genauigkeit

Die Messgenauigkeit des Clinometers hängt von der Setzstelle und vom Setzprinzip ab. Bei Messungen mit elektrischem Messgerät (z.B. Clinometer BL200B von Solexperts) und einer oben beschriebenen Setzstelle wird eine Messgenauigkeit von $\pm 0.2 \%$ erreicht. Der Messbereich liegt bei $\pm 17.5 \text{ mm/m}$ ($= \pm 1^\circ$). Die Messempfindlichkeit pro Digit beträgt $\pm 0.001 \text{ mm/m}$.

- Die Messdaten werden vor Ort manuell abgelesen und von Hand erfasst.
- Abgesehen von der Befestigung der Bolzen erfolgen die Messungen zerstörungsfrei.

7.27.4 Entwicklungsstand, Anwendungsgrenzen, Kosten

Das Präzisionsmessgerät Clinometer erlaubt Neigungsmessungen von hoher Genauigkeit. Das Gerät ist durch das geringe Gewicht (rund 2 kg) und kleiner Abmessung sehr handlich.

Neigungssensoren [90]:

Neben den normalen Neigungsmessgeräten (u.a. Clinometer) werden heute vermehrt hochpräzise Neigungssensoren verlangt, um Maschinen-Geometrien zu vermessen oder für die Langzeitüberwachung von Objekten wie Staudämme oder Brücken. Der digitale Aufbau erlaubt eine Kompensation von Temperaturänderung und die verlustfreie Übertragung der Messwerte über grosse Distanzen. Also eine automatisierte Neigungsmessung. Hochpräzise Neigungssensoren sind für 1- und 2-achsige Neigungsmessung erhältlich. Für Langzeit-Überwachungen werden Messbereich von $\pm 1^\circ$ und Messgenauigkeit von $\pm 1''$ (arcsec) angegeben. Die Genauigkeit wird mittels regelmässiger, automatischer Umschlagsmessungen erreicht, welche das Messen und Kompensieren jeglicher Drift des absoluten Nullpunktes erlauben.

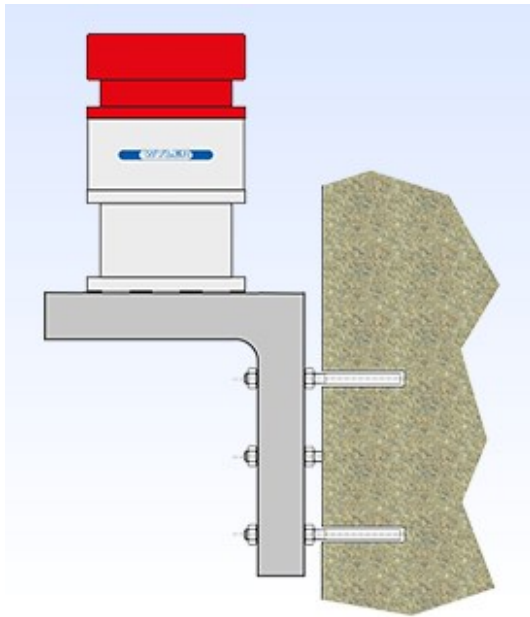


Abb. 7.54 Neigungsmessung mittels Neigungssensoren [88]

Die Kosten für die Erstmessung Clinometer mit Erstellung der Messstelle belaufen sich auf ca. 2'000 – 4'000 CHF. Wiederkehrende Kosten bestehen im Unterhalt, der Auswertung und Interpretationen der erhaltenen Daten. Einzelne Messungen verursachen Kosten im Bereich von ca. 500 - 1'500 CHF / Messung, abhängig von der Zugänglichkeit.

7.27.5 Ergänzende Ausschreibungsanforderungen

Siehe Kapitel 7.1.5

Ergänzend zu den Anforderungen an die Messtechnologie sind auch die Anforderungen an die baulichen Massnahmen (z.B. Konsolen, Befestigungen, etc.) zu definieren sowie die Zugänglichkeiten (z.B. Erreichbarkeit, Eigentümer, etc.) zu beachten. Die Konsolen und die Messeinrichtung müssen entsprechend geschützt werden. Bei periodischen Messungen (z.B. nur 1-2 x jährlich) oder Reinigungs- / Unterhaltsarbeiten im Bereich der Messeinrichtung empfiehlt sich eine Demontage und Montage vor der nächsten Messung.

7.27.6 Literaturverzeichnis

Sonstige Literatur / Forschungsberichte

-
- [88] Technische Universität Dresden, Geodätisches Institut, Lehrstuhl Ingenieurgeodäsie, Bewerksüberwachungsmessungen, Wintersemester 2004/2005, Univ. Prof. Dr.-Ing. Habil. Michael Möser
-
- [89] Solexperts AG, Dokumentation Clinometer BL200B, https://www.solexperts.com/files/downloads/10_clinometer_bl200b_de.pdf (Zugriff 29.08.2022)
-
- [90] Wyler AG, homepage: <https://www.wylerag.com/de/produkte/neigungssensoren/> (Zugriff 29.08.2022)
-

7.28 Faseroptische Sensoren

Siehe Kapitel 7.10

A 3 Berg- / Grundwasser

Tab. 7.23 Berg- / Grundwasser - Übersicht

Fragestellung		A3 Berg- / Grundwasser				
Kurzbeschreibung Fragestellung		Die Erstellung eines Tunnelbauwerks kann Auswirkungen auf das Berg- / Grundwasser haben (z.B. Einfluss Tunnelvortrieb auf Grundwasserpegel), wobei das Bauwerk ebenfalls durch die Berg- /Grundwasserverhältnisse beeinflusst werden kann (z.B. Belastung infolge Wasserdruck). Es kann zu einer Gefährdung der umliegenden Infrastruktur infolge der Berg- /Grundwasserverhältnisse kommen (z.B. verschmutzte/versiegte Quellen, Baugrundverformungen oder Massenbewegungen). Die Bestimmung der Berg- /Grundwasserverhältnisse (z.B. Pegel, Strömung, etc.) bereits vor dem Bau ermöglicht eine Beurteilung und Beweissicherung. Basierend auf den Voruntersuchungen kann eine Überwachung des Berg- /Grundwassers mittels geeigneter Messtechniken während dem Bau und Betrieb erfolgen.				
Überwachungs-technologie		Piezometer	Porenwasser-druckgeber	Grundwasserströ-mungsmessung	Wassertemperatur-sensoren	
"ID"		PIM_	PWD_	GWS_	WTP_	
Typisierung	a. Messprinzip	2 indirekt	2 indirekt	1 direkt	2 Indirekt	
	b. Datenerfassung	2 elektrisch	2 elektrisch	2 elektrisch	2 elektrisch	
	c. Datenspeicher	2 analog (Datenschreiber)	1 digital	2 analog (Datenschreiber)	3 analog (Ableseung)	
	d. Lokalisation	1 punktuell	1 punktuell	1 punktuell	1 punktuell	
	e. Raumbezug					
	f. Zustand	2 zerstörend (Bohrung)	2 zerstörend (Bohrung)	2 zerstörend (Bohrung)	3 nicht zerstörend	
Messgrößen und -genauigkeit	Größen	Wasserpegel / Wasserdruck	Wasserdruck	Strömung	Temperatur	
	Untersuchungs-/Tiefenbereich	bis 1500 m				
	Auflösung	0.1kPa	0.1kPa		0.1°C	
	Genauigkeit	±/- 0.2 - 2 kPa	±/- 0.5 kPa	±/- 8 - 25°	±/- 0.5 °C	
	Bemerkungen	Messbereich 0 bis 5'000 kPa	Messbereich -100 bis 350 kPa	Größenordnung cm / s bis cm / d	Messbereich -200 bis 2'000°C	
Tunnel		3	3	2	2	
Geotechnik		3	3	2	2	
Naturgefahren		3	3	3	3	
Umwelt		2	2	1	0	
Einsatzzeitpunkt		W	W	W	W	
Entwicklungsstand		●	●	●	●	
Kosten	initial / einmalig	●	●	●	●	
	wiederkehrend	●	●	●	●	

Fragestellung					
Kurzbeschreibung Fragestellung					
Überwachungs-technologie		Durchfluss-messung	Durchlässigkeits-versuche	Leitfähigkeits-sensoren	
"ID"		DFM_	DLK_	LFK_	
Typisierung	a. Messprinzip	2 indirekt	2 indirekt	1 direkt	
	b. Datenerfassung	2 elektrisch	1 mechanisch	2 elektrisch	
	c. Datenspeicher	1 digital	3 analog (Ableseung)	3 analog (Ableseung)	
	d. Lokalisation	1 punktuell	1 punktuell	1 punktuell	
	e. Raumbezug				
	f. Zustand	3 nicht zerstörend	2 zerstörend (Bohrung)	3 nicht zerstörend	
Messgrößen und -genauigkeit	Größen	Flies rate	Durchlässigkeit	elektr. Leitf.	
	Untersuchungs-/Tiefenbereich		< 1m bis 500 m		
	Auflösung		-	0.1 - 10 µS/cm	
	Genauigkeit	±/- 0.5 - 5 %	-	±/- 0.2 - 2 %	
	Bemerkungen	Messdynamik bis 1'000 1	-	Messbereich bis 100'000 µS/cm	
	Tunnel		2	3	2
Geotechnik		2	3	2	
Naturgefahren		2	2	3	
Umwelt		0	2	2	
Einsatzzeitpunkt		W	V	W	
Entwicklungsstand		●	●	●	
Kosten	initial / einmalig	●	●	●	
	wiederkehrend	●	●	●	

7.29 Piezometer

7.29.1 Beschreibung der Technologie

Das Piezometer erfasst den hydrostatischen Druck in einem offenen System (Abb. 7.55) [91].

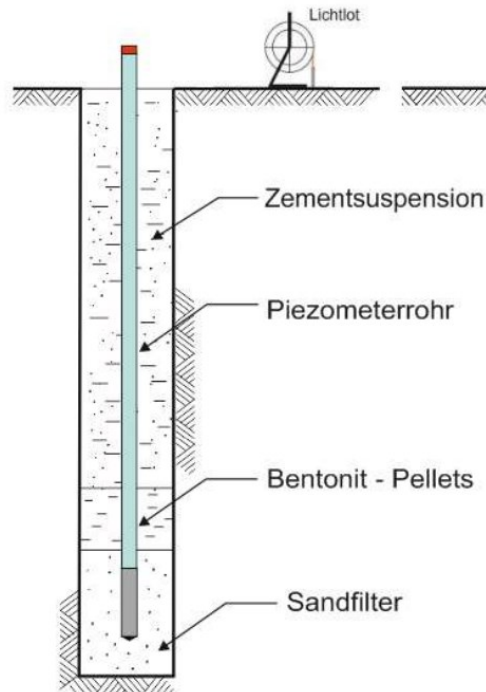


Abb. 7.55 Aufbau eines offenen Piezometers / Steigrohrs in einem Bohrloch [93]

Ein offenes System misst den freien Wasserspiegel in einem Stand-/Steigrohr. Das Piezometerrohr wird in einem Bohrloch verlegt oder direkt durch Rammen / Eindrücken in den Boden eingebracht. Über den im Fussbereich angeordneten Filterabschnitt (perforiertes Rohr) dringt Wasser in das Rohr und es stellt sich ein Wasserpegel entsprechend dem atmosphärischen Druck ein. Der Ringspalt zwischen Rohr und Bohrloch wird im Filterbereich mit einem durchlässigen Material (z.B. Filterkies) verfüllt. Im Bereich des Bohrlochkopfes dient ein undurchlässiges Material (z.B. Bentonit) als Abdichtung gegen Oberflächenwasser. Die Bestimmung des hydrostatischen Druckes im offenen System erfolgt über die Messung des Wasserpegels (Kabellichtlot, Schwimmpegel, Radar- oder Ultraschallpegel) oder durch die Druckmessung (hydrostatischer Drucksensor, pneumatischer Sensor). In einem Bohrloch können mehrere Steigrohre mit unterschiedlicher Tiefe der Filter für die Messung von unterschiedliche Grundwasserstockwerken eingebaut werden, sofern die Abdichtung des Ringspalts zwischen den Schichten gewährleistet ist.

Folgende Messmethoden können für die digitale Bestimmung des Wasserpegels verwendet werden:

- elektrischer Schwimmpegel (Erfassung der Lage eines Schwimmers mittels Umlenkrolle mit Winkelcodierer und Gegengewicht);
- pneumatischer Pegel (Einbringen eines pneumatischen Luftdrucks in einer bestimmten Wassertiefe mittels Tauchrohr. Der Luftdruck entspricht dem Wasserdruck auf Höhe des Tauchrohröffnungs);
- Drucksensoren (siehe auch Kap. 7.18, 7.19);
- Ultraschallsensor (Messung der Laufzeit von Ultraschallimpulse von einem Sensor bis zur Oberfläche des Wassers);
- Radarsensor (siehe auch Kapitel 7.13);

7.29.2 Fragestellungen in den Fachbereichen

Fragestellung im Bereich Tunnel

Die Bestimmung des hydrostatischen Druckes mittels Piezometer kann im durchlässigen/geklüfteten Fels und Lockergestein eingesetzt werden. Die Messungen erfolgen punktuell oder kontinuierlich direkt aus dem Tunnelbauwerk oder von der Oberfläche aus.

- Überwachung des Grundwasserpegels / hydrostatischen Druckes / Veränderung der räumlichen Ausdehnung kurzfristig während der Bauarbeiten (z.B. Einfluss Tunnelvortrieb auf Grundwasserpegel) sowie langfristig während des Betriebs (Einfluss von Bauwerken auf den Grundwasserpegel, die Fliessrichtung und -intensität);
- Überwachung der Wirksamkeit von Bauhilfsmassnahmen (z.B. Gefrierverfahren oder Injektionskörper).

Fragestellung im Bereich Naturgefahren

- Überwachung des Grundwasserpegels / hydrostatischen Druckes / Veränderung der räumlichen Ausdehnung in einem Rutschgebiet.
- Überwachung der Wirksamkeit von Stabilisierungsmassnahmen (z.B. Einfluss Drainageleitungen auf den Grundwasserpegel in einem Rutschgebiet).

7.29.3 Datenerfassung, Raumbezug, Messgrössen und – Genauigkeit

- Die Messdatenerfassung erfolgt analog oder digital (Ablesegerät bzw. Datenschreiber/Logger) je nach Zugänglichkeit der Messstelle und den Anforderungen an Kontinuität und Messwertdichte;
- Die Messung erfolgt punktuell und wird manuell (z.B. Wasserpegelmessung) oder automatisiert (z.B. Drucksensoren) vor Ort durchgeführt;
- Die Berechnung des hydrostatischen Drucks erfolgt indirekt über die Messung des Wasserpegel oder über Drucksensoren;
- Der Raumbezug einer einzelnen Messung kann über geodätische Aufnahmen bestimmt werden. In einem Bohrloch können Messungen einer spezifischen Bohrlochtiefe zugeordnet werden;
- Abgesehen von der zu erstellenden Bohrung erfolgen die Messungen zerstörungsfrei.

Die Messgenauigkeit ist abhängig vom verwendeten Sensortyp, dem Messbereich und der Einbausituation. Die Wasserspiegelhöhe in Steigrohren kann bei einem Kabellichtlot mit einer Genauigkeit von ca. $\pm 0.1\%$ des Messwertes und einer Auflösung von ca. 1 mm bestimmt werden. Der hydrostatische Druck kann durch einen elektrischen Sensor mit einer Genauigkeit von ca. ± 0.2 kPa bis ± 2 kPa bestimmt werden (für einen Messbereich von 0 kPa bis ca. 2'000 kPa). Der Messbereich liegt in einem Bereich zwischen 0 kPa und ca. 5000 kPa; in Spezialfällen können bis zu 30 MPa erreicht werden [94]. Die maximale Einbaulänge in Bohrlöchern beträgt ca. 1000 m. Der benötigte Bohrlochdurchmesser liegt in einem Bereich von ca. 50 mm bis 200 mm, je nach Anzahl Piezometer pro Bohrloch.

Die Reaktionszeit von Piezometer auf hydrostatische Druckänderung ist abhängig von der Durchlässigkeit des Bodens und dem erforderlichen zu-/abfliessenden Wasservolumen zum Piezometer. Ein offenes System besitzt daher im Vergleich zu einem geschlossenen System (siehe Kapitel 7.30) eine grössere Reaktionszeit. Die Dauer einer Messung beträgt zwischen wenigen Sekunden (elektrisch Messzelle) bis zu mehreren Minuten (offenes System, hydraulisch oder pneumatische Messzelle).

Tab. 7.24 Messbereich/Genauigkeit bestimmter Typen von Piezometer

Typ	Auflösung	Genauigkeit
Wasserpegel	ca. 1 mm	$\pm 0.1\%$
Drucksensor	ca. 0.1 kPa	± 0.2 kPa bis ± 2 kPa

7.29.4 Entwicklungsstand, Anwendungsgrenzen, Kosten

Die Messung des Wasserpegels in einem offenen System ist eine einfache, erprobte und zuverlässige Möglichkeit der Bestimmung des hydrostatischen Druckes. Offene Systeme sind jedoch nicht für die Bestimmung des Wasserpegels in Baugrund von geringer Durchlässigkeit oder in Bereichen mit rascher Änderung des hydrostatischen Drucks geeignet [91]. Mittels spezifischen Filterkerzen und einer Abdichtung des Beobachtungsabschnitts im Standrohr (durch den Drucksensor nur ein kleines Wasservolumen im Standrohr in Verbindung mit dem Grundwasser) kann der hydraulische Druck auch in einem gering durchlässigen Baugrund bestimmt werden [92]. Dabei kann der Beobachtungsabschnitt durch ein Entfernen des Drucksensors auch für andere Überwachungssensoren zugänglich gemacht werden (Unterschied zu einem geschlossenen System Kapitel 7.30).

Die Verfüllung des Ringspaltes mit unterschiedlichen Materialien (besonders bei der Anwendung von mehreren Piezometern in einem Bohrloch) ist aufwändig und es gibt eine hohe Fehleranfälligkeit bei der Erstellung der Dicht- und Filterstrecken [93].

Aufgrund des offenen Systems können in einem Steigrohr Probeentnahmen und weitere hydraulische Versuche (z.B. Bestimmung Wassertemperatur, siehe Kapitel 7.32) durchgeführt werden.

Eine neuere Entwicklung ist die kontinuierliche Bestimmung des Wasserpegels in einem Steigrohr durch faseroptische Temperatursensoren. Der Temperaturunterschied zwischen Wasser und Luft kann durch die faseroptischen Temperatursensoren mit einer Genauigkeit von ca. ± 0.1 m festgehalten werden [95].

Die Installationskosten für ein offenes System (Steigrohr) in einem Bohrloch belaufen sich auf ca. 200 CHF/m' bis ca. 400 CHF/m'. Wiederkehrende Kosten bestehen im Aufwand für die Aufnahme des Wasserpegels sowie für die Auswertung und Interpretation der Messwerte. Bei einem geschlossenen System liegen die Kosten in einem Bohrloch bei ca. 300 CHF/m' bis ca. 800 CHF/m'. Wiederkehrende Kosten bestehen im Aufwand für den Betrieb einer digitalen Lösung (Erfassung, Übermittlung und ggf. automatisierte Auswertung der Daten). Für die Erstellung eines Bohrlochs fallen zusätzliche Kosten an.

7.29.5 Ergänzende Ausschreibungsanforderungen

Siehe Kapitel 7.1.5

Ergänzend zu den Anforderungen an die Messtechnologie sind auch die Anforderungen an die baulichen Massnahmen (z.B. Bohrungen, Schutz Einrichtung, etc.) zu definieren sowie die Zugänglichkeiten (z.B. Erreichbarkeit, Eigentümer, etc.) zu beachten.

7.29.6 Literaturverzeichnis

Sonstige Literatur / Forschungsberichte

- | | |
|------|---|
| [91] | EN ISO 22475-1 (2006), Geotechnische Erkundung und Untersuchung – Probeentnahmeverfahren und Grundwassermessung |
| [92] | Solexperts AG, Dokumentation "Grundwasser Mehrfach-Monitoring-Systeme" (2009)
https://www.solexperts.com/files/downloads/de_06_hyd_grundw_mehr_mon_syst_v1.pdf (Zugriff 08.09.2022) |
| [93] | Priesack, T.; Plinninger, R.; Alber, M.; Salcher, B. (2016). Systematische Analyse innovativer Installationsverfahren für Porenwasserdruckgeber |
| [94] | SISGEO S.R.L. (2019), Technical Specification Vibrating wire Piezometers,
https://www.sisgeo.com/uploads/schede/schede/VW_PIEZO_EN_05_vibrating_wire_piezometer.pdf , (Zugriff 30.05.2022) |
| [95] | Hurtig, E.; Graupner, A.; Grosswig, S.; Nawrotzki, K.; Vogel, B (2003), Flüssigkeitsspiegelbestimmung mit faseroptischen Temperaturmessungen, Geso Jena - Germany |

7.30 Porenwasserdruckgeber

7.30.1 Beschrieb der Technologie

Der Porenwasserdruck wird mittels Porenwasserdruckgeber vor Ort bestimmt. Im Gegensatz zu Piezometer (siehe Kapitel 7.29) wird ein geschlossenes System verwendet (siehe Abb. 7.56). Es können zudem negative Porenwasserdrücke gemessen werden und der Porenwasserdruck kann auch bei geringer Durchlässigkeit zuverlässig bestimmt werden [96].

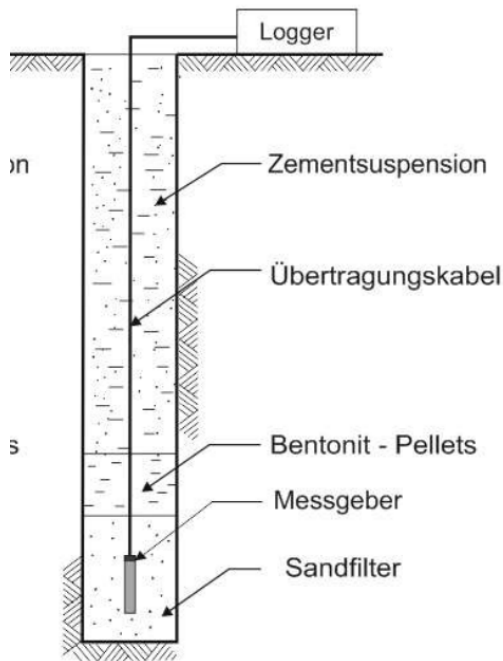


Abb. 7.56 Aufbau eines geschlossenen Systems mit Porenwasserdruckgeber [97]

Die Druckmessung erfolgt über hydraulische, pneumatische oder elektrische Messzellen, welche in einem Bohrloch eingebaut oder direkt eingerammt / eingedrückt werden.

Der hydrostatische Druck wird mittels hydraulischer, pneumatischer oder elektrischer Messzelle gemessen (Abb. 7.57) [98]. Eine Messzelle besteht aus einem Filterelement (i.d.R. Keramik- oder Sintermetallfilter) und einer kleinen Kammer/Wasserreservoir vor dem Messpunkt. Diese können in ein Bohrloch eingebaut oder zusammen mit einem Rohr in den Boden gerammt / eingedrückt werden. Durch einen ausgleichenden Wasser- (hydraulisch) bzw. Luftdruck (pneumatisch) wird der hydrostatische Druck am Messpunkt zum Bohrlochkopf übermittelt und kann dort mit einem analogen Druckmessgerät (z.B. Rohrfeder Manometer) oder elektrischen Drucksensor bestimmt werden. Eine elektrische Messzelle besteht aus einem Drucksensor, welche die Membrandeformation und somit den Druck am Messpunkt bestimmt und in ein elektrisches Signal umwandelt. Dies erfolgt z.B. mittels Schwingsaitensensor oder piezoresistiven Drucksensor. Die Druckmessung erfolgt je nach Typ relativ zum atmosphärischen Druck oder zu einem Referenzdruck und wird anschliessend auf den hydrostatischen Druck umgerechnet. Mehrere Drucksensoren in unterschiedlichen Tiefen eines Bohrlochs ermöglichen die Messung von unterschiedlichen Grundwasserstockwerken bei ausreichender Ringspalt-Abdichtung zwischen den Schichten.

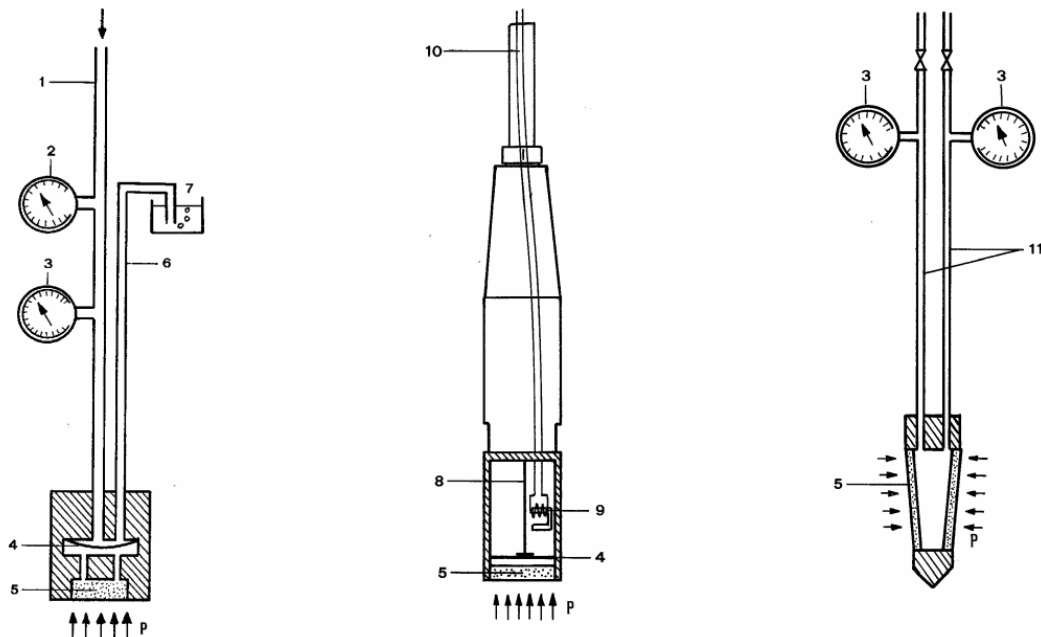


Abb. 7.57 Pneumatische (links), elektrische (mittig) und hydraulische Messzelle (rechts)[98]

Für eine Interaktion des Porenwasserdrucks im Baugrund und dem Wasserdruck im Wasserreservoir muss das Filterelement vorgängig mit Wasser gefüllt sein und keine Lufteinschlüsse aufweisen. Das Filterelement eines Porenwasserdruckgebers kann mit grossen ($\sim 50 \mu\text{m}$; "low air entry", LAE) oder kleinen ($\sim 1 - 3 \mu\text{m}$; "high air entry", HAE) Porengrössen ausgebildet werden [100]. Die kleine Porengrösse des HAE Filters bietet einen grösseren Widerstand gegen das Eintreten von Luft und wird benötigt, um negative Porenwasserdrücke messen zu können. Die vollständige Wassersättigung des Filters muss über Zuleitung in das Wasserreservoir sichergestellt werden [101].

7.30.2 Fragestellungen in den Fachbereichen

Fragestellung im Bereich Tunnel

Die Bestimmung des Porenwasserdruckes kann im teilweisen oder vollständig wassergesättigten Lockergestein oder im durchlässigen/geklüfteten Fels durchgeführt werden. Die Messungen erfolgen punktuell direkt aus dem Tunnelbauwerk oder ab Gelände-Oberfläche aus.

- Bestimmung und Überwachung des Porenwasserdruckes kurzfristig während der Bauarbeiten (z.B. Einfluss Tunnelvortrieb auf Porenwasserdruck und somit mit potenziellem Einfluss auf Stabilität) sowie langfristig während des Betriebs (z.B. Einfluss von Bauwerken auf Porenwasserdruck und somit mit potenziellem Einfluss auf Setzungen);
- Überwachung der Wirksamkeit von Bauhilfsmassnahmen (z.B. Gefrierverfahren, Injektionskörper oder Bodenverbesserungsmassnahmen).
- Überwachung Baugrubenabschlüsse und Erddruckverteilung

Fragestellung im Bereich Naturgefahren

- Überwachung des Porenwasserdruckes / Veränderung der räumlichen Ausdehnung in einem Rutschgebiet.
- Überwachung der Wirksamkeit von Stabilisierungsmassnahmen (z.B. Einfluss Drainageleitungen auf den Porenwasserdruck in einem Rutschgebiet).

7.30.3 Datenerfassung, Raumbezug, Messgrößen und – Genauigkeit

- Die Messdatenerfassung erfolgt analog oder digital (Ablesegerät bzw. Datenschreiber/Logger) je nach Zugänglichkeit der Messstelle und den Anforderungen an Kontinuität und Messwertdichte;
- Die Berechnung des Porenwasserdruckes erfolgt indirekt über elektrische Drucksensoren (Membrandeformation);
- Der Raumbezug einer einzelnen Messung kann über geodätische Aufnahmen bestimmt werden. In einem Bohrloch können Messungen einer spezifischen Bohrlochtiefe zugeordnet werden;
- Abgesehen von der zu erstellenden Bohrung erfolgen die Messungen zerstörungsfrei.

Die Messgenauigkeit ist abhängig vom verwendeten Sensortyp, dem Messbereich und der Einbausituation. Der Porenwasserdruck kann in einem Messbereich zwischen ca. – 100 kPa bis zu + 5000 kPa bestimmt werden. Die Messgenauigkeit liegt in einem Bereich von ca. +/- 0.5 kPa, für einen Messbereich von – 100 kPa bis 350 kPa. Die Auflösung der Drucksensoren liegt bei ca. 0.1 kPa. Die Anwendung in einem Bohrloch benötigt je nach Typ einen Durchmesser zwischen ca. 50 mm und 80 mm.

Tab. 7.25 Messbereich/Genauigkeit von Porenwasserdruckgeber

Typ	Auflösung	Genauigkeit
Drucksensor	ca. 0.1 kPa	+/- 0.5 kPa

7.30.4 Entwicklungsstand, Anwendungsgrenzen, Kosten

Die Bestimmung des hydrostatischen Druckes in einem geschlossenen System mittels Porenwasserdruckgeber ist eine zuverlässige und kontinuierliche Methode. Geschlossene Systeme sind in allen Baugrundarten, auch Boden und Fels mit geringer Durchlässigkeit sowie bei rascher Druckänderungen, einsetzbar.

Die Messung von negativen Porenwasserdrücken mit Drucksensoren hat folgende besondere Anforderungen: Der Ringspalt in einem Bohrloch zwischen Messgerät und Bohrlochwand muss verfüllt werden. Übliches Filtermaterialien (z.B. Sand) ist bei geringdurchlässigem Baugrund ungeeignet, da es bei einem negativen Porenwasserdruck schnell die Wassersättigung verliert und so eine Trennung zwischen dem Porenwasserdruck im Baugrund und dem Wasserreservoir entsteht (unbrauchbare Messung). Die Verwendung einer Zement-Bentonit-Suspension anstelle der üblichen Filtermaterialien ermöglicht die Messung von negativen Porenwasserdrücken [99].

Voll-verpresste Porenwasserdruckgeber

Der sogenannte voll-verpresste ("fully grouted") Einbau eines Porenwasserdruckgebers mittels Zement-Bentonit-Suspension in einem Bohrloch ermöglicht ein vereinfachtes Installationsverfahren. Im Vergleich zu einem klassischen Aufbau mittels Dicht- und Filterstrecke (siehe Abb. 7.58) verkleinert sich der Aufwand für die Erstellung und die Fehleranfälligkeit wird verkleinert. Die Anordnung von mehreren Porenwasserdruckgebern in einem Bohrloch wird ebenfalls vereinfacht [102].

Die Durchlässigkeit der Zement-Bentonit-Suspension kann dabei bis zu drei Größenordnungen grösser als die Durchlässigkeit des Baugrunds sein, ohne einen signifikanten Einfluss auf die Messergebnisse zu haben [103]. Die Antwortzeit eines voll-verpressten Porenwasserdruckgebers auf plötzliche Änderungen der Wasserdruckes an der Messstelle unterscheidet sich nur minimal von einem klassischen Aufbau und beträgt wenige Minuten [97].

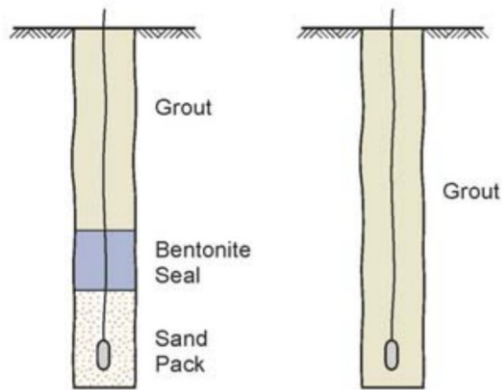


Abb. 7.58 Aufbau eines geschlossenen Systems mit Dicht- und Filterstrecke (links) und voll-verpresst (rechts) [103]

Voll-verpresste Porenwasserdruckgeber ermöglichen die Kombination mit anderen Messinstrumenten (z.B. Inklinometer). Dabei ist jedoch die Wechselwirkung zwischen den Instrumenten zu beachten (z.B. Dichtigkeit Inklinometer Messrohrs bei Deformationen) und die Zement-Bentonit-Suspension muss die Anforderungen aller verwendeten Messinstrumente erfüllen [97].

Die Verwendung von HAE Filtern in vollständig mit Zement-Bentonit-Suspension verfüllten Bohrlöcher zeigen in der Praxis teilweise Probleme mit der Luftbildung im Wasserreservoir. Besonders bei elektrischen Sensoren mit HAE Filter muss in diesem Fall eine Entlüftung des Wasserreservoirs sichergestellt werden (siehe auch Abb. 7.59) [99].

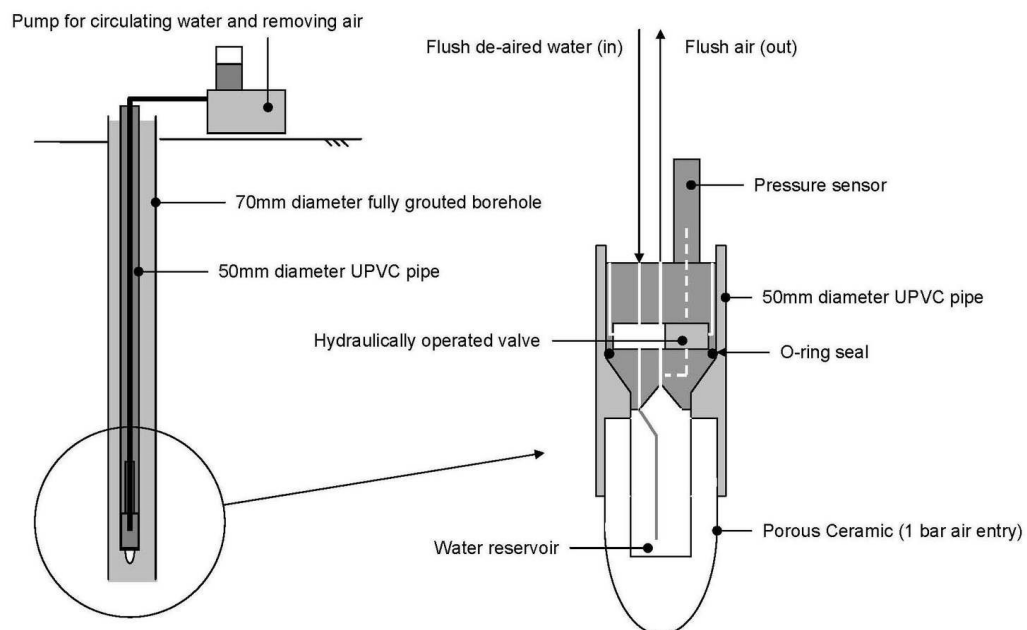


Abb. 7.59 Aufbau eines elektrischer Porenwasserdruckgeber mit Wasser- und Entlüftungsleitung [99]

Die Installationskosten für einen Porenwasserdruckgeber in einem Bohrloch belaufen sich auf ca. 500 CHF. Wiederkehrende Kosten bestehen im Aufwand für den Unterhalt, das Ablesen und Auswerten der Daten vor Ort oder für den Betrieb einer digitalen Lösung (Erfassung, Übermittlung und ggf. automatisierte Auswertung der Daten). Für die Erstellung eines Bohrlochs fallen zusätzliche Kosten an.

7.30.5 Ergänzende Ausschreibungsanforderungen

Siehe Kapitel 7.1.5

Ergänzend zu den Anforderungen an die Messtechnologie sind auch die Anforderungen an die baulichen Massnahmen (z.B. Bohrungen, Schutz Einrichtung, etc.) zu definieren sowie die Zugänglichkeiten (z.B. Erreichbarkeit, Eigentümer, etc.) zu beachten.

7.30.6 Literaturverzeichnis

Sonstige Literatur / Forschungsberichte

- | | |
|-------|---|
| [96] | Edwin Fecker (2018), Geotechnische Messgeräte und Feldversuche im Fels, 2. Auflage, Springer Spektrum Berlin, https://doi.org/10.1007/978-3-662-57824-7 |
| [97] | Priesack, T.; Plinninger, R.; Alber, M.; Salcher, B. (2016). Systematische Analyse innovativer Installationsverfahren für Porenwasserdruckgeber |
| [98] | Schweizerisches Talsperrenkomitee (2005), Messanlagen zur Talsperrenüberwachung, Teil 3: Messgeräte / Messmethoden |
| [99] | Geotechnical Observations Limited, Can a vibrating wire piezometer measure negative pore water pressure? It's a simple question... or is it, http://www.geo-observations.com/s/Can-a-vibrating-wire-piezometer-measure-negative-pore-water-pressure.pdf , (Zugriff 30.05.2022) |
| [100] | Geosense (2021), Technical publication - Piezometers in depth V1.1, https://www.geosense.co.uk/wp-content/uploads/2021/05/Piezometers-In-depth-V1.1.pdf , (Zugriff 30.05.2022) |
| [101] | Durham Geo Slope Indicator (2004), Guide to Geotechnical Instruments, https://durhamgeo.com/pdf/documents/course%20material/guide-to-instrumentation.pdf , (Zugriff 30.05.2022) |
| [102] | Mikkelsen P.E., and Green G.E (2003).; Piezometers in Fully Grouted Boreholes. In Proceedings of the 6th International Symposium on Field Measurements in Geomechanics, Oslo, Norway, 15.-18. September 2003 |
| [103] | Contreras, Iván & Grosser, Aaron & Strate, Richard. (2008). The Use of the Fully-grouted Method for Piezometer Installation Part 1. Geotechnical News. 30. 10.1061/40940(307)67. |

7.31 Grundwasserströmungsmessung

7.31.1 Beschrieb der Technologie

Die Grundwasserströmung eines Baugrunds wird über die Messung der Fliessgeschwindigkeit und Richtung bestimmt. Verschiedene Messmethoden ermöglichen die Bestimmung dieser beiden Eigenschaften durch Messungen in einem oder mehreren Bohrlöchern. Im Messbereich des Bohrlochs muss das Rohr und die Ringspaltverfüllung durchlässig ausgeführt werden.

Die meisten Messmethoden bestimmen die Fliessgeschwindigkeit (Transportgeschwindigkeit der Wasserteilchen) des Grundwassers. Demgegenüber ist auch vom spezifischen Durchfluss (auch Darcy-Geschwindigkeit oder Filtergeschwindigkeit) die Rede. Der spezifische Durchfluss ist eine fiktive Geschwindigkeit und leitet sich aus dem Darcy-Gesetz ab (siehe auch 7.34). Die Fliessgeschwindigkeit bildet sich dabei aus dem Quotienten des spezifischen Durchflusses und der effektiven Porosität des Baugrunds [104].

Die Messmethoden in nur einem Bohrloch erfassen die Fliessgeschwindigkeit und Richtung nur punktuell. Je nach Methode kann das Messgerät auf verschiedene Tiefen im Bohrloch abgesenkt werden und die Grundwasserströmungen können für unterschiedliche Tiefen bestimmt werden. Mehrere Messmethoden verwenden Tracer für die Bestimmung der Grundwasserströmung. Das Tracer-Material sollte dabei eine chemische Stabilität, geringe Sorptionstendenz und gute Wasserlöslichkeit aufweisen. Die wichtigsten Anforderungen sind jedoch die Unbedenklichkeit für Mensch, Tier und Pflanzen, die quantitativ gute Erfassbarkeit mit entsprechenden Sensoren, eine tiefe Nachweisgrenze und keine oder nur geringe Grundlast im Wasser [105].

Im Folgenden sind einige Messmethoden gemäss [104] aufgeführt:

Punkt-Verdünnungs-Methode

Die Punkt-Verdünnungs-Methode basiert auf der Tracer-Konzentrationsabnahme im Messbereich. In einem mit Packer abgetrennten Messbereich im Bohrloch wird ein Tracer eingebracht und mit dem Grundwasser vermischt (Abb. 7.60). Anschliessend wird die Konzentrationsabnahme im Messbereich über einen Zeitraum gemessen. Die Abnahme ist proportional zur Fliessgeschwindigkeit des Grundwassers.

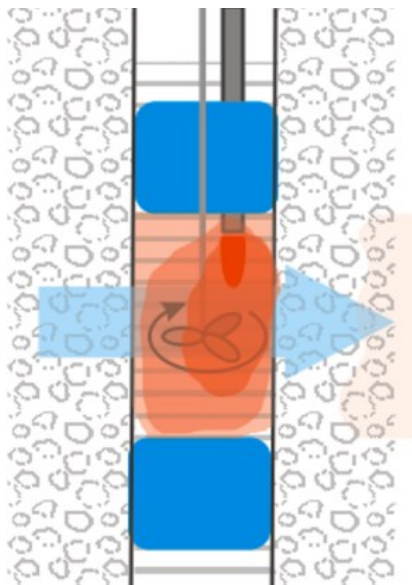


Abb. 7.60 Funktionsweise einer Punkt-Verdünnungs-Methode [104]

Tracer Durchflusssensor

In einem mit Packer abgetrennten Messbereich wird in Bohrloch Mitte ein Tracer eingebracht. An der Bohrlochumrandung wird mittels Sensoren, i.d.R. Leitfähigkeitssensoren (Kapitel 7.35) bei Salz-Tracer, die Konzentration des Tracers bestimmt. Durch die räumliche Anordnung der Sensoren kann die Fliessrichtung und Geschwindigkeit des Grundwassers bestimmt werden (siehe Abb. 7.61)

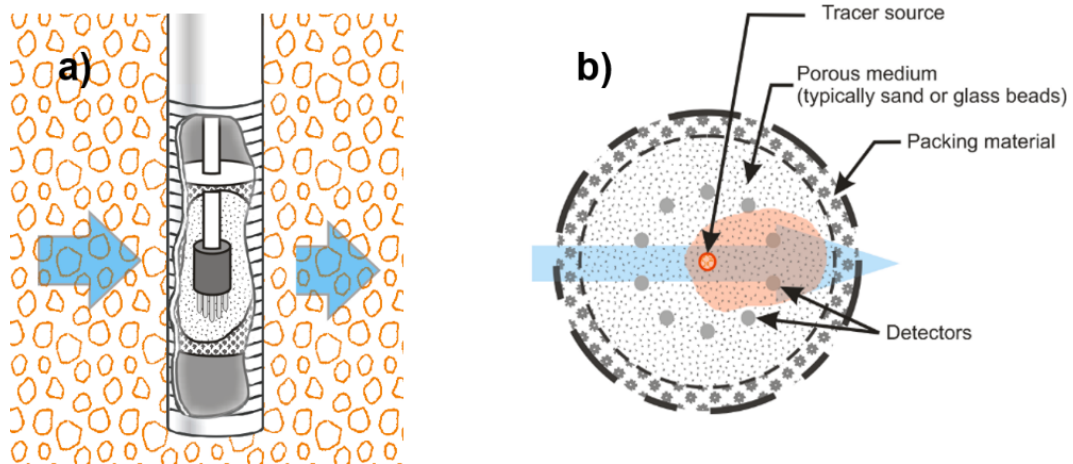


Abb. 7.61 Funktionsweise eines Tracer-Durchflusssensors, a) Ansicht und b) Querschnitt Bohrloch [104]

Wärme Durchflusssensor

Ein Wärme Durchflusssensor basiert auf demselben Prinzip wie ein Tracer Durchflusssensor. Anstelle eines Tracers wird Wärme in der Bohrlochmitte eingebracht (analog Abb. 7.61). Durch die Verteilung der Wassertemperatur am Bohrlochrand kann die Fliessgeschwindigkeit und Richtung des Grundwassers bestimmt werden. Sensoren für die Bestimmung der Wassertemperatur sind in Kapitel 7.32 aufgeführt.

Ein anderer Wärme Durchflusssensor besteht aus einem Rohr ohne Öffnungen, welches gleichmässig erwärmt wird. Durch den Kontakt mit dem Grundwasser kühlt sich das Rohr (entsprechend der Fliessrichtung mehr oder weniger stark) ab. Durch die Messung der Temperaturverteilung am Rohr kann die Fliessrichtung und Geschwindigkeit bestimmt werden.

Passives Flussmessgerät

Ein passives Flussmessgerät basiert auf dem Herauslösen oder dem Eintrag von Tracer/Material in einem Bohrloch. Eine bestimmte Menge Tracer/Material wird in ein Bohrloch eingebracht und nach einer gewissen Zeit wird die herausgelöste Menge bestimmt. Ein passives Flussmessgerät kann auch den Eintrag eines Tracers/Materials (an einem anderen Bohrloch eingebracht) festhalten. Aus dem Verlust bzw. Eintrag von Tracer/Material kann der spezifische Durchfluss (auch Filtergeschwindigkeit oder Darcy-Geschwindigkeit bezeichnet) bestimmt werden.

Kolloidales Boreskop

Ein kolloidales Boreskop bestimmt die Fliessgeschwindigkeit durch die optische Messung von Partikeln/Streukörper im Grundwasser. Die Auswertung der optischen Aufnahmen der Partikel erfolgt mittels Software. Durch Korrekturfaktoren wird aus der Geschwindigkeit der Streukörper die Fliessgeschwindigkeit des Grundwassers im ungestörten Untergrund berechnet.

Darcy-Methode

Die Darcy-Methode basiert auf der Messung von Grundwasserpegeln in unterschiedlichen Bohrlöchern. Die Bestimmung des spezifischen Durchflusses erfolgt anschliessend basierend auf dem Darcy-Gesetz (7.34). Dabei muss der Durchlässigkeitsbeiwert des Baugrunds bekannt sein (siehe Kapitel 7.34).

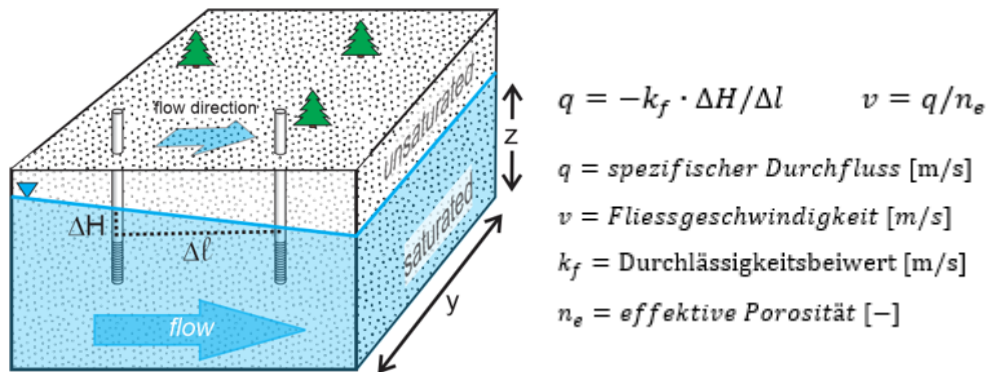


Abb. 7.62 Funktionsweise der Bestimmung des spezifischen Durchflusses mit der Darcy-Methode (links [104]) und Formeln der Darcy-Gleichung (rechts)

Tracer-Methode

Die Tracer-Methode basiert auf der Messung der Fliesszeit von Tracer zwischen zwei (oder mehreren) Bohrlöchern. Aus der Distanz zwischen den Bohrlöchern und der Fliesszeit des Tracers (Zeit nach Eingabe bis zum Erreichen der höchsten Konzentration des Tracers an der Messstelle/Bohrloch) kann die mittlere Fließgeschwindigkeit zwischen den Bohrlöchern bestimmt werden.

7.31.2 Fragestellungen in den Fachbereichen

Fragestellung im Bereich Tunnel

Die Bestimmung der Grundwasserströmung erfolgt im durchlässigen/geklüfteten Fels sowie im Lockergestein und kann punktuell direkt aus dem Tunnelbauwerk oder von der Oberfläche ausgeführt werden.

- Überwachung der Grundwasserströmung kurzfristig während der Bauarbeiten (z.B. Einfluss Tunnelvortrieb auf Strömungsverhältnisse) sowie langfristig während des Betriebs (Einfluss von Bauwerken auf Grundwasserregime und Strömungsverhältnisse);
- Überwachung der Wirksamkeit von Bauhilfsmassnahmen (z.B. Gefrierverfahren, Injektionskörper, Drainage).

Fragestellung im Bereich Naturgefahren

- Überwachung der Grundwasserströmung in Böschungen und Rutschhängen.
- Überwachung der Wirksamkeit von Stabilisierungsmassnahmen (z.B. Änderung der Grundwasserströmung infolge Drainagemassnahmen)

7.31.3 Datenerfassung, Raumbezug, Messgrößen und – Genauigkeit

- Die Messdatenerfassung erfolgt analog oder digital (Ablesegerät bzw. Datenschreiber/Logger) je nach Zugänglichkeit der Messstelle und den Anforderungen an Kontinuität und Messwertdichte;
- Die Messung erfolgt punktuell in einem Bohrloch und kann manuell oder automatisiert durchgeführt werden;
- Die Berechnung der Fließgeschwindigkeit und Richtung erfolgt indirekt über die Bestimmung des hydraulischen Gradienten, Messen von Tracer-Konzentrationen oder Wassertemperaturen sowie optischer Messung von Partikeln;
- Der Raumbezug einer einzelnen Messung kann über geodätische Aufnahmen bestimmt werden. In einem Bohrloch können Messungen je nach Methode einer spezifischen Bohrlochtiefe zugeordnet werden;
- Abgesehen von der zu erstellenden Bohrung erfolgen die Messungen zerstörungsfrei.

Eine Größenordnung der Fließgeschwindigkeit ist für einige der Messmethoden zusammen mit der Ungenauigkeit in der Bestimmung der Fließrichtung in der Tab. 7.26 gemäss [106] aufgeführt.

Tab. 7.26 Resultate aus Versuchen für die Bestimmung der Grundwasserströmung [106].

Typ	Größenordnung Geschwindigkeitsmessung	Ungenauigkeit Richtung
Punkt-Verdünnungs-Methode	10^{-2} bis 1 m / d	-
Tracer Durchflusssensor	10^{-2} bis 1 m / d	+/- 8°
Wärme Durchflusssensor	10^{-3} bis 10^3 m / d	+/- 15°
Kolloidales Boreskop	10^2 bis 10^3 m / d	+/- 25°
Darcy-Methode	10^{-3} bis 1 m / d	-

7.31.4 Entwicklungsstand, Anwendungsgrenzen, Kosten

Die mittlere Fliessgeschwindigkeit kann mit verschiedenen Methoden für einen grossen Messbereich bestimmt werden. Die Messmethoden unterscheiden sich dabei stark in ihrem Aufwand. Allgemein wird die Genauigkeit der Messung von der Anordnung der Messinstrumente im Messbereich und den Bohrlocheigenschaften beeinflusst. Bei einer verrohrten Bohrung beeinflussen die Ringspaltverfüllung und die Verrohrung die Messresultate [104]. Bei unverrohrten Bohrungen entfällt deren Einfluss.

Die Erfassung der Grundwasserströmung im geklüfteten Fels ist aufgrund der punktuellen Fliessgeschwindigkeiten und der punktuellen Messungen sehr aufwendig und es ist schwierig auf grossflächige Aussagen zu schliessen. Mittels Verwendung von faseroptischen Temperatursensoren zusammen mit einer gleichmässigen Wärmeeinbringung über die gesamte Bohrlochtiefe kann die Temperaturänderungen infolge Grundwasserströmung gemessen werden. Durch die kontinuierliche Temperaturmessung können die einzelnen Grundwasserströmungen in den Klüften erkannt und kontinuierlich gemessen werden [107].

Punkt-Verdünnungs-Methode

Während des Versuchs muss eine homogene Konzentration des Tracers durch ständige Durchmischung sichergestellt werden. Die unterschiedliche Dichte der Tracer Lösung und des Grundwassers können den Verdünnungsvorgang beeinträchtigen.

Tracer Durchflusssensor

Die Problematik der unterschiedlichen Dichte muss ebenfalls berücksichtigt werden. Für eine genaue Messung der Fliessrichtung muss eine enge Anordnung der Sensoren für die Erkennung der Tracer vorhanden sein. Dies wiederum kann den Einfluss der Grundwasserströmung durch den Messbereich im Bohrloch stark beeinflussen.

Wärme Durchflusssensor

Identisch zum Tracer Durchflusssensor steht die enge Anordnung der Temperatursensoren im Widerspruch zu einem ungestörten Durchfluss des Grundwassers durch den Messbereich.

Passives Flussmessgerät

Die Messung mit einem passiven Flussmessgerät erfolgt über einen längeren Zeitraum und nur die Bestimmung eines mittleren spezifischen Durchflusses ist möglich. Durch eine Unterteilung des Messbereiches kann eine horizontale Unterscheidung des Durchflusses erfolgen.

Kolloidales Boreskop

Im Vergleich zu den restlichen Messmethoden erfasst ein kolloidales Boreskop eher grössere Fliessgeschwindigkeiten. Für kleinere Fliessgeschwindigkeiten stimmt die Geschwindigkeit der Partikel nicht mehr sehr gut mit der Fliessgeschwindigkeit des Grundwassers überein [104].

Darcy-Methode

Mit der Darcy-Methode wird der gemittelte spezifische Durchfluss zwischen zwei Bohrlöchern bestimmt. Es wird von einem homogenen Durchlässigkeitsbeiwert ausgegangen und für die Berechnung der Fliessgeschwindigkeit wird eine homogene effektive Porosität berücksichtigt. Mit mehreren Bohrlöchern kann ebenfalls der räumliche

Gradient des Grundwasserspiegels und damit die gemittelte Fliessrichtung bestimmt werden.

Tracer-Methode

Für die Verwendung der Tracer-Methode muss ein gutes Vorwissen zur Grundwasserströmung (Richtung und Geschwindigkeit) vorhanden sein, damit die Anordnung der Bohrlöcher und die Versuchsdauer vorgängig erfolgen kann. Andernfalls wird eine grosse Anzahl an Bohrlöcher mit gegebenenfalls langer Überwachung notwendig. Aufgrund von Inhomogenitäten des Grundwasserstroms besteht auch bei mehreren Entnahmestellen/Bohrlöchern die Möglichkeit, dass in keiner Messstelle der Tracer detektiert wird.

Die Kosten für die Messung der Grundwasserströmung variiert stark zwischen den einzelnen Methoden. Bei einer kontinuierlichen Messung bestehen die Kosten im Aufwand für den Betrieb einer digitalen Lösung (Erfassung, Übermittlung und ggf. automatisierte Auswertung der Daten). Für die Erstellung eines Bohrlochs fallen zusätzliche Kosten an.

7.31.5 Ergänzende Ausschreibungsanforderungen

Siehe Kapitel 7.1.5

Ergänzend zu den Anforderungen an die Messtechnologie sind auch die Anforderungen an die baulichen Massnahmen (z.B. Bohrungen, Schutz Einrichtung, etc.) zu definieren sowie die Zugänglichkeiten (z.B. Erreichbarkeit, Eigentümer, etc.) zu beachten.

7.31.6 Literaturverzeichnis

Sonstige Literatur / Forschungsberichte

-
- [104] Devlin J.F. (2020), Groundwater Velocity, The Groundwater Project, Guelph, Ontario, Canada.
 - [105] Bundesamt für Wasser und Geologie BWG (2002), Einsatz künstlicher Tracer in der Hydrogeologie – Praxishilfe, Arbeitsgruppe Tracer der Schweizerischen Gesellschaft für Hydrogeologie SGH, Bern
 - [106] Li et al. (2019), Review of Groundwater Flow Velocity Measurement Method, Transactions – Geothermal Resources Council.
 - [107] Maldaner C. H., Munn J. D., Coleman T. I., Molson J., & Parker B. (2019). Groundwater flow quantification in fractured rock boreholes using active distributed temperature sensing under natural gradient conditions. Water Resources Research, 55, 3285– 3306.
<https://doi.org/10.1029/2018WR024319>
-

7.32 Wassertemperatursensoren

7.32.1 Beschrieb der Technologie

Die Wassertemperatur wird über Temperatursensoren direkt vor Ort bestimmt. Die Temperatur kann in einem Gerinne oder in einem Bohrloch gemessen werden und erfolgt über klassische Ausdehnungsthermometer (häufig Quecksilber), elektrische Sensoren (Widerstand, Thermoelement) oder über faseroptische Temperatursensoren. Die Bestimmung der Temperatur in einem Bohrloch kann über eine (elektrische) Temperatursonde erfolgen, welche auf die gewünschte Tiefe abgesenkt wird (Temperaturlichtlot, siehe Abb. 7.63 rechts). Mit der Erfassung der Temperatur in mehreren Tiefen kann ein Tiefenprofil der Temperatur erstellt werden. Für eine kontinuierliche Überwachung der Wassertemperatur können Messsonden stationär verbaut und mit einer digitalen Datenübertragung ausgerüstet werden. In einem Bohrloch können für ein kontinuierliches Temperatur-Tiefenprofil mehrere elektrische Sensoren auf unterschiedlichen Tiefen einzeln verbaut werden. Alternativ kann ebenfalls ein faseroptischer Sensor verwendet werden.

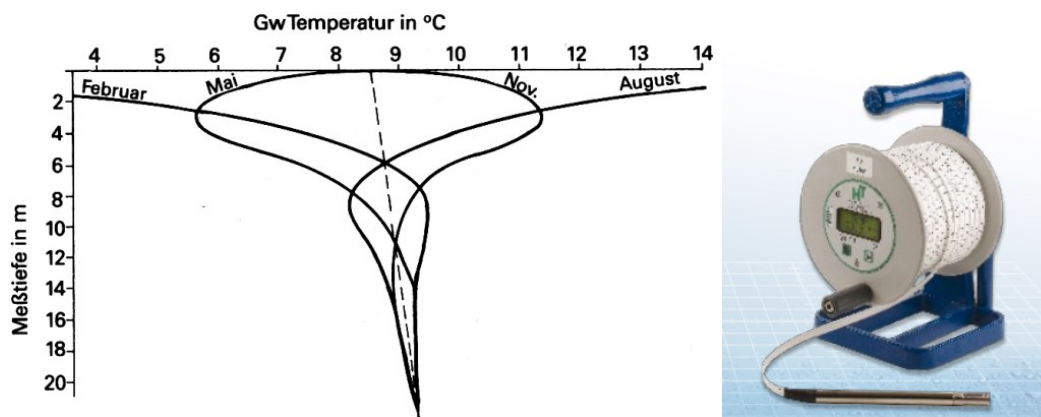


Abb. 7.63 Beispiel eines saisonalen Grundwasser Temperatur Tiefenprofils (links, [108]) und elektrische Sonde zur manuellen Temperaturmessung in einem Bohrloch vor Ort (rechts, [109])

Nachfolgend wird auf die einzelnen Wassertemperatursensoren eingegangen:

Ausdehnungsthermometer

Ausdehnungsthermometer bestimmen die Temperatur durch die unterschiedliche Längen- oder Volumenänderung von zwei Körper aufgrund einer Temperaturänderung. Ein klassisches Ausdehnungsthermometer ist ein Flüssigkeitsthermometer mit Quersilber in einem Glaskolben (-35°C bis 357°C), wobei auch diverse andere Flüssigkeiten verwendet werden können. Durch den Kontakt mit Wasser nehmen der Glaskolben und das Quecksilber die Wassertemperatur an. Durch eine geeichte Skala, welche vom Ausdehnungskoeffizienten von Quecksilber abhängig ist, kann die Temperatur bestimmt werden.

Elektrischer Temperatursensor

Elektrische Widerstandsthermometer basieren auf der Messung des elektrischen Widerstands eines metallischen Leiters. Als Leiter Materialien werden Platin (Pt), Nickel (Ni), Kupfer (Cu) und neuerdings auch Iridium (Ir) verwendet. Der elektrische Widerstand ist temperaturabhängig und nehmen mit steigender Temperatur zu. Die Messwiderstände sind bei 0°C auf $100\ \Omega \pm 0.1\ \Omega$ (Ohm) angegeben [110].

Elektrische Thermoelemente bestehen aus zwei Drähten aus unterschiedlichen Metallen, welche an einem Ende der Messstelle miteinander verbunden sind. Der thermoelektrische Effekt verursacht aufgrund des Temperaturgefälles zwischen Messstelle (verbundene Drähte) und Vergleichsstelle (einzelne Drähte) innerhalb eines elektrischen Leiters eine Thermospannung. Diese Spannung ist abhängig von der Temperaturdifferenz und dem Material des Leiters. Aufgrund der zwei unterschiedlichen Drähte heben sich diese Spannungen an der Vergleichsstelle nicht auf und eine Spannung (zwischen den zwei Drähten) kann gemessen werden. Aus dieser Spannung kann die Temperaturdifferenz zwischen Messstelle und Vergleichsstelle bestimmt werden. Als Vergleichsstelle kann ein zweites Thermoelement in Reihe geschaltet werden. Das zweite Element misst anschliessend an einem bekannten Wert (z.B. Eiswasser 0°C, Widerstandsthermometer oder elektrisch geheizte/gekühlte Vergleichskomponente) die Temperatur. Je nach verwendeten Materialien der Drähte können unterschiedliche Messbereiche der Temperatur abgebildet werden.

Faseroptische Temperatursensoren

Die faseroptische Temperatursensoren erfassen die Änderung des Lichtsignals innerhalb der Faser, was in Abhängigkeit von der Temperaturänderung der Faser selbst ist. Als Signal kann ein Raman oder Rayleigh-Signal verwendet werden (siehe Kapitel 7.10). Faseroptische Sensoren können die Temperatur punktuell oder quasi kontinuierlich (integrierte Temperatur über eine gewisse Faserlänge) über die Länge der Faser messen. In einem Bohrloch kann somit direkt das Tiefenprofil der Wassertemperatur bestimmt werden.

7.32.2 Fragestellungen in den Fachbereichen

Fragestellung im Bereich Tunnel

Die Messung der Wassertemperatur wird punktuell oder kontinuierlich direkt im Tunnel oder von der Oberfläche aus eingesetzt. Die Temperatur von Berg- und Grundwasser wird im Tunnelbau für die folgenden Einsatzzwecke verwendet:

- Überwachung von Berg- und Grundwasser kurzzeitig während der Bauarbeiten in sensitivem Umfeld (z.B. (Thermal-)Quellen, Grundwasserfassungen bzw. -schutzzonen)
- Überwachung von Berg- und Grundwasser während der Ausführung von Bauhilfsmassnahmen (z.B. Gefrierverfahren, Injektionsmassnahmen)
- Überwachung von Berg- und Grundwasser langfristig während des Betriebs (z.B. Einfluss auf Versinterungspotenzial, Alterung Abdichtung);
- Die Überwachung der Wassertemperatur kann für die Ortung von Undichtigkeiten in der Abdichtungsmembran verwendet werden.

7.32.3 Datenerfassung, Raumbezug, Messgrössen und – Genauigkeit

- Die Messdatenerfassung erfolgt analog oder digital (Ablesegerät bzw. Datenschreiber); Abhängig von der Zugänglichkeit der Messstelle und den Anforderungen an Kontinuität und Messwertdichte.
- Die Messung erfolgt Punktuell (elektrischer oder faseroptischer Sensor) oder über eine kontinuierliche Messpunktfolge (faseroptischer Sensor);
- Die Bestimmung des Messprinzips der elektrischen und faseroptischen Sensoren erfolgt indirekt z.B. über den temperaturabhängigen Widerstand (Widerstandssensor);
- Der Raumbezug einer einzelnen Messung oder Messstelle kann über geodätische Aufnahmen bestimmt werden. In einem Bohrloch können Messungen einer spezifischen Bohrlochtiefe zugeordnet werden;
- Die Prüfung erfolgt zerstörungsfrei (abgesehen von einer allfälligen Bohrung);

Die Messgenauigkeit einer Wassertemperaturmessung ist abhängig vom verwendeten Sensortyp, dem Messbereich und der Einbausituation. Für faseroptische Temperatursensoren wird eine Genauigkeit von ca. +/- 0.1°C bis ca. +/- 0.6°C erreicht. Die Auflösung beträgt ca. +/- 0.1°C und der Messbereich liegt im Bereich zwischen ca. -200°C und 300°C. Elektrische Widerstandssensoren erzielen eine Messgenauigkeit von ca.

+/- 0.1°C (im Messbereich -35°C bis 50°C) mit einer Auflösung von 0.01°C. Der gesamte Messbereich kann je nach Typ im Bereich von ca. -270°C und + 2000°C liegen. In einem Bohrloch können elektrische Temperatursensoren auf einer Länge von ca. 500 m mittels Sonde (siehe Abb. 7.63) eingesetzt werden. Faseroptische Temperatursensoren können kontinuierlich über grosse Längen (> 1 km) fest verbaut werden.

Tab. 7.27 Messbereich/Genauigkeit bestimmter Typen von Temperatursensoren.

Sensoren Typ	Messbereich	Auflösung	Genauigkeit
Ausdehnungsthermometer (Quecksilber)	-35°C bis 357°C	+/- 1.0°C	+/- 0.5°C
Elektr. Temperatursensor (Widerstand)	- 270°C bis + 800°C	+/- 0.01°C	+/- 0.1°C
Elektr. Temperatursensor (Thermoelement)	- 200°C bis + 2000°C	+/- 0.1°C	+/- 0.5°C
Faseroptisch (punktuell)	- 200°C bis + 300°C	+/- 0.1°C	+/- 0.1°C
Faseroptisch (kontinuierlich)	- 40°C bis + 300°C	+/- 0.1°C	+/- 0.6°C

7.32.4 Entwicklungsstand, Anwendungsgrenzen, Kosten

Die Wassertemperatur in einem Bohrloch oder einem Gerinne kann einfach, genau und kontinuierlich mit unterschiedlichen Sensoren überwacht werden. Der erwartete Temperaturbereich von Berg- und Grundwasser liegt klar innerhalb des Messbereichs aller Temperatursensoren.

Ausdehnungsthermometer

Die manuelle Erfassung der Wassertemperatur mittels Ausdehnungsthermometer ist nur in offenen Gerinnen möglich. Aufgrund der direkten Ablesung vor Ort/an der Messstelle kann ein Ausdehnungsthermometer nicht effektiv in einem Bohrloch angewendet werden.

Elektrische Temperatursensoren

Ein Widerstandssensor ermöglicht eine genauere Bestimmung der Temperatur als ein Thermoelement. Die Ansprechzeit, bis die Wassertemperatur angenommen und wiedergegeben werden kann, ist bei einem Thermoelement kürzer als bei einem Widerstandssensor. Die Langzeitstabilität eines Widerstandssensor ist dagegen grösser. Aufgrund des aktiven Stromflusses durch den Leiter muss die Selbsterwärmung bei einem Widerstandssensor berücksichtigt werden. Im Vergleich zum Widerstandssensor benötigt ein Thermoelement eine Vergleichstemperaturstelle, um eine absolute Temperatur bestimmen zu können. Für die Messung der Temperatur in mehreren Tiefen eines Bohrlochs müssen elektrische Temperatursensoren als Sonde verwendet werden (siehe Abb. 7.63). Es können auch mehrere fest verbaute elektrische Temperatursensoren in verschiedenen Tiefen des Bohrlochs verwendet werden.

Faseroptische Temperatursensoren

Die Messung der Wassertemperatur mittels faseroptischen Temperatursensoren ist eine neuere Entwicklung. Im Vergleich zu elektrischen Sensoren kann ohne grossen Aufwand eine grosse Messwertdichte erreicht werden. Die Messung der Temperatur kann nicht durch elektromagnetische Felder beeinflusst werden und der faseroptische Sensor hat keinen Einfluss auf die Wassertemperatur (keine Selbsterwärmung).

Die Kosten für eine einzelne Messung der Wassertemperatur belaufen sich auf ca. 300 CHF. Für die kontinuierliche Überwachung der Wassertemperatur liegt die Installationspauschale im Bereich von ca. 1'500 CHF pro Messstelle. Die wiederkehrenden Kosten bestehen im Aufwand für die Auswertung und Interpretation der aktuellen Messwerte oder für den Betrieb (und Installation) einer digitalen Lösung (Erfassung, Übermittlung und ggf. automatisierte Auswertung der Daten). Bei einer Messung im Bohrloch fallen zusätzliche Kosten für dessen Erstellung an.

7.32.5 Ergänzende Ausschreibungsanforderungen

Siehe Kapitel 7.1.5

7.32.6 Literaturverzeichnis

Sonstige Literatur / Forschungsberichte

-
- [108] Bayerisches Landesamt für Umwelt (2021), Grundwassertemperatur, <https://www.lfu.bayern.de/wasser/grundwassertemperatur/index.htm>, (Zugriff 24.05.2022)
-
- [109] Hydrotechnik GMBH (2022), Datenblatt Temperaturlichtlot Typ 110, <https://www.ht-hydrotechnik.com/de/produkte/handmessgeraete/temperaturlichtlot/>, (Zugriff 24.05.2022)
-
- [110] Edwin Fecker (2018), Geotechnische Messgeräte und Feldversuche im Fels, 2. Auflage, Springer Spektrum Berlin, <https://doi.org/10.1007/978-3-662-57824-7>
-

7.33 Durchflussmessung

7.33.1 Beschrieb der Technologie

Eine Durchflussmessung erfasst die Fliessrate von Wasser im offenen oder geschlossenen (Rohrleitung) Gerinne. Der Durchfluss bezieht sich auf die Wassermenge, welche pro Zeiteinheit einen definierten Fliessquerschnitt durchfliesst und wird mit der Einheit m^3/s oder l/s angegeben.

Es stehen verschiedene Messmethoden für den Durchfluss im offenen Gerinne / Schächte zur Verfügung:

Messwehr (Messüberfall)

Die gesamte Abflussmenge wird über ein Messüberfall geführt (Abb. 7.64). Aus der Höhe des Wassers über dem Überfall / Wehrkante und der Wehrgeometrie lässt sich der Durchfluss bestimmen. Der Wasserspiegel wird mit einem gewissen Abstand oberhalb der Wehrkante gemessen.

Die Messung des Wasserspiegels kann mit analoger (z.B. Ablesung Messlatte, Schwimmpegel) und/oder digitaler (z.B. Ultraschallsensor, Drucksensor) Messtechnik erfolgen. Mittels digitaler Wasserstandsensoren kann die Durchflussrate kontinuierlich überwacht werden.



Abb. 7.64 Messwehr in einer Quelfassung [112]

Messrinne (Venturi Kanal)

In einer Messrinne erfolgt durch die Verengung des Querschnittes ein Wechsel des Abflusses von strömend zu schiessend. Dies verhindert einen Einfluss des Wassers unterhalb der Verengung auf den Bereich oberhalb. Im Bereich oberhalb der Verengung entsteht dadurch eine stationäre Beziehung zwischen Wasserstand und Durchfluss, welche für die Bestimmung der Durchflussrate verwendet wird.



Abb. 7.65 Venturi Kanal einer Quellschüttung [113]

Die Messung des Wasserspiegels bei einem Messwehr oder Messrinne kann mittels unterschiedlicher Messtechniken erfolgen – abhängig von den Anforderungen der Genauigkeit und der Kontinuität der Messung. Analoge Messtechniken (z.B. Ablesung einer Messlatte) ermöglichen die einfache Messung vor Ort. Mittels digitaler Messtechniken (z.B. Radarsensor oder Drucksensor) kann der Wasserpegel kontinuierlich überwacht werden. Weiter Ausführungen zu Technologien zur Bestimmung des Wasserspiegels sind in Kapitel 7.29 aufgeführt.

Volumen-Füllzeit-Messung

Durch die Messung der erforderlichen Zeit, bis ein Messgefäß (mit geeichtem Volumen) gefüllt ist, kann die Durchflussrate direkt bestimmt werden. Die Volumen-Füllzeit-Messung kann nicht kontinuierlich erfolgen und erfolgt i.d.R. punktuell vor Ort.

Tracer- / Salzverdünnungsmethode

Im Bereich von offenen Gerinnen (besonders Gebirgsbächen) kann die Abflussmenge ebenfalls mit der Tracer- / Salzverdünnungsmethode festgestellt werden. Dabei wird in ein Gerinne eine Salzlösung eingegeben. Anschliessend wird kontinuierlich die Salzkonzentration an einer Stelle Flussabwärts mittels elektronischer Leitfähigkeit gemessen. Aus der Menge zugegebenen Salzes und der integrierten Konzentration über den Messzeitraum kann die Abflussmenge bestimmt werden.

Durchflussmessung in einem offenen Gerinne mittels Fliessgeschwindigkeit

Durch die Bestimmung der Fliessgeschwindigkeit und dem durchflossenen Querschnitt kann die Durchflussrate berechnet werden. Der Geschwindigkeitswert kann mittels Ultraschallsensor (z.B. Laufzeitverfahren oder Dopplerverfahren, siehe auch Abschnitt geschlossenes Gerinne) bestimmt werden und sollte dem mittleren Fliessgeschwindigkeit im Abflussprofil entsprechen. Für die Bestimmung des Wasserspiegels wird ein weiterer Sensor benötigt (siehe auch 7.29). Der Abflussquerschnitt muss für unterschiedliche Wasserspiegel bekannt sein.

In einem geschlossenen Gerinne /Vollverfüllte Rohrleitung muss für die Bestimmung des Durchflusses die Rohrgeometrie und die Fliessgeschwindigkeit bekannt sein. Folgende Messmethoden stehen zur Verfügung:

Volumenzähler

Mit einem Volumenzählern erfolgt die Bestimmung der Fliessrate über die Messung der Bewegung eines Propellers (oder ähnlichem) im Rohr, welche proportional zum durchflossenen Volumen ist.



Abb. 7.66 Flügelrad-Durchflussmesser [114]

Ultraschallsensor

Bei Ultraschall-Durchflussmessungen erfolgt die Bestimmung der Fliessgeschwindigkeit mit dem Laufzeit- oder Dopplerverfahren. Das Laufzeitverfahren verwendet zwei Sensoren, welche gleichzeitig Ultraschallimpulse empfangen und senden. Die Laufzeitdifferenz zwischen den Impulsen (Entgegen oder mit der Strömung unterschiedliche schnell) ist direkt proportional zur Fliessgeschwindigkeit im Rohr. Im Dopplerverfahren wird von einem Sensor ein Ultraschallsignal ausgesendet. Feststoffteilchen oder Gasblasen im Wasser reflektieren das Signal. Aufgrund der Bewegung der Teilchen erfolgt eine Frequenzverschiebung bei der Reflexion, welche direkt proportional zur Fliessgeschwindigkeit ist [111].

Magnetisch-Induktive Durchflussmessung (MID)

Bei der MID erfolgt die Bestimmung der Fliessrate über die Messung der induzierten Spannung des durchfliessenden Wassers, welche direkt proportional zur Fliessgeschwindigkeit ist.

Drucksensor

Die Bestimmung der Durchflussrate durch Drucksensoren erfolgt über die Messung des Strömungsdruckes im Rohr. Eine Möglichkeit ist die Messung des Staudrucks durch Öffnungen entgegen (Überdruck) und in (Unterdruck) Strömungsrichtung. Aus den zwei Drücken kann die mittlere Fliessgeschwindigkeit bestimmt werden. Eine Alternative bildet die Bestimmung der Fliessgeschwindigkeit durch die Messung des Wasserdrucks vor und während einer Querschnittsverengung (Venturi Prinzip). Die Druckdifferenz zwischen den zwei Messstellen ist proportional zum Durchfluss im Rohr.

7.33.2 Fragestellungen in den Fachbereichen**Fragestellung im Bereich Tunnel**

Die Messung des Durchflusses wird punktuell und/oder kontinuierlich in Quellschüttungen /Quellfassungen eingesetzt. Allgemeine Schüttungsmessungen werden direkt an der Austritts-Oberfläche im Tunnel eingesetzt. Sie dienen in der Regel der Überwachung von Grund- und Bergwasser.

- Überwachung von Quellen kurzzeitig während Bauarbeiten (z.B. Einfluss Tunnelvortrieb auf die Durchflussrate der Quellschüttung) und langfristig während des Betriebs im Einflussbereich des Bauwerks (z.B. Langzeiteinfluss von Tunneln auf die Durchflussrate der Quellschüttung).
- Überwachung von Abflussmengen kurzzeitig während Bauarbeiten (z.B. Anfall Bergwasser während dem Tunnelvortrieb) und langfristig während dem Betrieb (z.B. saisonale Schwankungen des Bergwasseranfalles).

Fragestellung im Bereich Naturgefahren

- Überwachung von Durchflussrate an Quellschüttungen in einem Rutschgebiet.
- Überwachung der Wirksamkeit von Stabilisierungsmassnahmen (z.B. Durchflussrate in einer Drainageleitung in einem Rutschgebiet).
- Überwachung der Abflussmengen in einem Fliessgewässer (z.B. zur Erkennung von Hochwasserereignissen.).

7.33.3 Datenerfassung, Raumbezug, Messgrössen und – Genauigkeit

- Die Messdatenerfassung kann analog oder digital erfolgen – je nachdem, welche Ansprüche an die Kontinuität, Messwertdichte gestellt werden. Die Messung kann in einem offenen oder geschlossenen Gerinne / vollverfüllte Rohrleitung erfolgen;
- Die Messdatenerfassung erfolgt mit einem Ablesegerät bzw. Datenschreiber;
- Der Raumbezug einer Messstelle kann über geodätische Aufnahmen bestimmt werden;
- Die Durchflussmessungen erfolgen zerstörungsfrei. Je nach Messmethode sind bauliche Massnahmen für die Messeinrichtung notwendig.

Die Genauigkeit und der Messbereich von Durchflussmessungen sind stark abhängig von der Messmethode und der Variation der Fliessrate. In Tab. 7.28 sind für einige Messmethoden die Messdynamik (Verhältnis zwischen minimalem und maximalem Messwert) und die Messunsicherheit zusammengestellt.

Die Messung der Abflussmenge mittels Tracer / Salzverdünnungsmethode erfolgt mit einer relativen Unsicherheit von ca. 8.5 % [115].

Tab. 7.28 Messbereich/Genauigkeit zur Durchflussmessung [111].

Typ	Messdynamik	Rohrleitungen	Messunsicherheit
Messwehr	bis ca. 400:1	-	ca. 2 % bis 4 %
Messrinne	ca. 20:1	-	ca. 3 % bis 5 %
Volumenzähler	ca. 10:1 bis 500:1	-	ca. 2 % bis 5 %
MID	bis ca. 1000:1	DN 25 bis DN 2'000	ca. 0.5 % bis 1 %
Ultraschallsensor (Laufzeitverfahren)	bis ca. 150:1	DN 15 bis DN 4'000	ca. 2 % bis 5 %
Ultraschallsensor (Dopplerverfahren)	bis ca. 150:1	DN 15 bis DN 4'000	ca. 1 % bis 3 %
Drucksensor (Staudruck)	bis ca. 30:1	DN 3 bis DN 3'000	ca. 1 %
Drucksensor (Venturi)	bis ca. 10:1	DN 10 bis DN 80	ca. 3 %

7.33.4 Entwicklungsstand, Anwendungsgrenzen, Kosten

Durchflussmessungen eignen sich mit unterschiedlichen Messmethoden als einfache, erprobte und kontinuierliche Überwachungsmethode der Durchflussrate von Quellen und Wasserzutritten.

Offenes Gerinne

Bei Messungen im offenen Gerinne kann es infolge von Rückstauungen zu grossen Messfehlern kommen. Ablagerungen und Verunreinigungen im Messquerschnitt beeinflussen ebenfalls die Messgenauigkeit

Geschlossenes Gerinne / Vollverfüllte Rohrleitung

Für die Minimierung von Messungenauigkeit bei einem vollständig gefüllten Querschnitt müssen die Turbulenzen im Rohr klein gehalten werden. Es können Beruhigungstrecken (z.B. gerade Rohrabschnitte) vor und nach der Messstelle angeordnet werden. Ablagerungen und Verunreinigungen im Messquerschnitt können ebenfalls zu Ungenauigkeiten führen. Ultraschallsensoren (Laufzeitverfahren) können an bestehenden Rohren angebracht werden, ohne das Umbauen benötigt werden. Ultraschallsensoren (Dopplerverfahren) brauchen für die Messung der Fliessgeschwindigkeit eine Mindestkonzentration an Streukörper (z.B. Verschmutzung oder Luftbläschen) im Wasser. Für Quellwasser ist das Verfahren daher eher nicht geeignet [111].

Messungen im geschlossenen Gerinne benötigen i.d.R. einen vollständig gefüllten Querschnitt. Mit den Messmethoden MID und Ultraschallsensor (Dopplerverfahren) können auch bei teilgefüllten Rohren zusammen mit der Messung der Wasserstandhöhe (z.B. über Drucksensor oder Ultraschallmessung) die Durchflussrate bestimmt werden.

Die Installationskosten für eine Durchflussmessung in einem offenen Gerinne belaufen sich abhängig von der Gerinnegrösse auf ca. 1000 CHF. Bei Rohrleitungen liegen die Kosten tendenziell höher. Wiederkehrende Kosten entstehen aus dem Ablesen oder der digitalen Bereitstellung der Messwerte und deren Auswertung.

7.33.5 Ergänzende Ausschreibungsanforderungen

Siehe Kapitel 7.1.5

Die Messstellen müssen regelmässig vor Ort visuell kontrolliert werden.

7.33.6 Literaturverzeichnis

Sonstige Literatur / Forschungsberichte

-
- [111] Bayerisches Landesamt für Umwelt (2008), Merkblatt Nr. 2.1/10 Messeinrichtungen an Quellen
-
- [112] Umwelt- und Ingenieurtechnik GmbH Dresden (2022), Messwehr - Abflussmessungen in Quelfassungen, https://www.uit-gmbh.de/de/produktdetails__762/getProdInfos_-_2277/, (Zugriff 18.05.2022)
-
- [113] Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft (BMLFUW)(2005), Quellbeobachtung im Hydrographischen Dienst in Österreich, Mitteilung des Hydrographischen Zentralbüros, Heft 70, Wien
-
- [114] Kobold Instruments AG, Flügelrad Durchflussmesser DRH, <https://www.kobold.com/FI%C3%BCgelrad-Durchflussmesser-DRH>, (Zugriff 22.08.2022)
-
- [115] DWA Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V. (2011), Merkblatt DWA-M 181 - Messung von Wasserstand und Durchfluss in Entwässerungssystemen.
-

7.34 Durchlässigkeitsversuche

7.34.1 Beschrieb der Technologie

Die Durchlässigkeit eines Materials kann mittels Durchlässigkeitsversuche im Labor, der empirischen Korrelation auf Grundlage der Korngrössenverteilung, durch Feldversuche und durch Auswertung von Oedometerversuchen bestimmt werden [116]. Für die Durchlässigkeitsmessung im Labor werden in der Regel zylindrische Proben verwendet, die durchströmt werden. Die Durchlässigkeit kann über die Fliessrate, Druckdifferenz und Geometrie der Probe bestimmt werden. Aus Oedometerversuchen kann bei Schluff- und Tonproben für eine konstante Verformungsgeschwindigkeit direkt die Durchlässigkeit bestimmt werden [116]. Die empirische Korrelation der Korngrössenverteilung mit der Durchlässigkeit ermöglicht eine rechnerische Abschätzung der Materialdurchlässigkeit von Lockergestein. Die Abschätzung basiert auf empirischen Erfahrungswerten und der theoretischen Grundlage, dass Feinanteil und die Ungleichförmigkeit des Korngemisches die Durchlässigkeit entscheidend beeinflussen [117].

Ein Feldversuch erfolgt in der Regel in einem Bohrloch (in-situ) und es können unterschiedlichen Verfahren (z.B. Pumpversuch, Packerversuch, Auffüll- / Absenkversuche, Slug- und Bail Tests, Einschwingversuche und Tracerversuche [118]) verwendet werden. Eine wissenschaftlich exakte Auswertung und Bestimmung der Durchlässigkeit ist nicht möglich. Aus den Versuchen können dennoch wichtige Erkenntnisse zur Durchlässigkeit gewonnen werden. Nachfolgend wird auf die einzelnen In-Situ Verfahren zur Bestimmung der Durchlässigkeit eingegangen.

Pumpversuche

Der Pumpversuch basiert auf einer konstanten Entnahme von Wasser aus einem Brunnen. Nach dem sich ein konstanter Wasserpegel eingestellt hat kann aus der Veränderung des Pegels und/oder der Pegelveränderung in benachbarten Grundwassermessstellen die Durchlässigkeit des Baugrunds bestimmt werden. Die Versuchsdauer ist abhängig vom Baugrund und beträgt bei normalen Pumpversuchen bis zu mehreren Tagen. Pumpversuche können in ausgebauten oder unausgebauten Bohrlöchern erfolgen.

Bei Auffüll- und Absenkversuchen (bzw. "kurz"-Pumpversuchen) beträgt die Versuchsdauer nur wenige Stunden. Die Versuche verlaufen dabei wie bei einem Pumpversuch durch Wasserentnahme (Absenkversuch) oder durch eine Wasserzugabe (Auffüllversuch). Im Vergleich zu einem Pumpversuch werden die Versuche auch auf begrenzten Stellen im Bohrloch (z.B. mit Packerabtrennung) und ohne weitere Messstellen bestimmt [117].

Packerversuche

Bei Packerversuchen (z.B. Pulse-Test, Drillstem-Test, WD- oder Lugeon-Test) wird in einem unverrohrten Abschnitt eines Bohrlochs der Wasserfluss oder die Druckveränderungen gemessen. Der Abschnitt wird durch Packer im Bohrloch abgedichtet.

Bei einem Pulse-Test wird durch ein kurzzeitiges Öffnen eines Ventils ein schlagartiger Überdruck auf den mit Wasser gefüllten Abschnitt zwischen zwei Packer aufgebracht. Der zeitliche Druckverlauf im Abschnitt wird gemessen und für die Auswertung der Durchlässigkeit verwendet.

Analog wie bei einem Pulse-Test wird bei einem Drillstem-Test der Wasserdruck im Abschnitt zwischen zwei Packern schlagartig verändert. Dabei erfolgt ein Aufbringen eines Unterdrucks. Nach der Normalisierung des Wasserdrucks wird das Vorgehen wiederholt. Die Auswertung basiert wiederum auf dem gemessenen zeitlichen Druckverlauf.

Bei einem WD-Test (oder Lugeon-Test) erfolgt eine Einleitung von Wasser in den Messbereich unter konstantem Druck (siehe Abb. 7.67). Durch die Messung der Wassermenge und dem Wasserdruck erfolgt die Auswertung der Durchlässigkeit.

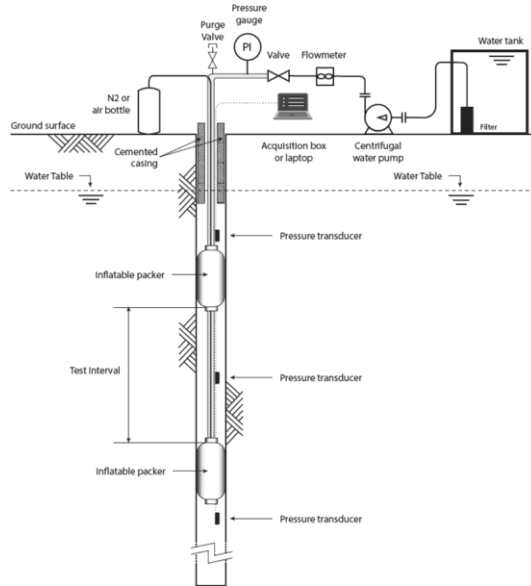


Abb. 7.67 Aufbau WD– oder Lugeon- Test [119]

Slug- and Bail Test

Slug- und Bail Tests basieren auf einer schlagartigen Änderung des Wasserdruckes/Wasserspiegels im Bohrloch. Gemessen wird die anschließende zeitliche Änderung des Wasserdruckes/Wasserspiegels. Die schlagartige Anhebung oder Absenkung des Wasserspiegels (Wasserdruck) erfolgt durch einen Verdrängungskörper (Slug-Körper). In Verbindung mit einem Packer können bestimmte Bohrlochabschnitte untersucht werden.

Einschwingverfahren

Das Einschwingverfahren wird als Sonderfall des Slug-Tests bezeichnet. Der Wasserspiegel wird mit Hilfe von Druckluft abgesenkt. Durch ein schlagartiges Entweichen der Druckluft (Druckabbau) nähert sich der Wasserspiegel durch ein schnelles einschwingen (oszillierender Verlauf) oder eher langsam angleichen (asymptotischer Verlauf) an die ursprüngliche Ausgangslage an.

Tracer Versuche

Tracer Versuche basieren aus dem Einbringen von verschiedenen Tracern (Farbstoffe, radioaktive Isotope, Sporen und Pollen) in Beobachtungsmessstellen/Zugabe-Stelle und einem Pumpversuch / einer Entnahmestelle in einem anderen Bohrloch. Aus der Dauer bis zur Feststellung des Tracers im Pumpversuch kann die Durchlässigkeit indirekt mit dem effektiven Porenvolumen bestimmt werden.

7.34.2 Fragestellungen in den Fachbereichen

Fragestellung im Bereich Tunnel

Versuche zur Bestimmung der Durchlässigkeit werden punktuell von der Oberfläche aus oder direkt im Tunnel bei Locker und Festgestein eingesetzt. Die Durchlässigkeit wird in der Regel im Rahmen der Geologischen Vorabklärungen untersucht. Im Allgemeinen wird die Durchlässigkeit des Baugrunds im Tunnelbau für folgende Einsatzzwecke verwendet:

- Abschätzung des Wasseranfalls z.B. während des Vortriebs oder des Aushubs einer Baugrube;
- Abschätzung der Machbarkeit von Bauhilfsmassnahmen z.B. Injektionen, Gefrierverfahren;
- Abschätzung des Erfolgs/Misserfolgs von Bauhilfsmassnahmen z.B. ausreichende Reduktion der Durchlässigkeit bei Injektionskörper.

Fragestellung im Bereich Naturgefahren

- Abschätzung der Entwässerung in Böschungen und Rutschhängen
- Abschätzung der Wirksamkeit von Stabilisierungsmassnahmen (z.B. Erhöhung der Durchlässigkeit in einer Böschung)

7.34.3 Datenerfassung, Raumbezug, Messgrössen und – Genauigkeit

- Die Messdatenerfassung erfolgt direkt vor Ort (in-Situ Versuche) oder nach Entnahme der Probe im Labor. Für In-Situ Versuche muss das Bohrloch für die Messung zugänglich sein.
- Die Messungen in einem Bohrloch mit Packer können einer spezifischen Bohrlochtiefe zugeordnet werden. Die Messung erfolgt in radialer Richtung des Bohrlochs. Bei Laborprüfungen kann die Orientierung der Probe geändert werden.
- Bei einer Bohrlochprobe erfolgt die Prüfung, abgesehen vom Bohrloch, zerstörungsfrei. Der aufgebrachte Wasserdruck kann jedoch zu Rissbildung oder Ausschwemmen im Baugrund führen. Die Bestimmung der Durchlässigkeit im Labor bedingt einer Probenentnahme und ist daher zerstörend.

Die Durchlässigkeit wird mit der hydraulischen Leitfähigkeit bzw. Durchlässigkeitsbeiwert k_f [m/s] angegeben. Dieser berücksichtigt die Viskosität des Wassers und die Durchlässigkeit des Materials (zu unterscheiden mit dem Wert der Permeabilität K [m²], welcher eine Materialkenngrösse des durchströmten Mediums ist). Der Durchlässigkeitsbeiwert basiert auf dem Gesetz von Darcy, welche den Volumendurchfluss Q proportional zum Produkt aus hydraulischem Gradienten i und Durchlässigkeitsbeiwert k_f festlegt ($Q/A = i \cdot k_f$).

Die Messgrössen aus einem Laborversuch ermöglichen eine direkte Berechnung der Proben-Durchlässigkeit (k_f zwischen 10^{-2} bis 10^{-11} m/s). Für einen heterogenen Baugrund (z.B. Fels) ist ein solcher Laborversuch nur beschränkt aussagekräftig, da die Probengrösse oft zu klein ist (Durchmesser 30 cm).

Durch die empirische Korrelation kann die Durchlässigkeit (k_f zwischen 10^{-3} bis 10^{-5} m/s) anhand der Korngrössenverteilung bestimmt werden.

Die Messgrössen in einem In-Situ Bohrlochversuch lassen sich nicht exakt in die gesuchten Durchlässigkeitsbeiwerte des Baugrunds umwandeln. Es erfolgt eine Abschätzung des Baugrundverhaltens anhand der erhaltenen Messwerte und gegebenenfalls anhand von standardisierten Messgrössen (z.B. Lugeon oder WD-Wert). Die Versuchsdauer variiert je nach Versuch und Durchlässigkeit des Baugrunds zwischen weniger als 1 Std. und mehr als 100 Std.

Tab. 7.29 Messbereich/Genauigkeit der Durchlässigkeit in Bohrlochversuchen [118].

Versuch	Messbereich Durchlässigkeit (k_f in m/s)	Länge Untersuchungsabschnitt	Grössenordnung der Reichweite
Pumpversuch	10^{-2} bis 10^{-8}	wassergesättigter Bereich	10 bis < 300 m
WD-Versuch	10^{-4} bis 10^{-8}	1 bis 5 m	2 bis 3 m
Pulse-Test	$< 10^{-8}$	1 m	1 m
Drillstem-Test	10^{-5} bis 10^{-10}	bis 10 m	1 bis 10 m
Bohrlochversickerung	10^{-4} bis 10^{-9}	2 m	bis 5 m
Slug- und Bail-Test	10^{-2} bis 10^{-7}	wassergesättigter Bereich	1 bis 10 m
Einschwingverfahren	10^{-2} bis 10^{-7}	abgepackter Bereich	50 bis 100 m
Tracer	10^{-2} bis 10^{-7}	abgepackter Bereich	bis 500 m

7.34.4 Entwicklungsstand, Anwendungsgrenzen, Kosten

Die exakte Bestimmung der Durchlässigkeit ist aufgrund der künstlichen Versuchsanordnung im Labor oder den unbekannten Verhältnissen im Bohrloch nur bedingt möglich. Versuche im Bohrloch oder im Labor können im Lockergestein oder Festgestein durchgeführt werden. Eine exakte Bestimmung der Materialdurchlässigkeit

lassen Bohrlochversuche nicht zu, hingegen liefern sie Indizien der (lokalen) Baugrunddurchlässigkeit. Versuche im Bohrloch werden ebenfalls durch die Eigenschaften der Bohrlochwand (z.B. verstopfte Strömungswege infolge Bohrung) beeinflusst. Für die Auswertung der Versuche müssen die passenden Auswertungsverfahren angewendet werden.

Laborversuche

Die Laborversuche sind besonders bei heterogenen Festmaterialien nur bedingt aussagekräftig für die realen Gegebenheiten vor Ort und stark Massstabs-abhängig. Für die Untersuchung von "ungestörten" Proben entsteht bei der Probeentnahme und dem Transport zusätzlicher Aufwand. Mit Laborversuchen lässt sich jedoch ein grosser Durchlässigkeitsbereich untersuchen.

Empirische Korrelation der Korngrössenverteilung

Die empirische Korrelation der Korngrössenverteilung für die Bestimmung der Durchlässigkeit kann nur bei Lockergestein angewendet werden. Die Auswertung ist abhängig von der Qualität der Korngrössenverteilung (kein Entmischen der Bodenproben, repräsentative Probe). Die Bestimmung der Durchlässigkeit kann mittels unterschiedlichen Umrechnungsformeln (z.B. nach Zieschang [120]) erfolgen.

Pumpversuche

Die Bestimmung der Baugrund Durchlässigkeit mittels Pumpversuche ist eine einfache und zuverlässige Methode. Sie können nur in wassergesättigten Baugrund durchgeführt werden. Es erfolgt eine Integration der Messwerte über das Bohrloch und Inhomogenitäten werden nicht erkannt.

Packerversuche,

Die Anwendung von Packerversuchen benötigt ein standfestes Bohrloch. Eine mögliche Umläufigkeit von Wasser um die Packer kann durch eine beidseitige Wasserdruckmessung am Packer kontrolliert werden. Der Baugrund muss je nach Versuch wassergesättigt sein.

Slug- and Bail Test

Die Anwendung von Slug- and Bail Tests benötigt ein standfestes Bohrloch. Sie können in Verbindung mit Packer verwendet werden.

Einschwingverfahren

Das Einschwingverfahren kann nur in wassergesättigten Baugrund erfolgen. Die Druckluft darf nicht in die Umgebung entweichen können (i.d.R. sollte daher der Grundwasserspiegel im Verrohrten Bereich der Bohrung liegen).

Tracer Versuche

Die Bestimmung der Durchlässigkeit mittels Tracerversuch ist ein aufwendiges Verfahren. Bei der Wahl des geeigneten Tracers müssen die Baugrundeigenschaften und die Umweltauflagen beachtet werden. Für die Bestimmung der Durchlässigkeit müssen bestimmte Kennwerte (z.B. effektive Porenvolumen) bekannt sein [117]. Je nach Durchlässigkeit des Baugrunds und Abstand der Messtellen ergeben sich sehr lange Versuchsdauern (mehrere Wochen)

Die Kosten sind je nach Versuch, Umfang und Anordnung variabel.

7.34.5 Ergänzende Ausschreibungsanforderungen

Siehe Kapitel 7.1.5

Ergänzend zu den Anforderungen an die Messtechnologie sind auch die Anforderungen an die baulichen Massnahmen (z.B. Bohrungen, Schutz Einrichtung, etc.) zu definieren sowie die Zugänglichkeiten (z.B. Erreichbarkeit, Eigentümer, etc.) zu beachten.

7.34.6 Literaturverzeichnis

Sonstige Literatur / Forschungsberichte

-
- [116] DIN EN 1997-2:2007, Anhang S, Detaillierte Informationen zu Versuchen zur Bestimmung der Durchlässigkeit
-
- [117] Landesanstalt für Umweltschutz Baden-Württemberg (1991), Bestimmung der Gebirgsdurchlässigkeit
-
- [118] Ebady, S. und Kowalewski, J. (1994), In-situ-Untersuchungsmethoden in Bohrlöchern zur Ermittlung der Wasserdurchlässigkeit
-
- [119] Vaskou, Philippe & Quadros, Eda & Kanji, Milton & Johnson, Tom & Ekmekci, Mehmet. (2019). ISRM Suggested Method for the Lugeon Test. Rock Mechanics and Rock Engineering. 52.
<https://doi.org/10.1007/s00603-019-01954-x>
-
- [120] Zieschang J. (1961), Zur zulässigen Höchstbelastung eines Brunnens. Zeitschrift für Angewandte Geologie 7: S 580-582
-

7.35 Leitfähigkeitssensoren

7.35.1 Beschrieb der Technologie

Die elektrische Leitfähigkeit von Wasser kann direkt vor Ort mittels Handmessgerät oder im Labor getestet werden. Reines Wasser ist grundsätzlich nicht leitfähig. Die im Wasser gelösten Ionen führen hingegen zu einer elektrischen Leitfähigkeit, welche mit konduktiven oder induktiven Leitfähigkeitssensoren gemessen werden kann. Die Leitfähigkeit ist somit ein Indiz für den Anteil an Anionen (Hydrogenkarbonat, Sulfat, Chlorid, Nitrat) und Kationen (Calcium, Magnesium, Natrium, Kalium) [121]. Aus der Veränderung der elektrischen Leitfähigkeit über mehrere Messungen kann eine Abschätzung über die Veränderung der Mineralien im Wasser erfolgen. Aufgrund der Temperaturabhängigkeit wird die Messung der Leitfähigkeit auf eine Referenztemperatur (internationaler Standard 25°C) bezogen. Neuere Messgeräte besitzen integrierte Temperatursonden und eine automatische Temperaturkorrektur.

Für eine kontinuierliche Überwachung können Leitfähigkeitssensoren stationär verbaut werden und mit einer digitalen Datenübertragung ausgerüstet werden. In Bohrlöcher kann die elektrische Leitfähigkeit in unterschiedlichen Tiefen bestimmt werden (Tiefenprofil). In der Regel erfolgt dies mit ein Kabellichtlot, welche mit einem Leitfähigkeitssensor ausgestattet ist. Aufgrund der möglichen Vermischung der Wasserschichten erfolgt eine Messung in der Regel beim Einfahren des Sensors von oben nach unten.

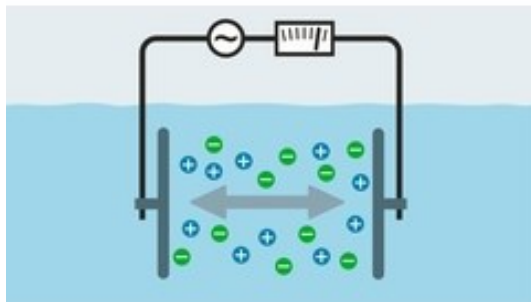


Abb. 7.68 Funktionsprinzip konduktiver Messsensor (links, [122]) und Feldmessgerät (rechts,[123])

7.35.2 Fragestellungen in den Fachbereichen

Fragestellung im Bereich Tunnel

Versuche der Leitfähigkeit von Wasser werden punktuell oder kontinuierlich direkt im Tunnel oder an der Baugrundoberfläche eingesetzt. Die elektrische Leitfähigkeit wird in der Regel im Rahmen der Überwachung Bau von Grund- und Bergwasser sowie von Abwasser verwendet.

- Überwachung von Berg- und Grundwasser kurzzeitig während der Bauarbeiten (z.B. Einfluss Tunnelvortrieb auf die Mineralisation im Wasser) sowie langfristig des Betriebs (Einfluss von Bauwerken auf die Mineralisation des Wassers; Veränderungen der Bergwasserdrainage);
- Überwachung von Bauwerksabwasser (Kurzzeit z.B. Baustellen-Abwasser; Langzeiteinfluss des Bauwerks z.B. i.F. Auswaschen).

Fragestellung im Bereich Naturgefahren

- Bestimmung der elektrischen Leitfähigkeit / Grundwasser-Zusammensetzung (z.B. Erkennung von Änderungen infolge eines Ereignisses). Das räumlich-zeitliche Verhalten einer Rutschung oder einer Instabilität kann nicht überwacht werden.

7.35.3 Datenerfassung, Raumbezug, Messgrößen und – Genauigkeit

- Die Messdatenerfassung kann analog oder digital erfolgen (Ablesegerät bzw. Datenschreiber), abhängig von der Zugänglichkeit der Messstelle und den Anforderungen an Kontinuität und Messwertdichte;
- Die Messung ist vor Ort (offenen oder geschlossenen Gerinne, Bohrlöcher) oder mittels Probenentnahme mit anschliessender Testung (vor Ort oder im Labor) möglich;
- Der Raumbezug einer einzelnen Messung oder Messstelle kann über geodätische Aufnahmen bestimmt werden. In einem Bohrloch können Messungen einer spezifischen Bohrlochtiefe zugeordnet werden;
- Die Prüfung erfolgt zerstörungsfrei (abgesehen von einer allfälligen Bohrung).

Die elektrische Leitfähigkeit wird in der Regel mit der Einheit [$\mu\text{S}/\text{cm}$] angegeben. Die Messgenauigkeit von Sensoren für die Feldmessung liegt zwischen ca. $\pm 0.25\%$ und $\pm 2.0\%$. Viele Messgeräte können unterschiedliche Messbereiche untersuchen. Der Messbereich liegt dabei in einem Bereich zwischen ca. $0\ \mu\text{S}/\text{cm}$ bis $2'000\ \mu\text{S}/\text{cm}$ mit einer Auflösung von ca. $0.1\ \mu\text{S}/\text{cm}$. In grösseren Messbereichen kann ein maximaler Wert von über $100'000\ \mu\text{S}/\text{cm}$ mit einer Auflösung von ca. $10\ \mu\text{S}/\text{cm}$ erreicht werden. Die Bestimmung der elektrischen Leitfähigkeit in einem Bohrloch wird durch die Länge des Bohrlochs bestimmt.

Tab. 7.30 Messbereich/Genauigkeit zur Bestimmung der elektrischen Leitfähigkeit.

Typ	Messbereich	Auflösung	Genauigkeit
Elektrische Leitfähigkeit	ca. $0\ \mu\text{S}/\text{cm}$ bis $100'000\ \mu\text{S}/\text{cm}$	ca. $0.1\ \mu\text{S}/\text{cm}$ bis $10\ \mu\text{S}/\text{cm}$	$\pm 0.25\%$ bis 2%

7.35.4 Entwicklungsstand, Anwendungsgrenzen, Kosten

Die Bestimmung der elektrischen Leitfähigkeit eignet sich als einfache, schnelle und kontinuierliche Überwachungsmethode der Mineralisation im Wasser. Die Konzentration der einzelnen Inhaltsstoffe können aufgrund der elektrischen Leitfähigkeit nicht bestimmt werden. Eine zeitlich verzögerte Bestimmung der elektrischen Leitfähigkeit einer Probe (z.B. in einem Labor) kann aufgrund des Absetzens von Mineralien und einer Temperaturänderung zu veränderten Messergebnissen führen. Bei einer Messung vor Ort kann eine starke Strömung im Wasser zu einem verfälschten Ergebnis führen [124].

Die Kosten für eine einzelne Messung der elektrischen Leitfähigkeit belaufen sich auf ca. 500 CHF. Für eine kontinuierliche Überwachung der elektrischen Leitfähigkeit liegt die Installationspauschale im Bereich von ca. 1'000 CHF bis 3'000 CHF pro Messstelle. Die wiederkehrenden Kosten bestehen im Aufwand für die Auswertung und Interpretation der aktuellen Messwerte oder für den Betrieb (und Installation) einer digitalen Lösung (Erfassung, Übermittlung und ggf. automatisierte Auswertung der Daten). Bei einer Messung im Bohrloch fallen zusätzliche Kosten für dessen Erstellung an.

7.35.5 Ergänzende Ausschreibungsanforderungen

Siehe Kapitel 7.1.5

7.35.6 Literaturverzeichnis

Sonstige Literatur / Forschungsberichte

-
- [121] BAFU (2019): Zustand und Entwicklung Grundwasser Schweiz. Ergebnisse der Nationalen Grundwasserbeobachtung NAQUA, Stand 2016
-
- [122] Endress+Hauser AG, Leitfähigkeitssensoren und -messumformer, <https://www.ch.endress.com/de/messgeraete-fuer-die-prozesstechnik/fluessigkeitsanalyse-produktuebersicht/leitfaehigkeit-sensoren-messumformer>, (Zugriff 17.05.2022)
-
- [123] RS Components Ltd. Datasheet RS PRO Conductivity Meter, <https://uk.rs-online.com/web/p/conductivity-meters/2050958>, (Zugriff 17.05.2022)
-
- [124] Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft (2003), Praxishilfe Grundwasserprobenahme
-

B Überwachung Baugrund Tunnelnahbereich

B 1 Baugrundveränderung (Entfestigung, Volumenänderung, Auflockerung, etc.)

Tab. 7.31 Baugrundveränderungen - Übersicht

Fragestellung		B1 Baugrundveränderung (Entfestigung, Volumenänderung, Auflockerung, etc.)			
Kurzbeschreibung Fragestellung		Die Erstellung eines Tunnelbauwerks kann den Baugrund im Tunnelnahbereich beeinflussen (z.B. Spannungumlagerungen). Kurz- oder langfristig kann dies zu veränderten Baugrundeigenschaften und Einwirkungen auf das Tunnelbauwerk führen. Unterschiedliche Baugrundveränderungen im Tunnelnahbereich (z.B. Entfestigung, Volumenänderung, Auflockerung, etc.) können zu einer Gefährdung der Tragsicherheit des Bauwerks führen. Während dem Bau und Betrieb können diese durch geeignete Messtechniken überwacht werden.			
Überwachungstechnologie		Sondenextensometer	Inklinometer	Extensometer	Faseroptische Sensoren
"ID"		SXT	IKN	EXT	FOS
Typisierung	a. Messprinzip	1 direkt	1 direkt	1 direkt	2 indirekt
	b. Datenerfassung	2 elektrisch	2 elektrisch	2 elektrisch	6 faseroptisch/photonsch
	c. Datenspeicher	2 analog (Datenschreiber)	2 analog (Datenschreiber)	3 analog (Ableseung)	1 digital
	d. Lokalisation	3 tiefenbezogen	3 tiefenbezogen	3 tiefenbezogen	2 streckenbezogen
	e. Raumbezug				
	f. Zustand	2 zerstörend (Bohrung)	2 zerstörend (Bohrung)	2 zerstörend (Bohrung)	3 nicht zerstörend
Messgrößen und -genauigkeit	Größen	Deformationen	Deformation	Deformationen	Deformationen
	Untersuchungs-/Tiefenbereich	bis 200 m	bis 100 m	bis 100 m	100 m bis zu 30 km
	Auflösung	0.001mm	0.002 mm/m	0.01mm	-
	Genauigkeit	± 0.002 mm	± 0.2 mm/m	± 0.001mm/m	bis 0.001mm/m
	Bemerkungen	Messbereich ± 10 mm/m	Messbereich ± 30°	Messbereich bis 250 mm	verteilt / quasi-kontinuierlich
Tunnel		4	4	4	2
Geotechnik		3	4	3	2
Naturgefahren		2	3	2	1
Umwelt		0	0	0	1
Einsatzzeitpunkt		W	W	W	W
Entwicklungsstand		➔	➔	➔	➔
Kosten	initial / einmalig	➔	➔	➔	➔
	wiederkehrend	➔	➔	➔	➔
Fragestellung					
Kurzbeschreibung Fragestellung					
Überwachungstechnologie		Reverse-Head-Extensometer	Bohrlochdilatometer	Bohrlochscan	
"ID"		RHE	BLD	BLS	
Typisierung	a. Messprinzip	1 direkt	2 indirekt	2 indirekt	
	b. Datenerfassung	2 elektrisch	2 elektrisch	5 optisch	
	c. Datenspeicher	1 digital	1 digital	1 digital	
	d. Lokalisation	3 tiefenbezogen	1 punktuell	2 streckenbezogen	
	e. Raumbezug				
	f. Zustand	2 zerstörend (Bohrung)	1 zerstörend	2 zerstörend (Bohrung)	
Messgrößen und -genauigkeit	Größen	axiale Deformation	Verformungseigenschaften	Beschaffenheit Bohrlöcher	
	Untersuchungs-/Tiefenbereich	bis 80	bis 1400 m	bis 800 m	
	Auflösung	0.01mm	-	-	
	Genauigkeit	± 0.1mm/m	± 0.001mm & 1kPa	± 1 & 1mm	
	Bemerkungen	Messbereich bis 250 mm	Messbereich bis 25 mm & 25 MPa	Genauigkeit Orientierung & Bildauflösung	
Tunnel		2	3	3	
Geotechnik		0	3	3	
Naturgefahren		0	1	2	
Umwelt		0	2	2	
Einsatzzeitpunkt		W	W	W	
Entwicklungsstand		➔	➔	➔	
Kosten	initial / einmalig	➔	➔	➔	
	wiederkehrend	➔	➔	➔	

7.36 Sondenextensometer

Siehe Kapitel 7.5

7.37 Inklinometer

Siehe Kapitel 7.6

7.38 Extensometer

Siehe Kapitel 7.7

7.39 Faseroptische Sensoren

Siehe Kapitel 7.10

7.40 Reverse-Head-Extensometer

Siehe Kapitel 7.7

7.41 Bohrlochdilatometer

7.41.1 Beschreibung der Technologie

Ein Bohrlochdilatometer erfasst die Verformungseigenschaften des Baugrunds in einem Bohrloch. Der Dilatometer erfasst beim Bohrlochaufweitungsversuch die radiale Baugrundverformung in Funktion des aufgetragenen Drucks im Schlauchpacker. Eine Dilatometer-Sonde (Abb. 7.69) besteht aus Drucksensoren und Wegaufnehmern, welche innerhalb einer flexiblen Gummimanschette angeordnet sind, sowie zugehörigem Datenlogger und Kompass [125]. Die Belastung des Baugrunds erfolgt in-situ durch die unter Druck (Druckluft oder Stickstoff) expandierende Gummimanschette, die so kraftschlüssig am anstehenden Baugrund aufliegt. Die elektrischen Wegaufnehmer (mind. 3) sind in einer horizontalen Ebene angeordnet und jeweils um 120° versetzt. Die Bestimmung der räumlichen Ausrichtung im Bohrloch erfolgt durch einen eingebauten elektrischen Kompass oder durch ein Ausrichtungsgestänge.

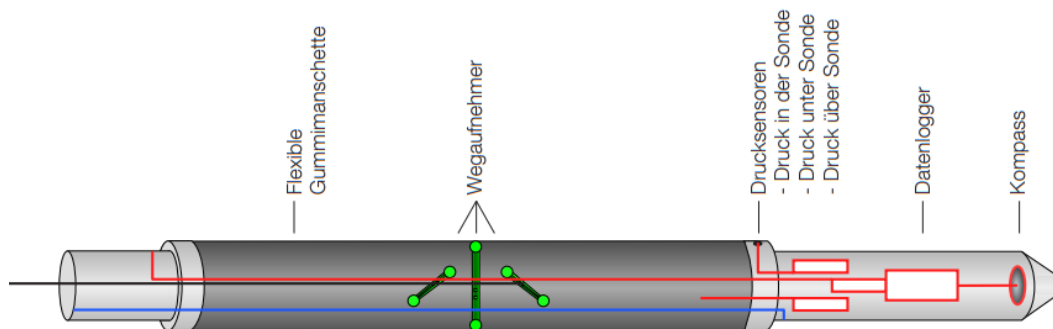


Abb. 7.69 Aufbau einer Bohrlochdilatometer-Sonde [125]

Die Druckversuche werden in mehreren Belastungs- und Entlastungszyklen durchgeführt. Die Bestimmung des Verformungs- und Elastizitätsmoduls erfolgt unter Einbezug der Poissonzahl (durch Laborversuche oder Literatur) und wird als Sekantenmodul berechnet. Infolge mehrerer Wegaufnehmer kann entweder direkt eine geeignete statistische Auswertung erfolgen oder eine allfällige Anisotropie der Verformungseigenschaften des Baugrunds mithilfe der räumlichen Anordnung beurteilt werden [129]. Durch die Messung des Druckes direkt in der Sonde müssen keine Druckverluste oder Ähnliches berücksichtigt werden. Durch stationäre Druckversuche über mehrere Stunden kann mittels Bohrlochdilatometer auch das zeitabhängige Verhalten des Baugrunds untersucht werden [125].

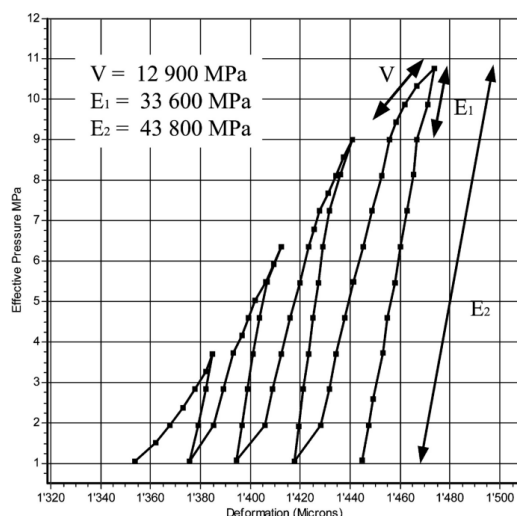


Abb. 7.70 Resultate eines Be- und Entlastungsversuchs mittels Bohrlochdilatometer [127]

7.41.2 Fragestellungen in den Fachbereichen

Fragestellung im Bereich Tunnel

Bohrlochdilatometer eignen sich besonders für den Einsatz im Fels und Lockergestein. Die Messungen erfolgen punktuell in Bohrlöchern ab dem Tunnel oder ab der Terrainoberfläche. Im Allgemeinen werden Dilatometer im Tunnelbau für folgende Einsatzzwecke verwendet:

- Bestimmung der Verformungseigenschaften (Verformungs- und Elastizitätsmodul) des Baugrunds;
- Überwachung der Baugrundveränderungen im Tunnelnahbereich (z.B. Steifigkeitsminderung infolge Tunnelvortrieb).
- Überwachung der Wirksamkeit von Bauhilfsmassnahmen (z.B. Versteifung Baugrund infolge Injektionen).

Fragestellung im Bereich Naturgefahren

- Die Technologie erlaubt Rückschlüsse auf Verformungseigenschaften von Böschungen und Rutschhängen. Das räumlich-zeitliche Verhalten kann nicht überwacht werden.

7.41.3 Datenerfassung, Raumbezug, Messgrössen und – Genauigkeit

- Die Messdatenerfassung erfolgt digital (Ablesegerät bzw. Datenschreiber/Logger) und das Messintervall kann je nach Typ und Anforderungen gewählt werden (wenige Sekunden bis mehrere Stunden);
- Die punktuelle Bestimmung der Verformungs-/Elastizitätsmoduli erfolgt direkt aus der gemessenen Deformations- und Druckänderung;
- Der Raumbezug einer Messung erfolgt über die Position des Bohrlochmunds, der Bohrlochachse und der Tiefe der Sonde im Bohrloch;
- Die Erstellung der Bohrung und der Druckversuch bei nicht-elastischer Verformung des Baugrunds erfolgen zerstörend.

Dilatometer können in Bohrlöcher bis zu einer Tiefe von ca. 1400 m verwendet werden. Der Bohrlochdurchmesser muss in einem Bereich zwischen ca. 101 mm bis 146 mm liegen (für geringe Messwege z.B. mit Goodman-Sonde auch 76 mm möglich), was jeweils ca. 4 mm grösser als der Sondendurchmesser ist. Die maximale radiale Verformung (max. Durchmesseränderung) liegt je nach Hersteller und Sensoren-Typ zwischen ca. 10 mm und 25 mm. Die Messgenauigkeit der elektrischen Wegaufnehmer liegt bei ca. ± 0.001 mm. Der maximal aufbringbare Druck in der Sonde liegt je nach Hersteller in einem Bereich zwischen ca. 10 MPa bis 25 MPa. Die Messgenauigkeit der Drucksensoren für diesen Messbereich liegt in etwa bei ca. ± 1 kPa.

Tab. 7.32 Messbereich/Genauigkeit der Sensoren in Dilatometer

Typ	Messbereich	Genauigkeit
Wegaufnehmer	bis 25 mm	± 0.001 mm
Drucksensor	bis ca. 25 MPa	± 0.001 MPa

7.41.4 Entwicklungsstand, Anwendungsgrenzen, Kosten

Bohrlochdilatometer werden typischerweise für die Voruntersuchung der Verformungseigenschaften des Baugrunds verwendet. Die punktuelle Belastungsversuche im Bohrloch ermöglichen die in-situ Bestimmung der Verformungseigenschaften des Baugrunds für unterschiedliche Tiefen. Gegenüber Laborversuchen erfolgt bei einem Dilatometer eine Bestimmung der Verformungseigenschaften am nahezu ungestörten System [129]. Bohrlochdilatometer können grundsätzlich in Lockergestein und Fels eingesetzt werden. Die Gerätewahl ist auf den erwarteten Baugrund abzustimmen (Boden: geringe Anpressdrücke und grosse Wege; Fels: hohe Anpressdrücke und kleine Wege). Für den Einsatz in nicht standfähigem Baugrund muss eine Stützung des Bohrlochs (z.B. mittels Betonitsuspension) erfolgen [128].

Die Kosten für die Erstellung des Bohrlochs belaufen sich auf ca. 150 CHF / m bis ca. 250 CHF / m für Bohrungen bis ca. 50-100 m. Für längere Bohrungen liegen die Kosten bei ca. 500 CHF / m. Die Bestimmung der Verformungseigenschaften in einem Bohrloch mittels Dilatometer verursacht Kosten im Bereich von ca. 1'000 CHF bis ca. 2'000 CHF pro Messung.

7.41.5 Ergänzende Ausschreibungsanforderungen

Siehe Kapitel 7.1.5

7.41.6 Literaturverzeichnis

Sonstige Literatur / Forschungsberichte

-
- [125] Solexperts AG (2016), Datenblatt Dilatometermessungen, https://www.solexperts.com/files/downloads/16_dilatometer_de.pdf, (Zugriff 09.06.22)
-
- [126] Edwin Fecker (2018), Geotechnische Messgeräte und Feldversuche im Fels, 2. Auflage, Springer Spektrum Berlin, <https://doi.org/10.1007/978-3-662-57824-7>
-
- [127] Zalesky, Marek & Bühler, Ch & Burger, Ulrich & John, M. (2007). Dilatometer tests in deep boreholes in investigation for Brenner base tunnel. <https://doi.org/10.1201/NOE0415408073>
-
- [128] Terradata SE AG (2016), Datenblatt High Pressure Dilatometer, http://www.swissenvironment.ch/se-ch/wp-content/uploads/SE_Prosp_Dilatometer_DE.pdf, (Zugriff 09.06.22)
-

7.42 Bohrlochscan

7.42.1 Beschrieb der Technologie

Ein Bohrlochscan erfasst die Beschaffenheit der Bohrlochwand über ein optisches oder akustisches System. Das standfeste Bohrloch wird mit einer Sonde befahren. Für eine genaue räumliche Einordnung der Aufnahmen ist diese mit einem Neigungssensor und einem elektronischen Kompass (bzw. Orientierungsgestänge in kurzen Bohrungen) ausgerüstet. Durch Zentriermodule ist die Sonde immer mittig im Bohrloch zentriert. Die Bestimmung der Tiefe im Bohrloch erfolgt über die elektrische Messung der Kabellänge.

Ein optischer Bohrlochscanner basiert auf der Aufnahme der Bohrlochwand mittels Kamera und Spiegelsystem (z.B. Kegelstumpfspiegel). Aufgrund des Spiegels entstehen jeweils verzerrte 360° Aufnahmen der Bohrlochwand, welche durch geometrische Beziehungen entzerrt werden. Durch ein Aneinanderreihen der Aufnahmen ergibt sich eine farbgetreue Darstellung der gesamten Bohrlochwand über die Tiefe des Bohrlochs [129]. Die Durchführung eines optischen Bohrlochscans benötigt ein mit Luft oder klarem Wasser gefülltes Bohrloch [130].

Ein akustischer Bohrlochscanner basiert auf der Aufnahme der Reflexion eines akustischen Signals/Schallimpuls an der Bohrlochwand, welche aufgrund unterschiedlicher dynamischer Eigenschaften des Gesteins und Klüften unterschiedlich ausfällt. Durch einen rotierenden Spiegel kann die Reflexion der Bohrlochwand auf 360° aufgenommen werden und durch eine Aneinanderreihung der Aufnahmen entsteht eine komplette Darstellung der Bohrlochwand über die Tiefe des Bohrlochs. Aufnahmen eines akustischen Scanners werden als kolorierte Messwerte dargestellt und basieren auf der Messung der Laufzeit und der Amplitude der Signalreflexion. Die Laufzeit ist abhängig von der zurückgelegten Distanz des Signals und ermöglicht somit eine Messung der Bohrlochgeometrie und Aussagen über die Öffnungsweite von Klüften. Aus der Messung der Amplitude lassen sich Änderungen der Struktureigenschaft des Gesteins erkennen. Für die Verwendung eines akustischen Scanners muss das Bohrloch mit Wasser gefüllt sein [129].

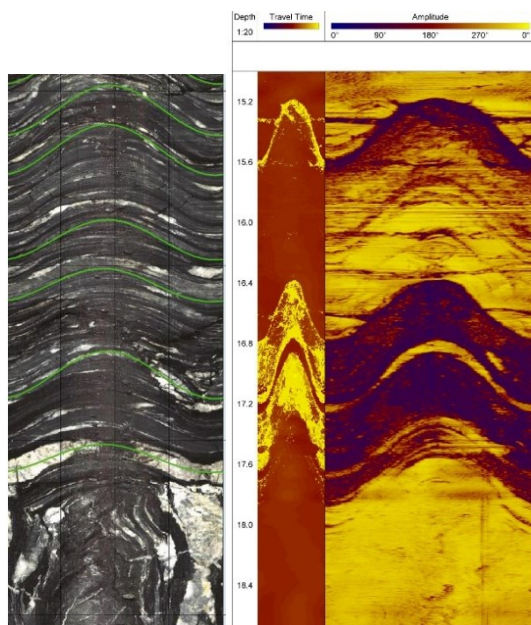


Abb. 7.71 Unterschiedliche Messwerte eines optischen (links, [130]) und eines akustischen Bohrlochscanners (rechts, [131])

Nach Vorliegen der Aufnahmen eines Bohrlochscanners kann der Baugrund betreffend der Lage und Orientierung von Kluft-, Schicht-, und Schieferungsflächen beurteilt werden. Des Weiteren können Kluftabstände, -öffnung und -füllung sowie der allgemeine Durchtrennungsgrad bestimmt werden. In optischen Aufnahmen kann ebenfalls eine

visuelle Beurteilung der Geologie erfolgen. Wasserzutritte können identifiziert und lokalisiert werden.

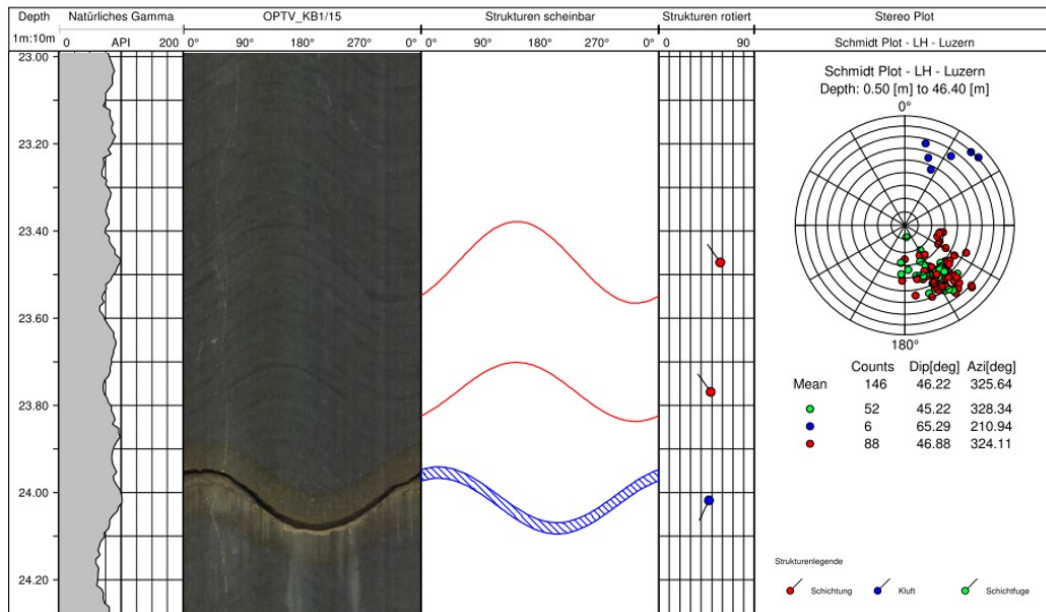


Abb. 7.72 Auswertung einer optischen Bohrlochaufnahme [132]

7.42.2 Fragestellungen in den Fachbereichen

Fragestellung im Bereich Tunnel

Bohrlochscanner eignen sich fast ausschliesslich für den Einsatz im Fels oder Beton. Die Messungen erfolgen kontinuierlich über die Länge des Bohrlochs und können direkt aus dem Tunnel oder von der Oberfläche aus eingesetzt werden. Im Allgemeinen werden Bohrlochscanaufnahmen im Tunnelbau für folgende Einsatzzwecke verwendet:

- Detaillierung der geologischen Prognose vor dem Start der Bauarbeiten zur Verifizierung und Detaillierung der geotechnischen Modelle (Störzonen, Strukturen allgemein).
- Kurzfristig während der Bauarbeiten: Vorseilende Beurteilung des anstehenden Baugrunds für die Festlegung der Sicherungsmassnahmen bzw. allfälliger Bauhilfsmassnahmen.
- Kurzfristig während der Bauarbeiten: Überwachung des Baugrunds mit Vergleich zur Prognose und Identifikation allfälliger Wasserzutritte im Tunnelnahbereich (z.B. Auflockerung infolge Tunnelvortrieb, Verifikation Kluftsysteme, Wasserzutritte).
- Langfristig während des Betriebs: Überwachung der Wirksamkeit von ausgeführten Massnahmen (z.B. Injektionen, Tübbinghinterfüllung, etc.).

Fragestellung im Bereich Naturgefahren

- Erkennen von Klüften und Trennflächen in Felsinstabilitäten; allenfalls können Gleitflächen in Rutschungen erkannt werden. Das räumlich-zeitliche Verhalten kann nicht überwacht werden.

7.42.3 Datenerfassung, Raumbezug, Messgrössen und – Genauigkeit

- Die Messdatenerfassung erfolgt digital (Datenschreiber/Logger) und die Auflösung der Aufnahme (Optisch: Pixeldichte, akustisch: Impulsdichte) ist abhängig vom Typ und den Anforderungen an die Auflösung;
- Die punktuellen Messungen werden zu einer kontinuierlichen des Bohrlochs zusammengefügt;
- Der Raumbezug der Messungen erfolgt über die Position des Bohrlochmunds, der Bohrlochachse sowie der Orientierung (Inklination & Azimut) und der Tiefe des Scanners im Bohrloch;

- Abgesehen von der zu erstellenden Bohrung erfolgen die Messungen zerstörungsfrei.

Bohrlochscanner können in Bohrlöchern bis zu einer Tiefe von ca. 800 m (optisch) und mehr als 5000 m (akustisch) eingesetzt werden [129]. Je nach Typ und Hersteller können die Sonden bis zu einem maximalen Druck von 100 MPa verwendet werden. Der Bohrlochdurchmesser muss in einem Bereich zwischen ca. 75 mm und 500 mm liegen. Die Auflösung der Aufnahmen liegen bei ca. +/- 1 mm (optisch) und ca. +/- 3 mm (akustisch) [130]. Die Genauigkeit der Messorientierung liegt für die Inklination bei ca. +/- 0.5° und für den Azimut in einem Bereich zwischen ca. +/- 1.0° bis ca. +/- 3.0°. Die Messgeschwindigkeit ist abhängig vom Typ, Hersteller, Bohrlochdurchmesser und Genauigkeit der Messung und liegt in einem Bereich zwischen ca. 1 m/min bis zu 10 m/min.

Tab. 7.33 Messbereich/Genauigkeit der Sensoren eines Bohrlochscanners.

Typ	Messbereich	Genauigkeit
Orientierung (Azimut)	360°	+/- 1.0° bis +/- 3.0°
Orientierung (Inklination)	0° bis 90°	ca. +/- 0.5°
Bildauflösung (optisch)	-	ca. +/- 1 mm
Bildauflösung (akustisch)	-	ca. +/- 3 mm

7.42.4 Entwicklungsstand, Anwendungsgrenzen, Kosten

Bohrlochscanner werden für die in Situ Aufnahme der geotechnischen Verhältnisse in einem Bohrloch angewendet. In einem mit Wasser gefüllten Bohrloch muss für die Verwendung eines optischen Scanners eine klare Sicht vorhanden sein (ggf. spülen der Bohrung notwendig). Bei trüben Wasserverhältnissen kann nur ein akustischer Bohrlochscanner verwendet werden. Aufgrund von unvorteilhaften Reflexionsbedingungen der Bohrlochwand (z.B. grosse Rauigkeit, grosse Impulsdämpfung) kann die Genauigkeit von akustischen Bohrlochscanner variieren.

Vergleichbar mit einem optischen oder akustischen Bohrlochscanner können weitere Technologien in einem Bohrloch für geophysikalische Messungen eingesetzt werden (z.B. Messung der elektr. Leitfähigkeit, Gamma-Ray Messungen, etc.). Diese werden selten im Fachbereich Tunnel eingesetzt.

Die Kosten für die Erstellung des Bohrlochs belaufen sich auf ca. 150 CHF / m bis ca. 250 CHF / m für Bohrungen bis ca. 50-100 m. Für längere Bohrungen liegen die Kosten bei ca. 500 CHF / m. Die Aufnahme und Auswertung eines Bohrlochs mittels Scanner verursacht Kosten im Bereich von ca. 100 CHF/m.

7.42.5 Ergänzende Ausschreibungsanforderungen

Siehe Kapitel 7.1.5

7.42.6 Literaturverzeichnis

Sonstige Literatur / Forschungsberichte

[129] Edwin Fecker (2018), Geotechnische Messgeräte und Feldversuche im Fels, 2. Auflage, Springer Spektrum Berlin, <https://doi.org/10.1007/978-3-662-57824-7>

[130] Terradata SE AG (2017), Datenblatt Bohrlochscanner optisch (OPTV) und akustisch (BHTV), http://www.swissenvironment.ch/se-ch/wp-content/uploads/SE_Prosp_OPTV_BHTV_DE.pdf, (Zugriff 10.06.2022)

[131] Terrascan Geophysik & Bohrlochmessungen GmbH (2021), Bohrlochscanner, akustisch & orientiert, <https://www.terrascan.at/unsere-leistungen/bohrlochscanner-akustisch-u-orientiert/>, (Zugriff 10.06.2022)

[132] Lombardi AG, Beratende Ingenieure

B 2 Belastungsänderungen (Quelldruck, druckhaftes Gebirge, etc.)

Tab. 7.34 Belastungsänderung - Übersicht

Fragestellung		B2 Belastungsänderungen (Quelldruck, Druckhaftes Gebirge, etc.)					
Kurzbeschreibung Fragestellung		Die Erstellung eines Tunnelbauwerks kann den Baugrund im Tunnelnahbereich beeinflussen (z.B. Spannungsumlagerungen). Kurz- oder langfristig könnte dies zu veränderten Baugrundeigenschaften und Einwirkungen auf das Tunnelbauwerk führen. Die Belastungsänderung in Teilen des Bauwerks infolge von veränderten/neuen Einwirkungen (z.B. Quelldruck, Druckhaftes Gebirge, etc.) können zu einer Gefährdung der Tragsicherheit führen. Während dem Bau und Betrieb können diese durch geeignete Messtechniken erfasst und überwacht werden.					
Überwachungstechnologie		Messanker	Kraftmessdose	Faseroptische Drucksensoren	Dehnungsmessstreifen	Schaltzpressmessungen	Druckkissen
"ID"		MAK_	KMD_	FOD_	DMS_	SPM_	DKS_
Typisierung	a. Messprinzip	2 indirekt	2 indirekt	2 indirekt	2 indirekt	2 indirekt	2 indirekt
	b. Datenerfassung	2 elektrisch	2 elektrisch	6 faseroptisch/photonisch	2 elektrisch	2 elektrisch	2 elektrisch
	c. Datenspeicher	3 analog (Ableitung)	1 digital	1 digital	1 digital	2 analog (Datenschreiber)	2 analog (Datenschreiber)
	d. Lokalisation	3 tiefenbezogen	1 punktuell	2 streckenbezogen	1 punktuell	1 punktuell	1 punktuell
	e. Raumbezug						
	f. Zustand	2 zerstörend (Bohrung)	3 nicht zerstörend	3 nicht zerstörend	3 nicht zerstörend	2 zerstörend (Bohrung)	2 zerstörend (Bohrung)
Messgrößen und -genauigkeit	Größen	Deformation	Kraft	Druck	Dehnung	Spannung	Spannung
	Untersuchungs-/Tiefenbereich	bis 12 m & bis 350 kN	-	-	-		
	Auflösung	-	-	-	-	± 0.1 MPa	± 0.025 % FS
	Genauigkeit	± 0.01 - 0.04 mm	± 0.03 % bis 0.25 %	± 3.8 Pa	± 1 µε	± 0.1 MPa	± 0.1 % FS
	Bemerkungen	Messbereich bis 50 mm	Messbereich > 0.5 N	Messbereich 0 kPa bis 600 kPa	Messbereich 3-5 %	Messbereich bis 50 MPa	Messbereich bis 60 MPa
Tunnel		4	3	2	3	2	2
Geotechnik		4	3	2	3	0	2
Naturgefahren		2	2	1	1	0	0
Umwelt		1	4	1	2	0	0
Einsatzzeitpunkt		W	W	W	W	N	W
Entwicklungsstand		●	●	●	●	●	●
Kosten	initial / einmalig	●	●	●	●	●	●
	wiederkehrend	●	●	●	●	●	●

7.43 Messanker

7.43.1 Beschrieb der Technologie

Ein Messanker besteht aus einem Anker, welcher mit einer Kraftmesseinrichtung ausgerüstet ist und somit jederzeit eine Messung der Spannkraft ermöglicht [133]. Die Messung der Spannkraft/ Ankerlast kann direkt mittels Kraftmessdose am Ankerkopf oder indirekt über die Messung der Dehnung des Ankers erfolgen. Die Technologie Kraftmessdose ist im Kapitel 7.44 beschrieben. Folgend wird auf die Bestimmung der Spannungen und Lasten im Anker durch die Dehnungsmessung eingegangen.

Ein mechanischer Messanker besteht aus einer Kombination zwischen vollständig verpressten Felsanker und Mehrfach-Extensometer. In der Regel werden mehrere (bis zu vier) Stangen-Extensometer in einem hohlen Ankerstab angeordnet. Durch die Verankerung der Extensometer mit dem Anker in unterschiedlichen Tiefen kann die axiale Verformung / Dehnung des Ankers abschnittsweise ermittelt werden (Funktionsweise Extensometer siehe Kapitel 7.7). Aus der Dehnung des Ankers kann zusammen mit dessen E-Modul die Spannung im Anker, gemittelt über dessen Länge (Einfach-) oder als abschnittsweise Verteilung (Mehrfach-Extensometer), bestimmt werden. Unter Berücksichtigung der Querschnittsfläche des Ankers kann die Ankerlast ebenfalls bestimmt werden. Eine automatisierte Messung der Extensometer (mittels elektrischem Wegaufnehmer) ermöglicht eine kontinuierliche Überwachung der Ankerspannungen / Ankerlasten.

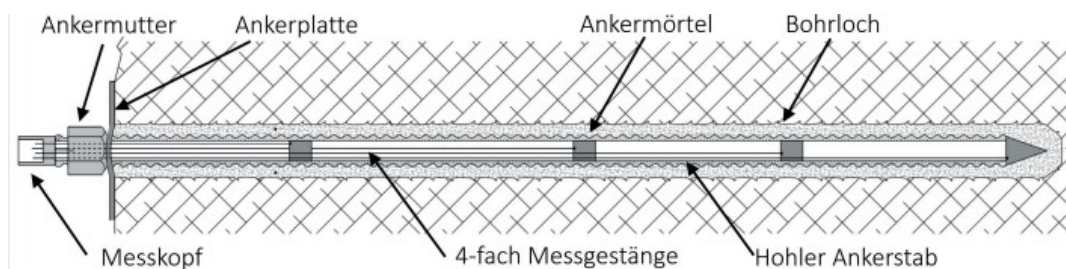


Abb. 7.73 Aufbau eines Messanker mit Mehrfach-Extensometer [134]

Falls keine Hohlanke verwendet werden können, ermöglicht die Installation eines (Mehrfach-) Extensometer aussen am Anker die Erfassung der Last- und Spannungsverteilung im Anker. Für die Erfassung der Dehnung in mehr als vier Abschnitten können alternativ mehrere Schwingsaiten-Dehnungsaufnehmer oder ein Gleitmikrometer-Messrohr am Anker befestigt werden [135]. Die Dehnungsaufnehmer werden direkt am Ankerstab befestigt und ermöglichen die punktuelle Messung der Dehnung. Ein Gleitmikrometer-Messrohr wird aussen am Anker angebracht und jeweils an den Messmarkierungen mit dem Anker verbunden. Mit dem Gleitmikrometer können folglich die Ankerdehnungen zwischen den einzelnen Messmarkierungen bestimmt werden (Funktionsweise Gleitmikrometer siehe Kapitel 7.5).



Abb. 7.74 Detail eines 4-fach Messkopfs (links,[134]) sowie Darstellung eines Messankers mit Gleitmikrometer-Messrohr (rechts,[135])

7.43.2 Fragestellungen in den Fachbereichen

Fragestellung im Bereich Tunnel

Messanker werden im Fels verwendet und ersetzen jeweils einen Systemanker. Sie dienen der kurz- und langzeitigen Überwachung des Verhalten von Anker im Baugrund und werden direkt aus dem Tunnelbauwerk oder von der Oberfläche (Baugrubenabschluss) versetzt. Im Allgemeinen werden Messanker für folgende Einsatzzwecke im Tunnelbau verwendet:

- Überwachung der Ankerlasten/Spannungen kurzfristig (z.B. infolge Bauwerksverschiebung) oder langfristig (z.B. infolge druckhaftem oder quellfähigem Gebirge, Entfestigung, Kriechverhalten Ringspaltverfüllung);
- Verifizierung / Optimierung der Ankerlängen und Überprüfung der Schubübertragung zwischen Anker und Gebirge.

Fragestellung im Bereich Naturgefahren

- Überwachung der Ankerlasten/Spannungen kurz- und langfristig im Bereich von rückverankerten Instabilitäten (Fels oder Rutschungen / Böschungen)

7.43.3 Datenerfassung, Raumbezug, Messgrößen und – Genauigkeit

- Die Messdatenerfassung erfolgt analog oder digital (Ablesegerät oder Datenschreiber/Logger) je nach Zugänglichkeit der Messstelle und den Anforderungen an Kontinuität und Messwertdichte;
- Die Messung erfolgt punktuell und wird manuell (Handmessgerät) oder automatisiert (elektrischer Wegaufnehmer) vor Ort am Ankerkopf durchgeführt. Bei einem Gleitmikrometer erfolgt die Messung manuell vor Ort;
- Die axiale Dehnung des Ankers wird direkt aus der Messung der Distanzänderung (Extensometer, Gleitmikrometer) bestimmt. Die Spannung im Anker wird aus der Dehnung und dem E-Modul des Ankerstabs berechnet;
- Die Messung ist lokalisiert und erfasst die Dehnung in einer Achse. Der Raumbezug ist durch die Position des Ankers/Messkopf sowie der Orientierung und Länge der Bohrung gegeben;
- Abgesehen von der zu erstellenden Bohrung erfolgt die Messung zerstörungsfrei.

Der minimale Bohrlochdurchmesser für Messanker liegt in einem Bereich von ca. 51 mm. Der Durchmesser von Hohlraumanker beträgt ca. 35 mm bis 41 mm. Die Bruchlast eines Messankers liegt je nach Typ und Hersteller in einem Bereich zwischen 200 kN bis maximal 350 kN. Die maximale Einbaulängen von Hohlraum Messanker liegt bei bis zu 12 m.

Die Messgenauigkeiten eines Extensometers in einem Messanker liegt in einem Bereich zwischen ca. ± 0.01 mm bis ± 0.04 mm. Der Messbereich für eine manuelle Messung

beträgt dabei ca. 250 mm und für eine automatisierte Messung ca. 50 mm. Die Genauigkeit der berechneten Ankerspannung ist entsprechend abhängig von der Messgenauigkeit der Dehnung und der Genauigkeit des E-Moduls. Die Genauigkeit der Ankerkraft ist folglich zusätzlich abhängig von der Genauigkeit der Querschnittfläche. Gemäss [136] erfolgt die Bestimmung der Ankerkraft mit einer Genauigkeit von ca. 10 kN.

Tab. 7.35 Messbereich und Genauigkeit von Messanker.

Typ	Messbereich	Messgenauigkeit
Dehnungsmessung	bis 50 mm	+/- 0.01 mm bis +/- 0.04 mm

7.43.4 Entwicklungsstand, Anwendungsgrenzen, Kosten

Messanker eignen sich aufgrund der einfachen Installation, der robusten Bauweise und der hohen Bruchlast für die Anwendung bei einer Systemankerung. Es wird keine spezielle Bohrung erforderlich und der Messanker ersetzt direkt einen Anker aus der Systemankerung. Aus der Bestimmung der Ankerspannungen können die Ankerlängen optimiert werden und kurz- und langzeitige Einwirkungen überwacht werden. Die berechnete Ankerspannung berücksichtigt nur die axiale Dehnungsmessung und zusätzliche Spannungen aus einer allfälligen Biegung des Ankers werden nicht berücksichtigt.

Für eine kontinuierliche Messung der Ankerdehnung über die gesamte Länge können faseroptische Sensoren verwendet werden [137]. Durch die durchgehende Befestigung von (mehreren) faseroptischen Sensoren an einem Ankerstab können die Dehnungen und entsprechende die Spannungen im Ankerstab bestimmt werden (Funktionsprinzip faseroptische Dehnungssensoren siehe Kapitel 7.10).

Die Kosten für die Erstellung des Bohrlochs belaufen sich auf ca. 150 CHF / m bis ca. 250 CHF / m. Die Installation eines Messankers in einem Bohrloch verursacht Kosten in einem Bereich von ca. 300 CHF/m. Wiederkehrende Kosten bestehen im Aufwand für die Messung vor Ort und die Auswertung oder für den Betrieb einer digitalen Lösung (Erfassung, Übermittlung und ggf. automatisierte Auswertung der Daten).

7.43.5 Ergänzende Ausschreibungsanforderungen

Siehe Kapitel 7.1.5

7.43.6 Literaturverzeichnis

Sonstige Literatur / Forschungsberichte

[133] SIA (2013), SIA 267 Geotechnik

[134] GEODATA Group (2020), Datenblatt Messanker, https://www.geodata.com/wp-content/uploads/2020/05/Messanker_20200519.pdf, (Zugriff 14.06.2022)

[135] Solexpert AG (2014), Datenblatt Messanker, https://www.solexperts.com/files/downloads/15_messanker_de.pdf, (Zugriff 14.06.2022)

[136] Edwin Fecker (2018), Geotechnische Messgeräte und Feldversuche im Fels, 2. Auflage, Springer Spektrum Berlin, <https://doi.org/10.1007/978-3-662-57824-7>

[137] Liu Q, Chai J, Chen S, Zhang D, Yuan Q, Wang S. Monitoring and correction of the stress in an anchor bolt based on Pulse Pre-Pumped Brillouin Optical Time Domain Analysis. Energy Sci Eng. 2020;8:2011–2023. <https://doi.org/10.1002/ese3.64>

7.44 Kraftsensoren / Kraftmessdose

7.44.1 Beschrieb der Technologie

Kraftmessdosen sind Kraftsensoren, die in der Lage sind, eine übertragene Last oder das Gewicht zu messen, indem sie mechanische Kräfte in lesbare und messbare Signale umwandeln. In technischen Anwendungen werden üblicherweise drei Arten von Kraftmessdosen verwendet, welche sich durch ihr Funktionsprinzip und das Ausgangssignal unterscheiden: pneumatisch, hydraulisch (beide mechanische Kraftsensoren) und Dehnungsmessstreifen.

Dehnungsmessstreifen sind die am häufigsten verwendeten Kraftmessdosen. Sie bestehen aus bis zu vier Dehnungsmessstreifen, die an einem ein- oder zweiseitigen elastischen Metallbalken befestigt sind. Der Metallkörper verformt sich unter der aufgetragenen Last, die entweder an der Oberseite des Trägers wirkt, während das andere Ende fixiert ist, oder in der Mitte, wenn sowohl die Ober- als auch die Unterseite eingespannt sind. Die Verformung des Trägers führt zu einer Veränderung der Form der Dehnungsmessstreifen und damit zu einer Spannungsänderung, die gemessen und in einen ablesbaren Ausgangswert (Gewicht oder Last) umgewandelt wird.

Tension load cell

'S-beam'

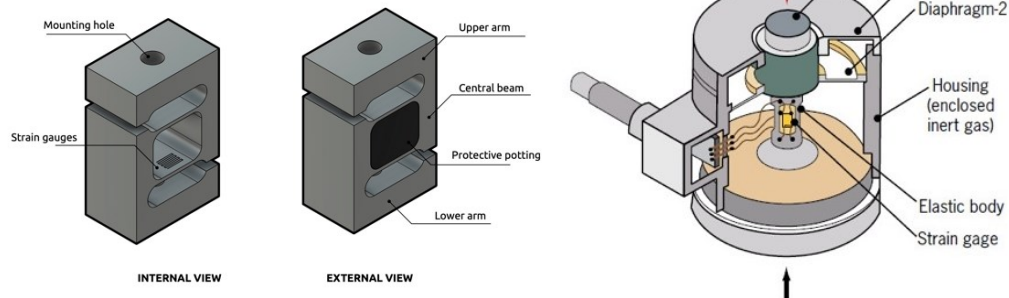


Abb. 7.75 Schematische Darstellung von Kraftmessdosen (Bilder wiederverwendet von [138],[139])

Die optimale Leistung der Kraftmessdosen wird durch die Einhaltung bestimmter Installationspraktiken gewährleistet:

- Die aufgetragenen Kräfte müssen präzise auf die Richtung der Wägezelle ausgerichtet sein. Falsch ausgerichtete Kräfte oder Bewegungen (seitlich, Durchbiegung, Torsion) sind zu vermeiden, da sie die Genauigkeit und Lebensdauer der Aufnehmer verringern.
- Die Stützstruktur sollte starr, flach und fest mit der Wägezelle verbunden sein und deren Unterseite vollständig bedecken, um sicherzustellen, dass die übertragenen Kräfte gleichmässig verteilt werden.
- Ein abgeschirmtes Gehäuse und Stahlrohre sollten verwendet werden, um die Messsensoren, ihre Elektronik und die Messkabel vor externen magnetischen und elektrischen Feldern, zu schützen, da diese mögliche Störquellen darstellen.

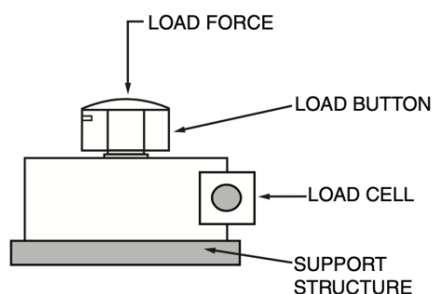


Abb. 7.76 Typischer Aufbau einer Kraftmessdose (Bilder wiederverwendet von [140])

7.44.2 Fragestellungen in den Fachbereichen

Fragestellung im Bereich Tunnel

Kraftmessdosen können in unterschiedlichen Bereichen für die Überwachung eingesetzt werden:

- Kurz- und Langzeitüberwachung sowie Überprüfung der wirkenden Kräfte / Vorspannkräfte am Ankerkopf oder am Pfahlkopf
- Kurz- und Langzeitüberwachung der wirkenden Kräfte in Bauwerksteilen (z.B. wirkende Kräfte im Stahlbogen einer Ausbruchsicherung),

Fragestellung im Bereich Naturgefahren

- Langzeitüberwachung von Schutzbauten (z.B. Bremsseile/Verankerungsbauwerk eines Steinschlagschutznetzes). Die Änderung der wirkenden Kräfte ermöglicht die Erfassung und Auswertung eines Ereignisses. Mögliche Überbelastungen der Schutzbauten können erkannt werden.

7.44.3 Datenerfassung, Raumbezug, Messgrößen und – Genauigkeit

- Geeignet und effektiv für die Erfassung einer Vielzahl von Kraftarten (Zug, Druck, oder Drehmoment) und -werten. Sie sind für einen breiten Lastbereich ausgelegt, der von einem Minimum von 0,5 N oder weniger bis zu mehreren MN reicht. Je nach den zu messenden Kräften können sie als Kraftmesszellen mit geringer, mittlerer oder hoher Kapazität klassifiziert werden. Innerhalb des Nennlastbereichs können niedrige Werte, nahe der unteren Grenze, nichtlinear sein.
- Die Messdatenerfassung kann entweder digital oder analog erfolgen. Damit die Kraftmessdosen ein analoges Ausgangssignal erzeugen können, müssen sie in einen Messkreis integriert werden. Dieser besteht aus einer Stromquelle, die den Aufnehmer mit einem Strom von bis zu 10 V (Gleichstrom) versorgt, und einer digitalen Signalverarbeitung zur hochpräzisen Erfassung der Kräfte.
- Messungen an abgelegenen Orten sollen über hydraulische Kraftmessdosen erfolgen, da diese keine Stromversorgung benötigen.
- Kraftmessdosen bieten eine hohe Messgenauigkeit von 0,03 bis 1% des Skalenendwerts (maximaler Wert im Nennbereich), je nach gewähltem Typ des Kraftsensors. Die höchste Genauigkeit bieten pneumatische Kraftsensoren; Dehnungsmessstreifen-Aufnehmer bieten eine Genauigkeit von 0,03 bis 0,25% des Skalenendwerts.
- Die Messfrequenz beträgt bis zu 5 kHz
- Die Messungen sind zerstörungsfrei.

7.44.4 Entwicklungsstand, Anwendungsgrenzen, Kosten

Kraftmessdosen sind eine äusserst zuverlässige und präzise Technologie, die sich sowohl für kurze als auch für lange Messdauern eignet. Sie ermöglichen Messungen in einem breiten Spektrum von Umgebungsbedingungen, einschliesslich Innen- oder Aussentemperaturen und stabilen oder rauen Umgebungen, die durch abrupte Schwankungen von Temperatur und Feuchtigkeit gekennzeichnet sind. Die Kalibrierung dieser Geräte, die für die Beibehaltung ihrer hohen Präzision unerlässlich ist, wird im Allgemeinen vom Hersteller durchgeführt und erfordert eine regelmässige Wiederholung.

Im Gegensatz zu anderen Lastsensoren, weisen Kraftmessdosen an der unteren Grenze des Lastbereichs, für den sie ausgelegt sind, eine Nichtlinearität auf, wodurch sie sich besser für hohe Lasten eignen. Die aufgebrachten Lasten müssen perfekt auf die Achse der Wägezelle ausgerichtet sein und zusätzliche Bewegungen müssen ausgeschlossen werden. Kraftmessdosen sind eine teure Technologie, vor allem wegen der digitalen Signalverarbeitung. Diese Komponente macht die Sensoren ausserdem komplex und erschwert die Einbindung in optimierte Anwendungen. So weisen einige Prototypen eine sperrige und massive Form auf, die sich nicht verändern und optimieren lässt. Aus diesem Grund müssen die umliegenden Komponenten angepasst werden. Eine Ausnahme bilden die Biegebalken-Kraftmessdosen, die sich durch geringe Kosten und einfache Konstruktion

auszeichnen. Sie haben jedoch den Nachteil, dass ihre freiliegenden Dehnungsmessstreifen geschützt werden müssen.

Die Kosten für Kraftmessdosen variieren je nach Modell und Kapazität [141]. Der Preis eines einzelnen Wägesensors kann schätzungsweise von 100 CHF für Gewichte unter 1 Tonne bis zu 4'000 CHF für Gewichte bis zu 100 Tonnen reichen.

7.44.5 Ergänzende Ausschreibungsanforderungen

Siehe Kapitel 7.1.5

7.44.6 Literaturverzeichnis

Sonstige Literatur / Forschungsberichte

[138] Flintec: What is a tension load cell and how does it work?; www.flintec.com, (Zugriff 06.09.2022)

[139] Tekscan: Load cell vs force sensor; www.tekscan.com, (Zugriff 06.09.2022)

[140] OMEGA Engineering (2015): How to evaluate and install a load cell; www.omega.co.uk, (Zugriff 06.09.2022)

[141] Trent D.: Strain gauge load cell basics; www.800loadcel.com, (Zugriff 06.09.2022)

7.45 Faseroptische Drucksensoren

7.45.1 Beschrieb der Technologie

Optische Drucksensoren erkennen eine Druckänderung durch Einwirkung auf Licht [144]. Im einfachsten Fall kann dies ein mechanisches System sein, das das Licht bei steigendem Druck blockiert. Bei fortschrittlicheren Sensoren ermöglicht die Messung der Phasendifferenz eine sehr genaue Messung kleiner Druckänderungen. Bei einem optischen Drucksensor auf Intensitätsbasis führt ein Druckanstieg dazu, dass die Lichtquelle nach und nach blockiert wird. Der Sensor misst dann die Veränderung des empfangenen Lichts. In dem in Abb. 7.77 gezeigten Mechanismus bewegt der Druck eine Blende, worauf die daran befestigte lichtundurchlässige Lamelle mehr Licht der LED als zuvor blockiert. Der Rückgang der Lichtintensität wird von der Fotodiode erfasst und ergibt eine direkte Messung des Drucks.

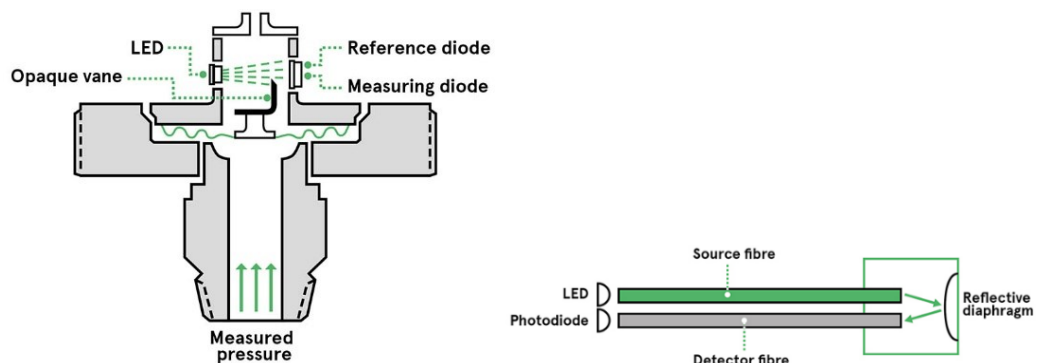


Abb. 7.77 Das Funktionsprinzip eines optischen Drucksensors, Abbildung wiederverwendet aus [144]

Faseroptische Drucksensoren können entweder als extrinsisch klassifiziert werden, bei denen die Messung ausserhalb der Faser stattfindet, oder als intrinsisch, bei denen sich die Faser selbst als Sensoren benutzt werden. Sehr empfindliche optische Messungen können mit Hilfe der Interferometrie durchgeführt werden, d. h. durch Messung der Phasenverschiebung zwischen Licht, das zwei verschiedene Wege genommen hat. Auf diese Weise können Abstandsänderungen festgestellt werden, die einem Bruchteil der Wellenlänge des Lichts entsprechen. Es gibt zwei gängige Arten von Drucksensoren, die die Interferometrie nutzen: das Fabry-Pérot-Interferometer (FPI) und das Faser-Bragg-Gitter (FBG).

Der FPI ist ein extrinsischer Sensor, der die Interferenz zwischen mehreren Lichtstrahlen nutzt, die zwischen zwei Oberflächen in einem Hohlraum hin und her reflektiert werden. Wenn sich der Abstand zwischen ihnen ändert, verändert sich durch die Interferenz die Menge des bei einer bestimmten Wellenlänge empfangenen Lichts. Dies ist eine der besten optischen Sensortechnologien. Sie ist eindeutig, genau und lässt sich leicht auf verschiedene Grössen und Druckbereiche skalieren.

Ein FBG ist ein intrinsischer Sensor, der eine regelmässige Reihe von Reflexionsstrukturen in der Faser aufweist. Diese reflektierenden Strukturen werden durch Dehnung oder Quetschung der Faser beeinflusst, wodurch sich die Wellenlängen des reflektierten Lichts ändern. Weitere Typen optischer Drucksensoren und eine Beschreibung ihres Funktionsprinzips finden sich in Ref. [142].

7.45.2 Fragestellungen in den Fachbereichen

Fragestellung im Bereich Tunnel

Faseroptische Drucksensoren finden Anwendung bei der Messung des Drucks an der Tunnelverkleidung, Dämmen und Rohrleitungen. Potenzielle Anwendungen von faseroptischen Drucksensoren im Bereich Tunnel umfassen:

- Langzeitüberwachung der Bauwerksbelastungen (z.B. Belastung Tunnelverkleidung infolge Quelldruck).
- Langzeitüberwachung der Belastung von Stützmauern, Dämmen, Baugrubenabschlüssen.

Fragestellung im Bereich Naturgefahren

- Langzeitüberwachung von kritischen Böschungen und Rutschhängen. Verteilte Faseroptische Drucksensoren ermöglichen ein Messen von erdrutschbedingten Spannungen und ermöglichen ein Erkennen von ersten Anzeichen eines Hangrutsches [145].

7.45.3 Datenerfassung, Raumbezug, Messgrößen und – Genauigkeit

Eine detailliertere Beschreibung der Datenerfassung finden Sie im Kapitel 7.10, Faseroptische Sensoren.

Die Genauigkeit der Druckmessung variiert bei den verschiedenen Arten von faseroptischen Drucksensoren. Eine sehr hohe Genauigkeit bei der Druckmessung mit optischen Fasern wird berichtet in [143] mit frequenzmodulierter Dauerstrich-Laserinterferenz, die eine Genauigkeit von 3,8 Pa im Bereich von 0 kPa-600 kPa sowie eine gute Wiederholbarkeit und Stabilität aufweist.

7.45.4 Entwicklungsstand, Anwendungsgrenzen, Kosten

Faseroptische Drucksensoren haben folgende Vorteile:

- geringe Grösse und Flexibilität.
- Unempfindlichkeit gegenüber Temperaturschwankungen.
- Unempfindlichkeit gegenüber Verhältnisfrequenzstörungen und elektromagnetischen Störungen oder Blitzschlag.
- sehr geringe Hysterese und dementsprechend gute Wiederholbarkeit aufgrund der geringen erforderlichen Bewegung.
- geringer Übertragungsverlust im Vergleich zu anderen elektrischen Sensoren.

Allerdings sind sie häufig mit den folgenden Einschränkungen verbunden:

- Empfindlichkeit gegenüber akustischen und mechanischen Vibrationen.
- Anfälligkeit von Fasersensoren und Kabeln:

Die Kosten für einen fertigen Sensor belaufen sich auf ca. 125 CHF pro 10 m. Die Kosten für die optische Rohfaser betragen 400 CHF für 1 km Faser. Die Vorbereitung eines Sensors dauert ca. 20-30 Minuten für gut ausgebildetes Personal. Die Spleissmaschine kostet ca. 500 bis 1000 CHF, kann aber wiederverwendet werden. Die Installation eines Fasersensors dauert 10-60 Minuten, abhängig von der Länge des Fasersensors und der Stelle, an der er montiert bzw. geklebt wird.

7.45.5 Ergänzende Ausschreibungsanforderungen

Siehe Kapitel 7.1.5

7.45.6 Literaturverzeichnis

Sonstige Literatur / Forschungsberichte

[142] HM Hashemian et. al. Assessment of Fiber Optic Pressure Sensors. (1995).
<https://www.osti.gov/servlets/purl/71391>, (Zugriff 06.09.2022)

[143] Lang Bai, Gang Zheng, Bin Sun, Xiongxing Zhang, Qiming Sheng, and Yuan Han, "High-precision optical fiber pressure sensor using frequency-modulated continuous-wave laser interference", AIP Advances 11, 025038, <https://doi.org/10.1063/5.0035643>

[144] Avnet Abacus, Pressure Sensors : The Design Engineer's Guide,
<https://www.avnet.com/wps/portal/abacus/solutions/technologies/sensors/pressure-sensors/core-technologies/optical/>, (Zugriff 06.09.2022)

-
- [145] Schenato, L., Palmieri, L., Camporese, M. et al. Distributed optical fibre sensing for early detection of shallow landslides triggering. *Sci Rep* 7, 14686 (2017). <https://doi.org/10.1038/s41598-017-12610-1>
-

7.46 Dehnungsmessstreifen

7.46.1 Beschreibung der Technologie

Ein Dehnungsmessstreifen funktioniert nach dem Prinzip des elektrischen Leitwerts und dessen Abhängigkeit von der Geometrie des Leiters. Dehnungsmessstreifen (Abb. 7.78) messen Dehnungen auf der Grundlage des Dehnungseffekts, der entsteht, wenn der Leiter oder das Halbleitermaterial unter äußerer Krafteinwirkung mechanisch verformt wird. Dies führt zu Änderungen der gemessenen Widerstandswerte. In der Praxis ist ein Dehnungsmessstreifen als leitfähiges Gitter im Zickzack aufgebaut, dessen Dehnung empfindlich auf Verformung (Dehnung/Stauchung) reagiert. Wenn ein Dehnungsmessstreifen fest mit einem verformten Element verbunden ist, kann die Dehnung des Elements durch den Dehnungsmessstreifen gemessen werden. Ein Dehnungsmessstreifen misst effektiv die durchschnittliche Dehnung, die sich über seine Spannweite entwickelt.

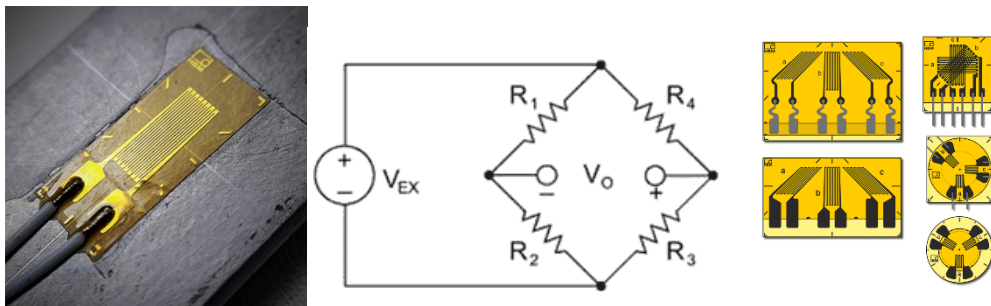


Abb. 7.78 Beispiel eines installierten Dehnungsmessstreifens (links); Leitungskreis eines Dehnungsmessstreifens (Mitte, [149]); Dehnungsmessstreifen-Rosetten (rechts) [151]

Der Widerstand des Dehnungsmessstreifens ändert sich nicht nur als Reaktion auf die aufgebrachte Dehnung. Sowohl das Material des Dehnungsmessstreifens als auch das Material der Probe, auf der der Dehnungsmessstreifen angebracht ist, reagieren auch auf Temperaturänderungen. Die Hersteller versuchen, diese Empfindlichkeit zu minimieren, indem sie das Material des Dehnungsmessstreifens so bearbeiten, dass die Wärmeausdehnung des Probenmaterials, für das der Dehnungsmessstreifen bestimmt ist, kompensiert wird. Kompensierte Messgeräte verringern zwar die thermische Empfindlichkeit, beseitigen sie aber nicht vollständig. Um kleine Widerstandsänderungen zu messen und die Temperaturempfindlichkeit zu kompensieren, werden Dehnungsmessstreifen fast immer in einer Brückenkonfiguration mit einer Spannungs- oder Stromerregungsquelle verwendet. Die allgemeine Wheatstone-Brückenkonfiguration ist in Abb. 7.78 (Mitte) dargestellt. Indem zwei der Widerstandsarme der Brücke (R_i) durch Dehnungsmessstreifen ersetzt werden, kann der Temperatureinfluss vermieden werden [149].

Es gibt verschiedene Arten von Dehnungsmessstreifen, z. B. lineare (unidirektionale) Dehnungsmessstreifen, bidirektionale Dehnungsmessstreifen und 45°- oder 60°-Rosetten. Ein linearer Dehnungsmessstreifen misst lokal eine einzige Dehnungskomponente entlang einer bestimmten Richtung. Bidirektionale Dehnungsmessstreifen messen die Dehnung in zwei zueinander senkrechten Richtungen. Eine 45°-Rosette misst lokal drei Dehnungskomponenten entlang der Richtungen 0, - (90° + 45°) und + (90° + 45°), während die 60°-Rosettenkonfiguration aus drei Dehnungsmessstreifen besteht, die im 60°-Winkel angeordnet sind. Rosetten dienen der Messung des vollständigen Dehnungszustandes. Typische Dehnungsmessstreifen-Rosetten sind in Abb. 7.78 (rechts) dargestellt.

Dehnungsmessstreifen mit Schwingsaitensensor

Ein Dehnungsmessstreifen mit Schwingsaitensensor besteht aus einer Spuleneinheit und zwei Endblöcken, welche mit einer Schwingsaite (in einem Rohr) verbunden sind (siehe Abb. 7.79). Der Abstand zwischen den Endblöcken beträgt je nach Ausführung zwischen 50 und 250 mm (in der Regel 150 mm). Durch den Schwingsaitensensor kann die Dehnung zwischen den zwei Endpunkten bestimmt werden (Funktionsweise Schwingsaitensensor siehe Kapitel 7.25). Die Endpunkte können als "Ankerplatten" für die direkte Anwendung

im Beton ausgebildet werden (siehe Abb. 7.79, rechts) oder mittels Bogenschweisssverfahren an ein Stahlbauteil / Bewehrung befestigt werden.

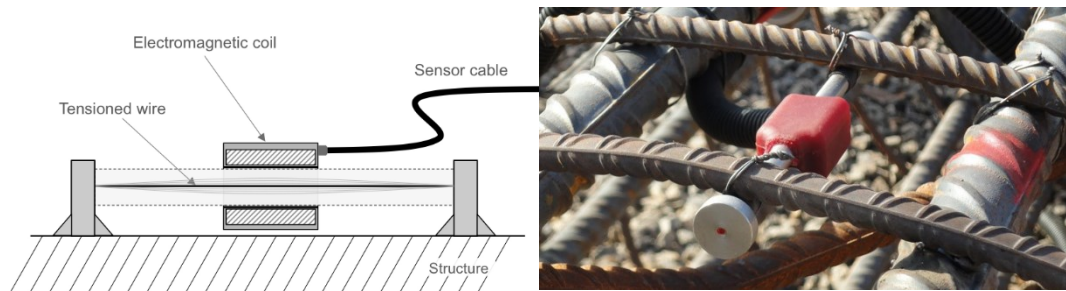


Abb. 7.79 Dehnungsmessstreifen mit Schwingsaitensensor konzeptioneller Aufbau (links, [152]) und Anwendungsbild für die direkte Anwendung im Beton (rechts, [153])

7.46.2 Fragestellungen in den Fachbereichen

Fragestellung im Bereich Tunnel

Messungen mit Hilfe von Dehnungsmessstreifen eignen sich für die punktuelle Erfassung von Bauwerksteilen im Tunnel. Dehnungsmessstreifen werden für folgende Einsatzzwecke verwendet:

- Überwachung der Dehnungsänderungen von Bauwerksteilen kurzzeitig während des Vortriebs (z.B. Stahlbögen Ausbruchsicherung infolge Auflockerung Baugrund) oder langfristig während des Betriebs (z.B. Bewehrung Tunnelgewölbe infolge druckhaftem oder quellfähigem Gebirge).
- Überwachung der Dehnungsänderungen im Bereich von Baugrubensicherungen (z.B. Baugrubenwände, Spriesse) und Pfahlprüfungen.

7.46.3 Datenerfassung, Raumbezug, Messgrößen und – Genauigkeit

- Die Datenerfassungsrate kann bis zu 300 kHz betragen. Dadurch eignen sich Dehnungsmessstreifen sowohl für statische als auch für dynamische Messungen.
- Die gemessene Oberfläche sollte vor der Montage der Dehnungsmessstreifen mit Sandpapier abgeschliffen und mit Ethanol oder Aceton gereinigt werden.
- Nach dem Montieren und Lötten eines Dehnungsmessstreifens sollten der Messstreifen und die Lötstellen vor Feuchtigkeit und Korrosion geschützt werden, um eine zuverlässige und langfristige Messung zu gewährleisten. Dringt Feuchtigkeit zum Messstreifen oder den Lötstellen durch, fällt in der Regel ein Dehnungsmessstreifen aus.
- Die Dehnung des Dehnungsmessstreifens wird als die Dehnung des gemessenen Substrats betrachtet.
- Dehnungsmessstreifen erreichen bei kleinen Dehnungen eine Genauigkeit von $\pm 1 \mu\epsilon$. Sie hängt jedoch stark von der Qualität der Montage ab. Je nach Art des Dehnungsmessstreifens liegt die maximal messbare Dehnung bei 3-5 %. Bei Überschreitung dieser Grenze werden andere Methoden, wie z. B. Extensometer (siehe Kapitel 7.7) empfohlen.
- Dehnungsmessstreifen mit Schwingsaitensensor können eine maximale Dehnung von rund ca. 0.3 % (3000 $\mu\epsilon$) messen. Die Genauigkeit liegt bei ca. $\pm 3 \mu\epsilon$ bei einer Auflösung von 1 $\mu\epsilon$.

7.46.4 Entwicklungsstand, Anwendungsgrenzen, Kosten

Dehnungsmessstreifen sind eine ausgereifte Technologie, die in verschiedenen Präzisions- und Kostenbereichen erhältlich ist. Die messbare Dehnung ist in der Regel auf 3 bis 5 % begrenzt, doch wurden kürzlich Dehnungsmessstreifen mit einer maximalen Dehnung von 40 % entwickelt [147]. Dehnungsmessstreifen sind darauf beschränkt, lokal über ihre meist kurze Spannweite zu messen. Das bedeutet, dass sie im Wesentlichen Dehnungsmessungen an einem Punkt bieten. Andere Technologien, wie z. B.

faseroptische Sensoren (FOS), sind in der Lage, gemittelte und verteilte Dehnungen entlang einer Linie zu messen (siehe Kapitel 7.10 für weitere Einzelheiten).

Für Kurzzeit-Messungen in einer trockenen Umgebung können sogenannte Magnet-Dehnmessstreifen (Abb. 7.80) auf zu messenden Stahloberflächen eingesetzt werden. Bei diesen Sensoren wird ein unidirektionaler Dehnmessstreifen mittels einer Feder und Permanentmagnet an das zu messende Objekt gepresst. Dadurch entfällt die zeitraubende Montage (Klebung und Lötung) der herkömmlichen Dehnmessstreifen. Die Dehnung des Messobjekts wird durch Haftreibung auf den Dehnmessstreifen übertragen. Magnet-Dehnmessstreifen eignen sich zur Messung von Dehnungen auf Bauteilen aus Stahl. Bis zu einer Dehnung von ca. 5 ‰ entspricht ihre Genauigkeit jener von geklebten Dehnmessstreifen. Magnet-Dehnmessstreifen können darüber hinaus mehrmals eingesetzt werden.



Abb. 7.80 Magnet-Dehnmessstreifen auf einem Stahlträger montiert.

Die Montage eines Dehnmessstreifens dauert ca. 45 – 60 Minuten (je nach Zugänglichkeit) und erfordert erfahrenes Personal, das in der Vorbereitung der Oberfläche vor dem Aufkleben des Messstreifens sowie im Kleben und Löten des Messstreifens gut geschult ist. Vorverkabelte Dehnmessstreifen erlauben die Montagezeit zu verkürzen, da das Löten am Dehnmessstreifen entfällt. Bei kalten Temperaturen erlauben Wärmelampen das Abhärten des Klebstoffs zu beschleunigen. Das Verfahren ist in einem entsprechenden HBM-Handbuch ausführlich beschrieben [147].

Der Preis für ein Dehnmessgerät liegt typischerweise im Bereich von 200 bis 400 CHF und beinhaltet die Kosten für den benötigten Signalwandler. Die Kosten für die DMS-Sensoren selbst sind ca. 15 CHF pro 10 Stück geschätzt. Der Preis erhöht sich, wenn zusätzliche Messgrößen, wie z.B. die Temperatur, in das gleiche Gerät integriert werden müssen.

7.46.5 Ergänzende Ausschreibungsanforderungen

Siehe Kapitel 7.1.5

7.46.6 Literaturverzeichnis

Sonstige Literatur / Forschungsberichte

-
- [146] Tokyo Measuring Instruments Laboratory Co. , Post-yield Strain Gauge, https://tml.jp/e/product/strain_gauge/post-yield.html#yhf_list.html, (Zugriff 13.06.2022)
-
- [147] HBK, Installation of Strain Gauges, <https://www.hbm.com/en/8132/how-to-install-strain-gauges-video-tutorial/>, (Zugriff 15.07.2022)
-
- [148] Yu, Y, Chan, Tommy, & Li, ZX (2006) Typhoon-induced accumulated fatigue damage evaluation using health monitoring data. In International Conference on Protection of Structures Against Hazards (3rd), 2006-09-28 - 2006-09-29.
-
- [149] National Instruments Corporation (1998), Strain Gauge Measurement – A Tutorial, Application Note 078, http://elektron.pol.lublin.pl/elekp/ap_notes/ni_an078_strain_gauge_meas.pdf, (Zugriff 15.07.2022)
-
- [150] Sawicki, B., Brühwiler, E. Long-term strain measurements of traffic and temperature effects on an RC bridge deck slab strengthened with an R-UHPFRC layer. J Civil Struct Health Monit 10, 333–344 (2020). <https://doi.org/10.1007/s13349-020-00387-3>
-
- [151] HBK, Der Standard bei Dehnungsmessstreifen, <https://www.hbm.com/fileadmin/mediapool/images/products/sensors/strain-gauges/y-series/RX-Preview.png>, (Zugriff 15.07.2022)
-
- [152] National Instruments Corp. (2020), Using Vibrating Wire Sensors with CompactRIO, <https://www.ni.com/de-ch/support/documentation/supplemental/13/using-vibrating-wire-sensors-with-compactrio.html>
-
- [153] SISGEO S.r.l., Schwingsaiten-Dehnungsaufnehmer, <https://sisgeo.com/products/strain-gauges/vibrating-wire-strain-gauges/>, (Zugriff 15.07.2022)
-

7.47 Schlitzpressenmessungen

7.47.1 Beschreibung der Technologie

Schlitzpressenmessungen ist ein Verfahren, mit welchem sich in einem bestehenden Bauteil die herrschenden Druckspannungen bestimmen lassen. Die Messtechnologie basiert darauf, dass in das vorhandene Bauteil ein Schlitz gefräst wird, dessen Öffnungsweite (Höhe des Schlitzes) sich nach Abschluss der Erstellung verändern wird. Mit einer im Schlitz eingebauten Flachpresse wird über Druck die Verformung im Schlitz zurückgestellt. Der Druck entspricht, unter Berücksichtigung von vorgängigen Kalibrierungen, den vorhandenen Normalspannungen im Bauteil. Vor der Erstellung des Schlitzes sind auf der Oberfläche des Bauteils Messbolzen (4 bis 6 Stk. je nach Breite des Schlitzes) zu versetzen und mit hoher Genauigkeit - mit Fokus auf den relativen Abstand in der Höhe der Bolzen untereinander – einzumessen (siehe Abb. 7.81). Die Entlastung im Bauteil durch den Schlitz kann so messtechnisch aufgenommen werden; die Druckerhöhung in der Flachpresse wird gestoppt, sobald der Abstand der Messbolzen wieder dem Ursprungszustand entspricht.

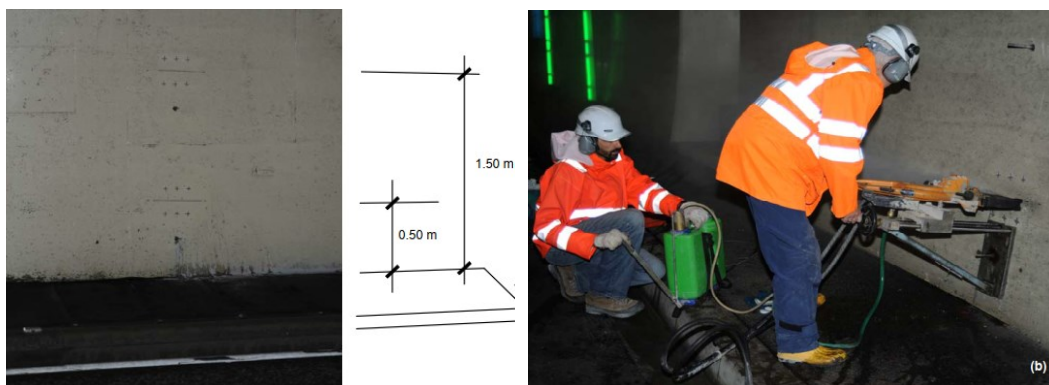


Abb. 7.81 links: Anzeichnen von 2 Schlitz mit je 6 Messbolzen, rechts: Erstellung Schlitz [156]

Die Voraussetzung für den Einsatz dieser Messtechnologie ist, dass die Beanspruchung im elastischen Bereich liegt, d.h. die Verformungen reversibel sind. Sollte die Beanspruchung über der Elastizitätsgrenze im plastischen Bereich liegen, ist mit verfälschten Resultaten zu rechnen. Detailliertere Angaben zur Messtechnik können in der angegebenen Literatur gefunden werden.

7.47.2 Fragestellungen in den Fachbereichen

Fragestellung im Bereich Tunnel

Schlitzpressenmessungen eignen sich in erster Linie für die Ermittlung der vorhandenen Druckspannungen im Bereich des Schlitzes, welche einen Anhaltspunkt für die im Bauteil vorherrschenden Spannungsverhältnisse geben. Die Messungen sind insbesondere in Bauwerksteilen sinnvoll anzuwenden, welche eine hohe Belastung infolge Normalkraft aufweisen. Typischerweise sind dies Tunnelgewölbe in quelfähigem Baugrund, die durch Quelldruck als Haupteinwirkung beansprucht werden. Auch in gemauerten Tunnelverkleidungen können Schlitzpressenmessungen Anzeichen über die Beanspruchung geben, da diese die Lasten statisch vor allem über Normalkraft abtragen.

Bei Bauteilquerschnitten, die auf Normalkraft und Biegung beansprucht werden und dadurch in der Spannungsverteilung über die Bauteildicke auch einen Anteil aus Biegung aufweisen, ist die Aussagekraft der Resultate aus diesen Messungen begrenzt. In Bauteilquerschnitten, welche auf Zug beansprucht werden, sind Schlitzpressenmessungen nicht zweckmässig. Bei der Anordnung der Schlitz im Tunnelquerschnitt sind daher die Einschränkungen der Schlitzpressenmessungen in Bezug auf Biege- und Zugbeanspruchung zu berücksichtigen.

Im Allgemeinen kommen Schlitzpressenmessungen im Tunnelbau für folgende Einsatzzwecke zum Einsatz:

- Langzeitüberwachung der Normalspannung in Bauteilen, welche in quellfähigem Baugrund liegen (z.B. grobe Rückrechnung des Quelldrucks aufgrund gemessener Normalspannung);

Fragestellung im Bereich Naturgefahren

- --

7.47.3 Datenerfassung, Raumbezug, Messgrössen und – Genauigkeit

- Die Messdaten Erfassung erfolgt händisch vor Ort. Das Einmessen der Bolzen erfolgt mit einem Massband. Der Druck in der eingesetzten und kalibrierten Flachpresse wird an der Anzeige abgelesen und notiert. Es erfolgen während rund 30 bis 40 Minuten mehrere Messungen (Druck und Distanz Messbolzen), welche am Schluss ausgewertet werden.
- Der Raumbezug bei der Messung ist durch die Höhen der Messbolzen bzw. durch deren relativen Abstand gegeben.
- Bei wiederholenden Messungen müssen die Messbolzen immer wieder neu eingemessen werden, um mit der Flachpresse den Abstand der Bolzen gemäss Ursprungszustand wieder herzustellen.
- Die Genauigkeit der Messung ist vor allem von der Anzeige der eingesetzten Flachpresse und der Deformationsmessung abhängig. Die Anforderungen sind projektspezifisch festzulegen, jedoch reicht in der Regel eine Genauigkeit von ± 0.1 MPa resp. ± 1.0 mm.
- Die Messtechnologie ist zerstörungsarm (Bolzen und Frässchnitt).

Der Messbereich des Messbandes muss einen Abstand von rund 30 bis 40 cm abdecken können. Auf diese Distanz ist die Genauigkeitsklasse II (± 1.0 mm auf 10 m) hinreichend.

Die Flachpresse sollte einen Druck bis rund 50 MPa aufbringen können; projektspezifisch und je nach ausführender Unternehmung kann der Wert auch reduziert werden. Der Druck auf dem Manometer oder der digitalen Anzeige wird häufig auf 0.1 MPa angezeigt.

Tab. 7.36 Messbereich / Genauigkeit einer Schlitzpressenmessung.

Messgrösse	Messbereich	Auflösung	Genauigkeit
Abstand Bolzen	bis 40 cm	± 1 mm	± 1.1 mm auf 10 m
Druck Flachpresse	bis 50 MPa	± 0.1 MPa	± 0.1 MPa

7.47.4 Entwicklungsstand, Anwendungsgrenzen, Kosten

Schlitzpressenmessungen sind für den Anwendungsbereich in Tunnel fertig entwickelt. Die nötigen Einrichtungen sind Stand der Technik.

Die Anwendungsgrenzen der Schlitzpressenmessungen sind unter Ziffer 1.1.2 bereits beschrieben. Häufigster Anwendungsbereich für die Messtechnologie sind auf Normalkraft beanspruchte Tunnelverkleidungen.

Die Kosten für die Schlitzpressenmessung belaufen sich auf einen Bereich zwischen ca. 2'000 CHF und 5'000 CHF pro Messung. Wiederkehrende Kosten bestehen im Aufwand für die Messung vor Ort und die Auswertung.

7.47.5 Ergänzende Ausschreibungsanforderungen

Siehe Kapitel 7.1.5

7.47.6 Literaturverzeichnis

Sonstige Literatur / Forschungsberichte

- [154] Mitteilung der Schweizerischen Gesellschaft für Boden- und Felsmechanik, Juradurchquerungen - aktuelle Tunnelprojekte im Jura, Wisenbergtunnel, W. Steiner, (April 1989).
-
- [155] Beitrag zum Internationalen Kongress für Tunnelbau, Toronto, Kanada, "Flat jack Measurements in the lining of the Hauenstein-Tunnel as a design base for the new Wisenberg-Tunnel ", Steiner, W.; Rossi, P.; Devin P. (1989).
-
- [156] Lombardi AG, Beratende Ingenieure
-

7.48 Druckkissen

7.48.1 Beschreibung der Technologie

Spannungen im Bauwerk oder Baugrund können mittels Druckkissen gemessen werden. Die Druckkissen bestehen aus zwei dünnen Stahlplatten (ca. 3 – 6 mm) und sind mit einer Hydraulikflüssigkeit gefüllt (Abb. 7.82). Der Druck der Flüssigkeit innerhalb des Druckkissen kann über Drucksensoren (siehe Kapitel 7.18, Kapitel 7.19 und Kapitel 7.45) gemessen werden. Aus den gemessenen Druckänderungen kann die Veränderung der Totalspannung (d.h. der Summe aus Boden-/Gebirgs- bzw. Betonspannungen und allfälligem Porenwasserdruck) im umliegenden Material bestimmt werden. Es können dabei nur die Normalspannungen auf das Druckkissen erfasst werden. Nicht erfasst Schubspannungen verfälschen das Ergebnis (d.h. je senkrechter das Druckkissen zur Hauptspannung orientiert eingebaut wird, desto kleiner ist deren Einfluss). Für die Erfassung des räumlichen Spannungszustandes müssen mehrere Druckkissen (mind. 3 resp. 6 Stück für 2D resp. 3D Spannungszustand) verwendet und nach individuellen Spannungsebenen ausgerichtet werden [157].



Abb. 7.82 Druckkissen (links, [158]) und mögliche Anordnung in der Tunnelverkleidung (rechts, [159])

Druckkissen können im Bauwerk, im Baugrund, oder im Übergang dazwischen platziert werden (siehe Abb. 7.82). Im Bauwerk können die Druckkissen direkt einbetoniert werden. Im Baugrund (Festgestein) können Druckkissen in Schlitzten oder Bohrlöcher platziert werden. In Lockergestein (Aufschüttungen) können Druckkissen direkt im Baugrund verbaut werden. Aufgrund der erforderlichen Eingriffe für die Installation der Druckkissen können die In-Situ-Spannungen im Baugrund nicht gemessen werden. Die Installation in Schlitzten oder Bohrlöcher erfordert eine vollständige Verfüllung der Hohlräume zwischen Baugrund und Druckkissen. Das Verfüllmaterial muss dabei eine möglichst gleiche Steifigkeit wie der Baugrund aufweisen, damit das Baugrundverhalten übertragen werden kann. Allgemein muss bei der Installation von Druckkissen ein möglichst optimaler Kontakt zwischen Druckkissen und Verfüllmaterial / Einbaumedium erzielt werden. [157]



Abb. 7.83 Mehrere Druckkissen (Spannungsmonitorstation) für die Verwendung in einem Bohrloch [160]

7.48.2 Fragestellungen in den Fachbereichen

Fragestellung im Bereich Tunnel

Druckkissen können im Tunnelbau eingesetzt werden, um die Spannungsänderungen in der Tunnelverkleidung oder dem Baugrund zu messen. Im Allgemeinen kommen Druckkissen im Tunnelbau für folgende Einsatzzwecke zum Einsatz:

- Kurz- und Langzeitüberwachung der Änderungen der Spannungen im Bauwerk;
- Kurz- und Langzeitüberwachung der Änderungen der Totalspannungen im Baugrund (z.B. infolge Quelldruck, Erddruck im Lockergestein);

7.48.3 Datenerfassung, Raumbezug, Messgrößen und – Genauigkeit

- Die Messdatenerfassung erfolgt analog oder digital (Ablesegerät bzw. Datenschreiber/Logger) je nach Zugänglichkeit der Messstelle und den Anforderungen an Kontinuität und Messwertdichte.
- Die Berechnung der Spannungen im Baugrund resp. Bauwerk erfolgt indirekt über die Drucksensoren.
- Der Raumbezug einer einzelnen Messung erfolgt über die Einmessung bei der Installation.

Die Messgenauigkeit eines Druckkissen ist abhängig vom verwendeten Drucksensor, der Einbausituation und der Einbettung der Druckkissen. Der Messbereich von Druckkissen kann bis zu ca. 60 MPa reichen. Die Messgenauigkeit liegt bei ca. 0.1 % FS und bei einer Auflösung von ca. +/- 0.025 % FS.

Tab. 7.37 Messbereich / Genauigkeit einer Druckkissenmessung.

Messgrösse	Messbereich	Auflösung	Genauigkeit
Druck	bis 60 MPa	+/- 0.025 % FS	+/- 0.1 % FS

7.48.4 Entwicklungsstand, Anwendungsgrenzen, Kosten

Die Messung der Spannungen mittels Druckkissen ist eine etablierte Methode zur Überwachung der Verkleidung und des Baugrunds. Die Messung der Spannung mittels Druckkissen erfolgt sehr lokal und über eine relativ kleine Fläche. Daher ist mit lokalen Abweichungen der Spannung zu rechnen. Die Qualität der Messung ist stark abhängig von der Installation. Es muss ein optimaler Kontakt (Bettung) des Druckkissens mit den anliegenden Verfüllmaterial / Einbaumedium vorhanden sein. Hohlräume, aber auch unterschiedliche Steifigkeiten zwischen Einbaumaterial und Baugrund können zu Spannungsumlagerungen führen und die Messresultate verfälschen. Aufgrund des festen Einbaus der Druckkissen kann die Installation nicht überprüft werden und es können keine Reparaturen durchgeführt werden.

Die Kosten für die Installation ein Druckkissen sind abhängig vom Messsystem, der Einbausituation und der Zugänglichkeit. Für die Installation eines einfachen Druckkissen in der Betonverkleidung eines Tunnels belaufen sich die Kosten auf ca. 2'000 CHF bis ca. 3'000 CHF. Für die Erstellung eines Bohrlochs fallen zusätzliche Kosten an. Die wiederkehrenden Kosten bestehen im Aufwand für die Auswertung und Interpretation der aktuellen Messwerte oder für den Betrieb (und Installation) einer digitalen Lösung (Erfassung, Übermittlung und ggf. automatisierte Auswertung der Daten). Einzelne Auswertungen verursachen Kosten im Bereich von ca. 100 CHF / Messung.

7.48.5 Ergänzende Ausschreibungsanforderungen

Siehe Kapitel 7.1.5

7.48.6 Literaturverzeichnis

Sonstige Literatur / Forschungsberichte

- [157] Empfehlungen des Arbeitskreises Geomesstechnik (2021), Deutsche Gesellschaft für Geotechnik (DGGT) und Gesellschaft für Geodäsie, Geoinformation und Landmanagement (DVW), Wiley, ISBN 978-3-433-03343-2
- [158] GEOKON, Pressure Cells - NATM Style Shotcrete Stress (VW); <https://www.geokon.com/4850> (Zugriff 04.04.2023)
- [159] Glötzl Baumesstechnik (2020), Spannungsnehmer, http://www.gloetzl.de/fileadmin/produkte/1%20Messwertnehmer/1%20Druck%20und%20Spannung/P_68.11___12_Spannungsnehmer_Typ_BF.pdf (Zugriff 04.04.2023)
- [160] GLÖTZL Baumesstechnik (2003), AWID-Spannungsmesser, http://www.gloetzl.de/fileadmin/produkte/4_Sondergeraetebau/P_096.00_AWID_Spannungsmessung_de.pdf (Zugriff 04.04.23)

B 3 Berg- / Grundwasserveränderungen

Tab. 7.38 Berg-/Grundwasserveränderungen - Übersicht

Fragestellung		B3 Berg- / Grundwasserveränderungen				
Kurzbeschreibung Fragestellung		Die Erstellung eines Tunnelbauwerks kann Auswirkungen auf das vorhandene Berg-/ Grundwasserregime haben (z.B. Einfluss Tunnelvortrieb auf Grundwasserpegel), wobei das Bauwerk ebenfalls durch die Berg-/ Grundwasserverhältnisse beeinflusst werden kann (z.B. Belastung infolge Wasserdruck). Veränderungen im Berg-/Grundwasser können zu einer Gefährdung der Tragsicherheit (infolge Belastungsänderung Verkleidung) und der Betriebssicherheit (z.B. Tropfstellen) des Tunnelbauwerks führen. Die Überwachung der Berg-/Grundwasserverhältnisse (z.B. Pegel, Strömung, etc.) im Tunnelnahbereich ermöglicht eine Beurteilung der Veränderungen im direkten Nahbereich des Bauwerks.				
Überwachungstechnologie		Piezometer	Porenwasserdruckgeber	Wassertemperatur-sensoren	pH-Wert	Leitfähigkeits-sensoren
"ID"		PIM_	PWD_	WTP_	PHW_	LFK_
Typisierung	a. Messprinzip	2 indirekt	2 indirekt	2 indirekt	2 indirekt	1 direkt
	b. Datenerfassung	2 elektrisch	2 elektrisch	2 elektrisch	2 elektrisch	2 elektrisch
	c. Datenspeicher	2 analog (Datenschreiber)	1 digital	3 analog (Ablesung)	3 analog (Ablesung)	3 analog (Ablesung)
	d. Lokalisation	1 punktuell	1 punktuell	1 punktuell	1 punktuell	1 punktuell
	e. Raumbezug					
	f. Zustand	2 zerstörend (Bohrung)	2 zerstörend (Bohrung)	3 nicht zerstörend	3 nicht zerstörend	3 nicht zerstörend
Messgrößen und -genauigkeit	Größen	Wasserpegel / Wasserdruck	Wasserdruck	Temperatur	elektr. Potential	elektr. Leitf.
	Untersuchungs-/ Tiefenbereich	bis 1500 m				
	Auflösung	0.1 kPa	0.1 kPa	0.1 °C		0.1 - 10 µS/cm
	Genauigkeit	±/- 0.2 - 2 kPa	±/- 0.5 kPa	±/- 0.5 °C	±/- 0.01	±/- 0.2 - 2 %
	Bemerkungen	Messbereich 0 bis 5'000 kPa	Messbereich -100 bis 350 kPa	Messbereich -200 bis 2'000 °C	Messbereich pH = 0 bis 14	Messbereich bis 100'000 µS/cm
Tunnel		3	3	2	3	2
Geotechnik		3	3	2	2	2
Naturgefahren		3	3	3	1	3
Umwelt		2	2	0	3	2
Einsatzzeitpunkt		W	W	W	W	W
Entwicklungsstand		●	●	●	●	●
Kosten	initial / einmalig	●	●	●	●	●
	wiederkehrend	●	●	●	●	●

7.49 Piezometer

Siehe Kapitel 7.29

7.50 Porenwasserdruckgeber

Siehe Kapitel 7.30

7.51 Wassertempertursensoren

Siehe Kapitel 7.32

7.52 pH-Wert

7.52.1 Beschrieb der Technologie

Die Messung des pH-Werts von Wasser kann direkt vor Ort oder im Labor getestet werden. Der pH-Wert beschreibt die Konzentration von Wasserstoffionen ($\text{pH} = -\log[\text{H}^+]$) in einer wässrigen Lösung, ist ein dimensionsloser Wert und bewegt sich in einem Bereich zwischen $\text{pH} = 0$ (saure-), 7 (neutrale-) und 14 (basische-Lösung). Die Bestimmung des pH-Werts kann über Indikatorfarbstoff oder Potentiometrie erfolgen.

Sogenannte pH-Messstreifen verwenden die Reaktion von Indikatorfarbstoffen auf die Wasserstoffionenkonzentration für die Messung des pH-Werts. Durch den direkten Kontakt mit dem zu messenden Wasser erfolgt ein Farbumschlag der Indikatorfarbstoffe auf dem Messpapier. Der visuelle oder farbmetrische Vergleich der Indikatorfarbstoffe mit einer Farbvergleichsskala ermöglicht die Bestimmung des pH-Werts. Einzelne Farbstoffe besitzen einen begrenzten Messbereich (2 bis 3 pH-Stufen). Durch die Verwendung von mehreren Farbstoffen (Universalindikatoren) kann der pH-Wert über die gesamte Bandbreite bestimmt werden [161].

Die elektrische Messung des pH-Werts (pH-Meter oder pH-Messkette) basieren auf der Methode der Potentiometrie. In einer Glasmembrankugel ist eine Pufferflüssigkeit und ein Draht eingelassen. Durch Eintauchen der Glaskugel in die Messflüssigkeit können in der äussersten Schicht der Glasmembran Wasserstoffionen, am inneren und äusseren Rand, eindringen. Aufgrund der unterschiedlichen Ionenkonzentration an den beiden Ränder entsteht ein Potential [161]. In der Referenzelektrode ist das Potential unabhängig vom pH-Wert und konstant. Die Potentialdifferenz zwischen der Referenzelektrode und der Glasmembrankugel kann als Spannung gemessen werden, welche direkt proportional zur pH-Differenz zwischen der Messflüssigkeit und der Referenzelektrode ist. Der pH-Wert der Referenzelektrode und die Kalibrierung der Spannungsdifferenzen zum pH-Wert der Messflüssigkeit müssen vorgängig erfolgen. Eine Berücksichtigung der Wassertemperatur bei jeder Messung erhöht zudem ebenfalls die Genauigkeit. Die elektrische Messung des pH-Werts mittels Potentiometrie kann mit einem Handgerät punktuell (vor Ort oder im Labor) oder mit stationärer Installation kontinuierlich erfolgen [162].

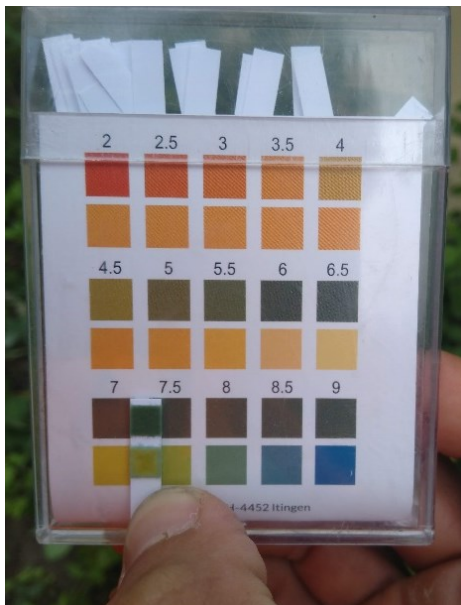


Abb. 7.84 Visuelle Auswertung eines pH-Messstreifen (links) und elektrische Messung des pH-Werts in einem Schacht (rechts) [163]

7.52.2 Fragestellungen in den Fachbereichen

Fragestellung im Bereich Tunnel

Die Messung des pH-Werts wird punktuell direkt im Tunnel oder von der Oberfläche aus durchgeführt. Der pH-Wert ist im Tunnelbau für die folgenden Einsatzzwecke relevant:

- Überwachung von Berg- und Grundwasser kurzzeitig während der Bauarbeiten (z.B. Einfluss Tunnelvortrieb auf den pH-Wert des Berg-/Grundwassers) sowie langfristig während des Betriebs (z.B. Einfluss von Bauwerken auf den pH-Wert, Veränderungen des pH-Werts des Wassers in Drainageleitungen);
- Überwachung von Berg- und Grundwasser während der Ausführung von Bauhilfsmassnahmen (z.B. während und nach Injektionsmassnahmen);
- Überwachung von Abwasser kurzzeitig (z.B. Baustellenabwasser) sowie langfristig (z.B. in Folge Auswaschen Sickerbeton oder Betonrecyclingmaterial).

7.52.3 Datenerfassung, Raumbezug, Messgrössen und – Genauigkeit

- Die Messdatenerfassung erfolgt analog oder digital (Ablesegerät bzw. Datenschreiber); Abhängig von der Zugänglichkeit der Messstelle und den Anforderungen an Kontinuität und Messwertdichte;
- Die Messung erfolgt punktuell vor Ort (Indikator oder Potentiometrie) oder mittels Probeentnahme mit anschliessender Testung (vor Ort oder im Labor);
- Die Bestimmung des pH-Werts erfolgt indirekt über die Potentialmessung oder die Reaktion von Indikatorfarbstoffe;
- Der Raumbezug einer einzelnen Messung oder Messstelle kann über geodätische Aufnahmen bestimmt werden;
- Die Prüfung erfolgt zerstörungsfrei (abgesehen von einer allfälligen Bohrung);

Die Messgenauigkeit einer pH-Messung mittels Universalindikator liegt in einem Bereich zwischen ca. ± 0.5 bis ca. ± 1.0 . Der Messbereich eines Universalindikators liegt in einem Bereich zwischen $\text{pH} < 1$ und $\text{pH} = 14$. Mit einzelnen Indikatorfarbstoffen kann eine Genauigkeit bis ca. ± 0.1 erreicht werden, wobei der Messbereich nur noch Wertebereich von 2 bis 3 pH-Stufen beinhalten. Die Bestimmung des pH-Werts mit der Potentiometrie Methode erreicht eine Messgenauigkeit von ca. ± 0.01 bis ± 0.02 . Voraussetzung für eine solche Genauigkeit ist die vorgängige Kalibrierung und die Berücksichtigung der Temperatur bei der Messung. Der Messbereich liegt im gesamten pH-Wertebereich ($\text{pH} = 0$ bis $\text{pH} = 14$).

Tab. 7.39 Messbereich/Genauigkeit zur Bestimmung des pH-Werts.

Typ	Messbereich	Genauigkeit
Einzelner Farbindikator	2 bis 3 pH-Stufen	ca. ± 0.1
Universalindikator	$\text{pH} < 1$ bis $\text{pH} = 14$	± 0.5 bis ± 1
Potentiometrie	$\text{pH} = 0$ bis $\text{pH} = 14$	± 0.01 bis ± 0.02

7.52.4 Entwicklungsstand, Anwendungsgrenzen, Kosten

Die Bestimmung des pH-Werts mittels Indikatorfarbstoffen ist eine einfache, effiziente und zuverlässige Methode. Mit der Potentiometrie kann die Genauigkeit der Messung stark verbessert werden. Die Messmethode benötigt jedoch grösseren Aufwand in der Kalibrierung, der Durchführung und dem Unterhalt. Bei einer kontinuierlichen Messung muss regelmässig die Sonde gereinigt (etwa alle zwei Wochen) und neu kalibriert (etwas alle zwei bis drei Monate) werden. Dabei hat jeweils eine Kontrolle des Referenz pH-Werts zu erfolgen [162].

Eine weitere Möglichkeit zur elektronischen Messung des pH-Werts bilden ISFET (ionenselektiver Feldeffekttransistor) Sensoren. Die Messung des pH-Werts basiert ebenfalls auf der Potentiometrie, erfolgt jedoch mit einer glaslosen Membran. Diese Messmethode ist heute kaum verbreitet.

Die Kosten für eine einzelne Messung des pH-Wert belaufen sich je nach Zugänglichkeit in einem Bereich zwischen ca. 200 CHF und ca. 500 CHF. Eine kontinuierliche Messung des pH-Werts verursacht Installationskosten von ca. 1'500 CHF. Die wiederkehrenden Kosten bestehen aus dem Aufwand für den Betrieb einer digitalen Lösung (Erfassung, Übermittlung, ggf. automatisierte Auswertung der Daten und Alarmierungssystem) sowie für den Unterhalt (Kalibrierung Elektroden).

7.52.5 Ergänzende Ausschreibungsanforderungen

Siehe Kapitel 7.1.5

Bei der Ausschreibung muss die Zeitdauer der Überwachung und der damit verbundene Aufwand für den Unterhalt (Kontrollen, Reinigung und Kalibrierung Elektroden) unbedingt integriert werden.

7.52.6 Literaturverzeichnis

Sonstige Literatur / Forschungsberichte

[161] ChemBuddy (2005), pH meter, <http://www.ph-meter.info/>, (Zugriff 07.06.22)

[162] Kremer M. (2012), Messung des pH-Wertes, JUMO GmbH & Co. Fulda, Deutschland, <https://www.jumo.net/attachments/JUMO/attachmentdownload?id=5123>, (Zugriff 07.06.22)

[163] Lombardi AG, Beratende Ingenieure

7.53 Leitfähigkeitssensoren

Siehe Kapitel 7.35

C Überwachung Verkleidung und Zwischendecke

C 1 Bewehrungskorrosion

Tab. 7.40 Bewehrungskorrosion - Übersicht

Fragestellung		C1 Bewehrungskorrosion	
Kurzbeschreibung Fragestellung		Die Tunnelbauwerke sind dem Verkehr und dem damit verbundenen Sprühnebel ausgesetzt, wo durch aus dem Tausalz Chloride in die Stahlbetonkonstruktion eingetragen werden können. Die Chloride durchdringen die Passivschicht an einzelnen Stellen und führen zu einer lokalen Depassivierung der Stahloberfläche, womit die Bewehrungskorrosion einsetzt. Dies kann zu einer Gefährdung der Betriebssicherheit (Abplatzungen) bis zur Gefährdung der Tragsicherheit (Versagen Bauteil) führen.	
Überwachungstechnologie		Potentialfeldmessung	Chloridgehaltsmessungen
"ID"		ELP_	CGM_
Typisierung	a. Messprinzip	2 indirekt	2 indirekt
	b. Datenerfassung	3 elektromagnetisch	11 (hydro)chemisch
	c. Datenspeicher	1 digital	
	d. Lokalisation	1 punktuell	1 punktuell
	e. Raumbezug		
	f. Zustand	3 nicht zerstörend	2 zerstörend (Bohrung)
Messgrößen und -genauigkeit	Größen	elektr. Potential	Chloridgehalt
	Untersuchungs-/Tiefenbereich	Oberflächennahe	Bohrkern / Bohrmehl
	Auflösung		
	Genauigkeit		
	Bemerkungen		
Tunnel		4	4
Geotechnik		0	0
Naturgefahren		0	0
Umwelt		0	0
Einsatzzeitpunkt		N	N
Entwicklungsstand			
Kosten	initial / einmalig		
	wiederkehrend		

7.54 Potentialfeldmessung

7.54.1 Beschreibung der Technologie

Für die Planung von Erhaltungsmassnahmen und für die Abschätzung der Lebensdauer ist die Bestimmung des Korrosionszustandes der Stahlbewehrung notwendig. Seit der Entwicklung der Grundlagen für die Potentialfeldmessung hat sich diese Methode bewährt [164]. Durch Messung der Spannungsdifferenz zwischen einer Referenzelektrode, die auf der Betonoberfläche angebracht wird, und der Bewehrung kann deren Potential bestimmt werden. Anhand dieses Bewehrungspotentials lassen sich Rückschlüsse auf die Lage und das Ausmass von Korrosionsherden ziehen. Im Allgemeinen können negativere Potentiale als Korrosionsstellen interpretiert werden, während positivere Potentiale auf eine passive Bewehrung hinweisen [165]. Abb. 7.85 zeigt schematisch den Messaufbau der elektrischen Potentialmessung.

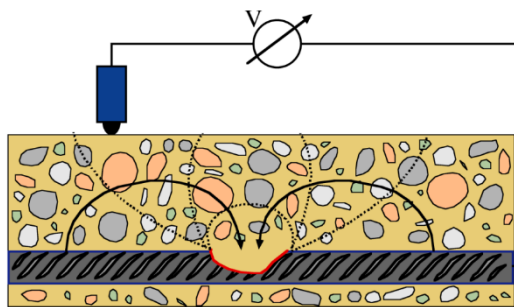


Abb. 7.85 Messaufbau zur Bestimmung des Bewehrungspotentials. Der Ionenstrom im Beton (durchgezogene Linie) führt zu einem Spannungsabfall (gestrichelte Linie), der an der Betonoberfläche gemessen werden kann [166].

7.54.2 Fragestellungen in den Fachbereichen

Fragestellung im Fachbereich Tunnel

Potentialfeldmessungen werden im Bereich Tunnel eingesetzt, um den Zustand der Stahlbewehrung der Verkleidung und der Zwischendecke zu beurteilen. Mit dieser Methode können Orte mit unterschiedlichem elektrischem Potenzial auf einer Betonplatte bestimmt werden. Veränderungen des elektrischen Potenzials sind häufig auf Korrosion der Stahlbewehrung zurückzuführen, können aber auch durch lokale Feuchtigkeitsansammlungen verursacht werden.

Fragestellung im Fachbereich Naturgefahren

- --

7.54.3 Datenerfassung, Raumbezug, Messgrössen und – Genauigkeit

- Die Potenzialmessung wird mit einem Gerät durchgeführt, das entweder in der Hand gehalten oder über die zu messende Oberfläche gerollt wird.
- Die Korrosion von Stahl im Beton ist ein elektrochemischer Prozess.
- Wenn die Bewehrungsseisen im Beton korrodiert sind, kann mit einer Elektrode ein kleiner Stromfluss an der Betonoberfläche gemessen werden.
- Mit der Potentialmessung kann zwischen korrodierter und nicht korrodierter Bewehrung unterschieden werden. Stark negative Potentialwerte deuten auf Korrosion hin.
- Zur Kalibrierung der potenziellen Feldmessung (Korrosionsgrade) und zur Messung des Chloridgehalts können Betonproben entnommen werden.



Abb. 7.86 Potentialfeldmessung an Autobahnbrückenuntersicht [167]

7.54.4 Entwicklungsstand, Anwendungsgrenzen, Kosten

Die Ergebnisse der Messung des elektrischen Potentials werden von mehreren Faktoren beeinflusst [166]. Die elektrische Leitfähigkeit des Betons hat einen direkten Einfluss auf die Ausdehnung des Makroelements und die Grösse des Spannungsabfalls. Betonfeuchte, Temperatur und Porosität beeinflussen die elektrische Leitfähigkeit in hohem Masse und wirken sich somit auch direkt auf die Interpretation der Potentialfeldmessung aus. Eine grundlegende Untersuchung hat gezeigt, dass die wahrscheinliche Lage von Korrosions-Hotspots in Kombination mit statistischen Methoden bestimmt werden kann [164].

Die Erkennbarkeit lokaler Korrosionsstellen hängt von ihrer Grösse, der Betonüberdeckung, der Grösse des Probengitters und der Korrosionsgeschwindigkeit ab. Anodengrössen im Bereich von einem Zentimeter können nicht direkt erkannt werden.

Eine heterogene Verteilung von pH-Wert, Feuchtigkeit und Chloridgehalt kann auch zu Spannungsverteilungen auf der Betonoberfläche führen, die fälschlicherweise als Korrosionsquelle interpretiert werden können.

Bei der Potentialfeldmessung führen eine hohe Betonfeuchte und eine hohe Streusalzbelastung des Betons zu einer lokalen Potentialminderung. Da in den meisten praktischen Fällen neben der Bewehrungskorrosion auch diese beiden Effekte vorhanden sind, werden in der praktischen Anwendung sehr gute Ergebnisse erzielt.

Wenn die lokale Chloridverschmutzung und die nassen Stellen durch eine Reparatur entfernt werden, kann die lokale Korrosionsquelle schwieriger oder sogar unmöglich zu erkennen sein, da diese Beiträge zur potenziellen Feldmessung entfernt werden.

Die Kosten der Messmethode als Dienstleistung liegt im Bereich von 250 bis 280 CHF pro Stunde.

7.54.5 Ergänzende Ausschreibungsanforderungen

Siehe Kapitel 7.1.5

7.54.6 Literaturverzeichnis

Sonstige Literatur / Forschungsberichte

[164] Hunkeler, F. (1994). Grundlagen der Korrosion und der Potentialmessung bei Stahlbetonbauten. VSS, Zürich, Bericht Nr. 510.

[165] ASTM, C. (1991). Standard Test Method for Half-Cell Potentials of Uncoated Reinforcing Steel in Concrete. ASTM C876-91.

[166] Schiegg, M. B. (2008). Untersuchungen zur Potenzialfeldmessung an Stahlbetonbauten. Eidgenössisches Departement für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK, Forschungsauftrag AGB2002/007

[167] MT-Qualitest GmbH, Bauwerksuntersuchungen, mt-qualitest.ch (Zugriff 06.09.2022)

7.55 Chloridgehaltsmessungen

7.55.1 Beschreibung der Technologie

Der Chloridgehalt in einem Betonbauteil kann durch unterschiedliche Methoden bestimmt werden.

Titration

Laboruntersuchung von Beton/Bohrmehl mittels unterschiedlicher Lösungen. Dabei wird das Chlorid als schwerlösliches Silberchlorid vollständig ausgefällt. Aus der Menge der dazu nötigen Nitratlösung wird der Chloridgehalt der Lösung berechnet [169].

Photometrie

Laboruntersuchung von Beton/Bohrmehl mittels unterschiedlicher Lösungen. Eine chloridhaltige Lösung wird umgesetzt und die Lichtabsorption des Umsetzprodukts wird gemessen. Mittels Eichkurven lässt sich die Chloridkonzentration bestimmen [169].

Ionensensitive Elektrode

Sensor für die Bestimmung der Konzentration/Aktivität von bestimmten gelösten Ionen. Der Chloridgehalt von gelösten Proben von Beton/Bohrmehl wird über die Messung des elektrochemischen Potenzials der Elektroden und mittels Eichkurven bestimmt [169].

Ionenchromatographie

Die Ionenchromatographie ist eine analytische Methode zur Trennung von geladenen Teilchen. Je nach spezifischen Methoden können Anionen (Chlorid, Nitrat, Sulfat, ...) oder Kationen (Calcium, Magnesium, Natrium, ...) getrennt werden [168]. Mit der Ionenchromatographie kann die Ionenkonzentration einer gelösten Probe durch einen Leitfähigkeitsdetektor bestimmt werden [169].

Röntgenfluoreszenzanalyse

Die gemahlene Betonprobe / Bohrmehl wird direkt mittels Röntgenfluoreszenzanalyse untersucht. Dabei wird die Probe mittels Röntgenstrahlen angeregt und gibt von sich aus eine Fluoreszenzröntgenstrahlung ab. Aus dem aufgezeichneten Spektrum kann zusammen mittels Kalibrationskurven oder Referenzmessungen der Chloridgehalt bestimmt werden [169].

7.55.2 Fragestellung in den Fachbereichen

Fragestellung im Fachbereich Tunnel

Die Bestimmung des Chloridgehalts wird im Tunnelbau verwendet, um den Zustand von bewehrten Betonbauteilen (z.B. Zwischendecke, Verkleidung) zu beurteilen. Dabei kann die Auswirkungen auf die Stahlbewehrung durch z.B. Chlorid durch ein Tiefenprofil beurteilt werden.

Fragestellung im Fachbereich Naturgefahren

- --

7.55.3 Datenerfassung, Raumbezug, Messgrößen und – Genauigkeit

- Die Bestimmung des Chloridgehaltes wird an Proben im Labor durchgeführt.
- Der Zustand der Bewehrung/Bewehrungskorrosion kann nur indirekt über den Chloridgehalt im Betonbauwerks abgeschätzt werden.
- Es erfolgt jeweils nur eine punktuelle Bestimmung des Chloridgehalts im Bauteil durch die entnommene Probe.
- Für die Bestimmung des Chloridgehalts müssen Proben am Bauwerk entnommen werden (zerstörend).

7.55.4 Entwicklungsstand, Anwendungsgrenzen, Kosten

Die Verteilung von Chlorid in einem Bauteil ist heterogen und kann durch die punktuelle Probenentnahme und deren Testung nur bedingt abgebildet werden.

7.55.5 Ergänzende Ausschreibungsanforderungen

Siehe Kapitel 7.1.5

7.55.6 Literaturverzeichnis

Sonstige Literatur / Forschungsberichte

-
- [168] Goethe Universität Frankfurt am Main, Ionenchromatographie – Versuchsanleitung, Institut für Anorganische und Analytische Chemie, https://www.uni-frankfurt.de/61963184/Praktikumsskript___Ionenchromatographie.pdf?bcs-agent-scanner=ccf4b09b-6640-644f-8d38-46096dafd940 (Zugriff 08.09.2022)
-
- [169] F. Hunkeler, H. Ungricht, F. Deillon TFB (2000), Untersuchungen zur chloridbestimmung im Beton und Durchführung eines 2-stufigen Ringversuches, TFB im Auftrag von Eidg. Departement für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation (UVEK), Bundesamt für Strassen, FA 88/97, Bericht VSS Nr. 546.
-

C 2 Betonspannungen

Tab. 7.41 Betonspannung - Übersicht

Fragestellung	C2 Betonspannungen					
Kurzbeschreibung Fragestellung	Die Verkleidung und Zwischendecke wird aufgrund von unterschiedlichen Einwirkungen aus dem Baugrund und dem Tunnelbauwerk belastet und können entsprechend die Tragsicherheit gefährden. Die resultierenden Spannungen im Beton können durch geeignete Messtechniken erfasst und folglich überwacht werden. Dies ermöglicht ein Rückschluss auf das Tragverhalten des Bauteils sowie auf möglichen effektiv vorhandenen und/oder veränderter Einwirkungen. Dadurch können auch Erkenntnisse über die Tragreserven gewonnen werden.					
Überwachungstechnologie	Kapazitive Drucksensoren	Piezoelektrische Drucksensoren	Dehnungsmessstreifen	Faseroptische Dehnungsmessung	Faseroptische Drucksensoren	Druckkissen
"ID"	DSK ₁	DSP ₁	DMS ₁	FOS ₁	FOD ₁	DKS ₁
Typisierung	a. Messprinzip	2 indirekt	2 indirekt	2 indirekt	2 indirekt	2 indirekt
	b. Datenerfassung	2 elektrisch	2 elektrisch	2 elektrisch	6 faseroptisch/phonisch	2 elektrisch
	c. Datenspeicher	1 digital	1 digital	1 digital	1 digital	2 analog (Datenschreiber)
	d. Lokalisation	1 punktuell	1 punktuell	1 punktuell	2 streckenbezogen	1 punktuell
	e. Raumbezug					
	f. Zustand	3 nicht zerstörend	3 nicht zerstörend	3 nicht zerstörend	3 nicht zerstörend	2 zerstörend (Bohrung)
Messgrößen und -genauigkeit	Größen	Druck	Druck	Dehnung	Deformationen	Druck
	Untersuchungs-/Tiefenbereich	-	-	-	100 m bis zu 30 km	-
	Auflösung	-	-	-	-	-
	Genauigkeit	± 0.1%	± 1%	± 1µε	bis 0.001mm/m	± 3.8 Pa
	Bemerkungen	Messbereich 250 kPa bis 70 MPa	Messbereich 0.7 kPa bis 70 MPa	Messbereich 3-5%	verteilt / quasi-kontinuierlich	Messbereich 0 kPa bis 600 kPa
Tunnel	2	2	3	2	2	2
Geotechnik	2	2	3	2	2	2
Naturgefahren	2	2	1	1	1	0
Umwelt	3	1	2	1	1	0
Einsatzzeitpunkt	W	W	W	W	W	W
Entwicklungsstand	⊕	⊕	⊕	⊕	⊕	⊕
Kosten initial / einmalig	⊕	⊕	⊕	⊕	⊕	⊕
wiederkehrend	⊕	⊕	⊕	⊕	⊕	⊕

7.56 Druckmessdosen

Siehe Kapitel 7.18 & 7.19

7.57 Dehnungsmessstreifen

Siehe Kapitel 7.46

7.58 Faseroptische Dehnungsmessungen

Siehe Kapitel 7.10

7.59 Faseroptische Drucksensoren

Siehe Kapitel 7.45

7.60 Druckkissen

Siehe Kapitel 7.48

C 3 Verformungen

Tab. 7.42 Verformungen - Übersicht

Fragestellung		C3 Verformungen			
Kurzbeschreibung Fragestellung		Die Verkleidung und Zwischendecke wird aufgrund von unterschiedlichen Einwirkungen aus dem Baugrund und dem Tunnelbauwerk belastet. Die resultierenden Verformungen können die Betriebssicherheit des Tunnelbauwerks gefährden. Die resultierenden Verformungen der Bauteile können durch geeignete Messtechniken erfasst und folglich überwacht werden. Dies ermöglicht eine Beurteilung der Betriebssicherheit (z.B. Beeinträchtigung Lichtraumprofil) und des Tragverhaltens der Verkleidung und der Zwischendecke.			
		Laserscanning	Geodätische Aufnahmen (Tachymeter)	Schlauchwaage	Faseroptische Dehnungsmessungen
Überwachungstechnologie					
"ID"		LSC_	TAC_	SWA_	FOS_
Typisierung	a. Messprinzip	1 direkt	1 direkt	1 direkt	2 indirekt
	b. Datenerfassung	7 laseroptisch	2 elektrisch	2 elektrisch	6 faseroptisch/phononisch
	c. Datenspeicher	1 digital	2 analog (Datenschreiber)	2 analog (Datenschreiber)	1 digital
	d. Lokalisation	4 flächenbezogen	1 punktuell	1 punktuell	2 streckenbezogen
	e. Raumbezug				
	f. Zustand	3 nicht zerstörend	3 nicht zerstörend	3 nicht zerstörend	3 nicht zerstörend
Messgrößen und -genauigkeit	Größen	Deformation	Deformationen	Setzungen / Hebungen	Deformationen
	Untersuchungs-/Tiefenbereich	bis 8 km, Horizontal 360°, Vertikal ca. 150°	bis 10 km	-	100 m bis zu 30 km
	Auflösung	3 mm, 0.1°	0.1°	0.001-0.1 mm	-
	Genauigkeit	1 mm + 10 mm/km, 10°	1 mm + 15 mm/km, 0.5°	±/- 0.01-0.3 mm	bis 0.001 mm/m
	Bemerkungen	3D Punktgauigkeit ca. 2 mm @ 10m, 5 mm @ 100m	-	Messbereich bis 1000 mm	verteilt / quasi-kontinuierlich
Tunnel		4	4	3	2
Geotechnik		3	4	2	2
Naturgefahren		3	3	1	1
Umwelt		0	1	0	1
Einsatzzeitpunkt		W	W	W	W
Entwicklungsstand		①	②	③	④
Kosten	initial / einmalig	①	①	①	②
	wiederkehrend	①	②	①	③

Fragestellung					
Kurzbeschreibung Fragestellung					
		Neigungs-änderungen (Clinometer)	Distometer	Nivellement	Fugen- und Rissmessgerät
Überwachungstechnologie					
"ID"		CLI_	DIS_	NV_	FUG_
Typisierung	a. Messprinzip	1 direkt	1 direkt	1 direkt	1 direkt
	b. Datenerfassung	2 elektrisch	1 mechanisch	5 optisch	2 elektrisch
	c. Datenspeicher	1 digital	3 analog (Ablesung)	3 analog (Ablesung)	1 digital
	d. Lokalisation	1 punktuell	1 punktuell	1 punktuell	1 punktuell
	e. Raumbezug				
	f. Zustand	3 nicht zerstörend	3 nicht zerstörend	3 nicht zerstörend	3 nicht zerstörend
Messgrößen und -genauigkeit	Größen	Neigungsänderung	Distanzänderung	Setzungen / Hebungen	Deformationen
	Untersuchungs-/Tiefenbereich	-	bis 50 m	bis 100 m	-
	Auflösung	-	0.01 mm	-	< 0.025%
	Genauigkeit	±/- 0.2 %	±/- 0.02 mm	±/- 0.2 - 2 mm / km	±/- 0.1 %
	Bemerkungen	Messbereich ±/- 1°	Messbereich bis 100 mm	-	Messbereich bis 300 mm
Tunnel		3	3	3	3
Geotechnik		2	2	3	2
Naturgefahren		1	1	3	3
Umwelt		0	0	1	0
Einsatzzeitpunkt		W	W	W	W
Entwicklungsstand		③	④	⑤	⑥
Kosten	initial / einmalig	①	①	①	②
	wiederkehrend	①	①	②	①

7.61 Laserscanning

Siehe Kapitel 7.3

7.62 Geodätische Aufnahmen (Tachymeter)

Siehe Kapitel 7.4

7.63 Schlauchwaage

Siehe Kapitel 7.8

7.64 Faseroptische Dehnungsmessungen

Siehe Kapitel 7.10

7.65 Neigungsänderungen (Clinometer)

Siehe Kapitel 7.27

7.66 Distometer

Siehe Kapitel 7.26

7.67 Nivellement

Siehe Kapitel 7.9

7.68 Fugen- und Rissmessgeräte

Siehe Kapitel 7.25

D Bergwasserdrainage

D 1 Überwachung

Tab. 7.43 Überwachung - Übersicht

Fragestellung		D1 Überwachung					
Kurzbeschreibung Fragestellung	Veränderungen im Bergwasseranfall in der Drainageleitung bieten einen Rückschluss auf Veränderungen zu deren Zustand oder einer veränderter Bergwasserzirkulation im Baugrund. Versinterungen und Ablagerungen können die Funktionstüchtigkeit der Bergwasserdrainage gefährden, was zu weiteren Gefährdung des Tunnelbauwerks infolge Wasseraufstau führen könnte. Eine Überwachung der Bergwasserdrainage mittels unterschiedlicher Messtechniken ermöglicht die Erfassung von Veränderungen in der Fliessrate, der Temperatur und der Zusammensetzung des anfallenden Wassers.						
Überwachungs-technologie	Durchfluss-messung	Wassertemperatur-sensoren	pH-Wert	Versinterungs-potenzial (Kohlensäure-Kalk)	Leitfähigkeitssensoren	Kanalkamera	
"ID"	DFM_	WTP_	PHW_	VSP_	LFK_	KTV_	
Typisierung	a. Messprinzip	2 indirekt	2 indirekt	2 indirekt	2 indirekt	1 direkt	2 indirekt
	b. Datenerfassung	2 elektrisch	2 elektrisch	2 elektrisch	2 elektrisch	2 elektrisch	5 optisch
	c. Datenspeicher	1 digital	3 analog (Ablesung)	3 analog (Ablesung)	3 analog (Ablesung)	3 analog (Ablesung)	1 digital
	d. Lokalisation	1 punktuell	1 punktuell	1 punktuell	1 punktuell	1 punktuell	2 streckenbezogen
	e. Raumbezug						
	f. Zustand	3 nicht zerstörend	3 nicht zerstörend	3 nicht zerstörend	3 nicht zerstörend	3 nicht zerstörend	3 nicht zerstörend
Messgrößen und -genauigkeit	Größen	Fliessrate	Temperatur	elektr. Potential	Diverse	elektr. Leitf.	Diverse
	Untersuchungs-/Tiefenbereich				-		-
	Auflösung		0.1°C		-	0.1-10 µS/cm	-
	Genauigkeit	± 0.5 - 5 %	± 0.5 °C	± 0.01	-	± 0.2 - 2 %	-
	Bemerkungen	Messdynamik bis 1000 l	Messbereich -200 bis 2000°C	Messbereich pH = 0 bis 14	-	Messbereich bis 100'000 µS/cm	-
Tunnel	2	2	3	4	2	4	
Geotechnik	2	2	2	1	2	2	
Naturgefahren	2	3	1	1	3	1	
Umwelt	0	0	3	2	2	2	
Einsatzzeitpunkt	W	W	W	N	W	N	
Entwicklungsstand	●	●	●	●	●	●	
Kosten	initial / einmalig	⦿	⦿	⦿	⦿	⦿	⦿
	wiederkehrend	⦿	⦿	⦿	⦿	⦿	⦿

7.69 Durchflussmessung

Siehe Kapitel 7.33

7.70 Wassertemperatursensoren

Siehe Kapitel 7.32

7.71 pH-Wert

Siehe Kapitel 7.52

7.72 Versinterungspotenzial (Kalk-Kohlensäure-Gleichgewicht)

7.72.1 Beschrieb der Technologie

Problemstellung der Versinterung

Entwässerungseinrichtungen liegen typischerweise hinter der Tunnelverkleidung und sind somit während ihrer Nutzungsdauer nur beschränkt zugänglich. Als Versinterungen werden (Kalk-) Ablagerungen bei der Ausscheidung von Mineralien aus fließendem Wasser bezeichnet. Sie zeigen sich in Form von harten Verkrustungen und können im Extremfall die Entwässerungssysteme der Untertagbaute komplett blockieren. Der sich dadurch aufbauende Wasserdruck kann Schäden am Bauwerk verursachen. Es ist daher zentral das Versinterungspotenzial bereits früh in der Projektierung zu berücksichtigen, um angemessene Bemessungs-, Ausführungs- und Qualitätsaspekte der Entwässerungseinrichtungen sicherzustellen. Beispielhaft genannt werden hierfür die Kenntnis der Bergwasserzusammensetzung (Bergwasserchemismus und -menge) inkl. Analyse des Kontakts des Bergwassers zu zementhaltigen oder chemischen Baustoffen von Sicherung und Verkleidung (z.B. Spritzbetonqualität, Betone mit geringer Auslaugrate, Abdichtung); das Vorsehen der erforderlichen Drainagehohlräume mit ausreichender und stabiler Sickerpackung; die geeignete Rohr-Materialwahl inkl. ausreichendem Durchmesser und spülbarer Geometrie (Krümmungsradien, Rohrgefälle, Schachteinläufe und -abstände, Rohrverbindungen und Einlaufflächen; Widerstand gegen HD-Spülen/-Fräsen oder Kettenschleuderkopf etc.); die Planung geeigneter Härtestabilisationsmassnahmen (flüssig, Depotsteine, Rückführsysteme) inkl. deren Überwachung.

Im Betrieb ist das Versinterungspotenzial zu überwachen. Dieses ist laut [170] [171] abhängig von:

- den Druckverhältnissen: eine hohe Druckentlastung des Bergwassers führt in Kombination mit hohem CO₂-Gehalt (s.u.) im Bergwasser bei Luftkontakt zur Kalkausfällung (CO₂-Partialdruckausgleich: Ausgasen der gelösten Kohlensäure mit Ausfällen von Kalk);
- der Temperatur: je höher die Temperatur, desto höher die Löslichkeit und somit der Kalkgehalt des Bergwassers, wobei ein Temperaturabfall zusätzliche Kalkmengen verfügbar macht (Abkühlungskorrosion);
- der Zusammensetzung (Mineralisation) des Bergwassers: die natürliche Zusammensetzung des Bergwassers reicht von kalkübersättigt (was zu Ablagerungen ohne zusätzliche äussere Einflüsse neigt) bis zu untersättigt; von stark bis schwach (magmatischem) CO₂-haltig (erstes neigt zu sehr starken Ablagerungen) usw.;
- dem pH-Wert des Bergwassers: gelöster Kalk im Bergwasser wird bei pH-Wert-Erhöhung (z.B. Ausschwemmen der Alkalien des Spritzbetons) ausgefällt.

Messung des Versinterungspotenzials im Bau

Das Versinterungsverhalten im Bau ist im Kontext mit dem primären Entwässerungssystem (Felsklüfte, Vliese, Drainagematte, Sickerpackungen etc.) zu analysieren. Zur Quantifizierung des Versinterungspotenzials wird das Kalk-Kohlensäuren-Gleichgewicht betrachtet und das Ablagerungspotenzial rechnerisch abgeschätzt. Neben dem theoretisch fundierten, aber gering sensitiven Calcium-Sättigungsindex hat sich in der Praxis der Stabilitätsindex SI nach Rynzar durchgesetzt (Details siehe [170]).

Eine oder mehrere frische (< 24h) Wasserproben werden idealerweise vor Ort analysiert, um den CO₂-Gehalt des Bergwassers nicht zu verändern (Ausgasen durch Erschütterung). Ermittelt wird Salzgehalt S, Kalziumhärte H, Temperatur T und Alkalität (m-Wert) A. Der Stabilitätsindex SI errechnet sich wie folgt:

$$SI = 2 [(9,3 + S + T) - (H + A)] - [pH\text{-gemessen}]$$

Die pH-Messung (siehe Kapitel 7.52) ist in festgelegten Abständen zu wiederholen und das Messgerät muss Temperaturen (siehe Kapitel 7.32) kompensieren können. Letzteres gilt auch für die Leitfähigkeitsmessung (siehe Kapitel 7.35). Kalziumhärte sowie Alkalität werden durch Teststreifen und/oder Titration (mit marktüblichen, vorbereiteten Indikatorlösungen) ermittelt; portable Wasserbeprobungsgeräte sind typischerweise als Photo- oder Spectrometer konzipiert.

Ein Stabilitätsindex < 7 gilt als abgelagernd, Werte > 7.5 als korrosiv (Abb. 7.87).

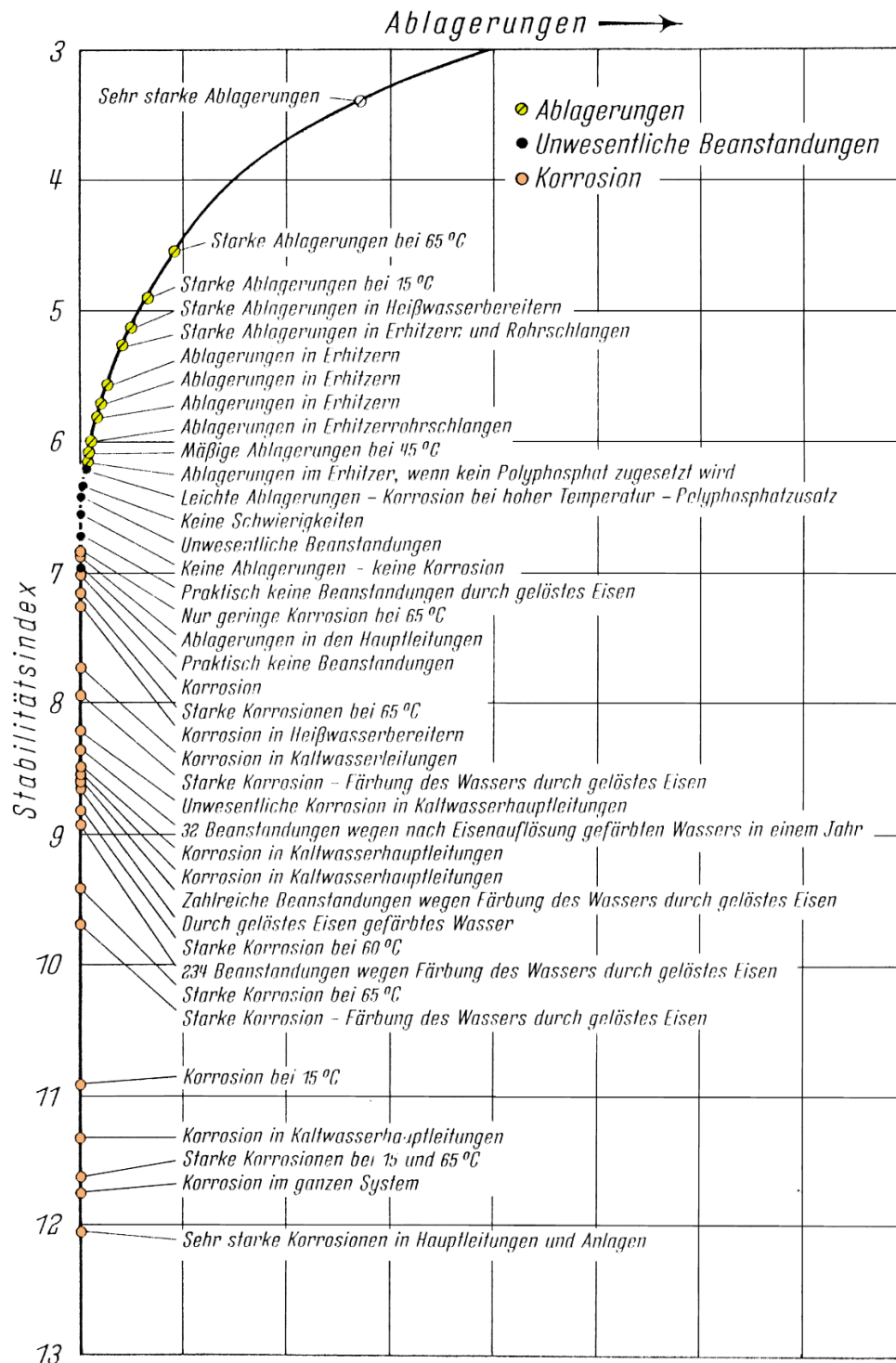


Abb. 7.87 Stabilitätsindex SI nach Ryznar [170]

Messung des Versinterungspotenzials im Betrieb

Der Einbezug des sekundären Entwässerungssystems (Sickermatte, Schächte, Leitungen) beinhaltet zu viele Unbekannte zur aussagekräftigen Ermittlung des Versinterungspotenzials nach Ryznar [170]. Gemessen wird im Betrieb somit nur die Versinterungsmenge, die im Schnitt in 1 m Entwässerungsleitung abgelagert wird (ermittelt z.B. durch Inspektion der Leitung mittels Befahrung durch Kamera, Reinigungsprobe, Messung Wasserführung). Die Ablagerungsmessung erlaubt die Abschätzung des kommenden Reinigungsaufwand (sowie allenfalls Anpassung der technischen Rahmenbedingungen in Härtestabilisationsanlage oder Erhöhung der Wassermenge zwecks Mischungskorrosion etc.).

Zur Kontrolle der Wirkstoffkonzentrationen von angeordneten Massnahmen wie Depotsteinen etc. erfolgen auch Trübungsmessungen (Photometer), über die mittels projektspezifischer Korrelationskurven zur Wirkstoffkonzentration abgeleitet wird (siehe Beispiel in [172]).

7.72.2 Fragestellungen in den Fachbereichen

Fragestellung im Bereich Tunnel

Die Kenntnis des Versinterungspotenzials im Tunnelbau hat folgende, übergeordnete Einsatzzwecke (Kurz- und Langzeitüberwachung):

- Bemessung und Konzipierung des Tunnelentwässerungssystems;
- Bei Bedarf Anpassung des sekundären Entwässerungssystems durch gewonnene Messergebnisse und Auffälligkeiten im Bau aus primären Entwässerungssystem;
- Regelung im sekundären Entwässerungssystem (Anpassungen in Härtestabilisationsanlage, Erhöhung der Wassermenge zwecks Mischungskorrosion).

Vor dem Bau gehört die Bergwasseranalyse zur Geologische Erkundung. Es ist der wichtigste Erkenntniszeitpunkt zwecks Festlegung adäquater Massnahmen im Umgang mit Versinterung (siehe erster Abschnitt, Kapitel 7.72.1).

Im Bau erfolgt die punktuelle Messung am Ort des Bergwasserzutritts an der Tunnellaibung (seltener direkt am Baugrund; eine allfällige Lokalisierung erfolgt durch eine Zusatzmessung). Mehrfachmessungen dienen der Beobachtung der Veränderung des Versinterungspotenzials entlang des Tunnelprofils oder über der Zeitachse (z.B. Abhängigkeit von Regenereignissen).

Auch die Messungen im Betrieb erfolgen punktuell am Zugang zum Bergwasser (z.B. Schacht, Spülnische). Mehrfachmessungen entlang des Tunnelprofils dienen der Eingrenzung des Versinterungspotenzials auf einzelne Abschnitte.

7.72.3 Datenerfassung, Raumbezug, Messgrössen und – Genauigkeit

- Bauzustand: Die Messdaten-Erfassung erfolgt idealerweise nach der Probenentnahme vor Ort. Die Automatisierung und Digitalisierung sind in den einzelnen Messtechnologien aufgeführt. Das Messintervall ist für den pH-Wert relevant, ansonsten jedoch untergeordnet. Die Messdaten-Erfassung erfolgt Zerstörungsfrei. Ein Raumbezug ist über zusätzliche Positionierung möglich. Mittels wiederholter, zeitlich gestaffelter Messungen kann die zeitliche Veränderung des Versinterungspotenzials (oder dessen Abhängigkeit von Niederschlagsereignissen etc.) aufgezeigt werden. SI selbst ist eine Abschätzungsformel mit praktischer, jedoch nicht wissenschaftlicher Genauigkeit. Primäres Entwässerungssystem in Analyse mit zu berücksichtigen.
- Betriebszustand: Grobabschätzung aufgrund Erfahrung und mit Einbezug des sekundären Entwässerungssystems. Zerstörungsfrei. Automatisierung und Digitalisierung siehe einzelne Messtechnologien Raumbezug über zusätzliche Positionierung möglich. Mittels wiederholter, zeitlich gestaffelter Messungen kann die zeitliche Veränderung des Versinterungspotenzials (oder dessen Abhängigkeit von Niederschlagsereignissen etc.) aufgezeigt werden Messgrössen, -genauigkeit, -bereich: siehe einzelne Technologien.

7.72.4 Entwicklungsstand, Anwendungsgrenzen, Kosten

Die Bestimmung des Versinterungspotenzial im Bau erfolgt mittels etablierter und praxistauglicher Abschätzungen. Der Einbezug des Entwässerungssystems ist zentral. Das Versinterungspotenzial erst im Betrieb zu bestimmen ist einerseits sehr rudimentär (ohne isolierte Zuweisungsmöglichkeit der einzelnen Einflussfaktoren), andererseits bzgl. Eingriffsmöglichkeiten beschränkt (=> Die Messung des Versinterungspotenzials ist unzureichend, die Projektierungsmassnahmen sind relevant!).

Neue Entwicklungen im Bereich der Härtestabilisationsanlagen und Unterhalt sowie Materialisierung (Rohre sowie Sicherungsmittel), jedoch nicht in der Messtechnologie als solches.

7.72.5 Ergänzende Ausschreibungsanforderungen

Siehe Kapitel 7.1.5

7.72.6 Literaturverzeichnis

Sonstige Literatur / Forschungsberichte

[170] Wegmüller M.C. (2001), "Einflüsse des Bergwassers auf Tiefbau/Tunnelbau", Stäubli AG, Zürich, ISBN 3 7266 0052 3

[171] M.C.Wegmüller Engineering, Lösungen zur Verhinderung von Kalkablagerungen, www.mcwegmueller.com (Zugriff 08.06.2022)

[172] Ingenieurgesellschaft Gotthard-Basistunnel-Süd (2007), "Härtestabilisation Versuchsstrecke TA Bodio, Schlussbericht", DMS-Nr. LZ01-117581, AlpTransit Gotthard

7.73 Leitfähigkeitssensoren

Siehe Kapitel 7.35

7.74 Kanal-TV

7.74.1 Beschrieb der Technologie

Der Zustand eines Rohrs / Kanals kann mittels Kamerabefahrung erfasst und überwacht werden. Mittels Videokameras wird die Innenansicht im durchfahrenen Rohr optisch aufgenommen. Durch die manuelle Auswertung der Aufnahmen lassen sich Schadensbilder im Rohr (Risse, Abplatzungen, Ablagerungen, Versinterungen) erkennen und überwachen. Für eine klare Innenansicht des Rohrs muss dieses vorgängig gespült werden.

Abhängig von der Grösse des Rohrs werden Schiebekamerasystem (bis DN 200) oder Kamerafahrwagen (> DN 200) verwendet. Die Kamerasysteme werden jeweils durch eine Lampe für das Ausleuchten des Rohrs ergänzt. Schiebekamerasysteme (Abb. 7.88, links) werden händisch oder durch Windensysteme in ein Rohr eingeschoben und können durch einen Schiebestab gelenkt werden. Ein Kamerafahrwagen (Abb. 7.88, rechts) fährt mit einer festgelegten Geschwindigkeit durch das Rohr und kann mittels Fernbedienung gesteuert werden.



Abb. 7.88 Schiebekamerasystem (links, [173]) und Kamerafahrwagen (rechts,[174])

7.74.2 Fragestellung in den Fachbereichen

Fragestellung im Bereich Tunnel

Die Befahrung eines Rohrs / Kanals mittels Kanal-TV wird im Tunnelbau für folgende Einsatzzwecke verwendet:

- Langzeitüberwachung von Bergwasserdrainageleitungen während des Betriebs (z.B. Versinterung infolge Bergwasserchemismus);
- Kurzzeitüberwachung von Bergwasserdrainageleitung während der Ausführung von Bauhilfsmassnahmen (z.B. Ablagerungen infolge Injektionen) oder Kontrolle hinsichtlich allfälligen Eintrags von Feinmaterial.

7.74.3 Datenerfassung, Raumbezug, Messgenauigkeit

- Die Messdatenerfassung erfolgt digital (Ablesebildschirm und Datenschreiber);
- Die Messung erfolgt streckenhaft über den befahrenen Rohrabschnitt;
- Die Bestimmung des Zustands erfolgt indirekt über die optische Auswertung der Aufnahmen;
- Der Raumbezug der Aufnahmen erfolgt über integrierte Ortungssender oder über die verwendete Kabellänge, die Position des Startpunkts und den Rohrverlauf;
- Die Kamerabefahrung erfolgt zerstörungsfrei.

Die Befahrung mittels Kanal-TV kann in Rohren ab ca. 2 cm Durchmesser durchgeführt werden. Die Länge einer Aufnahme ist durch die Kabellänge begrenzt und beträgt bis zu ca. 1'000 m. Die Qualität der Videoaufnahmen ist abhängig vom Kameramodell und der Ausleuchtung des Rohrs. Die Genauigkeit des Raumbezugs der Videoaufnahmen ist abhängig vom verwendeten Ortungssender.

7.74.4 Entwicklungsstand, Anwendungsgrenzen, Kosten

Die Befahrung eines Rohrs mittels Kanal-TV für die Überwachung des Zustands ist eine etablierte Methode im Bereich Tunnel. Für die Befahrung eines Rohrs muss der Zugang durch einen Schacht (oder ähnliches) erfolgen. Das Durchstossen eines Schiebkamerasystems kann durch einen kleinen Rohrdurchmesser und kleiner Radien erschwert oder verhindert werden. Allgemein kann das Befahren mittels Kanal-TV bei grossen Ablagerungen, Versinterungen, Abplatzungen oder lokalen Versätzen behindert werden. Eine vorgängige Reinigung ermöglicht die Aufnahme der Rohr-Innenansicht (Erkennung Risse, etc.), verhindert jedoch die wirklichkeitsnahe Aufnahme von Ablagerungen und Versinterungen

Neuere Kameraentwicklungen ermöglichen die Aufnahme der Innenansicht mittels Weitwinkelobjektive. Dies verringert die Anfälligkeit eines Übersehens von Schadensbilder. Aktuell laufen zudem Entwicklungen zur automatischen Schadensdetektion (vgl. Kap. 8.2).

Die Kosten für eine Kamera-TV Befahrung sind abhängig von der Zugänglichkeit der Messstelle und dem Durchmesser des Rohrs. Weitere Kosten entstehen aus der

vorgängigen Rohrreinigung / Spülung und der manuellen Auswertung der Aufnahmen. Die Kosten pro Laufmeter Kanalkamera inkl. Auswertung belaufen sich auf ca. 10 CHF/m bis ca. 30 CHF/m

7.74.5 Ergänzende Ausschreibungsanforderungen

Siehe Kapitel 7.1.5

7.74.6 Literaturverzeichnis

Sonstige Literatur / Forschungsberichte

[173] MiTech AG, Kanalkamera Typ Inspector X-9-PT; <https://www.mitechag.ch/online-shop/product/kanalkamera-typ-inspector-x-9-pt-122119> (Zugriff 11.05.23)

[174] iPEK International GmbH, Fahrwagen RX130, <https://www.ipek.at/kanalinspektion/mobil> (Zugriff 11.05.22)

E Überwachung Belag und Fundation

E 1 Längsebenheit

Tab. 7.44 Längsebenheit - Übersicht

Fragestellung		E1 Längsebenheit					
Kurzbeschreibung Fragestellung		Die Längsebenheit ist ein Qualitätsmass für Strassen und Wege, welches in der Regel Fahrtrichtungs- und Fahrsteifen bezogen erfasst wird. Abweichungen in der Längsebenheit wirken sich negativ auf den Fahrkomfort und die Fahrsicherheit aus. Die Betriebssicherheit des Tunnelbaus kann gefährdet werden. Die Datengrundlage für die Überwachung bildet ein Längsprofil oder partiell abgeleitete Differenzen zu einer Referenz, welche georeferenziert oder zu einer Strassenkilometrierung synchronisiert werden.					
Überwachungstechnologie		Richtlatte	Planograf	Goniograph	Lasersensor	Laserscanner	Triangulations-sensor
Typisierung	"ID"	Lia_	LPI_	LGo_	LLS_	LLC_	LTr_
	a. Messprinzip	1 direkt	1 direkt	1 direkt	1 direkt	1 direkt	1 direkt
Messgrößen und -genauigkeit	b. Datenerfassung	1 mechanisch	1 mechanisch	1 mechanisch	7 laseroptisch	7 laseroptisch	7 laseroptisch
	c. Datenspeicher	3 analog (Ablesung)	2 analog (Datenschreiber)	2 analog (Datenschreiber)	1 digital	1 digital	1 digital
	d. Lokalisation	1 punktuell	2 streckenbezogen	1 punktuell	2 streckenbezogen	2 streckenbezogen	2 streckenbezogen
	e. Raumbezug	2 separat	1 integriert	2 separat	1 integriert	1 integriert	1 integriert
	f. Zustand	3 nicht zerstörend	3 nicht zerstörend	3 nicht zerstörend	3 nicht zerstörend	3 nicht zerstörend	3 nicht zerstörend
	Größen	W-Wert/PGR	PGR, IRI	W-Wert	PGR, IRI	PGR, IRI, VLP, AUN, LWI	PGR, IRI, VLP, AUN, LWI
Tunnel	Untersuchungs-/Tiefenbereich	Oberfläche	Oberfläche	Oberfläche	Oberfläche	Oberfläche	Oberfläche
	Auflösung	-	-	-	0.01-0.1mm	-	0.01-1mm
	Genauigkeit	0.1-0.5 mm	0.5-2 mm	0.1	0.2 mm	0.2 mm	0.2-0.5 mm
	Bemerkungen	-	-	-	-	Extraktion aus Punktwolke, Laserklasse 1	Laserklasse 3-4
Geotechnik		4	3	4	3	3	2
Naturgefahren		0	0	0	0	0	0
Umwelt		0	0	0	0	0	0
Einsatzzeitpunkt		W, N	W, N	W, N	W, N	W, N	W, N
Entwicklungsstand		●	●	●	●	●	●
Kosten	initial / einmalig	●	●	●	●	●	●
	wiederkehrend	●	●	●	●	●	●

Längsebenheit ist ein Qualitätsmass für Strassen und Wege, welches in der Regel Fahrtrichtungs- und Fahrsteifen bezogen erfasst wird. Abweichungen in der Längsebenheit wirken sich negativ auf den Fahrkomfort und die Fahrsicherheit aus. Die Datengrundlage hierfür bildet ein Längsprofil oder partiell abgeleitete Differenzen zu einer Referenz, welche georeferenziert oder zu einer Strassenkilometrierung synchronisiert werden.

Über die Datengrundlage, welche abhängig vom eingesetzten Messinstrument ist, können verschiedene Kennwerte zur Evaluierung herangezogen werden. Diese sind z.B.

- Wellenbandanalyse NBO für die drei Wellenlängenbänder (kurze Wellen (PO), mittlere Wellen (MO) und lange Wellen (GO)),
- Winkelwert der Neigungsänderung (W-Wert bzw. Wmax),
- sW-Werte Standardabweichung der W-Werte,
- Simulation der gleitenden Richtlatte (PGR),
- das Bewertete Längsprofil (BLP),
- Allgemeine Unebenheit (AUN),
- Standardabweichung der Differenz zum gleitenden Mittelwert (SXX),
- International Roughness Index (IRI) und
- Längsebenheitswirkindex (LWI).

Fehlereinflüsse bei der Erfassung der Längsebenheit können messtechnisch von der Höhenmessung, der Spurtreue und der Verortung der gemessenen Werte entstehen. Weitere Fehlerquellen sind in der Datenverarbeitung (Filterung, Glättung, etc.) zu verorten[175].

Die Längsebenheit kann entweder bei der Abnahme eines neuen Fahrbahnabschnittes erfolgen oder zur Bewertung einer bestehenden Fahrbahnoberfläche dienen.

Für die Längsebenheit werden in jeder Radspur alle 10-12,5 mm Messpunkte für ein Höhenlängsprofil aus Rohmessdaten generiert. Das digitale Profil sollte Wellenlängen von 0,3 bis 160 m oder 200 m aufweisen. Mit Hilfe des Profils können darauf aufbauend verschiedene Indikatoren für die Längsebenheit berechnet werden; z. B. nach VSS-40517 [176] (Sw-, W-Werte), NBO nach VSS-40525 [177] oder nach EN 13036-5 [178] (IRI, PSD). Die Erhebung und Bewertung des Zustands erfolgt im Weiten nach VSS-40925B [179].

Zustandsgrössen der Zustandsmerkmale werden für eine Bewertung mit Hilfe von Normierungsfunktionen in einen dimensionslosen Zustandsindex überführt. Dieser Zustandsindex dient als Bewertungsmassstab von 0 bis 5 für die Zustandsgrösse der jeweiligen Zustandseigenschaft. Hierfür ist jedem Zustandsmerkmale eine Zustandsgrösse definiert, welche messtechnisch oder auch visuell für die vorhandenen Objekte des Inventars zugeordnet werden.

Die Längsebenheitsmessung basiert i.d.R. auf statistischen Methoden, wobei z.B. in konstanten Intervallen gemessene Profilabweichungen von einer mittleren Bezugsebene als Standardabweichung oder Varianz angegeben werden. In Anlehnung an die Begriffsdefinitionen der DIN 4760 [180] handelt es sich bei Ebenheitstoleranzen um Variationen 2. Ordnung. Während Variationen 1. Ordnung (z.B. Winkeltoleranzen) nur bei Messung des Streckenabschnitts festgestellt werden können. Aus der Eingrenzung des Begriffes Rauheit im Strassenbau folgt, dass sich Ebenheitstoleranzen oberhalb der Megarauheit im Wellenlängenbereich $> 0,3$ m bewegen. Eine andere Bewertungsmöglichkeit gibt die ISO 13473-1 [181] vor. Hier sind Unebenheiten als geometrische Unregelmässigkeiten im Wellenlängenbereich von 0,5 bis 50 m definiert.

Die Messung auf Strassenoberflächen regelt in Deutschland die Technische Prüfvorschrift TP-Eben. Diese gilt für Fahrbahnoberflächen in Längs- sowohl auch in Querrichtung. Weiterhin wird unterschieden zwischen berührungslosen [182] und berührenden Messungen [182].

7.75 Richtlatte (4 m)

Gemäss DIN 18201 ist die Ebenheitstoleranz der Bereich für die zulässige Abweichung einer Fläche von der Ebene[183]. Zur Beurteilung von Ebenheitstoleranzen wird nach dieser Norm das Stichmass verwendet. Dieses ist der Abstand eines Punktes von einer Bezugslinie, der im Verhältnis zum Messpunkt Abstand bewertet wird. Das Grundprinzip und das Messverfahren sind nach DIN 18202 und TP-Eben Teil: berührende Messungen [184] geregelt.

7.75.1 Beschrieb der Technologie

Die Richtlatte ist eine 4 m lange, zum Teil zerlegbare Metallkonstruktion mit einer maximalen Biegelinie kleiner als 0,5 mm. Die Latte dient hierbei zur lokalen Detektion von Unebenheiten. Zur Messung der Abweichung, welches im Weiteren als Stichmass definiert wird, kommt ein Messkeil zum Einsatz. Dieser Messkeil mit einem definierten Anstellwinkel von 10 bis 15° repräsentiert, durch eine metrische Einteilung auf der Oberseite, den Abstand zwischen Oberfläche und Richtlatte.

Aufnahmeprinzip

Die 4 m-Richtlatte ist ein mechanisches Messinstrument, welches den Anforderungen des Technische Regelwerkes (bspw. [184]) entsprechen muss. Der zu verwendende Messkeil soll mit einer verschleissfreien Oberfläche versehen sein. Bei Unebenheiten unter der 4 m-Richtlatte bilden sich i.d.R. zwischen der Bezugslinie der Richtlatte und der Fahrbahnoberfläche der beiden Auflagepunkten eine Abweichung (Siehe Abb. 7.89).

Für grössere Messdistanzen wird die Lattenlage entlang des zu messendes Längsprofiles um 2 m verschoben. Bei jeder Lattenlage werden die maximalen Stichmasse unter der ersten und zweiten Lattenhälfte ermittelt und in ein Protokoll übertragen (siehe Abb. 7.90).

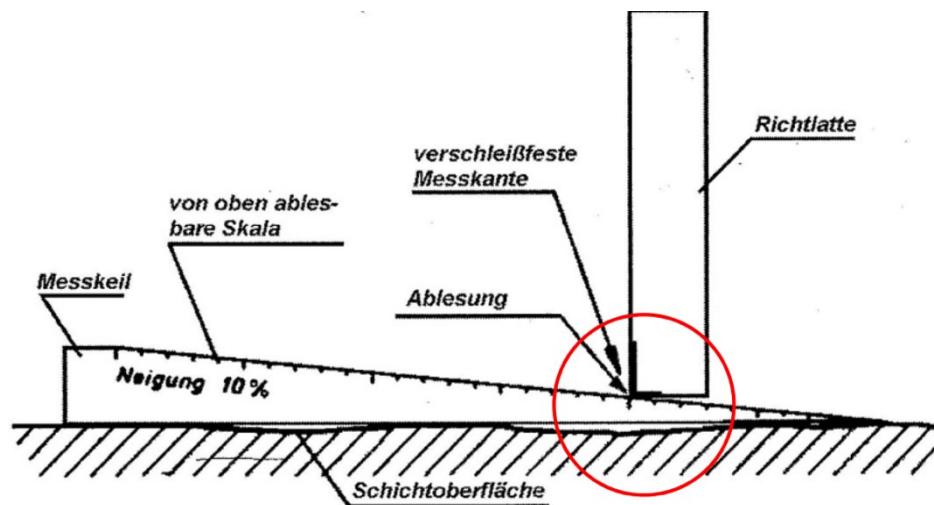


Abb. 7.89 Richtlatte und Messkeil in Messstellung (Prinzipsskizze) [183]

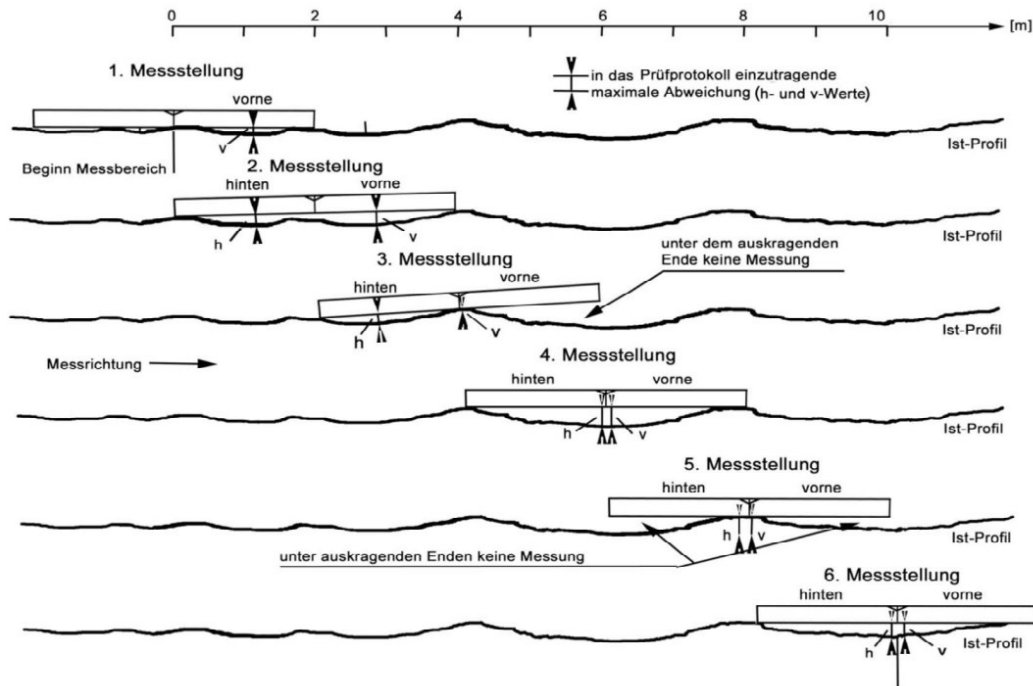


Abb. 7.90 Fortlaufende Messung mit der Richtlatte [184]

7.75.2 Fragestellungen in den Fachbereichen

Fragestellung im Bereich Tunnel

Ermittlung der Profiltiefe PT/ Stichmass erfolgt mechanisch. Dies wird realisiert durch eine stichprobenartige Prüfung oder rasterförmig angeordnete Messpunkte lt. [183]. Die Ebenheit einer längeren Messstrecke wird durch spezielles Anlegen der 4 m-Latte realisiert.

Dieses Verfahren dient zur manuellen Prüfung direkt am Messobjekt. Da der Zeitaufwand zur Aufnahme vergleichsweise hoch ist, haben sich andere schnellere Prüfverfahren etabliert. Das Grundprinzip der Stichmassbestimmung wird auch virtuell anhand eines Höhenlängsprofils über den Index "Simulation der gleitenden Richtlatte" (PGR) bestimmt.

7.75.3 Datenerfassung, Raumbezug, Messgrößen und – Genauigkeit

Zur Daten Erfassung wird die 4 m-Latte entlang des zu messenden Höhenlängsprofils auf die Oberfläche gelegt. Die Lattenlage wird über ein Messrad oder ein Hand-GPS-Gerät zum Streckenabschnitt verortet.

Anforderungen an die Richtlatte:

- Format: 4000 x 18 x 90 mm,
- Durchbiegung: max. 0,5 mm vertikal,
- Querbiegung: max. 1,5 mm,
- Besonderheiten: Mittenkennzeichnung

Anforderungen an den Messkeil:

- Anstellwinkel: 10 bis 15%
- Zu erreichende Messgenauigkeit (Massstab): 0,1 – 0,5 mm
- Messbereich: minimal 2 bis 25 mm
- Material: abriebfestes Material (lt. TP-Eben – Metall)
- Aufstandsfläche: 30 (± 5) mm breit, 295 (± 5) mm breit

Mit der Richtlatte wird das maximale Stichmass unter der 4 m-Richtlatte mit dem Messkeil ermittelt. Es ist für kleine Messgebiete < 500 m geeignet.

7.75.4 Entwicklungsstand, Anwendungsgrenzen, Kosten

Es ist ein bewehrtes, einfaches, kostengünstiges und vielseitig einsetzbares Messverfahren um vor Ort Stichmasse entlang eines Längsprofils zu erfassen. Der Zeitaufwand der Erfassung kann mit 30 min pro 500 m abgeschätzt werden. Die Kosten richten sich zeitbasiert nach dem jeweiligen Stundensatz des Einsatzteams. Das Verfahren ist in der Schweiz nicht weit verbreitet.

Die Kosten für den Einsatz der Technologie setzen sich zusammen aus:

- Tagessatz für Techniker ca. 1500-2000 CHF

7.75.5 Ergänzende Ausschreibungsanforderungen

Siehe Kapitel 7.1.5

7.75.6 Literaturverzeichnis

Sonstige Literatur / Forschungsberichte

-
- [175] J. Neubeck und A. Wiesebeck, Längsebenheitsmesssysteme : Überprüfung der Signalverarbeitungsverfahren nach dem Prinzip der Mehrfachabtastung (HRM), 2015.
-
- [176] VSS-40517, Eigenschaften der Fahrbahnoberflächen: Längsebenheit, 2019.
-
- [177] VSS-40525, Eigenschaften der Fahrbahnoberflächen – Anforderungen, 2019
-
- [178] DIN EN 13036-5:2017-07, Oberflächeneigenschaften von Strassen und Flugplätzen – Prüfverfahren – Teil 5: Bestimmung der Längsunebenheitsindizes; Deutsche und Englische Fassung prEN 13036-5:2017.
-
- [179] VSS-40925B, Erhaltungsmanagement der Fahrbahnen (EMF); Zustandserhebung und Indexbewertung, 2019.
-
- [180] DIN 4760:1982-06, Gestaltabweichungen; Begriffe, Ordnungssystem
-
- [181] DIN EN ISO 13473-1:2021-11, Charakterisierung der Textur von Deckschichten unter Verwendung von Oberflächenprofilen - Teil 1: Bestimmung der mittleren Profiltiefe (ISO_13473-1:2019, korrigierte Fassung 2021-06); Deutsche Fassung EN_ISO_13473-1:2019.
-
- [182] Technische Prüfvorschriften für Ebenheitsmessungen auf Fahrbahnoberflächen in Längs- und Querrichtung – Teil: Berührungslose Messungen, Ausg. 2009 Hrsg., Köln: FGSV-Verl., 2009.
-
- [183] Merkblatt / Zentralverband Deutsches Baugewerbe, Toleranzen im Hochbau nach DIN 18201 und DIN 18202, [Stand:] August 2000 Hrsg., Köln: Müller, 2000.
-
- [184] L. Löcherer, Hrsg., Technische Prüfvorschriften für Ebenheitsmessungen auf Fahrbahnoberflächen in Längs- und Querrichtung – Teil: Berührende Messungen, Ausgabe 2017 Hrsg., Köln: FGSV Verlag GmbH, 2018.
-

7.76 Planograf

7.76.1 Beschrieb der Technologie

Das Messgerät Planograf besteht in der Regel aus einem Rohrgitter-Rahmen mit jeweils zwei Rädern auf mehreren Achsen, die einen idealen Horizont / Oberfläche realisieren. In der Mitte des Rohrgitterrahmens befindet sich ein variables aufgehängtes Messrad, welches sich in vertikaler Richtung frei bewegen kann. Jede Veränderung dieses Messrades wird digital oder analog aufgezeichnet und stellt hier die die Abweichung aus dem idealen Horizont dar (siehe Abb. 7.91).

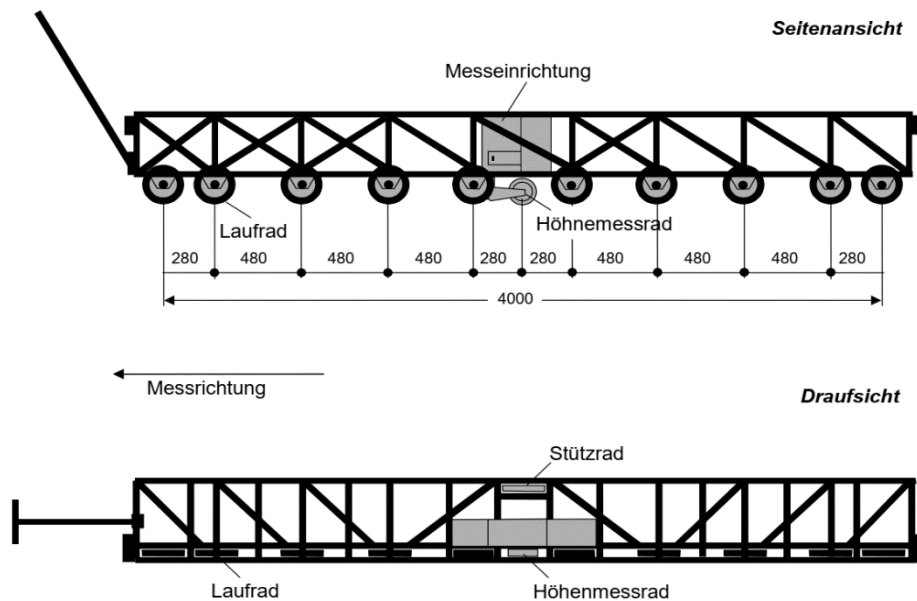


Abb. 7.91 Prinzipskizze Planograf [185]

Der Planograf steht als elektronisches oder mechanisches Aufzeichnungssystem zur Verfügung.

7.76.2 Fragestellungen in den Fachbereichen

Fragestellung im Bereich Tunnel

Das Verfahren dient zur Ermittlung und Dokumentation von Unebenheiten im Längsprofil. Mit diesem Verfahren lassen sich Höhenlängsprofile in einfacher Weise für

- Kontrollprüfungen bei Bauabnahmen,
- Überprüfungen der Bauausführung (Eigenüberwachung),
- Prüfungen vor Ablauf der Verjährungsfrist für Mängelansprüche und
- objektbezogenen Nachprüfungen in Einzelfällen

durchführen.

7.76.3 Datenerfassung, Raumbezug, Messgrößen und – Genauigkeit

Messungen mit dem Planografen werden unmittelbar berührend, das heisst in Kontakt mit der zu prüfenden Oberfläche durchgeführt. Sie erlauben hierbei nur eine Wiedergabe der relativen Höhenverhältnisse von einzelnen Punkten der Oberfläche, bezogen auf eine Länge von maximal 4 m. Dies begrenzt den Einsatzbereich dieser Messverfahren für die Erfassung der Ebenheit in Längsrichtung im Hinblick auf Aussagen zum Gebrauchswert als auch zum Substanzwert der Strasse. Der Planograf erfasst Abweichungen mittig unter einer 4 m langen Bezugslinie (Nulllinie). Die Messung erfolgt kontinuierlich. Dabei werden die Bewegungen des Messrades relativ zur Bezugslinie aufgezeichnet. Die Erfassung besteht aus der Messung einer Folge von Abweichungen zur Nulllinie, die bei

mechanischen Messwerterfassungssystemen kontinuierlich, bei elektronischen Messwerterfassungssystemen quasikontinuierlich als grösster Messwert innerhalb von 10 cm Wegstrecke aufgezeichnet werden.

Die Messdurchführung sollte in Schrittgeschwindigkeit (ca. 3 bis 6 km/h) erfolgen. In Ausnahmefällen kann bei Messungen auf geraden Strecken ohne offensichtliche Unebenheiten die Geschwindigkeit bis ca. 10 km/h erhöht werden.

Bei mechanisch arbeitenden Planografen werden neben dem Messschrieb auch eine Nulllinie und verschiedene Hilfslinien eingetragen, so dass die Grösse der Überschreitungen p direkt abgelesen werden kann. Bei elektronischen Messsystemen können auch Auslenkungen oberhalb der Nulllinie erfasst werden, wobei diese nicht bewertungsrelevant sind.

Planografenmessungen können nicht unter fliessendem Verkehr durchgeführt werden, da die Messgeschwindigkeit zu gering ist. Es ist immer eine Sperrung der Messstrecke notwendig.

7.76.4 Entwicklungsstand, Anwendungsgrenzen, Kosten

Der Planograf ist ein anerkanntes Messgerät zur Qualitätssicherung der Längsebenheit im Strassenbau [186]. Der Planograf ist ein Standardverfahren, welcher bspw. in der Schweiz und in Deutschland Anwendung findet. Der Planograf eignet sich für Messungen von 10 bis 5.000 m.

Die Kosten für den Einsatz der Technologie setzen sich zusammen aus:

- Tagessatz für Techniker ca. 1500-2000 CHF
- Messsystem ca. 300 bis 500 CHF pro Kilometer.

7.76.5 Ergänzende Ausschreibungsanforderungen

Siehe Kapitel 7.1.5

7.76.6 Literaturverzeichnis

Sonstige Literatur / Forschungsberichte

[185] J. Neubeck und A. Wiesebeck, Längsebenheitsmesssysteme : Überprüfung der Signalverarbeitungsverfahren nach dem Prinzip der Mehrfachabtastung (HRM), 2015.

[186] L. Löcherer, Hrsg., Technische Prüfvorschriften für Ebenheitsmessungen auf Fahrbahnoberflächen in Längs- und Querrichtung – Teil: Berührende Messungen, Ausgabe 2017 Hrsg., Köln: FGVS Verlag GmbH, 2018.

7.77 Goniograph

7.77.1 Beschrieb der Technologie

Der vornehmlich in der Schweiz zur Anwendung kommende Goniograph [SN 640 520a] erfasst auf einer Länge von 2 m den relativen Winkel in Bezug auf ein rollbares Messgerät mit 3 Stützachsen mit einem symmetrischen Aufbau. Bei diesem Messverfahren wird der Winkel zwischen den parallelen 3 Achsen gemessen, die in Fahrtrichtung jeweils einen Abstand von 1 m zueinander haben. Bei einer idealen ebenen Oberfläche wird der zu erfassende Winkel null sein. Bei Variationen in der Oberfläche verändert sich der Winkel dementsprechend.

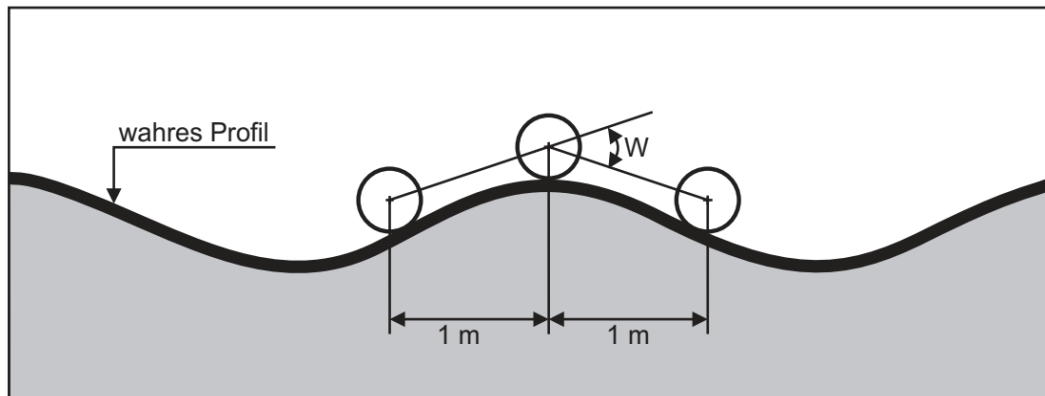


Abb. 7.92 Prinzipsskizze Goniograph [187]

Der Goniograph steht als elektronisches oder mechanisches Aufzeichnungssystem zur Verfügung.

7.77.2 Fragestellungen in den Fachbereichen

Fragestellung im Bereich Tunnel

Das Verfahren dient zur Ermittlung und Dokumentation von Unebenheiten im Längsprofil. Der Goniograph eignet sich für kleine Streckenabschnitte oder Flick- oder Ausbesserungsstellen. Durch die kleine Bauform ist das Gerät flexibel einsetzbar.



Abb. 7.93 analoger Goniograph [187]

7.77.3 Datenerfassung, Raumbezug, Messgrößen und – Genauigkeit

Durch die Vorwärtsbewegung des Messsystems entlang des zu erfassenden Streckenabschnittes ergeben sich streckenbezogene Messsignale. Die Datenerfassung erfolgt rein analog und mit Stationsbezug oder mit einer einfachen GPS-Maus. Die Festlegung und auch die Positionierung des Messsystems sind stark Nutzerabhängig. Hierdurch können die Messwerte und auch die Wiederholungsmessungen variieren.

Die Messung der Neigungsänderung mit dem Goniograph ist mit einer Geschwindigkeit von 1 m/s möglich. Es wird kontinuierlich den Winkelwert (W-Wert) erfasst. Die Berechnung der sW-Werte ergeben sich anhand Standardabweichung der W-Werte über 250 m. Über die Fortbewegung entlang der Messstrecke können Längsprofile <1 km erfasst werden.

Der Goniograph kann nicht unter fliessendem Verkehr eingesetzt werden, da die Messgeschwindigkeit zu gering ist. Es ist immer eine Sperrung der Messstrecke notwendig.

7.77.4 Entwicklungsstand, Anwendungsgrenzen, Kosten

Der Goniograph ist ein anerkanntes Messgerät zur Qualitätssicherung der Längsebenheit im Strassenbau. Der Goniograph ist ein Standardverfahren, welches in der Schweiz Anwendung findet. Der Goniograph eignet sich für Messungen von 10 bis 5.000 m.

Die Kosten für den Einsatz der Technologie setzen sich zusammen aus:

- Tagessatz für Techniker ca. 1500-2000 CHF
- Messsystem ca. 300 bis 500 CHF pro Kilometer.

7.77.5 Ergänzende Ausschreibungsanforderungen

Siehe Kapitel 7.1.5

7.77.6 Literaturverzeichnis

Sonstige Literatur / Forschungsberichte

[187] IMP Bautest AG, Goniograph, https://www.impbautest.ch/de/goniograph-_content---1--1119.html

7.78 Lasersensoren

7.78.1 Beschrieb der Technologie

Unter der Technologie "Lasersensoren" werden Messsysteme zusammengefasst, die mit Hilfe eines Entfernungsmessers und eines Beschleunigungsmessers bzw. einem Inertialsystem ein Höhenlängsprofil erfassen können. Diese Technologie wird oft als South Dakota Profilometer bezeichnet und wurde in mehreren Studien, vor allem in den USA, untersucht [188][189][190][191].

Die Technologie arbeitet mit zwei verschiedenen Messkomponenten. Das erste System ist die hoch präzise Entfernungsmessung welche den Abstand zwischen Fahrbahn und Messplattform ermittelt. Das zweite System ist zur Kompensation bzw. Lokalisierung der Messplattform. Die Systeme können zum einen ein Beschleunigungssensor sein, welcher die Vertikalbeschleunigungen der Messplattform ermittelt und diese als Offsetfaktor mit anbringt oder zum anderen ein hochgenaues Positionierungssystem, welches die Messplattform mit allen Orientierungswinkeln und einer Position bestimmt. Beide Möglichkeiten finden in der Praxis Anwendung. Das Verfahren mit Hilfe des Beschleunigungssensors um die Vertikalbewegungen zu kompensieren findet die häufigste Anwendung.

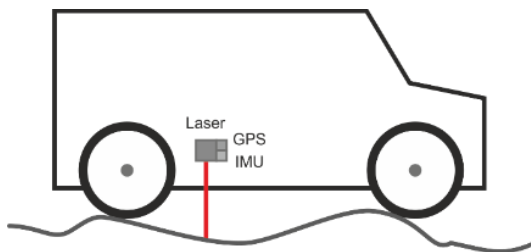


Abb. 7.94 Skizze zum Aufbau eines Messfahrzeugs zur Längsebenheitsmessung bestehend aus einem Messsystem mit Einzellaser, Beschleunigungssensor und GPS.

7.78.2 Fragestellungen in den Fachbereichen

Fragestellung im Bereich Tunnel

Die Systeme zur Erfassung der Längsebenheit aus Lasersensoren eignen sich zur schnellen berührungslosen und präzisen Erfassung von einem Höhenlängsprofil. Berührungslos arbeitende Messsysteme können im fließenden Verkehr eingesetzt werden. Die Qualität und auch die im Höhenlängsprofil abgebildeten Wellenlängen verhalten sich proportional zu den eingesetzten Komponenten. Kalibrierte Systeme mit einem Laserdistanzsensor und einem Beschleunigungssensor können i.d.R. Wellenlängen von 0,3 bis 60 m erfassen. Für die Berechnung des IRI ist dies hinreichend. Werden längere Wellenlängen benötigt, wie bspw. zur Berechnung des WLP oder AUN, ist zumindest die Kombination mit einem Positionierungssystem notwendig bzw. die Anwendung des HRM-Verfahrens zwingend erforderlich.

7.78.3 Datenerfassung, Raumbezug, Messgrößen und – Genauigkeit

Das Funktionsprinzip der Lasersensoren wurde bereits beschrieben. Durch die genaue Bestimmung der Trajektorie des Sensors in Kombination mit den Höhenwerten kann im Postprocessing die vollständige 3D-Geometrie der auszuwertenden Spur berechnet werden. Hieraus können dann abschnittsweise reale Wellenlängen der Längsebenheit bestimmt werden. Um die Orientierung des Lasers genau bestimmen zu können, eignet sich ein inertiales Messsystem (IMU). IMUs bestehen in der Regel aus einem Beschleunigungssensor in Kombination mit einem Drehratensensor. Bei Kombination von jeweils drei orthogonal ausgerichteten Beschleunigungssensoren und Drehratensensoren können alle sechs kinematischen Freiheitsgrade bestimmt werden. Solche Systeme sind sehr gut geeignet, um Veränderungen in der Position, vor allem bei schnellen Bewegungsänderungen, zu detektieren. Allerdings geben sie permanent nur relative Veränderungen aus, so dass IMUs dazu neigen, zu drifteten. Um die Drift zu eliminieren, werden zusätzlich Magnetometer oder GNSS-Sensoren eingesetzt. In Kombination

können so sehr genaue Trajektorien erstellt werden. Der Preis und die Grösse der Einheit hängen dabei direkt von Präzision und Genauigkeit der Trajektorienbestimmung ab.

Die zweite Methode besteht in Auswertung eines Beschleunigungssensors. Die vertikalen Beschleunigungswerte werden hier durch Differenzierung in einen Offsetwert reduziert, die die vertikale Fahrzeugbewegung repräsentieren soll. Die Beschleunigungssensoren haben i.d.R. eine bauartbedingte Drift. Dieser Beschleunigungsmessfehler setzt sich aus folgenden Einflüssen zusammen: Nullpunktverschiebung, Fehler durch Verkippen (Bremsen-Beschleunigen), allgemeines Rauschen des Sensors und einem Restfehler (äussere Einflüsse, Temperatur, Druck).

Als Ergebnis wird ein relatives Höhenlängsprofil ermittelt, welches qualitativ direkt von den eingesetzten Messkomponenten abhängt. Aus diesem Höhenlängsprofil können dann die jeweiligen Indizes berechnet werden. Hierbei ergeben sich allerdings Einschränkungen in Bezug auf die abgebildeten Wellenlängen im Höhenlängsprofil, welche vom eingesetzten Messsystem abhängig sind.

Die Abtastrate bei Lasersensoren muss so hoch sein, dass für die Mittelung auf 0,1 m-Elemente genügend Messwerte zur Verfügung stehen. Bei einer Fahrtgeschwindigkeit von 80 km/h und 10 Messwerten pro 0,1 m muss mit einer Frequenz von mehr als 2,2 kHz gemessen werden. Üblicherweise betragen die am Markt verwendeten Messfrequenzen ~20 kHz und haben einen Faktor 10 über den Mindestanforderungen. Abstandssensoren mit 50 kHz Messfrequenz sind am Markt üblich. Die Frequenz ist auch hier lediglich durch die interne Belichtungszeit des zu verwendeten Sensors limitiert. Die Genauigkeit der Einzelmessung kann mit 0,2 mm angegeben werden.

Die Messwertauflösung für Beschleunigungssensoren muss mindestens 0,15 g betragen, um einen akzeptablen Beschleunigungswert zu liefern [188]. Die besten Messwerte liefert ein Beschleunigungssensor nur bei zu Beginn starker Beschleunigung und anschliessend konstanter Fahrtgeschwindigkeit ohne leichte Geschwindigkeitsänderungen. Zuletzt ist die Berechnung der Wellenlängen bei ausschliesslicher Verwendung eines Beschleunigungssensors nur auf kurze Wellenlängen beschränkt. Entsprechend ist eine Kombination mit einem Inertialsystem sinnvoll. So können lange Wellenlängen gemessen und schwache Beschleunigungen integriert werden.

Ein Fehler in der Trajektorienbestimmung der Messplattform wirkt sich direkt proportional auf das Ergebnis des Höhenlängsprofils aus. Es sollte sichergestellt werden, dass für eine Standardabweichung unter 0,1 mm der Fehler der Weggebung unter 2 % liegt [192]. Weiterhin lässt sich ein Fehler in der Bestimmung der Nickbewegung auf einen Fehler in der Justierung des Sensors reduzieren. Fehler von etwa 1° sind noch tolerierbar. Eine IMU oder ein Vertikalbeschleunigungssensor in Kombination mit bspw. einem GNSS-Sensor muss diese Spezifikationen erfüllen.

Als Ergebnis dieser Messung liegt ein stationsbezogenes Höhenlängsprofil mit einem Punktmindestabstand von 10 cm vor. Dieses bildet die Grundlage zur Berechnung des jeweiligen erforderlichen Indexes. Hierbei ist darauf zu achten, dass das verwendete System die erforderlichen Wellenlängen im Höhenlängsprofil abbildet.

Durch Anwendung von Lasersensoren oder Beschleunigungsaufnehmer können basierend auf dem ermittelten Höhenlängsprofil die bekannten Längsebenenparameter wie NBO, W-Werte und sW-Werte, IRI oder PGR berechnet werden.

7.78.4 Entwicklungsstand, Anwendungsgrenzen, Kosten

Lasersensoren oder Beschleunigungsaufnehmer sind Stand der Technik. Die Messung mit Hilfe eines Beschleunigungssensors bedingt einige Einschränkungen: Zum einen können diese Systeme langsame Fahrten und Start-Stop Ergebnisse durch die Trägheit des Beschleunigungssensors nicht hinreichend erfassen, welches zu Artefakten im Höhenlängsprofil führt. Die kombinierte Verwendung von Initialen Positionierungssystemen ist von der Qualität her genauer, hat aber die Einschränkung bei Tunneldurchfahren. Hier werden die Driftraten des Kreisel Systems nicht mehr durch die

GNSS-Komponente gestützt. Das bedeutet, dass mit der Länge des Tunnelbauwerks die Qualität der Trajektorie abnimmt.

Die Kosten für eine Befahrung können mit 100 bis 500 CHF pro Kilometer angesetzt werden.

7.78.5 Ergänzende Ausschreibungsanforderungen

Siehe Kapitel 7.1.5

7.78.6 Literaturverzeichnis

Sonstige Literatur / Forschungsberichte

-
- [188] S. M. KARAMIHAS und T. D. GILLESPIE, „Guidelines for longitudinal pavement profile measurement,“ Michigan, 1999.
-
- [189] S. X. Hu und A. F. Starace, „Laser acceleration of electrons to giga-electron-volt energies using highly charged ions,“ Phys. Rev. E, Bd. 73, p. 066502, 2006.
-
- [190] D. L. Huft, I. Her, S. K. Agrawal, R. A. Zimmer und C. J. Bester, „Surface properties-vehicle interaction,“ p. 16428, 1984.
-
- [191] S. L. ESHKABILOV und A. G. YUNUSOV, Measuring and Assessing Road Profile by Employing Accelerometers and IRI, 2018, p. 24–40.
-
- [192] J. Neubeck und A. Wiesebrock, Längsebenheitsmesssysteme : Überprüfung der Signalverarbeitungsverfahren nach dem Prinzip der Mehrfachabtastung (HRM), 2015.
-

7.79 Laserscanner

Laserscanner werden im Folgenden als 2D/3D Erfassungsgeräte definiert, welche mit Hilfe eines modulierten oder gepulsten Laserstrahls und einer Ablenkeinheit die Umgebung durch eine nicht zielgerichtete, punktförmige und flächendeckende Abtastung erfassen. Das Ergebnis ist eine dreidimensionale Punktwolke, welche im weiteren Prozessverlauf analysiert wird. Laserscanner können hinsichtlich ihrer Erfassungstechnologie und ihres Einsatzzwecks unterschieden werden. Zusätzlich können Laserscanner für die Automatisierung der Erfassung auf unterschiedlichen Trägersystemen eingesetzt werden, wodurch sich Unterschiede bei der Erfassungsgenauigkeit ergeben können.

7.79.1 Beschrieb der Technologie

Die Typisierung der Laserscanner erfolgt zum einen durch das Aufnahmeprinzip der Entfernungsmessung und zum anderen über den Sichtbereich und deren Genauigkeit. Laserscanner mit einer Genauigkeit > 1 cm werden hier nicht weiter betrachtet, da diese für die Ebenheitsbetrachtungen nicht hinreichend sind.

Aufnahmeprinzip

Es werden zwei Grundprinzipien für die Entfernungsmessung in einem Laserscanner unterschieden [193]:

- Das **Impulslaufzeitverfahren** (engl. time-of-flight) ermittelt aus der Laufzeit von einem ausgesendeten und wieder empfangenen Laserimpuls eine Distanz. Diese Distanz berechnet sich aus der Lichtgeschwindigkeit und der Zeitdifferenz zwischen empfangenem und ausgesendetem Impuls. Die Genauigkeit der Streckenmessung korreliert somit direkt mit der internen Zeitmessung des Gerätes [194]. Mit diesem Verfahren sind Messungen von grossen Entfernungsbereichen möglich, so dass es vorrangig von luftgestützten Plattformen aus Verwendung findet.
- Das **Phasenvergleichsverfahren** verwendet zur Entfernungsmessung einen kontinuierlichen Laserstrahl, bei dem eine Modulations- und eine Trägerwelle benutzt wird. Die verwendete Modulationswelle bestimmt die maximale eindeutige Reichweite des Distanzmessers. Durch Aussenden und Empfangen des so modulierten Signals ergibt sich im reflektierten Signal eine Phasenverschiebung. Mit Hilfe des ganzzahligen Vielfachen der Modulationswellenlänge und der gemessenen Phasenverschiebung kann auf die Distanz zwischen Messgerät und Objekt rückgeschlossen werden.

Zur Realisierung der 2D/3D Erfassung wird der Messstrahl durch einen Spiegel (Rotation, DLC oder MEMS) abgelenkt, sodass der Messstrahl im Sichtbereich des Scanners abgelegt wird (Abb. 7.95). Hierbei müssen die Auslenkungswinkel hochgenau erfasst werden. Diese bilden die Grundlage für die spätere Berechnung der resultierenden Punktmessung.

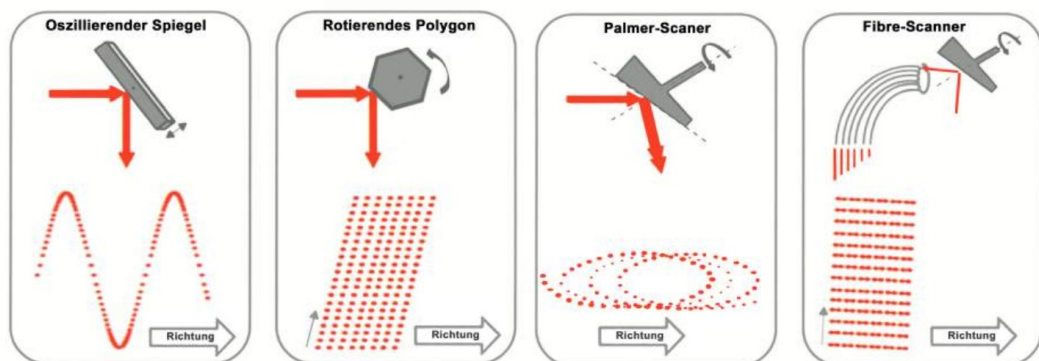


Abb. 7.95 Ablenkprinzipien eines Laserstrahls durch Spiegeloberflächen in einem Laserscanner [195]. (von links nach rechts) Prinzip eines oszillierenden Spiegels, eines rotierenden Polygons, eines Palmer- sowie eines Fibre-Scanners.

Unterteilung in Anwendungs- und Genauigkeitsklassen

Die Laserscanner können weiterhin in Oberflächenlaserscanner und Umfeldlaserscanner unterschieden werden. Der Oberflächenscanner besitzt ein eingeschränktes Messfeld von 50 bis 70°. Dieses Messfeld beschränkt, in Abhängigkeit der Anbauhöhe, die zu erfassende Oberfläche. Für die Oberflächenscanner werden spezielle Polygonspiegel verwendet, um den Laserstrahl mehrmals innerhalb einer Spiegelrotation über die Erfassungsfläche zu bewegen. Dieser Vorteil ermöglicht es den Oberflächenscanner, im Vergleich zum Umfeldscanner, eine höhere Punktdichte zu erzielen, was bei höheren Geschwindigkeiten des Trägersystems von Vorteil sein kann.

Der Umfeldscanner besitzt in der Regel nur einen rotierenden Spiegel, der es dem Scanner ermöglicht, ein Messfeld von 350 bis 360° abzudecken. Hinsichtlich der Genauigkeit sind die Oberflächenscanner den Umfeldscannern überlegen, besitzen aber auch einen eingeschränkten Eindeutigkeitsbereich, der nur wenige Meter abdeckt.

Oberflächenscanner:

- Eingeschränkter Öffnungswinkel $\sim 70^\circ$
- Hohe Genauigkeit 0,2 mm bis 1 mm
- Eingeschränkter Erfassungsbereich 1 bis 5 m
- Erfassungsrate 0,6 bis 2 Mio. Punkte/Sek

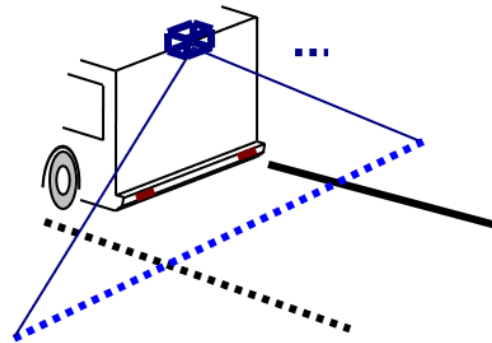


Abb. 7.96 Oberflächenscanner (links) und Prinzipskizze der Aufnahme der Strassenoberfläche (rechts) [196].

Umfeldscanner

- Erfassungsbereich > 30 m
- Mittlere bis hohe Genauigkeit: 0,2 mm bis 5 mm
- Öffnungswinkel $> 350^\circ$
- Erfassungsrate > 1 Mio. Punkte/Sek.

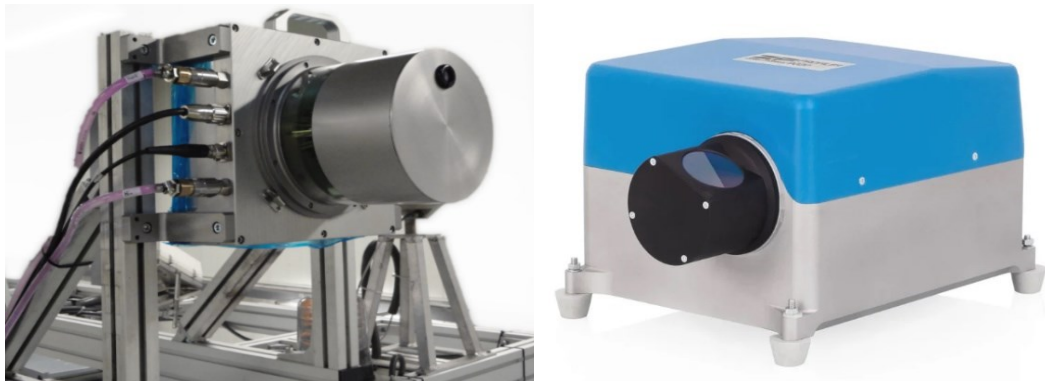


Abb. 7.97 links: Umfeldscanner mit einer 350° Abdeckung (10° Interne scannerspezifische Referenzmessung zum Ausgleich von Temperatureinflüssen)[197], rechts: Umfeldscanner mit einem Sichtfeld von 360° [198]

Erfassung von 3D-Punktwolken

Durch Bewegung des Trägersystems, auf dem der Laserscanner montiert ist, können Punktwolken (Oberflächenmodelle) der Umgebung erfasst werden. Dazu ist die Kombination des Sensors mit einem hochgenauen Positionierungssystem erforderlich, um die Verortung der erfassten Datenpunkte in einem lokalen oder globalen Koordinatensystem zu ermöglichen.

7.79.2 Fragestellungen in den Fachbereichen

Fragestellung im Bereich Tunnel

Der Laserscanner eignet sich für die Messung von Längsebenenheiten auf Fahrbahnbefestigungen. Die Messungen können direkt auf Fahrbahnbefestigungen in Asphalt- oder Betonbauweise durchgeführt werden. Zur Erfassung des Trassees werden spezielle Mobile Mapping Systeme eingesetzt, die meist kombiniert sind mit bildgebenden Sensoren. Auch terrestrische, stationäre Laserscanner können für kleine lokale Auswertebereiche angewendet werden, finden aber in der Bestimmung der Längsebeneheit aufgrund der dann nicht erfassbaren Wellenlänge keinen Einsatz.

Die marktübliche Realisierung für die Erfassung eines Trassees ist die Verwendung einer inertialen mobilen Messplattform, welche entweder fahrzeugbasiert oder drohnenbasiert realisiert wird. Durch die plattformspezifischen Gewichtseinschränkungen und der Entfernung zum Messobjekt ergeben sich Genauigkeitsunterschiede in den resultierenden Ergebnisdaten. Aus diesem Grund kann bislang mit einer drohnenbasierten Messplattform keine Längsebeneheit mit hinreichend grosser Datendichte und Genauigkeit aus den Ergebnisdaten extrahiert werden.

Laserscanner auf einer fahrzeugbasierten inertialen Plattform können am Heck oder auch an der Front angeordnet sein. Die durch die Rotationsscanner erzeugten Punktwolken werden zur messtechnischen Erfassung von Ebenheiten oder für die Umfelderkennung verwendet. Die Messung erfolgt ohne Einschränkungen im laufenden Verkehr. Es können mehrere Höhenlängsprofile extrahiert werden, sodass gleichzeitig z.B. die linke und die rechte Rollspur analysiert werden können.

Umsetzung der Technologie

Die Erfassung der Längsebeneheit basiert auf Grundlage einer erfassten 3D-Oberfläche. Die Daten werden aus einer dreidimensionalen Punktwolke generiert, die vorliegend aus den Daten des Laserscanners, in Kombination mit einem hochgenauen Positionierungssystem, gewonnen werden.

Der Ansatz zur Erfassung der Längs- und Querebeneheit mit nur einem Messsystem beruht auf einer integralen Bewertung der Ebeneheit aus einer gemeinsamen Datenbasis [199]. Das bedeutet, dass die Daten zur Ermittlung der Längs- und Querebeneheit aus der gleichen

dreidimensionalen Datenbasis abgeleitet werden. Als Grundlage dient hier ein sogenanntes „Curved Regular Grid“.

Aus dieser Datengrundlage leiten sich ein Höhenlängsprofil ab, welches nach einer Filterung (Butterworth- und Hochpassfilter), in eine Folge von Höhenmesspunkten mit definiertem Messpunktabstand (z.B. 10 cm) überführt werden kann.

Der Laserscanner eignet sich für die Untersuchung der folgenden Fragestellungen:

- Überprüfung der Längseinheit mit folgenden Indizes: PGR, W-Werte und sW-Werte, NBO (IRI, AUN, WLP)
- Prüfung im Rahmen der Bauüberwachung
- Beurteilung Längsebenheitswirkindex LWI [200]

7.79.3 Datenerfassung, Raumbezug, Messgrößen und – Genauigkeit

Die Datenerfassung findet rein digital statt. Der Raumbezug ist durch das verwendete Positionierungssystem realisiert und kann somit an die jeweilige Strassenkilometrierung projiziert werden.

Die Rohdaten des Höhenlängsprofils werden, abhängig von der Berechnungsvorschrift des jeweiligen Indizes, mit unterschiedlicher Rasterweite erzeugt und anschliessend in der Regel in Mittelwerte (z.B. 20 m oder 100 m) überführt.

Die zu erreichende Genauigkeit ist vom eingesetzten Laserscanner und dem Positionierungssystem abhängig.

Empfehlungen für die zu verwendenden Hardwarespezifikation zur Erfassung der Längsebenheit mit einem Laserscanner:

Laserscanner:

- Punktgenauigkeit: 0,2 bis 0,5 mm
- Erfassungsrate >1 Mio. Punkte/Sek

Positionierungssystem:

- Inertialsystem ist zwingend erforderlich (Kreiselssystem)
- Winkelgenauigkeit: < 0.02°
- Lagegenauigkeit: 2 bis 10 cm

7.79.4 Entwicklungsstand, Anwendungsgrenzen, Kosten

Der Einsatz der Technologie für die Messung der Längsebenheit ist als relativ neu einzuschätzen, so dass derzeit diese Technik nur vereinzelt Anwendung findet. Die Erfassung erfolgt im fließenden Verkehr und benötigt keine gesonderten Sicherungsmassnahmen. Alle oben abgebildeten Laserscanner arbeiten mit einem Laserstrahl der Laserklasse 1 oder 2 und sind Augensicher.

Einschränkungen in der Anwendung der Umfeldscanner gegenüber den Oberflächenscannern ergeben sich aus einer geringeren Punktdichte bei vergleichbarer Messgeschwindigkeit. Dies resultiert aus dem reduzierten Öffnungswinkel, welcher sich in den Profilaufständen der einzelnen Laserabtastungen widerspiegelt. Die Tagesleistung kann mit 100 bis 200 km pro Tag angegeben werden. Die Kosten für eine Messung belaufen sich auf ca. 50 bis 200 CHF je Messkilometer.

7.79.5 Ergänzende Ausschreibungsanforderungen

Siehe Kapitel 7.1.5

7.79.6 Literaturverzeichnis

Sonstige Literatur / Forschungsberichte

-
- [193] R. Joeckel, M. Stober und W. Huep, Elektronische Entfernungs- und Richtungsmessung, Bd. 5, VDE Verlag, 2008.
-
- [194] D. Schneider, „Geometrische und stochastische Modelle für die integrierte Auswertung terrestrischer Laserscannerdaten und photogrammetrischer Bilddaten,“ 2009.
-
- [195] F. B. J.-Angelo Beraldin und U. Lohr, Airborne and terrestrial laser scanning, G. Vosselman und H. Maas, Hrsg., Dunbeath: Whittles Publishing, 2010.
-
- [196] Lehmann + Partner GmbH
-
- [197] Clearance Profile Scanner, 2019.
-
- [198] Zoller+Fröhlich GmbH, 2D Laserscanner, <https://www.zofre.de/laserscanner/2d-laserscanner>
-
- [199] FE 04.0326/2018/DGB - Fortschreibung von Qualitätsstandards zur Abnahme von Ebenheitsmesssystemen für ZEB- und Abnahmemessungen vor dem Hintergrund neuer Erfassungstechnologien Referenznummer der Bekanntmachung: Z5ka-FE 04.0326/2018/DGB, 2022..
-
- [200] A. UECKERMANN, Heft 839: Der Längsebenheitswirkindex LWI, Bonn: Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung, 2002.
-

7.80 Triangulationssensoren

Triangulationssensoren sind spezielle Lasersensoren und bieten eine hohe Messgenauigkeit und höhere Messraten. Triangulation bedeutet hierbei die Abstandsmessung durch eine Winkelberechnung. In dieser Messtechnik projiziert ein Sensor einen Laserpunkt auf das Messobjekt. Das dort reflektierte Licht trifft abhängig von der Entfernung unter einem bestimmten Winkel auf ein Empfangselement. Die Position des reflektierten Lichts auf dem Empfangssensor ist korreliert mit dem Abstand zum Messobjekt.

Für die Messung von Höhenlängsprofilen werden spezielle Triangulationssensoren mit grossen Messabstand und sehr hoher Präzision verwendet.

7.80.1 Beschrieb der Technologie

Der HRM-Balken ist in Deutschland derzeit das einzige Messsystem welches eine Zulassung zur berührungslosen Ebenheitsmessung der Fahrbahnoberfläche in Längsrichtung hat [201]. Seinen Ursprung hat der Balken in Grossbritannien. Eine detaillierte Beschreibung des HRM-Balkens und der Ableitung der ZEB-Parameter findet sich in der Literatur [202][203].

Das ursprüngliche Design des HRM beinhaltet vier Lasersensoren, die entlang eines 4 m langen Balkens auf einem Anhänger platziert sind, der von einem Fahrzeug gezogen wird. Während der Balken vorwärtsbewegt wird, misst der führende Lasersensor (je nach Verfahren der vorderste oder zweite) die Strassenhöhe und wird von den zwei hinteren Sensoren referenziert. Das System benötigt zur Referenzierung nur einen Odometer, welches die Station der einzelnen Messwerte repräsentiert.

Gemessen wird jeweils eine Höhe jedes einzelnen Lasers zeitlich synchron über der Strassenoberfläche. Die Höhe an einer Stelle ergibt sich unter der Annahme von kleinen Balken-Nickwinkeln aus geometrischen Beziehungen (siehe Abb. 7.98). Dabei unterscheidet man zwischen dem symmetrischen und asymmetrischen Profil, mit Hilfe derer die lang- bzw. kurzwelligen Anteile der Strassenoberfläche berechnet werden können. Die Rekonstruktion des Höhenlängsprofils zeigt schematisch Abb. 7.99 .

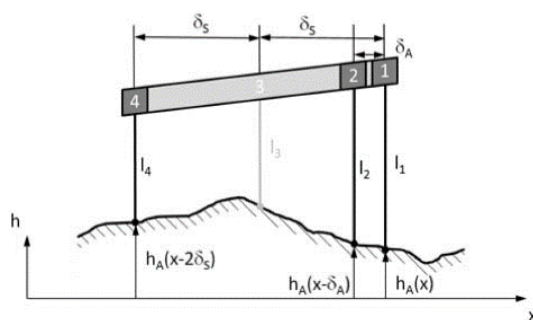


Abb. 7.98 Mehrfachabtastung kurzer Wellenlängen (asymmetrisches Profil) [202].

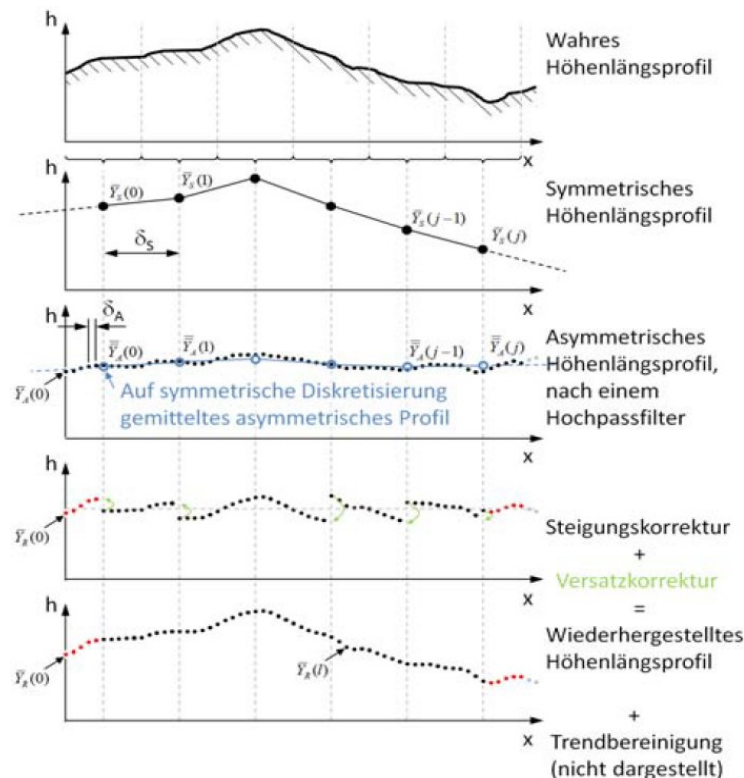


Abb. 7.99 Triangulationssensoren - HRM-System - Wiederherstellungsprozess des Höhenlängsprofils aus symmetrischem und asymmetrischem Höhenlängsprofil. [202]

Durch einen in [203] beschriebenen Wiederherstellungsprozess werden die beiden Anteile überlagert. Dabei werden zunächst die langwelligen Anteile der Strassenoberfläche aus dem asymmetrischen Profil herausgefiltert.

Diese Filterung muss auf die vorliegende Messgeometrie sowie die Wegdiskretisierung angepasst werden [202]. Sie führt durch eine übliche Filterwellenlänge von 120 bis 150 m zu einer Wellenlängeneinschränkung im langwelligen Bereich auf etwa die Eckwellenlänge, bzw. leicht kürzer [202]. Üblicherweise führt die Berechnung des resultierenden Höhenlängsprofils zu einer Abbildung von Wellenlängen von 0,3 bis 160 m. Diese Rohdaten werden dann auf einem 10 cm Punktabstand im Profil gemittelt. Dieses bildet dann die Grundlage für die weite Berechnung der einzelnen Indizes.

7.80.2 Fragestellungen in den Fachbereichen

Fragestellung im Bereich Tunnel

Die Messungen können direkt auf Fahrbahnbefestigungen in Asphalt- oder Betonbauweise durchgeführt werden. Zur Erfassung der Trasse werden spezielle Mobile Mapping Systeme eingesetzt, die meist kombiniert sind mit bildgebenden Sensoren.

Die marktübliche Realisierung für die Erfassung einer Trasse ist die Verwendung mobilen Messplattform, welche fahrzeugbasiert realisiert ist. Das HRM-System wird i.d.R. über der rechten Rollspur montiert. Das erfasste Höhenlängsprofil folgt der Fahrspur des Fahrzeuges. Um Variationen bei Wiederholungsmessungen zu vermeiden, muss besonders auf die Fahrspurlage während der Erfassung geachtet werden. Die Messung erfolgt ohne Einschränkungen im laufenden Verkehr. Es wird ein Höhenlängsprofil extrahiert, i.d.R. die rechte Rollspur.

7.80.3 Datenerfassung, Raumbezug, Messgrößen und – Genauigkeit

Die Datenerfassung findet rein digital statt. Alle 4 Lasersensoren des HRM-Systems werden kontinuierlich aber synchron Zeit- oder Weggetriggert. Die Länge des Balkens hat einen direkten Einfluss auf die Messung. So wird tendenziell mit längerem Balken die

Messung genauer, da für kurze Balkenlänge (< 2 m) das Messrauschen durch das symmetrische Profil nicht optimal kompensiert werden kann. Somit kommt es im langwelligen Bereich zu Fehlern [202]. Bei einem längeren Balken (> 4 m) tritt der reziproke Fall auf [202]. Deshalb haben sich Balken zwischen 2 m und 4 m Länge bewährt.

Distanzmessung

- Genauigkeit: 0,2 mm
- Arbeitsbereich: min. 100 mm $\pm$ 10 mm [201]
- Messfrequenz: ~ 20 kHz
- Sonnen unempfindlich

Wegmessung Odometer

- Toleranz der Messwegerfassung von 0,5 %
- Min. 1000 pulse pro Rad Umdrehung
- Phase-*Quadratur* Encoder

In Zusammenhang mit der Höhenmessung steht auch der Messbereich, der bei den herangezogenen Fahrzeugen ~ 200 mm beträgt. Studien zeigten dabei, dass es unter Hinzunahme der durch die Fahrbahnanregung verursachten Aufbaubewegung des Messfahrzeugs ein Messbereich von etwa 300 mm für einen schlechten Strassenzustand und hohe Erfassungsgeschwindigkeit notwendig sein kann [202][204]. Ein Messbereich von 400 mm kann sinnvoll sein, um zuverlässig Messen zu können. Zudem wird gefordert, dass die Sonden so montiert sind, dass die Mitte des Messbereiches ± 10 mm auf dem Niveau der Fahrbahnoberfläche liegt, also das Zentrum des Messbereichs die Fahrbahn bildet.

In direktem Zusammenhang zur Messfrequenz der Laser steht die Mittelung der Höhendaten. So findet normalerweise eine Mittelung auf ein 10 cm-Raster statt, um Zufallsfehler zu kompensieren. Die real beste auftretende Standardabweichung für gute Autobahnen liegt bei etwa 0,07 mm [202]. Geht man von einer Standardabweichung von 0,2 mm der Einzelmessung aus, so sind mindestens drei Messwerte pro 10 cm Profil zur Mittelung notwendig.

Weiterhin hat die Weggebung einen Einfluss auf das Höhenprofil. Diese wirkt sich direkt auf die Wegzuordnung der Lasersignale zur Höhenlängsprofilerzeugung, des Höhenlängsprofils zur Kennwertberechnung/Zustandsbewertung und der Auswerteabschnitte ins Netzknotensystem aus. In [202] wird die Standardabweichung bei 1 % Wegmessfehler für übliche Strassen auf etwa 0,05 mm quantifiziert und ist somit im Vergleich zu den anderen Fehlern vernachlässigbar.

Hinsichtlich der Datenmenge entstehen die Distanzdaten aus den vier Lasern abhängig von ihrer Messfrequenz. Bei Wegtriggerung oder Zeittriggerung liegt die Messrate bei etwa 20 bis 50 kHz. Entsprechend werden maximal etwa 200.000 Messwerte pro Sekunde erzeugt. Bei Wegtriggerung ist die Datenmenge bei den gängigen Fahrgeschwindigkeiten niedriger als bei Zeittriggerung. Zusätzlich entstehen weitere Daten durch die Weggebung. Geschätzt ergibt dies ~ 137 kB Maschinenrohdaten pro Messkilometer.

7.80.4 Entwicklungsstand, Anwendungsgrenzen, Kosten

Der Einsatz der Technologie für die Messung der Längsebenheit ist als ausgereift einzuschätzen. Es ist für die Erfassung der Längsebenheit das präziseste Messfahren. Die Erfassung erfolgt im fließenden Verkehr und benötigt keine gesonderten Sicherungsmassnahmen. Die verfügbaren Systeme sind bauartbedingt verschieden und arbeiten mit einem Laserstrahl der Laserklasse 2 bis 3.

Die Tagesleistung kann mit 100 bis 200 km pro Tag angegeben werden. Der Kostenpunkt einer Messung beträgt ca. 50 bis 200 CHF pro Messkilometer.

7.80.5 Ergänzende Ausschreibungsanforderungen

Siehe Kapitel 7.1.5

7.80.6 Literaturverzeichnis

Sonstige Literatur / Forschungsberichte

-
- [201] Technische Prüfvorschriften für Ebenheitsmessungen auf Fahrbahnoberflächen in Längs- und Querrichtung - Teil: Berührungslose Messungen, Ausg. 2009 Hrsg., Köln: FGSV-Verl., 2009.
-
- [202] J. Neubeck und A. Wiesebeck, Längsebenheitsmesssysteme : Überprüfung der Signalverarbeitungsverfahren nach dem Prinzip der Mehrfachabtastung (HRM), 2015.
-
- [203] P. B. Still, P. G. Jordan und C. P. Wroth, Evaluation of the TRRL high-speed profilometer, 1980.
-
- [204] M. Mitschke, Dynamik der Kraftfahrzeuge, Band B: Schwingungen, Springer Verlag, 1984.
-

E 2 Querebenheit

Tab. 7.45 Querebenheit - Übersicht

Fragestellung		E2 Querebenheit			
Kurzbeschreibung Fragestellung		Die Querebenheit ist ein Qualitätsmass für Strassen und Wege, welches in der Regel Fahrtrichtungs- und Fahrstreifen bezogen erfasst wird. Abweichungen in der Querebenheit wirken sich negativ auf den Fahrkomfort (Spurrillen) und die Fahrsicherheit aus (stehendes Wasser in Rillen, Gefahr Aquaplaning). Die Betriebssicherheit des Tunnelbauwerks kann gefährdet werden. Die Datengrundlage für die Überwachung bilden Querprofile aus einzelnen Messpunkten oder fast kontinuierlichen Messungen im Bezug zu einer Referenzhöhe. Die Querprofile können georeferenziert oder zu einer Strassenkilometrierung synchronisiert werden.			
Überwachungstechnologie		Richtlatte	Lasersensor	Laserscanner	Lichtschnittverfahren
"ID"		QLa_	QLS_	QLC_	QLi_
Typisierung	a. Messprinzip	1 direkt	1 direkt	1 direkt	1 direkt
	b. Datenerfassung	1 mechanisch	7 laseroptisch	7 laseroptisch	7 laseroptisch
	c. Datenspeicher	3 analog (Ablesung)	1 digital	1 digital	1 digital
	d. Lokalisation	1 punktuell	2 streckenbezogen	2 streckenbezogen	2 streckenbezogen
	e. Raumbezug	2 separat	1 integriert	1 integriert	1 integriert
	f. Zustand	3 nicht zerstörend	3 nicht zerstörend	3 nicht zerstörend	3 nicht zerstörend
Messgrößen und -genauigkeit	Größen	Spurrinnentiefe, fiktive Wassertiefe, Spurrinnentiefe, fiktive Wassertiefe, Spurrinnentiefe, fiktive Wassertiefe			
	Untersuchungs-/Tiefenbereich	Oberfläche	Oberfläche	Oberfläche	Oberfläche
	Auflösung	-	0,1- 0,01mm	-	1mm
	Genauigkeit	0,1- 0,5 mm	0,2 mm	0,2 mm	0,2 - 0,5 mm
	Bemerkungen	-	Erfassungsweite >2,5m erfordert	Extraktion aus Punktwolke, Laserklasse 1	Laserklasse 3-4
Tunnel		4	3	3	3
Geotechnik		0	0	0	0
Naturgefahren		0	0	0	0
Umwelt		0	0	0	0
Einsatzzeitpunkt		W, N	W, N	W, N	W, N
Entwicklungsstand		●	●	●	●
Kosten	initial / einmalig	●	●	●	●
	wiederkehrend	●	●	●	●

Die Querebenheit wird unter einer 4 m-Latte in der Schweiz gemessen (einer 2 m Latte in Deutschland). Unebenheiten und Neigung werden aufgezeichnet. Die maximal zulässigen t-Werte (theoretische Wassertiefe) und T-Werte (Muldentiefe) variieren in Abhängigkeit des Strassentyps. Alle folgenden Messverfahren beziehen sich auf die Ermittlung der theoretischen Wassertiefe und der Muldentiefe (SN 640 516-6/7/8 [208]-[210] und VSS-40518[205]).

Für die Querebenheit wiederum sind laut SN 640 516-8 [210] die Zustandsgrößen Spurrinnentiefe (rechts und links, jeweils Mittelwert und Standardabweichung und das Maximum der Mittelwerte rechts und links), fiktive Wassertiefe (analog zur Spurrinnentiefe) und die Querneigung der Fahrbahn zu berechnen.

Die Studie vom Swedish National Road and Transport Research Institute (VTI) [206] zeigt verschiedene Laserscannersysteme und Laserlichtschnittverfahren zur Querebenheitsmessung die anhand von realen Daten erfasst wurden. Insgesamt geht aus der Studie hervor, dass die verwendeten unterschiedlichen Systeme gute Werte liefern und der grösste Einflussfaktor der Mensch durch die Positionierung des Systems in der Spur ist.

7.81 Richtlatte (4 m)

7.81.1 Beschrieb der Technologie

Die Richtlatte ist eine 4 m lange - zum Teil zerlegbare - Metallkonstruktion mit einer maximalen Biegelinie kleiner als 0,5 mm. Die Latte dient hierbei zur lokalen Detektion von Unebenheiten. Zur Messung der Abweichung, welches im Weiteren als Stichmass definiert wird, kommt ein Messkeil zum Einsatz. Dieser Messkeil mit einem definierten Anstellwinkel von 10 bis 15° repräsentiert durch eine metrische Einteilung auf der Oberseite den Abstand zwischen Oberfläche und Richtlatte.

Die Querebenheit wird i.d.R. über erweiterte Messverfahren erfasst. Die Richtlatte dient hier nur der Qualitätssicherung und ist analog der Erfassung für die Längsebenheit zu realisieren. In der Praxis finden sich verschieden Umsetzungen eines Profilografen (4 m Latte mit automatischer Messeinheit). Im Folgenden ist ein analoger Profilograf beschrieben, der aber den gleichen Anforderungen entsprechen muss, wie bei der Messung mit der 4 m Richtlatte.

Aufnahmeprinzip

Profilograf ist eine "Erweiterung" der Richtlatte und dient zur elektronischen/analogen Erfassung der Querebenheit von Fahrbahnen und Verkehrsflächen. Profilograf nach Koehler-Fuess und das Standard-Querprofil-Messgerät (SQM) sind Varianten der Richtlatte, bei denen ein Tastrad das gesamte Profil aufnimmt und das gesamte Profil bzw. die benötigten Kennwerte auf dem Ausschrieb graphisch oder numerisch ermittelt. Das Messsystem dient hauptsächlich der Aufnahme der Querebenheit.

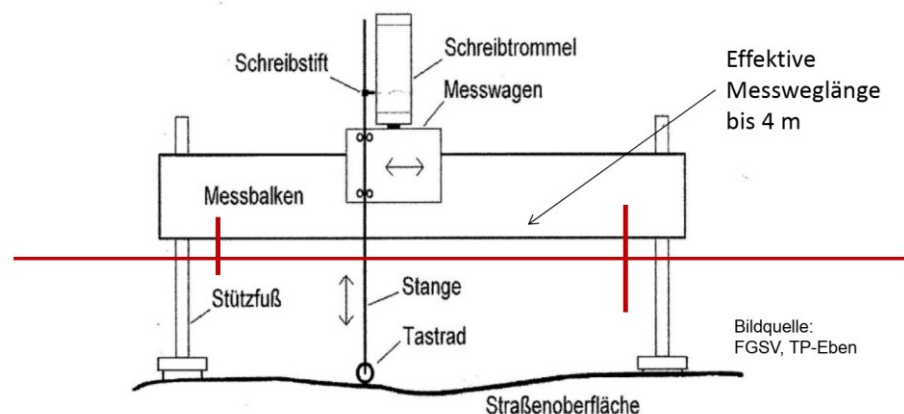


Abb. 7.100 Systemaufbau des Profilografen nach Koehler-Fuess. [207]

Es ist sicherzustellen, dass beide Stützfüße einen sicheren Stand aufweisen.

7.81.2 Fragestellungen in den Fachbereichen

Fragestellung im Bereich Tunnel

Die Ermittlung der maximal zulässigen t-Werte (theoretische Wassertiefe) und T-Werte (Muldentiefe) erfolgt auf mechanische oder digitale Weise. Es wird realisiert durch eine Tastrad, welches das Querprofil kontinuierlich erfasst.

Dieses Verfahren dient zur Prüfung direkt am Messobjekt. Da der Zeitaufwand zur Aufnahme sehr hoch ist, haben sich andere schnellere Prüfverfahren etabliert.

7.81.3 Datenerfassung, Raumbezug, Messgrößen und – Genauigkeit

Zur Erfassung wird die 4 m Latte / Profilograf entlang des zu Messenden Querprofils auf die Oberfläche gestellt. Die Station kann über ein Messrad oder ein Hand-GPS-Gerät zum Streckenabschnitt verortet werden.

Anforderungen an die Richtlatte:

- Format: 4000 x 18 x 90 mm,
- Durchbiegung: max. 0,5 mm vertikal,
- Querbiegung: max. 1,5 mm,
- Besonderheiten: Mittenkennzeichnung
- Wasserwaage mit einer Genauigkeit besser $\pm 0,01^\circ$

Anforderungen an den Messkeil / Sensorkopf:

- Zu erreichende Messgenauigkeit (Massstab): 0,1 -0,5 mm
- Messbereich: minimal 2 – 25 mm
- Material: abriebfestes Material (lt. TP-Eben - Metall)
- Aufstandsfläche: 30 (± 5) mm breit, 295 (± 5) mm breit

Gemäss DIN 13036-6 [208] ist die Ebenheitstoleranz der Bereich für die zulässige Abweichung einer Fläche von der Ebene. Zur Beurteilung von Ebenheitstoleranzen wird nach dieser Norm das Stichmass verwendet. Dieses ist der Abstand eines Punktes von einer Bezugslinie, der im Verhältnis zum Messpunktastand bewertet wird. Das Grundprinzip und das Messverfahren sind nach DIN 13036-7 [209] und TP-Eben Teil: berührende Messungen [207] geregelt.

Aus diesem Querprofil lassen sich dann die messspezifischen Werte der Querebenheit ableiten.

7.81.4 Entwicklungsstand, Anwendungsgrenzen, Kosten

Der Profilograf ist ein bewährtes, einfaches, kostengünstiges und vielseitig einsetzbares Messverfahren um vor Ort Stichmasse entlang eines Querprofils zu erfassen. Es ist für kleine Messgebiete < 500 m geeignet. Der Zeitaufwand der Erfassung kann mit 5 min pro 4 m abgeschätzt werden.

Die Kosten für den Einsatz der Technologie setzen sich zusammen aus:

- Tagessatz für Techniker ca. 1500 bis 2000 CHF

7.81.5 Ergänzende Ausschreibungsanforderungen

Siehe Kapitel 7.1.5

7.81.6 Literaturverzeichnis

Sonstige Literatur / Forschungsberichte

-
- [205] VSS-40518, Eigenschaften der Fahrbahnoberflächen, Querebenheit, 2019
-
- [206] T. Lundberg, P. Andrén, T. Wahlman, O. Eriksson, L. Sjögren und P. Ekdahl, „VTI rapport 961A | New technology for road surface measurement,“ 2018.
-
- [207] L. Löcherer, Hrsg., Technische Prüfvorschriften für Ebenheitsmessungen auf Fahrbahnoberflächen in Längs- und Querrichtung - Teil: Berührende Messungen, Ausgabe 2017 Hrsg., Köln: FGSV Verlag GmbH, 2018
-
- [208] SN 13036-6:2008-06, Oberflächeneigenschaften von Strassen und Flugplätzen - Prüfverfahren - Teil 6: Bestimmung der Quer- und Längsprofile in den Wellenlängen der Ebenheit und der Megatextur; Deutsche Fassung EN 13036-6:2008.
-
- [209] SN 13036-7:2003-12, Oberflächeneigenschaften von Strassen und Flugplätzen - Prüfverfahren - Teil 7: Messung von Einzelunebenheiten von Verkehrsflächen: Messung mit der Richtlatte; Deutsche Fassung EN 13036-7:2003
-
- [210] SN 13036-8:2008-06, Oberflächeneigenschaften von Strassen und Flugplätzen - Prüfverfahren - Teil 8: Bestimmung der Parameter zur Ermittlung der Breitenunebenheit; Deutsche Fassung EN 13036-8:2008
-

7.82 Lasersensoren

Eine Standardmethode zur Erfassung der Querebenheit ist ein Messbalken mit variierbarer Anzahl an Laserdistanzsensoren, die nach unten auf die Strasse gerichtet werden und transversal zur Fahrtrichtung ausgerichtet ist. Für die Erfassung können verschiedene Lasersensoren zum Einsatz kommen. Die gebräuchlichsten Sensoren sind hier Triangulationslaser. Der Querbalken wird i.d.R. auf ein Mobile Mapping Fahrzeug montiert und je nach Anforderungen werden in einem definierten konstanten Abstand Lasersensoren angebracht. Die Lokalisierung der so erfassten Profile erfolgt mit Hilfe eines Odometers.

7.82.1 Beschrieb der Technologie

Zur Erfassung der Querebenheit werden bei diesem Messprinzip einzelne Lasersensoren rechtwinklig zur Strassenoberfläche an einer festen Basis verbaut (Balken). Die Breite und auch die Anzahl der Laserdistanzsensoren hängt vom jeweiligen Einsatzzweck ab. In der Regel ist der Abstand zwischen den Sensoren auf 10 cm festgelegt. Die Anzahl richtet sich nach der Strassenkategorie und beträgt auf Ausserortstrassen 29 Sensoren (3,0 m) und min. 33 Sensoren (3,2 m) auf Autobahnen.

Alle Messsensoren werden entweder weg- oder zeitgesteuert ausgelöst und müssen eine hinreichende Messfrequenz aufweisen. Durch die Vorwärtsbewegung der Messplattform werden kontinuierlich Querprofile aufgezeichnet. Diese Roh-Werte sind im Weiteren einer statistischen Ausreisserbehandlung zu unterziehen und einer Mittelung auf 10 cm in Längsrichtung pro Lasersonde [211].

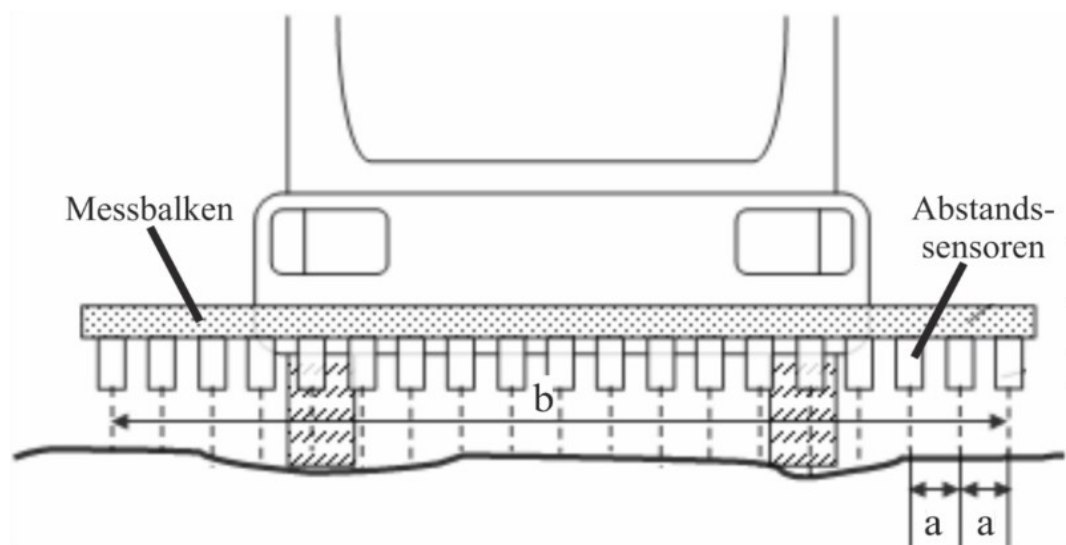


Abb. 7.101 Lasersensoren – Balkenmessung für Querebenheitsmessung
Prinzipdarstellung einer berührungslosen Messung mit einem Messbalken [212].

In Fahrtrichtung erfolgt zur Minimierung von Rauheitseinflüssen eine Mittelung der Höhendaten auf einer Länge von 0,1 m. Die Standardabweichung der Einzelmessung ist mit 0,2 mm vorgegeben. Weiterhin ist zur Erfüllung der Genauigkeitsanforderungen die Mittelung von mindestens 10 Abstandswerten, was einer Messfrequenz von ~20 kHz Daten entspricht, notwendig. Die Toleranz der Messweg erfassung darf 0,5 % nicht überschreiten.

Durch den geringen Abstand des Messbalkens von der Fahrbahnoberfläche und den Mittelungsbereichen von 0,1 m hat eine Abweichung von der lotrechten Ausrichtung der Lasersonden weder in Längs- noch in Querrichtung grösseren Einfluss auf die Ableitung der Kenngrössen. Erforderlich ist eine korrekte Einhaltung des Abstands "a" zwischen den Sensoren (siehe Abb. 7.101). Hier gilt $a = 0,1 (\pm 0,005)$ m. Weiterhin ist eine Abstandsprotokollierung des Systems zum rechten Fahrbahnrand mit einer Auflösung von 1 cm erforderlich.

Als Ergebnis wird alle 10 cm entlang der Fahrspur der Messplattform ein Roh-Querprofil ausgegeben. Dieses Querprofil dient dann zu weiten Verarbeitung für die zu verwenden Indizes.

7.82.2 Fragestellungen in den Fachbereichen

Fragestellung im Bereich Tunnel

Die Messungen können direkt auf Fahrbahnbefestigungen in Asphalt- oder Betonbauweise durchgeführt werden. Zur Erfassung des Trassees werden spezielle Mobile Mapping Systeme eingesetzt, die meist kombiniert sind mit bildgebenden Sensoren.

7.82.3 Datenerfassung, Raumbezug, Messgrößen und – Genauigkeit

Die marktübliche Realisierung für die Erfassung einer Trasse ist die Verwendung einer mobilen Messplattform. Das System wird i.d.R. in der Front oder am Heck eines Fahrzeuges montiert. Das erfasste Querprofil folgt der Fahrspur des Fahrzeuges. Um Variationen bei Wiederholungsmessungen zu vermeiden, muss besonders auf die Fahrspur Lage während der Erfassung geachtet werden. Die Messung erfolgt ohne Einschränkungen im laufenden Verkehr.

Die Erfassung des Querprofils erfolgt schnellfahrend (>80 km/h) und rein digital. Die Messwerte der einzelnen Laserdistanzsensoren werden weg- oder zeitgesteuert ausgelöst. Die Verortung der Messwerte erfolgt durch ein Odometer oder durch ein GNSS-System. Folgende Anforderungen können festgelegt werden

Distanzmessung

- Genauigkeit: 0,2 mm
- Arbeitsbereich: min. 200 mm $\pm$ 10 mm [211]
- Messfrequenz: mindestens 20 kHz
- Sonnen unempfindlich
- Anzahl der zu verwenden Sensoren min. 3,2 m (für eine Fahrspurerfassung)

Wegmessung Odometer

- Toleranz der Messwegerfassung von 0,5 %
- Min. 1000 Pulse pro Rad Umdrehung
- Phase-*Quadratur* Encoder

Die maximale Erfassungsbreite des Messgeräts wird über die fest verbauten Lasersensoren ermittelt. Es konnte gezeigt werden, dass der Querversatz einen starken Einfluss auf die Reproduzierbarkeit der Kennwerte der Querebenheitsmessung aber auch auf die Bestimmung selbst haben kann [213]. Generell wird dies als Haupteinflussquelle bei Vergleichsmessungen die Erfahrung des Fahrers bzw. der FahrerIn des Messfahrzeuges im Sinne des Haltens der richtigen Spur angeführt. Nachteil beim Messbalken ist die eingeschränkte Erfassungsbreite des Messsystems. Die Fahrbahn kann dennoch auf einer Breite erfasst werden, die in Deutschland den gesetzten Standards von mindestens 3,2 m für BAB und 3 m für Bundesstrassen genügt.

7.82.4 Entwicklungsstand, Anwendungsgrenzen, Kosten

Der Einsatz der Technologie für die Messung der Querebenheit gilt als ausgereift. Die Erfassung erfolgt im fließenden Verkehr und benötigt ggf. bei einer Überbreite von mehr als 2,55 m (Deutschland $>2,5$ m) gesonderten Sicherungsmassnahmen. Die am Markt verfügbaren Systeme sind bauartbedingt verschieden und arbeiten mit einem Laserstrahlen der Laserklasse 2 bis 3.

Die Tagesleistung kann mit 100 bis 200 km pro Tag angegeben werden. Der Kostenpunkt einer Messung beträgt ca. 50 bis 200 CHF pro Messkilometer.

7.82.5 Ergänzende Ausschreibungsanforderungen

Siehe Kapitel 7.1.5

7.82.6 Literaturverzeichnis

Sonstige Literatur / Forschungsberichte

-
- [211] Technische Prüfvorschriften für Ebenheitsmessungen auf Fahrbahnoberflächen in Längs- und Querrichtung - Teil: Berührungslose Messungen, Ausg. 2009 Hrsg., Köln: FGSV-Verl., 2009.
-
- [212] Schniering GmbH, Ebenheit im Querprofil / Querebenheit,
<https://www.schniering.com/dienstleistungen/querebenheit>
-
- [213] T. Lundberg, P. Andrén, T. Wahlman, O. Eriksson, L. Sjögren und P. Ekdahl, „VTI rapport 961A | New technology for road surface measurement,“ 2018.
-

7.83 Laserscanner

Laserscanner werden im Folgenden als 2D/3D Erfassungsgeräte definiert, welche mit Hilfe eines modulierten oder gepulsten Laserstrahls und einer Ablenkeinheit die Umgebung durch eine nicht zielgerichtete, punktförmige und flächendeckende Abtastung erfassen. Das Ergebnis ist eine dreidimensionale Punktwolke, welche im weiteren Prozessverlauf analysiert wird. Laserscanner können hinsichtlich ihrer Erfassungstechnologie und ihres Einsatzzwecks differenziert werden. Zusätzlich können Laserscanner, für die Automatisierung der Erfassung auf unterschiedlichen Trägersystemen eingesetzt werden, wodurch sich Unterschiede bei der Erfassungsgenauigkeit ergeben können. Weitere Erläuterungen sind im Kapitel 7.79 zu finden.

7.83.1 Beschrieb der Technologie

Die Typisierung der Laserscanner erfolgt zum einen durch das Aufnahmeprinzip der Entfernungsmessung und zum anderen über den Sichtbereich und deren Genauigkeit. Laserscanner mit einer Genauigkeit > 1 cm werden hier nicht weiter betrachtet, da diese für die Ebenheitsbetrachtungen nicht hinreichend sind.

Unterteilung in Anwendungs- und Genauigkeitsklassen

Die Laserscanner können weiterhin in Oberflächenlaserscanner und Umfeldlaserscanner unterschieden werden. Der Oberflächenscanner besitzt ein eingeschränktes Messfeld von 50 bis 70°. Dieses Messfeld grenzt, in Abhängigkeit der Anbauhöhe, die zu erfassende Oberfläche ein. Hinsichtlich der Genauigkeit sind die Oberflächenscanner den Umfeldscannern überlegen, besitzen aber auch einen eingeschränkten Eindeutigkeitsbereich, der nur wenige Meter abdeckt. Zur Erfassung der Querebene ist ein Oberflächenscanner mit einer Messbreite von ~4 m ideal

Oberflächenscanner:

- Eingeschränkter Öffnungswinkel $\sim 70^\circ$
- Hohe Genauigkeit 0,2 mm - 1 mm
- Eingeschränkter Erfassungsbereich 1 bis 5 m
- Erfassungsrate 0,6 - 2 Mio. Punkte/Sek

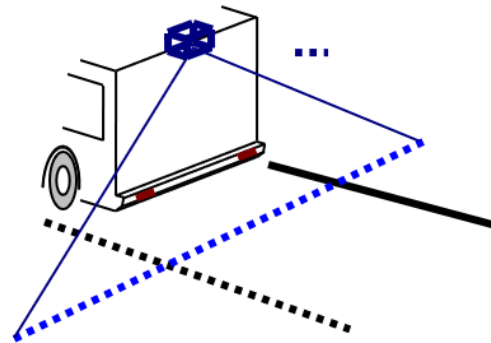


Abb. 7.102 Oberflächenscanner (links) und Prinzipskizze der Aufnahme der Strassenoberfläche (rechts) [214].

Umfeldscanner werden in der Erfassung der Querebene in der aktuellen Marktsituation nicht verwendet (Siehe Abschnitt im Kapitel 7.79).

Erfassung von Querprofilen

Durch Bewegung des Trägersystems, auf dem der Laserscanner montiert ist, können Punktwolken (Oberflächenmodelle) der Umgebung erfasst werden. Dazu ist die Kombination des Sensors mit einem hochgenauen Positionierungssystem erforderlich, um die Verortung der erfassten Datenpunkte in einem lokalen oder globalen Koordinatensystem zu ermöglichen.

Aus dieser Punktwolke werden dann im Nachgang die zur Erfassung notwendigen Lasersensoren analog eines Messbalkens extrahiert. Damit ist die Technologie komplementär zum Messbalken jedoch mit einer grösseren Erfassungsbreite.

7.83.2 Fragestellungen in den Fachbereichen

Fragestellung im Bereich Tunnel

Der Laserscanner eignet sich für die Messung von Querebenenheiten auf Fahrbahnbefestigungen. Die Messungen können direkt auf Fahrbahnbefestigungen in Asphalt- oder Betonbauweise durchgeführt werden. Zur Erfassung der Trasse werden spezielle Mobile Mapping Systeme eingesetzt, die meist kombiniert sind mit bildgebenden Sensoren. Auch terrestrische, stationäre Laserscanner können für kleine lokale Auswertebereiche angewendet werden, finden aber in der Bestimmung der Längsebeneheit keinen Einsatz. Alle weiteren Punkte sind identisch mit dem Kapitel "Laserscanner".

Umsetzung der Technologie

Die Erfassung der Querebeneheit basiert auf einer erfassten 3D-Oberfläche. Die Daten werden auf Grundlage einer dreidimensionalen Punktwolke generiert, die vorliegend aus den Daten des Laserscanners, in Kombination mit einem hochgenauen Positionierungssystem, gewonnen werden.

7.83.3 Datenerfassung, Raumbezug, Messgrößen und – Genauigkeit

Die Datenerfassung findet digital statt. Der Raumbezug ist durch das verwendete Positionierungssystem realisiert und kann somit an die jeweilige Strassenkilometrierung projiziert werden.

Die Rohdaten Querprofile werden, abhängig von der Berechnungsvorschrift des jeweiligen Index, mit unterschiedlicher Rasterweite erzeugt und anschliessend in der Regel in Mittelwerte (z.B. 20 m oder 100 m) überführt.

Die zu erreichende Genauigkeit ist vom eingesetzten Laserscanner und dem Positionierungssystem abhängig.

Aus den einzelnen Laserscanneraufnahmen leiten sich die Querprofile ab, welche nach einer Filterung in eine Folge von Quermesspunkten mit definiertem Messpunktabstand (z.B. 10 cm) überführt werden kann.

Der Laserscanner eignet sich für die Untersuchung der folgenden Fragestellungen:

- Spurrinnentiefe in der rechten und linken Rollspur,
- Fiktive Wassertiefe,
- Grundlage für Lattensimulation (2 m oder 4 m)

Empfehlungen für die zu verwendenden Hardwarespezifikation zur Erfassung der Längsebeneheit mit einem Laserscanner:

Laserscanner:

- Punktgenauigkeit: 0,2 bis 0,5 mm
- Erfassungsrate >1 Mio. Punkte/Sek

Positionierungssystem:

- Inertialsystem ist zwingend erforderlich (Kreiselsystem)
- Winkelgenauigkeit: < 0.02°
- Lagegenauigkeit: 2 bis 10 cm

7.83.4 Entwicklungsstand, Anwendungsgrenzen, Kosten

Der Einsatz der Technologie für die Messung der Querebenheit ist als relativ neu einzuschätzen, so dass derzeit nur wenige Technologien zum Einsatz kommen. Die Erfassung erfolgt im fließenden Verkehr und benötigt keine gesonderten Sicherungsmassnahmen. Alle oben abgebildeten Laserscanner arbeiten mit einem Laserstrahl der Laserklasse 1 oder 2 und sind Augensicher.

Einschränkungen in der Anwendung der Umfeldscanner gegenüber den Oberflächenscannern ergeben sich aus einer geringeren Punktdichte bei vergleichbarer Messgeschwindigkeit. Diese resultiert aus dem reduzierten Öffnungswinkel, welcher sich in den Profilabständen der einzelnen Laserabtastungen widerspiegelt.

Die Tagesleistung kann mit 100 bis 200 km pro Tag angegeben werden.

Der Kostenpunkt einer Messung beträgt ca. 50 bis 200 CHF pro Messkilometer.

7.83.5 Ergänzende Ausschreibungsanforderungen

Siehe Kapitel 7.1.5

7.83.6 Literaturverzeichnis

Sonstige Literatur / Forschungsberichte

[214] Lehmann + Partner GmbH

7.84 Lichtschnittverfahren

Ein weit verbreitetes Verfahren zur optischen Formerfassung ist das Lichtschnittverfahren. Hierbei wird eine Laserlinie auf die zu erfassende Oberfläche projiziert. Die Lichtebene schneidet das Messobjekt entlang einer Profillinie. Die reflektierte Profillinie wird auf einen Flächensensor projiziert. Entsprechend der Ebenheit und dem Verlauf der Linie in Abhängigkeit von der Objekthöhe, wird die Abbildung gekrümmt oder versetzt auf dem Flächensensor dargestellt. Durch eine Kalibrierung kann so auf eine dreidimensionale Oberflächenbeschreibung rückgeschlossen werden. In der Regel wird nur die projizierte Laserlinie ausgewertet, sodass ein Querprofil entsteht, bei der Form und Entfernung über den Schnittwinkel berechenbar sind.

7.84.1 Beschrieb der Technologie

Je nach Hersteller besteht das System aus ein oder zwei Modulen, die eine transversale Messbreite von 3 bis 4,5 m abdecken können. Weiterhin kann ein monochromes Oberflächenbild von aus den Daten berechnet werden, welches jedoch in der Regel nicht den Anforderungen an die Auswertung von Oberflächenschäden genügt. Das verwendete Laserlichtschnittverfahren hat je nach Hersteller eine Laserklasse 2 bis 4. Die Sensorköpfe, welche eine Laserlinie emittieren, werden in etwa 1 bis 2,4 m Höhe montiert. Die Laserlinie wird transversal auf die Strassenoberfläche projiziert und von einem Flächensensor detektiert (Siehe Abb. 7.103).

Aus der geometrischen Berechnung der rückprojizierten Laserlinie wird ein Querprofil berechnet. Bei Systemen mit mehreren Sensorköpfen muss das Querprofil aus mehreren Messungen zusammengesetzt werden, wodurch geometrische Unstetigkeitsstellen im Profil hervorrufen werden können. Herstellerseitig erfolgt die Auswertung der Spurrinne für die rechte und linke Rollspur mithilfe der beiden Sensorköpfe in der Regel separat. Eine Verknüpfung der beiden Sensoren zu einem Profil ist geometrisch teilweise auch fragwürdig, da beide Laserlinien keinen realen Schnittpunkt besitzen. Die Berechnungsvorschrift, bspw. [215] mit der virtuellen Lattensimulation kann nur umgesetzt werden, wenn beide Profileile exakt zusammengesetzt sind.

Die Berechnung der einzelnen Punkte im Querprofil ist abhängig von der Sensorauflösung. Es können theoretisch bis zu 4.000 Punkte auf 4 m im Querprofil (je Sensor 2.000 Punkte) ausgegeben werden. Die Synchronisierung erfolgt auf Grundlage des Odometersignals und kann auf die Einzellasersensoren vereinfacht werden.

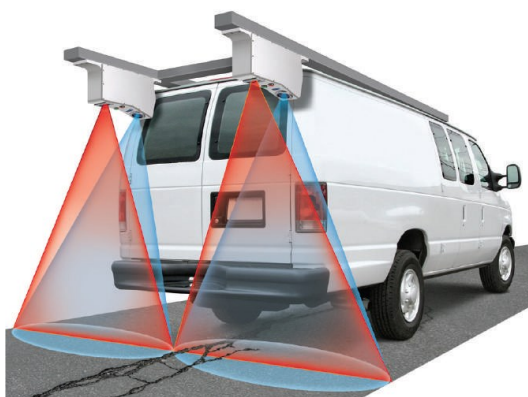


Abb. 7.103 Schema, zwei Laserlichtschnittverfahren: zwei rote Laserlinien werden auf die Strasse projiziert und von zwei Kameras unter einem definierten Winkel detektiert (blau) [216].



Abb. 7.104 Messfahrzeug IRIS 6 der Firma Lehmann + Partner Polska Spółka z o.o. [217].

7.84.2 Fragestellungen in den Fachbereichen

Fragestellung im Bereich Tunnel

Die Messungen können direkt auf Fahrbahnbefestigungen in Asphalt- oder Betonbauweise durchgeführt werden. Zur Erfassung des Trassees werden spezielle Mobile Mapping Systeme eingesetzt, die meist kombiniert sind mit bildgebenden Sensoren.

Die marktübliche Realisierung für die Erfassung eines Trassees ist die Verwendung mobilen Messplattform. Das System wird i.d.R. fahrzeugbasiert am Heck montiert. Das erfasste Querprofil folgt der Fahrspur des Fahrzeuges. Um Variationen bei Wiederholungsmessungen zu vermeiden, muss besonders auf die Fahrspurlage während der Erfassung geachtet werden. Die Messung erfolgt ohne Einschränkungen im laufenden Verkehr. Zu beachten sind die teils nicht augensicheren Systeme, wenn diese im öffentlichen Raum zum Einsatz kommen.

7.84.3 Datenerfassung, Raumbezug, Messgrößen und – Genauigkeit

Das Messsystem "Lichtschnittverfahren" verarbeitet die Messwerte rein digital. Die Erfassung ist abhängig von der projizierten Laserlinie auf der Fahrbahnoberfläche und deren Detektion.

Grundvoraussetzungen für die Querprofilerfassung:

- Erfassungsbreite: 3 bis 4 m
- Hohe Genauigkeit: 0,2 mm bis 1 mm
- Erfassungsbereich/Messbereich: min 1 m
- Erfassungsrate 0,6 bis 2 Mio. Punkte/Sek
- Roh-Profilpunkte im Querprofil: 1000 bis 2000
- Schnittwinkel Laserebene und Sensor: >30°

Wegmessung Odometer

- Toleranz der Messwegerfassung von 0,5 %
- Min 1000 pulse pro Rad Umdrehung
- Phase-Quadratur Encoder

Für die Querebenheit kann mit einer 0,1 mm Tiefenauflösung bei 0,25 mm Genauigkeit in der Einzelmessung ausgegangen werden. Durch Mittelung auf die 0,1 m-Intervalle ist eine Verbesserung der Standardabweichung von höchstens 0,2 mm zu erreichen (siehe oben), was auch die Ergebnisse in [218] bestätigen. Somit eignen sich die Laserlichtschnittsysteme mit diesen Spezifikationen von diesem Gesichtspunkt her zur Messung.

Ähnlich wie beim Messbalken gelten ebenfalls die Überlegungen zum Messbereich.

7.84.4 Entwicklungsstand, Anwendungsgrenzen, Kosten

Der Einsatz der Technologie für die Messung der Querebenheit ist als Stand der Technik einzustufen. Die Erfassung erfolgt im fliessenden Verkehr und benötigt keine gesonderten Sicherungsmassnahmen. Alle oben abgebildeten Laserscanner arbeiten mit einem Laserstrahl der Laserklasse 2 oder 4 und sind bedingt Augensicher, da der Messkopf sich i.d.R. bei ~1,5 m über Grund befindet.

Einschränkungen bestehen bei einigen Systemen hinsichtlich der geringen Wiederhohlfrequenz und damit auch in der maximalen Messgeschwindigkeit. Dies resultiert aus dem verwendeten Flächensensor, welcher bei einfachen Systemen nur mit 30 bis 60 Hz arbeitet. Dieses resultiert dann in grösseren Querprofilabständen der einzelnen Laserabtastungen, welches zu beachten ist.

Die Tagesleistung kann mit 100 bis 200 km pro Tag angegeben werden. Der Kostenpunkt einer Messung beträgt ca. 50 bis 200 CHF pro Messkilometer.

7.84.5 Ergänzende Ausschreibungsanforderungen

Siehe Kapitel 7.1.5

7.84.6 Literaturverzeichnis

Sonstige Literatur / Forschungsberichte

[215] Technische Prüfvorschriften für Ebenheitsmessungen auf Fahrbahnoberflächen in Längs- und Querrichtung - Teil: Berührungslose Messungen, Ausg. 2009 Hrsg., Köln: FGSV-Verl., 2009.

[216] Pavemetrics, Laser Crack Measurement System (LCMS®-2), <https://www.pavemetrics.com/applications/road-inspection/lcms2-en/>

[217] Lehmann + Partner GmbH

[218] T. Lundberg, P. Andrén, T. Wahlman, O. Eriksson, L. Sjögren und P. Ekdahl, „VTI rapport 961A | New technology for road surface measurement,“ 2018

E 3 Querneigung

Tab. 7.46 Querneigung - Übersicht

Fragestellung		E3 Querneigung		
Kurzbeschreibung Fragestellung		Die Querneigung (Quergerfälle) wird definiert als Gefälle der Fahrbahnoberfläche (oder darunterliegenden Schichten) rechtwinklig zur Strassenachse. Als Abkürzung wird «q» oder «QN» verwendet und erfolgt in Prozent. Speziell die Neigung ist ein spezifischer, lageabhängiger Winkel, welcher zwischen einer exakt horizontalen Ebene und einer realen Oberfläche bestimmt wird.		
Überwachungstechnologie		Neigungsmesser	inertiales Kreiselssystem	Laserscanner
"ID"		QnN_	QnK_	QnL_
Typisierung	a. Messprinzip	1 direkt	1 direkt	1 direkt
	b. Datenerfassung	5 optisch	5 optisch	7 laseroptisch
	c. Datenspeicher	1 digital	1 digital	1 digital
	d. Lokalisation	1 punktuell	1 punktuell	2 streckenbezogen
	e. Raumbezug	4 kein	2 separat	1 integriert
	f. Zustand	3 nicht zerstörend	3 nicht zerstörend	3 nicht zerstörend
Messgrößen und -genauigkeit	Größen	Querneigung in %	Winkel	g in % (Indirekt durch Auswertung)
	Untersuchungs-/Tiefenbereich	Oberfläche	Oberfläche	Oberfläche
	Auflösung	-	-	-
	Genauigkeit	0,01mm/m	0,001°	0,2mm
	Bemerkungen	-	IdR. in Kombination mit Laserdistanzsensoren	Extraktion aus Punktwolke, Laserklasse 1
Tunnel		2	1	3
Geotechnik		0	0	0
Naturgefahren		0	0	0
Umwelt		0	0	0
Einsatzzeitpunkt		V, W, N	W, N	W, N
Entwicklungsstand		●	●	●
Kosten	initial / einmalig	○	○	○
	wiederkehrend	○	○	○

Die Querneigung (auch Quergerfälle) wird definiert als Gefälle der Fahrbahnoberfläche (oder darunterliegenden Schichten) rechtwinklig zur Strassenachse. Als Abkürzung wird "q" oder "QN" verwendet und erfolgt in Prozent. 1 % Querneigung entspricht somit einer Höhendifferenz von 1 cm auf 1 m. Speziell die Neigung ist ein spezifischer, lageabhängiger Winkel, welcher zwischen einer exakt horizontalen Geraden oder Ebene und einer realen Oberfläche bestimmt wird.

Zentrale Aufgabe der Querneigung ist es, das Oberflächenwasser möglichst effektive von der Fahrbahnoberfläche abzuführen, um zum einen das Bauwerk vor eindringender

Feuchtigkeit zu schützen und zum anderen Wasseransammlungen und deren Folgen (Aquaplaning, Sprühfahnen- oder Glatteisbildung) an der Oberfläche zu verhindern.

Durch planerische Ansätze und Regewerke ist das Ziel durch spezielle Fahrbahnneigungen in Quer als auch in Längsrichtung den Wasserfilm unter dem Kritischen Mass von 2 mm zu halten (Aquaplaning). Die Grenz- und Richtwerte für die Querneigung sind in den folgenden Richtlinien angegeben, um ein möglichst hohes Mass an Funktionalität und Verkehrssicherheit gewährleisten zu können.

- VSS-40120 [219] Linienführung; Quergefälle in Geraden und Kurven, Quergefälleänderung (Schweiz)
- RAL: Richtlinien für die Anlage von Landstrassen (Deutschland)
- RVS 03.03.23 [220] Linienführung & Trassierung (Österreich)

Die Regelquerneigung von Fahrbahnen beträgt grundsätzlich $q = 2,5 \%$. Mit Zunahme der Geschwindigkeit und in Abhängigkeit von Strassenkategorie und Kurvenradius kann dieser Wert bis zu $q = 8 \%$ angehoben werden. Abweichungen nach oben und nach unten sind möglich, müssen aber im Einzelfall bewertet werden. Durch einen Wechsel der Querneigung entlang einer Achse entstehen in diesen Bereichen meist entwässerungsschwache Zonen besonders dann, wenn keine ausreichende Längsneigung vorhanden ist. Zur Verringerung dieser entwässerungsschwachen Zonen enthält die Richtlinie für die Anlage von Landstrassen [221] Angaben für eine Mindestschrägneigung. Untersuchungen zu den Auswirkungen bei fehlerhaft dimensionierter Querneigung auf die Verkehrssicherheit finden sich in [222][223]. Für eine Ermittlung des möglichen Einflusses von entwässerungsschwachen Zonen wird in Deutschland das Prüfkriterium der RAS-Ew (FGSV 2005B) [224] mit der Forderung einer Schrägneigung von $p \geq 0,5 \%$ angesetzt. Bereiche mit Nulldurchgängen in der der Querneigung werden in Abhängigkeit der Strassenklasse EKL – nach den RAL (FGSV 2012) [221] definiert. Geprüft wird die Neigung in den entwässerungsschwachen Bereichen über die Schrägneigung die wie folgt definiert ist:

$$p = \sqrt{(s^2 + q^2)}$$

p - resultierende Schrägneigung [%]

s - Längsneigung [%]

q - Querneigung [%]

7.85 Neigungsmesser

Mit einem Neigungsmesser können auf analoge oder elektronische Weise der angelegte Winkel bzw. die vorliegende Neigung bestimmt werden. Die Geräte sind einfach zu bedienen und transportabel ausgelegt. Folgende Neigungsmesser können unterschieden werden:

- analoge Wasserwaage mit Neigungslibelle
- digitaler 1-dimensionaler Neigungsmesser (digitale Wasserwaage)
- digitale 2-achsige Kompensatoren
- Digitale Theodolite und Tachymeter
- (indirekt) Nivelliere (analog und digital)

Weitere Möglichkeiten der indirekten Messung der Querneigung ist auch mit dem Profilografen möglich (Siehe 7.81)

7.85.1 Beschrieb der Technologie

Die Kontrolle der Querneigung erfolgt aufgrund des Messgerätes und der Effektivität Abschnittsweise alle 10 oder 25 m synchron zur Strassenachse. Die Messwerte werden Fahrspur- und Stationsbezogen erfasst. Ergebnis ist eine gleichabständige Messwerttabelle in der die jeweiligen fahrspurbezogenen Querneigungen eingetragen werden. Hierbei ist zu unterscheiden welche Technologie zum Einsatz kommt und ob die Auflösung des Messgerätes hinreichend dimensioniert ist.



Abb. 7.105 Präzisions-Wasserwaage [225].

Vorteile des analogen Auswerteverfahren:

- Das analoge Messprinzip ist optimiert für das Vermessen mit Handmessgeräten
- Schnelle Wertermittlung - effizienter Messprozess
- unempfindlich gegenüber tieffrequenten Störungen

Vorteile des digitalen Auswerteverfahren:

- höhere Messfrequenzen
- Messwert-Integration wird digital erfasst (Reduktion von Ablesefehlern)

- Mehrere Sensoren können synchronisiert werden, womit Reduktion von externen Störungen ermöglicht wird



Abb. 7.106 digitaler Neigungsmesser Clinotronic Plus [226].

Mit Umschlagsmessungen kann das absolute Null des Messgerätes ermittelt werden. Absolutes NULL bedeutet, dass das Gerät den Messwert „0“ anzeigt, wenn die Messfläche des Instrumentes absolut horizontal (senkrecht zur Erdanziehungskraft) ausgerichtet ist. Der absolute Nullpunkt wird automatisch aus einer Umschlagsmessung (zwei Messungen in entgegengesetzter Richtung, jedoch am selben Ort) ermittelt. Bei analogen Geräten Generationen muss die Umschlagsmessung manuell korrigiert werden. Bei Wasserwaagen sollte die Libelle entsprechend korrigiert werden.

Weiterhin wird unterschieden zwischen einer relativen Lokalisierung und einer absoluten Lokalisierung. Die Unterscheidung bezieht sich auf das verwendete Messsystem und deren Georeferenzierung. Bei der relativen Lokalisierung wird der erfasste Messwert im Nachhinein dem Bauabschnitt oder einer Stationierung zugeordnet. Dieses erfolgt zumeist direkt bei der Messung. Zuordnungsfehler können im Nachhinein nur schwer detektiert werden. Bei der Absoluten Lokalisierung werden direkt bei der Messung Koordinaten miterfasst, welches die eindeutige Zuordnung der Messwerte erleichtert.



Abb. 7.107 Tachymeter als Beispiel zur indirekten Bestimmung der Neigung über grosse Messentfernungen [227].

7.85.2 Fragestellungen in den Fachbereichen

Fragestellung im Bereich Tunnel

Der Einsatzzweck der Messung der Querneigung ist zum einem die Kontrolle der Planungsparameter bei Baufertigstellung und zum anderen das Monitoring der Strecken für Veränderungen des Baukörpers Aufgrund von Hangrutschungen oder anderen Baugrundbewegungen. Hierbei können je nach Art und Umfang der Messungen die oben genannten Messgeräte eingesetzt werden. Alle oben aufgezählten Messgeräte erfordern eine Sperrung der Fahrbahn um die Messung durchzuführen.

7.85.3 Datenerfassung, Raumbezug, Messgrößen und – Genauigkeit

Die Messung der Querneigung erfolgt i.d.R. alle 25 m als Querprofil mit hinreichend aufgenommen Mehrfachmessungen, damit grobe Fehler in den Messwerten detektiert werden können. Die Datenerfassung kann analog oder digital erfolgen. Bei der Erfassung der Querneigung ist auf die Apriori Genauigkeit des Messinstrumentes zu achten. Die Verortung der Messdaten sollte, wenn möglich, über einen absoluten Raumbezug erfolgen, um Zuordnungsfehler zu vermeiden.

Wasserwage: 0,02 - 0,5 mm/m (Kurze Messbasis)

Tachymeter/Nivellement: ~0,01 mm/m (Lange Messbasis)

Digitaler Neigungsmesser: ~10 µm/m: Messbereich von ±200 mm/m (Kurze Messbasis)

Die Messung erfolgt immer berührend mit der jeweiligen Fahrbahnoberfläche. Bei den Neigungssensoren werden direkt die Neigungen als % oder entsprechendes Winkelmaß ausgegeben. Bei den analogen Präzisionswasserwagen ist auf eine entsprechende Scala zu achten, welche linear die Neigungswerte widerspiegeln. Die Messgeräte Tachymeter und Nivellement erfassen Höhenänderungen zwischen 2 Messpunkten. Hier muss die Neigung aus dem Abstand der beiden Punkte und der Höhendifferenz ermittelt werden.

7.85.4 Entwicklungsstand, Anwendungsgrenzen, Kosten

Alle hier vorgestellten Messsysteme eignen sich für eine Neigungsmessung und werden vielfach in der Praxis eingesetzt. Die Anwendungsgrenzen beziehen sich hier hauptsächlich auf die Genauigkeit und die Effektivität des Verfahrens.

Wasserwage: Kontrollmessungen < 1 km – Für grosse Bauabschnitte nicht effektiv (ca. 300 bis 500 CHF/km)

Tachymeter/Nivellement: > 1 km für Kontroll-Prüfungen längerer Abschnitte (300 CHF/km)

Digitaler Neigungsmesser: Kontrollmessungen < 1 km – Für grosse Bauabschnitte nicht effektiv (400-600 CHF/km)

7.85.5 Ergänzende Ausschreibungsanforderungen

Siehe Kapitel 7.1.5

7.85.6 Literaturverzeichnis

Sonstige Literatur / Forschungsberichte

-
- [219] VSS-40120 SN 640 120 Linienführung; Quergefälle in Geraden und Kurven, Quergefältsänderung, 2019.
-
- [220] RVS 03.03.23 Linienführung und Trassierung, FGSV-Verl., 2014.
-
- [221] Richtlinien für die Anlage von Landstrassen, Ausg. 2012 Hrsg., Köln: FGSV-Verl., 2012.
-
- [222] B. Wessel, C. Wiedemann und H. Ebner, „The role of context for road extraction from SAR imagery,“ 2003.
-
- [223] C. Lippold, T. Lehmann, A. Veters, W. Ressel und A. & Benner, „Entwurfshinweise zum sicheren sechsstreifigen Ausbau von Autobahnen,“ Forschung Strassenbau und Strassenverkehrstechnik, Heft 1018, p. 110, 2011.
-
- [224] Richtlinien für die Entwässerung von Strassen, 2021.
-
- [225] ELMAG Entwicklungs- und Handels-GmbH, Präzisions-Wasserwaage, <https://www.elmag.at/de/praezisions-wasserwaage-de9995e4-4f84-4497-b1ae-8066e356d2de.html>
-
- [226] WYLER AG, wylerClino / Clinotronic, <https://www.wylerag.com/de/produkte/neigungsmessgeraete/wylerclino-clinotronic/>
-
- [227] Théodolite DTM-A20 (face arrière - cercle à gauche), <https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/0/0c/DTM-A20LG-04.jpg> (Zugriff 26.02.2024)
-

7.86 Inertiales Kreissystem

Ein inertiales Kreissystem (englisch inertial measurement unit, IMU) basiert auf einer Kombination mehrerer Sensoren (Beschleunigungssensoren und Drehratensensoren). Die ursprüngliche Entwicklung von Kreissystemen kommt aus der Navigation von Raketen und der Luftbildbefliegung. Das System erfasst gleichzeitig alle drei Rotationswinkel (Roll-Nick- und Gierwinkel) der Messplattform sowie alle auftretenden Beschleunigungswerte, relativ zur Gravitationskraft. Da das Kreissystem eine gewisse Drift über die Zeit im Heading Winkel aufweist, wird es in der Praxis durch eine GNSS Positionsbestimmung gestützt.

Der Sensor wird auf mobilen Messplattformen eingesetzt und bestimmt die Lage der Plattform im Raum. Die Lage im Raum orientiert sich am Erdschwerefeld und repräsentiert die Messplattform. Um eine reale Neigung messen zu können, ist weiterhin der Verkipfungswinkel zwischen der Messplattform und der Fahrbahnoberflächen zu ermitteln. Ohne diese Offsetmessung wird nur die Neigung der Messplattform bestimmt und weicht in der Regel durch die Dynamik der Plattform und deren verwendete Federdämpfersysteme von der realen Querneigung ab.

Die Realisierung kann mit zwei einfachen Laserdistanzsensoren erfolgen die transversal zur Fahrtrichtung verbaut sind. Die Abweichung beider Distanzsensoren ist als Winkeloffset zum Messwert der IMU anzubringen.

7.86.1 Beschrieb der Technologie

Die Technologie wird vorrangig in der Luftfahrt und im Mobile Mapping Bereich für Messzwecke eingesetzt. Die verwendeten Systeme richten sich in der Regel nach Einsatzzweck (Genauigkeit) und Gewicht. Die Drehratensensoren können hierbei wie folgt kategorisiert werden:

- Mechanische Gyroskope (werden i.d.R. nicht mehr verwendet)
- Faser-optische-Kreisel (englisch fibre optic gyroscope, FOG)
- MEMS- Halbleitersensoren

Bei geringen Stabilitätsanforderungen finden mikro-elektro-mechanische Systeme (MEMS) Anwendung, welche sich direkt in integrierten Schaltkreisen realisieren. Die Langzeitstabilität ist hingegen um mehrere Faktoren schlechter als zu den Faser-optischen Kreissystemen: Die Drift kann im Vergleich bei einem Faserkreissystem mit $0,003^\circ$ pro Stunde angegeben werden. Bei einem sehr preiswerten MEMS-basierenden Drehratensensor auf Halbleiterbasis kann die Driftrate bei ca. 30° pro Stunde liegen.



Abb. 7.108 faseroptischer Kreisel [228].

Die Messungen erfolgen mit einem Mobile Mapping System während der Fahrt und fahrstreifenbezogen. Die Querebenheitsmessungen können im laufenden Verkehr bei 80 - 100 km/h stattfinden. Die Voraussetzungen hierfür sind eine hinreichend hochfrequente Datenerfassung des Kreisel systems (min. 200 Hz) und eine synchrone Messung des Offsetwinkels zwischen der Messplattform und der Strassenoberfläche. Durch die GNSS-Kreiselstabilisierung und den Orientierungswinkeln der IMU können somit Querneigungen berechnet werden die eine direkte Georeferenzierung besitzen. Mit diesen Systemen lassen sich sehr hochfrequent in einem Abstand von 1 m Querneigungsdaten erfassen.

7.86.2 Fragestellungen in den Fachbereichen

Fragestellung im Bereich Tunnel

Der Einsatzzweck der Messung der Querneigung ist zum einem die Kontrolle der Planungsparameter bei Baufertigstellung und zum anderen das Monitoring der Strecken für Veränderungen des Baukörpers Aufgrund von Hangrutschungen oder anderen Baugrundbewegungen. Das hier vorgestellte Messsystem erfordert keine Sperrung der Fahrbahn um die Messung durchzuführen. Es kann aufgrund der Fahrzeugbreite bzw. der Breite der Messplattform nur einen Fahrstreifen erfassen.

7.86.3 Datenerfassung, Raumbezug, Messgrößen und – Genauigkeit

Die Messung der Querneigung erfolgt i.d.R. alle 1 m als georeferenzierter Winkelwert. Die Datenerfassung erfolgt rein digital. Bei der Erfassung der Querneigung ist auf die Apriori Genauigkeit des Kreisel systems und der Lasersensoren für den Offsetwinkel zwischen Messplattform und Fahrbahnoberfläche zu achten (soll 0,04°).

- Faser-optische-Kreisel – Genauigkeit roll: 0,005° - 0,02°
- MEMS- Halbleitersensoren: Genauigkeit roll: 0,02° - 1°
- Lasersensoren – Siehe Lasersensoren Kapitel 7.82

Die Messung erfolgt berührungslos. Die Neigungen wird berechnet aus den Winkelwerten der IMU und dem Offsetwinkel der beiden Lasersensoren und als % Wert oder entsprechendes Winkelmass ausgegeben. Alle Messwerte sind georeferenziert und können direkt in ein CAD oder GIS-System übernommen werden. Die Zuordnung der Station erfolgt im Postprocessing.

7.86.4 Entwicklungsstand, Anwendungsgrenzen, Kosten

Das Messsystem eignet sich besonders für einen schnelle effiziente Erfassung der Querneigung auf einem Fahrstreifen und wird bereits vielfach in der Praxis eingesetzt. Die Anwendungsgrenzen beziehen sich hier hauptsächlich auf die Genauigkeit des Verfahrens.

Die Vermessung ist für grössere Streckenabschnitte > 1 km und für Kontrollprüfungen geeignet. Der Preis kann mit ca. 300 CHF/km angegeben werden. Berücksichtigt werden muss das die Anfahrtkosten eines Mobile Mapping-Fahrzeuges i.d.R. höher ist.

7.86.5 Ergänzende Ausschreibungsanforderungen

Siehe Kapitel 7.1.5

7.86.6 Literaturverzeichnis

Sonstige Literatur / Forschungsberichte

- [228] Applanix, Position and orientation systems for land vehicles (POS LV), https://www.applanix.com/downloads/products/brochures/LandBrochure_2017_web.pdf

7.87 Laserscanner

Laserscanner werden im Folgenden als 2D/3D Erfassungsgeräte definiert, welche mit Hilfe eines modulierten oder gepulsten Laserstrahls und einer Ablenkeinheit die Umgebung durch eine nicht zielgerichtete, punktförmige und flächendeckende Abtastung erfassen. Das Ergebnis ist eine dreidimensionale Punktwolke, welche im weiteren Prozessverlauf analysiert wird. Laserscanner können hinsichtlich ihrer Erfassungstechnologie und ihres Einsatzzwecks differenziert werden. Zusätzlich können Laserscanner, für die Automatisierung der Erfassung auf unterschiedlichen Trägersystemen eingesetzt werden, wodurch sich Unterschiede bei der Erfassungsgenauigkeit ergeben können. Weitere Erklärungen sind im Kapitel 7.79 Längsebenheit– Laserscanner zu finden.

7.87.1 Beschrieb der Technologie

Die Typisierung der Laserscanner erfolgt zum einen durch das Aufnahmeprinzip der Entfernungsmessung und zum anderen über den Sichtbereich und deren Genauigkeit. Laserscanner mit einer Genauigkeit >1 cm werden hier nicht weiter betrachtet, da diese für die Querneigungsmessung nicht hinreichend sind.

Unterteilung in Anwendungs- und Genauigkeitsklassen

Für die Erfassung der Querneigung eignen sich die Umfeldlaserscanner aufgrund Ihrer schlechteren Einzelpunktgenauigkeit weniger. Hier müsste man auf spezielle statistische Verfahren zurückgreifen um das Rauschen der Einzelpunkte zu minimieren. Theoretisch würden sich auch Umfeldscanner für die Berechnung der Querneigung eignen, wenn eine hinreichende Anzahl von Laserscannerpunkte zur Mittelung herangezogen werden. Zur Erfassung der Querneigung ist ein Oberflächenscanner mit einer Messbreite von ~ 4 m ideal

Oberflächenscanner:

- Eingeschränkter Öffnungswinkel $\sim 70^\circ$
- Hohe Genauigkeit 0,2 mm -1 mm
- Eingeschränkter Erfassungsbereich 1-5 m
- Erfassungsrate 0,6 -2 Mio. Punkte/Sek

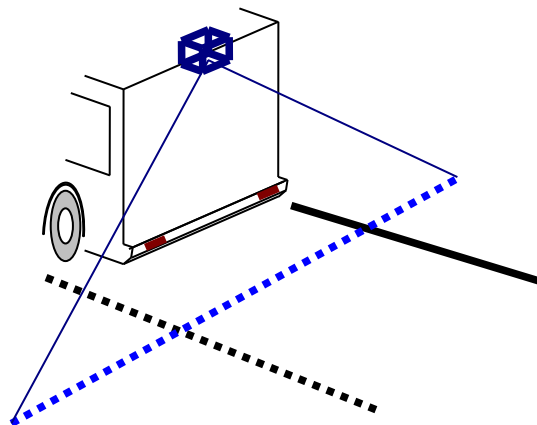


Abb. 7.109 Prinzipskizze der Aufnahme der Strassenoberfläche für die Berechnung der Querneigung [229].

Die Erfassung von Querneigung, Längsneigung, Querebenheit und Längsebenheit kann mit dieser Art von Systemen gleichzeitig erfolgen.

Erfassung von Querprofilen

Durch Bewegung des Trägersystems, auf dem der Laserscanner montiert ist, können Punktwolken (Oberflächenmodelle) der Umgebung erfasst werden. Dazu ist die Kombination des Sensors mit einem hochgenauen Positionierungssystem erforderlich, um

die Verortung der erfassten Datenpunkte in einem lokalen oder globalen Koordinatensystem zu ermöglichen.

Aus dieser Punktwolke werden dann im Nachgang die zur Erfassung notwendigen Lasersensoren extrahiert. Damit ist die Technologie komplementär zum Kreiselssystem jedoch mit einer grösseren Anzahl von Quermesswerten über die Erfassungsbreite. Durch die höhere Anzahl von Messpunkten wird eine bessere Repräsentation der Querneigung realisiert.

7.87.2 Fragestellungen in den Fachbereichen

Fragestellung im Bereich Tunnel

Der Laserscanner eignet sich für die Messung von Querneigungen auf Fahrbahnbefestigungen. Die Messungen können direkt auf Fahrbahnbefestigungen in Asphalt- oder Betonbauweise durchgeführt werden. Zur Erfassung eines Trassees werden spezielle Mobile Mapping Systeme eingesetzt, die meist kombiniert sind mit bildgebenden Sensoren. Alle weiteren Punkte sind identisch mit dem Kapitel 7.79.2.

Umsetzung der Technologie

Die Erfassung der Querneigung basiert auf Grundlage einer erfassten 3D-Oberfläche. Die Daten werden auf Grundlage einer dreidimensionalen Punktwolke generiert, die vorliegend aus den Daten des Laserscanners, in Kombination mit einem hochgenauen Positionierungssystem gewonnen werden.

Aus den einzelnen Laserscanneraufnahmen leiten sich die Querprofile ab, welches nach einer Filterung in eine Folge von Quermesspunkten mit definiertem Messpunktstand (z.B. 10 cm) überführt werden kann. Aus dieser Messfolge berechnet sich dann die resultierende Querneigung. Mit dem gleichen Verfahren kann analog auch eine Längsneigung realisiert werden.

7.87.3 Datenerfassung, Raumbezug, Messgrößen und – Genauigkeit

Die Datenerfassung findet rein digital statt. Der Raumbezug ist durch das verwendete Positionierungssystem realisiert und kann somit an die jeweilige Strassenkilometrierung projiziert werden. Die Rohdaten Querprofile werden, abhängig von der Berechnungsvorschrift des jeweiligen Index, mit unterschiedlicher Rasterweite erzeugt und anschliessend in der Regel in Mittelwerte (z.B. 1 m oder 20 m) überführt. Die zu erreichende Genauigkeit ist vom eingesetzten Laserscanner und dem Positionierungssystem bzw. Kreiselssystem abhängig. Empfehlungen für die zu verwendenden Hardwarespezifikation zur Erfassung der Querneigung mit einem Laserscanner:

Laserscanner:

- Punktgenauigkeit: 0,2 - 0,5 mm
- Erfassungsrate >1 Mio. Punkte/Sek

Positionierungssystem:

- Inertialsystem ist zwingend erforderlich (Kreiselssystem)
- Winkelgenauigkeit: < 0.02°
- Lagegenauigkeit: 2-10 cm

7.87.4 Entwicklungsstand, Anwendungsgrenzen, Kosten

Der Einsatz der Technologie für die Messung der Querneigung ist als relativ neu einzuschätzen, so dass derzeit weniger als 10 Fahrzeuge in den Ländern Deutschland, Österreich und Schweiz mit dieser Technik regelmässige Messungen durchführen.

Die Erfassung erfolgt im fließenden Verkehr. Die Laserscanner sollten mit einem Laserstrahl der Laserklasse 1 arbeiten und sind damit Augensicher.

Die Tagesleistung kann mit 100-200 km pro Tag angegeben werden.

Der Kostenpunkt einer Messung kann mit 50-200 CHF angegeben werden.

7.87.5 Ergänzende Ausschreibungsanforderungen

Siehe Kapitel 7.1.5

7.87.6 Literaturverzeichnis

Sonstige Literatur / Forschungsberichte

[229] Lehmann + Partner GmbH

8 Aufstrebende Technologien

8.1 Kamera-basiert / Daedalus

8.1.1 Beschreibung der Technologie

Die Entwicklung zuverlässiger und aus der Ferne zugänglicher Digitalkameras und Computer-Vision-Algorithmen hat in den letzten Jahren eine kamerabasierte Infrastrukturüberwachung ermöglicht. Bildverarbeitungs-basierte Systeme bieten vielversprechende Werkzeuge für die kontinuierliche Messung von Verschiebungen in Bauwerken. Sie haben gegenüber herkömmlichen Verschiebungssensoren Vorteile bei den Gerätekosten, dem Installationsaufwand und der Messkapazität in Bezug auf die räumliche Auflösung.

Die Anwendung eines bildverarbeitungs-basierten Systems zur Überwachung von Strukturverschiebungen erfordert die Aufstellung einer oder mehrerer Kameras an einem stabilen Ort, die Beobachtung des "Ziels" in einer Struktur und die Ableitung der Strukturverschiebung durch Zielverfolgung. Das Messziel kann dabei künstlich (z. B. eine vorinstallierte Markierung, eine LED-Lampe oder eine ebene Platte mit speziellen Mustern) oder ein vorhandenes Strukturmerkmal (z.B. Bolzen oder Löcher) sein. Für die Auswertung ist die Software zur Bildverarbeitung von entscheidender Bedeutung. Die Software erfasst die (Video-)Bilder, verfolgt die Zielpositionen in den Bildsequenzen und transformiert schliesslich die Zielpositionen im Bild zu strukturellen Verschiebungen über den Zeitverlauf [230].

Zu den ersten Anwendungen der kontinuierlichen Überwachung von Bauwerksverformungen mit Hilfe von CCD-Arrays (Charge-Coupled Device) gehörten die Humber Bridge und die Severn Bridge im Vereinigten Königreich [230][231].

Ein auf Bildverarbeitung basierendes Messsystem, das besonders für Anwendungen in der Bauwerksüberwachung interessant ist, ist die Kombination von CCD mit herkömmlichen Totalstationen, wodurch bildgestützte Totalstationen (IATS) gemeint sind [233]. Die Genauigkeit der Winkelmessungen des Tachymeters (siehe Kapitel 7.4) wird mit der Photogrammetrie (siehe Kapitel 7.22) und der damit verbundenen einfachen Zielmarkenbestimmung kombiniert. Durch den Einsatz von Fernrohr-linsen kann der Abstand zum Bauwerk auf über 50 Meter vergrössert werden. Das Anbringen von Zielmarken am Objekt kann durch die photogrammetrische Auswertung von bauwerksspezifischen Markierungen entfallen, wenn solche Unterscheidungsmerkmale am Bauwerk vorhanden sind. Durch die kontinuierliche Verfolgung und Identifizierung eines Ziels auf der Struktur wird die Strukturverschiebung durch eine Kreuzkorrelationsanalyse zwischen dem vordefinierten Muster und den aufgenommenen digitalen Bildern mit Hilfe eines Mustervergleichsalgorithmus abgeleitet [232].

Daedalus-System

DAEDALUS bezeichnet ein Messsystem, das am Labor für Geodäsie und Geodynamik (GGL) der ETH Zürich konzipiert und entwickelt wurde. Während das Daedalus-System in erster Linie entwickelt wurde, um das Problem der persönlichen Beeinflussung im Zusammenhang mit zeitrelevanten Beobachtungen in der geodätischen Astronomie zu überwinden, machen die Eigenschaften des Systems es für die Infrastrukturüberwachung interessant [235]. Das Daedalus-System besteht aus einer CCD-Kamera, die auf eine Totalstation aufgesteckt wird (Abb. 8.110), einer aufsteckbaren Frontlinse und einer Verbindung zu einem Computer, der die Kamera auslöst und die Bilder speichert und nachbearbeitet. Die Verwendung eines GPS-Timers in der CCD-Kamera ermöglicht eine präzise Zeitmessung und Synchronisierung zwischen mehreren Totalstationen.



Abb. 8.110 Das Herzstück des QDaedalus-Systems besteht aus digitalen Kameras, die auf herkömmlichen Totalstationen montiert sind [234].

Das System bietet neue Möglichkeiten für vollautomatische, hochpräzise digitale Winkelmessungen im Freien, die nicht durch menschliche Eingriffe beeinflusst werden. Darüber hinaus ist die Software in der Lage, eine optische Zielerkennung unter Verwendung verschiedener Bildverarbeitungsalgorithmen wie Least-Squares-Template-Matching, Kreiserkennung oder Center-of-Mass-Operatoren durchzuführen. Das Daedalus-System bietet vollautomatische und hochpräzise Messungen von Strukturverschiebungen an diskreten Stellen, ohne die Verwendung von Eckwürfelzielen, die bei der standardmässigen automatischen Objekterkennung verwendet werden. Elektronische Schnittstellen zur Hardwaresynchronisation mehrerer Daedalus-Systeme ermöglichen berührungslose, dreidimensionale Messungen an mehreren Punkten der Struktur [234]. Das Messprinzip ist in Abb. 8.111 dargestellt, wobei die Verfolgung des LED-Ziels mittels optischer Zielerkennung (OTR) erfolgt [235].

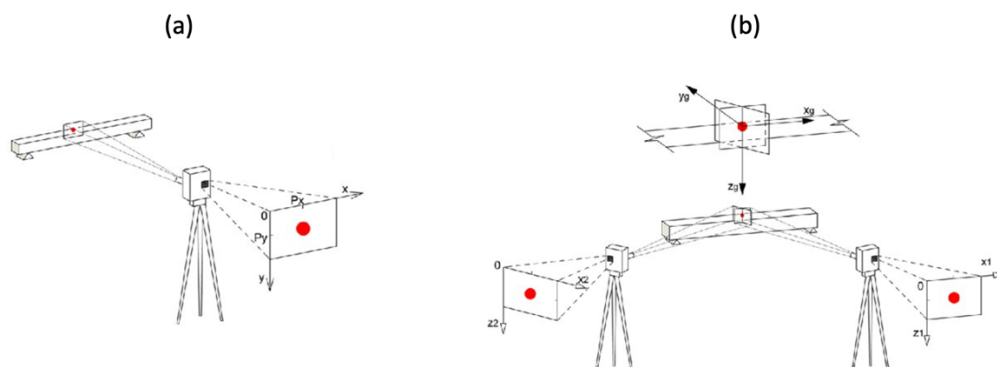


Abb. 8.111 Skizze des Überwachungsprinzips des Daedalus-Systems: a) Die Pixelposition des LED (roter Kreis) wird in einem zweidimensionalen lokalen Koordinatensystem abgerufen. b) Unter Verwendung von zwei Daedalus-Systemen an verschiedenen Kontrollpunkten kann die dreidimensionale Verschiebung des LED-Targets aus den beiden lokalen, planaren Koordinatensystemen rekonstruiert werden [236].

8.1.2 Forschungsstand, Anwendungsgrenzen und Potential

IATS und insbesondere das Daedalus-System haben ihr Potenzial an realen Bauwerken unter Aussenbedingungen in Anwendungsbeispielen gezeigt (siehe Abschnitt 8.1.5). Das praktische Potenzial dieser Technologie für die Anwendung ist jedoch begrenzt durch:

- Die Kosten für Totalstationen, insbesondere wenn räumlich dicht beieinander liegende Messpunkte erforderlich sind.
- Die Exposition des Messsystems, das für Langzeitüberwachungsanwendungen einen vor rauen Umgebungsbedingungen geschützten Standort benötigt, da es nicht wasserdicht ist und die Kompatibilität mit Temperaturen unter 0 nicht getestet wurde.
- Die riesige Datenmenge, die das System produziert, schränkt die Kapazität für das Streaming von Daten vor der Nachbearbeitung stark ein.

Der Vorteil der Montage von Kameras auf hochpräzisen Totalstationen liegt in der höheren Messgenauigkeit (Sub-mm-Bereich) [236] im Vergleich zu anderen bildverarbeitungs-basierten Methoden.

Ein Vergleich der Frequenzspektren des Daedalus-Systems mit kommerziellen Beschleunigungsmessern hat gezeigt, dass das Daedalus-System eine bessere Empfindlichkeit bei der Messung von Verschiebungen und Beschleunigungen bis zu einer Frequenz von etwa 3 Hz aufweist [234].

8.1.3 Einsatzzweck und Fragestellung im Bereich

Fragestellungen im Bereich Tunnel

Mögliche Anwendungen im Bereich Tunnel sind insbesondere die Aussenbereiche:

- Überwachung des Deformationsverhalten im Portalbereich und von Baugrubenwänden,
- Überwachung von sensitiven Bauten oberhalb bzw. im Einflussbereich der Tunnelbauten.

Fragestellungen im Bereich Naturgefahren

Mögliche Anwendungen im Bereich Naturgefahren sind:

- Überwachung von Felsinstabilitäten.

8.1.4 Datenerfassung, Messgrössen und Genauigkeit

- Bei den erfassten Daten handelt es sich um digitale Bilder, die von einer auf einer Totalstation montierten Kamera aufgenommen werden.
- Diese Technik liefert relative und absolute Verschiebungen an Zielpunkten, die entweder aus Markern, wie LED-Zeigern, oder aus charakteristischen Objekten bestehen können, die auf der Oberfläche deutlich zu erkennen sind.
- Mit Hilfe von externen Controllern können die Bilder zwischen mehreren Totalstationen synchronisiert werden, was dreidimensionale Verschiebungsmessungen und Messungen von mehreren Punkten ermöglicht.
- Bei der Datenerfassung entsteht ein sehr grosser Datensatz, der mit der Kameraauflösung und der Anzahl der gespeicherten Bilder (d. h. der Frequenzrate) zunimmt. Ausserdem begrenzt die grosse Menge an Datenproben (Bilder) die Abtastfrequenz, die mit typischen Laptops erreicht werden kann, auf etwa 30 Hz [236].
- Da alle Daten digital vorliegen, ist es möglich, einen Fernzugriff auf die Daten einzurichten.

Die Genauigkeit des Daedalus-Systems hängt von der Kameraauflösung, dem Abstand zwischen Kamera und Struktur und, in geringerem Masse, von der maximal zu messenden Verschiebung ab. Bei Aussenanwendungen ermöglicht die Synchronisierung mehrerer Daedalus-Systeme die berührungslose Messung dreidimensionaler Verschiebungen mit einer Genauigkeit von 0,01 mm bei einer Abtastrate von 60 Hz in drei Dimensionen [234].

8.1.5 Anwendungsbeispiele, Pilotanwendungen

Das Daedalus-System wurde in einem Feldversuch von Swisstopo für die Überwachung einer Staumauer (Montsalvens) verwendet (siehe Abb. 8.112,) [237]. Dabei wurden klassische Zielmarken und Messbolzen mittels automatisierter Daedalus Messungen und halbautomatischen "von Auge erfassten" Totalstation Messungen anvisiert. Das Daedalus-System wurde an einer Totalstation mit einer Winkelmess-Genauigkeit von 1 arcsec (0.3 mgon) verbaut. Für die von Auge erfassten Messungen wurde eine Totalstation mit 0.5 arcsec (0.15 mgon) Winkelmess-Genauigkeit verbaut.

Die Erfassung und Messung der Zielmarken erfolgte mit dem Daedalus-System schneller als mit einer klassischen Totalstation. Für die Installation des Daedalus-Systems wird jedoch mehr Zeit benötigt. Die Messung mittels Dadealus weist eine höhere Genauigkeit auf als die Messung mittels klassischer Totalstation [234].

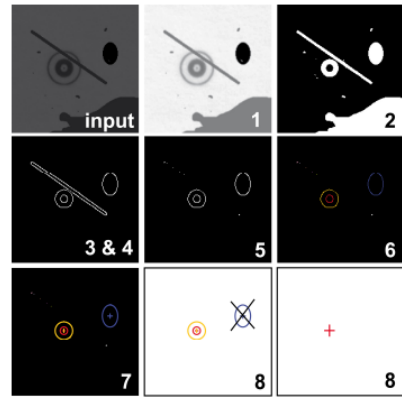


Abb. 8.112 Anwendung des Daedalus-Systems bei der Staumauer "Montsalvens" (links, [237]) und die Verarbeitungsschritte eines Algorithmus für die Zielerkennung eines Daedalus-Systems (rechts, [234]).

Die Überwachung starrer Strukturen mit Modalfrequenzen von mehr als 5 Hz, wie z.B. viele zivile Infrastruktursysteme, mit Verschiebungen im Sub-mm-Bereich wurde vom Labor für Geodäsie und Geodynamik der ETH Zürich in Zusammenarbeit mit dem Institut für Hochbau der ETH Zürich und der EMPA getestet. Das Daedalus-System wurde zur Überwachung der Verschiebung eines starren Balkenprototyps und zur Schätzung seiner modalen Frequenzen bis zu 30 Hz eingesetzt (siehe Abb. 8.113 rechts). Die Ergebnisse der Daedalus-Datenanalyse wurden mit denen von Beschleunigungsmessern verglichen und erwiesen sich als ausreichend genau und als geeignete Ergänzung zu den bestehenden Überwachungstechniken [236].

Darüber hinaus wurde das System auf einer Stahlbrücke über die Rhone getestet, die von Lastwagen befahren wird (siehe Abb. 8.113 links). Die Messungen wurden von der Fachhochschule Yverdon-les-Bains mit einem Leica TCA 2003, ausgestattet mit Daedalus, geplant und durchgeführt. Das Ziel war eine Standardtaschenlampe (siehe Abb. 8.113 links), die in der Mitte der Brücke befestigt wurde. Der Abstand zwischen der Totalstation und der Lampe betrug 40 Meter [235]. Die robuste Verfolgung des Lichts der Fackel wurde bei Tageslicht durch Anwendung eines angepassten Schwellenwerts für die Hintergrundsubtraktion erreicht. Die vertikalen Bewegungen der Brücke konnten verfolgt werden und ermöglichten die Extraktion der vertikalen Auslenkung und der gedämpften Schwingung bei der Eigenfrequenz (2,59 Hz).



Abb. 8.113 Anwendung des Daedalus-Systems auf einer Stahlbrücke über die Rhone im Kanton Wallis (links, [236]) und an einem starren Prototyp-Träger in den ETH-Versuchsanlagen (rechts, [235]).

8.1.6 Literaturverzeichnis

Sonstige Literatur / Forschungsberichte

-
- [230] Xu, Y., Brownjohn, J.M.W. Review of machine-vision based methodologies for displacement measurement in civil structures. *J Civil Struct Health Monit* 8, 91-110 (2018).
<https://doi.org/10.1007/s13349-017-0261-4>
-
- [231] Stephen, G. A., J. M. W. Brownjohn, und C. A. Taylor. "Messungen der statischen und dynamischen Verschiebung durch visuelle Überwachung der Humber-Brücke". *Engineering Structures* 15, no. 3 (1993): 197-208.
-
- [232] Ye, X. W., Y. Q. Ni, T. T. Wai, K. Y. Wong, X. M. Zhang, und F. Xu. "Ein bildverarbeitungs-basiertes System zur dynamischen Messung der Verschiebung von Brücken mit grosser Spannweite: Algorithmus und Verifizierung". *Smart Structures and Systems* 12, no. 3_4 (2013): 363-379.
-
- [233] Zschiesche, Kira. "Image Assisted Total Stations for Structural Health Monitoring-A Review". *Geomatics* 2, no. 1 (2021): 1-16.
-
- [234] Guillaume, Sébastien, Jonas Clerc, Claude Leyder, Jérôme Ray, und Matthias Kistler. "Contribution of the image-assisted theodolite system QDaedalus to geodetic static and dynamic deformation monitoring." (2016) In *3rd Joint International Symposium on Deformation Monitoring (JISDM)*.
-
- [235] Bürki, B., Guillaume, S., Sorber, P. und Oesch, H.P., 2010, September. DAEDALUS: Ein vielseitig einsetzbares digitales Aufsteckmesssystem für Totalstationen. In *2010 International Conference on Indoor Positioning and Indoor Navigation* (S. 1-10). IEEE.
-
- [236] Charalampous, E., Psimoulis, P., Guillaume, S., Spiridonakos, M., Klis, R., Bürki, B., Rothacher, M., Chatzi, E., Luchsinger, R. und Feltrin, G., 2015. Messung von Strukturverschiebungen im Sub-mm-Bereich mit QDaedalus: ein für Totalstationen entwickeltes digitales Clip-On-Messsystem. *Applied Geomatics*, 7(2), pp.91-101.
-
- [237] Sievers, Beat; Wiget Adrian; Huser René; Federer Urs (2021): Beiträge der Geodäsie zur Talsperrensicherheit - Zum 100-jährigen Jubiläum der Talsperrenvermessungen in der Schweiz. Sumiswald / Melligen / Dübendorf / Villigen, 87 Seiten. URL: https://emuseum.gggs.ch/eexpo-talsperren/files/Bericht_Talsperrenvermessungen.pdf (Zugriff 31.03.2023)
-

8.2 CV/KI basierte Schadensdetektion

8.2.1 Beschreibung der Technologie

Computer Vision (CV; Künstliche Intelligenz KI) ist ein interdisziplinäres wissenschaftliches Gebiet, das sich mit der automatischen Extraktion nützlicher Informationen aus Bilddaten befasst, um die zugrundeliegende physikalische Welt zu verstehen oder darzustellen, entweder qualitativ oder quantitativ [238]. CV-Methoden können zur Automatisierung von Aufgaben des menschlichen visuellen Kortex eingesetzt werden. Die ersten Bemühungen für die Anwendung von Computer-Vision-Methoden begannen in den 1960er Jahren und zielten auf die Extraktion von Forminformationen über Objekte anhand von Kanten und primitiven Formen (z.B. Kästchen) ab [239]. Mit der Entwicklung verschiedener Darstellungen von Bildmustern begannen CV-Methoden, komplexere Wahrnehmungsprobleme zu berücksichtigen. CV-Techniken sind im Bauwesen als eine Schlüsselkomponente für eine verbesserte Inspektion und Überwachung anerkannt worden. Bilder und Videos sind zwei wichtige Arten von Daten, die mit Hilfe von Computer-Vision-Techniken analysiert werden. Bilder erfassen visuelle Informationen, die denen von menschlichen Inspektoren ähneln. Aufgrund dieser Ähnlichkeit ist eine Computerimplementierung der Bauwerksinspektion zu erwarten, die der visuellen Inspektion durch menschliche Inspektoren entspricht. Darüber hinaus können Bilder Informationen aus dem gesamten Sichtfeld berührungslos kodieren, wodurch die Herausforderungen der Überwachung mit Kontaktsensoren gelöst werden können.

Videos sind eine Abfolge von Bildern, bei denen die zusätzliche Zeitdimension wichtige Informationen sowohl für Inspektions- als auch für Überwachungsanwendungen liefert, angefangen bei der Erfassung des Kontexts, wenn Bilder aus mehreren Ansichten aufgenommen werden, bis hin zur dynamischen Reaktion der Struktur, wenn hohe Abstraten verwendet werden. Darüber hinaus bieten solche bildverarbeitungsbasierten Ansätze in Verbindung mit Kameras und unbemannten Luftfahrzeugen (UAVs) das Potenzial für eine schnelle und automatisierte Inspektion und Überwachung zur Zustandsbewertung ziviler Infrastrukturen.

Die jüngsten Fortschritte im Bereich der Computer-Vision-Techniken wurden vor allem durch das End-to-End-Lernen mit künstlichen neuronalen Netzen (ANNs) und Faltungsneuronalen Netzen (CNNs) vorangetrieben. In ANNs und CNNs wird eine komplexe Input-Output-Beziehung von Daten durch eine parametrisierte, nichtlineare Funktion angenähert, die mit Hilfe von als Knoten bezeichneten Einheiten definiert wird. Diese Algorithmen haben bemerkenswerte Erfolge bei der Entwicklung von Wahrnehmungssystemen für hochkomplexe visuelle Probleme erzielt. Ein Beispiel für eine CNN-Architektur zur semantischen Segmentierung In Abb. 8.114 ist anhand eines Flussdiagramms ein möglicher Prozess für die Schadensdetektion mittels CV dargestellt.

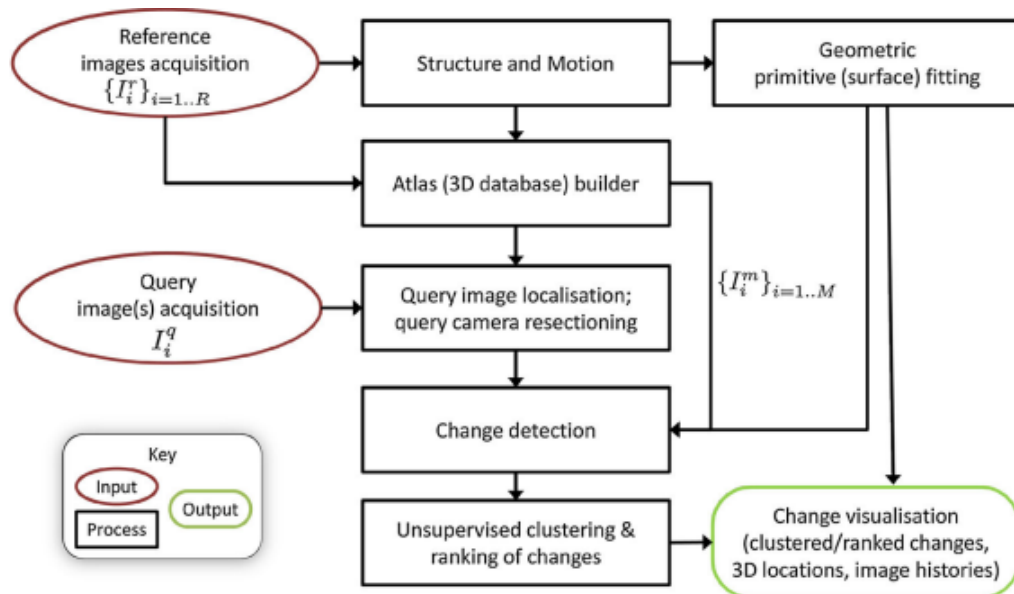


Abb. 8.114 Flussdiagramm eines CV basierten Systemprozesses [246].

8.2.2 Forschungsstand, Anwendungsgrenzen und Potenzial

Der Einsatz von Computer-Vision-Techniken für die Erkennung von Strukturschäden ist in der wissenschaftlichen Literatur relativ gut untersucht. Deep-Learning-Modelle haben sich für diese Aufgabe als nützlich erwiesen [240]-[244]. Der Einsatz solcher Techniken in praktischen Anwendungen ist jedoch komplexer als der Nachweis ihrer Nützlichkeit anhand eines sorgfältig ausgewählten Datensatzes. Die Achillesferse der überwachten Lerntechniken ist die Notwendigkeit qualitativ hochwertiger, markierter Daten (d. h. Bilder, in denen die Objekte bereits identifiziert sind), die zu Trainingszwecken verwendet werden. Während viele Softwareanwendungen, die den Beschriftungsprozess erleichtern, entwickelt wurden (siehe z. B. [245]), bleibt die manuelle Beschriftung immer noch eine sehr aufwendige Aufgabe. Ein realistisches Inspektionsszenario beinhaltet eine sehr grosse Vielfalt an Bildgebungsbedingungen, Sensoren und dem Aussehen der untersuchten Strukturen und ihrer Schäden. Bildsensoren, unterschiedlich Aussehende Strukturen und entsprechend unterschiedliche Schadensbilder. Insgesamt ist die Fähigkeit, Bilder oder Videodaten automatisch und robust in verwertbare Informationen umzuwandeln, immer noch eine Herausforderung [238].

8.2.3 Einsatzzweck und Fragestellung im Bereich

Fragestellungen im Bereich Tunnel

CV wird im Bereich Tunnel (aber auch in anderen Fachbereichen) für die Schadenserkenkung und die Erkennung von Bauwerksteilen eingesetzt. Im Folgenden werden diese zwei Hauptanwendungen erläutert.

Schadenserkenkung.

Die automatische Erkennung von Schäden ist ein wesentlicher Bestandteil jedes automatischen oder halbautomatischen Inspektionssystems. Das Vorhandensein von Defekten in Bildern einer Struktur ist relativ selten, wenn man das Verhältnis von Pixeln, die Schäden darstellen, zu denen, die den unbeschädigten Teil der Strukturoberfläche darstellen, betrachtet. Daher ist die Erkennung visueller Defekte mit hoher Präzision und Wiedererkennbarkeit eine anspruchsvolle Aufgabe. Dieses Problem wird durch das Vorhandensein von schadensähnlichen Merkmalen weiter erschwert (z. B. können dunkle Kanten wie eine Rille fälschlicherweise für einen Riss gehalten werden). Abb. 8.115 zeigt ein charakteristisches Beispiel für die automatische Schadensdetektion auf CV-Basis bei einer Tunnelinspektion. Wie im Folgenden beschrieben, wurden zahlreiche Forschungsarbeiten zur Entwicklung von Methoden und Techniken zur zuverlässigen Erkennung verschiedener visueller Defekte durchgeführt, darunter Betonrisse, Betonabplatzungen und Delaminationen, Ermüdungsrisse, Stahlkorrosion und

Asphaltrisse. Es werden drei verschiedene Ansätze zur Schadenserkennung unterschieden:

- **Heuristische Methoden der Merkmalsextraktion.** Im Prinzip funktionieren diese Methoden durch die Anwendung eines Schwellenwerts oder eines Klassifizierers für maschinelles Lernen auf die Ausgabe eines manuell erstellten Filters für die jeweilige Schadensart von Interesse: Betonrisse und Abplatzungen, Ermüdungsrisse in Stahlkonstruktionen [247].
- **Deep Learning-basierte Schadenserkennung.** Deep Learning hat die Möglichkeiten und die Robustheit der herkömmlichen bildverarbeitungs-basierten Schadenserkennung für eine Vielzahl von visuellen Defekten, von Rissen und Abplatzungen bis hin zu Korrosion, erheblich erweitert. Es wurden verschiedene Ansätze für die Erkennung untersucht, darunter Bildklassifizierung, Objekterkennung oder Methoden zur Erkennung von Regionen sowie semantische Segmentierungsmethoden.
- **Erkennung von Veränderungen.** Wenn ein Bauwerk regelmässig inspiziert werden muss, kann zunächst eine Basisdarstellung des Bauwerks erstellt werden. Diese Basislinie kann dann mit den Daten der nachfolgenden Inspektionen verglichen werden. Jede neue visuelle Beschädigung des Bauwerks wird beim Vergleich mit der Basislinie als Veränderung sichtbar. Die Erkennung und Lokalisierung von Veränderungen kann dazu beitragen, den Arbeitsaufwand für die Verarbeitung von Daten aus UAV-Inspektionen zu verringern. Es gibt zwei Hauptansätze für die Erkennung von Veränderungen: die punktwolkenbasierte Erkennung von Veränderungen und die bildbasierte Erkennung von Veränderungen.

Erkennen von Bauwerksteilen.

Die Erkennung von Bauteilen ist ein Prozess zur Erkennung, Lokalisierung und Klassifizierung charakteristischer Teile eines Bauwerks, der ein wichtiger Schritt auf dem Weg zur automatisierten Inspektion ziviler Infrastrukturen sein soll. Informationen über strukturelle Komponenten verleihen Rohbildern oder 3D-Punktwolkendaten eine gewisse Semantik. Diese Semantik hilft, den aktuellen Zustand des Bauwerks zu verstehen, und verleiht den fehleranfälligen Daten aus der Feldumgebung Konsistenz. Die Erkennung von Bauteilen liefert auch wichtige Informationen für die automatisierte, visuell gestützte Schadensbewertung von Bauwerken. Ähnlich wie bei der Modellierung des Ist-Zustandes können Informationen über Strukturkomponenten verwendet werden, um die Konsistenz der automatisierten Schadenserkennungsmethoden zu verbessern, indem schadensähnliche Muster auf anderen Objekten als den interessierenden Strukturkomponenten entfernt werden. Auf dem Weg zu einer vollständig autonomen Inspektion wird die Erkennung von Strukturkomponenten voraussichtlich ein Baustein für autonome Navigations- und Datenerfassungsalgorithmen für Roboterplattformen (z. B. UAVs) sein. Auf der Grundlage der Arten und Positionen von Strukturkomponenten, die von der/den Bordkamera(s) erkannt werden, sollen autonome Roboter geeignete Navigationspfade und Datenerfassungsverhalten planen.

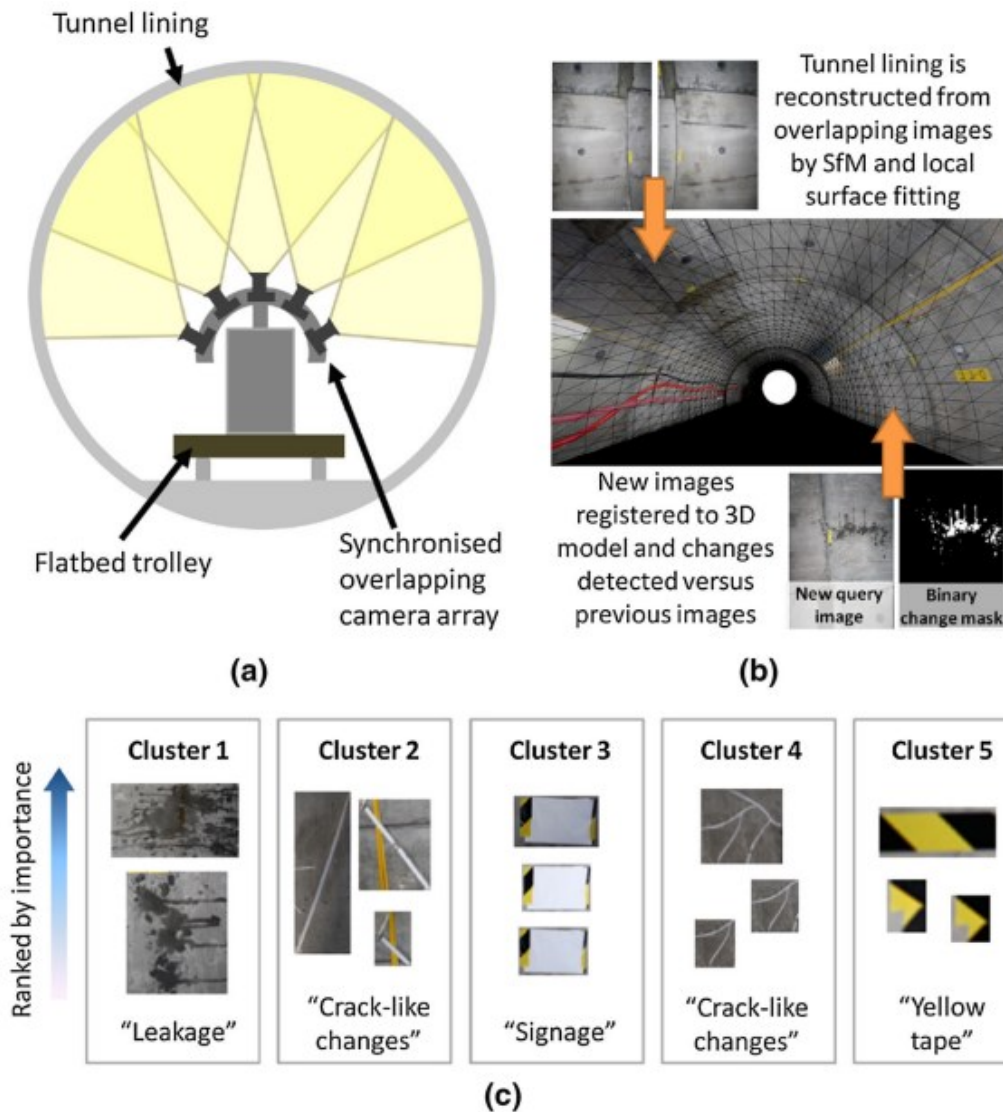


Abb. 8.115 System für die automatische Schadenserkennung in Tunnelinspektionen, a) mögliches Hardware für die Datenerfassung, b) 3D Modellerstellung und Erkennung von Veränderungen im Vergleich zu vorgängigen Aufnahmen, c) Beispiel von erkannten Änderungen, welche nach Aussehen sortiert und nach benutzerdefinierter Wichtigkeit aufgeführt werden [246].

8.2.4 Datenerfassung, Messgrößen und Genauigkeit

Automatisierte Inspektionssysteme bestehen aus zwei Hauptschritten: (a) Einsatz von autonomen Robotern/autonomen Messplattformen (UAVs) für die automatische Datenerfassung aus der Ferne und (b) Datenverarbeitung und Inspektion mithilfe von Computer-Vision-Techniken. Intelligente UAVs sind keine Zukunftsmusik mehr und das rasante Wachstum der Drohnenindustrie in den letzten Jahren hat UAV zu einer praktikablen Option für die Datenerfassung gemacht. Bei den erfassten Daten handelt es sich um digitale Bilder und Videos. Die Nachbearbeitungsphase kann nach oder während der Datenerfassung durchgeführt werden. Die dynamische Überwachung von Strukturen erfordert spezielle Kameras und Steuerungen, die Bilder mit hoher Frequenz aufnehmen können. Die Datenerfassung erzeugt einen sehr grossen Datensatz, der mit der Kameraauflösung und der Anzahl der gespeicherten Bilder (d. h. der Frequenzrate) zunimmt. Da alle Daten digital vorliegen, ist es möglich, einen Fernzugriff auf die Daten einzurichten. Die Genauigkeit der CV-Methoden hängt von der Art der Kameras und Objektive, der Grösse des Objekts und der Entfernung zum Objekt ab.

8.2.5 Anwendungsbeispiele, Pilotanwendungen

CV-basierte Methoden wurden zur Erkennung verschiedener Arten von Schäden in der zivilen Infrastruktur eingesetzt, z. B. Risse und Abplatzungen in Betonstrukturen, Ermüdungsrisse und Korrosion in Stahlelementen und Asphalt Schäden. Um die Effizienz solcher Methoden in einem realistischen Kontext zu überprüfen, wurden in den letzten Jahren mehrere Proof-of-Concept-Anwendungen durchgeführt im Bereich Kunstbauten.

Die Kosten für den Einsatz von CV-basierten Inspektionen lassen sich in drei Hauptkategorien unterteilen:

- Hardware-Kosten: Autonome Fahrzeuge, ausgestattet mit Kameras und möglicherweise weiteren Sensoren.
- Inspektion: Betrieb autonome Fahrzeuge, mögliche Strassensperrungen aus Gründen der Zugänglichkeit oder der Sicherheit.
- Expertenbewertung: Verwaltung und Bewertung der gesammelten visuellen Daten.

Da die Hardware für die Inspektionen vorübergehend gemietet werden kann, wird die CV-basierte Bewertung in der Regel als Beratungsdienstleistung angeboten, wobei die Preise von der Grösse und Komplexität des zu überwachenden Bauwerks abhängen.

8.2.6 Literaturverzeichnis

Sonstige Literatur / Forschungsberichte

-
- [238] Spencer BF, Hoskere V, Narazaki Y. Advances in Computer Vision-Based Civil Infrastructure Inspection and Monitoring. Engineering 2019; 5(2): 199-222. DOI: 10.1016/j.eng.2018.11.030.
-
- [239] Roberts L. Machine perception of three-dimensional solids. Massachusetts Institute of Technology, 1963.
-
- [240] Pantoja-Rosero BG, Achanta R, Kozinski M, Fua P, Perez-Cruz F, Beyer K. Generating LOD3 building models from structure-from-motion and semantic segmentation. Automatisierung im Bauwesen 2022; 141: 104430. DOI: 10.1016/j.autcon.2022.104430.
-
- [241] Pantoja-Rosero BG, dos Santos KRM, Achanta R, Rezaie A, Beyer K. Determining crack kinematics from imaged crack patterns. Konstruktion und Baumaterialien 2022; 343: 128054. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2022.128054.
-
- [242] Pantoja-Rosero BG, Oner D, Kozinski M, Achanta R, Fua P, Perez-Cruz F, et al. TOPO-Loss for continuity-preserving crack detection using deep learning. Construction and Building Materials 2022; 344: 128264. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2022.128264
-
- [243] Rezaie A, Godio M, Beyer K. Investigating the cracking of plastered stone masonry walls under shear-compression loading. Konstruktion und Baumaterialien 2021; 306: 124831. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2021.124831
-
- [244] Rezaie A, Achanta R, Godio M, Beyer K. Comparison of crack segmentation using digital image correlation measurements and deep learning. Construction and Building Materials 2020; 261: 120474. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2020.120474
-
- [245] Hess MR, Petrovic V, Kuester F. Interactive classification of construction materials: feedback-gesteuertes framework für annotation und analyse von 3d-punktwolken. The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences 2017; XLII-2/W5: 343-347. DOI: 10.5194/isprs-archives-XLII-2-W5-343-2017.
-
- [246] Stent, Simon & Gherardi, Riccardo & Stenger, Bjorn & Soga, Kenichi & Cipolla, Roberto. (2015). Visual Change Detection on Tunnel Linings. Machine Vision and Applications. 27. 10.1007/s00138-014-0648-8.
-
- [247] Quqa, S., Martakis, P., Movsessian, A. Pai, S., Reuland, Y., Chatzi, E.. Two-step approach for fatigue crack detection in steel bridges using convolutional neural networks. J Civil Struct Health Monit 12, 127–140 (2022).
-

8.3 Verteilte akustische Erfassung (DAS)

Die Dehnung ist einer der am häufigsten überwachten Parameter, sowohl bei der Überwachung der strukturellen Gesundheit (SHM), als auch bei der Überwachung der strukturellen Leistungsfähigkeit (SPM). Der Hauptvorteil besteht darin, dass die Dehnung in direktem Zusammenhang mit der Elementspannung und der strukturellen Verformung steht. Diese Sensoren können entweder zur Erkennung von Rissen auf der Elementoberfläche, zur Ableitung von Struktureigenschaften wie dem Elastizitätsmodul und der neutralen Achse oder zur Bestimmung thermischer Auswirkungen auf das Strukturverhalten verwendet werden.

Das früheste Konzept der Dehnungsmessung wurde im 19. Jahrhundert erforscht und die ersten Dehnungssensoren wurden in den 1920er Jahren entwickelt. Es wurden drei Generationen von Sensoren entwickelt und diese Entwicklung wurde von Glisic [248] umfassend dargestellt (Abb. 8.116). Bei der ersten Generation handelt es sich um diskrete Sensoren mit kurzer Messlänge (z.B. Dehnungsmessstreifen Kapitel 7.46), während die zweite Generation lange eindimensionale Messgeräte umfasst, die dank faseroptischer Sensoren (siehe Kapitel 7.10) kontinuierliche Messungen ermöglichen. Die derzeitige Forschung konzentriert sich auf eine dritte Generation mit Sensorfolien, die eine verteilte Überwachung in zwei Dimensionen ermöglichen. Diese befindet sich aber noch in der Entwicklungsphase [249].

Lichtwellenleiter der zweiten Generation werden häufig für die Überwachung eingesetzt [250], [251]. Seit ihrer Entwicklung in den 1960er Jahren wurden verschiedene Sensortypen vorgeschlagen, die auf unterschiedlichen physikalischen Prinzipien beruhen [252][253]. Der häufigste ist das Faser-Bragg-Gitter (FBG; Abb. 8.117). Kommerzielle Produkte waren in den 1990er Jahren verfügbar. In jüngster Zeit wurde eine neue faseroptische Technologie namens Distributed Acoustic Sensing (DAS) zur Messung der dynamischen Dehnung in einer optischen Faser eingesetzt. Diese Technologie wird im Folgenden beschrieben.

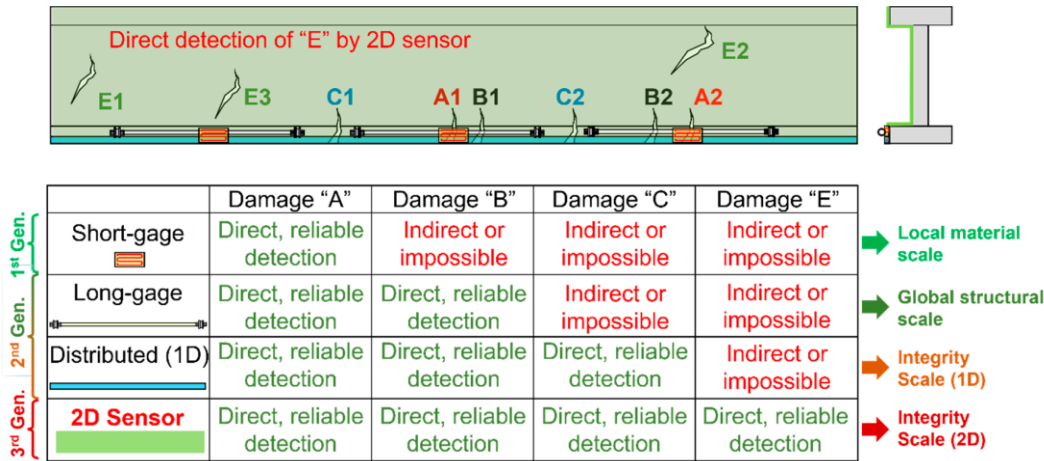


Abb. 8.116 Generationen von Dehnungssensoren und ihre Anwendung zur Schadenserkennung [248].

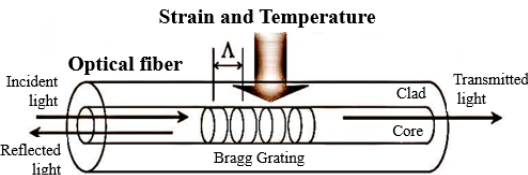


Abb. 8.117 Faseroptik mit Bragg-Gitter, angepasst aus [252].

8.3.1 Beschreibung der Technologie

DAS kombiniert die Standardvorteile der Faseroptik (verteilte Messungen, kleine Abmessungen, geringes Gewicht und hohe Präzision) mit der Möglichkeit, die mechanische Dehnung mit einem einzigen Sensor über Dutzende von Kilometer zu messen [254]. Die meisten DAS-Systeme basieren auf der optischen Zeitbereichsreflektometrie (OTDR) [255] (Abb. 8.118).

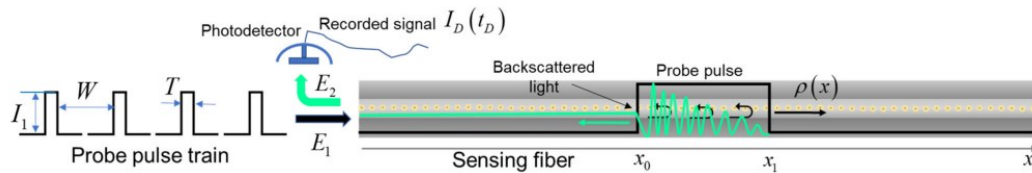


Abb. 8.118 Schema des Betriebs eines OTDR-Sensors. E_1 und E_2 sind die Amplituden des Sondenimpulses und des Rückstreuungsfeldes; I_1 , T und W sind die Spitzenleistung, die Dauer und die Periode des Pulses; x ist die Koordinate entlang der Sensorfaser, $\rho(x)$ ist das relative Reflexionsvermögen der Rayleigh-Rückstreuungszentren, die entlang der Faserlänge verteilt sind [256].

OTDR wurde 1976 eingeführt, um den Zustand der optischen Kommunikationsverbindung zu überwachen [257]. Bei dieser Technologie wird ein kurzer optischer Impuls in die Faser eingespeist und breitet sich vorwärts aus. Dann wird die Rayleigh-Rückstreuung (RBS) verwendet, um die Vibrationen entlang der Faser zu erkennen und zu lokalisieren [258], die mit der Messung der Dehnung in Verbindung gebracht werden können. Eine Änderung des OTDR-Signals entspricht einer lokalen Diskontinuität/Abnormalität der Glasfaser. Lokale dynamische Dehnungsänderungen können durch Messung der Signaländerungen zwischen aufeinanderfolgenden Impulsen von derselben Stelle der Faser bestimmt werden. Ein typisches DAS-System ist dargestellt in Abb. 8.119.

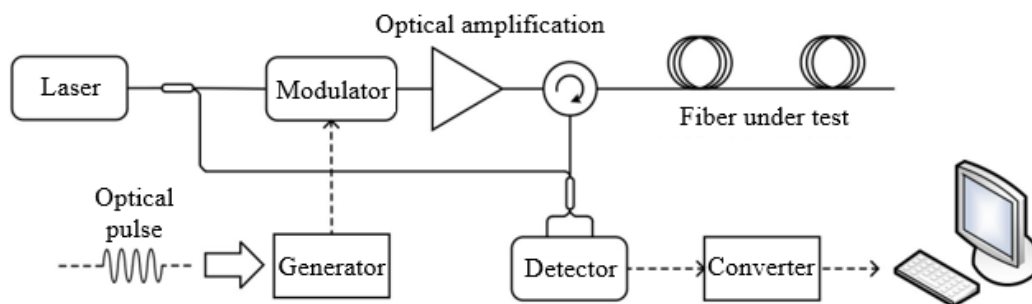


Abb. 8.119 Typisches DAS-System mit OTDR [255].

8.3.2 Forschungsstand, Anwendungsgrenzen und Potenzial

DAS wird allmählich für Anwendungen im Bauwesen eingesetzt [251], [259]. Da sich dieses Überwachungssystem noch in einem frühen Stadium befindet, gibt es derzeit mehrere konkurrierende Technologien. Zum Beispiel haben mehrere Forscher die optische Frequenzbereichsreflektometrie (OFDR) anstelle von OTDR [260], [261]. Diese Techniken unterscheiden sich jedoch meist in Bezug auf den Kompromiss zwischen der Sensorauflösung und den maximalen Messabständen [255]. Einige Forscher haben sich auf die Erkennung akustischer Emissionen mit Hilfe von Glasfasern konzentriert [262], [263], aber die Genauigkeit und Empfindlichkeit des Sensors sind derzeit unzureichend und erfordern möglicherweise ein neues Sensordesign [264], [265].

Die wichtigsten Vorteile von DAS-Systemen sind:

- **Verteilte Sensortechnologien:** Es ist möglich, viele komplexe strukturelle Verhaltensweisen zu erfassen, wie z.B. die Form der Durchbiegung, Knickpunkte sowie die Momentübertragung an den Stützen.
- **Schadenserkennung:** Es ist möglich, Risse zu lokalisieren und Rissöffnungen zu bestimmen.

- Statische und dynamische Messungen: Statische und dynamische Dehnungen werden gemessen und dynamische Eigenschaften wie Modalfrequenzen können extrahiert werden.
- Langfristige Stabilität und Haltbarkeit: Glasfasern wurden ursprünglich für die Telekommunikationsindustrie entwickelt und sind daher chemisch inert und haben langfristig stabile Materialeigenschaften.

Die allgemeinen Herausforderungen von DAS-Systemen sind:

- Kosten: Verteilte Sensortechnologien sind im Allgemeinen teurer als diskrete Sensortechniken (z.B. herkömmliche Dehnungsmessstreifen).
- Signal-Rausch-Verhältnis (SNR): Da das Signal mit der Länge der Faser abgeschwächt wird, hängt die maximale Reichweite von dem minimal akzeptablen SNR ab.
- Mühsame Reparatur von beschädigten Kabelverlängerungen: Der Anschluss von Glasfasern erfordert spezielle Geräte, die unter den Bedingungen vor Ort nicht einfach zu bedienen sind.
- Drahtlose Unfähigkeit: DAS kann nicht mit drahtlosen Knoten verbunden werden und muss daher verkabelt werden. Die faseroptische Dehnungssensor-Leseinheit kann jedoch drahtlos mit dem entfernten Büro kommunizieren.

8.3.3 Einsatzzweck und Fragestellung im Bereich

Fragestellungen im Bereich Tunnel

Neue Studien zeigen mögliche Einsatzbereiche von DAS im Bereich Tunnel auf:

- Überwachung / Erkennung von Vibrations-/Schadensereignissen entlang der Tunnelröhre während des Baus [266];
- Überwachung dynamische Schwingungen Zwischendecke.

Weitere Einsatzbereiche sind vergleichbar mit dem Einsatz bei übrigen tragenden Infrastrukturbauten wie:

- Kontinuierliches Verformungsverhalten; allg. Dehnungsberechnung;
- Belastungsverhalten tragender Einbauten (Zwischendecken, WELK-Decken)
- Risserkennung und Messung der Rissöffnungsweite
- Modellvalidierung und Rückrechnung (FEM)
- Schallemission bei Lüftungszentralen.

Fragestellungen im Bereich Naturgefahren

- Erkennen und Lokalisierung von Naturereignissen (z.B. Felssturz);
- Abgrenzung von Hang- und Felsinstabilitäten, Erkennen von Zonen mit erhöhten Bewegungen bzw. Identifikation von Bewegungshorizonten; Messung von (limitierten) differentiellen Bewegungen innerhalb eines Rutschhangs.

8.3.4 Datenerfassung, Messgrößen und Genauigkeit

- Bei den erfassten Daten handelt es sich um Phasenmessungen, die später mit einer Software nachbearbeitet werden, um Dehnungen, Verschiebungen und modale Frequenzen zu berechnen. Die Nachbearbeitungsphase kann nach oder während der Erfassung durchgeführt werden.
- Diese Technik liefert verteilte Messungen über die Messstrecke (bis zu 100 m), die Verschiebungen, Verformungen und Dehnungen mit einer hohen Frequenzrate umfassen.
- Die Datenerfassung erzeugt einen sehr grossen Datensatz, der mit der Frequenzrate und dem Erfassungsabstand zunimmt.
- Da alle Daten digital vorliegen, ist es möglich, einen Fernzugriff auf die Daten einzurichten.

Die Genauigkeit des DAS-Systems hängt von der Art des verwendeten Lichtleiters, dem extrahierten Parameter (d. h. Dehnung oder modale Frequenzen) und dem Messabstand ab. Im Allgemeinen liegt die Genauigkeit der Dehnungsmessung in der Größenordnung von ± 10 bis 40 Mikrodehnungen und kann durch die Sensorlänge beeinflusst werden. Die Abtastrate liegt in der Regel zwischen 50 und 250 Hz.

8.3.5 Anwendungsbeispiele, Pilotanwendungen

Ein Beispiel für die Anwendung des DAS-Systems für die Infrastrukturüberwachung wurde 2018 in den Niederlanden durchgeführt (Abb. 8.120) [254]. Die Stahlbetonbrücke wurde 1932 erbaut und hat eine Länge von 103 m mit sieben Feldern. Die Fahrbahn hat eine Breite von 33,2 m (Abb. 8.120A). Die Fahrbahnplatte wird von V-förmigen Stahlbetonstützen getragen. Die Fahrbahn der Brücke besteht in beiden Richtungen aus zwei Fahrspuren und einem Gehweg auf einer Seite. Es wurde ein DAS-System mit einer Gesamtlänge von 244,6 m installiert (Abb. 8.120B). Es wurden mehrere dynamische Belastungstests mit und ohne Aufprall durchgeführt. Lokale (Abb. 8.120C) und verteilte (Abb. 8.120D) Dehnungsmessungen wurden aufgezeichnet. Die Modalfrequenzen der Brücke wurden extrahiert und sind mit denen vergleichbar, die von numerischen Modellen vorhergesagt wurden. Die Autoren haben ihre Studie damit abgeschlossen, dass sie zeigen, dass DAS-Daten für Gewicht-in-Bewegung-Messungen an Brücken verwendet werden können.

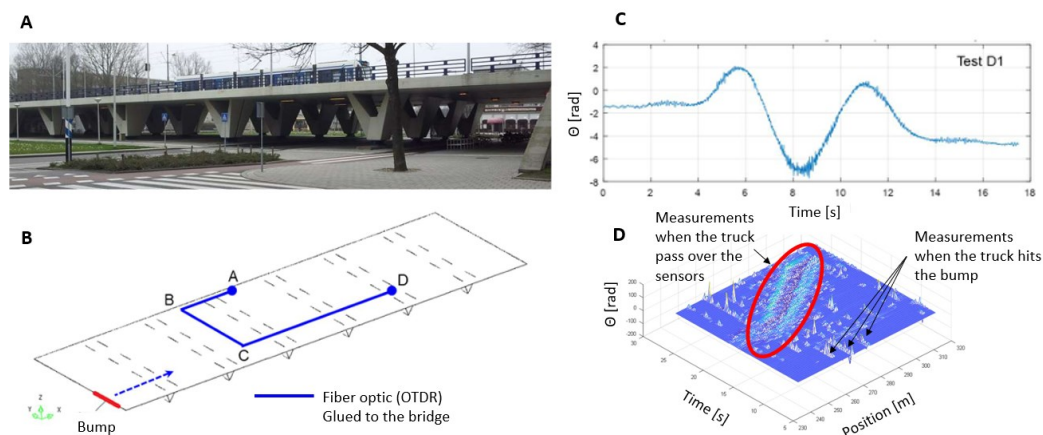


Abb. 8.120 Überwachung der Brücke 705 in den Niederlanden mit dem DAS-System. A) Brückenfoto; B) Sensorsystem; C) Lokale Phasenänderung (direkt mit der Dehnung verbunden), während ein LKW die Brücke mit 20 km/h passiert (ohne Bodenwelle); D) Verteilte Phasenänderung (3D-Diagramm) während der Vorbeifahrt eines Lastwagens mit 20 km/h (mit Bodenwelle) [254].

Die Anwendungsbeschränkungen beziehen sich hauptsächlich auf die Langzeitmessung. Eine wichtige Herausforderung für Dehnungssensoren aller Generationen ist die Langzeitstabilität und Zuverlässigkeit. Während faseroptische Sensoren ihre hervorragende Langzeitstabilität und Zuverlässigkeit über mehrere Jahrzehnte hinweg unter Beweis gestellt haben, wurde manchmal eine Drift oder Fehlfunktion aufgrund der Verschlechterung der Sensorkomponenten durch verschiedene Umweltfaktoren (chemische Stoffe, elektromagnetische Störungen, Temperaturschwankungen usw.) beobachtet [248].

Die Sensorkosten hängen stark vom Sensortyp und dem Datenerfassungssystem, der Messentfernung in Metern und den Kosten für die Sensorinstallation ab, die je nach Fallstudie und Zugänglichkeit der Brücke erheblich variieren können.

8.3.6 Literaturverzeichnis

Sonstige Literatur / Forschungsberichte

- [248] Glisic B. Concise Historic Overview of Strain Sensors Used in the Monitoring of Civil Structures: The First One Hundred Years. *Sensors* 2022;22:2397. <https://doi.org/10.3390/s22062397>

-
- [249] Glisic B, Yao Y, Tung S-TE, Wagner S, Sturm J, Verma N. Strain Sensing Sheets for Structural Health Monitoring Based on Large-Area Electronics and Integrated Circuits. *Proceedings of the IEEE* 2016;104:1513-28. <https://doi.org/10.1109/JPROC.2016.2573238>.
-
- [250] Du C, Dutta S, Kurup P, Yu T, Wang X. A review of railway infrastructure monitoring using fiber optic sensors. *Sensors and Actuators A: Physical* 2020;303:111728. <https://doi.org/10.1016/j.sna.2019.111728>
-
- [251] Bado MF, Casas JR. A Review of Recent Distributed Optical Fiber Sensors Applications for Civil Engineering Structural Health Monitoring. *Sensors* 2021;21:1818. <https://doi.org/10.3390/s21051818>.
-
- [252] Ramakrishnan M, Rajan G, Semanova Y, Farrell G. Overview of Fiber Optic Sensor Technologies for Strain/Temperature Sensing Applications in Composite Materials. *Sensors* 2016;16:99. <https://doi.org/10.3390/s16010099>
-
- [253] Barrias A, Casas JR, Villalba S. A Review of Distributed Optical Fiber Sensors for Civil Engineering Applications. *Sensors* 2016;16:748. <https://doi.org/10.3390/s16050748>
-
- [254] Cheng L-K, Jansen R, Burggraaf H, De Jong W, Toet P, Doppenberg E. Dynamic load monitoring of a concrete bridge using a fiber optic Distributed Acoustic Sensing (DAS) system, Potsdam, Germany: 2019, p. 1-8.
-
- [255] He Z, Liu Q. Optical Fiber Distributed Acoustic Sensors: A Review. *J Lightwave Technol*, JLT 2021;39:3671-86. <https://doi.org/10.1364/JLT.39.003671>.
-
- [256] Gorshkov BG, Yüksel K, Fotiadi AA, Wuilpart M, Korobko DA, Zhirnov AA, et al. Scientific Applications of Distributed Acoustic Sensing: State-of-the-Art Review and Perspective. *Sensors* 2022;22:1033. <https://doi.org/10.3390/s22031033>.
-
- [257] Barnoski MK, Jensen SM. Fiber waveguides: a novel technique for investigating attenuation characteristics. *Appl Opt* 1976;15:2112-5. <https://doi.org/10.1364/AO.15.002112>.
-
- [258] Masoudi A, Newson TP. Contributed Review: Distributed optical fibre dynamic strain sensing. *Review of Scientific Instruments* 2016;87:011501
-
- [259] Sakiyama FIH, Lehmann F, Garrecht H. Structural health monitoring of concrete structures using fibre-optic-based sensors: a review. *Magazine of Concrete Research* 2021;73:174-94. <https://doi.org/10.1680/jmacr.19.00185>.
-
- [260] Li H, Liu Q, Chen D, Deng Y, He Z. High-spatial-resolution fiber-optic distributed acoustic sensor based on Φ -OFDR with enhanced crosstalk suppression. *Optics Letters* 2020;45:563-6.
-
- [261] Barrias A, Rodriguez G, Casas JR, Villalba S. Application of distributed optical fiber sensors for the health monitoring of two real structures in Barcelona. *Structure and Infrastructure Engineering* 2018;14:967-85. <https://doi.org/10.1080/15732479.2018.1438479>
-
- [262] Verstrynge E, De Wilder K, Drougkas A, Voet E, Van Balen K, Wevers M. Crack monitoring in historical masonry with distributed strain and acoustic emission sensing techniques. *Construction and Building Materials* 2018;162:898-907. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.01.103>
-
- [263] Verstrynge E, Pfeiffer H, Wevers M. A novel technique for acoustic emission monitoring in civil structures with global fiber optic sensors. *Smart Mater Struct* 2014;23:065022. <https://doi.org/10.1088/0964-1726/23/6/065022>
-
- [264] Wei P, Han X, Xia D, Liu T, Lang H. Novel Fiber-Optic Ring Acoustic Emission Sensor. *Sensors* 2018;18:215. <https://doi.org/10.3390/s18010215>
-
- [265] Gillham J, Bentz EC, Hoult NA. Messung von Auflagerreaktionen und Schadenserkenkung in Stahlträgern mit verteilter Dehnungserfassung. *Engineering Structures* 2022;262:114389. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2022.114389>.
-
- [266] Zhang, T., Shi, B., Zhang, C., Xie, T., Yin, J., & Li, J. (2021). Tunnel disturbance events monitoring and recognition with distributed acoustic sensing (DAS). *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 861.
-
- [267] Gillham J, Hoult NA, Bentz EC. Praxistest eines Scherkraftmessverfahrens mit faseroptischer Abtastung unter LKW-Belastung mit variabler Geschwindigkeit. *Journal of Bridge Engineering* 2022;27:04022115.
-
- [268] Webb G. T., Vardanega P. J., Hoult N. A., Fidler P. R. A., Bennett P. J., Middleton C. R. Analysis of Fiber-Optic Strain-Monitoring Data from a Prestressed Concrete Bridge. *Journal of Bridge Engineering* 2017;22:05017002. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)BE.1943-5592.0000996](https://doi.org/10.1061/(ASCE)BE.1943-5592.0000996).
-
- [269] Hubbard PG, Xu J, Zhang S, Dejong M, Luo L, Soga K, et al. Dynamic structural health monitoring of a model wind turbine tower using distributed acoustic sensing (DAS). *J Civil Struct Health Monit* 2021;11:833-49. <https://doi.org/10.1007/s13349-021-00483-y>.
-
- [270] Min R, Liu Z, Pereira L, Yang C, Sui Q, Marques C. Optical fiber sensing for marine environment and marine structural health monitoring: A review. *Optics & Laser Technology* 2021;140:107082. <https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2021.107082>
-

8.4 Mobile Mapping Systeme

8.4.1 Beschrieb der Technologie

Mobile Mapping Systeme verwenden unterschiedliche Sensoren zur räumlichen Erfassung von Daten. Durch die Verwendung der Sensoren auf einer mobilen Plattform kann die Datenerfassung einfach über einen grösseren Bereich erfolgen. Als mobile Plattform können unterschiedliche Land- (z.B. Strassen-, Schienen-, oder Roboterfahrzeug) und Luftfahrzeuge (z.B. Flugzeuge, Helikopter, Drohnen) verwendet werden. Für die Georeferenzierung der Sensordaten müssen die mobilen Plattformen (Fahrzeuge oder Transportmittel) mit einem inertialen Navigationssystem (Beschleunigungs- und Drehratensensoren) ausgestattet sein. Dies wird in der Regel zusammen mit einem globalen Navigationssystem (GNSS) verwendet. Dadurch lassen sich die Messdaten einem übergeordneten Referenzsystem zuordnen.

Die Messausrüstung eines Mobile Mapping Systems besteht in der Regel aus mehreren Sensoren und ist abhängig von den spezifischen Anforderungen [271]. Laserscanner (siehe auch Kapitel 7.3) auf einer mobilen Plattform ermöglichen die Erfassung einer räumliche Punktwolken (siehe Abb. 8.121). Mit zusätzlichen Kameras können weitere Informationen (Farbbilder, Infrarotbilder) erfasst werden und im Zusammenspiel mit dem Laserscanner räumlich zugeordnet werden [272]. Eine weitere Möglichkeit ist die Ausrüstung eines Mobile Mapping Systems mit einem Radarsystem (u.a. InSAR, siehe auch Kapitel 7.2), (Abb. 8.122) [273].



Abb. 8.121 Mobile Mapping System auf einem Strassenfahrzeug mit einem Laserscanner [274].



Abb. 8.122 Mobile Mapping System mit einem InSAR auf einer Drohne (links) und einem Strassenfahrzeug (rechts) [273].

8.4.2 Forschungsstand, Anwendungsgrenzen und Potential

Die Verwendung der Sensoren (Laserscanner, Radar, etc.) ermöglicht in Kombination mit einer mobilen Plattform die grossflächige Erfassung von Daten. Aufgrund der grossen

Datenmenge ist die automatisierte Datenverarbeitung und Auswertung von zentraler Bedeutung. Ein wichtiger Bestandteil des Mobile Mapping ist die automatisierte Auswertung mittels KI zur direkten Klassifizierung / Segmentation der Daten und gegebenenfalls direkter Schadensdetektion (siehe auch Kapitel 8.2).

Eine hohe Genauigkeit der Daten erfordert eine genaue Lokalisierung des Fahrzeugs im übergeordneten Koordinatensystem. Aufgrund des beschränkten GNSS-Empfangs in Tunnel ist die Georeferenzierung der Messdaten einzig vom inertialen Navigationssystem abhängig. Die Messdatenungenauigkeit im übergeordneten Koordinatensystem wird mit längerem Tunnel ebenfalls grösser. Möglichkeit zur Verbesserung der absoluten Genauigkeit (im übergeordneten Koordinatensystem) von Mobile Mapping Systeme lassen sich durch die Verwendung von eingemessenen Fixpunkten [275], der "Schlaufenmessung", der Zuhilfenahme von Bildaufnahmen für die Auswertung sowie allgemein die Verwendung von fortschrittlichen Datenauswertungsalgorithmen erzielen [276].

8.4.3 Einsatzzweck und Fragestellungen im Bereich

Fragestellungen im Bereich Tunnel

- Überwachung des Deformationsverhalten der sichtbaren Bauteile im Tunnel (Verkleidung, Zwischendecke, etc.);
- Überwachung / Erkennen von Schädigungen im Tunnel und Portalbereich.



Abb. 8.123 Räumliche (intensitätsschattierte) Punktwolke im Portalbereich eines Tunnels, aufgenommen mittels Laserscanner [272].

Fragestellungen im Bereich Naturgefahren

- Grossflächige Überwachung des Deformationsverhalten von Böschungen und Rutschhängen.
- Überwachung von Felsinstabilitäten.

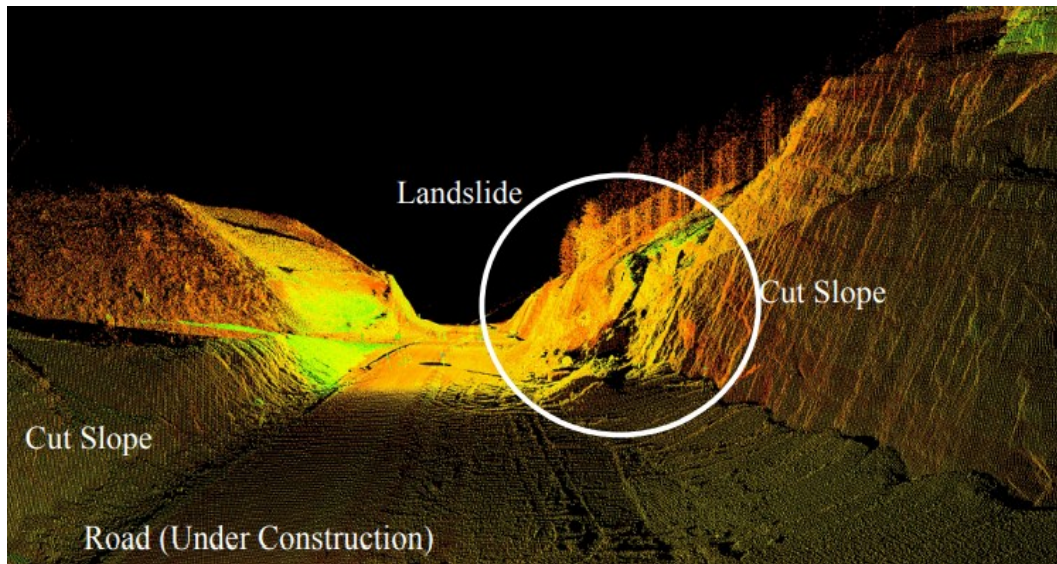


Abb. 8.124 Räumliche Punktwolke eines Rutschhangs, aufgenommen mittels Laserscanner [272].

8.4.4 Datenerfassung, Messgrößen und Genauigkeit

- Die Messdaten werden im Bezugssystem des Fahrzeuges erfasst. Die relative Genauigkeit der Messdaten ist von den Messsensoren abhängig. (z.B. Laserscanner, Kapitel 7.3)
- Für die Georeferenzierung der Daten in ein übergeordnetes Koordinatensystem muss die Positionierung des Fahrzeugs in diesem jederzeit bekannt sein (INS, GNSS).
- Die absolute Genauigkeit der Messungen ist neben der Messsensoren von den Positionierungsdaten (Genauigkeit GNSS, INS) des Fahrzeugs abhängig.

8.4.5 Anwendungsbeispiele, Pilotanwendungen

Die Anwendung eines Mobile Mapping Systems mit InSAR wurde im Rahmen der Überwachung des Rutschhangs in Brienzaults, Schweiz, getestet [273]. Die wiederholten Messungen mittels InSAR wurden mit einem Strassenfahrzeug und einer Drohne vorgenommen. Die Verschiebung in Sichtlinie (siehe Abb. 8.125) zum Mobile Mapping Systems konnte mit einer hohen Auflösung bestimmt werden.

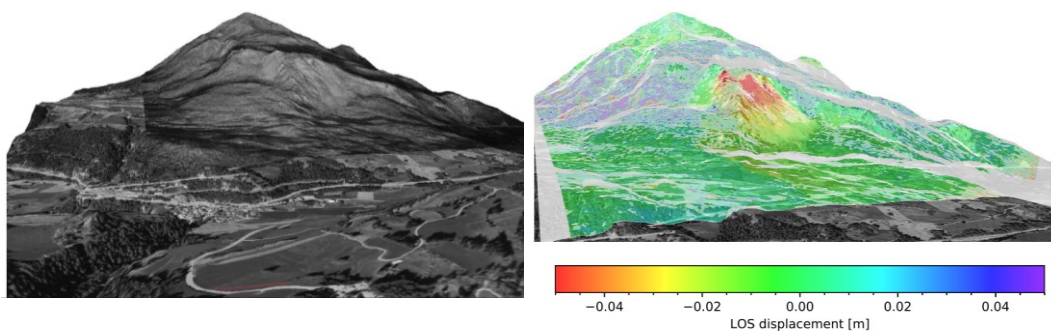


Abb. 8.125 Räumliches Darstellung eines Rutschhangs mit hinterlegtem Orthophoto, aufgenommen mittels InSAR (links) und gemessene Verschiebung (in Sichtlinie) mittels InSAR über eine Periode von 4 Tagen (rechts) [273].

8.4.6 Literaturverzeichnis

Sonstige Literatur / Forschungsberichte

-
- [271] El-Sheimy, Naser. (2005). An Overview of Mobile Mapping Systems.
-
- [272] Williams, Keith, Michael J. Olsen, Gene V. Roe, and Craig Glennie. 2013. "Synthesis of Transportation Applications of Mobile LIDAR" Remote Sensing 5, no. 9: 4652-4692. <https://doi.org/10.3390/rs5094652>
-
- [273] O. Frey, C. L. Werner, A. Manconi and R. Coscione, "Measurement of surface displacements with a UAV-borne/car-borne L-band DInSAR system: system performance and use cases," 2021 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium IGARSS, 2021, pp. 628-631, doi: 10.1109/IGARSS47720.2021.9553573.
-
- [274] Leica Geosystems AG, 2022, Leica Pegasus: Two Mobile Sensoreplattform, https://leica-geosystems.com/de-de/products/mobile-mapping-systems/capture-platforms/leica-pegasus_two (Zugriff 24.10.2022)
-
- [275] Civil + Structural Engineer, 2021, Mobile Mapping Underground: They Said it Couldn't be Done, <https://csengineermag.com/mobile-mapping-underground-they-said-it-couldnt-be-done/>, (Zugriff 24.10.2022)
-
- [276] Blaser, Stefan & Nebiker, Stephan & Wisler, D.. (2019). PORTABLE IMAGE-BASED HIGH PERFORMANCE MOBILE MAPPING SYSTEM IN UNDERGROUND ENVIRONMENTS – SYSTEM CONFIGURATION AND PERFORMANCE EVALUATION. ISPRS Annals of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. IV-2/W5. 255-262. 10.5194/isprs-annals-IV-2-W5-255-2019.
-

9 Technologiebewertung

9.1 Relevante Gefährdungen im Teilsystem

Die Bewertung der Überwachungstechnologien erfolgt gemäss Kapitel 5 und dem darin beschriebenen Konzept. Für eine verallgemeinerte Bewertung der in Kapitel 7 vorgestellten Überwachungstechnologien ist die jeweilige Fragestellung, respektive potenzielle Gefährdung von zentraler Bedeutung (siehe Kapitel 9.1.1). Die Konsequenzen aus dem Eintreten einer Gefährdung auf das Bauwerk ist abhängig von diversen Faktoren und wird verallgemeinert mit der Robustheit des Bauwerks behandelt (siehe Kapitel 9.1.2). Die Robustheit ergibt zusammen mit der Konsequenz des Versagens des Bauwerks (siehe Kapitel 9.1.3) die Kritikalität (siehe Kapitel 9.2).

9.1.1 Gefährdungen

Die Gliederung der Überwachungstechnologien in Kapitel 7 bezieht sich auf die konkreten Fragestellungen, welche bei Tunnelbauwerken häufig auftreten und entsprechend in der Struktur der evaluierten Technologien gemäss Kapitel 6 zusammengestellt sind. Aus den Fragestellungen ergeben sich die entsprechenden Gefährdungen für das Tunnelbauwerk oder dessen Umgebung. In der Tab. 9.47 werden die Gefährdungen erläutert und beispielhaft dargestellt.

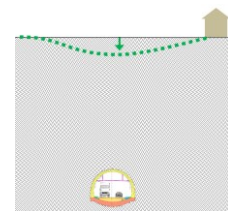
Tab. 9.47 Relevante Gefährdungen und beispielhafte Darstellung der Gefährdung.

A Bauwerksentkoppelte Überwachung

A1 Baugrundverformungen

Durch den Ausbruch (bergmännischer Tunnel) bzw. Aushub und Verfüllung (Tagbautunnel) für die Erstellung eines Tunnelbauwerks und/oder infolge einer Veränderung des Berg-/Grundwasserregimes können Verformungen des Baugrunds auftreten.

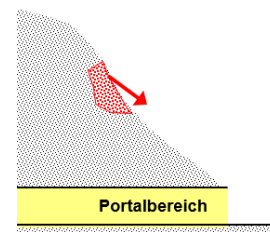
Diese Baugrundverformungen können insbesondere in überbautem Umfeld zu Schäden an der bestehenden Infrastruktur führen. Typischerweise sind bereits vor Baubeginn frühzeitig Überwachungsmassnahmen zur Beweissicherung erforderlich.



A2 Massenbewegungen (Steinschlag, Murgänge, Lawinen, Rutschhang, etc.)

Mögliche Massenbewegungen (Steinschlag, Murgänge, Lawinen, Rutschhang, etc.) im Bereich von Infrastrukturen stellen für den Bau und Betrieb eine grosse Gefährdung dar. Die Erstellung eines Bauwerks kann zudem einen Einfluss auf bereits bestehende oder neue Massenbewegungen (z.B. Rutschhang) haben.

Bereits vor dem Bau müssen mögliche Massenbewegungen erkannt und überwacht werden. Während des Baus und ebenso während des Betriebs kann eine Überwachung möglicher Massenbewegung mittels geeigneter Messtechnik erfolgen, welche häufig auch direkt in ein Alarmierungssystem eingebunden ist.

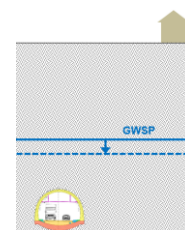


A3 Berg-/Grundwasser

Die Erstellung eines Tunnelbauwerks kann Auswirkungen auf das Berg-/Grundwasser haben (z.B. Einfluss Tunnelvortrieb auf Grundwasserpegel), wobei das Bauwerk ebenfalls durch die Berg-/Grundwasserverhältnisse beeinflusst werden kann (z.B. Belastung infolge Wasserdruck).

Es kann zu einer Gefährdung der umliegenden Infrastruktur infolge der Berg-/Grundwasserverhältnisse kommen (z.B. verschmutzte/versiegte Quellen, Baugrundverformungen oder Massenbewegungen).

Die Bestimmung der Berg-/Grundwasserverhältnisse (z.B. Pegel, Strömung, etc.) bereits vor dem Bau ermöglicht eine Beurteilung und Beweissicherung. Basierend auf den Voruntersuchungen kann eine Überwachung des Berg-/Grundwassers mittels geeigneter Messtechniken während Bau und Betrieb erfolgen.



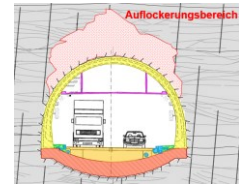
Tab. 9.47 Relevante Gefährdungen und beispielhafte Darstellung der Gefährdung.

B Überwachung Baugrund Tunnelnahbereich

B1 Baugrundveränderungen (Entfestigung, Volumenänderung, Auflockerung, etc.)

Die Erstellung eines Tunnelbauwerks kann den Baugrund im Tunnelnahbereich beeinflussen (z.B. Spannungsumlagerungen). Kurz- oder langfristig kann dies zu veränderten Baugrundeigenschaften und Einwirkungen auf das Tunnelbauwerk führen.

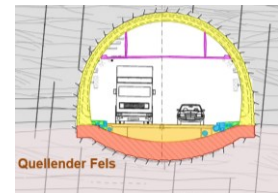
Unterschiedliche Baugrundveränderungen im Tunnelnahbereich (z.B. Entfestigung, Volumenänderung, Auflockerung, etc.) können zu einer Gefährdung der Tragsicherheit des Bauwerks führen. Während Bau und Betrieb können diese durch geeignete Messtechniken überwacht werden.



B2 Belastungsänderungen (Quelldruck, druckhaftes Gebirge, etc.)

Die Erstellung eines Tunnelbauwerks beeinflusst den Baugrund im Tunnelnahbereich (z.B. Spannungsumlagerungen). Kurz- oder langfristig kann dies zu veränderten Baugrundeigenschaften und Einwirkungen auf das Tunnelbauwerk führen.

Die Belastungsänderung in Teilen des Bauwerks infolge von veränderten/neuen Einwirkungen (z.B. Quelldruck, druckhaftes Gebirge, etc.) können zu einer Gefährdung der Tragsicherheit führen. Während Bau und Betrieb können diese durch geeignete Messtechniken erfasst und überwacht werden.

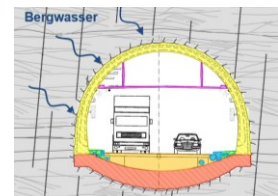


B3 Berg-/Grundwasserveränderungen

Die Erstellung eines Tunnelbauwerks hat Auswirkungen auf das vorhandene Berg-/ Grundwasserregime (z.B. Einfluss Tunnelvortrieb auf Grundwasserpegel), wobei das Bauwerk ebenfalls durch die Berg-/ Grundwasserverhältnisse beeinflusst werden kann (z.B. Belastung infolge Wasserdrucks).

Veränderungen im Berg-/Grundwasser können zu einer Gefährdung der Tragsicherheit (infolge Belastungsänderung Verkleidung) und der Betriebssicherheit (z.B. Tropfstellen) des Tunnelbauwerks führen.

Die Überwachung der Berg-/Grundwasserverhältnisse (z.B. Pegel, Strömung, etc.) im Tunnelnahbereich ermöglicht eine Beurteilung der Veränderungen im direkten Nahbereich des Bauwerks.

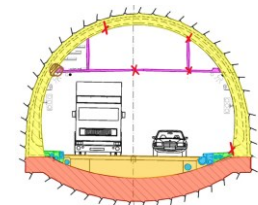


C Überwachung Verkleidung und Zwischendecke

C1 Bewehrungskorrosion

Die Tunnelbauwerke sind dem Verkehr und dem damit verbundenen Sprühnebel ausgesetzt, wodurch aus dem Tausalz Chloride in die Stahlbetonkonstruktion eingetragen werden können.

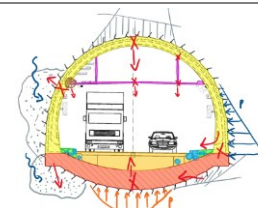
Die Chloride durchdringen die Passivschicht an einzelnen Stellen und führen zu einer lokalen Depassivierung der Stahloberfläche, womit die Bewehrungskorrosion einsetzt. Dies kann zu einer Gefährdung der Betriebssicherheit (Abplatzungen) bis zur Gefährdung der Tragsicherheit (Versagen Bauteil) führen.



C2 Betonspannungen

Die Verkleidung und Zwischendecke wird aufgrund von unterschiedlichen Einwirkungen aus dem Baugrund und dem Tunnelbauwerk belastet und können entsprechend die Tragsicherheit gefährden.

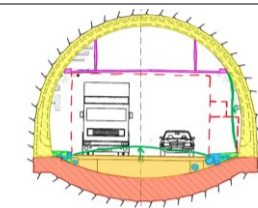
Die resultierenden Spannungen im Beton können durch geeignete Messtechniken erfasst und folglich überwacht werden. Dies ermöglicht ein Rückschluss auf das Tragverhalten des Bauteils sowie auf möglichen effektiv vorhandenen und/oder veränderter Einwirkungen. Dadurch können auch Erkenntnisse über die Tragreserven gewonnen werden.



C3 Verformungen

Die Verkleidung und Zwischendecke wird aufgrund von unterschiedlichen Einwirkungen aus dem Baugrund und dem Tunnelbauwerk belastet. Die resultierenden Verformungen können die Betriebssicherheit des Tunnelbauwerks gefährden.

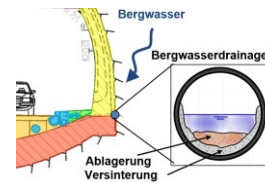
Die resultierenden Verformungen der Bauteile könne durch geeignete Messtechniken erfasst und folglich überwacht werden. Dies ermöglicht eine Beurteilung der Betriebssicherheit (z.B. Beeinträchtigung Lichtraumprofil) und des Tragverhaltes der Verkleidung und der Zwischendecke.



Tab. 9.47 Relevante Gefährdungen und beispielhafte Darstellung der Gefährdung.**D Bergwasserdrainage****D1 Überwachung**

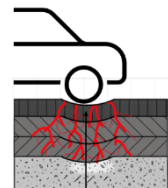
Veränderungen im Bergwasseranfall in der Drainageleitung lassen Rückschlüsse auf Veränderungen an deren Zustand oder allenfalls veränderter Bergwasserzirkulationsverhältnisse im Baugrund zu. Versinterungen und Ablagerungen können die Funktionstüchtigkeit der Bergwasserdrainage gefährden, was zu weiteren Gefährdung des Tunnelbauwerks infolge Wasseraufstau führen könnte.

Eine Überwachung der Bergwasserdrainage ermöglicht die Erfassung von Veränderungen in der Fließrate, der Temperatur und der Zusammensetzung des anfallenden Wassers.

**E Überwachung Belag und Fundation****E1 Längsebenheit**

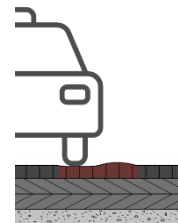
Die Längsebenheit ist ein Qualitätsmass für Strassen und Wege, welches in der Regel Fahrtrichtungs- und Fahrsteifen bezogen erfasst wird. Abweichungen in der Längsebenheit wirken sich negativ auf den Fahrkomfort und die Fahrsicherheit aus. Die Betriebssicherheit des Tunnelbauwerks kann gefährdet werden.

Die Datengrundlage für die Überwachung bildet ein Längsprofil oder partiell abgeleitete Differenzen zu einer Referenz, welche georeferenziert oder zu einer Strassenkilometrierung synchronisiert werden.

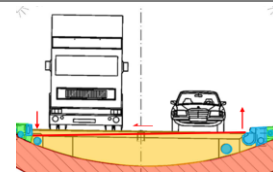
**E2 Querebenheit**

Die Querebenheit ist ein Qualitätsmass für Strassen und Wege, welches in der Regel Fahrtrichtungs- und Fahrsteifen bezogen erfasst wird. Abweichungen in der Querebenheit wirken sich negativ auf den Fahrkomfort (Spurrillen) und die Fahrsicherheit aus (stehendes Wasser in Rillen, Gefahr Aquaplaning). Die Betriebssicherheit des Tunnelbauwerks kann gefährdet werden.

Die Datengrundlage für die Überwachung bilden Querprofile aus einzelnen Messpunkten oder fast kontinuierlichen Messungen im Bezug zu einer Referenzhöhe. Die Querprofile können georeferenziert oder zu einer Strassenkilometrierung synchronisiert werden.

**E3 Querneigung**

Die Querneigung (Quer Gefälle) wird definiert als Gefälle der Fahrbahnoberfläche (oder darunterliegenden Schichten) rechtwinklig zur Strassenachse. Abweichungen in der Querneigung wirken sich negativ auf den Fahrkomfort (Kurvenfahrt) und die Fahrsicherheit aus (Entwässerung der Strasse). Die Betriebssicherheit des Tunnelbauwerks kann gefährdet werden.

**9.1.2 Robustheit**

Die Robustheit eines Tunnelbauwerks ist von vielen Faktoren abhängig. Ein spezifisches Bauwerk kann anhand der örtlichen Randbedingungen (Bauwerkstyp, Geologie, Gefährdungen, Boden-Bauwerks-Interaktion, etc.) bezüglich seiner Robustheit beurteilt werden. Für eine generalisierte Beurteilung ohne explizites Bauwerk müssen starke Vereinfachungen vorgenommen werden. Folgende Kriterien können für die vereinfachte Beurteilung der Robustheit eines Tunnelbauwerks verwendet werden:

- Geologie (Lockergestein, Festgestein, Hydrogeologie)
- Profilform (Hufeisenprofil, Maulprofil, Kreisprofil)
- Bauart Innenschale (Beton unbewehrt, Stahlbeton)
- Abdichtungskonzept (drainierend, druckhaltend)

Die Beurteilung der Robustheit folgt aus der Kombination der einzelnen Kriterien und ist in Abb. 9.126 dargestellt.

Geologie	Profilform	Bauart Innenschale	Abdichtungskonzept	Robustheit
Lockergestein	Maulprofil	Stahlbeton	drainierend	Mittel
			druckhaltend	Mittel
	Kreisprofil	Stahlbeton	drainierend	Hoch
			druckhaltend	Hoch
Festgestein	Hufeisenprofil	Stahlbeton	drainierend	Mittel
		Beton (unbewehrt)	drainierend	Gering
	Maulprofil	Stahlbeton	drainierend	Mittel
			druckhaltend	Mittel
		Beton (unbewehrt)	drainierend	Gering
			druckhaltend	Gering
	Kreisprofil	Stahlbeton	drainierend	Hoch
			druckhaltend	Hoch
		Beton (unbewehrt)	drainierend	Hoch
			druckhaltend	Mittel

Abb. 9.126 Zusammenstellung der vereinfachten Beurteilung der Robustheit bei Tunnelbauwerken.

9.1.3 Netzbezug / Umgebung

Für eine vereinfachte Einordnung des Netzbezugs eines Tunnels respektive der Konsequenzen eines Tunnelversagens auf den Verkehrsfluss des Nationalstrassennetzes kann die Einbindung im übergeordneten Strassennetz und die Verkehrsbelastung berücksichtigt werden. Dabei erfolgt eine Verknüpfung der beiden Kriterien in einer Risikomatrix. Es resultiert eine Klassifizierung des Netzbezugs für das Tunnelbauwerk (Abb. 9.127), welche die Konsequenzen des Versagens aufzeigt.

Die Verkehrsbelastung in einem Tunnel kann anhand des durchschnittlichen Tagesverkehrs (DTV) quantifiziert werden. Für die Abstufung der drei Kriterien kann zwischen schwach (DTV < 30'000 Fahrzeuge/Tag, z.B. Tunnel Gotschna) bis stark befahrenen Tunnel (DTV > 70'000 Fahrzeuge/Tag, z.B. Gubristtunnel) unterschieden werden. Ein stark befahrener Tunnel hat entsprechend einen höheren Netzbezug und die Konsequenzen eines Versagens sind grösser.

Die Einbindung des Tunnels im übergeordneten Strassennetz kann mit den vorhandenen Ausweichrouten vereinfacht beurteilt werden. Die Abstufung der Kriterien unterscheidet zwischen lokalen (z.B. Kantonsstrasse anstelle Tunnel), regionalen (z.B. Axenstrasse anstelle Seelisberg) und grossräumigen (z.B. San Bernadino anstelle Gotthard) Ausweichrouten.

Legende: Bewertung Konsequenz des Versagens

: Gering

: Mittel

: Hoch

			Ausweichroute			
			Umgebung	Lokal	Regional	Grossräumig
	Netzbelastung	DTV		Gering	Mittel	Hoch
1	Gering	< 30'000		1	2	3
2	Mittel	30'000 - 70'000				
3	Hoch	> 70'000				

Abb. 9.127 Bewertung der Konsequenz des Versagens.

9.2 Bewertung von einzelnen Technologien

9.2.1 Generelles Vorgehen

Die einzelnen Überwachungstechnologien werden im Bezug zur jeweiligen Fragestellung bzw. Gefährdung bewertet. Die Bewertung erfolgt nicht spezifisch an einem konkreten Tunnelbauwerk, sondern übergeordnet, generalisiert und stark vereinfacht auf Basis von Randbedingungen und Szenarien. Diese werden einerseits für eine grobe Kostenabschätzung verwendet und fliessen andererseits ebenfalls in die Bewertung des Nutzens ein. Die beschriebene, grobe Technologiebewertung dient als Ausgangslage, um einen Überblick zu bekommen. Im konkreten Fall sind die Technologien immer objektspezifisch für die konkrete Problemstellung zu beurteilen.

Das grundlegende Szenario geht von der Überwachung eines Tunnelabschnitts von 1 km Länge und rund 20 Messstellen aus, welche über einen Zeitraum von 15 Jahren gemessen werden. Um den zusätzlichen Nutzen einer Messtechnologie und die dazugehörigen Kosten bei einem grösseren Ausmass zu bewerten, wird ein zweites Szenario ("zusätzliches Ausmass") definiert. Dieses geht von einem 3 km langen Tunnelabschnitt mit rund 60 Messstellen aus, der während 25 Jahre überwacht wird. Diese Handlungsszenarios sind starke Vereinfachungen und weitere Randbedingungen werden aufgrund der generalisierten Betrachtung nicht definiert.

Der objektbezogene Nutzen einer Technologie wird gemäss Kapitel 5.4.2 anhand der Zuverlässigkeit (Abb. 5.10) und der Aussagekraft der Indikatoren (Abb. 5.11) bestimmt und mittels Kategorien zwischen 1 (Klein) und 3 (Gross) bewertet. Die Aussagekraft der Indikatoren wird dabei durch deren Bezug zur Gefährdung gebildet. Dieser Bezug zur Gefährdung wird vereinfacht durch die Technologie an sich (Messgrösse, Genauigkeiten, etc.) und deren Anwendung im grundlegenden Szenario beeinflusst. Der zusätzliche Nutzen für ein zusätzliches Ausmass (zweites Szenario) wird mittels Kategorien zwischen 1 (gering) und 5 (sehr gross) bewertet.

Die objektbezogenen Kosten (siehe auch Kap. 5.4.3) einer Technologie werden anhand der Handlungsszenarios bestimmt. Die Kosten stützen sich auf die Angaben in Kapitel 7. Der Überwachungszeitraum wird durch ein Messintervall sowie der Unterteilung in einmalige und wiederkehrende Kosten berücksichtigt. Die Kosten pro Technologie für die beiden Szenarios werden qualitativ innerhalb einer Fragestellung verglichen, wobei die Bewertung mittels Kategorien zwischen 1 (sehr klein) und 5 (sehr gross) erfolgt. Aufgrund der diversen Vereinfachungen und Annahmen sind genauere, quantitative Aussagen über die Kosten nicht möglich.

In den folgenden Tabellen (Tab. 9.48 bis Tab. 9.60) werden die generellen Bewertungen der Überwachungstechnologien je Fragestellung dargestellt. In den Abbildungen (Abb. 9.128 bis Abb. 9.140) sind die Nutzen-/Kosten-Diagramme der Überwachungstechnologien je Fragestellung abgebildet. In einem Diagramm werden pro Technologie jeweils zwei Punkte dargestellt, welche mit einer Ellipse umhüllt werden. Die Punkte zeigen die Kosten und den Nutzen für die zwei Handlungsszenarios: Nutzen und Kosten für das grundlegende Szenario sowie der zusätzliche Nutzen mit grösserem Ausmass und entsprechenden Zusatzkosten gemäss zweitem Szenario. Die umhüllende Ellipse stellt die Bandbreite der Parameter Nutzen und Kosten dar.

In den Abbildungen und den Tabellen werden jeweils die obere und untere Grenze aufgezeigt. Die Kritikalität eines Bauwerks gemäss Kapitel 5 hat einen Einfluss auf den Nutzen der Überwachungstechnologie. Bei einer hohen Kritikalität des Bauwerks haben die Kriterien für den Nutzen einer Technologie (Aussagekraft Indikator und die Zuverlässigkeit der Technologie) eine höhere Bedeutung und werden entsprechend in der Beurteilung stärker gewichtet. Diese Beurteilung wird im Diagramm "obere Grenze" dargestellt. Die Beurteilung der Überwachungstechnologien eines Bauwerks mit tiefer Kritikalität wird im Diagramm "untere Grenze" dargestellt.

9.2.2 Bewertung der Technologien

A Bauwerksentkoppelte Überwachung

A1 Baugrundverformungen

Tab. 9.48 Kategorien / Bewertung der Technologien A1 Baugrundverformungen.

Technologie	Objektbezogener Nutzen					Objektbezogene Kosten	
	Zuverlässigkeit	Aussagekraft	Untere Grenze	Obere Grenze	Zusätzlicher Nutzen	Kosten	Kosten zusätzliches Ausmass
Terrestrische Radarinterferometrie	3	2	6	18	2	2.00	3.25
Satellitengestützte Radarinterferometrie	1	2	4	12	3	3.00	4.25
Laserscanning	3	3	9	27	4	2.75	3.50
Geodätische Aufnahmen (Tachymeter)	3	2	6	18	3	3.00	4.00
Sondenextensometer	3	3	9	27	4	3.25	4.75
Inklinometer	3	2	6	18	3	3.00	4.50
Extensometer	3	2	6	18	3	2.75	4.25
Schlauchwaage	3	1	3	9	1	2.00	3.00
Nivellement	3	2	6	18	3	2.75	3.75
Faseroptische Sensoren	3	2	6	18	5	3.00	5.00

Erläuterung Berechnungsmethode und Darstellung in den Diagrammen

Schrittweise Erläuterung für Technologie "Terrestrische Radarinterferometrie".

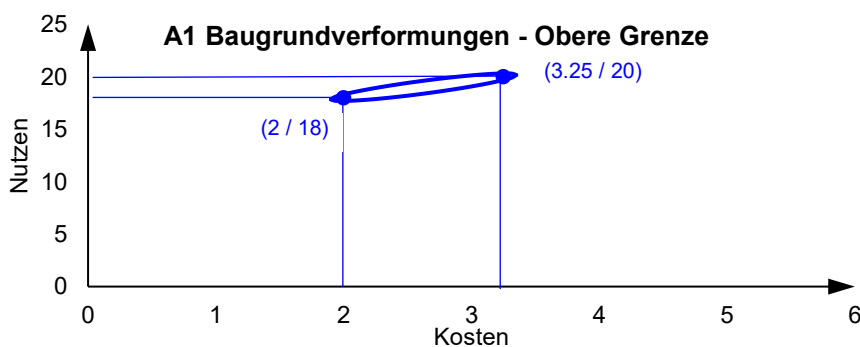
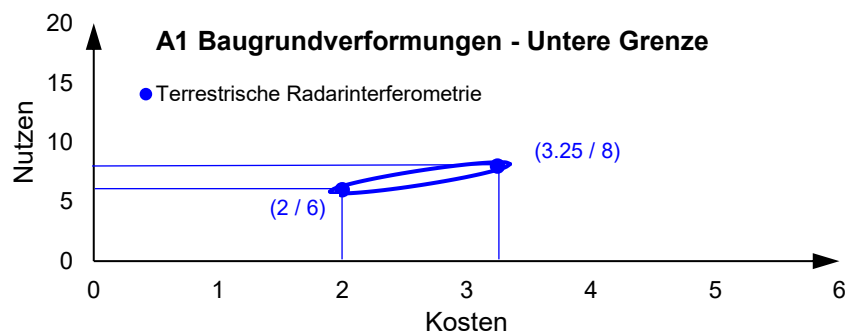
Technologie	Objektbezogener Nutzen					Objektbezogene Kosten	
	Zuverlässigkeit	Aussagekraft	Untere Grenze	Obere Grenze	Zusätzlicher Nutzen	Kosten	Kosten zusätzliches Ausmass
Terrestrische Radarinterferometrie	3	2	6	18	2	2.00	3.25

Erläuterung Objektbezogener Nutzen

Zuverlässigkeit:	Die Technologie ist erprobt in der Anwendung und funktioniert zuverlässig. → Kategorie 3
Aussagekraft:	Die Technologie liefert aussagekräftige Resultate, wobei diese bei schlechten Wetterverhältnissen teilweise relativiert werden müssen. → Kategorie 2
Untere Grenze / Obere Grenze:	Wie in der allgemeinen Beschreibung erläutert wird die Kritikalität mit einer unteren Grenze (Faktor 1) und einer oberen Grenze (Faktor 3) einbezogen
Objektbezogener Nutzen Untere Grenze:	$\text{Zuverlässigkeit} \times \text{Aussagekraft} \times \text{Faktor Untere Grenze} = 3 \times 2 \times 1 = 6$
Objektbezogener Nutzen Obere Grenze:	$\text{Zuverlässigkeit} \times \text{Aussagekraft} \times \text{Faktor Obere Grenze} = 3 \times 2 \times 3 = 18$
Zusätzlicher Nutzen:	Die Technologie liefert bei einem zusätzlichen Ausmass nur einen kleinen Zusatznutzen → Kategorie 2 →
Objektbezogener Gesamtnutzen:	Untere Grenze: $3 \times 2 \times 1 + 2 = 8$ Obere Grenze: $3 \times 2 \times 3 + 2 = 20$

Erläuterung Objektbezogene Kosten

Kosten	Die Kosten wurden über alle Technologien bei dieser Fragestellung verglichen und zwischen 1 (sehr klein) und 5 (sehr gross) bewertet → Bewertung 2.00
Kosten zusätzliches Ausmass	Die Kosten bei einem zusätzlichen Ausmass steigen trotz des kleinen Zusatznutzens spürbar an → Bewertung 3.25



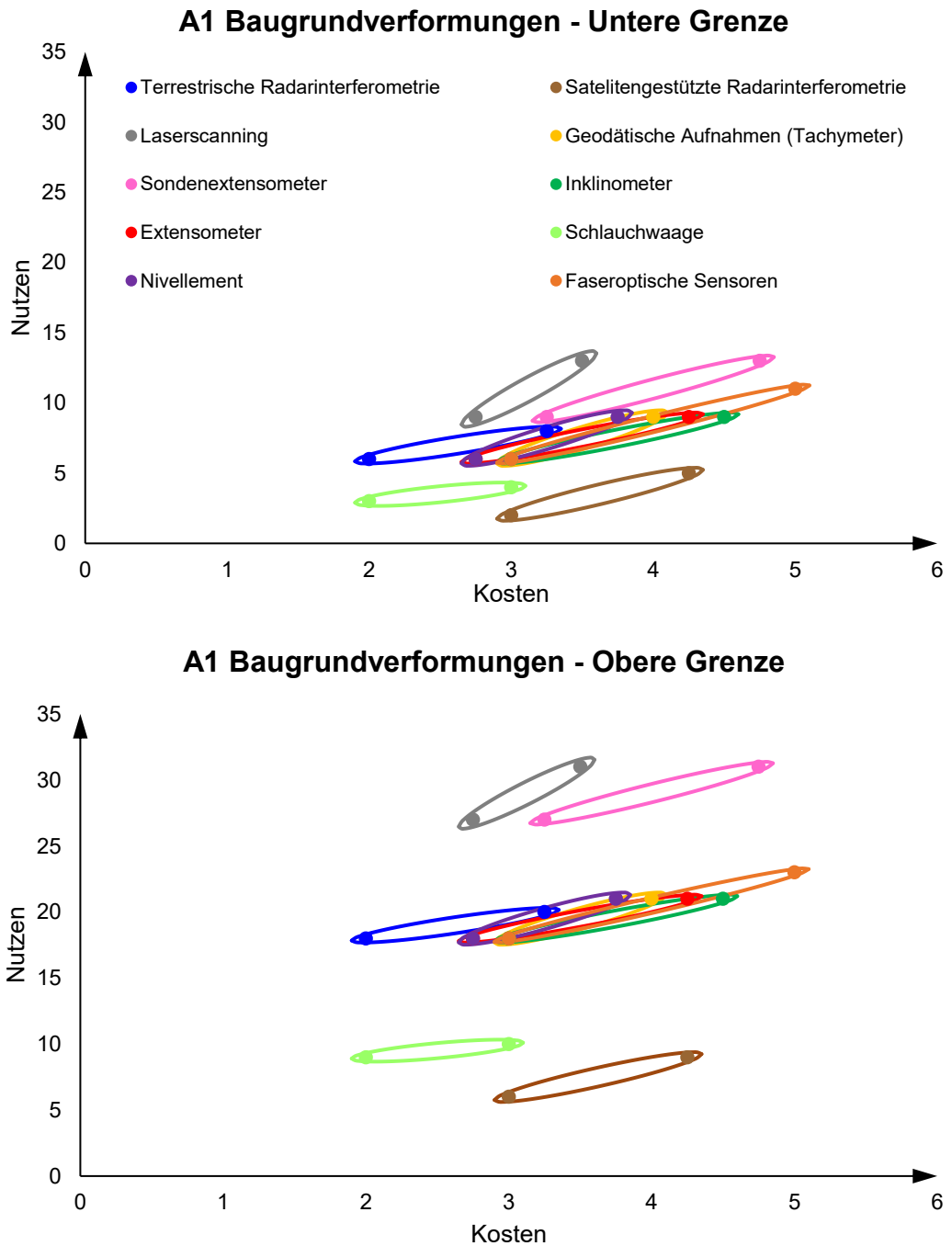


Abb. 9.128 Obere und Untere Grenze Nutzen/Kosten – Baugrundverformungen.

A2 Massenbewegungen

Tab. 9.49 Kategorien / Bewertung der Technologien A2 Massenbewegungen.

Technologie	Objektbezogener Nutzen					Objektbezogene Kosten	
	Zuverlässigkeit	Aussagekraft	Untere Grenze	Obere Grenze	Zusätzlicher Nutzen	Kosten	Kosten zusätzliches Ausmass
Bewegungs-Radar (Dopplerradar)	3	3	9	27	3	1.50	2.00
Geophone	3	2	6	18	3	3.00	4.00
Pegel-Radar	3	1	3	9	1	1.25	1.75
Infrasound	3	2	6	18	2	1.25	2.00
Wetterstation	3	1	3	9	3	1.25	2.00
Laserscanning	3	2	6	18	4	2.50	3.00
Reissleinen	3	1	3	9	2	2.50	3.00
Kapazitive Drucksensoren	3	1	3	9	2	2.75	4.00
Piezoelektrische Drucksensoren	3	1	3	9	2	2.75	4.00
Terrestrische Radarinterferometrie	3	3	9	27	2	2.00	3.00
Satellitengestützte Radarinterferometrie	3	3	9	27	3	3.00	4.00
Deformationskameras	3	3	9	27	2	1.25	2.00
Geodätische Aufnahmen (Tachymeter)	3	2	6	18	4	2.50	3.00
Nivellement	3	2	6	18	3	2.25	2.75
Fugen- und Rissmessgeräte	3	1	3	9	1	1.00	1.50
Distometer	3	1	3	9	2	2.50	3.50
Neigungsänderungen (Clinometer)	3	2	6	18	3	3.00	4.00
Faseroptische Sensoren	3	2	6	18	4	4.00	4.50

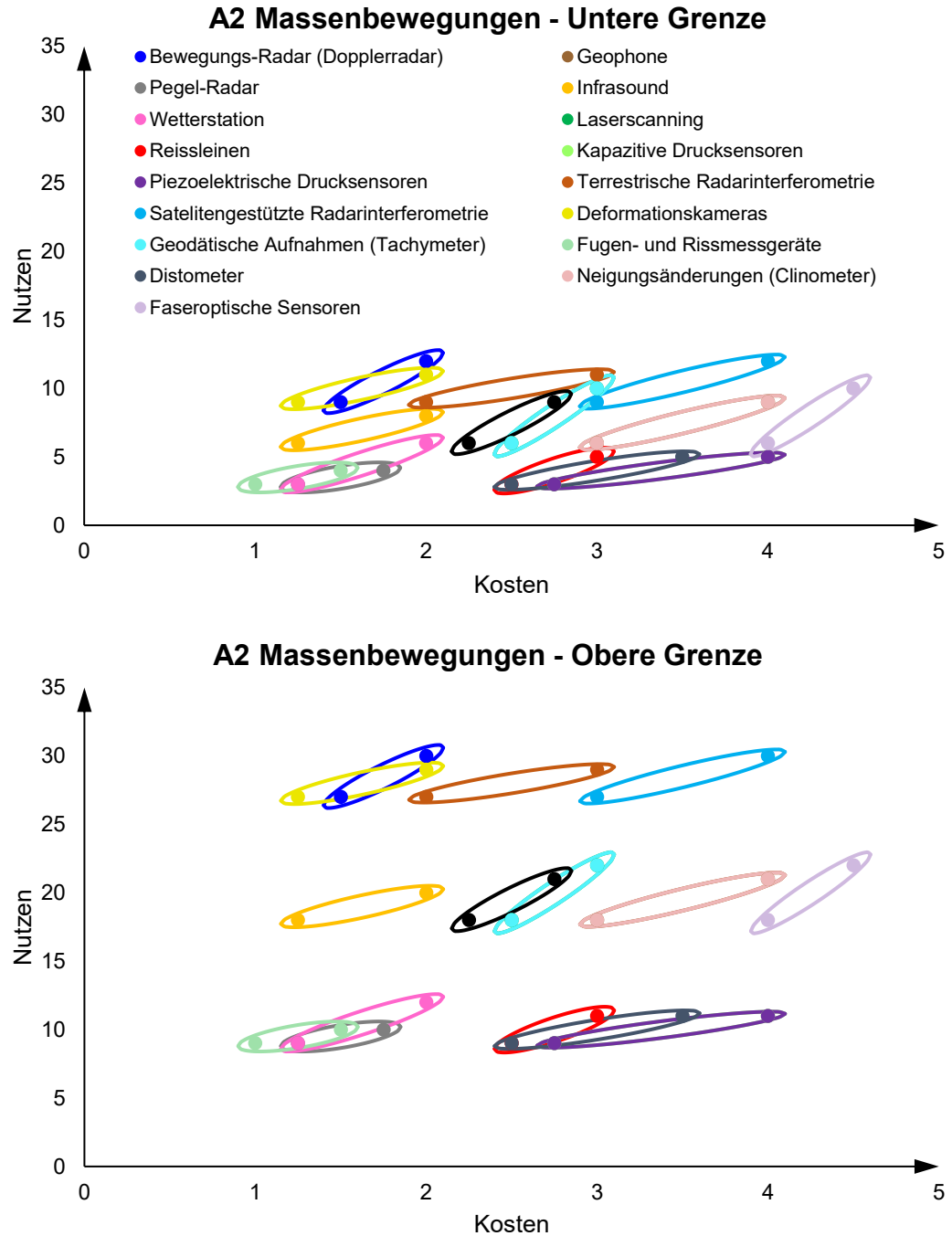


Abb. 9.129 Obere und Untere Grenze Nutzen/Kosten – Massenbewegungen.

A3 Berg-/Grundwasser*Tab. 9.50 Kategorien / Bewertung der Technologien A3 Berg-/Grundwasser.*

Technologie	Objektbezogener Nutzen					Objektbezogene Kosten	
	Zuverlässigkeit	Aussagekraft	Untere Grenze	Obere Grenze	Zusätzlicher Nutzen	Kosten	Kosten zusätzliches Ausmass
Piezometer	3	3	9	27	3	2.00	3.25
Porenwasserdruckgeber	3	3	9	27	3	2.50	3.50
Grundwasserströmungsmessung	3	1	3	9	4	3.00	4.00
Wassertemperatursensoren	3	2	6	18	2	1.75	3.00
Durchflussmessung	3	2	6	18	2	1.50	2.75
Durchlässigkeitsversuche	3	1	3	9	3	4.25	5.00
Leitfähigkeitssensoren	3	2	6	18	3	2.00	3.25

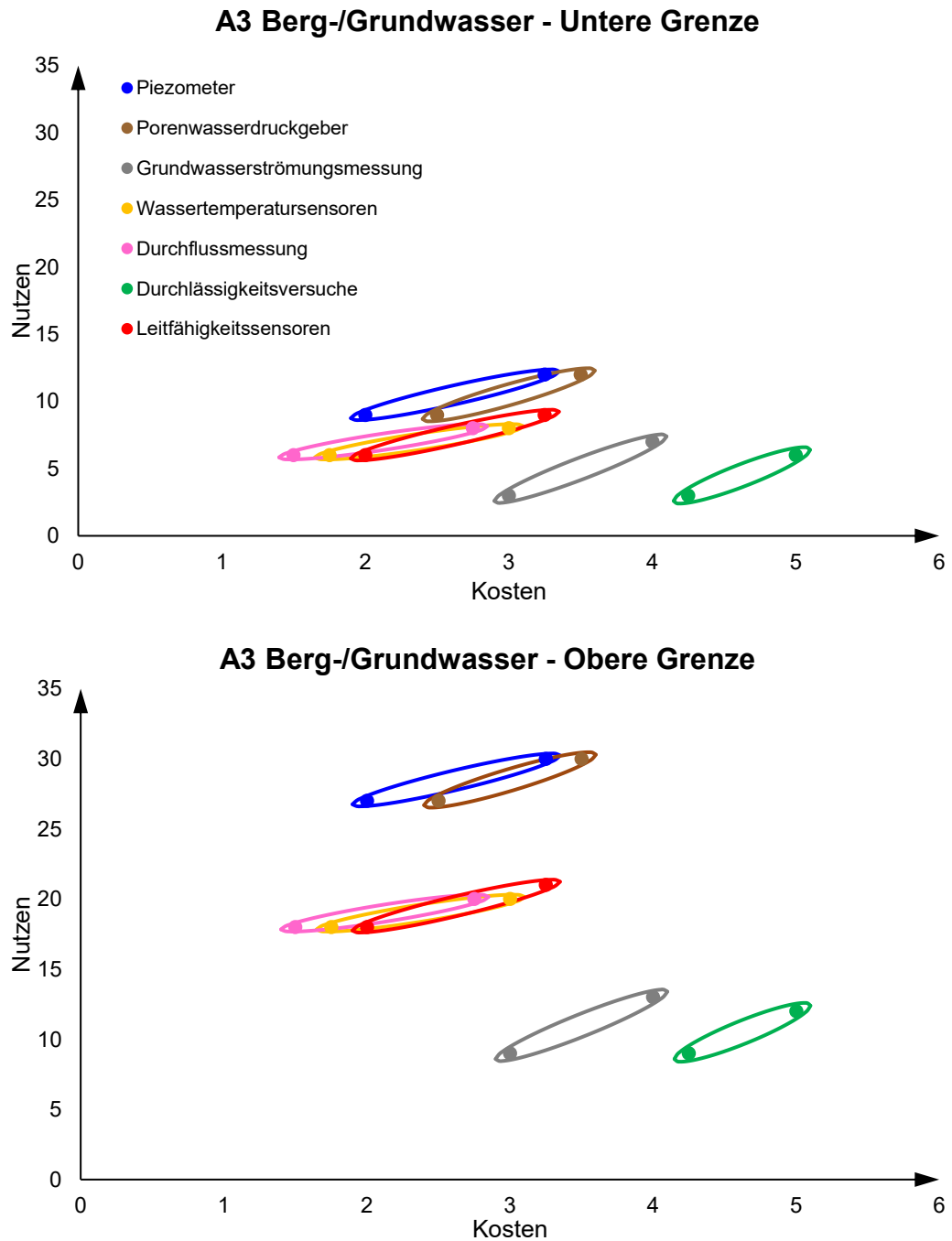


Abb. 9.130 Obere und Untere Grenze Nutzen/Kosten – Berg / Grundwasser.

B Überwachung Baugrund Tunnelnabereich

B1 Baugrundveränderungen

Tab. 9.51 Kategorien / Bewertung der Technologien B1 Baugrundveränderungen.

Technologie	Objektbezogener Nutzen					Objektbezogene Kosten	
	Zuverlässigkeit	Aussagekraft	Untere Grenze	Obere Grenze	Zusätzlicher Nutzen	Kosten	Kosten zusätzliches Ausmass
Sondenextensometer	3	3	9	27	4	2.50	4.00
Inklinometer	3	2	6	18	3	2.50	4.00
Extensometer	3	2	6	18	3	2.50	3.50
Faseroptische Sensoren	3	2	6	18	5	3.00	4.25
Reverse-Head-Extensometer	3	1	3	9	2	2.50	4.00
Bohrlochdilatometer	3	1	3	9	3	2.50	5.00
Bohrlochscan	3	2	6	18	3	2.00	3.75

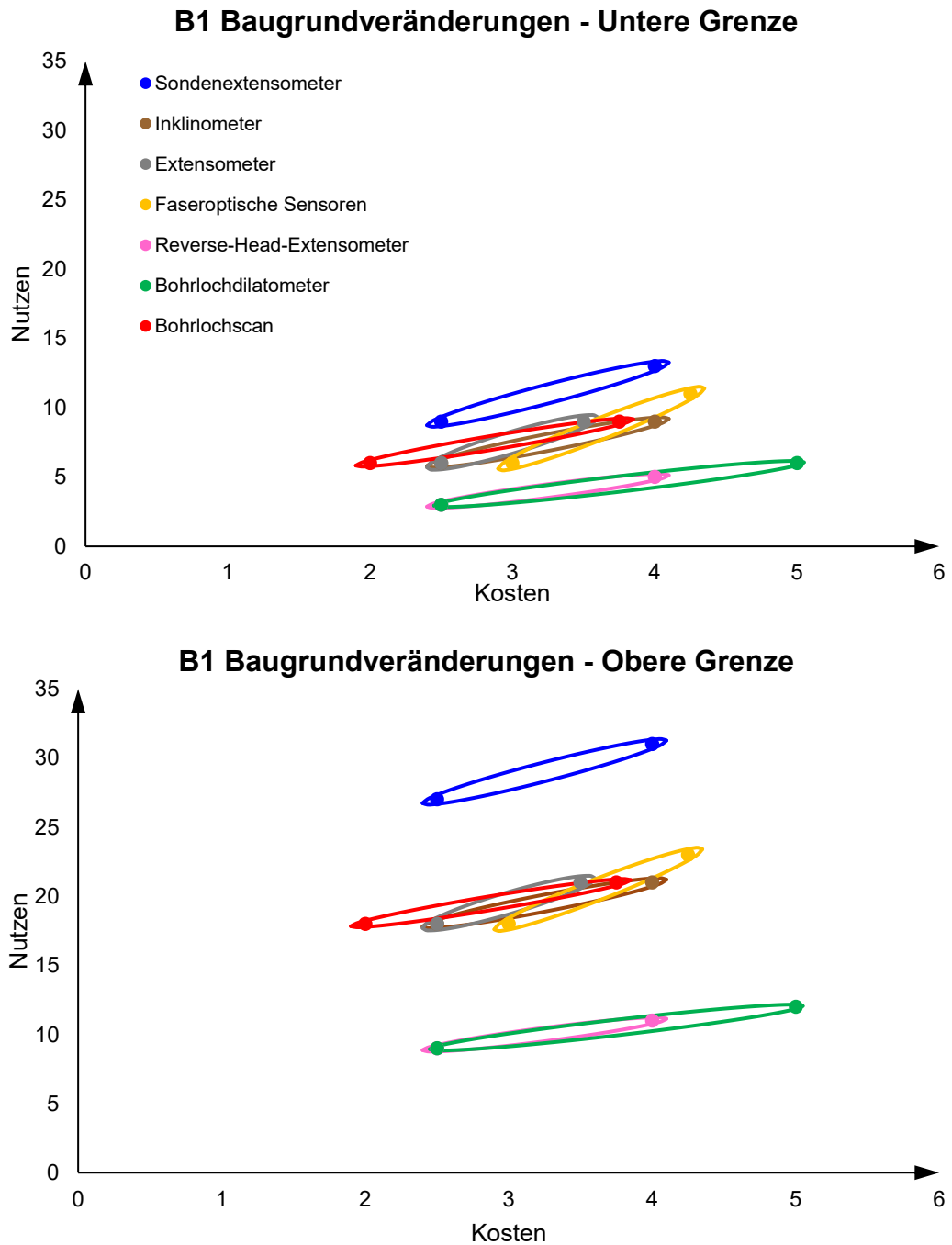


Abb. 9.131 Obere und Untere Grenze Nutzen/Kosten – Baugrundveränderungen.

B2 Belastungsänderungen*Tab. 9.52 Kategorien / Bewertung der Technologien B2 Belastungsänderungen.*

Technologie	Objektbezogener Nutzen					Objektbezogene Kosten	
	Zuverlässigkeit	Aussagekraft	Untere Grenze	Obere Grenze	Zusätzlicher Nutzen	Kosten	Kosten zusätzliches Ausmass
Messanker	3	3	9	27	3	2.25	4.25
Kraftmessdose	3	3	9	27	2	2.00	3.75
Faseroptische Drucksensoren	3	2	6	18	3	1.50	3.00
Dehnungsmessstreifen	3	2	6	18	4	1.75	3.25
Schlitzpressenmessungen	3	1	3	9	1	2.00	4.00
Druckkissen	3	1	3	9	2	2.00	3.75

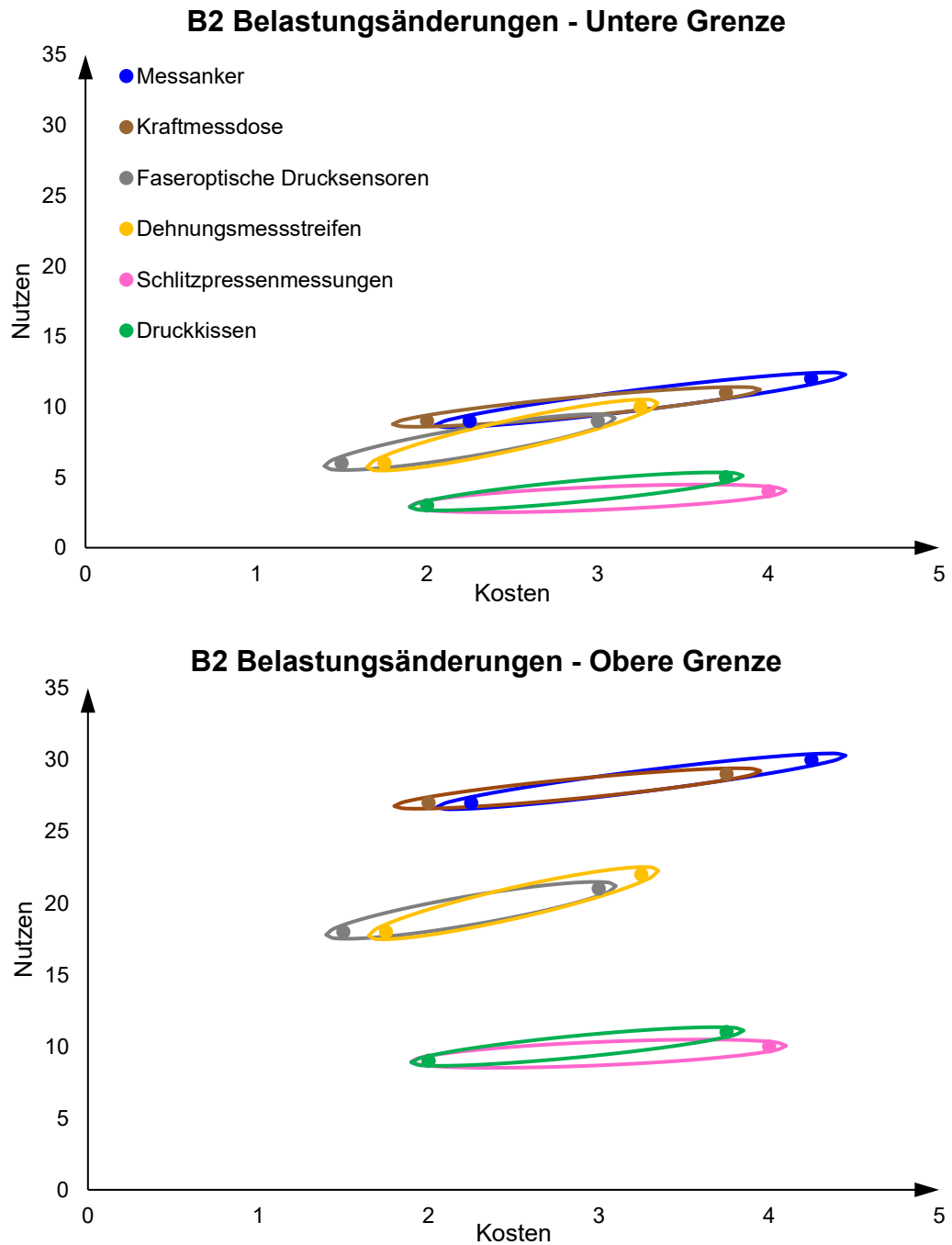


Abb. 9.132 Obere und Untere Grenze Nutzen/Kosten – Belastungsänderungen.

B3 Berg-/Grundwasserveränderungen

Tab. 9.53 Kategorien / Bewertung der Technologien B3 Berg-Grundwasserveränderungen.

Technologie	Objektbezogener Nutzen					Objektbezogene Kosten	
	Zuverlässigkeit	Aussagekraft	Untere Grenze	Obere Grenze	Zusätzlicher Nutzen	Kosten	Kosten zusätzliches Ausmass
Piezometer	3	3	9	27	3	2.00	3.50
Porenwasserdruckgeber	3	3	9	27	3	2.75	4.75
Wassertemperatursensoren	3	2	6	18	2	1.50	3.00
pH-Wert	3	2	6	18	3	1.75	3.25
Leitfähigkeitssensoren	3	2	6	18	3	2.00	3.50

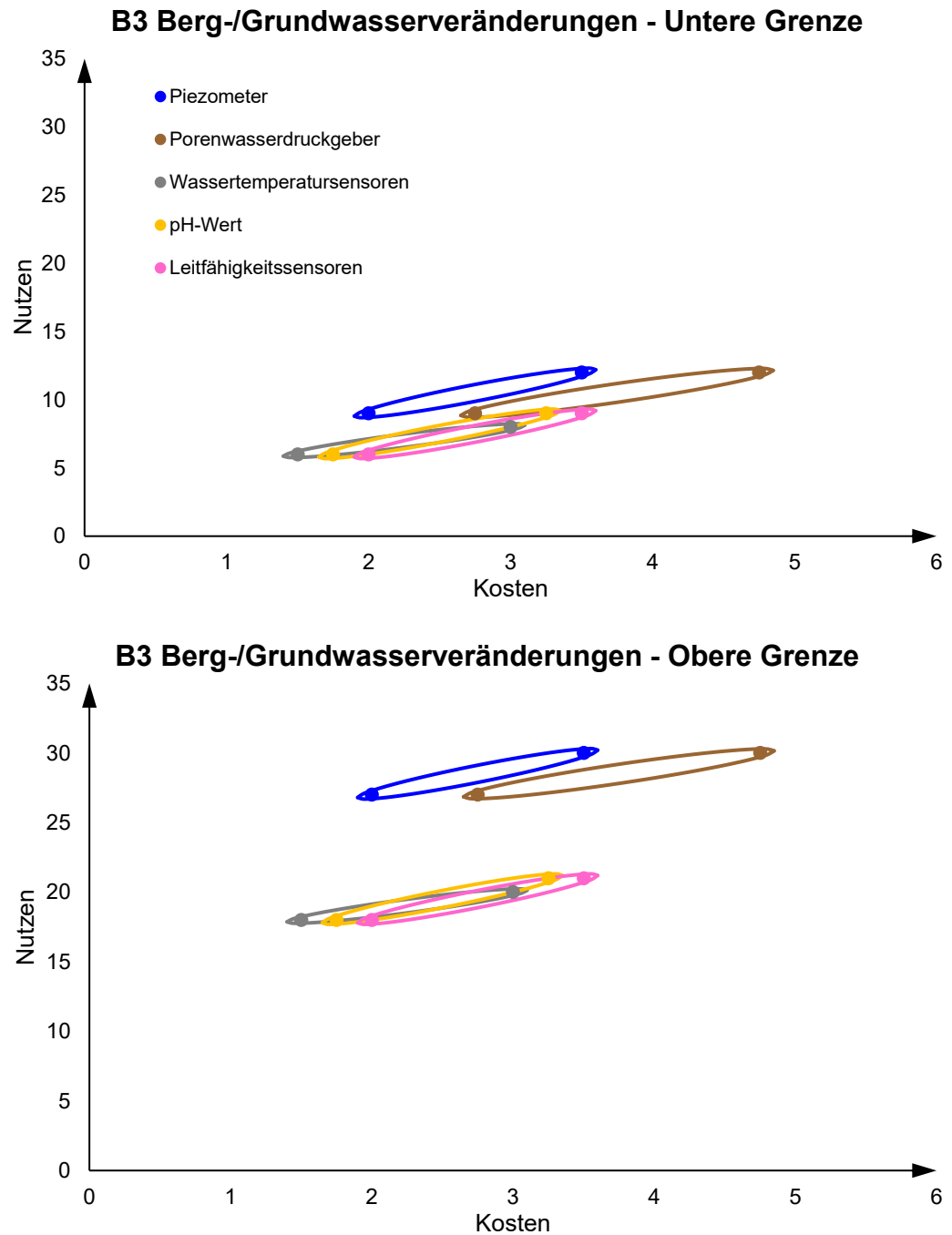


Abb. 9.133 Obere und Untere Grenze Nutzen/Kosten – Berg- / Grundwasserveränderungen.

C Überwachung Verkleidung und Zwischendecke

C1 Bewehrungskorrosion

Tab. 9.54 Kategorien / Bewertung der Technologien C1 Bewehrungskorrosion.

Technologie	Objektbezogener Nutzen					Objektbezogene Kosten	
	Zuverlässigkeit	Aussagekraft	Untere Grenze	Obere Grenze	Zusätzlicher Nutzen	Kosten	Kosten zusätzliches Ausmass
Potentialfeldmessung	3	2	6	18	3	3.00	4.00
Chloridgehaltsmessungen	3	2	6	18	4	3.25	4.25

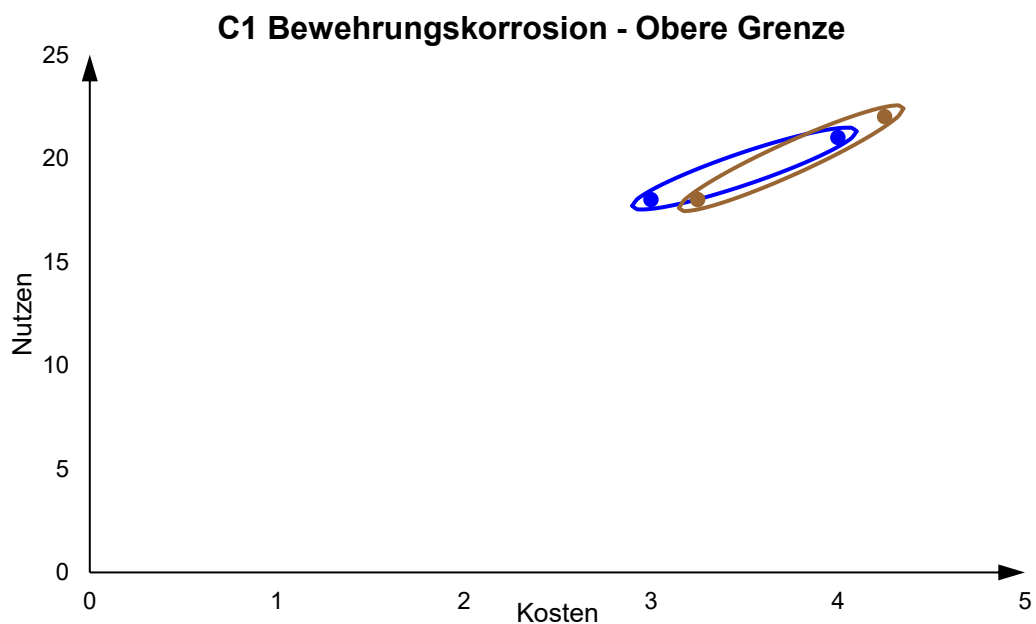
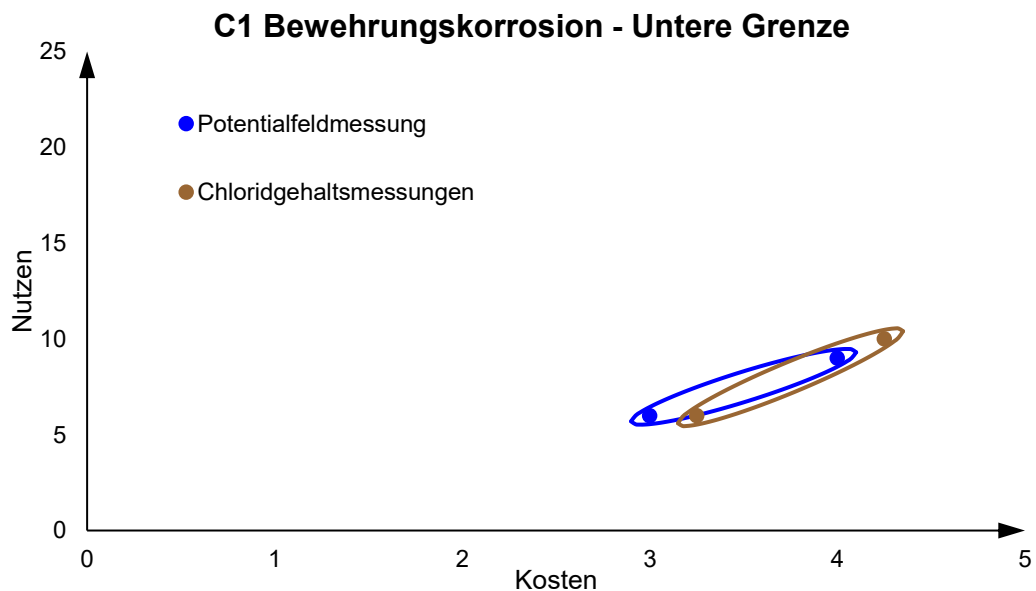


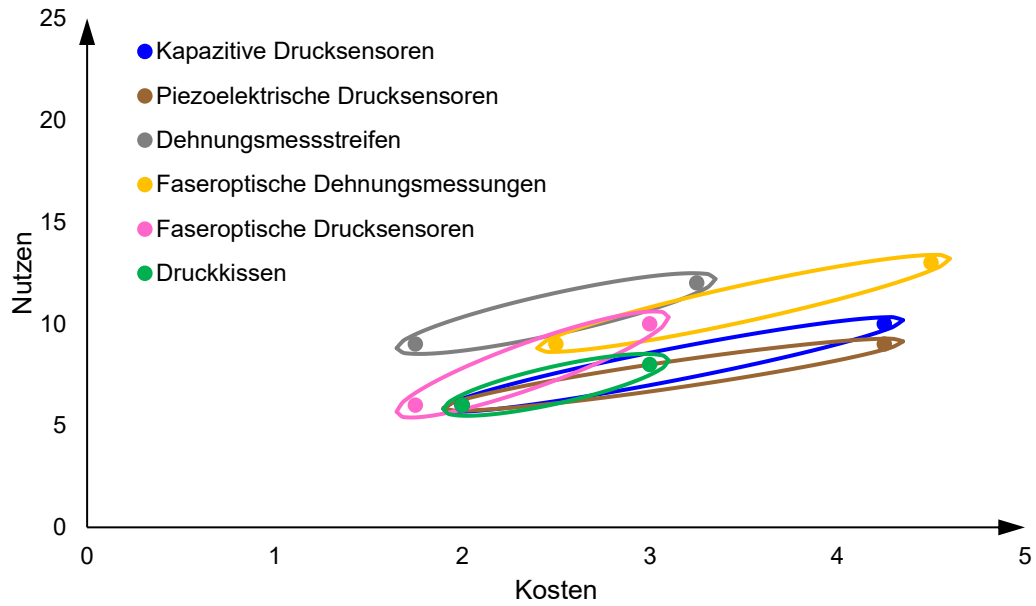
Abb. 9.134 Obere und Untere Grenze Nutzen/Kosten – Bewehrungskorrosion.

C2 Betonspannungen

Tab. 9.55 Kategorien / Bewertung der Technologien C2 Betonspannungen.

Technologie	Objektbezogener Nutzen					Objektbezogene Kosten	
	Zuverlässigkeit	Aussagekraft	Untere Grenze	Obere Grenze	Zusätzlicher Nutzen	Kosten	Kosten zusätzliches Ausmass
Kapazitive Drucksensoren	3	2	6	18	4	2.00	4.25
Piezoelektrische Drucksensoren	3	2	6	18	3	2.00	4.25
Dehnungsmessstreifen	3	3	9	27	3	1.75	3.25
Faseroptische Dehnungsmessungen	3	3	9	27	4	2.50	4.50
Faseroptische Drucksensoren	3	2	6	18	4	1.75	3.00
Druckkissen	3	2	6	18	2	2.00	3.00

C2 Betonspannungen - Untere Grenze



C2 Betonspannungen - Obere Grenze

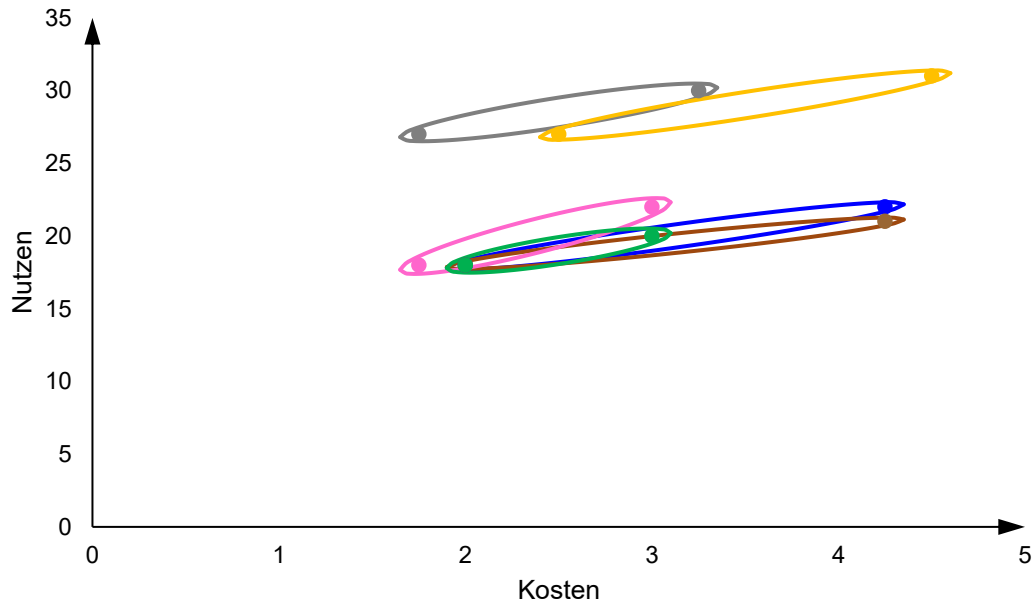


Abb. 9.135 Obere und Untere Grenze Nutzen/Kosten – Betonspannungen.

C3 Verformungen

Tab. 9.56 Kategorien / Bewertung der Technologien C3 Verformungen

Technologie	Objektbezogener Nutzen					Objektbezogene Kosten	
	Zuverlässigkeit	Aussagekraft	Untere Grenze	Obere Grenze	Zusätzlicher Nutzen	Kosten	Kosten zusätzliches Ausmass
Laserscanning	3	3	9	27	4	3.00	3.25
Geodätische Aufnahmen	3	2	6	18	3	3.25	4.25
Schlauchwaage	3	1	3	9	1	2.00	3.00
Faseroptische Dehnungsmessungen	3	2	6	18	4	4.00	5.00
Neigungsänderungen (Clinometer)	3	1	3	9	1	3.00	4.00
Distometer	3	1	3	9	2	2.50	3.50
Nivellement	3	2	6	18	3	3.00	4.00
Fugen- und Rissmessgerät	3	1	3	9	1	1.00	2.00

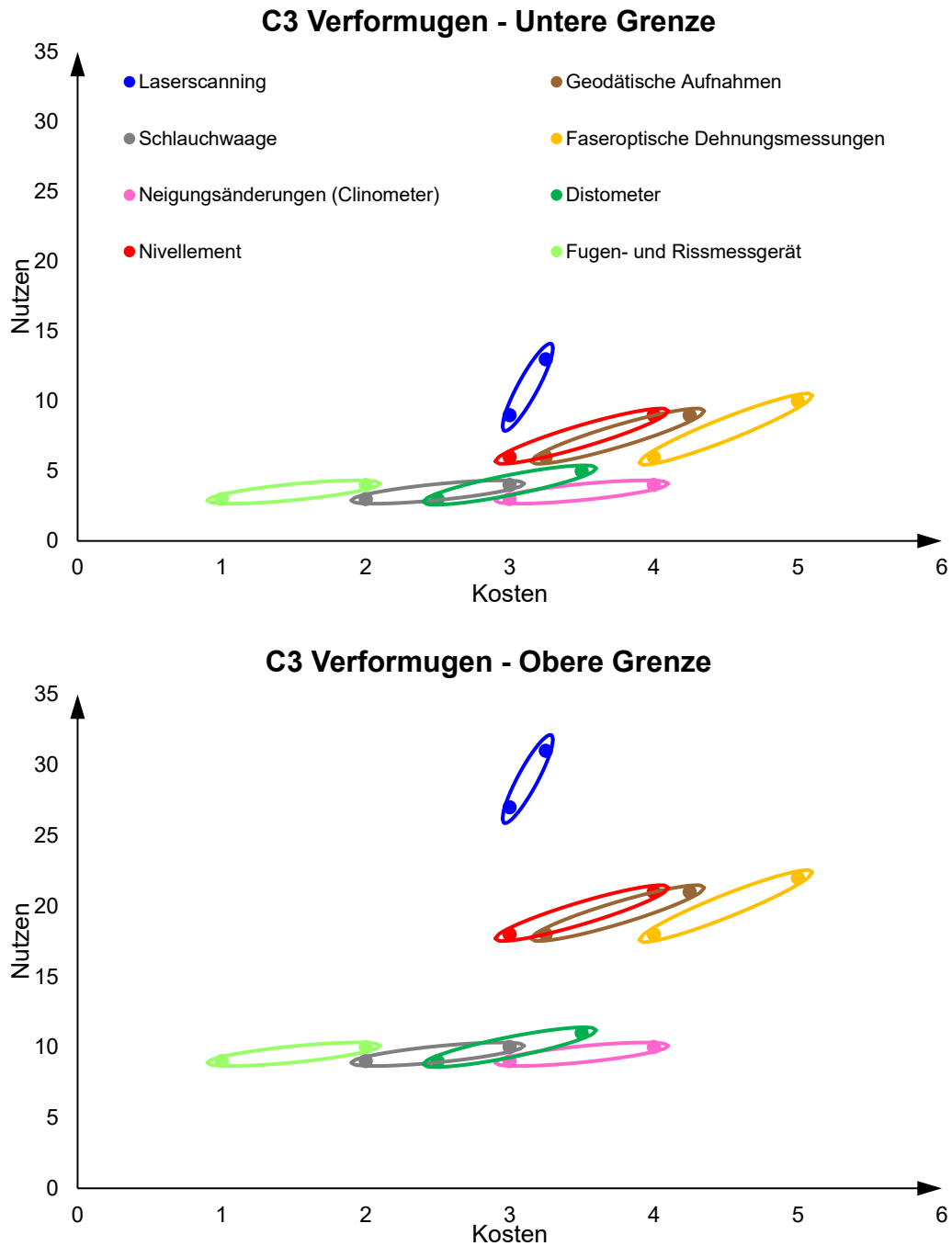


Abb. 9.136 Obere und Untere Grenze Nutzen/Kosten – Vermögenen.

D **Bergwasserdrainage**

D1 Überwachung

Tab. 9.57 Kategorien / Bewertung der Technologien D1 Überwachung.

Technologie	Objektbezogener Nutzen					Objektbezogene Kosten	
	Zuverlässigkeit	Aussagekraft	Untere Grenze	Obere Grenze	Zusätzlicher Nutzen	Kosten	Kosten zusätzliches Ausmass
Durchflussmessung	3	3	9	27	2	2.50	4.25
Wassertemperatursensoren	3	2	6	18	3	1.50	3.50
pH-Wert	3	2	6	18	2	1.75	3.75
Versinterungspotenzial (Kohlensäure-Kalk)	3	2	6	18	3	3.00	4.50
Leitfähigkeitssensoren	3	2	6	18	3	2.00	4.00
Kanalkamera	3	2	6	18	3	2.5	4.25

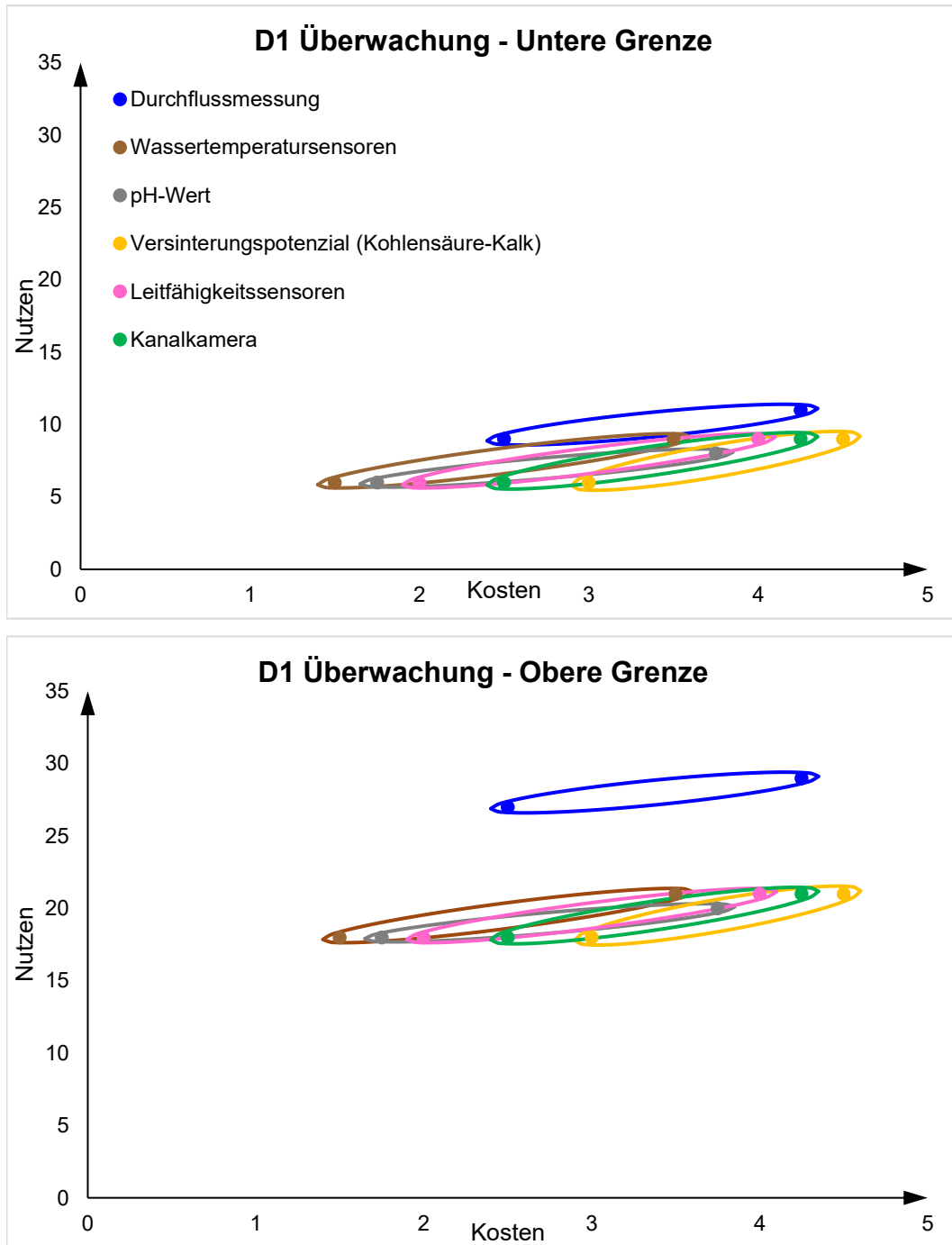


Abb. 9.137 Obere und Untere Grenze Nutzen/Kosten – Überwachung.

E Überwachung Belag und Foundation

E1 Längsebenheit

Tab. 9.58 Kategorien / Bewertung der Technologien E1 Längsebenheit

Technologie	Objektbezogener Nutzen					Objektbezogene Kosten	
	Zuverlässigkeit	Aussagekraft	Untere Grenze	Obere Grenze	Zusätzlicher Nutzen	Kosten	Kosten zusätzliches Ausmass
Richtlatte	3	2	6	18	1	2.00	3.50
Planograph	3	2	6	18	3	3.00	4.50
Goniograph	3	2	6	18	2	3.00	4.50
Lasersensor	3	3	9	27	3	2.25	3.75
Laserscanner	3	3	9	27	4	1.75	3.25
Triangulationssensor	3	3	9	27	5	1.75	3.25

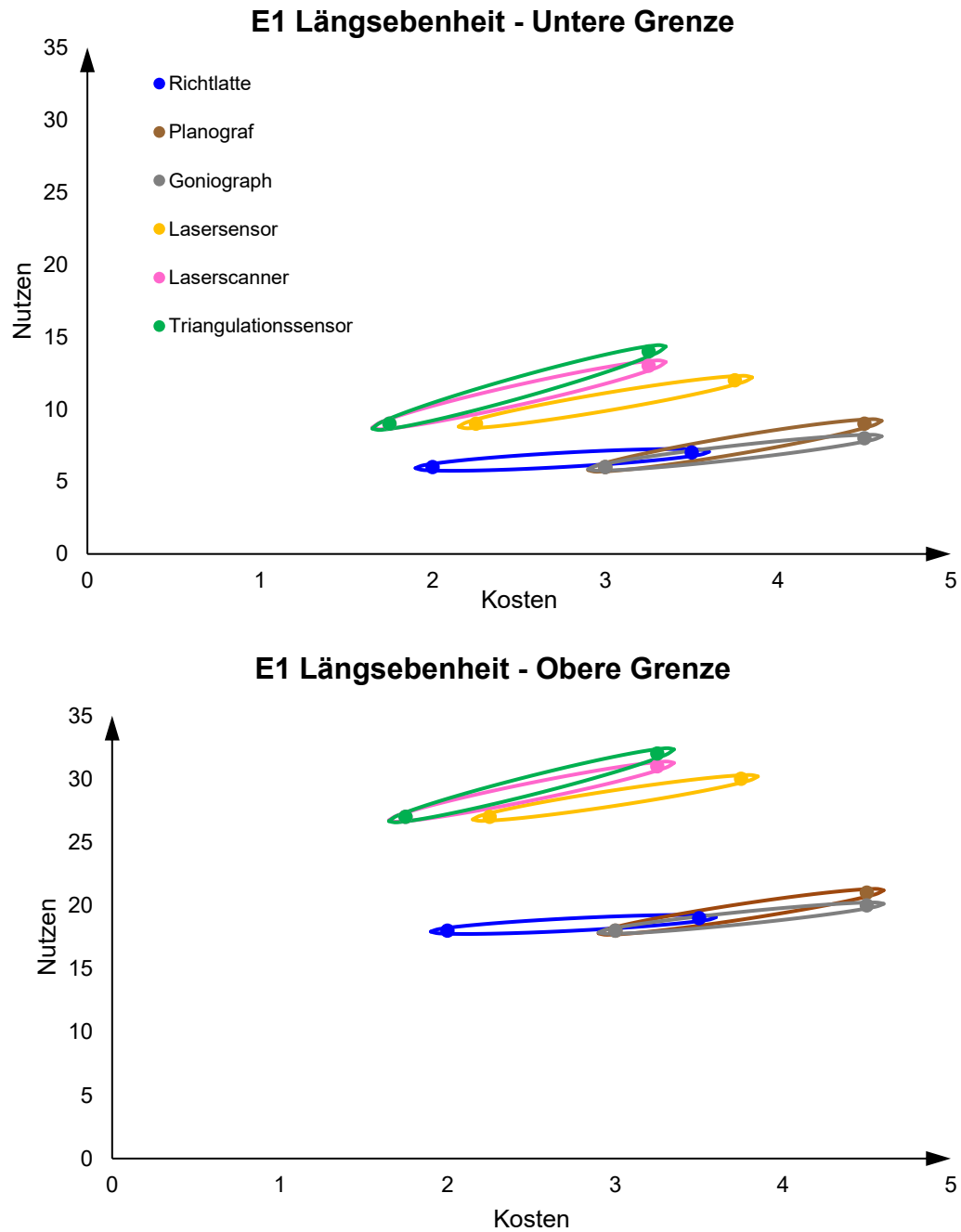


Abb. 9.138 Obere und Untere Grenze Nutzen/Kosten – Längsebenheit.

E2 Querebeneheit

Tab. 9.59 Kategorien / Bewertung der Technologien E2 Querebeneheit.

Technologie	Objektbezogener Nutzen					Objektbezogene Kosten	
	Zuverlässigkeit	Aussagekraft	Untere Grenze	Obere Grenze	Zusätzlicher Nutzen	Kosten	Kosten zusätzliches Ausmass
Richtlatte	3	3	9	27	1	3.00	5.00
Lasersensor	3	3	9	27	3	1.50	2.00
Laserscanner	3	3	9	27	4	1.50	2.00
Lichtschnittverfahren	3	3	9	27	5	1.50	2.00

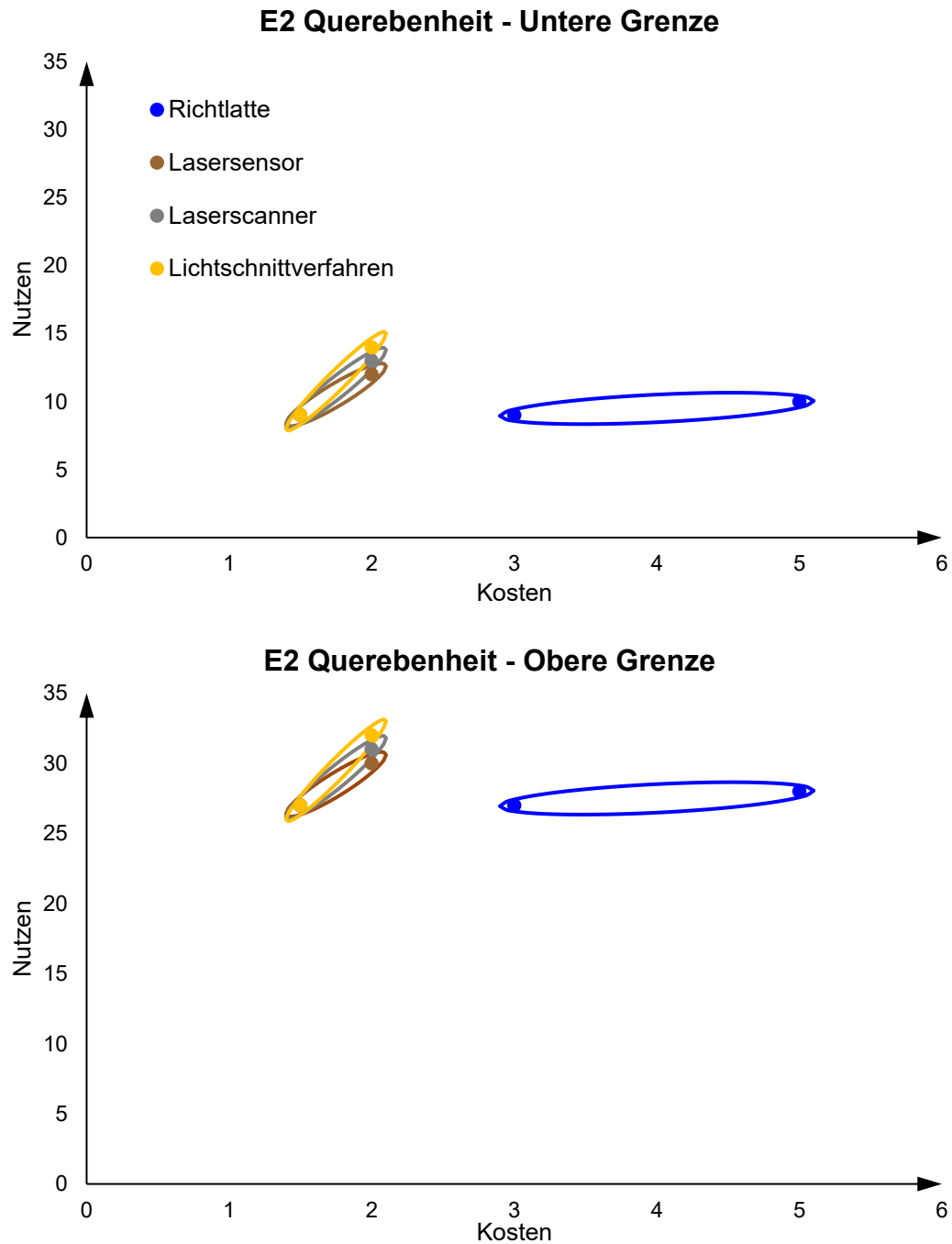


Abb. 9.139 Obere und Untere Grenze Nutzen/Kosten – Querebenheit.

E3 Querneigung

Tab. 9.60 Kategorien / Bewertung der Technologien E2 Querebenheit.

Technologie	Objektbezogener Nutzen					Objektbezogene Kosten	
	Zuverlässigkeit	Aussagekraft	Untere Grenze	Obere Grenze	Zusätzlicher Nutzen	Kosten	Kosten zusätzliches Ausmass
Neigungsmesser	3	3	9	27	3	2.50	4.00
inertiales Kreiselssystem	3	3	9	27	4	2.25	2.50
Laserscanner	3	3	9	27	4	1.50	2.00

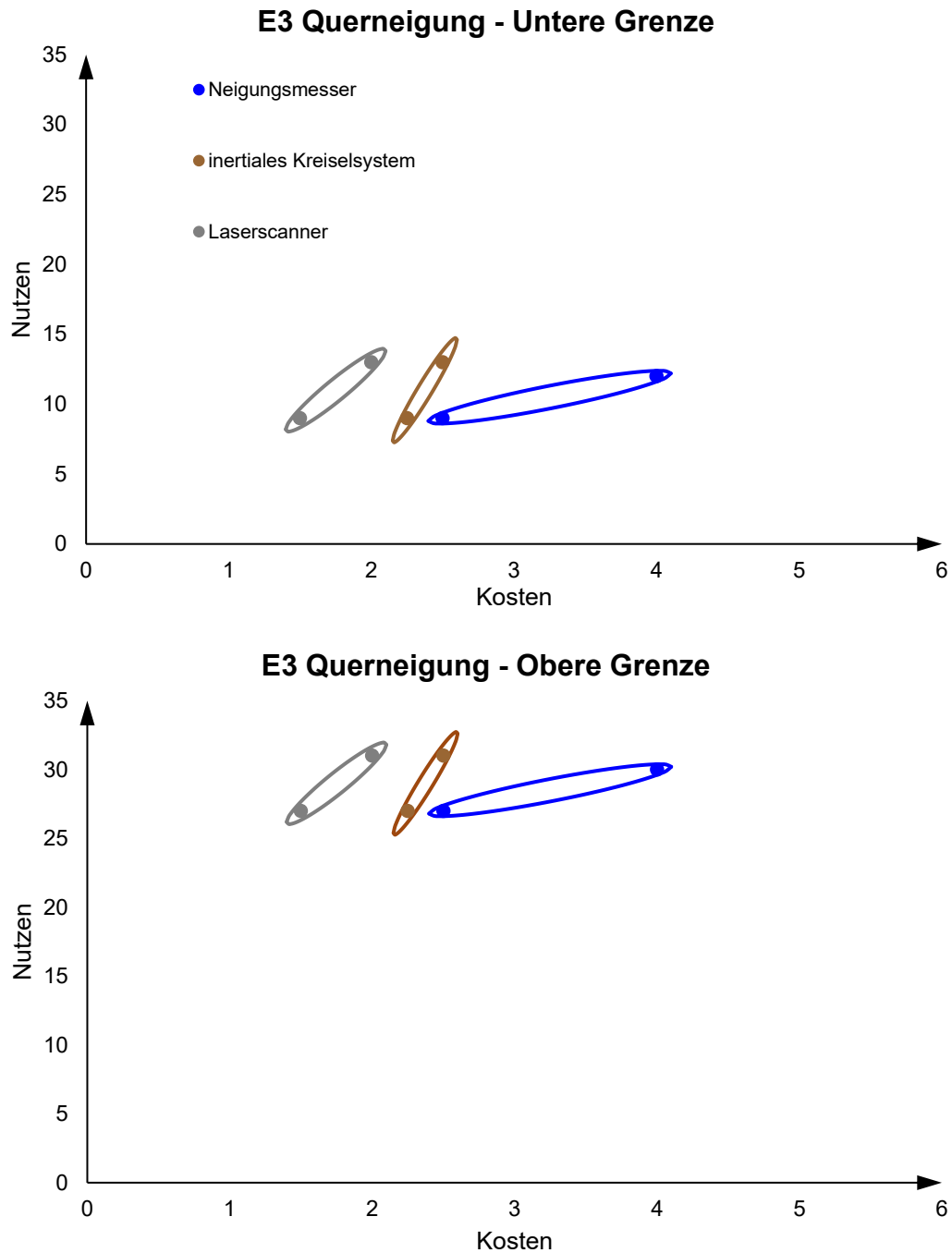


Abb. 9.140 Obere und Untere Grenze Nutzen/Kosten – Querneigung.

9.2.3 Beispielanwendung

Als Beispiel wird die spezifische Technologiebewertung an einem fiktiven Tunnel mit folgenden Objektkennndaten aufgezeigt:

- Tunnellänge 4.2 km;
- Einröhriger Tunnel im Gegenverkehr mit parallelem Sicherheitsstollen;
- Geologie: Fels mit stark kakiritisiertem Fels sowie quelfähigen Schichten;
- Tunnelprofil: Maulprofil aus Stahlbeton;
- Abdichtungskonzept: drainiert;
- Umfahrungstunnel (Lokale Umleitung möglich)
- DTV: 10'000 Fahrzeuge pro Tag

Im Folgenden wird auf die Gefährdungen des Teilsystem Gewölbeverkleidung und Zwischendecke mit dem Gefährdungsbild einer Verformung der Gewölbeverkleidung eingegangen.

Die Kritikalität des Bauwerks kann gemäss Kapitel 5 bestimmt werden. Infolge der Objektkennndaten kann die Konsequenz des Versagens (Abb. 9.141) mit "Gering" und die Robustheit (Abb. 9.142) mit "Mittel" bestimmt werden. Aus dieser Bewertung erfolgt eine Einteilung der Kritikalität (Abb. 9.143) als "Gering".

		Ausweichroute		
		Umgebung		
		Lokal	Regional	Grossräumig
Netzbelastung	DTV	1	2	3
1 Gering	< 30'000	X		
2 Mittel	30'000 - 70'000			
3 Hoch	> 70'000			

Abb. 9.141 Beispielanwendung: Konsequenz des Versagens.

Geologie	Profilform	Bauart Innenschale	Abdichtungskonzept	Robustheit
Lockergestein	Maulprofil	Stahlbeton	drainierend	Mittel
			druckhaltend	Mittel
	Kreisprofil	Stahlbeton	drainierend	Hoch
			druckhaltend	Hoch
Festgestein	Hufeisenprofil	Stahlbeton	drainierend	Mittel
		Beton (unbewehrt)	drainierend	Gering
	Maulprofil	Stahlbeton	drainierend	Mittel
			druckhaltend	Mittel
		Beton (unbewehrt)	drainierend	Gering
			druckhaltend	Gering
	Kreisprofil	Stahlbeton	drainierend	Hoch
			druckhaltend	Hoch
		Beton (unbewehrt)	drainierend	Hoch
			druckhaltend	Mittel

Abb. 9.142 Beispielanwendung: Robustheit des Tunnels.

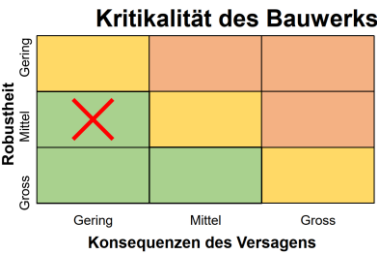


Abb. 9.143 Beispielanwendung: Kritikalität des Tunnels.

Für die Überwachung der Verformung der Gewölbeverkleidung kommen generell die Technologien gemäss Tab. 9.56 zur Anwendung. Die Bewertung der Technologien wird infolge der Objektdaten angepasst und ist in Tab. 9.61 dargestellt. Die Anpassungen der Bewertungen erfolgen für folgende, vereinfachte Aspekte:

- Objektspezifische Kritikalität ("Gering" → untere Grenze / Faktor 1)
- Ausmass (Überwachung über 4 km Tunnellänge → Grosses Ausmass)

Tab. 9.61 Beispielanwendung: Bewertung der Technologien C3 Verformungen

Technologie	Objektbezogener Nutzen					Objektbezogene Kosten
	Zuverlässigkeit	Aussagekraft	Untere Grenze (Faktor 1)	Zusätzlicher Nutzen (Grosses Ausmass)	Nutzen Total	Kosten Total (Grosses Ausmass)
Laserscanning	3	3	9	4	13	3.25
Geodätische Aufnahmen	3	2	6	3	9	4.25
Schlauchwaage	3	1	3	1	4	3.00
Faseroptische Dehnungsmessungen	3	2	6	4	10	5.00
Neigungsänderungen (Clinometer)	3	1	3	1	4	4.00
Distometer	3	1	3	2	5	3.50
Nivellement	3	2	6	3	9	4.00
Fugen- und Rissmessgerät	3	1	3	1	4	2.00

Aus der durchgeführten Bewertung der Technologien ergeben sich die fett und kursiv aufgeführten Werte in Tab. 9.61 für den Nutzen und die Kosten, welche in Abb. 9.144 dargestellt sind.

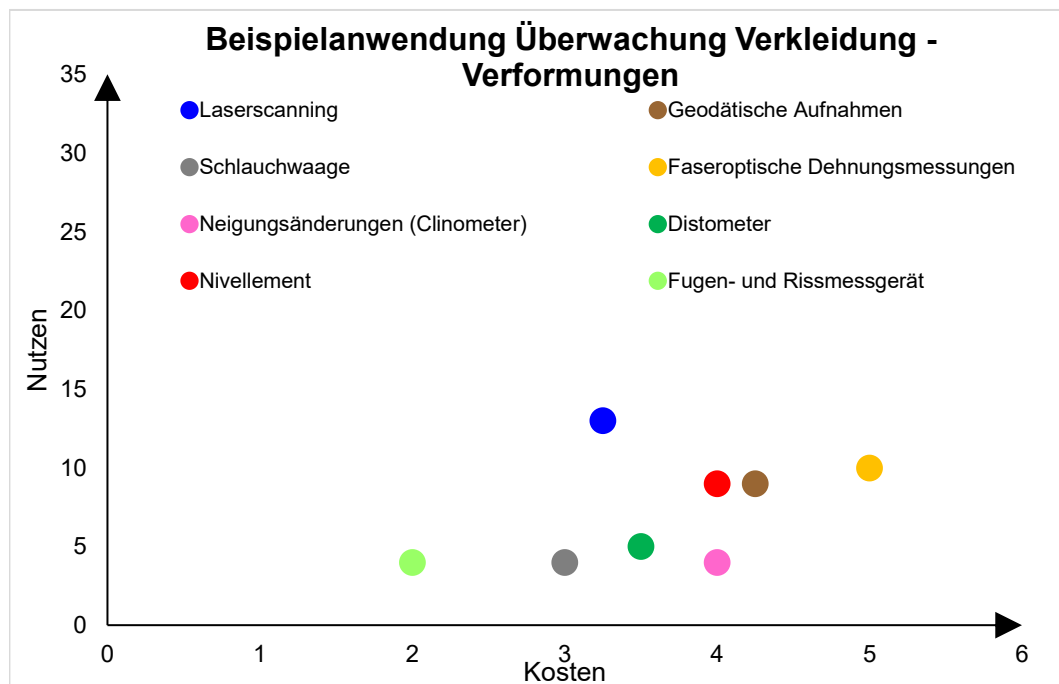


Abb. 9.144 Beispielanwendung: Kosten/Nutzen, C3 Verformungen

Aus dem obenstehenden Diagramm zeigt sich, dass das Laserscanning das beste Kosten-Nutzenverhältnis aufweist.

9.3 Erstellen und Bewertung von Überwachungskonzepten

9.3.1 Erstellung eines Überwachungskonzepts

Die Überlegungen zu einem Messkonzept mit einer Überwachungstechnologie sind in Kapitel 2.2 aufgeführt. Die unterschiedlichen Technologien decken dabei jedoch die geforderten Überwachungsaspekte je nach Fragestellung / Gefährdung unterschiedlich und meist nicht vollständig ab. Mit einer kombinierten Anwendung von Messtechnologien zu derselben Fragestellung können die geforderten Überwachungsaspekte umfassender abgedeckt werden. Ziel einer kombinierten Anwendung von Überwachungstechnologien ist es, einen Mehrwert im Vergleich zur Anwendung einer einzelnen Technologie zu erhalten. Mögliche Mehrwerte bzw. ein besseres Kosten-Nutzen-Verhältnis entsteht durch:

- Redundanz der Technologien (z.B. unterschiedliche Zuverlässigkeit, Datenerfassung, Datenspeicher, etc.);
- Unterschiedliche Messbereiche, Genauigkeiten und Auflösungen;
- Unterschiedliche Messgrößen;
- Punktuelle, lineare bis flächige Anwendungsbereiche;

Die Kosten einer kombinierten Anwendung sind abhängig von den einzelnen Kosten der Überwachungstechnologien und von möglichem Mehr- oder Minderaufwand (z.B. infolge gemeinsamer Auswertung, Auslesung, etc.). Ein Beispiel für die Kombination von Technologien derselben Fragestellung ist in Kapitel 9.3.2 dargelegt.

Die zentralen Gefährdungsbilder im Tunnelbau können infolge der Boden-Bauwerks-Interaktion am Bauwerk und im Baugrund überwacht werden. Mit der kombinierten Überwachung der gleichen Fragestellung bzw. Gefährdungsbilder im Baugrund und im Bauwerk mit unterschiedlichen Messtechnologien kann ein besseres Verständnis dessen erreicht werden. Mögliche Mehrwerte bzw. ein besseres Kosten-Nutzen-Verhältnis entsteht durch:

- Verständnis Boden-Bauwerk-Interaktion
- Erkenntnisse über effektiv vorhandene Einwirkungen
- Verständnis Schadensursachen, Schadensmechanismus und Prognose der weiteren Entwicklung

Ein Beispiel für die Kombination von Überwachungstechnologien im Boden und im Bauwerk ist in Kapitel 9.3.2 dargelegt.

9.3.2 Bewertung von Überwachungskonzepten

Kombination von Überwachungstechnologien für dieselbe Fragestellung

Die Bewertung des Kosten-Nutzen-Verhältnisses einer kombinierten Anwendung von Überwachungstechnologien für dieselbe Fragestellung kann im selben Rahmen wie die Bewertung der einzelnen Technologien erfolgen. Als Beispiel wird eine kombinierte Anwendung von Messtechnologien für die Überwachung von Verkleidung und Zwischendecke mit der Fragestellung (B2) Betonspannung aufgeführt. Die Gefährdung ist das Erreichen einer unzulässigen Betonspannung in der Verkleidung (z.B. im Sohlgewölbe infolge Quelldruck). Das Überwachungsziel ist daher die Erfassung der Betonspannungen (z.B. im Sohlgewölbe). Für eine flächige/linienhafte Überwachung können faseroptische Dehnungsmessungen (Kapitel 7.10) verwendet werden und für eine lokale Erfassung der Spannung in der Bewehrung resp. Beton können Dehnungsmesstreifen (Kapitel 7.46) eingesetzt werden. In Abb. 9.145 ist eine mögliche Anordnung beider Technologien im Tunnelquerschnitt dargestellt.

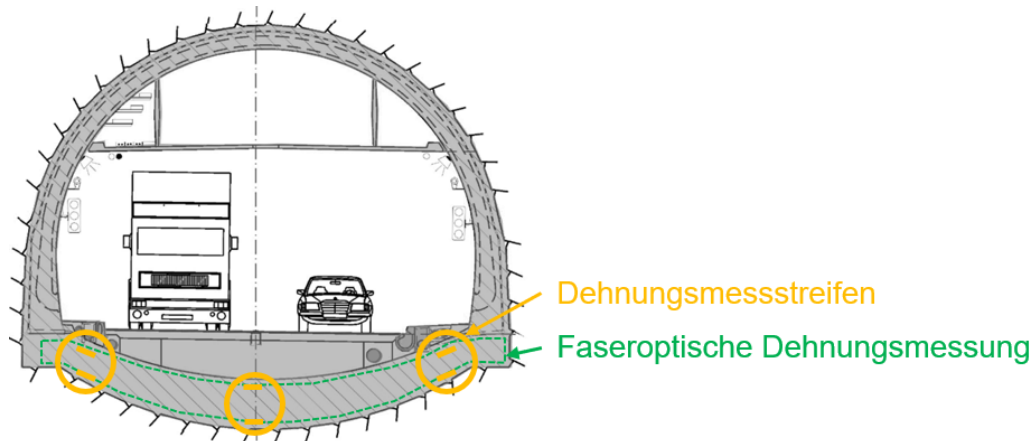


Abb. 9.145 Mögliche kombinierte Anwendung von Überwachungstechnologien im Tunnelquerschnitt für identische Fragestellung.

Im Kosten-Nutzen-Verhältnis vergrößert sich der Nutzen der kombinierten Anwendung durch die entstandene Redundanz des Systems und der unterschiedlichen Anwendungsbereiche (lokal und linienhaft). Die Kosten vergrößern sich infolge der zwei Technologien. Infolge gemeinsamer Auswertung ergibt sich jedoch auch Minderkosten. Eine Bewertung der Kosten-Nutzen einer kombinierten Anwendung von Dehnungsmessstreifen und faseroptischer Dehnungsmessungen ist in Abb. 9.146 dargestellt.

C2 Betonspannungen - Untere Grenze

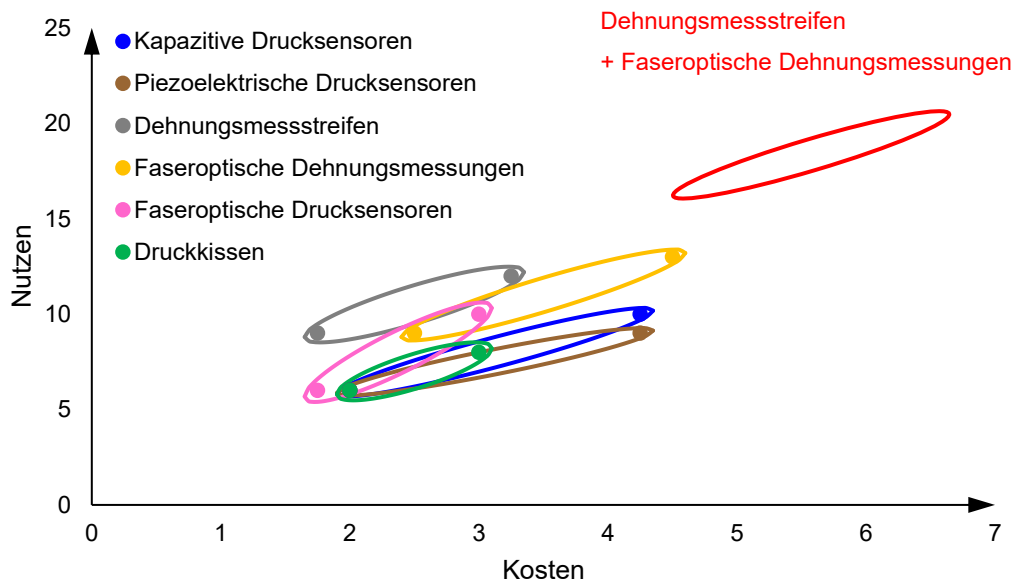


Abb. 9.146 Nutzen/Kosten Bewertung der Anwendung kombinierten Überwachungstechnologien.

Mehrfachnutzen von Überwachungstechnologien für mehrere Fragestellungen

Als Beispiel einer Überwachung im Baugrund und am Bauwerk kann das Gefährdungsbild Quellhebungen / -druck aufgezeigt werden. Dabei überlappen sich die Fragestellungen der Baugrundveränderungen und Belastungsänderungen des Baugrunds (B1 und B2) sowie der Betonspannungen und Verformungen des Bauwerks (C2 und C3). Das Ziel der Überwachung liegt dabei in der Erkennung von Quellverformungen im Baugrund sowie von unzulässigen Spannungen und Verformungen in der Bauwerksverkleidung. Für die Überwachung der Verformungen im Baugrund können Gleitmikrometer / Sondenextensometer verwendet werden (Kapitel 7.5, Bewertung Abb. 9.131). Die Überwachung der Belastungsänderung im Baugrund kann zusammen mit der Überwachung der Betonspannung mittels Dehnungsmessstreifen (Kapitel 7.46, Bewertung Abb. 9.135) in der Verkleidung des Bauwerks erfolgen.

Die Verformungen des Bauwerks an der Zwischendecke und am Parament können mittels Laserscanning (Kapitel 7.79, Bewertung Abb. 9.136) im Fahrraum überwacht werden. Das Laserscanning des gesamten Fahrraums bietet eine Mehrfachnutzung, weil im Bereich der Fahrbahn zusätzlich die Gefährdungen zu Längsebenheit (E1), Querebenheit (E2) und Querneigung (E3) überwacht werden können.

Eine mögliche Anordnung der vorgängig erwähnten Überwachungstechnologien im Querschnitt für die verschiedenen Fragestellungen zum Baugrund (B1 und B2), den Spannungen / Verformungen des Bauwerks (C2 und C3) sowie Gefährdungen im Bereich des Fahrbahnbelags (E1 bis E3) sind in Abb. 9.147 abgebildet.

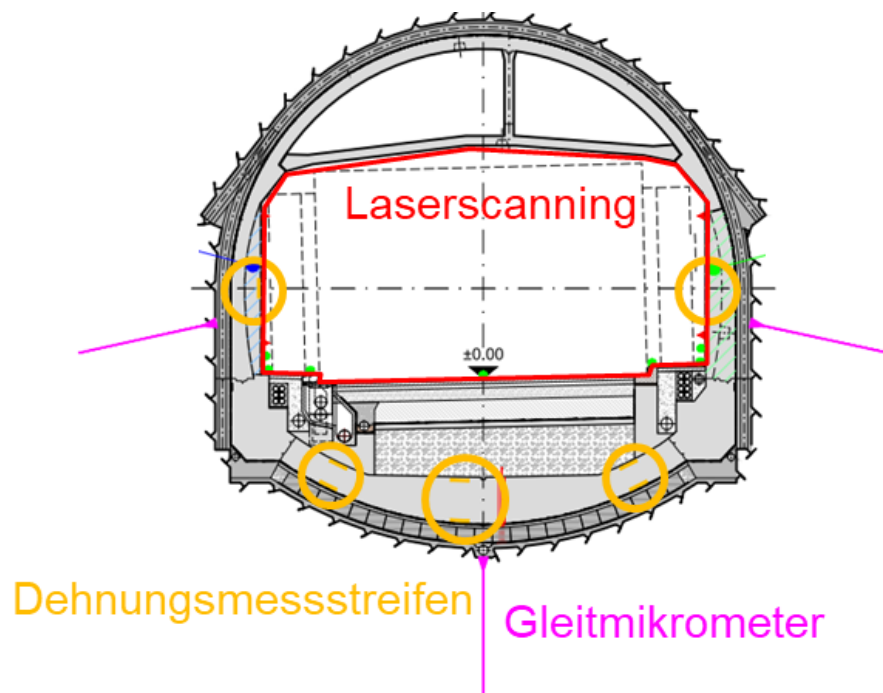


Abb. 9.147 Kombinierte Anwendung von Messtechnologien für einen Mehrfachnutzen zu Fragestellungen am Bauwerk und im Baugrund.

Glossar

Abkürzung	Begriff	Bedeutung
BSA	Betriebs- und Sicherheitsausrüstungen	Elektromechanische Installationen
DAS	Distributed Acoustic Sensing	verteilte akustische Erfassung
FBG	Fibre Bragg Gratin	faseroptischer Sensor
FEM	Finite-Element-Methode	numerisches Berechnungsverfahren
FOS	Faseroptische Sensoren	Optische Messgeräte
FPI	Fabry-Perot-Interferometer	faseroptischer Sensor
FS	Full Scale	Endwert, Messgenauigkeit [%] bezogen auf den Messbereich
GNSS	Global Navigation Satellite System	globales Navigationssatellitensystem
INS	Inertial Measurement System	Inertiales Messsystem
InSAR	Interferometric Synthetic Aperture Radar	Radarinterferometrie
LiDAR	Light Detection And Ranging	Anwendungsform des Laserscannings
MEMS	Micro Electro Mechanical System	Sensortechnologie in Chipformat
OFDR	Optical Frequency Domain Reflectometry	optische Frequenzbereichsreflektometrie
OTDR	Optical Time Domain Reflectometer	optisches Zeitbereichsreflektometer
SHM	Structural Health Monitoring	Strukturelle Überwachung
SNR	Signal to Noise Ratio	Signal-Rausch-Verhältnis
SPM	Structural Process Monitoring	Strukturelle Leistungsfähigkeit
UAV	Unmanned Aerial Vehicle	Unbemanntes Luftfahrzeug (Drohne)
VW	Vibrating Wire	Schwingsaitensensor
WELK	Werkleitungskanal	Begehrbarer, vom Fahrraum abgetrennter Kanal für Leitungen.
ZaP	zerstörungsarme Prüfmethode	
ZfP	zerstörungsfreie Prüfmethode	

Auflistung der Änderungen

Ausgabe	Version	Datum	Änderungen
2024	1.00	24.05.2024	Erste Ausgabe

