



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Bundesamt für Strassen ASTRA

DOKUMENTATION

TECHNOLOGIEN ZUR ÜBERWACHUNG DER INFRASTRUKTUR

SYNTHESEBERICHT

*Ausgabe 2025 V1.00
ASTRA 84010*

Impressum

Autoren / Arbeitsgruppe

Christian Gammeter	ASTRA N-SSI, Vorsitz
Dimitrios Papastergiou	ASTRA N-SSI, Teilprojektleiter
Gerrit Bartels	ASTRA N-SSI, Teilprojektleiter
Walter Waldis	ASTRA N-SSI
Susanne Rust	ASTRA N-SSI
Rade Hajdin	IMC GmbH
Frank Schiffmann	IMC GmbH
Neryvaldo Galvão	IMC GmbH
Eleni Chatzi	IBK, ETH Zürich
Yves Reuland	IBK, ETH Zürich
Panagiotis Martakis	IBK, ETH Zürich
Paul Sieber	IBK, ETH Zürich
Cyprien Hoelzl	IBK, ETH Zürich
Sergio Nicoli	IBK, ETH Zürich
Vasileios Ntertimanis	IBK, ETH Zürich
Eugen Brühwiler	EPFL
Numa Bertola	EPFL
Glauco Feltrin	Empa
Johannes Hugenschmidt	OST
Ernst Niederleithinger	BAM Deutschland
Matteo Breveglieri	Empa
Patrick Beeler	Lombardi SA
Sara Zingg	Lombardi AG
Tobias Stauber	Lombardi SA
Régis Blin	Smartec SA
Andreas Grossmann	Lehmann & Partner GmbH
Ronny Stricker	Lehmann+Partner Deutschland
Steffen Scheller	Lehmann+Partner Deutschland
Hans-Heini Utelli	IMPULS AG

Originalsprache

Deutsch

Dieses Dokument ist Teil eines Gesamtdokuments, welches in folgenden finalen 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 2025

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

Zusammenfassung

Der vorliegende Bericht stellt als Synthesebericht des ASTRA-Projekts «NTech - Nutzung neuer Technologien zur Überwachung der Infrastruktur» den Rahmen für die Teilberichte Kunstbauten, Tunnel und Trasse dar. Es werden zusammenfassend eine Übersicht über alle drei Fachbereiche Kunstbauten, Tunnel und Trasse gegeben sowie die Anwendung der Teilberichte aufgezeigt. Zusätzlich werden Schlussfolgerungen gezogen und Empfehlungen für eine standardmässige Umsetzung, erste Pilotprojekte sowie prioritäre Forschungsthemen gegeben und dokumentiert.

Die vorliegende über das Internet frei zugängliche Fassung der Teilberichte, auf welche sich dieser Synthesebericht bezieht, stellt einerseits eine Zusammenfassung der aktuell für die Überwachung der Infrastruktur der Nationalstrassen verfügbaren Technologien dar. Damit soll eine Übersicht über die aktuell vorhandenen und in Nutzung befindlichen Technologien im Allgemeinen geschaffen werden. Auf der Grundlage dieser Zusammenstellung werden im Anschluss neue, noch nicht am Markt verfügbarer Technologien und deren Potentiale für die Überwachung aufgezeigt. Andererseits wird eine Bewertung der beschriebenen Technologien mit einem Bezug zu verschiedenen Gefährdungen vorgenommen.

Das Projekt NTech erstreckt sich bis zur Bereitstellung einer abschliessend bewerteten Technologieübersicht mit Empfehlungen an die zuständigen Fachbereiche. Betrachtet wird der aktuelle Wissenstand zu diesen Technologien weltweit. Die Ableitungen von Handlungsempfehlungen und notwendigen Forschungsarbeiten sowie Pilotanwendungen erfolgt konkret im Hinblick auf den Bedarf für Betrieb und Erhaltung des Nationalstrassennetzes.

Inhaltsverzeichnis

Impressum	2
Zusammenfassung	4
Inhaltsverzeichnis	5
 1 Einleitung	 7
1.1 Zweck der Dokumentation	7
1.2 Geltungsbereich	7
1.3 Adressaten	7
1.4 Inkrafttreten und Änderungen	7
 2 Ausgangslage.....	 8
2.1 Allgemeines	8
2.2 Gliederung der Strasseninfrastruktur	10
2.3 Gefährdungen der Strasseninfrastruktur	10
2.4 Abgrenzungen	12
2.5 Auftrag.....	12
 3 Instrumente zur Überwachung der Infrastruktur	 13
3.1 Übersicht	13
3.2 Dokumentation	14
3.3 Instrumente	14
 4 Grundlagen	 16
4.1 Fachbereich Kunstbauten	16
4.2 Fachbereich Tunnel	17
4.3 Fachbereich Trasse	18
 5 Anwendung der Teilberichte für die Überwachung	 19
5.1 Identifizierung von vorhandenen Technologien	19
5.2 Überblick über die Bewertungsmethodik	19
5.3 Verallgemeinerung durch Klassifizierung.....	20
5.4 Evaluation von Technologien	23
 6 Evaluerte Technologien und Datenquellen für die Überwachung im Überblick	 26
6.1 Übersichtstabellen – Legende und Lesehilfe	26
6.2 Evaluerte Technologien – Übersichtstabellen in Bezug auf bestehende Anwendungsfälle	28
6.3 Evaluerte Technologien – Übersicht in Bezug auf neue Anwendungsfälle	37
 7 Externen Datenquellen zur Überwachung der Strasseninfrastruktur	 39
7.1 Daten der Schweizer Bundesverwaltung	39
7.2 Individuelle Standort-Massendaten.....	42
7.3 Daten der Fahrzeugindustrie.....	43
7.4 Daten des Copernicus Satellitenprogramms	44
 8 Schlussfolgerungen und Empfehlung	 50
8.1 Grundsatz	50
8.2 Erkenntnisse.....	50
8.3 Standardmässige Umsetzung	52
8.4 Pilotprojekte.....	59

9	Bestehender Forschungsbedarf	64
9.1	TP Kunstbauten	64
9.2	TP Tunnel.....	65
9.3	TP Trasse	66
9.4	Querschnittsthema Naturgefahren.....	67
	Anhänge.....	69
I	Detailinformationen zum Copernicus Projekt.....	71
I.A	Erläuterungen zum Projektumfang	71
I.B	Beitragende Missionen des Copernicus Projekts	92
I.C	Zusammenfassung der SAR-instrumentierten Missionen	93
I.D	Kommerzielle Kosten von SAR-Bildern	97
I.E	Übersicht über Forschungspublikationen	98
	Literaturverzeichnis	101
	Glossar.....	104
	Auflistung der Änderungen	107
	Publication bibliography	108

1 Einleitung

1.1 Zweck der Dokumentation

Dieser Synthesebericht ist neben den Teilberichten für Kunstbauten, Tunnel und Trasse Teil der Dokumentation «Technologien zur Überwachung der Infrastruktur». Der Synthesebericht fasst die für die Überwachung der Nationalstrassen vorhandenen Technologien zusammen. Er ist die Basis für die Anwendung der Teilberichte in Bezug auf bestehende und neue Technologien im Rahmen der Überwachung. Darüber hinaus weist dieser Synthesebericht auf jene Daten, welche durch externe Stellen zur Verfügung gestellt werden und zur Überwachung genutzt werden können. Die gesamte Dokumentation bietet mit dem vorliegenden Synthesebericht und den drei dazugehörigen Teilberichten Trasse, Kunstbauten und Tunnel ein Instrument, mit welchem Überwachungsmöglichkeiten in einem konkreten Fall verglichen werden können und schliesslich die optimale Technologie ausgewählt werden kann.

1.2 Geltungsbereich

Der Geltungsbereich umfasst hauptsächlich die in der Erhaltung des Schweizerischen Nationalstrassennetzes angewendeten oder anzuwendenden Technologien und Methoden. Es werden Aspekte aus den Bereichen Bau und Betrieb aufgegriffen, wenn diese relevant für die Erhaltung sind.

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 11.11.2025 in Kraft. Die "Auflistung der Änderungen" ist auf Seite 107 dokumentiert.

2 Ausgangslage

2.1 Allgemeines

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 Infrastrukturobjekten der Nationalstrassen, insbesondere bei Kunstbauten und Tunneln, weniger beim Trassee, 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 Trassee in einem 4-Jahres-Zyklus) sowie Überprüfungen auf Veranlassung hat sich zur Gewährleistung der Sicherheit (sowohl Trag- als auch Verkehrssicherheit) und einer effizienten Erhaltungsplanung bisher bewährt. Sie erlaubt aber keine Echtzeit-Diagnose über den Zustand und das Verhalten eines Infrastrukturobjekts. Eine häufigere oder gar permanente Überwachung wichtiger Objekte der Strasseninfrastruktur gewinnt bei erhöhten Risiken an Bedeutung. Darunter fallen beispielsweise Infrastrukturobjekte, die kritischen und nicht direkt inspizierbaren 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 Infrastrukturobjekten in Echtzeit bereitstellen und für ein modernes Erhaltungsmanagement geeignet sind.

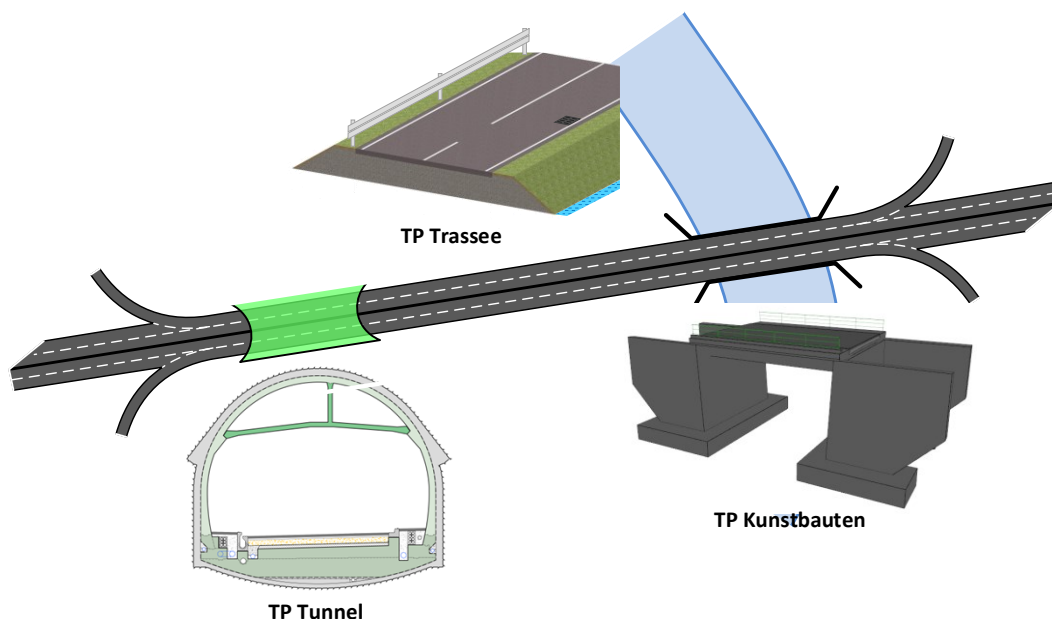


Abb. 2.1 Fokus auf Objekte der Strasseninfrastruktur im Gesamt-Projekt NTEch

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 Witterungs-, Fahrzeug- und Satellitendaten für die umfassendere Überwachung der Strasseninfrastruktur genutzt werden können.

Mehrere Arbeiten in diesem Bereich wurden bereits durchgeführt oder sind im Gange. Dies auf unterschiedlichen Ebenen: als Forschung, als Produktentwicklungen, Pilotprojekte und Weiteres.

Das Gesamtprojekt NTech erstellt eine Auflistung, Analyse und Wertung der bestehenden und absehbaren Technologien zur Unterstützung der Infrastruktur-Überwachung, 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.

Die vorliegende Dokumentation bildet als Synthesebericht einen Rahmen für die Teilberichte Kunstbauten, Tunnel und Trasse. Diese wurde im Rahmen der jeweiligen Teilprojekte erstellt und im Verlauf des Projekts NTech ergänzt und vervollständigt. Sie zeigen Technologien für den jeweiligen fachlichen Fokus und vorhandene Schnittstellen untereinander auf. Die Dokumentation hat zum Ziel, einen ersten Überblick über alle Teilberichte zu geben und den beteiligten Stellen die Handhabung aufzuzeigen.

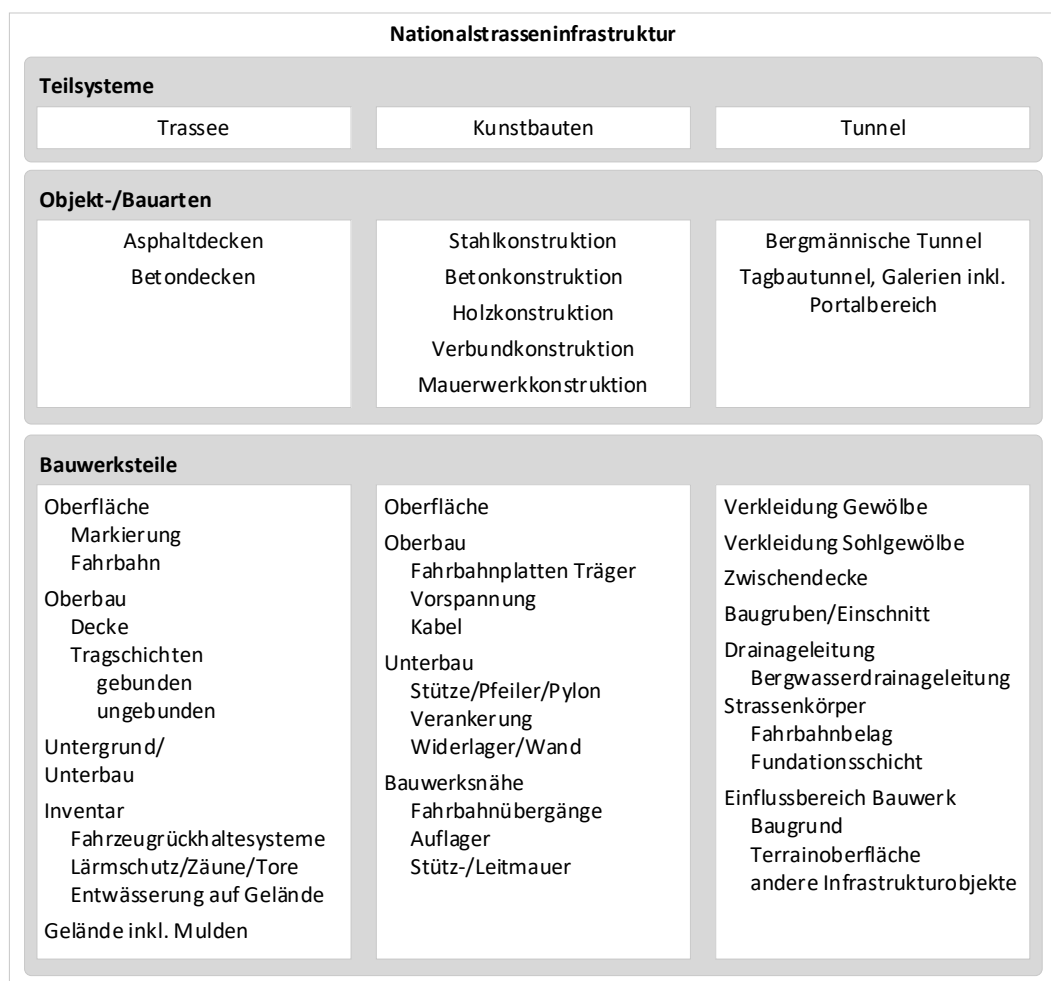


Abb. 2.2 Gliederung der Nationalstrasseninfrastruktur im Rahmen von NTech

2.2 Gliederung der Strasseninfrastruktur

Grundsätzlich wird ein Strassennetz nach seiner Verbindungsfunktion unterschiedlich gegliedert. Für das Erhaltungsmanagement ist vor allem eine Gliederung in Bezug auf den Infrastrukturobjekttyp von Bedeutung. Hier werden Objekte mit ähnlichen Eigenschaften in Bezug auf den strukturellen Aufbau und die damit verbundenen Prozesse von Überwachung und Erhaltungsplanung in Teilsysteme gruppiert, in Bauwerksteile gegliedert und mit notwendigen Eigenschaften, wie z.B. Geometrie, Material, Herstellungsverfahren usw., versehen. Für diese Inventardaten bestehen für das ASTRA Fachkataloge (genauer Taxonomien) definiert in den jeweiligen Datenerfassungshandbüchern (vgl. [1] und [2]).

Im Rahmen der Teilprojekte von NTech wurden für die Nationalstrassen die für die Überwachung relevanten Infrastruktur-Objekttypen und deren Bauwerksteile für die drei Teilsysteme definiert (vgl. Abb. 2.2). Diese wurden abgeleitet aus den generalisierten Datenstrukturen der jeweiligen Strasseninformationssysteme des ASTRA Trasse und KUBA (vgl. [1] und [2]).

2.3 Gefährdungen der Strasseninfrastruktur

Im Laufe der Nutzungsdauer ist ein Infrastrukturobjekt unterschiedlichen Gefährdungen ausgesetzt, welche dazu führen können, dass es die ihm zugewiesene Funktion nur teilweise oder gar nicht erfüllen kann. Beispiele für Gefährdungen sind:

- Überbeanspruchung durch den Verkehr oder übrige mechanische Einwirkungen, wie z. B. Anprall von Fahrzeugen auf Bauwerke
- Naturereignisse: Rutschungen, Steinschlag, Hochwasser, Erdbeben, Murgang
- Folgen von Verkehrsunfällen v. a. Havarie
 - Physikalische und/oder chemische Schädigungsprozesse

Die Gefährdungen können grundsätzlich wie folgt aufgegliedert werden:

- Gefährdungen, welche sich langsam entfalten, wie z. B. diverse physikalisch-chemische Schädigungsprozesse.

Diese langsam verlaufenden Schädigungsprozesse lassen sich weiterhin aus diagnostischer Sicht unterteilen in

 - verfolgbare Schädigungsprozesse, welche mit den verfügbaren Untersuchungsmethoden aufgedeckt und verfolgt werden können und
 - verborgene Schädigungsprozesse, welche mit den heute verfügbaren Untersuchungsmethoden nicht diagnostiziert werden können.
- Gefährdungen, welche sich schnell entfalten, wie z. B. Naturereignisse.

Beide Gefährdungen können zu einem plötzlichen Versagen (oder anderweitiger Funktionsbeeinträchtigung) führen, aber sie unterscheiden sich dadurch, dass bei den ersteren das Versagen am Ende eines über mehrere Jahre oder Jahrzehnte laufenden Schädigungsprozesses eintritt, wogegen bei den letzteren das Versagen und dessen Ursache mehrere Stunden oder höchstens Tage auseinanderliegen.

Tab. 2.1 Kategorisierung der relevanten Gefährdungen für Kunstbauten

Lage	Gefährdung
Umgebung/Lasten	Temperatur
	Feuchtigkeit
	Wind
	Verkehr
	Stein-/Blockschlag
	Lawinen
	Murgang
	Überschwemmung

Tab. 2.1 Kategorisierung der relevanten Gefährdungen für Kunstbauten

Lage	Gefährdung
Tragwerk	Kraft/Beanspruchung
	Verschiebung/Verformung/Durchbiegung
	Rissbildung
	Dehnung
	Schwingung
Material	Ungenügende Materialeigenschaften
	Ablaufende Schadenprozesse

Tab. 2.2 Kategorisierung der relevanten Gefährdungen für Tunnel

Lage	Gefährdung
Bauwerksentkoppelte Lage	Baugrundverformungen
	Massenbewegungen
	Berg-/Grundwasser
Tunnelnahbereich	Baugrundveränderungen
	Belastungsänderungen
	Berg-/Grundwasserveränderungen
Verkleidung und Zwischendecke	Bewehrungskorrosion
	Betonspannungen
	Verformungen
Bergwasserdrainage	Gestörte Drainage
Belag und Fundation	Unebenheit in Längsrichtung
	Unebenheit in Querrichtung
	Querneigung

Tab. 2.3 Kategorisierung der relevanten Gefährdungen für das Trasse

Bereich	Gefährdung
Sicherheit	Ungenügende Rauheit
	Ungenügende Textur
	Ungenügende Sichtbarkeit Markierung
	Ungenügendes Lichtraumprofil
Befahrbarkeit	Unebenheit in Längsrichtung
	Unebenheit in Querrichtung
	Querneigung
Substanz (Oberbau)	Ungenügende Substanzmerkmale Oberfläche
	Nicht hinreichende Schichtdicken
	Fehlende Einbauteile oder Anomalien im Material
	Ungenügende Tragfähigkeit
Umwelt	Strukturelle Substanz infolge Achslasten
	Lärmbelastung
Bauwerksentkoppelte Lage	Baugrundverformungen
	Massenbewegungen
Überwachung	Fehlerhafte Verortung von Informationen

Grundsätzlich ergeben sich verschiedene Gefährdungen für die unterschiedlichen Teilsysteme. Diese sind in Tab. 2.1 für Kunstbauten, in Tab. 2.2 für Tunnel und in Tab. 2.3 für das Trasse aufgeführt. In den jeweiligen Teilberichten werden diese ausführlicher beschrieben und die jeweilig relevanten Überwachungstechnologien zugeordnet.

2.4 Abgrenzungen

Der vorliegende Synthesebericht gibt eine grobe Übersicht über die zugehörigen Teilberichte der Fachbereiche Tunnel, Kunstbauten und Trasse mit den damit verknüpften Themen aus den Bereichen Geotechnik, Naturgefahren und Umwelt. Die Überwachungstechnologien, welche für die Problemstellungen in den Fachbereichen mit ihren Gefährdungen Anwendung finden, werden in den jeweiligen Teilberichten beschrieben und zusammengefasst.

Grundsätzlich werden das Verkehrsmonitoring sowie die gesamte BSA nicht thematisiert. Im Einzelnen nicht Bestandteil der Dokumentation mit seinen Teilberichten und diesem Synthesebericht 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 Gesamtprojekt NTech wurde im ersten Schritt in den drei Fachbereichen Kunstbauten, Tunnel und Trasse eine Übersicht der zur Verfügung stehenden Überwachungstechnologien erstellt. Diese sind in Kapitel 7 der Teilberichte aufgeführt. Weiter werden erfolgversprechende Ansätze zu neuen, noch nicht für die Überwachung der Infrastruktur standardmässig genutzten oder noch nicht marktreifen Technologien dokumentiert (Kapitel 8 der Teilberichte).

Diese beiden ersten Ergebnisse wurden in einem zweiten Schritt analysiert und bewertet hinsichtlich ihrer Tauglichkeit für die Überwachung der Infrastruktur in den genannten Fachbereichen. Die Resultate sind in den Teilberichten in Kapitel 9 mit den Ergebnissen der Analyse- und Bewertung der Technologien enthalten.

Im dritten Schritt wurde die Synthese der vorangehenden Arbeiten pro Fachbereich erstellt und daraus wurden Empfehlungen für mögliche Pilotprojekte, für Forschungsthemen und für erforderliche ASTRA-Standards abgeleitet. Das Resultat stellt ein übergreifender Synthesebericht über alle Teilberichte mit Empfehlungen pro Fachbereich zur Lancierung von Pilotprojekten, dem vorhandenen Forschungsbedarf und zur Formulierung von Standards dar.

Das ASTRA wird diese Ergebnisse in einem weiteren Schritt nutzen, um einerseits die gegebenen Handlungsempfehlungen zu prüfen und gegebenenfalls umzusetzen. Andererseits sollen Vorgehensweisen und interne Prozesse entwickelt werden, um in der Zukunft in der Lage zu sein, neue Trends zu erkennen und das vorhandene Potential aus sich daraus entwickelnden Technologien für die Überwachung der Strasseninfrastruktur zu nutzen und effizient einzusetzen.

3 Instrumente zur Überwachung der Infrastruktur

3.1 Übersicht

Schweizerisches Recht	NSG; SR 725.11 (Art. 49) Bundesgesetz über die Nationalstrassen	
	NSV; SR 725.111 (Art. 46) Nationalstrassenverordnung	
	NSV; SR 725.13 Bundesgesetz über den NAFG	
Weisungen ASTRA	ASTRA 75001 Daten für das Verkehrsmanagement Schweiz	ASTRA 71005 Qualitätsanforderungen bit. Schichten; Massnahmen bei Abweichungen
	ASTRA 78003 Vollzug der Umweltgesetzgebung bei Projekten der Nationalstrassen	ASTRA 74001 Sicherheitsanforderungen an Tunnel im Nationalstrassennetz
Richtlinien ASTRA	ASTRA 1B002 Erhaltungsmanagement für Nationalstrassen - Grundlagen und Prinzipien	ASTRA 11021 Überwachung der Fahrbahn: Zustandserhebung und -bewertung
	ASTRA 10001 Nationalstrassennetz als räumliches Basis-Bezugssystem RBBS	ASTRA 12002 Überwachung und Unterhalt der Kunstbauten der Nationalstrassen
Normen	SN 640 900 Erhaltungsmanagement; Grundnorm	VSS 40 925 Zustandserfassung und Indexbewertung
	SIA 469 Erhaltung von Bauwerken	SIA 269 Erhaltung von Tragwerken
Fachhandbuch ASTRA	Fachhandbuch Erhaltungsplanung	Fachhandbuch Trasse / Umwelt
		Fachhandbuch Tunnel / Geotechnik
		Fachhandbuch Kunstbauten
Dokumentationen	Technologien zur Überwachung der Infrastruktur - Synthese	Technologien zur Überwachung der Infrastruktur - Trasse
		Technologien zur Überwachung der Infrastruktur - Kunstbauten
		Technologien zur Überwachung der Infrastruktur - Tunnel

Abb. 3.3 Übersicht über die ASTRA-Standards, Normen und weitere massgebliche Dokumente.

3.2 Dokumentation

Die Dokumentation über die Technologien zur Überwachung der Infrastruktur setzt sich aus den folgenden Berichten zusammen:

- Teilbericht Kunstbauten: Beschreibung, Analyse und Bewertung der für die Fragestellungen der Kunstbauten relevanten Überwachungstechnologien
- Teilbericht Tunnel: Beschreibung, Analyse und Bewertung der für die Fragestellungen der Tunnel relevanten Überwachungstechnologien
- Teilbericht Trasse: Beschreibung, Analyse und Bewertung der für die Fragestellungen des Trassees relevanten Überwachungstechnologien
- Synthesebericht: Grundlegende Anwendung der Teilberichte und Schlussfolgerungen und Empfehlungen für die Überwachung der Infrastruktur

Die Dokumentation basiert auf den im ASTRA definierten hierarchischen gegliederten Grundlagen. Diese sind in den Teilberichten für das jeweilige Fachgebiet umfassend fokussiert auf die relevanten gesetzlichen Grundlagen, Normen und Standards aufgeführt. Weitere Grundlagen für die umfassende Dokumentation liefern Forschungs- und Monitoring-Projekte, welche ebenfalls in den Teilberichten aufgeführt sind. Ein erster zeitlicher Überblick wird in Kapitel 4 dieses Syntheseberichts gegeben. Detailliertere Informationen liefern die Kapitel 4 in den jeweiligen Teilberichten für Kunstbauten, Tunnel und Trasse.

3.3 Instrumente

Die Überwachung liefert wichtige Grundlagen für den Prozess der Entscheidungsfindung. Sie hat zum Ziel, den Zustand von Infrastrukturobjekten festzustellen, zu bewerten sowie Empfehlungen für weitere Massnahmen abzugeben. Ein Teil der Überwachungstätigkeiten ist periodisch.

Voraussetzung zur Durchführung der Überwachung ist die Kenntnis über den Infrastrukturbestand, dessen Eigenschaften sowie dessen vorherig aufgenommen Zustand. Basierend auf den Definitionen der Norm SIA 469 [4] stehen folgende Tätigkeiten zur Verfügung. Diese sind sinngemäss bei allen 3 Fachbereichen Kunstbauten, Tunnel und Trasse vorhanden, werden jedoch im Bereich Trasse teilweise abweichend benannt. Die Inspektionen entsprechen dabei den Kampagnen der Zustandserfassung.

Überwachung

- Beobachtung
- Inspektionen
 - Hauptinspektion
 - Zwischeninspektionen
 - Sonderinspektionen
- Kontrollmessungen
- Funktionskontrollen

Die Überwachungstätigkeiten sind veränderten Bedingungen anzupassen. Falls die Ergebnisse der Überwachung Sofortmassnahmen erfordern, müssen diese unverzüglich veranlasst werden. Ermöglicht die Überwachung keine zuverlässige Aussage über den Zustand des Infrastrukturobjekts, so ist eine Überprüfung erforderlich.

Überprüfung

- Weiterführende Untersuchungen

Die Ergebnisse aus Überwachung und Überprüfung müssen anschliessend ausgewertet und der notwendige Handlungsbedarf abgeleitet werden.

Methoden der Zustandserfassung

Die zur Verfügung stehenden Methoden zur Durchführung der Überwachung können in grundsätzlichen 3 Gruppen gegliedert werden. Dies zeigt Abb. 3.4 und wird im Folgenden kurz erläutert. Eine Übersicht über die Technologien zeigt Kapitel 6. Die ausführliche Beschreibung der einzelnen Technologien erfolgt in den Teilberichten für Trasse, Kunstbauten und Tunnel.

Die erste Gruppe umfasst die visuelle Inspektion ergänzt durch einfache handnahe Prüfungen, welche auf der subjektiven Einschätzung des Inspektors bzw. Erfassers beruht. Sofern diese mit qualifiziertem Personal erfolgt, ist dies eine sehr wertvolle Informationsquelle. Die Aussagegenauigkeit der visuellen Inspektion ist jedoch begrenzt und es bedarf der Vorgabe von eindeutigen Bewertungskriterien.

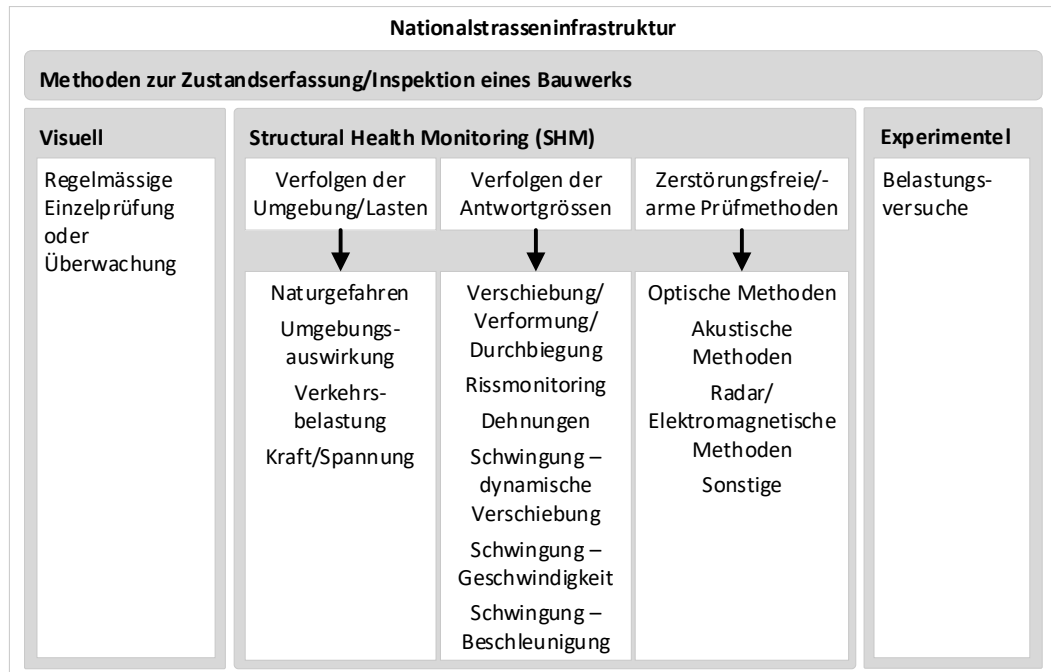


Abb. 3.4 Übersicht zu Verfahren der Zustandserfassung eines Infrastrukturobjekts

Neben der visuellen Zustandserfassung im Rahmen der Überwachung gibt es eine Vielzahl an zusätzlichen messtechnischen Erfassungsmethoden. Diese zweite Gruppe von Methoden lässt sich unterschiedlich je nach Fragestellung in das Verfolgen der Einflüsse aus der Umgebung bzw. die Messung der auftretenden Einwirkungen, die Messung der Antwortgrössen sowie in Bezug auf die Prüfmethode gliedern (vgl. Abb. 3.4).

Die Teilberichte für Trasse, Kunstbauten und Tunnel erläutern die für den jeweiligen Fachbereich relevanten Technologien anhand von 6 Kriterien:

- Beschrieb der Technologie,
- Fragestellungen in den Fachbereichen,
- Datenerfassung, Raumbezug, Messgrössen und -genauigkeit
- Entwicklungsstand, Anwendungsgrenzen, Kosten
- Ergänzende Ausschreibungsanforderungen
- Literaturverzeichnis

Eine dritte Gruppe zur Analyse des Zustandsverhalten bietet die experimentelle Zustandserfassung. Dabei werden unter kontrollierten Randbedingungen im Rahmen von experimentellen Belastungsversuchen der Einfluss einzelner Faktoren auf das mechanische und chemische Verhalten der Bauwerksteile untersucht.

4 Grundlagen

Die Grundlagen der vorliegenden und in Kapitel 3 aufgezeigten Dokumentation 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 in den 3 Teilberichten behandelten Überwachungstechnologien basieren damit insbesondere auf Forschungen in den Bereichen der Sensormessung in direktem Kontakt und der berührungsfreien Messung (z.B. Laser- oder Radarmessung im Nahfeld bzw. Fernerkundungen).

4.1 Fachbereich Kunstbauten

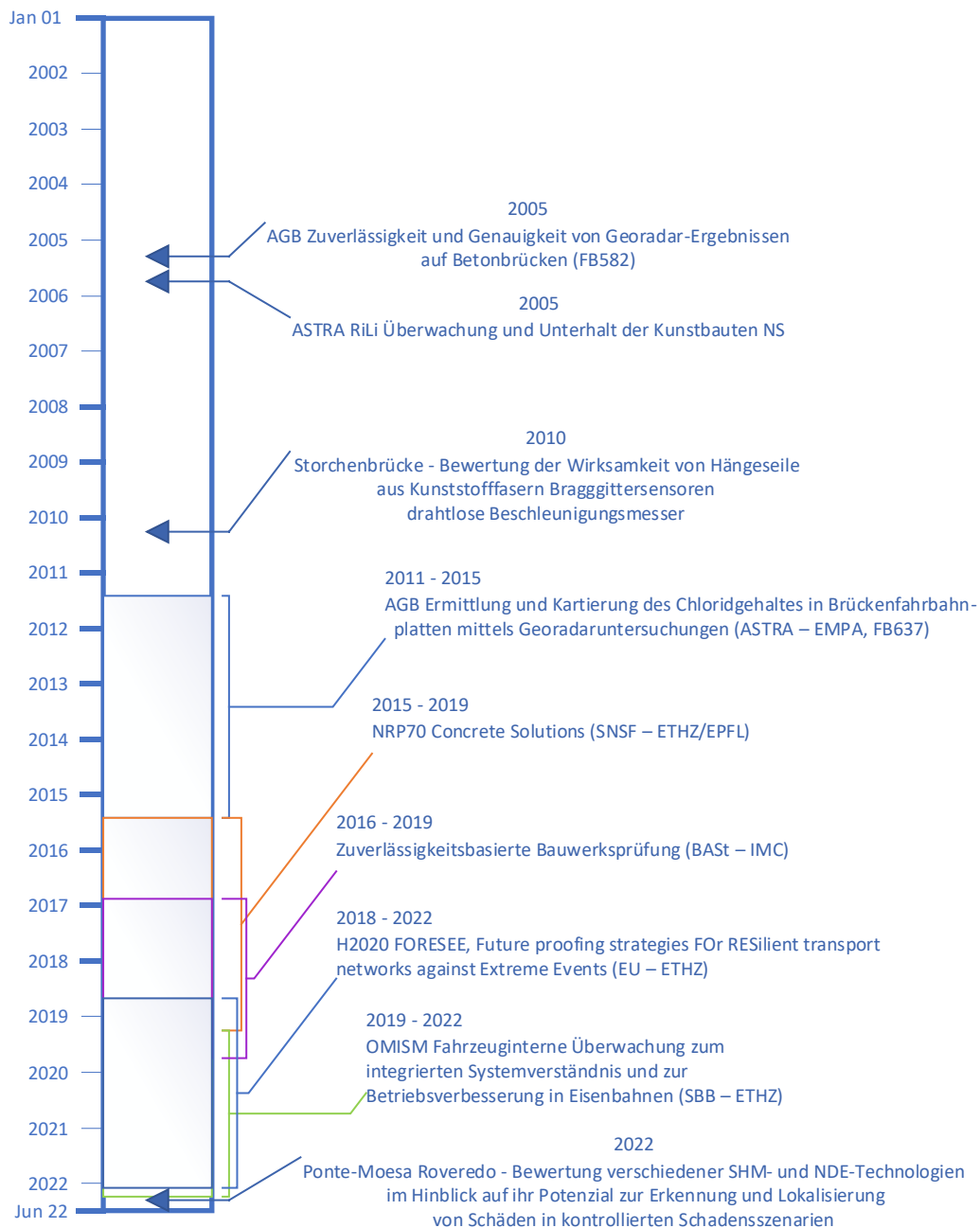


Abb. 4.5 Zeitliche Einordnung relevanter Forschungs- und Monitoring-Projekte TP Kunstbauten

Abb. 4.5 zeigt die zeitliche Einordnung der wichtigsten Literaturquellen für den Fachbereich Kunstbauten. Eine umfassende Übersicht für Kunstbauten findet sich im Kapitel 4 des Teilberichts Kunstbauten.

4.2 Fachbereich Tunnel

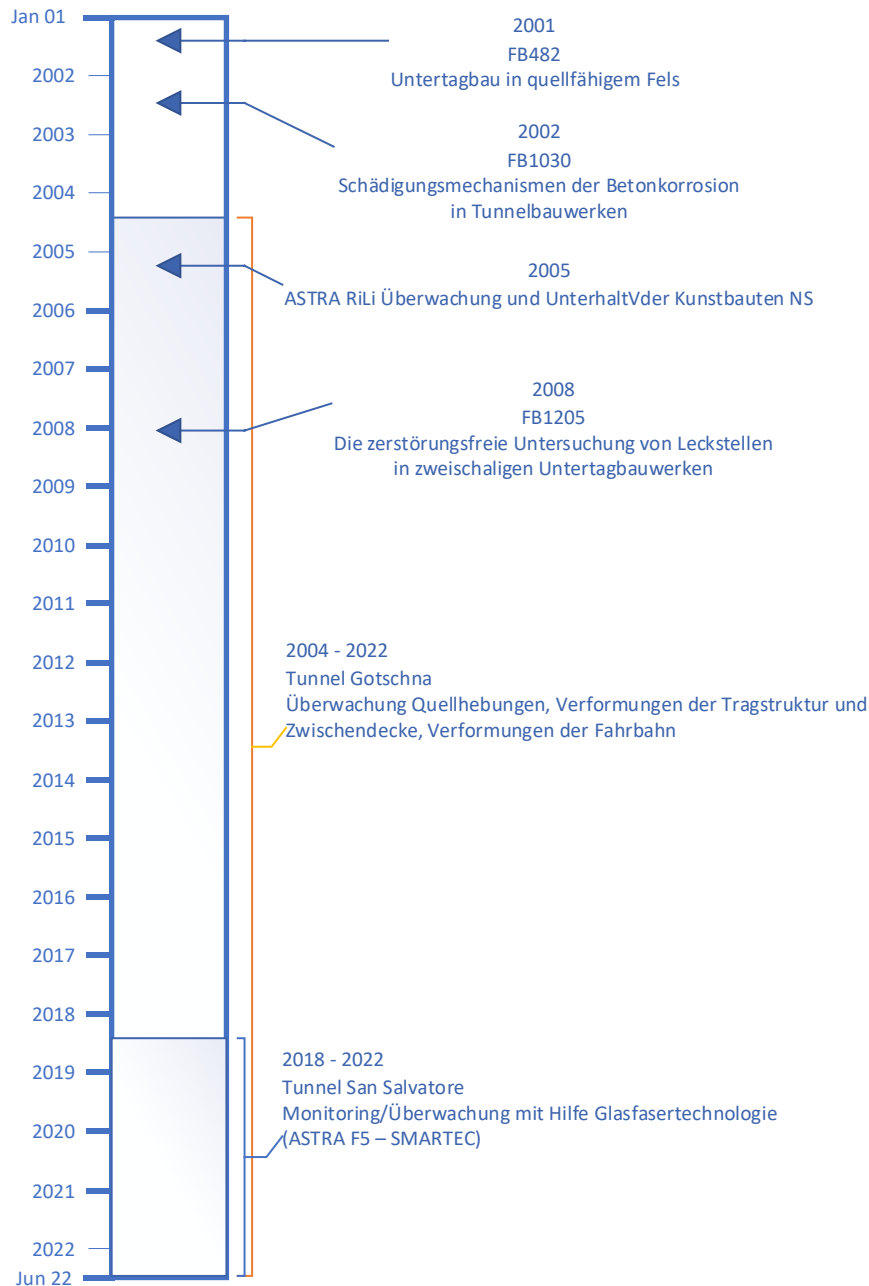


Abb. 4.6 Zeitliche Einordnung relevanter Forschungs- und Monitoring-Projekte TP Tunnel

Abb. 4.6 zeigt die zeitliche Einordnung der wichtigsten Literaturquellen für den Fachbereich Tunnel. Eine umfassende Übersicht für Tunnel findet sich im Kapitel 4 des Teilberichts Tunnel.

4.3 Fachbereich Trasse

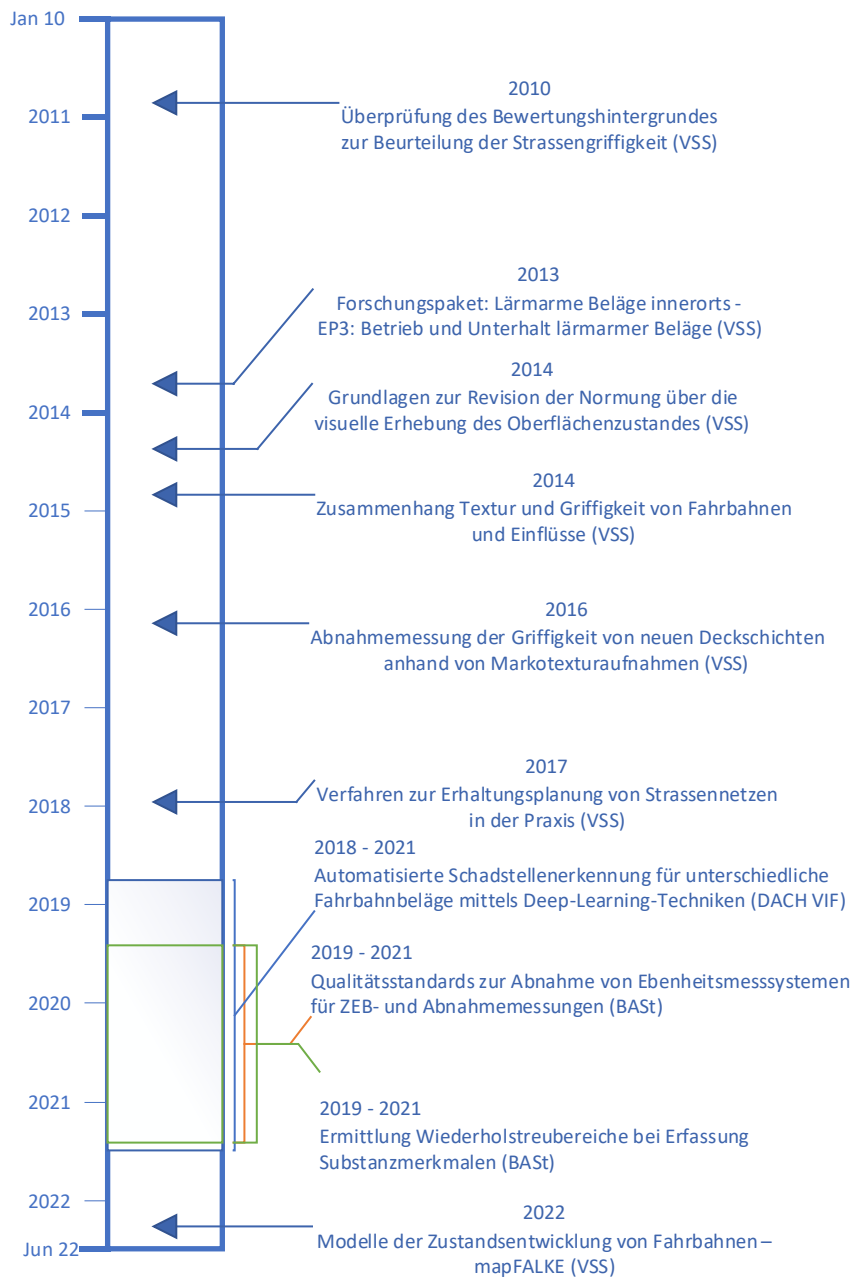


Abb. 4.7 Zeitliche Einordnung relevanter Forschungs- und Monitoring-Projekte TP Trasse

Abb. 4.7 zeigt die zeitliche Einordnung der wichtigsten Literaturquellen für den Fachbereich Trasse. Eine umfassende Übersicht für das Trasse findet sich im Kapitel 4 des Teilberichts Trasse.

5 Anwendung der Teilberichte für die Überwachung

5.1 Identifizierung von vorhandenen Technologien

Im Rahmen der Dokumentation «Technologien zur Überwachung der Infrastruktur» 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.

Das grundlegende Vorgehen ist die Auswahl einer möglichst optimalen Überwachungstechnologie für konkrete Fragestellungen im jeweiligen Fachbereich. Ausgehend vom jeweiligen Infrastrukturobjekt, d.h. ein Bauwerk mit seinen Bauwerksteilen, und den vorhandenen Gefährdungen ergeben sich relevante Fragestellungen in Bezug auf die Einwirkungen oder den Widerstand bzw. den momentanen Bauwerkszustand (vgl. Abb. 3.4, Beobachtung Umgebung/Lasten bzw. Antwortgrößen oder ZfP), welche durch die Anwendung von passenden Technologien beantworten lassen.

Unterstützung bieten dabei die Teilberichte im jeweiligen Fachbereich, d.h. Trasse, Kunstbauten oder Tunnel, durch die Technologietabellen (vgl. Kap. 6), in denen die vorhandenen Technologien den verschiedenen Fragestellungen und Bauwerksteilen zugeordnet sind. Somit können alle aktuell vorhandenen Überwachungstechnologien für die jeweiligen Fragestellungen identifiziert und anschliessend unter Anwendung der folgenden Methodik bewertet und evaluiert werden (vgl. Kap. 5.2).

Funktion	Einsatzbereich	Mess-Prinzip	Technologie		Einsatz in	Bemerkungen	Oberfläche	i.B. Applikationen	Stahlkonst.	Betonkonst.	Holzkonst.	Verbundkonst.	Mauerwerk	Vergewölbung	Stützen/Pfeiler/Pylon	Widerlager	Fahrstuhlüberläufe	Lager	andere Infrastrukturobjekte	Vor Bauphase (V)	Während Bauph. (W)	Nach Bauphase (N)					
			Name	Prinzip																							
Strukturelle Überwachung	Schwingung	Beschleunigung	Rein	Pyroresistenz	ALC																						
			EL	Dehnungssensoren	OML	Strm	2	0	2	1	2	3	1	3	3	2	2	3	3	3	1						
			PO	Flaschensensoren	FGS	Strm	3	0	2	1	2	3	1	3	1	3	3	3	3	3	3	1					
			Strm	Induktive Sensoren	IAS	Strm	2	0	2	1	2	3	1	3	1	3	3	3	3	3	3	1					
			Strm	Induktive Radarsensoren	RAD	Strm	2	0	2	1	2	3	1	3	1	3	3	3	3	3	3	1					
			Strm	Geophon/Sensoren	GPH	Strm	2	0	2	1	2	3	1	3	1	3	3	3	3	3	3	1					
			Strm	Form-Beschleunigungssensoren	FBS	Strm	2	0	2	1	2	3	1	3	1	3	3	3	3	3	3	1					
			Strm	Phasensensoren	PHS	Strm	2	0	2	1	2	3	1	3	1	3	3	3	3	3	3	1					
			Strm	Kapazitive MEMS	MEM	Strm	3	0	2	1	2	3	1	3	1	3	3	3	3	3	3	3	1				
			Strm	Induktive	IND	Strm	2	0	2	1	2	3	1	3	1	3	3	3	3	3	3	3	1				
Zustandsüberwachung	Schwingung	Beschleunigung	Rein	Pyroresistenz	ALC																						
			EL	Dehnungssensoren	OML	Strm	2	0	2	1	2	3	1	3	3	2	2	3	3	3	3	1					
			PO	Flaschensensoren	FGS	Strm	3	0	2	1	2	3	1	3	1	3	3	3	3	3	3	3	1				
			Strm	Induktive Sensoren	IAS	Strm	2	0	2	1	2	3	1	3	1	3	3	3	3	3	3	3	1				
			Strm	Induktive Radarsensoren	RAD	Strm	2	0	2	1	2	3	1	3	1	3	3	3	3	3	3	3	1				
			Strm	Geophon/Sensoren	GPH	Strm	2	0	2	1	2	3	1	3	1	3	3	3	3	3	3	3	1				
			Strm	Form-Beschleunigungssensoren	FBS	Strm	2	0	2	1	2	3	1	3	1	3	3	3	3	3	3	3	1				
			Strm	Phasensensoren	PHS	Strm	2	0	2	1	2	3	1	3	1	3	3	3	3	3	3	3	1				
			Strm	Kapazitive MEMS	MEM	Strm	3	0	2	1	2	3	1	3	1	3	3	3	3	3	3	3	3	1			
			Strm	Induktive	IND	Strm	2	0	2	1	2	3	1	3	1	3	3	3	3	3	3	3	3	1			

Abb. 5.8 Identifizierung aktuell vorhandener Überwachungstechnologien für eine relevante Fragestellung an einem Bauwerksteil

5.2 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. 5.9 dargestellt.

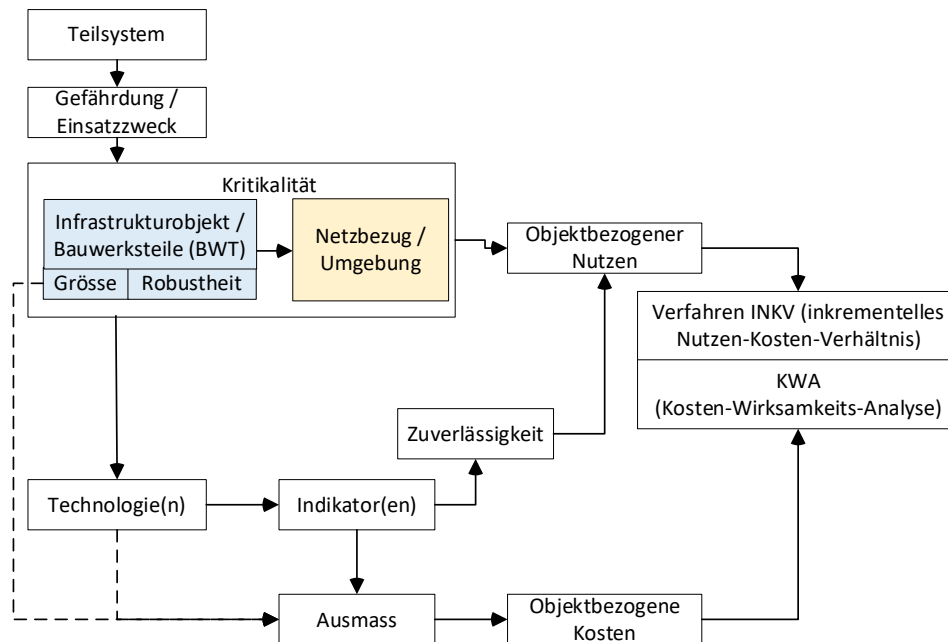


Abb. 5.9 Konzept der Bewertung der Technologien am Wert der Information

Mit diesem Konzept werden die Technologien, welche in Kapitel 6 aufgelistet sind, bewertet. 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 der Teilberichte). Dabei soll die Bewertung sowohl in beiden Bewertungsebenen, der Technologiebewertung und der Bewertung zur Entscheidungsfindung am einzelnen Infrastrukturobjekt bzw. Bauwerk, als auch in allen drei Teilsystemen, mit Kunstbauten, Tunnel und Trasse, Anwendung finden.

5.3 Verallgemeinerung durch Klassifizierung

Grundsätzlich ist der Wert der Information an einem Infrastrukturobjekt nicht unabhängig von den Gefährdungen und deren Konsequenzen ermittelbar. Am Einzelobjekt sollten alle relevanten Aspekte des Infrastrukturobjekts, 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 aufgezeigt. Die konkrete Klassifizierung im Teilsystem ist dem Kapitel 9 der Teilberichte zu entnehmen.

5.3.1 Kritikalität eines Infrastrukturobjekts oder eines seiner Bauwerksteile (BWT)

Die Kritikalität eines Infrastrukturobjekts bzw. eines seiner Bauwerksteile (BWT) wird durch das Infrastrukturobjekt 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. [3]) für die Simulation von Szenarien, z.B. zur Versagenswahrscheinlichkeit oder der resultierenden Konsequenzen, sinnvoll. Zum Teil ist dies die einzige Möglichkeit, konkrete Aussagen für das Einzelobjekt machen zu können.

Infrastrukturobjektgrösse

Die Grösse eines Infrastrukturobjekts hat je nach Technologieauswahl einen kostenbestimmenden Einfluss. Dies ist jedoch nicht zwingend. Bei einem punktuellen Einsatz der Technologien ist die Infrastrukturobjektgrösse eher nicht von Bedeutung. Auch bei einem linienförmigen oder flächigen Überwachungsgegenstand muss nicht zwingend das gesamte Infrastrukturobjekt betroffen sein. Für die überschlägige Technologiebewertung ist bei Bedarf eine grobe Klassifizierung je nach Teilsystem zu wählen. Dies wird im Rahmen eines zusätzlichen Nutzens im Rahmen einer überschläglichen Nutzenbestimmung verwendet. Eine überschlägliche Kostenbestimmung in Abhängigkeit von der Grösse des Infrastrukturobjekts ist somit nicht zielführend. Eine Abschätzung der Grösse des Überwachungsgegenstands ist notwendig.

Robustheit

Die Robustheit eines Infrastrukturobjekts gibt Aufschluss über die Wahrscheinlichkeit eines Versagens des Infrastrukturobjekts bzw. Infrastrukturobjekts oder eines seiner Bauwerksteile (BWT). Hierbei sind einerseits der Infrastrukturobjekttyp sowie andererseits dessen Gefährdungen relevant. Am konkreten Infrastrukturobjekt, dessen Gefährdungen und den vorhandenen örtlichen Randbedingungen können Tragwerksmodelle durch Szenarienbildung Aufschlüsse über das Versagen geben. Ohne einen konkreten Bezug auf ein existierendes Infrastrukturobjekt mit seinen Randbedingungen hilft eine Klassifizierung, um diese in eine überschlägige Bewertung einzubeziehen. Eine einfache qualitative Klassifizierung zeigt Abb. 5.10 auf.

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

Abb. 5.10 Einfache qualitative Klassifizierung der Robustheit

Netzbezug

Der Netzbezug ermöglicht es, die Konsequenzen eines Versagens von Infrastrukturobjekten zu bestimmen. Dabei werden die zu erwartenden Konsequenzen addiert. Ein wesentlicher Teil von Konsequenzen eines Versagens bei Strasseninfrastrukturobjekten kann aus der existierenden Verkehrsbelastung auf dem Infrastrukturobjekt selbst und dem umgebenden Strassennetz abgeleitet werden. Hierbei helfen Szenariensimulationen am Verkehrsmodell. Für eine überschlägliche Bewertung ohne konkrete Ansätze müssen analog zur Robustheit relevante Klassen gebildet werden. Eine einfache qualitative Klassifizierung zeigt Abb. 5.11 auf.

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

Abb. 5.11 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. 5.12). 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. 5.12 Klassifizierung der Kritikalität zur Verwendung bei der einfachen qualitativen Technologiebewertung

5.3.2 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. Bei der Quantifizierung sollten im Rahmen eines Überwachungskonzepts auch Kombinationen von Technologieanwendungen berücksichtigt werden, 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 eines Infrastrukturobjekts 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. 5.13). 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. 5.13 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 Problemstellung haben oder eben weniger. Dies kann mit einer weiteren einfachen Klassifizierung grob überschlagen werden (vgl. Abb. 5.14).

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

Abb. 5.14 Klassifizierung der Zuverlässigkeit in Bezug zur Aussagekraft der Indikatoren auf eine spezifische Gefährdung

Zusätzlicher Nutzen in Abhängigkeit des Überwachungsausmasses

Bei einer einfachen qualitativen Technologiebewertung ist, im Gegensatz zur Nutzenbestimmung am konkreten Infrastrukturobjekt mit dessen Randbedingungen, nicht eindeutig bestimmbar, welches Überwachungsausmass der Technologieinstallation am Infrastrukturobjekt relevant ist. Hierfür müssen Annahmen in Form einer Bandbreite mit oberer und un-

terer Grenze gebildet werden. Diese Skalierung hilft, den Nutzen in einer Bandbreite zwischen z.B. wenigen, punktuelle Messungen und ausgedehnten Messbereichen durch einen zusätzlichen Nutzen analog der aufgeführten Klassifizierung in Abb. 5.15 aufzuzeigen (vgl. auch Bandbreite Kosten). Den Hintergrund hierfür bildet der Wert einer Information an einem Infrastrukturobjekt. 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 Überwachungsausmass erzeugen höhere Kosten, resultieren aber durch ihre umfassendere Aussagekraft im Gefährdungskontext auch in einem höheren Nutzen.

Überwachungsausmass (Ü-Ausmass)		
zN	Kategorie	zusätzlicher Nutzen bei grossem Ü-Ausmass
	1	gering
	2	klein
	3	mittel
	4	gross
	5	sehr gross

Abb. 5.15 Klassifizierung des zusätzlichen Nutzens bei grossem Überwachungsausmass

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 Infrastrukturobjektsdefinition zumindest dargestellt werden. In der Einzelbewertung am Infrastrukturobjekt muss dies mit Kosten und quantifizierten Nutzen in der Szenariensimulation (vgl. Kapitel 5.4.2) Berücksichtigung finden.

5.3.3 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 Infrastrukturobjekt aus. Es ist eine Abschätzung bzw. Klassifizierung einer Grösse des Überwachungsgegenstandes am Infrastrukturobjekt für die grobe Technologiebewertung notwendig. Je nach Fragestellung und verfügbarer Technologie korreliert das Überwachungsausmass nicht mit der Infrastrukturobjektgrösse.

Auch die Ermittlung der objektbezogenen Kosten am konkreten Fall ist anhand des Überwachungsausmasses der Technologieanwendung, wie z.B. Grösse des Messbereichs bzw. Anzahl der Messpunkte, in Abhängigkeit zur Gefährdung und des Infrastrukturobjekts mit seinen Randbedingungen möglich. Für eine grobe Technologiebewertung bilden die Angaben in den jeweiligen Teilberichten eine gute Grundlage. Zusätzlich müssen in Bezug zum Überwachungsausmass analog zum Nutzen Annahmen in Form einer Bandbreite mit oberer und unterer Grenze erfolgen.

5.4 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.

5.4.1 Einfache qualitative Technologiebewertung

Im Rahmen der groben Technologiebewertung kann vereinfacht das Nutzen-Kosten-Verhältnis qualitativ aufgezeigt werden. Durch eine leichte Anpassung im Vorgehen (vgl. Abb. 5.16), können die Technologien direkt ohne den Bezug zu einem einzelnen Infrastrukturobjekt und seiner Umgebung bewertet werden. Hierfür werden die Nutzen- und Kosten-

kenngrossen 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 5.3 für die jeweiligen Aspekte beispielhaft aufgezeigt und muss für jedes Teilsystem separat betrachtet und sinnvoll definiert werden.

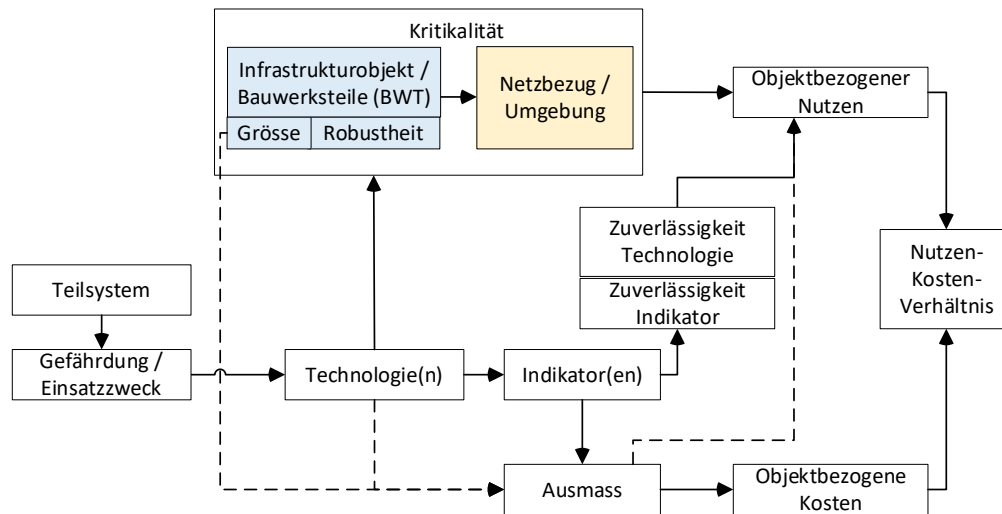


Abb. 5.16 Ablauf zur einfachen qualitativen Bewertung ausgehend von den im Teilsystem vorhandenen Technologien

Qualitative Ermittlung des objektbezogenen Nutzens ohne konkretes Infrastrukturobjekt

Für die Ermittlung des objektbezogenen Nutzens im Rahmen der einfachen qualitativen Technologiebewertung sind notwendige Angaben zu einem spezifischen Infrastrukturobjekt und seinem Netzbezug nicht vorhanden. Dies soll über eine Kategorisierung möglicher Eigenschaften inklusive Netzbezug gelöst werden. Hierfür wurden in Kapitel 5.3.1 drei Kategorien der Kritikalität *Krit* eingeführt. Diese bilden eine Bandbreite von gering kritischen Infrastrukturobjekten (Kategorie 1 – untere Grenze) bis zu hoch kritischen Infrastrukturobjekten (Kategorie 3 – obere Grenze) ab.

Für die gewählten Technologie mit spezifischen gemessenen oder berechneten physikalischen Grössen als einen oder mehreren Indikatoren zu einer relevanten Infrastruktureigenschaft, lässt sich qualitativ die Zuverlässigkeit aus ZV1 und ZV2 ermitteln. Zusätzlich existiert ein zusätzlicher Nutzen zN, wenn die Aussagekraft im Gefährdungskontext durch ein grösseres Überwachungsausmass erhöht wird (vgl. Kapitel 5.3.2). 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 Bauwerksteilen wird für das jeweilige Teilsystem in Kapitel 9 der Teilberichte konkret aufgezeigt.

5.4.2 Einzelbewertung am Infrastrukturobjekt

Für die Einzelbewertung am Infrastrukturobjekt sind die spezifischen örtlichen Randbedingungen über eine Risikobetrachtung konkret zu analysieren. Dabei können Computermodele helfen, die Wahrscheinlichkeit eines Versagens (z.B. Tragwerksmodelle linear, flächenbezogen oder FEM) oder dessen Konsequenzen (z.B. Verkehrssimulationen mit [3]) zu quantifizieren.

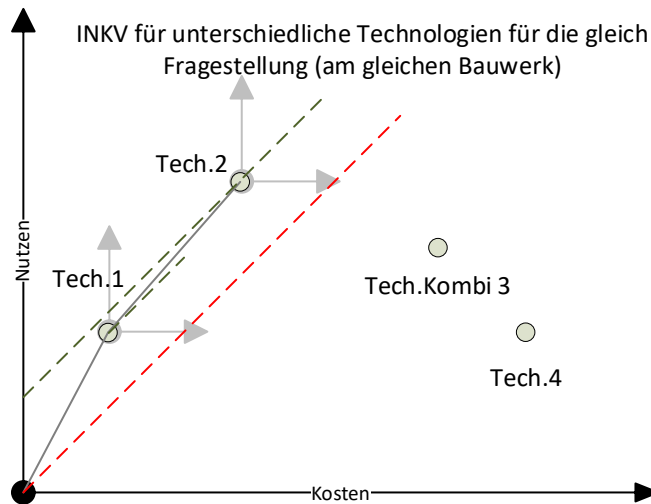


Abb. 5.17 Verfahren des Inkrementellen Nutzen-Kosten-Verhältnisses (INKV)

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. 5.17 und [5], [6]).

Hintergrund der Bewertung ist der Wert der Information. 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 Rhythmus (je nach Teilsystem 4-6 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. Szenario der anzuwendenden Technologie oder Kombination). Damit können der Wert der Information und auch der Nutzen des Überwachungskonzepts an einem Infrastrukturobjekt mit den örtlichen Randbedingungen und vorhandenen Gefährdungen für einen Vergleich mit anderen Varianten ermittelt werden.

6 Evaluierte Technologien und Datenquellen für die Überwachung im Überblick

6.1 Übersichtstabellen – Legende und Lesehilfe

Die evaluierten Technologien werden im vorliegenden Synthesebericht in Tabellen je nach möglichem Einsatz-/Verwendungszweck für die drei Teilbereiche Kunstbauten, Tunnel und Trasse zusammengefasst dargestellt. Einzelne Technologien können auch an unterschiedlichen Orten mehrfach genannt werden, wenn sie für unterschiedliche Messziele einsetzbar sind. Die Tabellenstruktur wird durch die in Tab. 6.4 aufgezeigte Legende erläutert.

Im Anschluss folgt in Kapitel 6.2 die jeweils detailliertere Tabellendarstellung der einzelnen Technologien mit einer ersten Übersichtseinstufung nach Nutzungen, während der verschiedenen Lebensphasen, 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 (vgl. Tab. 6.4).

Es wird darauf hingewiesen, dass die Einstufung auf der Grundlage des Anwendungspotenzials jeder Technologie erfolgt und nicht auf der Grundlage deren Einsatzhäufigkeit, 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. 6.5 zeigt einen Auszug aus der Übersicht der evaluierten Technologien, worin im Sinne einer Lesehilfe ein konkretes Beispiel für die Anwendung der Tabellenübersichten aus Kapitel 6.2 dargestellt ist:

1. Relevantes Infrastrukturobjekt / 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, sinnvollster Einsatzzeitpunkt) zu jeder Technologie.

Tab. 6.4 Legende

Übergeordnete Gruppe		Bauwerksentkoppelte Überwachung					
Fragstellung		Baugrundverformungen		Fragestellung			
Gängige Bezeichnung der Technologien	ID: 3 Buchstaben ohne Nummerierung	Art des Prüfverfahrens	Name	"ID"	ZfP / ZaP / ZP (NDT/PDT/DT) (zerstörungsfrei/zerstörungssam / zerstörende Prüfung)	Technologie	
		Fachgebiet -->		Einsatzfachgebiet			
		Tunnel		Querschnittsthemen			
		Geotechnik					
		Naturgefahren					
		Umwelt					
		<--- bauwerksbezogen					
		Verkleidung - Gewölbe		Bergähnliche Tunnel			
		Verkleidung - Sohlgewölbe					
		Zwischendecke		Tagbautunnel, Galerien inkl. Portalbereich			
		Verkleidung - Gewölbe					
		Verkleidung - Sohlgewölbe					
		Zwischendecke					
		Baugruben, Einschnitt					
		Bergwasserdrainageleitungen		Drainageleitungen und Strassenkörper			
		Fahrbahnbelag					
		Fundationsschicht					
		Baugrund		Einflussbereich Bauwerk			
		Terrainoberfläche					
		andere Infrastruktureobjekte					
		Einsatz-/Durchführungs-Zeitpunkt		Phasen			
Einsatzzeitpunkt: vor (V) / während (W) / nach (N) Bau				Detaildaten (Links zu) Kapitel(n)			
Verweis Detailbeschreibung				weitere Erläuterungen (Links zu Quellenverzeichnis)			
Weitere Referenzen							

Tab. 6.5 Lesehilfe zur Übersicht der evaluierten Technologien

Bauwerksentkoppelte Überwachung									
Massenbewegungen (Steinschlag, Murgänge, Lawinen, Rutschhang, etc.)					Baugrundverformungen		Fragestellung		
					Name		2. Baugrundverformung		
					ID		4. Art der Prüfung		
					ZfP / ZaP / ZP (NDT/PDT/DT) (zerstörungsfrei/zerstörungsarm/zerstörende Prüfung)				
					Fachgebiet -->		Einsatz in Fachgebieten		
					Geotechnik		4. Weitere Fachbereiche		
					Naturgefahr				
					Umwelt				
					<--- bauwerksbezogen				
					Verkleidung - Gewölbe		1. Baugrube		
					Verkleidung - Sohlgewölbe				
					Zwischendecke				
					Verkleidung - Gewölbe				
					Verkleidung - Sohlgewölbe				
					Zwischendecke				
					Baugruben, Einschnitt				
					Bergwasserdrainageleitungen				
					Fahrbahnbelag				
					Fundationsschicht				
					Baugrund				
					Terrainoberfläche				
					andere Infrastrukurobjekte				
					Einsatz-/Durchführung Zeitpunkt		4. Einsatzzeitpunkt		
					Detaildaten (Links zu) Kapitel(n)				
					weitere Erläuterungen (Links zu Quellenverzeichnis)				

Tab. 6.6 Übersicht der evaluierten Technologien im Fachbereich Trasse 1/2

Einsatzzweck		Name		"ID"		ZiP / ZaP / ZP (NDT/PDT/DT)		Fachgebiet -->		Trassee		Geotechnik		Naturgefahren		Umwelt		<--- bauwerks-bezogen		Messszenario (Punktuell, Serienmessung)		Ober- fläche		Oberbau				Inventar			Einsatz-/Durch- führungs-Zeitpunkt		Detaildaten (Links zu) Seite(n)		weitere Erläuterungen (Links zu) Quellenverzeichnis																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																															
Sicherheit	Rauheit [Reibwert µ]	Pendelgerät	RRP_Z	ZiP		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	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	

Tab. 6.7 Übersicht der evaluierten Technologien im Fachbereich Trasse 2/2

		Einsatzzweck		ZIP / ZaP / ZP (NDT/PDT/DT)		Fachgebiet -->		Trassee		Geotechnik		Naturgefahren		Umwelt		<--- bauwerks-bezogen		Messszenario (Punktuell, Serienmessung)		Ober- fläche	Oberbau					Inventar					weitere Erläuterungen (Links zu) Quellenverzeichnis																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																	
		Name																Markierung			Fahrbahn Asphalt/Beton		Decke (Asphalt)		Decke (Beton)		Asphalttragschichten		Tragschichten mit hydr. Bindemittel		Schichten ohne Bindemittel		Untergrund / Unterbau		Fahrzeurgückhaltesysteme		Lärmschutz / Zäune und Tore		Entwässerung auf Fahrbahn		Gelände inklusive Mulden		Einsatz-/Durch- führungs-Zeitpunkt		Detaildaten (Links zu) Seite(n)																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																			
Substanz	Anomalien im Material (Qualitativ/Quantitativ)	Tragfähigkeit [Deflektion in µm]	Radar		ARd	ZIP	3	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0</

Tab. 6.8 Übersicht der evaluierten Technologien im Fachbereich Kunstbauten 1/3

SHM - Umgebung/Lasten										Funktion	
Einsatzzweck										Mess-Prinzip	
Technologie										Einsatz in Fachgebiet	
Querschnitts- themen										Oberfläche	
Oberbau										Unterbau	
andere Infrastruktur objekte										Bauwerksnähe	
Einsatz-/Durch- führungs-Zeitpunkt										Detaildaten (Links zu) Seite(n)	
Name										"ID"	
SHM / ZIP / ZaP										Kunstbauten	
Naturgefahren										Umwelt/Belastung	
<--- bauwerks-bezogen											
z.B. Abdichtungen										Stahlkonst.	
Fahrbahnplatte/ Träger										Beton	
										Hohlzkonst.	
										Verbundkon.	
										Mauerwerk	
Vorspannung											
Kabel											
Stütze/Pfeiler/Pylon											
Verankerungen											
Widerlager/Wand											
Fahrbahnübergänge											
Auflager											
Stütz-/Leitmauer											
Vor Bauphase (V)											
Während Bauph. (W)											
Gebrauchst.											
nach Bauphase (N)											
Tragfähigk.											
7:07										7:07	
7:07										7:07	
7:07										7:07	
7:07										7:07	
7:07										7:07	
7:08										7:08	
7:08										7:08	
7:08										7:08	
7:09										7:09	
7:10										7:10	
7:10										7:10	
7:10										7:10	
7:11										7:11	
7:12										7:12	
7:13										7:13	
7:14										7:14	
7:15										7:15	
7:16										7:16	

Tab. 6.9 Übersicht der evaluierten Technologien im Fachbereich Kunstbauten 2/3

SHM - Antwortgrößen										Funktion	
Verschiebung / Verformung / Durchbiegung										Einsatzzweck	
Mess-Prinzip										Technologie	
Name										"ID"	
SHM / ZiP / ZaP										SHM / ZiP / ZaP	
Kunstbauten										Einsatz in Fachgebiet	
Naturgefahren										Querschnitts-themen	
Umwelt/Belastung										Umwelt/Belastung	
<--- bauwerks-bezogen										<--- bauwerks-bezogen	
z.B. Abdichtungen										Oberfläche	
Stahlkonst.										Gliederung Bauwerk in generalisierte Bauwerksteile	
Beton										Oberbau	
Hohlzkonst.										Oberbau	
Verbundkon.										Oberbau	
Mauerwerk										Oberbau	
Vorspannung										Oberbau	
Kabel										Oberbau	
Stütze/Pfeiler/Pylon										Unterbau	
Verankerungen										Unterbau	
Widerlager/Wand										Unterbau	
Fahrbahnübergänge										andere Infrastruktur objekte	
Auflager										andere Infrastruktur objekte	
Stütz-/Leitmauer										andere Infrastruktur objekte	
Vor Bauphase (V)										Einsatz-/Durchführungs-Zeitpunkt	
Während Bauph. (W)										Einsatz-/Durchführungs-Zeitpunkt	
Gebrauchst.										Einsatz-/Durchführungs-Zeitpunkt	
Tragfähigk.										Einsatz-/Durchführungs-Zeitpunkt	
Detaildaten (Links zu) Seite(n)										Detaildaten (Links zu) Seite(n)	

Tab. 6.10 Übersicht der evaluierten Technologien im Fachbereich Kunstbauten 3/3

Zerstörungs- freie/arme Prüfmethoden				Funktion	
Korrosion / Dicke / Hohlräume / Delaminationen		Rissbildung / Delamination / Materialeigenschaften		Einsatzzweck	
Sonst.	Radio / Elektromagnetische	Akustische Methoden	Optische Method.	Mess-Prinzip	
Name	"ID"	SHM / Z/P / ZaP	Kunstbauten	Einsatz in Fachgebiet	Technologie
Endoskopie	END_	ZaP	2	0	Querschnitts- themen
Mikroskopie	MIK_	ZaP	2	0	
Digitale Bildkorrelation	DIC_	Z/P	1	2	Umwelt/Belastung
Akustische Emission	AEI_	Z/P	3	1	
Impulsantwort	IMP_	Z/P	3	0	<--- bauwerks-bezogen
Impact-Echo	ECH_	Z/P	3	0	
Ultraschalltechniken	UTS_	Z/P	3	0	Oberfläche
Radiografie/Gammagrafie	RDG_	Z/P	3	0	
Computertomographie	CTM_	Z/P	2	0	Gliederung Bauwerk in generalisierte Bauwerkstelle
GPR	GPR_	Z/P	3	2	
Eddy Current Testing	ECT_	Z/P	2	0	Oberbau
Magnetflussverfahren	MFL_	Z/P	2	0	
Widerstandsmessverfahren	WSM_	Z/P	2	0	Unterbau
Potentialfeldmessung	ELP_	Z/P	2	0	
Infrared Thermografie	IRT_	Z/P	2	0	andere Infrastruktur objekte
Skonometrie	SKL_	Z/P	1	0	
Chloridgehaltsmessungen	CHL_	Z/P	0	0	Einsatz-/Durch- führungs-Zeitpunkt
			0	2	
			0	0	Detaildaten (Links zu) Seite(n)
			0	2	
			0	0	Vor Bauphase (V)
			0	0	
			0	0	Während Bauph. (W)
			0	0	
			0	0	Gebrauchst.
			0	0	
			0	0	nach Bauphase (N)
			0	0	
			0	0	Tragfähigk.
			0	0	
			0	0	7.37
			0	0	
			0	0	7.38
			0	0	
			0	0	7.39
			0	0	
			0	0	7.40
			0	0	
			0	0	7.41
			0	0	
			0	0	7.42
			0	0	
			0	0	7.43
			0	0	
			0	0	7.44
			0	0	
			0	0	7.45
			0	0	
			0	0	7.46
			0	0	
			0	0	7.47
			0	0	
			0	0	7.48
			0	0	
			0	0	7.49
			0	0	
			0	0	7.50
			0	0	
			0	0	7.51
			0	0	
			0	0	7.52
			0	0	
			0	0	7.53
			0	0	

Tab. 6.11 Übersicht der evaluierten Technologien im Fachbereich Tunnel 1/3

Technologie		Gliederung Bauwerk in generalisierte Bauwerksteile										Einflussbereich Bauwerk			Phasen		
		Einsatz in Fachgebieten		Querschnitts-themen		Bergmännische Tunnel		Tagbautunnel, Galerien inkl. Portalbereich		Drainage-leitungen und Strassenkörper		Bauwerk					
Fragestellung		Tunnel		Naturgefahren		Verkleidung - Gewölbe		Verkleidung - Sohlgewölbe		Baugruben, Einschnitt		Bergwasserdrainageleitungen		Baugrund		Einsatz-/Durchführungs-Zeitpunkt	
Name		Geotechnik		Umwelt		Verkleidung - Gewölbe		Verkleidung - Sohlgewölbe		Zwischendecke		Zwischendecke		Terrainoberfläche		weitere Erläuterungen	
"ID"		Fachgebiet ->		<--- bauwerksbezogen		Verkleidung - Gewölbe		Verkleidung - Sohlgewölbe		Zwischendecke		Zwischendecke		andere Infrastrukturobjekte		(Links zu Quellenverzeichnis)	
ZfP / ZaP / ZP (NDT/PDT/DT)		Tunnel		<--- bauwerksbezogen		Verkleidung - Gewölbe		Verkleidung - Sohlgewölbe		Baugruben, Einschnitt		Bergwasserdrainageleitungen		Baugrund		Detaildaten	
Lokalisation Messresultat (P, L, F)		Tunnel		<--- bauwerksbezogen		Verkleidung - Gewölbe		Verkleidung - Sohlgewölbe		Baugruben, Einschnitt		Bergwasserdrainageleitungen		Baugrund		weitere Erläuterungen	
Baugrundverformungen		Tunnel		<--- bauwerksbezogen		Verkleidung - Gewölbe		Verkleidung - Sohlgewölbe		Baugruben, Einschnitt		Bergwasserdrainageleitungen		Baugrund		weitere Erläuterungen	
Bewegungs-Radar (Dopplerradar) BWR_		Tunnel		<--- bauwerksbezogen		Verkleidung - Gewölbe		Verkleidung - Sohlgewölbe		Baugruben, Einschnitt		Bergwasserdrainageleitungen		Baugrund		Detaildaten	
Geophone EMG_		Tunnel		<--- bauwerksbezogen		Verkleidung - Gewölbe		Verkleidung - Sohlgewölbe		Baugruben, Einschnitt		Bergwasserdrainageleitungen		Baugrund		weitere Erläuterungen	
Pegel-Radar PR_		Tunnel		<--- bauwerksbezogen		Verkleidung - Gewölbe		Verkleidung - Sohlgewölbe		Baugruben, Einschnitt		Bergwasserdrainageleitungen		Baugrund		weitere Erläuterungen	
Infrasound iFS_		Tunnel		<--- bauwerksbezogen		Verkleidung - Gewölbe		Verkleidung - Sohlgewölbe		Baugruben, Einschnitt		Bergwasserdrainageleitungen		Baugrund		weitere Erläuterungen	
Wetterstation WTS_		Tunnel		<--- bauwerksbezogen		Verkleidung - Gewölbe		Verkleidung - Sohlgewölbe		Baugruben, Einschnitt		Bergwasserdrainageleitungen		Baugrund		weitere Erläuterungen	
Laserscanning LSC_		Tunnel		<--- bauwerksbezogen		Verkleidung - Gewölbe		Verkleidung - Sohlgewölbe		Baugruben, Einschnitt		Bergwasserdrainageleitungen		Baugrund		weitere Erläuterungen	
Reissleiten RSL_		Tunnel		<--- bauwerksbezogen		Verkleidung - Gewölbe		Verkleidung - Sohlgewölbe		Baugruben, Einschnitt		Bergwasserdrainageleitungen		Baugrund		weitere Erläuterungen	
Kapazitive Drucksensoren DSK_		Tunnel		<--- bauwerksbezogen		Verkleidung - Gewölbe		Verkleidung - Sohlgewölbe		Baugruben, Einschnitt		Bergwasserdrainageleitungen		Baugrund		weitere Erläuterungen	
Piezoelektrische Drucksensoren DSP_		Tunnel		<--- bauwerksbezogen		Verkleidung - Gewölbe		Verkleidung - Sohlgewölbe		Baugruben, Einschnitt		Bergwasserdrainageleitungen		Baugrund		weitere Erläuterungen	
Terrestrische Radarinterferometrie TRF_		Tunnel		<--- bauwerksbezogen		Verkleidung - Gewölbe		Verkleidung - Sohlgewölbe		Baugruben, Einschnitt		Bergwasserdrainageleitungen		Baugrund		weitere Erläuterungen	
Satellengestützte Radarinterferometrie SRL_		Tunnel		<--- bauwerksbezogen		Verkleidung - Gewölbe		Verkleidung - Sohlgewölbe		Baugruben, Einschnitt		Bergwasserdrainageleitungen		Baugrund		weitere Erläuterungen	
Deformationskameras DFK_		Tunnel		<--- bauwerksbezogen		Verkleidung - Gewölbe		Verkleidung - Sohlgewölbe		Baugruben, Einschnitt		Bergwasserdrainageleitungen		Baugrund		weitere Erläuterungen	
Geodätische Aufnahmen (Tachymeter) TAC_		Tunnel		<--- bauwerksbezogen		Verkleidung - Gewölbe		Verkleidung - Sohlgewölbe		Baugruben, Einschnitt		Bergwasserdrainageleitungen		Baugrund		weitere Erläuterungen	
Nivellament NIV_		Tunnel		<--- bauwerksbezogen		Verkleidung - Gewölbe		Verkleidung - Sohlgewölbe		Baugruben, Einschnitt		Bergwasserdrainageleitungen		Baugrund		weitere Erläuterungen	
Fugen- und Rissmessgeräte FUG_		Tunnel		<--- bauwerksbezogen		Verkleidung - Gewölbe		Verkleidung - Sohlgewölbe		Baugruben, Einschnitt		Bergwasserdrainageleitungen		Baugrund		weitere Erläuterungen	
Dilatometer DIS_		Tunnel		<--- bauwerksbezogen		Verkleidung - Gewölbe		Verkleidung - Sohlgewölbe		Baugruben, Einschnitt		Bergwasserdrainageleitungen		Baugrund		weitere Erläuterungen	
Neigungsänderungen (Clinometer) CL_		Tunnel		<--- bauwerksbezogen		Verkleidung - Gewölbe		Verkleidung - Sohlgewölbe		Baugruben, Einschnitt		Bergwasserdrainageleitungen		Baugrund		weitere Erläuterungen	
Faseroptische Sensoren FOS_		Tunnel		<--- bauwerksbezogen		Verkleidung - Gewölbe		Verkleidung - Sohlgewölbe		Baugruben, Einschnitt		Bergwasserdrainageleitungen		Baugrund		weitere Erläuterungen	

Tab. 6.12 Übersicht der evaluierten Technologien im Fachbereich Tunnel 2/3

[illegible]

Tab. 6.13 Übersicht der evaluierten Technologien im Fachbereich Tunnel 3/3

Bergwasser- drainage	Überwachung Verkleidung und Zwischendecke			Fragestellung	Technologie
	Überwachung	Verformungen	Betonspan- nungen		
Versinterungspotenzial (Kohlensäure-Kalk) Leitfähigkeitssensoren Kanal-TV KTV_				Name	ZfP / ZaP / ZP (NDT/PDT/DT) (zerstörungsfrei/zerstörungsarm/zerstörende Prüfung)
				"IP"	
Durchflussmessung Wassertemperatursensoren pH-Wert VSP LFK Kanal-TV KTV_					Lokalisation Messresultat (P, L, F) (Punktuell, Linear, Flächenbezogen)
Geodätische Aufnahmen (Tachymeter) Schlauchwäge Faseroptische Dehnungsmessungen Neigungsänderungen (Clinometer) Distometer Nivelliermet Fugen- und Rissmessgeräte					Fachgebiet -->
Laserscanning TAC SWA FOS CL DIS NIV FUG					Einsatz in Fachgebieten
LSC TAC SWA FOS CL DIS NIV FUG					Querschnitts- themen
LSC TAC SWA FOS CL DIS NIV FUG					Gliederung Bauwerk in generalisierte Bauwerksteile
LSC TAC SWA FOS CL DIS NIV FUG					Bergmännische Tunnel
LSC TAC SWA FOS CL DIS NIV FUG					Tagbautunnel, Galerien inkl. Portabereich
LSC TAC SWA FOS CL DIS NIV FUG					Drainage- leitungen und Strassenkörper
LSC TAC SWA FOS CL DIS NIV FUG					Baugruben, Einschnitt
LSC TAC SWA FOS CL DIS NIV FUG					Bergwasserdrainageleitungen
LSC TAC SWA FOS CL DIS NIV FUG					Fahrbahnbelag
LSC TAC SWA FOS CL DIS NIV FUG					Fundationsschicht
LSC TAC SWA FOS CL DIS NIV FUG					Baugrund
LSC TAC SWA FOS CL DIS NIV FUG					Terraingo- berfläche
LSC TAC SWA FOS CL DIS NIV FUG					andere Infrastrukturo- bjekte
LSC TAC SWA FOS CL DIS NIV FUG					Einsatz-/Durchführungs- Zeitpunkt
LSC TAC SWA FOS CL DIS NIV FUG					Detaildaten (Links zu Kapitel(n))
LSC TAC SWA FOS CL DIS NIV FUG					weitere Erläuterungen (Links zu Quellenverzeichnis)

6.3 Evaluierte Technologien – Übersicht in Bezug auf neue Anwendungsfälle

Neben einer Beschreibung der bereits verfügbaren Technologien und bestehender Anwendungsfälle für die Strasseninfrastruktur wurden im Rahmen der Teilberichte Trasse, Kunstbauten und Tunnel weitere aufstrebende Technologien identifiziert, welche neu sind oder sich bereits in einer Testphase befinden.

Die Technologien werden mit Hilfe von vordefinierten Aspekten beleuchtet:

- Beschreibung der Technologie
- Forschungsgegenstand, Anwendungsgrenzen und Potential
- Einsatzzwecke und Fragestellung im jeweiligen Bereich
- Datenerfassung, Messgrößen und Genauigkeit
- Anwendungsbeispiele, Pilotanwendungen
- Literaturverzeichnis

Je nach Potential werden einige dieser Technologien im Kontext der Kapitel 8 und 9 des vorliegenden Syntheseberichts für einen Anwendungsfall mit in Betracht gezogen.

6.3.1 Kunstbauten

Im Teilbereich Kunstbauten zeigen sich folgende aufstrebende Technologien, welche vielversprechend in Bezug auf Ihr Potential zur Nutzung haben. Diese sind in Kapitel 8 des Teilberichts Kunstbauten mit Hilfe der oben aufgeführten Struktur beschrieben.

- (interferometrische) Synthetische Apertur-Radar
- Laser-Doppler-Vibrometrie (LDV)
- Fahrzeugseitiges Monitoring (On-Board Monitoring)
- Bildgestützte Bewegungsverstärkung (Vision-based Motion Amplification)
- Kamera-basierte Schadenserkennung
- Drahtlose Sensornetze
- Brücken - Weigh In Motion (B-WIM)
- Verteilte faseroptische Sensoren für Vorspannsysteme
- Computer Vision basierte Schadensdetektion
- Verteilte faseroptische Sensoren
- Neutronenradiographie
- Myonentomographie
- Korrosionsüberwachung
- Intelligente Betonaggregate

6.3.2 Tunnel

Im Teilbereich Tunnel zeigen sich folgende aufstrebende Technologien, welche vielversprechend in Bezug auf Ihr Potential zur Nutzung haben. Diese sind in Kapitel 8 des Teilberichts Tunnel mit Hilfe der oben aufgeführten Struktur beschrieben.

- Kamerabildverarbeitungsbasierte Systeme / Daedalus
- CV/KI basierte Schadensdetektion
- Verteilte akustische Erfassung (DAS)
- Mobile Mapping Systeme

6.3.3 Trasse

Im Teilbereich Trasse zeigen sich folgende aufstrebende Technologien, welche vielversprechend in Bezug auf Ihr Potential zur Nutzung haben. Diese sind in Kapitel 8 des Teilberichts Trasse mit Hilfe der oben aufgeführten Struktur beschrieben.

- Fahrzeugflottendatenanalyse (Vehicle Onboard Analytics)
- Berührungslose Griffigkeitsmessung
- ML-basierte Bilddatenverarbeitung zur Objekt- und Schadstellendetektion
- Fahrzeugseitig-sensorgestützte Radlastmessung (On Board Weighing)
- Streckenkontrolle - Auswertung von Mikroverkehrsdaten
- Zustandsabgleich mit Augmented Reality + BIM
- ML-basierte Auswertung von Messdatenreihen
- Einsatz von Robotern und UAVs zur zerstörungsfreien Prüfung

7 Externen Datenquellen zur Überwachung der Strasseninfrastruktur

Für die Entscheidungsfindung im Erhaltungsmanagement der Strasseninfrastruktur werden relevante Daten direkt in den Prozessen der Überwachung, dem Bau und der Erhaltung generiert, verwendet und vorgehalten. Grundsätzlich stehen nahezu alle Lebensbereiche der Gesellschaft in einem digitalen Wandel. Für die unterschiedlichsten Zwecken unabhängig und somit ausserhalb bzw. extern zur Strasseninfrastruktur werden Daten aus verschiedensten Quellen erhoben und verarbeitet.

Diese Daten aus externen Quellen können je nach Verwendungsmöglichkeiten bzw. nach den existierenden Datenschutzbestimmungen verwendbarem Inhalt durch eine Verknüpfung mit Strasseninfrastrukturdaten neues Wissen über Zusammenhänge und somit einen Mehrwert für die Entscheidungsfindung generieren. Die folgenden externen Datenquellen würden im Rahmen dieses Projekts betrachtet:

- Daten der Schweizer Bundesverwaltung
- Individuelle Standort-Massendaten
- Daten der Fahrzeugindustrie
- Daten des Copernicus-Satellitenprogramms

Im Folgenden werden diese externen Datenquellen aufgezeigt und in Bezug auf eine mögliche Nutzung zusammenfassend erläutert. Einige der Anwendungsfälle sind bereits in den 3 Teilberichten beschrieben und zusätzlich werden in den Kapiteln 8 und 9 verschiedene Empfehlungen gegeben.

7.1 Daten der Schweizer Bundesverwaltung

Die Schweizer Bundesverwaltung stellt unterschiedlichste Geodaten für den privaten oder wirtschaftlichen Gebrauch sowie für Forschung und Lehre über verschiedene Web-Dienste von swisstopo zur Verfügung. Das Bundesamt für Landestopografie swisstopo ist Teil des Eidgenössischen Departements für Verteidigung, Bevölkerungsschutz und Sport VBS, und erfüllt sowohl militärische wie zivile Aufgaben. swisstopo ist das Kompetenzzentrum für Geoinformation der Schweizerischen Eidgenossenschaft und teilt dieses Wissen auf offene, transparente und wiederverwendbare Weise, damit es für die Bevölkerung, Unternehmen und Behörden zugänglich ist (vgl. <https://www.swisstopo.admin.ch/>).

7.1.1 Überblick und aktueller Stand

swisstopo Produkte

Die Daten stehen im Rahmen verschiedener Produkte zur Verfügung. Je nach Verwendungszweck können diese in unterschiedlichster Form und Kombination für Analysen und Auswertungen oder für die Einbindung in Softwareapplikationen verwendet werden. Für die gesamte Schweiz sind die Daten in unterschiedlichen Modellformen strukturiert. Dazu gehören

- Landschaftsmodelle (<https://www.swisstopo.admin.ch/de/landschaftsmodelle>)
- Höhenmodelle (<https://www.swisstopo.admin.ch/de/hohenmodelle>)
- Geologische Modelle (<https://www.swisstopo.admin.ch/de/geologische-modelle>)

Neben den bereits existierenden Datenmodellen wurde zusätzlich ein verkehrsträgerübergreifendes Produkt Verkehrsnetz CH (VnCH) eingeführt, welches Verkehrs- bzw. Mobilitätsdaten der Schweiz kombinieren und über die vorhandenen Verkehrsbeziehungen in einem einheitlichen und routingfähigen Basisnetz verorten wird.

Ein neuer Produktbereich swiss Earth Observation (swissEO) von swisstopo basiert auf vorhandenen Satellitendaten des Copernicus-Programms (Satellitenquelle Sentinel 2, vgl. Kapitel 7.4), der amerikanischen National Aeronautics and Space Administration NASA (Satellitenquelle Landsat) und der Europäischen Organisation für die Nutzung meteorologischer Satelliten EUMETSAT (Satellitenquelle Meteosat). Diese swissEO Produkte, hauptsächlich für das operationellen Monitoring des Vegetationszustandes in der Schweiz, wurden in Zusammenarbeit mit dem Bundesamt für Meteorologie und Klimatologie MeteoSchweiz und dem Bundesamt für Umwelt (BAFU) definiert und durch eigene Datenprozessierung gewonnen.

Verkehrsnetz CH

Der Datensatz des VnCH beinhaltet im Kern einen Basisbestand an Daten, welcher den Bezugsrahmen für Verkehrs- und Mobilitätsdaten schafft und einen erweiterten Bestand an Daten, welcher multimodales Routing und weitere Anwendungen ermöglicht. Im Datenmodell und im Datensatz des VnCH enthalten sind die Verkehrsträger Strasse und Weg, Schiene, Wasser und Seilbahn. Die Flughäfen sind als zentrale Knotenpunkte mit eingebunden, der Flugverkehr selbst steht jedoch aktuell nicht im Fokus des VnCH (vgl. <https://www.swisstopo.admin.ch/de/projekt-verkehrsnetz-ch>).

Das Projekt VnCH schafft damit einerseits einen gemeinsamen Nenner für die Verknüpfung aller Verkehrs- und Mobilitätsdaten und andererseits eine Geodatenbasis, auf der Verkehrs- und Mobilitätsdaten aufbauen können. Ersteres ermöglicht es, die Daten untereinander räumlich in Beziehung zu bringen. Das Basisnetz ist damit ein zentraler Baustein für die zukünftige Mobilitätsdateninfrastruktur (MODI) und dient der nationalen Datenvernetzungsinfrastruktur Mobilität (NADIM) als räumlicher Bezugsrahmen (vgl. [7]).

Das System VnCH stellt selbst keine Endanwendungen zur Verfügung, insbesondere keine Routinganwendung. VnCH liefert aber interessensneutrale Grundlagedaten und den Bezugsrahmen für die Anbindung weiterer Daten. Die Routingfähigkeit des Datenbestands des VnCH geht so weit, wie es die Aktualität des Datenbestands zulässt: Statische und planbare Informationen werden in den Datenbestand Verkehrsnetz CH integriert. Dynamische Betriebsdaten – d. h. Daten zu dem, was aktuell bzw. in Echtzeit auf der physischen Verkehrsinfrastruktur stattfindet – sind nicht Teil des Datenbestands. Sie werden von anderen Organisationen gepflegt und fliessen von dort in die NADIM ein. Aber auch für diese Daten schafft das VnCH den räumlichen Bezugsrahmen und macht sie so verknüpfbar. Die Zusammenführung erfolgt aber ausserhalb des Systems VnCH, z.B. in der NADIM (vgl. [7]).

Satellitendaten

Als Grundlage für diese Produkte dienen die vorprozessierten Satellitendaten swissEO S2-SR (Sentinel 2 Surface Reflectance), welche durch die Aufbereitung eine hohe Lagegenauigkeit sicherstellen und Störungen durch Wolken und Geländeschatten maskieren (vgl. <https://www.swisstopo.admin.ch/>). Da die Schweiz durch den Bundesratsbeschluss vom 1. Mai 2024 vorerst in der aktuellen Periode bis 2027 des Copernicus-Programms nicht teilnehmen wird, kann von bereits prozessierten Daten nicht profitiert werden. Es stehen nur die direkten Satellitendaten ohne eine Vorprozessierung und dadurch nutzbare Dienste zur Verfügung (vgl. Kapitel 7.4).

Ein aus dem swiss EO S2-SR abgeleitetes Produkt wurde durch swissEO VHI geschaffen. Das "swissEO VHI" (Vegetation Health Index) Produkt liefert eine Einschätzung des Vegetationszustandes der Erdoberfläche mit vorhandener Vegetation innerhalb der Schweiz. Der VHI ermöglicht die Erkennung lokaler Anomalien durch den Vergleich des abgeleiteten aktuellen Gesundheitszustands der Vegetation mit der Klimareferenzperiode von 1991 bis 2020, was schnelle und gezielte Entscheidungen unterstützen kann (vgl. <https://www.swisstopo.admin.ch/>).

INSPIRE

Alle Geodaten von swisstopo werden für unterschiedliche Themenbereiche gegliedert und stehen in verschiedenen strukturellen Standardformaten zur Verfügung. Dabei erfüllt

swisstopo auch den EU Standard INSPIRE. In der EU wird der allgemeine Standard für räumliche Infrastrukturdaten durch die technischen Spezifikationen der INSPIRE-Richtlinie (Infrastructure for spatial information in the European Community) vorgegeben. Dabei kommt dem Bezugssystem aufgrund der Notwendigkeit der eindeutigen Zuordenbarkeit besondere Bedeutung zu.

Das übergeordnete Ziel von INSPIRE ist es sicherzustellen, dass alle möglichen Geodaten problemlos international ausgetauscht werden können. Diese Vorgaben sind sehr umfangreich und für die Details wird folglich auf das entsprechende Dokument verwiesen.

Hierzu legen die INSPIRE-Richtlinien folgende fünf grundlegenden Ziele fest:

- Alle Daten müssen nur einmal aufgenommen und dort gespeichert werden, wo sie am effizientesten gepflegt werden können.
- Geodaten aus verschiedenen Quellen in ganz Europa müssen übergangslos kombinierbar und vielen Nutzern und Applikationen verfügbar sein.
- Informationen, welche auf einer Ebene/Massstab aufgenommen werden, müssen auf allen anderen Ebenen/Massstäben verfügbar sein; detailliert für gründliche Untersuchungen und generell für strategische Überlegungen.
- Geodaten, die für die reibungslose Regierungs-/Verwaltungsführung auf irgendeiner Ebene benötigt werden, sollen leicht und transparent zur Verfügung stehen.
- Es soll einfach ermittelt werden können, welche Geodaten verfügbar sind, wie man sie für einen bestimmten Zweck nutzen kann und unter welchen Bedingungen man sie beziehen und benutzen kann.

Um das zu erreichen, definiert INSPIRE Standards für insgesamt 34 verschiedene Gebiete in denen Geodaten in vorgegebenen Datenmodellen zu überführen sind. Im Rahmen von NTech ist u.a. das Gebiet Transportnetzwerke relevant. Dieser Bereich enthält Informationen von allen politischen Ebenen, die den öffentlichen und privaten Sektor in vielfältiger Weise unterstützen (INSPIRE Thematic Working Group Transport Networks 2017).

Referenzierung

Generell werden die Geodaten von swisstopo im planaren Raumbezug lokal für die Schweiz im aktuell gültigen erneuerten schweizerischen Bezugssystem der Landesvermessung 1995 (LV95 bzw. CH1903+) zur Verfügung gestellt. Im Rahmen des Landschaftsmodells swissTLM3D sind gerade auch die Höhenangaben interessant. Hierfür gilt das aktuell gültige alte schweizerische Höhenbezugssystem Landesnivellement 1902 (LN02).

Für eine Nutzung im Rahmen der Informationsanreicherung von Daten der Strasseninfrastruktur erfolgt eine Referenzierung auf den linearen Raumbezug des Strassennetzes (räumliches Basis-Bezugssystem RBBS). Dies vereinfacht die Nutzung von Strasseninformationssystemen und vorhandenen Analyse-Werkzeugen für netzweite Betrachtungen und Auswertungen der referenzierten Daten mit linearem Raumbezug erheblich.

Bisher war die Referenzierung auf vorhandene Strassendatenbanken bei der Erarbeitung und Pflege von swisstopo-Produkten nicht berücksichtigt. Dies galt im Übrigen auch für das nationale Personenverkehrsmodell ([3], vgl. Kapitel 5.4.2). Für die Nutzung dieser Daten war somit eine Zuordnung zu Abschnitten im linearen Raumbezug des Strassennetzes notwendig. Mit dem neuen Produkt Verkehrsnetz CH ist diesem Defizit Rechnung getragen und wird übergreifend auf Mobilitätsdaten der Verkehrsträger Strasse und Weg, Schiene, Wasser und Seilbahnen ausgeweitet.

7.1.2 Schlussfolgerung

Die Schweizer Bundesverwaltung, zu der auch das ASTRA gehört, hat mit swisstopo eine funktionierende Plattform zur Veröffentlichung und Bezug von schweizerischen Geodaten geschaffen. Unter den gegebenen Randbedingungen werden nicht nur für Verwaltungen, sondern die gesamte schweizerische Bevölkerung erhebliche Mehrwerte durch die Bereitstellung von Daten in Form von standardisierten Datenstrukturen und -diensten geschaffen.

Für die Überwachung der Infrastruktur wird klassisch das Kartenmaterial für die zweidimensionale Abbildung der Infrastrukturobjekte auf einem Plan oder in einem GIS-Browser verwendet. Sind die räumliche Lage und die Umgebungsverhältnisse von Belang liefern die drei verschiedenen Modelle wichtige ergänzende Daten, z.B. Höhenlage und geologische Beschaffung der oberflächennahen Schichten. Die Nutzung im Zusammenhang mit 3D-Geometriemodellen der Infrastrukturobjekte stellt hierbei einen möglichen Anwendungsfall dar.

Die Nutzung von Satellitendaten wurde durch den Bundesratsbeschluss vom 1. Mai 2024 vorerst beschränkt. swisstopo hat durch eigenfinanzierte Entwicklung der Datenprozessierung eine erste Nutzung von Teilen des Copernicus-Programms ermöglicht. Inwieweit sich dies für eine mögliche Nutzung im Bereich der Überwachung der Infrastruktur umsetzen lässt, bleibt aktuell offen. Im Kapitel 7.4 und speziell im Anhang II.A wird das Copernicus-Programm im Detail vorgestellt und verschiedene bisherige Anwendungsfälle beschrieben (vgl. Anhang I.A.4) und eine erste Schlussfolgerung gezogen (vgl. Kapitel 7.4.2).

7.2 Individuelle Standort-Massendaten

Individuelle Standort-Massendaten werden bereits im Zusammenhang mit Reisezeitenanalysen im Verkehrsmanagement genutzt. Dies betrifft sowohl den operativen Verkehrsbetrieb als auch den strategischen Bereich, z.B. für die Kalibrierung von Verkehrsmodellen (vgl. [8]). In Kombination mit den verschiedenen Zählstellen der automatischen Verkehrszählung erzeugen diese Daten einen erheblichen Nutzen vor allem in Bezug auf die Genauigkeit der davon abhängigen Modelle zur Abbildung des Verkehrsablaufs oder Verkehrsprognose. Im Zusammenhang mit der Überwachung der Infrastruktur bildet der Verkehr grundsätzlich eine wichtige Grundlage, z.B. Abschätzungen zum relevanten Schwerverkehr. Dabei werden vorhandene Potentiale der Nutzung von Verkehrssimulationen gerade für eine Abschätzung der Auswirkungen von verschiedenen Szenarien im Rahmen von Prognosen für Fragestellungen des Erhaltungsmanagements oft noch nicht umfangreich genutzt (vgl. [9]). Im Folgenden werden einige relevante Quellen von Standortdaten aufgezeigt.

7.2.1 Quellen von individueller Standort-Massendaten

Im Rahmen der NTech-Fragestellungen zu relevanten Technologien der Überwachung der Infrastruktur greifen die bereits bekannten durchschnittlichen Abschätzungen zum Verkehrsgeschehen und der Verkehrszusammensetzung zu kurz. Die Möglichkeit der Abschätzung des Realverkehrs am spezifischen Infrastrukturobjekt stellt einen erheblichen Mehrwert durch die Erhöhung der Genauigkeit der Belastungsabschätzung dar.

Dienstleistungsanbieter INRIX

INRIX ist ein weltweit agierender Anbieter von ITS-Dienstleistungen (Intelligente Transportsysteme). Dazu zählen z.B. Assistenzsysteme von Fahrzeugen, IST-Analysesoftware oder Verkehrsdaten zu Verkehrsströmen und Reisezeiten. Grundlage hierfür sind Standortdaten (GPS), welche anonymisiert seit 2006 von vernetzten Personenwagen, Nutzfahrzeugen und Mobilgeräten erfasst werden. Dadurch können neben unter Nutzung der Bewegungsprofile neben Reisezeiten auch Reiserouten ausgewertet werden. Die Daten werden bereits im Bereich der Verkehrsmodellierung und -simulation unter anderem zur Plausibilisierung stark genutzt (z.B. [8]).

Onlinedienst von Google

Google bietet weltweit unterschiedlichste IT-Services an. Einst als Suchmaschine gestartet, werden neben klassischen cloudbasierten Lösungen inkl. Speicherkapazitäten unter anderem auch Werkzeuge zum Trainieren und dem Einsatz von Neuronalen Netzwerken zur Verfügung gestellt. Ein klassischer und weltweit bekannter Dienst stellt der Routenplaner inkl. der Fahrzeitenangabe in Abhängigkeit des definierten Startzeitpunkts dar. Die Fahrtzeitangaben in Google Maps beruhen auf der Kombination aus mehreren Datenquellen. Die Methodik ist nicht offengelegt und dokumentiert, aber [10] liefert Anhaltspunkte über die verwendeten Datenquellen: Geschwindigkeitsbegrenzungen, strassentypspezifische

sche Annahmen zum Fahrverhalten, historische Messdaten, GPS-Messungen von Strassennutzern sowie Echtzeitdaten. Generell können die resultierenden Werte als sehr verlässlich angesehen werden, und die angegebenen Bandbreiten widerspiegeln die täglichen Schwankungen in den Verkehrsverhältnissen (vgl. [8]).

Mobilfunkanbieter Swisscom

Swisscom als bekannter Mobilfunkanbieter bietet neben seinen klassischen Leistungen im Bereich Telekommunikation auch Standort- bzw. Bewegungsdaten seiner Kunden, welche auf deren SIM-Karten basieren. Diese Daten werden nach den geltenden Datenschutzregeln anonymisiert und dann weiter prozessiert. Dadurch ist es möglich auf das Bewegungsverhalten von Menschen zu schliessen. Durch die Mobilfunknutzung kann neben dem mIV-Verkehrsaufkommen vor allem der Langsamverkehr gut abgebildet werden und für Fragestellungen des Langsamverkehrs sehr hilfreich. Infolge der Anonymisierung ist eine Zuordnung zu einer Fahrzeugkategorie nur grob und durch Verknüpfung mit Zählstellendaten möglich.

7.2.2 Schlussfolgerung

Grundsätzlich lassen Standort-Massendaten bzw. Bewegungsdaten auf das reale Verkehrsgeschehen und daraus abgeleitete relevante Verkehrskennzahlen direkt schliessen. Aus diesem Grund werden diese Daten im Bereich der Verkehrstelematik und des Verkehrsmanagements bereits umfangreich genutzt. Da es sich um Datenprodukte von privaten Anbietern handelt, stehen keine Metadaten zur Verfügung. Die abgeleiteten Verkehrsdaten werden in den Standardformaten für definierte Strassenabschnitte geliefert.

Im Kontext der Überwachung der Strasseninfrastruktur greifen allein die Standortdaten zu kurz. Aus Gründen des berechtigten Datenschutzes bezüglich der SIM-Karten-Benutzer fehlt die Information der relevanten Belastungsgrössen. Wenn Fahrzeuge ihren Standort kontinuierlich mitteilen, ist von Interesse inwieweit z.B. auf die Achslast geschlossen werden kann.

7.3 Daten der Fahrzeugindustrie

Heutige Fahrzeuge sind ausgestattet mit einer Reihe von unterschiedlichen Sensoren und IT-Systemen, welche kontinuierlich Daten direkt oder über Datenprozessierung im Fahrzeug erzeugen und über Mobilfunk an einen herstellereigenen Server senden. Welche Daten genau ein Fahrzeug an den Hersteller sendet, wird nicht offen kommuniziert. Grundsätzlich ist aufgrund dieser Zurückhaltung anzunehmen, dass diese Daten für die Fahrzeugindustrie ein grosses Potential für verschiedene neue Geschäftsmodelle aufzeigt (vgl. [11] und [12]).

Fahrzeughersteller

Die Hersteller haben zum Teil eigene Produkte, welche sie als Flottendaten, z.B. für Transportunternehmen, der eigenen Flotte, zur Verfügung stellen. Zum Teil gehen die Hersteller auch Kooperationen ein, um zusätzliche Produkte der Datenauswertung und -analyse für verschiedene Endnutzer anbieten zu können (vgl. Kapitel 8.4.3).

Reifenhersteller

Zusätzlich zu den Fahrzeugherstellern haben auch die Reifenhersteller Sensoren in den Reifen der Fahrzeuge verbaut, deren Daten für Auswertungen kontinuierlich gesendet und als Datenprodukt inkl. Analysesoftware für Kunden zur Verfügung steht. Dabei wird vorgegeben, dass die vorhandenen Achslasten und damit die existierenden Belastungen auf das Infrastrukturobjekt ausgegeben werden können (vgl. Kapitel 9.3).

7.3.1 Schlussfolgerungen

Obwohl der gesamte Umfang von Daten, welches ein Fahrzeug an die Hersteller kontinuierlich sendet, nicht bekannt ist, kann erwartet werden, dass diese Daten nicht nur für die

Funktionsweise der einzelnen Fahrzeuge, sondern in Form von kontinuierlichen Flottendaten auch auf relevante Informationen der Infrastruktur schliessen lassen. Hinweise darauf sind bereits in den Teilberichten gegeben worden. Wie diese Daten im Rahmen der Überwachung nutzbringend Verwendung finden, können muss noch erforscht oder im Rahmen von Piloten erprobt werden (vgl. auch Kapitel 8 und 9). Gerade Informationen zur Belastung der Infrastrukturprojekte aus dem Schwerverkehr stehen hierbei im Fokus. Wie diese Daten vergleichbar mit der realen Belastung und über den gesamten Schwerverkehr erhoben und ausgewertet werden können gilt es zu überprüfen.

7.4 Daten des Copernicus Satellitenprogramms

Das folgende Kapitel gibt einen Überblick über die zur Verfügung stehenden Satellitendaten der Erdbeobachtung des Copernicus-Programms. Anschliessend wird eine Schlussfolgerung gezogen, inwieweit die Daten für die Überwachung von Nutzen sein können. Im Anhang (vgl. Anhang I) werden die verschiedenen Missionen im Detail erläutert, die Metadaten aufgezeigt, welche für Abfragen verfügbar sind und wie die gewonnenen Daten für die Überwachung der Nationalstrasseninfrastruktur genutzt werden können.

7.4.1 Copernicus-Programm

Copernicus ist ein Weltraumprogramm der Europäischen Union mit Schwerpunkt Erdbeobachtung, das von der Europäischen Kommission gemeinsam mit der Europäischen Weltraumorganisation (ESA) und der Europäischen Organisation für die Nutzung meteorologischer Satelliten (EUMETSAT) verwaltet und durchgeführt wird. Ziel von Copernicus ist es, Organisationen und Behörden kontinuierliche, zuverlässige und chronologische Erdbeobachtungsdaten und -dienste zur Verfügung zu stellen, die leicht zugänglich und kostenlos sind, um fundierte Entscheidungen in zahlreichen Bereichen zu unterstützen.

Die Daten werden mit Hilfe der 7 Sentinel-Missionen (deutsch: Wächter-Missionen), etwa 30 beitragenden Missionen und In-situ-Erdsensoren (d. h. bodengestützte, luftgestützte und seegestützte Messsensoren) gesammelt. Die Sentinel-Missionen werden speziell für das Copernicus-Programm entwickelt, während die beitragenden Missionen das Programm unterstützen. Sentinel-Missionen (vgl. Tab. 7.14) und beitragende Missionen (vgl. Tab. 7.15) lassen sich nach dem Hauptinstrument (d. h. den Sensoren) an Bord ihrer Satelliten in die folgenden 5 Kategorien einteilen:

- Radar mit synthetischer Öffnungsweite (Synthetic Aperture Radar -SAR), für Tag- und Nachtbeobachtungen über Land und Meer,
- Optische Sensoren für die Überwachung von Landaktivitäten und der Meeresdynamik,
- Altimetriesysteme für die Messung der Meeresoberfläche/des Meeresspiegels,
- Radiometer, zur Überwachung der Temperatur an Land und im Meer und
- Spektrometern zur Messung der Luftqualität.

Bei Sentinel-Missionen handelt es sich um Projekte mit spezifischen Zielen, welche sich auf die Entwicklung von einzusetzenden Satelliten und Instrumenten sowie auf die Datenerfassung und -speicherung, die Entwicklung von Algorithmen zur Vorverarbeitung der erfassten Rohdaten und zur Ableitung relevanter Informationen konzentrieren. Jede Sentinel-Mission konzentriert sich mehr, aber nicht ausschliesslich, auf bestimmte Aspekte der Erdbeobachtung. Während Sentinel-1 beispielsweise Tag- und Nacht-Radaraufnahmen für Land- und Ozeandienste liefert, überwacht Sentinel-4 wichtige Spurengase und Aerosole für die Luftqualität [13]. Einige der Missionen haben spezielle Konstellationen (d. h. eine Gruppe von Satelliten) oder einen einzelnen Satelliten, die das Hauptinstrument für die Datenerfassung tragen. Andere Missionen haben ihr Hauptinstrument an Bord von Satelliten, die nicht ausschliesslich für die Mission bestimmt sind (z. B. Sentinel-4 und -5, vgl. Tab. 7.14). Darüber hinaus sind weitere Satelliten bzw. deren Starts geplant, deren Instrumenten- bzw. Funktionsumfang die Fähigkeiten der Mission erweitern und als Ersatz für die derzeitigen Satelliten am Ende ihrer Lebensdauer dienen sollen (vgl. Abb. 7.18). Ausführliche Informationen zu den einzelnen Sentinel-Missionen sind auf Sentinel Online (<https://sentinels.copernicus.eu/>) oder SentiWiki (<https://sentiwiki.copernicus.eu/>) zu finden.

Bei den beitragenden Missionen handelt es sich um eine Reihe von Erdbeobachtungsmissionen, die von nationalen, europäischen und internationalen Organisationen betrieben werden und Daten liefern, die den Zielen des Copernicus-Programms entsprechen. Einige der beitragenden Missionen sind in Tab. 7.15 aufgelistet und nach der Kategorie des Hauptinstrumentes der Mission gekennzeichnet.

Tab. 7.14 Sentinel-Missionen und ihre jeweiligen Satelliten und Instrumentenkategorien

Missionen	Satelliten	Start Jahr	Hauptinstrument Kategorie
mit speziellen Satelliten	Sentinel-1	Sentinel-1A	04/2014
		Sentinel-1B ¹	04/2016
		Sentinel-1C	Q1/2024 ²
	Sentinel-2	Sentinel-2A	06/2015
		Sentinel-2B	03/2017
	Sentinel-3	Sentinel-3A	02/2016
		Sentinel-3B	04/2018
		Sentinel-3B	04/2018
	Sentinel-5P ³	Sentinel-5P	10/2017
ohne eigene Satelliten	Sentinel-6	Sentinel-6 MF ⁴	11/2020
		Sentinel-6B	Q4/2026 ²
	Sentinel-4	MTG ⁵ -S1	Q2/2025 ²
	Sentinel-5	MetOp-SG ⁶ A1	Q1/2025 ²
		MetOp-SG B1	Q4/2025 ²

¹Der Satellit Sentinel-1B ist seit August 2022 nicht mehr in Betrieb.

²geplant im genannten Quartal

³Sentinel-5 Precursor (deutsch: Wächter-5-Vorläufer)

⁴Sentinel-6 Michael Freilich oder auch Sentinel-6A

⁵Geostationäre Wettersatelliten der dritten Generation: Meteosat Third Generation (MTG)

⁶Meteorologischer Einsatzsatellit Zweite Generation: Meteorological Operational satellite Second Generation (MetOp-SG)

Eine ausführlichere Übersicht über die beitragenden Missionen findet sich in Anhang II.B. Die mit SAR-Instrumenten ausgerüsteten Missionen und ihre jeweiligen Satelliten sind im Einzelnen in Anhang I.C aufgeführt. Was die kommerzielle Nutzung der beitragenden Missionen betrifft, so sind ihre Kosten in Anhang I.D aufgeführt. Die Sentinel-1-Mission und zwei weitere Missionen (COSMO-SkyMed und TerraSAR-X) werden im Anhang II.A näher erläutert, da sie für die Überwachung ziviler Infrastrukturen von Bedeutung sind.



Abb. 7.18 Frühere und künftige Copernicus-Satelliten und ihr Startplan [14]

Tab. 7.15 Einige der am Copernicus-Programm beteiligten Missionen

Beitragende Missionen	Satelliten	Hauptinstrument
Deutsche TerraSAR-X	TerraSAR-X TanDEM-X	SAR
Italienisch COSMO-SkyMed	CSK-1 CSK-2 CSK-3 CSK-4	SAR
Europäisches ERS	ERS-1 ERS-2	SAR
Kanadisches RADARSAT	Radarsat-1 Radarsat-2 RCM-1 RCM-2 RCM-3	SAR
Koreanisch KOMPSAT-5	KOMPSAT-5	SAR
Französisch Pléiades	Pléiades-1A Pléiades-1B	Optisch
DMC - Konstellation zur Katastrophenüberwachung	ALSAT-1 Beijing-1 BILSAT-1 NigeriaSat-1 UK-DMC-1	Radiometer
Französisch-amerikanische OSTM/Jason-2	Jason-2	Höhenmesser

Zugänglichkeit der Daten

Die von den Sentinel- und anderen Missionen erfassten Daten werden von der ESA (European Space agency) und EUMETSAT verwaltet und über zahlreiche Plattformen verbreitet, wo sie zum Herunterladen zur Verfügung stehen. Als solche sind dies die folgenden:

- ESA (European Space Agency; Deutsch: Europäische Weltraumorganisation)
 - Copernicus data space ecosystem:
Das Ökosystem des Copernicus-Datenraums bietet über die Copernicus-Browser-Plattform Zugang zu Rohdaten und verarbeiteten Daten der Sentinel-1-, -2-, -3- und -5P-Missionen.
 - Copernicus contributing missions (CCM):
Der Zugang zu den Daten der beitragenden Missionen wird über eine Plattform namens PANDA (Planetary Data Access) ermöglicht.
- EUMETSAT (European Organisation for the Exploitation of Meteorological Satellites; deutsch: Europäische Organisation für die Nutzung meteorologischer Satelliten)
 - EUMETSAT-Datenzentrum:
Es bietet Zugang zu Langzeitarchiven, die für die Sentinel-4- und -5-Missionen relevant sind, und ermöglicht den Zugriff auf die für die Sentinel-6-Mission erfassten Daten nahezu in Echtzeit.

Darüber hinaus sind Daten und Verarbeitungstools auch über fünf zentralisierte Cloud-basierte Plattformen verfügbar, die als Data and Information Access Services (DIAS) bekannt sind:

- CREODIAS - <https://creodias.eu/>
- SOBLOO – <https://sobloo.eu/>
- MUNDI - <https://mundiwebseervices.com/>
- ONDA - <https://www.onda-dias.eu/cms/>
- WEKEO - <https://www.wekeo.eu/>

Dienstleistungen

Das Copernicus-Programm bietet auch Copernicus-Dienste an, welche die riesige Menge an Daten, die im Rahmen der zahlreichen Missionen gesammelt wird, in Informationen umwandeln. Diese Mehrwertdienste sind in sechs verschiedene Gruppen unterteilt:

- **Atmosphere Monitoring Service (CAMS) / Atmosphärenüberwachungs-Datendienst**
Erfassung von Luftqualität und Zusammensetzung der Atmosphäre, Ozonschicht und ultraviolette Strahlung, Emissions- und Oberflächenströmungen, Sonneneinstrahlung und Klimaerwärmung
- **Marine Environment Monitoring Service (CEMS) / Datendienst zur Überwachung der Meeresumwelt**
Verringerung der Umweltverschmutzung, Schutz der Meere, Sicherheit und Routenplanung im Seeverkehr und nachhaltige Nutzung der Meeresressourcen
- **Land Monitoring Service (CLMS) / Landüberwachungs-Datendienst**
systematische Überwachung biophysikalischer Parameter, Bodenbedeckung, Landnutzungskartierung, thematische Hot-Spot-Kartierungen, Bild- und Referenzdaten sowie Bodenbewegungen
- **Climate Change Service (C3S) / Klimawandel-Datendienst**
Bewertung der Auswirkungen des Klimawandels, Risikomanagement für den Rohstoffhandel und nachhaltige Wasserbewirtschaftung
- **Emergency Management Service (CEMS) / Notfallmanagement-Datendienst**
Kartierung und Frühwarnung (z. B. Vorhersage von Überschwemmungen und Bränden)
- **Security Service (CSS) / Sicherheit-Datendienst**
Grenzüberwachung, Überwachung des Seeverkehrs und Unterstützung des auswärtigen Handelns der EU

Unter den verfügbaren Diensten sind die Copernicus Land Monitoring Services (CLMS) und die Copernicus Emergency Management Services (CEMS) diejenigen, die in ihrer derzeitigen Form einen Nutzen für das Infrastrukturmanagement bringen können. Im Folgenden werden die relevanten Informationen unter Berücksichtigung ihrer Bedeutung für das Infrastrukturmanagement erläutert.

Das CLMS befasst sich mit der Messung von Bodenverschiebungen und unterstützt eine Vielzahl von Anwendungen, wie die Überwachung von Infrastrukturverformungen (z.B. Brücken, Dämme, Eisenbahnen und Gebäude) sowie die Überwachung von Böschungen und Hängen. Der vom CLMS bereitgestellte European Ground Motion Service (EGMS - <https://egms.land.copernicus.eu/>) liefert Messungen mit Millimetergenauigkeit, die auf der multitemporalen interferometrischen Analyse der von Sentinel-1 gelieferten Radarbilder beruhen - darauf wird folgend noch näher eingegangen. EGMS liefert den zeitlichen Verlauf der Verschiebung zahlreicher Bodenpunkte, so dass man ihre Verschiebung im Laufe der Zeit verfolgen kann (vgl. Abb. 7.19 und Abb. 7.20).

Die Schweiz ist im EGMS nicht enthalten. Allerdings sind die erforderlichen Daten für den EGMS für die Schweiz frei verfügbar, so dass ein ähnlicher Dienst angeboten werden könnte. Abb. 7.19 und Abb. 7.20 wurden ausschliesslich für die Zwecke dieses Syntheseberichts direkt von der EGMS-Website entnommen. Mehrere andere spezifische Punkte, d. h. die grünen Punkte in beiden Abbildungen, können von jedermann kostenlos und ohne Vorregistrierung eingesehen werden. Der in Abb. 7.19 dargestellte Punkt am Bodensee-ufer erfuhr zwischen 2018 und 2022 eine negative Verschiebung von 80 mm. Abb. 7.20 zeigt eine Verschiebung von 12 mm auf der Vasco-da-Gama-Brücke im gleichen Zeitraum. Es ist zu beachten, dass negative Werte der Verschiebung Verschiebungen vom Satelliten weg (d. h. nach unten) und positive Werte Verschiebungen zum Satelliten hin (d. h. nach oben) bezeichnen.

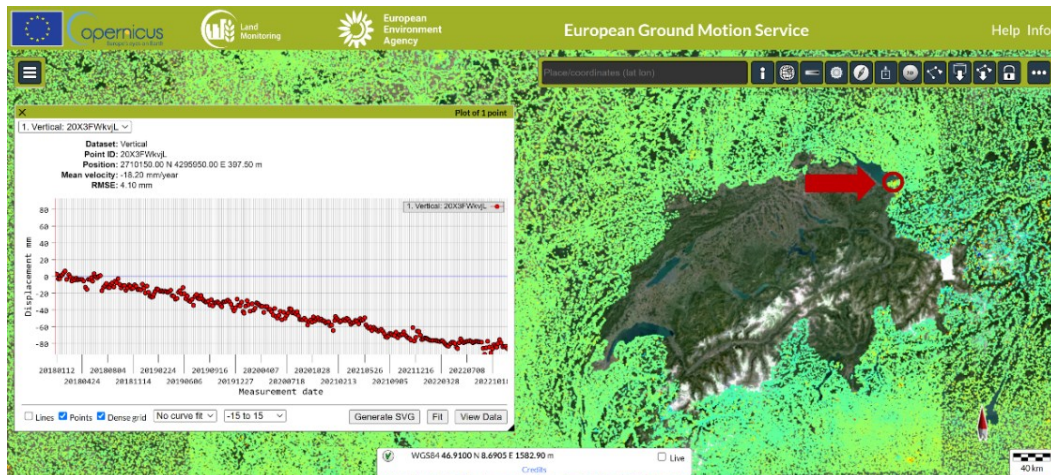


Abb. 7.19 Verschiebungsverlauf eines Punktes in der Grenzregion der Schweiz

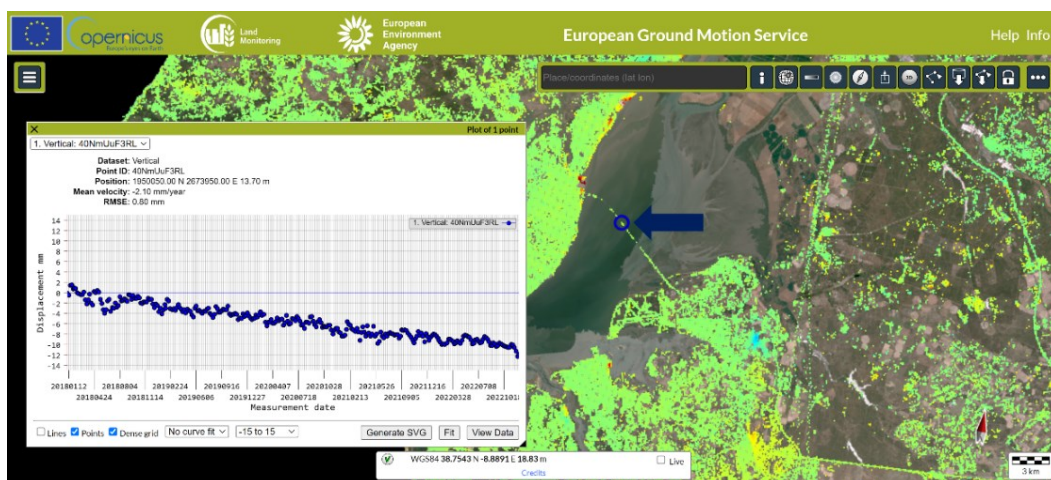


Abb. 7.20 Verschiebung eines Punktes über der Vasco-da-Gama-Brücke (in Lisbon)



Abb. 7.21 Saisonale Prognose des Wasserabflusses der Limmat nach Angaben des EFAS

Das European Flood Awareness System (EFAS - <https://www.efas.eu/>) und das Global Flood Awareness System (GloFAS - <https://www.globalfloods.eu/>) sind beides Frühwarn-

systeme, die das CEMS für europäische und weltweite Hochwasserereignisse zur Verfügung stellt. EFAS und GloFAS bieten Hochwasserüberwachung, Hochwasservorhersagen (vgl. Abb. 7.21), Hochwasserfolgenabschätzung und saisonale Hochwasserrisikoprognosen. Darüber hinaus umfasst die Frühwarnsystemkomponente des CEMS u. a. das Europäische Waldbrandinformationssystem (EFFIS - <https://effis.jrc.ec.europa.eu/>) und das Globale Waldbrandinformationssystem (GWIS - <https://gwis.jrc.ec.europa.eu/>). Abb. 7.21 zeigt beispielhaft den beobachteten Abfluss an der Limmat in den ersten Märzwochen sowie die 90th und 10th Jahresperzentile des Abflusses.

7.4.2 Schlussfolgerung

Das Copernicus-Programm bietet eine grosse Menge an Daten, die für Einzelpersonen, Institutionen und Regierungsbehörden frei zugänglich sind. Dennoch gibt es einige Einschränkungen, die nur durch die Erfüllung bestimmter Anforderungen überwunden werden können. Die im Rahmen des Programms durch die Sentinel-Missionen und die beteiligten Missionen gesammelten Daten werden über verschiedene Dienste (z. B. die Copernicus-Dienste) und cloudbasierte Plattformen verbreitet. In diesem Zusammenhang sollte klar gestellt werden, dass die Sentinel-Missionen freien Zugang zu allen erfassten Daten bieten, während die beitragenden Missionen punktuelle Daten zur Unterstützung des Programms bereitstellen. Letztere bieten keinen breiten und freien Zugang zu ihren Daten. Für gut begründete Forschungsvorhaben werden diese jedoch auf förmlichen Antrag hin zur Verfügung gestellt. Die Copernicus-Dienste konzentrieren sich je nach ihren Hauptzielen auf bestimmte Aspekte der Erdbeobachtung, von denen keiner speziell auf das Infrastrukturmanagement ausgerichtet ist. Informationen, die über Dienste wie die [Copernicus Land Monitoring Services](https://land.copernicus.eu/) (<https://land.copernicus.eu/>) und die [Copernicus Emergency Management Services](https://emergency.copernicus.eu/) (<https://emergency.copernicus.eu/>) bereitgestellt werden, sollten jedoch genutzt werden. Erstere bieten eine millimetergenaue Überwachung der Bodenbewegungen in fast ganz Europa, mit Ausnahme der Schweiz. Copernicus liefert Informationen zur Hochwasservorhersage und zur Überwachung von Waldbränden, die das Management von Waldbränden in ganz Europa, einschliesslich der Schweiz, unterstützen.

Wenn es um die Nutzung der Daten in ihrer Rohform geht, finden sich in der Literatur immer wieder Beispiele dafür, wie diese Daten in Informationen umgewandelt werden können, die für Infrastrukturbetreiber von besonderem Interesse sind, z.B. für die Fernüberwachung von Brücken, Erdbeben, Dämmen, Häfen, Gebäuden, Tunnelbauwerken, Strommasten und Verkehrsmanagement. Einige Unternehmen bieten solche Dienste bereits kostenpflichtig an; sie können jedoch auch selbst entwickelt werden. Darüber hinaus gibt es bereits Open-Source-Software zur Unterstützung massgeschneiderter Anwendungen; Anpassungen der Software zur Überwindung der derzeitigen Beschränkungen und zur Verbesserung der Zuverlässigkeit und Genauigkeit der Messungen sind jedoch keine Seltenheit. Die Entwicklung von Unternehmen in dieser Richtung, d. h. die Umwandlung von Daten in Informationen, ist auch eines der Ziele des Copernicus-Programms, für das einige Mittel zur Verfügung stehen. Für die Messung von Verschiebungen sind die erforderlichen Daten des Copernicus-Programms und anderer Erdbeobachtungsprogramme, die für InSAR geeignet sind, in Tab. 9.31 und Anhänge I.C. In der Spalte "Anwendung" sind diese mit "Interferometrie" gekennzeichnet. Darüber hinaus werden auch die erforderlichen Metadaten für ihre Identifizierung angegeben (vgl. Anhang I.A.2).

8 Schlussfolgerungen und Empfehlung

8.1 Grundsatz

Mit der vorliegenden Dokumentation als Synthesebericht und Rahmen für die Teilberichte Kunstbauten, Tunnel und Trasse wird ein zusammenfassender Überblick über alle Teilberichte gegeben und deren Handhabung aufgezeigt. Die Teilberichte selbst beschreiben, analysieren und bewerten sehr detailliert die etablierten Technologien für die Überwachung der Infrastruktur in Abhängigkeit der verschiedenen relevanten Gefährdungen. Ausserdem werden in den Teilberichten für jeden Teilbereich vielversprechende technologische Neansätze dargestellt und deren Potential für die Nutzung abgeschätzt.

Im Folgenden werden abschliessend die bisherigen Erkenntnisse für die einzelnen Teilbereiche zusammengefasst und daraus Schlussfolgerungen gezogen. Abgeleitet aus diesen Schlussfolgerungen werden für jeden der drei Teilbereiche Kunstbauten, Tunnel und Trasse sowie das Querschnittsthema Naturgefahren Empfehlungen für eine mögliche Nutzung im Rahmen der Überwachung gegeben.

Durch den unterschiedlichen Reifegrad der verschiedenen Technologien ergeben sich Empfehlungen für

- eine standardmässige Umsetzung
- Pilotprojekte
- vorhandenen Forschungsbedarf

Etablierte Technologien mit umfangreichen Erfahrungen in der Praxis können direkt in der Überwachung standardmässig ungesetzt werden. Für Technologien, bei welchen relevante Erfahrungen für den standardisierten Einsatz in der Praxis fehlen, werden Pilotprojekte aufgezeigt. Zusätzlich wird für aufstrebende Technologien mit Potential für die Überwachung der Infrastruktur eine Priorisierung des vorhandenen Forschungsbedarfs abgeschätzt, um die Entscheidungsfindung zur Lancierung verschiedener Projekte zu unterstützen.

8.2 Erkenntnisse

8.2.1 TP Kunstbauten

Im Zusammenhang mit der Überwachung von Kunstbauten ist es wichtig zu betonen, dass viele Sensortechnologien mehr als einer Fragestellung dienen können. Folglich gliedert der Teilbericht Kunstbauten die Beschreibung der Technologien nach der gemessenen physikalischen Grösse (z.B. Dehnung, Verschiebung, Beschleunigung, elektrische Eigenschaften, usw.). Darüber hinaus wird im Teilbericht Kunstbauten erörtert, ob die verfügbaren Sensorlösungen für den Einsatz in einem permanenten Umfeld zur Verfügung stehen, wie dies bei der kontinuierlichen Überwachung des Zustands von Bauwerken der Fall ist (SHM), oder ob sie in regelmässigen Abständen - oder bei Bedarf - im Rahmen einer periodischen Inspektion eingesetzt werden, wie dies bei zerstörungsfreien Prüfverfahren (ZfP) üblicherweise der Fall ist.

Kunstbauten sind aus mehreren Bauwerksteilen zusammengesetzt, von denen jedes einzelne Schäden oder lokale Pathologien aufweisen kann (z.B. beschädigte Verbindungen oder Lagerelemente, Ermüdung in kritischen Abschnitten), während es gleichzeitig möglich ist, dass bestimmte Schadensbilder die gesamte Struktur ganzheitlich beeinflussen (z.B. ausgedehnte Korrosion). Man muss sich also der Tatsache bewusst sein, dass ein geeignetes Überwachungsschema entsprechend dem jeweiligen Zweck ausgewählt werden muss und in der Regel Sensoren kombiniert, die auf die Bewertung mehrerer Schadensmechanismen abzielen. So sollte beispielsweise eine Brücke, die einer Erdbebengefährdung ausgesetzt ist, mit einem schwingungsbasierten System ausgestattet werden, um den Einfluss einer seismischen Kraft auf die Hauptelemente (einschliesslich Deck, Lager

und Pfeiler) zu erfassen. Vorgespannte Elemente, die Drahtbrüchen und Korrosionseinflüssen ausgesetzt sind, sollten mit eingebetteten Messsystemen (z.B. faseroptischen oder akustischen Sensoren) ausgestattet werden. Aufgrund des grossen Aufwands ist eine solche Ausstattung auf kritische Brücken (aufgrund von fortgeschrittenem Schaden, hoher Gefährdung oder grossen Konsequenzen bei Teilversagen) zu beschränken. Zusätzlich sollten sie mit zerstörungsfreien Bewertungsmethoden getestet werden, die in der Lage sind, Defekte zu identifizieren und eine objektivere Entscheidungsfindung bezüglich Reparatur oder Austausch zu ermöglichen. Gleichzeitig können Ferndaten, wie z.B. von Messfahrzeugen oder Satellitenbildern, Informationen liefern, die für die Beurteilung von Kunstbauten hilfreich sind. Der Zugang zu solchen Daten kann als ergänzende Informationsquelle zu Technologien dienen, die an Kunstbauten eingesetzt werden, oder - falls keine Überwachung stattfindet - können solche Daten Informationen liefern, die bei Bedarf die Bewertung und forensische Prozesse unterstützen.

Es ist ausserdem wichtig hinzuzufügen, dass die Tragwerksüberprüfung und -überwachung nicht zwingend mit Schäden und Versagen verbunden sind, sondern auch mit der Bewertung des Zustands, der Tragfähigkeit und der Gebrauchstauglichkeit eines Objekts unter bestehenden oder sich ändernden Anforderungen, wie in der schweizerischen Norm SIA 269 ([16], Ziffer 2.1) spezifiziert. Systeme wie das Bridge-WIM oder WIM werden verwendet, um die Einwirkungen zu quantifizieren und die notwendigen normativen Anforderungen festzulegen. Der Teilbericht Kunstbauten bietet anschauliche Beispiele für charakteristische Fälle der Bewertung im Bereich der Kunstbauten. Die Möglichkeit, verschiedene Erfassungssysteme zu verschmelzen und synchron zu nutzen, ermöglicht die Entwicklung wirtschaftlicher und zuverlässiger Überwachungskonzepte, die jedoch für jedes Überwachungsobjekt entsprechend dem Bewertungsziel individuell gestaltet werden müssen.

8.2.2 TP Tunnel

Beim Tunnel ist die Interaktion zwischen Bauwerk und Baugrund derart ausgeprägt wie bei keinem anderen Bauwerk. Mit dem Entwurf des Normalprofils wird den prognostizierten geologischen und hydrogeologischen Verhältnissen mit der Wahl der Profilform, dem Abdichtungskonzept sowie der Bauart Rechnung getragen. Die Robustheit eines Tunnelbauwerks ist von vielen Faktoren abhängig und die örtlichen Randbedingungen (Gefährdungsbilder, Bauwerkstyp, Geologie, Hydrogeologie, Boden-Bauwerks-Interaktion, etc.) müssen berücksichtigt werden. Die Robustheit des Bauwerks ist ein wesentlicher Faktor für die Art und Intensität einer allfälligen Überwachung des Tunnels. Grundsätzlich können für bergmännische Tunnel die folgenden Faktoren zu einer eher geringen Robustheit führen: Hufeisen- oder Maulprofil, unbewehrte Verkleidung, drainierendes Abdichtungskonzept. Neben der Tragsicherheit der Verkleidung sind für die Betriebssicherheit des Tunnels auch sekundäre Bauwerksteile, insbesondere Zwischendecke und Werkleitungskanal bzw. aufgeständerte Fahrbahn wichtig.

Die im Bericht Tunnel evaluierten Überwachungstechnologien sind pro Fragestellung resp. Gefährdung gegliedert und der heutige Einsatzbereich wird für die spezifischen Bauwerksteile im Tunnelquerschnitt angegeben. Weiterführend werden anhand stark vereinfachter Szenarios die objektsbezogenen Kosten und Nutzen der Technologien bewertet. Die Auswirkungen des Einsatzes einer Technologie in einem grösseren Überwachungsausmass (z.B. längere Strecke) und der mögliche Zusatznutzen für die Anwendung der Überwachungstechnologie für mehrere Fragestellungen werden aufgezeigt. Mit dieser Vorgehensweise können mehrere Technologien kombiniert und für verschiedene Fragestellungen ein wirtschaftliches Überwachungskonzept erstellt werden.

8.2.3 TP Trasse

Die Fahrbahnoberfläche stellt die Schnittstelle zwischen Fahrzeug und Strassenoberbau dar. Sie steht somit gegenüber den anderen Bauwerksteilen, wie bspw. die einzelnen Schichten des Fahrbahnaufbaus oder den Randbereichen wie Bankette einschliesslich den Entwässerungseinrichtungen im Vordergrund. Daraus ergibt sich auch die Notwendigkeit, vornehmlich oberflächenbezogene zerstörungsfreie Messverfahren einzusetzen. Anders als bei den TP Kunstbauten und Tunnel ist das TP Trasse in seiner Ausprägung räumlich nicht beschränkt. Die Entwicklung von Technologien zur Erfassung des Zustandes hat sich demnach in den vergangenen Jahrzehnten – im Wesentlichen aus wirtschaftlichen Gründen

- auf eine netzbezogene Erfassung mit schnellfahrenden Systemen konzentriert. Allerdings liegen auch Problemstellungen vor, die den Einsatz punktuell messender Technologien erfordern. Insofern kommt der Differenzierung zwischen einer punktbezogenen und linien- bzw. flächenbezogenen Messung in grösserem Ausmass eine besondere Bedeutung bei der Auswahl der geeigneten Technologie zu. Hierbei ist auch zu berücksichtigen, dass manche Technologien sich nicht für eine punktbezogene bzw. linien- oder flächenbezogene Erfassung des Zustandes eignen.

Zusammenfassend kann zunächst festgehalten werden, dass für die analysierten und den Bereich Trasse relevanten Parameter Sicherheit, Befahrbarkeit, Substanz und Umwelt viele standardisierte Prüfverfahren mit definierten Anforderungen zur Verfügung stehen. Anhand derer kann fundiert die Gefährdung und die daraus folgende Kritikalität für die Überwachung abgeleitet werden. Diese Technologien sind allerdings häufig einfache Messverfahren (bspw. 4m-Latte, Planograf oder Goniograf) die zwar noch dem Stand der Technik entsprechen, generell aber aufgrund eingeschränkter Anwendung im Zeitalter der Digitalisierung nur noch vereinzelt zur Anwendung kommen sollten. Insofern hat die Analyse der Technologien aufgezeigt, dass moderne Messverfahren (bspw. Laserscanning) Anwendung finden, ohne dass konkrete Anforderungen der Genauigkeit und Zuverlässigkeit an Zielgrössen oder prüfungsrelevante Kennwerte definiert sind.

Wie bereits ausgeführt, finden hinsichtlich der Einschätzung der Gefährdung und der daraus abgeleiteten Kritikalität die Parameter Sicherheit und Befahrbarkeit vordringlich Beachtung. Im Wesentlichen sind dies die Zustandsgrössen Griffigkeit und die Ebenheit. In diesem Zusammenhang ist eine hinreichende Entwässerung der Trasse über die gesamte Breite sicherzustellen.

8.3 Standardmässige Umsetzung

8.3.1 Grundsatz für eine Standardisierung von Methoden

Bevor eine Überwachung in Bezug auf einer Gefährdung der Infrastruktur in Betracht gezogen wird, müssen verschiedene Grundlagen und Grundkenntnisse vorhanden sein:

- Die Gefährdung bzw. die Naturgefahr muss in seiner Wahrscheinlichkeit wie auch dem möglichen Ereignisausmass und möglichen Schadenbildern bekannt sein.
- Das Risiko ausgelöst durch diese Gefährdung bzw. Naturgefahr muss bekannt sein und in Relation zu den Schutzziele gesetzt werden.
- Die Grunddisposition, die variable Disposition, das auslösende Moment wie auch mögliche Ereignisabläufe (schnell oder langsam ablaufend) eines Versagens- oder eines Naturgefahrenereignis müssen bekannt sein.

Daraus ergeben sich verschiedene Anwendungsmöglichkeiten für die Überwachung von Naturgefahren (nach Sättele et al. [15]). Abgeleitet daraus können diese auch für andere Gefährdungen als allgemein gültig betrachtet werden:

- Gefährdungs- bzw. Naturgefahrenprozess verstehen: Technologie dient in erster Linie zur Erkennung möglicher Gefahrenstellen und zur besseren Quantifizierung von Ereigniswahrscheinlichkeit und Ereignisausmass.
- Gefährdungs- bzw. Naturgefahrenprozess verfolgen: Technologie dient in der Regel, um die Entwicklung einer spezifischen Gefahrenstelle zu verfolgen. Typischerweise werden dafür periodische Einzelpunktmessungen dafür verwendet
- Früherkennung Warnsystem: Technologie unterstützt die Experten bei der Entscheidungsfindung, um geeignete Interventionsmassnahmen vor einem Ereignisfall einleiten zu können
- Alarmsystem: Technologie detektiert gefährliche Naturereignisse, um bei Überschreiten von vordefinierten Schwellenwerten automatisierte Interventionsmassnahmen auszulösen.
- Je nach Fragestellung und technologischen Möglichkeiten kommen auch Kombisysteme zum Einsatz.

Wenn der Anwendungszweck klar ist, können die Ansprüche an die Überwachung definiert werden:

- typische Bewegungsart und -geschwindigkeit
- Prozessparameter, geeignete Messgrösse
- benötigte Vorlaufzeit
- räumliche Auflösung
- Messart (punktuell oder flächenhaft)
- Genauigkeitslevel (mm - dm)
- Messdimension (1D - 2D - 3D)
- zeitliche Auflösung und Betriebsart (permanente oder periodische Messung -> Messintervall)

Mit all diesen Überlegungen kann die für die Fragestellung geeignete Technologie festgelegt werden.

In einer standardmässigen Umsetzung von Frühwarnsystemen müssen folgende Elemente bedacht werden (nach Sättele et al. [15]):

- Datenerfassung (Sensor vor Ort, Stromversorgung, äussere Einflüsse, lokale Kommunikation)
- Dateninterpretation (Datenauswertung, Datenübertragung, Datenverwaltung, Visualisierung, Stromversorgung)
- Datenausgabe (automatische Intervention, organisierte Intervention, vorbehaltene Entscheidung)
- Kontrollsysteme
- Betriebskonzept

8.3.2 TP Kunstbauten

Der Teilbericht Kunstbauten (siehe Kapitel 7) bietet einen detaillierten Überblick über die Sensortechnologien, die für die Anwendung im Rahmen der Überwachung von Bauwerken als ausgereift gelten. Wie bereits erwähnt, werden diese Technologien im Hinblick auf ihre Zuverlässigkeit und Anwendbarkeit bei der Messung einer gewünschten physikalischen Grösse bewertet (z.B. Verschiebung, elektrisches Potential), welche als direkter oder indirekter Indikator für verschiedene Zustandsveränderungen – und deren Einfluss auf die Tragsicherheit oder Gebrauchstauglichkeit - dienen kann.

Das Potenzial zur Standardisierung und zum grossflächigen Einsatz einer Überwachungstechnologie wird bestimmt von i) ihrer Zuverlässigkeit bei der Bewertung einer potenziellen Gefährdung, ii) der einfachen und erprobten Anwendung und iii) den direkten (z.B. Sensorik, Installation und Datenauswertung) und indirekten (z.B. Strassensperrung, Sensorwartung und Datenspeicherung) Kosten der Lösung. Im Folgenden wird das Potenzial für eine solche Standardisierung unter dem Gesichtspunkt verschiedener Gefährdungen oder messbaren Grössen beschrieben.

Überwachung der Umgebungseinwirkungen und Lasten

In Regionen mit Erdbebengefährdung ist ein grundlegendes System zur permanenten Schwingungsüberwachung (z.B. mittels Beschleunigungssensoren) standardmässig erforderlich, um sowohl die einwirkenden Lasten (Bodenanregung) als auch das Tragwerksverhalten und den Verformungsbedarf an Schlüsselstellen (Pfeiler, Lager, Fahrbahndecke) zu überwachen und eine schnelle Zustandserfassung nach aussergewöhnlichen Einwirkungen zu ermöglichen.

In Regionen, in denen Überschwemmungen oder starke Winde auftreten, macht der standardmässige Einsatz von Wetterstationen Sinn, um präzise Informationen über Wind und Niederschlag zu ermöglichen. In stark korrosiven Umgebungen, z.B. in der Nähe von Gewässern, sollten standardmässig Messungen der Luftfeuchtigkeit und der Temperatur durchgeführt und mit anderen Mitteln zur (entweder kontinuierlichen oder regelmässigen)

Überwachung des baulichen Zustands kombiniert werden. Auch kritische Bauwerksteile, wie z.B. Lager, würden von Lastmessungen profitieren, wie sie mit Kraftmessdosen bereits möglich sind. Obwohl noch nicht in grossem Umfang genutzt, wäre der standardmässige Einsatz von Kraftmessdosen bei Auflager hilfreich, um Einblicke in deren Zustand sowohl bei extremen Ereignissen als auch auf lange Sicht zu erhalten. Bei Neubau oder beim Ersatz von Auflagerapparaten, könnte der Einbau von Kraftmessdosen dementsprechend grundsätzlich vorgeschlagen werden.

Eine wichtige Anforderung besteht in der zuverlässigen Verfolgung der Verkehrsbelastung von Brücken, um die gegenwärtige, aber auch die zukünftige Sicherheit bei potenziell steigenden Verkehrsaufkommen und Achslasten (u.a. wegen Elektroantrieb) zu verstehen. Dies kann durch den Einsatz von WIM-Lösungen erreicht werden, die jedoch mit hohen Anschaffungs-, Installations- und Wartungskosten verbunden sind. Stattdessen können Brücken-WIM-Lösungen eine breitere Verwendung finden, die jedoch Pilotprojekte erfordern, um eine zuverlässigere Messung und ausreichende Präzision zu gewährleisten. Aus diesem Grund werden in Kapitel 8.4.1 Brücken-WIM-Lösungen als Pilotprojekte mit hoher Priorität empfohlen.

Überwachung von Verformungen

In dieser Klasse beziehen wir uns auf die Überwachung sowohl sich entwickelnder als auch dauerhafter Verformungen, die eng mit dem Fortschreiten von Schäden in Tragwerkselementen verbunden sind. Hier können Messverfahren, die zuverlässige absolute Verschiebungsmessungen gewährleisten, standardmässig eingesetzt werden und sind deshalb in Abschnitt B2 des Teilberichts über Kunstbauten beschrieben. Neben den üblicherweise angewandten geodätischen Verfahren sei an dieser Stelle auch auf das Potenzial von Fernerkundungsmethoden wie Satellitendaten hingewiesen (7.4), die jedoch mit grosser Ungenauigkeit behaftet sind und daher mit Vorsicht behandelt und durch weitere Pilotstudien geprüft werden sollten.

Rissmonitoring

Wenn ein besonderes Interesse an der Nachverfolgung der Entwicklung gerissener Oberflächen besteht, können herkömmliche Rissmonitore nützliche Einblicke liefern. Darüber hinaus stehen neuere Methoden zur Verfügung, die auf Computer Vision basieren und – potenziell in Kombination mit Drohnen – eine effiziente Risserkennung und präzise Kartierung ermöglichen.

Ein weiteres Verfahren, das in diesem Zusammenhang Potenzial zeigt, ist die Digitale Bildkorrelation (DIC). Dieses optische Messverfahren hat sich insbesondere unter Laborbedingungen bewährt, wo kontrollierte Licht- und Umweltverhältnisse eine hohe Genauigkeit und Detailauflösung gewährleisten. Der Einsatz von DIC im Feld ist jedoch mit grossen Herausforderungen verbunden, wie wechselnden Lichtverhältnissen, unregelmäßigen Oberflächenstrukturen und begrenztem Zugang zu stabilen Kameraaufbauten. Obwohl DIC aktuell hauptsächlich in kontrollierten Umgebungen eingesetzt wird, bietet es eine vielversprechende Grundlage für weiterführende Entwicklungen, um es auch für den Einsatz unter realen Bedingungen zu adaptieren. Dies bedarf aber noch weiteren Pilotstudien unter realen Bedingungen (siehe Tab. 8.19), bevor eine standardmässige Anwendung möglich ist.

Dauerüberwachung des baulastdynamischen Schwingungsverhaltens

Für die langfristige Überwachung maximaler Verformungen, Dehnungen und Beschleunigungen unter dynamischen Lasten, stehen zahlreiche zuverlässige, schwingungsbasierte Lösungen zur Verfügung. Eine der effizientesten und wirtschaftlichsten Optionen ist die Nutzung beschleunigungsbasierter Messmethoden, wie in Abschnitt B6 des Teilberichts zu Kunstbauten detailliert beschrieben. Diese Methoden bieten ein optimales Verhältnis zwischen Kosten und Messgenauigkeit und spielen eine entscheidende Rolle bei der Sicherstellung der Gebrauchstauglichkeit von Infrastrukturen. Bei ermüdungskritischen Brücken, wie Verbundbrücken, wird eine standardmässige datenbasierte Überwachung der Schadensakkumulation an kritischen Kerbdetails vorgeschlagen.

Die schwingungsbasierte Überwachung ist auch von grossem Wert für die indirekte Verfolgung struktureller Schäden. Diese Form der Schadensdetektion basiert auf der Analyse dynamischer Eigenschaften des Tragwerks und beruht auf dem Einsatz fortschrittlicher Verarbeitungsalgorithmen sowie statistischer Methoden. Ein zentraler Aspekt dieses Ansatzes ist der robuste Vergleich aktueller Messdaten mit einem festgelegten Referenzzustand.

Als Referenzzustand dient üblicherweise eine der folgenden Quellen:

- Baugleiche Konstruktionen: Messungen eines vergleichbaren Bauwerksteils können als Grundlage dienen. Diese bauwerksübergreifende Dauerüberwachung benötigt Pilotstudien um die Einflüsse unterschiedlicher Tragwerkeigenschaften zu quantifizieren.
- Frühere Messungen: Zeitlich frühere Datensätze desselben Bauwerks bieten eine wertvolle Grundlage für die Überwachung von Veränderungen, welche ein Anzeichen für Tragwerksschäden sind.
- Computergestützte Modelle: Simulationsmodelle des Bauwerks, die auf Grundlage der ursprünglichen Entwurfsparameter erstellt wurden, ermöglichen detaillierte Referenzanalysen.

Durch den Einsatz dieser Methoden wird eine präzise und kontinuierliche Überwachung gewährleistet, die sowohl sicherheitskritische Zustandsänderungen als auch langfristige Gebrauchstauglichkeit effektiv adressiert. Aufgrund der kosteneffizienten Schwingungsmesser ist die standardmässige Anwendung der baulastdynamischen Dauerüberwachung sinnvoll.

Bewertung der Dehnung/Ermüdung

Wenn die Dehnung eine wichtige Rolle spielt, wie z.B. bei der Untersuchung von vorgespannten Systemen oder Systemen, bei denen die Materialermüdung kritisch ist, können Dehnungsmessungen entweder lokal (z.B. Standard-Dehnungsmessstreifen) oder verteilt (z.B. eingebettete Glasfaser an den Spanngliedern) durchgeführt werden (Abschnitt B3 Teilbericht Kunstbauten). Auf kommerzieller Ebene werden heute fortschrittliche Lösungen angeboten, die die Präzision der gelieferten Messungen gewährleisten (z.B. SmART Strand und SOFO-Sensoren).

Zerstörungsfreie Untersuchungsmethoden

Zerstörungsfreie Prüfmethoden, wie sie in Kapitel C des Teilberichts Kunstbauten beschrieben sind, stellen ausgereifte Methoden dar, die je nach Aufgabe standardmässig eingesetzt werden können. Von den aufgelisteten Methoden ist Georadar als Standardmethode zu nennen, die bereits vor dem Beginn von Instandsetzungsprojekten eingesetzt wird, da sie eine Erkundung der zugrunde liegenden Bedingungen (z. B. Eindringen von Feuchtigkeit, Korrosionsprodukte, Bewehrungsgehalt) ermöglicht. Diese Methode kann zusammen mit Ultraschallverfahren für die Kartierung der Geometrie und der Zusammensetzung bestehender Tragwerkskomponenten verwendet werden, um mögliche Defekte im Inneren solcher Bauwerksteile aufzudecken. Beide Verfahren können bei der Bewertung von Korrosionsschäden angewandt werden, wobei es ausserdem ratsam ist, Verfahren zu nutzen, die sich auf Messungen des elektrischen Potenzials stützen (wie z.B. das Potentialfeldmessungen).

Es sollte betont werden, dass die Anwendung möglicher Überwachungsplanung entweder i) in Form einer *periodischen Inspektion / Überwachung* (meist in Verbindung mit ZfP; Abschnitt C Teilbericht Kunstbauten), ii) einer *kontinuierlichen Überwachung* (meist in Verbindung mit SHM-Methoden; Abschnitt B Teilbericht Kunstbauten) erfolgen kann, iii) während unter Umständen auch *Belastungstests* durchgeführt werden sollten, um Aspekte der Tragfähigkeit und der Gebrauchstauglichkeit von Kunstbauten zu untersuchen.

Der zielführende Einsatz von Messtechnologien verlangt oftmals eine präzise Bestimmung der Fragestellung (wie z.B. genauere Rückberechnung der Tragsicherheit, Überwachung der Dauerhaftigkeit, Früherkennung von Schäden, schnelle Reaktion auf ausserordentliche Einwirkungen) und eine Kombination mehrerer Messtechnologien [17]. Ausserdem sind die

Messtechnologien nur der erste Schritt: eine erfolgreiche Tragwerksüberwachung erfordert zwingend auch eine robuste und übersichtliche Datenverarbeitung und eine nachvollziehbare Interpretation der Daten, zum Beispiel durch einen Experten oder transparente und validierte Algorithmen.

Tab. 8.16 Priorisierung der Technologien für standardmässige Umsetzung

Technologie	Anwendungsfall	Priorität
Dehnmessstreifen	Stahl- und Verbundbrücken Versagenstyp: Ermüdung oder andere langsam fortschreitende Schäden, vorgespannte Brücken; Dauerüberwachung der Auslastung	++
Georadar	Stahlbetonbrücken, korrosionsgefährdet	++
Beschleunigungsaufnehmer	Alle Brückentypen; Dauerüberwachung von langsam fortschreitenden Schäden, Erdbebengefährdung und Gebrauchstauglichkeit	++
Kraftmessdosen	Alle Brückentypen, kraftbasierte Versagenstypen	+
Potenzialfeldmessungen	Stahlbetonbrücken, korrosionsgefährdet	+

8.3.3 TP Tunnel

Die betriebsrelevanten Bauwerksteile im Tunnel, insbesondere Verkleidung, Zwischendecke, Werkleitungskanal oder aufgeständerte Fahrbahn sowie die Bergwasserdrainage, sind für eine standardmässige Überwachung von grossem Interesse. Basierend auf der im Teilbericht Tunnel vorgenommenen Bewertung werden Technologien für die standardmässige Umsetzung empfohlen.

Für die Zwischendecke und Verkleidung stellen sich die Fragestellungen zu den vorhandenen Betonspannungen und Verformungen (siehe Abb. 8.22) in den Vordergrund.

Fragestellung		Technologie				Einsatz in Fachgebieten	Querschnitts- themen				Gliederung Bauwerk in generalisierte Bauwerksteile												
		Name	"ID"	ZIP / Zap / ZP (NDT/PT/TOT) (Zerstörungsfrei/Zerstörungsmässig/Zerstörungsfrei)	Lokalisation Messresultat (P, L, F) (Punktuell, Linear, Flächendeckend)		Tunnel	Geotechnik	Naturgefahren	Umwelt	← bauwerksbezogen	Bergmännische Tunnel				Tagbautunnel, Galerien inkl. Portalbereich				Drainage- leitungen und Strassenkörper			
												Verkleidung - Gewölbe	Verkleidung - Sohlgewölbe	Zwischendecke	Verkleidung - Gewölbe	Verkleidung - Sohlgewölbe	Zwischendecke	Baugruben, Einschnitt	Bergwasserdrainageleitungen	Fahrbahnbelag	Fundamentschicht		
Überwachung Verkleidung und Zwischendecke	Beton- spannungen	Kapazitive Drucksensoren	DSK_	ZIP	P	2	2	2	2	3	2	2	1	2	2	1	2	0	1	1			
		Piezoelektrische Drucksensoren	DSP_	ZIP	P	2	2	2	2	1	2	2	1	2	2	1	2	0	1	1			
		Dehnmessstreifen	DMS_	ZIP	P	2	2	2	1	2	3	3	3	3	3	3	0	0	0	0			
		Faseroptische Dehnungsmessungen	FOS_	ZIP	L	2	2	2	1	1	2	2	2	2	2	2	1	0	0	0			
		Faseroptische Drucksensoren	FOD_	ZIP	L	2	2	2	1	1	3	3	1	3	3	1	1	0	1	1			
		Druckkissen	DKS_	ZaP	P	2	2	2	0	0	2	2	2	0	1	1	0	1	0	1			
	Verformungen	Laserscanning	LSC_	ZIP	F	2	2	2	3	3	0	0	4	0	4	4	0	4	0	3	0		
		Geodätische Aufnahmen (Tachymeter)	TAC_	ZIP	P	2	2	2	3	1	4	0	4	4	0	4	4	0	2	0			
		Schlauchwaage	SWA_	ZIP	P	2	2	2	1	0	2	0	3	2	0	3	2	0	0	0			
		Faseroptische Dehnungsmessungen	FOS_	ZIP	L	2	2	2	1	1	2	3	3	2	3	3	1	0	0	0			
		Neigungsänderungen (Clinometer)	CLI_	ZIP	P	2	2	2	1	0	3	0	3	3	0	3	2	0	0	0			
		Distometer	DIS_	ZIP	P	2	2	2	1	0	4	0	3	4	0	3	1	0	0	0			
		Nivellement	NIV_	ZIP	P	2	2	2	3	3	1	0	0	3	0	0	3	3	0	4	1		
		Fugen- und Rissmessgeräte	FUG_	ZIP	P	2	2	2	3	0	3	0	3	3	0	3	2	0	1	0			

Abb. 8.22 Technologien für die Fragestellungen Betonspannung und Verformungen.

Die Überwachung der Betonspannungen sind sehr projektspezifisch und abhängig von den Einwirkungen und Gefährdungsbildern. Mögliche Technologien können diese Spannungen punktuell (z.B. Dehnmessstreifen) oder linienförmig (faseroptischen Sensoren) und mit grossem Aufwand überwachen. Entsprechend wird keine systematische Umsetzung

empfohlen. Bei druckhaften Gebirgsverhältnissen oder quelfähigem Baugrund sind relevante Betonspannungen in der Verkleidung zu erwarten. Eine Überwachung dieser Bauwerksteile in Abstimmung mit dem Tragwerkskonzept und allfällig vorhandenen Tragwerksreserven ist in der Regel für solche Tunnel sinnvoll und wichtig.

Die Überwachung von Verformungen können kombiniert für Verkleidung und Zwischendecke erfolgen. Dadurch kann eine allfällige Entwicklung von eintretenden Verformungen bemerkt und beobachtet werden, was für das Erhaltungsmanagement eine wichtige Grundlage bildet. Entsprechend wird empfohlen, die Verformungen an Zwischendecke und Verkleidung mittels Vermessungsaufnahmen standardmässig zu Erfassen. Dabei kann Laserscanning mittels Mobile Mapping eingesetzt werden, um die Verkleidung und Zwischendecke sowie Fahrbahn und Bankett direkt aus dem Fahrraum aufzunehmen. In Kombination mit Photogrammetrie / Bildaufnahmen kann direkt auch eine Schadenserkennung (z.B. Abplatzungen, Feuchtstellen, Risse, Belagsausbrüche, Schäden an Randelementen, etc.) erfolgen. Über wiederkehrende Messungen kann die Zustandsentwicklung erfasst und beurteilt werden. Dadurch entstehen wichtige Entscheidungsgrundlagen für das Erhaltungsmanagement. Die standardmässige Umsetzung von Laserscanning und Photogrammetrie für Strassentunnel bringt einen klaren Mehrwert. Diese standardmässige Überwachung bedingt entsprechende Strukturen im Datenmanagement.

Bei der Bergwasserdrainage stellt sich die Fragestellung der Funktionsfähigkeit. Dabei ist die Überwachung der Abflussmenge (Menge, Schwankungen), des Abflussquerschnittes (Verstopfungen, Versinterungen, etc.) und des Bergwasserchemismus von Relevanz. Die Abflussmenge kann mit Durchflussmessungen einfach an den Portalen und/oder weiteren Stellen im Tunnel überwacht werden. Dadurch können Veränderungen (z.B. Versiegen des Zuflusses oder plötzlicher Anstieg) erkannt und mit weiteren Daten (z.B. Niederschlag) in Verbindung gebracht werden. Ein Versiegen des Zuflusses kann immer auch ein Hinweis auf eine nicht mehr funktionstüchtige Drainageleitung sein, was im ungünstigen Fall zu einer Zusatzbelastung der Verkleidung führen kann. Die Überwachung des Querschnitts der Drainageleitung erfolgt aktuell am zielführendsten mit Kanal-TV Aufnahmen. Für den Bergwasserchemismus wird die Überwachung des Versinterungspotenzials mit der Messung des pH-Werts empfohlen (siehe Abb. 8.23). Die Messung der Abflussmenge in Drainageleitungen ist betrieblich und bei Verlust der Funktionstüchtigkeit der Drainagewirkung auch statisch relevant. Ergänzend kann evtl. eine allfällige Konditionierung des Bergwassers gegen Versinterungen reduziert werden, wenn der Bergwasserabfluss in den Leitungen versiegt. Aufgrund der beschränkten Zugänglichkeit mit der entsprechend aufwändigen Umsetzung der Überwachungsmassnahmen besteht hier jedoch noch weiteres Potenzial (siehe Kap. 9.2).

Fragestellung		Technologie				Fachgebiet →	Einatz in Fachgebieten	Querschnitts- themen		Gliederung Bauwerk in generalisierte Bauwerksteile											
		Name	"ID"	ZP / ZP / ZP (NOT/PT/DT) (Zerstörungsfreie Zustellungsraum/Ze-störungsfreie Prüfung)	Lokalisation Messresultat (P, L, F) (Punktual, Linear, Flächenbezogen)					Bergmännische Tunnel	Tagbautunnel, Galerien inkl. Portalbereich				Drainage- leitungen und Strassenkörper						
											Tunnel	Geotechnik	Naturgefahren	Umwelt	← bauwerk-bezogen	Verkleidung - Gewölbe	Verkleidung - Sohlgewölbe	Zwischendecke	Verkleidung - Gewölbe	Verkleidung - Sohlgewölbe	Zwischendecke
Bergwasser- drainage	Überwachung	Durchflussmessung	DFM	ZIP	P	2	2	2	0	0	0	0	0	0	0	2	2	0	0		
		Wassertemperatursensoren	WTP	ZIP	P	2	2	3	0	1	1	0	1	1	0	0	2	0	0		
		pH-Wert	PHW	ZIP	P	3	2	1	3	0	0	0	0	0	0	0	4	0	0		
		Versinterungspotenzial (Kohlensäure-Kalk)	VSP	ZIP	P	1	1	1	2	0	0	0	0	0	0	0	4	0	0		
		Leitfähigkeitssensoren	LFK	ZIP	P	2	2	3	2	0	0	0	0	0	0	0	2	0	0		
		Kanal-TV	KTV	ZIP	L	3	2	1	2	0	0	0	0	0	0	0	4	0	0		

Abb. 8.23 Technologien für die Fragestellung Überwachung Bergwasserdrainage.

Tab. 8.17 Priorisierung der Technologien für standardmässige Umsetzung

Technologie	Priorität
Laserscanning und Photogrammetrie/Bildaufnahmen	+++
Kanal-TV und Versinterungspotenzial (pH-Messungen)	++
Dehnungsmessstreifen und/oder faseroptische Dehnungsmessungen	+
Durchflussmessungen	+

8.3.4 TP Trasse

Hinsichtlich einer standardmässigen Umsetzung sollte beim TP Trasse für die Anwendung einer Technologie zunächst festgelegt werden, ob eine punktbezogene, linien- oder flächenbezogene zu erfassende Gefährdung vorliegt. Generell kann eine Gefährdung über einen längeren Streckenabschnitt mit stationär arbeitenden Messsystemen erfasst werden, allerdings stellt sich dies in aller Regel als nicht wirtschaftlich dar. Umgekehrt sind Messsysteme, konzipiert für eine netzweite linien- oder flächenbezogene Erfassung, nicht zwingend für eine punktbezogene Messung einsetzbar, ebenso nicht für kurze Abschnitte. Exemplarisch sei dies anhand des Parameters «Rauheit» ausgeführt: Liegt eine punktbezogene Gefährdung vor, bspw. mangelnde Griffigkeit in einem Kreuzungsbereich, so kann die Gefährdung mittels Pendelmessung einschliesslich Ausflussmesser erfasst und bewertet werden. Eine Messung mit dem GripTester oder der SKM bzw. des Stuttgarter Reibungsmessers ist hier nicht zielführend. Erstreckt sich die Gefährdung über einen längeren Bereich bis ca. 100 bis 200m, ist hier durchaus wiederum der Pendel einschliesslich Ausflussmesser (jedoch aufwändiger) oder der GripTester einsetzbar, die SKM bzw. der Stuttgarter Reibungsmesser eher nicht, sowohl aus technischer als auch wirtschaftlicher Sicht. Ähnlich wirkt die Erfassung der Längsebenheit die Frage auf, ob mit einer 4m-Latte, einem Planograf bzw. Goniograf oder einem schnellfahrenden System (z.B. HRM) die Gefährdung analysiert werden soll.

Im Weiteren sollten im Sinne einer standardmässigen Umsetzung neuerer, allerdings bereits dem Stand der Technik entsprechender, Technologien (bspw. Laser bzw. Laserscanning) Anforderungen an die Erfassungsgenauigkeit einhergehend mit deren Anwendungszweck festgelegt werden. Ansonsten besteht die Gefahr, dass die eingesetzte Technik nicht die für eine sichere Bewertung und Einschätzung der Gefährdung erforderliche Grundlage bildet. Anzumerken ist in diesem Zusammenhang, dass 2 unterschiedliche Laserscanner mit ähnlicher oder gleicher Spezifikation (z.B. Auflösung, Genauigkeit) aufgrund der Ausrichtung der Spiegel durchaus erheblich unterschiedliche Ergebnisse liefern können.

Exemplarisch sei dies am Beispiel der Längsebenheit erläutert: Über ein erfasstes Höhenlängsprofil können sämtliche Parameter nur in der Genauigkeit und Wiederholbarkeit berechnet werden, in welcher auch das Höhenlängsprofil erfasst wurde. So kann mit einem Beschleunigungsaufnehmer in Kombination mit einem Positionierungssystem durchaus ein sehr gutes Höhenlängsprofil erfasst werden. Einschränkungen entstehen dann, wenn bspw. die Erfassungsgeschwindigkeit aufgrund von Hindernissen oder sonstigen Rahmenbedingungen verändert werden muss.

Daraus abgeleitet sollte somit die Entwicklung eines Qualitätsstandards für die Beurteilung einer Gefährdung und der daraus abgeleiteten Zustandserfassung vorgesehen werden. Dieser Qualitätsstandard könnte beispielsweise für die Sicherheit, die Befahrbarkeit und Substanzmängel an der Oberfläche dem Zertifizierungsprozess der zeitbefristeten Betriebszulassung für Messsysteme in Deutschland ähneln bzw. entsprechen. Einhergehend wird die Entwicklung eines Eigenüberwachungsprozesses und einer Kontrollprüfung für die Zustandserfassung gesehen.

Eine weitere standardmässige Umsetzung betrifft die Datenhaltung. Dies auch im Hinblick auf die weitere Entwicklung und Nutzung von neuen Technologien. Es sollte im Bereich der Fahrbahnoberfläche damit begonnen werden, die referenzierten Rohdaten der Kampagnen der Zustandserfassung als Dateneigentümer zu übernehmen und geeignet strukturiert abzulegen. Konkret sind hier in erster Priorität die hochaufgelösten Orthofotos der

Fahrbahnoberfläche zu nennen. Ebenfalls gehört das erfasste Höhenlängsprofil der Fahrspuren dazu.

Tab. 8.18 Priorisierung der Technologien für standardmässige Umsetzung

Technologie	Priorität
Entwicklung eines Qualitätsstandards Zustandserfassung (Zertifizierung von Messsystemen)	+++
Referenzierte Rohdatenübernahme des erfassten Orthofotos	++
Referenzierte Rohdatenübernahme des erfassten Höhenlängsprofils	++

8.4 Pilotprojekte

Allgemein sollte Pilotprojekte darauf abzielen, nützliche Messtechnologien an realen Tragwerken, in operativen Umgebungsverhältnissen und unter realen Wetterbedingungen zu validieren. Aus den Pilotprojekten können die Erfahrungen und Resultate aus den Messungen aus technischer Sicht beurteilt werden und auch hinsichtlich dem Kosten-Nutzen Verhältnis im Vergleich zu erprobten Messtechnologien bewertet werden.

8.4.1 TP Kunstbauten

Generell ist die Veranschaulichung des Potentials und der Aussagekraft aller Messtechnologien, insbesondere bei SHM, immer noch nicht klar formuliert. Pilotstudien, welche die gesamte Wertbildungskette der Information abbilden, von der Messung, über die Bewertung der Daten und deren Speicherung, bis hin zur Entscheidungsfindung – mit oder ohne Rechenmodell – sind daher noch notwendig und sollten für weit verbreitete Messtechnologien, wie Dehnmessstreifen, Beschleunigungsaufnehmer und Kraftmessdosen, angestrebt werden.

Eine hohe Priorität gilt dabei für die folgenden Technologien:

- Brücken-WIM mit kosteneffizienten Sensoren (Dehnmessstreifen, eventuell in Kombination mit Beschleunigungsaufnehmern), kombiniert mit Kamerabildern oder anderen visuellen Technologien, um die Verkehrslasten und den Tragwerkszustand gleichzeitig und permanent zu überwachen. Während B-WIM bereits eingesetzt wird, sind weitere Pilotstudien nötig zur Validierung in der Praxis und zur Ermittlung der Präzision und der Trefferquote (Achslasten, laterale Position, Kategorisierung anhand der Swiss10 Skala), vor allem in Abhängigkeit der Parameter des Tragwerks (Spannweite, Anzahl Fahrbahnen, Brückentyp) und der Anzahl und Positionierung der Sensoren. Eine Pilotstudie in unmittelbarer Nähe zu bestehenden WIM-Installationen wäre für den Vergleich und die Validierung hilfreich. Auch eine operative Bestimmung der dynamischen Amplifikation sollte angestrebt werden und könnte mit Forschungsprojekten zu Onboard-Monitoring verbunden werden. Falls das Budget es zulässt, könnte es nützlich sein, auch den Mehrwert von Messungen mit Wägezellen an ausgewählten Positionen der Struktur, wie z.B. an Auflagern, zu bestimmen. Das Ziel von Bridge-WIM ist es jedoch, solche spezialisierten Messungen durch kostengünstigere Technologien, wie Dehnungssensoren oder Beschleunigungsaufnehmer, zu ersetzen.
- Zuverlässige Überwachungsmethoden, um Korrosion und Drahtbrüche bei Bauwerksteilen aus vorgespannten Stahlbeton zu bestimmen. Hierfür wäre ein Pilotprojekt mit einer Kombination aus mehreren Messtechnologien erstrebenswert, um ein Gesamtbild des Tragwerksverhaltens zu erhalten (AAR, Korrosion, Feuchtigkeit): Dehnmessstreifen, Temperatur- und Feuchtemessungen, Beschleunigungssensoren, verteilte faseroptische Sensoren und kamerabasierte Risserkennung könnten hierbei kombiniert und mit Hinsicht auf Kosten und Nutzen verglichen werden.
- Für Stützmauern, vor allem Winkelstützmauern, welche anfällig für Korrosionsschäden bei der schwer zugänglichen rückseitigen Biegebewehrung sind, ist eine Pilotierung von mobilen und robotergestützten Messmethoden erstrebenswert. Hierfür geeignet sind z.B. Georadar oder Potenzialfeldmessungen. Der kombinierte Einsatz mit Dauerüberwachung, z.B. mit Inklinationsmessern, würde dabei eine vielversprechende Symbiose bilden.

Die spezifische Bewertung aller aufstrebenden Messtechnologien, welche im Teilbericht Kunstbauten beschrieben werden, und für welche die Technologie reif für eine Pilotstudie sind, können der Tabelle 8.21 entnommen werden.

Tab. 8.19 Priorisierung der Technologien für Pilotprojekte

Technologie	Priorität
Brücken - Weigh In Motion (B-WIM)	+++
(interferometrische) Synthetische Apertur-Radar	++
Verteilte faseroptische Sensoren für Vorspannsysteme	++
Computer-Vision basierte Schadensdetektion	++
Korrosionsüberwachung Winkelstützmauern	++
Inklinometer für Winkelstützmauern	+
Bildgestützte Bewegungsverstärkung (Vision-based Motion Amplification)	+
Kamera-basierte Schadenserkenkung	+
Messungen von Oberflächenverschiebungen durch digitale Bildkorrelation	+

8.4.2 TP Tunnel

Die nachfolgende Tabelle zeigt die aufstrebenden Technologien gemäss dem Teilbericht Tunnel.

Tab. 8.20 Priorisierung der Technologien für Pilotprojekte

Technologie	Priorität
Mobile Mapping Systeme	Bereits im Einsatz
Verteilte akustische Erfassung (DAS)	+++
CV/KI basierte Schadensdetektion	+++
Kamerabildverarbeitungs-basierte Systeme / Daedalus	+

Empfehlungen für die Umsetzung von Pilotprojekten im Bereich der Überwachung von Tunnelbauwerken werden für Zwischendecke und Verformungen von Tagbautunnel aufgrund von Einwirkungen aus dem Baugrund angedacht.

Die Zwischendecke ist ein betriebsrelevantes Bauwerksteil im Tunnel. Bestehende Zwischendecken genügen oft nicht den heutigen Vorgaben und die Resttragfähigkeit ist aufgrund unterschiedlicher (dynamischer) Beanspruchungen schwierig zu bestimmen (Abb. 8.24). Verformungen der Zwischendecke können aus dem Fahrraum (siehe Kap. 9.2) überwacht werden. Weiterführend ist jedoch insbesondere die Überwachung des Zusammenspiels zwischen Verformung, Beanspruchung und Schwingungen von Interesse. Entsprechend wird ein Pilotprojekt für die Überwachung dieses Zusammenspiels empfohlen. Dabei soll ein Vergleich der Messungen aus konventionellen Technologien (Vermessungsaufnahmen, Dehnungsmessstreifen, etc.) zu faseroptischen Sensoren (DAS) geführt werden. Ergänzen können Schwingungsmessungen (Geophone und faseroptische Systeme) angewendet werden, um die Eigenfrequenz der Zwischendecken zu bestimmen. Durch ein solches Pilotprojekt soll die Grundlage für die zukünftig, standardmässige Überwachung von bestehenden und neuen Zwischendecken geschaffen werden. Eine Umsetzung sollte mittelfristig (3 bis 5 Jahre) möglich sein.



Abb. 8.24 Schadensfall an einer Zwischendecke [Quelle: Lombardi AG]

Die Verkleidung eines Tagbautunnels wird durch die umliegende Hinterfüllung belastet. Dabei erfolgt die Bemessung der Einwirkungen gemäss ASTRA Richtlinie 12014. Für Rückschlüsse hinsichtlich der Einwirkungen aus dem Baugrund und Verifizierung der Bemessungsgrundlage wird eine messtechnische Überwachung bestehender und neuer Tagbautunnel empfohlen. Verformungen der Verkleidung und des Baugrunds sowie die Entwicklung der Beanspruchung sollen mittels faseroptischer Sensoren in Kombination mit weiteren Technologien (Dehnungsmessstreifen, Laserscanning etc.) überwacht werden.

8.4.3 TP Trassee

Es wird empfohlen, die entwickelte Systematik zur Beurteilung der Gefährdung im Rahmen eines Forschungsprojektes ausgiebig zu testen, zu analysieren und ggf. zu optimieren. Hierbei spielen die o.g. Fragestellungen an die räumliche Ausprägung sowie die eigentliche Zielsetzung eine bedeutende Rolle. Hierbei ist insbesondere eine mögliche Spezifizierung der Anwendung zu untersuchen. Im Teilprojekt Trasse werden für die Durchführung von Pilotprojekten nachfolgend aufgeführte Fragestellungen empfohlen.

3D Oberflächenscan

Potential: Das Potential des 3D Oberflächenscan liegt in der Erfassung einer 3D Oberfläche, anhand derer neben dem Querprofil auch die Längsebene in mehreren Messlinien erfasst werden kann, des Weiteren auch Oberflächenschäden wie Risse und Flickstellen. Die üblichen Verfahren wie bspw. Planograf oder HRM messen jeweils nur in einer Messlinie – die je nach Aufgabenstellung, Kurvigkeit der Strecke etc. nicht die zielführende Messlinie sein muss. Weiterhin kann durch die Aufnahme einer 3D-Oberfläche das reale Fahrzeugverhalten im dreidimensionalen Raum besser abgebildet werden. Der Einsatz eines geeigneten 3D Oberflächenscan ermöglicht darüber hinaus pixelgenaue Schadenskodierung, die Anwendung von KI für die Schadensdetektion und die generelle Grundlage im Rahmen der Digitalisierung von Bauwerken (BIM). In diesem Zusammenhang ermöglicht der ergänzende Einsatz eines 360° Scanners die Erfassung der Umwelteigenschaften zur Gewinnung relevanter Informationen für die Bewertung und Planung.

Voraussetzung: Definition der Anforderung an die Genauigkeit und Auflösung des Oberflächenscanners

Nutzung von Massendaten zur laufenden Überwachung der Infrastruktur

Potential: Durch die Verwendung von fahrzeugspezifischen Massendaten wie «Unebenheiten» (erfasst durch Beschleunigungsaufnehmer) und «Rauheit» (erfasst über den Schlupf), die durch Pkw während der Fahrt aufgezeichnet und in einer Cloud zur Verfügung gestellt werden, lassen sich kontinuierlich wichtige Informationen zur Befahrbarkeit eines Streckenabschnittes generieren. Bei erkennbaren Veränderungen der aufgezeichneten Daten können dann spezifische Untersuchungen, wie sie im Rahmen des Teilberichts

Trassee vorgestellt wurden, gezielt eingesetzt und der Strassenzustand mit abgesicherten Methoden erfasst und bewertet werden.

Voraussetzung: Zugriff zu den Daten

Geometrieerfassung aus 3D Laserscan

Potential: Das Potential einer Geometrieerfassung mittels 3D Oberfläche liegt im Bereich der Digitalisierung des Strassenraums. Zum Einsatz sollten hier 360° Laserscanner, ggf. in Verbindung mit der Photogrammetrie zur Erzeugung von Tiefenbildern (grey scale pictures), kommen. Neben der Digitalisierung des Strassenraums können auch Durchfahrts-höhen, Höhen von Schutzeinrichtungen etc. hochgenau erfasst werden.

Voraussetzung: Definition der Anforderung an die Genauigkeit und Auflösung

Nutzung der Oberflächenbilder / KI-Analyse

Potential: Durch hochauflösende Oberflächenbilder lassen sich Schadensausprägungen und Schadensveränderungen sehr gut dokumentieren. Hochauflösende Oberflächenbilder sollten im Zuge einer netzweiten oder objektbezogenen Erfassung standardmässig aufgenommen werden. Anzumerken ist, dass eine KI-Auswertung keine eigene Technologie darstellt, sondern in Kombination mit einer Sensorerfassung zur Anwendung kommt. Die KI-Auswertung stellt damit eine Datenverarbeitungsmethode dar, welche die visuelle Erfassung der Oberflächenschäden unterstützt.

Die Oberflächenbilder dienen darüber hinaus als Grundlage der Entwicklung von Schadensdetektoren im Rahmen der Anwendung von KI. Mit Unterstützung der KI kann die zeitliche Veränderung der Schadensausprägung analysiert und für die Entwicklung von Prognosemodellen im Rahmen eines PMS Anwendung finden. Somit wird die Grundlage für eine zielgerichtete Auswertung für die Schadenswicklung geschaffen. Einfache und veraltete Modelle, wie bspw. die 1m²-Auswertung in Deutschland, sind somit keine geeignete und zukunftsorientierte Voraussetzung für die Zustandsanalyse.

Voraussetzung: Definition der Anforderung an die Genauigkeit und Auflösung der Sensorik

Nachfolgende werden mögliche Pilotprojekte im Bereich der Trasse wie folgt zusammengefasst:

Tab. 8.21 Priorisierung der Technologien für Pilotprojekte

Technologie	Priorität
3D Oberflächenscan	+++
Nutzung von Massendaten zur laufenden Überwachung der Infrastruktur	++
Geometrieerfassung aus 3D Laserscan	++
Nutzung der Oberflächenbilder / KI-Analyse	+

8.4.4 Querschnittsthema Naturgefahren

Bei den folgenden Technologien sehen wir ein grosses Potenzial, das im Rahmen von Pilotprojekten weiter vertieft werden könnte:

- Flächige Anwendung von satellitengestützten Radarinterferometriedaten (Satellitendaten) in Bezug auf Rutschungen und Hangbewegungen und deren Interaktion mit Infrastrukturbauwerken.
- Überwachung von Hanginstabilitäten mit landgestützten (Fahrzeuge) Radarinterferometrie. In ersten Pilotprojekten in der Schweiz wurde die Umsetzbarkeit grundsätzlich bewiesen, die spezifische Umsetzbarkeit und der spezifische Nutzen für das ASTRA sind in einer dafür ausgelegten Fragestellung zu klären.
- Überwachung von (bewaldeten) Hanginstabilitäten mittels drohnengestütztem flächigem Laserscanning.

- Bodenflächenverschiebungen aus digitalen Bildkorrelationen (Surface Displacements from Digital Image Correlation)
- Überwachung von Felsinstabilitäten mittels Bodenunruhe ("ambient vibrations")

Tab. 8.22 Priorisierung der Technologien für Pilotprojekte	
Technologie	Priorität
Flächige Anwendung von satellitengestützten Radarinterferometriedaten (Satellitendaten)	+++
Überwachung von Hanginstabilitäten mit landgestützten Radarinterferometrie	++
Bodenflächenverschiebungen aus digitalen Bildkorrelationen	++
Überwachung von Felsinstabilitäten mittels Bodenunruhe	+

9 Bestehender Forschungsbedarf

In diesem Abschnitt werden ausgewählte aufstrebende Technologien benannt und priorisiert, die ein vielversprechendes Potenzial aufweisen, jedoch noch mehr Forschung und Validierung in einem kontrollierten Versuchsumfeld (im Gegensatz zu einer Pilotstudie an realen Bauwerken) erfordern.

9.1 TP Kunstbauten

Eine erste derartige Technologie die hier aufgrund des bereits höheren Reifegrads bestehender Forschungsanstrengungen und einiger vorläufiger Hinweise auf eine Validierung [18] mit hoher Priorität eingestuft wird, ist das fahrzeugseitige (On-board) Monitoring für die Zustandserfassung des Tragwerks von Brückenportfolios. Der Einsatz mobiler Sensoren, die Daten beim Überfahren von Brücken erfassen, bietet wertvolle Einblicke in das globale Verhalten von Bauwerken. Dadurch wird es möglich, den Zustand zahlreicher Brücken zu bewerten, insbesondere solcher, bei denen eine permanente Instrumentierung aufgrund des Kosten-Nutzen-Verhältnisses nicht gerechtfertigt ist. In diesem Fall können auch Brücken, die weniger kritisch sind, regelmässig und kostengünstig anhand der durch Fahrzeugüberfahrten gesammelten Daten überprüft und überwacht werden.

In ähnlicher Weise hat der Einsatz von Laser-Doppler Vibrometrie, mit Sensoren, die von Drohnen getragen werden, vielversprechende Ergebnisse betreffend Brückenverschiebung geliefert. Garg et al. [19] zeigen anhand von Feldversuchen, dass ein solches System berührungslos und referenzfrei dynamische Verschiebungen auf Brückenstrukturen messen kann, wobei der durchschnittliche Spitzen- und Effektivwertfehler für die drei Experimente bei 10% bzw. 8% im Vergleich zu LVDT liegt. Allerdings sind noch Verfeinerungen erforderlich, um die Umgebungsbedingungen, die oszillierende Bewegung der Drohne und weitere Störungen in den Griff zu bekommen.

In derselben Kategorie, aber mit geringerer Priorität, schlagen wir die Untersuchung von Smart Aggregate (SA) auf Piezokeramikbasis vor [20]. Bemühungen in dieser Richtung wurden bereits in den frühen 2000er Jahren unternommen, aber neuere Untersuchungen zeigen, dass sie vielversprechend für die praktische Anwendung sind. Da die Bewertung mit solchen Mitteln jedoch nur indirekte Informationen zu Schäden in Betonstrukturen liefern, sind weitere Untersuchungen erforderlich, um die Reife dieses vorgeschlagenen Ansatzes und seine zuverlässige Anwendung in der Praxis zu beweisen.

Schliesslich erwähnen wir auch das Potenzial von Methoden, die zwar schon seit einiger Zeit existieren, aber erst in jüngster Zeit mehr Aufmerksamkeit in Bezug auf die NDE für Strukturen erhalten haben. Dazu gehören die Neutronenradiographie und die Myonentomographie. Jüngste Studien zeigen, dass die Ergebnisse der Myonenbildgebung im Vergleich zur Ultraschall- und Radarbildgebung von ähnlicher Qualität sein können, möglicherweise sogar besser [21]. Allerdings sind diese Methoden noch nicht ausgereift für eine breite Anwendung und erfordern möglicherweise eine spezielle und hochspezialisierte Ausrüstung mit begrenztem Zugang, weshalb ein nützlicher und tragbarer Einsatz in der Praxis weitere Forschung benötigt.

Tab. 9.23 Priorisierung der Technologien für Forschungsprojekte

Technologie	Priorität
Fahrzeugseitiges (On-Board) Monitoring für Brückenbewertung	++
Laser-Doppler-Vibrometrie (LDV)	+
Intelligente Betonaggregate	+
Neutronenradiographie	-
Myonentomographie	-

9.2 TP Tunnel

Im Bereich Tunnel besteht ein Forschungsbedarf im Bereich von autonomen Technologien für die Überwachung von beengten Querschnitten, wie z.B. über der Zwischendecke, im Lüftungsraum oder im Werkleitungskanal sowie aufgeständerten Fahrbahnen im Sohlbereich des Tunnelquerschnitts. Ergänzend besteht auch ein Bedürfnis in der autonomen Aufnahme von Bergwasserdrainageleitungen.

Beengte Querschnitte finden sich in den verschiedenen neuen und bestehenden Tunnelanlagen in der Regel über der Zwischendecke. Der Raum über der Zwischendecke ist in bestehenden Tunnel häufig in zwei Teile unterteilt. In die Zwischendecke integrierte Brandabluftklappen schränken den Querschnitt lokal weiter ein. Unter der Fahrbahn angeordnete Werkleitungskanäle oder aufgeständerte Fahrbahnen mit mehreren, kleinen Querschnitten sowie Einrichtungen für die Betriebs- und Sicherheitseinrichtungen können für die Überwachung und Inspektionsarbeiten ebenso anspruchsvoll sein.



Abb. 9.25 *Beengte Platzverhältnisse im Lüftungsraum über der Zwischendecke.*

Der Einsatz von autonomen Überwachungstechnologien im Fahrraum in einer Kombination von Photogrammetrie und Laserscanaufnahmen (Punktwolke) ist heute etabliert. Die Umgebungsbedingungen in beengten Querschnitten wie über der Zwischendecke stellen hinsichtlich Verschmutzung, Lichtverhältnissen, Hindernissen auf der Zwischendecke hohe Anforderungen an autonome Überwachungstechnologien.

Zusätzlicher Forschungsbereich ergibt sich in der Entwicklung von Messtechnologien, welche autonom und georeferenziert die für die Erhaltungsplanung relevanten Schäden wie Abplatzungen, Risse und Wasserzutritte aufnehmen können. Mit Unterstützung von künstlicher Intelligenz sollten die Messdaten zukünftig automatisiert hinsichtlich der relevanten Schadensbilder ausgewertet werden können. Mit dem periodischen Vergleich der ermittelten Daten und erkannten Schadensbildern können wichtige Informationen für das Erhaltungsmanagement gewonnen werden.

Ablagerungen in Drainageleitungen können schnell voranschreiten und die Funktionstüchtigkeit gefährden. Aktuelle Überwachungstechnologien (siehe Kap. 8.3.3, z.B. Kanal-TV aufnahmen) sind aufwändig und Beeinträchtigen den Verkehr im Tunnel. Durch die Entwicklung von autonomen Geräten würde eine solche Beeinträchtigung wegfallen und eine regelmässige Überwachung wäre möglich. Autonome Geräte (z.B. kleine Amphibiengeräte mit integriertem MobileMapping) könnten sich selbständig in Leitungen bewegen und Messungen (Aufnahme Punktwolke und Bildaufnahmen sowie Messungen zum Bergwasserchemismus) ausführen.



Abb. 9.26 Versinterung in einer Bergwasserdrainageleitung

Tab. 9.24 Bewertung des Forschungsbedarfs

Technologie	Priorität
Autonome Überwachung beengter Querschnitte inkl. Schadensdetektion	++
Autonome Überwachung Leitungen inkl. Schadensdetektion	++

9.3 TP Trasse

Der hier vorgeschlagene Forschungsbedarf bezieht sich auf neue Technologien im Bereich der Sicherheit zur Griffigkeit und der Beanspruchung des Strassenoberbaus zur besseren Abschätzung der Auswirkungen von realen Achslasten auf die.

Berührungslose Messung der Griffigkeit

Potential: Durch den Einsatz geeigneter Sensorik, welche eine Erfassung der Rauheit im μm -Bereich ermöglicht, kann dezidiert die Struktur der Strassenoberfläche erfasst und bewertet werden. Somit ist eine deutlich verbesserte Bewertung der Fahrbahngriffigkeit sowie deren Entwicklung unter Anwendung geeigneter Gummi-Reibungsmodelle möglich.

Voraussetzung: Entwicklung eines Systems unter Nutzung bereits erfolgter Forschung

Sensordaten des Schwerverkehr (LW), Ermittlung von Belastung und Beanspruchung

Potential: Neben den bereits generell verfügbaren Sensordaten aus Pkw, deren Möglichkeiten im Rahmen einer Pilotstudie getestet werden sollten, wird weiterhin empfohlen, entsprechende Sensordaten aus dem Schwerverkehr zu nutzen (fahrzeugseitiges bzw. On-Board Monitoring). Vorteil hierbei wäre, dass möglicherweise auch Belastungen miterfasst werden können. Die aufgenommenen Daten könnten dann bspw. in Abgleich mit TSD-Messungen oder punktuellen Tragfähigkeitsmessungen analysiert werden. Diese Analysen sind darüber hinaus für das Teilprojekt «Kunstabauten» von besonderer Bedeutung.

Voraussetzung: Klärung, ob und wie solche Fahrzeugdaten genutzt werden könnten

Nachfolgende wird der mögliche Forschungsbedarf im Bereich der Trasse wie folgt zusammengefasst:

Tab. 9.25 Bewertung des Forschungsbedarfs

Technologie	Priorität
Berührungslose Griffigkeit	++
Sensordaten von LKW, Ermittlung von Belastung und Beanspruchung -> Fahrzeugseitiges Monitoring (On-Board Monitoring)	+

9.4 Querschnittsthema Naturgefahren

Für das Querschnittsthema Naturgefahren zeigen sich drei verschiedene Forschungsthemen, welche aufbauend auf bisherige Forschungsprojekte eine Vertiefung in konkrete Teilbereiche erfordern.

Tab. 9.26 Bewertung des Forschungsbedarfs

Technologie	Priorität
UAV-gestützte Radarinterferometrie	++
Verwendung neuer Satellitenradardaten und neuer Frequenzbereiche	++
Kombination von verschiedenen Überwachungstechnologien mit near-real-Time-Prozesssimulationen	+

Die Themen werden im Folgenden kurz dargestellt.

UAV-gestützte Radarinterferometrie:

In ersten Forschungsprojekten konnte gezeigt werden, dass Radarinterferometrie grundsätzlich auch mit Drohnen möglich ist. Die ersten erfolgreichen Versuche konzentrierten sich bisher auf L-Band-Auswertungen, da diese weniger empfindlich auf Störungen in der Flugbahn reagieren. Die Technologie steht an der Schwelle zu ersten Pilotprojekten, es bedarf aber sicher noch Forschungsbedarf in der Auswertung anderer Frequenzbänder.

Verwendung neuer Satellitenradardaten und neuer Frequenzbereiche:

Im Moment kommen laufend neue Satellitenradardaten auf den Markt, die eine räumlich (Pixelgrösse im dm-Bereich) und zeitliche (bis zu vier Bilder pro Tag) höhere Auflösung versprechen. Die Eignung dieser Daten muss validiert, Auswertungsalgorithmen erarbeitet und deren praktische Umsetzung an konkreten Orten geprüft werden. Ebenfalls in Entwicklung sind Datenauswertungen im sogenannten S-Bandbereich.

Kombination von verschiedenen Überwachungstechnologien (z. B. Laserscanning aus Drohnen zur Schneehöhenmessung) mit near-real-Time-Prozesssimulationen:

Im Moment laufen Forschungsprojekte mit dem Ziel, die Strassensicherheit in Lawinsituationen zu verbessern und die dafür notwendigen Sperrzeiten zu optimieren. Dank stationären oder mobilen Überwachungsmessungen (z. B. Drohnen) können aktuelle Schneehöhendaten und Temperaturdaten in flächig und in Echtzeit erfasst werden, die dann in near-real-Time-Prozesssimulationen einfließen. Hiermit kann der Wirkungsbereich möglicher Lawinen mit aktuellen Schnee- und Meteodaten modelliert werden und somit die Strassenverantwortlichen im Entscheid, eine Strasse zu sperren oder offen zu lassen, unterstützt werden.

Anhänge

I	Detailinformationen zum Copernicus Projekt	71
I.A	Erläuterungen zum Projektumfang	71
I.A.1	Beschreibung der Missionen	71
I.A.2	Metadaten	78
I.A.3	Verarbeitung	84
I.A.4	Anwendungen	88
I.B	Beitragende Missionen des Copernicus Projekts	92
I.C	Zusammenfassung der SAR-instrumentierten Missionen	93
I.D	Kommerzielle Kosten von SAR-Bildern	97
I.E	Übersicht über Forschungspublikationen	98

I Detailinformationen zum Copernicus Projekt

I.A Erläuterungen zum Projektumfang

I.A.1 Beschreibung der Missionen

SAR-Einsätze

Hauptsächlich werden hier SAR-instrumentierte Missionen erläutert, da sie für die Messung von Verschiebungen von grosser Bedeutung sind. SAR ist eine Technik, bei der die Bewegung eines Satelliten und der an Bord befindliche Radarsensor kombiniert werden, um ein mittel- bis hochauflösendes zweidimensionales RadARBild oder eine dreidimensionale Rekonstruktion der Erdoberfläche zu erstellen. Der Radarsensor sendet Signale durch elektromagnetische Wellen aus, die sich mit Lichtgeschwindigkeit im Mikrowellenfrequenzbereich zwischen 1 GHz und 40 GHz bewegen (vgl. Abb. 9.27). Das ausgestrahlte Signal wird von der Erdoberfläche reflektiert (vgl. Abb. 9.28), was die Erzeugung grauer RadARBilder ermöglicht. Im Mikrowellenfrequenzbereich liegen die Wellenlängen im Zentimeter- bis Meterbereich (vgl. Abb. 9.27). Zum Vergleich: Der Frequenzbereich der Infrarotstrahlen liegt zwischen 300 GHz und 400 THz mit Wellenlängen zwischen 1 mm und 700 nm. Sichtbares Licht hat einen Frequenzbereich zwischen 430 THz und 750 THz mit Wellenlängen zwischen 700 nm und 400 nm. Radar ist ein aktiver Sensor (analog LiDAR - Light Detection and Ranging), der sich von passiven Sensoren wie thermischen Infrarotsensoren und optischen Sensoren unterscheidet, da er anstatt auf Wärmestrahlung bzw. Sonnenlicht sich auf sein eigenes Signal stützt.

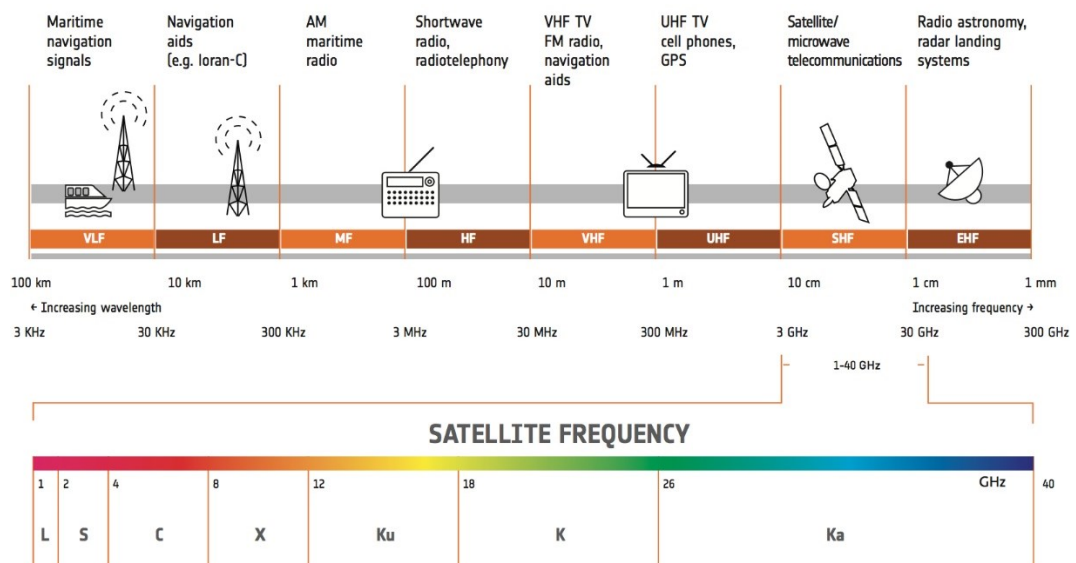


Abb. 9.27 Frequenzband und Wellenlängen der Satelliten [22]

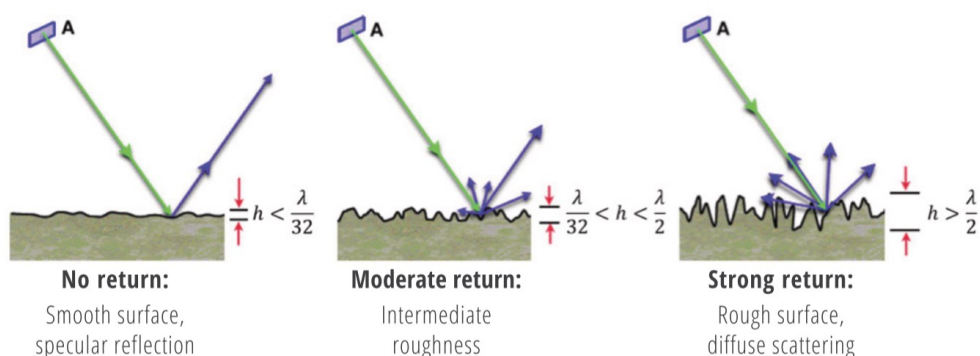


Abb. 9.28 Rückstreuungseigenschaften von verschiedenen Oberflächen (vgl. [23])

Die Rückstreuung, d.h. das reflektierte Signal, ermöglicht die Aufzeichnung von zwei relevanten Informationen, der Phase und der Amplitude. Die Phase charakterisiert den Abstand zwischen dem Sensor an Bord eines Satelliten und dem Ziel auf der Erdoberfläche, während die Amplitude die Stärke der Rückstreuung kennzeichnet. Die Phasenkomponente des Signals erzeugt verrauschte Bilder, die für das menschliche Auge nicht lesbar sind (vgl. Abb. 9.29, rechts), jedoch für die Messung der Verschiebung unerlässlich sind. Die Phasensignalverschiebung der Rückstreuung jedes Pixels, d.h. Δr in Abb. 9.30, wird zwischen den Bildern verglichen, was die Messung jeder Verschiebung ermöglicht. Zu diesem Zweck wird eine Technik verwendet, die als interferometrisches SAR (InSAR) bekannt ist. InSAR wird später in einem eigenen Kapitel ausführlicher behandelt. Die Stärke der Rückstreuung ist eine Funktion der Rauheit (vgl. Abb. 9.28) und der Geometrie der Oberfläche. Die in einem Radarbild verfügbare Amplitudeninformation kann verwendet werden, um für das menschliche Auge lesbare Bilder zu erzeugen (vgl. Abb. 9.29, links). In jedem Pixel erzeugen die Amplitudeninformationen je nach Grösse der Amplitude eine Aufhellung oder Abdunklung.

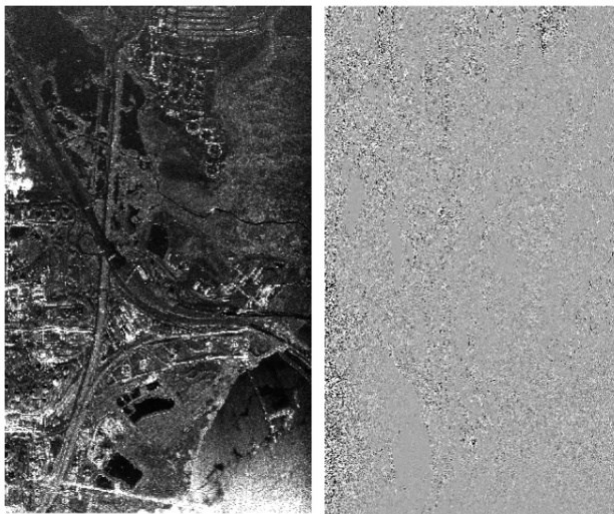


Abb. 9.29 Amplitudenbasiertes und phasenbasiertes SAR-Bild [24]

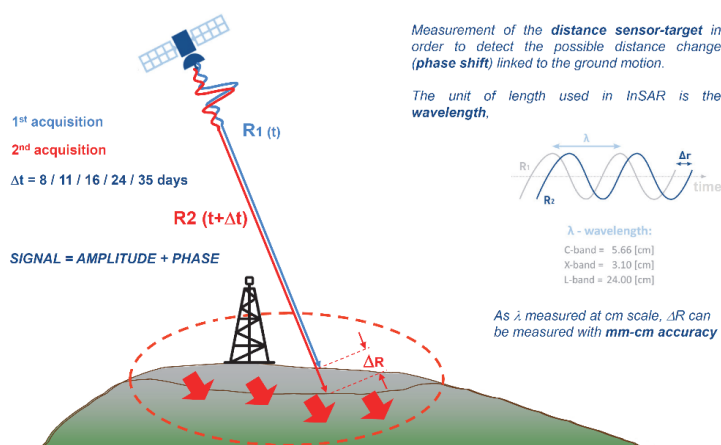


Abb. 9.30 SAR-Prinzip für die Messung von Verschiebungen [25]

Tab. 9.27 gibt einen Überblick über die mit SAR-Instrumenten ausgestatteten Missionen und ihre jeweilige Messgenauigkeit, Auflösung und das Frequenzband, in dem sie arbeiten. Die Auflösung eines Radarbildes wird anhand der äquivalenten Grösse eines Pixels auf der Erdoberfläche gemessen. Dabei hängt die notwendige Auflösung von der Grössenschwelle für die Unterscheidung zweier unterschiedlicher Objekte in getrennten Pixeln ab. Das heisst, je höher die Auflösung, desto kleiner sind die Objekte oder Bereiche, die in einem einzigen Pixel isoliert werden können. Frequenzbänder, dargestellt durch Grossbuchstaben, gruppieren Mikrowellen in Untergruppen nach Frequenzbereichen und entsprechenden Wellenlängen (vgl. Abb. 9.27).

Besondere Aufmerksamkeit sollte dem Frequenzband gewidmet werden, weil

- je kleiner die Wellenlänge des Bandes ist, desto höher ist die Auflösung des Radarbildes und desto höher ist die Dichte der Punkte, die für die Messung der Verschiebung erreicht werden können.
- die Verschiebung eines Objekts zwischen zwei Radarbildern darf nicht grösser sein als ein Viertel der Wellenlänge λ des Bandes, d. h. $\lambda/4$ (vgl. Abb. 9.30), da sonst eine Bewegung dieses Objekts nicht eindeutig identifiziert werden kann. Diese Einschränkung ist auf die periodische Natur der Phase elektromagnetischer Wellen im Wellenzyklus $[-\pi; +\pi]$ und die Zweideutigkeit der Phasenverschiebung auf dem Weg Radargerät-Erdoberfläche-Radargerät zurückzuführen, wodurch bei grösseren Phasenverschiebungen als $\lambda/4$ positive und negative Verschiebung nicht eindeutig unterschieden werden können. Bei der Verwendung eines X-Band-SAR-Instruments beispielsweise darf die Verschiebung eines Objekts zwischen zwei Satellitenbildern, die in einem Intervall von 11 Tagen aufgenommen wurden (d. h. TerraSAR-X-Wiederholungszyklus), 7,8 mm nicht überschreiten. Diese Einschränkung kann jedoch durch die Verwendung eines Satelliten mit einem kürzeren Wiederholungszyklus oder durch die Verwendung eines Radars mit einer grösseren Wellenlänge überwunden werden [26]. Der Wiederholungszyklus bezieht sich auf das Zeitintervall, welches ein Satellit benötigt, um dieselbe Umlaufbahn über dasselbe Gebiet zurückzulegen. Unter Berücksichtigung der Radarwellenlänge der verschiedenen SAR-Missionen und des Wiederholungszyklus eines einzelnen Satelliten beträgt die maximale theoretische Differenzverschiebung, die von Envisat, TerraSAR-X, Sentinel-1 und ALOS gemessen werden kann, 14,7, 25,7, 42,6 bzw. 46,8 cm/Jahr (vgl. [27]). Solche theoretischen Einschränkungen könnten durch eine Anpassung der Standardverarbeitungstechniken auf der Grundlage linearer Deformationsmodelle überwunden werden (vgl. [28]).
- je kleiner die Wellenlänge ist, desto grösser ist der Einfluss von Niederschlag, Temperatur und Luftfeuchtigkeit und anderen Faktoren auf das ausgestrahlte Radarsignal. Solche Einflüsse werden durch "Kalibrierungspunkte" herausgefiltert. Dabei handelt es sich um Referenzpunkte auf der Erde, deren zeitliche Verschiebung als stabil oder nahe Null angesehen wird und die als Bezugspunkte zum Herausfiltern von Messfehlern verwendet werden können.
- je länger die Wellenlänge, desto höher das Eindringen in die Vegetationsdecke (vgl. Abb. 9.31), trockenes Schwemmland und Gletschereis. Die Eindringtiefe ist von einiger Bedeutung für die ordnungsgemässe Überwachung von Erdrutschen an Hängen und Böschungen mit hoher Vegetationsdichte, da eine gewisse Eindringtiefe des Signals erforderlich ist, damit die Bodenverschiebung gemessen werden kann.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass die von einem SAR-Instrument unterstützten Anwendungen vom jeweiligen Frequenzband abhängen.

Tab. 9.27 Überblick über SAR-Missionen und ihre Merkmale (vgl. [29])

Frequenzband	Wellenlänge	Penetration ¹	Auflösung ²	Präzision bei der Messung	Abgedeckter Bereich	Missionen ³
X	$\lambda = 2,4\text{-}3,8$ cm	Niedrig	Hoch (1-3 m)	Hoch (2-3 mm)	4x4 km - 30x50 km	TerraSAR-X, COSMO-SkyMed
C	$\lambda = 3,8\text{-}7,5$ cm	Mittel	Mittel (5-30 m)	Mittel (4-5 mm)	20x20 km - 50x170 km	Sentinel-1, RadarSat, Envisat
L	$\lambda = 15\text{-}30$ cm	Hoch	Mittel (5-30 m)	Niedrig (10-20 mm)	25x25 km - 350x350 km	ALOS, ALOS-2

¹Je kleiner die Wellenlänge, desto geringer ist das Durchdringungsvermögen.

²Je kleiner die Wellenlänge, desto höher die Auflösung. Zusätzlich hat der Haupterfassungsmodus einen Einfluss auf die Auflösung (vgl. Tab. 9.32).

³Der erste SAR-Satellit mit Instrumenten war der NASA-Satellit Seasat, der am 28. Juni 1978 gestartet wurde. Aufgrund eines Kurzschlusses in seinem elektrischen System war er nur 106 Tage lang betriebsbereit.

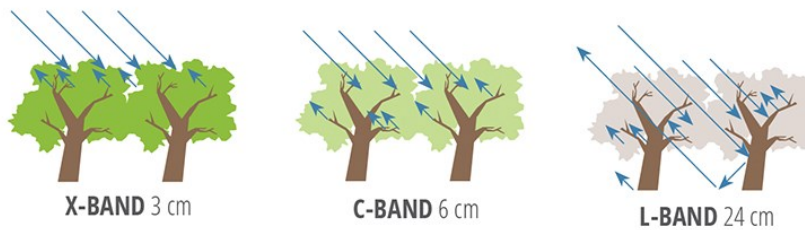


Abb. 9.31 Eindringen in die Vegetationsdecke als Funktion der Frequenzbänder und ihrer jeweiligen Wellenlängen [23]

Ein umfassenderer Überblick über die instrumentierten SAR-Missionen mit Angabe des Startdatums, des Frequenzbandes, der Wellenlänge, der Auflösung, des Wiederholungszyklus, der Anwendungen, der Datenverfügbarkeit usw. findet sich in Anhang I.C.

Sentinel-1

Die Sentinel-1-Mission ist die Initiative des europäischen Radarobservatoriums für Radaraufnahmen bei Tag und Nacht und bei jedem Wetter - auch an bewölkten Tagen. Die Mission besteht aus einer Konstellation von zwei erdnahen Satelliten - zunächst Sentinel-1A und Sentinel-1B. Die Mission des Sentinel-1B-Satelliten wurde am 3. August 2022 beendet, und der Start des Sentinel-1C-Satelliten ist für das Jahr 2024 geplant. Satelliten in niedriger Umlaufbahn sind Satelliten, die die Erde in einer Höhe zwischen 250 und 2000 km umkreisen. Die Sentinel-1-Satelliten umkreisen die Erde in einer Höhe von 693 km. Die Sentinel-1-SAR-Instrumente arbeiten im C-Band-Mikrowellenbereich mit Wellenlängen zwischen 3,75 und 7,5 cm. Jeder Satellit hat einen Umlaufwiederholungszyklus von 12 Tagen, und die Konstellation hat einen 6-tägigen Wiederholungszyklus aufgrund der um 180 Grad phasenverschobenen Anordnung der Zwillingssatelliten, d.h. der entgegengesetzten Positionierung zueinander (vgl. [14]). Der Wiederholungszyklus liefert die für die InSAR-Analyse relevante zeitliche Auflösung, da für die Radaraufnahme bis auf geringe Abweichungen die gleichen Aufnahmeparameter (z. B. Abbildungswinkel) verwendet werden. Dies ist der Fall, weil die Satelliten denselben Weg zurücklegen, den sie bei allen vorangegangenen Aufnahmen über eine bestimmte Region zurückgelegt haben. Dadurch wird auch die Überlappung der Phaseninformationen in den aufeinanderfolgenden Bildern erleichtert, welche für die Messung von Verschiebungen wichtig sind.

Das von den Sentinel-1-Satelliten mitgeführte SAR-Instrument arbeitet in verschiedenen Erfassungsmodi (siehe Abb. 9.32), deren Auflösungsvermögen in folgender Tab. 9.28 zusammengefasst sind. Für die Sentinel-1-Satelliten sind die folgenden Erfassungsmodi verfügbar:

- Stripmap (SM): Dieser Modus verwendet sechs sich überlappende nummerierte Streifen (d. h. Quadrate in Abb. 9.32), die durch eine ununterbrochene Folge von Impulsen beleuchtet werden (d. h. violetter Strahl in Abb. 9.32). Der Antennenstrahl, der für das Aussenden und Empfangen des Signals verantwortlich ist, wird in einem festen Winkel in Azimut- (d. h. Satellitenflugrichtung) und Entfernungsrichtung (d. h. Richtung senkrecht zum Flug) gehalten, so dass sich ein durchgehender Streifen in Azimutrichtung ergibt. Im Gegensatz zu anderen Erfassungsmodi ist es nicht erforderlich, die Antenne in Azimutrichtung zu steuern. Der SM-Modus wird nur in Ausnahmefällen zur Unterstützung von Notfallmassnahmen und zur Abbildung kleiner Inseln verwendet.
- Interferometric Wide swath (IW): In diesem Modus wird das TOPSAR-Verfahren (Terrain Observation with Progressive Scans SAR) eingesetzt, welches eine homogene Bildqualität über die gesamte Breite des Streifens gewährleistet. TOPSAR ermöglicht die Lenkung des Strahls sowohl in der Entfernungsrichtung als auch in der Azimutrichtung von hinten nach vorne - siehe Abb. 9.33. Der IW ist der Haupte Erfassungsmodus über Land und stellt die Grundlage für den European Ground Motion Service EGMS (vgl. Kap. 7.4) dar.

- Extra-Wide swath (EW): Dieser Modus verwendet ebenfalls die TOPSAR-Technik, deckt jedoch ein grösseres Gebiet als IW mit fünf Teilstreifen und einer geringeren Auflösung ab (siehe Abb. 9.32). Dieser Modus wird empfohlen, wenn eine grosse Abdeckung und eine kurze Wiederholungszeit erforderlich sind.
 - Wave (WV): Bei diesem Modus wird in regelmässigen Abständen ein einzelnes Streifenbild aufgenommen, das Bereiche von 20 x 20 km abdeckt, die in Azimutrichtung regelmässig alle 100 km angeordnet sind, so dass ein rasterförmiges Erfassungsmuster entsteht - siehe Abb. 9.32. Der WV-Modus ist der Standard-Erfassungsmodus, der über dem offenen Ozean verwendet wird.

Tab. 9.28 Sentinel-1-Erfassungsmodi und Leistungsspezifikationen [14]

Erfassungsmodi	Auflösung	Streifenbreite
Stripmap (SM)	5x5 m	80 km
Interferometric Wide swath (IW)	5x20 m	250 km
Extra-Wide swath (EW)	20x40 m	410 km
Wave (WV)	5x5 m	20 km

Weitere Einzelheiten über die Sentinel-1-Mission unter

<https://sentiwiki.copernicus.eu/web/s1-mission#S1-Mission-Stripmap>

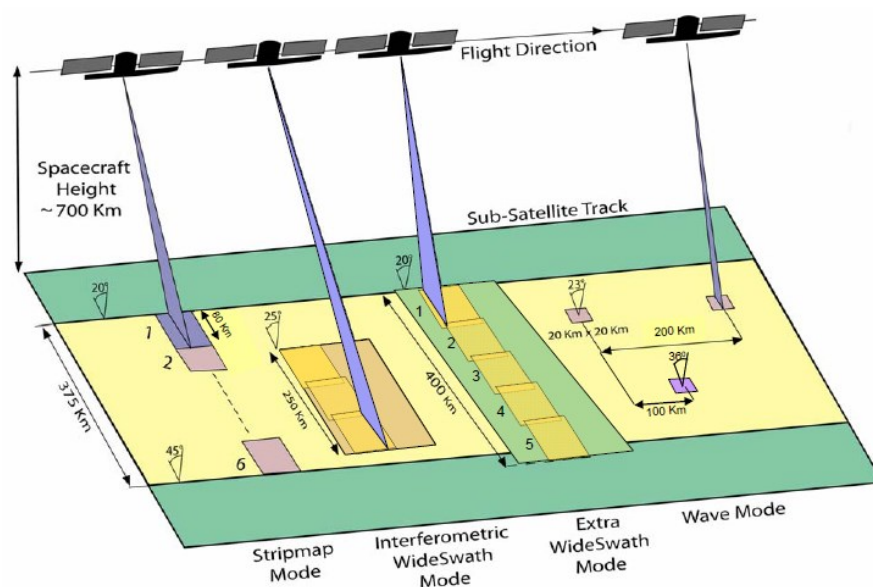


Abb. 9.32 Erfassungsmodi [14]

Die Erfassungsmodi sind relevante Metadaten, die die Auflösung und den erfassten Bereich des Radarbildes beeinflussen. In der Regel gibt es einen Kompromiss zwischen der Auflösung und dem erfassten Bereich. Eine höhere Auflösung schränkt den abgedeckten Bereich ein, und je grösser der abgedeckte Bereich ist, desto geringer ist die zu erwartende Auflösung.

COSMO-SkyMed

COSMO-SkyMed ist eine von der italienischen Raumfahrtbehörde und dem italienischen Verteidigungsministerium finanzierte Beobachtungsmission für die Beobachtung des Mittelmeerraums mit einer Konstellation von 3 erdnahen Satelliten der ersten Generation und 2 Satelliten der zweiten Generation - ab 2023 (vgl. Abb. 9.33). Einer der ursprünglich verfügbaren Satelliten der ersten Generation ist nicht mehr in Betrieb. Die Satelliten der zweiten Generation wurden gestartet, um die Erfassungsmöglichkeiten zu verbessern und die Kontinuität der Mission angesichts der begrenzten Lebensdauer der Satelliten zu gewährleisten. Jeder Satellit ist mit einem hochauflösenden Multimode-SAR-Instrument ausgestattet, das im X-Band-Mikrowellenbereich mit Wellenlängen zwischen 2,4 und 3,8 cm arbeitet. Der nominale Wiederholungszyklus der Umlaufbahn beträgt für jeden Satelliten 16

Tage, und die Konstellation bietet einen Wiederholungszyklus von nur 1 Tag (vgl.[30]). Die Erfassungsmodi (vgl. Abb. 9.34) werden im Folgenden kurz beschrieben:

- **Spotlight:** Dieser Aufnahmemodus ermöglicht die gezielte Ausleuchtung eines bestimmten, kleineren Bereichs von Interesse, indem die Beleuchtungszeit (d. h. die Dauer der Signalabgabe) verlängert wird. Diese verlängerte Beleuchtungszeit wird durch die Lenkung des Antennenstrahls in Azimutrichtung erreicht - siehe Abb. 9.34.
- **Stripmap:** bereits im vorangegangenen Kapitel definiert - siehe Senteinel-1. Die Subakquisitionsmodi HIMAGE und PING PONG (siehe Tab. 9.29) werden über ihr Auflösungsvermögen hinaus nicht näher erläutert, da eine solche Diskussion im Rahmen dieses Syntheseberichts nicht als relevant angesehen wird.
 - **ScanSAR:** Es bietet einen grösseren Erfassungsbereich als andere Erfassungsmodi in der Richtung senkrecht zur Azimutrichtung unter Verwendung leicht überlappender Streifen (vgl. Abb. 9.34) durch sukzessive Lenkung des Antennenstrahls, was zu einer kürzeren Beleuchtungszeit und damit zu einer geringeren Auflösung führt. Das Auflösungsvermögen und die Streifenbreite des ScanSAR-Modus sind zusammengefasst in Tab. 9.29.

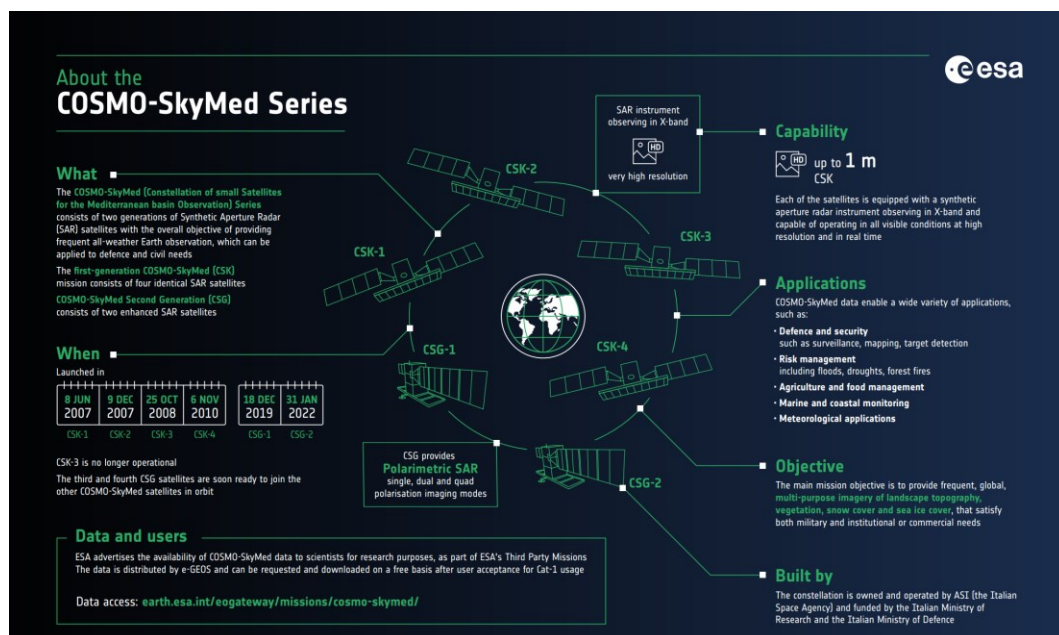


Abb. 9.33 Zusammenfassung der COSMO-SkyMed-Konstellation [22]

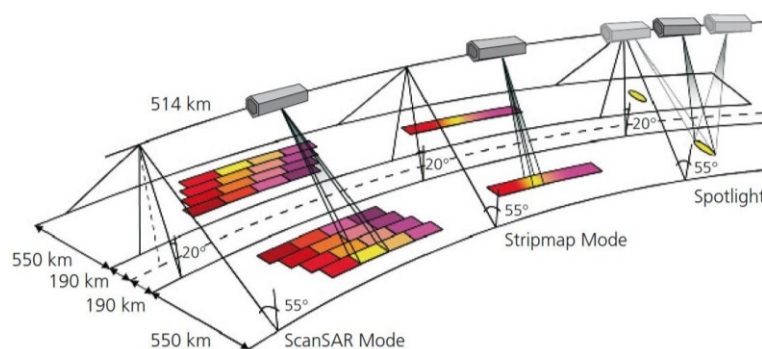


Abb. 9.34 Sensor-Modi [31]

Tab. 9.29 COSMO-SkyMed-Erfassungsmodi und Leistungsspezifikationen [30]

Erfassungsmodi		Auflösung	Streifenbreite
Spotlight		1x1 m	10 km
Stripmap	HIMAGE	3x3 m	40 km

	PING PONG	15x15 m	30 km
ScanSAR	Breit	30x30 m	100 km
	Riesig	100x100 m	200 km

Details zu COSMO-SkyMed der ersten Generation unter <https://earth.esa.int/eogateway/missions/cosmo-skymed#data-section>

Details zu COSMO-SkyMed Zweite Generation unter <https://earth.esa.int/eogateway/missions/cosmo-skymed-second-generation>

TerraSAR-X

TerraSAR-X und TanDEM-X sind zwei deutsche SAR-Satelliten in niedriger Umlaufbahn des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt (DLR), die zahlreichen Missionen für nachrichtendienstliche, wissenschaftliche und kommerzielle Anwendungen unterstützen. Eine dieser Missionen ist nach dem ersten Satelliten benannt, nämlich TerraSAR-X. Jeder Satellit ist mit einem hochauflösenden Multimode-SAR-Instrument ausgestattet, das im X-Band-Mikrowellenbereich arbeitet. Die Konstellation hat einen Wiederholungszyklus von 11 Tagen, der mit dem Wiederholungszyklus eines einzelnen Satelliten übereinstimmt, vor allem wegen ihrer engen Betriebsformation, die sich bis auf eine Distanz von nur 120 m reduzieren kann (vgl. Abb. 9.35). Auf derselben Umlaufbahn wie die Satelliten TerraSAR-X und TanDEM-X befindet sich der Satellit PAZ, der ebenfalls im X-Band-Mikrowellenbereich arbeitet. Die von diesen Satelliten verwendeten Erfassungsmodi unterscheiden sich nicht von den zuvor vorgestellten, mit Ausnahme ihrer Auflösungsfähigkeiten, (vgl. Tab. 9.30). Die in Tab. 9.30 aufgeführten Spotlight-Submodi werden hier nicht über ihr Auflösungsvermögen hinaus erörtert.

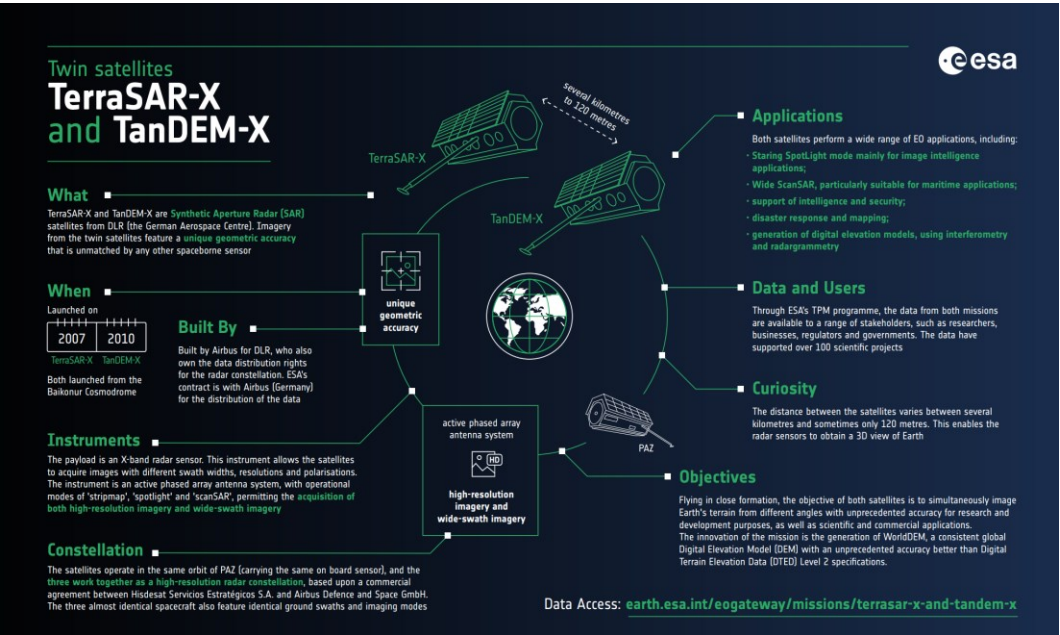


Abb. 9.35 Zusammenfassung der TerraSAR-X- und TanDEM-X-Konstellation [22]

Tab. 9.30 Sentinel-1-Erfassungsmodi und Leistungsspezifikationen [22]			
Erfassungsmodi		Auflösung	Streifenbreite
Spotlight	Staring ¹	0,25x0,25 m	4 km
	Hohe Auflösung	2x1 m	10 km
	Standard-Modus	2x1 m	10 km
	Experimentelle	1x1 m	10 km
Stripmap-Modus (SM)		3x3 m	30 km
ScanSAR (SC)		16x16 m	100 km

¹Nur für nachrichtendienstliche Anwendungen. Jedoch, Hoppe et al. [32] haben die Daten jedoch für Forschungszwecke genutzt. Weitere Einzelheiten zu TerraSAR-X und TanDEM-X unter <https://earth.esa.int/eogateway/missions/terrasar-x-and-tandem-x#instruments-section>

Nicht-SAR-Missionen

Die übrigen Sentinel-Missionen unterscheiden sich in vielerlei Hinsicht von den Missionen mit SAR-Instrumenten und sind für die Überwachung von Infrastrukturen nur von begrenztem Interesse. Ein bemerkenswerter Unterschied liegt jedoch in den Instrumenten, die jede Konstellation mit sich führt und die sie für unterschiedliche Zwecke geeignet machen. Die Sentinel-2-Konstellation verfügt über ein optisches Instrument, das in der Lage ist, 13 Spektralbänder (d. h. ein Multispektralinstrument (MSI)) mit unterschiedlichen räumlichen Auflösungen abzutasten, und das passiv arbeitet, da es von der Beleuchtung durch das Sonnenlicht abhängig ist. Daher kann es nicht unter allen Wetterbedingungen arbeiten und benötigt einen klaren Himmel. Die Kombination der verschiedenen Spektralbänder der MSI-Instrumente ermöglicht die Aufnahme von Bildern, die bestimmte Objekte mit bestimmten Farben hervorheben, z. B. natürliche Farben, wie sie der Mensch von Natur aus sieht, oder falsche Farben, bei denen Städte und freiliegender Boden grau oder hellbraun und Wasser blau oder schwarz gefärbt werden. Auch Nahinfrarot und grünes Licht, das von Pflanzen reflektiert wird, kann erfasst werden.

Sentinel-3 verfügt über mehrere Instrumente zur Beobachtung des Meeres, der Meeresoberflächentopografie und der Temperatur der Meeres- und Landoberfläche. Er ist mit einem Radarhöhenmesser, einem Radiometer für die Temperatur der Meeres- und Landoberfläche und einem Mikrowellenradiometer ausgestattet. Sentinel-4 widmet sich der Überwachung der Luftqualität und ist mit einem passiven, bildgebenden Spektrometer ausgestattet, das in verschiedenen Spektralbändern arbeitet und so wichtige Spurengase wie Ozon (O₃), Stickstoffdioxid (NO₂), Schwefeldioxid (SO₂) und andere überwachen kann. Sentinel-5 ist ebenfalls für die Überwachung der Luftqualität zuständig, und Sentinel-6 soll zusammen mit Sentinel-3 die globalen Veränderungen des Meeresspiegels überwachen und ist ebenfalls mit einem Radarhöhenmesser ausgestattet.

I.A.2 Metadaten

Metadaten der Produkte

Die SAFE-Spezifikation (Standard Archive Format for Europe), die üblicherweise für die Archivierung und Übermittlung von Daten innerhalb der ESA verwendet wird, wird für die Verteilung von Sentinel-Datenprodukten mit einigen speziellen Variationen verwendet. Die Sentinel-1-Produkte werden nach folgenden Kriterien benannt (vgl. Abb. 9.36), wobei die entsprechenden Metadaten in den folgenden Abschnitten erläutert werden. Diese Metadaten werden zusammen mit den Werten erläutert, die sie bei der Benennung von Sentinel-1-Produkten annehmen. Ein Produkt ist nichts anderes als die im Rahmen der Mission gewonnenen Daten, die strategisch mit relevanten Informationen für bestimmte Anwendungen verpackt sind. Zum Teil werden diese Daten in ihrer Rohform bereitgestellt, in anderen Fällen nach einer umfangreichen Verarbeitung.

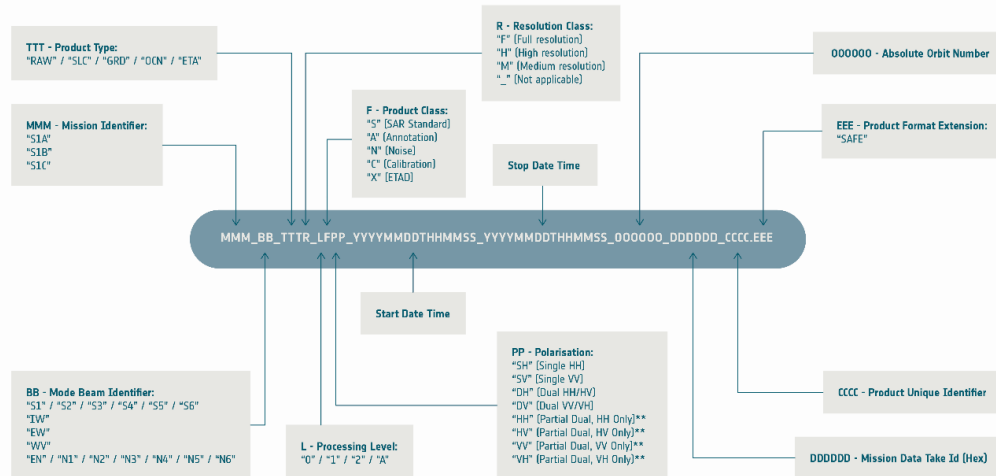


Abb. 9.36 Sentinel-1 SAFE-Ordnerbenennungskonvention [14]

Missionskennung enthält den Code der spezifischen Satelliten, die zur Datenerfassung eingesetzt werden, z. B. Sentinel-1A ("S1A"), Sentinel-1B ("S1B") und Sentinel-1C ("S1C").

Modus-Strahl-Identifikator bezieht sich auf die Erfassungsmodi gemäss Abb. 9.32. Die Werte dieser Metadaten, z. B. "S1-S6", beziehen sich auf jeden der sechs Streifen des Erfassungsmodus Stripmap (SM). Ausserdem beziehen sich "IW", "EW" und "WV" auf die Erfassungsmodi Interferometric Wide Swath, Extra-Wide Swath und Wave. Darüber hinaus arbeitet Sentinel-1 in anderen Modi, die intern verwendet und daher nicht angegeben werden. Solche Erfassungsmodi sind Elevation (EN) und Azimuth Notch (N1-N6). Auf diese Modi wird nicht weiter eingegangen, da sie für die in diesem Synthesebericht geführte Diskussion von geringer Bedeutung sind.

Produkttyp bezieht sich auf die angewandte Vorverarbeitung der erfassten Rohdaten. Die Bezeichnung des Produkttyps hängt von der Mission und der Instrumentenkategorie ab, mit der die Daten erfasst wurden. Eine Übersicht findet sich in Tab. 9.31 für verschiedene SAR-Missionen. Single Look Complex ("SLC") und Ground Range Detected ("GRD") entsprechen den Bezeichnungen, die auf die aus den "RAW"-Daten gewonnenen Folgeprodukten angewendet werden. Nach Angaben der Universität Twente [33] bestehen SLC-Produkte aus den Real- und Imaginärteilen fokussierter komplexer SAR-Daten in Schrägentfernungsgeometrie, aus denen die Phasen- und Amplitudeninformationen abgerufen werden können. GRD-Produkte bestehen aus fokussierten und Multi-Look-SAR-Daten, die auf eine Bodengeometrie projiziert wurden und nur die Amplitudeninformationen enthalten. Multi-look bezieht sich auf mehrere unabhängigen Bilder über denselben Bereich, um die Auflösung des Radarbildes zu erhöhen. Die in SLC-Produkten verfügbaren Phaseninformationen sind für InSAR-Analysen, die für die Messung von Verschiebungen erforderlich sind, unerlässlich – siehe I.A.3 für weitere Einzelheiten. Das Extended Timing Annotation Dataset ("ETAD") ist ein Support-Produkt, das analysefähige Schichten enthält, um atmosphärische Pfadverzögerungen zu entfernen, die das ausgesendete Signal beeinflussen. Andere verfügbare Produkte, auf die hier nicht verwiesen wird, wurden als nicht relevant für diesen Synthesebericht angesehen.

Verarbeitungsebene steht in direktem Zusammenhang mit den oben beschriebenen Produkttyp-Metadaten. Level-"0" bezieht sich auf Rohdaten, während Level-"1" sich unter anderem auf SLC- und GRD-Produkte bezieht. Ebene "2" bezieht sich auf Produkte, wie z. B. Differentialinterferogramme, die aus Ebene-1-Produkten gewonnen werden. Differenzielle Interferogramme werden durch Subtraktion der in den SLC-Produkten der Ebene 1 verfügbaren Phaseninformationen gewonnen. Das ETAD-Produkt liefert Hilfsdaten und wird daher als Stufe-A-Produkt eingestuft.

Auflösungsklasse bezieht sich auf die Auflösungskategorien, in denen die GRD-Produkte

bereitgestellt werden, d. h. volle Auflösung (FR), hohe Auflösung (HR) and mittlere Auflösung (MR). Die Auflösungsklasse hängt vom Ausmass der durchgeführten Mehrfachbetrachtung ab, die die endgültige Auflösung des Radarbildes ergibt. GRD-Produkte enthalten keine Phaseninformationen und können daher nicht für Verschiebungsmessungen verwendet werden. Sie liefern jedoch lesbare Graubilder des Standorts. Die Metadaten sind ebenso nicht auf SLC-Produkte, welche für Wegmessungszwecke unerlässlich sind, anwendbar. In diesem Fall enthält die Auflösungsklasse einen Wert "-", zur Filterung der gewünschten Daten benutzt wird. In diesem Bericht wird mehrfach auf das Auflösungsvermögen von Erfassungsmodi verwiesen, ohne dass ein Zusammenhang mit diesen Metadaten (Auflösungsklasse) besteht.

Produktklasse gruppiert die Sentinel-Produkte unter anderem in die folgenden Klassen: SAR-Standard ("S"), Annotation ("A"), Rauschen ("N") und Kalibrierung ("C"). Die erste Klasse enthält die SAR-Bilder, die zweite Klasse enthält zusätzliche Metadaten zur Unterstützung der weiteren Verarbeitung, die dritte Klasse enthält Informationen zum Rauschen bzw. zu den Merkmalen des erfassten SAR-Bildes und die vierte Klasse bezieht sich auf Produkte, die zur Kalibrierung der erfassten Daten verwendet werden. High-Level-Produkte wie SLC umfassen nur die Klassen "Standard" und "Annotation". Die übrigen Produkte sind den Level-0-Produkten vorbehalten, deren Kalibrierung und Rauschunterdrückung nicht Gegenstand dieses Syntheseberichts sind.

Polarisationskanäle beziehen sich auf die spezifische Richtung, in die der SAR-Sensor die Mikrowellensignalschwingung aussendet oder empfängt. Einfach ausgedrückt, beschreibt er die Ausrichtung der Schwingungsebene des Signals – siehe Abb. 9.37. Als aktives Instrument verfügt SAR über eine eigene Beleuchtungsquelle, die es ihm ermöglicht, die Polarisation des von ihm gesendeten und empfangenen Signals vollständig zu steuern. Die meisten SAR-Sensoren sind linear polarisiert, d. h. sie senden und empfangen entweder horizontal und/oder vertikal polarisierte Signale. VV-Polarisation bedeutet, dass die Wellen vertikal gesendet und vertikal empfangen werden, während sich VH-Polarisation auf ein vertikal gesendetes und horizontal empfangenes Signal bezieht. Der Sentinel-1 arbeitet in einfacher (d. h. HH und VV) und doppelter Polarisation (z. B. HH/HV, VV/VH). Eine HH/HV-Polarisation bedeutet, dass das Signal in horizontaler Richtung ausgestrahlt und sowohl in horizontaler als auch in vertikaler Richtung empfangen wird. Laut BAST (vgl. [26]) kann bei Strassenoberflächen (d.h. schwachen diffusen Reflektoren) durch VV-Polarisation ein stärkeres Echo (Rückstreusignal) erzielt werden. Die Streuungstypen, die in Abb. 9.38 dargestellten Streuarten tragen unterschiedlich zu den polarimetrischen Kanälen bei. Die Polarisation des rückgestreuten Signals kann mit Merkmalen wie Form, Rauheit und Ausrichtung der Erdoberfläche verknüpft sein. Beispielsweise profitieren Gebäude, Brücken, Baumstämme und Lichtmasten sowie andere vertikale Strukturen von einer stärkeren Streuung von HH-polarisierten Wellen (siehe - Abb. 9.38). Ausserdem ist zu erwähnen, dass verschiedene Erfassungsmodi spezifische Polarisationskanäle verwenden können.

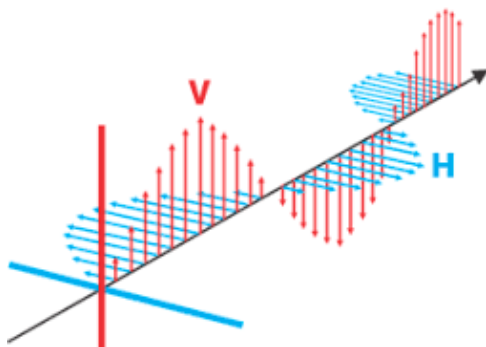


Abb. 9.37 Signalpolarisierung [34]

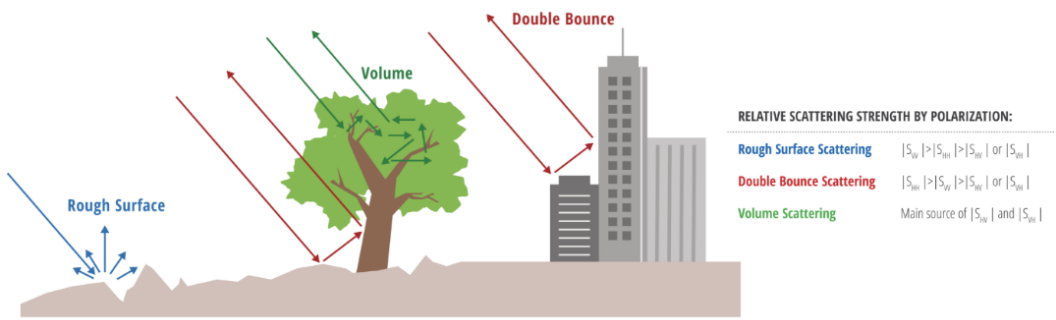


Abb. 9.38 Auf der Stärke der Streuung basierende Wellenpolarisation von Objekten (vgl. [23])

Tab. 9.31 Produkttypen und ihre Anwendungen			
Mission	Name des Produkts	Enthaltene Informationen	Anwendungen
Sentinel-1	L0-Rohdaten	Rohe	Entwicklung von übergeordneten Produkten
	L1 SLC	Phase und Amplitude	Interferometrie
	L1 Erkannte Hochauflösend Single- & Dual-Pol	Amplitude	Visualisierung, Kartierung, Erkennung von Veränderungen
	L1 Erkannte Einzel- & Dual-Pol	Amplitude	Visualisierung, Kartierung, Erkennung von Veränderungen
COSMO-SkyMed	L0 RAW	Rohe	Höherwertige Produkte
	L1A	Phase und Amplitude	Interferometrie
	L1B MDG (Multi-look Detected Ground Range)	Amplitude	Visualisierung, Kartierung, Erkennung von Veränderungen
	L1C GEC (Geocodiert Ellipsoid korrigiert)	Amplitude	Visualisierung, Kartierung, Erkennung von Veränderungen
	L1D GTC (Geocoded Terrain Corrected)	Amplitude	Visualisierung, Kartierung, Erkennung von Veränderungen
TerraSAR-X	L1 SSC (Single Look Slant) Bereichskomplex)	Phase und Amplitude	Interferometrie
	L1 MGD (Multi Look Bodenbereich erkannt)	Amplitude	Visualisierung, Kartierung, Erkennung von Veränderungen
	L1 GEC	Amplitude	Visualisierung, Kartierung, Erkennung von Veränderungen
	L1 EEC (Erweitertes Ellipsoid korrigiert)	Amplitude	Visualisierung, Kartierung, Erkennung von Veränderungen

Eine erweiterte Version von Tab. 9.31 ist verfügbar in Anhänge I.C für zahlreiche SAR-Einsätze.

Datum und Uhrzeit des Beginns bezieht sich auf das Datum und die Uhrzeit des Beginns der Bildaufnahme. Es wird im Format JJJJMMTT beschrieben, um den Tag anzuzeigen, gefolgt vom Format HHMMSS, um die Uhrzeit der Aufnahme anzuzeigen.

Datum und Uhrzeit der Beendigung steht für Datum und Uhrzeit, zu der die Erfassung beendet wurde.

Absolute Orbitalnummer gibt die absolute Orbitalnummer seit dem Start des Satelliten zum Zeitpunkt der Erfassung an. Sie ist für die Bahnidentifizierung und Korrekturberechnungen bei der Verarbeitung der erfassten Daten relevant. Die genaue Satellitenposition im Weltraum ist für die Messung von Verschiebungen unerlässlich, da kleine Abweichungen von den vorherigen Erfassungen die im Radarbild enthaltenen Phaseninformationen beeinflussen.

Produktformat bezieht sich auf den Standard, der für die Archivierung und Übermittlung der Produktdaten verwendet wird; bei den Sentinel-Produkten ist dies der SAFE"-Standard.

ID & Product unique Identifier bilden einen eindeutigen Code, der zur Identifizierung eines Produkts verwendet wird. Er wird durch einen Algorithmus erzeugt, der als Cyclic Redundancy Check (CRC)-16 bekannt ist. Der Code ist wichtig, um bestimmte Daten, die bei einer Verarbeitung verwendet werden, schnell zu identifizieren.

Einige weitere erwähnenswerte, noch nicht definierte Metadaten sind:

- **Sensor-Typ:** Charakterisieren Sie den Sensortyp, der für die Erfassung verwendet wird, z.B. optisch, Radar, höhenmetrisch und thermisch, um nur einige zu nennen.
- **Richtung der Umlaufbahn:** SAR-Satelliten umkreisen die Erde von Norden nach Süden ("absteigende" Umlaufbahn) und von Süden nach Norden ("aufsteigende" Umlaufbahn) und haben eine nahezu polare Umlaufbahn. Diese Metadaten beschreiben die Flugbahn des Satelliten zum Zeitpunkt der Aufnahme des Radarbildes. Es ist wichtig, die Ausrichtung der Radarbilder zu sortieren, damit sie später für die Verarbeitung richtig getrennt werden können – siehe Abb. 9.39.

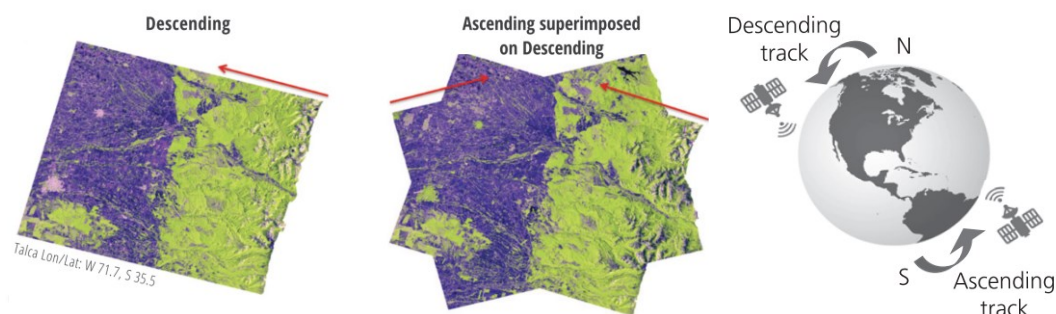


Abb. 9.39 Richtung der Umlaufbahn (vgl. [23],[28])

Daten-Ökosystem

Die im vorangegangenen Kapitel besprochenen Metadaten werden direkt verwendet, um auf geeignete Daten zuzugreifen, die im [Copernicus-Browser](#) (in Abb. 9.40) und [CREO-DIAS](#), neben anderen Plattformen, zur Verfügung gestellt werden. Wenn es jedoch um die Produkte der beitragenden Missionen geht, die auf [PANDA](#) verfügbar sind, sind einige Abweichungen von der oben dargestellten Diskussion zu erwarten, wobei jedoch die gleiche Logik verfolgt wird. Es versteht sich von selbst, dass die erfassten Daten georeferenziert sind und die Grenzen der interessierenden Gebiete leicht definiert werden können - siehe blaues Quadrat in Abb. 9.40. Die Region von Interesse kann über Städte und Länder hinaus definiert werden. Die folgenden bereits definierten Metadaten sind im [Copernicus-Browser](#) unter verschiedenen Namen verfügbar (siehe Abb. 9.40):

- Kennung der Mission → "Sentinel-Mission und Satellitenplattform".
- Produkttyp
- Richtung der Umlaufbahn
- Modus-Strahl-Kennung → "Erfassungsmodi"
- Polarisationskanäle → "Polarisation"
- Startzeitpunkt der Messung → "Zeitbereich: Von"
- Ende der Erfassungszeit → "Zeitbereich: Bis"

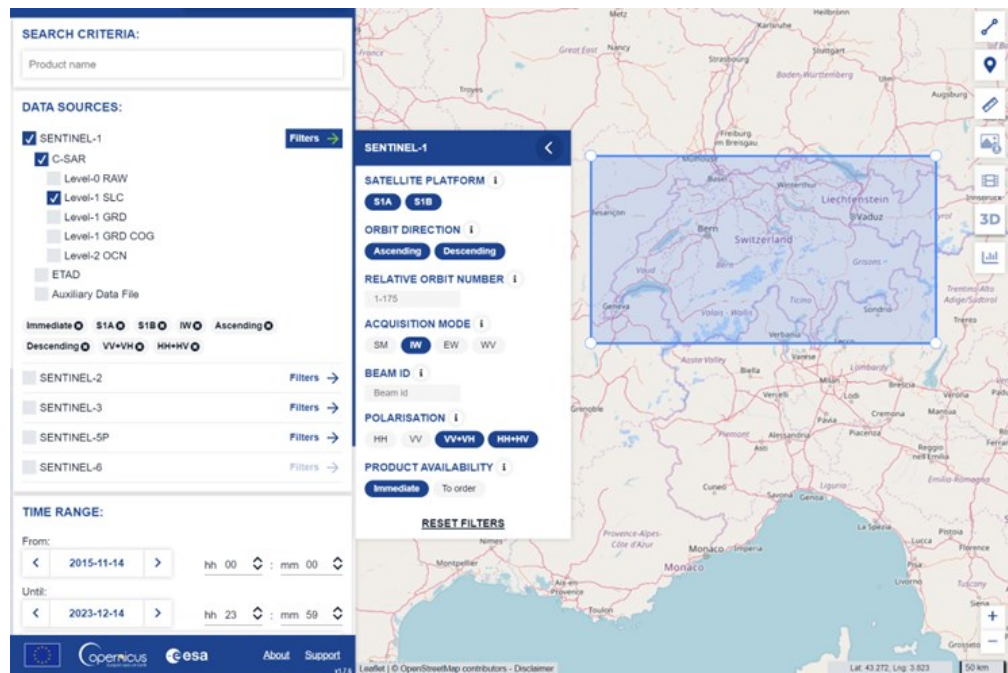


Abb. 9.40 Zusammenfassung der TerraSAR-X- und TanDEM-X-Konstellation [35]

Der Begriff der Metadaten wird auf vielen Ebenen verwendet, um die riesige Menge an erfassten Daten in jedem Erdbeobachtungsprogramm zu charakterisieren und die Archivierung und Übertragung von Informationen zu erleichtern. Viele dieser Daten sind für die Datenverarbeitung zur Gewinnung nützlicher Informationen unerlässlich. Die Auflistung aller Metadaten würde jedoch den Rahmen dieses Syntheseberichts sprengen. Die bereits besprochenen Metadaten reichen aus, um auf geeignete Daten zuzugreifen, die für die Zwecke der Verschiebungsmessung weiterverarbeitet werden können. Die aus dem Copernicus-Datenraum heruntergeladenen Produkte werden mit einer zusätzlichen XML-Datei geliefert, in der eine umfangreiche Liste von Metadaten mit den entsprechenden Werten für die einfache Verarbeitung und Implementierung von Algorithmen enthalten ist. Eine ausführliche Erörterung der Sentinel-1-Produkte und -Metadaten, die von der ESA zur Verfügung gestellt wurde, ist zu finden unter [36]. Für Erdbeobachtungsprodukte als Ganzes gilt der Standard des Open Geospatial Consortium (vgl. [37]), welches einen umfassenden Überblick bietet.

I.A.3 Verarbeitung

Interferometrisches SAR

InSAR ist eine Technik, mit der Verschiebungen auf der Erdoberfläche gemessen werden können, indem die Phaseninformationen von mindestens zwei Radarbildern subtrahiert werden, die zu unterschiedlichen Zeiten über demselben Gebiet aufgenommen wurden, wodurch ein interferometrisches Paar oder ein Interferogramm entsteht (siehe Abb. 9.41). Im Zusammenhang mit diesem Synthesebericht bezieht sich InSAR auf differentielles InSAR. Eine spezielle Klasse von differenziellem InSAR, die grosse Vorteile bietet, ist die Persistent Scatterer Interferometry (PSI), bei der mehrere Radarbilder über demselben Gebiet und ein geeigneter Algorithmus zur Ausnutzung persistenter Streuungen (PS) verwendet werden (vgl. [38]). Normalerweise werden für die SAR-Interferometrie 25 bis 30 SAR-Bilder empfohlen, um eine bessere Korrektur der atmosphärischen und orbitalen Fehler zu erreichen. PS-Punkte sind bestimmte Punkte innerhalb eines SAR-Bildpixels mit einer starken und konstanten Rückstreuung (d. h. einem reflektierten Signal) über mehrere SAR-Bilder, die über einen langen Zeitraum aufgenommen wurden, und eignen sich daher für eine zuverlässige Messung der Verschiebung im Zeitverlauf - siehe rote Punkte in Abb. 9.42. Die Auswahl der PS-Punkte hängt von drei Hauptmethoden ab, die auf (i) der Bewertung des Amplitudenstreuungsindex, (ii) der Phasenstabilität und Korrelationsmethoden und (iii) der Kohärenz der PS basieren. Die erste Methode wird jedoch als am besten geeignet für die Überwachung von Verkehrsinfrastrukturen angesehen, da sie die Punktdichte und die Möglichkeit der Identifizierung besonders stabiler Streuer für die Zielstruktur begünstigt und von geringeren Rechenkosten profitiert (vgl. [39]). Eine detaillierte Ausarbeitung dieser Methoden würde den Rahmen dieses Syntheseberichts sprengen.

Die gängigsten PSI-Methoden sind das Permanent Scatter InSAR (PSInSAR) und das Small Baseline Subset (SBAS). Nichtsdestotrotz sollten auch andere fortschrittliche Algorithmen erwähnt werden, z. B. Persistent Scatters Pairs (PSPs), SqueeSAR, Quasi-PSs (QPSs) und SAR-Tomographie (TomoSAR), neben anderen. Crosetto et al. [27] beschrieben etwa 20 verschiedene PSI-Ansätze. Jede dieser Techniken unterscheidet sich vor allem durch ihre Methoden zur Auswahl von persistenten Streuern (PS), Strategien zur Phasentrennung und Deformationsmodelle (vgl. [39]).

Die im Rahmen des Copernicus-Programms zur Verfügung gestellten und für die Interferometrie geeigneten Produkte sind in Tab. 9.31 und Anhänge I.C in der Spalte "Anwendung" mit der Bezeichnung "Interferometrie" aufgeführt.

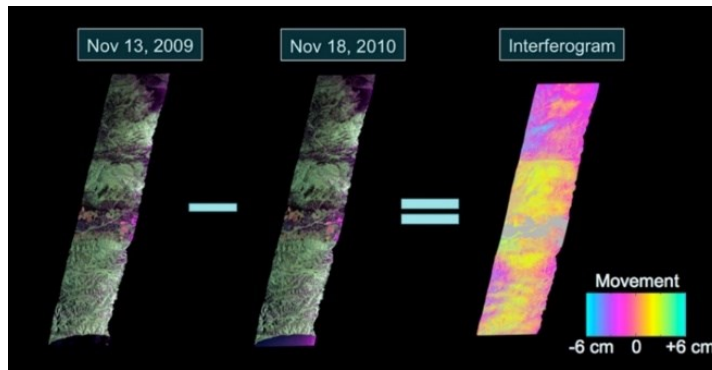


Abb. 9.41 Beispiel für ein Interferogramm [40]

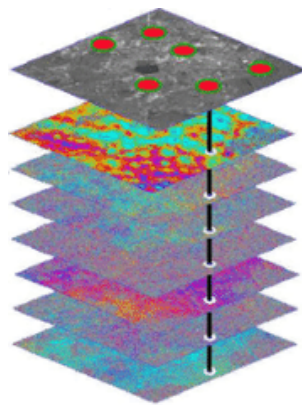
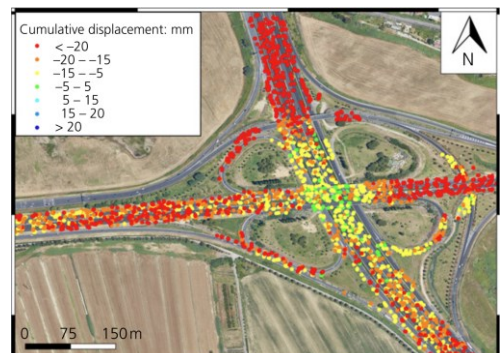


Abb. 9.42 Persistente Streuungen [39].

Zu Illustrationszwecken, Abb. 9.43 zeigt die PS-Dichte (farbliche Punkte), die anhand von Radarbildern mit unterschiedlichen Auflösungen aufgrund des Frequenzbandes des für die Aufnahme verwendeten SAR-Instruments, nämlich X-Band (von TerraSAR-X und COSMO-SkyMed) und C-Band (von Envisat), ermittelt wurde. Die Lage von PS-Punkten ist vor einer PSI-Analyse nicht bekannt. Diese Methode kann Punkte bzw. Objekte mit einer konstanten und gut signalreflektierenden Eigenschaft identifizieren und daraus lassen messbare Verformungen ableiten. Es werden somit Objekte mit einer ausreichend signalreflektierenden Eigenschaft benötigt, was nicht immer garantiert werden kann. Dieser Nachteil kann jedoch mit Instrumenten, die im X-Band-Frequenzbereich arbeiten, hochauflösenden Erfassungsmodi und künstlichen Eckreflektoren (CRs) ausgeglichen werden. Bei Letzteren handelt es sich um stromquellenfreie Geräte, die strategisch platziert werden können und in der Lage sind, eine gleichmäßige Rückstreuung in mehreren über einen langen Zeitraum aufgenommenen Radarbildern zu gewährleisten. Es ist zu beachten, dass die Verwendung von CRs auf Kosten des Verlustes einer breiten Netzabdeckung und früherer Erfassungen geht, da die breite Installation von CRs mühsam und kostspielig ist und vor ihrer Installation keine kontinuierliche, stabile Rückstreuung möglich ist.



Auftrag: TerraSAR -X



Auftrag: COSMO-SkyMed

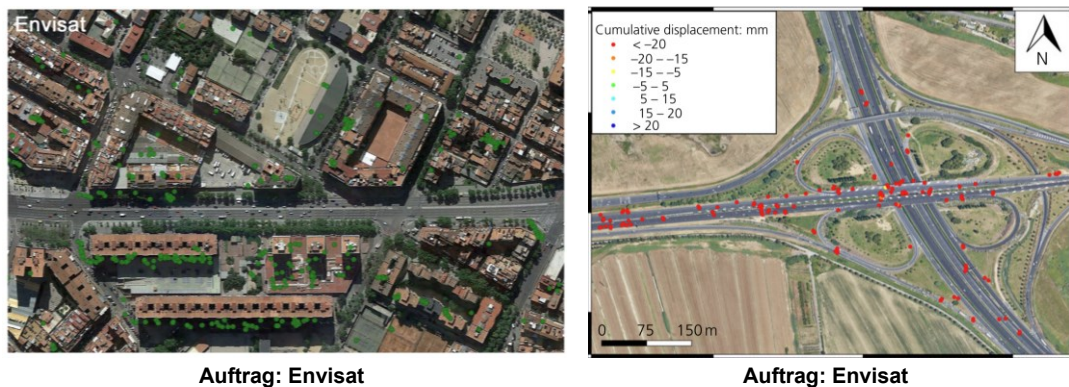


Abb. 9.43 PS auf der Grundlage des Auflösungsvermögens von SAR-Instrumenten (vgl. [27],[28])

Um den opportunistischen Charakter der SAR-Interferometrie weiter zu verdeutlichen, wird Abb. 9.44 eingeführt. Sie zeigt die PS, die über der A22-Po-Brücke mit 109 Radarbildern mit einer Auflösung von 3 x 3 m gewonnen wurden, die zwischen 2014 und 2021 im Stripmap HIMAGE-Erfassungsmodus der COSMO-SkyMed-Mission aufgenommen wurden. Die Trägerbrücke ist 980 m lang und 22,5 m breit. Von Abb. 9.44 kann man PS-Linien erkennen, welche die Leitplanken auf der Brücke aufzeigen. Leitplanken selbst haben selbst eine konstante und gut signalreflektierende Eigenschaft, daher die Konzentration von PS. Darüber hinaus ist das Vorhandensein von PS auf den Richtungsfahrbahnen aufgrund des Verkehrs nicht zu erwarten, so dass eine uneinheitliche Reflexion des Signals zwischen Fahrbahnoberfläche und Leitplanken gewährleistet ist. Ein guter Massstab für die erreichte Anzahl von PS, angesichts ihrer Konzentration über 3 Hauptreihen, ist 1 PS pro 3,6 m für eine der Reihen - optimistisch gemessen. Das angegebene Mass kann für verschiedene Brückenabschnitte in derselben Studie variieren, und noch mehr für Brücken mit besonderen Merkmalen (z. B. Hänge- und Schrägseilbrücken). Hänge- und Schrägseilbrücken sind besonders problematisch, da sie zwischen den Aufnahmen aufgrund von Wind, thermischer Ausdehnung und Verkehr Verschiebungen von mehr als einem Viertel der Wellenlänge von Mikrowellen erfahren. Darüber hinaus kann die Nichtlinearität der Verschiebungen, die die Brücke erfährt, problematisch sein (vgl. [41]).

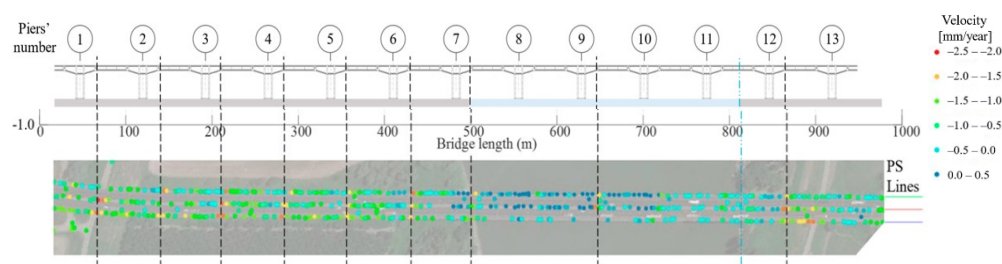


Abb. 9.44 PS über die Brücke über den Fluss A22 Po [42]

Bei der Analyse einer gemauerten Bogenbrücke, der "Old Bridge" in Aylesford in Kent, Grossbritannien, die eine Länge von 100 m und eine Breite von 4 m aufweist, Alani et al. [43] wurden nur 11 PS auf der gesamten Oberfläche der Brücke identifiziert – siehe Abb. 9.45. Dies ist hauptsächlich auf die geringe Auflösung (d. h. 5 x 20 m) der 12 in der Analyse berücksichtigten Radarbilder zurückzuführen, die zwischen 2015 und 2017 mit dem "Interferometric Wide Swath"-Aufnahmemodus von Sentinel-1 aufgenommen wurden. Es sei darauf hingewiesen, dass der Erfassungsmodus "Stripmap" von Sentinel-1 eine höhere PS-Dichte liefern würde, da er Radarbilder mit höherer Auflösung erzeugen kann, allerdings wird der Modus "Stripmap" nur in Ausnahmefällen zur Unterstützung des Notfallmanagements verwendet.

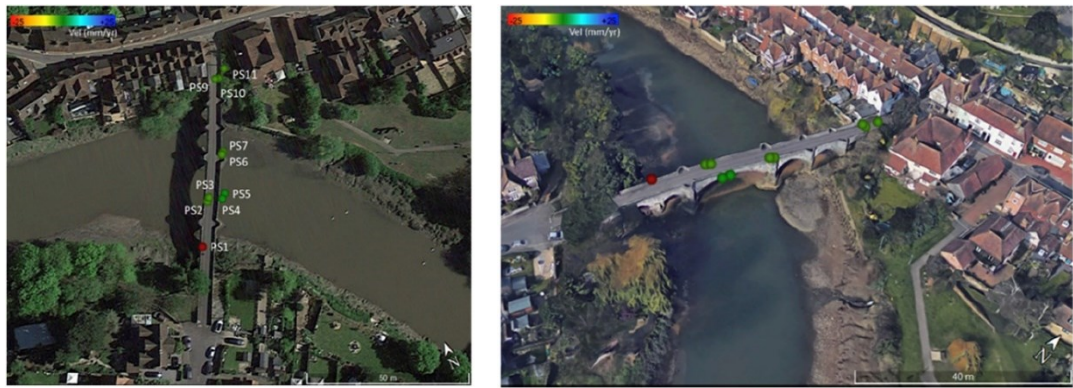


Abb. 9.45 PS auf der Old Bridge in Aylesford in Kent, UK [43]

Bei der Nutzung von Radarbildern mit der höchsten Auflösung, die durch den Spotlight Staring-Aufnahmemodus der Satelliten TerraSAR-X und TanDEM-X erreicht wird, der eine Auflösung von 0,25 x 0,25 m ermöglicht, ist die Dichte der PS (d. h. die Anzahl der PS pro Flächeneinheit) wesentlich höher. Grobe Schätzungen, die von Hoppe et al. [32] deuten darauf hin, dass im Gegensatz zu den Ergebnissen, die in Abb. 9.46 dargestellt sind, der Spotlight-Staring-Modus die Dichte der PS auf derselben Fläche um den Faktor 5 verbessern könnte. Betrachtet man die Anzahl der PS über einzelne Reihen, wurde eine Verbesserung um den Faktor 3 geschätzt. Hoppe et al. [32] berichteten über eine PS-Dichte in der Größenordnung von 1 PS pro 6 m² für einen Zeitraum von 1,3 Jahren. Es sei darauf hingewiesen, dass es sich hierbei um grobe Schätzungen handelt und ein besserer Überblick über den Einfluss der Erfassungsmodi auf die PS-Dichte gewonnen werden könnte, wenn dieselbe Brücke über denselben Zeitraum unter Berücksichtigung verschiedener Erfassungsmodi vom selben Satelliten untersucht wird. Die Verarbeitungssoftware wirkt sich ebenfalls auf die Dichte der aus denselben Bildern gewonnenen PS aus. Sadeghi et al. [44] berichteten über eine Verbesserung der PS-Dichte um den Faktor 7 in Abhängigkeit von der für die Verarbeitung verwendeten kommerziellen und Open-Source-Software. Die Dichte der PS, die mit dem Spotlight-Staring-Modus über der Eltham-Brücke ermittelt wurde, ist in Abb. 9.46 ersichtlich. Die Brücke ist 20,7 m breit und die Länge zwischen den beiden roten Linien in Abb. 9.46 beträgt 265 m - diese Angaben dienen dazu, den Massstab der Abbildung festzulegen. Außerdem werden die PS in Abb. 9.46 entsprechend ihrer geschätzten Verschiebung farbig dargestellt, wobei gelbliche PS eine Verschiebung nach unten und bläuliche PS eine Verschiebung nach oben anzeigen

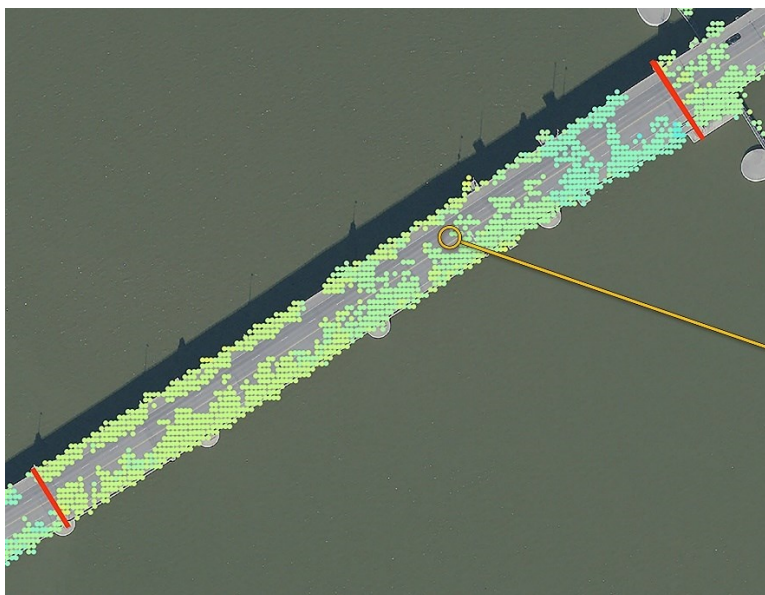


Abb. 9.46 Über der Eltham-Brücke erzielte PS [32]

Auch andere Faktoren können die Verfügbarkeit von PS beeinträchtigen, nämlich Strassenrenovierungen, Bauarbeiten, Schnee und Überschwemmungen - je nach Dauer des Ereignisses. Dies ist vor allem deshalb der Fall, weil die stabile Reflexion vieler PS beeinträchtigt ist. Nichtsdestotrotz können Methoden wie QPS mit PS umgehen, die nur für einen begrenzten Zeitraum verfügbar sind (vgl. [28]). Eine ausführliche Diskussion über die Grenzen der PSI-Techniken und deren Überwindung wurde zusammengefasst von Macchiarulo et al. [45], Milillo et al. [41], und Crosetto et al. [27], unter anderem.

Software

Für die Weiterverarbeitung von Level-1-Produkten, die von den verschiedenen SAR-Instrumentenmissionen zur Verfügung gestellt werden, stehen mehrere Open-Source-Programme zur Verfügung, die die Berechnung von Interferogrammen für die Messung von Verschiebungen ermöglichen. Die folgende Software ist im Folgenden aufgeführt:

- [PolSARpro](#): Polarimetrische SAR-Datenverarbeitung und Bildungs-Toolbox
- [SNAP](#): Sentinel-Anwendungsplattform
 - [ST1BX](#): Sentinel-1 Werkzeugkasten
 - [SNAPHU](#): Netzwerk-Fluss-Algorithmus mit statistischen Kosten für die Phasentrennung
- [ASF MapReady](#): Alaska Satellite Facility Map Ready
- [SARbian OS](#): SAR-Betriebssystem
- [DORIS](#): Delft Objektorientierte RADAR Interferometrische Software
- [ISCE](#): Wissenschaftliche Berechnungsumgebung InSAR
- [GMTSAR](#): Ein InSAR-Verarbeitungssystem auf der Grundlage von GMT
- [ROI_PAC](#): Paket für wiederholte Orbit-Interferometrie
- [PyRAT](#): Python-Werkzeuge zur Radaranalyse
- [StaMPS](#): Stanford-Methode für persistente Streuer
- [ASF HYP3](#): Alaska Satellite Facility's Hybrid Pluggable Processing Pipeline

Es ist zu beachten, dass die oben aufgelistete Software keine Komplettlösung für die Wegmessung darstellt, sondern eher Teile der Lösung, die sorgfältig genutzt werden sollten. Diese wurden hier aufgelistet, um einen Überblick über den Reifegrad des Open-Source-Softwaremarktes zu geben. Eine in der Literatur häufig verwendete Kombination ist [SNAP](#) und [StaMPS](#). Was die Kompatibilität mit instrumentierten SAR-Missionen wie Sentinel-1, COSMO-SkyMed, TerraSAR-X und TanDEM-X angeht, so sind die Software [ST1BX](#), [GMTSAR](#), [ISCE](#), [SARbian OS](#) und [PolSARpro](#) mit allen gleichzeitig kompatibel. Die übrigen sind ausschliesslich mit bestimmten SAR-instrumentierten Satelliten kompatibel. Die Besonderheiten der einzelnen Programme sind zwar relevant, würden aber den Rahmen dieses Syntheseberichts sprengen.

I.A.4 Anwendungen

Forschungsprojekte

BIMSAR (Feb 2021 - Jan 2023)

BIMSAR ist ein Forschungs- und Entwicklungsprojekt, das die Überwachung der Bewegung von Gebäuden und Infrastrukturen durch die Zusammenführung von Gebäudeinformationsmodellen (BIM), Photogrammetrie und weltraumgestützten SAR-Daten beinhaltet. Eine innovative Kombination von KI-Methoden und modellbasierten Datenanalyseverfahren stand dabei im Mittelpunkt. Geeignete Bilder von TerraSAR-X wurden von der Universität Stuttgart und EFTAS (Fernerkundung Technologietransfer) zur Verfügung gestellt. Für die Verschiebungsmessung wurde die PSI-Methode verwendet. Darüber hinaus wurde die Bodenbewegung auch anhand von Sentinel-1-Radarbildern bewertet. Abb. 9.47 zeigt die entwickelte webbasierte Plattform mit den aufgezeichneten Verschiebungen für die Fallstudie, die über ein einfaches BIM-Modell verbreitet werden. Es ist zu erkennen, dass sich bestimmte Teile des Bauwerks mit höherer Geschwindigkeit bewegen. Die Projektergebnisse und die entwickelten webbasierten Plattformen sind unter <https://bimsar.eftas.services/> verfügbar.

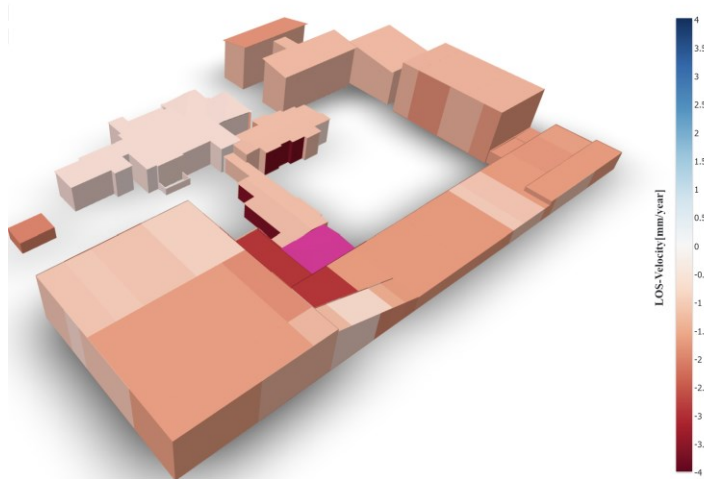


Abb. 9.47 BIMSAR-Plattform [46]

SENBRIDGE (Juni 2021 - Mai 2023)

SENBRIDGE zielt darauf ab, zu verstehen, wie Verformungsmessungen von Brücken mit Hilfe geeigneter Sensoren und Sentinel-Satellitendaten aus dem Copernicus-Programm verbessert werden können. Die Schottwiener Brücke wurde als Fallstudie für eine spätere Verallgemeinerung auf das Netzwerk, d.h. eine netzweite Anwendung, verwendet. Es wurden auch einige Erkenntnisse über die Einflussfaktoren auf die Deformationsmessung gewonnen und Vorschläge zur Verbesserung der Ergebnisse aufgezählt, nämlich:

- Verwendung von CRs zur Kontrolle der Verformung diskreter Punkte und zur Verbesserung der Zuordnung von Punkten in jedem SAR-Bild,
- Optimierung der Datenverarbeitung,
- Verbesserung der Berücksichtigung täglicher und saisonaler Strukturverformungen aufgrund von Temperaturschwankungen,
- Kombination verschiedener Sensoren und Methoden, um Fehler zu reduzieren und die Auflösung zu erhöhen.

Die auf die Sentinel-Daten angewandte PSI-Methode wurde als geeignet für eine kontinuierliche Überwachung angesehen. Im Vergleich zu anderen SAR-Missionen bietet Sentinel-1 grössere Vorteile in Bezug auf Kosten und historische Archive. Das Projekt wurde von der ASFINAG in Auftrag gegeben. Eine weitere Beschreibung des Projekts findet sich unter <https://www.ait.ac.at/en/research-topics/structural-dynamics-and-assessment/projects/senbridge>.

EO4Infrastrukturen (Nov 2022 - laufend)

Das Hauptziel des EO4Infrastructure-Projekts besteht darin, aufzuzeigen, wie Copernicus-Dienste in Verbindung mit anderen Erdbeobachtungsprodukten und In-situ-Tests den deutschen, französischen und italienischen Bahnbetreibern, d. h. RFI, SNCF und DB NETZE, greifbare Vorteile bringen können. Zu diesem Zweck wurden im Rahmen des Projekts verschiedene Produkte aus dem Copernicus-Programm in die Überwachungssysteme der Bahnbetreiber integriert. Das CLMS, das auf den Radarbildern von Sentinel-1 und den optischen Bildern von Sentinel-2 basiert, war Teil des entwickelten Basisprodukts, ebenso wie die hochauflösenden Bilder von TerraSAR-X und COSMO-SkyMed. Die Anforderungen der Endnutzer wurden nach verschiedenen Interessensgebieten zusammengefasst, z. B. Überwachung von Böschungen und Dämmen, Überwachung des Eindringens von Vegetation, Minderung des Hochwasserrisikos und Überwachung von Brücken. Die Implementierung, Validierung und Demonstration ermöglichten die Klärung der Vorteile der entwickelten Produkte und ihrer Grenzen entsprechend den Anforderungen der Nutzer. Der Abschlussbericht des Projekts ist unter <https://eo4society.esa.int/projects/infrastructure-mapping-and-planning/> verfügbar.

LEVANGO (Sep 2019 - Aug 2021)

Das LEVANGO-Projekt zielt auf die langfristige Überwachung und Bestimmung kritischer Bauzustände von Verkehrswegen ab. TerraSAR-X und TanDEM-X wurden zusammen mit den Sentinel-1-Satelliten eingesetzt, um Veränderungen wie Setzungen und Verschiebungen an der Oberfläche einer Brücke durch interferometrische Auswertungen zu erkennen. Lokale Messdaten, die Teil der Online-Strukturüberwachung einer Brücke sind, werden mit Weltraummessungen in einem statischen Risikomodell kombiniert, um zuverlässige Überwachungsmöglichkeiten zu erhalten, die Gefahrenpotenziale charakterisieren oder als Frühwarnsystem in grossem Massstab eingesetzt werden können. Beteiligte Institutionen waren die Airbus D&S GmbH, die Technische Universität Berlin und die AllTerra Deutschland GmbH. Eine weitere Beschreibung des Projekts findet sich unter <https://www.dlr-in-nospace.de/projekt/levango-langzeitueberwachung-und-ermittlung-kritischer-bauwerkszustaende-von-verkehrswegen-durch-analyse-von-geodaten/>.

ROAD-DL

Das Projekt ROAD-DL zielt auf die Entwicklung eines Klassifizierers für den Strassenzustand ab, der Deep-Learning-Techniken auf SAR-Bilder anwendet. Anders ausgedrückt: Das Hauptziel des Projekts ist die Bewertung des Strassenzustands auf der Grundlage von SAR-Bildern durch die Bereitstellung einer aktualisierten Klassifizierung spezifischer Merkmale, die zur Auslösung von Wartungs- und Inspektionsmassnahmen verwendet werden können. Das Projekt wird durch Sentinel-1 SAR-Bilder unterstützt. Telespazio UK testete einen Deep-Learning-Ansatz, bei dem die gesammelten Zustandsparameter der nationalen Autobahnen verwendet wurden, um das neuronale Netz zur Erkennung beschädigter und verfallener Strassennetze zu trainieren. Die lernenden Klassifikatoren wurden trainiert und später mit unabhängigen In-Situ-Laserscanner-Messdaten validiert. Eine weitere Beschreibung des Projekts findet sich unter <https://eo4society.esa.int/projects/road-dl/>.

Veröffentlichungen zur Forschung

Milillo et al. [47] untersuchten die Verformungen der Morandi-Brücke vor dem Einsturz mittels InSAR. Die Analyse umfasste mehrere Jahre der relativen Verschiebung der Brücke vor ihrem Einsturz. Die Studie stützte sich auf SAR-Bilder von COSMO-SkyMed, Envisat und der Sentinel-1-Mission, die zwischen 2003 und 2018 aufgenommen wurden. Genauer gesagt handelt es sich um 130 bzw. 148 Bilder in aufsteigender bzw. absteigender Umlaufbahn von COSMO-SkyMed, die zwischen 2009 und 2018 aufgenommen wurden, 134 bzw. 136 Bilder in aufsteigender bzw. absteigender Umlaufbahn von Sentinel-1, die zwischen 2015 und 2018 aufgenommen wurden, und 34 Bilder in aufsteigender bzw. absteigender Umlaufbahn von Envisat, die zwischen 2003 und 2011 aufgenommen wurden. Es wurde eine zunehmende Verformung über den betrachteten Zeitraum beobachtet, wobei sich die Verformung in den letzten beiden Jahren vor dem Kollaps beschleunigte (vgl. Abb. 9.48). Die Studie kommt zu dem Schluss, dass weltraumgestützte Messungen inzwischen ausgereift genug sind, um Verformungen im Millimeterbereich zuverlässig zu beobachten, was die Überwachung von Infrastrukturen grossen Ausmasses ermöglicht. Es ist jedoch anzumerken, dass Anpassungen der Standardverfahren erforderlich waren, um bestimmte Besonderheiten dieser speziellen Brücke zu berücksichtigen, nämlich erhebliche Schwingungen (in Bezug auf die Wellenlängen), die durch Wind, Verkehr und Temperatur verursacht werden, da das Deck flexibel ist [41].

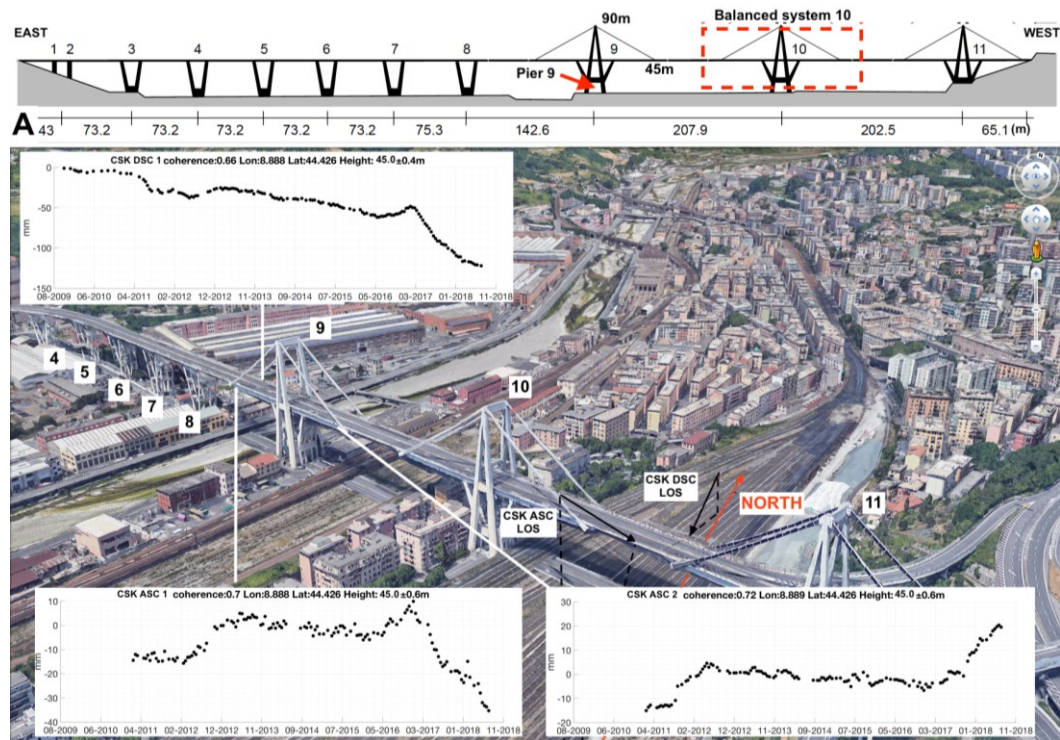


Abb. 9.48 Aufgezeichnete Bewegungen auf der Morandi-Brücke vor ihrem Einsturz [47]

Selvakumaran et al. [48] präsentierten die Ergebnisse der satellitengestützten Überwachung der Hammersmith-Überführung in London durch die Verarbeitung von Radarbildern der Missionen Sentinel-1 und COSMO-SkyMed. Die InSAR-Messungen wurden mit In-situ-Sensormessungen (d. h. LVDTs) validiert, was die Genauigkeit der Satellitenmessungen beweist – siehe Abb. 9.49. Die thermische Ausdehnung und Kontraktion der Brücke zeigte eine gute Korrelation mit den jahreszeitlichen Temperaturschwankungen. Die Ausrichtung der Hammersmith-Überführung ist für Satellitenmessungen günstig, da die angestrebte Verschiebungsmessung in West-Ost-Richtung erfolgt. Angesichts der nahezu polaren Umlaufbahn und der seitlichen Ausrichtung von SAR-Satelliten ist die Messung von Verschiebungen in Nord-Süd-Richtung problematisch.

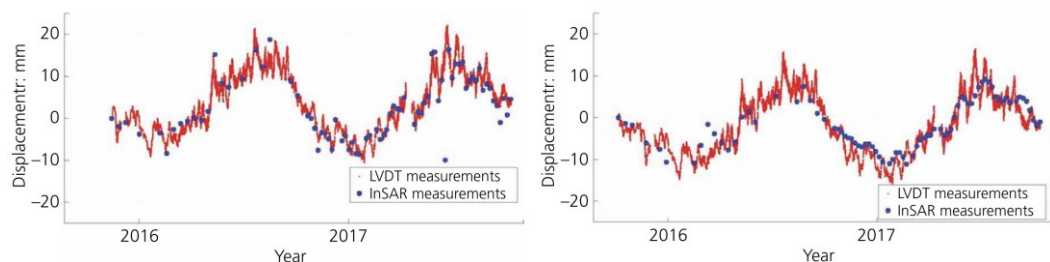


Abb. 9.49 LVDT-Messungen gegen InSAR-Messungen [48]

Scoular et al. [49] untersucht retrospektiv die Deformationsmuster im Osten Londons während des Baus des Lee-Tunnels, wobei u. a. Radarbildarchive des Europäischen Fernerkundungssatelliten (ERS) verwendet werden, die acht Jahre zurückreichen. Unerwartete geologische Merkmale, die während des Tunnelbaus entdeckt wurden, hätten erkannt werden können, wenn die SAR-Bilder vor dem Start der Tunnelbohrmaschine analysiert worden wären. Die analysierten Radarbilder bestätigten langfristige Deformationsmuster und unerwartete geologische Merkmale, die später vor Ort bestätigt wurden. Darüber hinaus zeigten die Ergebnisse unterschiedliche Besiedlungsmuster für Gebiete mit unterschiedlichen Landnutzungen, wie Friedhöfe, historische Deponien und Wohngebiete.

In den letzten 20 Jahren hat der ausgereifte Stand der Technik gezeigt, dass InSAR die

Verformungen von Objekten genau erkennen kann. Die kurze Wiederholungszeit, die Genauigkeit und die räumliche Dichte der Messungen machen die weltraumgestützte Fernerkundung zu einer kosteneffizienten Überwachungslösung nahezu in Echtzeit [50]. Bei grossflächiger Anwendung kann es jedoch recht zeitaufwändig sein, die benötigten Informationen manuell zu erfassen. Als solches stellt Macchiarulo et al [45] eine vollautomatische Methode vor, die geografische Informationssysteme, Infrastrukturinventare und InSAR-Analysen für Frühwarndienste im italienischen Verkehrsnetz integriert. Es versteht sich von selbst, dass eine solch breite Abdeckung auf Kosten der Präzision und Zuverlässigkeit der Messungen geht.

Eine ausführliche Zusammenstellung von Veröffentlichungen zur Signaturforschung findet sich in Anhänge I.E dargestellt, wobei die verwendeten SAR-Missionen und Erfassungsmodi, das Zeitintervall der Analyse, die Menge der verwendeten SAR-Bilder und die für die Verarbeitung verwendete kommerzielle/offene Software hervorgehoben werden.

I.B Beitragende Missionen des Copernicus Projekts

Dieser Anhang gibt einen Überblick über die aktuellen und kommenden beitragenden Copernicus-Missionen (CCM) in Abb. 9.50.



Abb. 9.50 Die an Copernicus beteiligten Missionen [22] Mit SAR-Instrumenten ausgerüstete Missionen des Copernicus Projekts

I.C Zusammenfassung der SAR-instrumentierten Missionen

Der in diesem Anhang gegebene Überblick über die instrumentierten SAR-Satelliten geht über die Copernicus-Missionen hinaus - siehe Tab. 9.32. Eine anschaulichere Zusammenfassung der Merkmale der einzelnen Missionen ist zu finden unter: <https://earth.esa.int/eogateway/missions> und <https://www.eoportal.org/satellite-missions>.

Tab. 9.32 Überblick über SAR-Instrumentenkonstellationen (angepasst aus [23])

Mission 1 st und 2 nd Generation	Satelliten	Einsatzzeit	Frequenz/ Wellenlänge	Polarisierung	Aufnahmemodus: Auflösung	Zyklus wie- derholen	Bezeichnung der Produkte (L1)	Anwendungen	Zugang
Seasat	Seasat	1978	L-Band $\lambda = 24,6$ cm	HH	Nicht definiert: 25x25 m	-	L1 HDF5 Bild L1 GeoTIFF	Vis. Karte. ChD ¹ Vis. Karte. ChD	Frei & offen
ERS-1	ERS-1	1991-2000	C-Band $\lambda = 5,6$ cm	VV	Bildmodus: 6x26 m Wellen-Modus: 30x26 m	35 Tage	L1 Bild	Vis. Karte. ChD	Zurückhaltend
JERS-1	JERS-1	1992-1998	L-Band $\lambda = 24,6$ cm	HH	Nicht definiert: 20 x 23 m	44 Tage	L1 Bild	Vis. Karte. Ch	Zurückhaltend
ERS-2	ERS-2	1995-2011	C-Band $\lambda = 5,6$ cm	VV	Bildmodus: 6x26 m Wellen-Modus: 30x26 m	35 Tage	L1 Bild	Vis. Karte. ChD	Zurückhaltend
Radarsat-1	Radarsat-1	1995-2013	C-Band $\lambda = 5,6$ cm	HH	Standard: 25x28 m Fein: 9x9 m Breite1: 35x28 m Breite2: 35x28 m ScanSAR: 50x50-100x100 m	24 Tage	L1 Bild	Vis. Karte. ChD	1995-2008: Zurückhaltend 2008-2013: Kommerziell
ENVISAT	ENVISAT	2002-2012	C-Band $\lambda = 5,6$ cm	HH, VV, VV/HH, HH/HV, VV/VH	Bild: <30m Welle: <10 m Breite Streifen: 150 m Globale Überwachung: 1 km	35 Tage	L1 Bild	Vis. Karte. ChD	Zurückhaltend
ALOS	ALOS	2006-2011	L-Band $\lambda = 24,6$ cm	FBS: HH, VV FBD: HH/HV, HH/VH PLR: HH/HV /VH/VV ScanSAR: HH, VV	Feiner Strahl S: 10x10 m Feiner Strahl D: 20x10 m Polarimetrie: 30x10 m ScanSAR: 100 m	46 Tage	L1.1 Komplex L1.5	Interferometrie Vis. Karte. ChD	Frei & offen
COSMO-Sky-Med (1st Generation)	CSK-1 CSK-2 CSK-3 CSK-4	2007-	X-Band $\lambda = 3,5$ cm	Einzel: HH, VV, HV, VH Zweifach: HH/HV, HH/VV, VV/VH	Scheinwerfer: ≤ 1 m Streifenkarte: 3-15 m ScanSAR: 30-100 m	Satellit: 16 Tage Konstellation: ≈ 4 Tage	L1 SLC ² L1B MDG ³ L1C GEC ⁴ L1D GTC ⁵	Interferometrie Vis. Karte. ChD	Kommerziell; begrenzt für wissenschaftliche Zwecke

Mission 1 st und 2 nd Generation	Satelliten	Einsatzzeit	Frequenz/ Wellenlänge	Polarisierung	Aufnahmemodus: Auflösung	Zyklus wie- derholen	Bezeichnung der Produkte (L1)	Anwendungen	Zugang
Radarsat-2	Radarsat-2	2007-	C-Band $\lambda = 5,6$ cm	Einzel: HH, VV, HV, VH Zweifach: HH/HV, VV/VH Quad: HH/HV/VH/VV	Scheinwerfer: ~1,5 m Streifenkarte: ~3x3- 25x25 m ScanSAR: 35x35- 100x100 m	24 Tage	L1 SLC L1 Boden Reichweite L1 Geokorri- giert	Interferometrie Vis. Karte, ChD	Kommerziell
TerraSAR-X (TDX)	TerraSAR-X TanDEM-X	2010-	X-Band $\lambda = 3,5$ cm	Einzel: HH, VV Zweifach: HH/VV, HH/HV, VV/VH Zwilling: HH/VV, HH/VH, VV/VH	Scheinwerfer: 0,2x1,0-1,7x3,5 m Streifenkarte: 3x3 m ScanSAR: 18-40 m	11 Tage	L1 SSC ⁶ L1 MGD ⁷ L1 GEC L1 EEC ⁸	Interferometrie Vis. Karte, ChD	Kommerziell; Be- grenzt für wissen- schaftliche Zwecke
KOMPSAT-5	KOMPSAT-5	2013-2022	X-Band	Einzel: HH, HV, VH, VV	Spot SAR: 1 m Standard: 3 m Breite Schwade: 20 m	Satellit: 28 Tage	L1A – SCS ⁹ L1C - GEC L1D - GTC	Interferometrie Vis. Karte, ChD	Kommerziell; be- grenzt für wissen- schaftliche Zwecke
ALOS-2 PALSAR-2	ALOS-2	2014-	L-Band $\lambda = 24,6$ cm	Einzel: HH, VV, HV, VH Zweifach: HH/HV, VV/VH Quad: HH/HV/VH/VV	Scheinwerfer: 1x3 m Streifenkarte: 3-10 m ScanSAR: 25-100 m	14 Tage	L1.1 SLC L1.5 SSC	Interferometrie Vis. Karte, ChD	Kommerziell; Be- grenzt für wissen- schaftliche Zwecke
Sentinel -1	Sentinel-1A Sentinel-1B Sentinel-1C	2014-	C-Band $\lambda = 5,6$ cm	Einzel: HH, VV Zweifach: HH/HV, VV/VH	Streifenkarte: 5x5m Interferometrischer Breitstreifen (IW): 5x20 m Extra breite Schwade (EW): 20-40 m	Satellit: Tage Konstellation: 6 Tage	L1 SLC L1 Erkennt Hochauflö- send Single- & Dual-Pol L1 Erkannte Einzel- & Dual-Pol	Interferometrie Vis. Karte, ChD	Frei & offen
SAOCOM	SAOCOM-1A SAOCOM-1B	2018-	L-Band $\lambda = 24,6$ cm	Einzel: HH, VV Zweifach: HH/HV, VV/VH Quad: HH/HV/VH/VV	Streifenkarte: 10x10 m TopSAR: 100x100 m	Satellit: Tage Konstellation: 8 Tage	L1A SLC L1B DJ ¹⁰ L1C GEC L1D GTC	Interferometrie Vis. Karte, ChD	Frei & offen
PAZ SAR	PAZ SAR	2018-	X-Band $\lambda = 3,5$ cm	*Siehe TerraSAR	*Siehe TerraSAR	11 Tage	*Siehe Terra-SAR	*Siehe Terra-SAR	Kommerziell

Mission 1 st und 2 nd Generation	Satelliten	Einsatzzeit	Frequenz/ Wellenlänge	Polarisierung	Auflösung	Aufnahmmodus:	Zyklus wie- derholen	Bezeichnung der Produkte (L1)	Anwendungen	Zugang
ICEYE	30 Satelliten ab 11/2023	2018-	X-Band $\lambda = 3,5$ cm	Einzel: VV	Spot-Modus: 1x1 m Strip-Modus: 3x3 m Scan-Modus: < 15 x < 15 m	Spot Erweiterter Bereich: 1x1 m Verweilzeit-Modus: 1x1 m	Satellit: 17 Tage Konstellation: < 24 Stunden	L1 SLC	Interferometrie	Kommerziell; begrenzt für wissenschaftliche Zwecke
								L1 GRD ¹¹	Vis. Karte. ChD	
COSMO-Sky-Med (2nd Generation)	CSG-1 CSG-2 Noch zu starten CSG-3 CSG-4	2019-	X-Band $\lambda = 3,5$ cm	Einzel: HH, VV Zweifach: HH/VH, HV/VV Quad: HH/VH/HV/VV	Spotlight: 0,3 x 0,5 m - 0,8 x 0,8 m Stripmap: 3 x 3 m Pingpong: 12 x 5 m Quad Pol: 3 x 3 m ScanSAR: 20 x 4 m & 40 x 6m		Satellit: 16 Tage Konstellation: ≈ 4 Tage	L1A SCS	Interferometrie	
								L1B DGM ¹²	Vis. Karte. ChD	
								L1C GEC		Kommerziell; Begrenzt für wissenschaftliche Zwecke
								L1D GTC		
RADARSAT-Konstellation (RCM)	RCM-1 RCM-2 RCM-3	2019-	C-Band $\lambda = 5,6$ cm	Einzel: HH, VV, VH, HV Zweifach: HH/HV, VV/VH, HH/VV Quad: HH/VV/HV/VH unter anderem	Fein: 8x8 m Erweitert: 24x24m Standard: 24x24 m Breite: 24x24 m ScanSAR schmal: 60x60 m ScanSAR breit: 100x100 m		Satellit: 12 Tage Konstellation: 4 Tage	L1 SLC	Interferometrie	
								L1 GRD	Vis. Karte. ChD	
								L1 GRC ¹³		Kommerziell; Begrenzt für wissenschaftliche Zwecke
								L1 GCD ¹⁴		
NISAR	NISAR	2024 (Geplant)	L-Band $\lambda = 24,6$ cm S-Band $\lambda = 12,0$ cm	Einzel: HH, VV, VH, HV Zweifach: HH/HV, VV/VH, HH/VV Quad: HH/HV/HV/VV unter anderem	Nicht definiert: 3-10 m (abhängig vom Modus)		12 Tage	L1 RSLC ¹⁵	Interferometrie	
								-L1 RIFG ¹⁶ -L1 RUNW ¹⁷ -L1 ROFF ¹⁸	Interferometrisches Produkt von L1 RSLC	Frei & offen
BIOMASS	Biomasse	03/2025 (Geplant)	P-Band $\lambda = 70,0$ cm	-	Nicht definiert: $\leq 60 \times 50$ m		17 Tage	-	-	Frei & offen
TanDEM-L	2 Satelliten werden erwartet	Ende 2028 (Geplant)	L-Band $\lambda = 24,6$ cm	Einzel-, Doppel- und Vierfachmodus	Es ist eine große Bandbreite an Aufhebungen vorgesehen, die von 5-100 m		Satellit: 16 Tage Konstellation: 8 Tage	L1A SSC	Interferometrie	
								L1A CoBISS + 8 andere Produkte	Interferometrie Vis. Karte. ChD ¹	Frei & offen

¹Vis. Karte. ChD - Visual Mapping and Change Detection; ²SLC - Single Look Complex; ³MCD - Multi Look Ground Range Detected; ⁴GEC - Geocoded Ellipsoid Corrected; ⁵GTC - Geocoded Terrain Corrected; ⁶SSC - Single Look Slant Range Complex; ⁷MGD - Detected Ground Multi-look; ⁸EEC - Enhanced Ellipsoid Corrected; ⁹SCS - Single Look Complex Slant; ¹⁰DI - Detected Image; ¹¹GRD - Ground Range Detected; ¹²DGM - Multi-look Detected Ground Range; ¹³GRC - Ground Range Georeferenced Complex; ¹⁴GCD - GeoCoded Detected; ¹⁵RSLC - Range Doppler Single Look Complex; ¹⁶RIFG - Range Doppler Wrapped Interferogram; ¹⁷RUNW - Range Doppler Unwrapped Interferogram; ¹⁸ROFF - Range Doppler Pixel Offsets.

I.D Kommerzielle Kosten von SAR-Bildern

In diesem Anhang werden die kommerziellen Kosten von SAR-Bildern je nach Auftrag, Erfassungsmodus, Streifenbreite und Auflösung zusammengefasst – siehe Tab. 9.33.

Tab. 9.33 Preis pro Bild für Radarbilder (angepasst aus [51])

Mission	Erfassungsmodus	Streifenbreite	Auflösung	Preis pro Bild
Sentinel - 1	Streifenkarte	80 km	5x5 m	KOSTENLOS
	Interferometrisch Breite Streifen	250 km	5x20 m	KOSTENLOS
	Extra-breite Streifen	410 km	20x40 m	KOSTENLOS
	Welle	20 km	5x5 m	KOSTENLOS
TerraSAR-X und PAZ	Spotlight	4 km	Bis zu 0,25x0,25 m	EUR 2125 - 3475
	Streifenkarte	30 km	3x3 m	EUR ≈ 1475
	ScanSAR	100 km	16x16 m	EUR ≈ 875
COSMO-SkyMed	Spotlight	10 km	1x1 m	EUR ≈ 650
	Streifenkarte	30 km	3x3 m	EUR ≈ 300
	ScanSAR	100 km	30x30 m	
RADARSAT-2	Spotlight	18 km	Bis zu 1.3x0.4 m	EUR 3500 - 3900
	Streifenkarte	125 km	Bis zu 2.7x2.9 m	EUR 2700 - 5050
	ScanSAR	500 km	50x50 m	2350 EURO
ALOS-2	Spotlight	10 km	1x3 m	EUR≈ 3200
	Streifenkarte	70 km	3x3 m	EUR≈ 1900
	ScanSAR	350 km	100x100 m	EUR≈ 650

I.E Übersicht über Forschungspublikationen

Dieser Anhang gibt einen Überblick über mehrere Veröffentlichungen, die für die in diesem Synthesebericht geführte Diskussion als relevant angesehen werden – siehe Tab. 9.34. Eine umfangreichere, aber weniger detaillierte Zusammenstellung der in der Literatur verfügbaren InSAR-Anwendungen findet sich in Crosetto et al. [27], Macchiarulo et al. [45], Gagliardi et al. [39] die sich mit der Überwachung von Erdrutschen, Brücken, Dämmen und Gebäuden befassen.

Tab. 9.34 Kurze Zusammenfassung der Literatur

Tab. 9.34 Kurze Zusammenfassung der Literatur								
Objektklasse	Titel		Auftrag & Acq. Modus	Zeitintervall & Auflösung	Anzahl der Bilder & Standort	Software	PSI-Technik	Referenzen
Brücken	Bewertung vor dem Versagen	Multitemporale SAR-Interferometrie zeigt Beschleunigung des Brückensinkens vor dem Einsturz	ERS-1/2	1992-2000	52 Abst., Portugal	StaMPS-MTI	PSI und SB	[52]
			-	-	-	-	-	-
			TerraSAR-X Streifenkarte	2014-2015 3x3m	48 Aufst. England	SARscape	SBAS	[53]
		Weltraumgeodätische Beobachtungen kritischer Infrastrukturen vor dem Kollaps: Die Mond-Brücke, Genua, Italien	COSMO-SkyMed Streifenkarte	2009-2018 3x3m	130 Aufst. 145 Abst. Italien	Angepasst SARPROZ	PSI MCMC	[47]
			Sentinel-1 Interferometrische Breitschwingung	2015-2018 5x20m	134 Aufst. 136 Desc. Italien	-	-	-
			Envisat	2003-2011 5x25m	34 Aufst. 24 Abst. Italien	-	-	-
		Eine Methode zur Bauwerksüberwachung von mehrfeldrigen Brücken unter Verwendung von InSAR-Satellitendaten mit Quantifizierung der Unsicherheit und ihre Anwendung vor dem Einsturz auf die Albiano-Magra-Brücke in Italien	COSMO-SkyMed	2013-2020	121 Aufst., Italien	e-geos	PSP	[54]
			-	-	-	-	-	-
			-	2015-2020	64 Abst. Italien	-	-	-

Objektklasse	Titel		Auftrag & Acq. Modus	Zeitintervall & Auflösung	Anzahl der Bilder & Standort	Software	PSI-Tech-nik	Referenzen
Brücken Kontinuierliche Bauwerksüberwachung (Structural Health Monitoring SHM)		Ein integrierter Untersuchungsansatz für die Zustandsüberwachung von gemauerten Bogenbrücken unter Verwendung von GPR- und InSAR-Technologien	Sentinel-1 Interferometrische Breitenschwungung	2015-2017 5x20m	21 Aufst. UK	SARscape	-	[43]
			TerraSAR-X Staring SpotLight	2016-2018 0,25x0,25m	37 Aufst. 38 Abst. US	SqueeSAR-Algorithmus	-	[32]
			COSMO-SkyMed Streifenkarte	2014-2015 3x3m	- US			
			Sentinel-1	2015-2017 4x20m	132 Aufst. UK	StaMPS-MTI	PSI	[48]
Verkehrswege		Vergleich von In-situ- und interferometrischer Radarüberwachung mit synthetischer Apertur zur Bewertung der Wärmeausdehnung von Brücken	COSMO-SkyMed Streifenkarte	2011-2015 2015-2018 3x3	40 Abst. 34 Abst. UK	e-Geos & SARscape	PSI	
			COSMO-SkyMed Streifenkarte	2014-2021 3x3m	109 Abst. Italien	SARPROZ	-	[42]
			Sentinel-1	2018-2020 -	25 Aufst. China	-	SBAS	[55]
			TerraSAR-X Streifenkarte	2017-2018 3,3x1,17m	38 Aufst. UK	StaMPS-MTI	PSI	[56]
			COSMO-SkyMed	2008-2014 3x3m	- Italien	SARPROZ	-	[50]
			Sentinel-1	2016-2019 5x20m	84 Asc. US			
Verkehrswege		Überwachung der Verformungen von Infrastrukturnetzen: Eine vollautomatische GIS-Integration und Analyse von InSAR-Zeitreihen	ERS/Envisat	1992-2010 6x24m	- Italien			

Literaturverzeichnis

Sonstige Literatur / Forschungsberichte

- [1] ASTRA IT-Dokumentation MISTRA Trasse TRA 2.3 (2023) "Datenerfassungshandbuch", Bundesamt für Strassen, Schweiz n, Schweiz
- [2] ASTRA IT-Dokumentation KUBA 5.1 (2015) "Datenerfassungshandbuch", Bundesamt für Strasse
- [3] ARE (2020) Nationales Personenverkehrsmodell NPVM 2017. Eidgenössisches Departement für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK, Bundesamt für Raumentwicklung ARE, Bern 2020
- [4] SIA 469 (SN 588469) Erhaltung von Bauwerken (1997) Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein SIA, Zürich
- [5] 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 ASTRA (Schriftenreihe Brückenforschung, FB620).
- [6] Rafi, Ali; Hajdin, Rade; Welte, Urs (2005): Optimierungsprozesse im Management der Strassenerhaltung (MSE). VSS 1999/293, Bundesamt für Strassen ASTRA. Bern (Schriftenreihe, FB1109).
- [7] Koch, R., P. Meier & C. Frey (2022) Verkehrsnetz CH Konzept, Version 01.12.2022, Bundesamt für Landestopografie swisstopo, Wabern
- [8] Vrtic, M., C. Weis, G. Rindsfuser & W. Matthews (2018) Kalibrierung von Capacity-Restraint-Funktionen. VSS 2015/113. Bundesamt für Strassen ASTRA, Schriftenreihe, FB1628).
- [9] Schiffmann, F., R. Hajdin, M. Vrtic, C. Weis & J. von Sury (2021) RobaRE – Routenwahlverhalten durch baustellenbedingte Reisezeitveränderungen infolge geplanter Erhaltungsprojekte. VSS 2015/413. Bundesamt für Strassen ASTRA, Schriftenreihe, FB1696).
- [10] Szoldra, P. (2013) Ex-Google Engineer Reveals How Google Maps Figures Out Destination Times, Business Insider, <http://www.businessinsider.com/google-maps-times-2013-12>.
- [11] Kaiser, C. (2021) Quantified vehicles : data, services, ecosystems. Dissertation Universität Rostock. https://doi.org/10.18453/rosdok_id00003515
- [12] Rous, M. (unveröffentlicht) StreetProbe - Cloudbasierte Straßenzustandserfassung, Forschungsnehmer: Robert Bosch GmbH, Technische Universität Berlin, Bundesanstalt für Strassenwesen BAST, Durth Ross Consulting GmbH, 3D Mapping Solutions GmbH, gefördert durch Bundesministerium für Wirtschaft und Energie BMWi, https://www.digitale-technologien.de/DT/Redaktion/DE/Downloads/Publikation/SSW_Factsheet_StreetProbe.pdf
- [13] Copernicus Program, "Discover our satellites | Copernicus." Accessed: May 25, 2023. [Online]. Available: <https://www.copernicus.eu/en/about-copernicus/infrastructure-overview/discover-our-satellites>
- [14] European Space Agency (ESA), "SentiWiki." Accessed: Nov. 29, 2023. [Online]. Available: <https://sentiwiki.copernicus.eu/web/copernicus-programme>
- [15] M. Sättele, and M. Bründl, Praxishilfe für den Einsatz von Frühwarnsystemen für gravitative Naturgefahren" WSL-Institut für Schnee- und Lawinenforschung SLF, Bundesamt für Bevölkerungsschutz BABS, Bern.
- [16] SIA 269 (SN 505269) Grundlagen der Erhaltung von Tragwerken (2011) Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein SIA, Zürich
- [17] Bertola, N., Schiltz, P., & Brühwiler, E. (2024). A global framework for data-informed bridge examination. Structure and Infrastructure Engineering, 1–20. <https://doi.org/10.1080/15732479.2024.2337088>.
- [18] Sadeghi Eshkevari, S., Matarazzo, T., Milardo S. et al." Bridging the Gap: Commodifying Infrastructure Condition Data with Crowdsensing", 10 July 2023, PREPRINT (Version 1) available at Research Square <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-2992014/v1>
- [19] Garg, P., Nasimi, R., Ozdagli, A.; Zhang, S., Mascarenas, D.D.L., Reda Taha, M, and Moreu, F. "Measuring Transverse Displacements Using Unmanned Aerial Systems Laser Doppler Vibrometer (UAS-LDV): Development and Field Validation", Sensors 2020, 20, 6051. <https://doi.org/10.3390/s20216051>
- [20] Singh, S., Sachan, A.K., Shanker, R. "A review on smart aggregate based structural health monitoring", Materials Today: Proceedings, vol. 78, Part 1, 2023, Pages 28-35, ISSN 2214-7853, <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.10.246>
- [21] Niederleithinger, E., Guangliang, Y., Mahon, D., & Gardner, S. (2022) "Muon tomography applied to assessment of concrete structures: First experiments and simulations", International Symposium on Non-Destructive Testing in Civil Engineering (NDT-CE 2022), 16-18 August 2022, Zurich, Switzerland. e-Journal of Nondestructive Testing Vol. 27(9). <https://doi.org/10.58286/27198>
- [22] European Space Agency (ESA), "ESA Earth Observation gateway." Accessed: May 02, 2024. [Online]. Available: <https://earth.esa.int/eogateway>

-
- [23] Africa Flores-Anderson, Kelsey E. Herndon, and Rajesh Thapa, "The SAR Handbook - Comprehensive Methodologies for Forest Monitoring and Biomass Estimation," Huntsville, 2019. doi: 10.25966/nr2c-s697.
-
- [24] Capella Space, "SAR 101: An Introduction to Synthetic Aperture Radar." Accessed: May 02, 2024. [Online]. Available: <https://www.capellaspace.com/sar-101-an-introduction-to-synthetic-aperture-radar/>
-
- [25] A. Ferretti, A. Tamburini, F. Novali, A. Fumagalli, G. Falorni, and A. Rucci, "Impact of high resolution radar imagery on reservoir monitoring," *Energy Procedia*, vol. 4, pp. 3465–3471, Jan. 2011, doi: 10.1016/J.EGYPRO.2011.02.272.
-
- [26] Federal Highway Research Institute (BAST), by Michael Riedmann, Jan Anderssohn, and Maik Bindrich, "Potential of satellite-based monitoring of road structures," 2015.
-
- [27] M. Crosetto, O. Monserrat, M. Cuevas-González, N. Devanathéry, and B. Crippa, "Persistent Scatterer Interferometry: A review," *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, vol. 115, pp. 78–89, May 2016, doi: 10.1016/j.isprsjprs.2015.10.011.
-
- [28] V. Macchiarulo, P. Milillo, C. Blenkinsopp, C. Reale, and G. Giardina, "Multi-temporal InSAR for transport infrastructure monitoring: recent trends and challenges," *Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Bridge Engineering*, vol. 176, no. 2, pp. 92–117, Jun. 2023, doi: 10.1680/jbren.21.00039.
-
- [29] Sky Geo by: Jennifer Scoular, "The ultimate guide to using inSAR," 2022. Accessed: Dec. 15, 2023. [Online]. Available: <https://skygeo.com/the-ultimate-guide-to-using-insar/>
-
- [30] Italian Space Agency, "COSMO-SkyMed Mission and Products Description," 2019.
-
- [31] Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR), "Synthetic Aperture Radar (SAR)." Accessed: May 02, 2024. [Online]. Available: <https://www.dlr.de/en/research-and-transfer/projects-and-missions/terrasar-x/synthetic-aperture-radar-sar>
-
- [32] E. J. Hoppe et al., "Deformation Monitoring of Posttensioned Bridges Using High-Resolution Satellite Remote Sensing," *Journal of Bridge Engineering*, vol. 24, no. 12, Dec. 2019, doi: 10.1061/(ASCE)BE.1943-5592.0001479.
-
- [33] University of Twente, "Concept list." Accessed: Dec. 04, 2023. [Online]. Available: <https://ltb.itc.utwente.nl/page/580/concept/list>
-
- [34] "Learn Synthetic Aperture Radar (SAR) by Example - GIS Geography." Accessed: May 02, 2024. [Online]. Available: <https://gisgeography.com/synthetic-aperture-radar-examples/>
-
- [35] European Space Agency (ESA), "Copernicus Browser." Accessed: May 02, 2024. [Online]. Available: <https://browser.dataspace.copernicus.eu>
-
- [36] P. Vincent, M. Bourbigot, H. Johnsen, R. Piantanida, J. Poullaouec, and G. Hajduch, "Sentinel-1 Product Specification," 2020.
-
- [37] Jerome Gasperi, Frédéric Houbie, Andrew Woolf, and Steven Smolders, "Earth Observation Metadata profile of Observations & Measurements," Washington, 2016. [Online]. Available: <http://www.open-gis.net/doc/IS/eompom/1.1>
-
- [38] A. Ferretti, C. Prati, and F. Rocca, "Permanent scatterers in SAR interferometry," *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 39, no. 1, pp. 8–20, 2001, doi: 10.1109/36.898661.
-
- [39] V. Gagliardi et al., "Satellite Remote Sensing and Non-Destructive Testing Methods for Transport Infrastructure Monitoring: Advances, Challenges and Perspectives," *Remote Sens (Basel)*, vol. 15, no. 2, p. 418, Jan. 2023, doi: 10.3390/rs15020418.
-
- [40] "Interferometry | Get to Know SAR – NASA-ISRO SAR Mission (NISAR)." Accessed: May 02, 2024. [Online]. Available: <https://nisar.jpl.nasa.gov/mission/get-to-know-sar/interferometry/>
-
- [41] P. Milillo, G. Giardina, D. Perissin, G. Milillo, A. Coletta, and C. Terranova, "Reply to Lanari, R., et al. Comment on 'Pre-Collapse Space Geodetic Observations of Critical Infrastructure: The Morandi Bridge, Genoa, Italy' by Milillo et al. (2019)," *Remote Sens (Basel)*, vol. 12, no. 24, p. 4016, Dec. 2020, doi: 10.3390/rs12244016.
-
- [42] D. Tonelli et al., "Interpretation of Bridge Health Monitoring Data from Satellite InSAR Technology," *Remote Sens (Basel)*, vol. 15, no. 21, p. 5242, Nov. 2023, doi: 10.3390/rs15215242.
-
- [43] A. M. Alani, F. Tosti, L. B. Ciampoli, V. Gagliardi, and A. Benedetto, "An integrated investigative approach in health monitoring of masonry arch bridges using GPR and InSAR technologies," *NDT & E International*, vol. 115, p. 102288, Oct. 2020, doi: 10.1016/j.ndteint.2020.102288.
-
- [44] Z. Sadeghi et al., "Benchmarking and inter-comparison of Sentinel-1 InSAR velocities and time series," *Remote Sens Environ*, vol. 256, p. 112306, Apr. 2021, doi: 10.1016/j.rse.2021.112306.
-
- [45] V. Macchiarulo, P. Milillo, C. Blenkinsopp, and G. Giardina, "Monitoring deformations of infrastructure networks: A fully automated GIS integration and analysis of InSAR time-series," *Struct Health Monit*, vol. 21, no. 4, pp. 1849–1878, Jul. 2022, doi: 10.1177/14759217211045912.
-
- [46] Fernekundung Technologietransfer (EFTAS), "BIMSAR." Accessed: May 02, 2024. [Online]. Available: <https://bimsar.eftas.services/>
-

-
- [47] P. Milillo, G. Giardina, D. Perissin, G. Milillo, A. Coletta, and C. Terranova, "Pre-Collapse Space Geodetic Observations of Critical Infrastructure: The Morandi Bridge, Genoa, Italy," *Remote Sens (Basel)*, vol. 11, no. 12, p. 1403, Jun. 2019, doi: 10.3390/rs11121403.
-
- [48] S. Selvakumaran, Z. Sadeghi, M. Collings, C. Rossi, T. Wright, and A. Hooper, "Comparison of in situ and interferometric synthetic aperture radar monitoring to assess bridge thermal expansion," *Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Smart Infrastructure and Construction*, vol. 175, no. 2, pp. 73–91, Jun. 2022, doi: 10.1680/jsmic.21.00008.
-
- [49] J. Scoular et al., "Retrospective InSAR Analysis of East London during the Construction of the Lee Tunnel," *Remote Sens (Basel)*, vol. 12, no. 5, p. 849, Mar. 2020, doi: 10.3390/rs12050849.
-
- [50] V. Macchiarulo, P. Milillo, C. Blenkinsopp, and G. Giardina, "Monitoring deformations of infrastructure networks: A fully automated GIS integration and analysis of InSAR time-series," *Struct Health Monit*, vol. 21, no. 4, pp. 1849–1878, Jul. 2022, doi: 10.1177/14759217211045912.
-
- [51] D. Amitrano et al., "Earth Environmental Monitoring Using Multi-Temporal Synthetic Aperture Radar: A Critical Review of Selected Applications," *Remote Sens (Basel)*, vol. 13, no. 4, p. 604, Feb. 2021, doi: 10.3390/rs13040604.
-
- [52] J. J. Sousa and L. Bastos, "Multi-temporal SAR interferometry reveals acceleration of bridge sinking before collapse," *Natural Hazards and Earth System Sciences*, vol. 13, no. 3, pp. 659–667, Mar. 2013, doi: 10.5194/nhess-13-659-2013.
-
- [53] S. Selvakumaran, S. Plank, C. Geiss, C. Rossi, and C. Middleton, "Remote monitoring to predict bridge scour failure using Interferometric Synthetic Aperture Radar (InSAR) stacking techniques," *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, vol. 73, pp. 463–470, Dec. 2018, doi: 10.1016/j.jag.2018.07.004.
-
- [54] E. Farneti et al., "A method for structural monitoring of multispan bridges using satellite InSAR data with uncertainty quantification and its pre-collapse application to the Albiano-Magra Bridge in Italy," *Struct Health Monit*, vol. 22, no. 1, pp. 353–371, Jan. 2023, doi: 10.1177/14759217221083609.
-
- [55] L. Zhou et al., "Deformation monitoring of long-span railway bridges based on SBAS-InSAR technology," *Geod Geodyn*, vol. 15, no. 2, pp. 122–132, Mar. 2024, doi: 10.1016/j.geog.2023.07.005.
-
- [56] Z. Sadeghi, T. Wright, A. Hooper, and S. Selvakumaran, "Using Ray Tracing to Improve Bridge Monitoring With High-Resolution SAR Satellite Imagery," *IEEE J Sel Top Appl Earth Obs Remote Sens*, vol. 17, pp. 1155–1166, 2024, doi: 10.1109/JSTARS.2023.3335284.
-

Glossar

Abkürzung	Begriff	Bedeutung
AAR	Alkali-Aggregat-Reaktion	Chemische Reaktion der alkalische Porenlösung im Beton mit Anteilen der Gesteinskörnung, durch welche ein quellendes Gel entsteht.
ASTRA	Bundesamt für Strassen	Fachbehörde für die Strasseninfrastruktur und den individuellen Strassenverkehr
BAFU	Bundesamt für Umwelt	Fachbehörde für die nachhaltige Nutzung der natürlichen Ressourcen wie Boden, Wasser, Luft, Ruhe und Wald
BIM	Building Information Modeling	Arbeitsmethode für die vernetzte Planung, den Bau und die Bewirtschaftung von Infrastrukturobjekten und anderen Bauwerken mithilfe von Software. Dabei werden alle relevanten Bauwerksdaten digital modelliert, kombiniert und erfasst.
BSA	Betriebs- und Sicherheitsausrüstungen	Die BSA-Anlagenstruktur gliedert sich in Energie, Beleuchtung, Lüftung, Signalisation, Überwachungsanlagen, Kommunikation & Leittechnik, Kabelanlagen und Nebeneinrichtungen.
BWT	Bauwerksteil	Ein Teil bzw. ein selbständiges ins Bauwerk eingebautes Stück
C3S	Climate Change Service	Klimawandel-Datendienst des Copernicus-Programms
CAMS	Atmosphere Monitoring Service	Atmosphärenüberwachungs-Datendienst des Copernicus-Programms
CEMS	Emergency Management Service	Notfallmanagement-Datendienst des Copernicus-Programms
CLMS	Land Monitoring Service	Landüberwachungs-Datendienst des Copernicus-Programms
CMEMS	Marine Environment Monitoring Service	Datendienst zur Überwachung der Meeresumwelt des Copernicus-Programms
CSS	Security Service	Sicherheit-Datendienst des Copernicus-Programms
DAS	Distributed Acoustic Sensing	Verteilte akustische Erfassung
DIAS	Data and Information Access Services	Entwickelte Cloud-basierte Dienste, die den Zugang zu Copernicus-Daten und -Informationen erleichtern und standardisieren.
DIC	Digital Image Correlation	Digitale Bild Korrelation (DBK) vgl. Teilbericht Kunstbauten
EFAS	European Flood Awareness System	Datendienst des CEMS mit europäischen Hochwasserereignissen
EFFIS	European Forest Fire Information System	Europäische Waldbrandinformationssystem des CEMS
EGMS	European Ground Motion Service	Datendienst des CLMS mit zeitlichem Verlauf der Verschiebung von Bodenpunkten
ESA	European Space Agency	Raumfahrtbehörde der Europäischen Union
EUMETSAT	European Organisation for the Exploitation of Meteorological Satellites	Europäische operationelle Satellitenagentur zur Überwachung von Wetter, Klima und Umwelt aus dem Weltraum
GloFAS	Global Flood Awareness System	Datendienst des CEMS mit globalen Hochwasserereignissen
GNSS	Global Navigation Satellite System	Globales Navigationssatellitensystem
GPS	Global Positioning System	Globales Navigationssatellitensystem zur Positionsbestimmung
GWIS	Global Wildfire Information System	Globale Waldbrandinformationssystem des CEMS
HRM	High Speed Road Monitor	Schellfahrendes Messsystem zur Erfassung des Längsprofils
INKV	Inkrementelles Nutzen-Kosten-Verhältnis	Methode der Optimierung von Optionen
InSAR	Interferometric Synthetic Aperture Radar	Radarinterferometrie

Abkürzung	Begriff	Bedeutung
INSPIRE	Infrastructure for spatial information in the European Community	Standard für räumliche Infrastrukturdaten in der EU
IO	Infrastrukturobjekt	Element zur Gliederung der Infrastruktur
Krit	Kritikalität	Klassifizierung eines Infrastrukturobjekts, relative Bedeutung eines Infrastrukturobjekts bezüglich der Auswirkungen seines Ausfalls
LDV	Laser-Doppler-Vibrometrie	Quantifizierung mechanischer Schwingungen (Schwingungsanalyse)
LiDAR	Light Detection And Ranging	Methode zur optischen Abstands- und Geschwindigkeitsmessung
	Myonentomographie	Bildgebendes Verfahren zur dreidimensionalen Abbildung großvolumiger Objekte mittels Myonen
MEMS	Micro Electro Mechanical System	Mikro-elektromechanisches System,
ML	Machine Learning	Maschinelles Lernen – trainieren von künstlichen neuronalen Netzwerken anhand von Trainingsdaten (KI – künstliche Intelligenz)
	Neutronenradiographie	Methode zur zerstörungsfreien Materialuntersuchung mit Hilfe von Neutronen
N	Einsatzzeitpunkt nach der Bauphase eines Infrastrukturobjekts	Einsatzzeitpunkt einer Technologie
NASA	National Aeronautics and Space Administration	Raumfahrtbehörde der USA
OBM	On-Board Monitoring	Fahrzeugseitiges Monitoring
OFDR	Optical Frequency Domain Reflectometry	Optische Frequenzbereichsreflektometrie
OTDR	Optical Time Domain Reflectometer	Optisches Zeitbereichsreflektometer
PMS	Pavement Management System	Software, Analysewerkzeug zur Erhaltungsplanung Trasse/Fahrbahn
RBBS	Räumliches Basis-Bezugssystem	Linearen Raumbezug des schweizerischen Strassennetzes
SHM	Structural Health Monitoring	Tragwerksüberwachung (dauerhaft)
SIA	Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein	Berufsverband für qualifizierte Fachleute aus den Bereichen Ingenieurbaukunst, Architektur, Technik und Umwelt
SIM	Subscriber Identity Module	Karte mit Chip in Mobilfunkgeräten zur Herstellung des Zugangs zum Mobilfunknetz mit eindeutiger identifizierbaren Mobilfunknummer.
SmART Strand	Strain measurement for pre-stressing steel strands	Spannstahlstütze mit eingebetteter optischer Faser für die Zugkraftüberwachung
SNR	Signal to Noise Ratio	Signal-Rausch-Verhältnis
SOFO	Surveillance d'Ouvrage par Fibres Optiques	Structural Monitoring using Optical Fibres: Überwachung/Monitoring der Kunstbauten mit faseroptischen Sensoren
swisstopo	Bundesamt für Landestopografie	Das Bundesamt für Landestopografie «swisstopo» ist das Geoinformationszentrum der Schweiz
TP	Teilprojekt	Teilprojekt des jeweiligen Fachbereichs
TS	Teilsystem	Als Teilsystem werden Gruppen von Objekten der Strassenverkehrsanlage mit ähnlichen Eigenschaften bezeichnet.
TSD	Traffic Speed Deflectometer	Schnellfahrendes/dynamisches Messfahrzeug zur Tragfähigkeitsmessungen auf Strassen
UAV	Unmanned Aerial Vehicle	Unbemanntes Luftfahrzeug (Drohne)
V	Einsatzzeitpunkt vor der Bauphase eines Infrastrukturobjekts	Einsatzzeitpunkt einer Technologie
VnCH	Verkehrsnetz CH	Verkehrs- bzw. Mobilitätsdaten der Schweiz von swisstopt
VSS	Schweizerischer Verband der Strassen- und Verkehrsfachleute	Normierungsorganisation im Strassen- und Verkehrswesen der Schweiz
VW	Vibrating Wire	Schwingsaitensensor

Abkürzung	Begriff	Bedeutung
W	Einsatzzeitpunkt während der Bauphase eines Infrastrukturobjekts	Einsatzzeitpunkt einer Technologie
WIM	Weight-in-motion	Dynamische Fahrzeugwaage
ZaP	Zerstörungsarme Prüfmethode	Verfahren mit geringen Eingriffen in die Bausubstanz
ZfP	Zerstörungsfreie Prüfmethode	Verfahren ohne Eingriffe in die Bausubstanz
zN	Zusätzlicher Nutzen	Klassifizierung eines zusätzlichen Nutzens einer Technologie durch ein grösseres Überwachungsausmass bzw. eines ausgedehnten Messbereichs im Gegensatz zu Einzelmessungen
ZP	Zerstörende Prüfmethode	Verfahren durch Eingriffe in die Bausubstanz
ZV1	Zuverlässigkeit (Technologieakzeptanz)	Klassifizierung der Zuverlässigkeit in Bezug auf eine Akzeptanz der gewählten Technologie
ZV2	Zuverlässigkeit (Ausagekraft Indikator für Gefährdung)	Klassifizierung der Zuverlässigkeit in Bezug auf die Aussagekraft eines Indikators, welcher durch eine gewählten Technologie ermittelt wird

Auflistung der Änderungen

Ausgabe	Version	Datum	Änderungen
2025	1.00	11.11.2025	Erste Ausgabe.

