



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Bundesamt für Strassen ASTRA

DOKUMENTATION

TECHNOLOGIEN ZUR ÜBERWACHUNG DER INFRASTRUKTUR

TEILBERICHT TRASSEE

*Ausgabe 2024 V1.00
ASTRA 84013*

Impressum

Autoren / Arbeitsgruppe

Christian Gammeter	ASTRA N-SSI, Vorsitz
Gerrit Bartels	ASTRA N-SSI, Teilprojektleiter
Andreas Großmann	Lehmann+Partner Deutschland
Ronny Stricker	Lehmann+Partner Deutschland
Steffen Scheller	Lehmann+Partner Deutschland
Ernst Niederleithinger	BAM Deutschland
Hans-Heini Utelli	IMPULS AG
Rade Hajdin	IMC GmbH
Frank Schiffmann	IMC GmbH

Sounding Board

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

Originalsprache

Deutsch

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

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

Herausgeber

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

Bezugsquelle

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

© ASTRA 2024

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

Inhaltsverzeichnis

Impressum	2
Inhaltsverzeichnis	5
1 Einleitung	9
1.1 Zweck der Dokumentation	9
1.2 Geltungsbereich	9
1.3 Adressaten	9
1.4 Inkrafttreten und Änderungen	9
2 Ausgangslage	10
2.1 Relevante Infrastruktur-Objekttypen im Fachgebiet Trasse	11
2.2 Überwachungsaufgaben betr. Trasseanlagen des ASTRA (inkl. Geotechnik allgemein, Naturgefahren, Umwelt)	15
2.3 Abgrenzungen	19
2.4 Auftrag	19
3 Anforderungen	20
3.1 Gesetzliche Grundlagen, relevante Normen und Standards	20
3.2 Rahmenbedingungen	24
4 Grundlagen	25
4.1 Forschungsberichte	25
4.2 Bestehende Monitoring-Anwendungen	26
5 Methodisches Vorgehen	28
5.1 Grundsatz	28
5.2 Grundlage der Technologiebeschreibung	30
5.3 Überblick über die Bewertungsmethodik	30
5.4 Verallgemeinerung durch Klassifizierung	31
5.5 Evaluation von Technologien	34
5.6 Literaturverzeichnis	35
6 Evaluierte Technologien und Datenquellen für die Überwachung im Überblick	37
6.1 Übersichtstabellen – Legende	37
6.2 Evaluierte Technologien – Übersicht in Bezug auf Anwendungsfälle	43
7 Bewährte Technologien	44
A Sicherheit	46
A 1 Rauheit	46
7.1 Messverfahren Skid Resistance Tester (SRT Pendel)	48
7.2 Schräglaufendes Rad	50
7.3 Definiert blockiertes Rad	52
7.4 Definiert gebremstes Rad	54
A 2 Textur	56
7.5 Sandflächenverfahren	59
7.6 Lasersensoren	61
7.7 Triangulationssensoren / Profilometer	63
A 3 Fahrbahnmarkierungen / Reflexionseigenschaften	66
7.8 Retroreflektometrie	67
A 4 Lichtraumprofil / Höhenmessung	69
7.9 Laserscanning	71
7.10 Winkel-, Streckenmessung	75
B Befahrbarkeit	77
B 1 Längsebenheit	77
7.11 Richtlatte (4 m)	80
7.12 Planograf	82
7.13 Goniograph	84
7.14 Lasersensoren	86
7.15 Laserscanner	89
7.16 Triangulationssensoren	93
B 2 Querebenheit	96
7.17 Richtlatte (4 m)	97
7.18 Lasersensoren	99

7.19	Laserscanner	102
7.20	Lichtschnittverfahren	104
B 3	Querneigung	107
7.21	Neigungsmesser	108
7.22	inertiales Kreiselssystem	111
7.23	Laserscanner	114
C	Substanz	116
C 1	Substanzmerkmale Oberfläche	116
7.24	Photogrammetrie	117
7.25	Laserscanner	120
7.26	Lichtschnittverfahren	121
C 2	Schichtdicken und -parameter	124
7.27	Radar	125
7.28	Ultraschall-Echo	128
7.29	Impakt-Echo	131
7.30	Refraktionsseismik	133
7.31	Oberflächenwellenseismik (SASW/MASW)	135
7.32	Geoelektrik	138
C 3	Einbauteile	140
7.33	Radar	141
7.34	Induktive Bewehrungssucher	141
7.35	Magnetik	143
C 4	Anomalien im Material	145
7.36	Radar	146
7.37	Ultraschall-Echo	147
7.38	Impakt-Echo	148
7.39	Refraktionsseismik	148
7.40	Oberflächenwellenseismik (SASW/MASW)	149
7.41	Geoelektrik	150
7.42	Thermographie	151
7.43	Elektromagnetik	153
C 5	Tragfähigkeit	155
C 6	Tragfähigkeit - Mechanisch	155
7.44	Plattendruckversuch	156
7.45	Benkelman-Balken	158
7.46	Deflektograph/Lacroix	160
C 7	Tragfähigkeit - Geophone	162
7.47	Fallgewichtsgerät	163
7.48	Falling Weight Deflectometer (FWD)	165
7.49	Curviametro	167
C 8	Tragfähigkeit - Lasersensoren	169
7.50	Traffic speed deflectometer	170
7.51	Rapid Pavement Tester (RAPTOR)	171
C 9	Achslast	173
7.52	Weigh in Motion	173
D	Umwelt	178
D 1	Lärmmessung	178
7.53	Rollgeräuschmessung (CPX-Methode)	178
7.54	Statistische Vorbeifahrt (SPB-Messung)	180
D 2	Positionssysteme	181
7.55	stationäre Positionsbestimmung	183
7.56	mobile Positionsbestimmung (GNSS Inertialsysteme)	186
D 3	Entwässerung	190
7.57	Begehung (Kontrolle/Aufmass)	193
7.58	Fotografie/Videobefahrung	195
7.59	Laserscanning	197
7.60	Pegelhöhenmessungen	198
7.61	Durchflussmengenmesser	198
7.62	Indirekte Inspektion mit ferngesteuerten, bildbasierten Systemen	200

E	Bauwerksentkoppelte Überwachung	203
E 1	Baugrundverformungen	203
7.63	Terrestrische Radarinterferometrie	204
7.64	Satellitengestützte Radarinterferometrie	208
7.65	Geodätische Aufnahmen - Tachymeter	213
7.66	Inklinometer	215
7.67	Nivellement	218
E 2	Massenbewegungen (Steinschlag, Murgänge, Lawinen, Rutschhang, etc.)	220
7.68	Doppler-Radar	221
7.69	Pegel-Radar	224
7.70	Infrasound	226
7.71	Reissleinen	227
7.72	Terrestrische Radarinterferometrie	229
7.73	Satellitengestützte Radarinterferometrie	230
7.74	Photogrammetrie zur Langzeitüberwachung mit Deformationskameras	230
7.75	Geodätische Aufnahmen - Tachymeter	232
7.76	Nivellement	232
8	Aufstrebende Technologien	233
8.1	Vehicle Onboard Analytics	233
8.2	Berührungslose Griffigkeitsmessung	234
8.3	ML-basierte Bilddatenverarbeitung zur Objekt- und Schadstellendetektion	236
8.4	On Board Weighing	242
8.5	Streckenkontrolle - Auswertung von Mikroverkehrsdaten	243
8.6	Zustandsabgleich mit Augmented Reality + BIM	246
8.7	ML-basierte Auswertung von Messdatenreihen	250
8.8	Einsatz von Robotern und UAVs zur zerstörungsfreien Prüfung	252
9	Technologiebewertung	257
9.1	Relevante Gefährdungen im Teilsystem	257
9.2	Bewertung von einzelnen Technologien	260
9.3	Erstellen und Bewertung von Überwachungskonzepten	271
	Glossar	275
	Literaturverzeichnis	277
	Auflistung der Änderungen	279

1 Einleitung

1.1 Zweck der Dokumentation

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

1.2 Geltungsbereich

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

1.3 Adressaten

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

1.4 Inkrafttreten und Änderungen

Dieses Dokument tritt am 24.05.2024 in Kraft. Die "Auflistung der Änderungen" ist auf Seite 279 dokumentiert.

2 Ausgangslage

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

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

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

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

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

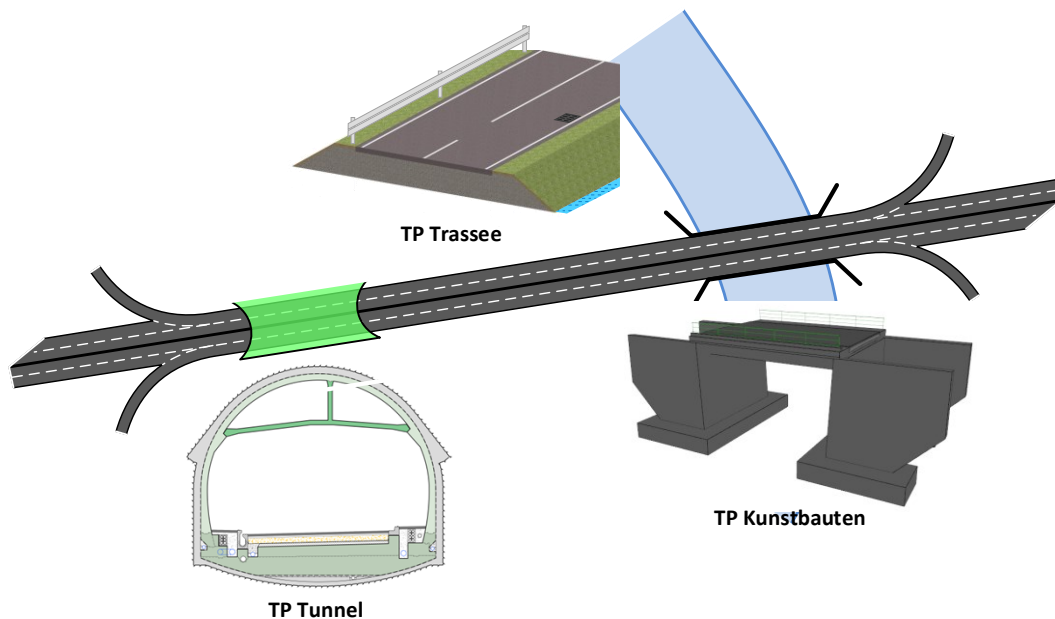


Abb. 2.1 Fokus im Gesamt-Projekt NTech

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

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

2.1 Relevante Infrastruktur-Objekttypen im Fachgebiet Trasse

Im Wesentlichen konzentriert sich die Überwachung im Bereich des Trassees sowohl im Zuge der Bauphase als auch der späteren Betriebsphase auf den Strassenoberbau. Insofern zählen zu den relevanten Objekttypen, welche einen Bestandteil der Strasse bilden vorliegend die Bestandteile des Oberbaus. Aufgrund der grossen Bedeutung für den Verkehrsteilnehmer wurde vorliegend eine Abgrenzung zwischen Fahrbahnoberfläche und den Schichten des Strassenoberbaus vorgenommen.

Da diverse Erfassungstechnologien auch im Bereich des Erdbaus Anwendung finden, wurde als weiterer Inventartyp der Untergrund bzw. Unterbau betrachtet. Im Strassenraum zählen zu den unter Beachtung der Aufgabenstellung der Ersterfassung einbezogenen Objekttypen auch Objekte des Strasseninventars gemäss [ASTRA 1b001] wie Fahrzeugrückhaltesysteme. Darüber hinaus wurden Möglichkeiten zur Inspektion der Geometrie des Geländes einschliesslich der Mulde beschrieben.

Die betrachteten Infrastruktur-Objekttypen werden im Folgenden zusammenfassend dargestellt (vgl. Abb. 2.2).

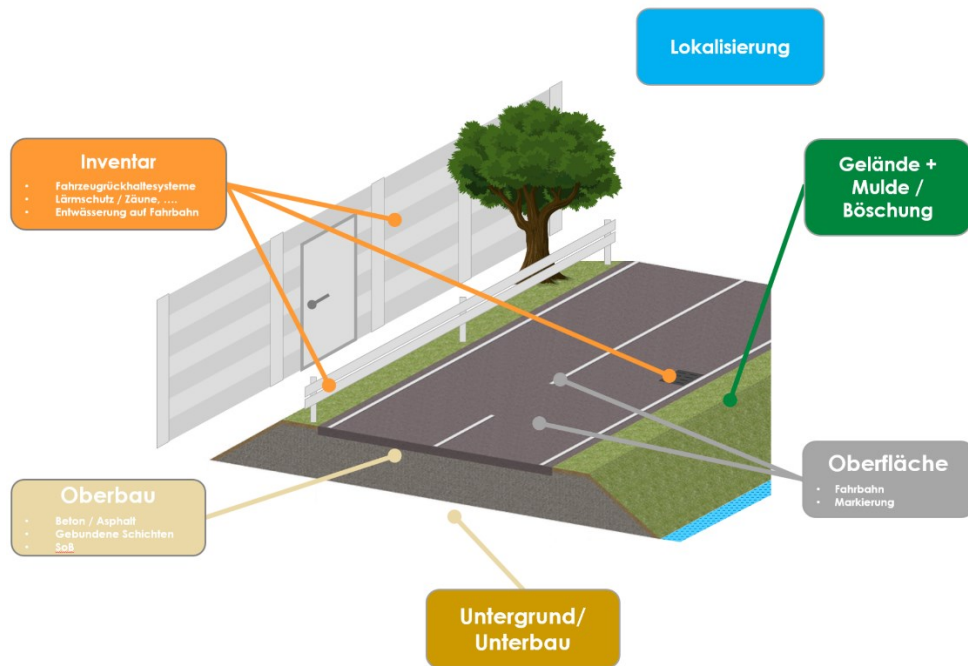


Abb. 2.2 Überblick über die für das Trasse relevanten Themenfelder und Schnittstellen

2.1.1 Schichten des Oberbaus

Der Oberbau besteht aus mehreren Schichten. Für die Dickenfestlegung des Oberbaues werden die Schichtdicken und Schichtfolgen nach Bauweisen bestimmt. Bei der Wahl der Bauweise, d.h. Asphalt-, Beton- oder Pflasterbauweise, sind die örtlichen Gegebenheiten, regionale Erfahrungen mit Baustoffen und Klima, die technischen und wirtschaftlichen Gesichtspunkte sowie Umweltbedingungen zu berücksichtigen, wie zum Beispiel die Verwendung örtlicher Baustoffe, stufenweiser Aufbau, nutzungsbedingte Besonderheiten wie besonders schwerer oder spurgeführter Verkehr, Auswirkungen von Erhaltungsstrategien, Verringerung der Lärmemissionen, Umweltverträglichkeit von industriellen Nebenprodukten oder Recycling-Baustoffen.

Die Bauweisen, die mit Asphalt- und Betondecken ausgeführt werden, sind als gleichwertig anzusehen, d.h. für einen bestimmten Belastungsfall können beide Bauweisen diese Verkehrsbelastung im Nutzungszeitraum ohne strukturelle Schäden im Oberbau aufnehmen. Dies gilt nicht uneingeschränkt für Pflasterbauweisen, die insbesondere unter Berücksichtigung der Anforderung an Strassen in geschlossener Ortslage festgelegt werden. Da in vorliegendem Bericht der Fokus auf den Nationalstrassen liegt, werden Bauweisen mit Pflaster und Plattenbelägen nicht weiter betrachtet.

Die für die Strasse gewählte Deckschichtart hat, neben Unterschieden in den Nutzungseigenschaften, auch Auswirkung auf die Erfassung des Zustands und auf etwaige Erhaltungsmassnahmen. Je nach Anwendungszweck werden die unterschiedlichen Materialien in der Schichtenfolge kombiniert.

Die Deckschicht ist für höchste Beanspruchungen des Verkehrs ausgelegt und muss eine ausreichende Verkehrssicherheit durch Griffigkeit, Helligkeit und Ebenheit gewährleisten sowie durch entsprechende Rezepturen wasserundurchlässig bzw. wasserdicht und verschleissfest ausgebildet werden.

Die Binderschicht, die nur bei Asphaltbauweisen vorkommt, stellt den Übergang von der Deckschicht zur Asphalttragschicht her. Durch ihren Einbau soll eine Zone besonders guter Schubspannungsaufnahme entstehen und es sollen durch sie die Unebenheiten der Tragschicht ausgeglichen werden. Bei geringen Beanspruchungen der Strasse kann auch die darunterliegende Asphaltschicht die Funktion der Binderschicht übernehmen.

Die Tragschichten haben die Funktion, die durch die Decke nicht ausreichend abgebauten vertikalen und horizontalen Beanspruchungen durch Verkehr – auch Biegezugbeanspruchungen an der Unterseite – so weit abzumindern, dass das Planum durch die Spannungen nicht mehr unzulässig belastet und verformt wird. Dabei ist zu berücksichtigen, dass die Tragfähigkeit des Bodens aufgrund des Wassergehaltes mit der Jahreszeit wechselt. Die Tragschichten selbst dürfen sich zur Aufrechterhaltung einer ausreichenden Tragfähigkeit der Strassenkonstruktion nicht unzulässig verformen, wobei vor allem plastische Verformungen zu begrenzen sind. Bei Betonfahrbahnen wird grundsätzlich davon ausgegangen, dass die Betondecke die Verkehrslasten aufnimmt. Insofern sind die Anforderungen an Tragschichten unter Betondecken anders zu betrachten als unter einer Asphaltdecke. Tragschichten und Betondecken müssen vor allem dauerhaft sein und die Bewegungen der Betondecke infolge thermisch induzierter oder aus Verkehrsbelastung resultierenden Spannungen aufnehmen können.

Schichten ohne Bindemittel werden in vorliegendem Kontext nur als Tragschichten verwendet. Die Verteilung der Kraft erfolgt allein durch die Verspannungen des Korngerüsts, die eine innere Reibung bewirken. Diese Verspannungen werden durch das Verdichten beim Einbau erzeugt und die innere Reibung sukzessiv erhöht.

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

2.1.2 Inventar im nahen Strassenumfeld

Im Bereich des Trasse befinden sich eine Reihe an zusätzlichen Inventartypen, deren Inspektion für einen sicheren Gebrauch der Strasse unumgänglich ist. Grundsätzlich wird bei der Erfassung und Inspektion dieser Objektgruppen zwischen Einzelobjekten und Linienobjekten unterschieden.

Zu den betrachteten Inventartypen zählen Fahrzeughaltssysteme, Zäune und Tore sowie Entwässerungseinrichtungen auf Fahrbahnen. Die Möglichkeiten zur Inspektion der Entwässerungseinrichtungen auf der Fahrbahn sowie der Geometrie des Geländes einschliesslich der Mulde werden in Abschnitt D 3 betrachtet.

Die Erfassung des Inventars im nahen Strassenumfeld beschränkt sich, hinsichtlich der Prüfung, in der Regel auf eine reine Existenzprüfung, die mit der Erfassung der Geometrie gleichzusetzen ist. Hinsichtlich der Erfassung bzw. Inspektion wurde daher vorliegend primär die Erfassung der Geometrie betrachtet (Abschnitt A 4).

2.1.3 Schnittstellen mit Naturgefahren

Das Spektrum möglicher Naturgefahren auf die Verkehrsinfrastruktur ist vielfältig: Es reicht von regelmässig eintretenden Ereignissen bis hin zu äusserst seltenen, aber dennoch nicht gänzlich unwahrscheinlichen Gefahrenarten. So stellen bspw. überflutete Strassen bei Starkregen Einschränkungen der Hilfeleistungsfähigkeit von Einsatzorganisationen dar.

Das Spektrum der Naturgefahren lässt sich, bezogen auf den Teilbereich Trasse, wie folgt einteilen:

- Extremwetterereignisse wie bspw. Stürme, Starkniederschläge, Sturzfluten, Hochwasser, Hitzewellen, Dürren, Temperaturstürze
- Seismische Ereignisse und gravitative Massenbewegungen wie bspw. Erdbeben, Felsstürze, Hangrutschungen, Murgänge, Lawinen, Steinschläge

Weitere Gefahrenarten sind Vulkanausbrüche, Meeresspiegelanstiege oder kosmische Ereignisse, die jedoch vorliegend keine Rolle spielen.

Für die Ermittlung der Exposition spielen die räumlichen Gegebenheiten vor Ort eine entscheidende Rolle. Die Lage einer kritischen Infrastruktur am Hang, in Senken oder nahe Gewässern kann eine Gefährdung begünstigen. Wetter- und Geodaten können bei der

Abschätzung der Exposition hilfreich sein. Insofern haben Extremwetterereignisse oder seismische Ereignisse und gravitative Massenbewegungen einen erheblichen Einfluss auf die Funktionalität der Verkehrsinfrastruktur.

Techniken für die Überwachung von Baugrundverformungen werden in Abschnitt E 1 und Techniken für die Überwachung von Massenbewegungen in Abschnitt E 2 beschrieben.

2.1.4 Schnittstellen mit Umwelt

Die Trennung zwischen Umwelt und Naturgefahren auf die Verkehrsinfrastruktur ist nicht immer klar definiert. Unterschieden werden kann generell zwischen Beanspruchungen durch Temperatur bzw. Angriffen auf die eingesetzten Materialien wie bspw. chemische Reaktionen die Betondecken schädigen (z.B. Alkali-Aggregat-Reaktion) oder auf den Menschen, Flora, Fauna und Habitate.

Strassenkonstruktionen mit bitumenhaltigen Bindemitteln reagieren ausgeprägt auf unterschiedliche Temperaturzustände. Bei hohen Temperaturen treten aufgrund des viskoelastischen Verhaltens von Asphalten in Abhängigkeit der Bindemittelwahl sowie weiterer Komponenten des Mischgutes Verformungen in Form von Verdrückungen bzw. Spurrinnen auf, die einen erheblichen Einfluss auf die Verkehrssicherheit und den Fahrkomfort haben können. Bei tiefen Temperaturen reagieren Asphalte spröde, was bei einer entsprechenden Beanspruchung zu bspw. Rissen in der Konstruktion führen kann.

Betonfahrbahnen zeigen ebenfalls Reaktionen infolge von Temperaturunterschieden, allerdings in anderer Ausprägung als Bauweisen mit bitumenhaltigen Bindemitteln. Bei hohen Temperaturen dehnen sich Betonfahrbahnen aus. Dies bedingt – teilweise erhebliche – Zwängsspannungen, die Schäden im Fugenbereich hervorrufen, im Extremfall aber auch zu «Blow-up» führen können. Entsprechende Phänomene treten plötzlich und an nicht eindeutig vorhersagbaren Stellen auf und haben demnach eine grosse Bedeutung im Sinne der Verkehrssicherheit. Tiefe Temperaturen einhergehend mit weiteren externen und internen Rahmenbedingungen der Betondecke können zu einem Aufschüsseln der Plattenränder führen, die ebenfalls zu Schäden im Querfugenbereich führen können.

Die Alkali-Aggregat-Reaktion (kurz AAR) ist die chemische Reaktion zwischen Alkalien des Zementsteins im Beton und der Gesteinskörnung mit alkalilöslicher Kieselsäure. Die Reaktion kann schwere Schäden an Beton-Konstruktionen wie Brücken und Autobahnbelägen hervorrufen. Sie tritt auf, wenn der Beton der Feuchtigkeit ausgesetzt ist und mit Kies hergestellt wurde, der zu viel lösliche Kieselsäuren enthält.

Die Umweltbelastung durch den Verkehr auf den Menschen, Flora, Fauna und Habitate ist vielfältig. Der Flächenverbrauch für Verkehrsanlagen hat vielfältige Auswirkungen auf unsere Umwelt, vor allem durch die Versiegelung der Böden. Gleichwohl führt eine ausgebaute Verkehrsinfrastruktur (z.B. Reduzierung der Kurvigkeit) zu einer Reduzierung von Emissionen. Der Ausstoss von Luftschadstoffen wie Stickstoffdioxid, Feinstaub oder Kohlenmonoxid aus dem Verkehrssektor ist seit 1990 gesunken. In den letzten Jahren flacht der Rückgang der Emissionen ab. Im weitesten Sinne sind Reduktionen von Emissionen in der Regel nur durch aktive Massnahmen wie Geschwindigkeitsbegrenzungen oder Verkehrsumlagerungen zu erzielen. Passive Massnahmen sind derzeit in der Erprobung und werden vereinzelt eingesetzt.

Verkehrslärm wird von vielen Menschen als störend oder belästigend empfunden. Lärmschutzwände bzw. -wälle schützen Menschen vor Verkehrslärm (Abschnitt D 1).

2.1.5 Schnittstellen Kunstbauten und Tunnel

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

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

Bezogen auf die Fragestellung liegen mit den Kunstbauten und Tunneln u.a. folgende Schnittstellen vor:

- Durchfahrtshöhen
- Baugrunduntersuchungen
- Entwässerungseinrichtungen

Die Inspektionsmöglichkeiten für die Erfassung der Durchfahrtshöhen bzw. zur Baugrunduntersuchung wurden im vorliegenden Berichtsteil mit den anderen Teilprojekten abgeglichen.

2.2 Überwachungsaufgaben betr. Trasseanlagen des ASTRA (inkl. Geotechnik allgemein, Naturgefahren, Umwelt)

Trasseanlagen unterliegen einer Verkehrsbeanspruchung sowie sich ständig ändernden Umwelteinflüssen und sind somit einem permanenten Alterungsprozess ausgesetzt.

Um die Sicherheit, Befahrbarkeit und Dauerhaftigkeit der Verkehrsanlagen sicherzustellen, muss insbesondere der Zustand der Strassen daher regelmässig einer Untersuchung unterzogen werden.

Generell wird der Zustand von Strassen im Rahmen von regelmässigen Zustandserfassungen beurteilt, wohingegen vorzugsweise vor allem die Deckschicht einer Strasse kontrolliert wird. Diese Kontrolle erfolgt auf Nationalstrassen in der Regel mit schnellfahrenden, im Verkehr mitschwimmenden Messfahrzeugen.

Eine Kontrolle des Unterbaus erfolgt in der Regel nur anlassbezogen.

2.2.1 Überwachungsaufgaben vor und während der Bauphase

Vor und während der Bauphase stehen Mess- und Überwachungsthemen im Vordergrund, mit denen zunächst die Planung unterstützt werden kann. Des Weiteren sollten erste Installationen für die Bauphase berücksichtigt werden, die im Zusammenhang mit Beweissicherungsaufgaben von Vorteil sind.

Voruntersuchung und Beweissicherung

Bei der Planung von Trassen werden i.d.R. in Bezug auf den Untergrund lokale (hydro-) geologisch-geotechnische Gutachten herangezogen. Die Planung der Achse erfolgt, unter Berücksichtigung des aktuellen Stands der technischen Möglichkeiten, mit Hilfe von hochgenauen Oberflächenmodellen (DTM – digitales Terrain Model). Diese legen in den verschiedenen Planungsvarianten die von künstlichen Trassen bedingten Bauwerke, sowie den Auf- und Abtrag der Geländeformationen fest. In diesem Planungsstadium können auch erste Sicherheitsaspekte für das Trasse erörtert werden.

Die Grundlage bildet zunächst die Erfassung der geometrischen Eigenschaften entlang der Trassenachse und von vorhandener Infrastruktur, wobei auch Umweltaspekte berücksichtigt werden müssen. Diese Grundlage kann für die Bauphase oder auch darüber hinaus für langfristige Überwachungsaufgaben genutzt werden.

Situationsabhängig ergeben sich hier bestimmte Anforderungen im Hinblick auf Gefährdungen aus Naturgefahrenprozessen.

- Deformationen vor – während – nach dem Bau
- Grundwasserinteraktionen vor – während – nach dem Bau
- Naturgefahren – je nach Situation Wasser / Rutschung / Steinschlag etc. / Lawinen
- Beeinträchtigungen durch Luftschadstoffe während der Betriebsphase

Während der Planung sollte der Baugrund soweit geologisch erkundet sein, dass sich hieraus Einflüsse auf das zukünftige Bauwerk ableiten lassen. Hiermit kann der Überwachungsbedarf während der Bauphase und auch darüber hinaus festgelegt werden. Dies betrifft die angrenzenden urbanen Gebiete, die angrenzenden (hydro-)geologisch-geotechnischen Strukturen und auch den im Zuge der Trassenplanung erfolgten Ab- und Auftrag von Erdreich.

Die Punkte können einen Überwachungsbedarf während der Bauphase erforderlich machen.

Baugruben- und Umfeld-Überwachung – u.a. auch zur weiteren Beweissicherung

Weitere Gesichtspunkte:

- Deformationsmessungen an Tunnelportalen oder Brückenübergangskonstruktionen
- Hangrutschungen
- Senkungen
- Ebenheiten (Oberbau)

2.2.2 Überwachungsaufgaben während der Betriebsphase

Die Überwachung des Zustands während der Betriebsphase dient vor allem der Sicherstellung der Nutzbarkeit und lässt sich in die Aspekte **Sicherheit**, **Befahrbarkeit** und **Substanz** untergliedern.

Sicherheit

Unter dem Aspekt der Sicherheit werden alle Teilaspekte zusammengefasst, die aus Nutzersicht eine sichere Nutzung der Strasse gewährleisten.

- Rauheit, Oberflächentextur, Textur
Geometrische Gestalt der Fahrbahnoberfläche. Unterschieden wird zwischen Micro-, Makro- und Megarauheit.
- Fahrbahnmarkierung
Tag- und Nachtsichtbarkeit der Fahrbahnmarkierung
- Lichtraumprofile
Definierte Umgrenzungslinie zur Bestimmung des lichten Raums

Befahrbarkeit

Bei der Betrachtung der Befahrbarkeit stehen aus Nutzersicht vor allem qualitative Aspekte während der Benutzung im Vordergrund. Diese Aspekte wirken sich allerdings auch direkt auf die Langlebigkeit einer Strasse aus und müssen daher auch unter diesem Aspekt langfristig überwacht werden.

- Längsebenheit
Übereinstimmung der Form der tatsächlichen Schichtoberfläche (Ist) mit der Form der projektierten oder aus Bestandsdaten definierten Oberfläche (Soll) in Längsrichtung.
- Querebenheit
Übereinstimmung der Form der tatsächlichen Schichtoberfläche (Ist) mit der Form der projektierten oder aus Bestandsdaten definierten Oberfläche (Soll) in Querrichtung.
- Querneigung
Neigung der alle Höhenmesspunkte eines Querprofils berücksichtigten Regressionsgraden zur Horizontalen

Substanz

- Substanzmerkmale Oberfläche
Visuell erkennbare Zustandsmerkmale zur Beschreibung des Zustandes der Strassenbefestigung (bspw. Risse, Flickstellen, etc.)
- Schichtdicken
Abstand zwischen zwei Schichtbegrenzungsflächen
- Einbauten
Abläufe zur Entwässerung etc.
- Anomalien im Strassenaufbau
Abweichungen von der Homogenität des eingebauten Materials bzw. derer Komponenten die mit bspw. seismischen Methoden detektierbar sind.
- Tragfähigkeit
Mechanische Widerstand einer Strassenbefestigung gegen kurzzeitige Verformungen.
- Verkehrsbelastung
Die Verkehrsbelastung bewirkt durch Fahrzeugarten des Schwerverkehrs (mehr als 3,5 t) eine Verkehrsbeanspruchung auf den Strassenaufbau.

Umwelt

- Erfassung von Verkehrslärm
Bestimmung der Geräuschemissionen

2.2.3 Ausschreibungsanforderungen

Für die zu definierenden Anforderungen an die Ausschreibung ist primär der Umfang der Messung zu definieren. Hierbei ist zu unterscheiden, ob das zu erfassende Objekt

- Punktförmig
- Abschnittsweise
- Netzweise

zu erfassen ist.

Weitere Anforderungen ergeben sich aus den ortsspezifischen Gegebenheiten, welche Einfluss auf den folgenden Fragestellungen haben können:

- Ist die Messdurchführung im fließenden Verkehr erforderlich (Anforderungen an minimale Messgeschwindigkeit)?
- Sind Sperrungen oder Sicherungsmassnahmen durchzuführen?
- Ergeben sich bei der Messdurchführung Einschränkungen in Bezug auf Wettereinflüsse (z.B. Messung nur bei trockener Strassenoberfläche möglich), Jahreszeit (z.B. Einschränkungen der Messung durch Laub) oder Temperatur

Neben den aufgeführten primären Anforderungen, sollten folgende sekundäre Punkte Berücksichtigung finden:

- Lokalisierung
 - Einfacher Stationsbezug zum Trasse
 - Achsbezug (Station, Abstand und Fahrstreifen)
 - Koordinatenbezug (Definition des amtliches Lage- und Höhenkoordinatensystems)
- Übergabeformat der Messergebnisse
 - Datei-/Datenbankformat
 - Programmspezifische Formate (GIS, CAD, Spezialsoftware mit definierter Lokalisierung)
- Projektspezifischer Ausführungszeitraum
 - Projektspezifische Vorgaben (Messzeiträume (nur nachts), Abnahmemessung für Abschnittsfreigabe)

- Wiederholungsmessungen (Zeitlich oder unter anderen Umweltbedingungen)
- Anschliessende Baumassnahmen/Sicherungsmaßnahmen

Für die Messaufgaben in den folgenden Abschnitten kommen überwiegend Verfahren aus der zerstörungsfreien Prüfung (ZfP) und der Geophysik zum Einsatz. Entsprechende Dienstleistungen werden meist von spezialisierten Fachfirmen angeboten und erfolgen oft durch eine separate Ausschreibung oder als Unterauftrag. Um die Rahmenbedingungen eindeutig zu beschreiben, sowohl auf Auftraggeber Seite als auch bei den ausführenden Fachfirmen, erfolgt hier eine generische Auflistung von erforderlichen Bestandteilen der Ausschreibungsunterlagen:

- 1) Untersuchungsobjekt:
 - a) Bezeichnung
 - b) Ort
 - c) Baujahr (bei QS Neubau: genaues Datum)
 - d) Ggf. zu untersuchende Bauteil/Teilfläche mit Massangaben
 - e) Bauart (Materialien, Geometrie)
 - f) Zugänglichkeit (zeitlich und örtlich)
 - g) Zustand (z. B. Rauigkeit Oberfläche, Risse, Schlaglöcher, stehendes Wasser, Bewuchs), ggf. Fotos beifügen
 - h) Ggf. Link zu vorhandenen Bauwerksunterlagen und früheren Untersuchungsergebnissen
- 2) Untersuchungsziel
 - a) Prüfaufgabe
 - b) Geplante Verwendung der Prüfergebnisse (z. B. Kataster, Sanierung)
 - c) Anforderungen an die Detektionstiefe
 - d) Anforderungen an Auflösung (z. B. Grösse einer zu detektierenden Fehlstelle)
 - e) Anforderungen an Genauigkeit (z. B. einer Schichtmächtigkeit)
- 3) Untersuchungsmethode:
 - a) Bezeichnung
 - b) Zu berücksichtigende Regelwerke
 - c) Messraster (Linien- und Punktabstände)
 - d) Wenn sinnvoll, z. B. wg. Vergleichbarkeit von Untersuchungsergebnissen: Vorgabe von Geräte- und Mess- und Auswerteparametern (z. B. Frequenz Radarantenne, Aufzeichnungszeit, Samplefrequenz, Signalverarbeitung)
- 4) Dokumentation/Datenübergabe
 - a) Art der Berichtslegung (nur Messergebnis, Kurzbericht oder ausführlicher Bericht, Zwischenbericht, Dokumentation für Abrechnung)
 - b) Ggf. Notwendigkeit der Neuauswertung oder Neubewertung der Daten nach Vorliegen zusätzlicher Ergebnisse (z. B. anschliessend gezogener Bohrkern)
 - c) Anforderungen Datenübergabe analog (Plan/Zeichnung)
 - d) Anforderungen Datenübergabe digital (Art, Format)
 - e) Dateneintrag in Systeme des Kunden (Art, Format z. B. in Datenbanken, BIM, GIS)
 - f) Archivierung Rohdaten (wo, wie lange, Format)
- 5) Allgemeines
 - a) Ansprechpartner (Email/Telefon)
 - b) Projektbesprechungen (wo, wie häufig, wie lange nach Berichts- und Datenübergabe)
 - c) Ggf. notwendig Zusammenarbeit mit anderen Vertragspartnern (z.B. Fachfirmen für andere Untersuchungsbestandteile)

Mit Berücksichtigung der aufgeführten Punkte 2.2.1, 2.2.2 und der Art der Messung können zusammen mit den nachfolgenden beschriebenen Techniken (unter Datenerfassung) der Raumbezug, Messgrößen und -genauigkeit die entsprechenden Ausschreibungsanforderungen spezifisch vervollständigt werden.

Die nachfolgenden Kostenschätzungen für Messungen sind Richtpreise und können je nach Länge der Messung, Anzahl der Achsen, Straßentyp usw. variieren.

2.3 Abgrenzungen

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

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

2.4 Auftrag

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

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

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

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

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

3 Anforderungen

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

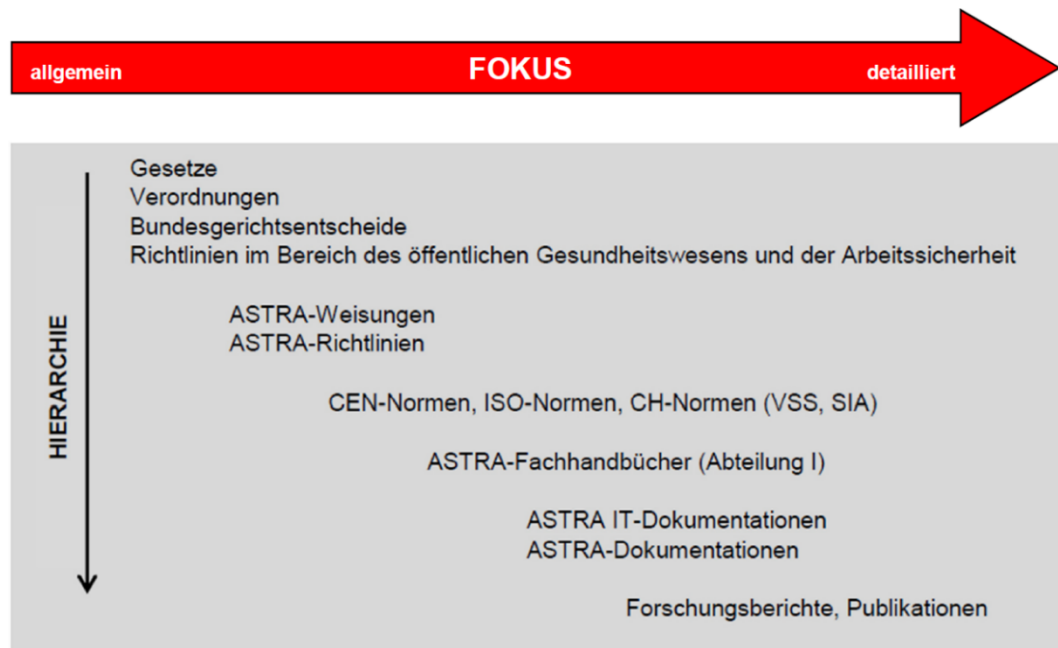


Abb. 3.3 Definition der Hierarchie von Veröffentlichungen im Geltungsbereich des Bundesamts für Strassen ASTRA

3.1 Gesetzliche Grundlagen, relevante Normen und Standards

Gesetze und Verordnungen

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

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

Normen

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

- SN 640 900a: Erhaltungsmanagement (EM); Grundnorm
- VSS 40 925b: Erhaltungsmanagement der Fahrbahnen (EMF); Zustands-erhebung und Indexbewertung
- VSS 40 925b.1: Erhaltungsmanagement der Fahrbahnen (EMF); Anleitung zur visuellen Zustandserhebung und Indexbewertung mit dem Schadenkatalog
- VSS 40 926: Erhaltungsmanagement der Fahrbahnen (EMF); Visuelle Zustandserhebung: Einzelindizes
- SN-EN-1436_2019: Straßenmarkierungsmaterialien, Anforderungen an Markierungen auf Straßen und Prüfverfahren
- SN 640 510: Eigenschaften der Fahrbahnoberflächen; Grundnorm
- VSS 40 511a: Eigenschaften der Fahrbahnoberflächen; Textur
- SN-640511-1_EN-13036-1: Oberflächeneigenschaften von Strassen und Flugplätzen; Prüfverfahren – Teil 1: Messung der Makrotexturtiefe der Fahrbahnoberfläche mit Hilfe eines volumetrischen Verfahrens
- VSS 40 512: Eigenschaften der Fahrbahnoberflächen; Griffigkeitsmessungen
- SN-640512-2_CEN/TS-13036-2: Oberflächeneigenschaften von Strassen und Flugplätzen; Prüfverfahren – Teil 2: Verfahren zur Bestimmung der Griffigkeit von Fahrbahndecken durch Verwendung von dynamischen Messsystemen
- SN-640511-3D_EN-13036-3: Oberflächeneigenschaften von Strassen und Flugplätzen – Prüfverfahren – Teil 3: Messung der horizontalen Entwässerung von Deckschichten
- SN-640512-4_EN-13036-4: Oberflächeneigenschaften von Strassen und Flugplätzen; Prüfverfahren – Teil 4: Verfahren zur Messung der Griffigkeit von Oberflächen: Der Pendeltest
- SN-EN-13036-5_2020-04: Oberflächeneigenschaften von Strassen und Flugplätzen; Prüfverfahren - Teil 5: Bestimmung der Längsunebenheitindizes
- SN-640516-6_EN-13036-6-D: Oberflächeneigenschaften von Strassen und Flugplätzen; Prüfverfahren – Teil 6: Bestimmung der Quer- und Längsprofile in den Wellenlängen der Ebenheit und der Megatextur
- SN-640516-7A_EN-13036-7: Oberflächeneigenschaften von Strassen und Flugplätzen – Prüfverfahren – Teil 7: Messung von Einzelunebenheiten von Verkehrsflächen: Messung mit der Richtlatte
- SN-640516-8_EN-13036-8: Oberflächeneigenschaften von Strassen und Flugplätzen - Prüfverfahren – Teil 8: Bestimmung der Parameter zur Ermittlung der Breitenunebenheit
- VSS 40 517: Eigenschaften der Fahrbahnoberflächen; Längsebenheit
- VSS 40 518: Eigenschaften der Fahrbahnoberflächen; Querebenheit
- VSS 40 525: Eigenschaften der Fahrbahnoberflächen; Anforderungen
- VSS 40 730b: Erhaltung von Fahrbahnen; Kopfnorm; Massnahmenkonzept
- VSS 40 733b: Erhaltung von Fahrbahnen; Oberbauverstärkung von Fahrbahnen in bituminöser Bauweise aufgrund von Deflexionsmessungen
- VSS-40330_2019-12: Eigenschaften der Fahrbahnoberflächen; Messverfahren der Tragfähigkeit – Deflexionsmessungen
- VSS-70362_2019-12: Eigenschaften der Fahrbahnoberflächen; Deflexionsmessungen – Benkelman-Balken
- VSS 40 877: Markierungen; Lichttechnische Anforderungen, Griffigkeit
- SN-EN-1436_2019: Straßenmarkierungsmaterialien, Anforderungen an Markierungen auf Straßen und Prüfverfahren
- SN 640 340a: Strassenentwässerung; Grundlagen
- VSS 40 350: Oberflächenentwässerung; Regenintensitäten

- VSS 40 353: Strassenentwässerung; Abfluss
- VSS 40 354: Strassenentwässerung; Entwässerung über das Bankett
- VSS 40 356: Strassenentwässerung; Ablauf, Strassenablauf
- VSS 40 357: Strassenentwässerung; Bemessung der Leitung
- VSS 40 361: Strassenentwässerung; Retention und Behandlung
- VSS 40 364: Strassenentwässerung; Unfälle und Havarien
- VSS 40 366: Strassenentwässerung; Aufsätze und Abdeckungen
- VSA- Richtlinie: Datenstruktur Siedlungsentwässerung (VSA-DSS)
- VSA-Richtlinie 1: Betrieblicher Unterhalt von Entwässerungsanlagen
- VSA-Richtlinie 2: Zustandserfassung von Entwässerungsanlagen
- VSA-Richtlinie 3: Optische Inspektion von Entwässerungsanlagen: Schadencodierung und Datentransfer
- VSA-Richtlinie 4: Zustandsbeurteilung von Entwässerungsanlagen
- VSA-Richtlinie 5: Baulicher Unterhalt von Entwässerungsanlagen
- VSA-Richtlinie: Dichtheitsprüfungen von Abwasseranlagen
- VSS 70 362: Benkelmanbalken; Gerät, Messvorgang und Auswertung
- SN 640 530-1a: Messung des Einflusses von Strassenoberflächen auf Verkehrsgerausche - Teil 1: Statistisches Vorbeifahrtverfahren
- SN-640530-1A_EN-ISO-11819-1-D: Akustik, Messung des Einflusses von Straßenoberflächen auf Verkehrsgerausche, Teil 1: Statistisches Vorbeifahrtverfahren (ISO 11819-1:1997)
- SN-EN-ISO-11819-2: Akustik, Messung des Einflusses von Straßenoberflächen auf Verkehrsgerausche, Teil 2: Nahfeldmessverfahren (ISO 11819-2:2017)
- SIA 197/2 Projektierung von Tunnel - Strassentunnel
- SIA 267: Geotechnik (2013)
- SN-EN-ISO-13473-1_2022-04: Charakterisierung der Textur von Fahrbahnbelägen unter Verwendung von Oberflächenprofilen; Teil 1: Bestimmung der mittleren Profiltiefe
- SN-640511-1_EN-13473-5: Charakterisierung der Textur von Fahrbahnbelägen unter Verwendung von Oberflächenprofilen; Teil 5: Bestimmung der Megatextur
- EN ISO 14688: Geotechnische Erkundung und Untersuchung
- EN ISO 18674: (1 10): Normen für die geotechnische Überwachung und Instrumentierung

Internationale Richtlinien

- DIN EN 13473-2:2004-07: Charakterisierung der Textur von Fahrbahnbelägen unter Verwendung von Oberflächenprofilen - Teil_2: Begriffe und grundlegende Anforderungen für die Analyse von Fahrbahntexturprofilen (ISO_13473-2:2002).
- DIN EN 13473-3:2004-07: Charakterisierung der Textur von Fahrbahnbelägen unter Verwendung von Oberflächenprofilen - Teil_3: Anforderungen an und Einteilung von Profilometern (ISO_13473-3:2002).
- DIN EN ISO 11819-4:2013-03: Akustik - Messung des Einflusses von Straßenoberflächen auf Verkehrsgerausche - Teil 4: Statistisches Vorbeifahrtverfahren unter Verwendung einer Abschirmplatte (backing board) (ISO 11819-4:2013-03); Deutsche Fassung EN ISO 11819-4:2013-03, Beuth Verlag GmbH.
- DIN 1054: Baugrund – Sicherheitsnachweise im Erd- und Grundbau (alt -> siehe DIN EN 1997-1)
- DIN 4019: Baugrund – Setzungsberechnungen (drei Teile, zwei Beiblätter)
- DIN 4020: Geotechnische Untersuchungen für bautechnische Zwecke – Ergänzende Regelungen zu DIN EN 1997-2 (mit einem Beiblatt)
- DIN 18134: Baugrund - Versuche und Versuchsgeräte - Plattendruckversuch
- DIN 18201: Maßtoleranzen im Hochbau
- DIN 18202: Toleranzen im Hochbau, regelt die Grenzabmaße, Winkeltoleranzen und Ebenheitstoleranzen

- DIN EN 1997 - Eurocode 7: Entwurf, Berechnung und Bemessung in der Geotechnik
- DIN EN ISO 2282-1: Geotechnische Erkundung und Untersuchung – Geohydraulische Versuche
- TP Eben: Berührende Messungen - Technische Prüfvorschriften für Ebenheitsmessungen auf Fahrbahnoberflächen in Längs- und Querrichtung Teil: Berührende Messungen
- TP Eben: Berührungslose Messungen - Technische Prüfvorschriften für Ebenheitsmessungen auf Fahrbahnoberflächen in Längs- und Querrichtung Teil: Berührungslose Messungen
- ISO 10303-41: IRI (international roughness index).
- ISO 10303-41: MPD Mean Profile Depth
- TP Oberflächenbild-StB 20: Technische Prüfvorschriften für die Erfassung von Substanzmerkmalen (Oberfläche) mit schnellfahrenden Messsystemen - Teil: Bildaufnahme- und Auswertetechnik
- TP Griff-StB (SRT): Technische Prüfvorschriften für Griffigkeitsmessungen im Straßenbau Teil: Messverfahren SRT
- TP Griff-StB (SKM): Technische Prüfvorschriften für Griffigkeitsmessungen im Straßenbau Teil: Seitenkraftmessverfahren (SKM)
- TP Textur-StB (ZTM) 20: Technische Prüfvorschriften für Texturmessungen im Verkehrswegebau - Teil: Zirkulares Texturmessverfahren (ZTM)
- TP KoSD-19: Technische Prüfvorschriften zur Korrekturwertbestimmung der Geräuschemission von Straßendeckschichten
- TP BF-StB: Technische Prüfvorschriften für Boden und Fels im Straßenbau
- TP D-StB 12: Technische Prüfvorschriften zur Bestimmung der Dicken von Oberbauschichten im Straßenbau
- TP Gestein-StB Part 6.6.3 E: Technical testing regulations for aggregates in road construction (TP Gestein-StB) Part 6.6.3: Water susceptibility of fine aggregates - Shaking abrasion method
- RLS-19: Richtlinien für den Lärmschutz an Straßen
- RVS 13.01.11: Zustandsbeschreibung und mögliche Schadensursachen von Asphalt- und Betonstrassen
- RVS 13.01.15 Beurteilungskriterien für messtechnische Zustandserfassung mit dem System RoadSTAR
- RVS 13.01.16: Bewertung von Oberflächenschäden und Rissen auf Asphalt- und Betondecken
- ÖNORM B 4402: Erd- und Grundbau – Geotechnische Untersuchungen für bautechnische Zwecke

Standards des ASTRA:

Weisungen, Richtlinien, Fachhandbücher und Dokumentationen

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

Weisungen

- ASTRA 71005 Qualitätsanforderungen bitumenhaltiger Schichten; Massnahmen bei Abweichungen (2010 V1.21)
- ASTRA 72001 Strassenraum mehrfach nutzen (1991 V1.00)
- ASTRA 78003 Vollzug der Umweltgesetzgebung bei Projekten der Nationalstrassen (2017 V1.02)

Richtlinien

- ASTRA 10001 Nationalstrassennetz als räumliches Basis-Bezugssystem RBBS (2017 V1.20)

- ASTRA 11001 Normalprofile - Nationalstrassen 1. und 2. Klasse mit Richtungstrennung (2021 V3.00)
- ASTRA 11002 Berücksichtigung des Unterhalts bei der Projektierung und beim Bau der Nationalstrassen (2002)
- ASTRA 1b001 Inventarobjekte
- ASTRA 11005 Fahrzeugrückhaltesysteme (2013 V3.00)
- ASTRA 18007 Grünräume an Nationalstrassen; Gestaltung und betrieblicher Unterhalt (2015 V1.10)
- Die ASTRA-Richtlinie 18005 «Strassenabwasserbehandlung an Nationalstrassen»

Dokumentationen

- ASTRA 80002 Materialisierung und Versicherung der Bezugspunkte auf den Nationalstrassen (2017 V1.0)
- ASTRA 80003 Nummerierung und Anzeige der Streckenkilometer der NS 3. Klasse (2020 V1.00)
- ASTRA 81002 Fahrzeugrückhaltesysteme (2020)
- ASTRA 61014 MISTRA Trasse TRA – Datenerfassungshandbuch (2021 V2.10)
- ASTRA 68014 MISTRA LBK Sofortlösung; Datenerfassungshandbuch (2021 V2.21)
- ASTRA 68024 MISTRA SABA; Datenerfassungshandbuch (2019 V1.50)
- ASTRA 88002 Strassenabwasserbehandlung: Stand der Technik
- ASTRA 88010 CPX-Messungen auf Nationalstrassen (2017 V1.00)
- ASTRA 88016 Methodologie Bewertung Zustandserfassung Grünräume (2022 V1.00)

Fachhandbücher

- ASTRA 21001 Fachhandbuch Trasse / Umwelt (2022)
- ASTRA 22001 Fachhandbuch Kunstbauten (2022)
- ASTRA 24001 Fachhandbuch Tunnel / Geotechnik (2022)
- ASTRA 2B010 Handbuch Erhaltungsplanung (2016 V1.01)

3.2 Rahmenbedingungen

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

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

4 Grundlagen

Die Grundlagen für den in Kapitel 2.4 definierten Auftrag bilden der aktuelle Stand der Technik zum Einsatz bewährter und neuer Überwachungstechnologien sowohl in der schweizerischen als auch in der internationalen Praxis und Forschung im Bereich der Verkehrsinfrastruktur. Hierbei liegt der Fokus auf den einzelnen Teilsystemen Kunstbauten, Tunnel und Trasse sowie auf den Querschnittsthemen Umwelt, Naturgefahren und Geotechnik. Die im vorliegenden Bericht behandelten Überwachungstechnologien basieren damit auf Forschungen in den Bereichen der Sensormessung in direktem Kontakt und der berührungsfreien Messung (z.B. Laser- oder Radarmessung im Nahfeld bzw. Fernerkundungen).

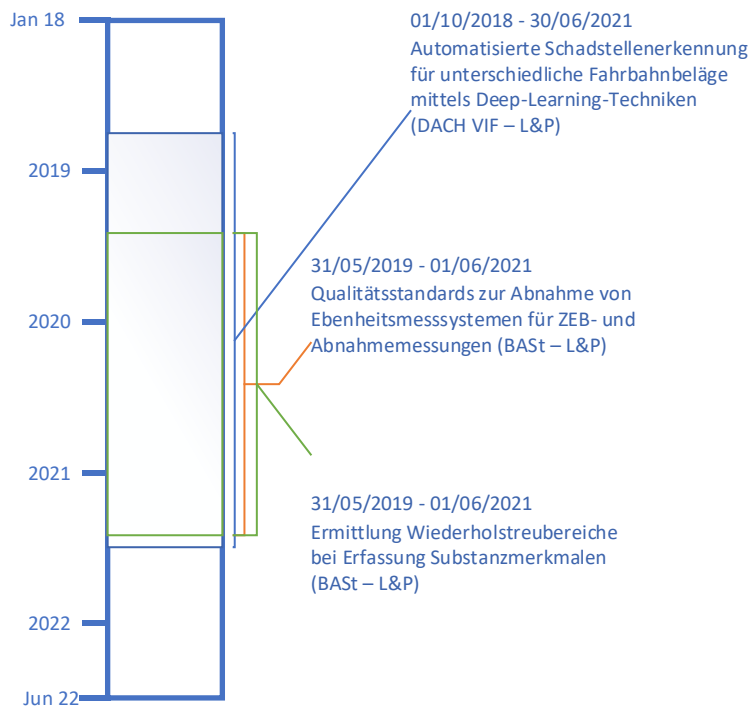


Abb. 4.4 Zeitliche Einordnung relevanter Forschungs- und Monitoring-Projekte TP Trasse

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

4.1 Forschungsberichte

Die nachfolgende Tabelle zeigt die wichtigsten Forschungsberichte im Kontext dieses Projektes. Hierbei liegt besonderes Augenmerk auf den verschiedenen Technologien zum Monitoring des Trassees. Zusätzlich sind verschiedene Forschungsberichte zur Bedeutung und Bewertung verschiedener Indikatoren im Bereich Trasse aufgeführt.

Tab. 4.1 Wichtigste Forschungsberichte im Kontext von NTech

FFG-VIF-DACH 2018 - ASFALT	Automatisierte Schadstellenerkennung für unterschiedliche Fahrbahnbeläge mittels Deep-Learning-Techniken
FE 04.0248/2011/DGBAGB2002/009	Integrale Bewertung der Ebenheit - Feldversuche mit dem akustischen Überwachungssystem Soundprint
FE 04.02612012MRB	Ermittlung der Vergleichs- und Wiederholstreubereiche bei der Erfassung von Substanzmerkmalen (Oberfläche)
FE 04.0326/2018/DGB	Fortschreibung von Qualitätsstandards zur Abnahme von Ebenheitsmesssystemen für ZEB- und Abnahmemessungen vor dem Hintergrund neuer Erfassungstechnologien
VSS2009/703	Zusammenhang Textur und Griffigkeit von Fahrbahnen und Einflüsse auf die Lärmemission
VSS2010/701	Grundlagen zur Revision der Normung über die visuelle Erhebung des Oberflächenzustandes
VSS2009/706	Verfahren zur Erhaltungsplanung von Strassennetzen in der Praxis
VSS2005/702	Überprüfung des Bewertungshintergrundes zur Beurteilung der Strassengriffigkeit
VSS2008/702	Abnahmemessung der Griffigkeit von neuen Deckschichten anhand von Makrotexturaufnahmen
VSS 2010/012	Forschungspaket: Lärmarme Beläge innerorts - EP3: Betrieb und Unterhalt lärmarmen Beläge
VSS 2014/713	Massnahmenplanung im Erhaltungsmanagement von Fahrbahnen Bedeutung Oberflächenzustand und Tragfähigkeit sowie gegenseitige Beziehung für Gebrauchs- und Substanzwert
VSS 2018/421	Modelle der Zustandsentwicklung von Fahrbahnen – mapFALKE

4.2 Bestehende Monitoring-Anwendungen

4.2.1 Allgemein

Durch die Mehrfachmessungen kann ein ungewöhnliches zeitliches Verhalten einer Trassenoberfläche oder das Überschreiten von festgelegten Grenzwerten frühzeitig erfasst werden. Der Umfang dieser Messungen wird anwendungsbezogen bestimmt.

4.2.2 Wichtigste Anwendungen im Kontext des Projektes

In der nachfolgenden Tabelle sind ausgewählte Projekte im Fachbereich Trasse sowie Naturgefahren zusammengestellt, wo ein Monitoring mit verschiedenen Überwachungstechnologien realisiert wurde.

Tab. 4.2 Anwendungsfälle im Kontext dieses Projektes

Objekt	Zielgrösse	Überwachungs-Technologien	Ref.
Trasse			
Teilstück A81 (D) und Teststrecke in Berlin	Erfassung von Oberflächenschäden	Nutzung von in modernen Fahrzeugen vorhandener Sensorik	
duraBASt – Autobahnkreuz A3/A4 (D)	Tragfähigkeit, Schichtdicken, Anomalien, Substanzmerkmale der Oberfläche, Ebenheiten	Zertifizierte Messtechnologien, neue Technologien	
Verbundprojekt „Leiser Straßenverkehr 2“	akustische Langzeitwirkung von Belägen	akustischen Messgeräte	[199]
Naturgefahren			
Axenstrasse	Überwachung Felssturz, Murgang, Erschütterungen, Bewegungen, Niederschlag.	Steinschlagradare, Kameras, Pluviometer, Georadar, Kombibewegungssensoren	
Brünig	Überwachung Felssturz	terrestrisches interferometrisches Radar; Extensometer; Geodätische Aufnahmen / Tachymeter, Handmessstellen	
Lawinen Brienzersee	Überwachung und Alarmierung (automat. Sperrung Strasse) Lawinen	Pendel an Drahtseil; Geophone, Lawinenradar; mit Rücknahme-system unten an der Strasse	

5 Methodisches Vorgehen

5.1 Grundsatz

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

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

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

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

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

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

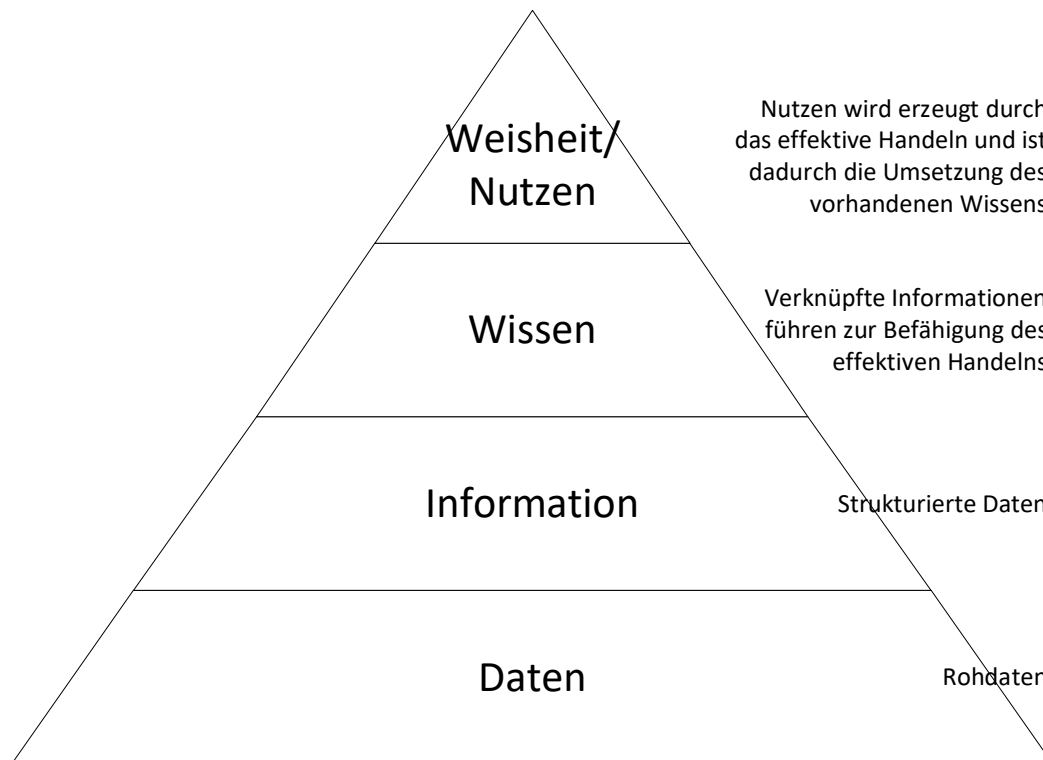


Abb. 5.5 Wissenspyramide (vgl. [2])

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

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

mit

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

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

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

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

5.2 Grundlage der Technologiebeschreibung

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

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

5.3 Überblick über die Bewertungsmethodik

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

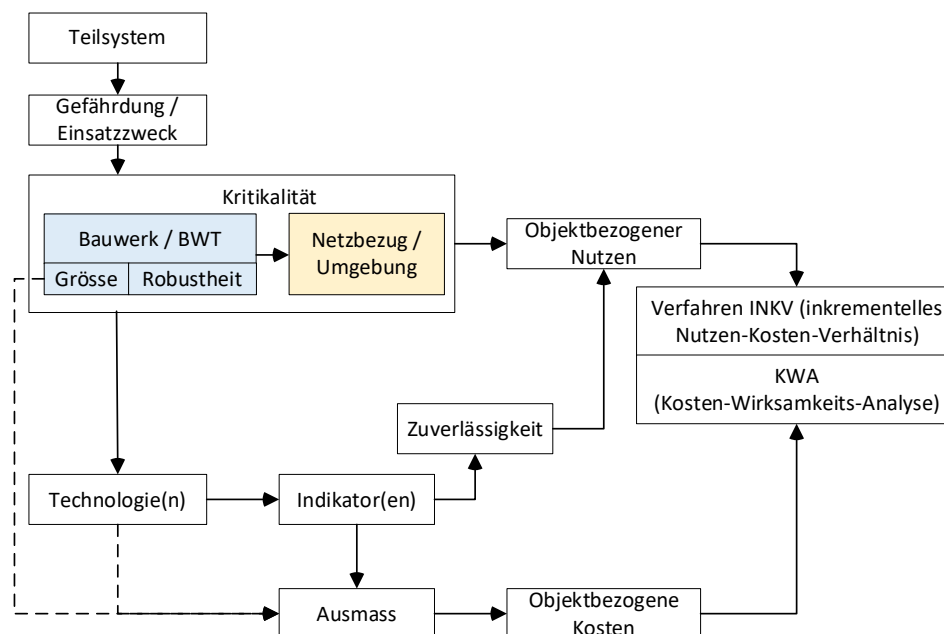


Abb. 5.6 Konzept der Bewertung der Technologien am Wert der Information

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

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

5.4 Verallgemeinerung durch Klassifizierung

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

5.4.1 Kritikalität eines Bauwerks oder eines seiner Bauwerksteile

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

Bauwerksgrösse

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

Robustheit

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

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

Abb. 5.7 Einfache qualitative Klassifizierung der Robustheit

Netzbezug

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

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

Abb. 5.8 Einfache qualitative Klassifizierung des Netzbezugs

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

Robustheit	Kritikalität		
gering			
mittel			
gross			
	gering	mittel	gross
	Konsequenzen des Versagens		

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

5.4.2 Objektbezogener Nutzen

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

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

Zuverlässigkeit

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

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

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

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

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

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

Zusätzlicher Nutzen in Abhängigkeit des Ausmasses

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

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

Abb. 5.12 Klassifizierung des zusätzlichen Nutzens bei grossem Ausmass

Darstellung eines Mehrfachnutzens

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

5.4.3 Objektbezogene Kosten

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

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

5.5 Evaluation von Technologien

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

5.5.1 Einfache qualitative Technologiebewertung

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

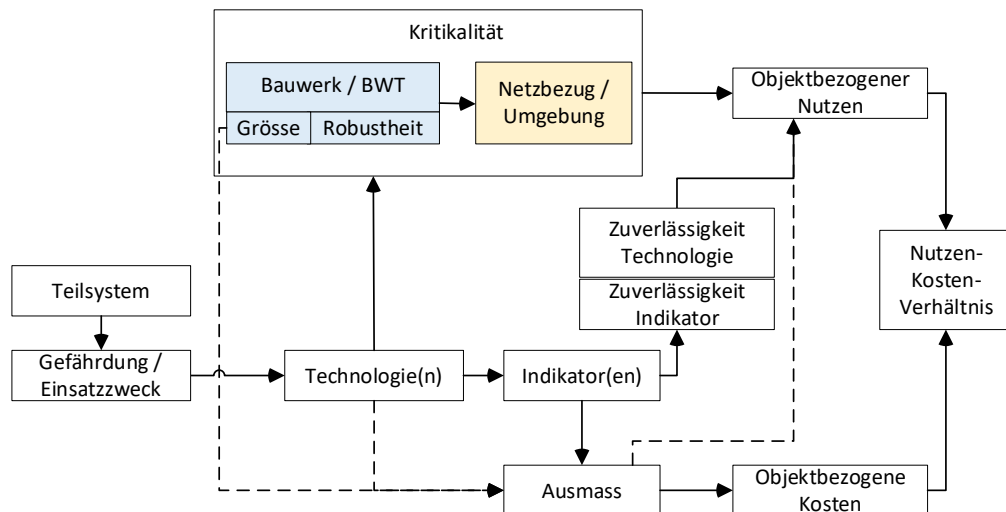


Abb. 5.13 Ablauf zur einfachen qualitativen Bewertung ausgehend von den im Teilsystem vorhandenen Technologien

Qualitative Ermittlung des objektbezogenen Nutzens

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

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

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

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

5.5.2 Einzelbewertung am Infrastrukturobjekt

Für die Einzelbewertung am Infrastrukturobjekt sind die spezifischen örtlichen Randbedingungen über eine Risikobetrachtung konkret zu analysieren. Dabei können

Computermodelle helfen, die Wahrscheinlichkeit eines Versagens (z.B. Tragwerksmodelle linear, flächenbezogen oder FEM) oder dessen Konsequenzen (z.B. Verkehrssimulationen mit [7]) zu quantifizieren.

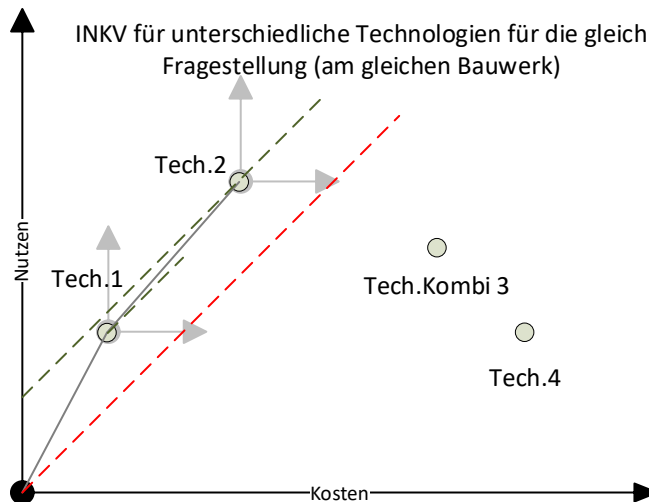


Abb. 5.14 Verfahren des Inkrementellen Nutzen-Kosten-Verhältnisses (INKV)

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. 5.14, [4] und [8]).

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

5.6 Literaturverzeichnis

Sonstige Literatur / Forschungsberichte

- [1] Schiffmann, Frank; Büchel, Beda; Botzen, Matthias; Hajdin, Rade und Weninger-Vycudil (2017) Gutachten zum internationalen Vergleich des Zustands von Strassen. unveröffentlichtes Gutachten, Bundesanstalt für Strassen BAST, Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur BMVI, Bonn
- [2] Ackoff, R. L. (1989): From Data to Wisdom. In Journal of Applied Systems Analysis 16 (16), pp. 3–9.
- [3] Lükking, Jost; Herrmann, Thomas; Schindele, Nadine; Adey, Bryan Tyrone; Hajdin, Rade (2008): Gesamtnutzen und Nutzen-Kosten-Verhältnis von standardisierten Erhaltungsmassnahmen. Schlussbericht VSS 2004/714. Strassen, Bundesamt für. Bern (Schriftenreihe, 1244).
- [4] van Linn, Andreas; Welte, Urs; Hajdin, Rade; Adey, Bryan (2009): Sicherheit des Verkehrssystems Strasse und dessen Kunstbauten; Effektivität und Effizienz von Massnahmen. AGB 2005/104. Bundesamt für Strassen AST-RA (Schriftenreihe Brückenforschung, FB620).
- [5] Adey, Bryan; Hajdin, Rade; van Linn, Andreas; Welte, Urs (2009): Sicherheit des Verkehrssystems Strasse und dessen Kunstbauten; Effektivität und Effizienz von Massnahmen bei Kunstbauten. AGB 2005/109. Bundesamt für Strassen ASTRA (Schriftenreihe Brückenforschung, FB625).

-
- [6] SN 641 820 (2019): Kosten-Nutzen-Analysen im Strassenverkehr, Grundnorm. Swiss Code. Zürich: Schweizerischer Verband der Strassen- und Verkehrsfachleute (VSS) (SN 640 820).
-
- [7] ARE (2020) Nationales Personenverkehrsmodell NPVM 2017. Eidgenössisches Departement für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK, Bundesamt für Raumentwicklung ARE, Bern 2020
-
- [8] Rafi, Ali; Hajdin, Rade; Welte, Urs (2005): Optimierungsprozesse im Management der Strassenerhaltung (MSE). Edited by Ve. Bern (Schriftenreihe, 1109).
-

6 Evaluierte Technologien und Datenquellen für die Überwachung im Überblick

6.1 Übersichtstabellen – Legende

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

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

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

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

Tab. 6.3 Legende

[illegible]

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

1. Relevantes Bauwerk / Bauwerksteil → z.B. Fahrbahn Asphalt / Beton
2. Spezifische Fragestellung → z.B. Sicherheit
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 Übersicht der evaluierten Technologien nach Einsatzzweck

Substanz	Befahrbarkeit	Sicherheit		Name	Art der Prüfung	4. weitere Fachbereiche		Art der Prüfung	1. Fahrbahn										Inventar					4. Einsatzzeitpunkt	(Links zu) Seite(n)	weitere Erläuterungen (Links zu) Quellenverzeichnis																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																								
		Querenheit [mm]	Querenheit [mm]			Trassee	Decke (Asphalt)		Asphalttragschichten	Tragschichten mit hydr. Bindemittel	Schichten ohne Bindemittel	Untergrund / Unterbau	Fahrzeughaltssysteme	Lärmschutz / Zäune und Tore	Entwässerung auf Fahrbahn	Gelände inklusive Mulden																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																		
Einbauteile (Lage, Größe)	Substanzmerkmal [Indikator in %]	Schichtdicken [mm]	Ultraschall Echo	Pendelgerät	RPR_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

		Einsatzzweck		ZfP / ZaP / ZP (NDT/PDT/DT)		Ober- fläche		Oberbau				Inventar			Einsatz-/Durch- führungs-Zeitpunkt		Detaildaten (Links zu) Seite(n)		weitere Erläuterungen (Links zu) Quellenverzeichnis																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																										
		Name		ID		Fachgebiet -->		Trassee		Geotechnik		Naturgefahren		Umwelt		Messszenario (Punktuell, Serienmessung)		Markierung		Fahrbahn Asphalt/Beton		Decke (Asphalt)		Decke (Beton)		Asphalttragschichten		Tragschichten mit hydr. Bindemittel		Schichten ohne Bindemittel		Untergrund / Unterbau		Fahrzeugrückhaltesysteme		Lärmschutz / Zäune und Tore		Entwässerung auf Fahrbahn		Gelände inklusive Mulden																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					

		Einsatzzweck		Name		ZfP / ZaP / ZP (NDT/PDT/DT)		Fachgebiet -->		Trassee		Geotechnik		Naturgefahren		Umwelt		<--- bauwerks-bezogen		Messszenario (Punktuell, Serienmessung)		Ober- fläche		Oberbau					Inventar			Gelände inklusive Mulden		Einsatz-/Durch- führungs-Zeitpunkt		Detaildaten (Links zu) Seite(n)		weitere Erläuterungen (Links zu) Quellenverzeichnis	
				"ID"																																			
		Radar		ARd_ZfP		3		0		2		2		2		2				S		S		0		0		0		0		0		0		0		0	
		Ultraschall-Echo		AUS_ZfP		3		0		0		0		0		0				S		S		0		0		0		0		0		0		0		0	
		Impakt-Echo		AIE_ZfP		3		0		0		0		0		0				S		S		0		0		0		0		0		0		0		0	
		Refraktionsseismik		ARS_ZfP		2		2		2		2		2		2				P		P		0		0		0		0		0		0		0		0	
		SASW/MASW		ASM_ZfP		2		2		2		2		2		2				P		P		0		0		2		1		1		1		2		2	
		Geoelektrik		AGE_ZfP		2		2		2		2		2		2				P		P		0		0		0		0		0		0		0		0	
		Thermographie		ATH_ZfP		2		0		0		0		0		0				S		S		0		0		2		2		0		0		0		0	
		Elektronagnetik		AMG_ZfP		2		2		2		2		2		2				S		S		0		0		0		0		0		0		0		0	
		Plattendruckversuch		DPd_ZfP		3		2		0		0		0		0				P		P		0		0		3		3		3		1		4		4	
		Berkehn-Balken		DBe_ZfP		3		0		0		0		0		0				P		P		0		0		3		3		3		1		4		4	
		Deflektograph/acroix		DDe_ZfP		3		0		0		0		0		0				P		P		0		0		3		3		3		3		1		4	
		Fallgewichtsgesetz		DFg_ZfP		3		2		0		0		0		0				P		P		0		0		3		3		3		4		4			
		Falling Weight Deflectometer		DFw_ZfP		3		0		0		0		0		0				PS		PS		0		0		3		3		3		4		4			
		Curviometro		DCu_ZfP		3		0		0		0		0		0				S		S		0		0		3		3		3		1		0			
		Traffic Speed Deflectometer		DSD_ZfP		3		0		0		0		0		0				S		S		0		0		3		3		3		1		0			
		Rapid Pavement Tester		DPt_ZfP		3		0		0		0		0		0				S		S		0		0		3		3		3		1		0			
		Weigh in Motion		AWM_Zap		3		0		0		0		1		1				P		P		0		3		0		0		0		0		0			
		Rollgeräuschrückmessung		LmR_ZfP		3		0		0		0		3		3				S		S		0		0		0		0		0		0		0			
		statistische Vorbefahrt		LmV_ZfP		3		0		0		0		3		3				P		P		0		0		0		0		0		0		0			
		Winkel Streckenmessung GNSS		PWS_ZfP		3		3		3		3		3		3				PS		PS		2		2		0		0		0		0		0			
		mobile Positionsbestimmung		PMW_ZfP		3		3		3		3		3		3				S		S		3		3		0		0		0		0		0			
		Terrestrische Radarinterferometrie		TRf_ZfP		1		1		3		0		0		0				S		S		0		0		0		0		0		0		0			
		Satellengestützte Radaranterferometrie		SRf_ZfP		1		1		2		2		2		2				S		S		0		0		0		0		0		0		0			
		Geodätische Aufnahmen		GdA_ZfP		4		4		3		1		1		1				P		P		0		0		0		0		0		0		0			
		Inklinometer		IKV_Zap		1		4		3		0		0		0				P		P		0		0		0		0		0		0		0			
		Nivellement		NIV_ZfP		4		3		3		1		1		1				P		P		0		0		0		0		0		0		0			
		Bewegungs-Radar (Dopplerradar)		BWR_ZfP		1		1		4		0		0		0				PS		PS		0		0		0		0		0		0		0			
		Pegel-Radar		PRd_ZfP		1		1		4		1		1		1				P		P		0		0		0		0		0		0		0			
		Infrasound		IFS_ZfP		1		1		4		0		0		0				P		P		0		0		0		0		0		0		0			
		Reisstelen		RSL_ZfP		1		1		4		0		0		0				P		P		0		0		0		0		0		0		0			
		Terrestrische Radarinterferometrie		TRf_ZfP		1		1		3		0		0		0				S		S		0		0		0		0		0		0		0			
		Satellengestützte Radaranterferometrie		SRf_ZfP		1		1		2		2		2		2				S		S		0		0		0		0		0		0		0			
		Geodätische Aufnahmen		GdA_ZfP		4		4		3		1		1		1				P		P		0		0		0		0		0		0		0			
		Inklinometer		IKV_Zap		1		4		3		0		0		0				P		P		0		0		0		0		0		0		0			
		Nivellement		NIV_ZfP		4		3		3		1		1		1				P		P		0		0		0		0		0		0		0			
		Bewegungs-Radar (Dopplerradar)		BWR_ZfP		1		1		4		0		0		0				PS		PS		0		0		0		0		0		0		0			
		Pegel-Radar		PRd_ZfP		1		1		4		1		1		1				P		P		0		0		0		0		0		0		0			
		Infrasound		IFS_ZfP		1		1		4		0		0		0				P		P		0		0		0		0		0		0		0			
		Reisstelen		RSL_ZfP		1		1		4		0		0		0				P		P		0		0		0		0		0		0		0			
		Terrestrische Radarinterferometrie		TRf_ZfP		1		1		3		0		0		0				S		S		0		0		0		0		0		0		0			
		Satellengestützte Radaranterferometrie		SRf_ZfP		1		1		2		2		2		2				S		S		0		0		0		0		0		0		0			
		Geodätische Aufnahmen		GdA_ZfP		4		4		3		1		1		1				P		P		0		0		0		0		0		0		0			
		Inklinometer		IKV_Zap		1		4		3		0		0		0				P		P		0		0		0		0		0		0		0			
		Nivellement		NIV_ZfP		4		3		3		1		1		1				P		P		0		0		0		0		0		0		0			
		Bewegungs-Radar (Dopplerradar)		BWR_ZfP		1		1		4		0		0		0				PS		PS		0		0		0		0		0		0		0			
		Pegel-Radar		PRd_ZfP		1		1		4		1		1		1				P		P		0		0		0		0		0		0		0			
		Infrasound		IFS_ZfP		1		1		4		0		0		0				P		P		0		0		0		0		0		0		0			
		Reisstelen		RSL_ZfP		1		1		4		0		0		0				P		P		0		0		0		0		0		0		0			
		Terrestrische Radarinterferometrie		TRf_ZfP		1		1		3		0		0		0				S		S		0		0		0		0		0		0		0			
		Satellengestützte Radaranterferometrie		SRf_ZfP		1		1		2		2		2		2				S		S		0		0		0		0		0		0		0			
		Geodätische Aufnahmen		GdA_ZfP		4		4		3		1		1		1				P		P		0		0		0		0		0		0		0			
		Inklinometer		IKV_Zap		1		4		3		0		0		0				P		P		0		0		0		0		0		0		0			
		Nivellement		NIV_ZfP		4		3		3		1		1		1				P		P		0		0		0		0		0		0		0			
		Bewegungs-Radar (Dopplerradar)		BWR_ZfP		1		1		4		0		0		0				PS		PS		0		0		0		0		0		0		0			
		Pegel-Radar		PRd_ZfP		1		1		4		1		1		1				P		P		0		0		0		0		0		0		0			
		Infrasound		IFS_ZfP		1		1		4		0		0		0				P		P		0		0		0		0		0		0		0			
		Reisstelen		RSL_ZfP		1		1		4		0		0		0				P		P		0		0		0		0		0		0		0			
		Terrestrische Radarinterferometrie		TRf_ZfP		1		1		3		0		0		0				S		S		0		0		0		0		0		0		0			
		Satellengestützte Radaranterferometrie		SRf_ZfP		1		1		2		2		2		2				S		S		0		0		0		0		0		0		0			
		Geodätische Aufnahmen		GdA_ZfP		4		4		3		1		1		1				P		P		0		0		0		0		0		0		0			
		Inklinometer		IKV_Zap		1		4		3		0		0		0				P		P		0		0		0		0		0		0		0			
		Nivellement		NIV_ZfP		4		3		3		1		1		1				P		P		0		0		0		0		0		0		0			
		Bewegungs-Radar (Dopplerradar)		BWR_ZfP		1		1		4		0		0		0				PS		PS		0		0		0		0		0		0		0			
		Pegel-Radar		PRd_ZfP		1		1		4		1		1		1				P		P		0		0		0		0		0		0		0			
		Infrasound		IFS_ZfP		1		1		4		0		0		0				P		P		0		0		0		0		0		0		0			
		Reisstelen		RSL_ZfP		1		1		4		0		0		0				P		P		0		0		0		0		0		0		0			
		Terrestrische Radarinterferometrie																																					

6.2 Evaluierte Technologien – Übersicht in Bezug auf Anwendungsfälle

Die Evaluation der Technologien erfolgte gruppiert nach dem jeweiligen Zweck des Einsatzes. Für die bessere Übersicht wurden die Einsatzzwecke zusätzlich zu folgenden Obergruppen zusammengefasst:

Sicherheit

Unter dem Aspekt der Sicherheit werden alle Einsatzzwecke zusammengefasst die aus Nutzersicht eine sichere Nutzung der Strasse gewährleisten. Dazu zählen Eigenschaften der Fahrbahn die eine gute Griffigkeit (Rauheit, Textur), eine sichere Verkehrsführung (Fahrbahnmarkierungen) und eine hindernisfreie Benutzung (Lichtprofil) adressieren.

Befahrbarkeit

Bei der Betrachtung der Befahrbarkeit stehen aus Nutzersicht vor allem qualitative Aspekte während der Benutzung im Vordergrund. Diese Aspekte wirken sich allerdings auch direkt auf die Langlebigkeit einer Strasse aus und müssen daher langfristig überwacht werden. Unter diese Aspekte zählen die Ebenheiten (Längsebenheit und Querebenheit) und auch die Querneigung.

Substanz

Verfahren für die Beurteilung der strukturellen Substanz der Fahrbahn sind der Obergruppe Substanz zugeordnet. Neben Verfahren zur Bestimmung von Schadensindikatoren der Oberfläche (Substanzmerkmale Oberfläche), werden in dieser Gruppe auch Verfahren für die Analyse des Oberbaus zusammengefasst. Entsprechend werden Verfahren für die Bestimmung von Schichtdicken im Oberbau (Schichtdicken), für die Kontrolle von Einbauteilen (Einbauteile), für das Auffinden von Anomalien (Anomalien im Material) und für die Bestimmung der Tragfähigkeit der Fahrbahn (Tragfähigkeit) vorgestellt. Weiterhin finden sich unter den Punkt Achslast ein Verfahren, welches in der Lage ist den Gebrauch der Strasse zu analysieren, wodurch zusätzlich Rückschlüsse auf die Entwicklung der Substanz möglich werden.

Umwelt

Unter der Gruppe Umwelt befinden sich Verfahren für die Lärmmessung, welche Einflüsse des Trassees auf die Umwelt untersuchen. Zusätzlich befinden sich in diese Gruppe Verfahren zur Positionsbestimmung, welche für viele weitere Technologien eine wichtige Grundlage darstellt.

Bauwerksentkoppelte Überwachung

Unter der Obergruppe der Bauwerksentkoppelten Überwachung finden sich vorrangig Verfahren für den Umgang mit Naturgefahren im Bereich des Trassees. Dabei wird nach Verfahren für die Detektion von Baugrundverformungen und von Massenbewegungen unterschieden.

7 Bewährte Technologien

Die Beschreibung der verfügbaren Technologien auf dem Gebiet Trasse gliedert sich vorliegend zunächst nach den Anforderungen an eine Verkehrsanlage: Sicherheit, Befahrbarkeit, Substanz sowie die Umwelt. In zweiter Gliederungsebene erfolgt eine Kategorisierung der Technologien in Bezug auf den Einsatzzweck. Der Inhalt ist daher nach den in dargestellten Hauptkategorien gegliedert.

Tab. 7.5 Kategorisierung der Überwachungstechnologien nach ihrer übergeordneten Gruppe, dem Einsatzzweck und dem Messprinzip.

	Einsatzzweck	Technologie			Detaildaten (Links zu) Seite(n)
		Name	"ID"	ZfP / ZaP / ZP (NDT/PDT/DT)	
Sicherheit	Rauheit [Reibwert μ]	Pendelgerät	RRP_	ZfP	7.1
		schräglaufendes Rad	RSL_	ZfP	7.2
		definiert blockiertes Rad	RBR_	ZfP	7.3
		definiert gebremstes Rad	RGR_	ZfP	7.4
	Textur [Rt in mm]	Sandflächenverfahren	TSAN	ZfP	7.5
		Lasersensoren	TLA_	ZfP	7.6
		Triangulationssensoren	TTS_	ZfP	7.7
	Markierung [mcd/lx]	Retroreflektometrie	RRe_	ZfP	7.8
	Lichttraumprofil / Höhe [m]	Laserscanning	LIL_	ZfP	7.9
		Winkel, Streckenmessung	LIW_	ZfP	7.10
Befahrbarkeit	Längsebenheit [PGR in mm, AUN in $\Phi h/(\Omega 0)$ oder IRI in mm/m]	Richtlatte (4 m)	LLa_	ZfP	7.11
		Planograf	LPI_	ZfP	7.12
		Goniograph	LGo_	ZfP	7.13
		Lasersensoren	LLS_	ZfP	7.14
		Laserscanner	LLC_	ZfP	7.15
		Triangulationssensoren	LTr_	ZfP	7.16
	Querebenheit [spt/l in mm]	Richtlatte (4 m)	QLa_	ZfP	7.17
		Lasersensoren	QLS_	ZfP	7.18
		Laserscanner	QLC_	ZfP	7.19
		Lichtschnittverfahren	QLi_	ZfP	7.20
	Querneigung [%]	Neigungsmesser	QnN_	ZfP	7.21
		inertiales Kreiselssystem	QnK_	ZfP	7.22
		Laserscanner	QnL_	ZfP	7.23
	Substanzmerk- male Oberfläche [Indikator in %]	Photogrammetrie	SOP_	ZfP	7.24
		Laserscanner	SOL_	ZfP	7.25
		Lichtschnittverfahren	SOS_	ZfP	7.26
Substanz	Schichtdicken [mm] und -parameter (Dichte/ E-Modul etc).	Radar	SRd_	ZfP	7.27
		Ultraschall-Echo	SUs_	ZfP	7.28
		Impakt-Echo	SIE_	ZfP	7.29
		Refraktionsseismik	SRs_	ZfP	7.30
		SASW/MASW	SSM_	ZfP	7.31
		Geoelektrik	SGe_	ZfP	7.32

	Einsatzzweck	Technologie			Detaildaten (Links zu) Seite(n)
		Name	"ID"	ZfP / ZaP / ZP (NDT/PDT/DT)	
Substanz	Anomalien im Material (Qualitativ/Quantitativ)	Radar	ARd_	ZfP	7.36
		Ultraschall-Echo	AUs_	ZfP	7.37
		Impakt-Echo	AIE_	ZfP	7.38
		Refraktionsseismik	ARs_	ZfP	7.39
		SASW/MASW	ASM_	ZfP	7.40
		Geoelektrik	AGe_	ZfP	7.41
		Thermographie	ATh_	ZfP	7.42
		Elektromagnetik	AMg_	ZfP	7.43
	Tragfähigkeit [Deflektion in µm]	Plattendruckversuch	DPd_	ZfP	7.44
		Benkelman-Balken	DBe_	ZfP	7.45
		Deflektograph/Lacroix	DDe_	ZfP	7.46
		Fallgewichtsgerät	DFg_	ZfP	7.47
		Falling Weight Deflectometer	DFw_	ZfP	7.48
		Curviometro	DCu_	ZfP	7.49
		Traffic Speed Deflectometer	DSd_	ZfP	7.50
		Rapid Pavement Tester	DPT_	ZfP	7.51
	Achslast [kg]	Weigh in Motion	AWM_	ZaP	7.52
Umwelt	Lärmmessung [dB(A)]	Rollgeräuschmessung	LmR_	ZfP	7.53
		statistische Vorbeifahrt	LmV_	ZfP	7.54
	Positionssysteme [3d Koord. in m]	Winkel, Streckenmessung, GNSS	PWS_	ZfP	7.55
		mobile Positionsbestimmung	PMP_	ZfP	7.56
Bauwerksentkoppelte Überwachung	Baugrund- verformungen	Terrestrische Radarinterferometrie	TRI_	ZfP	7.57
		Satellitengestützte Radarinterferometrie	SRI_	ZfP	7.58
		Geodätische Aufnahmen	GDA_	ZfP	7.59
		Inklinometer	IKN_	ZaP	7.60
		Nivellement	NIV_	ZfP	7.61
	Massenbewegungen	Bewegungs-Radar (Dopplerradar)	BWR_	ZfP	7.62
		Pegel-Radar	PRA_	ZfP	7.63
		Infrasound	IFS_	ZfP	7.64
		Reissleinen	RSL_	ZfP	7.65
		Terrestrische Radarinterferometrie	TRI_	ZfP	7.66
		Satellitengestützte Radarinterferometrie	SRI_	ZfP	7.67
		Photogrammetrie (Deformationskameras)	PGM_	ZfP	7.68
		Geodätische Aufnahmen	GDA_	ZfP	7.69
		Nivellement	NIV_	ZfP	7.70

In Ergänzung hierzu wurde die Oberfläche, der Oberbau und das Inventar voneinander abgegrenzt. Dies begründet sich im Wesentlichen durch das zur Verfügung stehende Monitoringverfahren. Unter Oberfläche wurde vorliegend die Kontaktfläche zwischen Reifen und Fahrbahn verstanden. Der Oberbau hingegen unterscheidet sich zwischen gebundenen und ungebunden Schichten. Eine Betrachtung des Untergrunds bzw. Unterbaus erfolgte vorliegend gemäss Aufgabenstellung nicht. Die Erfassung des Inventars erfolgt in der Regel mittels Photogrammetrie oder Laserscanning und wurde in einer Gruppe zusammengefasst.

Insofern erfolgte eine Unterteilung hinsichtlich dem Messszenario. Es wurde eine Differenzierung nach punktuellen Messungen und seriellen Messverfahren vorgenommen. Während im Rahmen der Voruntersuchung und der Bauphase in der Regel punktuelle Messverfahren zum Einsatz kommen, sind dies während der Betriebsphase Messsysteme, die den Verkehr nicht beeinträchtigen. Der Fokus im Zuge der Bauphase liegt in der Kontrolle der erbrachten Leistung, was im Idealfall zu einer Abnahme der Leistung führt und einem Fortschritt des Bauvorhabens. Im Zuge der Betriebsphase liegt das Hauptaugenmerk auf einem regelmässigen Monitoring in festen Zeitabständen um Informationen zur Sicherheit, Befahrbarkeit sowie der Substanz der Verkehrsanlage zu erhalten und darüber hinaus die Entwicklung in die Zukunft als Grundlage eines Pavement Management Systems abschätzen zu können.

A Sicherheit

A 1 Rauheit

Definition Rauigkeit/Griffigkeit (SN-640512-4_EN-13036-4-D):

„Als Rauheit oder Textur bezeichnet man die geometrische Feingestalt der Oberfläche einer Verkehrsfläche. Sie wird gekennzeichnet durch die Abstände zwischen den Profilsitzen sowie der Tiefe des Profils. Die Rauheit ist die Primärgrösse für die Gebrauchseigenschaften der Griffigkeit, der Rollgeräusche, der Sprühhahnenbildung und des Rollwiderstands.“

Die Unterscheidung der Texturbereiche wird über die Texturwellenlänge λ beschrieben und ist hierbei als die kürzeste Distanz zwischen sich periodisch wiederholenden Abschnitten einer Fahrbahnprofilkurve definiert.

Ein Vergleich der Messwerte unterschiedlicher Messverfahren ist in der Regel nicht sinnvoll, da jedes Messverfahren spezifische Eigenschaften aufweist, die den Reibwert beeinflussen.

In der Schweiz wird die Griffigkeit aufbauend auf der ISO-Norm in folgende Normen unterteilt:

- VSS 40 512 Beschreibung der Griffigkeitsmessungen
- VSS 40 525 Beurteilung der Griffigkeitsmessungen
- VSS 40 877 Markierungen – Lichttechnische Anforderungen, Griffigkeit

Tab. 7.6 Rauheit - Übersicht

Technologie Nr und Name	7.1	7.2	7.3	7.4
Pendelgerät				
7.1.1	Kurzbeschreibung	7.2.1	7.3.1	7.4.1
stationäre Griffgleitmessung auf lokal begrenzten Reparaturflächen oder Nebenflächen, Erfassung erfolgt über ein Pendel, welche auf der Oberflächentextur aufgesetzt wird		Ermittlung der Seitenkraft an einem schräg zur Fahrtrichtung des Messsystems laufenden Messrad. Messung erfolgt bei benasteter Fahrbahn.	Ermittlung des Längskraftbeiwert durch Vergleichsmessungen mit frei laufenden / blockierten Messrad. Messung erfolgt auf benasteter Fahrbahn.	Ermittlung des Längskraftbeiwert an einem abgabensten Messrad durch Dehnmessstreifen an Messradachse. Messung erfolgt auf benasteter Fahrbahn.
7.1.2	Einsatzzweck	7.2.2	7.3.2	7.4.2
partielle Kontrolle der Griffbarkeit	Überwachung von Reparaturstellen	netzweite Erfassung der Griffbarkeit	Überwachung von Reparaturstellen	Überwachung von Kontrollmessungen an Unfallsschwerpunkten
Anwendungs-Nr. "ID"	RRP1	RSL1	RBR1	RCR1
1 direkt	1 direkt	1 direkt	1 direkt	1 direkt
1 mechanisch	1 mechanisch	1 mechanisch	1 mechanisch	1 mechanisch
3 analog (Ables 3 analog (Ablesung)	1 digital	1 digital	1 digital	1 digital
1 punktuell	1 punktuell	1 punktuell	1 punktuell	1 punktuell
2 separat	2 separat	2 separat	2 separat	2 separat
3 nicht zerstörend	3 nicht zerstörend	3 nicht zerstörend	3 nicht zerstörend	3 nicht zerstörend
7.1.3	Größen	7.2.3	7.3.3	7.4.3
SRT-Wert	Seitenkraftbeiwert	Längskraftbeiwert	Längskraftbeiwert	Längskraftbeiwert
Untersuchungs-/Tiefenbereich	Fahrbahnoberfl. lache	Fahrbahnoberfl. lache	Fahrbahnoberfl. lache	Fahrbahnoberfl. lache
Auflösung	5	1 m	25 m	1 m
Genauigkeit	5	0,05	0,015	0,03
Bemerkungen				
Trasse	3	4	4	3
Geotechnik	0	0	0	0
Naturgefahren	0	0	0	0
Umwelt	0	0	0	0
Nutzung in Fachgebieten				
Eintrittszeitpunkt	W, N	W, N	W, N	W, N
Entwicklungsstand	W, N	W, N	W, N	W, N
7.1.4	Kosten	7.2.4	7.3.4	7.4.4
Initial / einmalig	W	W	W	W
wiederkehrend	W	W	W	W

7.1 Messverfahren Skid Resistance Tester (SRT Pendel)

7.1.1 Beschrieb der Technologie

Das SRT-Pendelgerät ist ein mechanisches Messsystem nach dem Pendelprinzip zur Bestimmung des SRT-Wertes. Das SRT-Pendelgerät arbeitet mit einem Gleitkörper, der den Gummi des Reifens simuliert (Aufstandsfläche des Reifens). Das Gerät misst die Reibung zwischen dem Gleitkörper und der Prüffläche und liefert einen genormten Griffigkeitswert. Dieser wird als SRT-Wert (bzw. Pendulum Test Value (PTV) oder British Pendulum Number (BPN)) bezeichnet.

Bei kombinierten Griffigkeitsmessungen werden zur Beurteilung einer Fahrbahnoberfläche das SRT-Pendelgerät und ein geeignetes Makrotexturmessverfahren, in der Regel der Ausflussmesser (vgl. Abb. 7.15) in Kombination eingesetzt.



Abb. 7.15 Ausführungsbeispiel für ein SRT-Pendelgerät und Ausflussmesser, Quelle: [9]

Das SRT-Pendelgerät (vgl. Abb. 7.15) ist mit verstellbaren Fußschrauben in einem dreiarmligen Basisgestell und einer Dosenlibelle für eine waagerechte Ausrichtung versehen. Ein im Basisgestell befestigtes Standrohr trägt den Pendellagerkopf mit Pendelarm und Schleppzeiger sowie das Skalenschild. Am Ende des Pendelarmes ist ein federbelasteter Gleitkörper angebracht. Die einzuhaltende Berührungslänge (Gleitlänge) von $(126 \pm 1,0)$ mm wird durch die Höhe der Pendelachse über der Fahrbahnoberfläche vorgegeben und muss vor jeder Messung anhand des Reiblängenmassstabes eingestellt werden.

In Deutschland dürfen nur von der Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM) hergestellte Gleitkörper mit der Bezeichnung „Slider 57“ verwendet werden, bei denen der Gummikörper auf die Trägerplatte vulkanisiert worden ist.

Der Ausflussmesser nach Moore wird beim Aufsetzen auf die Fahrbahnoberfläche unter seiner Auflast mit seinem Gummiring auf die Fahrbahnoberfläche gepresst. Besitzt diese keine Makrotextur, so schliesst der Gummiring den Innenraum des Gerätes gegen die umgebende Fahrbahnfläche völlig oder fast völlig ab, und es kann kein oder nur sehr wenig Wasser in der Zeiteinheit ausfliessen [10].

7.1.2 Einsatzzweck und Fragestellung im Bereich Trasse

Das SRT-Pendel eignet sich für die Durchführung von Griffigkeitsmessungen auf Fahrbahnbefestigungen. Die Messungen können direkt auf Fahrbahnbefestigungen in Asphalt-, Beton- oder Pflasterbauweise durchgeführt werden. Die stationäre Arbeitsweise der Geräte macht es erforderlich, bei Messungen auf Fahrbahnen, die unter Verkehr liegen, entsprechende Sicherungen nach den Vorschriften der Strassenverkehrs-Ordnung zu treffen. Zusätzlich wird das SRT-Pendel für die Bestimmung der Griffigkeit auf Fahrbahnmarkierungen eingesetzt.

7.1.3 Datenerfassung, Raumbezug, Messgrössen und Genauigkeit

Mit dem stationär messenden Messsystem, bestehend aus dem SRT-Pendelgerät und dem Ausflussmesser als Makrotexturmessverfahren, ist lediglich eine punktuelle Erfassung der Griffigkeit möglich. Die Messmethode eignet sich daher in der Regel nur für die Bewertung kleinerer Oberflächenabschnitte. Für die Bewertung grösserer Flächen ist die Messfelddichte entsprechend der Aufgabenstellung festzulegen.

Es darf nur auf sauberen, nicht verunreinigten Oberflächen gemessen werden. Messungen bei Luft-, Fahrbahn- oder Wassertemperaturen unter 5 °C und über 40 °C sind nicht zulässig. Die Temperatur des Gleitkörpers muss im Bereich von 5 °C bis 40 °C liegen. Um eine Erwärmung des Gleitkörpers durch Sonneneinstrahlung zu vermeiden, muss der Gleitkörper vor und nach den Messungen abgedeckt werden. Die Messergebnisse beziehen sich auf eine Gleitkörpertemperatur von 20 °C. Wenn die Gleitkörpertemperatur von 20 °C abweicht, ist eine Korrektur des SRT-Wertes erforderlich. Messungen dürfen nur auf Prüfoberflächen vorgenommen werden, die keine grössere Längsneigung als 10 % haben.

Die Prüffläche ist unmittelbar vor Messbeginn mit ausreichend Wasser zu übergiesen, so dass ein geschlossener Wasserfilm entsteht.

Auf einer Messstrecke ist alle 300 m bis 500 m ein Messfeld anzulegen.

7.1.4 Entwicklungsstand, Anwendungsgrenzen, Kosten

Die Entwicklung des SRT-Pendelgerätes ist abgeschlossen. Eine Anwendung auf Asphalt-, Betonfahrbahnen sowie Pflaster und Plattenbeläge ist Stand der Technik.

Pro Arbeitstag können von einem Messtechniker typischerweise 10 bis 15 Messfelder aufgenommen werden. Obgleich der geringen Kosten und einfachen Anwendung des Messinstruments hat der SRT-Pendel keine grosse Verbreitung.

Die Messungen können nicht im fliessenden Verkehr erfolgen.

Die Kosten für den Einsatz der Technologie setzen sich zusammen aus:

Tagessatz für Techniker ca. 1500-2000 CHF

7.1.5 Ergänzende Ausschreibungsanforderungen

Als Basis für die zu definierenden Anforderungen an die Ausschreibung dient ein objektspezifisches Messkonzept (siehe Kapitel 2.2), welches die spezifischen Gegebenheiten des Objekts entweder für das Trasse oder Naturgefahren berücksichtigt.

Mit Berücksichtigung dieser aufgeführten Themen können, zusammen mit den vorgängig unter Datenerfassung, Raumbezug, Messgrössen und –genauigkeit angeführten

Rahmenbedingungen, die Ausschreibungsanforderungen spezifisch vervollständigt werden.

Insbesondere sind bei dieser Technologie die ortsspezifischen Gegebenheiten zu berücksichtigen, welche ggf. Sperrungen oder Sicherungsmassnahmen erforderlich machen. Weiterhin sind genaue Angaben über den Ort der Prüfung und/oder über die Anzahl und Abstände der Durchzuführenden Messungen erforderlich.

7.1.6 Literaturverzeichnis

Sonstige Literatur / Forschungsberichte

[9] Aalener Baustoffprüfinstitut GmbH, SRT-Pendel, Webseite, Abgerufen am 01.06.2022: <http://www.abpi-online.de/skm/>.

[10] Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen. Arbeitsgruppe Infrastrukturmanagement, Technische Prüfvorschriften für Griffigkeitsmessungen im Straßenbau Teil 2 Messverfahren SRT, Ausg. 2021. Hrsg., Köln: FGSV-Verl., 2021.

7.2 Schräglaufendes Rad

7.2.1 Beschrieb der Technologie

Bei der Messmethode des schräglaufenden Rads, welche auch als Seitenkraftmessverfahren (SKM) bekannt ist, wird die an einem schräg zur Fahrtrichtung laufenden Messrad auftretende Seitenkraft ermittelt, welche Aufschluss über die Griffigkeit der Fahrbahnoberfläche gibt. Unter der Annahme, dass ein kritisches Kraftschlussverhalten von Fahrbahnen im Wesentlichen bei Nässe auftritt [11], erfolgt die Messung grundsätzlich auf nasser Fahrbahn.

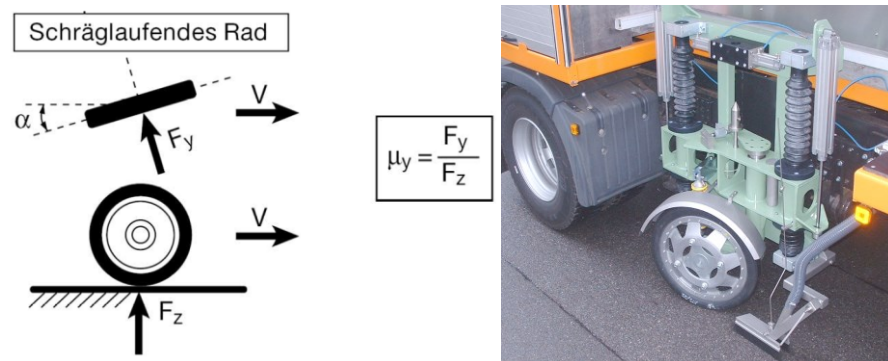


Abb. 7.16 links: Bestimmung des Seitenkraftbeiwertes bei einem schräg zur Vorwärtsbewegung montierten (frei laufenden) Messrad, Quelle: [11] rechts: Umsetzung des Seitenkraftmessverfahrens an einem Messfahrzeug, Quelle: [12]

Die an dem schräglaufernden Messrad auftretenden Kräfte sind in Abb. 7.16 links dargestellt. Der für die Beurteilung der Griffigkeit herangezogene Seitenkraftbeiwert μ_y ergibt sich als Quotient aus der vom Messsystem gemessenen Seitenführungskraft F_y und der vom Messsystem auf das Rad ausgeübten Radlast F_z .

Dabei ist der Seitenkraftbeiwert wesentlich von den folgenden Faktoren beeinflusst [11]:

- Eigenschaften der Fahrbahnoberfläche
- Schräglaufwinkel α
- Eigenschaften des Reifens (Dimension, Typ, Radlast, Innendruck, Gummieigenschaften)
- Geschwindigkeit des Messsystems: V
- Dicke des Wasserfilms auf der Fahrbahnoberfläche
- Temperaturen (Reifen, Wasserfilm, Fahrbahnoberfläche, Luft)

Um vergleichbare Messungen zu ermöglichen, werden viele der Faktoren standardisiert und sind von dem Messsystem (vgl. Abb. 7.16) einzuhalten (z.B. Schräglaufwinkel, Normalkraft von 1960 N auf das Messrad, Eigenschaften des Reifens). Auch die Dicke des Wasserfilms wird durch das Messsystem sichergestellt, indem die Fahrbahn durch einen Wasserschuh (vgl. Abb. 7.16 rechts) vor dem Messrad definiert benässt wird (Wasserfilm mit einer rechnerischen Dicke von 0,5 mm). Weitere Faktoren werden vom Messsystem aufgezeichnet (Temperaturen) oder sind während der Messung konstant zu halten (Fahrgeschwindigkeit).



Abb. 7.17 Messfahrzeug nach der Methodes des schräglaufenden Rads, Quelle: [12]

7.2.2 Einsatzzweck und Fragestellung im Bereich Trasse

Das Seitenkraftmessverfahren eignet sich für die Durchführung von Griffigkeitsmessungen (Seitenkraftbeiwert) auf Fahrbahnbefestigungen, welche aktiv und definiert durch das Messsystem benässt werden. Die Messungen können direkt auf Fahrbahnbefestigungen in Asphalt- und Betonbauweise durchgeführt werden und erfolgen typischerweise in der rechten Rollspur der Fahrbahn. Aufgrund der typischerweise genutzten Messgeschwindigkeiten zwischen (40 km/h und 80 km/h) ist die Messung im laufenden Verkehr möglich.

7.2.3 Datenerfassung, Raumbezug, Messgrößen und Genauigkeit

Die Datenerfassung erfolgt digital. Der Seitenkraftbeiwert μ_y wird dabei in der Regel mindestens alle 10 cm ermittelt. Die Ausgabe der Daten erfolgt anschliessend typischerweise über Mittelung in einem 1-Meter-Raster.

Die Wiederholgenauigkeit für die Bestimmung des Seitenkraftbeiwerts darf für gültige Messungen maximal eine Abweichung von 0,050 (bezogen auf 100-Meter-Mittelwerte) nicht überschreiten [11].

Der Raumbezug erfolgt in der Regel über die Erfassung der Stationierung und über Wegstreckenmessung.

7.2.4 Entwicklungsstand, Anwendungsgrenzen, Kosten

Die Anwendung des Seitenkraftmessverfahrens ist Stand der Technik.

Messungen sollten nicht auf verunreinigten Oberflächen oder auf regennassen Fahrbahnen erfolgen, da ansonsten eine Verfälschung der Messwerte möglich ist.

Die Kosten für die Messung belaufen sich, in Abhängigkeit der Gesamtlänge der Messtrecke, auf ca. 30-50 CHF/km zuzüglich der Messgerätebereitstellung vor Ort.

7.2.5 Ergänzende Ausschreibungsanforderungen

Als Basis für die zu definierenden Anforderungen an die Ausschreibung dient ein objektspezifisches Messkonzept (siehe Kapitel 2.2), welches die spezifischen Gegebenheiten des Objekts entweder für das Trasse oder Naturgefahren berücksichtigt.

Mit Berücksichtigung dieser aufgeführten Themen können, zusammen mit den vorgängig unter Datenerfassung, Raumbezug, Messgrößen und –genauigkeit angeführten Rahmenbedingungen, die Ausschreibungsanforderungen spezifisch vervollständigt werden.

Insbesondere sind bei dieser Technologie Angaben über das Messintervall zu integrieren.

7.2.6 Literaturverzeichnis

Sonstige Literatur / Forschungsberichte

[11] Der Auszug aus dem FGSV-Regelwerk Nr. 408/01, Technische Prüfvorschriften für Griffigkeitsmessungen im Straßenbau Teil: Seitenkraftmessverfahren (SKM), Ausgabe 2007, ist mit freundlicher Genehmigung der Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen e.V. auszugsweise wiedergegeben worden. Maßgebend für das Anwenden des FGSV-Regelwerkes ist dessen Fassung mit dem neuesten Ausgabedatum, die beim FGSV Verlag, Wesseling Str. 15-17, 50999 Köln, www.fgsv-verlag.de, erhältlich ist.

[12] BAST, „Erfassen und Bewerten von Oberflächeneigenschaften: SKM - Seitenkraftmessverfahren,“ 2015

7.3 Definiert blockiertes Rad

7.3.1 Beschrieb der Technologie

Bei der Messmethode des definiert blockierten Rades, welche auch unter dem Begriff «Stuttgarter Reibungsmesser (SRM)» bekannt ist, wird eine Griffigkeitsmessung durchgeführt, indem der Längskraftbeiwert (Bremschlupf) eines definiert blockierten Rades bestimmt wird. Unter der Annahme, dass ein kritisches Kraftschlussverhalten von Fahrbahnen im Wesentlichen bei Nässe auftritt [13], erfolgt die Messung grundsätzlich auf nasser Fahrbahn.

Bei dem Verfahren wird ein Messsystem mit einer konstanten Geschwindigkeit über die Fahrbahnoberfläche bewegt. Während dieser Bewegung wird ein an dem Messsystem montiertes Messrad kontrolliert und wiederholend blockiert. Während das Messrad blockiert ist, kann das von dem Messrad ausgehende Bremsmoment M_B bestimmt werden. Unter Kenntnis des Messradradius r , kann über die folgende Formel die korrespondierende Bremskraft F_B berechnet werden:

$$F_B = \frac{M_B}{r}$$

Unter der Annahme, dass die auf das Messrad wirkende Radlast F_N ebenfalls bekannt ist, lässt sich der Längskraftbeiwert μ_{SRM} als Quotient aus der Bremskraft und der Radlast folgendermassen bestimmen (vgl. Abb. 7.18):

$$\mu_{SRM} = \frac{F_B}{F_N}$$

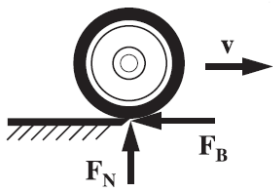


Abb. 7.18 Visualisierung der auf das blockierte Rad wirkenden Kräfte, Quelle: [14]

Dabei ist der Längskraftbeiwert μ_{SRM} wesentlich von den folgenden Faktoren beeinflusst [14]:

- Eigenschaften der Fahrbahnoberfläche
- Eigenschaften des Reifens (Dimension, Typ, Radlast, Innendruck, Gummieigenschaften)
- Geschwindigkeit des Messsystems: V
- Dicke des Wasserfilms auf der Fahrbahnoberfläche
- Temperaturen (Reifen, Wasserfilm, Fahrbahnoberfläche, Luft)



Abb. 7.19 links: Stuttgarter Reibungsmesser. Im Fahrzeug befindet sich ein Wassertank für den Auftrag eines Wasserfilms [15] rechts: Messanhänger Skiddometer, der sowohl eine Messung mit blockiertem Rad als auch mit definiert gebremsten Rad ermöglicht (vgl. 7.4)

Um vergleichbare Messungen zu ermöglichen, werden viele der Faktoren standardisiert und sind von dem Messsystem einzuhalten (z.B. Normalkraft auf das Messrad, Eigenschaften des Reifens). Auch die Dicke des Wasserfilms wird durch das Messsystem sichergestellt, indem die Fahrbahn durch einen kontrolliert aufgetragenen Wasserfilm vor dem Messrad benässt wird (Wasserfilm mit einer rechnerischen Dicke von 0,5 mm). Weitere Faktoren werden vom Messsystem aufgezeichnet (Temperaturen) oder sind während der Messung konstant zu halten (Fahrgeschwindigkeit).

Unter dem Begriff modifizierter Stuttgarter Reibungsmesser existiert eine Modifikation des Verfahrens, welches auch Messungen mit Antiblockiersystem und mit konstantem Bremschlupf ermöglicht.

7.3.2 Einsatzzweck und Fragestellung im Bereich Trasse

Das Messverfahren «definiert blockiertes Rad» eignet sich für die Durchführung von Griffigkeitsmessungen (Längskraftbeiwert) auf benässen Fahrbahnbefestigungen. Die Messungen können direkt auf Fahrbahnbefestigungen in Asphalt- und Betonbauweise durchgeführt werden und erfolgen typischerweise in der rechten Rollspur der Fahrbahn. Aufgrund der typischerweise genutzten Messgeschwindigkeiten zwischen (40 km/h und 80 km/h) ist die Messung im laufenden Verkehr möglich.

7.3.3 Datenerfassung, Raumbezug, Messgrößen und Genauigkeit

Die Datenerfassung erfolgt digital. Der Längskraftbeiwert μ_{SRM} wird zyklisch über jeweils 25 Meter ermittelt. Davon wird das Rad 20 Meter gebremst und 5 Meter rollend betrieben. Von den 20 Metern in denen das Messrad gebremst wird, werden der Seitenkraftbeiwert über die letzten 15 Meter gemittelt.

Die Wiederholgenauigkeit für die Bestimmung des Längskraftbeiwerts darf für gültige Messungen maximal eine Abweichung von 0,015 (bezogen auf 100-Meter-Mittelwerte) nicht überschreiten [14].

Der Raumbezug erfolgt in der Regel über die Erfassung der Stationierung und über Wegstreckenmessung.

7.3.4 Entwicklungsstand, Anwendungsgrenzen, Kosten

Die Anwendung des definiert blockierten Rads ist Stand der Technik.

Messungen sollten nicht auf verunreinigten Oberflächen oder auf regennassen Fahrbahnen erfolgen, da ansonsten eine Verfälschung der Messwerte möglich ist.

Die Kosten für die Messung belaufen sich, in Abhängigkeit der Gesamtlänge der Messstrecke, auf ca. 30-50 CHF/km zuzüglich der Messgerätebereitstellung vor Ort.

7.3.5 Ergänzende Ausschreibungsanforderungen

Als Basis für die zu definierenden Anforderungen an die Ausschreibung dient ein objektspezifisches Messkonzept (siehe Kapitel 2.2), welches die spezifischen Gegebenheiten des Objekts entweder für das Trasse oder Naturgefahren berücksichtigt.

Mit Berücksichtigung dieser aufgeführten Themen können, zusammen mit den vorgängig unter Datenerfassung, Raumbezug, Messgrößen und –genauigkeit angeführten Rahmenbedingungen, die Ausschreibungsanforderungen spezifisch vervollständigt werden.

Insbesondere sind bei dieser Technologie Angaben über das Messintervall zu integrieren.

7.3.6 Literaturverzeichnis

Sonstige Literatur / Forschungsberichte

- [13] Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, Technische Prüfvorschriften für Griffigkeitsmessungen im Straßenbau Teil: Seitenkraftmessverfahren (SKM), FGSV, 2007.
- [14] Der Auszug aus dem FGSV-Regelwerk Nr. 409, Arbeitsanleitung für Griffigkeitsmessungen mit dem SRM, Ausgabe 2004, ist mit freundlicher Genehmigung der Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen e.V. auszugsweise wiedergegeben worden. Maßgebend für das Anwenden des FGSV-Regelwerkes ist dessen Fassung mit dem neuesten Ausgabedatum, die beim FGSV Verlag, Wesseling Str. 15-17, 50999 Köln, www.fgsv-verlag.de, erhältlich ist.
- [15] S. van der Sluis, „Ableitung einer Wechselbeziehung zwischen Griffigkeit, Geschwindigkeit und Haltesichtweite anhand realer Bremsvorgänge“, 2002.
- [16] Skiddometer der Firma Moventor. <https://moventor.com/factory-overhaul>. Aufruf: 08.11.2023

7.4 Definiert gebremstes Rad

7.4.1 Beschrieb der Technologie

Bei der Messmethode des definiert gebremsten Rades wird eine Griffigkeitsmessung durchgeführt, indem der Längskraftbeiwert (Bremschlupf) eines definiert gebremsten Rades bestimmt wird. Die Methode ist auch unter dem Namen LFC (Longitudinal Friction Coefficient) - Verfahren oder unter dem Namen GripTester bekannt. Unter der Annahme, dass ein kritisches Kraftschlussverhalten von Fahrbahnen im Wesentlichen bei Nässe auftritt [17], erfolgt die Messung grundsätzlich auf nasser Fahrbahn.

Bei dem Verfahren wird ein Messsystem mit einer konstanten Geschwindigkeit über die Fahrbahnoberfläche bewegt. Während dieser Bewegung wird ein am Messsystem montiertes Messrad mit einem konstanten Schlupf abgebremst. Die durch den Schlupf hervorgerufene horizontale Längsreibungskraft F_H , wird über Dehnmessstreifen gemessen, welche an der Achse angebracht sind. Da auch die auf das Messrad wirkende Radlast F_N indirekt über Dehnmessstreifen ermittelt wird, lässt sich der Längskraftbeiwert μ_{LFC} als Quotient aus der Bremskraft und der Radlast folgendermassen berechnen:

$$\mu_{LFC} = \frac{F_B}{F_N}$$

Dabei ist der Längskraftbeiwert (analog zu 7.3) wesentlich von den folgenden Faktoren:

- Eigenschaften der Fahrbahnoberfläche
- Eigenschaften des Reifens (Dimension, Typ, Radlast, Innendruck, Gummieigenschaften)
- Geschwindigkeit des Messsystems: V
- Dicke des Wasserfilms auf der Fahrbahnoberfläche
- Temperaturen (Reifen, Wasserfilm, Fahrbahnoberfläche, Luft)
- Aufgewendeter Bremsschlupf auf Messrad

Der konstante Bremsschlupf wird durch eine feste Übersetzung zwischen den Laufrädern und dem Messrad sichergestellt. Die Dicke des Wasserfilms ist durch eine geschwindigkeitsabhängige Wasserzufuhr von dem Messsystem sicherzustellen. Weitere Faktoren sind standardisiert (Messrad), werden vom Messsystem aufgezeichnet (Temperaturen) oder sind während der Messung konstant zu halten (Fahrgeschwindigkeit).

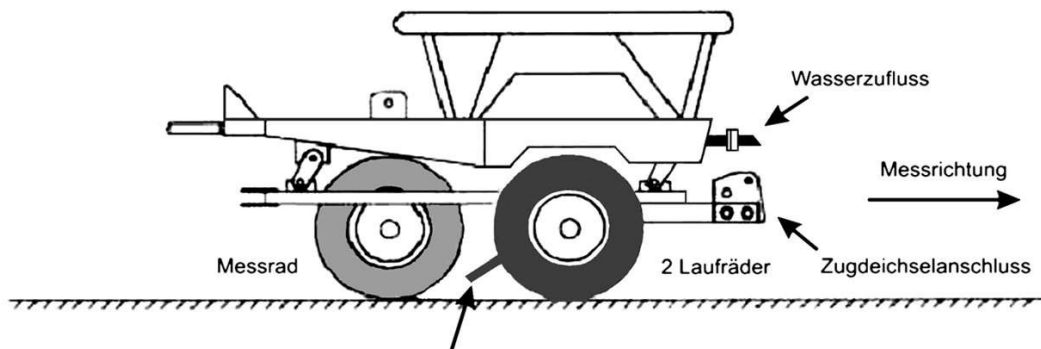


Abb. 7.20 Seitenansicht eines LFC-Messsystems in der Ausführung als Anhänger, Quelle:[18].

Das Messsystem ist in der Regel als Anhänger ausgeführt (vgl. Abb. 7.20) und kann an ein Zugfahrzeug angehängt oder durch Messpersonal geschoben werden.

7.4.2 Einsatzzweck und Fragestellung im Bereich Trasse

Das Messverfahren eignet sich für die Durchführung von Griffigkeitsmessungen (Längskraftbeiwert) auf benähten Fahrbahnbefestigungen. Die Messungen können direkt auf Fahrbahnbefestigungen in Asphalt- und Betonbauweise durchgeführt werden. Aufgrund der Bauweise und der Möglichkeit zum Schiebetrieb ist die Anwendung auch auf Flächen des ruhenden Verkehrs, auf Rad- und Fussgängerverkehrsflächen, Verkehrsnebenflächen und auf Fahrbahnmarkierungen möglich [18]. Weiterhin eignet sich das Gerät für Unfalluntersuchungen.

In Verbindung mit einem Zugfahrzeug kann das Messgerät bei Geschwindigkeiten bis 60 km/h eingesetzt werden, wodurch die Messung im laufenden Verkehr möglich ist.

7.4.3 Datenerfassung, Raumbezug, Messgrößen und Genauigkeit

Die Datenerfassung erfolgt digital. Der Längskraftbeiwert μ_{LFC} wird in der Regel über 1-Meter-Abschnitte gemittelt erfasst.

Die Wiederholgenauigkeit für die Bestimmung des Längskraftbeiwerts darf für gültige Messungen maximal eine Abweichung von 0,030 (bezogen auf 100-Meter-Mittelwerte) nicht überschreiten [18].

Der Raumbezug kann über die Erfassung der Stationierung und über Wegstreckenmessung oder über GPS-Lokalisation erfolgen.

7.4.4 Entwicklungsstand, Anwendungsgrenzen, Kosten

Die Anwendung des definiert gebremsten Rads ist Stand der Technik.

Messungen sollten nicht auf verunreinigten Oberflächen oder auf regennassen Fahrbahnen erfolgen, da ansonsten eine Verfälschung der Messwerte möglich ist.

Die Kosten für die Messung im Zugbetrieb belaufen sich, in Abhängigkeit der Gesamtlänge der Messtrecke, auf ca. 30-50 CHF/km zuzüglich der Messgerätebereitstellung vor Ort.

Die Kosten der Messung im Schiebebetrieb setzen sich zusammen aus dem Tagessatz für einen Techniker (ca. 1500-2000 CHF) und der Messgerätebereitstellung vor Ort.

7.4.5 Ergänzende Ausschreibungsanforderungen

Als Basis für die zu definierenden Anforderungen an die Ausschreibung dient ein objektspezifisches Messkonzept (siehe Kapitel 2.2), welches die spezifischen Gegebenheiten des Objekts entweder für das Trasse oder Naturgefahren berücksichtigt.

Mit Berücksichtigung dieser aufgeführten Themen können, zusammen mit den vorgängig unter Datenerfassung, Raumbezug, Messgrößen und –genauigkeit angeführten Rahmenbedingungen, die Ausschreibungsanforderungen spezifisch vervollständigt werden.

Insbesondere sind bei dieser Technologie Angaben über das Messintervall zu integrieren.

7.4.6 Literaturverzeichnis

Sonstige Literatur / Forschungsberichte

-
- [17] Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, Technische Prüfvorschriften für Griffigkeitsmessungen im Straßenbau Teil: Seitenkraftmessverfahren (SKM), FGSV, 2007.
-
- [18] Der Auszug aus dem FGSV-Regelwerk Nr. 411, Arbeitsanleitung für Griffigkeitsmessungen mit dem LFCG-Messverfahren (GripTester), Ausgabe 2015, ist mit freundlicher Genehmigung der Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen e.V. auszugsweise wiedergegeben worden. Maßgebend für das Anwenden des FGSV-Regelwerkes ist dessen Fassung mit dem neuesten Ausgabedatum, die beim FGSV Verlag, Wesseling Str. 15-17, 50999 Köln, www.fgsv-verlag.de, erhältlich ist.
-

A 2 Textur

Die Beschaffenheit der Fahrbahnoberfläche bestimmt Faktoren wie die Geräuschemission an der Schnittstelle zwischen Reifen und Fahrbahn, den akustischen Komfort im Fahrzeug, die Reibung zwischen Reifen und Fahrbahn, den Rollwiderstand und den Reifenverschleiss. Die verschiedenen Messmethoden und deren mathematischer Zusammenhang sind in der EN ISO 13473 beschrieben und geregelt. ISO 13473 beschreibt weiterhin mehrere Prüfverfahren zur Bestimmung der mittleren Tiefe der Makrotextur der Fahrbahnoberfläche durch Messung des Profils einer Oberfläche und Berechnung der Texturtiefe aus diesem Profil. Das Verfahren dient dazu, einen Wert ausschliesslich für die mittlere Tiefe der Makrotextur des Fahrbahnbelags zu liefern, und

ist als unempfindlich gegenüber der Mikrotextur und Unebenheit der Fahrbahn zu berücksichtigen.

Um den Bedürfnissen von Verkehrssicherheit, Fahrkomfort und Minimierung der Lärmemissionen zu genügen, werden insbesondere in der Schweiz Anforderungen an die Oberflächenstruktur der Fahrbahnen hinsichtlich Textur sowie der erzeugten Verkehrsgeräusche gestellt.

In der Schweiz wird die Texturmessung aufbauend auf der ISO-Norm in folgende Normen

- SN 640 510 (Eigenschaften der Fahrbahnoberfläche Grundnorm),
- SN 640 511-1 [122] (Oberflächeneigenschaften von Strassen und Flugplätzen; Prüfverfahren – Teil 1: Messung der Makrotexturtiefe der Fahrbahnoberfläche mit Hilfe eines volumetrischen Verfahrens),
- SN 640 530-1a_EN-ISO-11819-1-D (Akustik – Messung des Einflusses von Strassenoberflächen auf Verkehrsgeräusche – Teil 1: Statistisches Vorbeifahrtverfahren)
- geregelt.

Definitionen lt. EN ISO 13473:

Textur-Wellenlänge: λ

- Grösse, die die horizontale Dimension der Unregelmässigkeiten eines Texturprofils beschreibt. Die Texturwellenlänge wird in Metern (m) oder Millimetern (mm) angegeben.

Fahrbahntextur:

- Abweichung einer Fahrbahnoberfläche von einer echten ebenen Fläche, mit einer Texturwellenlänge von weniger als 0,5 m

Texturprofil:

- Obere Kontur eines vertikalen Querschnitts durch einen Belag
- Das Profil der Oberfläche wird durch zwei Koordinaten beschrieben: eine in der Oberflächenebene, genannt Abstand (die Abszisse), und die andere in einer Richtung normal zur Oberflächenebene, genannt vertikale Verschiebung (die Ordinate). Der Abstand kann in Längs- oder Querrichtung (quer) zur Fahrtrichtung auf einer Fahrbahn oder in einem Kreis oder einer anderen Richtung zwischen diesen Extremen angegeben werden.

Makrotextur:

- Abweichung einer Fahrbahnoberfläche von einer echten ebenen Oberfläche mit den charakteristischen Abmessungen entlang der Oberfläche von 0,5 mm bis 50 mm, entsprechend den Texturwellenlängen mit Terzbändern, die den Bereich von 0,63 mm bis 50 mm der mittleren Wellenlängen einschliessen. Die Amplituden von Spitze zu Spitze können normalerweise im Bereich von 0,1 mm bis 20 mm variieren.

Texturtiefe – TD:

- im dreidimensionalen Fall der Abstand zwischen der Oberfläche und einer Ebene durch die Spitze der drei höchsten Erhebungen innerhalb eines Oberflächenbereichs in der Grössenordnung der Schnittstelle Autoreifen/Belag

mittlere Texturtiefe – MTD:

- ermittelt mit der volumetrischen Patch-Methode

Profiltiefe- PD:

- in der 2D Ansicht eines Profils, ist PD die Differenz zwischen dem Profil und einer horizontalen Linie durch die Spitze des höchsten Punktes innerhalb dieses Profils innerhalb einer bestimmten Längs-/Seitendistanz in der gleichen Längenordnung wie die Kontaktfläche zwischen Autoreifen und Fahrbahn

Bewertungslänge – l:

- Länge eines Teils eines oder mehrerer Profile, für die die MPD zu berechnen ist

mittlere Profiltiefe - MPD

- Durchschnitt der Werte der mittlere Segmenttiefe über die Bewertungslänge l

geschätzte Texturtiefe - ETD

- Begriff, der verwendet wird, wenn die MPD zur Schätzung der MTD mit Hilfe einer Transformationsformel verwendet wird

Tab. 7.7 Textur - Übersicht.

Technologie Nr und Name	7.5	7.6	7.7
Sandflächenverfahren	7.5.1	7.6.1	7.7.1
Kurzbeschreibung	stationäre Texturmessung auf lokal begrenzten reparaturflächen oder Nebenflächen, Erfassung erfolgt über ein "Sandfleck"	Stationäre punktuelle Texturmessung mit Linearen oder kreisförmig angeordneten Lasersensoren welches ein digitales Texturprofil auswertet	mobile Texturmessung mit einer Profilerfassung über die Bewegung der Messplattform mit Hilfe eines Triangulationsensors welches ein digitales Texturprofil aufzeichnet und lückenlos auswertet
Einsatzzweck	7.5.2	7.6.2	7.7.2
"IP"	7.5.2	7.6.2	7.7.2
a. Messprinzip	1 direkt	1 direkt	1 direkt
b. Datenerfassung	1 mechanisch	7 laseroptisch	7 laseroptisch
c. Datenspeicher	3 analog (Ablesung)	1 digital	1 digital
d. Lokalisation	1 punktuell	1 punktuell	1 digital
e. Raumbezug	2 separat	1 integriert	3 analog (Ablesung)
f. Zustand	3 nicht zerstörend	1 integriert	2 streckenbezogen 2 streckenbezogen 3 streckenbezogen
Grossen	3 nicht zerstörend	3 nicht zerstörend 3 nicht zerstörend 3 nicht zerstörend	3 nicht zerstörend 3 nicht zerstörend 3 nicht zerstörend
Untersuchungs-/Tiefenbereich	MPD-Wert (Mean Profile Depth) oder geschätzte Texturtiefe - ETD	MPD-Wert (Mean Profile Depth)	MPD-Wert (Mean Profile Depth)
Aufbau	Fahrbahnoberfläche	Fahrbahnoberfläche	Fahrbahnoberfläche
Genauigkeit	5-25 mm	1-50 mm	1-50 mm
Bemerkungen	0,3 mm	0,02 mm	0,02 mm
Nutzung in Fachgebieten	7.5.3	7.6.3	7.7.3
Trasse	3	3	3
Geotechnik	0	0	0
Naturgefahren	0	0	0
Umwelt	0	0	0
Einsatzzeitpunkt	W, N	W, N	W, N
Entwicklungsstand	7.5.4	7.6.4	7.7.4
Kosten	initial / einmalig wiederkehrend	7.6.4	7.7.4

7.5 Sandflächenverfahren

7.5.1 Beschrieb der Technologie

Eine valide Methode zur Messung der Oberflächenbeschaffenheit ist die so genannte "Sandflecken"-Methode oder die allgemeinere "volumetrische Flecken"-Methode. Dieses wird seit vielen Jahren weltweit angewandt, und ist eine sehr einfache Messung zur Beschreibung der Oberflächenbeschaffenheit. Dabei wird ein bestimmtes Volumen von Glasperlen auf einer Oberfläche verteilt. Die Volumetrische Patch-Methode beruht somit auf der Ausbringung eines Materials, in der Regel Sand oder Glasperlen, in eine Oberflächenstruktur (vgl. Abb. 7.21). Das Material wird mit einem Gummikissen so verteilt, dass ein annähernd kreisförmiger Fleck entsteht, dessen durchschnittlicher Durchmesser gemessen wird. Durch Division des Materialvolumens durch die bedeckte Fläche erhält man einen Wert, der die durchschnittliche Tiefe der Sand- oder Glasperlenschicht darstellt, die mittlere Texturtiefe – MTD und den quadratischen Mittelwert der Texturtiefe (RMS).

Der ETD-Wert beschreibt auf Grundlage der verwendeten Glasperlen die mittlere Texturtiefe.



Abb. 7.21 Sandflächenverfahren, ausbringen und verteilen des Materials mit einem speziellen «Hartgummi-Verteilerscheibe» Quelle: [Fa. Nievelt]

Zu verwendendes Material ist ein spezieller Glassand (runde Glaskugeln- Rundheit >90 %) mit einem Durchmesser von 0,18 mm – 0,25 mm. Die Menge des Prüfmittels ist mit > 25 cm³ festgesetzt.

7.5.2 Einsatzzweck und Fragestellung im Bereich Trasse

Der Vorteil des Sandflächenverfahrens ist die einfache und schnelle Durchführung Vorort ohne spezielle Prüfeinrichtungen. Die Messungen können direkt auf Fahrbahnbefestigungen in Asphalt- oder Betonbauweise durchgeführt werden.

In der Schweiz soll die Erfassung der Texturtiefe eine bessere Beurteilung der Anfangsgriffigkeit von neuen Deckschichten und somit Erhöhung der Verkehrssicherheit während dieser (für die Griffigkeit) kritischen Phase dienen. Die schlechte Anfangsgriffigkeit von neu eingebauten Deckschichten kann in gewissen Fällen die Verkehrssicherheit gefährden. Dieses Phänomen hängt meistens mit dem flächendeckenden Bindemittelfilm zusammen, welcher die Mikrotextur der Aggregate überdeckt. Die nötige Zeit für das Abtragen dieses Bitumenfilms ist je nach Belagstyp unterschiedlich und kann wenige Wochen bis mehrere Monate bei hoch dosiertem PmB-Bindemittel betragen. Somit werden Sinn und Aussagekraft von dynamischen Abnahmemessungen der Griffigkeit immer wieder in Frage gestellt. Die Verkehrssicherheit, und somit ein für die lokalen Verhältnisse passendes Angebot der Griffigkeit, muss aber vom ersten Tag nach Verkehrsfreigabe gewährleistet sein. [19].

Das Ziel ist es eine Methodik/Verfahren zur Abnahmemessung und zur Beurteilung der Textur zu implementieren, um vergleichbare und wiederholbare Werte zu generieren.

7.5.3 Datenerfassung, Raumbezug, Messgrößen und Genauigkeit

Die Datenerfassung findet rein analog statt. Das bezieht sich sowohl auf die Bestimmung der Grösse des Sandflecks, sowie auf die Positionierung.

Bei der Anwendung der "volumetrischen Patch-Methode" wird die Ebene in der Praxis durch den Kontakt zwischen einem Gummipad und der Oberfläche bestimmt, wenn das Pad über die Fläche gerieben wird. Daher basiert die in diesem Fall ermittelte Texturtiefe nicht auf einer exakten Ebene, sondern eher auf einer Annäherung, die eine etwas unebene Fläche darstellt, die sich über die maximalen Texturspitzen sich ausbildet.

Durch sorgfältiges Aufbringen und Verteilung der bekannten Glassandmenge, auf die Oberfläche und die anschliessende Grössenmessung der gesamten bedeckten Fläche, ergibt sich die mittlere Texturtiefe. Die Technik ist so ausgelegt, dass sie einen Mittelwert ausschliesslich für die Tiefe der Makrotextur der Fahrbahn liefert und die Beschaffenheit der Mikrotextur der Fahrbahn nicht berücksichtigt.

Der MTD und MPD wird in Millimeter angegeben und berechnet sich analog zur EN ISO 13473.

Die zu erwartende Genauigkeit hat einen erheblichen Prüfeinfluss und nur eine bedingte Reproduzierbarkeit auf bestimmten Oberflächen. Die Standardabweichung für das manuelle Verfahren kann mit $\pm 0,227$ mm abgeschätzt werden [20].

7.5.4 Entwicklungsstand, Anwendungsgrenzen, Kosten

Der Einsatz der Technologie für die Messung des Sandflächenverfahren ist ein bewährtes und vielfach eingesetztes Verfahren. Die Erfassung kann nicht im fließenden Verkehr stattfinden und benötigt gesonderten Sicherungsmassnahmen. Das Verfahren ist sehr einfach, schnell und kostengünstig durchzuführen. Die Messungen sind Stichproben anzusehen und eignen sich für eine partielle Überprüfung. Für eine Netzweite Erfassung ist das Verfahren nicht zu bevorzugen.

Dieses Verfahren sollte nur bei Oberflächen angewandt werden, welche einen MPD-Wert (Mean Profile Depth) von 0,25 bis 5 mm aufweisen.

Eine Einzelmessung mit analoger Datenaufnahme kann mit ~1min abgeschätzt werden. Die Tagesleistung ergibt sich dann aus den aufzunehmenden Stichproben pro Streckenabschnitt zuzüglich der Umsetzzeiten.

Die Kosten einer Messung betragen ca. 20-50 CHF.

7.5.5 Ergänzende Ausschreibungsanforderungen

Als Basis für die zu definierenden Anforderungen an die Ausschreibung dient ein objektspezifisches Messkonzept (siehe Kapitel 2.2), welches die spezifischen Gegebenheiten des Objekts entweder für das Trasse oder Naturgefahren berücksichtigt.

Mit Berücksichtigung dieser aufgeführten Themen können, zusammen mit den vorgängig unter Datenerfassung, Raumbezug, Messgrößen und –genauigkeit angeführten Rahmenbedingungen, die Ausschreibungsanforderungen spezifisch vervollständigt werden.

Insbesondere sind bei dieser Technologie die ortsspezifischen Gegebenheiten zu berücksichtigen, welche ggf. Sperrungen oder Sicherungsmassnahmen erforderlich machen. Weiterhin sind genaue Angaben über den Ort der Prüfung und/oder über die Anzahl und Abstände der Durchzuführenden Messungen erforderlich.

7.5.6 Literaturverzeichnis

Sonstige Literatur / Forschungsberichte

- [19] „VSS2008/702 , Abnahmemessung der Griffigkeit von neuen Deckschichten anhand von Makrotexturaufnahmen (VSS2008/702),“ 2016.
- [20] R.-R. Schulz, „Hat das Sandflächenverfahren bald ausgedient?“, 2014.

7.6 Lasersensoren

7.6.1 Beschrieb der Technologie

Weiterhin wurden die Regelwerke so überarbeitet, dass Lasersensoren zur Bestimmung der Texturtiefe der Fahrbahnoberfläche realisierbar sind, um eine Alternative zur traditionell verwendeten volumetrischen Technik (Sandflächenverfahren) zu etablieren. DIN EN ISO 13473-1 [21] die Beschreibung eines Prüfverfahrens zur Bestimmung der durchschnittlichen Tiefe der Makrotextur einer Fahrbahnoberfläche durch Messen einer Profilkurve der Oberfläche und Berechnung der Texturtiefe aus diesem Profil. Das Verfahren ist so ausgelegt, dass es einen Wert ausschliesslich für die Makrotextur des Fahrbahnbelages liefert und die Beschaffenheit der Mikrotextur der Fahrbahn und Unebenheitsmerkmale nicht erfasst.

Durch die Charakterisierung der Textur von Fahrbahnbelägen unter Verwendung von Oberflächenprofilen können Oberflächeneigenschaften wie die „Mittlere Profiltiefe“ schnell und effizient geprüft werden.

Vor jedem Messeinsatz sollte das Lasermessgerät automatisiert kalibriert werden an einer Normalfläche. Anschliessend wird das Messgerät auf die zu messende Oberfläche aufgesetzt und die Messung gestartet. Der Laser überfährt dabei entweder eine gerade Strecke oder einen Vollkreis (vgl. Abb. 7.22). Im Anschluss erfolgt digital die Berechnung der Profileigenschaften MPD. Über eine normierte Umrechnungsfunktion kann hieraus die ETD berechnet werden, welche der in Deutschland üblichen MTD nach Kaufmann entspricht.



Abb. 7.22 ELAtextur® Messgerät, Quelle: [Nievelt & LP]

7.6.2 Einsatzzweck und Fragestellung im Bereich Trasse

Die Erfassung der Textur mit Hilfe von Lasersensoren ermöglicht eine einfache und schnelle Durchführung vor Ort. Die Messungen können direkt auf Fahrbahnbefestigungen in Asphalt- oder Betonbauweise durchgeführt werden. Der Einsatzzweck ist identisch mit Kapitel 7.5.2. Das Ziel ist es eine Methodik/Verfahren zur Abnahmemessung und zur Beurteilung der Textur zu implementieren welches eine digitale Messung realisiert, um standardisierte vergleichbare und wiederholbare Werte zu generieren.

7.6.3 Datenerfassung, Raumbezug, Messgrößen und Genauigkeit

Die Datenerfassung und Speicherung erfolgen rein digital. Der Raumbezug ist teilweise bei den am Markt befindlichen Geräten über einen einfachen GNSS-Empfänger realisiert. Die Aufnahme des Profils, welche zur Texturanalyse weiterverarbeitet wird, erfolgt entweder in einer Linearen oder einen Kreisförmigen Abtastung. In beiden Fällen entsteht ein Texturprofil, welches digital weiterverarbeitet wird. Die Daten im Messprofil, welche statistisch ungewöhnlich hoch sind, werden über einen speziellen Spike Filter und drop-out Filter eliminiert [21]. Nach der Analyse des Profils werden idR. ETD und MPD in Millimeter ausgegeben und gespeichert.

Die zu erwartende Genauigkeit hat bei diesem Verfahren keinen Prüferinfluss und eine bessere Wiederholbarkeit auf Oberflächen. Die Standardabweichung für das Laserverfahren kann mit $\sim 0,08$ mm (dMPD) abgeschätzt werden [22].

Die technischen Voraussetzungen können wie folgt angegeben werden:

- Auflösung / vertikal 0,01 mm
- Auflösung / horizontal 0,2 mm
- Messlänge: 400-500 mm

7.6.4 Entwicklungsstand, Anwendungsgrenzen, Kosten

Der Einsatz der Technologie für die Messung mit Lasersensoren ist ein bewährtes Verfahren. Die Erfassung kann nicht im fließenden Verkehr stattfinden und benötigt gesonderten Sicherungsmassnahmen. Das Verfahren ist sehr einfach, schnell und kostengünstig durchzuführen. Die Messungen sind Stichproben anzusehen und eignen sich für eine partielle Überprüfung. Für eine Netzweite Erfassung ist das Verfahren nicht zu bevorzugen. Die Auswertemethode mit Lasersensoren ist gemäss [21] auf die Beurteilung von Fahrbahndecken beschränkt.

Die Tagesleistung mit ca. 250 Messpunkten pro Tag angegeben werden.

Die Kosten einer Messung betragen ca. 50 CHF pro Messpunkt.

7.6.5 Ergänzende Ausschreibungsanforderungen

Als Basis für die zu definierenden Anforderungen an die Ausschreibung dient ein objektspezifisches Messkonzept (siehe Kapitel 2.2), welches die spezifischen Gegebenheiten des Objekts entweder für das Trasse oder Naturgefahren berücksichtigt.

Mit Berücksichtigung dieser aufgeführten Themen können, zusammen mit den vorgängig unter Datenerfassung, Raumbezug, Messgrößen und –genauigkeit angeführten Rahmenbedingungen, die Ausschreibungsanforderungen spezifisch vervollständigt werden.

Insbesondere sind bei dieser Technologie die ortsspezifischen Gegebenheiten zu berücksichtigen, welche ggf. Sperrungen oder Sicherungsmassnahmen erforderlich machen. Weiterhin sind genaue Angaben über den Ort der Prüfung und/oder über die Anzahl und Abstände der Durchzuführenden Messungen erforderlich.

7.6.6 Literaturverzeichnis

Sonstige Literatur / Forschungsberichte

[21] DIN EN ISO 13473-1:2021-11, Charakterisierung der Textur von Deckschichten unter Verwendung von Oberflächenprofilen - Teil_1: Bestimmung der mittleren Profiltiefe (ISO_13473-1:2019, korrigierte Fassung 2021-06); Deutsche Fassung EN_ISO_13473-1:2019.

[22] R.-R. Schulz, „Hat das Sandflächenverfahren bald ausgedient?“ 2014.

7.7 Triangulationssensoren / Profilometer

Triangulationssensoren sind spezielle Lasersensoren und bieten eine hohe Messgenauigkeit und höhere Messraten. Triangulation bedeutet hierbei die Abstandsmessung durch eine Winkelberechnung. In dieser Messtechnik projiziert ein Sensor einen Laserpunkt auf das Messobjekt. Das dort reflektierte Licht trifft abhängig von der Entfernung unter einem bestimmten Winkel auf ein Empfangselement. Die Position des reflektierten Lichts auf dem Empfangssensor ist korreliert mit dem Abstand zum Messobjekt.

7.7.1 Beschrieb der Technologie

Zur Erfassung der Textur werden ein oder auch mehrere Triangulationssensoren auf einer mobilen Trägerplattform installiert. Durch die Bewegung der Trägerplattform überstreicht der Triangulationssensoren ein Texturprofil welche durch GNSS-Sensoren, Inertialnavigationssysteme INS, Beschleunigungssensoren oder einem Wegstreckensensor (DMI, Distance measurement Unit) gestützt werden kann. Die Mess-Sensorik erfasst während der Bewegung der Messplattform den zurückgelegten Weg (vgl. Abb. 7.23). Das Resultat ist eine kontinuierliche Aufnahme eines Texturprofils welches im Nachgang digital ausgewertet wird.

Wurde das Profil kontinuierlich aufgezeichnet so ist eine Hochpassfilterung vorzunehmen, um die Wirkung von Steigungen oder Gradienten in der Profilkurve (langwellige Komponenten) zu verringern, die für die Bestimmung von MSD und MPD nicht relevant sind. Der Filter muss vom Typ Butterworth, 2. Ordnung, sein und einen Cut-Off bei 140 mm Texturwellenlänge haben. Die Filterung muss mit Hilfe eines Vorwärts-Rückwärts-Filter erfolgen, um die Phasenverzerrung des Profilsignals zu minimieren. Es ist weiterhin eine Tiefpassfilterung vorzunehmen, um den möglichen Einfluss von Rauschen und Einschwingvorgängen zu verringern und einen relativ gleichmässigen Einfluss von schmalen Profilsitzen zu erreichen. Der Filter muss vom Typ Butterworth, 2. Ordnung, sein und einen Cut-Off bei 3,0 mm Texturwellenlänge haben.

Die meisten berührungslosen «Profilometer» basieren auf Lasern und Sensoren, die nach dem Triangulationsprinzip arbeiten. Bei der Anwendung auf eine Strassenoberfläche, insbesondere auf eine neu verlegte Asphaltdecke, welche schwarz und oft glänzend ist und einige Hohlräume enthalten oder eine poröse Asphaltdecke, die tiefe Hohlräume enthält, unterliegt das reflektierte Laserlicht mehreren Fehlereinflüssen, die zu gravierenden Fehlern in dem gemessenen Texturprofil führen können. Beispielsweise kann der Reflexionspunkt auf der Oberfläche durch einen höher gelegenen Teil des Oberflächenprofils für den Sensor unsichtbar sein, sodass das empfangene Licht unter einem Akzeptanzschwellenwert liegt. Hierbei werden ein oder mehrere ungültige Datenpunkte ermittelt, was als "Drop-out" bezeichnet wird. Dies kann dadurch kompensiert werden, dass die als "Drop-outs" gekennzeichneten Proben nicht berücksichtigt werden und stattdessen die benachbarten gültigen Messwerte Interpolation ersetzt werden. Weitere Fehler sind kurze Einschwingvorgänge im Signal, die im Allgemeinen als "Spikes" bezeichnet werden. Diese Fehler äussern sich durch einzelne Ausreisser die vom gleitenden Mittelwert des Profils massiv abweichen. Der Grund für diese "Spikes" ist oft, dass zu schwaches Laserlicht reflektiert wird oder dass sogenannte Sekundärreflexionen entstehen. Die "Spikes" führen zu grossen Fehlern in MSD- und MPD-Berechnungen und in Texturspektren, wenn sie nicht entsprechend gefiltert werden [23].

Ziel ist es, dass die MSD/MPD-Werte frei von fehlerhaften Daten sind, damit das gemessene Profil dem "wahren" Profil so ähnlich wie möglich ist. Die Texturwellenlängenspektren sollen soweit über Hoch- und Tiefpassfilter gefiltert werden dass diese im Texturwellenlängenbereich von 1 - 500 mm liegt.



Abb. 7.23 Mobile Mapping System "Hawkeye 1000 Digital Laser Profiler" welches sich auch für die Erfassung der Macrotexture (MPD and SMTD) eignet. Quelle: [24]

7.7.2 Einsatzzweck und Fragestellung im Bereich Trasse

Die Erfassung der Textur mit Hilfe von Triangulationssensoren ermöglicht die Erfassung mit einem Mobile Mapping Fahrzeug und somit eine einfache und schnelle Durchführung der Messung Vorort. Die Messungen können direkt auf Fahrbahnbefestigungen in Asphalt- oder Betonbauweise durchgeführt werden. Der Einsatzzweck ist identisch mit Kapitel 7.5.2. Das Ziel ist es eine Methodik/Verfahren zur Abnahmemessung und zur Beurteilung der Textur zu implementieren welches eine Digitale Messung realisiert, um standardisierte vergleichbare und wiederholbare Werte zu generieren mit einer höheren Messgeschwindigkeit. Diese Verfahren eignen sich zur Netzweiten Erfassung der Textur. Der Vorteil der Technologie besteht im flexiblen Einsatz, sodass gleichzeitig beide Rollspuren oder auch mehrere Spuren gleichzeitig erfasst werden können.

7.7.3 Datenerfassung, Raumbezug, Messgrößen und Genauigkeit

Die Datenerfassung erfolgt bei diesem Verfahren rein digital. Die zu verwenden Triangulationssensoren müssen entsprechend der Aufnahmegeschwindigkeit und der Genauigkeit für eine Aufnahme Texturprofils dimensioniert sein. Die Erfassung der Wegstrecke sollte aufgrund der hohen Datenrate durch ein Odometer realisiert sein.

Lasersensoren

Die Abtastrate des Lasers muss hoch sein, dass für eine Auflösung besser 0,5 mm-genügend Messwerte zur Verfügung stellt. Bei einer Fahrtgeschwindigkeit von 80 km/h sollte mit einer Frequenz besser als 40 kHz gemessen werden. Abstandssensoren mit 50 kHz Messfrequenz sind mittlerweile am Markt üblich. Die Frequenz ist auch hier lediglich durch die interne Belichtungszeit des zu verwendeten Sensors limitiert. Die Genauigkeit der Einzelmessung kann mit 0,01 - 0,03 mm angegeben werden.

Odometer

Mechanisches Messgerät zur Ermittlung der zurückgelegten Wegstrecke eines Fahrzeugs. Dieses Gerät wird an einem Fahrzeugrad montiert und ermittelt die zurückgelegte Wegstrecke. Die Auflösung ergibt sich aus den erfassten Pulsen pro Radumdrehung. Die Auflösung des Wegstreckensensors sollte mindestens 1000-4000 Pulse betragen. Hierbei werden vor allem Quadraturencoder verwendet die 2 separate phasenverschobene Signale erzeugt. Über diese phasenverschobenen Signale kann die Drehrichtung ermittelt werden. Die Genauigkeit sollte mit kleiner >1% der Fahrstrecke angegeben werden.

Massgebend für die Macotextur sind die Korngrösse und die Kornverteilung. Sie hat charakteristische Texturwellenlängen zwischen 0,5 mm und 50 mm und weist damit

Wellenlängen in derselben Grössenordnung wie die Reifenprofilelemente auf der Reifenaufstandsfläche auf. Mit dem Profilometer-Verfahren wird die Profiltiefe PD erhoben bzw. die mittlere Profiltiefe MPD (Mean Profile Depth) bestimmt. Die mittlere Profiltiefe MPD ergibt sich durch Subtraktion des durchschnittlichen Wertes vom Maximalwert. Der durchschnittliche Wert ergibt sich durch das arithmetische Mittel aller Werte über die Grundlinie von 100 mm. Zusätzlich müssen die langwelligen Anteile durch Hochpassfiltrierung oder Steigungsunterdrückung der Grundlinie eliminiert werden. Die Grundlinie ist in zwei Hälften zu je 50 mm zu unterteilen. Der Spitzenwert berechnet sich als Mittelwert der zwei Maximalwerte beider Hälften. Die mittlere Profiltiefe MPD wird mittels Transformationsgleichung in die geschätzte Texturtiefe ETD (Evaluated Texture Depth) umgerechnet, um die mittlere Texturtiefe MTD abschätzen zu können [25].

Die Genauigkeit solcher Systeme kann mit den in Kapitel Lasersensoren beschriebenen Sensoren verglichen werden. Die zu erwartende Genauigkeit hat bei diesem Verfahren einen Prüferinfluss, der sich in der Fahrspur Lage des Systems widerspiegelt. Die Standardabweichung für die Triangulationssensoren kann mit $\sim 0,08$ mm (dMPD) abgeschätzt werden.

Die Technischen Voraussetzungen können wie folgt angegeben werden:

- Auflösung / vertikal 0,03 mm
- Auflösung / horizontal $< 0,5$ mm

7.7.4 Entwicklungsstand, Anwendungsgrenzen, Kosten

Die Tagesleistung für Mobile Mapping Systeme kann mit 100-200 km pro Tag angegeben werden. Die Tagesleistung eines stationären Systems kann je nach Reichweite des Instruments mit einigen Kilometern angenommen werden.

Der Einsatz der Technologie für die Messung mit Lasersensoren ist ein bewährtes Verfahren. Die Erfassung kann nicht im fliessenden Verkehr stattfinden und benötigt gesonderten Sicherungsmassnahmen. Das Verfahren ist sehr einfach, schnell und kostengünstig durchzuführen. Die Messungen sind Stichproben anzusehen und eignen sich für eine partielle Überprüfung. Für eine Netzweite Erfassung ist das Verfahren nicht zu bevorzugen. Die Auswertemethode mit Lasersensoren ist gemäss [23] auf die Beurteilung von Fahrbahndecken beschränkt.

Die Tagesleistung kann mit 1 bis 5 km pro Tag angegeben werden.

Die Kosten einer Messung betragen ca. 50-100 CHF.

7.7.5 Ergänzende Ausschreibungsanforderungen

Als Basis für die zu definierenden Anforderungen an die Ausschreibung dient ein objektspezifisches Messkonzept (siehe Kapitel 2.2), welches die spezifischen Gegebenheiten des Objekts entweder für das Trasse oder Naturgefahren berücksichtigt.

Mit Berücksichtigung dieser aufgeführten Themen können, zusammen mit den vorgängig unter Datenerfassung, Raumbezug, Messgrössen und –genauigkeit angeführten Rahmenbedingungen, die Ausschreibungsanforderungen spezifisch vervollständigt werden.

Insbesondere sind bei dieser Technologie Angaben über die gewünschte horizontale Auflösung der Messungen zu integrieren, welche Anforderungen bezüglich der verwendbaren Sensoren und der maximalen Messgeschwindigkeiten definiert.

7.7.6 Literaturverzeichnis

Sonstige Literatur / Forschungsberichte

- [23] DIN EN ISO 13473-1:2021-11, Charakterisierung der Textur von Deckschichten unter Verwendung von Oberflächenprofilen - Teil 1: Bestimmung der mittleren Profiltiefe (ISO_13473-1:2019, korrigierte Fassung 2021-06); Deutsche Fassung EN_ISO_13473-1:2019.

[24] ARRB, Hawkeye 1000, 2022.

[25] R. B. E. Kälin, „Zusammenhang Textur und Griffigkeit von Fahrbahnen und Einflüsse auf die Lärmemission,“ 2014.

A 3 Fahrbahnmarkierungen / Reflexionseigenschaften

Fahrbahnmarkierungen erfüllen im Strassenverkehr die Funktionen der Verkehrsführung und -regelung. Eine sachgerechte Ausführung der Fahrbahnmarkierung sowie ihr ordnungsgemässer Zustand leisten somit einen direkten Beitrag zur Sicherheit im Strassenverkehr.

In der Bauphase stehen vor allem die geeignete Materialwahl und das korrekte Applizieren auf der Fahrbahn im Vordergrund. Daraus ergeben sich die folgenden möglichen Prüfungen, die in der Bauphase durchgeführt werden können [1]:

- Nassfilmdicke bei gespritzten Markierungen
- Nachsichtbarkeit (Werte können sich nach der Verkehrsfreigabe noch ändern)
- Trockenschichtdicke
- Einbettung der Nachstreumittel (visuell)
- Applizierte Menge der Nachstreumittel
- Geometrie (Breite / Länge usw.)
- Klimatische Umgebungsbedingungen

Neben geometrischen Messungen stehen hier die visuelle Inspektion und die Bewertung der Sichtbarkeit im Fokus. Auch während des Betriebs kommt der regelmässigen Zustandskontrolle eine hohe Bedeutung zu. Dazu zählt ebenfalls die gute Sichtbarkeit der Markierung bei Tageslicht und Dunkelheit, die Griffigkeit der Markierung und die strukturelle Unversehrtheit.

Neben der Griffigkeit, welche mit dem SRT-Pendel (siehe 7.1) oder dem GripTester (siehe 7.4) bestimmt wird, erfolgt die Bewertung des Zustands von Markierungen über die visuelle Inspektion und über die Bestimmung der Sichtbarkeit.

Unabhängig von Alter, Einsatzort und der Art der Markierung ist von Fahrbahnmarkierung ein Mindestwert für die Griffigkeit zu erreichen (Klasse S1 der EN 1436 [2]) [1]. Die Anforderungen an die Sichtbarkeit der Fahrbahnmarkierungen sind abhängig von Einsatzort und der Art der Markierung und erfolgt in 3 Klassen [3]:

- Klasse Q – Tagessichtbarkeit bei Trockenheit
- Klasse R – Nachsichtbarkeit bei Trockenheit
- Klasse RW – Nachsichtbarkeit bei Feuchtigkeit

Tab. 7.8 Fahrbahnmarkierungen / Reflexionseigenschaften - Übersicht

Technologie		Retroreflektometrie		
7.8	Nr. und Name			
7.8.1	Kurzbeschreibung	Bestimmung der lichttechnischen Eigenschaften von Fahrbahnmarkierungen unter gerichteter und diffuser Beleuchtung		
7.8.2	Einsatzzweck	Tagessichtbarkeit	Nachtsichtbarkeit	Nachtsichtbarkeit dynamisch
7.8.2	"ID"	RRe1	RRe2	RRe3
7.8.2	a. Messprinzip	1 direkt	1 direkt	1 direkt
7.8.2	b. Datenerfassung	5 optisch	5 optisch	5 optisch
7.8.2	c. Datenspeicher	1 digital	1 digital	1 digital
7.8.2	d. Lokalisation	1 punktuell	1 punktuell	2 streckenbezogen
7.8.2	e. Raumbezug	2 separat	2 separat	1 integriert
7.8.2	f. Zustand	3 nicht zerstören	3 nicht zerstören	3 nicht zerstören
7.8.3	Grossen	Qd	R _L	R _L
Messgrößen und -genauigkeit				
Untersuchungs-/Tiefenbereich		Oberfläche	Oberfläche	Oberfläche
Auflösung				
Genauigkeit		2%	2%	5%
Bemerkungen				
Nutzung in Fachgebieten				
Trasse		4	4	4
Geotechnik		0	0	0
Naturverfahren		0	0	0
Umwelt		0	0	0
7.8.4	Einsatzzeitpunkt	W, N	W, N	W, N
7.8.4	Entwicklungsstand	●	●	●
7.8.4	Kosten			
7.8.4	initial / einmalig	☺	☺	☺
7.8.4	wiederkehrend	☹	☹	☹

7.8 Retroreflektometrie

7.8.1 Beschrieb der Technologie

Mit Hilfe der Retroreflektometrie können die lichttechnischen Eigenschaften von Fahrbahnmarkierungen und sonstigen retroreflektierenden Materialien (z.B. Verkehrszeichen) untersucht werden. Bei der Analyse werden zwei unterschiedliche Beleuchtungsszenarien unterschieden:

Retroreflektion (Nachtsichtbarkeit)

Für die Messung der Nachtsichtbarkeit wird das Material aus einem spitzen Winkel beleuchtet und das reflektierte Licht - ebenfalls unter einem spitzen Winkel - gemessen [26] (vgl. Abb. 7.24). Der gemessene Leuchtdichtekoeffizient wird bei der Retroreflektion mit R_L bezeichnet und in der Einheit $mcd \cdot m^{-2} \cdot lx^{-1}$ gemessen.

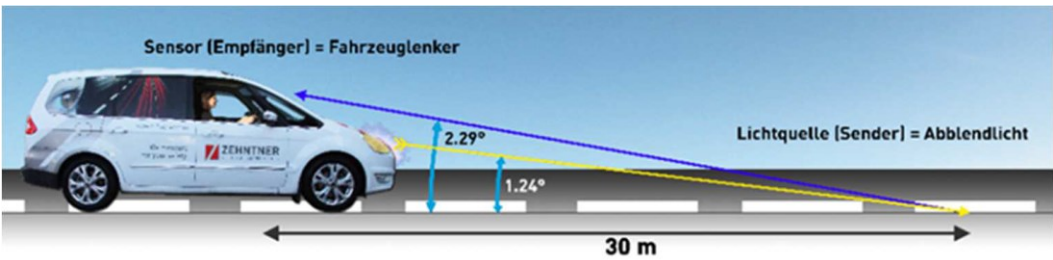


Abb. 7.24 Verdeutlichung des Messprinzips für die Bestimmung der Nachtsichtbarkeit. Im Messgerät ist das Prinzip in kleinerem Massstab umgesetzt. Quelle: [27]

Diffuse Beleuchtung (Tagessichtbarkeit)

Bei diffuser Beleuchtung wird das Rückstrahlverhalten des Materials untersucht, wenn es gleichmässig von allen Seiten beleuchtet und unter einem spitzen Winkel gemessen wird [26] (vgl. Abb. 7.25). Der in diesem Fall gemessene Leuchtdichtekoeffizient wird mit Q_d bezeichnet und ebenfalls in der Einheit $mcd \cdot m^{-2} \cdot lx^{-1}$ gemessen.

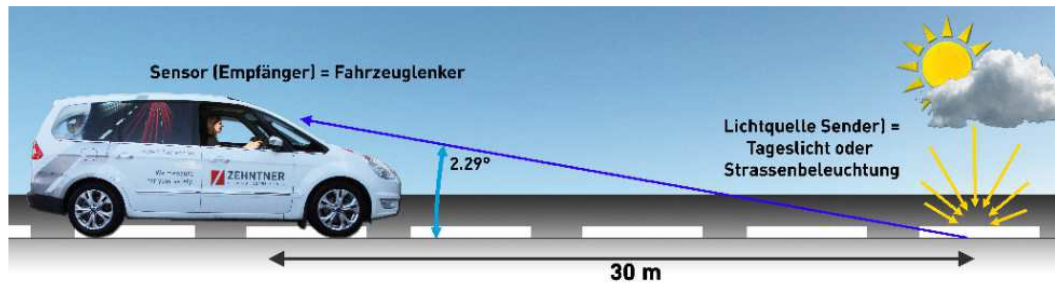


Abb. 7.25 Veranschaulichung des Messprinzips für die Bestimmung der Tagsichtbarkeit mit diffuser Beleuchtung. Im Messgerät ist das Prinzip in kleinerem Massstab umgesetzt. Quelle: [27]

Das Reflektionsverhalten ändert sich, wenn das Material mit einem Wasserfilm bedeckt ist. Daher muss bei der Messung grundsätzlich auch die Temperatur und Luftfeuchtigkeit erfasst werden, um den Taupunkt bestimmen zu können.

Die Messung der Tagessichtbarkeit erfolgt mit tragbaren Messgeräten, welche auf die Markierung aufgesetzt werden (vgl. Abb. 7.26 links). Für die Messung der Nachtsichtbarkeit ist sowohl der Einsatz von tragbaren Messgeräten, als auch von dynamischen Messsystemen möglich (vgl. Abb. 7.26 rechts). Das dynamische Messsystem wird an einem Fahrzeug montiert und kann die Messwerte für die Nachtsichtbarkeit in normaler Fahrgeschwindigkeit ermitteln (in der Regel mit mindestens 80 km/h).



Abb. 7.26 links: mobiles Retroreflektometer für die Bestimmung von Tages- und Nachtsichtbarkeit Quelle: [4] rechts: An einem Fahrzeug montiertes, dynamisches Retroreflektometer für die Bestimmung der Nachtsichtbarkeit, Quelle: [28]

7.8.2 Einsatzzweck und Fragestellung im Bereich Trasse

Messgeräte zur Retroreflektometrie werden im Bereich Trasse für die Ermittlung der Sichtbarkeit von Fahrbahnmarkierungen und von Verkehrszeichen mit retroreflektierender Beschichtung eingesetzt. Dabei wird auf Markierungen sowohl die Sichtbarkeit bei Tag (Tagessichtbarkeit) als auch bei Nacht (Nachtsichtbarkeit) bewertet. Auf Typ II Markierungen ist ausserdem die Bewertung der Sichtbarkeit bei Nässe vorgesehen. Dazu wird die Markierung künstlich bewässert und direkt anschliessend eine Nachtsichtbarkeitsmessung durchgeführt.

Für die Bestimmung der Nachtsichtbarkeit können auch dynamische Messgeräte eingesetzt werden. Die als nicht anforderungsgerecht herausgefundenen Messbereiche müssen jedoch mit Handgeräten statisch überprüft werden.

7.8.3 Datenerfassung, Raumbezug, Messgrößen und Genauigkeit

Die Messungen werden digital erfasst. Neben dem gemessenen Leuchtdichtkoeffizienten wird auch die Temperatur und die relative Luftfeuchtigkeit gespeichert.

Bei Einzelmessungen (mobiles Retroreflektometer) ist der Umfang der Messungen abhängig von der Länge der zu beurteilenden Strassenlänge. Dabei sollten die Einzelmessungen möglichst in gleichen Abständen und repräsentativ erfolgen.

Messungen mit dynamischen Messgeräten können in Fahrgeschwindigkeit (i.d.R. wenigstens 80 km/h) erfolgen. Der Raumbezug erfolgt bei dynamischen Messgeräten in der Regel per GPS. Dynamische Messungen arbeiten üblicherweise bei einer Genauigkeit von +/- 5% und einer Wiederholpräzision von +/- 3%.

7.8.4 Entwicklungsstand, Anwendungsgrenzen, Kosten

Die Bestimmung der Retroreflektometrie mit statischen Messgeräten ist Stand der Technik. Der Einsatz von dynamischen Retroreflektometern findet im Bereich der Nachtsichtbarkeit zunehmend Verbreitung. In Hinblick auf die dynamische Erfassung der Tagessichtbarkeit und in Hinblick auf die Erfassung der Nachtsichtbarkeit bei Nässe besteht Entwicklungspotential.

Einzelne Retroreflektometer für die Bestimmung der Tages- und Nachtsichtbarkeit kosten etwa zwischen 8000 – 15000 CHF. Systeme für die Erfassung der dynamischen Nachtsichtbarkeit liegen etwa in der Größenordnung von 150.000 CHF.

7.8.5 Ergänzende Ausschreibungsanforderungen

Als Basis für die zu definierenden Anforderungen an die Ausschreibung dient ein objektspezifisches Messkonzept (siehe Kapitel 2.2), welches die spezifischen Gegebenheiten des Objekts entweder für das Trasse oder Naturgefahren berücksichtigt. Mit Berücksichtigung dieser aufgeführten Themen können, zusammen mit den vorgängig unter Datenerfassung, Raumbezug, Messgrößen und –genauigkeit angeführten Rahmenbedingungen, die Ausschreibungsanforderungen spezifisch vervollständigt werden.

Insbesondere sind bei dieser Technologie anzugeben, ob die Messung der Tagsichtbarkeit, Nachtsichtbarkeit oder von beidem erfolgen soll. Weiterhin muss festgelegt werden, ob eine Messung im fließenden Verkehr erfolgen soll oder der Einsatz von Geräten für die Einzelmessung ausreichend ist.

7.8.6 Literaturverzeichnis

Sonstige Literatur / Forschungsberichte

- [26] DIN EN 1436:2018-03, Straßenmarkierungsmaterialien - Anforderungen an Markierungen auf Straßen und Prüfverfahren; Deutsche Fassung EN 1436:2018, Beuth Verlag GmbH.
- [27] SISTRA Merkblatt 2017/3 (D), „Guideline – Qualitätskontrolle von Fahrbahnmarkierungen auf Schweizer Strassen,“ 2017.
- [28] Traffic Data Systems, Dynamisches Retroreflektometer, <https://www.traffic-data-systems.net/produkte/optische-messgeraete/fahrbahnmarkierung/>, Website, Abruf: 01.06.2022

A 4 Lichtraumprofil / Höhenmessung

Als Lichtraumprofil wird die virtuelle Umgrenzungslinie im Querprofil bezeichnet, die senkrecht zur Strassenachse definiert ist. Das Lichtraumprofil beschreibt entlang der Strassenachse einen vorgeschriebenen Bereich der baulich und auch von Vegetation freizuhalten ist (vgl. Abb. 7.27). Der Lichtraum ist entsprechend der Strassenklasse dimensioniert (Aufbau des Lichtraumprofils der Strasse [5]). Der durch das Lichtraumprofil definierte Raum ist zwingend von Bauteilen (Pfeilern, Stützen, Verkehrssignalen, Brückenüberbauten etc.) frei zu halten ist. Die erforderliche lichte Höhe wird unter

Berücksichtigung des Quergefälles im rechten Winkel zur Fahrbahn gemessen. Unter Signaltafeln von Signalportalen ist eine lichte Höhe von mindestens 4.90 m frei zu halten.

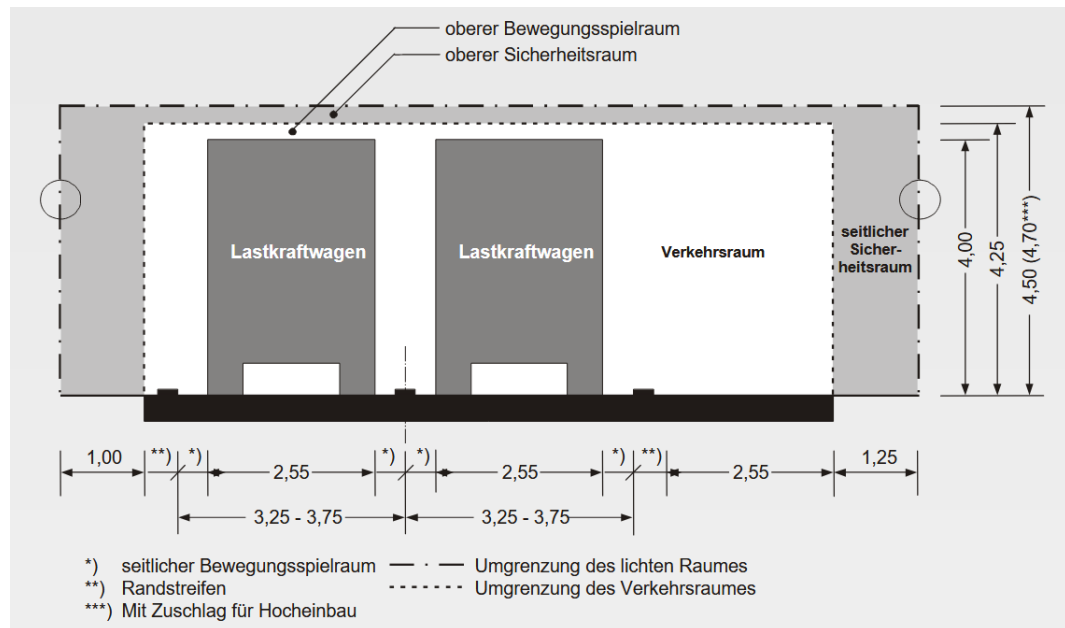


Abb. 7.27 Lichtraumprofil nach RAA (Richtlinien für die Anlage von Autobahnen), Quelle: [6]

Bei Überführungen ist zuzüglich zum Lichtraumprofil eine zusätzliche Höhe von mindestens 0.10 m frei zu halten. Massgebend für die Bestimmung dieser Höhe ist der Bauwerkspunkt mit dem geringsten Höhenabstand zur Fahrbahn. Diese zusätzliche Höhe dient zur Kompensation allfälliger Setzungen der Überführung bzw. als Reserve für den Fall, dass der Oberbau der Fahrbahn verstärkt werden muss. Zur Kontrolle des Lichtraumprofils eignen sich besonders berührungslose Messverfahren die eine schnelle und effiziente Erfassung ermöglichen.

Die in diesem Abschnitt beschriebenen Verfahren ermitteln geometrische Eigenschaften auf der Fahrbahn und im Strassennahen Umfeld. Die Verfahren eignen sich daher grundsätzlich auch für die geometrische Erfassung von Inventar und dem sich an die Fahrbahn anschliessenden Gelände.

Tab. 7.9 Lichtraumprofil / Höhenmessung - Übersicht

Technologie		7.9		7.10	
Nr und Name		Laserscanning		Winkel, Streckenmessung	
7.9.1		Bestimmung des Lichtraumprofils mit stationären oder mobilen Laserscannern		7.10.1 Bestimmung des Lichtraumprofils mit stationären Tachymetern oder Totalstationen	
Kurzbeschreibung					
7.9.2		7.10.2			
Einsatzzweck		punktueller Erfassung des Lichtraumprofils		punktueller Erfassung des Lichtraumprofils	
ID		LIL 1		LW 1	
7.9.2		LIL 2		LW 2	
a. Messprinzip		1 direkt		1 direkt	
b. Datenerfassung		5 optisch		5 optisch	
c. Datenspeicher		1 digital		1 digital	
d. Lokalisation		1 punktuell		1 punktuell	
e. Raumbezug		1 integriert		5 raumbezogen	
f. Zustand		3 nicht zerstört		1 integriert	
7.9.3		7.10.3		3 nicht zerstört	
Typisierung					
Messgrößen und -genauigkeit		Profil		Profil	
Untersuchungs-/Tiefenbereich		1 mm		0,1 mm	
Auflösung		2-5 mm		1 mm	
Genauigkeit		2-7 mm		2-5 mm	
Bemerkungen					
Nutzung in Fachgebieten		3		3	
Trasse		0		0	
Geotechnik		1		1	
Naturgefahren		0		0	
Umwelt		2		1	
Einsatzzeitpunkt		V, W, N		W, N	
7.9.4		7.10.4			
Entwicklungsstand		V, W, N		W, N	
7.9.4		7.10.4			
Kosten		initial / einmalig		wiederkehrend	

7.9 Laserscanning

Laserscanner werden im Folgenden als 2D/3D Erfassungsgeräte definiert, welche mit Hilfe eines modulierten oder gepulsten Laserstrahls und einer Ablenkeinheit die Umgebung durch eine nicht zielgerichtete, punktförmige und flächendeckende Abtastung erfassen. Das Ergebnis ist eine dreidimensionale Punktwolke, welche im weiten Prozessverlauf analysiert wird. Laserscanner können hinsichtlich ihrer Erfassungstechnologie und ihres Einsatzzwecks differenziert werden. Für die Erfassung des Lichtraumprofils haben sich stationäre Laserscanner, welche eine sphärische Aufnahme realisieren (120° vertikal und 360° horizontal) und Mobile Mapping Systeme mit einem Umfeldscanner welche i.d.R. einen Öffnungswinkel von >350° besitzen (siehe Kapitel 7.15) bewährt.

7.9.1 Beschreibung der Technologie

Die Erfassung der Lichtraumprofile mit Hilfe von Laserscanner-Technologien kann in zwei Verfahren unterteilt werden. Das erste Verfahren ist die Erfassung des Lichtraumprofils mit einem statischen Laserscanner (3D). Diese Laserscanner erfassen die Umgebung in einem Winkelbereich von 360° horizontal und ~120° vertikal. Die resultierende Punktwolke deckt somit fast einen vollumfänglichen sphärischen Bereich ab, wobei der Standpunkt des Gerätes ausgespart ist. Die Erfassung ist berührungslos. Die Gräte besitzen unterschiedliche maximale Messentfernungen (~50-250 m), aber für eine Erfassung eines Lichtraumprofils i.d.R. ausreichend ist. Die Messung erfolgt durch Platzieren des Gerätes im jeweilig aufzunehmenden Lichtraumprofilen. Hierbei ist auf verdeckte Bereiche im Laserscann zu achten, sodass relevante Bereiche des Lichtraumprofils nicht detektierbar sind. Die Lokalisierungen der Punktwolke kann entweder stationsbasiert oder georeferenziert erfolgen. Aus dem aufgenommenen Strassenabschnitt werden rechtwinklig zur Strassenachse relevante Bereiche extrahiert und analysiert. Dieses Vorgehen ist für die stationären und mobilen Laserscanner-Erfassungssysteme identisch und werden im Folgenden erläutert.



Abb. 7.28 stationärer 3D Laserscanner FARO Focus Premium [FARO]

Das zweite Verfahren ist die Erfassung des Lichtraumprofils mit einem Mobile Mapping Laserscanner-System. Durch die Bewegung des Trägersystems, auf dem ein 2D Umfeld-Laserscanner montiert ist, können Punktwolken der Umgebung erfasst werden. Dazu ist die Kombination des Sensors mit einem hochgenauen Positionierungssystem erforderlich, um die Verortung der erfassten Datenpunkte in einem lokalen oder globalen Koordinatensystem zu ermöglichen. Diese Technologie eignet sich besonders für eine effiziente Erfassung von Lichtraumprofilen im laufenden Verkehr. Bei der Erfassung ist darauf zu achten, dass sich Fahrzeuge nicht im Erfassungsbereich des Laserscanners aufhalten, da diese gegebenenfalls einen Scanschatten erzeugen und relevante Daten zur Lichtraumbemessung verdecken.



Abb. 7.29 Mobile Mapping-System, Trimble MX9 [Trimble]

Extraktion des Lichtraumprofils aus einer Punktwolke

Die erfasste Punktwolke visualisiert die Fahrbahn, inkl. aller erfassten Nebenanlagen. Die Datenerfassung sollte mindesten 350° bei Mobilien Systemen und bei stationären Systemen sollte der Vertikalwinkel mindesten 120° betragen, sodass der Bereich in der Punktwolke, der keine Informationen enthält, minimal ist. Der Bereich ist immer so zu wählen, dass dieser auf der Fahrbahnoberfläche liegt und keine relevanten Informationen oder Einschränkungen für das Lichtraumprofil enthält. Für die Extraktion des Lichtraumprofils muss die Fahrbahnoberfläche extrahiert werden. Diese stellt mit der realen Querneigung die Basis des Lichtraumprofils dar. Über die Begrenzung der Fahrbahn und der Nebenanlagen und der vorherrschenden Strassenklasse kann dann der Bereich des Lichten Profils rekonstruiert werden. Alle erfassten Objekte, welche über die Punktwolke repräsentiert werden und die sich innerhalb der Rekonstruktionfläche des Lichtraumprofils

befinden, müssen im weiteren analysiert werden, in wie weit diese das Lichtraumprofil negativ tangieren.

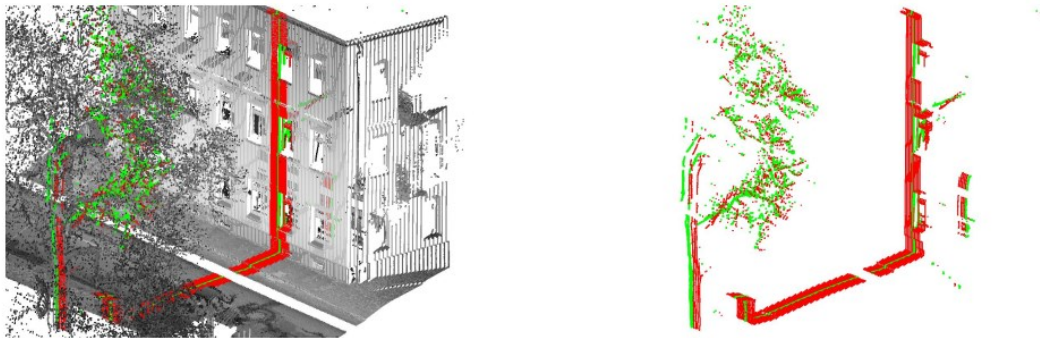


Abb. 7.30 Extrahiertes Lichtraumprofil aus einer Punktwolke (links), exponierte Darstellung Rechts mit grün Lichtraumprofil und rot 1 m Buffer [LP]

7.9.2 Einsatzzweck und Fragestellung im Bereich Trasse

Der Laserscanner eignet sich für die Messung von Lichtraumprofilen. Die Messungen können auf allen Strassen durchgeführt werden. Zur Erfassung des Trassees werden spezielle Mobile Mapping Systeme eingesetzt, die meist kombiniert sind mit bildgebenden Sensoren. Auch terrestrische, stationäre Laserscanner können für kleine lokale Auswertebereiche angewendet werden.

Der Erfassungsbereich der Technologie ist typischerweise nicht nur auf den Fahrbahnbereich beschränkt, so dass auch die geometrische Erfassung von Strasseninventar (Fahrzeugrückhaltesysteme, Lärmschutzwände / Zäune Tore) und dem an die Strasse angrenzenden Gelände ermöglicht wird.

Die marktübliche Realisierung für die Erfassung eines Trassees ist die Verwendung einer inertialen mobilen Messplattform, welche fahrzeugbasiert realisiert wird. Die durch die Laserscanner erzeugten Punktwolken werden zur messtechnischen Erfassung des Lichtraumprofils, des Strasseninventars oder des Geländes verwendet. Die Messung erfolgt ohne Einschränkungen im laufenden Verkehr. Es können kontinuierlich Profile extrahiert werden, welche eine lückenlose Kontrolle ermöglichen.

7.9.3 Datenerfassung, Raumbezug, Messgrößen und Genauigkeit

Die Datenerfassung findet rein digital statt. Der Raumbezug ist durch das verwendete Positionierungssystem oder durch einen GNSS Empfänger (stationärer Laserscanner) realisiert und kann somit an die jeweilige Strassenkilometrierung projiziert werden.

Die Punktwolken werden, abhängig von der Strassenklasse, mit unterschiedlicher Rasterweite erzeugt. Die zu erreichende Genauigkeit ist vom eingesetzten Laserscanner und des Positionierungssystems abhängig und sollte relative einen Wert von 1 cm nicht überschreiten.

Empfehlungen für die zu verwendenden Hardwarespezifikation zur Erfassung der Längsebenheit mit einem Laserscanner:

- Laserscanner:
 - Erfassungsrate >1 Mio. Punkte/Sek
- Positionierungssystem:
 - Inertialsystem ist zwingend erforderlich (Kreiselsystem)
 - Winkelgenauigkeit: < 0.02°
 - Lagegenauigkeit: 2-10 cm absolut
 - Relative Genauigkeit innerhalb eines Profils: <1 cm

Der Laserscanner eignet sich für die Untersuchung der folgenden Fragestellungen:

- Erfassung eines realen geometrischen Profils welchen zur Lichtraumanalyse verwendet wird
- Prüfung im Rahmen der Bauüberwachung
- Kontinuierliche Prüfung des Lichtraumprofils möglich
- Kontrolle Brückendurchfahrtshöhen

Als Ergebnis werden Laserscannerpunkte lokalisiert, die im entsprechenden Lichtraumprofil verortet sind und einer weiteren Analyse bedürfen. Dieses geschieht i.d.R. als 2D Profilplot mit metrischen Achsen.

7.9.4 Entwicklungsstand, Anwendungsgrenzen, Kosten

Der Einsatz der Technologie für die Messung des Lichtraumprofils, des Strasseninventars oder des Geländes ist als relativ neu einzuschätzen. Die Erfassung mit einem Mobile Mapping Systems erfolgt im fließenden Verkehr und benötigt keine gesonderten Sicherungsmassnahmen.

Alle stationären Laserscanner können partiell einzelne Profile erfassen, die für spezielle Überprüfungen von Relevanz sind. Diese Vorgehensweise eignet sich für Durchfahrtshöhen. Für eine Netzweite Erfassung ist das Mobile Verfahren zu bevorzugen.

Die Tagesleistung für Mobile Mapping Systeme kann mit 100-200 km pro Tag angegeben werden. Die Tagesleistung eines stationären Systems kann je nach Reichweite des Instruments mit einigen Kilometern angenommen werden.

Die Kosten einer Messung belaufen sich ca. auf 50-500 CHF.

7.9.5 Ergänzende Ausschreibungsanforderungen

Als Basis für die zu definierenden Anforderungen an die Ausschreibung dient ein objektspezifisches Messkonzept (siehe Kapitel 2.2), welches die spezifischen Gegebenheiten des Objekts entweder für das Trasse oder Naturgefahren berücksichtigt.

Mit Berücksichtigung dieser aufgeführten Themen können, zusammen mit den vorgängig unter Datenerfassung, Raumbezug, Messgrößen und –genauigkeit angeführten Rahmenbedingungen, die Ausschreibungsanforderungen spezifisch vervollständigt werden.

Insbesondere sind bei dieser Technologie Angaben über den gewünschten Abstand der Messungen zu integrieren, welche Anforderungen bezüglich der verwendbaren Sensoren und der maximalen Messgeschwindigkeiten definiert.

7.9.6 Literaturverzeichnis

Sonstige Literatur / Forschungsberichte

-

7.10 Winkel-, Streckenmessung

Die Erfassung des Lichtraumprofils ist weiterhin auch mit einfachen Entfernungsmessern oder mit Tachymetern möglich. Diese Art der Lichtraumbestimmung ist nur für die Kontrolle spezifischer Bauwerke, Schilderbrücken, Inventargegenstände oder Geländeabschnitte geeignet, da jeder Messpunkt im zu prüfenden Lichtraumprofil oder für die Bestimmung der Objektgeometrie einzeln zu erfassen ist.

7.10.1 Beschrieb der Technologie

Für die Erfassung des Lichtraumprofils mit einem Distanzsensor wird rechtwinklig zur Achse ein Profil erfasst, welches die Höhenwerte rechtwinklig über der Fahrbahnoberfläche abträgt. Die Wahl der Höhenpunkte sind Nutzerabhängig und dienen nur für eine grobe Orientierung. Dieses Verfahren sollte im Weiteren nur für grobe Kontrollprüfungen für Durchfahrtshöhen benutzt werden, da die orthogonale Ausrichtung von Fahrbahnoberfläche und Höhenpunkt unzureichend über einen Distanzmesser erfasst werden kann. Damit sind die erfassten Strecken i.d.R. zu lang und repräsentieren nicht die reale Situation. Aus diesem Grund sollten Erfassungen zumindest mit einem Tachymeter erfolgen, bei dem die Messpunkte der Strasse und der Höhenpunkte so erfasst werden, dass die Querneigung exakt mit dem Lichtraumprofil korrespondiert.

Distanzmesser verwenden zur Messung der Entfernung grösstenteils eine Laufzeitmessung oder eine Messung der Phasenverschiebungen auf Grundlage von auf Infrarot- oder sichtbaren Lichtwellen. Die Entfernungsmessung kann bis ~100 m erfolgen, wobei eine Genauigkeit von wenigen Zentimetern erreicht wird.

Elektronische Tachymeter messen entsprechend der Horizontierung einen Richtungswinkel und eine Distanz zum Zielpunkt. Über die so erfassten Polarkoordinaten können die Koordinaten des Standpunktes auf den Zielpunkt übertragen werden. Dabei wird für die Distanzmessung vorrangig bei präziseren Tachymetern über eine Phasenverschiebung des ausgesandten und im Zielpunkt reflektierten Lichtstrahls gemessen. Hierbei ist auf eine reflektorlose Distanzmessung zu achten um nicht am Messobjekt ein Prisma oder retroreflektierendes Material anbringen zu müssen.



Abb. 7.31 Tachymeter/Totalstation Leica TS10 [Leica]

Punktbestimmung Beschreibung

7.10.2 Einsatzzweck und Fragestellung im Bereich Trasse

Die Systeme zur Strecken und Winkelmessung eignen sich für die Messung von Lichtraumprofilen oder zur Bestimmung der Geometrien von Strasseninventar und dem

Gelände im Strassenumfeld. Die Messungen können an allen Fahrbahnen durchgeführt werden. Zur Erfassung des Trassees werden terrestrische, stationäre Systeme verwendet. Durch die spezifische Erfassung ist die Messung nicht im laufendem Verkehr realisierbar. Es können einzelne Lichtraumprofile oder Geometrien erfasst werden, wo hingegen eine lückenlose Kontrolle effektive als nicht sinnvoll zu erachten ist.

7.10.3 Datenerfassung, Raumbezug, Messgrössen und Genauigkeit

Die Datenerfassung findet rein digital statt. Der Raumbezug ist durch das verwendete Positionierungssystem oder durch einen GNSS Empfänger (stationärer Laserscanner) realisiert und kann somit an die jeweilige Strassenkilometrierung projiziert werden.

Die Punktwolken werden, abhängig von der Strassenklasse, mit unterschiedlicher Rasterweite erzeugt. Die zu erreichende Genauigkeit ist vom eingesetzten Laserscanner und des Positionierungssystems abhängig und sollte relative einen Wert von 1 cm nicht überschreiten.

Empfehlungen für die zu verwendenden Hardwarespezifikation zur Erfassung eines Lichtrauprofiles:

- Entfernungsmessung:
 - Ohne Prisma / beliebige Oberfläche
 - 0 m – 500 m: 2 mm + 2 ppm
- Winkelmessung
 - Winkelgenauigkeit: 0,3 -1,5 mgon
 - Lagegenauigkeit: resultiert aus der Entfernungsmessung und der Winkelmessung
 - ~3-5 mm je nach Gerätetyp und Objektentfernung

Die Strecken und Winkelmessung eignet sich für die Untersuchung der folgenden Fragestellungen:

- Erfassung eines realen geometrischen Profils welches zur Lichtraumanalyse verwendet wird
- Prüfung im Rahmen der Bauüberwachung
- Kontrolle Brückendurchfahrtshöhen

Als Ergebnis werden einzelne lokale Lichtraumprofile erfasst, die einer weiteren Analyse bedürfen und mit dem Soll Profil verglichen werden muss. Dieses geschieht i.d.R. als 2D Profilplot mit metrischen Achsen, welche der Stationierung zugeordnet werden.

7.10.4 Entwicklungsstand, Anwendungsgrenzen, Kosten

Der Einsatz der Technologie für die Messung des Lichtrauprofiles mit Hilfe von Winkel und Streckenmessung ist Stand der Technik. Die Erfassung erfolgt nicht im fliessenden Verkehr und benötigt gesonderte Sicherungsmassnahmen.

Alle Profile werden einzeln erfasst, die entweder für spezielle Überprüfungen von Relevanz sind oder in einer äquidistanten Wiederholung von mehreren Metern. Diese Vorgehensweise eignet sich für Durchfahrtshöhen oder kleineren Streckenabschnitten. Für eine netzweite Erfassung ist das Verfahren nicht geeignet.

Die Tagesleistung kann mit 1 bis 5 km angegeben werden und ist stark abhängig von den zu erfassenden Objekten im Lichtraumprofil bzw. bauartbedingten oder vegetationsbedingten Eigenheiten.

Der Kostenpunkt einer Messung beträgt ca. 1.200 CHF am Tag.

7.10.5 Ergänzende Ausschreibungsanforderungen

Als Basis für die zu definierenden Anforderungen an die Ausschreibung dient ein objektspezifisches Messkonzept (siehe Kapitel 2.2), welches die spezifischen Gegebenheiten des Objekts entweder für das Trasse oder Naturgefahren berücksichtigt.

Mit Berücksichtigung dieser aufgeführten Themen können, zusammen mit den vorgängig unter Datenerfassung, Raumbezug, Messgrößen und –genauigkeit angeführten Rahmenbedingungen, die Ausschreibungsanforderungen spezifisch vervollständigt werden.

Insbesondere sind bei dieser Technologie die ortsspezifischen Gegebenheiten zu berücksichtigen, welche ggf. Sperrungen oder Sicherungsmassnahmen erforderlich machen.

7.10.6 Literaturverzeichnis

Sonstige Literatur / Forschungsberichte

-

B Befahrbarkeit

B 1 Längsebenheit

Längsebenheit ist ein Qualitätsmass für Strassen und Wege, welches in der Regel Fahrtrichtungs- und Fahrsteifen bezogen erfasst wird. Abweichungen in der Längsebenheit wirken sich negativ auf den Fahrkomfort und die Fahrsicherheit aus. Die Datengrundlage hierfür bildet ein Längsprofil oder partiell abgeleitete Differenzen zu einer Referenz, welche georeferenziert oder zu einer Strassenkilometrierung synchronisiert werden.

Über die Datengrundlage, welche abhängig vom eingesetzten Messinstrument ist, können verschiedene Kennwerte zur Evaluierung herangezogen werden. Diese sind z.B.

- Wellenbandanalyse NBO für die drei Wellenlängenbänder (kurze Wellen (PO), mittlere Wellen (MO) und lange Wellen (GO))
- Winkelwert der Neigungsänderung (W-Wert bzw. W_{max}).
- sW-Werte Standardabweichung der W-Werte
- Simulation der gleitenden Richtlatte (PGR)
- das Bewertete Längsprofil (BLP),
- Allgemeine Unebenheit (AUN),
- Standardabweichung der Differenz zum gleitenden Mittelwert (SXX),
- International Roughness Index (IRI) und
- Längsebenheitswirkindex (LWI).

Fehlereinflüsse bei der Erfassung der Längsebenheit können messtechnisch von der Höhenmessung, der Spurtreue und der Verortung der gemessenen Werte entstehen. Weitere Fehlerquellen sind in der Datenverarbeitung (Filterung, Glättung, etc.) zu verorten.

Die Längsebenheit kann entweder bei der Abnahme eines neuen Fahrbahnabschnittes erfolgen oder zur Bewertung einer bestehenden Fahrbahnoberfläche dienen.

Für die Längsebenheit werden in jeder Radspur alle 10-12,5 mm Messpunkte für ein Höhenlängsprofil aus Rohmessdaten generiert. Das digitale Profil sollte Wellenlängen von 0,3 bis 160 m oder 200 m aufweisen. Mit Hilfe des Profils können darauf aufbauend verschiedene Indikatoren für die Längsebenheit berechnet werden; z. B. nach VSS-40517 (S_w -, W-Werte), NBO nach VSS 40525 oder nach EN 13036-5 (IRI, PSD). Die Erhebung und Bewertung des Zustands erfolgt im Weiten nach VSS-40925B.

Zustandsgrößen der Zustandsmerkmale werden für eine Bewertung mit Hilfe von Normierungsfunktionen in einen dimensionslosen Zustandsindex überführt. Dieser Zustandsindex dient als Bewertungsmaßstab von 0 bis 5 für die Zustandsgröße der jeweiligen Zustandseigenschaft. Hierfür ist jedem Zustandsmerkmale eine Zustandsgröße definiert, welche messtechnisch oder auch visuell für die vorhandenen Objekte des Inventars zugeordnet werden.

Die Längsebenheitsmessung basiert i.d.R. auf statistischen Methoden, wobei z.B. in konstanten Intervallen gemessene Profilabweichungen von einer mittleren Bezugsebene als Standardabweichung oder Varianz angegeben werden. In Anlehnung an die Begriffsdefinitionen der DIN 4760 handelt es sich bei Ebenheitstoleranzen um Variationen 2. Ordnung. Während Variationen 1. Ordnung (z.B. Winkeltoleranzen) nur bei Messung des Streckenabschnitts festgestellt werden können. Aus der Eingrenzung des Begriffes Rauheit im Strassenbau folgt, dass sich Ebenheitstoleranzen oberhalb der Megarauheit im Wellenlängenbereich $> 0,3$ m bewegen. Eine andere Bewertungsmöglichkeit gibt die ISO 13473-1 vor. Hier sind Unebenheiten als geometrische Unregelmäßigkeiten im Wellenlängenbereich von 0,5 bis 50 m definiert.

Die Messung auf Strassenoberflächen regelt in Deutschland die Technische Prüfvorschrift TP-Eben. Diese gilt für Fahrbahnoberflächen in Längs- sowohl auch in Querrichtung. Weiterhin wird unterschieden zwischen berührungslosen [203] und berührenden Messungen [204].

Tab. 7.10 Längsebenheit - Übersicht

Technologie Nr und Name	7.11	7.12	7.13	7.14	7.15	7.16
Richtlatte						
7.11.1 Kurzbeschreibung	Messlatte für die manuelle Messung einer Ebenheitstoleranz für die zulässige Abweichung einer Fläche	7.12.1 mobiles Messgerät Planograf zur Erfassung der Längsebeneheit	7.13.1 Messgerät zur Längsebeneheitsmessung (Schweiz)	7.14.1 Einzellassensoren zur mobilen schnellen Erfassung eines relativen Höhenlängsprofils welches mit einem Beschleunigungssensor gestützt wird	7.15.1 Mobiles schnelfahrendes Messsystem zur Erfassung mehrerer absoluter Höhenlängsprofile	7.16.1 Mobiles schnelfahrendes Messsystem zur Erfassung eines oder mehrerer relativer Höhenlängsprofile
7.11.2 Einsatzzweck	punktueller manueller Messung mit Hilfe einer 4m Latte und eines Messkeils	streckenbezogene Erfassung eines relativen Höhenlängsprofils	streckenbezogene Erfassung eines Längsebeneheitsprofils	streckenbezogene Erfassung eines relativen Höhenlängsprofils	streckenbezogene Erfassung eines absoluten Höhenlängsprofils	streckenbezogene Erfassung eines relativen Höhenlängsprofils (HRM Balken)
7.11.2 "ID"	LLp1 1 direkt 1 mechanisch 1 direkt 1 mechanisch	LP1 1 direkt 1 mechanisch 2 analog (Datenschreiber) 2 streckenbezogen 1 integriert 3 nicht zerstörend	LG01 1 direkt 1 mechanisch 2 analog (Datenschreiber) 1 punktuell 2 separat 3 nicht zerstörend	LLS1 1 direkt 7 laseroptisch 1 digital 2 streckenbezogen 1 integriert 3 nicht zerstörend	LLC1 1 direkt 7 laseroptisch 1 digital 2 streckenbezogen 1 integriert 3 nicht zerstörend	LTr1 1 direkt 7 laseroptisch 1 digital 2 streckenbezogen 1 integriert 2 separat 3 nicht zerstörend
7.11.3 Typisierung	1 punktuell 2 separat 3 nicht zerstörend	2 analog (Datenschreiber) 2 streckenbezogen 1 integriert 3 nicht zerstörend	2 analog (Datenschreiber) 2 streckenbezogen 1 integriert 3 nicht zerstörend	2 streckenbezogen 1 integriert 3 nicht zerstörend	2 streckenbezogen 1 integriert 3 nicht zerstörend	2 streckenbezogen 1 integriert 2 separat 3 nicht zerstörend
7.11.3 Messgrößen und -genauigkeit	Werte / PGR	PGR, IRI	W-Wert	PGR, IRI	PGR, IRI, WLP, AUN, LWI	PGR, IRI, WLP, A, UN, LWI
Untersuchungs-/Tiefenbereich	Oberfläche	Oberfläche	Oberfläche	Oberfläche	Oberfläche	Oberfläche
Auflösung	-	-	-	-	0,01 - 0,1 mm	0,1 - 0,01 mm
Genauigkeit	0,1 - 0,5 mm	0,5 - 2 mm	0,1 Grad	0,2 mm	0,2 mm	0,2 - 0,5 mm
Bemerkungen					Extraktion aus Punktwolke, Laserklasse 1	Laserklasse 3-4
Nutzung in Fachgebieten	Trasse 3 Geotechnik 0 Naturverfahren 0 Umwelt 0	3 0 0 0	4 0 0 0	3 0 0 0	4 0 0 0	4 0 0 0
Einsatzzeitpunkt	W, N	W, N	W, N	W, N	V, W, N	W, N
7.11.4 Entwicklungsstand	W, N	W, N	W, N	W, N	W, N	W, N
7.11.4 Kosten	initial / einmalig wiederkehrend	7.12.4	7.13.4	7.14.4	7.15.4	7.16.4

7.11 Richtlatte (4 m)

Gemäss DIN 18201 ist die Ebenheitstoleranz der Bereich für die zulässige Abweichung einer Fläche von der Ebene [29]. Zur Beurteilung von Ebenheitstoleranzen wird nach dieser Norm das Stichmass verwendet. Dieses ist der Abstand eines Punktes von einer Bezugslinie, der im Verhältnis zum Messpunktstand bewertet wird. Das Grundprinzip und das Messverfahren sind nach DIN 18202 und TP Eben Teil: berührende Messungen [30] geregelt.

7.11.1 Beschrieb der Technologie

Die Richtlatte ist eine 4 Meter lange zum Teil zerlegbare Metallkonstruktion mit einer maximalen Biegelinie kleiner als 0,5 mm. Die Latte dient hierbei zur lokalen Detektion von Unebenheiten. Zur Messung der Abweichung, welches im Weiteren als Stichmass definiert wird, kommt ein Messkeil zum Einsatz. Dieser Messkeil mit einem definierten Anstellwinkel von 10 bis 15° repräsentiert, durch eine metrische Einteilung auf der Oberseite, den Abstand zwischen Oberfläche und Richtlatte.

AUFNAHMEPRINZIP

Die 4 m-Richtlatte ist ein mechanisches Messinstrument, welches den Anforderungen des Technische Regelwerkes (bspw. [30]) entsprechen muss. Der zu verwendende Messkeil soll mit einer verschleissfreien Oberfläche versehen sein. Bei Unebenheiten unter der 4 m-Richtlatte bilden sich i.d.R. zwischen der Bezugslinie der Richtlatte und der Fahrbahnoberfläche der beiden Auflagepunkten eine Abweichung (vgl. Abb. 7.32).

Für grössere Messdistanzen wird die Lattenlage entlang des zu messendes Längsprofiles um 2 Meter verschoben. Bei jeder Lattenlage werden die maximalen Stichmasse unter der ersten und zweiten Lattenhälfte ermittelt und in ein Protokoll übertragen (vgl. Abb. 7.33).

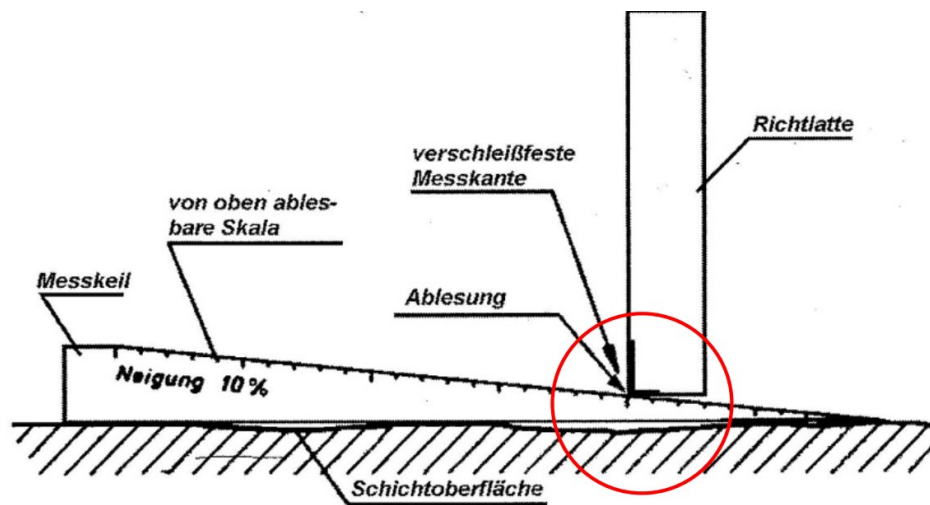


Abb. 7.32 Richtlatte und Messkeil in Messstellung (Prinzipsskizze) Quelle: [29]

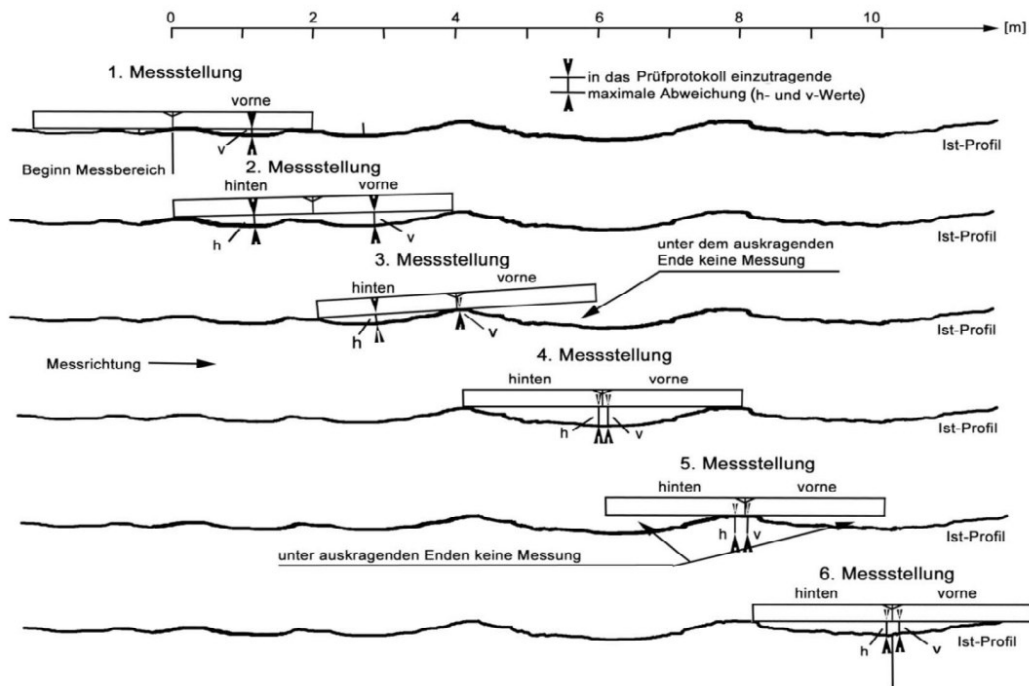


Abb. 7.33 Fortlaufende Messung mit der Richtlatte, Quelle: [30]

7.11.2 Einsatzzweck und Fragestellung im Bereich Trasse

Ermittlung der Profiltiefe PT/ Stichmass erfolgt mechanische. Dies wird realisiert durch eine stichprobenartige Prüfung oder rasterförmig angeordnete Messpunkte lt. [29]. Die Ebenheit einer längeren Messstrecke wird durch spezielles Anlegen der 4 m-Latte realisiert.

Dieses Verfahren dient zur manuellen Prüfung direkt am Messobjekt. Da der Zeitaufwand zur Aufnahme vergleichsweise hoch ist, haben sich andere schnellere Prüfverfahren etabliert. Das Grundprinzip der Stichmassbestimmung wird auch virtuell anhand eines Höhenlängsprofils über den Index «Simulation der gleitenden Richtlatte» (PGR) bestimmt.

7.11.3 Datenerfassung, Raumbezug, Messgrößen und Genauigkeit

Zur Daten Erfassung wird die 4 m-Latte entlang des zu messenden Höhenlängsprofils auf die Oberfläche gelegt. Die Lattenlage wird über ein Messrad oder ein Hand-GPS-Gerät zum Streckenabschnitt verortet.

Anforderungen an die Richtlatte:

- Format: 4000 x 18 x 90 mm,
- Durchbiegung: max. 0,5 mm vertikal,
- Querbiegung: max. 1,5 mm,
- Besonderheiten: Mittenkennzeichnung

Anforderungen an den Messkeil:

- Anstellwinkel: 10 bis 15%
- Zu erreichende Messgenauigkeit (Massstab): 0,1 -0,5 mm
- Messbereich: minimal 2 bis 25 mm
- Material: abriebfestes Material (lt. TP Eben - Metall)
- Aufstandsfläche: (30 ± 5) mm breit, (295 ± 5) mm breit

Mit der Richtlatte wird das maximale Stichmass unter der 4 m-Richtlatte mit dem Messkeil ermittelt. Es ist für kleine Messgebiete < 500 Meter geeignet.

7.11.4 Entwicklungsstand, Anwendungsgrenzen, Kosten

Es ist ein bewehrtes, einfaches, kostengünstiges und vielseitig einsetzbares Messverfahren um Vorort Stichmasse entlang eines Längsprofils zu erfassen. Der Zeitaufwand der Erfassung kann mit 30 min pro 500 m abgeschätzt werden. Die Kosten richten sich zeitbasiert nach dem jeweiligen Stundensatz des Einsatzteams. Das Verfahren ist in der Schweiz nicht weit verbreitet.

Die Kosten für den Einsatz der Technologie setzen sich zusammen aus:

- Tagessatz für Techniker ca. 1500-2000 CHF

7.11.5 Ergänzende Ausschreibungsanforderungen

Als Basis für die zu definierenden Anforderungen an die Ausschreibung dient ein objektspezifisches Messkonzept (siehe Kapitel 2.2), welches die spezifischen Gegebenheiten des Objekts entweder für das Trasse oder Naturgefahren berücksichtigt.

Mit Berücksichtigung dieser aufgeführten Themen können, zusammen mit den vorgängig unter Datenerfassung, Raumbezug, Messgrößen und –genauigkeit angeführten Rahmenbedingungen, die Ausschreibungsanforderungen spezifisch vervollständigt werden.

Insbesondere sind bei dieser Technologie die ortsspezifischen Gegebenheiten zu berücksichtigen, welche ggf. Sperrungen oder Sicherungsmassnahmen erforderlich machen.

7.11.6 Literaturverzeichnis

Sonstige Literatur / Forschungsberichte

[29] Merkblatt / Zentralverband Deutsches Baugewerbe, Toleranzen im Hochbau nach DIN 18201 und DIN 18202, [Stand:] August 2000 Hrsg., Köln: Müller, 2000.

[30] Technische Prüfvorschriften für Ebenheitsmessungen auf Fahrbahnoberflächen in Längs- und Querrichtung - Teil: Berührende Messungen, Ausgabe 2017 Hrsg., Köln: FGSV Verlag GmbH, 2018.

7.12 Planograf

7.12.1 Beschrieb der Technologie

Das Messgerät Planograf besteht in der Regel aus einem Rohrgitter-Rahmen mit jeweils zwei Rädern auf mehreren Achsen, die einen idealen Horizont/Oberfläche realisieren. In der Mitte des Rohrgitterrahmens befindet sich ein variables aufgehängtes Messrad, welches sich in vertikaler Richtung frei bewegen kann. Jede Veränderung dieses Messrades wird digital oder analog aufgezeichnet und stellt hier die die Abweichung aus dem idealen Horizont dar (vgl. Abb. 7.34).

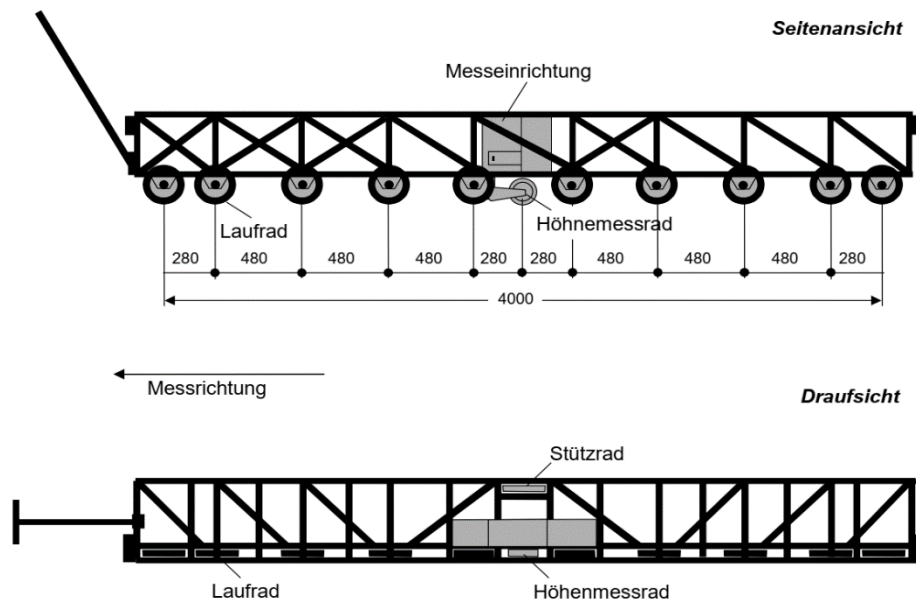


Abb. 7.34 Prinzipskizze Planograf [7]

Der Planograf steht als elektronisches oder mechanisches Aufzeichnungssystem zur Verfügung.

7.12.2 Einsatzzweck und Fragestellung im Bereich Trasse

Das Verfahren dient zur Ermittlung und Dokumentation von Unebenheiten im Längsprofil. Mit diesem Verfahren lassen sich Höhenlängsprofile in einfacher Weise für

- Kontrollprüfungen bei Bauabnahmen,
- Überprüfungen der Bauausführung (Eigenüberwachung),
- Prüfungen vor Ablauf der Verjährungsfrist für Mängelansprüche und
- objektbezogenen Nachprüfungen in Einzelfällen

durchführen.

7.12.3 Datenerfassung, Raumbezug, Messgrößen und Genauigkeit

Messungen mit dem Planografen werden unmittelbar berührend, das heisst in Kontakt mit der zu prüfenden Oberfläche durchgeführt. Sie erlauben hierbei nur eine Wiedergabe der relativen Höhenverhältnisse von einzelnen Punkten der Oberfläche, bezogen auf eine Länge von maximal 4 m. Dies begrenzt den Einsatzbereich dieser Messverfahren für die Erfassung der Ebenheit in Längsrichtung im Hinblick auf Aussagen zum Gebrauchswert als auch zum Substanzwert der Strasse. Der Planograf erfasst Abweichungen mittig unter einer 4 m langen Bezugslinie (Nulllinie). Die Messung erfolgt kontinuierlich. Dabei werden die Bewegungen des Messrades relativ zur Bezugslinie aufgezeichnet. Die Erfassung besteht aus der Messung einer Folge von Abweichungen zur Nulllinie, die bei mechanischen Messwerterfassungssystemen kontinuierlich, bei elektronischen Messwerterfassungssystemen quasikontinuierlich als grösster Messwert innerhalb von 10 cm Wegstrecke aufgezeichnet werden.

Die Messdurchführung sollte in Schrittgeschwindigkeit (ca. 3 bis 6 km/h) erfolgen. In Ausnahmefällen kann bei Messungen auf geraden Strecken ohne offensichtliche Unebenheiten die Geschwindigkeit bis ca. 10 km/h erhöht werden.

Bei mechanisch arbeitenden Planografen werden neben dem Messschrieb auch eine Nulllinie und verschiedene Hilfslinien eingetragen, so dass die Grösse der Überschreitungen p direkt abgelesen werden kann. Bei elektronischen Messsystemen können auch Auslenkungen oberhalb der Nulllinie erfasst werden, wobei diese nicht bewertungsrelevant sind.

Planografenmessungen können nicht unter fliessendem Verkehr durchgeführt werden, da die Messgeschwindigkeit zu gering ist. Es ist immer eine Sperrung der Messstrecke notwendig.

7.12.4 Entwicklungsstand, Anwendungsgrenzen, Kosten

Der Planograf ist ein anerkanntes Messgerät zur Qualitätssicherung der Längsebenheit im Strassenbau [8]. Der Planograf ist ein Standardverfahren, welches bspw. in der Schweiz und in Deutschland Anwendung findet. Der Planograf eignet sich für Messungen von 10 bis 5.000 m.

Die Kosten für den Einsatz der Technologie setzen sich zusammen aus:

- Tagessatz für Techniker ca. 1500-2000 CHF
- Messsystem ca. 300 bis 500 CHF pro Kilometer.

7.12.5 Ergänzende Ausschreibungsanforderungen

Als Basis für die zu definierenden Anforderungen an die Ausschreibung dient ein objektspezifisches Messkonzept (siehe Kapitel 2.2), welches die spezifischen Gegebenheiten des Objekts entweder für das Trasse oder Naturgefahren berücksichtigt.

Mit Berücksichtigung dieser aufgeführten Themen können, zusammen mit den vorgängig unter Datenerfassung, Raumbezug, Messgrössen und –genauigkeit angeführten Rahmenbedingungen, die Ausschreibungsanforderungen spezifisch vervollständigt werden.

Insbesondere sind bei dieser Technologie die ortsspezifischen Gegebenheiten zu berücksichtigen, welche ggf. Sperrungen oder Sicherungsmassnahmen erforderlich machen.

7.12.6 Literaturverzeichnis

Sonstige Literatur / Forschungsberichte

[31] Merkblatt / Zentralverband Deutsches Baugewerbe, Toleranzen im Hochbau nach DIN 18201 und DIN 18202, [Stand:] August 2000 Hrsg., Köln: Müller, 2000.

[32] L. Löcherer, Hrsg., Technische Prüfvorschriften für Ebenheitsmessungen auf Fahrbahnoberflächen in Längs- und Querrichtung - Teil: Berührende Messungen, Ausgabe 2017 Hrsg., Köln: FGSV Verlag GmbH, 2018.

7.13 Goniograph

7.13.1 Beschrieb der Technologie

Der vornehmlich in der Schweiz zur Anwendung kommende Goniograph [SN 640 520a] erfasst auf einer Länge von 2 m den relativen Winkel in Bezug auf ein rollbares Messgerät mit 3 Stützachsen mit einem symmetrischen Aufbau. Bei diesem Messverfahren wird der Winkel zwischen den parallelen 3 Achsen gemessen, die in Fahrtrichtung jeweils einen Abstand von 1 m zueinander haben. Bei einer idealen ebenen Oberfläche wird der zu erfassende Winkel null sein. Bei Variationen in der Oberfläche verändert sich der Winkel dementsprechend.

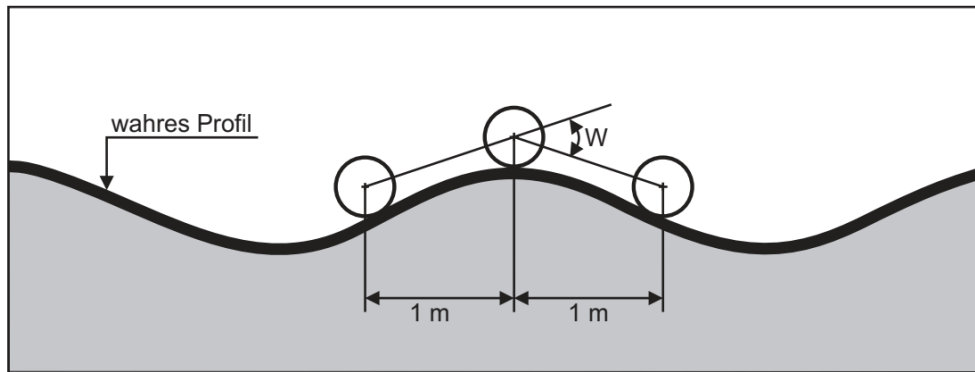


Abb. 7.35 Prinzipsskizze Goniograph [IMP]

Der Goniograph steht als elektronisches oder mechanisches Aufzeichnungssystem zur Verfügung.

7.13.2 Einsatzzweck und Fragestellung im Bereich Trasse

Das Verfahren dienen zur Ermittlung und Dokumentation von Unebenheiten im Längsprofil. Der Goniograph eignet sich für kleine Streckenabschnitte oder Flick- oder Ausbesserungsstellen. Durch die kleine Bauform ist das Gerät flexible einsetzbar.



Abb. 7.36 analoger Goniograph [IMP]

7.13.3 Datenerfassung, Raumbezug, Messgrößen und Genauigkeit

Durch die Vorwärtsbewegung des Messsystems entlang des zu erfassenden Streckenabschnittes ergeben sich streckenbezogene Messsignale. Die Datenerfassung erfolgt rein analog und mit Stationsbezug oder mit einer einfachen GPS-Maus. Die Festlegung und auch die Positionierung des Messsystems sind stark Nutzerabhängig. Hierdurch können die Messwerte und auch die Wiederholungs-messungen variieren.

Die Messung der Neigungsänderung mit dem Goniograph ist mit einer Geschwindigkeit von 1 m/s möglich. Es wird kontinuierlich den Winkelwert (W-Wert) erfasst. Die Berechnung der sW-Werte ergeben sich anhand Standardabweichung der W-Werte über 250 m. Über die Fortbewegung entlang der Messstrecke können Längsprofile <1 km erfasst werden.

Der Goniograph kann nicht unter fließendem Verkehr eingesetzt werden, da die Messgeschwindigkeit zu gering ist. Es ist immer eine Sperrung der Messstrecke notwendig.

7.13.4 Entwicklungsstand, Anwendungsgrenzen, Kosten

Der Goniograph ist ein anerkanntes Messgerät zur Qualitätssicherung der Längsebenheit im Strassenbau. Der Goniograph ist ein Standardverfahren, welches in der Schweiz Anwendung findet. Der Goniograph eignet sich für Messungen von 10 bis 5.000 m.

Die Kosten für den Einsatz der Technologie setzen sich zusammen aus:

- Tagessatz für Techniker ca. 1500-2000 CHF
- Messsystem ca. 300 bis 500 CHF pro Kilometer.

7.13.5 Ergänzende Ausschreibungsanforderungen

Als Basis für die zu definierenden Anforderungen an die Ausschreibung dient ein objektspezifisches Messkonzept (siehe Kapitel 2.2), welches die spezifischen Gegebenheiten des Objekts entweder für das Trasse oder Naturgefahren berücksichtigt.

Mit Berücksichtigung dieser aufgeführten Themen können, zusammen mit den vorgängig unter Datenerfassung, Raumbezug, Messgrössen und –genauigkeit angeführten Rahmenbedingungen, die Ausschreibungsanforderungen spezifisch vervollständigt werden.

Insbesondere sind bei dieser Technologie die ortsspezifischen Gegebenheiten zu berücksichtigen, welche ggf. Sperrungen oder Sicherungsmassnahmen erforderlich machen.

7.13.6 Literaturverzeichnis

Sonstige Literatur / Forschungsberichte

-

7.14 Lasersensoren

7.14.1 Beschrieb der Technologie

Unter der Technologie «Lasersensoren» werden Messsysteme zusammengefasst, die mit Hilfe eines Entfernungsmessers und eines Beschleunigungsmessers bzw. einem Inertialsystem ein Höhenlängsprofil erfassen können. Diese Technologie wird oft als South Dakota Profilometer bezeichnet und wurde in mehreren Studien, vor allem in den USA, untersucht [33][34][35][36].

Die Technologie arbeitet mit zwei verschiedenen Messkomponenten. Das erste System ist die hoch präzise Entfernungsmessung, welche den Abstand zwischen Fahrbahn und Messplattform ermittelt. Das zweite System ist zur Kompensation bzw. Lokalisierung der Messplattform. Die Systeme können zum einen ein Beschleunigungssensor sein, welcher die Vertikalbeschleunigungen der Messplattform ermittelt und diese als Offsetfaktor mit anbringt oder zum anderen ein hochgenaues Positionierungssystem, welches die Messplattform mit allen Orientierungswinkeln und einer Position bestimmt. Beide Möglichkeiten finden in der Praxis Anwendung. Das Verfahren mit Hilfe des Beschleunigungssensors, um die Vertikalbewegungen zu kompensieren findet die häufigste Anwendung.

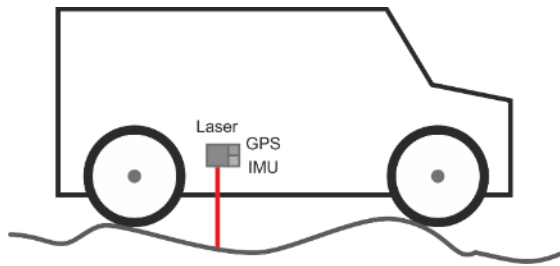


Abb. 7.37 Skizze zum Aufbau eines Messfahrzeugs zur Längsebenenmessung bestehend aus einem Messsystem mit Einzellaser, Beschleunigungssensor und GPS.

7.14.2 Einsatzzweck und Fragestellung im Bereich Trasse

Die Systeme zur Erfassung der Längsebenheit aus Lasersensoren eignen sich zur schnellen berührungslosen und präzisen Erfassung von einem Höhenlängsprofil. Berührungslos arbeitende Messsysteme können im fließenden Verkehr eingesetzt werden. Die Qualität und auch die im Höhenlängsprofil abgebildeten Wellenlängen verhalten sich proportional zu den eingesetzten Komponenten. Kalibrierte Systeme mit einem Laserdistanzsensor und einem Beschleunigungssensor können i.d.R. Wellenlängen von 0,3 bis 60 m erfassen. Für die Berechnung des IRI ist dies hinreichend. Werden längere Wellenlängen benötigt, wie bspw. zur Berechnung des WLP oder AUN, ist zumindest die Kombination mit einem Positionierungssystem notwendig bzw. die Anwendung des HRM-Verfahrens zwingend erforderlich.

7.14.3 Datenerfassung, Raumbezug, Messgrößen und Genauigkeit

Das Funktionsprinzip der Lasersensoren wurde bereits beschrieben. Durch die genaue Bestimmung der Trajektorie des Sensors in Kombination mit den Höhenwerten kann im Postprocessing die vollständige 3D-Geometrie der auszuwertenden Spur berechnet werden. Hieraus können dann abschnittsweise reale Wellenlängen der Längsebenheit bestimmt werden. Um die Orientierung des Lasers genau bestimmen zu können, eignet sich ein inertiales Messsystem (IMU). IMUs bestehen in der Regel aus einem Beschleunigungssensor in Kombination mit einem Drehratensensor. Bei Kombination von jeweils drei orthogonal ausgerichteten Beschleunigungssensoren und Drehratensensoren können alle sechs kinematischen Freiheitsgrade bestimmt werden. Solche Systeme sind sehr gut geeignet, um Veränderungen in der Position, vor allem bei schnellen Bewegungsänderungen, zu detektieren. Allerdings geben sie permanent nur relative Veränderungen aus, so dass IMUs dazu neigen, zu drifteten. Um die Drift zu eliminieren, werden zusätzlich Magnetometer oder GNSS-Sensoren eingesetzt. In Kombination können so sehr genaue Trajektorien erstellt werden. Der Preis und die Grösse der Einheit hängen dabei direkt von Präzision und Genauigkeit der Trajektorienbestimmung ab.

Die zweite Methode besteht in Auswertung eines Beschleunigungssensors. Die vertikalen Beschleunigungswerte werden hier durch Differenzierung in einen Offsetwert reduziert, die die vertikale Fahrzeugbewegung repräsentieren soll. Die Beschleunigungssensoren haben i.d.R. eine bauartbedingte Drift. Dieser Beschleunigungsmessfehler setzt sich aus folgenden Einflüssen zusammen: Nullpunktverschiebung, Fehler durch Verkippen (Bremsen-Beschleunigen), allgemeines Rauschen des Sensors und einem Restfehler (äussere Einflüsse, Temperatur, Druck).

Als Ergebnis wird ein relatives Höhenlängsprofil ermittelt, welches qualitativ direkt von den eingesetzten Messkomponenten abhängt. Aus diesem Höhenlängsprofil können dann die jeweiligen Indizes berechnet werden. Hierbei ergeben sich allerdings Einschränkungen in Bezug auf die abgebildeten Wellenlängen im Höhenlängsprofil, welche vom eingesetzten Messsystem abhängig sind.

Die Abtastrate bei Lasersensoren muss so hoch sein, dass für die Mittelung auf 0,1 m-Elemente genügend Messwerte zur Verfügung stehen. Bei einer Fahrtgeschwindigkeit von 80 km/h und 10 Messwerten pro 0,1 m muss mit einer Frequenz von mehr als 2,2 kHz

gemessen werden. Üblicherweise betragen die am Markt verwendeten Messfrequenzen ~20 kHz und haben einen Faktor 10 über den Mindestanforderungen. Abstandssensoren mit 50 kHz Messfrequenz sind am Markt üblich. Die Frequenz ist auch hier lediglich durch die interne Belichtungszeit des zu verwendeten Sensors limitiert. Die Genauigkeit der Einzelmessung kann mit 0,2 mm angegeben werden.

Die Messwertauflösung für Beschleunigungssensoren muss mindestens 0,15 g betragen, um einen akzeptablen Beschleunigungswert zu liefern [33]. Die besten Messwerte liefert ein Beschleunigungssensor nur bei zu Beginn starker Beschleunigung und anschliessend konstanter Fahrtgeschwindigkeit ohne leichte Geschwindigkeitsänderungen. Zuletzt ist die Berechnung der Wellenlängen bei ausschliesslicher Verwendung eines Beschleunigungssensors nur auf kurze Wellenlängen beschränkt. Entsprechend ist eine Kombination mit einem Inertialsystem sinnvoll. So können lange Wellenlängen gemessen und schwache Beschleunigungen integriert werden.

Ein Fehler in der Trajektorienbestimmung der Messplattform wirkt sich direkt proportional auf das Ergebnis des Höhenlängsprofils aus. Es sollte sichergestellt werden, dass für eine Standardabweichung unter 0,1 mm der Fehler der Weggebung unter 2 % liegt [37]. Weiterhin lässt sich ein Fehler in der Bestimmung der Nickbewegung auf einen Fehler in der Justierung des Sensors reduzieren. Fehler von etwa 1 ° sind noch tolerierbar. Eine IMU oder ein Vertikalbeschleunigungssensor in Kombination mit bspw. einem GNSS-Sensor muss diese Spezifikationen erfüllen.

Als Ergebnis dieser Messung liegt ein stationsbezogenes Höhenlängsprofil mit einem Punktmindestabstand von 10 cm vor. Dieses bildet die Grundlage zur Berechnung des jeweiligen erforderlichen Indexes. Hierbei ist darauf zu achten, dass das verwendete System die erforderlichen Wellenlängen im Höhenlängsprofil abbildet.

Durch Anwendung von Lasersensoren oder Beschleunigungsaufnehmer können basierend auf dem ermittelten Höhenlängsprofil die bekannten Längsebenenparameter wie NBO, W-Werte und sW-Werte, IRI oder PGR berechnet werden.

7.14.4 Entwicklungsstand, Anwendungsgrenzen, Kosten

Lasersensoren oder Beschleunigungsaufnehmer sind Stand der Technik. Die Messung mit Hilfe eines Beschleunigungssensors bedingt einige Einschränkungen: Zum einen können diese Systeme langsame Fahrten und Start-Stop Ergebnisse durch die Trägheit des Beschleunigungssensors nicht hinreichend erfassen, welches zu Artefakten im Höhenlängsprofil führt. Die kombinierte Verwendung von Initialen Positionierungssystemen ist von der Qualität her genauer, hat aber die Einschränkung bei Tunneldurchfahren. Hier werden die Driftraten des Kreisel systems nicht mehr durch die GNSS-Komponente gestützt. Das bedeutet, dass mit der Länge des Tunnelbauwerks die Qualität der Trajektorie abnimmt.

Die Kosten für eine Befahrung können mit 100 bis 500 CHF pro Kilometer angesetzt werden.

7.14.5 Ergänzende Ausschreibungsanforderungen

Als Basis für die zu definierenden Anforderungen an die Ausschreibung dient ein objektspezifisches Messkonzept (siehe Kapitel 2.2), welches die spezifischen Gegebenheiten des Objekts entweder für das Trasse oder Naturgefahren berücksichtigt.

Mit Berücksichtigung dieser aufgeführten Themen können, zusammen mit den vorgängig unter Datenerfassung, Raumbezug, Messgrössen und –genauigkeit angeführten Rahmenbedingungen, die Ausschreibungsanforderungen spezifisch vervollständigt werden.

Insbesondere sind bei dieser Technologie die zu extrahierenden Längsebenenparameter zu spezifizieren, welche die Anforderungen an die zu verwendende Hardware definiert.

7.14.6 Literaturverzeichnis

Sonstige Literatur / Forschungsberichte

-
- [33] S. M. KARAMIHAS und T. D. GILLESPIE, „Guidelines for longitudinal pavement profile measurement,“ Michigan, 1999.
-
- [34] S. X. Hu und A. F. Starace, „Laser acceleration of electrons to giga-electron-volt energies using highly charged ions,“ Phys. Rev. E, Bd. 73, p. 066502, 2006.
-
- [35] D. L. Huft, I. Her, S. K. Agrawal, R. A. Zimmer und C. J. Bester, „Surface properties-vehicle interaction,“ p. 16428, 1984.
-
- [36] S. L. ESHKABILOV und A. G. YUNUSOV, Measuring and Assessing Road Profile by Employing Accelerometers and IRI, 2018, p. 24–40.
-
- [37] J. Neubeck und A. Wiesebeck, Längslebenheitsmesssysteme : Überprüfung der Signalverarbeitungsverfahren nach dem Prinzip der Mehrfachabtastung (HRM), 2015.
-

7.15 Laserscanner

Laserscanner werden im Folgenden als 2D/3D Erfassungsgeräte definiert, welche mit Hilfe eines modulierten oder gepulsten Laserstrahls und einer Ablenkeinheit die Umgebung durch eine nicht zielgerichtete, punktförmige und flächendeckende Abtastung erfassen. Das Ergebnis ist eine dreidimensionale Punktwolke, welche im weiteren Prozessverlauf analysiert wird. Laserscanner können hinsichtlich ihrer Erfassungstechnologie und ihres Einsatzzwecks unterschieden werden. Zusätzlich können Laserscanner für die Automatisierung der Erfassung auf unterschiedlichen Trägersystemen eingesetzt werden, wodurch sich Unterschiede bei der Erfassungsgenauigkeit ergeben können.

7.15.1 Beschrieb der Technologie

Die Typisierung der Laserscanner erfolgt zum einen durch das Aufnahmeprinzip der Entfernungsmessung und zum anderen über den Sichtbereich und deren Genauigkeit. Laserscanner mit einer Genauigkeit > 1 cm werden hier nicht weiter betrachtet, da diese für die Ebenheitsbetrachtungen nicht hinreichend sind.

AUFNAHMEPRINZIP

Es werden zwei Grundprinzipien für die Entfernungsmessung in einem Laserscanner unterschieden [38]:

- Das **Impulslaufzeitverfahren** (engl. time-of-flight) ermittelt aus der Laufzeit von einem ausgesendeten und wieder empfangenen Laserimpuls eine Distanz. Diese Distanz berechnet sich aus der Lichtgeschwindigkeit und der Zeitdifferenz zwischen empfangenem und ausgesendetem Impuls. Die Genauigkeit der Streckenmessung korreliert somit direkt mit der internen Zeitmessung des Gerätes [39]. Mit diesem Verfahren sind Messungen von grossen Entfernungsbereichen möglich, so dass es vorrangig auf fliegenden Plattformen Verwendung findet.
- Das **Phasenvergleichsverfahren** verwendet zur Entfernungsmessung einen kontinuierlichen Laserstrahl, bei dem eine Modulations- und eine Trägerwelle benutzt wird. Die verwendete Modulationswelle bestimmt die maximale eindeutige Reichweite des Distanzmessers. Durch Aussenden und Empfangen des so modulierten Signals ergibt sich im reflektierten Signal eine Phasenverschiebung. Mit Hilfe des ganzzahligen Vielfachen der Modulationswellenlänge und der gemessenen Phasenverschiebung kann auf die Distanz zwischen Messgerät und Objekt rückgeschlossen werden.

Zur Realisierung der 2D/3D Erfassung wird der Messstrahl durch einen Spiegel (Rotation, DLC oder MEMS) abgelenkt, sodass der Messstrahl im Sichtbereich des Scanners abgelegt wird (vgl. Abb. 7.38). Hierbei müssen die Auslenkungswinkel hochgenau erfasst werden. Diese bilden die Grundlage für die spätere Berechnung der resultierenden Punktmessung.

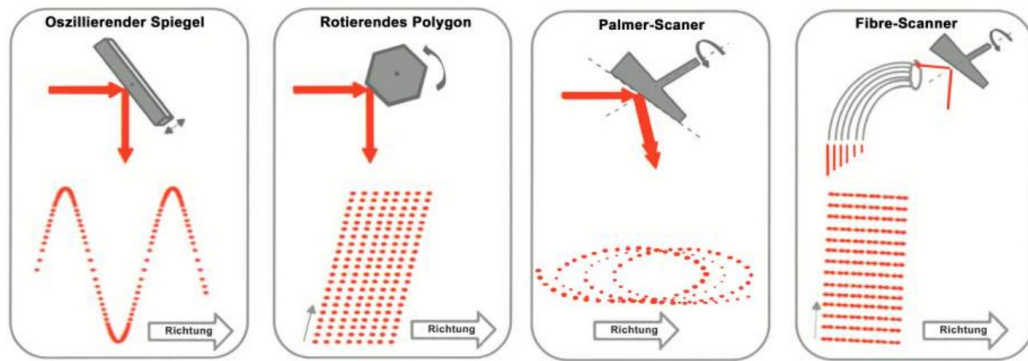


Abb. 7.38 Ablenkprinzipien eines Laserstrahls durch Spiegeloberflächen in einem Laserscanner, Quelle: [40] (von links nach rechts) Prinzip eines oszillierenden Spiegels, eines rotierenden Polygons, eines Palmer- sowie eines Fibre-Scanners.

UNTERTEILUNG IN ANWENDUNGS- UND GENAUIGKEITSKLASSEN

Die Laserscanner können weiterhin in Oberflächenlaserscanner und Umfeldlaserscanner unterschieden werden. Der Oberflächenscanner besitzt ein eingeschränktes Messfeld von 50 bis 70°. Dieses Messfeld beschränkt, in Abhängigkeit der Anbauhöhe, die zu erfassende Oberfläche. Für die Oberflächenscanner werden spezielle Polygonspiegel verwendet, um den Laserstrahl mehrmals innerhalb einer Spiegelrotation über die Erfassungsfläche zu bewegen. Dieser Vorteil ermöglicht es den Oberflächenscanner, im Vergleich zum Umfeldscanner, eine höhere Punktdichte zu erzielen, was bei höheren Geschwindigkeiten des Trägersystems von Vorteil sein kann.

Der Umfeldscanner besitzt in der Regel nur einen rotierenden Spiegel, der es dem Scanner ermöglicht, ein Messfeld von 350 bis 360° abzudecken. Hinsichtlich der Genauigkeit sind die Oberflächenscanner den Umfeldscannern überlegen, besitzen aber auch einen eingeschränkten Eindeutigkeitsbereich, der nur wenige Meter abdeckt.

Oberflächenscanner:

- Eingeschränkter Öffnungswinkel ~70°
- Hohe Genauigkeit 0,2 mm bis 1 mm
- Eingeschränkter Erfassungsbereich 1 bis 5 m
- Erfassungsrate 0,6 bis 2 Mio. Punkte/Sek

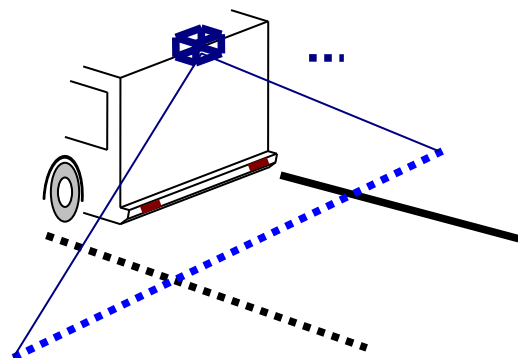


Abb. 7.39 Oberflächenscanner (links) und Prinzipskizze der Aufnahme der Strassenoberfläche (rechts) Quelle: [LP]

Umfeldscanner:

- Erfassungsbereich >30 m
- Mittlere bis hohe Genauigkeit: 0,2 mm bis 5 mm
- Öffnungswinkel >350°
- Erfassungsrate >1 Mio. Punkte/Sek.

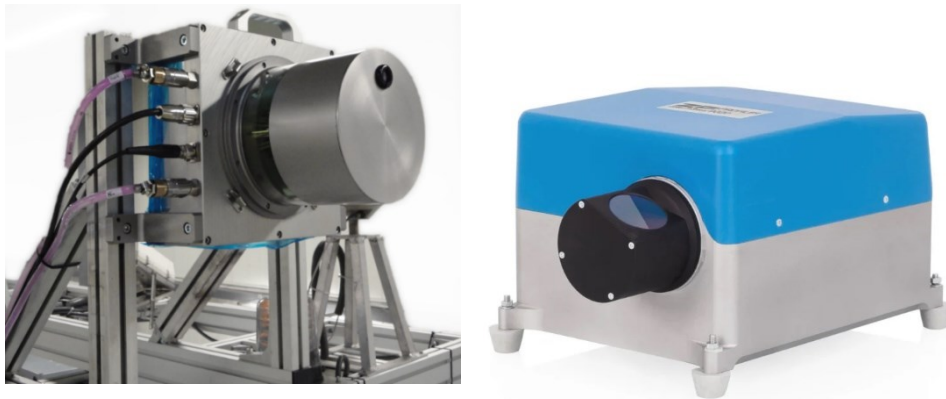


Abb. 7.40 links: Umfeldscanner mit einer 350° Abdeckung (10° Interne scannerspezifische Referenzmessung zum Ausgleich von Temperatureinflüssen) Quelle: [41], rechts: Umfeldscanner mit einem Sichtfeld von 360°, Quelle: [Zoller+Fröhlich]

Erfassung von 3D-Punktwolken

Durch Bewegung des Trägersystems, auf dem der Laserscanner montiert ist, können Punktwolken (Oberflächenmodelle) der Umgebung erfasst werden. Dazu ist die Kombination des Sensors mit einem hochgenauen Positionierungssystem erforderlich, um die Verortung der erfassten Datenpunkte in einem lokalen oder globalen Koordinatensystem zu ermöglichen.

7.15.2 Einsatzzweck und Fragestellung im Bereich Trasse

Der Laserscanner eignet sich für die Messung von Längsebenen auf Fahrbahnbefestigungen. Die Messungen können direkt auf Fahrbahnbefestigungen in Asphalt- oder Betonbauweise durchgeführt werden. Zur Erfassung des Trassees werden spezielle Mobile Mapping Systeme eingesetzt, die meist kombiniert sind mit bildgebenden Sensoren. Auch terrestrische, stationäre Laserscanner können für kleine lokale Auswertebereiche angewendet werden, finden aber in der Bestimmung der Längsebene aufgrund der dann nicht erfassbaren Wellenlänge keinen Einsatz.

Die marktübliche Realisierung für die Erfassung eines Trassees ist die Verwendung einer inertialen mobilen Messplattform, welche entweder fahrzeugbasiert oder drohnenbasiert realisiert wird. Durch die plattformspezifischen Gewichtseinschränkungen und der Entfernung zum Messobjekt ergeben sich Genauigkeitsunterschiede in den resultierenden Ergebnisdaten. Aus diesem Grund kann bislang mit einer drohnenbasierten Messplattform keine Längsebene mit hinreichend grosser Datendichte und Genauigkeit aus den Ergebnisdaten extrahiert werden.

Laserscanner auf einer fahrzeugbasierten inertialen Plattform können am Heck oder auch an der Front angeordnet sein. Die durch die Rotationsscanner erzeugten Punktwolken werden zur messtechnischen Erfassung von Ebenheiten oder für die Umfelderkennung verwendet. Die Messung erfolgt ohne Einschränkungen im laufenden Verkehr. Es können mehrere Höhenlängsprofile extrahiert werden, sodass gleichzeitig z.B. die linke und die rechte Rollspur analysiert werden können.

UMSETZUNG DER TECHNOLOGIE

Die Erfassung der Längsebenheit basiert auf Grundlage einer erfassten 3D-Oberfläche. Die Daten werden aus einer dreidimensionalen Punktwolke generiert, die vorliegend aus den Daten des Laserscanners, in Kombination mit einem hochgenauen Positionierungssystem, gewonnen werden.

Der Ansatz zur Erfassung der Längs- und Querebenheit mit nur einem Messsystem beruht auf einer integralen Bewertung der Ebenheit aus einer gemeinsamen Datenbasis [42]. Das bedeutet, dass die Daten zur Ermittlung der Längs- und Querebenheit aus der gleichen dreidimensionalen Datenbasis abgeleitet werden. Als Grundlage dient hier ein sogenanntes „Curved Regular Grid“.

Aus dieser Datengrundlage leiten sich ein Höhenlängsprofil ab, welches nach einer Filterung (Butterworth- und Hochpassfilter), in eine Folge von Höhenmesspunkten mit definiertem Messpunktabstand (z.B. 10 cm) überführt werden kann.

Der Laserscanner eignet sich für die Untersuchung der folgenden Fragestellungen:

- Überprüfung der Längseinheit mit folgenden Indizes PGR, W-Werte und sW-Werte, NBO (IRI, AUN, WLP)
- Prüfung im Rahmen der Bauüberwachung
- Beurteilung Längsebenheitswirkindex LWI [9]

7.15.3 Datenerfassung, Raumbezug, Messgrößen und Genauigkeit

Die Datenerfassung findet rein digital statt. Der Raumbezug ist durch das verwendete Positionierungssystem realisiert und kann somit an die jeweilige Strassenkilometrierung projiziert werden.

Die Rohdaten des Höhenlängsprofils werden, abhängig von der Berechnungsvorschrift des jeweiligen Indizes, mit unterschiedlicher Rasterweite erzeugt und anschliessend in der Regel in Mittelwerte (z.B. 20 m oder 100 m) überführt.

Die zu erreichende Genauigkeit ist vom eingesetzten Laserscanner und des Positionierungssystems abhängig.

Empfehlungen für die zu verwendenden Hardwarespezifikation zur Erfassung der Längsebenheit mit einem Laserscanner:

- Laserscanner:
 - Punktgenauigkeit: 0,2 bis 0,5 mm
 - Erfassungsrate >1 Mio. Punkte/Sek
- Positionierungssystem:
 - Inertialsystem ist zwingend erforderlich (Kreiselsystem)
 - Winkelgenauigkeit: < 0.02°
 - Lagegenauigkeit: 2 bis 10 cm

7.15.4 Entwicklungsstand, Anwendungsgrenzen, Kosten

Der Einsatz der Technologie für die Messung der Längsebenheit ist als relativ neu einzuschätzen, so dass derzeit diese Technik nur vereinzelt Anwendung findet. Die Erfassung erfolgt im fliessenden Verkehr und benötigt keine gesonderten Sicherungsmassnahmen. Alle oben abgebildeten Laserscanner arbeiten mit einem Laserstrahl der Laserklasse 1 oder 2 und sind Augensicher.

Einschränkungen in der Anwendung der Umfeldscanner gegenüber den Oberflächenscannern ergeben sich aus einer geringeren Punktdichte bei vergleichbarer Messgeschwindigkeit. Dies resultiert aus dem reduzierten Öffnungswinkel, welcher sich in den Profilabständen der einzelnen Laserabtastungen widerspiegelt. Die Tagesleistung kann mit 100 bis 200 km pro Tag angegeben werden. Die Kosten für eine Messung belaufen sich auf ca. 50 bis 200 CHF je Messkilometer.

7.15.5 Ergänzende Ausschreibungsanforderungen

Als Basis für die zu definierenden Anforderungen an die Ausschreibung dient ein objektspezifisches Messkonzept (siehe Kapitel 2.2), welches die spezifischen Gegebenheiten des Objekts entweder für das Trasse oder Naturgefahren berücksichtigt.

Mit Berücksichtigung dieser aufgeführten Themen können, zusammen mit den vorgängig unter Datenerfassung, Raumbezug, Messgrößen und –genauigkeit angeführten Rahmenbedingungen, die Ausschreibungsanforderungen spezifisch vervollständigt werden.

Insbesondere sind bei dieser Technologie die zu extrahierenden Längsebenenparameter zu spezifizieren, welche die Anforderungen an die zu verwendende Hardware definiert.

7.15.6 Literaturverzeichnis

Sonstige Literatur / Forschungsberichte

- [38] R. Joeckel, M. Stober und W. Huep, Elektronische Entfernung- und Richtungsmessung, Bd. 5, VDE Verlag, 2008.
- [39] D. Schneider, „Geometrische und stochastische Modelle für die integrierte Auswertung terrestrischer Laserscannerdaten und photogrammetrischer Bilddaten,“ 2009.
- [40] F. B. J.-Angelo Beraldin und U. Lohr, Airborne and terrestrial laser scanning, G. Vosselman und H. Maas, Hrsg., Dunbeath: Whittles Publishing, 2010.
- [41] Clearance Profile Scanner, 2019.
- [42] FE 04.0326/2018/DGB - Fortschreibung von Qualitätsstandards zur Abnahme von Ebenheitsmesssystemen für ZEB- und Abnahmemessungen vor dem Hintergrund neuer Erfassungstechnologien Referenznummer der Bekanntmachung: Z5ka-FE 04.0326/2018/DGB, 2022.

7.16 Triangulationssensoren

Triangulationssensoren sind spezielle Lasersensoren und bieten eine hohe Messgenauigkeit und höhere Messraten. Triangulation bedeutet hierbei die Abstandsmessung durch eine Winkelberechnung. In dieser Messtechnik projiziert ein Sensor einen Laserpunkt auf das Messobjekt. Das dort reflektierte Licht trifft abhängig von der Entfernung unter einem bestimmten Winkel auf ein Empfangselement. Die Position des reflektierten Lichts auf dem Empfangssensor ist korreliert mit dem Abstand zum Messobjekt.

Für die Messung von Höhenlängsprofilen werden spezielle Triangulationssensoren mit grossen Messabstand und sehr hoher Präzision verwendet.

7.16.1 Beschrieb der Technologie

Der HRM-Balken ist in Deutschland derzeit das einzige Messsystem welches eine Zulassung zur berührungslosen Ebenheitsmessung der Fahrbahnoberfläche in Längsrichtung [43] hat. Seinen Ursprung hat der Balken in Grossbritannien. Eine detaillierte Beschreibung des HRM-Balkens und der Ableitung der ZEB-Parameter findet sich in der Literatur [44][45].

Das ursprüngliche Design des HRM beinhaltet vier Lasersensoren, die entlang eines 4 Meter langen Balkens auf einem Anhänger platziert sind, der von einem Fahrzeug gezogen wird. Während der Balken vorwärtsbewegt wird, misst der führende Lasersensor (je nach Verfahren der vorderste oder zweite) die Strassenhöhe und wird von den zwei hinteren Sensoren referenziert. Das System benötigt zur Referenzierung nur einen Odometer, welches die Station der einzelnen Messwerte repräsentiert.

Gemessen wird jeweils eine Höhe jedes einzelnen Lasers zeitlich synchron über der Strassenoberfläche. Die Höhe an einer Stelle ergibt sich unter der Annahme von kleinen Balken-Nickwinkeln aus geometrischen Beziehungen (vgl. Abb. 7.41). Dabei unterscheidet

man zwischen dem symmetrischen und asymmetrischen Profil, mit Hilfe derer die lang- bzw. kurzwelligen Anteile der Strassenoberfläche berechnet werden können (vgl. Abb. 7.42).

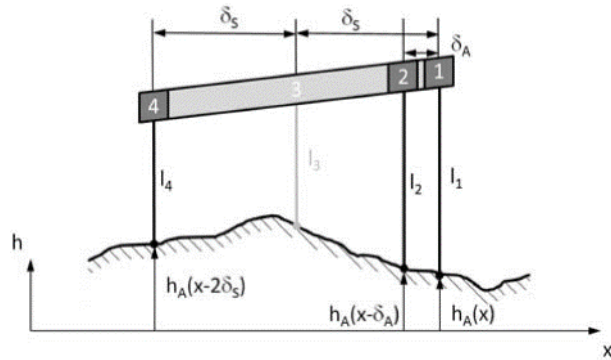


Abb. 7.41 Mehrfachabtastung kurzer Wellenlängen (asymmetrisches Profil) Quelle: [44]

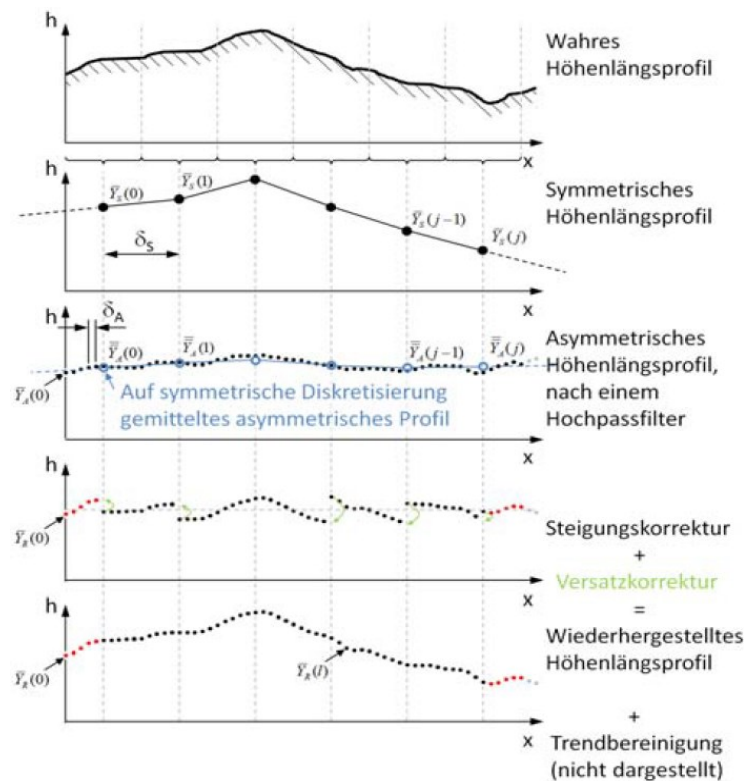


Abb. 7.42 Triangulationssensoren - HRM-System - Wiederherstellungsprozess des Höhenlängsprofils aus symmetrischem und asymmetrischem Höhenlängsprofil, Quelle: [44]

Durch einen in [45] beschriebenen Wiederherstellungsprozess werden die beiden Anteile überlagert. Dabei werden zunächst die langwelligen Anteile der Strassenoberfläche aus dem asymmetrischen Profil herausgefiltert.

Diese Filterung muss auf die vorliegende Messgeometrie sowie die Wegdiskretisierung angepasst werden [44]. Sie führt durch eine übliche Filterwellenlänge von 120 bis 150 m zu einer Wellenlängeneinschränkung im langwelligen Bereich auf etwa die Eckwellenlänge, bzw. leicht kürzer [44]. Üblicherweise führt die Berechnung des resultierenden Höhenlängsprofils zu einer Abbildung von Wellenlängen von 0,3 bis 160 m. Diese Rohdaten werden dann auf einem 10 cm Punktabstand im Profil gemittelt. Dieses bildet dann die Grundlage für die weitere Berechnung der einzelnen Indizes.

7.16.2 Einsatzzweck und Fragestellung im Bereich Trasse

Die Messungen können direkt auf Fahrbahnbefestigungen in Asphalt- oder Betonbauweise durchgeführt werden. Zur Erfassung des Trassees werden spezielle Mobile Mapping Systeme eingesetzt, die meist kombiniert sind mit bildgebenden Sensoren.

Die marktübliche Realisierung für die Erfassung eines Trassees ist die Verwendung mobiler Messplattform, welche fahrzeugbasiert realisiert ist. Das HRM System wird i.d.R. über der rechten Rollspur montiert. Das erfasste Höhenlängsprofil folgt der Fahrspur des Fahrzeuges. Um Variationen bei Wiederholungsmessungen zu vermeiden, muss besonders auf die Fahrspurlage während der Erfassung geachtet werden. Die Messung erfolgt ohne Einschränkungen im laufenden Verkehr. Es wird ein Höhenlängsprofil extrahiert, i.d.R. die rechte Rollspur.

7.16.3 Datenerfassung, Raumbezug, Messgrößen und Genauigkeit

Die Datenerfassung findet rein digital statt. Alle 4 Lasersensoren des HRM Systems werden kontinuierlich aber synchron Zeit- oder Weggetriggert. Die Länge des Balkens hat einen direkten Einfluss auf die Messung. So wird tendenziell mit längerem Balken die Messung genauer, da für kurze Balkenlänge ($< 2\text{ m}$) das Messrauschen durch das symmetrische Profil nicht optimal kompensiert werden kann. Somit kommt es im langwelligen Bereich zu Fehlern [44]. Bei einem längeren Balken ($> 4\text{ m}$) tritt der reziproke Fall auf [44]. Deshalb haben sich Balken zwischen 2 m und 4 m Länge bewährt.

Distanzmessung

- Genauigkeit: 0,2 mm
- Arbeitsbereich: min. 100 mm $\pm$ 10 mm [43]
- Messfrequenz: ~20 kHz

- Sonnen unempfindlich

Wegmessung Odometer

- Toleranz der Messwegerfassung von 0,5 %
- Min. 1000 pulse pro Rad Umdrehung
- Phase-*Quadratur* Encoder

In Zusammenhang mit der Höhenmessung steht auch der Messbereich, der bei den herangezogenen Fahrzeugen ~200 mm beträgt. Studien zeigten dabei, dass es unter Hinzunahme der durch die Fahrbahnanregung verursachten Aufbaubewegung des Messfahrzeugs ein Messbereich von etwa 300 mm für einen schlechten Strassenzustand und hohe Erfassungsgeschwindigkeit notwendig sein kann [44][46]. Ein Messbereich von 400 mm kann sinnvoll sein, um zuverlässig Messen zu können. Zudem wird gefordert, dass die Sonden so montiert sind, dass die Mitte des Messbereiches $\pm 10\text{ mm}$ auf dem Niveau der Fahrbahnoberfläche liegt, also das Zentrum des Messbereichs die Fahrbahn bildet.

In direktem Zusammenhang zur Messfrequenz der Laser steht die Mittelung der Höhendaten. So findet normalerweise eine Mittelung auf ein 10 cm-Raster statt, um Zufallsfehler zu kompensieren. Die real beste auftretende Standardabweichung für gute Autobahnen liegt bei etwa 0,07 mm [44]. Geht man von einer Standardabweichung von 0,2 mm der Einzelmessung aus, so sind mindestens drei Messwerte pro 10 cm Profil zur Mittelung notwendig.

Weiterhin hat die Weggebung einen Einfluss auf das Höhenprofil. Diese wirkt sich direkt auf die Wegzuordnung der Lasersignale zur Höhenlängsprofilerzeugung, des Höhenlängsprofils zur Kennwertberechnung/Zustandsbewertung und der Auswerteabschnitte ins Netzknotensystem aus. In [44] wird die Standardabweichung bei 1 % Wegmessfehler für übliche Strassen auf etwa 0,05 mm quantifiziert und ist somit im Vergleich zu den anderen Fehlern vernachlässigbar.

Hinsichtlich der Datenmenge entstehen die Distanzdaten aus den vier Lasern abhängig von ihrer Messfrequenz. Bei Wegtriggerung oder Zeittriggerung liegt die Messrate bei etwa 20 bis 50 kHz. Entsprechend werden maximal etwa 200.000 Messwerte pro Sekunde erzeugt. Bei Wegtriggerung ist die Datenmenge bei den gängigen Fahrgeschwindigkeiten niedriger als bei Zeittriggerung. Zusätzlich entstehen weitere Daten durch die Weggebung. Geschätzt ergibt dies ~137 kB Maschinenrohdaten pro Messkilometer.

7.16.4 Entwicklungsstand, Anwendungsgrenzen, Kosten

Der Einsatz der Technologie für die Messung der Längsebenheit ist als ausgereift einzuschätzen. Es ist für die Erfassung der Längsebenheit das präziseste Messfahren. Die Erfassung erfolgt im fliessenden Verkehr und benötigt keine gesonderten Sicherungsmassnahmen. Die verfügbaren Systeme sind bauartbedingt verschieden und arbeiten mit einem Laserstrahl der Laserklasse 2 bis 3.

Die Tagesleistung kann mit 100 bis 200 km pro Tag angegeben werden. Der Kostenpunkt einer Messung beträgt ca. 50 bis 200 CHF pro Messkilometer.

7.16.5 Ergänzende Ausschreibungsanforderungen

Als Basis für die zu definierenden Anforderungen an die Ausschreibung dient ein objektspezifisches Messkonzept (siehe Kapitel 2.2), welches die spezifischen Gegebenheiten des Objekts entweder für das Trasse oder Naturgefahren berücksichtigt.

Mit Berücksichtigung dieser aufgeführten Themen können, zusammen mit den vorgängig unter Datenerfassung, Raumbezug, Messgrössen und –genauigkeit angeführten Rahmenbedingungen, die Ausschreibungsanforderungen spezifisch vervollständigt werden.

Insbesondere sind bei dieser Technologie zu spezifizieren in welcher Fahrspurlage die Erfassung erfolgen soll.

7.16.6 Literaturverzeichnis

Sonstige Literatur / Forschungsberichte

[43] Technische Prüfvorschriften für Ebenheitsmessungen auf Fahrbahnoberflächen in Längs- und Querrichtung - Teil: Berührungslose Messungen, Ausg. 2009 Hrsg., Köln: FGSV-Verl., 2009.

[44] J. Neubeck und A. Wiesebeck, Längsebenheitsmesssysteme : Überprüfung der Signalverarbeitungsverfahren nach dem Prinzip der Mehrfachabtastung (HRM), 2015.

[45] P. B. STILL, P. G. JORDAN und C. P. WROTH, Evaluation of the TRRL high-speed profilometer, 1980.

[46] M. MITSCHKE, Dynamik der Kraftfahrzeuge, Band B: Schwingungen, Springer Verlag, 1984.

B 2 Querebenheit

Die Querebenheit wird unter einer 4 m-Latte in der Schweiz gemessen (einer 2 m Latte in Deutschland). Unebenheiten und Neigung werden aufgezeichnet. Die maximal zulässigen t-Werte (theoretische Wassertiefe) und T-Werte (Muldentiefe) variieren in Abhängigkeit des Strassentyps. Alle folgenden Messverfahren beziehen sich auf die Ermittlung der theoretischen Wassertiefe und der Muldentiefe [SN 640 516-6/7/8 und VSS-40 518].

Für die Querebenheit wiederum sind laut SN 640 516-8 die Zustandsgrössen Spurrinnentiefe (rechts und links, jeweils Mittelwert und Standardabweichung und das Maximum der Mittelwerte rechts und links), fiktive Wassertiefe (analog zur Spurrinnentiefe) und die Querneigung der Fahrbahn zu berechnen.

[51] zeigt verschiedene Laserscannersysteme und Laserlichtschnittverfahren zur Querebenheitsmessung die anhand von realen Daten erfasst wurden. Insgesamt geht aus der Studie hervor, dass die verwendeten unterschiedlichen Systeme gute Werte liefern und der grösste Einflussfaktor der Mensch durch die Positionierung des Systems in der Spur ist.

Tab. 7.11 Querebenheit - Übersicht.

Technologie Nr und Name	7.17	7.18	7.19	7.20
	Richtlatte	Lasersondoren	Laserscanner	Lichtschnittverfahren
7.17.1 Kurzbeschreibung	Messlatte für die manuelle Messung einer Ebenheits toleranz für die zulässige Abweichung einer Fläche	Transversal angeordnete einzelne Lasersondoren zur mobilen schnelfahrenden Erfassung der Querebenheit	Mobiles schnelfahrendes Messsystem zur Erfassung der Querebenheit	Mobiles schnelfahrendes Messsystem zur Erfassung der Querebenheit
7.17.2 Einsatzzweck	7.17.2 punktueller manueller Messung mit Hilfe einer 4m Latte und eines Messkeils 7.18.2 punktueller 4m Profilerfassung Profilograph (siehe Querebenheit)	7.18.2 streckenbezogene netzweite Erfassung eines relativen Querprofils	7.19.2 streckenbezogene netzweite Erfassung eines absoluten Querprofils	7.20.2 streckenbezogene netzweite Erfassung eines relativen Querprofils
7.17.2 Typisierung	"ID" a. Messprinzip 1 direkt b. Datenerfassung 1 mechanisch c. Datenspeicher 3 analog (Ables 3 analog (Ablesung)) d. Lokalisation 1 punktuell e. Raumbezug 2 separat f. Zustand 3 nicht zerstörend 7.17.3 Grossen Wassertiefe	7.18.2 QLS1 1 direkt 7 laseroptisch 1 digital 2 streckenbezogen 1 integriert 3 nicht zerstörend 7.18.3 Spurmentiefe, fiktive Wassertiefe	7.19.2 QLC1 1 direkt 7 laseroptisch 1 digital 2 streckenbezogen 1 integriert 3 nicht zerstörend 7.19.3 Spurmentiefe, fiktive Wassertiefe	7.20.2 QLI1 1 direkt 7 laseroptisch 1 digital 2 streckenbezogen 1 integriert 3 nicht zerstörend 7.20.3 Spurmentiefe, fiktive Wassertiefe
Messgrößen und -genauigkeit	Untersuchungs- / Tiefenbereich Auflösung Genauigkeit Bemerkungen	Oberfläche 0,1 - 0,01 mm 0,2 mm Erfassungsbreite >2,5m erfordert Sondergenehmigungen	Oberfläche - 0,2 mm Extraktion aus Punktwolke, Laserklasse 1	Oberfläche 1 mm 0,2 - 0,5 mm Laserklasse 3-4
Nutzung in Fachgebieten	Trasse 3 Geotechnik 0 Naturverfahren 0 Umwelt 0	3 0 0 0	4 0 0 0	4 0 0 0
7.17.4 Kosten	Eintrittspunkt Entwicklungsstand initial / einmalig wiederkehrend	W, N W, N 7.18.4 7.18.4	W, N W, N 7.19.4 7.19.4	W, N W, N 7.20.4 7.20.4

7.17 Richtlatte (4 m)

7.17.1 Beschrieb der Technologie

Die Richtlatte ist eine 4 Meter lange - zum Teil zerlegbare - Metallkonstruktion mit einer maximalen Biegelinie kleiner als 0,5 mm. Die Latte dient hierbei zur lokalen Detektion von Unebenheiten. Zur Messung der Abweichung, welches im Weiteren als Stichmass definiert wird, kommt ein Messkeil zum Einsatz. Dieser Messkeil mit einem definierten Anstellwinkel von 10 bis 15° repräsentiert durch eine metrische Einteilung auf der Oberseite den Abstand zwischen Oberfläche und Richtlatte.

Die Querebenheit wird i.d.R. über erweiterte Messverfahren erfasst. Die Richtlatte dient hier nur der Qualitätssicherung und ist analog der Erfassung für die Längsebenheit zu realisieren. In der Praxis finden sich verschieden Umsetzungen eines Profilographen (4 m Latte mit automatischer Messeinheit). Im Folgenden ist ein analoger Pofilograf

beschrieben, der aber den gleichen Anforderungen entsprechen muss, wie bei der Messung mit der 4 m Richtlatte.

AUFNAHMEPRINZIP

Profilograf ist eine «Erweiterung» der Richtlatte und dient zur elektronischen/analogen Erfassung der Querebenheit von Fahrbahnen und Verkehrsflächen. Profilograf nach Koehler-Fuess und das Standard-Querprofil-Messgerät (SQM) sind Varianten der Richtlatte, bei denen ein Tastrad das gesamte Profil aufnimmt und das gesamte Profil bzw. die benötigten Kennwerte auf dem Ausschrieb graphisch oder numerisch ermittelt. Das Messsystem dient hauptsächlich der Aufnahme der Querebenheit.

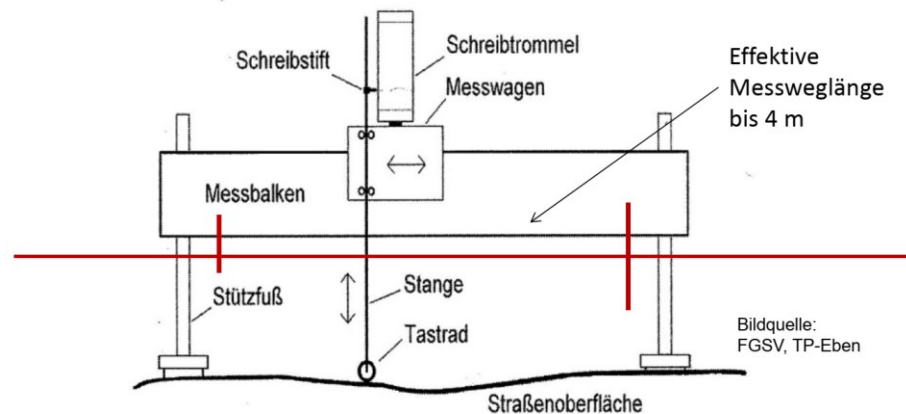


Abb. 7.43 Systemaufbau des Profilografen nach Koehler-Fueß, Quelle: [47]

Es ist sicherzustellen, dass beide Stützfüße einen sicheren Stand aufweisen.

7.17.2 Einsatzzweck und Fragestellung im Bereich Trasse

Die Ermittlung der maximal zulässigen t-Werte (theoretische Wassertiefe) und T-Werte (Muldentiefe) erfolgt auf mechanische oder digitale Weise. Es wird realisiert durch eine Tastrad, welches das Querprofil kontinuierlich erfasst.

Dieses Verfahren dient zur Prüfung direkt am Messobjekt. Da der Zeitaufwand zur Aufnahme sehr hoch ist, haben sich andere schnellere Prüfverfahren etabliert.

7.17.3 Datenerfassung, Raumbezug, Messgrößen und Genauigkeit

Zur Erfassung wird die 4 m Latte / Profilograf entlang des zu Messenden Querprofils auf die Oberfläche gestellt. Die Station kann über ein Messrad oder ein Hand-GPS-Gerät zum Streckenabschnitt verortet werden.

Anforderungen an die Richtlatte:

- Format: 4000 x 18 x 90 mm,
- Durchbiegung: max. 0,5 mm vertikal,
- Querbiegung: max. 1,5 mm,
- Besonderheiten: Mittenkennzeichnung
- Wasserwage mit einer Genauigkeit besser $\pm 0,01^\circ$

Anforderungen an den Messkeil / Sensorkopf:

- Zu erreichende Messgenauigkeit (Massstab): 0,1 - 0,5 mm
- Messbereich: minimal 2 – 25 mm
- Material: abriebfestes Material (lt. TP Eben - Metall)

- Aufstandsfläche: (30 ± 5) mm breit, (295 ± 5) mm breit

Gemäss SN-640516-6_EN-13036-6-D [48] ist die Ebenheitstoleranz der Bereich für die zulässige Abweichung einer Fläche von der Ebene. Zur Beurteilung von Ebenheitstoleranzen wird nach dieser Norm das Stichmass verwendet. Dieses ist der Abstand eines Punktes von einer Bezugslinie, der im Verhältnis zum Messpunktabstand bewertet wird. Das Grundprinzip und das Messverfahren sind nach SN-640516-7A_EN-13036-7-D [49] und TP Eben Teil: berührende Messungen [47] geregelt.

Aus diesem Querprofil lassen sich dann die messspezifischen Werte der Querebenheit ableiten.

7.17.4 Entwicklungsstand, Anwendungsgrenzen, Kosten

Der Profilograf ist ein bewährtes, einfaches, kostengünstiges und vielseitig einsetzbares Messverfahren um vor Ort Stichmasse entlang eines Querprofils zu erfassen. Es ist für kleine Messgebiete <500 m geeignet. Der Zeitaufwand der Erfassung kann mit 5 min pro 4 m abgeschätzt werden.

Die Kosten für den Einsatz der Technologie setzen sich zusammen aus:

- Tagessatz für Techniker ca. 1500 bis 2000 CHF

7.17.5 Ergänzende Ausschreibungsanforderungen

Als Basis für die zu definierenden Anforderungen an die Ausschreibung dient ein objektspezifisches Messkonzept (siehe Kapitel 2.2), welches die spezifischen Gegebenheiten des Objekts entweder für das Trasse oder Naturgefahren berücksichtigt.

Mit Berücksichtigung dieser aufgeführten Themen können, zusammen mit den vorgängig unter Datenerfassung, Raumbezug, Messgrössen und –genauigkeit angeführten Rahmenbedingungen, die Ausschreibungsanforderungen spezifisch vervollständigt werden.

Insbesondere sind bei dieser Technologie die ortsspezifischen Gegebenheiten zu berücksichtigen, welche ggf. Sperrungen oder Sicherungsmassnahmen erforderlich machen.

7.17.6 Literaturverzeichnis

Sonstige Literatur / Forschungsberichte

- [47] L. Löcherer, Hrsg., TP Eben - Technische Prüfvorschriften für Ebenheitsmessungen auf Fahrbahnoberflächen in Längs- und Querrichtung - Teil: Berührende Messungen, Ausgabe 2017 Hrsg., Köln: FGSV Verlag GmbH, 2018.
- [48] SN-640516-6_EN-13036-6-D, Oberflächeneigenschaften von Straßen und Flugplätzen - Prüfverfahren - Teil 6: Bestimmung der Quer- und Längsprofile in den Wellenlängen der Ebenheit und der Megatextur.
- [49] SN-640516-7A_EN-13036-7-D, Oberflächeneigenschaften von Straßen und Flugplätzen - Prüfverfahren - Teil 7: Messung von Einzelunebenheiten von Verkehrsflächen: Messung mit der Richtlatte.

7.18 Lasersensoren

Eine Standardmethode zur Erfassung der Querebenheit ist ein Messbalken mit variierbarer Anzahl an Laserdistanzsensoren, die nach unten auf die Strasse gerichtet werden und transversal zur Fahrtrichtung ausgerichtet ist. Für die Erfassung können verschiedenen Lasersensoren zum Einsatz kommen. Die gebräuchlichsten Sensoren sind hier Triangulationslaser. Der Querbalken wird i.d.R. auf ein Mobile Mapping Fahrzeug montiert und je nach Anforderungen werden in einem definierten konstanten Abstand Lasersensoren angebracht. Die Lokalisierung der so erfassten Profile erfolgt mit Hilfe eines Odometers.

7.18.1 Beschrieb der Technologie

Zur Erfassung der Querebenheit werden bei diesem Messprinzip einzelne Lasersensoren rechtwinklig zur Strassenoberfläche an einer festen Basis verbaut (Balken). Die Breite und auch die Anzahl der Laserdistanzsensoren hängt vom jeweiligen Einsatzzweck ab. In der Regel ist der Abstand zwischen den Sensoren auf 10 cm festgelegt. Die Anzahl richtet sich nach der Strassenkategorie und beträgt auf Ausserortstrassen 29 Sensoren (3,0 m) und min. 33 Sensoren (3,2 m) auf Autobahnen.

Alle Messsensoren werden entweder weg- oder zeitgesteuert ausgelöst und müssen eine hinreichende Messfrequenz aufweisen. Durch die Vorwärtsbewegung der Messplattform werden kontinuierlich Querprofile aufgezeichnet. Diese Roh-Werte sind im Weiteren einer statistischen Ausreisserbehandlung zu unterziehen und einer Mittelung auf 10 cm in Längsrichtung pro Lasersonde [50].

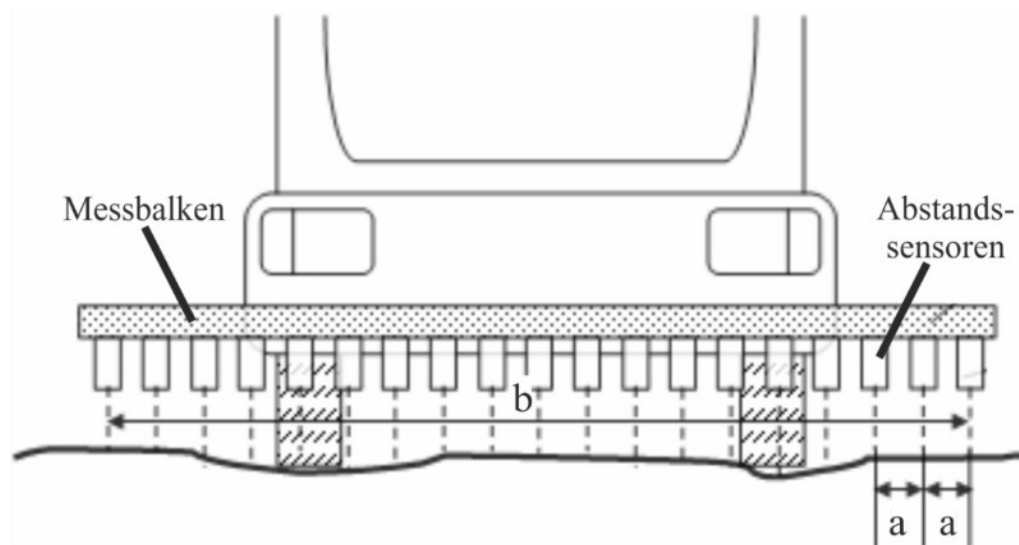


Abb. 7.44 Lasersensoren – Balkenmessung für Querebenheitsmessung
Prinzipdarstellung einer berührungslosen Messung mit einem Messbalken [Schniering]

In Fahrtrichtung erfolgt zur Minimierung von Rauheitseinflüssen eine Mittelung der Höhendaten auf einer Länge von 0,1 m. Die Standardabweichung der Einzelmessung ist mit 0,2 mm vorgegeben. Weiterhin ist zur Erfüllung der Genauigkeitsanforderungen die Mittelung von mindestens 10 Abstandswerten, was einer Messfrequenz von ~20 kHz Daten entspricht, notwendig. Die Toleranz der Messweg erfassung darf 0,5 % nicht überschreiten.

Durch den geringen Abstand des Messbalkens von der Fahrbahnoberfläche und den Mittelungsbereichen von 0,1 m hat eine Abweichung von der lotrechten Ausrichtung der Lasersonden weder in Längs- noch in Querrichtung grösseren Einfluss auf die Ableitung der Kenngrössen. Erforderlich ist eine korrekte Einhaltung des Abstands «a» zwischen den Sensoren (vgl. Abb. 7.44). Hier gilt $a = 0,1 (\pm 0,005)$ m. Weiterhin ist eine Abstandsprotokollierung des Systems zum rechten Fahrbahnrand mit einer Auflösung von 1 cm erforderlich.

Als Ergebnis wird alle 10 cm entlang der Fahrspur der Messplattform ein Roh-Querprofil ausgegeben. Dieses Querprofil dient dann zu weiten Verarbeitung für die zu verwenden Indizes.

7.18.2 Einsatzzweck und Fragestellung im Bereich Trasse

Die Messungen können direkt auf Fahrbahnbefestigungen in Asphalt- oder Betonbauweise durchgeführt werden. Zur Erfassung eines Trassees werden spezielle Mobile Mapping Systeme eingesetzt, die meist kombiniert sind mit bildgebenden Sensoren.

7.18.3 Datenerfassung, Raumbezug, Messgrößen und Genauigkeit

Die marktübliche Realisierung für die Erfassung eines Trassees ist die Verwendung einer mobilen Messplattform. Das System wird i.d.R. in der Front oder am Heck eines Fahrzeuges montiert. Das erfasste Querprofil folgt der Fahrspur des Fahrzeuges. Um Variationen bei Wiederholungsmessungen zu vermeiden, muss besonders auf die Fahrspurlage während der Erfassung geachtet werden. Die Messung erfolgt ohne Einschränkungen im laufenden Verkehr.

Die Erfassung des Querprofils erfolgt schnellfahrend (>80 km/h) und rein digital. Die Messwerte der einzelnen Laserdistanzsensoren werden weg- oder zeitgesteuert ausgelöst. Die Verortung der Messwerte erfolgt durch ein Odometer oder durch ein GNSS-System. Folgende Anforderungen können festgelegt werden

Distanzmessung

- Genauigkeit: 0,2 mm
- Arbeitsbereich: min. 200 mm $\pm$ 10 mm [50]
- Messfrequenz: mindestens 20 kHz
- Sonnen unempfindlich
- Anzahl der zu verwenden Sensoren min. 3,2 m (für eine Fahrspurerfassung)

Wegmessung Odometer

- Toleranz der Messwegerfassung von 0,5 %
- Min. 1000 Pulse pro Rad Umdrehung
- Phase-*Quadratur* Encoder

Die maximale Erfassungsbreite des Messgeräts wird über die fest verbauten Lasersensoren ermittelt. Es konnte gezeigt werden, dass der Querversatz einen starken Einfluss auf die Reproduzierbarkeit der Kennwerte der Querebenheitsmessung aber auch auf die Bestimmung selbst haben kann [51]. Generell wird dies als Haupteinflussquelle bei Vergleichsmessungen die Erfahrung des Fahrers bzw. der Fahrerin des Messfahrzeuges im Sinne des Haltens der richtigen Spur angeführt. Nachteil beim Messbalken ist die eingeschränkte Erfassungsbreite des Messsystems. Die Fahrbahn kann dennoch auf einer Breite erfasst werden, die in Deutschland den gesetzten Standards von mindestens 3,2 m für BAB und 3 m für Bundesstrassen genügt.

7.18.4 Entwicklungsstand, Anwendungsgrenzen, Kosten

Der Einsatz der Technologie für die Messung der Querebenheit gilt als ausgereift. Die Erfassung erfolgt im fließenden Verkehr und benötigt ggf. bei einer Überbreite von mehr als 2,55 m (Deutschland $>2,5$ m) gesonderten Sicherungsmassnahmen. Die am Markt verfügbaren Systeme sind bauartbedingt verschieden und arbeiten mit einem Laserstrahlen der Laserklasse 2 bis 3.

Die Tagesleistung kann mit 100 bis 200 km pro Tag angegeben werden. Der Kostenpunkt einer Messung beträgt ca. 50 bis 200 CHF pro Messkilometer.

7.18.5 Ergänzende Ausschreibungsanforderungen

Als Basis für die zu definierenden Anforderungen an die Ausschreibung dient ein objektspezifisches Messkonzept (siehe Kapitel 2.2), welches die spezifischen Gegebenheiten des Objekts entweder für das Trasse oder Naturgefahren berücksichtigt.

Mit Berücksichtigung dieser aufgeführten Themen können, zusammen mit den vorgängig unter Datenerfassung, Raumbezug, Messgrößen und –genauigkeit angeführten Rahmenbedingungen, die Ausschreibungsanforderungen spezifisch vervollständigt werden.

Insbesondere sind bei dieser Technologie die gewünschte Messbreite und der Messpunktabstand zu definieren.

7.18.6 Literaturverzeichnis

Sonstige Literatur / Forschungsberichte

[50] Technische Prüfvorschriften für Ebenheitsmessungen auf Fahrbahnoberflächen in Längs- und Querrichtung - Teil: Berührungslose Messungen, Ausg. 2009 Hrsg., Köln: FGSV-Verl., 2009.

[51] T. Lundberg, P. Andrén, T. Wahlman, O. Eriksson, L. Sjögren und P. Ekdahl, „VTI rapport 961A | New technology for road surface measurement,“ 2018.

7.19 Laserscanner

Laserscanner werden im Folgenden als 2D/3D Erfassungsgeräte definiert, welche mit Hilfe eines modulierten oder gepulsten Laserstrahls und einer Ablenkeinheit die Umgebung durch eine nicht zielgerichtete, punktförmige und flächendeckende Abtastung erfassen. Das Ergebnis ist eine dreidimensionale Punktwolke, welche im weiten Prozessverlauf analysiert wird. Laserscanner können hinsichtlich ihrer Erfassungstechnologie und ihres Einsatzzwecks differenziert werden. Zusätzlich können Laserscanner, für die Automatisierung der Erfassung auf unterschiedlichen Trägersystemen eingesetzt werden, wodurch sich Unterschiede bei der Erfassungsgenauigkeit ergeben können. Weitere Erläuterungen sind im Kapitel 7.15 zu finden.

7.19.1 Beschrieb der Technologie

Die Typisierung der Laserscanner erfolgt zum einen durch das Aufnahmeprinzip der Entfernungsmessung und zum anderen über den Sichtbereich und deren Genauigkeit. Laserscanner mit einer Genauigkeit >1 cm werden hier nicht weiter betrachtet, da diese für die Ebenheitsbetrachtungen nicht hinreichend sind.

UNTERTEILUNG IN ANWENDUNGS- UND GENAUIGKEITSKLASSEN

Die Laserscanner können weiterhin in Oberflächenlaserscanner und Umfeldlaserscanner unterschieden werden. Der Oberflächenscanner besitzt ein eingeschränktes Messfeld von 50 bis 70°. Dieses Messfeld grenzt, in Abhängigkeit der Anbauhöhe, die zu erfassende Oberfläche ein. Hinsichtlich der Genauigkeit sind die Oberflächenscanner den Umfeldscannern überlegen, besitzen aber auch einen eingeschränkten Eindeutigkeitsbereich, der nur wenige Meter abdeckt. Zur Erfassung der Querebene ist ein Oberflächenscanner mit einer Messbreite von ~4 m ideal

Oberflächenscanner:

- Eingeschränkter Öffnungswinkel ~70°
- Hohe Genauigkeit 0,2 mm -1 mm
- Eingeschränkter Erfassungsbereich 1 bis 5 m
- Erfassungsrate 0,6 -2 Mio. Punkte/Sek

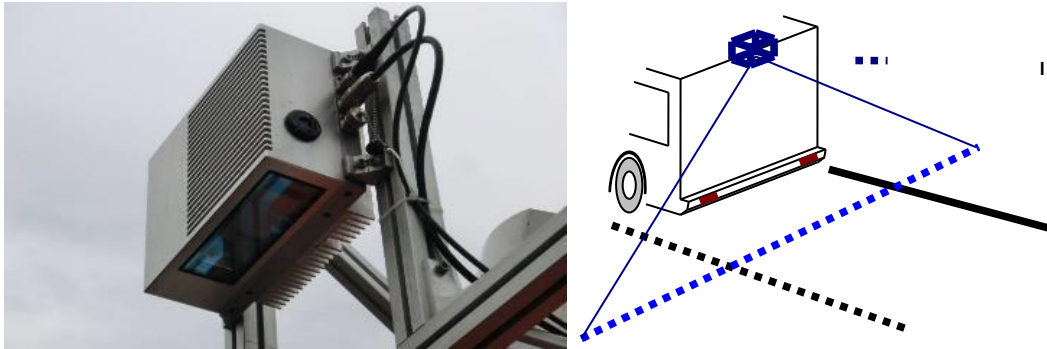


Abb. 7.45 Oberflächenscanner (links) und Prinzipskizze der Aufnahme der Strassenoberfläche (rechts), Quelle: [LP]

Umfeldscanner werden in der Erfassung der Querebene in der aktuellen Marktsituation nicht verwendet (Siehe Abschnitt im Kapitel 7.15).

Erfassung von Querprofilen

Durch Bewegung des Trägersystems, auf dem der Laserscanner montiert ist, können Punktwolken (Oberflächenmodelle) der Umgebung erfasst werden. Dazu ist die Kombination des Sensors mit einem hochgenauen Positionierungssystem erforderlich, um die Verortung der erfassten Datenpunkte in einem lokalen oder globalen Koordinatensystem zu ermöglichen.

Aus dieser Punktwolke werden dann im Nachgang die zur Erfassung notwendigen Lasersensoren, analog eines Messbalkens (siehe Kap. 7.18) extrahiert. Damit ist die Technologie komplementär zum Messbalken jedoch mit einer grösseren Erfassungsbreite.

7.19.2 Einsatzzweck und Fragestellung im Bereich Trasse

Der Laserscanner eignet sich für die Messung von Querebenen auf Fahrbahnbefestigungen. Die Messungen können direkt auf Fahrbahnbefestigungen in Asphalt- oder Betonbauweise durchgeführt werden. Zur Erfassung eines Trassees werden spezielle Mobile Mapping Systeme eingesetzt, die meist kombiniert sind mit bildgebenden Sensoren. Auch terrestrische, stationäre Laserscanner können für kleine lokale Auswertebereiche angewendet werden, finden aber in der Bestimmung der Längsebene keinen Einsatz. Alle weiteren Punkte sind identisch mit dem Kapitel «Laserscanner».

UMSETZUNG DER TECHNOLOGIE

Die Erfassung der Querebene basiert auf einer erfassten 3D-Oberfläche. Die Daten werden auf Grundlage einer dreidimensionalen Punktwolke generiert, die vorliegend aus den Daten des Laserscanners, in Kombination mit einem hochgenauen Positionierungssystem, gewonnen werden.

7.19.3 Datenerfassung, Raumbezug, Messgrößen und Genauigkeit

Die Datenerfassung findet digital statt. Der Raumbezug ist durch das verwendete Positionierungssystem realisiert und kann somit an die jeweilige Strassenkilometrierung projiziert werden.

Die Rohdaten Querprofile werden, abhängig von der Berechnungsvorschrift des jeweiligen Index, mit unterschiedlicher Rasterweite erzeugt und anschliessend in der Regel in Mittelwerte (z.B. 20 m oder 100 m) überführt.

Die zu erreichende Genauigkeit ist vom eingesetzten Laserscanner und dem Positionierungssystem abhängig.

Aus den einzelnen Laserscanneraufnahmen leiten sich die Querprofile ab, welche nach einer Filterung in eine Folge von Quermesspunkten mit definiertem Messpunktstand (z.B. 10 cm) überführt werden kann.

Der Laserscanner eignet sich für die Untersuchung der folgenden Fragestellungen:

- Spurrinnentiefe in der rechten und linken Rollspur
- Fiktive Wassertiefe
- Grundlage für Lattensimulation (2 m oder 4 m)

Empfehlungen für die zu verwendenden Hardwarespezifikation zur Erfassung der Längsebenheit mit einem Laserscanner:

- Laserscanner:
 - Punktgenauigkeit: 0,2 bis 0,5 mm
 - Erfassungsrate >1 Mio. Punkte/Sek
- Positionierungssystem:
 - Inertialsystem ist zwingend erforderlich (Kreiselsystem)
 - Winkelgenauigkeit: < 0.02°
 - Lagegenauigkeit: 2 bis 10 cm

7.19.4 Entwicklungsstand, Anwendungsgrenzen, Kosten

Der Einsatz der Technologie für die Messung der Querebenheit ist als relativ neu einzuschätzen, so dass derzeit nur wenige Technologien zum Einsatz kommen. Die Erfassung erfolgt im fließenden Verkehr und benötigt keine gesonderten Sicherungsmassnahmen. Alle oben abgebildeten Laserscanner arbeiten mit einem Laserstrahl der Laserklasse 1 oder 2 und sind Augensicher.

Einschränkungen in der Anwendung der Umfeldscanner gegenüber den Oberflächenscannern ergeben sich aus einer geringeren Punktdichte bei vergleichbarer Messgeschwindigkeit. Diese resultiert aus dem reduzierten Öffnungswinkel, welcher sich in den Profilabständen der einzelnen Laserabtastungen widerspiegelt.

Die Tagesleistung kann mit 100 bis 200 km pro Tag angegeben werden.

Der Kostenpunkt einer Messung beträgt ca. 50 bis 200 CHF pro Messkilometer.

7.19.5 Ergänzende Ausschreibungsanforderungen

Als Basis für die zu definierenden Anforderungen an die Ausschreibung dient ein objektspezifisches Messkonzept (siehe Kapitel 2.2), welches die spezifischen Gegebenheiten des Objekts entweder für das Trasse oder Naturgefahren berücksichtigt.

Mit Berücksichtigung dieser aufgeführten Themen können, zusammen mit den vorgängig unter Datenerfassung, Raumbezug, Messgrößen und –genauigkeit angeführten Rahmenbedingungen, die Ausschreibungsanforderungen spezifisch vervollständigt werden.

Insbesondere sind bei dieser Technologie die gewünschte Messbreite und der Messpunktabstand zu definieren.

7.19.6 Literaturverzeichnis

Sonstige Literatur / Forschungsberichte

-

7.20 Lichtschnittverfahren

Ein weit verbreitetes Verfahren zur optischen Formerkennung ist das Lichtschnittverfahren. Hierbei wird eine Laserlinie auf die zu erfassende Oberfläche projiziert. Die Lichtebeine schneidet das Messobjekt entlang einer Profillinie. Die reflektierte Profillinie wird auf einen Flächensensor projiziert. Entsprechend der Ebenheit und dem Verlauf der Linie in Abhängigkeit von der Objekthöhe, wird die Abbildung gekrümmt oder versetzt auf dem

Flächensensor dargestellt. Durch eine Kalibrierung kann so auf eine dreidimensionale Oberflächenbeschreibung rückgeschlossen werden. In der Regel wird nur die projizierte Laserlinie ausgewertet, sodass ein Querprofil entsteht, bei der Form und Entfernung über den Schnittwinkel berechenbar sind.

7.20.1 Beschrieb der Technologie

Je nach Hersteller besteht das System aus ein oder zwei Modulen, die eine transversale Messbreite von 3 bis 4,5 m abdecken können. Weiterhin kann ein monochromes Oberflächenbild aus den Daten berechnet werden, welches jedoch in der Regel nicht den Anforderungen an die Auswertung von Oberflächenschäden genügt. Das verwendete Laserlichtschnittverfahren hat je nach Hersteller eine Laserklasse 2 bis 4. Die Sensorköpfe, welche eine Laserlinie emittieren, werden in etwa 1 bis 2,4 m Höhe montiert. Die Laserlinie wird transversal auf die Strassenoberfläche projiziert und von einem Flächensensor detektiert.

Aus der geometrischen Berechnung der rückprojizierten Laserlinie wird ein Querprofil berechnet. Bei Systemen mit mehreren Sensorköpfen muss das Querprofil aus mehreren Messungen zusammengesetzt werden, wodurch geometrische Unstetigkeitsstellen im Profil hervorrufen werden können. Herstellerseitig erfolgt die Auswertung der Spurrinne für die rechte und linke Rollspur mithilfe der beiden Sensorköpfe in der Regel separat. Eine Verknüpfung der beiden Sensoren zu einem Profil ist geometrisch teilweise auch fragwürdig, da beide Laserlinien keinen realen Schnittpunkt besitzen. Die Berechnungsvorschrift, bspw. [52] mit der virtuellen Lattensimulation kann nur umgesetzt werden, wenn beide Profiltile exakt zusammengesetzt sind.

Die Berechnung der einzelnen Punkte im Querprofil ist abhängig von der Sensorauflösung. Es können theoretisch bis zu 4.000 Punkte auf 4 m im Querprofil (je Sensor 2.000 Punkte) ausgegeben werden. Die Synchronisierung erfolgt auf Grundlage des Odometersignals und kann auf die Einzellasersensoren vereinfacht werden.



Abb. 7.46 Schema, zwei Laserlichtschnittmodule am Heck des Fahrzeuges: zwei rote Laserlinien (rot) werden auf die Straße projiziert und von zwei Kameras unter einem definierten Winkel detektiert (blau), Messfahrzeug IRIS 6 der Firma Lehmann + Partner Polska Spółka z o.o. Quelle: [LP]

7.20.2 Einsatzzweck und Fragestellung im Bereich Trasse

Die Messungen können direkt auf Fahrbahnbefestigungen in Asphalt- oder Betonbauweise durchgeführt werden. Zur Erfassung des Trassees werden spezielle Mobile Mapping Systeme eingesetzt, die meist kombiniert sind mit bildgebenden Sensoren.

Die marktübliche Realisierung für die Erfassung eines Trassees ist die Verwendung mobilen Messplattform. Das System wird i.d.R. fahrzeugsbasiert am Heck montiert. Das erfasste Querprofil folgt der Fahrspur des Fahrzeuges. Um Variationen bei Wiederholungsmessungen zu vermeiden, muss besonders auf die Fahrspurlage während der Erfassung geachtet werden. Die Messung erfolgt ohne Einschränkungen im laufenden Verkehr. Zu beachten sind die teils nicht augensicheren Systeme, wenn diese im öffentlichen Raum zum Einsatz kommen.

7.20.3 Datenerfassung, Raumbezug, Messgrößen und Genauigkeit

Das Messsystem «Lichtschnittverfahren» verarbeitet die Messwerte rein digital. Die Erfassung ist abhängig von der projizierten Laserlinie auf der Fahrbahnoberfläche und deren Detektion.

Grundvoraussetzungen für die Querprofileraufnahme:

- Erfassungsbreite: 3 bis 4 m
- Hohe Genauigkeit: 0,2 mm bis 1 mm
- Erfassungsbereich/Messbereich: min 1 m
- Erfassungsrate 0,6 bis 2 Mio. Punkte/Sek
- Roh-Profilpunkte im Querprofil: 1000 bis 2000
- Schnittwinkel Laserebene und Sensor: >30°

Wegmessung Odometer

- Toleranz der Messwegaufnahme von 0,5 %
- Min 1000 pulse pro Rad Umdrehung
- Phase-*Quadratur* Encoder

Für die Querebenheit kann mit einer 0,1 mm Tiefenaufösung bei 0,25 mm Genauigkeit in der Einzelmessung ausgegangen werden. Durch Mittelung auf die 0,1 m-Intervalle ist eine Verbesserung der Standardabweichung von höchstens 0,2 mm zu erreichen (siehe oben), was auch die Ergebnisse in [53] bestätigen. Somit eignen sich die Laserlichtschnittssysteme mit diesen Spezifikationen von diesem Gesichtspunkt her zur Messung.

Ähnlich wie beim Messbalken gelten ebenfalls die Überlegungen zum Messbereich.

7.20.4 Entwicklungsstand, Anwendungsgrenzen, Kosten

Der Einsatz der Technologie für die Messung der Querebenheit ist als Stand der Technik einzustufen. Die Erfassung erfolgt im fließenden Verkehr und benötigt keine gesonderten Sicherungsmassnahmen. Alle oben abgebildeten Laserscanner arbeiten mit einem Laserstrahl der Laserklasse 2 oder 4 und sind bedingt Augensicher, da der Messkopf sich i.d.R. bei ~1,5 m über Grund befindet.

Einschränkungen bestehen bei einigen Systemen hinsichtlich der geringen Wiederholhfrquenz und damit auch in der maximalen Messgeschwindigkeit. Dies resultiert aus dem verwendeten Flächensensor, welcher bei einfachen Systemen nur mit 30 bis 60 Hz arbeitet. Dieses resultiert dann in grösseren Querprofilabständen der einzelnen Laserabtastungen, welches zu beachten ist.

Die Tagesleistung kann mit 100 bis 200 km pro Tag angegeben werden. Der Kostenpunkt einer Messung beträgt ca. 50 bis 200 CHF pro Messkilometer.

7.20.5 Ergänzende Ausschreibungsanforderungen

Als Basis für die zu definierenden Anforderungen an die Ausschreibung dient ein objektspezifisches Messkonzept (siehe Kapitel 2.2), welches die spezifischen Gegebenheiten des Objekts entweder für das Trassee oder Naturgefahren berücksichtigt.

Mit Berücksichtigung dieser aufgeführten Themen können, zusammen mit den vorgängig unter Datenerfassung, Raumbezug, Messgrößen und –genauigkeit angeführten

Rahmenbedingungen, die Ausschreibungsanforderungen spezifisch vervollständigt werden.

Insbesondere sind bei dieser Technologie die gewünschte Messbreite und der Messpunkt Abstand zu definieren.

7.20.6 Literaturverzeichnis

Sonstige Literatur / Forschungsberichte

- [52] Technische Prüfvorschriften für Ebenheitsmessungen auf Fahrbahnoberflächen in Längs- und Querrichtung - Teil: Berührungslose Messungen, Ausg. 2009 Hrsg., Köln: FGSV-Verl., 2009.
- [53] T. Lundberg, P. Andrén, T. Wahlman, O. Eriksson, L. Sjögren und P. Ekdahl, „VTI rapport 961A | New technology for road surface measurement“, 2018.
- [54] Richtlinien für die Anlage von Autobahnen (RAA 08), Ausgabe 2008, Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (FGSV), Köln 2008, 120 S. (ISBN 978-3-939715-51-1 bzw. FGSV-Nr. 202)

B 3 Querneigung

Die Querneigung (auch Quergefälle) wird definiert als Gefälle der Fahrbahnoberfläche (oder darunterliegenden Schichten) rechtwinklig zur Strassenachse. Als Abkürzung wird «q» oder «QN» verwendet und erfolgt in Prozent. 1 % Querneigung entspricht somit einer Höhendifferenz von 1 cm auf 1 m. Speziell die Neigung ist ein spezifischer, lageabhängiger Winkel, welcher zwischen einer exakt horizontalen Geraden oder Ebene und einer realen Oberfläche bestimmt wird.

Zentrale Aufgabe der Querneigung ist es, das Oberflächenwasser möglichst effektiv von der Fahrbahnoberfläche abzuführen, um zum einen das Bauwerk vor eindringender Feuchtigkeit zu schützen und zum anderen Wasseransammlungen und deren Folgen (Aquaplaning, Sprühfahnen- oder Glatteisbildung) an der Oberfläche zu verhindern.

Durch planerische Ansätze und Regewerke ist das Ziel durch spezielle Fahrbahnneigungen in Quer als auch in Längsrichtung den Wasserfilm unter dem Kritischen Mass von 2 mm zu halten (Aquaplaning). Die Grenz- und Richtwerte für die Querneigung sind in den folgenden Richtlinien angegeben, um ein möglichst hohes Mass an Funktionalität und Verkehrssicherheit gewährleisten zu können.

- VSS-40120 [198] Linienführung; Quergefälle in Geraden und Kurven, Quergefälleänderung (Schweiz)
- RAL: Richtlinien für die Anlage von Landstrassen (Deutschland)
- RVS 03.03.23 [214] Linienführung & Trassierung (Österreich)

Die Regelquerneigung von Fahrbahnen beträgt grundsätzlich $q = 2,5 \%$. Mit Zunahme der Geschwindigkeit und in Abhängigkeit von Strassenkategorie und Kurvenradius kann dieser Wert bis zu $q = 8 \%$ angehoben werden. Abweichungen nach oben und nach unten sind möglich, müssen aber im Einzelfall bewertet werden. Durch einen Wechsel der Querneigung entlang einer Achse entstehen in diesen Bereichen meist entwässerungsschwache Zonen besonders dann, wenn keine ausreichende Längsneigung vorhanden ist. Zur Verringerung dieser entwässerungsschwachen Zonen enthält die Richtlinie für die Anlage von Landstrassen RAL Angaben für eine Mindestschrägneigung. Untersuchungen zu den Auswirkungen bei fehlerhaft dimensionierter Querneigung auf die Verkehrssicherheit finden sich in [213]. Für eine Ermittlung des möglichen Einflusses von entwässerungsschwachen Zonen wird in Deutschland das Prüfkriterium der RAS-Ew (FGSV 2005B) mit der Forderung einer Schrägneigung von $p \geq 0,5 \%$ angesetzt. Bereiche mit Nulldurchgängen in der Querneigung werden in Abhängigkeit der Strassenklasse EKL – nach den RAL (FGSV 2012) definiert. Geprüft wird die Neigung in den entwässerungsschwachen Bereichen über die Schrägneigung die wie folgt definiert ist:

$$p = \sqrt{(s^2 + q^2)}$$

p - resultierende Schrägneigung [%]

s - Längsneigung [%]

q - Querneigung [%]

Tab. 7.12 Querneigung - Übersicht

Technologie Nr und Name	7.21	7.22	7.23
Neigungsmesser			
7.21.1	Kurzbeschreibung Direkte oder indirekte punktuelle Neigungsmessung	7.22.1 netzweite Neigungsmessung mit einer schnelllaufenden Plattform	7.23.1 Hochgenaue indirekte und netzweite Neigungsmessungen über ein Mobile Mapping fahrzeug mit Laserscanner (Punktwolke)
7.21.2	Einsatzzweck "ID" a. Messprinzip 1 direkt GN1 b. Datenerfassung 8 dosimetrisch 5 optisch c. Datenspeicher 3 analog (Ables 1 digital 1 punktuell 1 punktuell d. Lokalisation 1 punktuell 4 kein e. Raumbezug 4 kein f. Zustand 3 nicht zerstörend 3 nicht zerstörend 3 nicht zerstörend	7.22.2 streckenbezogene netzweite Erfassung einer Querneigung GNK1 5 optisch 1 digital 1 punktuell 2 separat 3 nicht zerstörend	7.23.2 streckenbezogene netzweite Erfassung einer Querneigung GNL1 1 direkt 7 laseroptisch 1 digital 2 streckenbezogen 1 integriert 3 nicht zerstörend
7.21.3	Typisierung Größen Querneigung in %	7.22.3 Winkel	7.23.3 Querneigung in % (indirekt durch Auswertung Querprofil)
Messgrößen und -genauigkeit	Untersuchungs-/Tiefenbereich Auflösung Genauigkeit Bemerkungen	Oberfläche - 0,001 Grad iDR in Kombination mit Laserdistanzsensoren	Oberfläche - 0,2 mm Extraktion aus Punktwolke, Laserklasse 1
Nutzung in Fachgebieten	Trasse 3 Geotechnik 0 Naturgefahren 0 Umwelt 0	1 0 0 0	4 0 0 0
Eintrittszeitpunkt	V, W, N	V, W, N	W, N
7.21.4	Kosten Initial / einmalig wiederkehrend	7.22.4	7.23.4

7.21 Neigungsmesser

Mit einem Neigungsmesser können auf analoge oder elektronische Weise der angelegte Winkel bzw. die vorliegende Neigung bestimmt werden. Die Geräte sind einfach zu bedienen und transportabel ausgelegt. Folgende Neigungsmesser können unterschieden werden:

- analoge Wasserwaage mit Neigungslibelle
- digitaler 1-dimensionaler Neigungsmesser (digitale Wasserwaage)
- digitale 2-achsige Kompensatoren
- Digitale Theodolite und Tachymeter
- (indirekt) Nivelliere (analog und digital)

Weitere Möglichkeiten der indirekten Messung der Querneigung ist auch mit dem Profilografen möglich (Siehe 7.17)

7.21.1 Beschrieb der Technologie

Die Kontrolle der Querneigung erfolgt aufgrund des Messgerätes und der Effektivität Abschnittsweise alle 10 oder 25 m synchron zur Strassenachse. Die Messwerte werden Fahrspur- und Stationsbezogen erfasst. Ergebnis ist eine gleichabständige Messwerttabelle in der die jeweiligen fahrspurbezogenen Querneigungen eingetragen werden. Hierbei ist zu unterscheiden welche Technologie zum Einsatz kommt und ob die Auflösung des Messgerätes hinreichend dimensioniert ist.



Abb. 7.47 Präzisions Wasserwaage, Quelle: [ELMAG Entwicklungs- und Handels-GmbH]

Vorteile des analogen Auswerteverfahren:

- Das analoge Messprinzip ist optimiert für das Vermessen mit Handmessgeräten
- Schnelle Wertermittlung - effizienter Messprozess
- unempfindlich gegenüber tieffrequenten Störungen

Vorteile des digitalen Auswerteverfahren:

- höhere Messfrequenzen
- Messwert-Integration wird digital erfasst (Reduktion von Ablesefehlern)
- Mehrere Sensoren können synchronisiert werden, womit Reduktion von externen Störungen ermöglicht wird



Abb. 7.48 digitaler Neigungsmesser Clinotronic Plus, Quelle: [WYLER AG]

Mit Umschlagsmessungen kann das absolute Null des Messgerätes ermittelt werden. Absolutes NULL bedeutet, dass das Gerät den Messwert „0“ anzeigt, wenn die Messfläche des Instrumentes absolut horizontal (senkrecht zur Erdanziehungskraft) ausgerichtet ist. Der absolute Nullpunkt wird automatisch aus einer Umschlagsmessung (zwei Messungen in entgegengesetzter Richtung, jedoch am selben Ort) ermittelt. Bei analogen Geräten Generationen muss die Umschlagsmessung manuell korrigiert werden. Bei Wasserwaagen sollte die Libelle entsprechend korrigiert werden.

Weiterhin wird unterschieden zwischen einer relativen Lokalisierung und einer absoluten Lokalisierung. Die Unterscheidung bezieht sich auf das verwendete Messsystem und deren Georeferenzierung. Bei der relativen Lokalisierung wird der erfasste Messwert im Nachhinein dem Bauabschnitt oder einer Stationierung zugeordnet. Dieses erfolgt zumeist direkt bei der Messung. Zuordnungsfehler können im Nachhinein nur schwer detektiert werden. Bei der Absoluten Lokalisierung werden direkt bei der Messung Koordinaten miterfasst, welches die eindeutige Zuordnung der Messwerte erleichtert.



Abb. 7.49 Tachymeter als Beispiel zur indirekten Bestimmung der Neigung über grosse Messentfernungen

7.21.2 Einsatzzweck und Fragestellung im Bereich Trasse

Der Einsatzzweck der Messung der Querneigung ist zum einem die Kontrolle der Planungsparameter bei Baufertigstellung und zum anderen das Monitoring der Strecken für Veränderungen des Baukörpers Aufgrund von Hangrutschungen oder anderen Baugrundbewegungen. Hierbei können je nach Art und Umfang der Messungen die oben genannten Messgeräte eingesetzt werden. Alle oben aufgezählten Messgeräte erfordern eine Sperrung der Fahrbahn, um die Messung durchzuführen.

7.21.3 Datenerfassung, Raumbezug, Messgrößen und Genauigkeit

Die Messung der Querneigung erfolgt i.d.R. alle 25 m als Querprofil mit hinreichend aufgenommenen Mehrfachmessungen, damit grobe Fehler in den Messwerten detektiert werden können. Die Datenerfassung kann analog oder digital erfolgen. Bei der Erfassung der Querneigung ist auf die Apriori Genauigkeit des Messinstrumentes zu achten. Die Verortung der Messdaten sollte, wenn möglich über einen absoluten Raumbezug erfolgen, um Zuordnungsfehler zu vermeiden.

Wasserwage: 0,02 - 0,5 mm/m (Kurze Messbasis)

Tachymeter/Nivellement: ~0,01 mm/m (Lange Messbasis)

Digitaler Neigungsmesser: ~10 µm/m: Messbereich von ±200 mm/m (Kurze Messbasis)

Die Messung erfolgt immer berührend mit der jeweiligen Fahrbahnoberfläche. Bei den Neigungssensoren werden direkt die Neigungen als % oder entsprechendes Winkelmass ausgegeben. Bei den analogen Präzisionswasserwagen ist auf eine entsprechende Scala zu achten, welche linear die Neigungswerte widerspiegeln. Die Messgeräte Tachymeter und Nivellement erfassen Höhenänderungen zwischen 2 Messpunkten. Hier muss die Neigung aus dem Abstand der beiden Punkte und der Höhendifferenz ermittelt werden.

7.21.4 Entwicklungsstand, Anwendungsgrenzen, Kosten

Alle hier vorgestellten Messsysteme eignen sich für eine Neigungsmessung und werden vielfach in der Praxis eingesetzt. Die Anwendungsgrenzen beziehen sich hier hauptsächlich auf die Genauigkeit und die Effektivität des Verfahrens.

Wasserwage: Kontrollmessungen < 1 km – Für grosse Bauabschnitte nicht effektiv (ca. 300 bis 500 CHF/km)

Tachymeter/Nivellement: > 1 km für Kontroll Prüfungen längerer Abschnitte (300 CHF/km)

Digitaler Neigungsmesser: Kontrollmessungen < 1 km – Für grosse Bauabschnitte nicht effektiv (400-600 CHF/km)

7.21.5 Ergänzende Ausschreibungsanforderungen

Als Basis für die zu definierenden Anforderungen an die Ausschreibung dient ein objektspezifisches Messkonzept (siehe Kapitel 2.2), welches die spezifischen Gegebenheiten des Objekts entweder für das Trasse oder Naturgefahren berücksichtigt.

Mit Berücksichtigung dieser aufgeführten Themen können, zusammen mit den vorgängig unter Datenerfassung, Raumbezug, Messgrößen und –genauigkeit angeführten Rahmenbedingungen, die Ausschreibungsanforderungen spezifisch vervollständigt werden.

Insbesondere sind bei dieser Technologie der Messpunktabstand und die gewünschte Genauigkeit der Querneigungsmessung zu definieren.

7.21.6 Literaturverzeichnis

Sonstige Literatur / Forschungsberichte

-

7.22 Inertiales Kreiselssystem

Ein inertiales Kreiselssystem (englisch inertial measurement unit, IMU) basiert auf einer Kombination mehrerer Sensoren (Beschleunigungssensoren und Drehratensensoren). Die ursprüngliche Entwicklung von Kreiselssystemen kommt aus der Navigation von Raketen

und der Luftbildbefliegung. Das System erfasst gleichzeitig alle drei Rotationswinkel (Roll-, Nick- und Gierwinkel) der Messplattform sowie alle auftretenden Beschleunigungswerte, relativ zur Gravitationskraft. Da das Kreiselssystem eine gewisse Drift über die Zeit im Heading Winkel aufweist, wird es in der Praxis durch eine GNSS Positionsbestimmung gestützt.

Der Sensor wird auf mobilen Messplattformen eingesetzt und bestimmt die Lage der Plattform im Raum. Die Lage im Raum orientiert sich am Erdschwerefeld und repräsentiert die Messplattform. Um eine reale Neigung messen zu können, ist weiterhin der Verkipfungswinkel zwischen der Messplattform und der Fahrbahnoberflächen zu ermitteln. Ohne diese Offsetmessung wird nur die Neigung der Messplattform bestimmt und weicht in der Regel durch die Dynamik der Plattform und deren verwendete Federdämpfersysteme von der realen Querneigung ab.

Die Realisierung kann mit zwei einfachen Laserdistanzsensoren erfolgen die transversal zur Fahrtrichtung verbaut sind. Die Abweichung beider Distanzsensoren ist als Winkeloffset zum Messwert der IMU anzubringen.

7.22.1 Beschrieb der Technologie

Die Technologie wird vorrangig in der Luftfahrt und im Mobile Mapping Bereich für Messzwecke eingesetzt. Die verwendeten Systeme richten sich in der Regel nach Einsatzzweck (Genauigkeit) und Gewicht. Die Drehratensensoren können hierbei wie folgt kategorisiert werden:

- Mechanische Gyroskope (werden i.d.R. nicht mehr verwendet)
- Faser-optische-Kreisel (englisch fibre optic gyroscope, FOG)
- MEMS- Halbleitersensoren

Bei geringen Stabilitätsanforderungen finden mikro-elektro-mechanische Systeme (MEMS) Anwendung, welche sich direkt in integrierten Schaltkreisen realisieren. Die Langzeitstabilität ist hingegen um mehrere Faktoren schlechter als zu den Faser-optischen-Kreiselsystemen: Die Drift kann im Vergleich bei einem Faserkreisel mit $0,003^\circ$ pro Stunde angegeben werden. Bei einem sehr preiswerten MEMS-basierenden Drehratensensor auf Halbleiterbasis kann die Driftrate bei ca. 30° pro Stunde liegen.



Abb. 7.50 faseroptischer Kreisel, Quelle: [Applanix]

Die Messungen erfolgen mit einem Mobile Mapping System während der Fahrt und fahrstreifenbezogen. Die Querebenheitsmessungen können im laufenden Verkehr bei 80 - 100 km/h stattfinden. Die Voraussetzungen hierfür sind eine hinreichend hochfrequente Datenerfassung des Kreisel systems (min. 200 Hz) und eine synchrone Messung des Offsetwinkels zwischen der Messplattform und der Strassenoberfläche. Durch die GNSS-Kreiselstabilisierung und den Orientierungswinkeln der IMU können somit Querneigungen

berechnet werden die eine direkte Georeferenzierung besitzen. Mit diesen Systemen lassen sich sehr hochfrequent in einem Abstand von 1 m Querneigungsdaten erfassen.

7.22.2 Einsatzzweck und Fragestellung im Bereich Trasse

Der Einsatzzweck der Messung der Querneigung ist zum einen die Kontrolle der Planungsparameter bei Baufertigstellung und zum anderen das Monitoring der Strecken für Veränderungen des Baukörpers aufgrund von Hangrutschungen oder anderen Baugrundbewegungen. Das hier vorgestellte Messsystem erfordert keine Sperrung der Fahrbahn um die Messung durchzuführen. Es kann aufgrund der Fahrzeugbreite bzw. der Breite der Messplattform nur einen Fahrstreifen erfassen.

7.22.3 Datenerfassung, Raumbezug, Messgrößen und Genauigkeit

Die Messung der Querneigung erfolgt i.d.R. alle 1 m als georeferenzierter Winkelwert. Die Datenerfassung erfolgt rein digital. Bei der Erfassung der Querneigung ist auf die Apriori Genauigkeit des Kreisel Systems und der Lasersensoren für den Offsetwinkel zwischen Messplattform und Fahrbahnoberfläche zu achten (soll $0,04^\circ$).

- Faser-optische-Kreisel – Genauigkeit roll: $0,005^\circ$ - $0,02^\circ$
- MEMS- Halbleitersensoren: Genauigkeit roll: $0,02^\circ$ - 1°
- Lasersensoren – Siehe Lasersensoren Kapitel 7.18

Die Messung erfolgt berührungslos. Die Neigungen wird berechnet aus den Winkelwerten der IMU und dem Offsetwinkel der beiden Lasersensoren und als % Wert oder entsprechendes Winkelmaß ausgegeben. Alle Messwerte sind georeferenziert und können direkt in ein CAD oder GIS System übernommen werden. Die Zuordnung der Station erfolgt im Postprocessing.

7.22.4 Entwicklungsstand, Anwendungsgrenzen, Kosten

Das Messsystem eignet sich besonders für einen schnelle effiziente Erfassung der Querneigung auf einem Fahrstreifen und wird bereits vielfach in der Praxis eingesetzt. Die Anwendungsgrenzen beziehen sich hier hauptsächlich auf die Genauigkeit des Verfahrens.

Die Vermessung ist für grössere Streckenabschnitte > 1 km und für Kontrollprüfungen geeignet. Der Preis kann mit ca. 300 CHF/km angegeben werden. Berücksichtigt werden muss das die Anfahrtkosten eines Mobile Mapping-Fahrzeuges i.d.R. höher ist.

7.22.5 Ergänzende Ausschreibungsanforderungen

Als Basis für die zu definierenden Anforderungen an die Ausschreibung dient ein objektspezifisches Messkonzept (siehe Kapitel 2.2), welches die spezifischen Gegebenheiten des Objekts entweder für das Trasse oder Naturgefahren berücksichtigt.

Mit Berücksichtigung dieser aufgeführten Themen können, zusammen mit den vorgängig unter Datenerfassung, Raumbezug, Messgrößen und –genauigkeit angeführten Rahmenbedingungen, die Ausschreibungsanforderungen spezifisch vervollständigt werden.

Insbesondere sind bei dieser Technologie der Messpunktabstand und die gewünschte Genauigkeit der Querneigungsmessung zu definieren.

7.22.6 Literaturverzeichnis

Sonstige Literatur / Forschungsberichte

-

7.23 Laserscanner

Laserscanner werden im Folgenden als 2D/3D Erfassungsgeräte definiert, welche mit Hilfe eines modulierten oder gepulsten Laserstrahls und einer Ablenkeinheit die Umgebung durch eine nicht zielgerichtete, punktförmige und flächendeckende Abtastung erfassen. Das Ergebnis ist eine dreidimensionale Punktwolke, welche im weiteren Prozessverlauf analysiert wird. Laserscanner können hinsichtlich ihrer Erfassungstechnologie und ihres Einsatzzwecks differenziert werden. Zusätzlich können Laserscanner, für die Automatisierung der Erfassung auf unterschiedlichen Trägersystemen eingesetzt werden, wodurch sich Unterschiede bei der Erfassungsgenauigkeit ergeben können. Weitere Erklärungen sind im Kapitel 7.15 Längsebenheit– Laserscanner zu finden.

7.23.1 Beschrieb der Technologie

Die Typisierung der Laserscanner erfolgt zum einen durch das Aufnahmeprinzip der Entfernungsmessung und zum anderen über den Sichtbereich und deren Genauigkeit. Laserscanner mit einer Genauigkeit >1 cm werden hier nicht weiter betrachtet, da diese für die Querneigungsmessung nicht hinreichend sind.

Unterteilung in Anwendungs- und Genauigkeitsklassen

Für die Erfassung der Querneigung eignen sich die Umfeldlaserscanner aufgrund Ihrer schlechteren Einzelpunktgenauigkeit weniger. Hier müsste man auf spezielle statistische Verfahren zurückgreifen um das Rauschen der Einzelpunkte zu minimieren. Theoretisch würden sich auch Umfeldscanner für die Berechnung der Querneigung eignen, wenn eine hinreichende Anzahl von Laserscannerpunkte zur Mittelung herangezogen werden. Zur Erfassung der Querneigung ist ein Oberflächenscanner mit einer Messbreite von ~ 4 m ideal

Oberflächenscanner:

- Eingeschränkter Öffnungswinkel $\sim 70^\circ$
- Hohe Genauigkeit 0,2 mm -1 mm
- Eingeschränkter Erfassungsbereich 1-5 m
- Erfassungsrate 0,6 -2 Mio. Punkte/Sek

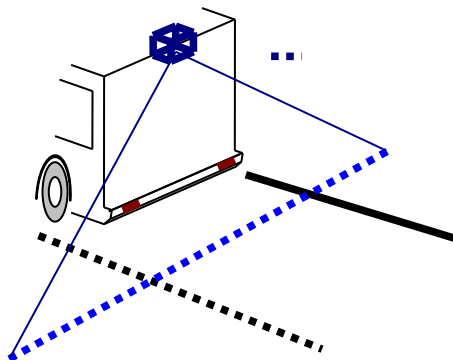


Abb. 7.51 Prinzipskizze der Aufnahme der Strassenoberfläche für die Berechnung der Querneigung, Quelle: [LP]

Die Erfassung von Querneigung, Längsneigung, Querebenheit und Längsebenheit kann mit dieser Art von Systemen gleichzeitig erfolgen.

Erfassung von Querprofilen

Durch Bewegung des Trägersystems, auf dem der Laserscanner montiert ist, können Punktwolken (Oberflächenmodelle) der Umgebung erfasst werden. Dazu ist die Kombination des Sensors mit einem hochgenauen Positionierungssystem erforderlich, um die Verortung der erfassten Datenpunkte in einem lokalen oder globalen Koordinatensystem zu ermöglichen.

Aus dieser Punktwolke werden dann im Nachgang die zur Erfassung notwendigen Lasersensoren extrahiert. Damit ist die Technologie komplementär zum Kreiselssystem jedoch mit einer grösseren Anzahl von Quermesswerten über die Erfassungsbreite. Durch die höhere Anzahl von Messpunkten wird eine bessere Repräsentation der Querneigung realisiert.

7.23.2 Einsatzzweck und Fragestellung im Bereich Trasse

Der Laserscanner eignet sich für die Messung von Querneigungen auf Fahrbahnbefestigungen. Die Messungen können direkt auf Fahrbahnbefestigungen in Asphalt- oder Betonbauweise durchgeführt werden. Zur Erfassung eines Trassees werden spezielle Mobile Mapping Systeme eingesetzt, die meist kombiniert sind mit bildgebenden Sensoren. Alle weiteren Punkte sind identisch mit dem Kapitel 7.15.2.

Umsetzung der Technologie

Die Erfassung der Querneigung basiert auf Grundlage einer erfassten 3D-Oberfläche. Die Daten werden auf Grundlage einer dreidimensionalen Punktwolke generiert, die vorliegend aus den Daten des Laserscanners, in Kombination mit einem hochgenauen Positionierungssystem gewonnen werden.

Aus den einzelnen Laserscanneraufnahmen leiten sich die Querprofile ab, welches nach einer Filterung in eine Folge von Quermesspunkten mit definiertem Messpunktabstand (z.B. 10 cm) überführt werden kann. Aus dieser Messfolge berechnet sich dann die resultierende Querneigung. Mit dem gleichen Verfahren kann analog auch eine Längsneigung realisiert werden.

7.23.3 Datenerfassung, Raumbezug, Messgrößen und Genauigkeit

Die Datenerfassung findet rein digital statt. Der Raumbezug ist durch das verwendete Positionierungssystem realisiert und kann somit an die jeweilige Strassenkilometrierung projiziert werden. Die Rohdaten Querprofile werden, abhängig von der Berechnungsvorschrift des jeweiligen Index, mit unterschiedlicher Rasterweite erzeugt und anschliessend in der Regel in Mittelwerte (z.B. 1 m oder 20 m) überführt. Die zu erreichende Genauigkeit ist vom eingesetzten Laserscanner und dem Positionierungssystem bzw. Kreiselssystem abhängig. Empfehlungen für die zu verwendenden Hardwarespezifikation zur Erfassung der Querneigung mit einem Laserscanner:

- Laserscanner:
 - Punktgenauigkeit: 0,2 -0,5 mm
 - Erfassungsrate >1 Mio. Punkte/Sek
- Positionierungssystem:
 - Inertialsystem ist zwingend erforderlich (Kreiselssystem)
 - Winkelgenauigkeit: < 0.02 °
 - Lagegenauigkeit: 2-10 cm

7.23.4 Entwicklungsstand, Anwendungsgrenzen, Kosten

Der Einsatz der Technologie für die Messung der Querneigung ist als relativ neu einzuschätzen, so dass derzeit weniger als 10 Fahrzeuge in den Ländern Deutschland, Österreich und Schweiz mit dieser Technik regelmässige Messungen durchführen.

Die Erfassung erfolgt im fliessenden Verkehr. Die Laserscanner sollten mit einem Laserstrahl der Laserklasse 1 arbeiten und sind damit Augensicher.

Die Tagesleistung kann mit 100-200 km pro Tag angegeben werden.

Der Kostenpunkt einer Messung kann mit 50-200 CHF angegeben werden.

7.23.5 Ergänzende Ausschreibungsanforderungen

Als Basis für die zu definierenden Anforderungen an die Ausschreibung dient ein objektspezifisches Messkonzept (siehe Kapitel 2.2), welches die spezifischen Gegebenheiten des Objekts entweder für das Trasse oder Naturgefahren berücksichtigt.

Mit Berücksichtigung dieser aufgeführten Themen können, zusammen mit den vorgängig unter Datenerfassung, Raumbezug, Messgrössen und –genauigkeit angeführten Rahmenbedingungen, die Ausschreibungsanforderungen spezifisch vervollständigt werden.

Insbesondere sind bei dieser Technologie der Messpunktabstand und die gewünschte Genauigkeit der Querneigungsmessung zu definieren.

7.23.6 Literaturverzeichnis

Sonstige Literatur / Forschungsberichte

-

C Substanz

C 1 Substanzmerkmale Oberfläche

Für die Bewertung der strukturellen Substanz von Fahrbahnbefestigungen liefert die Beschaffenheit der Strassenoberfläche einen ersten Hinweis auf etwaige Beschädigungen.

Im Rahmen der Ermittlung der Substanzmerkmale der Oberfläche (Oberflächenschäden) sind gemäss VSS 40925B und in Abhängigkeit der Belagart die folgenden Schadensgruppen zu analysieren:

- Oberflächenglätte
- Belagsschäden (bitumenhaltiger Belag) / Materialverlust (Betonbelag)
- Belagsverformungen (bitumenhaltiger Belag) / Fugen- und Kantenschäden (Betonbelag)
- Vertikalverschiebung (Betonbelag)
- Strukturelle Schäden (bitumenhaltiger Belag) / Risse, Brüche (Betonbelag)
- Flicke

Den Oberflächenschäden werden über die beiden Zustandsindikatoren Schadenausmass (4 Klassen von «kein Schaden» bis «Schaden sehr häufig auftretend») und Schadensschwere (3 Klassen von «Schaden leicht» bis «Schaden schwer») beschrieben. Die Zustandsindikatoren werden anschliessend zu einem Matrixwert verrechnet und abhängig von der Belagart gewichtet, um einen Indexwert zu ermitteln, der eine Aussage über den Strassenzustand ermöglicht.

Im Prozess der Zustandserhaltung kommt dieser Erfassung der Substanzmerkmale der Oberfläche eine grosse Bedeutung zu, da diese Analyse vergleichsweise kostengünstig und einfach umzusetzen ist.

Tab. 7.13 Substanzmerkmale Oberfläche - Übersicht

Technologie Nr und Name	7.24	7.25	7.26
Photogrammetrie			
7.24.1	Kurzbeschreibung: Bilineale Erfassung der Strassenoberfläche unter homogenen Aufnahmebedingungen, durch Zuhilfenahme von aktiven Beleuchtungsquellen.		
7.24.2	7.25.2	7.26.2	
Einsatzzweck	netzweite Substanzbewertung Erfassung von Straßeninventar	netzweite Substanzbewertung Erfassung von Straßeninventar	netzweite Substanzbewertung Erfassung von Straßeninventar
Typisierung	a. Messprinzip 2 indirekt b. Datenerfassung 5 optisch c. Datenspeicher 1 digital d. Lokalisation 4 flächenbezogen e. Raumbezug 1 integriert f. Zustand 3 nicht zerstörend g. Aufnahme von Oberflächenbildern	7.25.2 2 indirekt 7 laseroptisch 1 digital 4 flächenbezogen 1 integriert 3 nicht zerstörend Aufnahme von Punktwolken/Tiefenbildern/Reflektanzbildern der Oberfläche	7.26.2 2 indirekt 7 laseroptisch 1 digital 4 flächenbezogen 1 integriert 3 nicht zerstörend Aufnahme von Tiefenbildern und Graustufenbildern der Oberfläche
Messgrößen und -genauigkeit	Fahrbahnoberfläche 1 mm 1 mm - Bewertung erfolgt i.d.R. durch geschultes Personal	Fahrbahnoberfläche 5 mm < 28 mm 5 mm < 28 mm < 1 mm -	Fahrbahnoberfläche 1 mm 1 mm < 1 mm Bewertung erfolgt insbesondere für Risse automatisiert.
Nutzung in Fachgebieten	7.25.4	7.26.4	
Trassee	2	2	4
Geotechnik	0	0	0
Naturgefahren	0	0	0
Umwelt	0	0	0
Einsatzzeitpunkt	W, N	W, N	N
Entwicklungsstand	W, N	W, N	N
7.24.4 Kosten	7.25.4	7.26.4	
initial / einmalig	W	W	W
wiederkehrend	W	W	W

7.24 Photogrammetrie

7.24.1 Beschrieb der Technologie

Bei Verfahren der Photogrammetrie wird die Strassenoberfläche, durch Zuhilfenahme von aktiven Beleuchtungsquellen, unter möglichst homogen Aufnahmebedingungen bildhaft erfasst. Die so aufgenommenen Oberflächenbilder können anschliessend auf Schäden untersucht werden.

Als Plattform für die Aufnahme der Strassenoberfläche werden Mobile Mapping Systeme eingesetzt. Diese verfügen, neben den eigentlichen Kameras für die Aufnahme der Oberflächenbilder, über ein Positionierungssystem auf Basis von GPS, über aktive Beleuchtungsquellen und über zusätzliche Kameras, um die Umgebung des Fahrzeugs zu erfassen. Die Bilder der Umgebungskameras werden auch bei der Substanzbewertung eingesetzt, um Schadstellen aus einem anderen Blickwinkel beurteilen zu können.

Die Mobile Mapping System sind derart ausgelegt, dass Sie die Aufnahme der Oberflächenbilder mit Geschwindigkeiten von ca. 80 km/h ermöglichen, wodurch die Erfassung im fließenden Verkehr erfolgen kann.



Abb. 7.52 links: Mobile Mapping System mit Flächenkameras (oben in Träger) und aktiver Blitzbeleuchtung (im unteren Bereich des Fahrzeugs) rechts: Mobile Mapping System mit Linienkamera (oben im Träger) und Konstantlichtquellen (schwarze Module im unteren Bereich des Fahrzeugs) Quelle: [LP]

Für die Erfassung der Oberflächenbilder kommen sowohl Flächenkameras als auch Zeilenkameras zum Einsatz. Bei Flächenkameras sind von oben direkt auf die Strassenoberfläche gerichtet und nehmen in Fahrtrichtung einen fixen Bereich (z.B. 1 Meter) auf. Entsprechend nehmen die Kameras, weggesteuert, in einem fixen Abstand Bilder auf, so dass die aktive Beleuchtung bei diesen Systemen in der Regel durch Blitzlichter realisiert wird (vgl. Abb. 7.53 links). Abhängig von der im Auswerteprozess geforderten Bildgrösse (z.B. 10 Meter), müssen die Einzelaufnahmen der Flächenkameras durch Stitching zu grösseren Oberflächenbildern zusammengefügt werden. Durch den physikalisch bedingten Lichtabfall am Rand der Einzelaufnahmen, führt dieser Prozess zu sichtbaren Stitchingkanten im erzeugten Oberflächenbild. Linienkameras sind ebenfalls direkt von oben auf die Strassenoberfläche gerichtet, nehmen aber zu jedem Aufnahmezeitpunkt nur eine Querlinie der Fahrbahn auf, so dass während der Bewegung des Mobile Mapping Systems permanent neue Aufnahmen erzeugt werden müssen. Daher kommen bei diesem Kamerasystem Konstantlichtquellen zum Einsatz (vgl. Abb. 7.53 rechts). Stitchingkanten sind bei diesem Aufnahmesystem in Fahrtrichtung nicht vorhanden.

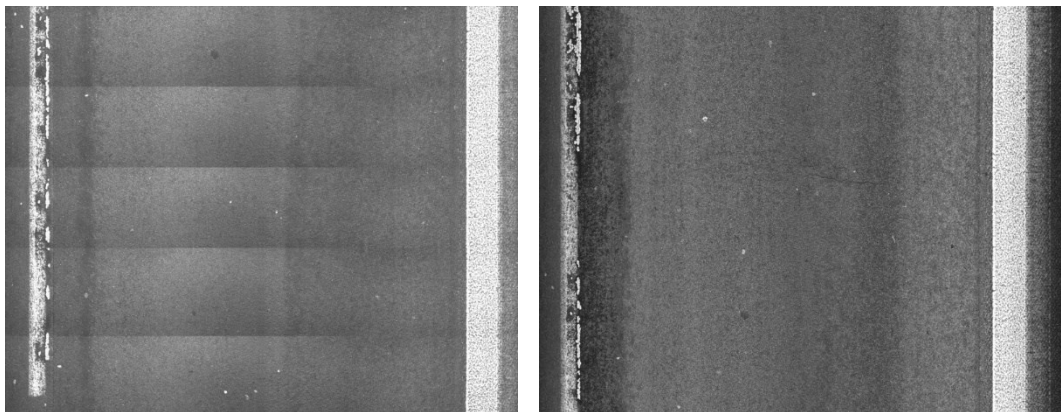


Abb. 7.53 links: Oberflächenbild eines Aufnahmesystems mit Flächenkameras. Der physikalisch bedingte Lichtabfall zum Bildrand führt zu Stitching-Kanten in Fahrtrichtung. rechts – Oberflächenbild eines Aufnahmesystems mit Zeilenkamera

7.24.2 Einsatzzweck und Fragestellung im Bereich Trasse

Die kalibrierte und hochgenau lokalisierte Erfassung der Oberflächenbilder ermöglicht die Untersuchung unterschiedlicher Fragestellungen:

- Ermittlung der Substanzmerkmale der Oberfläche durch Verwendung der Oberflächenbilder in einem standardisierten Prozess zur Ermittlung des Strassenzustands (z.B. ZTV ZEB [55])
- Erfassung und Verortung von Strasseninventar
- Vermessung im Bereich der Strassenoberfläche

7.24.3 Datenerfassung, Raumbezug, Messgrößen und Genauigkeit

Die Erfassung der Kamerabilder erfolgt digital. Neben den Bildinformationen werden mit den Messfahrzeugen auch Informationen zur Lokalisation (GPS) und zu den intrinsischen und extrinsischen Kameraparametern erfasst.

Die Aufnahme der Bilder erfolgt typischerweise derart, dass ein Pixel im Oberflächenbild etwa 1 mm auf der Oberfläche entspricht. In der Breite überspannen die Oberflächenbilder wenigstens 4 Meter.

7.24.4 Entwicklungsstand, Anwendungsgrenzen, Kosten

Die Erfassung der Strassenoberfläche mit Mobile Mapping Systemen ist insbesondere im europäischen Raum ein etabliertes Verfahren, welches einen ausgereiften Entwicklungsstand erreicht hat.

Die Grenzen des Verfahrens liegen in der fehlenden Tiefenauflösung der Kamerabilder, so dass bestimmte Schadenstypen schwerer erkannt werden können. Ausserdem können keine Aussagen zur Eindringtiefe eines Schadens in die Strassenoberfläche getroffen werden.

Die Kosten für die Datenaufnahme setzen sich aus folgendermassen zusammen:

- Einsatzpauschale für das Mobile Mapping Systems, abhängig vom Umfang der Messung: 2000 bis 4000 CHF
- Kosten für Datenaufnahme pro Kilometer (ohne Bewertung der Substanzmerkmale), abhängig vom Umfang der Messung: 75 bis 125 CHF
- Kosten für Datenaufnahme pro Kilometer (mit Bewertung der Substanzmerkmale), abhängig vom Umfang der Messung: 150 bis 300 CHF

7.24.5 Ergänzende Ausschreibungsanforderungen

Als Basis für die zu definierenden Anforderungen an die Ausschreibung dient ein objektspezifisches Messkonzept (siehe Kapitel 2.2), welches die spezifischen Gegebenheiten des Objekts entweder für das Trasse oder Naturgefahren berücksichtigt.

Mit Berücksichtigung dieser aufgeführten Themen können, zusammen mit den vorgängig unter Datenerfassung, Raumbezug, Messgrößen und –genauigkeit angeführten Rahmenbedingungen, die Ausschreibungsanforderungen spezifisch vervollständigt werden.

Insbesondere sind bei dieser Technologie die zu erfassenden Schadensklassen und die Erfassungsgenauigkeit (Objektscharf, Rasterung, Abschnittsweise Mittelwerte) zu definieren. Weiterhin ist anzugeben welche örtliche Auflösung bei der Erkennung von Oberflächenschäden mindestens zu erzielen ist.

7.24.6 Literaturverzeichnis

Sonstige Literatur / Forschungsberichte

- [55] Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen und Richtlinien zur Zustandserfassung und -bewertung von Straßen, Ausg. 2018 Hrs., FGSV-Verl., 2018.
-

7.25 Laserscanner

7.25.1 Beschrieb der Technologie

Die unter Abschnitt 7.15 beschriebenen Oberflächenscanner können auch für die Bewertung der Substanz der Oberfläche eingesetzt werden. Für diesen Zweck kann neben der Entfernungsmessung der Lasersensoren auch die für jeden Messpunkt ermittelte Reflektanz (Reflexionsgrad für einen Messpunkt) genutzt werden, um eine Darstellung der Strassenoberfläche zu erzielen, welcher der Aufnahme mit Oberflächenkameras ähnelt. Während für die Bewertung der Ebenheiten vor allem die Tiefenauflösung der Scanner relevant ist, spielt für die Substanzbewertung auch die erzielbare Auflösung in Querrichtung und in Fahrtrichtung eine wesentliche Rolle. Die Erkennbarkeit, insbesondere von feinen Rissen, ist direkt mit der maximalen räumlichen Auflösung des Aufnahmesystems verknüpft. Während die Auflösung in Querrichtung für jedes Lasersystem konstant ist, hängt die Auflösung in Fahrtrichtung von der Geschwindigkeit des Messsystems ab.

7.25.2 Einsatzzweck und Fragestellung im Bereich Trasse

Die mittels Oberflächenscanner gewonnen Informationen können für die visuelle Bewertung der Substanzmerkmale Verwendung finden, indem eine Umwandlung in Oberflächenbilder erfolgt. Hierfür bieten sich zum einen Bilder aus den Reflektanzwerten an, da diese einen ähnlichen visuellen Eindruck wie normale Kameras vermitteln (vgl. Abb. 7.54 links).

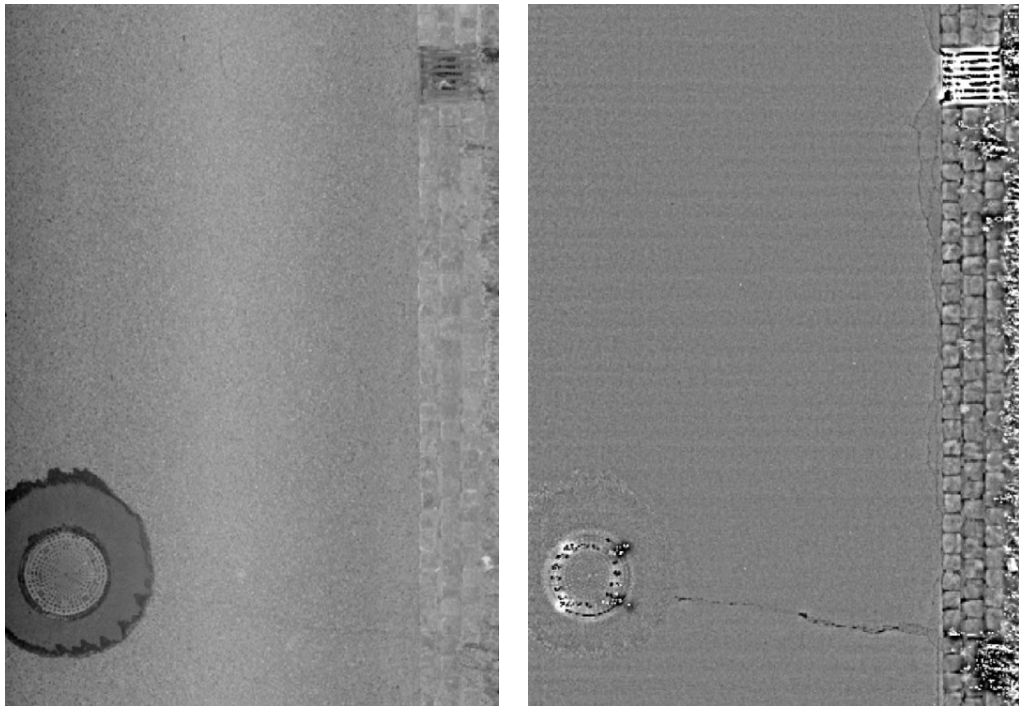


Abb. 7.54 links: Darstellung des aus den Laserscannerdaten extrahierten Reflektanzbildes. rechts: Darstellung des aus den Laserscannerdaten extrahierten Höhenbildes (Hochpass)

Der Vorteil der Daten besteht in der genauen Erfassung der Tiefenwerte von Schadstellen. So lassen sich insbesondere Risse und Ausbrüche in den Tiefendaten sehr gut abbilden (vgl. Abb. 7.54 rechts). Weiterhin ermöglichen die Tiefendaten eine bessere Beurteilung der Schadensschwere.

7.25.3 Datenerfassung, Raumbezug, Messgrößen und Genauigkeit

Die Erfassung der Lasermesswerte und Kameradaten erfolgt digital. Neben den Bildinformationen werden mit den Messfahrzeugen auch Informationen zur Lokalisation (GPS) und zu den intrinsischen und extrinsischen Kameraparametern erfasst.

In Querrichtung werden typischerweise bis zu 5 Metern mit einem Messpunkt Abstand von 4-5 mm erfasst. In Fahrtrichtung ist die Punktdichte abhängig von der Fahrgeschwindigkeit des Messsystems und liegt zwischen 10 mm (30 km/h) und 28 mm (80 km/h).

7.25.4 Entwicklungsstand, Anwendungsgrenzen, Kosten

Die Erfassung des Zustands über Lasersensoren kommt gehäuft im kommunalen Bereich zum Tragen. Die Technik ist bislang vor allem durch die vergleichsweise geringe Auflösung limitiert, die derzeit den Einsatz mit hohen Fahrgeschwindigkeiten behindert. Insbesondere die Erfassung sehr feiner Risse wird durch die, im Vergleich zu visuellen Systemen, geringe Punktdichte behindert. Der grosse Vorteil der Technik liegt in der relativen Unabhängigkeit von der Umgebungsbeleuchtung und der homogenen Datenaufnahme.

Die Kosten für die Datenaufnahme setzen sich aus folgendermassen zusammen:

- Einsatzpauschale für das Mobile Mapping Systems, abhängig vom Umfang der Messung: 2000 bis 4000 CHF
- Kosten für Datenaufnahme pro Kilometer (ohne Bewertung der Substanzmerkmale), abhängig vom Umfang der Messung: 75 bis 125 CHF
- Kosten für Datenaufnahme pro Kilometer (mit Bewertung der Substanzmerkmale), abhängig vom Umfang der Messung: 150 bis 300 CHF

7.25.5 Ergänzende Ausschreibungsanforderungen

Als Basis für die zu definierenden Anforderungen an die Ausschreibung dient ein objektspezifisches Messkonzept (siehe Kapitel 2.2), welches die spezifischen Gegebenheiten des Objekts entweder für das Trasse oder Naturgefahren berücksichtigt.

Mit Berücksichtigung dieser aufgeführten Themen können, zusammen mit den vorgängig unter Datenerfassung, Raumbezug, Messgrößen und –genauigkeit angeführten Rahmenbedingungen, die Ausschreibungsanforderungen spezifisch vervollständigt werden.

Insbesondere sind bei dieser Technologie die zu erfassenden Schadensklassen und die Erfassungsgenauigkeit (Objektscharf, Rasterung, Abschnittsweise Mittelwerte) zu definieren. Weiterhin ist anzugeben welche örtliche Auflösung bei der Erkennung von Oberflächenschäden mindestens zu erzielen ist.

7.25.6 Literaturverzeichnis

Sonstige Literatur / Forschungsberichte

-

7.26 Lichtschnittverfahren

7.26.1 Beschreibung der Technologie

Das unter Abschnitt 7.20.1 beschriebene Lichtschnittverfahren kann auch für die Bewertung der Substanz der Oberfläche eingesetzt werden.

Messsysteme, die mittels Lichtschnittverfahren arbeiten, sind in der Regel an Mobile Mapping Systeme montiert. Diese verfügen, neben dem eigentlichen Lichtschnittmesssystem, über ein hochgenaues Positionierungssystem auf Basis von GPS und Inertial- und Odometriesensoren. Durch das hochgenaue Positionierungssystem können die von dem Lichtschnittverfahren gemessenen Datenpunkte in ein lokales-/globales Koordinatensystem eingetragen werden. Bei Bewegung des Mobile Mapping

Systems können weitere Datenpunkte in das Koordinatensystem eingetragen werden, so dass sich die komplette Oberfläche der Strasse dreidimensional abbilden lässt.

Zusätzlich zu den Tiefenwerten werden von den Lichtschnittverfahren typischerweise auch Intensitätswerte extrahiert. Damit ist die Darstellung eines Tiefenbildes, eines Intensitätsbildes und einer Kombination aus beiden aus den Daten möglich (vgl. Abb. 7.55).

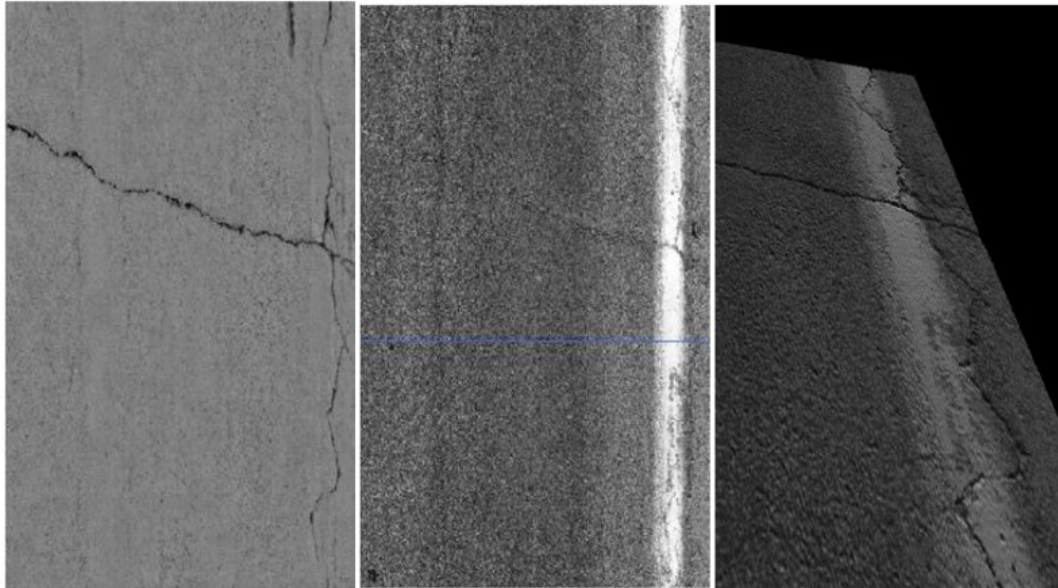


Abb. 7.55 Links - Von einem Lichtschnittverfahren ermittelten Tiefenbild einer Oberfläche (schwarz - hohe Entfernung vom Sensor, weiss - geringe Entfernung vom Sensor), Mitte-Darstellung des aus den Messwerten generierten Intensitätsbilds. Rechts – Kombinierte Darstellung von 3D-Werten mit Intensität, Quelle: [56].

Während die räumliche Auflösung des Lichtschnittsystems in Querrichtung konstant ist, hängt die Auflösung in Fahrtrichtung von der Fahrgeschwindigkeit des Mapping-Systems und von der Aufnahmegeschwindigkeit des Messsystems ab. Lichtschnittsysteme bieten jedoch in der Regel eine sehr hohe Abtastrate, so dass auch räumlich eine hohe Abtastgenauigkeit erreicht werden kann.

7.26.2 Einsatzzweck und Fragestellung im Bereich Trasse

Die aus dem Lichtschnittverfahren generierten Tiefenbilder und Intensitätsbilder können für die Bewertung der Substanzmerkmale der Oberfläche verwendet werden. Naturgemäss können aus diesem dreidimensionalen Strassenabbild vor allen Schäden erkannt werden, die eine Höhenänderung an der Oberfläche hervorrufen (z.B. Risse oder Ausbrüche). Über die Intensitätsbilder können hingegen auch Substanzmerkmale erfasst werden, die sich aus den reinen Tiefendaten nicht oder nur unzureichend gut erkennen lassen (z.B. vergossene Risse).

Für das Lichtschnittverfahren gibt es dabei bereits eine Herstellerseitige Softwarelösung, welche eine automatisierte Schadendetektion ermöglicht. Hierbei kann die Detektion von Risschäden, Schlaglöchern und vergossenen Rissen vollständig automatisch erfolgen.

7.26.3 Datenerfassung, Raumbezug, Messgrössen und Genauigkeit

Die Erfassung der Tiefendaten und Intensitätsdaten erfolgt digital. Neben den Bildinformationen werden mit den Messfahrzeugen auch Informationen zur Lokalisation (GPS) und zu den intrinsischen und extrinsischen Sensorparametern erfasst.

In Querrichtung werden typischerweise mindestens 4 Metern mit einem Messpunkt Abstand von bis zu 1 mm erfasst. Aufgrund der schnell Abtastfrequenz kann auch in Fahrtrichtung

bei Fahrgeschwindigkeit des Messsystems von bis zum 100 km/h ein Punktabstand von 1 mm erreicht werden.

7.26.4 Entwicklungsstand, Anwendungsgrenzen, Kosten

Die Erfassung von Substanzmerkmalen auf Basis des Lichtschnittverfahrens hat weltweit bereits eine grosse Verbreitung erreicht, so dass mehr als 100 Systeme im Einsatz sind. Die Automatisierte Detektion von Schadensmerkmalen auf Basis der Tiefendaten (Risse und Ausbrüche) hat bereits eine hohe Detektionsgenauigkeit erreicht. Potential besteht allerdings noch bei der Detektion von Flächenschäden (Flickstellen).

Weiterhin ist anzumerken, dass der für die Linienprojektion genutzte Laserscanner mit Laserklasse 2 oder 4 arbeitet und somit nur bedingt Augensicher ist. Die Anwendung des Systems kann daher nicht immer im fliessenden Verkehr erfolgen.

Die Kosten für die Datenaufnahme setzen sich aus folgendermassen zusammen:

- Einsatzpauschale für das Mobile Mapping Systems, abhängig vom Umfang der Messung: 2000 bis 4000 CHF
- Kosten für Datenaufnahme pro Kilometer (mit automatischer Riss- und Schlaglochdetektion), abhängig vom Umfang der Messung: 150 bis 200 CHF

7.26.5 Ergänzende Ausschreibungsanforderungen

Als Basis für die zu definierenden Anforderungen an die Ausschreibung dient ein objektspezifisches Messkonzept (siehe Kapitel 2.2), welches die spezifischen Gegebenheiten des Objekts entweder für das Trasse oder Naturgefahren berücksichtigt.

Mit Berücksichtigung dieser aufgeführten Themen können, zusammen mit den vorgängig unter Datenerfassung, Raumbezug, Messgrössen und –genauigkeit angeführten Rahmenbedingungen, die Ausschreibungsanforderungen spezifisch vervollständigt werden.

Insbesondere sind bei dieser Technologie die zu erfassenden Schadensklassen und die Erfassungsgenauigkeit (Objektscharf, Rasterung, Abschnittsweise Mittelwerte) zu definieren. Weiterhin ist anzugeben welche örtliche Auflösung bei der Erkennung von Oberflächenschäden mindestens zu erzielen ist.

7.26.6 Literaturverzeichnis

Sonstige Literatur / Forschungsberichte

- [56] J. Laurent, J. Hébert, D. Lefebvre und Y. Savard, „Using 3D Laser Profiling Sensors for the Automated Measurement of Road Surface Conditions,“ Bd. 4, 2012, pp. 157-167.
-

C 2 Schichtdicken und -parameter

Tab. 7.14 Schichtdicken und -parameter - Übersicht

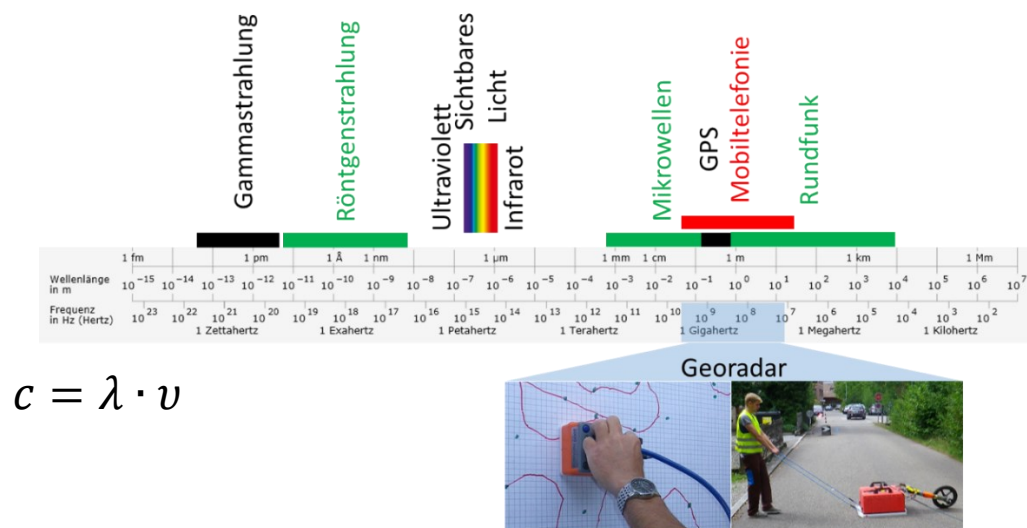
Technologie Nr und Name	7 27	7 28	7 29	7 30	7 31	7 32
Radar	7 27.1 Kurzbeschreibung	7 28.1 Ultraschalleiten (meist Scherwellen) werden in den Untergrund und die Echos aufgezeichnet. Laufzeiten und Amplituden geben Hinweise auf Schichtaufbau und Eigenschaften. Umfangreiche Datenbearbeitung notwendig.	7 29.1 Mit einem kleinen Hammer wird auf der Oberfläche ein Impuls angelegt. Das über einen Beschleunigungsaufnehmer aufgenommene Frequenzspektrum wird ausgewertet und die Plattendicke berechnet.	7 30.1 Miest durch Hammerschlag wird seismische Wellenausbreitung im Untergrund angeregt. Die zur Oberfläche zurückkehrenden Wellen werden mit Geophonen aufgezeichnet. Refraktierte Wellen enthalten Informationen zu "schallleitenden" Schichten als	7 31.1 Miest durch Hammerschlag wird seismische Wellenausbreitung im Untergrund angeregt. Die zur Oberfläche zurückkehrenden Wellen werden mit Geophonen aufgezeichnet. Refraktierte Wellen enthalten Informationen zur Tiefenverteilung	7 32.1 Über Elektroden wird Gleichstrom in den Boden geleitet und die resultierende Spannung gemessen. Über Variation von Ort und Elektrodenabstand sowie umfangreiche Datenbearbeitung wird die Widerstandsverteilung
	7 27.2 Einsatzzweck	7 28.2 Schichtdicken Beton	7 29.2 Schichtdicken Beton	7 30.2 Schichtdicken Baugrund	7 31.2 Schichtdickenmessung und elast. Parameter Baugrund	7 32.2 Schichtdicken und -parameter Baugrund
ID	7 27.2 a. Messprinzip	7 28.2 2 indirekt	7 29.2 2 indirekt	7 30.2 2 indirekt	7 31.2 2 indirekt	7 32.2 2 indirekt
	7 27.2 b. Datenerfassung	7 28.2 10 radar	7 29.2 13 akustisch	7 30.2 13 akustisch	7 31.2 13 akustisch	7 32.2 2 elektrisch
Typisierung	7 27.2 c. Datenspeicher	7 28.2 1 digital	7 29.2 1 digital	7 30.2 1 digital	7 31.2 1 digital	7 32.2 1 digital
	7 27.2 d. Lokalisation	7 28.2 4 flächenbezogen	7 29.2 3 tiefenbezogen	7 30.2 3 tiefenbezogen	7 31.2 3 tiefenbezogen	7 32.2 3 tiefenbezogen
Größen	7 27.2 e. Raumbezug	7 28.2 1 integriert	7 29.2 2 separat	7 30.2 2 separat	7 31.2 2 separat	7 32.2 2 separat
	7 27.2 f. Zustand	7 28.2 3 nicht zerstörend	7 29.2 3 nicht zerstörend	7 30.2 3 nicht zerstörend	7 31.2 3 nicht zerstörend	7 32.2 3 nicht zerstörend
Messgrößen und -genauigkeit	7 27.3 Untersuchungs-/Tiefenbereich	7 28.3 0 - 50 cm (materialabh.)	7 29.3 0 - 100 cm (in Beton)	7 30.3 1 - 30 m	7 31.3 1 - 30 m	7 32.3 0 - 30 m
	7 27.3 Auflösung	7 28.3 1 cm	7 29.3 1 cm	7 30.3 10 cm - 1 m	7 31.3 20 cm	7 32.3 0,1 - 1 m
Bemerkungen	7 27.3 Genauigkeit	7 28.3 > 1 GHz	7 29.3 2 cm	7 30.3 20 cm - 2 m	7 31.3 0,5 - 2 m	7 32.3 0,1 - 1 m
	7 27.3 Bemerkungen	7 28.3 10 - 500 MHz	7 29.3 1 cm	7 30.3 2 cm	7 31.3 10 cm	7 32.3 0,1 - 1 m
Nutzung in Fachgebieten	7 27.4 Trasse	7 28.4 3	7 29.4 2	7 30.4 2	7 31.4 2	7 32.4 2
	7 27.4 Geotechnik	7 28.4 0	7 29.4 0	7 30.4 2	7 31.4 2	7 32.4 1
Einzelzeitpunkt	7 27.4 Naturverfahren	7 28.4 0	7 29.4 0	7 30.4 2	7 31.4 2	7 32.4 2
	7 27.4 Umwelt	7 28.4 0	7 29.4 0	7 30.4 0	7 31.4 0	7 32.4 2
Kosten	7 27.4 Einzelzeitpunkt	7 28.4 N	7 29.4 W, N	7 30.4 V	7 31.4 V, W, N	7 32.4 V, N
	7 27.4 Entwicklungsstand	7 28.4 N	7 29.4 W, N	7 30.4 V	7 31.4 V, W, N	7 32.4 V, N
Kosten	7 27.4 initial / einmalig	7 28.4 N	7 29.4 N	7 30.4 N	7 31.4 N	7 32.4 N
	7 27.4 wiederkehrend	7 28.4 N	7 29.4 N	7 30.4 N	7 31.4 N	7 32.4 N

7.27 Radar

7.27.1 Beschrieb der Technologie

Georadar, auch bezeichnet als Bodenradar, Ground-Penetrating-Radar (GPR) oder einfach Radar (Radio Detection And Ranging), ist ein elektromagnetisches Untersuchungsverfahren. Ein elektromagnetischer Impuls wird von einer Antenne abgestrahlt, an Inhomogenitäten reflektiert und via Antenne wieder registriert. Aus der Laufzeit des reflektierten Signals können, ähnlich wie beim akustischen Echo, Rückschlüsse auf die Existenz und den Abstand eines allfälligen Reflektors gezogen werden [57][58][59].

Georadar arbeitet mit elektromagnetischen Wellen im Frequenzbereich von einigen Megahertz bis einigen Gigahertz. Dieser Bereich des elektromagnetischen Spektrums wird auch von anderen Technologien intensiv genutzt (vgl. Abb. 7.56). Aus diesem Grunde müssen Geräte und Nutzer Regeln einhalten, um Störungen anderer Nutzer zu vermeiden. Elektromagnetische Wellen breiten sich im Vakuum mit Lichtgeschwindigkeit ($c = 3 \cdot 10^8$ m/s) aus. In gängigen Baustoffen wie Asphalt oder Beton beträgt die Geschwindigkeit etwa ein Drittel der Lichtgeschwindigkeit. Die Beziehung zwischen Wellenlänge und Frequenz lautet $c = \lambda \cdot \nu$ (Ausbreitungsgeschwindigkeit gleich Wellenlänge mal Frequenz). Die bedeutet, dass tiefere Frequenzen grössere Wellenlängen aufweisen und somit (ähnlich wie in der Akustik) grössere Antennen (Instrumente) benötigen. Abb. 7.56 zeigt eine hochfrequente (2.6 GHz, links) und eine tieffrequente (200 MHz, rechts) Antenne.



$$c = \lambda \cdot \nu$$

Abb. 7.56 Elektromagnetisches Spektrum

Georadar kann grundsätzlich im Transmissions- und Reflexionsmodus betrieben werden. Da der Reflexionsmodus die mit Abstand am häufigsten eingesetzte Methode ist, beschränken sich die folgenden Ausführungen auf diesen. Ein elektromagnetischer Impuls wird von einem Sender abgestrahlt (vgl. Abb. 7.57). Ein Teil der Energie wird bereits an der Oberfläche des Untersuchungsobjektes reflektiert, ein anderer Teil dringt in das Objekt ein und wird, beispielsweise an der Untergrenze des Objekts, reflektiert. Die reflektierte Energie wird via Empfänger aufgezeichnet und zur Speicherung, Darstellung oder Weiterverarbeitung an die Zentraleinheit übertragen. Eine Messung an einem Punkt liefert also eine Zeitreihe mit variierender Signalstärke, welche als Scan bezeichnet wird (vgl. Abb. 7.57 rechts). Da das Verfahren aus der Geophysik kommt, wo meist der Untergrund untersucht wird, wird das Signal meist mit der Zeitachse nach unten und vielfach in Graustufen codiert dargestellt (vgl. Abb. 7.58 rechts). Die Zeitachse hat eine Länge von lediglich einigen Nanosekunden, da sich das Signal mit nahezu Lichtgeschwindigkeit ausbreitet.

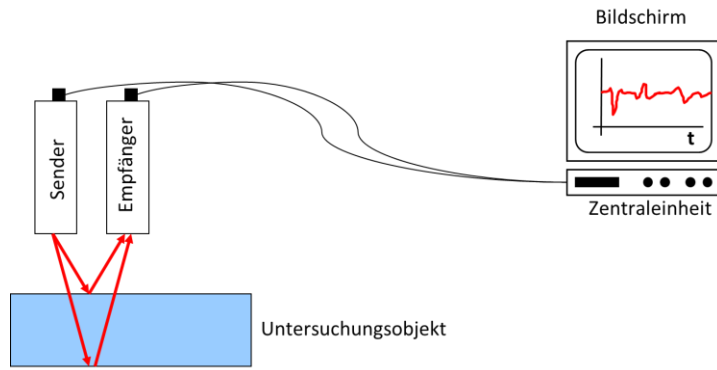


Abb. 7.57 Reflexionsmodus

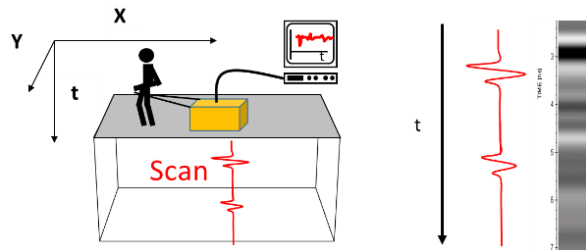


Abb. 7.58 Prinzip Scan

Da die Aufzeichnung eines Scans lediglich einige Nanosekunden in Anspruch nimmt, handelt es sich um ein sehr schnelles Verfahren, bei dem pro Zeiteinheit eine grosse Zahl von Messungen (Scans) möglich sind. Somit werden Messungen meist nicht an einzelnen Punkten, sondern entlang von Linien durchgeführt. Die Antenne wird entlang einer Linie (grüner Pfeil) bewegt und es entsteht eine quasi-kontinuierliche Aufzeichnung, welche als Radargramm bezeichnet wird (vgl. Abb. 7.59). Die horizontale Achse weist in die X-Richtung, die vertikale ist nach wie vor eine Zeitachse, welche via $d = c \cdot t/2$ in eine Tiefe umgerechnet werden kann.

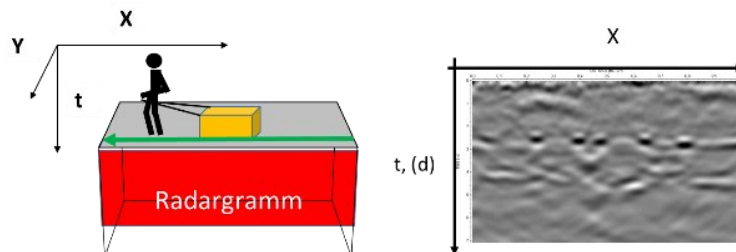


Abb. 7.59 Prinzip Radargramm

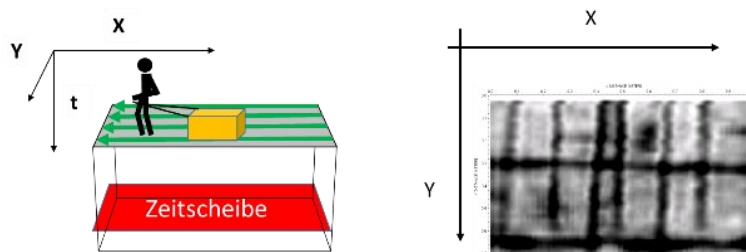


Abb. 7.60 Prinzip Zeitscheibe

Werden Daten entlang vieler paralleler Linien aufgezeichnet, eine Oberfläche also flächendeckend gemessen, so kann ein Datenkubus konstruiert werden, aus welchem anschliessend sogenannte Zeitscheiben dargestellt werden können (vgl. Abb. 7.60). Da bei konstanter Ausbreitungsgeschwindigkeit eine bestimmte Zeit auch einer bestimmten Tiefe entspricht, können solche Darstellungen sehr nützlich sein, z.B. für die Detektion

eines Bewehrungsverlauf in einem Fussboden (vgl. Abb. 7.60 rechts). Dabei repräsentieren die Achsen X und Y die horizontalen Dimensionen.

7.27.2 Einsatzzweck und Fragestellung im Bereich Trassen

Das Georadarverfahren kommt in verschiedenen Variationen und für verschiedenen Zwecke im Bereich Trasse zum Einsatz. Niederfrequente Systeme (typischerweise 100 MHz – 500 MHz) werden in der Vorerkundung von Trassen eingesetzt und dienen dort der Ermittlung des geologischen Schichtaufbaus und der Detektion von Bauhindernissen wie Findlingen, Rohrleitungen (hierfür speziell ausgerichtete Geräte und Software verfügbar), Bauwerksresten oder im Einzelfall auch Altmunition.

Im Bereich Bau wird das Radarverfahren zur Qualitätssicherung eingesetzt, z. B. der grossflächigen Nachmessung von Schichtdicken (Beton und Asphalt) oder der Lagebestimmung von Bewehrung und Dübeln (Betontrassen). Für Schichtdicken- und Tiefenbestimmungen ist stets eine lokale Kalibrierung notwendig, da z. B. unterschiedliche Feuchte zu unterschiedlichen Wellengeschwindigkeiten führt.

Untergeordnet kann das Radarverfahren auch zur Detektion von Abweichungen in Materialparametern eingesetzt werden. Dies beschränkt sich meist auf die Detektion von durchfeuchteten Bereichen. Neuere Veröffentlichungen weisen auch auf Einsatzmöglichkeiten bei der Detektion von Bewehrungskorrosion hin. Dies ist aber noch nicht validiert und im Bereich Trasse ohnehin weniger relevant.

Fallbeispiel: Asphaltbelag auf einer Brücke

Um die Belagsdicke auf einer Brücke zu bestimmen, wurde diese mit einem mobilen Radarsystem entlang mehrerer Messlinien befahren. Als Ergebnis wurde eine Karte mit Belagsdicken erstellt (vgl. Abb. 7.61).

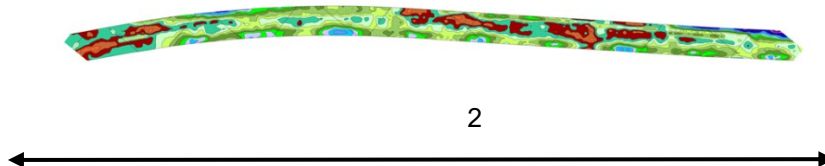


Abb. 7.61 Farbkodierte Dicke des Asphaltbelags auf einer Brücke

7.27.3 Datenerfassung, Raumbezug, Messgrößen und Genauigkeit

Die Datenerfassung erfolgt in Bewegung (je nach Gerät 0,1 m/s bis 25 m/s) mit kommerziellen Messgeräten. Arraygeräte nehmen gleichzeitig mehrere Spuren auf (bis 2,5 m Breite). Der Raumbezug erfolgt lokal durch händische Einmessung, bei fahrenden Geräten in der Regel durch GNSS. Messgrösse ist für eine Einzelmessung (Spur, A-Scan) Amplitude über Zeit. Zahlreiche Einzelspuren entlang einer Linie oder auf einer Fläche werden zu 2D oder 3D Bildern des Untergrundes verarbeitet, aus denen die Position/Tiefenlage von Schichtgrenzen und Objekten abgelesen werden kann. Die Geschwindigkeit der Radarwellen (kann aus den Messungen ermittelt werden) gibt Hinweise auf Material und/oder Feuchte. Die Messungen sind zerstörungsfrei.



Abb. 7.62 Mobiles Georadar-System der OST, Hornantennen zur Bestimmung des Schichtaufbaus

7.27.4 Entwicklungsstand, Anwendungsgrenzen, Kosten

Entwicklungsstand/Kosten: Geräte (€ 5.000 – € 200.000) und Auswertesoftware kommerziell verfügbar und in der Praxis eingesetzt. Empfehlungen verfügbar.

Anwendungsgrenzen: Die Eindringtiefe ist je nach Antennenfrequenz, Material und Feuchte begrenzt. Die Fähigkeit zur Materialidentifikation ist begrenzt (Mehrdeutigkeit). Die Fähigkeit zur Schichterkennung ist begrenzt (dünne Ablösungen, Asphaltsschichten). Die Auflösung (dünnste erkennbare Schicht) und Genauigkeit beträgt bestenfalls 1 cm.

7.27.5 Ergänzende Ausschreibungsanforderungen

Als Basis für die zu definierenden Anforderungen an die Ausschreibung dient ein objektspezifisches Messkonzept (siehe Kapitel 2.2), welches die spezifischen Gegebenheiten des Objekts entweder für das Trasse oder Naturgefahren berücksichtigt.

Mit Berücksichtigung dieser aufgeführten Themen können, zusammen mit den vorgängig unter Datenerfassung, Raumbezug, Messgrößen und –genauigkeit angeführten Rahmenbedingungen, die Ausschreibungsanforderungen spezifisch vervollständigt werden.

Insbesondere sind die Anforderungen an max. notwendige Untersuchungstiefe, die notwendige Genauigkeit bei der Schichtmächtigkeit, die erforderliche Auflösung (kleinste zu erkennende Schichtmächtigkeit) sowie der zur erwartende Schichtaufbau (Material, Mächtigkeit) in der Ausschreibung zu definieren, da er die grundsätzliche Eignung des Verfahrens und Auswahl von Gerät und Messparametern bestimmt.

7.27.6 Literaturverzeichnis

Sonstige Literatur / Forschungsberichte

[57] E. Carrick Utsi, „Ground Penetrating Radar, Theory and Practice,“ *Elsevier Science & Technology*, 2017.

[58] DGZfP, Merkblatt B10 Radar.

[59] J. Hugenschmidt, „Ground penetrating radar for the evaluation of reinforced concrete structures,“ in *Non-Destructive Evaluation of Reinforced Concrete Structures*, H. R. C. Maierhofer und G. Dobmann, Hrsg., Woodhead Publishing Limited, 2010, pp. 317-333.

7.28 Ultraschall-Echo

7.28.1 Beschrieb der Technologie

Das Ultraschallverfahren ist in [60] beschrieben. Das Messprinzip des Ultraschallverfahrens beruht auf der Auswertung von Veränderungen, die eine Ultraschallwelle in einem Bauteil durch Streuung an inneren Objekten erfährt. Die Ultraschallwelle wird an der Bauteiloberfläche beispielsweise durch eine piezoelektrische Anregung erzeugt und breitet sich als elastische Welle im Bauteil aus. Bei der Ausbreitung im Material tritt die Welle in Wechselwirkung mit der Materialstruktur und wird an ihr

gestreut, so bei Beton vorzugsweise an den Schichtgrenzen der Gesteinskörnung zur Betonmatrix.

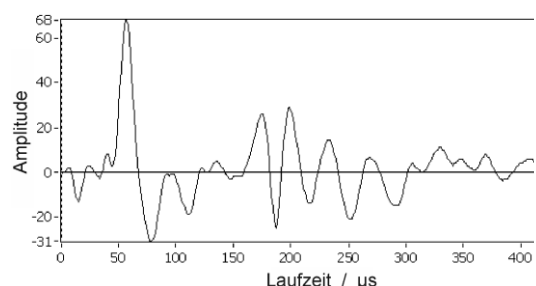
An Teilen der inneren Konstruktion, zum Beispiel Bewehrungsstäben oder Hüllrohren, werden Anteile der eingeschalteten Energie rückgestreut und gelangen wieder zur Oberfläche. An der Rückwand eines Bauteils wird ein grosser Anteil der Energie reflektiert. Zum Eintrag und zur Aufzeichnung der Schallenergie werden Prüfköpfe verschiedener Bauarten als Sender und Empfänger verwendet, die zur Messung und Ergebnisdarstellung an Ultraschallgeräte angeschlossen sind. Sender und Empfänger werden je nach angewandeter Methode unterschiedlich angeordnet.

Je nach Zugänglichkeit des Bauteils werden Sender und Empfänger auf der gleichen Seite des Bauteils angesetzt, was als Reflexions- oder Echoanordnung bezeichnet wird. Verfahren, die nach dieser Methode angewendet werden, bezeichnet man als Impuls-Echo-Verfahren. Ist ein beidseitiger Zugang möglich, spricht man von Transmissionsanordnung oder Durchschallung. In Durchschallung kann die Schallgeschwindigkeit sehr einfach bestimmt werden. Diese kann experimentell mit Materialkennwerten wie der Betondruckfestigkeit oder dem Erstarrungsverlauf von Frischbeton in Bezug gebracht werden. Werden in Impuls-Echo-Anordnung aufgezeichnete Amplituden über der Zeit aufgetragen, kann bei Kenntnis der Schallgeschwindigkeit auf die Tiefe von Objekten und auf die Bauteildicke geschlossen werden. Dabei kommt der Vorbereitung zur Aufzeichnung von genauen Laufzeiten durch Kalibrierung und Justierung eine besondere Bedeutung zu.

Erfolgt die Aufzeichnung entlang von Messlinien oder Messrastern mit definiertem Punktabstand, können Kenntnisse über Position, Tiefe und Ausdehnung von Objekten im Bauteil gewonnen werden. Durch entsprechende Auswertungsmethoden (Abbildungsverfahren, z. B. SAFT) können Geometrie und innere Konstruktion des untersuchten Bauteils bildgebend dargestellt werden. Dabei erlaubt die Anordnung mehrerer Prüfköpfe in einer bestimmten Apertur eine beschleunigte Datenaufnahme.



Abb. 7.63 Links: Gerät zur Ultraschall-Transmissionsmessung (proceq sa). Rechts: Gerät zur Ultraschall-Echomessung (ACS)



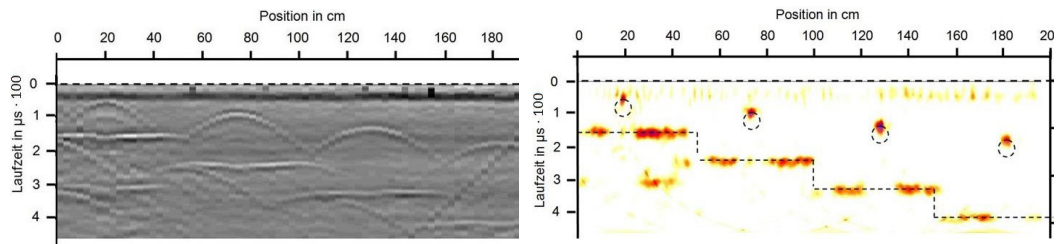


Abb. 7.64 Oben links: Stahlbeton-Probekörper: Oben rechts: Einzelnes Ultraschall-Messsignal (A-Scan).- Unten links: Zusammengesetzte Messsignale (B-Bild). Unten rechts: Bearbeitete Messsignal (SAFT), Ultraschall-Querschnitt durch das Objekt

7.28.2 Einsatzzweck und Fragestellung im Bereich Trassen

Das Ultraschall-Echo-Verfahren wird im Bereich Trasse bisher wenig, und dann überwiegend zur Dickenmessung von Betonfahrbahnen oder anderen Bauelementen aus Beton bis ca. 1 m Dicke eingesetzt. Versuche zur Schichtdickenbestimmung an Asphalttrassen sind in der Literatur dokumentiert, aber noch nicht in der Praxis validiert. Die Lokalisierung grösserer Einbauteile (in Beton, z. B. Bewehrung ab 12 mm) ist ebenfalls möglich. Aus den Wellengeschwindigkeiten lassen sich qualitativ auch Druckfestigkeiten und elastische Moduli ableiten, wofür eine lokale Kalibrierung an Bohrkernen notwendig ist.

7.28.3 Datenerfassung, Raumbezug, Messgrößen und Genauigkeit

Datenerfassung: Kommerzielle Messgeräte mit Sende- und Empfangsprüfköpfen (für Durchschallung meist Kompressionswellen, für Echo meist Scherwellen) liefern Empfangssignale (Amplitude über Zeit, „A-Scan“). Diesen werden zum Teil die Laufzeiten bestimmter Signalanteile direkt entnommen (z. B. zur Geschwindigkeitsbestimmung in Durchschallung). Bei Echo-Messungen wird in der Regel eine Vielzahl von Signalen zusammen zu einem Bild der Objektstruktur verarbeitet, in dem dann z. B. die Tiefe der Rückwand (Dicke) oder die Lage von Einbauteilen erkennbar sind. Die zur Berechnung notwendige Geschwindigkeit muss abgeschätzt oder besser aus den Messungen bestimmt werden.

Raumbezug: Meist manuelle Einmessung der Messorte

Messgrößen: Amplitude über Zeit (Messsignal), abgeleitet z. B. Bauteildicken, Position von Einbauteilen etc.

Genauigkeit: Bedingt durch die Wellenlänge der Signale (einige cm) Auflösung und Genauigkeit 1 – 2 cm, bei ausführlicher Kalibrierung besser.

7.28.4 Entwicklungsstand, Anwendungsgrenzen, Kosten

Kommerzielle Messtechnik (€ 10.000 - € 40.000) verfügbar, eingeführtes Messverfahren für

Stahl- und Spannbeton. Für Asphalt nur im Ausnahmefall einsetzbar. Da manuelles Umsetzen und Ankoppeln notwendig im Vergleich zu Radar langsamer Messfortschritt.

7.28.5 Ergänzende Ausschreibungsanforderungen

Als Basis für die zu definierenden Anforderungen an die Ausschreibung dient ein objektspezifisches Messkonzept (siehe Kapitel 2.2), welches die spezifischen Gegebenheiten des Objekts entweder für das Trasse oder Naturgefahren berücksichtigt.

Mit Berücksichtigung dieser aufgeführten Themen können, zusammen mit den vorgängig unter Datenerfassung, Raumbezug, Messgrößen und –genauigkeit angeführten

Rahmenbedingungen, die Ausschreibungsanforderungen spezifisch vervollständigt werden.

Insbesondere sind die Anforderungen an max. notwendige Untersuchungstiefe, die notwendige Genauigkeit bei der Schichtmächtigkeit, die erforderliche Auflösung (kleinste zu erkennende Schichtmächtigkeit) sowie der zu erwartende Schichtaufbau (Material, Mächtigkeit) in der Ausschreibung zu definieren, da er die grundsätzliche Eignung des Verfahrens und Auswahl von Gerät und Messparametern bestimmt.

7.28.6 Literaturverzeichnis

Sonstige Literatur / Forschungsberichte

[60] DGZfP, Merkblatt B04 Ultraschall.

7.29 Impakt-Echo

7.29.1 Beschreibung der Technologie

Das Impakt-Echo-Verfahren zur zerstörungsfreien Prüfung von Bauteilen aus mineralischen Baustoffen (meist Beton) wird im Merkblatt B11 der DGZfP [61].

Für das Impakt-Echo-Verfahren wird an der Oberfläche eines Bauteils ein kurzer mechanischer Impuls (Impakt) ausgelöst, der eine elastische Welle im Bauteil angeregt. Diese erzeugt eine Art stehender Welle zwischen Vorder- und Rückseite des Bauteils. Diese wird durch einen Sensor nahe dem Anregungspunkt registriert. Für die Auswertung wird das Messsignal in den Frequenzbereich transformiert, wo sich die stehende Welle als Resonanzanzeige bemerkbar macht. Aus der Resonanzfrequenz kann bei bekannter Schallgeschwindigkeit die Dicke eines Bauteils bestimmt werden. Die Lokalisierung von Fehlstellen wird ebenfalls aus Dickenmessungen abgeleitet (vgl. Abb. 7.65).



Abb. 7.65 Links: Prinzip der Dickenmessung mit Impakt-Echo. Rechts: Typisches Einzelmessergebnis im Frequenzbereich mit ausgeprägter, der Bauteildicke entsprechender Resonanz

Ziel einer Prüfung mit diesem Verfahren ist in erster Linie die Ermittlung der Dicke von Bauteilen oder von Deckschichten im Bereich von 5 cm bis 80 cm, der Nachweis von lokalen oder flächigen Verbundstörungen oder Delaminationen oder die Ortung von Hohlstellen. Das Impakt-Echo-Verfahren kann sowohl im Rahmen einer Qualitätssicherung als auch bei Schadensanalysen eingesetzt werden.

Die Vorteile des Verfahrens gegenüber vergleichbaren zerstörungsfreien Prüfverfahren liegen im geringen technischen Aufwand einer Einzelmessung und in der Tatsache, dass aufgrund der benutzten niedrigen Frequenzen und der hohen eingebrachten Energie auch relativ dicke Bauteile mit hohem Bewehrungsanteil geprüft werden können. Nachteilig ist seine Unempfindlichkeit gegenüber Objekten mit kleinem Querschnitt, weshalb es sich für die Suche nach kleinformatigen Fehlstellen, Spannkänen o. ä. weniger eignet. Bei der Auswertung der Messsignale ist Erfahrung nötig, um die teilweise komplexen Signalformen interpretieren zu können (vgl. Abb. 7.66).

In der Richtlinie RI-ZFP-TU [62] wird die Anwendung des Impakt-Echo-Verfahrens zur Dickenmessung von Tunnelinnenschalen dargestellt. Der ASTM-Standard C 1383 [63] geht auf Dickenmessung mit dem Verfahren allgemein ein. In einigen Punkten, z. B. Anwendungsfelder und -grenzen, bestehen Unterschiede zwischen den einzelnen Richtlinien.

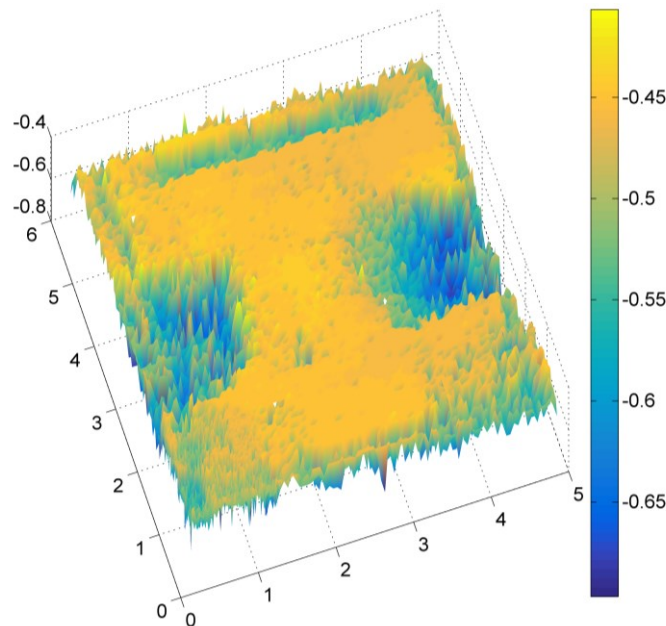


Abb. 7.66 Ergebnisse flächenhafter Dickenmessungen mit Impakt-Echo auf einer Testplatte (Stärke nach Plan 0,45 m) mit zwei planmässigen Bereichen höherer Bauteilstärke (blau, rechts und links) sowie scheinbar erhöhter Bauteilstärke durch einen eingelagerten Spannkanal (oben). Typisch sind die teils fehlerhaften Werte am Plattenrand.

7.29.2 Einsatzzweck und Fragestellung im Bereich Trassen

Bestimmung von Schichtdicken an Betonfahrbahnen.

7.29.3 Datenerfassung, Raumbezug, Messgrößen und Genauigkeit

- Datenerfassung: Energieeintrag („Schuss“) z. B. durch Schlag mit Hämmerchen (einige Gramm bis 10er Gramm, Anregungsfrequenz einige kHz), Registrierung aufbaufelächermontiertem Piezo-Beschleunigungsaufnehmer (100 Hz – min. 20 KHz) in einigen cm Entfernung, verbunden mit Datenerfassungseinheit.
- Raumbezug: Manuelle örtliche Einmessung des Messorts
- Messgrößen: Bei Aufzeichnung am Piezo Amplitude über Zeit (Spur), umgesetzt in Frequenzspektrum. Umsetzung von Resonanzpeaks f [Hz] in Tiefen d [m] über abgeschätzte oder kalibrierte Wellengeschwindigkeit c [m/s] über $d = 0,96 \cdot c / 2 \cdot f$.
- Genauigkeit: Tiefenlage von Schichten 5 - 10%

7.29.4 Entwicklungsstand, Anwendungsgrenzen, Kosten

Kommerziell verfügbares eingeführtes Messverfahren. Dünne Schichten und weiche Schichten werden u. U. nicht erkannt. Kosten Apparatur und Software ab ca. € 6.000.

Oftmals propagierte Anwendungsmöglichkeiten wie Spannkanalortung oder Verpressfehler lassen sich in der Praxis meist nicht nachvollziehen.

Nahe Bauteilrändern liefern oft irreführende Ergebnisse.

7.29.5 Ergänzende Ausschreibungsanforderungen

Als Basis für die zu definierenden Anforderungen an die Ausschreibung dient ein objektspezifisches Messkonzept (siehe Kapitel 2.2), welches die spezifischen Gegebenheiten des Objekts entweder für das Trasse oder Naturgefahren berücksichtigt.

Mit Berücksichtigung dieser aufgeführten Themen können, zusammen mit den vorgängig unter Datenerfassung, Raumbezug, Messgrößen und –genauigkeit angeführten Rahmenbedingungen, die Ausschreibungsanforderungen spezifisch vervollständigt werden.

Insbesondere sind die Anforderungen an max. notwendige Untersuchungstiefe, die notwendige Genauigkeit bei der Schichtmächtigkeit, die erforderliche Auflösung (kleinste zu erkennende Schichtmächtigkeit) sowie der zur erwartende Schichtaufbau (Material, Mächtigkeit) in der Ausschreibung zu definieren, da er die grundsätzliche Eignung des Verfahrens und Auswahl von Gerät und Messparametern bestimmt.

7.29.6 Literaturverzeichnis

Sonstige Literatur / Forschungsberichte

[61] DGZfP, Merkblatt B11 Impact Echo.

[62] RI-ZFP-TU, „Richtlinie für die Anwendung der zerstörungsfreien Prüfung von Tunnelinnenschalen; Ausgabe 2018-01,“ ZTV-ING, Bd. 5: Tunnelbau, pp. 32-38, 2018.

[63] ASTM C 1383, Standard Test Method for Measuring the P-Wave Speed and the Thickness of Concrete Plates Using the Impact-Echo Method, West Conshohocken, P.A.: ASTM International, 2004.

7.30 Refraktionsseismik

7.30.1 Beschreibung der Technologie

Die Refraktionsseismik gehört zu den seismischen Verfahren, bei denen meist aktiv (z. B. durch Hammerschlag) eine elastische Welle in den Untergrund geschickt wird und die durch Reflektion oder andere Effekte an der Oberfläche empfangbare Signale mit Geophonen (Schwingungsaufnehmern) aufgenommen und die darin enthaltene Information ausgewertet werden.

Mit Hilfe der Refraktionsseismik lassen sich strukturelle und petrophysikalische Parameter ermitteln. Sie wird z.B. zur Vermessung von Deponiesohlen, zur Kartierung von Grundwasser- und Felshorizonten, sowie von Wasserwegsamkeiten und zur Lokalisierung grösserer Hohlräume eingesetzt.

Die Refraktionsseismik [64][65] nutzt einen Spezialfall der Ausbreitung elastischer Wellen im geschichteten Medium. Falls die elastischen Parameter sich abrupt an einer Grenze ändern und dabei die Geschwindigkeit c_1 darüber kleiner ist als c_2 darunter, breitet sich ein Teil der Energie der elastischen Wellen entlang dieser Grenze mit c_2 aus und strahlt kontinuierlich in Richtung Oberfläche unter einem bestimmten Winkel („kritischer“ Winkel $i = \arcsin(c_1/c_2)$), abgestrahlt (refraktiert). Die refraktierten Wellen treffen ab einer gewissen Entfernung als erste am Geophon ein und sind somit leicht zu identifizieren. Aus diesen Einsätzen lassen sich Aussagen über die Lage des Refraktors und die Geschwindigkeit c_2 unterhalb des Refraktors ableiten.

Die Datenakquisition erfolgt zumeist auf Linienprofilen, wobei die Anordnung der Quellen und der Empfängereinheiten eine Mehrfachüberdeckung der zu untersuchenden Struktur erlauben sollte. Typische Geophonabstände liegen zwischen 0,5 und 5 m, die Schusspunktstände variieren zwischen 1 und 50 m. Aus den Messdaten werden die Ersteinsätze, d.h. die Ankunftszeit der ersten Wellenfront entnommen.

Man unterscheidet drei Gruppen von Auswerteverfahren. Unter direkten Verfahren versteht man Methoden, direkt aus den Ersteinsätzen ein Modell (d. h. Lage von Schichtgrenzen und Geschwindigkeiten) abzuleiten. Die wichtigsten Repräsentanten hierfür sind die General Reciprocal Method und das Wellenfrontenverfahren. Bei

Vorwärtsmodellierungstechniken wird die Feldmessung ausgehend von einem Startmodell, das alle Vorinformationen enthält, im Rechner mit Hilfe sog. Raytracing-Verfahren simuliert. Das Ergebnis sind synthetische Messdaten, die mit den Felddaten verglichen werden. Durch manuelle Veränderung des Modells kann ein Modell entwickelt werden, das die Daten möglichst gut erklärt. Anders als bei den oben geschilderten Verfahren geht man bei der refraktionsseismischen Tomographie nicht von Schichtgrenzen, sondern einer kontinuierlichen Geschwindigkeitsverteilung aus. Zu einem einfachen Startmodell berechnet ein Vorwärtsalgorithmus synthetische Daten zum Vergleich mit den Messwerten. Aus den Abweichungen wird ein verbessertes Modell abgeleitet. Diese Schritte werden im Rechner automatisch wiederholt, bis eine möglichst gute Anpassung erreicht ist („Inversion“).

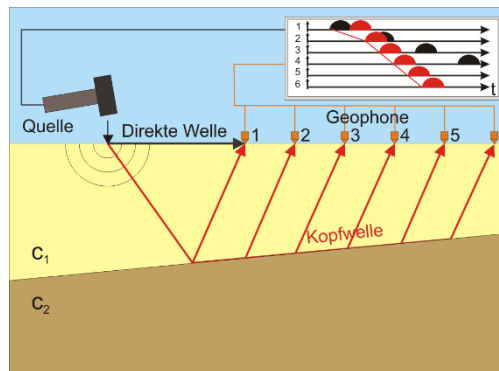


Abb. 7.67 Links: Prinzip der Refraktionsseismik. Rechts: Messdurchführung

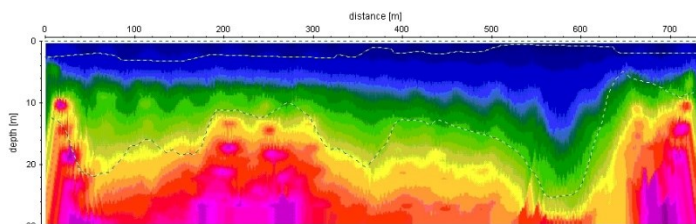


Abb. 7.68 Refraktionsseismisches Ergebnis: konventionelle Auswertung (gestrichelte Linien) und tomographisches Geschwindigkeitsmodell (Farbsektion).

7.30.2 Einsatzzweck und Fragestellung im Bereich Trassen

Bestimmung von Schichtgrenzen (z. B. Grundwasserspiegel, Felsoberkante) im Baugrund. Eingeschränkt auch Schichtparameter (z. B. dyn. E-Moduli aus Wellengeschwindigkeiten, Abschätzung petrophysikalischer Parameter)

7.30.3 Datenerfassung, Raumbezug, Messgrößen und Genauigkeit

- Datenerfassung: Energieeintrag („Schuss“) z. B. durch Hammerschlag. Aufzeichnung mit Ketten von Geophonen, verbunden mit einer Registrierapparatur.
- Raumbezug: Manuelle örtliche Einmessung von Schusspunkt und Geophonpositionen.
- Messgrößen: Bei Aufzeichnung an Geophonen Amplitude über Zeit (Spur). Nach Auswertung Tiefe von Schichtgrenzen, Wellengeschwindigkeit in der Schicht (hilft bei Materialansprache).
- Genauigkeit: Tiefenlage von Schichten 5 - 10%

7.30.4 Entwicklungsstand, Anwendungsgrenzen, Kosten

Kommerziell verfügbares eingeführtes Messverfahren. Dünne Schichten und weiche Schichten werden u. U. nicht erkannt. Kosten Apparatur und Software ab ca. € 20.000.

Nur bei einfachen Lagerungsverhältnissen und genügend grossen Geschwindigkeitskontrasten zwischen den einzelnen Schichten sind Datenaufnahme und -interpretation relativ einfach und effizient durchführbar. Bei komplexeren Verhältnissen ist es sinnvoll, parallel auch andere Methoden zur Plausibilitätsprüfung und Qualitätskontrolle (für letzteres insbesondere die Vorwärtsmodellierung) einzusetzen.

7.30.5 Ergänzende Ausschreibungsanforderungen

Als Basis für die zu definierenden Anforderungen an die Ausschreibung dient ein objektspezifisches Messkonzept (siehe Kapitel 2.2), welches die spezifischen Gegebenheiten des Objekts entweder für das Trasse oder Naturgefahren berücksichtigt.

Mit Berücksichtigung dieser aufgeführten Themen können, zusammen mit den vorgängig unter Datenerfassung, Raumbezug, Messgrössen und –genauigkeit angeführten Rahmenbedingungen, die Ausschreibungsanforderungen spezifisch vervollständigt werden.

Insbesondere sind die Anforderungen an max. notwendige Untersuchungstiefe, die notwendige Genauigkeit bei der Schichtmächtigkeit, die erforderliche Auflösung (kleinste zu erkennende Schichtmächtigkeit) sowie der zur erwartende Schichtaufbau (Material, Mächtigkeit) in der Ausschreibung zu definieren, da er die grundsätzliche Eignung des Verfahrens und Auswahl von Gerät und Messparametern bestimmt.

7.30.6 Literaturverzeichnis

Sonstige Literatur / Forschungsberichte

[64] DGZfP, Merkblatt B04 Ultraschall.

[65] DGZfP, Merkblatt B11 Impakt Echo.

7.31 Oberflächenwellenseismik (SASW/MASW)

7.31.1 Beschrieb der Technologie

Die Oberflächenwellenseismik in ihren Varianten SASW/MASW gehört zu den seismischen Verfahren, bei meist aktiv (z. B. durch Hammerschlag) eine elastische Welle in den Untergrund geschickt wird und die durch Reflektion oder andere Effekte an der Oberfläche empfangbare Signale mit Geophonen (Schwingungsaufnehmern) aufgenommen und die darin enthaltene Information ausgewertet wird.

Die Anregung von Oberflächenwellen an einem geologischen Standort kann durch passive oder aktive seismische Quellen erfolgen. In der Regel werden bei der Untersuchung aktive Anregungsverfahren (z. B. Hammerschlag, Fallgewicht) genutzt. Prinzipiell können Rayleighwellen oder Lovewellen für Untersuchung genutzt werden. In der Regel beschränkt sich die Auswertung auf Rayleighwellen. Ein wesentlicher Unterschied von Oberflächenwellen gegenüber Körperwellen ist das dispersive Verhalten (Frequenzabhängigkeit der Wellengeschwindigkeit). Die Oberflächenwellenverfahren haben einen breiten Einsatzbereich von der Seismologie über die Baugrundseismik bis zur Strukturanalyse in der zerstörungsfreien Prüfung. Für alle Oberflächenwellenverfahren gilt, dass die Auflösung mit der Tiefe abnimmt. Oberflächenwellenverfahren können im Gegensatz z. B. zur Refraktionsseismik auch eingebettete Niedriggeschwindigkeits-schichten detektieren. Die Ausrüstung der Oberflächenwellenseismik ist bis auf den Frequenzbereich der genutzten Geophone identisch mit der Technik der anderen Oberflächenverfahren. Die Geophone sollten einen konstanten Phasenverlauf zwischen 4 und 400 Hz aufweisen. Um Nahfeldeffekte zu vermeiden, sollte der Abstand der Quelle zur Auslage eine ausreichende Entfernung (ca. 10 m) besitzen. Aliasing im Bereich der räumlichen Abtastung muss durch einen entsprechend kleinen Geophonabstand Δx vermieden werden ($k_N = \pi/\Delta x \geq k_{max}$). Aus den Messdaten werden durch passende Verfahren (z. B. Frequenz-Wellenzahl-Transformation) zunächst die experimentellen Dispersionskurven berechnet. Diese liefern die Grundlage für den nachfolgenden Inversionsprozess. Nach Möglichkeit sind alle auftretenden Schwingungsmoden in die Auswertung einzubeziehen. Das Ergebnis ist ein Tiefenprofil

der Scherwellengeschwindigkeiten («SASW»). Verschiedene Softwarelösungen [66], ermitteln aus einem fortschreitenden 1D-Profil über Mittelung oder Geostatistik ein vereinfachtes 2D- oder 3D- Profil der Wellengeschwindigkeiten («MASW»). Die so entstanden 2D- oder 3D-Profile sind in jedem Fall durch andere Messverfahren bzw. direkten Baugrundaufschlüsse stichprobenweise auf Plausibilität zu prüfen.

Die Messungen der Oberflächenwellenfelder sollten immer in beiden Auslagenrichtungen erfolgen, um vorhandene Schichtneigungen in dem Baugrund erkennen zu können. Die Anwendung der üblichen, horizontal geschichteten Vorwärtsmodelle innerhalb der Inversion ergibt einen gemittelten Wert des Tiefenprofils über die Auslagenlänge. Für die Detektion von lateral veränderlichen Gebieten sollten andere Vorwärtsmodellierungen, wie Finite Differenzen oder Finite Elemente, genutzt werden. Bei Nutzung der Phasendifferenzen zur Bestimmung der Dispersionscharakteristik, ist auf einen korrekten Einsatz der Anfangsphasendurchgänge zu achten.

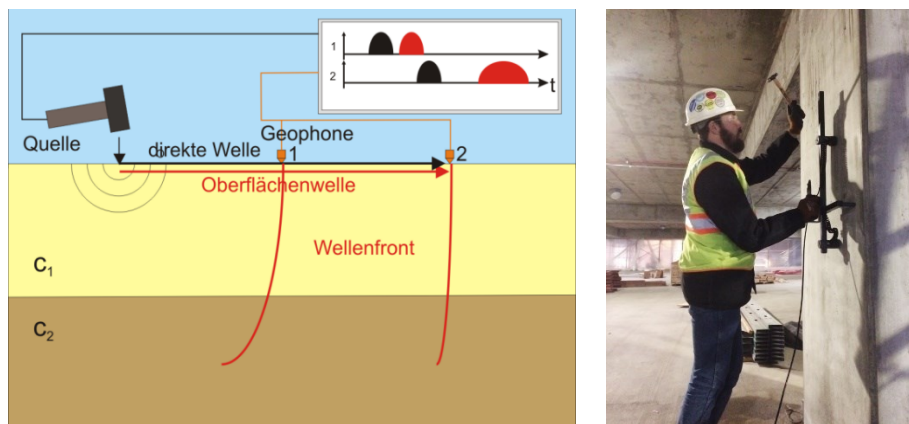


Abb. 7.69 Links: Prinzip der Oberflächenwellenseismik (SASW, bei der MASW zusätzliche Geophone). Rechts: Ausführung SASW an Beton (Olson Engineering, USA)

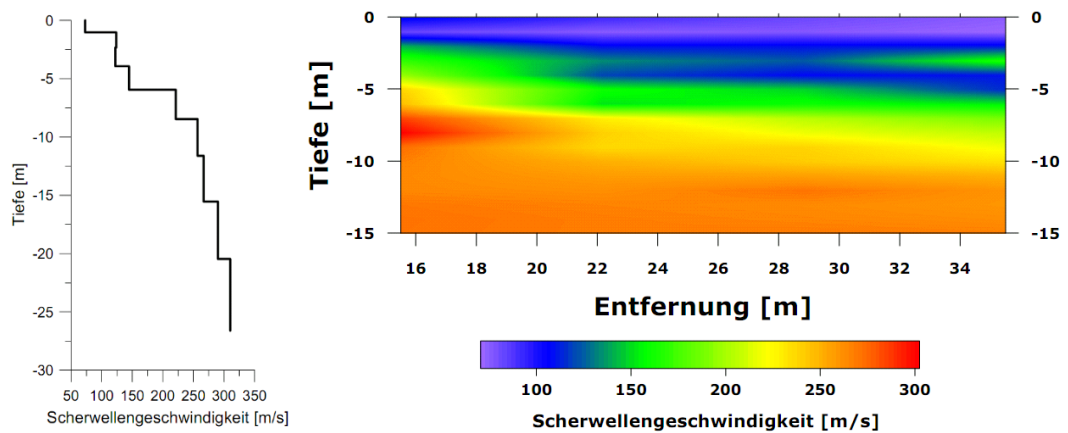


Abb. 7.70 Oberflächenwellenseismik: Typische Ergebnisse für SASW (links) und MASW (rechts)

7.31.2 Einsatzzweck und Fragestellung im Bereich Trassen

Für die Vorerkundung wird die geophysikalische Variante von SASW/MASW (Hammer oder Vibrator als Quelle, Geophone als Sensoren, Frequenzen 1 Hz – 1 kHz) eingesetzt. Das Messziel der Oberflächenwellenverfahren ist dann die Ermittlung eines Tiefenprofils der seismischen Scherwellengeschwindigkeit, aus welchem die geologische Struktur

(Schichtdicken) und insbesondere die vorhandene Initialschubsteifigkeiten im Baugrund abgebildet werden [66][67].

Analog ist der Einsatz auch in der Bauphase an Tragschichten möglich (Schichtdicken, Steifigkeiten).

Eine kleinskalige Variante von SASW (Piezos als Quellen und Empfänger, Frequenzen 1 kHz – 50 kHz) kann auch zur Bestimmung von elastischen Parametern an Betonbauwerken genutzt werden, (vgl. Abb. 7.70 rechts) [68].

7.31.3 Datenerfassung, Raumbezug, Messgrößen und Genauigkeit

- Datenerfassung: Energieeintrag („Schuss“) z. B. durch Hammerschlag. Aufzeichnung mit Ketten von Geophonen, verbunden mit einer Registrierapparatur.
- Raumbezug: Manuelle örtliche Einmessung von Schusspunkt und Geophonpositionen.
- Messgrößen: Bei Aufzeichnung an Geophonen Amplitude über Zeit (Spur). Nach Auswertung Tiefe von Schichtgrenzen, Wellengeschwindigkeit in der Schicht (hilft bei Materialansprache).
- Typische Genauigkeit: Tiefenlage von Schichten 10%

7.31.4 Entwicklungsstand, Anwendungsgrenzen, Kosten

Kommerziell verfügbares eingeführtes Messverfahren. Dünne Schichten werden u. U. nicht erkannt. Kosten Apparatur und Software ab ca. € 20.000.

Nur bei einfachen Lagerungsverhältnissen und genügend grossen Geschwindigkeitskontrasten zwischen den einzelnen Schichten sind Datenaufnahme und -interpretation relativ einfach und effizient durchführbar. Bei komplexeren Verhältnissen ist es sinnvoll, parallel auch andere Methoden zur Plausibilitätsprüfung und Qualitätskontrolle (für letzteres insbesondere die Vorwärtsmodellierung) einzusetzen.

7.31.5 Ergänzende Ausschreibungsanforderungen

Als Basis für die zu definierenden Anforderungen an die Ausschreibung dient ein objektspezifisches Messkonzept (siehe Kapitel 2.2), welches die spezifischen Gegebenheiten des Objekts entweder für das Trasse oder Naturgefahren berücksichtigt.

Mit Berücksichtigung dieser aufgeführten Themen können, zusammen mit den vorgängig unter Datenerfassung, Raumbezug, Messgrößen und –genauigkeit angeführten Rahmenbedingungen, die Ausschreibungsanforderungen spezifisch vervollständigt werden.

Insbesondere sind die Anforderungen an max. notwendige Untersuchungstiefe, die notwendige Genauigkeit bei der Schichtmächtigkeit, die erforderliche Auflösung (kleinste zu erkennende Schichtmächtigkeit) sowie der zur erwartende Schichtaufbau (Material, Mächtigkeit) in der Ausschreibung zu definieren, da er die grundsätzliche Eignung des Verfahrens und Auswahl von Gerät und Messparametern bestimmt.

7.31.6 Literaturverzeichnis

Sonstige Literatur / Forschungsberichte

[66] DGZfP, Merkblatt B08 Baugrunderkundung.

[67] ASTM D6758-02, „Standard Test Method for Measuring Stiffness and Apparent Modulus of Soil and Soil-Aggregate In-Place by an Electro-Mechanical Method,“ in Book of Standards.

[68] DGZfP, Merkblatt B02: Zerstörungsfreie Betondeckungsmessung und Bewehrungsart an Stahl- und Spannbetonbauteilen, 2021.

7.32 Geoelektrik

7.32.1 Beschrieb der Technologie

Geoelektrische Messmethoden ermitteln die Verteilung des spezifischen elektrischen Widerstands im Untergrund. Dies geschieht meist durch Einspeisung eines Gleichstromes oder eines niederfrequenten Wechselstromes durch zwei Elektroden in den Boden und Messung der Spannung an separaten Sonden. Mit einem sogenannten Geometrie-Faktor, der die Anordnung der Elektroden berücksichtigt, wird aus Strom und Spannung der scheinbare spezifische Widerstand ρ_a berechnet. Die Eindringtiefe wird dabei massgeblich vom Elektrodenabstand beeinflusst. Für die Rekonstruktion der Werte sind zahlreiche Einzelmessungen und spezielle Software notwendig.

Der spezifische elektrische Widerstand des Bodens wird von zahlreichen Faktoren beeinflusst, wie der Bodenart, dem Feinkornanteil (Art, Menge), der wirksamen Porosität und dem Wassergehalt sowie der Leitfähigkeit des Porenwassers. Es ist daher in der Regel nicht möglich, vom spezifischen elektrischen Widerstand eindeutig auf eine bestimmte Materialeigenschaft zu schliessen.

Die Anordnung der vier Elektroden für die Messung basiert meist auf standardisierten Basisanordnungen („Messkonfigurationen“). Diese Basiskonfigurationen werden hinsichtlich Elektrodenabstand und Position verändert, um ein Bild des Untergrundes zu erhalten. Für geoelektrische Messungen sind kommerzielle Apparaturen erhältlich. Stand der Technik sind Geräte, die mit Multielektrodenkabeln mit 24 bis 256 Anschlüssen verbunden werden und diese für die notwendigen Einzelmessungen durchschalten.

Für Messungen zur geotechnischen Erkundung hat sich die sogenannte 2D-Geoelektrik bewährt. Hierbei werden die Anordnungen entlang einer Profillinie bewegt und in ihrer Eindringtiefe verändert, um eine sogenannte Pseudosektion zu erstellen, bei der die gemessenen scheinbaren spezifischen elektrischen Widerstände bezüglich der Messposition und einer fiktiven Eindringtiefe aufgezeichnet werden. Die Anzahl unterschiedlicher Eindringtiefen bestimmt dabei den erfassten Tiefenbereich und die vertikale Auflösung. Für spezielle Einsatzzwecke lassen sich auch 1D-Messungen (geoelektrische Sondierungen) oder 3D-Messungen mit flächenhaften Elektrodenanordnungen durchführen. Aus den oft mehreren hundert Einzelmessungen müssen die realen Werte des spezifischen elektrischen Widerstandes im Untergrund zumindest angenähert rekonstruiert werden. Dies geschieht mit Inversionssoftware. Dabei werden ausgehend von einem Startmodell die für das Modell berechneten Messwerte schrittweise an die gemessenen Daten angepasst. Dabei ist insbesondere bei Querprofilen die Topographie des Messprofils zu berücksichtigen. Als Ergebnis erhält man einen Vertikalschnitt des spezifischen elektrischen Widerstandes.

Die Geoelektrik liefert nicht direkt die von der Geotechnik geforderten Parameter. Und nur in wenigen Fällen ist eine direkte Umrechnung des spezifischen elektrischen Widerstandes in Wassergehalte oder Porosität möglich. In der Regel erfolgt die Interpretation anhand von Bohrerergebnissen und begleitenden Laboruntersuchungen, die lokal mit den Ergebnissen der Geoelektrik verglichen werden. Mit Hilfe dieser Kalibrierung wird der geoelektrische Schnitt in einen geologisch-geotechnischen Schnitt transformiert.

Die Geoelektrik entspricht physikalisch der bei Kunstbauten eingesetzten Widerstandsmethode („Wennersonde“).

Um die Mehrdeutigkeit des spezifischen elektrischen Widerstandes bei der Interpretation zu verringern, können zusätzliche Messgrössen erfasst werden. Die Methode der **Induzierten Polarisation** (IP) misst die elektrische Aufladefähigkeit des Bodens (Zeitbereichs-IP) oder die Abhängigkeit des Widerstandes von der Messfrequenz (Spektrale IP, SIP). Mit dieser Methode kann in Einzelfällen die lithologische Ansprache verbessert oder die hydraulische Leitfähigkeit abgeschätzt werden [69]. Der Messaufwand ist allerdings deutlich höher als bei der Widerstandsgeoelektrik.

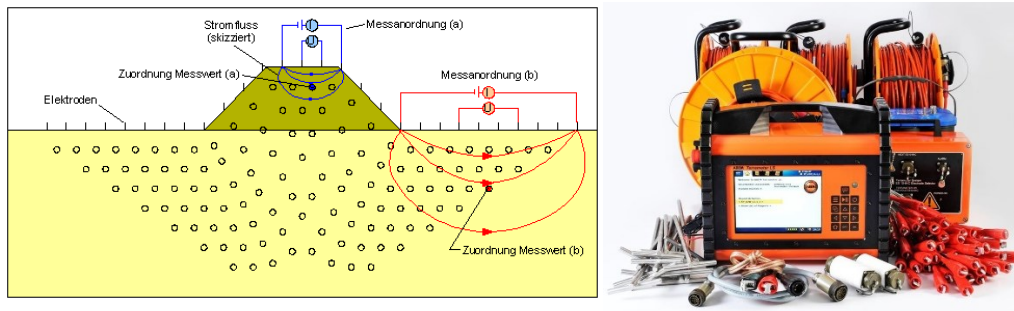


Abb. 7.71 Links: Prinzip der 2D-Geoelektrik, hier Messung über einen Deich. Rechts: Geoelektrisch Messausrüstung (abem.se)

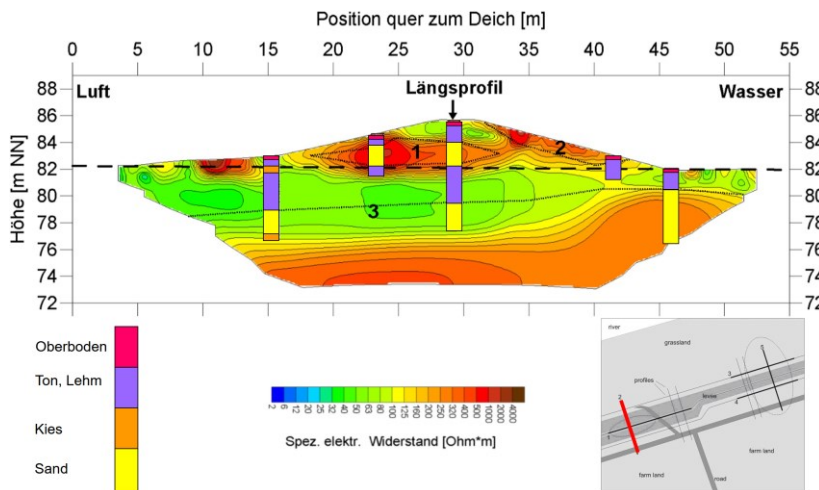


Abb. 7.72 2D-Geoelektrik, Ergebnisbeispiel: Schnitt durch einen Deich samt Untergrund

7.32.2 Einsatzzweck und Fragestellung im Bereich Trassen

Die Geoelektrik wird im Bereich Trasse ausschließlich zur Vorerkundung des Baugrunds eingesetzt. Sie ermöglicht die Abschätzung der Dicke geologischer Schichten sowie die Lokalisierung von Einlagerungen im Baugrund, eingeschränkt auch Materialparameter (z. B. Wassergehalt). Typische Anwendungsfälle sind z. B. die Lokalisierung von Torflinsen oder bindiger Einlagerungen und die Bestimmung ihrer Mächtigkeit. Dies dient zur Planung von Gründungen sowie evtl. notwendiger Bodenverbesserungsmassnahmen.

7.32.3 Datenerfassung, Raumbezug, Messgrößen und Genauigkeit

- Datenerfassung: Einleitung von Strom und Messungen von Spannungen (und damit elektrischer Widerstandsmessung) über in den Boden gesteckte Elektroden. Meist werden über vieladrige Kabel Ketten von Elektroden angesteuert und automatisiert durchgeschaltet.
- Raumbezug: Manuelle örtliche Einmessung von Elektrodenpositionen.
- Messgrößen: scheinbarer elektrischer Widerstand, durch Inversionsverfahren umgesetzt in 1D, 2D oder 3D Verteilung des „wahren“ spezifischen elektrischen Widerstand. Umsetzung in Materialansprache und/oder Wassergehalt. Bilder manchmal mehrdeutig und unscharf.
- Typische Genauigkeit: Tiefenlage von Schichten 10-20%, Auflösung mit der Tiefe stark abnehmend.

7.32.4 Entwicklungsstand, Anwendungsgrenzen, Kosten

Kommerziell verfügbares eingeführtes Messverfahren. Anwendungsgrenzen siehe oben. Dünne Schichten werden u. U. nicht erkannt. Kosten Apparatur und Software ab ca. € 10.000.

7.32.5 Ergänzende Ausschreibungsanforderungen

Als Basis für die zu definierenden Anforderungen an die Ausschreibung dient ein objektspezifisches Messkonzept (siehe Kapitel 2.2), welches die spezifischen Gegebenheiten des Objekts entweder für das Trasse oder Naturgefahren berücksichtigt.

Mit Berücksichtigung dieser aufgeführten Themen können, zusammen mit den vorgängig unter Datenerfassung, Raumbezug, Messgrößen und –genauigkeit angeführten Rahmenbedingungen, die Ausschreibungsanforderungen spezifisch vervollständigt werden.

Insbesondere sind die Anforderungen an max. notwendige Untersuchungstiefe, die notwendige Genauigkeit bei der Schichtmächtigkeit, die erforderliche Auflösung (kleinste zu erkennende Schichtmächtigkeit) sowie der zur erwartende Schichtaufbau (Material, Mächtigkeit) in der Ausschreibung zu definieren, da er die grundsätzliche Eignung des Verfahrens und Auswahl von Gerät und Messparametern bestimmt.

7.32.6 Literaturverzeichnis

Sonstige Literatur / Forschungsberichte

[69] E. Carrick Utsi, „Ground Penetrating Radar, Theory and Practice,“ Elsevier Science & Technology, 2017.

C 3 Einbauteile

Tab. 7.15 Einbauteile – Übersicht

Technologie Nr und Name	7.33	7.34	7.35
Radar	7.33.1	7.34.1	7.35.1
Kurzbeschreibung	Hochfrequente, elektromagnetische Wellen werden über eine Antenne in den Untergrund geschickt und die Echos aufgezeichnet. Laufzeiten und Amplituden geben Hinweise auf Einbauteile, Umlängsgriffe	Induktive Bewehrungssucher nutzen die Verzerrung der von ihnen erzeugten elektromagnetischen Felder um metallische Objekte zu lokalisieren	Metallische Objekte werden von der Oberfläche aus mit einem elektromagnetischen Puls magnetisiert. Das Magnetfeld wird dann vermessen und daraus Lage und Orientierung der Einbauteile bestimmt.
Einsatzzweck	Ortung von Bewehrung und Dübeln in Betonfahrbahnen	Ortung von Bewehrung	Ortung von metallischen Objekten
"ID"	ERd1	EBs1	EMg1
Typisierung	7.33.2 a. Messprinzip 2 indirekt b. Datenerfassung 13 akustisch c. Datenspeicher 1 digital d. Lokalisation 5 raumbezogen e. Raumbezug 1 integriert f. Zustand 3 nicht zerstörend Größen 3D-Lage von Einbauteilen	7.34.2 2 indirekt 3 elektromagnetisch 1 digital 5 raumbezogen 2 separat 3 nicht zerstörend 3D-Lage von Bewehrung	7.35.2 2 indirekt 3 elektromagnetisch 1 digital 5 raumbezogen 1 integriert 3 nicht zerstörend 3D-Lage von Einbauteilen
Messgrößen und -genauigkeit	7.33.3 Untersuchungs-/Tiefenbereich 0 - 0,5 m Auflösung 0,01 m Genauigkeit 0,01 m Bemerkungen Objektlagenbestimmung erst ab 5 cm	7.34.3 0 - 0,1 m 0,005 m 0,005 m eingeschränkt auch Durchmesserbestimmung möglich	7.35.3 0 - 0,5 m 0,005 m 0,01 m In der Praxis auf Dübelortung beschränkt
Nutzung in Fachgebieten	7.33.4 Trasse 2 Geotechnik 0 Naturgefahren 0 Umwelt 0 Einbauteilpunkt W	7.34.4 3 0 0 0 W, N	7.35.4 3 0 0 0 W
Kosten	7.33.4 Initial / einmalig wiederkehrend	7.34.4	7.35.4

7.33 Radar

7.33.1 Beschreibung der Technologie

Siehe 7.27.1

7.33.2 Einsatzzweck und Fragestellung im Bereich Trassen

Das Radarverfahren kann zur Lokalisierung und Tiefenbestimmung von Dübeln und Bewehrung in Betonfahrbahnen eingesetzt werden. Bei der Vorerkundung dient es z. B. zur Lokalisierung von Rohrleitungen im Baugrund (mögliches Bauhindernis), hierfür sind speziell ausgerichtete Geräte und Software verfügbar. Siehe auch 7.27.2.

7.33.3 Datenerfassung, Raumbezug, Messgrößen und Genauigkeit

Siehe 7.27.3

7.33.4 Entwicklungsstand, Anwendungsgrenzen, Kosten

Siehe 7.27.4

7.33.5 Ergänzende Ausschreibungsanforderungen

Als Basis für die zu definierenden Anforderungen an die Ausschreibung dient ein objektspezifisches Messkonzept (siehe Kapitel 2.2), welches die spezifischen Gegebenheiten des Objekts entweder für das Trasse oder Naturgefahren berücksichtigt. Mit Berücksichtigung dieser aufgeführten Themen können, zusammen mit den vorgängig unter Datenerfassung, Raumbezug, Messgrößen und –genauigkeit angeführten Rahmenbedingungen, die Ausschreibungsanforderungen spezifisch vervollständigt werden.

Insbesondere sind die Anforderungen an max. notwendige Untersuchungstiefe, die notwendige Genauigkeit bei der Lokalisierung, die erforderliche Auflösung (kleinstes zu erkennendes Objekt), die Arte der zu erwartenden Objekte sowie der zur erwartende Schichtaufbau (Material, Mächtigkeit) in der Ausschreibung zu definieren, da er die grundsätzliche Eignung des Verfahrens und Auswahl von Gerät und Messparametern bestimmt.

7.33.6 Literaturverzeichnis

Sonstige Literatur / Forschungsberichte

-Siehe 7.27.6

7.34 Induktive Bewehrungssucher

7.34.1 Beschreibung der Technologie

Einbauteile in Betonkonstruktionen wie Dübel, Anker, Bewehrung, etc., sind in der Regel aus elektrisch gut leitfähigem Stahl ausgeführt. Dies lässt sich zur induktiven Ortung und genauen Einmessung dieser Einbauteile nutzen. Dazu wird analog dem in Sektion 7.35 beschriebenen geophysikalischen, zur Untergrunderkundung eingesetztem Verfahren «Elektromagnetik» mit einem Spulensystem ein elektromagnetisches Puls- oder Wechselfeld erzeugt, das in dem metallischen Objekt einen Wirbelstrom und damit ein sekundäres Magnetfeld erzeugt. Dieses lässt sich wiederum durch abgestimmte Spulen an der Oberfläche registrieren und auswerten. Die Ergebnisse liefern horizontale und vertikale Bewehrungsposition sowie unter bestimmten Randbedingungen auch den Durchmesser. Die Geräte sind in der Regel orientierungssensitiv. Es müssen also mindestens 2 Messungen in unterschiedlichen Orientierungen auf der Oberfläche ausgeführt werden, um ein Bewehrungsgitter vollständig zu erfassen.



Abb. 7.73 Induktive Bewehrungsortung. Links: Einfache Handgeräte (Bosch AG, im Baumarkt erhältlich) Rechts: Professionelles bildgebendes Gerät (Proceq, [screeningeagle.com](https://www.screeningeagle.com))

7.34.2 Einsatzzweck und Fragestellung im Bereich Trasse

Primär im Bereich Kunstbauten, aber vereinzelt auch im Bereich Trasse werden Bauwerke oder Bauwerksteile aus Stahlbeton errichtet. Zur Qualitätssicherung (Art, Lage, Betondeckung der Bewehrung) können die hier beschriebenen Bewehrungssucher eingesetzt werden.

7.34.3 Datenerfassung, Raumbezug, Messgrößen und Genauigkeit

- Datenerfassung: Kommerzielle verfügbare Messgeräte mit integrierter Elektronik, verbunden mit Datenerfassungs- und Auswerteeinheit.
- Raumbezug: Manuelle örtliche Einmessung der Messposition. Lokal Wegaufnahme durch Messräder und Messschablonen.
- Messgrößen: Sekundäres Magnetfeld. Durch in das Gerät integrierte Software erfolgt direkt eine Orts- und Lagebestimmung der Bewehrung.
- Typische Genauigkeit: Ein Bewehrungsdurchmesser
- Das Verfahren benötigt keine Kalibrierung vor Ort, aber geschultes Personal

7.34.4 Entwicklungsstand, Anwendungsgrenzen, Kosten

Kommerziell verfügbares eingeführtes Messverfahren. Zahlreiche Geräte verschiedener Hersteller am Markt verfügbar. Regelung z. B. in DGZfP Merkblatt B2 [70].

Kosten Apparatur und Software € 100 (Baumarkt), 500 - € 5000 (professionell).

Anwendungsgrenzen: Tiefenreichweite max 10 cm. Alternativen: Magnetverfahren (für Dübel), Radarverfahren.

7.34.5 Ergänzende Ausschreibungsanforderungen

Als Basis für die zu definierenden Anforderungen an die Ausschreibung dient ein objektspezifisches Messkonzept (siehe Kapitel 2.2), welches die spezifischen Gegebenheiten des Objekts entweder für das Trasse oder Naturgefahren berücksichtigt.

Mit Berücksichtigung dieser aufgeführten Themen können, zusammen mit den vorgängig unter Datenerfassung, Raumbezug, Messgrößen und –genauigkeit angeführten Rahmenbedingungen, die Ausschreibungsanforderungen spezifisch vervollständigt werden.

Insbesondere sind die Anforderungen an max. notwendige Untersuchungstiefe, die notwendige Genauigkeit bei der Lokalisierung, die erforderliche Auflösung (kleinstes zu

erkennendes Objekt), die Arte der zu erwartenden Objekte sowie der zur erwartende Schichtaufbau (Material, Mächtigkeit) in der Ausschreibung zu definieren, da er die grundsätzliche Eignung des Verfahrens und Auswahl von Gerät und Messparametern bestimmt.

7.34.6 Literaturverzeichnis

Sonstige Literatur / Forschungsberichte

[70] DGZfP, Merkblatt B02: Zerstörungsfreie Betondeckungsmessung und Bewehrungsortung an Stahl- und Spannbetonbauteilen, 2021.

7.35 Magnetik

7.35.1 Beschrieb der Technologie

Einbauteile in Betonkonstruktionen wie Dübel, Anker, Bewehrung, etc sind in der Regel aus magnetisierbarem Stahl ausgeführt. Dies lässt sich zur Ortung und genauen Einmessung dieser Einbauteile nutzen. Dazu wird zunächst mit einem starken elektromagnetischen Feld (Dauerfeld oder Puls) von der Bauteiloberfläche aus der Stahl im Inneren magnetisiert. Anschliessend wird mit einem oder mehreren Magnetfeldmessgeräten das Magnetfeld der Einbauteile vermessen. Aus den Kenngrößen des Feldes (z. B. Stärke, Abklingverhalten zu den Seiten hin) lässt sich für insbesondere für nach Art und Grösse bekannte Einbauteile die Lage gut bestimmen. Der Mess- und Auswerteprozesse ist in modernen Geräten integriert und automatisiert. Das Verfahren wird als Magnetische Pulsinduktion (magnetic pulse induction) oder kurz Magnetik bezeichnet.



Abb. 7.74 Magnetische Dübelortung im Praxiseinsatz (www.mit-dresden.de)



Abb. 7.75 Magnetische Dübelortung mit Schienensystem für die Sensorführung (erhöhte Ortsgenauigkeit) (www.mit-dresden.de)

7.35.2 Einsatzzweck und Fragestellung im Bereich Trassen

An Querfugen in Betonfahrbahnen werden zur Sicherstellung von Kraftschluss und Höhenlage verbindende Dübel (25 mm Durchmesser, 500 mm Länge) eingelegt. An die Lagegenauigkeit werden in den einschlägigen Normen (z. B. in Deutschland ZTV Beton-

StB 07) bestimmte Anforderungen gestellt, da sonst Schäden nicht auszuschliessen sind. Im Rahmen der Qualitätssicherung ist die Dübellage exemplarisch zu prüfen. Hierfür, und ausschliesslich hierfür wird das hier beschriebene Verfahren eingesetzt.

7.35.3 Datenerfassung, Raumbezug, Messgrössen und Genauigkeit

- Datenerfassung: Kommerzielle verfügbare Messgeräte mit integrierter Elektronik, verbunden mit Datenerfassungs- und Auswerteeinheit.
- Raumbezug: Manuelle örtliche Einmessung der Messposition oder GNSS-Systeme. Bewegung des Sensors auf Schienensystem möglich zur Erhöhung der Ortsgenauigkeit
- Messgrössen: Magnetfeld. Durch in das Gerät integrierte Software erfolgt direkt einen Orts- und Lagebestimmung der Dübel.
- Typische Genauigkeit: Für Dübel in Betonfahrbahnen besser als 1 cm, Seitverschiebungen, Neigungen und Verdrehungen erkennbar.
- Das Verfahren benötigt keine Kalibrierung vor Ort.

7.35.4 Entwicklungsstand, Anwendungsgrenzen, Kosten

Kommerziell verfügbares eingeführtes Messverfahren. Anwendungsgrenzen: Nur für Dübelortung geeignet. Regelung in ASTM E3013 [71] und ZTV Beton StB 07 [72].

Kosten Apparatur und Software nicht bekannt.

7.35.5 Ergänzende Ausschreibungsanforderungen

Als Basis für die zu definierenden Anforderungen an die Ausschreibung dient ein objektspezifisches Messkonzept (siehe Kapitel 2.2), welches die spezifischen Gegebenheiten des Objekts entweder für das Trasse oder Naturgefahren berücksichtigt.

Mit Berücksichtigung dieser aufgeführten Themen können, zusammen mit den vorgängig unter Datenerfassung, Raumbezug, Messgrössen und –genauigkeit angeführten Rahmenbedingungen, die Ausschreibungsanforderungen spezifisch vervollständigt werden.

Insbesondere sind die Anforderungen an max. notwendige Untersuchungstiefe, die notwendige Genauigkeit bei der Lokalisierung, die erforderliche Auflösung (kleinstes zu erkennendes Objekt), die Arte der zu erwartenden Objekte sowie der zur erwartende Schichtaufbau (Material, Mächtigkeit) in der Ausschreibung zu definieren, da er die grundsätzliche Eignung des Verfahrens und Auswahl von Gerät und Messparametern bestimmt.

7.35.6 Literaturverzeichnis

Sonstige Literatur / Forschungsberichte

[71] ASTM E3013/E3013M-15, „Standard Test Method for Evaluating Concrete Pavement Dowel Bar Alignment Using Magnetic Pulse Induction“.

[72] ZTV Beton-StB 07, „Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen und Richtlinien für den Bau von Tragschichten mit hydraulischen Bindemitteln und Fahrbahndecken aus Beton“.

C 4 Anomalien im Material

Tab. 7.16 Anomalien im Material – Übersicht (1/2)

Technologie Nr und Name	7.36	7.37	7.38	7.39	7.40
Radar	7.36.1	7.37.1	7.38.1	7.39.1	7.40.1
Kurzbeschreibung	Hochfrequente, elektromagnetische Wellen werden über einen Antenn in den Untergrund geschickt und die Echos aufgezeichnet. Laufzeiten und Amplituden geben Hinweise auf Anomalien. Umfangreiche Datenbearbeitung notwendig	Ultraschallwellen (meist Scherwellen) werden in den Untergrund und die Echos aufgezeichnet. Laufzeiten und Amplituden geben Hinweise auf Struktur und Eigenschaften. Unverfälschte Echos oder das Ausbleiben erwarteter Echos (z.	Mit einem kleinen Hammer wird auf der Oberfläche ein Impuls angelegt. Das über einen Beschleunigungsaufnehmer aufgenommene Frequenzspektrum wird ausgewertet und die Plattendicke berechnet.	Meist durch Hammerschlag wird seismische Wellenausbreitung im Untergrund angeregt. Die zur Oberfläche zurückkehrenden Wellen werden mit Geophonen aufgezeichnet. Refraktierte Wellen enthalten Information zu „schallführenden“ Schichten als	Meist durch Hammerschlag wird seismische Wellenausbreitung im Untergrund angeregt. Die zur Oberfläche zurückkehrenden Wellen werden mit Geophonen aufgezeichnet. Oberflächenwellen enthalten Informationen zur Tiefenverteilung
Einsatzzweck	Ortung von Hohlstellen/Verdichtungs-mängeln in der Trasse	Schichtdicken Beton	Ortung von Anomalien in Betonfahrbahnen	Lage von größeren Anomaliebereichen im Baugrund	Lage von größeren Anomaliebereichen im Baugrund Anomalien in den elastischen Parametern (Betonfahrbahn)
Typisierung	"ID" a. Messprinzip 2 indirekt b. Datenerfassung 13 akustisch c. Datenspeicher 1 digital d. Lokalisation 5 raumbezogen e. Raumbezug 1 integriert f. Zustand 3 nicht zerstörend g. Gröszen Lage und Größe von Anomalien	Aus1 2 indirekt 13 akustisch 1 digital 3 tiefenbezogen 2 separat 3 nicht zerstörend Lage und Größe von Anomalien	AE1 2 indirekt 13 akustisch 1 digital 3 tiefenbezogen 2 separat 3 nicht zerstörend Lage von größeren Anomaliebereichen im Baugrund	ARs1 2 indirekt 13 akustisch 1 digital 3 tiefenbezogen 2 separat 3 nicht zerstörend Lage von größeren Anomaliebereichen im Baugrund	ASM1 2 indirekt 13 akustisch 1 digital 3 tiefenbezogen 2 separat 3 nicht zerstörend Lage von größeren Anomaliebereichen im Baugrund
Messgrößen und -genauigkeit	Untersuchungs-/Tiefenbereich 0 - 1 m Auflösung 0,05 m Genauigkeit 0,05 m Bemerkungen In bewehrten Bereichen Eindringsiefe	0 - 100 cm (in Beton) 5cm 2 cm Auflösung und Genauigkeit messrasterabhängig	0 - 100 cm 10 cm 5 cm Auflösung und Genauigkeit messrasterabhängig	1 m - 30 m 1 m - 3 m 1 m Auflösung und Genauigkeit mit Tiefe stark abnehmend	1 m - 30 m 1 m - 3 m 1 m Auflösung und Genauigkeit mit Tiefe stark abnehmend
Nutzung in Fachgebieten	Trasse 1 Geotechnik 0 Naturgefahren 0 Umwelt 0	2 0 0 0	2 0 0 0	2 2 2 0	2 2 2 0
Einsatzpunkt	V, N	W, N	W, N	V, N	V, W, N
Entwicklungsstand	●	●	●	●	●
Kosten	initial / einmalig wiederkehrend	●	●	●	●

Tab. 7.17 Anomalien im Material – Übersicht (2/2)

Technologie Nr und Name	7.41	7.42	7.43
	Geoelektrik	Thermographie	Elektromagnetik
Kurzbeschreibung	7.41.1 Über Elektroden wird Gleichstrom in den Boden geleitet und die resultierende Spannung gemessen. Über Variation von Ort und Elektrodenabstand sowie umfangreiche Datenbearbeitung wird die Widerstandsverteilung	7.42.1 Durch Aufnahmen der Oberflächentemperatur mit einer Infrarotkamera lassen sich Feuchteunterschiede und oberflächennahe Fehlstellen lokalisieren	7.43.1 Über von Spulen erzeugte elektromagnetische Felder werden im Untergrund in leitfähigem Material Sekundärfelder erzeugt, die an der Oberfläche gemessen werden können. Hierdurch ist Ortung metallischer Objekte, aber
Einsatzzweck	7.41.2 Lage von größeren Anomaliebereichen im Baugrund	7.42.2 Lokalisierung oberflächennaher Fehlstellen	7.43.2 Ortung metallischer Objekte geologische Kartierung
"ID"	7.41.2 a. Messprinzip b. Datenerfassung c. Datenspeicher d. Lokalisation e. Raumbezug f. Zustand g. Grossen	7.42.2 2 indirekt 9 thermometrisch 1 digital 4 flächenbezogen 2 separat 3 nicht zerstörend	7.43.2 2 indirekt 3 elektromagnetisch 1 digital 4 flächenbezogen 2 separat 3 nicht zerstörend
Typisierung	7.41.3 Lage von größeren Anomaliebereichen im Baugrund	7.42.3 Lage und Größe von Fehlstellen	7.43.3 Lage von Objekten, Verteilung von geologischen Strukturen
Messgrößen und -genauigkeit	Untersuchungs-/Tiefenbereich Auflösung Genauigkeit Bemerkungen	0 - 10 cm 5 cm 2 cm Interpretation erforderlich, zahlreiche Einflüsse wie Oberflächenbeschaffenheit,	0 - 3 m 0 - 6 m 0,5 m 1 m 0,5 m Auflösung und Genauigkeit messstrahlhängig Tiefeninformation oft nur
Trasse	2	1	2
Geotechnik	1	0	2
Naturverfahren	2	0	2
Umwelt	2	0	2
Einsatzzeitpunkt	V, N	N	V
Entwicklungsstand	7.41.4	7.42.4	7.43.4
Kosten initial / einmalig wiederkehrend	7.41.4 	7.42.4 	7.43.4

7.36 Radar

7.36.1 Beschrieb der Technologie

Siehe 7.27.1

7.36.2 Einsatzzweck und Fragestellung im Bereich Trassen

Im Rahmen der Baugrunderkundung kann das Georadar zur Detektion von Bauhindernissen wie z. B. Findlinge oder andere Einlagerungen sowie Hohlräumen eingesetzt werden.

Ebenso können Anomalien in Trag- und Deckschichten im Rahmen der Qualitätssicherung detektiert werden. Dies ist aber nur zuverlässig möglich, wenn es sich um Einlagerungen von Fremdmaterial mit anderen physikalischen Eigenschaften als dem vorgesehenen Baustoff handelt. In der Literatur finden sich auch Hinweise auf die Detektion von Unterspülungen.

7.36.3 Datenerfassung, Raumbezug, Messgrößen und Genauigkeit

Siehe 7.27.3

7.36.4 Entwicklungsstand, Anwendungsgrenzen, Kosten

Siehe 7.27.4

7.36.5 Ergänzende Ausschreibungsanforderungen

Als Basis für die zu definierenden Anforderungen an die Ausschreibung dient ein objektspezifisches Messkonzept (siehe Kapitel 2.2), welches die spezifischen Gegebenheiten des Objekts entweder für das Trasse oder Naturgefahren berücksichtigt.

Mit Berücksichtigung dieser aufgeführten Themen können, zusammen mit den vorgängig unter Datenerfassung, Raumbezug, Messgrößen und –genauigkeit angeführten Rahmenbedingungen, die Ausschreibungsanforderungen spezifisch vervollständigt werden.

Insbesondere sind die Anforderungen an max. notwendige Untersuchungstiefe, die notwendige Genauigkeit bei der Lokalisierung, die erforderliche Auflösung (kleinste zu erkennende Anomalie), die Art der zu erwartenden Anomalie sowie der zur erwartende Schichtaufbau (Material, Mächtigkeit) in der Ausschreibung zu definieren, da er die grundsätzliche Eignung des Verfahrens und Auswahl von Gerät und Messparametern bestimmt.

7.36.6 Literaturverzeichnis

Sonstige Literatur / Forschungsberichte

-Siehe 7.27.6

7.37 Ultraschall-Echo

7.37.1 Beschreibung der Technologie

Siehe 7.28.1

7.37.2 Einsatzzweck und Fragestellung im Bereich Trassen

Das Ultraschall-Echo-Verfahren ist primär an Betonfahrbahnen einsetzbar. Schwankungen in der festgestellten Wellengeschwindigkeit oder der Amplitude der Rückwandreflektion können Hinweise auf Verdichtungs- oder andere Qualitätsmängel (z. B. Kiesnester) sein (Kalibrierung erforderlich). Eingeschränkt ist auch die Detektion und Vermessung von schrägen oder vertikalen Rissen möglich. Ablösungen (Risse parallel zur Oberfläche) sind ab etwa 10 cm x 10 cm Grösse bei entsprechendem Messraster zuverlässig erkennbar.

7.37.3 Datenerfassung, Raumbezug, Messgrößen und Genauigkeit

Siehe 7.28.3

7.37.4 Entwicklungsstand, Anwendungsgrenzen, Kosten

Siehe 7.28.4

7.37.5 Ergänzende Ausschreibungsanforderungen

Als Basis für die zu definierenden Anforderungen an die Ausschreibung dient ein objektspezifisches Messkonzept (siehe Kapitel 2.2), welches die spezifischen Gegebenheiten des Objekts entweder für das Trasse oder Naturgefahren berücksichtigt.

Mit Berücksichtigung dieser aufgeführten Themen können, zusammen mit den vorgängig unter Datenerfassung, Raumbezug, Messgrößen und –genauigkeit angeführten Rahmenbedingungen, die Ausschreibungsanforderungen spezifisch vervollständigt werden.

Insbesondere sind die Anforderungen an max. notwendige Untersuchungstiefe, die notwendige Genauigkeit bei der Lokalisierung, die erforderliche Auflösung (kleinste zu erkennende Anomalie), die Art der zu erwartenden Anomalie sowie der zur erwartende Schichtaufbau (Material, Mächtigkeit) in der Ausschreibung zu definieren, da er die grundsätzliche Eignung des Verfahrens und Auswahl von Gerät und Messparametern bestimmt.

7.37.6 Literaturverzeichnis

Sonstige Literatur / Forschungsberichte

-Siehe 7.28.6

7.38 Impakt-Echo

7.38.1 Beschrieb der Technologie

Siehe 7.29.1

7.38.2 Einsatzzweck und Fragestellung im Bereich Trassen

Das Impakt-Echo-Verfahren ist nur an Betonfahrbahnen einsetzbar. Schwankungen in der festgestellten Wellengeschwindigkeit oder der Amplitude der Rückwandreflektion können Hinweise auf Verdichtungs- oder andere Qualitätsmängel (z. B. Kiesnester) sein (Kalibrierung erforderlich). Ablösungen (Risse parallel zur Oberfläche) sind ab etwa 20 cm x 20 cm Grösse bei entsprechendem Messraster zuverlässig erkennbar

7.38.3 Datenerfassung, Raumbezug, Messgrössen und Genauigkeit

Siehe 7.29.3

7.38.4 Entwicklungsstand, Anwendungsgrenzen, Kosten

Siehe 7.29.4

7.38.5 Ergänzende Ausschreibungsanforderungen

Als Basis für die zu definierenden Anforderungen an die Ausschreibung dient ein objektspezifisches Messkonzept (siehe Kapitel 2.2), welches die spezifischen Gegebenheiten des Objekts entweder für das Trasse oder Naturgefahren berücksichtigt.

Mit Berücksichtigung dieser aufgeführten Themen können, zusammen mit den vorgängig unter Datenerfassung, Raumbezug, Messgrössen und –genauigkeit angeführten Rahmenbedingungen, die Ausschreibungsanforderungen spezifisch vervollständigt werden.

Insbesondere sind die Anforderungen an die max. notwendige Untersuchungstiefe, die notwendige Genauigkeit bei der Lokalisierung, die erforderliche Auflösung (kleinste zu erkennende Anomalie), die Art der zu erwartenden Anomalie sowie der zu erwartende Schichtaufbau (Material, Mächtigkeit) in der Ausschreibung zu definieren, da er die grundsätzliche Eignung des Verfahrens und Auswahl von Gerät und Messparametern bestimmt.

7.38.6 Literaturverzeichnis

Sonstige Literatur / Forschungsberichte

-Siehe 7.29.6

7.39 Refraktionsseismik

7.39.1 Beschrieb der Technologie

Siehe 7.30.1

7.39.2 Einsatzzweck und Fragestellung im Bereich Trassen

Die Refraktionsseismik kommt im Bereich Trassen ausschliesslich bei der Vorerkundung des Baugrunds zum Einsatz. Neben dem primären Einsatzzweck (Bestimmung von Schichtdicken im Baugrund) ist auch die Detektion von Anomalien (z. B. grössere Einlagerungen, Hohlräume) im Baugrund als mögliche Bauhindernisse möglich. Dies dient zur Planung von Gründungen sowie evtl. notwendiger Bodenverbesserungsmassnahmen.

Allerdings funktioniert dies in der Regel nur, wenn die Anomalien einige Meter in der horizontalen und je nach Tiefe einige Dezimeter bis Meter mächtig sind und zudem zur Auswertung das Verfahren der Refraktionstomographie (7.30.1) herangezogen wird.

7.39.3 Datenerfassung, Raumbezug, Messgrößen und Genauigkeit

Siehe 7.30.3

7.39.4 Entwicklungsstand, Anwendungsgrenzen, Kosten

Siehe 7.30.4

7.39.5 Ergänzende Ausschreibungsanforderungen

Als Basis für die zu definierenden Anforderungen an die Ausschreibung dient ein objektspezifisches Messkonzept (siehe Kapitel 2.2), welches die spezifischen Gegebenheiten des Objekts entweder für das Trasse oder Naturgefahren berücksichtigt.

Mit Berücksichtigung dieser aufgeführten Themen können, zusammen mit den vorgängig unter Datenerfassung, Raumbezug, Messgrößen und –genauigkeit angeführten Rahmenbedingungen, die Ausschreibungsanforderungen spezifisch vervollständigt werden.

Insbesondere sind die Anforderungen an max. notwendige Untersuchungstiefe, die notwendige Genauigkeit bei der Lokalisierung, die erforderliche Auflösung (kleinste zu erkennende Anomalie), die Art der zu erwartenden Anomalie sowie der zur erwartende Schichtaufbau (Material, Mächtigkeit) in der Ausschreibung zu definieren, da er die grundsätzliche Eignung des Verfahrens und Auswahl von Gerät und Messparametern bestimmt.

7.39.6 Literaturverzeichnis

Sonstige Literatur / Forschungsberichte

-Siehe 7.30.6

7.40 Oberflächenwellenseismik (SASW/MASW)

7.40.1 Beschreibung der Technologie

Siehe 7.31.1

7.40.2 Einsatzzweck und Fragestellung im Bereich Trassen

Die Oberflächenwellenseismik ist primär zur Ermittlung von Schichtdicken und den zugehörigen elastischen Parametern geeignet. Bei ausreichend engem Messraster kann sie jedoch im Rahmen der Vorerkundung auch zur Lokalisierung von Anomalien im Baugrund (z. B. grössere Einlagerungen, Hohlräume. Dies dient zur Planung von Gründungen sowie evtl. notwendiger Bodenverbesserungsmassnahmen. Im Rahmen der Qualitätssicherung können auch Schwankungen in den elastischen Materialparametern der Trag- und Deckschichten (z. B. Verdichtungsmängel, Einlagerungen) detektiert werden.

7.40.3 Datenerfassung, Raumbezug, Messgrößen und Genauigkeit

Siehe 7.31.3

7.40.4 Entwicklungsstand, Anwendungsgrenzen, Kosten

Siehe 7.31.4

7.40.5 Ergänzende Ausschreibungsanforderungen

Als Basis für die zu definierenden Anforderungen an die Ausschreibung dient ein objektspezifisches Messkonzept (siehe Kapitel 2.2), welches die spezifischen Gegebenheiten des Objekts entweder für das Trasse oder Naturgefahren berücksichtigt.

Mit Berücksichtigung dieser aufgeführten Themen können, zusammen mit den vorgängig unter Datenerfassung, Raumbezug, Messgrößen und –genauigkeit angeführten Rahmenbedingungen, die Ausschreibungsanforderungen spezifisch vervollständigt werden.

Insbesondere sind die Anforderungen an max. notwendige Untersuchungstiefe, die notwendige Genauigkeit bei der Lokalisierung, die erforderliche Auflösung (kleinste zu erkennende Anomalie), die Art der zu erwartenden Anomalie sowie der zur erwartende Schichtaufbau (Material, Mächtigkeit) in der Ausschreibung zu definieren, da er die grundsätzliche Eignung des Verfahrens und Auswahl von Gerät und Messparametern bestimmt.

7.40.6 Literaturverzeichnis

Sonstige Literatur / Forschungsberichte

-Siehe 7.31.6

7.41 Geoelektrik

7.41.1 Beschreibung der Technologie

Siehe 7.32.1

7.41.2 Einsatzzweck und Fragestellung im Bereich Trassen

Die Geoelektrik wird im Bereich Trasse ausschliesslich zur Vorerkundung des Baugrunds eingesetzt. Sie ermöglicht die Abschätzung der Dicke geologischer Schichten sowie die Lokalisierung von Einlagerungen im Baugrund, eingeschränkt auch Materialparameter (z. B. Wassergehalt). Typische Anwendungsfälle sind z. B. die Lokalisierung von Torflinsen oder bindiger Einlagerungen und die Bestimmung ihrer Mächtigkeit. Dies dient zur Planung von Gründungen sowie evtl. notwendiger Bodenverbesserungsmassnahmen.

7.41.3 Datenerfassung, Raumbezug, Messgrößen und Genauigkeit

Siehe 7.32.3

7.41.4 Entwicklungsstand, Anwendungsgrenzen, Kosten

Siehe 7.32.4

7.41.5 Ergänzende Ausschreibungsanforderungen

Als Basis für die zu definierenden Anforderungen an die Ausschreibung dient ein objektspezifisches Messkonzept (siehe Kapitel 2.2), welches die spezifischen Gegebenheiten des Objekts entweder für das Trasse oder Naturgefahren berücksichtigt.

Mit Berücksichtigung dieser aufgeführten Themen können, zusammen mit den vorgängig unter Datenerfassung, Raumbezug, Messgrößen und –genauigkeit angeführten Rahmenbedingungen, die Ausschreibungsanforderungen spezifisch vervollständigt werden.

Insbesondere sind die Anforderungen an max. notwendige Untersuchungstiefe, die notwendige Genauigkeit bei der Lokalisierung, die erforderliche Auflösung (kleinste zu erkennende Anomalie), die Art der zu erwartenden Anomalie sowie der zur erwartende Schichtaufbau (Material, Mächtigkeit) in der Ausschreibung zu definieren, da er die grundsätzliche Eignung des Verfahrens und Auswahl von Gerät und Messparametern bestimmt.

7.41.6 Literaturverzeichnis

Sonstige Literatur / Forschungsberichte

-Siehe 7.32.6

7.42 Thermographie

7.42.1 Beschrieb der Technologie

Die Infrarot-Thermografie beruht auf dem Prinzip der unterschiedlichen Wärmeübertragungsraten verschiedener Materialien und Aggregatzustände. Bei dem Messverfahren wird eine im thermalen Infrarot empfindliche Kamera verwendet. Die Kamera misst die Infrarotstrahlung, die von der Oberfläche einer zu untersuchenden Struktur nach einer künstlich herbeigeführten oder umweltbedingten Temperaturänderung der Struktur abgegeben wird. Defekte können auf der Grundlage einer unterschiedlichen Wärmeübertragungsrate im Vergleich zum Nennmaterial identifiziert und lokalisiert werden.

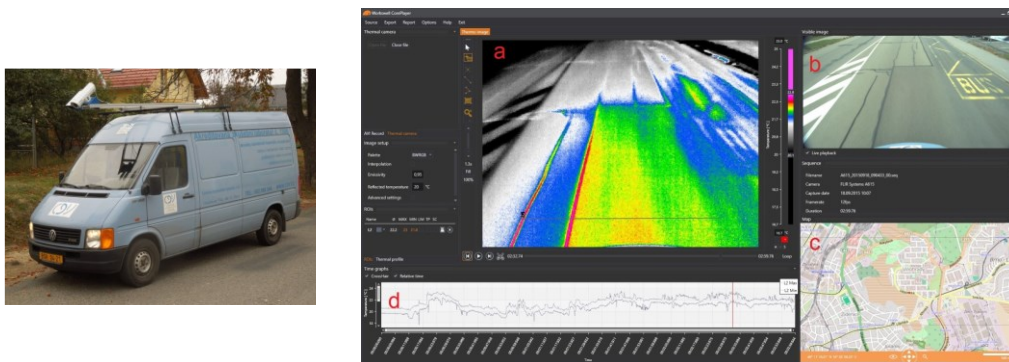


Abb. 7.76 Messfahrzeug mit Infrakamera und Benutzeroberfläche einer thermographischen Aufnahmesoftware [73]

Die Infrarot-Thermografie eignet sich im Allgemeinen für die Untersuchung von Bauteilen, bei denen davon ausgegangen wird, dass sie relativ homogene und gut charakterisierte Eigenschaften aufweisen. Die Infrarot-Thermografie erfordert einen möglichst grossen Temperaturgradienten in den zu untersuchenden Bereichen. In Bereichen, die nicht im Schatten liegen, kann starkes Sonnenlicht eine solche Erwärmung bewirken, so dass die Messung ohne künstliche Erwärmung möglich ist; in schattigen Bereichen oder bei unbeständigen Wetterbedingungen können jedoch bessere Ergebnisse erzielt werden, wenn die Erwärmung durch eine externe Quelle künstlich herbeigeführt wird.

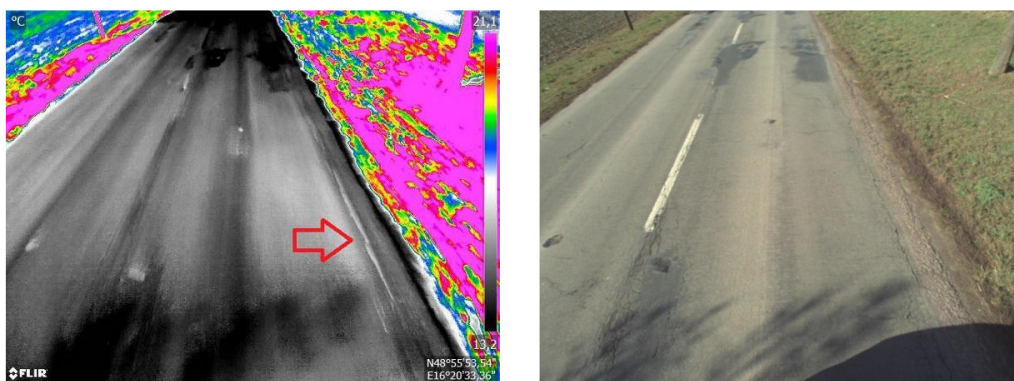


Abb. 7.77 Rissortung in Fahrbahnbelag: Links Thermogramm. Rechts Visuell. [73]

7.42.2 Einsatzzweck und Fragestellung im Bereich Trassen

Die Thermographie kann im Rahmen der Qualitätssicherung oder der Zustandsüberwachung eingesetzt werden. Sie dient der Erkennung von oberflächennahen

Delaminationen und Hohlräumen im Untergrund von Stahlbeton, sowie der Risserkennung in Beton und Asphalt.

- Im Bereich Trasse kommt anders als bei Kunstbauten nur die passive Variante der Methode (Nutzung von Temperaturunterschieden insbesondere bei Sonnenaufgang/Sonnenuntergang) zum Einsatz. Dies kann in beschatteten Bereichen oder bei bewölktem Wetter zu Problemen (geringere Detektionswahrscheinlichkeit) führen.

7.42.3 Datenerfassung, Raumbezug, Messgrößen und Genauigkeit

- Bei modernen Infrarotkameras erfolgt die Datenerfassung überwiegend digital, wobei die Daten mittels gängigen Bilddateien oder Analysesoftware, z. B. MATLAB, gespeichert werden.
- Die Datenerfassung erfolgt mit auf Fahrzeugen montierten Infrarotkameras, aber auch innovative Methoden wie der Einsatz von unbemannten Luftfahrzeugen (ULF) wurden untersucht.
- Infrarotkameras messen die Strahlungstemperatur, die neben der Objekttemperatur auch von der Oberflächenbeschaffenheit, dem Material, und der Oberflächenfeuchte abhängt. daher müssen neben den Infrarotaufnahmen immer auch konventionelle Fotos oder Videos aufgenommen werden, um Änderungen der o. a. Parameter bei der Auswertung berücksichtigen zu können und Fehlinterpretationen zu vermeiden.
- Der gemessene Wert ist die Oberflächentemperatur eines Bereichs einer Struktur im Laufe der Zeit.
- Die Messungen erfolgen zerstörungsfrei aus der Ferne, direkter Zugang zur Oberfläche ist nicht erforderlich, nur visuell.
- Messungen über eine grosse Fläche der Struktur werden sehr schnell durchgeführt, so schnell wie die Daten erfasst werden können.
- Studien haben gezeigt, dass Defekte bis zu einer Grösse von 5 x 5 cm erkannt werden können, obwohl die Erkennbarkeit von Defekten stark von ihrer Tiefe und der Amplitude des Temperaturgradienten abhängt. Kleinere und tiefere Defekte (weniger als 10 cm) sind schwieriger zu erkennen. Defekte können hinsichtlich ihrer Form und Fläche in der Ebene der gemessenen Oberfläche gut gemessen werden, ihre Tiefe wird jedoch im Allgemeinen nicht erfasst [74].

7.42.4 Entwicklungsstand, Anwendungsgrenzen, Kosten

Die Messtechnologie selbst ist ausgereift, die Anwendung und Interpretation befindet sich noch in der Entwicklungsphase. Vielversprechende Forschungsergebnisse haben ihr Potenzial gezeigt, aber eine breite industrielle Nutzung steht noch aus. Es sind noch Fragen hinsichtlich der Tiefe und Grösse von Fehlern zu klären, die zuverlässig erkannt werden können, und auch die besten Praktiken in Bezug auf die Messdauer und die optimalen Umgebungsbedingungen müssen weiter untersucht werden. Die Kombination mit weiteren Methoden wie dem Bodenradar könnte die Methode mit mehr Informationen über die Fehlertiefe ergänzen.

Die Gerätekosten liegen im Bereich von Fr. 5'000-20'000. Zusätzlich wird ein PC/Laptop zum Betrachten, Speichern und Verarbeiten der Bilder benötigt. Im Falle einer aktiven Heizung müssen jedoch die zusätzlichen Kosten für die Heizung selbst und die Energie zu deren Betrieb berücksichtigt werden. Weitere Kosten sind die Arbeitskosten für die bis zu einem Tag dauernden Tests und die Kosten für die Sperrung von Strassen für den Verkehr.

7.42.5 Ergänzende Ausschreibungsanforderungen

Als Basis für die zu definierenden Anforderungen an die Ausschreibung dient ein objektspezifisches Messkonzept (siehe Kapitel 2.2), welches die spezifischen Gegebenheiten des Objekts entweder für das Trasse oder Naturgefahren berücksichtigt.

Mit Berücksichtigung dieser aufgeführten Themen können, zusammen mit den vorgängig unter Datenerfassung, Raumbezug, Messgrößen und –genauigkeit angeführten

Rahmenbedingungen, die Ausschreibungsanforderungen spezifisch vervollständigt werden.

Insbesondere sind die Anforderungen an max. notwendige Untersuchungstiefe, die notwendige Genauigkeit bei der Lokalisierung, die erforderliche Auflösung (kleinste zu erkennende Anomalie), die Art der zu erwartenden Anomalie sowie der zur erwartende Schichtaufbau (Material, Mächtigkeit) in der Ausschreibung zu definieren, da er die grundsätzliche Eignung des Verfahrens und Auswahl von Gerät und Messparametern bestimmt.

7.42.6 Literaturverzeichnis

Sonstige Literatur / Forschungsberichte

- [73] ZTV Beton-StB 07, „Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen und Richtlinien für den Bau von Tragschichten mit hydraulischen Bindemitteln und Fahrbahndecken aus Beton“.
- [74] M. Janků und J. Stryk, „Application of infrared camera to bituminous concrete pavements: measuring vehicle,“ IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, Bd. 236, p. 012104, September 2017.

7.43 Elektromagnetik

7.43.1 Beschrieb der Technologie

Elektromagnetische Felder werden durch die Struktur des spezifischen elektrischen Widerstands (bzw. der elektrischen Leitfähigkeit) im Untergrund beeinflusst. Diese Tatsache wird durch die elektromagnetischen Verfahren der Geophysik genutzt. Als Quellen können natürliche oder technische Felder (z. B. Radiosender, „passive“ Verfahren) oder aber „künstliche“ Felder (z. B. von Wechselstrom durchflossene Spulen, „aktive“ Verfahren) sein. Die meisten der zahlreichen Verfahrensvariationen messen die durch Induktion im Untergrund erzeugten sogenannten Sekundärfelder an der Oberfläche. Messgröße ist in der Regel die im Empfänger (der meist eine Spule ist) erzeugte elektrische Spannung. Daraus wird mit Hilfe der Geräteparameter (Spulenabstand, Frequenz, Orientierung) die scheinbare elektrische Leitfähigkeit, mit den Komponenten real («In-Phase», gleichphasig mit dem Senderfeld, sehr sensitiv für Metalleinlagerungen im Untergrund) und imaginär («Out-of Phase», für die Bestimmung der elektrischen Kennwerte des Bodens) berechnet. Eindringtiefe und Auflösung werden von den vorherrschenden spezifischen Widerständen, der Messfrequenz und der Sender-/Empfängeranordnung bestimmt. Die Eindringtiefe beträgt im Ingenieurbereich typischerweise 0,5 m – 6 m. Der apparative und zeitliche Aufwand ist für die einzelnen elektromagnetischen Methoden unterschiedlich und nimmt mit zunehmend größerer Erkundungstiefe meist stark zu.

Physikalisch bedingt reagiert die Elektromagnetik besser auf elektrisch gutleitende Einlagerungen (z. B. feinkörnige Bereiche in sandigem Substrat) als auf schlechtleitende. Daher werden speziell ausgerichtete Geräte auch als Metalldetektor verwendet. Durch Variation der Frequenz lassen sich auch Sondierungen durchführen und durch Änderung der Aufstellungsposition vertikale oder horizontale Untergrundschnitte erzeugen.

Auch das Radar nutzt elektromagnetische Felder, allerdings bei sehr hohen Frequenzen. Das Verfahren wird gesondert behandelt. Dies gilt auch für induktive Bewehrungssucher.

Die Messprozeduren für die verschiedenen verfügbaren Verfahrensvariationen und Geräte unterscheiden sich zum Teil erheblich. Für einen kompletten Überblick und Details sei auf die Literatur verwiesen. Am häufigsten kommt bei der Trassenerkundung Induktionselektromagnetik (aktiv, zwei-Spulensysteme in einem Gehäuse oder durch Kabel verbunden) zum Einsatz.

Bei der Auswertung beschränkt man sich meist auf die flächenhafte Darstellung der Messwerte. Der entsprechende Tiefenbereich wird an Hand einfacher Formeln abgeschätzt. Inhomogenitäten lassen sich gut aufspüren, genaue Dimensionen und Tiefe sind aber nur schwer zu bestimmen. Der Aufwand für eine quantitative Auswertung ist

hoch, doch im Einzelfall sinnvoll. Für viele Verfahrensvarianten steht keine kommerzielle Auswertesoftware zur Verfügung.

Bei der Interpretation ist zu berücksichtigen, dass die Topographie oft erheblichen, aber nicht direkt korrigierbaren Einfluss auf das Messergebnis hat. Zusätzlich gilt analog zur Geoelektrik, dass für Widerstandsinhomogenitäten oft mehrere Ursachen in Frage kommen. Auch hier ist ein Abgleich mit Bohrergebnissen unerlässlich.

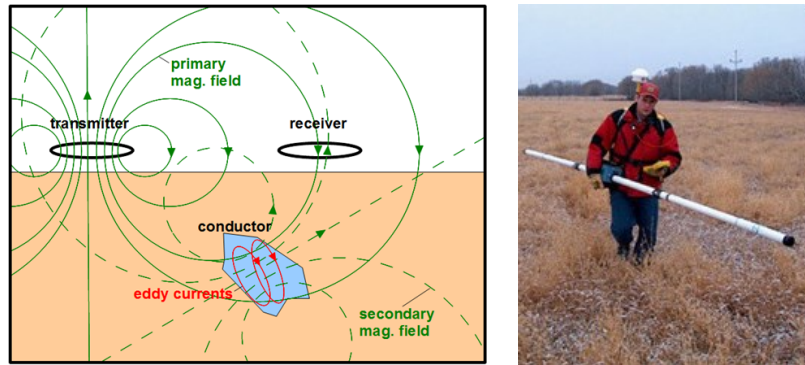


Abb. 7.78 Links: Prinzip der Induktions-Elektromagnetik. Rechts: Typisches Gerät (Geonics EM31).

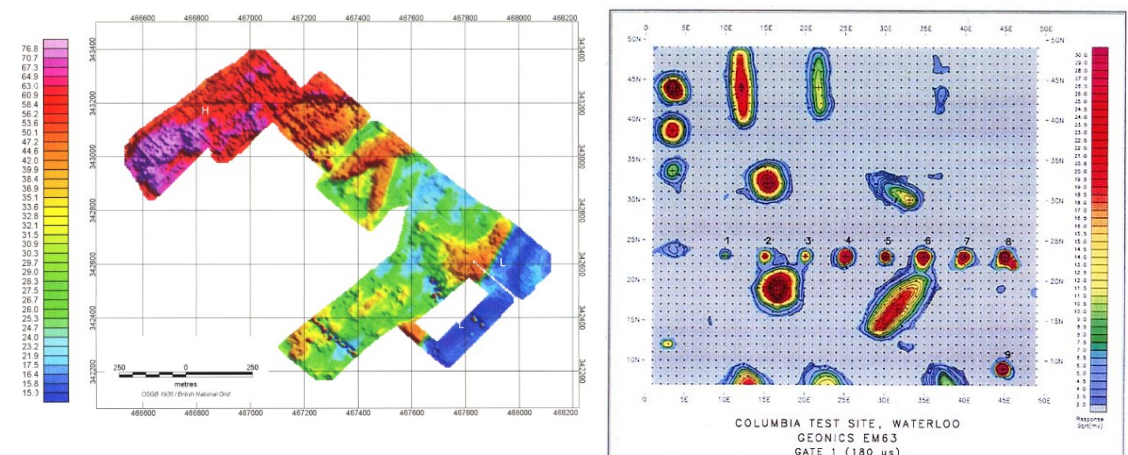


Abb. 7.79 Elektromagnetik: Kartierungsergebnisse (flächenhafte Messwertdarstellung). Links Geologiekartierung (rot: Festgestein, grün/blau: wassergefüllte Lockersedimente). Rechts Metalldetektion (auf Testgelände, vergrabenen Fässer u. ä.).

7.43.2 Einsatzzweck und Fragestellung im Bereich Trassen

- Das geophysikalische Messverfahren Elektromagnetik kommt ausschliesslich bei der Vorerkundung zum Einsatz. Neben der Detektion unterschiedlicher geologischer Materialien dient das Verfahren auch zur Detektion von Leitungen, Altmunition oder Bauwerksresten im Untergrund (Metalldetektion). Hierfür gibt es speziell ausgerichtete Geräte.

7.43.3 Datenerfassung, Raumbezug, Messgrößen und Genauigkeit

- Datenerfassung: Meist tragbare Geräte mit einem oder mehreren Spulenpaaren, die elektromagnetische Felder senden und empfangen.
- Raumbezug: Manuelle örtliche Einmessung der Messposition oder GNSS-Systeme.
- Messgrößen: scheinbare elektrische Leitfähigkeit (real und imaginär, s.o.). Diese Messgrösse ist äquivalent zum in der Geoelektrik ermittelten elektrischer Widerstand.

- Umsetzung im Materialansprache und/oder Wassergehalt sowie Position metallischer Objekte im Untergrund. Bilder manchmal mehrdeutig und unscharf.
- Typische Genauigkeit: Tiefenlage von Schichten 10-20% (wenn überhaupt ermittelbar, Auflösung mit der Tiefe stark abnehmend. Eher geringer als bei Geoelektrik.
 - Elektromagnetische Messungen zur Untergrunderkennung sind meist deutlich schneller als geoelektrische Messungen und werden daher häufig zur Überblickskartierung grosser Flächen eingesetzt

7.43.4 Entwicklungsstand, Anwendungsgrenzen, Kosten

Kommerziell verfügbares eingeführtes Messverfahren. Anwendungsgrenzen siehe oben. Dünne Schichten werden u. U. nicht erkannt. Kosten Apparatur und Software ab ca. € 10.000.

7.43.5 Ergänzende Ausschreibungsanforderungen

Als Basis für die zu definierenden Anforderungen an die Ausschreibung dient ein objektspezifisches Messkonzept (siehe Kapitel 2.2), welches die spezifischen Gegebenheiten des Objekts entweder für das Trasse oder Naturgefahren berücksichtigt.

Mit Berücksichtigung dieser aufgeführten Themen können, zusammen mit den vorgängig unter Datenerfassung, Raumbezug, Messgrössen und –genauigkeit angeführten Rahmenbedingungen, die Ausschreibungsanforderungen spezifisch vervollständigt werden.

Insbesondere sind die Anforderungen an max. notwendige Untersuchungstiefe, die notwendige Genauigkeit bei der Lokalisierung, die erforderliche Auflösung (kleinste zu erkennende Anomalie), die Art der zu erwartenden Anomalie sowie der zu erwartende Schichtaufbau (Material, Mächtigkeit) in der Ausschreibung zu definieren, da er die grundsätzliche Eignung des Verfahrens und Auswahl von Gerät und Messparametern bestimmt.

7.43.6 Literaturverzeichnis

Sonstige Literatur / Forschungsberichte

-

C 5 Tragfähigkeit

Die Bestimmung der Tragfähigkeit einer Verkehrsfläche erfolgt über die Ermittlung der Verformungseigenschaften in Folge einer kurzzeitigen Lasteinwirkung. Die existierenden Messsysteme unterscheiden sich sowohl in der Ausführung der Belastung der Verkehrsfläche, als auch in der Art der genutzten Sensorik für die Erfassung der Verformung. Ein direkter Vergleich der von den Verfahren ermittelten Verformung ist daher in der Regel nicht möglich. Weiterhin ist anzumerken, dass Methoden zur Serienmessung in der Regel Einschränkungen in Bezug auf den maximal messbaren Kurvenradius aufweisen.

Im Folgenden wird ein Überblick über unterschiedliche Messsysteme gegeben, wobei eine Gruppierung der Verfahren nach der für die Erfassung der Formung eingesetzten Art der Sensorik erfolgt.

C 6 Tragfähigkeit - Mechanisch

Die mechanische Erfassung von Verformungen erfolgt durch den Einsatz von Tastarmen, welche direkt auf der Fahrbahnoberfläche aufgesetzt werden. Die Bestimmung der maximalen Verformung erfolgt durch den Vergleich einer Messung im Belastungszustand und einer Messung im unbelasteten Zustand.

Tab. 7.18 Tragfähigkeit – Mechanisch - Übersicht

Technologie Nr und Name		7.44	7.45	7.46						
Kurzbeschreibung	Plattendruckversuch	7.44.1	7.45.1	7.46.1						
		Der zu prüfende Boden wird durch eine kreisförmige Lastplatte mit einer Druckvorrichtung wiederholt stufenweise be- und entlastet. Dabei wird die Einsenkung der Platte in den Boden bei der jeweiligen Laststufe gemessen.	Messung der Einsenkung einer Oberfläche durch Belastung durch einen auf der Oberfläche aufliegenden Tastarm.	Automatisierte Einsenkungsmessungen nach dem Prinzip des Benkelman-Balkens mit einem kombinierten Mess- und Belastungsfahrzeug						
		Bestimmung der Verformungsmodul und Tragfähigkeit von Schichten ohne Bindemittel	Einsenkungsmessungen auf gebundenen Fahrbahnbefestigungen	Einsenkungsmessungen auf gebundenen Fahrbahnbefestigungen						
		"ID"	DPd1	DBe1	DDe1					
Einsatzzweck	Typisierung	7.44.2	7.45.2	7.46.2						
		a. Messprinzip b. Datenerfassung c. Datenspeicher d. Lokalisation e. Raumbezug f. Zustand	1 direkt 1 mechanisch 2 analog (Datenschreiber) 1 punktuell 2 separat 3 nicht zerstörend	1 direkt 1 mechanisch 2 analog (Datenschreiber) 1 punktuell 2 separat 3 nicht zerstörend	1 direkt 1 mechanisch 1 digital 2 streckenbezogen 2 separat 3 nicht zerstörend					
		Grossen	Verformungsmodul	Deflektion und Deflektionsindex	Deflektion und Deflektionsindex					
		Messgrößen- und -genauigkeit								
Bemerkungen	Untersuchungs-/Tiefenbereich	Oberfläche	0.01 mm 0.01 mm	0.01 mm 0.01 mm						
					Auflösung					
						Genauigkeit				
							Nutzung in Fachgebieten			
Trasse	2	1	2							
				Geotechnik	2					
						Naturgefahren		0		
							Umwelt		0	
Einzelzeitpunkt	V, W	V, N	N							
				Entwicklungsstand	7.44.4					7.45.4
						Kosten		initial / einmalig		
							7.44.4		7.45.4	

7.44 Plattendruckversuch

7.44.1 Beschrieb der Technologie

Der Plattendruckversuch dient zur Bestimmung der Verformbarkeit und Tragfähigkeit des Bodens sowie zur Verdichtungskontrolle. Der Versuch ähnelt einer Probelastung (vgl. Abb. 7.80). Die Setzungsmesseinrichtung besteht aus dem Messgestell mit Tastarm und Messuhr. Als Gegengewicht zur Druckvorrichtung dient meist ein schweres Baufahrzeug. Zur Versuchsauswertung werden die Setzungen der einzelnen Laststufen und die zugehörigen mittleren Normalspannungen unter der Lastplatte in einem Diagramm als Drucksetzungslinien dargestellt.

Der Verformungsmodul E_v wird aus der Drucksetzungslinie der Erstbelastung (E_{v1}) und der Zweitbelastung (E_{v2}) ermittelt. Da durch die Erstbelastung immer eine gewisse bleibende Verformung erreicht wird, gibt das Verhältnis des entsprechend höheren E_{v2} -Wertes zum E_{v1} -Wert Hinweise auf die erreichte Verdichtung.



Abb. 7.80 Statischer Plattendruckversuch, Quelle: [75].

7.44.2 Einsatzzweck und Fragestellung im Bereich Trasse

Der statische Plattendruckversuch ist ein Versuch zur Bestimmung der Verformungsmoduls E_{v1} und E_{v2} sowie der Tragfähigkeit von Schichten ohne Bindemittel (Böden und Materialien). Er dient als Nachweis zur Eignung von Schichten ohne Bindemittel als Baugrund nach DIN 1054 [76] bzw. DIN 18134 [77] für den gesamten Erd-, Grund- und Strassenbau.

7.44.3 Datenerfassung, Raumbezug, Messgrößen und Genauigkeit

Voraussetzung der Messdurchführung ist ein beladener LKW oder ein vergleichbar schweres Fahrzeug, welches als Gegengewicht benötigt wird. Das Versuchsgerät ragt etwa 2 m bis 3 m über das Belastungsfahrzeug hinaus. Die von dieser Versuchsanordnung beanspruchte, zu prüfende Fläche muss horizontal eben sein. Während des Versuchs dürfen keine Arbeiten mit schwerem Gerät ausgeführt werden.

Der zu prüfende Boden wird durch eine kreisförmige Lastplatte mit einer Druckvorrichtung wiederholt stufenweise be- und entlastet. Dabei wird die Einsenkung der Platte in den Boden bei der jeweiligen Laststufe gemessen. Die reine Versuchsdauer beträgt ca. 15 Minuten, hinzu kommen etwa 10 Minuten für den Aufbau des Versuchs.

Wegen der sehr detaillierten Normung ist es der präziseste Versuch im Erdbau mit der höchsten Wiederholgenauigkeit.

7.44.4 Entwicklungsstand, Anwendungsgrenzen, Kosten

Der Einsatz der Technologie ist als Stand der Technik einzustufen.

Die Kosten für eine einzelne Messung liegen etwa bei 100 – 150 CHF.

7.44.5 Ergänzende Ausschreibungsanforderungen

Als Basis für die zu definierenden Anforderungen an die Ausschreibung dient ein objektspezifisches Messkonzept (siehe Kapitel 2.2), welches die spezifischen Gegebenheiten des Objekts entweder für das Trasse oder Naturgefahren berücksichtigt.

Mit Berücksichtigung dieser aufgeführten Themen können, zusammen mit den vorgängig unter Datenerfassung, Raumbezug, Messgrößen und –genauigkeit angeführten

Rahmenbedingungen, die Ausschreibungsanforderungen spezifisch vervollständigt werden.

7.44.6 Literaturverzeichnis

Sonstige Literatur / Forschungsberichte

- [75] Viellieber, Anja: Bodenverbesserung und Bodenaustausch, Ein Vergleich der Verfahren zur Leitungsgrabenverfüllung anhand eines Neubaugebietes. Bachelorthesis an der HTWG, 2023
- [76] DIN 1054:2021-04, Baugrund - Sicherheitsnachweise im Erd- und Grundbau - Ergänzende Regelungen zu DIN EN 1997-1, Beuth Verlag GmbH.
- [77] DIN 18134:2012-04, Baugrund - Versuche und Versuchsgeräte - Plattendruckversuch, Beuth Verlag GmbH.

7.45 Benkelman-Balken

7.45.1 Beschrieb der Technologie

Der Benkelman-Balken ist ein mechanisches Messinstrument, welches die Messung einer Einsenkung über direkten Oberflächenkontakt durchführt. Über eine, an einem Tastarm angebrachte Tastspitze, wird die Position der Tastspitze relativ zum Traggestell erfasst (vgl. Abb. 7.81). Das Messverfahren wird je nach Einsatz in unterschiedlichen Normen behandelt (vgl. [78], [79], [80]).

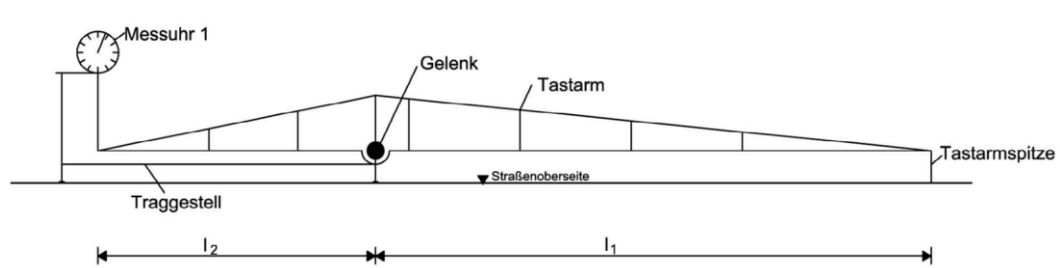


Abb. 7.81 Aufbau eines Benkelman-Balkens, Quelle: [81]

Änderungen der Höhenlage der Tastspitze, welche durch Belastung oder Entlastung der Oberfläche hervorgerufen werden, übertragen sich auf den Tastarm. Dadurch kann eine Änderung der Höhe an der Messuhr abgelesen werden.

Für die Messung der Differenz zwischen belasteter und unbelasteter Fahrbahn werden zwei Messungen mit dem Benkelman-Balken durchgeführt. Für die erste Messung wird ein Belastungsfahrzeug (Standard-Achslast von 10 t) über der Messstelle platziert, so dass sich die Messstelle mittig zwischen einem der Hinterachs-Zwillingsräder befindet.

Anschließend erfolgt die erste Messung, indem der Benkelman-Balken hinter dem Belastungsfahrzeug aufgestellt und die Tastspitze mittig zwischen den Zwillingsreifen positioniert wird. Die zweite Messung erfolgt, nachdem sich das Belastungsfahrzeug ca. 5 Meter nach vorne bewegt hat. Um der Änderung der Viskosität bei unterschiedlichen Temperaturen Rechnung zu tragen, ist während der Messung die Bestimmung Oberflächentemperatur und der charakteristischen Oberbautemperatur erforderlich. Bei der Messung auf Beton-Oberflächen erfolgt die Messung der Bewegung an den Plattenrändern. Hierfür sollte ein modifizierter Benkelman-Balken zur Anwendung kommen.

Die Erfassung der punktuellen Messungen kann analog oder digital erfolgen. Bei der digitalen Erfassung ist dabei auch die Erfassung des Belastungs-/Entlastungsvorgangs möglich. Daraus lässt sich eine Einsenkungsmulde ermitteln.

Der Benkelman-Balken sollte nur auf Befestigungsschichten eingesetzt werden, die bei der vorgegebenen Radlast und Belastungszeit keine messbaren bleibenden Vorformungen erwarten lassen [81].

7.45.2 Einsatzzweck und Fragestellung im Bereich Trasse

Der Benkelman-Balken eignet sich für die Durchführung von Einsenkungsmessungen auf Fahrbahnbefestigungen. Die Messungen können direkt auf Fahrbahnbefestigungen in Asphalt- oder Pflasterbauweise durchgeführt werden. Die Anwendung auf Pflasterbauweisen ist allerdings zu hinterfragen. Bei der Messung auf Fahrbahnen in Betonbauweise ergeben sich besondere Anforderungen an die Messdurchführung, um beispielsweise die relative vertikale Fugenbewegung bei Belastung ermitteln zu können.

Der Benkelman-Balken eignet sich für die Untersuchung der folgenden Fragestellungen [81]:

- Überprüfung des Last-Verformungsverhaltens von gebundenen Verkehrswegebefestigungen
- Überprüfung der Gleichmässigkeit des Last-Verformungsverhaltens von gebundenen Verkehrswegebefestigungen oder einzelner gebundener Befestigungsschichten (z.B. als zusätzliche Prüfung im Rahmen der Bauüberwachung)
- Quantitativer Vergleich der Last-Verformungseigenschaften und des Gebrauchsverhaltens unterschiedlicher Bauweisen
- Messung der relativen vertikalen Fugenbewegung an Quertugen von Betonfahrbahnplatten
- Beurteilung der Tragfähigkeit von Fahrbahnbefestigungen nach hydrologischen Extremereignissen (starker Anstieg des Grundwasserhorizonts, Überschwemmungen)

7.45.3 Datenerfassung, Raumbezug, Messgrössen und Genauigkeit

Die Konstruktion des Benkelman-Balkens ist in der Regel derart ausgelegt, dass Vertikalbewegungen der Fahrbahnoberfläche von mehr als 0,01 mm und ein Messbereich von wenigstens 10 mm erfasst werden können [82].

Die Positionierung der Messstellen unterliegt bei dem Verfahren grundsätzlich keinen Einschränkungen. Im Regelfall erfolgt die Aufnahme jedoch in der rechten Rollspur des Hauptfahrstreifens [82] und mit einem Messpunktabstand von 25 Metern [81].

7.45.4 Entwicklungsstand, Anwendungsgrenzen, Kosten

Die Entwicklung des Benkelman-Balkens ist einhergehend mit der digitalen Erfassung abgeschlossen. Eine Anwendung auf Asphalt- und Betonfahrbahnen, bei letzterem mit dem modifizierten Benkelman-Balken, ist Stand der Technik.

Pro Arbeitstag können von einem Messtechniker und einem Fahrer typischerweise 100 bis 150 Messpunkte aufgenommen werden [81].

Aufgrund der geringen Kosten und einfachen Anwendung des Messinstruments hat der Benkelman-Balken eine sehr grosse Verbreitung.

Die Messungen können nicht im fliessenden Verkehr erfolgen.

Für Messungen auf Betonfahrbahnen können nur Rückschlüsse auf die Querkraftübertragung im Bereich der Fugen getroffen werden.

Die Kosten für den Einsatz der Technologie setzen sich zusammen aus:

- Tagessatz für Techniker und Fahrer ca. 1500-2000 CHF
- Bereitstellung eines Belastungsfahrzeuges - ca. 1500-2000 CHF (exklusive der Anreise)

7.45.5 Ergänzende Ausschreibungsanforderungen

Als Basis für die zu definierenden Anforderungen an die Ausschreibung dient ein objektspezifisches Messkonzept (siehe Kapitel 2.2), welches die spezifischen Gegebenheiten des Objekts entweder für das Trasse oder Naturgefahren berücksichtigt.

Mit Berücksichtigung dieser aufgeführten Themen können, zusammen mit den vorgängig unter Datenerfassung, Raumbezug, Messgrößen und –genauigkeit angeführten Rahmenbedingungen, die Ausschreibungsanforderungen spezifisch vervollständigt werden.

Insbesondere sind bei dieser Technologie die ortsspezifischen Gegebenheiten zu berücksichtigen, welche ggf. Sperrungen oder Sicherungsmassnahmen erforderlich machen.

7.45.6 Literaturverzeichnis

Sonstige Literatur / Forschungsberichte

- [78] VSS-40330_2019-12: Eigenschaften der Fahrbahnoberflächen; Messverfahren der Tragfähigkeit – Deflexionsmessungen, Schweizerischer Verband der Strassen- und Verkehrsfachleute VSS, 2019
- [79] VSS-40733B: Erhaltung von Fahrbahnen; Oberbauverstärkung von Fahrbahnen in bituminöser Bauweise aufgrund von Deflexionsmessungen, Schweizerischer Verband der Strassen- und Verkehrsfachleute VSS, 2019
- [80] VSS-70362_2019-12: Eigenschaften der Fahrbahnoberflächen; Deflexionsmessungen – Benkelman-Balken, Schweizerischer Verband der Strassen- und Verkehrsfachleute VSS, 2019
- [81] Der Auszug aus dem FGSV-Regelwerk Nr. 433 B 1, Arbeitspapier Tragfähigkeit von Verkehrsflächenbefestigungen - Teil B 1: Benkelman-Balken: Gerätebeschreibung, Messdurchführung, Ausgabe 2014, ist mit freundlicher Genehmigung der Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen e.V. auszugsweise wiedergegeben worden. Maßgebend für das Anwenden des FGSV-Regelwerkes ist dessen Fassung mit dem neuesten Ausgabedatum, die beim FGSV Verlag, Wesseling Str. 15-17, 50999 Köln, www.fgsv-verlag.de, erhältlich ist.
- [82] Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen. Arbeitsgruppe Infrastrukturmanagement, Arbeitspapier Tragfähigkeit von Verkehrsflächenbefestigungen - Teil A: Messsysteme, FGSV Verlag GmbH, 2020.

7.46 Deflektograph/Lacroix

7.46.1 Beschrieb der Technologie

Der Deflektograph/Lacroix erweitert das Prinzip des Benkelman-Balkens durch die Kombination von Messsystem und Belastungsfahrzeug (vgl. Abb. 7.82). Dabei erfolgt die eigentliche Messung der Einsenkung der Oberfläche infolge einer Belastung, analog zum Benkelman-Balken. Eine an einem Messbalken befindliche Tastspitze liegen direkt auf der Oberfläche auf. Die durch eine Belastung der Oberfläche in der Nähe der Tastspitze hervorgerufene Vertikalbewegung der Tastspitze überträgt sich auf den Messbalken und wird direkt gemessen.



Abb. 7.82 Deflectograph/Lacroix [83].

Die Besonderheit des Deflektograph/Lacroix besteht in der automatisierten Platzierung von zwei Messbalken in der linken und rechten Rollspur, während der Vorwärtsbewegung des für die Belastung der Oberfläche genutzten Fahrzeugs.

Beim Deflectograph/Lacroix wird die erste Messung ohne Belastung durchgeführt, indem das Messbalkensystem automatisch vor den Zwillingsreifen des Belastungsfahrzeugs platziert wird. Anschliessend bewegt sich der Deflektograph/Lacroix in Fahrtrichtung weiter, während das Messbalkensystem auf der Strassenoberfläche verbleibt und kontinuierlich Messwerte erfasst. Wenn die Zwillingsreifen die Messspitzen passiert haben, wird das Messbalkensystem automatisiert nach vorne gezogen, so dass es sich wieder vor den Zwillingsreifen befindet und eine neue Messung beginnen kann. Auf diese Weise können mit dem Deflektograph/Lacroix automatisiert Belastungsmessungen durchgeführt werden, während sich das Belastungsfahrzeug mit einer kontinuierlichen Geschwindigkeit (ca. 3 km/h) fortbewegt.

7.46.2 Einsatzzweck und Fragestellung im Bereich Trasse

Der Deflektograph/Lacroix eignet sich für die Durchführung von Einsenkungsmessungen auf Fahrbahnbefestigungen. Die Messungen können direkt auf Fahrbahnbefestigungen in Asphaltbauweise durchgeführt werden. Eine Anwendung auf Verkehrsflächenbefestigungen mit Pflaster- oder Betondecken ist nicht sinnvoll [83].

Der Deflektograph/Lacroix eignet sich für die Untersuchung der folgenden Fragestellungen:

- Überprüfung des Last-Verformungsverhaltens von gebundenen Verkehrswegebefestigungen
- Überprüfung der Gleichmässigkeit des Last-Verformungsverhaltens von gebundenen Verkehrswegebefestigungen oder einzelner gebundener Befestigungsschichten (z.B. als zusätzliche Prüfung im Rahmen der Bauüberwachung)

Beurteilung der Tragfähigkeit von Fahrbahnbefestigungen nach hydrologischen Extremereignissen (starker Anstieg des Grundwasserhorizonts, Überschwemmungen).

7.46.3 Datenerfassung, Raumbezug, Messgrössen und Genauigkeit

Die Datenerfassung erfolgt automatisiert und digital und mit einem festen Abstand der Messpunkte. Neben der maximalen Einsenkung wird für die Messpunkte jeweils auch die Verformung bei der Annäherung der Lastachse an den Messpunkt erfasst.

Mit dem Messsystem ist eine Erfassung mit einer Geschwindigkeit von 3 bis 5 km/h möglich. Pro Arbeitstag können etwa 20 bis 30 Kilometer mit einem Messpunkt Abstand von ca. 3 bis 6 Meter aufgenommen werden [83].

Mit dem Messsystem können Einsenkungen zwischen 0 und 5 mm mit einer Genauigkeit von 0,01 mm über den gesamten Messbereich erfasst werden [83]. In dem Messbereich von 0,2 mm bis 1,2 mm liegt die Genauigkeit bei 0,03 mm [83].

Die Positionierung der Messpunkte unterliegt Einschränkungen durch den Aufbau des Messsystems. In der Regel erfolgt die Datenaufnahme in der rechten und linken Rollspur des Hauptfahrestreifens mit einem Messpunkt Abstand von 3 bis 6 Metern [83].

7.46.4 Entwicklungsstand, Anwendungsgrenzen, Kosten

Aufgrund der Kosten des Systems existieren nur einzelne Messsysteme [83].

Der Deflektograph entspricht dem Stand der Technik. Aufgrund der automatisierten Platzierung des Messbalkensystems, ist der Einsatz des Systems auf Strecken mit starken Störungen der Längsebenheit (z.B. kurzzeitige Längsebenheitsschwankungen, Schlaglöcher) oder auf Betonfahrbahnen nicht sinnvoll [83]. Weiterhin ist keine Anwendung in Kurven mit einem Kurvenradius von weniger als 40 Metern möglich [83].

Die Messung ist mit geeigneten Sicherungsmassnahmen auch im fließenden Verkehr erfolgen.

Die Kosten belaufen sich auf ca. 150 CHF/km zuzüglich der Messgerätebereitstellung vor Ort.

7.46.5 Ergänzende Ausschreibungsanforderungen

Als Basis für die zu definierenden Anforderungen an die Ausschreibung dient ein objektspezifisches Messkonzept (siehe Kapitel 2.2), welches die spezifischen Gegebenheiten des Objekts entweder für das Trasse oder Naturgefahren berücksichtigt.

Mit Berücksichtigung dieser aufgeführten Themen können, zusammen mit den vorgängig unter Datenerfassung, Raumbezug, Messgrößen und –genauigkeit angeführten Rahmenbedingungen, die Ausschreibungsanforderungen spezifisch vervollständigt werden.

Insbesondere sind bei dieser Technologie die ortsspezifischen Gegebenheiten zu berücksichtigen, welche ggf. Sperrungen oder Sicherungsmassnahmen erforderlich machen.

7.46.6 Literaturverzeichnis

Sonstige Literatur / Forschungsberichte

- [83] Der Auszug aus dem FGSV-Regelwerk Nr. 433 A, Arbeitspapier Tragfähigkeit von Verkehrsflächenbefestigungen - Teil A: Messsysteme, Ausgabe 2020, ist mit freundlicher Genehmigung der Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen e.V. auszugsweise wiedergegeben worden. Maßgebend für das Anwenden des FGSV-Regelwerkes ist dessen Fassung mit dem neuesten Ausgabedatum, die beim FGSV Verlag, Wesseling Str. 15-17, 50999 Köln, www.fgsv-verlag.de, erhältlich ist.
-

C 7 Tragfähigkeit - Geophone

Geophone eignen sich zur Erfassung von Bodenschwingungen. Sie werden auf der Oberfläche aufgesetzt und erfassen Vertikalbewegungen durch ein Federschwingsystem.

Für die Erfassung der Tragfähigkeit werden ein oder mehrere Geophone, in definiertem Abstand um ein Fallgewicht oder bewegliches Gewicht, welches eine Gewichtskraft auf die Oberfläche ausübt, auf der Oberfläche platziert. Durch diese Krafteinwirkung entsteht auf der Verkehrsfläche eine Verformungsmulde. Über die Auswertung der erfassten Verformung kann die Deflektionsmulde erfasst werden und es können Rückschlüsse auf die Tragfähigkeit der Oberfläche gezogen werden.

Tab. 7.19 Tragfähigkeit – Geophone - Übersicht

Technologie Nr und Name	7.47	7.48	7.49
Fallgewichtsgesetz	7.47.1	7.48.1	7.49.1
Kurzbeschreibung	Das Fallgewichtsgesetz erzeugt einen gedämpften Stoß auf die Oberfläche, so dass die maximale Setzung während des Stoßes bestimmt werden kann.	Bei dem FWD wird ein durch eine Fallplatte erzeugter Kraftstoß durch mehreren, in verschiedenen Abständen zur Lastplatte angeordneten Geophonen aufgezeichnet, um Rückschlüsse auf die Deflektion	Das Curviavmetro kombiniert Messsystem und Belastungsflanzung in einem System. Die von dem Fahrzeug erzeugte Last wird durch mehrere auf einer Endloskette montierte Geophone während der Fahrt erfasst.
Einsatzzweck	7.47.2	7.48.2	7.49.2
„ID“	DFG1	DFW1	DCU1
Typisierung	7.47.3	7.48.3	7.49.3
Messgrößen und -genauigkeit	7.47.4	7.48.4	7.49.4
Kosten	7.47.4	7.48.4	7.49.4
Entwicklungsstand	7.47.4	7.48.4	7.49.4
Kosten wiederkehrend	7.47.4	7.48.4	7.49.4

7.47 Fallgewichtsgesetz

7.47.1 Beschreibung der Technologie

Das Fallgewichtsgesetz erzeugt einen gedämpften Stoß auf die Oberfläche. Der Stoß wird durch ein Lastgewicht realisiert, welches einen definierten Fall auf den Boden ausführt (vgl. Abb. 7.83). Die dabei erzeugten Massenträgheitskräfte werden durch einen Sensor gemessen, so dass die maximale Setzung während des Stoßes bestimmt werden kann. Die Sensoren der Fallgewichtsgesetze können als Beschleunigungssensoren oder Geophone ausgeführt sein. Unterschiedliche Ausführungen gibt es ebenfalls in Bezug auf das Fallgewicht und die damit erreichte maximale Normalspannung unter der Lastplatte. In Abhängigkeit des zu untersuchenden Bodens, kann zwischen «Leichten Fallgewichtsgesetzen» (maximale Normalspannung unter der Lastplatte: 0.1 MN/m²) und «Mittelschweren Fallgewichtsgesetzen» (maximale Normalspannung unter der Lastplatte: 0,2 MN/m²) unterschieden werden.



Abb. 7.83 Leichtes Fallgewichtsgesetzgerät [84]

7.47.2 Einsatzzweck und Fragestellung im Bereich Trasse

Das Fallgewichtsgesetzgerät eignet sich für die Durchführung von Einsenkungsmessungen auf Fahrbahnbefestigungen. Das Messgerät eignet sich insbesondere für die Bestimmung der Verdichtung auf grobkörnigen und gemischtkörnigen Böden [85].

Das Fallgewichtsgesetzgerät eignet sich für die Untersuchung der folgenden Fragestellungen:

- Überprüfung des Last-Verformungsverhaltens von gebundenen Verkehrswegebefestigungen. Der Einsatz für ungebundene Schichten liegt bislang im Bereich der Forschung.
- Überprüfung der Gleichmässigkeit des Last-Verformungsverhaltens von gebundenen und ungebundenen Verkehrswegebefestigungen oder einzelner Befestigungsschichten (z.B. als zusätzliche Prüfung im Rahmen der Bauüberwachung)
- Quantitativer Vergleich der Last-Verformungseigenschaften und des Gebrauchsverhaltens unterschiedlicher Bauweisen

Beurteilung der Tragfähigkeit von Fahrbahnbefestigungen nach hydrologischen Extremereignissen (starker Anstieg des Grundwasserhorizonts, Überschwemmungen).

7.47.3 Datenerfassung, Raumbezug, Messgrössen und Genauigkeit

Mit dem Fallgewichtsgesetzgerät lassen sich Setzungen im Bereich von ca. 0,1 mm bis 2 mm bestimmen. Die Auflösung liegt dabei typischerweise mindestens bei 0.02 mm.

Die Datenerfassung erfolgt durch Beschleunigungssensoren oder Geophone und wird digital erfasst. Die Messwerte können anschliessend in vielen Fällen in digitaler Form übertragen werden.

Die Positionierung der Messstellen unterliegt bei dem Verfahren grundsätzlich keinen Einschränkungen. Die Erfassung der Position der Messung kann über GPS-Sensoren erfolgen.

7.47.4 Entwicklungsstand, Anwendungsgrenzen, Kosten

Das Fallgewichtsgesetz ist bereits seit sehr vielen Jahren im Einsatz. Mit der Integration der digitalen und drahtlosen Datenübertragung kann die Entwicklung des Verfahrens als abgeschlossen angesehen werden.

Aufgrund der geringen Kosten des Messinstruments hat das Fallgewichtsgesetz eine sehr grosse Verbreitung. Dank des geringen Platz- und Zeitbedarfs für eine Messung (ca. 2 Minuten) eignet sich das Messgerät sehr gut für Kontrollmessungen (z.B. während der Bauphase).

Einzelne Geräte können bereits ab ca. 3000 CHF von diversen Herstellern bezogen werden.

7.47.5 Ergänzende Ausschreibungsanforderungen

Als Basis für die zu definierenden Anforderungen an die Ausschreibung dient ein objektspezifisches Messkonzept (siehe Kapitel 2.2), welches die spezifischen Gegebenheiten des Objekts entweder für das Trasse oder Naturgefahren berücksichtigt.

Mit Berücksichtigung dieser aufgeführten Themen können, zusammen mit den vorgängig unter Datenerfassung, Raumbezug, Messgrößen und –genauigkeit angeführten Rahmenbedingungen, die Ausschreibungsanforderungen spezifisch vervollständigt werden.

7.47.6 Literaturverzeichnis

Sonstige Literatur / Forschungsberichte

[84] Der Auszug aus dem FGSV-Regelwerk Nr. 433 B 2.1, Arbeitspapier Tragfähigkeit von Verkehrsflächenbefestigungen - Teil B 2.1: Falling Weight Deflectometer (FWD): Gerätebeschreibung, Messdurchführung - Asphaltbauweisen, Ausgabe 2008, ist mit freundlicher Genehmigung der Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen e.V. auszugsweise wiedergegeben worden. Maßgebend für das Anwenden des FGSV-Regelwerkes ist dessen Fassung mit dem neuesten Ausgabedatum, die beim FGSV Verlag, Wesseling Str. 15-17, 50999 Köln, www.fgsv-verlag.de, erhältlich ist.

[85] Viellieber, Anja: Bodenverbesserung und Bodenaustausch, Ein Vergleich der Verfahren zur Leitungsrabenverfüllung anhand eines Neubaugebietes. Bachelorthesis an der HTWG, 2023.

7.48 Falling Weight Deflectometer (FWD)

7.48.1 Beschreibung der Technologie

Das Falling Weight Deflectometer (FWD) besteht im Wesentlichen aus einer Fallmasse, einer Lastplatte, einer Lastdose und mehreren, in verschiedenen Abständen zur Lastplatte angeordneten Geophonen (vgl. Abb. 7.84).

Der durch das Fallgewicht eingebrachte Kraftstoß (in der Regel 50 kN) wird durch die Kraftmessdose erfasst. Die Erfassung der, durch das Fallgewicht initiierten Deflektionsmulde, erfolgt durch die Geophone. Die Geophone sind sowohl in der Lastplatte, als auch an einem bis zu 3 Meter langem Geophonenbalken angebracht.

FWD werden in unterschiedlichen Bauarten vertrieben und können beispielsweise als Anhänger oder als in ein Fahrzeug eingebautes FWD realisiert werden. Weiterhin unterscheiden sie sich in Bezug auf die Masse des Fallgewichts.

Für die Messung werden die Lastplatte und die Geophone an geeigneter Stelle auf der Verkehrsfläche abgesetzt. Anschliessend können ein oder mehrere Messungen an der Messstelle erfolgen.

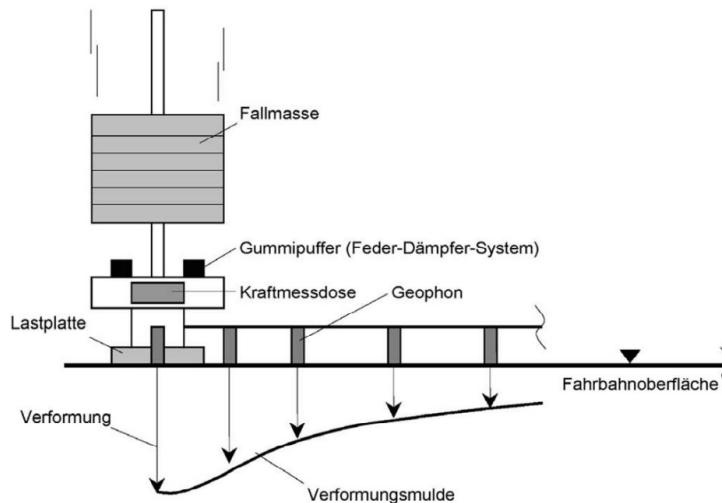


Abb. 7.84 Prinzipdarstellung des Falling Weight Deflectometer (FWD) [86].

Als Weiterentwicklung des hier beschriebenen FWD mit einer Fallmasse gibt es auch ein FWD, welches mit zwei Fallmassen arbeitet. Dabei fällt das erste Fallgewicht (mit erstem Puffer) auf ein zweites Fallgewicht (mit einem zweiten Puffer). Dadurch wird die Dauer der Krafteinwirkung verlängert, was zu einer grösseren Ähnlichkeit zu einer radlastbasierten Krafteinwirkung führen soll. Weiterhin kann die Messung anstelle von Geophonen über Seismographen erfolgen, welche einen höheren Erfassungsbereich aufweisen.

Ebenfalls zu erwähnen ist in diesem Zusammenhang das Heavy Weight Deflectometer (HWD), welches sich von dem FWD vor allem darin unterscheidet, dass die Fallmasse einen deutlich höheren Kraftstoss ausübt (bis ca. 300 kN). Dadurch wird dieses Gerät vor allem auf Flughäfen im Bereich der Landebahnen eingesetzt.

7.48.2 Einsatzzweck und Fragestellung im Bereich Trasse

Das Falling Weight Deflectometer eignet sich für die Durchführung von Einsenkungsmessungen auf Fahrbahnbefestigungen. Die Messungen können auf Fahrbahnbefestigungen mit Asphalt-, Beton- und Pflasterdecke erfolgen.

Der Falling Weight Deflectometer eignet sich für die Untersuchung der folgenden Fragestellungen:

- Überprüfung des Last-Verformungsverhaltens von gebundenen Verkehrswegebefestigungen
- Überprüfung der Gleichmässigkeit des Last-Verformungsverhaltens von gebundenen Verkehrswegebefestigungen oder einzelner gebundener Befestigungsschichten (z.B. als zusätzliche Prüfung im Rahmen der Bauüberwachung)
- Quantitativer Vergleich der Last-Verformungseigenschaften und des Gebrauchsverhaltens unterschiedlicher Bauweisen

Beurteilung der Tragfähigkeit von Fahrbahnbefestigungen nach hydrologischen Extremereignissen (starker Anstieg des Grundwasserhorizonts, Überschwemmungen).

7.48.3 Datenerfassung, Raumbezug, Messgrössen und Genauigkeit

Die analogen Messwerte der Geophone oder Seismographen werden nach einer A/D-Wandlung digital weiterverarbeitet. Für die Messung der Deflektion und der Lasteinwirkung werden jeweils die Maximalwerte und der zeitliche Verlauf aufgezeichnet. Dabei liegt die Genauigkeit der Geophone bei weniger als 0,002 mm und die Auflösung der Kraftmessdose bei einer Auflösung von wenigstens 0,1 kN.

Die Verortung der Messung muss mindestens über die Kilometrierung, in der Regel aber zusätzlich über GPS-Positionsbestimmungen erfolgen.

7.48.4 Entwicklungsstand, Anwendungsgrenzen, Kosten

Die Messung der Tragfähigkeit mit dem FWD besitzt eine grosse Verbreitung und die Entwicklung kann als weitestgehend abgeschlossen angesehen werden.

Pro Arbeitstag kann mit dem FWD an bis zu 200 Messpunkte gemessen werden. In der Regel werden Messpunkte mit einem Abstand von 25 Metern aufgenommen [87].

Aufgrund des mobil ausgelegten Aufbaus unterliegt die Positionierung der Messpunkte kaum Restriktionen.

Messungen können nicht im fließenden Verkehr erfolgen.

Die Kosten für den Einsatz der Technologie setzen sich zusammen aus:

- Einer Einsatzpauschale ca. 1200 CHF
- Kosten pro einzelner Deflektionsmessung von ca. 30 CHF

7.48.5 Ergänzende Ausschreibungsanforderungen

Als Basis für die zu definierenden Anforderungen an die Ausschreibung dient ein objektspezifisches Messkonzept (siehe Kapitel 2.2), welches die spezifischen Gegebenheiten des Objekts entweder für das Trasse oder Naturgefahren berücksichtigt.

Mit Berücksichtigung dieser aufgeführten Themen können, zusammen mit den vorgängig unter Datenerfassung, Raumbezug, Messgrößen und –genauigkeit angeführten Rahmenbedingungen, die Ausschreibungsanforderungen spezifisch vervollständigt werden.

Insbesondere sind bei dieser Technologie die ortsspezifischen Gegebenheiten zu berücksichtigen, welche ggf. Sperrungen oder Sicherungsmassnahmen erforderlich machen.

7.48.6 Literaturverzeichnis

Sonstige Literatur / Forschungsberichte

[86] Der Auszug aus dem FGSV-Regelwerk Nr. 433 A, Arbeitspapier Tragfähigkeit von Verkehrsflächenbefestigungen - Teil A: Messsysteme, Ausgabe 2020, ist mit freundlicher Genehmigung der Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen e.V. auszugsweise wiedergegeben worden. Maßgebend für das Anwenden des FGSV-Regelwerkes ist dessen Fassung mit dem neuesten Ausgabedatum, die beim FGSV Verlag, Wesseling Str. 15-17, 50999 Köln, www.fgsv-verlag.de, erhältlich ist.

[87] Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen. Arbeitsgruppe Infrastrukturmanagement, Arbeitspapier Tragfähigkeit - Teil B 2.1: Falling Weight Deflectometer (FWD): Gerätebeschreibung, Messdurchführung - Asphaltbauweisen, FGSV Verlag GmbH, 2008.

7.49 Curviametro

7.49.1 Beschrieb der Technologie

Bei dem Messsystem Curviametro wird die Deflektion der Oberfläche durch die Radlast des sich bewegendes Messsystems gemessen. Während der Bewegung des Systems werden zyklisch Geophone auf der Oberfläche platziert, an denen sich das Curviametro vorbeibewegt.

Um das temporäre Platzieren der Geophone auf der Oberfläche zu ermöglichen, sind diese auf einer Kette befestigt, welche sich mit Fahrtgeschwindigkeit durch das Messfahrzeug bewegt (vgl. Abb. 7.85). Die Kette verläuft zwischen den beiden hinteren, rechten

Zwillingsreifen des Curviametro und liegt im unteren Bereich auf dem Boden auf, um die Geophone zyklisch auf der Oberfläche ablegen zu könne.

Auf der 15 Meter langen Kette sind dabei 3 Geophone angebracht, so dass alle 5 Meter Messwerte für die Vorbeifahrt der bewegten Masse des Curviametros erfasst werden können. Aufgrund der mittigen Position des Rades innerhalb der Kette, kann sowohl der Belastungs- als auch der Entlastungsprozess erfasst werden.

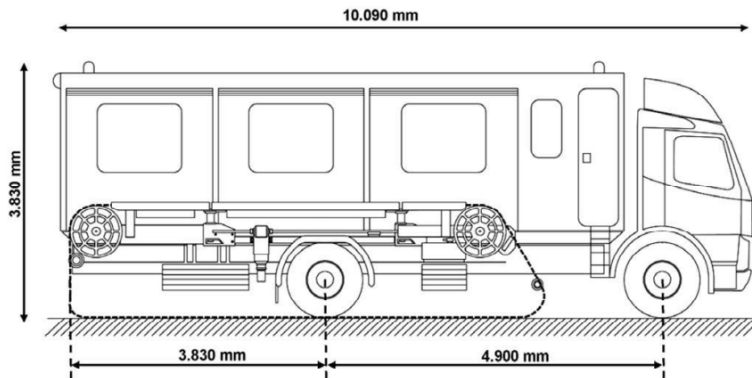


Abb. 7.85 Darstellung des Messprinzips des Curviametro [88].

Die Messung wird mit einer konstanten Geschwindigkeit des Messfahrzeugs von 5 m/s (18 km/h) durchgeführt. Der Vor- und Nachlauf der Messung beträgt etwa 50 Meter.

7.49.2 Einsatzzweck und Fragestellung im Bereich Trasse

Das Messsystem Curviametro eignet sich für die Durchführung von Einsenkungsmessungen auf Fahrbahnbefestigungen. Die Messungen können auf Fahrbahnbefestigungen mit Asphaltdecke erfolgen.

Das Curviametro eignet sich für die Untersuchung der folgenden Fragestellungen:

- Überprüfung des Last-Verformungsverhaltens von gebundenen Verkehrswegebefestigungen
- Überprüfung der Gleichmässigkeit des Last-Verformungsverhaltens von gebundenen Verkehrswegebefestigungen

7.49.3 Datenerfassung, Raumbezug, Messgrössen und Genauigkeit

Die Messwerte der Geophone werden für die Weiterverarbeitung digitalisiert. Dabei kann das System Verformungen der Oberfläche mit einer Genauigkeit von 0,001 mm aufnehmen. Neben den Maximalwerten werden jeweils auch die zeitlichen Verlaufswerte der Geophone erfasst.

Die Verortung der Messung muss mindestens über die Kilometrierung, in der Regel aber zusätzlich über GPS-Positionsbestimmungen erfolgen.

7.49.4 Entwicklungsstand, Anwendungsgrenzen, Kosten

Pro Arbeitstag können mit dem Curivametro etwa 100 Kilometer erfasst werden [88].

Aufgrund der automatisierten Platzierung der Geophone, ist der Einsatz des Systems auf Strecken mit starken Störungen der Längsebenheit (z.B. kurzweilige Längsebenheitsschwankungen, Schlaglöcher) nicht sinnvoll. Weiterhin können Messungen nur bei Kurvenradien von mehr als 40 Metern erfolgen.

Die Kosten belaufen sich auf ca. 250 CHF/km zuzüglich der Messgerätebereitstellung vor Ort.

7.50 Traffic speed deflectometer

7.50.1 Beschrieb der Technologie

Das Messprinzip des Traffic Speed Deflectometer (TSD) basiert auf der Nutzung von Doppler-Lasern, um die Geschwindigkeit der Verformung der Oberfläche bei einer Belastung zu messen. Dazu werden durch Doppler-Laser Messungen in verschiedenen, definierten Abständen zu einer, sich über die Oberfläche bewegend, Masse erfasst. Aus den erfassten Verformungsgeschwindigkeiten der Oberfläche lassen sich anschliessend Aussagen über die von der Masse verursachte Verformungsmulde treffen.

Der TSD ist in Form eines Zugfahrzeugs mit einem einachsigen Sattelaufleger ausgeführt (vgl. Abb. 7.86). Die Doppler-Laser sind in dem Aufleger senkrecht zur Fahrbahn ausgerichtet und nehmen ihre Messwerte vor der Achse des Auflegers auf. An jeder Sensorposition wird von dem System der sogenannte Slope-Wert (Anstieg der Verformungsmulde an der Messstelle) bestimmt, wodurch die Verformungsmulde bestimmt werden kann.

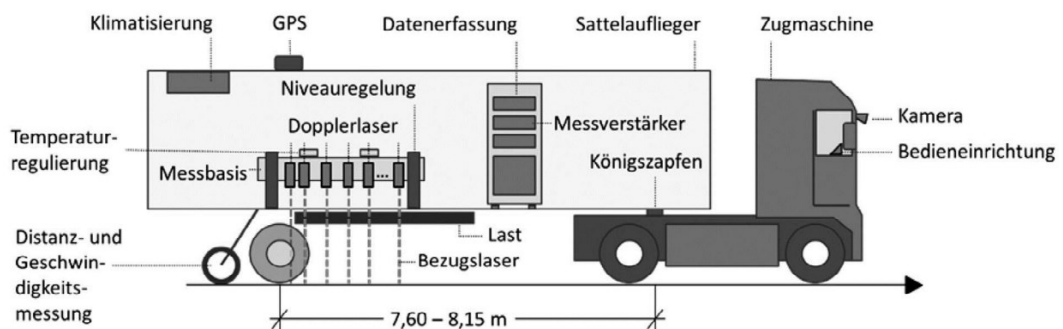


Abb. 7.86 Prinzipskizze des Traffic Speed Deflectometer (TSD) [89]

Die Messung sollte bei einer gleichmässigen Geschwindigkeit zwischen 40 und 80 km/h erfolgen [89].

7.50.2 Einsatzzweck und Fragestellung im Bereich Trasse

Das Messsystem TSD eignet sich für die Durchführung von Einsenkungsmessungen auf Fahrbahnbefestigungen. Die Messungen können nach dem Stand der Technik auf Fahrbahnbefestigungen mit Asphaltdecke durchgeführt. Neuere Untersuchungen zeigen auch die Anwendbarkeit des Messsystems TSD auf Fahrbahndecken in Betonbauweise. Diese Ergebnisse müssen allerdings noch weiter analysiert werden.

Der TSD eignet sich auf Asphaltbefestigungen für die Untersuchung der folgenden Fragestellungen:

- Überprüfung des Last-Verformungsverhaltens von gebundenen Verkehrswegebefestigungen
- Überprüfung der Gleichmässigkeit (Homogenität) des Last-Verformungsverhaltens von gebundenen Verkehrswegebefestigungen

Auf Betonfahrbahnen können folgende Parameter erfasst werden:

- Überprüfung Lastübertragung an den Querfugen (Wirksamkeitsindex)
- Detektion von gerissenen Platten (Querriss)

7.50.3 Datenerfassung, Raumbezug, Messgrößen und Genauigkeit

Die Messwerte des TSD werden für Messungen auf Asphaltkonstruktionen jeweils über mindestens 10 Meter gemittelt, so dass mit einer maximalen Auflösung von 10 Metern gemessen werden kann. Bei Betonfahrbahnen erfolgt die Auswertung über die Sensoren

in der Lastachse, so dass dort die Reaktionen im Bereich der Querfuge aufgenommen werden können.

Die Verortung der Messdaten erfolgt über ein kombiniertes GPS- und Inertialmesssystem.

Das System liefert Messdaten nur in Form von Mittelungen über 10-Meter-Abschnitte, wodurch keine genaue Spezifikation der Messgenauigkeit möglich ist. In der Literatur wurde das Verfahren, auf Grundlage der 10-Meter-Mittelwerte, mit FWD-Verfahren verglichen und konnte eine gute Verlaufsgleichheit der Werte erreichen.

7.50.4 Entwicklungsstand, Anwendungsgrenzen, Kosten

Derzeit sind weltweit etwa 20 TSD-Messgeräte im Einsatz.

Enge Kurvenradien können nicht erfasst werden, da die Erfassung aller Doppler-Laser in einer Linie liegen muss. Das Messprinzip setzt eine gleichmässig reflektierende Fahrbahnoberfläche voraus, so dass eine Messung bei Nässe oder Verschmutzung der Fahrbahn nur eingeschränkt möglich ist. Weiterhin sollte während der Messung eine Geschwindigkeit von 30 km/h nicht unterschritten werden, da es ansonsten zu stark überhöhten Deflektionsmesswerten kommen kann [90].

Die Messung ist weiterhin auf Betonbauwerken nicht zuverlässig möglich.

Unter Beachtung der Lenk- und Ruhezeiten können mit dem TSD theoretisch bis zu 600 km pro Messtag erfasst werden [89]. Die Kosten belaufen sich auf ca. 250 CHF/km zuzüglich der Messgerätebereitstellung vor Ort.

7.50.5 Ergänzende Ausschreibungsanforderungen

Als Basis für die zu definierenden Anforderungen an die Ausschreibung dient ein objektspezifisches Messkonzept (siehe Kapitel 2.2), welches die spezifischen Gegebenheiten des Objekts entweder für das Trasse oder Naturgefahren berücksichtigt.

Mit Berücksichtigung dieser aufgeführten Themen können, zusammen mit den vorgängig unter Datenerfassung, Raumbezug, Messgrößen und –genauigkeit angeführten Rahmenbedingungen, die Ausschreibungsanforderungen spezifisch vervollständigt werden.

7.50.6 Literaturverzeichnis

Sonstige Literatur / Forschungsberichte

[89] Der Auszug aus dem FGSV-Regelwerk Nr. 433 B 5, Arbeitspapier Tragfähigkeit von Verkehrsflächenbefestigungen - Teil B 5: Schnell fahrendes Messsystem Traffic Speed Deflectometer (TSD): Gerätebeschreibung, Messdurchführung, Ausgabe 2015, ist mit freundlicher Genehmigung der Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen e.V. auszugsweise wiedergegeben worden. Maßgebend für das Anwenden des FGSV-Regelwerkes ist dessen Fassung mit dem neuesten Ausgabedatum, die beim FGSV Verlag, Wesseling Str. 15-17, 50999 Köln, www.fgsv-verlag.de, erhältlich ist.

[90] M. Gribble und D. Stevens, „What do we do with the TrafficSpeed Deflectometer results?“, NZ Transport Agency & NZIHT 17th Annual Conference, 2016.

7.51 Rapid Pavement Tester (RAPTOR)

7.51.1 Beschrieb der Technologie

Der Rapid Pavement Test (RAPTOR) nutzt Lasersensoren für die Bestimmung des Abstandes der Oberfläche zu einem Querbalken, um die Deformation durch eine Masse zu bestimmen. Bei der Vorwärtsbewegung des Systems werden jeweils Messungen des gleichen Oberflächenbereichs durch benachbarte Sensoren erfasst. Um die Erfassung des gleichen Oberflächenbereiches sicherzustellen, werden Linienlaser mit einer hohen Abtastfrequenz eingesetzt. Identische Oberflächenpunkte werden durch Kreuzkorrelationen in den Oberflächenmessungen benachbarter Sensoren bestimmt.

Anschliessend kann über Differenzmessungen die eigentliche Form der Deflektionsmulde bestimmt werden.

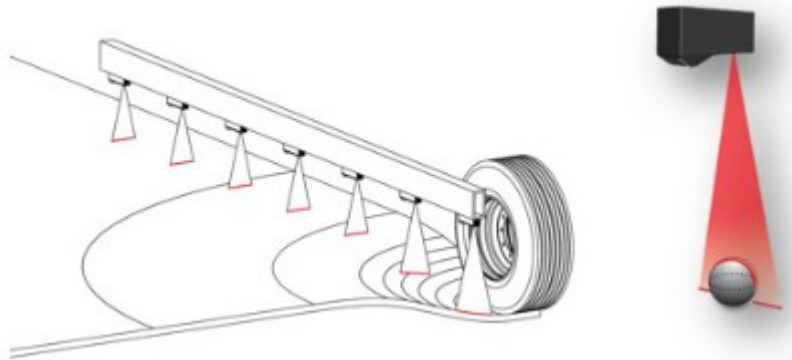


Abb. 7.87 Darstellung der Höhenmessung der Linienlaser des RAPTOR [91]

Der RAPTOR ist in Form eines Zugfahrzeugs mit einem einachsigen Sattelaufleger ausgelegt und kann Messungen gleichzeitig in der linken und rechten Radspur durchführen. Die Messungen mit dem RAPTOR kann bei Geschwindigkeiten zwischen 2 und 80 km/h erfolgen.

7.51.2 Einsatzzweck und Fragestellung im Bereich Trasse

Das Messsystem RAPTOR eignet sich für die Durchführung von Einsenkungsmessungen auf Fahrbahnbefestigungen. Die Messungen können auf Fahrbahnbefestigungen mit Asphalt- oder Betondecke erfolgen.

Das Messsystem eignet sich für die Untersuchung der folgenden Fragestellungen:

- Überprüfung des Last-Verformungsverhaltens von gebundenen Verkehrswegebefestigungen
- Überprüfung der Gleichmässigkeit des Last-Verformungsverhaltens von gebundenen Verkehrswegebefestigungen

7.51.3 Datenerfassung, Raumbezug, Messgrössen und Genauigkeit

Die von dem RAPTOR ermittelten Messwerte liegen im Bereich von Mikrometern [92]. Bei dem RAPTOR werden Messwerte über mehrere Messungen gemittelt, so dass eine verarbeitete Messpunktdichte von 10 Metern generiert wird.

7.51.4 Entwicklungsstand, Anwendungsgrenzen, Kosten

Bei dem Messsystem Raptor handelt es sich um eine relativ neue Entwicklung, deren Entwicklungspotential sich erst in den nächsten Jahren erweisen wird.

Unter Beachtung der Lenk- und Ruhezeiten können mit dem Raptor theoretisch bis zu 600 km pro Messtag erfasst werden. Für die Erfassung wird jedoch eine typische Erfassungsleistung von 250 Kilometern pro Tag angegeben. Die Kosten belaufen sich auf ca. 250 CHF/km zuzüglich der Messgerätebereitstellung vor Ort.

Es existieren nur einzelne Messfahrzeuge.

7.51.5 Ergänzende Ausschreibungsanforderungen

Als Basis für die zu definierenden Anforderungen an die Ausschreibung dient ein objektspezifisches Messkonzept (siehe Kapitel 2.2), welches die spezifischen Gegebenheiten des Objekts entweder für das Trasse oder Naturgefahren berücksichtigt.

Mit Berücksichtigung dieser aufgeführten Themen können, zusammen mit den vorgängig unter Datenerfassung, Raumbezug, Messgrößen und –genauigkeit angeführten Rahmenbedingungen, die Ausschreibungsanforderungen spezifisch vervollständigt werden.

7.51.6 Literaturverzeichnis

Sonstige Literatur / Forschungsberichte

[91] J. T. Maldonado, „Rolling Weight Deflectometer for Stiffer Pavements: Combining Machine Learning and Field Data,“ 2021.

[92] P. Deep, M. Andersen, S. Rasmussen, A. Marradi, N. Thom und D. Lo Presti, „Simulating Deflection of a Jointed Rigid Pavement Under Rolling Wheel Deflectometer (RAPTOR) Loading,“ 2020, pp. 859-870.

C 9 Achslast

Tab. 7.21 Achslast - Übersicht

Technologie		Weigh in Motion
7.52	Nr und Name	
7.52.1	Kurzbeschreibung	Weigh-in-Motion-Techniken ermöglichen die Messung der Achslasten von Fahrzeugen während der Fahrt, durch die Einbringung von druckempfindlichen Sensoren auf/in die Fahrbahnoberfläche.
7.52.2	Einsatzzweck	Gewichtsmessung während der Fahrt
7.52.2	"ID"	AWM1
7.52.2	a. Messprinzip	2 indirekt
7.52.2	b. Datenerfassung	1 digital
7.52.2	c. Datenspeicher	1 punktuell
7.52.2	d. Lokalisation	2 separat
7.52.2	e. Raumbezug	1 zerstörend
7.52.2	f. Zustand	Achslast/Radlast
7.52.3	Typisierung	
7.52.3	Grossen	
Messgrößen und -genauigkeit		Oberfläche
Untersuchungs-/Tiefenbereich		1 kg
Auflösung		6%
Genauigkeit		Genauigkeit wird bei 95% der Messungen erreicht
Bemerkungen		
Nutzung in Fachgebieten		
Trassee		3
Geotechnik		0
Naturgefahren		0
Umwelt		0
Einsatzzeitpunkt		N
7.52.4 Entwicklungsstand		
7.52.4 Kosten		
initial / einmalig		
wiederkehrend		

7.52 Weigh in Motion

7.52.1 Beschrieb der Technologie

Methoden aus dem Bereich der Weigh-in-Motion-Techniken ermöglichen die Messung der Achslasten von Fahrzeugen während der Fahrt. Dabei überfährt das Fahrzeug druckempfindliche Sensoren, welche auf der Fahrbahn aufgelegt sind, oder in die Fahrbahn eingelegt wurden. Abhängig von der Positionierung und Ausdehnung der Sensoren ist die Erfassung von Achslasten oder von einzelnen Radlasten möglich. Für die Erfassung von Achslasten, müssen die Sensoren möglichst über die komplette Fahrbahnbreite verbaut werden (vgl. Abb. 7.88), während für die Ermittlung einzelnen Radlasten mehrere schmale Einzelsensoren zum Einsatz kommen.

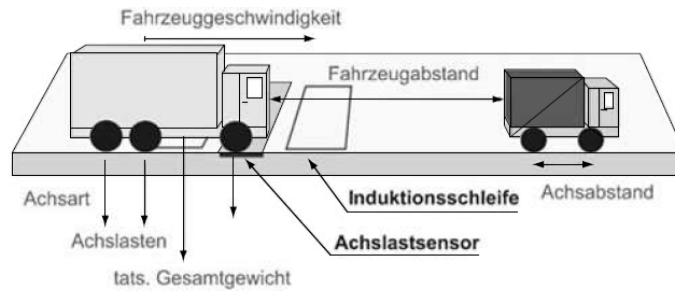


Abb. 7.88 Prinzipdarstellung der Achslastmessung über das Weigh-in-Motion-Verfahren. Bei der Überfahrt werden die einzelnen Achslasten des Fahrzeugs durch einen Sensor erfasst. Die Kombination der Sensoren mit Induktionsschleifen ermöglicht die sichere Zuordnung der Achslasten zu einzelnen Fahrzeugen. Quelle: [93]

Sensoren für die Weigh-in-Motion-Technik sind in [93] beschrieben und existieren sowohl für den temporären Einsatz als auch für den stationären Einsatz. Die Sensoren für den stationären Einsatz lassen sich wiederum in Streifensensoren und Wiegeplatten untergliedern. Im Folgenden werden zunächst kurz die Funktionsprinzipien der typischerweise zum Einsatz kommenden Drucksensoren beschreiben, bevor auf die Temporären – und Stationären Sensoren eingegangen wird.

Kapazitive Drucksensoren

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

Piezoelektrische Drucksensoren

Piezoelektrische Drucksensoren sind Geräte, die sich den piezoelektrischen Effekt zunutze machen, der darin besteht, aufgebrachte mechanische Spannungen in elektrische Ladungen umzuwandeln, um Druckschwankungen zu messen. Der ausgeübte Druck wird durch eine Membran auf einen internen piezoelektrischen Kristall übertragen, der im Allgemeinen aus Quarz oder Turmalin besteht und dessen Verformung verursacht. Aufgrund der geringen Auslenkung des Kristalls entstehen an seinen gegenüberliegenden Flächen zwei Ladungen, die proportional zum ausgeübten Druck sind und von einem externen oder internen Ladungsverstärker in eine Spannung umgewandelt werden. Diese elektrische Potentialdifferenz induziert einen elektrischen Stromfluss im angeschlossenen Stromkreis, die sogenannte Piezoelektrizität.

Faseroptische Drucksensoren

Optische Drucksensoren erkennen eine Druckänderung durch Veränderungen des Lichtflusses bei Druckeinwirkung. Im einfachsten Fall kann dies ein mechanisches System sein, das das Licht bei steigendem Druck blockiert. Bei fortschrittlicheren Sensoren ermöglicht die Messung der Phasendifferenz eine sehr genaue Messung kleiner Druckänderungen. Bei einem optischen Drucksensor auf Intensitätsbasis führt ein Druckanstieg dazu, dass die Lichtquelle nach und nach blockiert wird. Der Sensor misst dann die Veränderung des empfangenen Lichts.

Temporäre Sensoren

Temporäre Sensoren werden auf die Fahrbahn aufgelegt und müssen folglich sehr flach aufgebaut sein, um eine verkehrssichere Anbringung zu ermöglichen. Für diesen

Einsatzzweck kommen in der Regel kapazitive Drucksensoren zum Einsatz, die durch Dübel und Kleber mit der Fahrbahn verbunden werden. Die Wiederverwendbarkeit und Haltbarkeit der Sensoren ist begrenzt. Weiterhin entstehen durch die von den Sensoren selbst verursachte Unebenheit der Fahrbahn Schwingungen an den Fahrzeugen, die einer genauen Lastmessung entgegenstehen. Daher weisen temporäre Sensoren in der Regel eine geringere Genauigkeit als stationäre Sensoren auf.

Stationäre Sensoren – Streifensensoren

Unter Streifensensoren, werden Drucksensoren zusammengefasst, welche streifenförmig / schlauchförmig aufgebaut sind und quer zur Fahrtrichtung verlegt werden. Zu diesen Sensoren zählen vor allem piezoelektrische Drucksensoren (vgl. Abb. 7.89 links) oder faseroptische Drucksensoren. Durch Druckeinwirkung ändern sich die elektrischen (piezoelektrischer Sensor) oder optischen (faseroptischer Sensor) Eigenschaften der Sensoren und ermöglichen eine indirekte Lastmessung.

Der Einbau von Streifensensoren erfolgt, indem die Fahrbahn mit einem schmalen Schlitz versehen wird, in welchem ein Streifensensor platziert wird (vgl. Abb. 7.89 rechts).

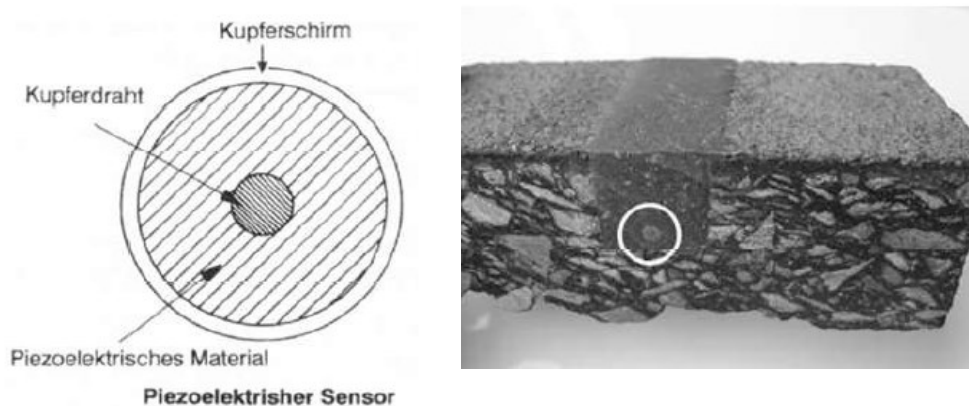


Abb. 7.89 Links: Schnitt durch einen piezoelektrischen Sensor. Bei Druckeinwirkung verformt sich das piezoelektrische Material, was zu einer Änderung des elektrischen Signals zwischen Innen- und Aussenleiter führt. Quelle: [93]. Rechts: Querschnitt durch einen in der Fahrbahn verlegten Piezosensor (weiss). Quelle: [93]

Stationäre Sensoren – Wiegeplatten

Wiegeplatten werden ebenfalls quer zur Fahrtrichtung in die Fahrbahn eingebaut. Die Sensoren sind von der Breite jedoch so dimensioniert, dass die vollständige Aufstandsfläche eines Reifens gleichzeitig auf den Sensor einwirkt.

Wiegeplatten können in Form von Biegeplatten ausgeführt sein (vgl. Abb. 7.90), welche sich bei einer Gewichtseinwirkung verformen. Diese Verformung wird über Dehnungsmessstreifen erfasst und kann in ein Gewichtsäquivalent umgerechnet werden. Es existieren allerdings auch andere Bauformen, bei denen die Gewichtsmessung auf dem plattenförmigen Sensor z.B. über piezoelektrische Druckdosen erfolgt. Diese kommen mit weniger Einbauhöhe aus (um 55 mm) und eignen sich deshalb auch auf Brücken.



Abb. 7.90 Wiegeplatte nach dem Prinzip der Biegeplatte, bei der der das Gewicht durch die Plattenverformung erfasst wird. Quelle: [94]

Kombination mit Induktionsschleifen

Die Kombination der Weigh-in-Motion-Sensoren mit Induktionsschleifen ermöglicht die Zuordnung der Achs-/Radlasten zu einzelnen Fahrzeugen. Diese Kombination ist daher häufig anzutreffen und erweitert die von dem Messsystem adressierten Fragestellungen (7.52.2) deutlich.

7.52.2 Einsatzzweck und Fragestellung im Bereich Trasse

In Kombination mit Induktionsschleifen und (wenn Genauigkeit gefordert) mit Kameras für Fahrzeugklassen-Zuordnung lassen sich die folgenden fahrstreifenbezogenen Kenngrößen erfassen [93]:

- Achslasten
- Achsabstände
- Achsarten (Einfachachse, Doppel- und Dreifachachse)
- Fahrzeugmengen
- Fahrzeuggeschwindigkeiten
- Fahrzeugarten (einige Sensoren ermöglichen zusätzlich die Trennung der Achslasten in Radlasten)
- Tatsächliches Gesamtgewicht
- Überladungen
- Fahrzeuglängen

7.52.3 Datenerfassung, Raumbezug, Messgrößen und Genauigkeit

Die Messdaten werden je nach eingesetzten Sensoren elektrisch oder optoelektronisch erfasst. Nach einer zwingenden periodischen Kalibrierung können die Messwerte von dem System in Gewichtsäquivalente umgerechnet werden.

Die Messergebnisse der Technik werden durch dynamische Schwingungen der Fahrzeugachsen und des Fahrzeugs überlagert. Um den Einfluss dieser Störquellen zu minimieren, sollte der Einbau der Sensoren nur in ebenen Fahrbahnbereichen erfolgen und möglichst eben ausgeführt sein.

Die Systeme sind i.d.R. derart ausgelegt, dass für 95% der Messungen ein Messfehler von weniger als 6% des tatsächlichen Gewichts sichergestellt werden kann.

7.52.4 Entwicklungsstand, Anwendungsgrenzen, Kosten

Der Einsatz der Weigh-in-Motion-Technik ist Stand der Technik. Die Anwendungsgrenzen ergeben sich vor allem aus der Überlagerung der Messung mit dynamischen

Schwingungen an den zu messenden Achsen/Fahrzeugen. Insbesondere bei hohen Geschwindigkeiten oder bei Unebenheiten in der Fahrbahn ergeben sich dadurch systembedingte Messungenauigkeiten.

Einzelne Messsensoren sind für ca. 2000 – 5000 CHF erhältlich. Für den Einbau mit einem Frässschnitt sind typischerweise ca. 1000 CHF anzusetzen. Die nötige Investition für eine gesamte WIM-Anlage bewegt sich in der Höhe von ca. Fr. 100'000; dazu kommen noch die in der Regel jährliche Kalibrierungskosten.

7.52.5 Ergänzende Ausschreibungsanforderungen

Als Basis für die zu definierenden Anforderungen an die Ausschreibung dient ein objektspezifisches Messkonzept (siehe Kapitel 2.2), welches die spezifischen Gegebenheiten des Objekts entweder für das Trasse oder Naturgefahren berücksichtigt.

Mit Berücksichtigung dieser aufgeführten Themen können, zusammen mit den vorgängig unter Datenerfassung, Raumbezug, Messgrößen und –genauigkeit angeführten Rahmenbedingungen, die Ausschreibungsanforderungen spezifisch vervollständigt werden.

Insbesondere ist zu definieren welche Auflösung erzielt werden soll und welche maximalen Messfehler toleriert werden können. Weiterhin ist anzugeben, ob die Kopplung der Messung mit Induktionsschleifen erfolgen soll.

7.52.6 Literaturverzeichnis

Sonstige Literatur / Forschungsberichte

- [93] Der Auszug aus dem FGSV-Regelwerk Nr. 120, Technisches Regelwerk: Hinweise zur kurzzeitigen automatischen Erfassung von Daten des Straßenverkehrs, Ausgabe 2010, ist mit freundlicher Genehmigung der Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen e.V. auszugsweise wiedergegeben worden. Maßgebend für das Anwenden des FGSV-Regelwerkes ist dessen Fassung mit dem neuesten Ausgabedatum, die beim FGSV Verlag, Wesseling Str. 15-17, 50999 Köln, www.fgsv-verlag.de, erhältlich ist.
 - [94] Bildquelle Viscoindia, Webseite, Abgerufen am 14.06.2022: <https://www.viscoindia.com/bending-plate-medium-speed-weigh-in-motion-mswim.aspx>, 2022.
-

D

Umwelt

D 1

Lärmmessung

Tab. 7.22 Lärmmessung - Übersicht

Technologie		Nr und Name		7.53		7.54	
		Rollgeräuschmessung				statistische Vorbeifahrt	
7.53.1	Kurzbeschreibung	Bestimmung der akustischen Eigenschaften von Straßenbelägen durch eine kontinuierliche und direkte Messung der Reifen-Fahrbahngeräusche im Nahfeld eines Fahrzeugs. Messung durch in einem Messanhänger		7.54.1	Ermittlung des A-bewerteten Vorbeifahrtsspiegels eines Fahrzeugs mit konstanter Fahrzeuggeschwindigkeit im horizontalen Abstand von 7,5 m zur Mitte des Fahrstreifens.		
7.53.2	Einsatzzweck	Bestimmung der akustischen Güte von Straßenbelägen		7.54.2	Bestimmung der akustischen Güte von Straßenbelägen		
7.53.2	Typisierung	a. Messprinzip 1 direkt b. Datenerfassung 13 akustisch c. Datenspeicher 1 digital d. Lokalisation 2 streckenbezogen e. Raumbezug 2 separat f. Zustand 3 nicht zerstörend g. Großen Schalldruckpegel (A-bewertet)		7.54.2	1 direkt 13 akustisch 1 digital 1 punktuell 2 separat 3 nicht zerstörend Schalldruckpegel (A-bewertet)		
Messgrößen und -genauigkeit		Untersuchungs-/Tiefenbereich Oberfläche Auflösung Genauigkeit 15% Bemerkungen				Oberfläche	
Nutzung in Fachgebieten		Trasse 2 Geotechnik 0 Naturgefahren 0 Umwelt 3		Nutzung in Fachgebieten		1 0 0 3	
7.53.4	Einsatzzeitpunkt	N		7.54.4	N		
7.53.4	Entwicklungsstand	N		7.54.4	N		
7.53.4	Kosten	initial / einmalig wiederkehrend		7.54.4	initial / einmalig wiederkehrend		

7.53

Rollgeräuschmessung (CPX-Methode)

7.53.1

Beschrieb der Technologie

Mit der CPX-Methode (close proximity) werden die akustischen Eigenschaften von Strassenbelägen durch eine kontinuierliche und direkte Messung der Reifen-Fahrbahngeräusche im Nahfeld ermittelt. Anhand der CPX-Methode lässt sich der Einfluss von Fahrbahnoberflächen auf die Verkehrsgерäusche auf der Basis von Rollgeräuschmessungen beurteilen. Es gelten die SN-EN-ISO-11819-2 [95].



Abb. 7.91 Messtechnische Untersuchungen nach dem CPX-Verfahren, Quelle: [96]

Die CPX-Methode beinhaltet die Messung des durch die Interaktion zwischen Fahrbahnbelag und verschiedenen Referenzreifen emittierten A-bewerteten

Schalldruckpegels über eine definierte Streckenlänge durch mindestens zwei Mikrofone nahe des Referenzreifens bei gleichzeitiger Messung der Fahrzeuggeschwindigkeit mittels GPS-Sensor. Für die Rollgeräuschemessungen kommt ein spezielles Testfahrzeug bzw. ein Zugfahrzeug mit einem Messanhänger zum Einsatz. Abweichend von der o.g. Norm wird in Abhängigkeit der Rahmenbedingungen für Anwendung auf Nationalstrassen empfohlen, nur zweispurige Messsysteme einzusetzen und die Messreifen zur Abschirmung von Umgebungsgerauschen einzuhausen. Durch Mittelung des gemessenen A-bewerteten Schalldruckpegels über verschiedene Mikrofone, Strassensegmente, Durchläufe und Referenzreifen wird der sogenannte CPX-Index für verschiedene Verkehrsarten bestimmt, der die Beurteilung und damit den Vergleich von Strassenoberflächen ermöglicht [97].

7.53.2 Einsatzzweck und Fragestellung im Bereich Trasse

Die Messungen kommen beim ASTRA mehrheitlich im Rahmen von Lärmschutzprojekten, bei schalltechnischen Monitoring zur Überprüfung der akustischen Güte des Strassenbelages sowie bei Forschungsprojekten zu lärmarmen Strassenbelägen zur Anwendung. Hinsichtlich dem Einsatzzweck wird unterschieden in die Erfassung akustischer IST-Zustände Belag zur Berücksichtigung in Projekten und zur Bestimmung detaillierter akustischer Eigenschaften von Belägen und deren Veränderungen über die Zeit. [98].

7.53.3 Datenerfassung, Raumbezug, Messgrößen und Genauigkeit

Für die Erfassung von IST-Zuständen und für das Monitoring ist ein geschlossenes Anhängesystem zu verwenden, wenn die Messungen unter Verkehr erfolgen. Weiterhin müssen die Reifen und das Korrekturverfahren den SN-EN-ISO-11819-2 [95] entsprechen. Die Messgeschwindigkeit beträgt 80 km/h. Die Lufttemperatur muss zwischen 5 bis 30°C liegen. Es ist je eine Messfahrt pro Fahrspur mit einem Pkw-Reifen (beidseitig montiert) und mit einem LKW-Reifen (beidseitig montiert) durchzuführen.

Der Toleranzbereich der Messgeschwindigkeit beträgt $\pm 15\%$.

7.53.4 Entwicklungsstand, Anwendungsgrenzen, Kosten

CPX-Messungen entsprechen dem Stand der Technik. Bei Lärmmessungen sind grundsätzlich die Rahmenbedingungen des Messstandortes zu berücksichtigen.

Die Kosten für den Einsatz der Technologie setzen sich zusammen aus:

- Tagessatz für Techniker ca. 1500-2000 CHF

7.53.5 Ergänzende Ausschreibungsanforderungen

Als Basis für die zu definierenden Anforderungen an die Ausschreibung dient ein objektspezifisches Messkonzept (siehe Kapitel 2.2), welches die spezifischen Gegebenheiten des Objekts entweder für das Trasse oder Naturgefahren berücksichtigt.

Mit Berücksichtigung dieser aufgeführten Themen können, zusammen mit den vorgängig unter Datenerfassung, Raumbezug, Messgrößen und –genauigkeit angeführten Rahmenbedingungen, die Ausschreibungsanforderungen spezifisch vervollständigt werden.

7.53.6 Literaturverzeichnis

Sonstige Literatur / Forschungsberichte

[95] SN-EN-ISO-11819-2: Akustik, Messung des Einflusses von Straßenoberflächen auf Verkehrsgerausche, Teil 2: Nahfeldmessverfahren (ISO 11819-2:2017)

[96] DieReferenz: Abbildung des Messfahrzeugs von Müller-BBM. Webseite, Abruf: 02.06.2021: <https://www.diereferenz.de/schweizer-messfahrten>.

[97] Akustikforschung.de, Webseite, Abgerufen am 02.06.2022: <https://www.akustikforschung.de/leistungen/umweltakustik/strassenlarm/cpx-rollgerauschemessung>.

[98] Bundesamt für Strassen ASTRA, CPX-Messungen auf Nationalstrassen, 2017.

7.54 Statistische Vorbeifahrt (SPB-Messung)

7.54.1 Beschrieb der Technologie

Zur Bestimmung der Geräuschemission von Fahrbahnoberflächen kann als Alternative zur CPX Messung das in SN-640530-1A_EN-ISO-11819-1-D [99] beschriebene Statistische Vorbeifahrt-Verfahren (SBP-Messung – Statistical Pass-By method) angewendet werden. In Ergänzung zum SPB-Verfahren wird die «Backing-Board»-Methode mit Abschirmplatte als modifiziertes SPB Verfahren gemäss ISO/PAS 11819-4 [100] bei rückseitig beeinflussender Schallreflexion (z.B. in bebauten Gebieten) eingesetzt.



Abb. 7.92 Messtechnische Untersuchungen nach dem Verfahren der Statistischen Vorbeifahrt, Quelle: [101]

Als Messgrösse dient jeweils der bei konstanter Fahrzeuggeschwindigkeit im horizontalen Abstand von 7,5 m zur Mitte des Fahrstreifens gemessene A-bewertete Vorbeifahrtspegel.

Abweichend von der Norm darf eine Mikrofonhöhe bis max. 5,0 m verwendet werden. Bei Messungen hinter Schutzplanken ist eine Mikrofonhöhe von mindestens 3,0 m zu verwenden. Aus den Aufzeichnungen des Vorbeifahrtspegel-Zeitverlaufs einer statistisch gesicherten Anzahl von Fahrzeugen verschiedener Kategorie (Pkw, zweiachsiger Lkw, mehrachsiger Lkw) wird für jede Vorbeifahrt der maximale Vorbeifahrtspegel ermittelt und der Fahrzeuggeschwindigkeit gegenübergestellt. Anschliessend erfolgt durch lineare Regression die Bestimmung des Fahrzeuggeräuschpegels der verschiedenen Kategorien für eine definierte Referenzgeschwindigkeit. Zur Beurteilung der Fahrbahnoberfläche hinsichtlich ihrer Geräuschemission werden die verschiedenen Fahrzeuggeräuschpegel gewichtet und energetisch addiert. Der daraus entstehende Einzahlwert ist der sogenannte SPB-Index. Je niedriger der SPB-Index ist, desto geringer ist die Geräuschentwicklung des Fahrbahnbelags.

7.54.2 Einsatzzweck und Fragestellung im Bereich Trasse

Zur Bestimmung von Korrekturwerten für unterschiedliche Strassendeckschichttypen im Rahmen der Bewertung von Lärmemissionen können Messungen nach dem Verfahren der Statistischen Vorbeifahrt (SBP) und nach dem Nahfeldverfahren (CPX) durchgeführt werden. In Deutschland werden die nach dem Statistischen Vorbeifahrtsverfahren ermittelten Pegel mit den Pegeln des Nahfeldverfahrens kombiniert. Die Korrekturwerte ergeben sich schliesslich als Abweichung der so gewonnenen Messergebnisse vom Grundwert gemäss den «Richtlinien für den Lärmschutz an Strassen» (RLS-19)

7.54.3 Datenerfassung, Raumbezug, Messgrössen und Genauigkeit

Der Messort ist für den zu untersuchenden Strassenabschnitt in Abhängigkeit des Strassenquerschnittes zu wählen. Bei Autobahnen ohne Seitenstreifen ist eine Messung der Geräuschemission des äusseren Fahrstreifens nicht möglich. Bei einbahnigen Strassen ausserorts mit je einem Richtungsfahrstreifen wird die Geräuschemission des fernen Richtungsfahrstreifens über den nahen Richtungsfahrstreifen hinweg gemessen. Weiter dürfen die Messungen nur ab einer Woche nach Ostern bis Ende Oktober

stattfinden. Bevorzugt sollten die Messungen zur Vermeidung von Hintergrundgeräuschen in verkehrsarmen Zeiten erfolgen.

An jedem zu untersuchenden Strassenabschnitt sind mindestens 112 gültige Vorbeifahrten von Fahrzeugen der Fahrzeuggruppe Pkw und mindestens 90 gültige Vorbeifahrten von Fahrzeugen der Fahrzeuggruppe Lkw zu erfassen. Eine Vorbeifahrt gilt dann als gültig, wenn die Anforderungen bezüglich Geräuschabstand, Temperatur und Windgeschwindigkeit erfüllt sind, keine Störgeräusche die Messung verfälscht haben und die Fahrzeuggeschwindigkeit innerhalb des entsprechenden Geschwindigkeitsbereichs liegt.

7.54.4 Entwicklungsstand, Anwendungsgrenzen, Kosten

SPB-Messungen entsprechen dem Stand der Technik. Bei Lärmmessungen sind grundsätzlich die Rahmenbedingungen des Messstandortes zu berücksichtigen.

Die Kosten für den Einsatz der Technologie setzen sich zusammen aus:

- Tagessatz für Techniker ca. 1500-2000 CHF

7.54.5 Ergänzende Ausschreibungsanforderungen

Als Basis für die zu definierenden Anforderungen an die Ausschreibung dient ein objektspezifisches Messkonzept (siehe Kapitel 2.2), welches die spezifischen Gegebenheiten des Objekts entweder für das Trasse oder Naturgefahren berücksichtigt.

Mit Berücksichtigung dieser aufgeführten Themen können, zusammen mit den vorgängig unter Datenerfassung, Raumbezug, Messgrößen und –genauigkeit angeführten Rahmenbedingungen, die Ausschreibungsanforderungen spezifisch vervollständigt werden.

7.54.6 Literaturverzeichnis

Sonstige Literatur / Forschungsberichte

[99] SN-640530-1A_EN-ISO-11819-1-D: Akustik, Messung des Einflusses von Straßenoberflächen auf Verkehrsgeschälle, Teil 1: Statistisches Vorbeifahrtverfahren (ISO 11819-1:1997)

[100] DIN EN ISO 11819-4:2013-03, Akustik - Messung des Einflusses von Straßenoberflächen auf Verkehrsgeschälle - Teil 4: Statistisches Vorbeifahrtverfahren unter Verwendung einer Abschirmplatte (backing board) (ISO 11819-4:2013-03); Deutsche Fassung EN ISO 11819-4:2013-03, Beuth Verlag GmbH.

[101] Bildquelle Akustikforschung.de, Webseite, Abgerufen am 02.06.2022:
<https://www.akustikforschung.de/leistungen/umweltakustik/strassenalarm/spb-statistisches-vorbeifahrt-verfahren/>.

D 2 Positionssysteme

Ein Positionierungssystem realisiert eine Ortsbestimmung oder auch Lokalisierung und ist allgemein die Zuordnung zu einer bestimmten räumlichen Stelle. Die Ermittlung der Position in Bezug zu einem definierten Fixpunkt wird auch Verortung genannt. Zur eindeutigen Beschreibung einer Position bzw. einer Koordinate wird ein eindeutig mathematisch beschreibbares Bezugssystem definiert. Diese Bezugssysteme sind eine ortsfeste Beschreibung der Erdoberfläche die auch die Plattentektonik berücksichtigen. Hierbei gibt es länderspezifische Realisierungen die aber ineinander transformierbar sind.

Bei der Bestimmung von Positionen auf der Erde wird im privaten Gebrauch durch geographische Koordinaten angegeben, die sich auf die kugelförmige Erdfigur beziehen. In der Landesvermessung werden spezielle lokal oder global angepasste Rotationsellipsoide (WGS84, Bessel1841) verwendet.

Diese bilden die Grundlage für die weitere Verebnung der Kartenprojektion. Diese Verebnung kann mit unterschiedlichen Projektionen realisiert werden (UTM- *Universal*

Transverse Mercator Projektion oder Schiefachsige, winkeltreue konforme Zylinderprojektion – «Mercatorprojektion»).

Die Positionsbestimmung im technischen Sinn der Geodäsie bedeutet die Einmessung eines Punktes auf der Erdoberfläche in einem standardisierten Bezugssystem. Als globale Rechenfläche dient das Erdellipsoid, für lokale Aufgaben wird auf ein Baukoordinatensystem abgestellt. Die Punktbestimmung erfolgt überwiegend durch Entfernung- und Winkelmessung.

Auszug Koordinatensysteme:

Geographische Koordinaten

Definiert durch die Geographische Breite und Länge, bezogen auf ein „geodätisches Datum“ (Realisierung) und einem Referenzellipsoid. Beispiel: WGS84 oder Bessel 1841

ETRS89 Koordinaten - Europäische Realisierung

Das ETRS 89 Koordinatensystem wird über eine UTM Abbildung mit einem Rotationsellipsoid GRS80 realisiert. Die UTM-Projektion (von englisch *Universal Transverse Mercator*) ist eine globale Abbildung. Es teilt die Erdoberfläche in 6° breite vertikale Zonen auf, die einzeln mit Hilfe der beiden Schnittmeridiane verebnet werden.

Kartenprojektion «Swiss Grid» CH1903 und CH1903+

Beim SWISS-GRID kommt eine Schiefachsige, winkeltreue (konforme) Zylinderprojektion (Mercatorprojektion) zum Einsatz. Die Projektion und die zugehörige mathematische Abbildung, welche im schweizerischen Bezugssystem (CH1903 und CH1903+) mit dem Bessel-Ellipsoid 1841 definiert ist. Als ellipsoidische Koordinaten des Fundamentalpunktes wird sowohl in CH1903 als auch in CH1903+ eine Länge von 7° 26' 22.50" und eine Breite von 46° 57' 08.66" festgelegt.

Kartenprojektion «Swiss Grid» CHTR95 Swiss Terrestrial Reference System 1995

Mit der Landesvermessung LV95 wurde in der Schweiz ein global gelagertes (CHTR95) und ein lokal gelagertes (CH1903+) System definiert, welches seit 2017 das offizielle Bezugssystem der Schweiz ist. Es ersetzt das alte lokale Bezugssystem CH1903.

Das global gelagerte Bezugssystem der Schweizerischen Landesvermessung LV95 ist zum Zeitpunkt 1.1.1993 identisch mit dem europäischen Bezugssystem ETRS89. CHTR95 verwendet, wie sein europäisches Pendant, das Bezugsellipsoid GRS80 und als Projektion die Universal Transverse Mercator Projection (UTM).

Tab. 7.23 Positionssysteme - Übersicht

Technologie Nr und Name		stationäre Positionsbestimmung		mobile Positionsbestimmung	
7.55				7.56	
7.55.1	Kurzbeschreibung	punktuell Positionsbestimmung zur Lokalisierung oder Überwachung		netzweite Positionsbestimmung zur Lokalisierung einer Mobilien Messplattform	
7.55.2	Einsatzzweck	Tachymeter / Totalstation		GNSS/RTK Rover	
7.55.2	Typisierung	a. Messprinzip b. Datenerfassung c. Datenspeicher d. Lokalisation e. Raumbezug f. Zustand Größen		7.56.2	
7.55.3	Messgrößen und -genauigkeit	Untersuchungs-/ Tiefenbereich Auflösung Genauigkeit Bemerkungen		7.56.3	
	Nutzung in Fachgebieten	Trasse Geotechnik Naturgefahren Umwelt		Nutzung in Fachgebieten	
7.55.4	Einsatzzeitpunkt	V, W, N		V, W, N	
7.55.4	Entwicklungsstand	V, W, N		V, W, N	
7.55.4	Kosten	initial / einmalig wiederkehrend		7.56.4	

7.55 stationäre Positionsbestimmung

Unter einer stationären Positionsbestimmung wird im Weiteren die Ermittlung von dreidimensionalen Punkten an einem ortsfesten Punkt. Hierzu können verschiedene Techniken eingesetzt werden, die unterschiedliche Voraussetzungen haben.

7.55.1 Beschrieb der Technologie

Tachymeter/Totalstation

Im geodätischen/vermessungstechnischen Bereich ist die klassische Erfassung mit einem elektronischen Tachymeter (Totalstationen) Standard. Zur Positionsbestimmung werden mindesten 2 voll Passpunkte mit amtlichen Lagebezug vorausgesetzt. Über die Standpunktlokalisierung können weite dreidimensionale Punkte erfasst werden. Hierbei muss das zu erfassende Objekt zugänglich und in direkter Sichtweite zum Tachymeter sich befinden. Die Erfassung eines Neupunktes kann mit Hilfe eines Reflektors oder auch reflektorlos erfolgen. Hierbei ist das zu verwendende Gerät den Genauigkeitsansprüchen der Neupunktkoordinaten anzupassen.

Die Erfassung erfolgt immer auf Sicht. Das bedeutet, dass jeder neu auf zumessende Punkt muss vom Standpunkt des Gerätes aus sichtbar sein. Die Neupunkte können entweder in der Örtlichkeit vermarkt oder digital gespeichert werden. Bei einer reflektorlosen Messung muss der zu vermessende Neupunkt nicht zugänglich sein und kann zur Erfassungen von Lichtraumprofilen, Brückendurchfahrtshöhen und der Erfassung von Nebenanlagen (Böschungen, Hänge) dienen.



Abb. 7.93 Tachymeter/Totalstation - Quelle: [Trimble/Sitech]

GNSS-RTK ROVER

Die GNSS/RTK Systeme arbeiten über ein Satellitensegment und ermitteln über einen räumlichen Rückwärtsschnitt einen dreidimensionalen Messpunkt auf der Erdoberfläche. Bei diesem Verfahren sind keine Passpunkte notwendig, allerdings ist eine freie Sicht in zum Raumsegment und eine kostenpflichtige NTRIP-Datenverbindung zu einem Korrekturdienst erforderlich.



Abb. 7.94 GNSS/RTK Rover-System Leica [Leica]

Die Erfassung erfolgt immer berührend. Das bedeutet, dass jeder aufzunehmende Neupunkt physisch mit dem Rover aufgehalten werden muss. Zusätzlich muss eine hinreichende Sichtbarkeit zum Raumsegment vorhanden sein. Das Verfahren ist sehr flexible und kurzfristig einsetzbar, auch bei schlechten Witterungsbedingungen.

7.55.2 Einsatzzweck und Fragestellung im Bereich Trasse

Der Einsatzzweck beider Verfahren ist sehr vielseitig zur Bestimmungen der Position/Lage von bestimmten Fragestellungen. Diese Technologie versteht sich entweder als direktes Erfassungssystem oder als indirektes Verfahren um sekundäre Messsysteme zu lokalisieren (z.B. MPD - Sandfleckverfahren)

Bauphase:

- Absteckungen für Erdaushub
- Absteckung von Trassenrelevanten Planungselementen
- Kontrollmessungen während des Oberbaus (Position Fertiger)

Abnahme:

- Messtechnische Aufnahme des Bauobjektes (Dokumentation/Lageplan)

- Kontrolle der Neigungen und der Trassierungselemente
- Kontrolle Lichtraumprofil / Brückendurchfahrtshöhen

Kontrollmessungen:

- Lokalisierung anderer Messverfahren ohne Lagebezug
- Lokal begrenzte Messung der Ebenheit, Neigung, Lichtraumprofil
- Monitoring - Kontrollmessungen u.a. von Nebenanlagen oder Hangrutschungen

7.55.3 Datenerfassung, Raumbezug, Messgrößen und Genauigkeit

Die Datenerfassung findet bei beiden Verfahren Tachymeter und GNSS-RTK-Rover rein digital statt. Der Raumbezug wird bei einer Tachymeteraufnahme von den verwendeten Passpunkten definiert. Diese Passpunkte legen das Koordinatensystem/Bezugssystem fest. Bei grösseren Baumassnahmen wird zum Teil auf ein lokal begrenztes Baukoordinatensystem verwendet, welches einen direkten Bezug hat zum Amtlichen Koordinatensystem. Das vorliegende und auch das Ziel-Koordinatensystem sind Apriori eindeutig zu definieren. Die Rohmessgrößen im Tachymeter sind Winkel und Strecken. Als Ergebnis werden i.d.R. nur Ziel-Koordinaten mit einer entsprechenden Genauigkeitsangabe/Standartabweichung (1 Sigma) angegeben.

Der Raumbezug beim GNSS-RTK-Rover ist durch das verwendete Raumsegment eindeutig gegeben. Der GNSS-RTK-Rover kann online und direkt in verschiedene Realisierungen und Projektionen die jeweiligen Zielkoordinaten exportieren.

Die zu erreichende Genauigkeit ist von der Gerätekategorie und den Sichtbedingungen zum Raumsegment abhängig. Durch längere Messzeiten auf einem Neupunkt kann die Genauigkeit gesteigert werden.

Richtwerte für die Hardwarespezifikation kann wie folgt angegeben werden:

- Entfernungsmessung:
 - Ohne Prisma / beliebige Oberfläche
 - 0 m – 500 m: 2 mm + 2 ppm
- Winkelmessung
 - Winkelgenauigkeit: 0,3 -1,5 mgon
 - Lagegenauigkeit: resultiert aus der Entfernungsmessung und der Winkelmessung
 - ~3-5 mm je nach Gerätetyp und Objektentfernung

Maximal erreichbare Genauigkeiten bei Idealbedingungen.

Tachymeter Punktgenauigkeit: 1-3 mm

GNSS/RTK Punktgenauigkeit (bei sichtbarem Raumsegment): bis zu ~3 mm

7.55.4 Entwicklungsstand, Anwendungsgrenzen, Kosten

Der Einsatz der Technologie für die Positionsbestimmung ist als ausgereifte Technik einzuschätzen. Die Erfassung erfolgt nicht fließenden Verkehr und benötigt gesonderte Sicherungsmassnahmen.

Messwerte werden einzeln erfasst, die entweder für spezielle Überprüfungen von Relevanz sind oder in einer äquidistanten Wiederholung von mehreren Metern. Diese Vorgehensweise hat sich markt technisch etabliert, da mit jedem zusätzlichen Messpunkt die Messdauer proportional steigt. Für eine Netzweite Erfassung ist das Verfahren nicht geeignet. Die Tagesleistung kann bei einer generalisierten Erfassung mit 1 - 5 km angegeben werden und ist stark abhängig von der Anzahl der zu erfassenden Objekten.

Das Messverfahren GNSS-RTK-Rover kann nicht verwendet werden, in Tunneln, Unterführungen, unter Brücken oder schwer zugänglichen Bereichen ohne oder mit eingeschränkter GNSS Abdeckung.

Der Kostenpunkt einer Messung pro km kann mit 100 bis 300 CHF angegeben werden, wobei der Einfluss der zu erfassen Neupunkte den Zeitaufwand und auch Preis stark beeinflussen.

7.55.5 Ergänzende Ausschreibungsanforderungen

Als Basis für die zu definierenden Anforderungen an die Ausschreibung dient ein objektspezifisches Messkonzept (siehe Kapitel 2.2), welches die spezifischen Gegebenheiten des Objekts entweder für das Trasse oder Naturgefahren berücksichtigt.

Mit Berücksichtigung dieser aufgeführten Themen können, zusammen mit den vorgängig unter Datenerfassung, Raumbezug, Messgrößen und –genauigkeit angeführten Rahmenbedingungen, die Ausschreibungsanforderungen spezifisch vervollständigt werden.

Insbesondere ist bei der Technologie die zu erzielende räumliche Auflösung zu spezifizieren.

7.55.6 Literaturverzeichnis

Sonstige Literatur / Forschungsberichte

-

7.56 mobile Positionsbestimmung (GNSS Inertialsysteme)

7.56.1 Beschrieb der Technologie

Die mobile Positionsbestimmung beschreibt den Prozess zur Erfassung raumbezogener Daten von einer mobilen Trägerplattform. Für Aufnahmen können verschiedene Plattformen gewählt werden wie, Fahrzeuge oder Flugzeuge, aber auch unbemannte Luftfahrzeuge wie Drohnen und Oktokopter. Auf diesen Trägerplattformen sind verschiedene Sensoren verbaut, wie GNSS, Inertialnavigationssysteme INS, Beschleunigungssensoren oder ein Wegstreckensensor (DMI, Distance measurement Unit). Die Mess-Sensorik erfasst während der Bewegung der Messplattform koordinatentechnisch den zurückgelegten Weg in einer dreidimensionalen Trajektorie. Die Trajektorie ist Ausgangspunkt bzw. Grundvoraussetzungen für sekundäre Messsensoren wie Laserscanner, Bildsensoren, Videos, Thermal- und Multispektralaufnahmen. Die Kombination ermöglicht eine leistungsfähige 3D-Datenerfassung. Das Resultat des Mobile Mapping sind dreidimensionale GIS-Daten, Punktwolken oder digitalen Karten sowie georeferenzierte Bilder und Videos.

Die Mobile-Positionsbestimmung besteht i.d.R. aus mehreren Einzel Sensoren die für die Positionsbestimmung in einem bestimmten Filter (Kalman-Filter) online zu einer Trajektorie zusammengefasst werden. Die üblichen Sensoren einer mobilen Positionsbestimmung sind die GNSS-Sensoren, der Kreisel sensor (IMU) und ein Wegstreckensensor.

GNSS (global navigation satellite system)

GNSS - globales Navigationssatellitensystem (englisch: Global Navigation Satellite System) ist ein System zur Positionsbestimmung und Navigation auf der Erde. Das System besteht aus einem Raumsegment und einem Nutzermodul. Das Raumsegment besteht aus verschiedenen Satelliten, die sich auf einer dynamischen Umlaufbahn um die Erde befinden. Im Nutzer-Segment werden Signallaufzeiten und Uhrenfehler bestimmt, um zu mindestens 4 Satelliten eine Entfernung zu messen. Mit Hilfe der übermittelten Bahndaten der Satelliten und der Entfernung zum Raumsegment wird die Position des Messgerätes über einen räumlichen Rückwärtsschnitt ermittelt.

Kreiselsysteme

Kreiselsysteme dienen zur Bestimmung der drei Rotationsachsen in Bezug zum Erdfesten Koordinatensystem. Die Messwerte werden in einem Winkelunterschied über die Zeit angegeben, die die Orientierung der Messplattform im Raum angibt. Die Winkelmessung wird in der Regel mit Beschleunigungssensoren unterstützt, die die nicht linearen Bewegungsmuster erfassen. Ein Kreiselsystem wird klassifiziert über die erreichte Winkelgenauigkeit und die auftretende Driftrate des Headingwinkels (Nordrichtung) (Siehe Kapitel 7.22).

Odometer

Das Odometer ist ein mechanisches Messgerät zur Ermittlung der zurückgelegten Wegstrecke eines Fahrzeugs. Dieses Gerät wird an einem Fahrzeugrad montiert und ermittelt die zurückgelegte Wegstrecke. Die Auflösung ergibt sich aus den erfassten Pulsen pro Radumdrehung. Eine typische Auflösung eines Wegstreckensensors sind 1.000 bis 4.000 Pulse. Hierbei werden vor allem Quadraturencoder verwendet, die 2 separate phasenverschobene Signale erzeugt. Über diese phasenverschobenen Signale kann die Drehrichtung ermittelt werden.



Abb. 7.95 Inertiales Messsystem, Quelle: [OXTS Survey v3]

7.56.2 Einsatzzweck und Fragestellung im Bereich Trasse

Der Einsatzzweck der Mobilen Positionsbestimmung ist sehr vielseitig und kann im Zusammenhang mit sekundären Messsystemen bestimmte Fragestellungen bedienen. Hierbei dient das mobile Positionierungssystem hauptsächlich zur Georeferenzierung der Messwerte der sekundären Erfassungssysteme. Für den Einsatzzweck können folgende Punkte aufgeführt werden:

Bauphase

- Kontrollmessungen Oberbau

Abnahme

- Messtechnische Aufnahme des Bauobjektes (Dokumentation/Lageplan)
- Kontrolle der Neigungen und der Trassierungselemente
- Kontrolle Lichtraumprofil / Brückendurchfahrtshöhen
- Lokalisierung von sekundären Messsystemen

Kontrollmessungen

- Messung der Ebenheit
- Neigungen
- Lichtraumprofil

- Monitoring - Kontrollmessungen ua. von Nebenanlagen oder Hangrutschungen

7.56.3 Datenerfassung, Raumbezug, Messgrößen und Genauigkeit

Die Datenerfassung findet bei einem mobilen Positionierungssystem rein digital statt. Der Raumbezug wird durch das verwendete Raumsegment eindeutig definiert. Die Koordinatenausgabe kann online und direkt in verschiedene Realisierungen und Projektionen exportiert werden.

Die zu erreichende Genauigkeit ist hauptsächlich von der Geräteklasse und den Sichtbedingungen zum Raumsegment abhängig.

GNSS

Die Lagegenauigkeit des GNSS-Moduls ist direkt proportional abhängig von den verwendeten Korrekturdaten. Diese Korrekturdaten können online während der Messung eingespielt werden oder auch im Postprocessing Anwendung finden. Eine signifikante Steigerung der Genauigkeit erfolgt im zivilen Bereich i.d.R. durch DGPS (Differential-GPS). Um diese Genauigkeiten zu erreichen, werden die zwei Sendefrequenzen der Satelliten ausgewertet, um Apriori atmosphärische Fehler zu minimieren und die Positionsbestimmung erfolgt durch eine 3D-Koordinatendifferenzen zwischen zwei GNSS-Empfängern. Damit können die Bahnfehler oder atmosphärische Einflüsse herausgerechnet werden, da die Positionsbestimmung in Relation zu einer Referenzstation erfolgt. Folgende Möglichkeiten der Lageverbesserung der GNSS-Positionsbestimmung sind möglich:

Online:

- SBAS-Korrekturdaten: WAAS/EGNOS, OmniSTAR, StarFire II, Trimble Center Point RTX (Übertragung von geostationären Satelliten)
- Ntrip- „Networked Transport of RTCM“ (Swiss Positioning Service - swipos, SAPOS, VRS-NOW, DTC) -> online Übertragung von RTK-Informationen (*Real Time Kinematic*) einer hochgenauen realen oder virtuellen Referenzstation

Offline:

- Referenzstationsdaten (RINEX 3.x)
- Präzise Bahndaten
- Verbesserte Atmosphärenmodelle

In der Praxis haben sich das Ntrip Onlinesignal über eine Internetverbindung und die Nachverarbeitung mit Hilfe von Referenzstationen durchgesetzt.

Entscheidend für die Positionsgenauigkeit sind die Anzahl der verfügbaren Satelliten und ihre Konstellation zueinander. Als Qualitätsmass für die Konstellation wird die sogenannte dilution of precision (DOP) verwendet. Je grösser der Raum zwischen den Satelliten und der Empfangsantenne ist (bzw. der Schnittwinkel grösser wird beim räumlichen Rückwärtsschnitt), desto kleiner der DOP Wert und desto besser die Apriori Positionsgenauigkeit.

Kreiselsysteme

Folgende allgemeine Spezifikation für die Kreiselsysteme können angesetzt werden (aktueller Forschungsstand):

- Mechanische Kreiselsysteme
 - Genauigkeiten: 0.005°
 - Driftraten: 0.001 °/h
- Faseroptische Kreiselsysteme
 - Genauigkeiten: 0.02°
 - Driftraten: 0.001°/h
- MEMS Kreiselsysteme

- Genauigkeiten: 1 - 0.02°
- Driftraten: 0.1°/h

Odometer

Der Wegstreckensensor gibt eine Radumdrehung als zwei um 90° phasenverschobene Rechtecksignal aus. Diese Rechtecksignale werden über einen A/D Wandler ausgewertet und mit Hilfe eines Kalibrierungsfaktors in einen metrischen Wert umgerechnet. Der Kalibrierungsfaktor ist entsprechend der verwendeten Radgrösse zu ermitteln und i.d.R. im Positionierungssystem zu vermerken. Der A/D Wandler zur Auswertung des Wegstreckensignals ist standartmässig im Positionierungssystem integriert. Die Genauigkeit des zu verwenden Wegstreckensensors sollte mindesten 1% der Wegstrecke entsprechen.

Das Ergebnis einer mobilen Positionsbestimmung ist eine zeitlich und auch lagetechnisch verortete Trajektorie welche sich aus den GNSS-Sensoren, des Kreiselensors (IMU) und einem Wegstreckensensor zusammensetzt.

Im Weiteren können die Positionierungssysteme zur Erfassung einer Trajektorie über die Lagegenauigkeit kategorisiert und Leistungstechnisch beschrieben werden.

- Geringe Anforderungen
 - Positionsgenauigkeit: >10 m
- Mittlere Anforderungen
 - Positionsgenauigkeit: <5 m
- Hohe Anforderungen
 - Positionsgenauigkeit: <0,1 m

Im Folgenden werden weitere Faktoren eines Mobilen –Positionierungssystems aufgezählt die zur Einschätzung bzw. zum Vergleich zwischen verschiedenen Systemen relevant sind.

- GNSS – Genauigkeit – abhängig von den verwendeten GNSS Systemen
- Kreisel drift – einsetz eines Kreises mit geringer Driftrate
- Erfassungsrates – maximaler Zeitliche Auflösung der Trajektorie (~200 Hz)
- Lagegenauigkeit Gesamtsystems
- Zusätzliche Messdaten zur Genauigkeitssteigerung:

Intertiale Positionierungssysteme mit hoher Genauigkeit haben immer die Möglichkeit der Postprozessierung der Trajektorie, welches mit Hilfe präzisen Satelliten-Bahndaten und externer Referenzstationen erfolgt.

7.56.4 Entwicklungsstand, Anwendungsgrenzen, Kosten

Der Einsatz der Technologie für die mobile Positionsbestimmung ist Stand der Technik. Die Erfassung kann im fließenden Verkehr erfolgen und benötigt keine gesonderten Sicherungsmassnahmen.

Die Messwerte werden aus einem Konglomerat aus verschiedenen Einzelsystemen berechnet und erlaubt eine kontinuierliche Messung während der Fahrt. Diese Systeme eignen sich für eine Netzweite Erfassung. Die Tagesleistung kann mit 50 bis 200 km angegeben werden.

Das Messverfahren liefert geringere Genauigkeiten bei der Durchfahrt von Tunneln, Unterführungen oder Brücken mit eingeschränkter GNSS Abdeckung. Durch den Einsatz des Kreiselsystems können GNSS-Abschattungen ausgeglichen/überbrückt werden und das System eignet sich somit auch für Unterführungen und partielle Tunnelfahrten.

Der Kostenpunkt einer Messung pro km beträgt ca. 100-300 CHF.

7.56.5 Ergänzende Ausschreibungsanforderungen

Als Basis für die zu definierenden Anforderungen an die Ausschreibung dient ein objektspezifisches Messkonzept (siehe Kapitel 2.2), welches die spezifischen Gegebenheiten des Objekts entweder für das Trasse oder Naturgefahren berücksichtigt.

Mit Berücksichtigung dieser aufgeführten Themen können, zusammen mit den vorgängig unter Datenerfassung, Raumbezug, Messgrößen und –genauigkeit angeführten Rahmenbedingungen, die Ausschreibungsanforderungen spezifisch vervollständigt werden.

Insbesondere ist bei der Technologie die zu erzielende räumliche und zeitliche Auflösung zu spezifizieren.

7.56.6 Literaturverzeichnis

Sonstige Literatur / Forschungsberichte

-

D 3 Entwässerung

Die Richtlinie ASTRA 18005 «Strassenabwasserbehandlung an Nationalstrassen» definiert die Anforderungen an die Beseitigung des Strassenabwassers in Abhängigkeit der gesetzlichen Vorgaben und der lokalen Gegebenheiten. Diese erweitert im Einvernehmen mit dem Bundesamt für Umwelt (BAFU), die Entwässerung von Verkehrswegen in Hinblick auf den Gewässerschutz. Die Richtlinie VSS 40361 präzisiert die Anforderungen an die Retention, die Behandlung und die Versickerung des Strassenabwassers sowie das Vorgehen zur Verhältnismässigkeitsbeurteilung. Unter anderem legt sie fest welche Abläufe zur Wahl der optimalen Entwässerung in Zusammenhang mit der Behandlungsart zu Verfügung stehen, zeigt die wichtigsten Projektierungsschritte und gibt Angaben zum Betrieb und Unterhalt der erforderlichen Anlagen.

Regelmässige Kontrolle und bedarfsweise Wartung der Einrichtungen zur Strassenentwässerung sind hierbei essenziell. Die Strassenentwässerungseinrichtungen unterliegen durch Beaufschlagung und Alterung einem kontinuierlichen Verschleiss. Durch regelmässige Kontrolle ist zu überprüfen, ob die Strassenentwässerung ihre Funktion erfüllt, da andernfalls die Verkehrssicherheit, die Umwelt oder die Bausubstanz selbst gefährdet sein können.

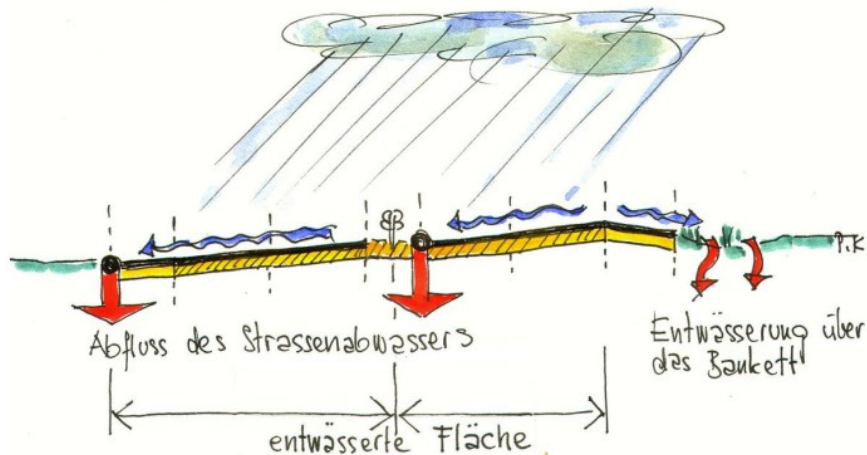


Abb. 7.96 Schema Niederschlagswassers der Strassenfläche einer 4-spurigen Autobahn, [ASTRA-Richtlinie 18005]

Verschmutztes Abwasser ist laut Gewässerschutzgesetz zu behandeln, nicht verschmutztes, wenn immer möglich zu versickern. Bei Verkehrswegen und -flächen stellt sich die Frage, wann abfließendes Niederschlagswasser als verschmutzt gilt und wie es sich beseitigen lässt.

Für den Vollzug des Gewässerschutzgesetzes sind grundsätzlich die Kantone zuständig. Bei Bundesaufgaben wie bei den Nationalstrassen und den Eisenbahnanlagen jedoch sind die entsprechenden Bundesstellen verantwortlich. Zu diesem Zweck wurden Richtlinien in diesen Bereichen vom Bundesamt für Strassen (ASTRA) und vom Bundesamt für Verkehr (BAV) zusammen mit dem BAFU erarbeitet. Die Entwässerung von Gemeinde- und Kantonsstrassen wurde 2019 in die Richtlinie des VSA «Abwasserbewirtschaftung bei Regenwetter» integriert, welche einen zeitgemässen Umgang mit Regenwasser in Siedlungsgebieten regelt.

Im Strassenabwasser befinden sich eine Vielzahl an Schadstoffen; u.a. aus Brems-, Reifen- und Fahrabrieb. Ziel ist es, das anfallende Abwasser von stark befahrenen Strassen in Strassenabwasserbehandlungsanlagen (SABA) zu behandeln, bevor es in ein Gewässer geleitet oder versickert wird. Diese nachfolgende Behandlung von Strassenabwasser dient dem Rückhalt von Benzin- Ölrückständen und auch auf den Rückhalt des anfallenden Strassenschlammes. In diesem Schlamm sind viele Schadstoffe gebunden, inkl. diverser Mikroplastiks aus dem Reifenabrieb.

Die Richtlinie «Strassenabwasserbehandlung an Nationalstrassen» des Bundesamts für Strassen (ASTRA) zeigt den optimalen Planungsprozess beim Bau von SABA auf. In der Schweiz wird die Entwässerung in folgende Normen definiert.

- Die ASTRA-Richtlinie 18005 «Strassenabwasserbehandlung an Nationalstrassen»
- Bundesamt für Umwelt BUWAL (2002), „Gewässerschutz bei der Entwässerung von Verkehrswegen. Wegleitung“
- ASTRA 88002: Strassenabwasserbehandlung: Stand der Technik, V1.00
- SN 640 340a: Strassenentwässerung; Grundlagen
- VSS 40 350: Oberflächenentwässerung; Regenintensitäten
- VSS 40 353: Strassenentwässerung; Abfluss
- VSS 40 354: Strassenentwässerung; Entwässerung über das Bankett
- VSS 40 356: Strassenentwässerung; Ablauf, Strassenablauf
- VSS 40 357: Strassenentwässerung; Bemessung der Leitung
- VSS 40 361: Strassenentwässerung; Retention und Behandlung
- VSS 40 364: Strassenentwässerung; Unfälle und Havarien

- VSS 40 366: Strassenentwässerung; Aufsätze und Abdeckungen

Die Entwässerung der Strassen erfolgt in der Regel über ein Entwässerungssystem. Der Verband Schweizer Abwasser- und Gewässerschutzfachleute VSA gibt hierfür Standards in Form von Regelwerken, Verbands- und Branchenpublikationen sowie Kontroll- und Prüfverfahren heraus und entwickelt diese weiter.

- VSA- Richtlinie: Datenstruktur Siedlungsentwässerung (VSA-DSS)
- VSA-Richtlinie 1: Betrieblicher Unterhalt von Entwässerungsanlagen
- VSA-Richtlinie 2: Zustandserfassung von Entwässerungsanlagen
- VSA-Richtlinie 3: Optische Inspektion von Entwässerungsanlagen: Schadencodierung und Datentransfer
- VSA-Richtlinie 4: Zustandsbeurteilung von Entwässerungsanlagen
- VSA-Richtlinie 5: Baulicher Unterhalt von Entwässerungsanlagen
- VSA-Richtlinie: Dichtheitsprüfungen von Abwasseranlagen

In Deutschland sind die planerischen Grundsätze in der „Richtlinien für die Anlage von Strassen - Teil: Entwässerung“ (RAS-Ew) enthalten und weiterhin allgemein gültige Lösungsvorschläge für die Entwässerung von Strassen. Sie geben Hinweise für die Aufstellung des Entwurfes der Entwässerungseinrichtungen und sollen damit zu einer einheitlichen Gestaltung der Entwässerung der Strassen beitragen. Die RAS-Ew wurde unter Berücksichtigung der Belange der Wasserwirtschaft, des Bodenschutzes, des Naturschutzes und der Landschaftspflege sowie des Städtebaues erstellt. Alle bautechnischen Vorgaben für Neu-, Aus- und Umbaumaassnahmen sind für eine umfassende Entwässerungsdokumentation zu berücksichtigen. Zur eindeutigen Bezeichnung wird jede Wassereinleitungsstelle innerhalb eines Kartenblattes eine eindeutige Nummerierung zugeordnet, sodass alle Wassereinleitungsstellen analog zur Netzknotennummerierung oder zur Bauwerkwerksbezeichnung vorliegen.

In Deutschland sind hierfür folgende grundlegende Regelwerke anzuführen.

- RWES
- FGSV
- DIN-

Gemäss DIN EN 1610 „Einbau und Prüfung von Abwasserleitungen und -kanälen“ ist nach Abschluss der Verlegung zunächst eine Sichtprüfung durchzuführen, die folgende Punkte umfassen soll:

- Prüfen der Richtung und Höhenlage
- Prüfen der Verbindungen
- Beschädigung oder Deformation
- Kontrolle der Anschlüsse
- Kontrolle der Auskleidungen und Beschichtungen

Anschliessend werden die neu verlegten Rohrleitungen, Schächte und Inspektionsöffnungen auf Dichtheit geprüft. Nach DIN EN 1610 kann entweder mit Luft oder mit Wasser geprüft werden. Die Prüfung von Rohren und Formstücken, Schächten und Inspektionsöffnungen erfolgt abschnittsweise. Die Dichtigkeitsprüfung wird in der Regel nur bei Neubauten durchgeführt und findet beim Monitoring keine Anwendung. Dieses Verfahren wird deshalb nicht weiter betrachtet.

Monitoring von Entwässerungsanlagen

Beim Monitoring von Entwässerungsanlagen kann technologiebasiert die Trennung zwischen der Kontrolle der Oberflächenentwässerung auf Verkehrsflächen und der Kontrolle der unterirdischen Anlagen zur Wasserableitung unterschieden werden.

Zu den oberflächlichen Anlagen zählt allgemein die versiegelte Verkehrsfläche, die Abflussrinnen, die Mulden und Gräben und die baulich eingesetzten Strassenabläufe. Die

Technologien zum regelmässigen Monitorings der Oberflächenentwässerung auf Verkehrsflächen kann wie folgt unterteilt werden:

- Begehung (Kontrolle/Aufmass)
- Fotografie/Videobefahrung
- Laserscanning

Ein weiteres Feld für Monitoringaufgaben ist die Erfassung und Bewertung der unterirdischen Anlagen zur Wasserableitung und somit der vorhandenen Entwässerungsanlagen. Hier bei können die Regenwasserkanälen, Sickerrohrleitungen und Schächte über spezielle Messgeräte überwacht und regelmässig kontrolliert werden.

Der Zustand von öffentlichen und privaten Entwässerungsanlagen ist gemäss VSA-Richtlinien während der gesamten Nutzungsdauer periodisch zu erheben und zu beurteilen. Vorschläge für Inspektionsintervalle sind in der VSA-Richtlinie 1 «Betrieblicher Unterhalt von Entwässerungsanlagen» aufgeführt. Die Kontrolle und Inspektion des baulichen und betrieblichen Zustands von Entwässerungsanlagen erfolgt zur frühzeitigen Erkennung von Störungen, bevor Schäden wie Überflutungen, Gewässer- und Grundwasserverschmutzungen oder Bauwerksschäden usw. entstehen können. Dabei ist gemäss VSA-Richtlinien zu unterscheiden zwischen Kontrollen zur Feststellung des baulichen Zustands (Zustandserfassung zur Erhaltung der Bauwerke) und Kontrollen zum Betrieb der Entwässerungsanlagen. Hierzu kommen im Allgemeinen folgende Techniken zum Einsatz:

- Pegelhöhenmessungen (vgl. 7.60)
- Durchflussmessungen (vgl. 7.61)
- Dichtigkeitsprüfungen
- Videobasierte Kanalinspektion (vgl. 7.58)

Alle weiterführenden SABA-Anlagen, wie z.B. Wasserrückhaltebecken und Abscheideanlagen, werden Aufgrund der Themenabgrenzung Trasse hier nicht weiter ausgeführt.

7.57 Begehung (Kontrolle/Aufmass)

Die Kenntnis über den Zustand der Entwässerungsanlagen und dessen Bewertung sind grundlegende Voraussetzungen für eine gezielte Funktionserhaltung. Mit einer periodischen Erfassung können der zeitliche Verlauf des Zustandes ermittelt und gegebenenfalls Unterspülungen, Funktionsdefizite von Regenrückhalte und Entwässerungssystemen rechtzeitig erkannt und behoben werden.

7.57.1 Beschreibung der Technologie

Zur Auswahlentscheidung gehört daher auch eine eingehende Schadensursachenanalyse. Zu unterscheiden ist dabei zwischen reinen Oberflächenmängeln und strukturellen Schäden. Erst wenn die Schadensart und die Schadensursachen festgestellt sind, ist die Auswahl der richtigen „Therapie“ möglich. Verschiedene Ursachen lassen sich mit einiger Erfahrung aufgrund einer visuellen Beurteilung erkennen und bewerten. Vielfach können die Ursachen aber erst durch weitergehende Untersuchungen aufgedeckt werden. Die Massnahmenarten der Erhaltung sollten so ausgewählt werden, dass mit ihnen die Ursachen der Schäden bzw. Mängel langfristig beseitigt werden. Beispielsweise lassen sich Risse infolge ungenügender Oberbautragfähigkeit auf Dauer nicht durch einfache Oberflächenbehandlungen ausschliessen; dafür sind in der Regel Verstärkungen oder Erneuerungen im Tiefenbau (Ersatz) erforderlich. Positive Erfahrungen mit dem „Zwischen-“ bzw. „einfachen Ausbau“ zeigen, dass es vielfach selbst bei höheren Verkehrsbelastungen möglich ist, die Fahrbahnbefestigungen auch mit einfachen Mitteln in einen langfristig guten Zustand zu versetzen, wenn für eine ausreichende Oberflächen- und seitliche Tiefenentwässerung gesorgt wird. Wichtig erscheint vor allem eine ausreichende Abwägung zwischen dem Umfang von einzelnen Massnahmen und den

jeweiligen Auswirkungen bzw. dem Nutzen. Darauf aufbauenden dienen die Daten auch zur betrieblichen Unterhaltung und Instandsetzung.



Abb. 7.97 Darstellung des Prozesses der Vermessung während einer Begehung (Kontrolle/Aufmass)

7.57.2 Einsatzzweck und Fragestellung im Bereich Trasse

Der Vorteil des Verfahrens ist eine einfache und schnelle Durchführung Vorort ohne spezielle Prüfeinrichtungen. Die Begehung setzt Fachexpertise voraus und sollte einheitlich dokumentiert werden. Zu Unterstützung von speziellen Fragestellungen kann auch einfache Messverfahren zurückgegriffen werden, wie zum Beispiel die Richtlatte zur Ermittlung der Strassenneigung.

Das Ziel ist es eine einheitliche Erfassung ohne menschliche Einflüsse zu gewährleisten. Zur Beurteilung der Entwässerung bieten sich standardisierte Tabellen oder auch rechnergestützte Abfragemasken an. Diese sind nach Ziel und Umfang der Erfassung anzupassen.

7.57.3 Datenerfassung, Raumbezug, Messgrößen und Genauigkeit

Die Datenerfassung kann rein analog oder digital erfolgen. Die digitale Erfassung über rechnergestützte Eingabemasken oder Datenbankmodell ist zu bevorzugen, da hier eine Geolokalisierung, beispielsweise durch GPS-Module, einfach zu realisieren ist.

Die Begehung sollte nur durch geschultes Personal erfolgen, um etwaige Streuungen in der Bewertung der Funktionsweise der Entwässerungen zu vermeiden. Die Bewertung, bzw. die Datenerfassungen kann durch die Vergabe von Bewertungsnoten oder auch Handlungsanweisungen sein für den ordnungsgemässen Erhalt des Betriebsdienstes.

Die zu erfassen Messgrößen beziehen sich auf Einzelmessungen durch Messgeräte die bei der Begehung mitgeführt werden können. Hierzu können Gliedermassstab, Messräder, elektronische Distanzmesssensoren oder auch ein Tachymeter oder Nivellement-Gerät zum Einsatz kommen, welche über einen Handwagen mitgeführt werden können.

7.57.4 Entwicklungsstand, Anwendungsgrenzen, Kosten

Der Einsatz der Technologie «Begehung» ist ein bewährtes und vielfach eingesetztes Verfahren. Die Erfassung kann auf den Nebenanlagen im fließenden Verkehr stattfinden. Die Kontrolle der Abläufe bzw. der oberirdischen Entwässerungseinrichtungen benötigt gesonderten Sicherungsmassnahmen. Das Verfahren ist sehr einfach und schnell, benötigt aber geschultes Personal. Für eine netzweite Erfassung ist das Verfahren nicht effektiv. Durch spezielle Erfahrungen des Prüfers können verdeckte Mängel, wie Unterspülungen oder Defizite in der Entwässerung aber effektiv erkannt werden. Hier sind technische Erfassungsmethoden zum Teil durch die Sichtbarkeit oder Auslösungen eingeschränkter nutzbar.

Die Tagesleistung mit 1-5 km pro Tag angegeben werden.

Die Kosten einer Begehung betragen ca. 100-300 CHF pro km (je nach Art und Umfang der Entwässerungseinrichtungen).

7.57.5 Ergänzende Ausschreibungsanforderungen

Als Basis für die zu definierenden Anforderungen an die Ausschreibung dient ein objektspezifisches Messkonzept (siehe Kapitel 2.2), welches die spezifischen Gegebenheiten des Objekts entweder für das Trasse oder Naturgefahren berücksichtigt.

Mit Berücksichtigung dieser aufgeführten Themen können, zusammen mit den vorgängig unter Datenerfassung, Raumbezug, Messgrößen und –genauigkeit angeführten Rahmenbedingungen, die Ausschreibungsanforderungen spezifisch vervollständigt werden.

Insbesondere ist zu definieren, welche Prüfungen während der Begehung durchzuführen sind.

7.57.6 Literaturverzeichnis

Sonstige Literatur / Forschungsberichte

-

7.58 Fotografie/Videobefahrung

Mit der Technologie Fotografie/Videobefahrung werden im Weiteren alle Technologien zusammengefasst, die ein digitales und georeferenziertes Bild erfassen, welches zu Dokumentations- oder auch zu Messzwecken dient. Die verwendete Plattform auf der die Kamera montiert ist spielt hierbei keine Rolle. Die Plattformen können fahrzeugbasiert, drohnenbasiert oder auch handgeführt sein.

7.58.1 Beschreibung der Technologie

Die hier beschriebene Technologie dient der Erfassung und Dokumentation von Objekten im Strassenraum die zur Beurteilungen der Funktionalität der Entwässerungen essentiell sind. Die technischen Umsetzungen können sehr divers ausfallen. Grundvoraussetzung ist einen CCD- oder CMOS Kamera mit mindestens einer Auflösung von 1920 x 1080 (Full-HD). Diese Kamera muss photogrammetrisch kalibriert sein, wenn diese zur Messzwecken eingesetzt werden soll (siehe 7.24). Des Weiteren ist eine Georeferenzierung durch einen GNSS Modul und eine Orientierung durch ein Kreiselssystem für die Lokalisierungen und Orientierungen notwendig (Positionierungssystem). Je nach Anforderung kann die Erfassung durch ein Messfahrzeug, eine Drohne oder auch ein Handy/Tablet mit geeigneten Hardwarekomponenten erfolgen.

Ziel der Technologie ist es Defizite in den Entwässerungsanlagen zu erfassen und zu dokumentieren. Alle erfassten Fotos/Videoaufnahmen sollten einheitlich trassenbezogen abgelegt oder ggf. in einem Webservice zur Verfügungen gestellt werden.

7.58.2 Einsatzzweck und Fragestellung im Bereich Trasse

Der Vorteil des Verfahrens ist die einfache und schnelle Durchführung Vorort ohne den Aufbau von spezielle Prüfeinrichtungen. Die Messungen können direkt fahrzeugbasiert ohne Verkehrseinschränkungen durchgeführt werden. Bei der Verwendung von Drohnen oder handgeführten Geräten ist auf eine ausreichende Verkehrssicherung zu achten.

Handgeführte Systeme:

- Bei Begehung zur weiteren Dokumentation

Drohnenbasierte Systeme:

- Erfassungen von unzugängliche Bereichen (Entwässerungsanlagen in Stützmauern)

Fahrzeugbasierte Systeme:

- Effektive Erfassung der oberflächlichen Entwässerungseinrichtungen entlang des Trassees

7.58.3 Datenerfassung, Raumbezug, Messgrößen und Genauigkeit

Die Datenerfassung erfolgt digital. Das bezieht sich sowohl auf die Bestimmung der Bilddaten als auch für die Positionierung. Für die Lokalisierung werden i.d.R. GNSS gestützte Inertialsysteme verwendet. Je nach Anwendungsfall und Entfernung zum Messobjekt entstehen verschiedene Anforderungen an die Positionierung (siehe D 2). Bei grösseren Messentfernungen steigen die Anforderungen an die Positionierung und Orientierung.

Die zu erwartende Genauigkeit ist abhängig von Grösse des verwendeten Sensors. Ausschlaggebend hierbei ist nicht die Anzahl der Megapixel der Kamera, sondern die Auflösung von Objekten in einem definierten Abstand zur Kamera. Diese Objektauflösung sollte der benötigten Messgenauigkeit entsprechen. Ein typischer Wert wäre hierbei eine Objektauflösung von ~0,5-1 cm in 10 m Distanz zur Kamera. Bei gut kalibrierten schnellfahrenden bzw. fliegenden Messsystemen kann die Messgenauigkeit (ohne Subpixeloperatoren) mit $\sqrt{2}$ der Objektauflösungen angegeben werden.

Die relativen Genauigkeiten der Messgrösse (Objektmessung im Bild) variiert von 1 cm bis 20 cm Genauigkeit. Bei Messsystemen mit der Möglichkeit zur direkten Georeferenzierung (Einbindungen in ein GIS System) muss der Fehler des Positionierungssystems noch quadratisch addiert werden.

7.58.4 Entwicklungsstand, Anwendungsgrenzen, Kosten

Der Einsatz der Technologie «Fotografie/Videobefahrung» ist ein bewährtes und vielfach eingesetztes Verfahren. Die Erfassung kann auf den Nebenanlagen im fließenden Verkehr stattfinden.

Die Kontrolle der Abläufe bzw. der oberirdischen Entwässerungseinrichtungen benötigt, ausser bei der fahrzeuggestützten Erfassung, gesonderte Sicherungsmassnahmen. Das Verfahren ist schnell und benötigt geschultes Personal. Für eine netzweite Erfassung ist nur das fahrzeugbasierte Verfahren effektiv. Verdeckte Mängel, wie Unterspülungen oder Defizite in der Entwässerung können eindeutig dokumentiert werden. Hierbei ist zu beachten, dass die schnellfahrenden oder luftbasierten technischen Erfassungsmethoden nicht alle funktionsbasierten Mängel erfassen können (z.B. vegetationsbedeckte Mulden und Durchflüsse).

Die Tagesleistung kann mit 100-200 km pro Tag angegeben werden.

Die Kosten einer Fotografie/Videobefahrung betragen ca. 100-1000 CHF pro km (je nach Art und Umfang der Entwässerungseinrichtungen und der zu erfassenden Bildaufnahmen).

7.58.5 Ergänzende Ausschreibungsanforderungen

Als Basis für die zu definierenden Anforderungen an die Ausschreibung dient ein objektspezifisches Messkonzept (siehe Kapitel 2.2), welches die spezifischen Gegebenheiten des Objekts entweder für das Trasse oder Naturgefahren berücksichtigt.

Mit Berücksichtigung dieser aufgeführten Themen können, zusammen mit den vorgängig unter Datenerfassung, Raumbezug, Messgrößen und –genauigkeit angeführten Rahmenbedingungen, die Ausschreibungsanforderungen spezifisch vervollständigt werden.

Insbesondere ist zu definieren, welche Rohrdurchmesser und –längen zu erfassen sind.

7.58.6 Literaturverzeichnis

Sonstige Literatur / Forschungsberichte

-

7.59 Laserscanning

Mit der Technologie Laserscanning wird im Weiteren eine Technologie beschrieben die zur geometrischen Erfassung der oberflächlichen Entwässerungsanlagen dient. Die Technologie erfasst mit Hilfe eines schnell rotierenden Laserstrahls die Fahrbahnoberfläche und alle oberirdischen Objekte die zur Entwässerung des Strassenraums dienen. Durch die Vorwärtsbewegungen des fahrzeugbasierten Systems werden dreidimensionale Punktwolken erfasst. Diese Technologie wird hauptsächlich zur Kontrolle der oberflächlichen Entwässerungen verwendet. Hierzu wird mit Hilfe der aufgenommenen Punktwolke ein digitales Oberflächenmodell berechnet. Dieses Oberflächenmodell findet anschliessend Verwendung in einer Regenwasser-Abflusssimulation. Hierbei kann geprüft werden, ob die eingebauten Regenabläufe an der richtigen Position und in ausreichender Dimensionierung vorhanden sind. Die Technologie wird vor allem bei Unfallschwerpunkten in Bezug auf Aquaplaning eingesetzt, um entwässerungsschwache Zonen in der oberflächlichen Entwässerungsanlage zu detektieren und ggf. baulich zu verbessern.

7.59.1 Beschrieb der Technologie

Siehe 7.15.1

7.59.2 Einsatzzweck und Fragestellung im Bereich Trasse

Siehe 7.15.2

7.59.3 Datenerfassung, Raumbezug, Messgrössen und Genauigkeit

Siehe 7.15.3

7.59.4 Entwicklungsstand, Anwendungsgrenzen, Kosten

Der Einsatz der Technologie «Laserscanning» für die Erfassung der oberflächlichen Entwässerungsanlagen ist ein bewährtes Verfahren. Die Erfassung kann im fließenden Verkehr erfolgen.

Die Kontrolle der Abläufe bzw. der oberirdischen Entwässerungseinrichtungen wird i.d.R. nur für Kontrollzwecke oder an Unfallschwerpunkten in Verbindung mit Nässe eingesetzt. Für eine netzweite Erfassung ist das fahrzeugbasierte Verfahren effektiv. Die Berechnung der Abflussmodelle ist sehr aufwendig und wird aktuell nicht netzweit eingesetzt. Verdeckte Mängel, wie Unterspülungen oder Defizite in der Entwässerung können nicht eindeutig erkannt werden.

Die Tagesleistung kann mit 200 km pro Tag angegeben werden.

Die Kosten einer Laserscannerbefahrung betragen ca. 500 CHF pro km (je nach Art und Umfang der Entwässerungseinrichtungen und der zu erfassenden Bildaufnahmen).

7.59.5 Ergänzende Ausschreibungsanforderungen

Als Basis für die zu definierenden Anforderungen an die Ausschreibung dient ein objektspezifisches Messkonzept (siehe Kapitel 2.2), welches die spezifischen Gegebenheiten des Objekts entweder für das Trasse oder Naturgefahren berücksichtigt.

Mit Berücksichtigung dieser aufgeführten Themen können, zusammen mit den vorgängig unter Datenerfassung, Raumbezug, Messgrössen und –genauigkeit angeführten Rahmenbedingungen, die Ausschreibungsanforderungen spezifisch vervollständigt werden.

Insbesondere ist zu definieren, welche Schadensmerkmale zu erfassen sind.

7.59.6 Literaturverzeichnis

Sonstige Literatur / Forschungsberichte

-

7.60 Pegelhöhenmessungen

Pegelhöhenmessungen erfolgen durch das Pegelradar, welches unter 7.69 beschrieben ist.

7.60.1 Beschrieb der Technologie

Siehe 7.69.1

7.60.2 Einsatzzweck und Fragestellung im Bereich Trasse

Siehe 7.69.2

7.60.3 Datenerfassung, Raumbezug, Messgrößen und Genauigkeit

Siehe 7.69.3

7.60.4 Entwicklungsstand, Anwendungsgrenzen, Kosten

Siehe 7.69.4

7.60.5 Ergänzende Ausschreibungsanforderungen

Siehe 7.69.5

7.60.6 Literaturverzeichnis

Sonstige Literatur / Forschungsberichte

-Siehe 7.69.6

7.61 Durchflussmengenmesser

Die Technologie «Durchflussmengenmesser» wird zum Monitoring der unterirdischen Abwasserleitungen verwendet. Mit ihr wird die Fließgeschwindigkeit erfasst, welche in einem Rohr vorherrscht. Dies kann Aufschluss geben bei welchen Regenereignissen die Rohrleitungen zur Entwässerung des Oberflächenwassers überlastet sind. Die Technologie kann sowohl für die Verkehrsregelung als auch für die Kontrolle der Rohrleitungskapazitäten bei Umbaumaßnahmen Verwendung finden.

7.61.1 Beschrieb der Technologie

Bei dieser Technologie wird der Durchfluss mithilfe eines tauchfähigen Ultraschallsensors ermittelt. Das Gerät ist für Durchflussmessungen in offenen Kanälen, teilweise gefüllten Abwasserrohren und überlasteten Rohren konzipiert. Damit eignet sich das tragbare Durchflussmessgerät für die Überwachung von Regenwasserabflüssen in Kanälen, zur Bestimmung von industriellen Durchflüssen und zur Durchflussmessung in Bewässerungsanlagen und natürlichen Flüssen.

Die Messung basiert auf der Ultraschalltechnologie. Hierfür wird der Sensor in ein Rohr oder am Boden eines wasserführenden Kanals mit einer Befestigungsmanschette eingebracht. Die Datenerfassung wird über die Zeit digital erfasst. In speziellen Geräten können die Messwerte auch per Funk an eine Leitstelle oder in eine Cloudlösung übertragen werden.



Abb. 7.98 Ultraschall-Durchflussmesser Stingray 2.0, Pulsar Measurement
[<https://pulsarmeasurement.com/stingray-2-0>]

7.61.2 Einsatzzweck und Fragestellung im Bereich Trasse

Der Vorteil des Verfahrens ist die einfache und schnelle Durchführung Vorort ohne spezielle Prüfeinrichtungen. Die Messungen können in Rohren oder in wasserführenden Regenwasserkanälen durchgeführt werden.

Das Ziel ist es eine Methodik/Verfahren für das Monitoring von Abflussmengen zu erhalten, um vergleichbare und über einen längeren Zeitraum wiederholbare Werte zu ermitteln.

Der Sensor wird in der Sohle eines Rohrs oder Kanals installiert. Die Daten werden in einem definierten Aufzeichnungsintervall erhoben und in Echtzeit auf einen Laptop oder PC übertragen. In der Regel arbeiten die Geräte im Batteriebetrieb, wodurch die Messdauer je nach Grösse der Batterie auf mehrere Tage oder Monate begrenzt ist.

Weiterhin ist bei vielen Geräten auch eine Füllstands-, Geschwindigkeits- und Temperaturaufzeichnung möglich. Im Rahmen der trassenbezogenen Entwässerung eignet sich die Technologie für die

- Überwachung des Durchflusses in offenen Kanälen,
- CSO-Überwachung,
- Ermittlung des Regenwasserabflusses und
- Kontrolle der Einhaltung der Abflussdimensionierung von Abscheideanlagen oder Sickerbecken.

7.61.3 Datenerfassung, Raumbezug, Messgrößen und Genauigkeit

Die Datenerfassung findet digital statt. Für Erfassung der Positionierung oder Lokalisierung ist ein separates GNSS Gerät nötig.

Der Messbereich und die zu erwartende Genauigkeiten hängt vom eingesetzten Messsensor ab. Folgende Richtwerte können für die Art von Sensoren angegeben werden:

- Durchflussgeschwindigkeiten von 0.01 m/s bis 10 m/s (~45-100 ppm)
- Notwendige Wassertiefen von 0,02 m bis 9 m

- Temperaturbereich: (-15°C) bis 60°C

7.61.4 Entwicklungsstand, Anwendungsgrenzen, Kosten

Der Einsatz der Technologie für die Messung des Durchflusses ist ein bewährtes und vielfach eingesetztes Verfahren. Die Erfassung kann ohne Einschränkungen stattfinden und benötigt keine gesonderten Sicherungsmassnahmen. Das Verfahren ist sehr einfach, schnell und kostengünstig durchzuführen. Die Messungen sind als Stichprobe anzusehen und eignen sich für eine partielle Überprüfung des Regenwassersystems des Trassees. Das Verfahren ist weiterhin für ein partielles Monitoring geeignet.

Dieses Verfahren kann bei jeglicher Art von Kanal, Mulde oder Kanal von abfliessenden Regenwasser angewandt werden. Die Kosten einer Messung betragen pro Tag ca. 50-100 CHF.

7.61.5 Ergänzende Ausschreibungsanforderungen

Als Basis für die zu definierenden Anforderungen an die Ausschreibung dient ein objektspezifisches Messkonzept (siehe Kapitel 2.2), welches die spezifischen Gegebenheiten des Objekts entweder für das Trasse oder Naturgefahren berücksichtigt.

Mit Berücksichtigung dieser aufgeführten Themen können, zusammen mit den vorgängig unter Datenerfassung, Raumbezug, Messgrössen und –genauigkeit angeführten Rahmenbedingungen, die Ausschreibungsanforderungen spezifisch vervollständigt werden.

7.61.6 Literaturverzeichnis

Sonstige Literatur / Forschungsberichte

-

7.62 Indirekte Inspektion mit ferngesteuerten, bildbasierten Systemen

7.62.1 Beschrieb der Technologie

Bei der indirekten Inspektion von Kanal- oder Leitungssystemen kommen in der Regel ferngesteuerte, bildbasierte Inspektionstechniken zum Einsatz. Diese Systeme bestehen aus einem Kamerasystem mit aktiver Beleuchtung, welches mit einer aktiven Antriebseinheit oder durch passiven Vortrieb die Analyse eines kompletten Kanal-/Leitungsabschnitts ermöglicht. Die Systeme sind über ein Kabel mit einem Aufnahme-/Steuersystem verbunden, welches die Datenübertragung und Stromversorgung ermöglicht. Das Kabel ist zugfest ausgelegt, so dass das Aufnahmesystem im Notfall über das Kabel geborgen werden kann. Je nach Einsatzzweck und in Abhängigkeit des Kanal-/Rohrdurchmessers wird bei den Systemen zwischen dem Einsatz von Axialsichtkameras und Dreh-/Schwenkkopfkameras unterschieden.

Bildaufnahmesysteme

Für geringe Querschnitte bis 100 mm kommen in der Regel Axialsichtkameras zum Einsatz. Diese Kameras sind entlang der Befahrungssachse ausgerichtet (Abb. 7.21). Bei grösseren Querschnitten des zu befahrenden Kanal-/Leitungssystems können auch Systeme mit dreh- und schwenkbaren Kamerasystemen zum Einsatz kommen. Diese Kamerasysteme ermöglichen die Ausrichtung der Kamera senkrecht zur Befahrungssachse, um auffällige Stellen besser betrachten zu können. Bei beiden Kamerasystemen kommen in der Regel Videokameras zum Einsatz, welche die Videodaten mit einer festen Bildrate und unter Einsatz von Konstantlichtquellen an das Aufnahmesystem übertragen. Die dritte Variante von Bildaufnahmesystemen werden von hochauflösenden Fischaugenkamerasystemen gebildet. Durch das weitwinklige Kamerasystem wird die Betrachtung von Bildbereichen axial und entlang der Befahrungssachse ermöglicht. In Kombination mit einer hochauflösenden Kamera kann eine Detailbetrachtung bestimmter Bildbereiche auch im Nachgang der Befahrung auf den

aufgenommenen Daten erfolgen. Die Panoramakamerasysteme nehmen in der Regel Einzelbilder in definierten Wegabständen auf und setzen für die Beleuchtung ein Blitzlichtsystem ein.



Abb. 7.99 Links: Axialkamera für den Schiebetrieb mit aktiver Beleuchtung [Fa. Ehle]. Mitte: Fahrwagen mit motorischem Heber und dreh-/schwenkbarer Kamera [Fa. Ehle]. Rechts: Fahrwagen mit hochauflösenden Fischaugenkameras und Blitzbeleuchtung [Fa. IBAK].

Antriebseinheiten

Bei dem Einsatz der Systeme in Kanal-/Rohrsystemen mit geringem Durchmesser kommen häufig Schiebestäbe zum Einsatz, mit denen das Kamerasystem vorwärtsbewegt wird. Dabei können Systeme eingesetzt werden, welche das aktive Abbiegen bei Verzweigungen ermöglichen.

Bei grösseren Kanal-/Rohrdurchmessern können auch steuerbare Fahrwagen zum Einsatz kommen. Diese Systeme können oft mit unterschiedlichen Raddurchmessern ausgestattet werden und sind zusätzlich oft mit einer Verstelleinheit für die Höhe der Kamera ausgestattet, so dass die Systeme für unterschiedliche Kanal-/Rohrsystemdurchmesser eingesetzt werden können.

Für den Einsatz in Schachtbauwerken können die Kamerasysteme an Teleskopstangen oder geführten Halterungen montiert werden, um die Begutachtung des Bauwerks zu ermöglichen.

Optionale Komponenten

Neben der bildhaften Erfassung der Bauwerke können die Systeme mit zusätzlichen Sensoren ausgestattet sein. Neben der Erfassung von Neigung und Temperatur können Komponenten für die laserbasierte Vermessung zum Einsatz kommen. Weiterhin können Ortungssysteme eingesetzt werden, die eine Ortung des Aufnahmesystems an der Oberfläche ermöglichen.

7.62.2 Einsatzzweck und Fragestellung im Bereich Trasse

Die Systeme können im Bereich des Trassees für die Zustandsbewertung von Kanal-, Leitungssystemen und Schachtbauwerken eingesetzt werden.

7.62.3 Datenerfassung, Raumbezug, Messgrößen und Genauigkeit

Die Erfassung der Bilddaten erfolgt digital als Videodatenstrom oder in Form von Einzelbildern. Der Raumbezug ist über die Messung der Abrollung des Betriebskabels gegeben, jedoch auch über zusätzliche Ortungssysteme möglich. Die Systeme sind typischerweise so ausgelegt, dass feine Strukturen wie Risse mit einer Mindestbreite von 0,5 mm- bis 1 mm erkannt werden können.

7.62.4 Entwicklungsstand, Anwendungsgrenzen, Kosten

Der Einsatz von Axialkamerasystemen sowie von dreh- und schwenkbaren Kamerasystemen ist Stand der Technik. Oft sind die Systeme jedoch in Bezug auf die

Auflösung begrenzt und erfordern den Einsatz von gut geschulten Personal, um auffällige Bereiche bereits während der Befahrung gezielt zu analysieren. Fischaugenkamerasysteme mit hochauflösenden Kameras und Blitz-basierter Beleuchtung ermöglichen hingegen eine Analyse auch im Nachgang der Befahrung.

Das für den Einsatz notwendige Kabel limitiert die maximale Befahrungslänge der Systeme, stellt jedoch bei typischen Bauausführungen keine Limitierung dar.

Die Kosten einer Inspektion richten sich nach den Eigenschaften des zu befahrenden Kanal-/Rohrsystems und variiert in Abhängigkeit des Kanal-/Rohrdurchmessers, der Länge der zu erfassenden Strecke und dem Vorhandensein von Abbiegungen und Kurven. Die Kosten belaufen sich auf ca. 300 CHF pro Arbeitsstunde zuzüglich der Messgerätebereitstellung vor Ort.

7.62.5 Ergänzende Ausschreibungsanforderungen

Als Basis für die zu definierenden Anforderungen an die Ausschreibung dient ein objektspezifisches Messkonzept (siehe Kapitel 2.2), welches die spezifischen Gegebenheiten des Objekts entweder für das Trasse oder Naturgefahren berücksichtigt.

Mit Berücksichtigung dieser aufgeführten Themen können, zusammen mit den vorgängig unter Datenerfassung, Raumbezug, Messgrößen und –genauigkeit angeführten Rahmenbedingungen, die Ausschreibungsanforderungen spezifisch vervollständigt werden.

Insbesondere ist zu definieren, welche Rohrdurchmesser und –längen zu erfassen sind.

7.62.6 Literaturverzeichnis

Sonstige Literatur / Forschungsberichte

[102] Aalener Baustoffprüfinstitut GmbH, SRT-Pendel, Webseite, Abgerufen am 01.06.2022: <http://www.abpi-online.de/skm/>.

[103] Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen. Arbeitsgruppe Infrastrukturmanagement, Technische Prüfvorschriften für Griffigkeitsmessungen im Straßenbau Teil 2 Messverfahren SRT, Ausg. 2021. Hrsg., Köln: FGSV-Verl., 2021.

E

Bauwerksentkoppelte Überwachung

E 1

Baugrundverformungen

Tab. 7.24 Baugrundverformungen - Übersicht

7.57	Technologie Nr. und Name	Terrestrische Radarinterferometrie	7.58	Satellitengestützte Radarinterferometrie	7.59	Geodätische Aufnahmen	7.60	Inklinometer	7.61	Nivellement
7.57.1	Kurzbeschreibung		7.58.1		7.59.1		7.60.1		7.61.1	
7.57.2	Einsatzzweck		7.58.2		7.59.2		7.60.2		7.61.2	
	"ID"	TRL _c		SRL _c		GDA _c		IKN _c		NIV _c
7.57.2	Typisierung	a. Messprinzip b. Datenerfassung c. Datenspeicher d. Lokalisation e. Raumbezug f. Zustand Größen	7.58.2	1 direkt 10 radar 1 digital 4 flächenbezogen 3 nicht zerstörend Deformationen	7.59.2	1 direkt 2 elektrisch 2 analog (Datenschreiber) 1 punktuell 3 nicht zerstörend Deformationen	7.60.2	1 direkt 2 elektrisch 2 analog (Datenschreiber) 3 flächenbezogen 2 zerstörend (Bohrung) Deformationen	7.61.2	1 direkt 5 optisch 3 analog (Ablesung) 1 punktuell 3 nicht zerstörend Setzungen / Hebungen
7.57.3	Messgrößen- und -genauigkeit	Untersuchungs-/ Tiefenbereich Auflösung Genauigkeit Bemerkungen				bis 10 km 0.1" 1 mm + 1.5 mm/km, 0.5"	bis 100 m 0.002 mm/m +/- 0.2 mm/m Messbereich +/- 30°	bis 100 m +/- 0.2 - 2 mm / km		
	Nutzung in Fachgebieten	Tassee Geotechnik Naturgefahren Umwelt								
7.57.4	Einsatzzeitpunkt	W	7.58.4	V	7.59.4	V, W, N	7.60.4	W	7.61.4	W, N
7.57.4	Kosten initial / einmalig wiederkehrend	☐ / ☐ / ☐	7.58.4	☐ / ☐ / ☐	7.59.4	☐ / ☐ / ☐	7.60.4	☐ / ☐ / ☐	7.61.4	☐ / ☐ / ☐

7.63 Terrestrische Radarinterferometrie

7.63.1 Beschrieb der Technologie

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

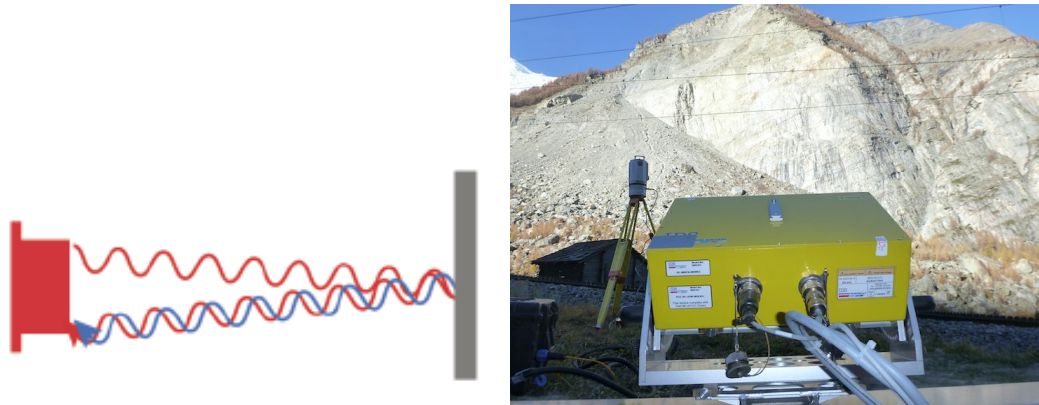


Abb. 7.100 links: Schema-Skizze zweier Radarmessungen mit verschobenen Phasen = Deformation in Blickrichtung des Radars [105]. Rechts: Für eine periodische Messung installierter terrestrischer Georadar bei Randa (VS) [106].

Verschiebungen können nur relativ innerhalb des aufgenommenen Bildes bestimmt werden, da keine absoluten Phasen zwischen Interferometer und Ziel gemessen werden können. Abb. 7.100 verdeutlicht diesen Sachverhalt: Vegetation selbst bewegt sich zu stark, als dass hier Aussagen getroffen werden können. Über Wald etc. dekorreliert die Phase. Felsbereiche innerhalb des Waldes erscheinen kohärent und die differentielle Phase kann hier interpretiert werden. Löst sich z.B. ein Teil des Felspaketes (d_{local}) relativ zum Rest mit einer geringen Bewegung ab, so kann diese Bewegung, bzw. die Bewegungskomponente entlang der Sichtlinie (line-of-sight / LOS) detektiert und quantifiziert werden. Bewegt sich nun aber das gesamte im Wald sichtbare Felspaket (d_{global}), so kann infolge fehlender stabiler Referenz (Fels «schwimmt» in einem durch Vegetation dekorreliertem Gebiet) diese Bewegung nicht detektiert werden.

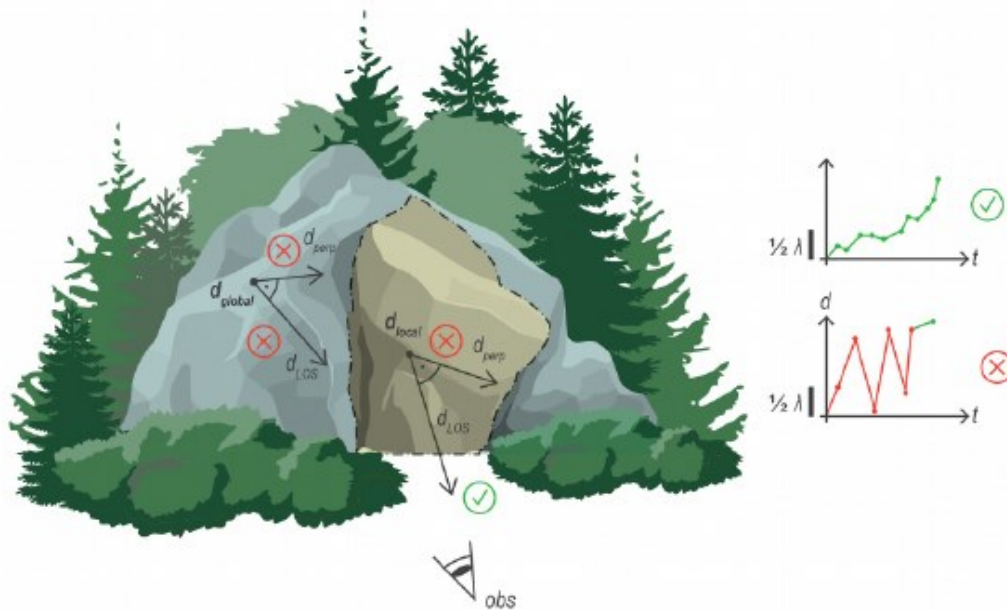


Abb. 7.101 Schematische Darstellung der Detektion von Bewegung mittels Radar-Interferometrie von einem Beobachtungsstandort (obs) aus. Lokale Ablösungen (d_{local}), können erfasst werden, wenn auf mindestens einer Seite ein kohärentes Gebiet ist (z.B. Fels). Die Gesamtbewegung eines isolierten, «schwimmenden» Bereichs (d_{global}) hingegen kann nicht bestimmt werden, da eine stabile Referenz im Bild fehlt [107].

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

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

7.63.2 Fragestellungen in den Fachbereichen

Fragestellung im Bereich Naturgefahren

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

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

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

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



Abb. 7. Überwachung eines Felspfeilers mittels terrestrischer Radarinterferometrie. In grün und blau sind diejenigen Bereiche eingefärbt, die keine Bewegungen zeigen. Gelb und orange eingefärbt sind Gebiete, die schwache Bewegungen zeigen, in rot ist eine Felsschuppe erkennbar, welche sich seit der letzten Messung markant bewegt hat oder schon abgebrochen ist. [108].

Fragestellung im Bereich Trasse

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

7.63.3 Datenerfassung, Raumbezug, Messgrößen und Genauigkeit

- Je nach Dringlichkeit der Gefahr sind permanente oder periodische Messungen möglich. Die Rasterdaten werden vom Radar entweder via Kabel oder kabellos über GSM oder Funk an einen Server des Betreibers übermittelt. Dort erfolgt eine Analyse der Rasterdaten. Eine Einbindung in ein Alarmsystem ist möglich. Das Analyseintervall ist flexibel wählbar (täglich, zweitäglich, wöchentlich, saisonal). Die Berechnung der Deformation erfolgt anhand des Vergleichs zweier Phasenmessungen.
- Bei der Terrestrischen Radarinterferometrie handelt es sich um eine flächige Überwachungstechnologie. Der Raumbezug ist gegeben durch den Standort des Radars und der Blickrichtung.
- Gemessen wird die Laufzeit der reflektierten Mikrowellen anhand der Phase.
- Die räumliche Auflösung beträgt bei einem Bodenradar mit 17 GHz Frequenz rund 1 m x 4,4 m. Die Genauigkeit der Deformationsanalyse beträgt in diesem Fall 0,5 - 2 mm in Blickrichtung. Je nach verwendeter Frequenz des Radars variiert Auflösung und Genauigkeit.

7.63.4 Entwicklungsstand, Anwendungsgrenzen, Kosten

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

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

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

7.63.5 Ergänzende Ausschreibungsanforderungen

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

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

7.63.6 Literaturverzeichnis

Sonstige Literatur / Forschungsberichte

- [104] Sättele M., Bründl M. (2015) Praxishilfe für den Einsatz von Frühwarnsystemen für gravitative Naturgefahren, WSL-Institut für Schnee- und Lawinenforschung SLF, Bundesamt für Bevölkerungsschutz / BABS, Bern
- [105] Bundesamt für Umwelt (BAFU): Überwachungssysteme für gravitative Naturgefahren – Handbuch. Bern, 34 Seiten.
- [106] Webseite von Geopraevent, <https://www.geopraevent.ch/technologien/alarm>, Abfrage vom 10.05.2022.
- [107] GAMMA REMOTE SENSING AG: Off_GPRI_BruenigSuuedrampe_Impuls_20210813, 13.08.2021.
- [108] GAMMA REMOTE SENSING AG: Noch zu definieren (Abbildung stammt aus einer Aktennotiz), 2019.

7.64 Satellitengestützte Radarinterferometrie

7.64.1 Beschrieb der Technologie

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

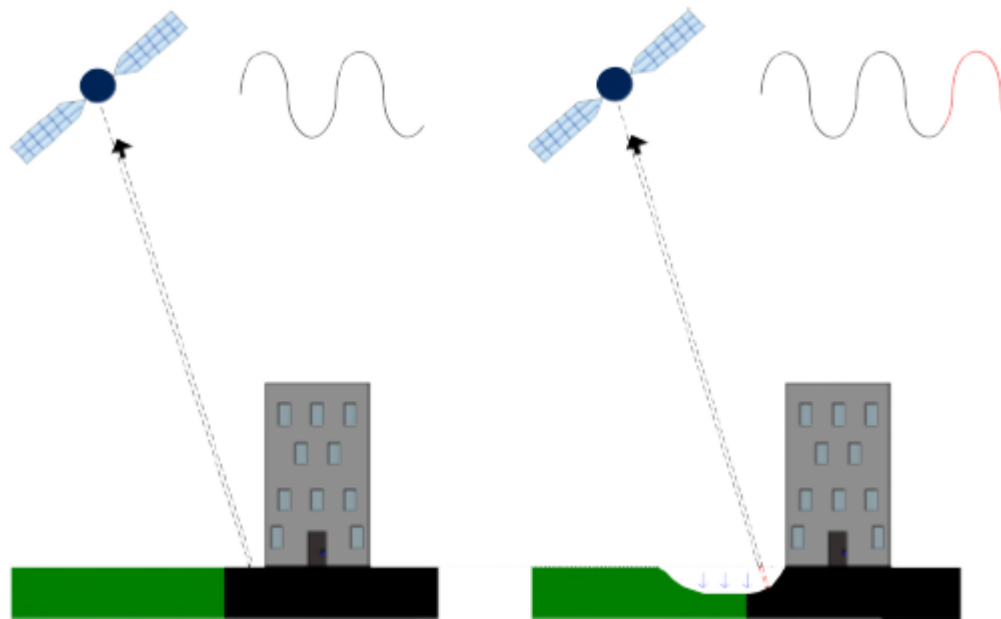


Abb. 7.102 Schemaskizze der satellitengestützten Radarinterferometrie [10]. Aus der Phasenverschiebung der reflektierten Radarstrahlen kann eine Deformation berechnet werden.

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

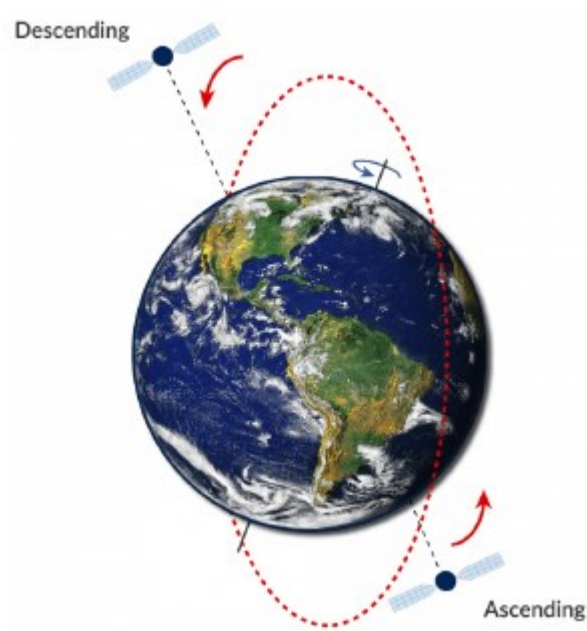


Abb. 7.103 Umlaufbahn eines Satelliten und Ansicht desselben Standorts, einmal von Süd nach Nord ('ascending') und einmal von Nord nach Süd ('descending').

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

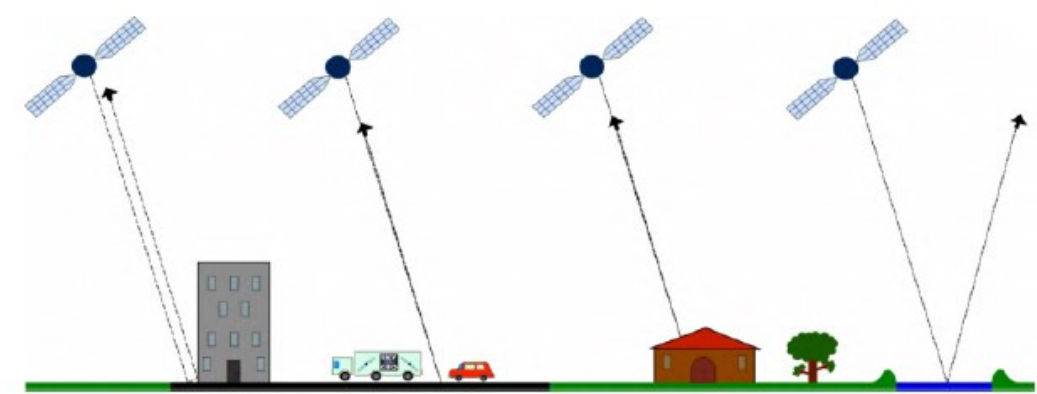


Abb. 7.104 Radarwellen werden nicht von allen Objekten an der Erdoberfläche gleich gut zum Satelliten reflektiert [10].

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

Tab. 7.25 Genauigkeit satellitengestützte Radarinterferometrie			
	Genauigkeit der Einzelmessung	Genauigkeit Lokalisation des Messpunkts	Genauigkeit der errechneten Bewegung
Standard Auflösung	6 - 8 mm	X, Y: 2 - 3 m Z: 2 - 2.5 m	1-2 mm/Jahr
Hoh Auflösung	2 - 3 mm	X, Y: 1 - 2 m Z: 1 - 1.5 m	< 1 mm/Jahr

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

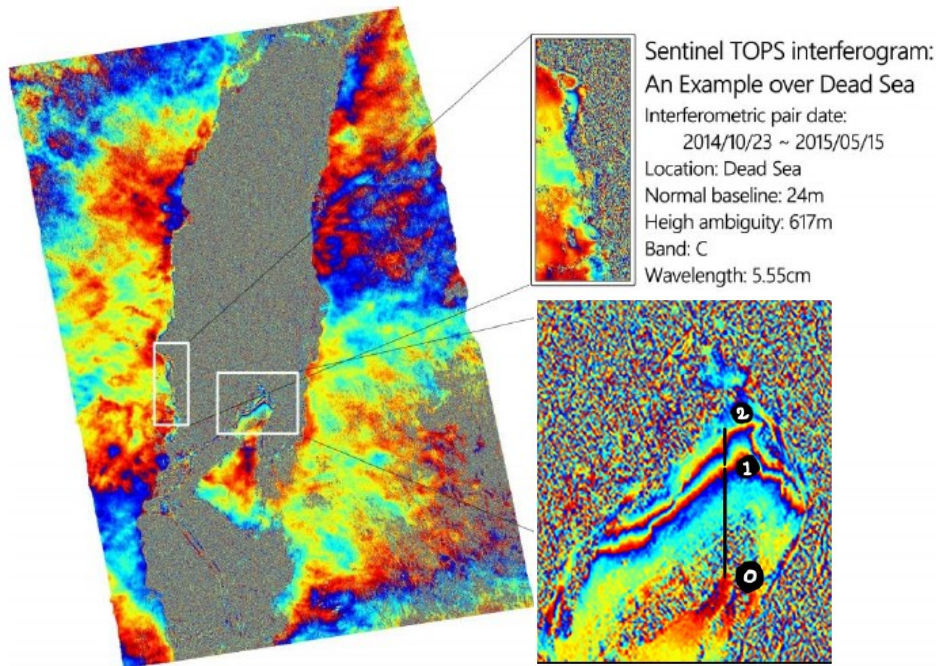


Abb. 7.105 Beispiel eines Interferogramms: Dieselbe Farbabfolge (rot- blau-rot) wiederholt sich dreimal in Richtung zusätzlicher Wellenlängen. Daraus kann geschlossen werden, dass sich dieser Bereich um die dreifache Wellenlänge verschoben hat.

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

7.64.2 Fragestellungen in den Fachbereichen

Fragestellung im Bereich Naturgefahren

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

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

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

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

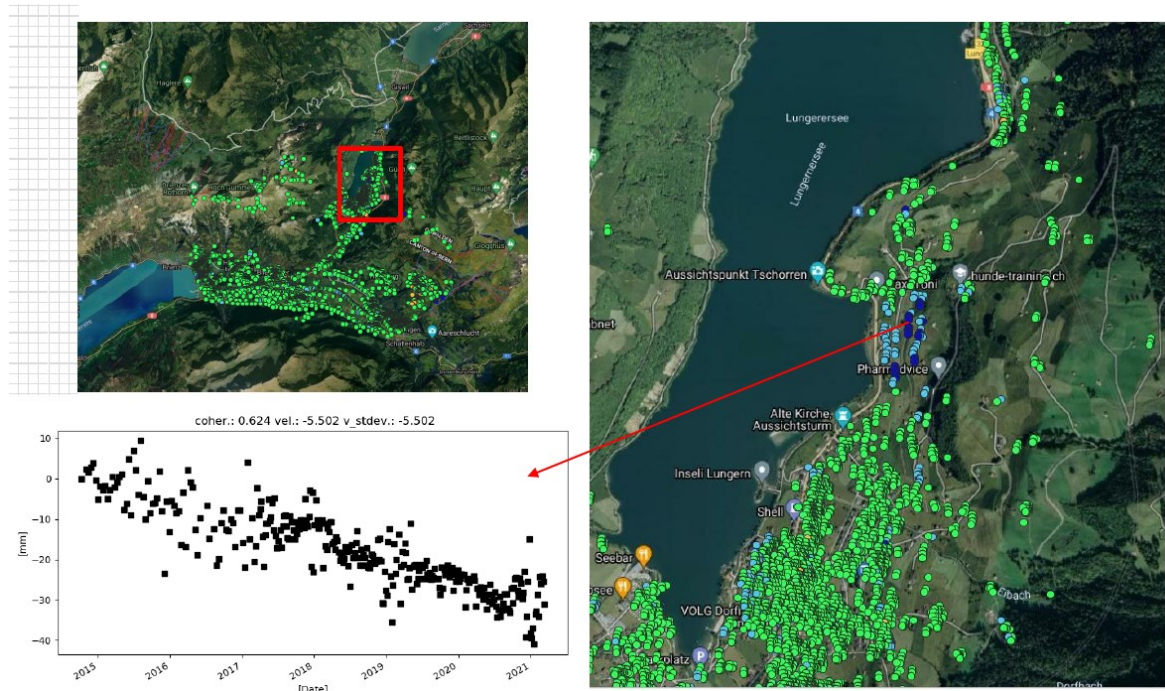


Abb. 7.106 Anwendung Satellitengestützter Radarinterferometrie in der Zentralschweiz. Die meisten analysierten Punkte zeigen keine Bewegung (grün). Bei einigen Punkten ist eine Bewegung erkennbar (blaue Farben). Diese repräsentieren ein bekanntes Rutschungsgebiet. Die Daten erlauben eine erste räumliche Abgrenzung der Rutschung. Für jeden Punkt innerhalb der Rutschung kann die Zeitlinie der Bewegungen ausgewertet und analysiert werden (unten links). Über die Auswertung mehrerer Punkte innerhalb der Rutschung können durchschnittliche Bewegungsraten und auch Phasen erhöhter Geschwindigkeiten bestimmt werden [115].

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

Fragestellung im Bereich Trasse

Die Überwachung mit satellitengestützten Radaren eignet sich zur Langzeitüberwachung von aktuell unkritischen, grossen Instabilitäten in Fels, Rutschmassen und Eis mit unbekanntem zukünftigem Bewegungsverhalten. Dies kann bei der Planung der Strassenführung helfen. Sie können auch während des Betriebs, unabhängig von Wetter und Tageszeit, Einsichten zu grossen Massenbewegungen gewährleisten und so als Langzeitüberwachung / Frühwarnsystem dienen.

7.64.3 Datenerfassung, Raumbezug, Messgrössen und Genauigkeit

- Die Rasterdaten werden vom Satelliten an einen Server des Betreibers übermittelt. Dort erfolgt eine Analyse der Rasterdaten mithilfe von Interferogrammen. Das

Messintervall ist abhängig von der Umlaufzeit der verwendeten Satelliten. Das Analyseintervall ist flexibel wählbar (zweiwöchentlich, monatlich, saisonal, jährlich). Die Berechnung der Deformation erfolgt anhand des Vergleichs zweier berechneter Punktwolken.

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

7.64.4 Entwicklungsstand, Anwendungsgrenzen, Kosten

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

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

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

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

7.64.5 Ergänzende Ausschreibungsanforderungen

Siehe Kapitel 7.63.5

7.64.6 Literaturverzeichnis

Sonstige Literatur / Forschungsberichte

-
- [109] Sättele M., Bründl M. (2015) Praxishilfe für den Einsatz von Frühwarnsystemen für gravitative Naturgefahren, WSL-Institut für Schnee- und Lawinenforschung SLF, Bundesamt für Bevölkerungsschutz / BABS, Bern
-
- [110] Bundesamt für Umwelt (BAFU): Überwachungssysteme für gravitative Naturgefahren – Handbuch. Bern, 34 Seiten.
-
- [111] Webseite von Geopraevent, <https://www.geopraevent.ch/technologien/alarm>, Abfrage vom 10.05.2022.
-
- [112] Sky Geo. InSAR technical background: Explaining the basics of InSAR, v2.2.
-
- [113] Bundesamt für Landestopografie swisstopo, Präsentationsunterlagen 'Radarinterferometrie für die Schweiz, 27.04.2018.
-
- [114] Kristina J. Reinders et al (2022): Proving compliance of satellite inSAR technology with geotechnical design codes, Transportation Geotechnics 33 (2022).
-
- [115] SarMap (2021): Monitoring and measurements of land displacements on the road network F2 and surrounding landscape using satellite differential SAR interferometry. Interim Report. October 2021.
-

7.65 Geodätische Aufnahmen - Tachymeter

7.65.1 Beschrieb der Technologie

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

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

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

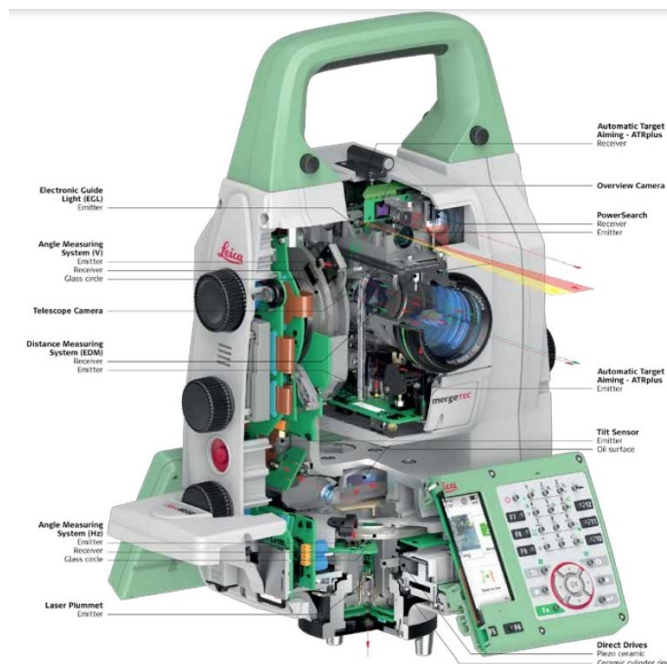


Abb. 7.107 Tachymeter / Totalstation [116].

7.65.2 Fragestellungen in den Fachbereichen

Fragestellungen im Bereich Trasse

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

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

- Kurz- und Langzeitüberwachung von Baugrundverformungen (z.B. an der Baugrundoberfläche oder in angrenzenden Bauwerken);
- Geotechnik / Böschungsüberwachung: Oberflächenverlaufsentwicklung über die Zeit und somit Rückschluss auf Stabilitäts- und Deformationsverhalten von Böschungen, Rutschhängen und Felssturzgebieten.

Fragestellungen im Bereich Naturgefahren

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

7.65.3 Datenerfassung, Raumbezug, Messgrössen und Genauigkeit

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

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

Tab. 7.26 Messbereich / Genauigkeit von geodätischen Aufnahmen mit Tachymeter

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

7.65.4 Entwicklungsstand, Anwendungsgrenzen, Kosten

Tachymeter werden aufgrund ihrer flexiblen, erprobten Einsatzbereiche und der grossen Genauigkeit für detaillierte Überwachungen von Verformungen an Baugrunds- und Bauwerksflächen sowie für Vermessungsaufgaben verwendet. Für die Anwendung

einer Messung muss ein direkter Sichtkontakt zwischen dem Messgerät und dem Zielpunkt vorhanden sein. Eingeschränkte Sichtverhältnisse (Nebel, Rauch) verschlechtern besonders die Genauigkeit von Messungen ohne Reflektor. Die Oberfläche von reflektorlosen Zielpunkten wirkt sich ebenfalls auf die Genauigkeit und den maximalen Einsatzbereich aus. Für das Erreichen einer hohen Messgenauigkeit darf das Messgerät und der Zielpunkt zudem keinen Erschütterungen ausgesetzt sein.

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

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

7.65.5 Ergänzende Ausschreibungsanforderungen

Siehe Kapitel 7.63.5

7.65.6 Literaturverzeichnis

Sonstige Literatur / Forschungsberichte

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

7.66 Inklinometer

7.66.1 Beschrieb der Technologie

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

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

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

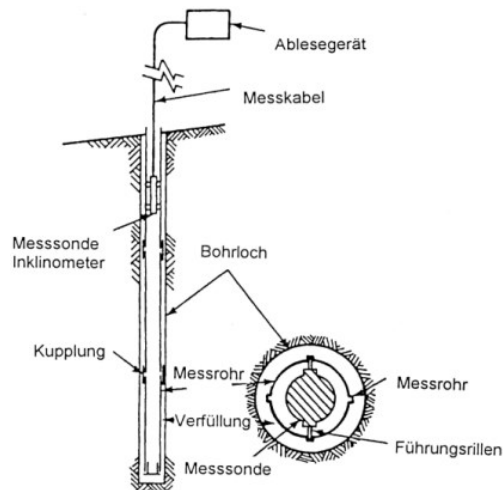


Abb. 7.108 Inklinometer im Bohrloch [117].

7.66.2 Fragestellungen in den Fachbereichen

Fragestellungen im Bereich Trasse

Inklinometer eignen sich generell für den Einsatz im Fels und Lockergestein. Sie werden für die kurzzeitige oder langfristige Überwachung des Baugrunds eingesetzt und werden von der Oberfläche versetzt. Im Allgemeinen werden Inklinometermessungen im Strassenbau zur Klärung von geotechnischen Fragen und zur Böschungsüberwachung verwendet:

- Deformationsverhalten von Böschungen,
- Überwachung des Verhaltens von Ablösungsflächen von mittel- bis tiefgründigen Rutschungen

Fragestellungen im Bereich Naturgefahren

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

7.66.3 Datenerfassung, Raumbezug, Messgrößen und Genauigkeit

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

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

Tab. 7.27 Messbereich / Genauigkeit von Inklinometer

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

7.66.4 Entwicklungsstand, Anwendungsgrenzen, Kosten

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

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

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

7.66.5 Ergänzende Ausschreibungsanforderungen

Siehe Kapitel 7.63.5

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

7.66.6 Literaturverzeichnis

Sonstige Literatur / Forschungsberichte

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

7.67 Nivellement

7.67.1 Beschrieb der Technologie

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

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

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

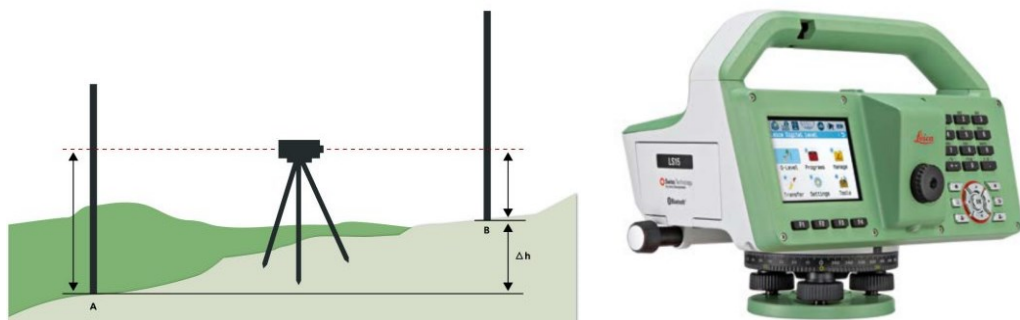


Abb. 7.109 Funktionsweise Nivellement (links,[118]) und digitales Nivelliergerät (rechts,[119])

7.67.2 Fragestellungen in den Fachbereichen

Fragestellung im Bereich Trasse

Geodätische Aufnahmen mit dem Nivellement eignen sich für die punktuelle Überwachung von Oberflächen (Baugrund oder Bauwerke). Durch ein Raster lassen sich zudem flächenhafte Messungen von Oberflächen erstellen und überwachen. Messung können an der Oberfläche erfolgen. Im Allgemeinen werden geodätische Aufnahmen mit Nivellement im Strassenbau für folgende Einsatzzwecke verwendet:

- Langzeitüberwachung von Baugrundverformungen z.B. infolge langfristigen Gebirgsdeformationen (quellfähiges Gebirge)

Fragestellung im Bereich Naturgefahren

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

7.67.3 Datenerfassung, Raumbezug, Messgrössen und Genauigkeit

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

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

Tab. 7.28 Messbereich / Genauigkeit von Nivellement

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

7.67.4 Entwicklungsstand, Anwendungsgrenzen, Kosten

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

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

7.67.5 Ergänzende Ausschreibungsanforderungen

Siehe Kapitel 7.63.5

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

7.67.6 Literaturverzeichnis

Sonstige Literatur / Forschungsberichte

[118] Bundesamt für Landestopografie, Nivellement, <https://www.swisstopo.admin.ch/de/wissen-fakten/geodaesie-vermessung/messverfahren/levelling.html>, (Zugriff 16.05.2022)

[119] Leica Geosystems AG, Datenblatt Leica LS Digitalnivellier, <https://leica-geosystems.com/de-ch/products/levels/digital-levels/leica-ls15-and-ls10>, (Zugriff 16.05.2022)

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

Tab. 7.29 Massenbewegungen – Übersicht (1/2)

Technologie Nr und Name		7 62		7 63		7 64		7 65	
Bewegungs-Radar (Dopperradar)		7 62 1		7 63 1		7 64 1		7 65 1	
Kurzbeschreibung		7 62 2		7 63 2		7 64 2		7 65 2	
Einsatzzweck		7 62 2		7 63 2		7 64 2		7 65 2	
ID		BWR_		PRA_		IFS_		RSL_	
a. Messprinzip		1 direkt		1 direkt		2 indirekt		1 direkt	
b. Datenerfassung		10 radar		10 radar		13 akustisch		1 mechanisch	
c. Datenspeicher		1 digital		1 digital		1 digital		1 digital	
d. Lokalisation		4 flächenbezogen		1 punktuell		4 flächenbezogen		1 punktuell	
e. Raumbezug									
f. Zustand		3 nicht zerstörend		3 nicht zerstörend		3 nicht zerstörend		3 nicht zerstörend	
Grossen		Bewegung		Pegel		Schallwellen		Kraft	
7 62 3		7 63 3		7 64 3		7 65 3			
Messgrößen und -genauigkeit		Untersuchungs-/ Tiefenbereich				3 - 5 km		Überschreitung vorgegeben Zugkraft	
Auflösung		bis 5 km bis 10 km2							
Genauigkeit				< 1 mm		-			
Bemerkungen		gewisse Ereignis-groesse-dauer ert.				Messbereich 0,001 - 20 Hz			
Trassee		1		1		1		1	
Geotechnik		1		1		1		1	
Naturgefahren		4		4		4		4	
Umwelt		0		1		0		0	
Nutzung in Fachgebieten		7 63 4		7 64 4		7 65 4		7 66 4	
Einsatzzeitpunkt		W		W		W		W	
Entwicklungsstand		7 63 4		7 64 4		7 65 4		7 66 4	
Kosten		7 63 4		7 64 4		7 65 4		7 66 4	
initial / einmalig		7 63 4		7 64 4		7 65 4		7 66 4	
wiederkehrend		7 63 4		7 64 4		7 65 4		7 66 4	

Tab. 7.30 Massenbewegungen – Übersicht (2/2)

Technologie Nr und Name		Bewegungs-Radar (Dopperradar)		Pegel-Radar		Infrasound		Reisefleuten						
7 62		7 63		7 64		7 65		7 66						
Kurzbeschreibung		7 63.1		7 64.1		7 65.1		7 66.1						
Einsatzzweck		7 63.2		7 64.2		7 65.2		7 66.2						
7 62.2	ID	BWR	Massenbewegungen	PRA	IFS	RSL	Massenbewegungen	Typisierung	Messgrößen und -genauigkeit					
7 62.3		7 63.3		7 64.3		7 65.3		7 66.3						
Typisierung		Bewegung		Pegel		Schallwellen		Kraft						
Messgrößen und -genauigkeit		Untersuchungs-/ Tiefenbereich		< 1 mm		3 - 5 km		Überschreitung vorgegeben Zugkraft						
Aufbau		bis 5 km bis 10 km2												
Genauigkeit														
Bemerkungen		gewisse Ereignis-groesse-dauer ert.				Messbereich 0.001 - 20 Hz								
Nutzung in Fachgebieten		7 63.4		7 64.4		7 65.4		7 66.4						
Einsatzzeitpunkt		W		W		W		W						
Entwicklungsstand		W		W		W		W						
Kosten		7 63.4		7 64.4		7 65.4		7 66.4						
initial / einmalig		W		W		W		W						
wiederkehrend		W		W		W		W						

7.66	Terrestrische Radarferrometrie	7.67	Satellitengestützte Radarferrometrie	7.68	Photogrammetrie (Deformationskameras)	7.69	Geodätische Aufnahmen	7.70	Nivellament
7.66.1		7.67.1		7.68.1		7.69.1		7.70.1	
7.66.2	Massenbewegungen	7.67.2	Massenbewegungen	7.68.2	Massenbewegungen	7.69.2	Massenbewegungen	7.70.2	Massenbewegungen
7.66.2	TRL	7.67.2	SRL	7.68.2	PGM	7.69.2	GDA	7.70.2	NIV
1 direkt	1 direkt	1 direkt	1 direkt	1 direkt	1 direkt	1 direkt	1 direkt	1 direkt	1 direkt
10 radar	10 radar	10 radar	5 optisch	2 elektrisch	2 elektrisch	5 optisch	3 analog (Ablesung)	3 analog (Ablesung)	3 analog (Ablesung)
1 digital	1 digital	1 digital	1 digital	1 digital	2 analog (Datenschreiber)	1 analog (Datenschreiber)	1 punktuell	1 punktuell	1 punktuell
4 flächenbezogen	4 flächenbezogen	4 flächenbezogen	4 flächenbezogen	4 flächenbezogen	1 punktuell	1 punktuell	1 punktuell	1 punktuell	1 punktuell
3 nicht zerstörend	3 nicht zerstörend	3 nicht zerstörend	3 nicht zerstörend	3 nicht zerstörend	3 nicht zerstörend	3 nicht zerstörend	3 nicht zerstörend	3 nicht zerstörend	3 nicht zerstörend
7.66.3	Deformationen	7.67.3	Deformationen	7.68.3	Deformation	7.69.3	Deformationen	7.70.3	Setzungen / Hebungen
	1 x 4,4 m		1 - 100 m		2 x 2 m		bis 10 km		bis 100 m
	0,5 - 2 mm		2 - 8 mm		1 - 10 cm		0,1"		+/- 0,2 - 2 mm / km
Nutzung in Fachgebieten	1 2 3 0	Nutzung in Fachgebieten	1 2 3 2	Nutzung in Fachgebieten	2 1 3 0	Nutzung in Fachgebieten	4 4 3 1	Nutzung in Fachgebieten	4 3 3 1
7.66.4	W	7.67.4	V	7.68.4	W,N	7.69.4	V,W,N	7.70.4	W,N
7.66.4		7.67.4		7.68.4		7.69.4		7.70.4	

7.68 Doppler-Radar

7.68.1 Beschrieb der Technologie

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

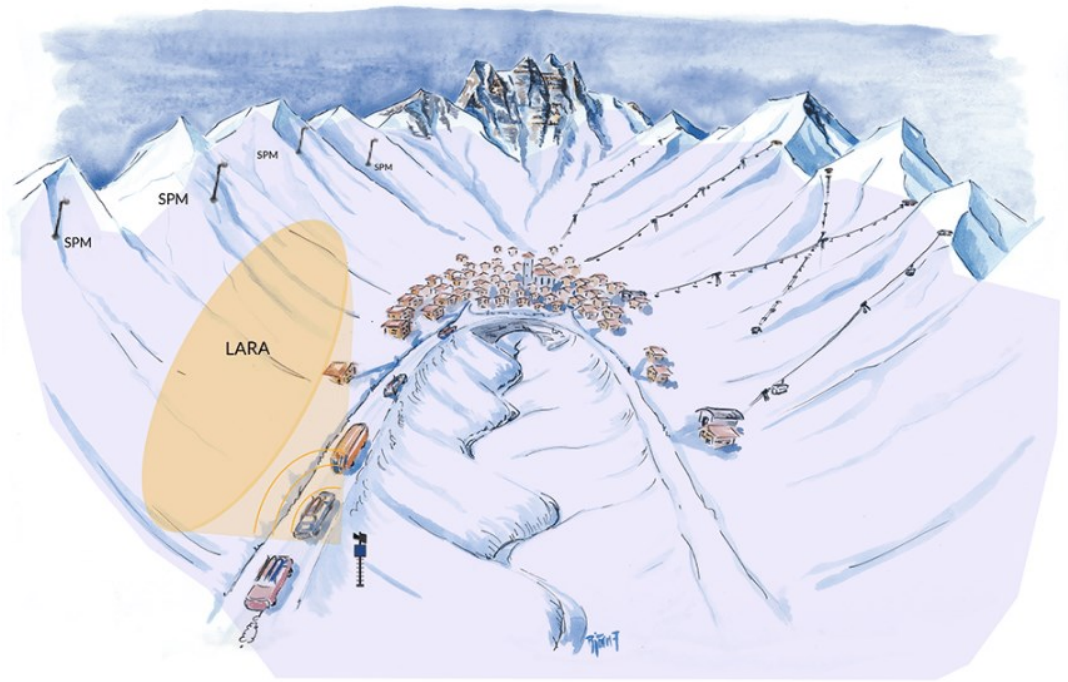


Abb. 7.110 Schema-Skizze eines Doppler-Radars zur Überwachung von Lawinenzügen oberhalb einer Strasse [123]

7.68.2 Fragestellungen in den Fachbereichen

Fragestellung im Bereich Naturgefahren

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

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

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

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

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

Fragestellung im Bereich Trasse

Doppler-Radare eignen sich zur permanenten Überwachung von Lawinen, Murgängen und Steinschlägen im Einzugsgebiet des Trassees. Eine Einbindung in ein Alarmsystem mit

Lichtsignalen oder Schranken ist möglich, damit die Strassenverkehrsteilnehmer in einem sicheren Wartebereich zurückgehalten werden können. Auch können mit Doppler-Radaren vor einer kontrollierten Lawinensprengung Personen / Autos in einem Lawinenzug detektiert und entsprechend vorgewarnt werden.

7.68.3 Datenerfassung, Raumbezug, Messgrößen und Genauigkeit

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

7.68.4 Entwicklungsstand, Anwendungsgrenzen, Kosten

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

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

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

7.68.5 Ergänzende Ausschreibungsanforderungen

Siehe Kapitel 7.63.5

7.68.6 Literaturverzeichnis

Sonstige Literatur / Forschungsberichte

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

7.69 Pegel-Radar

7.69.1 Beschrieb der Technologie

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



Abb. 7.111 Der Pegel-Radar (rechts) misst die Distanz zur Wasseroberfläche. Die Webcam (links) liefert zusätzlich wertvolle Bilder [108].

7.69.2 Fragestellungen in den Fachbereichen

Fragestellung im Bereich Naturgefahren

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

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

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

Fragestellung im Bereich Trasse

Pegel-Radare können zum Schutz vor Flutwellen oder Murgängen in Warn- oder Alarmsysteme eingebunden werden. Strassenteilnehmende können mit Lichtsignalen, Schranken oder ähnlichem vor einem akuten Ereignis gewarnt und in einem sicheren Wartebereich zurückgehalten werden.

7.69.3 Datenerfassung, Raumbezug, Messgrößen und Genauigkeit

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

7.69.4 Entwicklungsstand, Anwendungsgrenzen, Kosten

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

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

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

7.69.5 Ergänzende Ausschreibungsanforderungen

Siehe Kapitel 7.63.5

7.69.6 Literaturverzeichnis

Sonstige Literatur / Forschungsberichte

- [124] Sättele M., Bründl M. (2015) Praxishilfe für den Einsatz von Frühwarnsystemen für gravitative Naturgefahren, WSL-Institut für Schnee- und Lawinenforschung SLF, Bundesamt für Bevölkerungsschutz / BABS, Bern
- [125] Bundesamt für Umwelt (BAFU): Überwachungssysteme für gravitative Naturgefahren – Handbuch. Bern, 34 Seiten.

[126] Webseite von Geopraevent, <https://www.geopraevent.ch/technologien/alarm>, Abfrage vom 10.05.2022.

7.70 Infrasound

7.70.1 Beschrieb der Technologie

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



Abb. 7.112 Systemanlage Infrasound: vier Infraschall-Sensoren leiten ihre Messungen an eine zentrale Auswerteeinheit weiter [112].

7.70.2 Fragestellungen in den Fachbereichen

Fragestellung im Bereich Naturgefahren

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

Fragestellung im Bereich Trasse

Infrasound eignet sich zur Aktivitätsüberwachung von Lawinen im Einzugsgebiet des Trassees.

7.70.3 Datenerfassung, Raumbezug, Messgrößen und Genauigkeit

- Sensoren messen Infraschallwellen rund um ihren Standort. Die Messdaten werden via Kabel in Echtzeit zur Auswerteeinheit gesendet und von dort via Mobilfunk oder Satellitenverbindung zum Server zur Datenverarbeitung oder für die automatische Benachrichtigung (SMS, E-Mail, Publikationen in Datenbanken). Die Stromversorgung der Anlage kann via Solarzelle, Netzanschluss oder einer Brennstoffzelle erfolgen.
- Bei Infrasound handelt es sich um eine flächige Überwachungstechnologie. Der Raumbezug ist gegeben durch den Standort der Sensoren.
- Die Reichweite beträgt rund 3 – 5 km (u. a. abhängig von der Lawinengröße).

7.70.4 Entwicklungsstand, Anwendungsgrenzen, Kosten

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

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

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

7.70.5 Ergänzende Ausschreibungsanforderungen

Siehe Kapitel 7.63.5

7.70.6 Literaturverzeichnis

Sonstige Literatur / Forschungsberichte

[127] Sättele M., Bründl M. (2015) Praxishilfe für den Einsatz von Frühwarnsystemen für gravitative Naturgefahren, WSL-Institut für Schnee- und Lawinenforschung SLF, Bundesamt für Bevölkerungsschutz / BABS, Bern

[128] Bundesamt für Umwelt (BAFU): Überwachungssysteme für gravitative Naturgefahren – Handbuch. Bern, 34 Seiten.

[129] Webseite von Wyssen Avalanche Control AG, <https://www.wyssenavalanche.com/lawinendetektion/ida-infraschall-detektionssystem/>, Abfrage vom 13.05.2022.

7.71 Reissleinen

7.71.1 Beschrieb der Technologie

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



Abb. 7.113 Reissleinschalter zur Überwachung eines Murganggrabens [132]

7.71.2 Fragestellungen in den Fachbereichen

Fragestellung im Bereich Naturgefahren

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

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

Die Reissleine kann auch um eine mögliche Felsinstabilität montiert werden, so dass das Abbrechen einer grösseren Felsmasse detektiert werden kann. Bei Sturzprozessen kann so etwas Zeit gewonnen werden gegenüber Reissleinen, die in der Sturzbahn montiert sind. Weiter können Reissleinen auch zur Detektion von Sturz-Ereignissen in Steinschlagschutznetzen verwendet werden. Dabei werden sie so montiert, dass sie das Anspringen der Bremsen in den Steinschlagschutzsystemen anzeigen. Damit werden grössere Ereignisse in den Schutzsystemen erkannt, ohne dass jemand vor Ort war und Reparaturarbeiten können zeitnah ausgelöst werden.

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

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

Fragestellung im Bereich Trasse

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

7.71.3 Datenerfassung, Raumbezug, Messgrößen und Genauigkeit

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

7.71.4 Entwicklungsstand, Anwendungsgrenzen, Kosten

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

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

Für Überwachungssysteme dieser Art ist es sehr schwierig, generische Preise zu nennen. Sie sind stark abhängig von den lokalen Begebenheiten (Stromanschluss, abzudeckendes Gebiet, permanente oder periodische Messung, Einbindung in ein Alarmsystem, Anforderungen an Redundanz). Die Anschaffungskosten für eine Überwachung mit Reissleinen sind jedoch sehr kostengünstig (ab CHF 2'000, je nach Anzahl und Ausführung der Reissleinen). Die Kosten für die Einbindung in ein Alarmsystem sowie die Betriebskosten sind sehr variabel und können nicht generisch aufgeführt werden.

7.71.5 Ergänzende Ausschreibungsanforderungen

Siehe Kapitel 7.63.5

7.71.6 Literaturverzeichnis

Sonstige Literatur / Forschungsberichte

[130] Sättele M., Bründl M. (2015) Praxishilfe für den Einsatz von Frühwarnsystemen für gravitative Naturgefahren, WSL-Institut für Schnee- und Lawinenforschung SLF, Bundesamt für Bevölkerungsschutz / BABS, Bern

[131] Bundesamt für Umwelt (BAFU): Überwachungssysteme für gravitative Naturgefahren – Handbuch. Bern, 34 Seiten.

[132] Webseite von Geopraevent, <https://www.geopraevent.ch/technologien/alarm>, Abfrage vom 10.05.2022.

7.72 Terrestrische Radarinterferometrie

Siehe Kapitel 7.63

7.73 Satellitengestützte Radarinterferometrie

Siehe Kapitel 7.64

7.74 Photogrammetrie zur Langzeitüberwachung mit Deformationskameras

7.74.1 Beschrieb der Technologie

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



Abb. 7.114 Deformationskamera mit Solarpanel zur Stromversorgung [121]

7.74.2 Fragestellungen in den Fachbereichen

Fragestellung im Bereich Naturgefahren

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

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

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

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

Fragestellung im Bereich Trasse

Die Methode der Photogrammetrie mit Deformationskameras eignet sich zur Langzeitüberwachung / Frühwarnsystem unkritischer Instabilitäten in Fels und Eis im Einzugsgebiet des Trassees.

7.74.3 Datenerfassung, Raumbezug, Messgrößen und Genauigkeit

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

7.74.4 Entwicklungsstand, Anwendungsgrenzen, Kosten

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

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

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

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

7.74.5 Ergänzende Ausschreibungsanforderungen

Siehe Kapitel 7.63.5

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

7.74.6 Literaturverzeichnis

Sonstige Literatur / Forschungsberichte

[133] Sättele M., Bründl M. (2015) Praxishilfe für den Einsatz von Frühwarnsystemen für gravitative Naturgefahren, WSL-Institut für Schnee- und Lawinenforschung SLF, Bundesamt für Bevölkerungsschutz / BABS, Bern

[134] Bundesamt für Umwelt (BAFU): Überwachungssysteme für gravitative Naturgefahren – Handbuch. Bern, 34 Seiten.

[135] Webseite von Geopraevent, <https://www.geopraevent.ch/technologien/alarm>, Abfrage vom 10.05.2022.

7.75 Geodätische Aufnahmen - Tachymeter

Siehe Kapitel 7.65

7.76 Nivellement

Siehe Kapitel 7.67

8 Aufstrebende Technologien

8.1 Vehicle Onboard Analytics

8.1.1 Beschrieb der Technologie

«Vehicle Onboard Analytics»-Verfahren nutzen Daten, die von in Serienfahrzeugen (z.B. VW-Gruppe) bereits integrierten Sensoren wie bspw. Beschleunigungssensoren für vertikale Fahrzeugbewegungen oder Informationen vom ABS-System, generiert und zentralisiert verarbeitet werden. Aus der Summe der Beobachtungen vieler Einzelfahrzeuge ergeben sich tagesaktuelle Informationen zum Fahrbahnzustand (Griffigkeit, Längsebenheit). Auch die Analysen von Fahrerassistenzsystemen, können wertvolle Informationen zur Strasseninfrastruktur liefern, indem beispielsweise ausgewertet wird an welchen Orten Kollisionswarnsysteme häufig eine nahende Kollision vorhersagen. Mit dem im Fahrzeug integrierten Softwaremodulen werden die Daten erfasst, komprimiert und an eine Cloud zur weiteren Nutzung übermittelt.

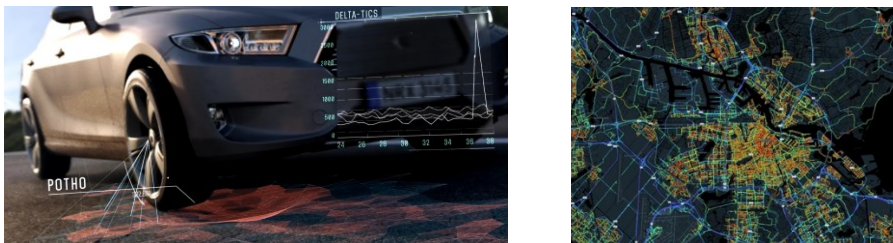


Abb. 8.115 Vehicle onboard analytics, NIRA Dynamics [136]

8.1.2 Forschungsstand, Anwendungsgrenzen und Potential

Die Nutzung der Daten im Sinne einer Strassenzustandserfassung ist seit ca. 2021 bekannt. Die Firma NIRA [136] nutzt in Zusammenarbeit mit VW die Daten Europaweit seit Anfang 2021.

In Deutschland stehen diese Fahrzeugdaten mit einer hohen Aktualisierungsrate bundesweit zur Verfügung. Die Grenzen der Anwendung liegen im Bereich der Fahrbahngriffigkeit und Detektion von Unebenheiten. Substanzmerkmale (bspw. Schlaglöcher) können nur indirekt erfasst werden.

Ebenfalls möglich ist die Nutzung von Daten aus Fahrerassistenzsystemen, um die Sicherheit von Strassen zu bewerten, indem beispielsweise die Vorkommnisse von fast stattgefundenen Kollision ausgewertet werden [137].

Das Potential der Technik ist sehr gross. Zwar ist die Präzision der Daten in der Regel deutlich geringer als bei etablierten Verfahren, allerdings besitzen die Daten durch die grosse Anzahl an Wiederholungsmessungen potentiell eine grosse Aussagekraft. Als kritisch ist zu bewerten, dass die genaue Funktionsweise der Ableitung von Indikatorwerten in der Regel nicht offengelegt ist und auch die Vergleichbarkeit der Indikatorwerte mit etablierten Verfahren noch nicht hinreichend nachgewiesen ist.

8.1.3 Einsatzzweck und Fragestellung im Bereich Trasse

Die aus den Fahrzeugdaten gewonnenen Informationen können eine sehr gute Ergänzung zu der nur alle 4 bis 5 Jahre durchgeführten Zustandserfassung sein. Mit den tagesaktuell verfügbaren Daten können jederzeit Abschnitte mit einem schlechten Fahrkomfort detektiert und die zeitliche Entwicklung beurteilt werden. Durch die Schätzung der Griffigkeit kann ausserdem eine Überwachung der Entwicklung der Griffigkeit genutzt werden, um beispielsweise eine Erkennung von Gefahrenstellen zu realisieren oder beispielsweise eine zielgerichtete Steuerung des Winterdienstes zu ermöglichen. Darüber

hinaus lassen sich möglicher Weise grössere Schadensereignisse wie bspw. Schlaglöcher durch häufiges Überfahren lokalisieren. So können entsprechende Erhaltungsmassnahmen aber auch Massnahmen im Sinne der Strassenverkehrssicherungspflicht eingeleitet werden.

8.1.4 Datenerfassung, Messgrössen und Genauigkeit

Die Datenerfassung erfolgt über die in Serienfahrzeugen oder in Fahrzeugflotten eingebauten Sensoren, die wiederum über installierte Softwaremodule die Daten vorauswerten und über eine Cloud zur weiteren Verwendung Nutzern zur Verfügung stellt.

In der Regel werden «Längsunebenheiten» und «Schlupf» gemessen. Die Präzision dieser Daten ist nicht mit den konventionellen Systemen zu vergleichen. Allerdings, wie schon erwähnt, liefern die Massendaten durchaus Hinweise auf bspw. einen mangelnden Fahrkomfort.

8.1.5 Anwendungsbeispiele, Pilotanwendungen

Erste Pilotversuche mit der Technologie wurden in den Wintern 2015/2016 in Göteborg (Schweden) durchgeführt. Dabei wurde eine Taxiflotte mit der Sensorik ausgestattet, um in Echtzeit der Strassenglätte analysieren zu können [138].

In den Wintern 2018 und 2019 wurde die Technologie von dem Schwedischen Transportministerium in einem Pilotprojekt für die Verbesserung des Winterdiensts getestet. Dabei wurden durch die Technologie automatisiert Daten vorwiegend in Stockholm, Göteborg erfasst und ebenfalls für die Analyse der lokalen Glätte auf Strassen eingesetzt [139].

Eine Pilotstudie wurden 2022 auch in Deutschland initiiert, in der die Landesbehörde für Strassenbau und Verkehr die Untersuchung des kontinuierliche Monitoring des Fahrbahnzustandes der Landesstrassen auf Grundlage der Echtzeit Fahrzeugdaten beauftragt hat [140].

Ebenfalls 2022 wurde von in den Niederlanden ein Pilotprojekt initiiert, um über einen Zeitraum von 2 Jahren Fahrzeugdaten von Mercedes Benz für die Unterstützung des Winterdienstes und die Ermittlung der Strassensicherheit einzusetzen [137].

8.1.6 Literaturverzeichnis

Sonstige Literatur / Forschungsberichte

[136] www.niradynamics.se

[137] Mercedes-Benz Ag / Min I&W, Presseartikel, Abrufdatum 05.04.23, <https://group-media.mercedes-benz.com/marsMediaSite/en/instance/ko/Mercedes-Benz-wins-landmark-road-monitoring-programme-in-the-Netherlands.xhtml?oid=52898709>

[138] New slip hazard warning feature from NIRA Dynamics improves the safety of connected vehicles. Presseartikel NIRA Dynamics. Abrufdatum : 05.04.23 : <https://niradynamics.se/new-slip-hazard-warning-feature-from-nira-dynamics-improves-the-safety-of-connected-vehicles>

[139] NIRA Dynamics wins Swedish Department of Transportation public tender for and create safer winter roads in Sweden. Presseartikel NIRA Dynamics. Abrufdatum : 05.04.23. <https://www.mynewsdesk.com/se/nira-dynamics/pressreleases/nira-dynamics-wins-swedish-department-of-transportation-public-tender-for-and-create-safer-winter-roads-in-sweden-2966121>

[140] Straßenschäden frühzeitig erkennen: Bundesweites Pilotprojekt NIRA, Presseartikel Straße hat Zukunft, Abrufdatum : 05.04.23. <https://strasse-hat-zukunft.de/ausstellung-der-laender-beim-dsvk2022/niedersachsen/niedersachsen-pilotprojekt-nira/>

8.2 Berührungslose Griffigkeitsmessung

8.2.1 Beschrieb der Technologie

Die Idee zur Entwicklung eines Verfahrens zur Messung der «Berührungslosen Griffigkeit» beruht auf der optischen Erfassung der Textur der Strassenfläche und darauf aufbauend der Berechnung der Griffigkeit auf Basis eines Gummireibungsmodells, welches auch die

«Griffigkeit bei Nässe» berücksichtigt. Im Rahmen des seitens des BMDV (Deutschland) geförderten Projektes «OPTOgrip» [1] wurde ein entsprechendes Verfahren entwickelt.

Grundlage der Technologie ist ein an der RWTH Aachen entwickeltes Laborverfahren, mit dem aus der optisch erfassten Textur der Strassenoberfläche anhand eines Gummireibungsmodells nach Persson [2] die Strassengriffigkeit unter 100% Schlupf nach Wehner-Schulze berechnet werden kann [3]. Das Wehner-Schulze-Gerät ist ein Labormessverfahren, das eine Vollbremsung auf nasser Strasse im Labormassstab nachbildet. Darauf aufbauend wurde ein auf realen Strassenoberflächen einsetzbares, optisches Verfahren entwickelt, das die Griffigkeit von Strassen gemäss dem Seitenkraftmessverfahren (SKM) erfasst. Kernbestandteil des „Griffigkeitsmodells“ ist ein Gummireibungsmodell, mit dem der über die Strassenoberfläche gleitende Messgummi in Form des Messrades während der Messung beschrieben wird. Ergänzt wird das Reibungsmodell um einen Term, in dem weitere Einflüsse auf die Griffigkeit, die sich aus der „Texturform“ ergeben, berücksichtigt werden.

Für die Anwendung des Gummireibungsmodells muss die Textur der Fahrbahnoberfläche möglichst exakt erfasst werden. Der zur Anwendung kommende Ultraschnelle Optische Textursensor muss demnach bei Fahrgeschwindigkeiten bis 80 km/h eine ausreichend detaillierte Auflösung der Mikrotextur ermöglichen. Angestrebt wurde hier ein Lichtfleck von 10 µm. Des Weiteren muss der Sensor die tatsächliche Oberfläche der üblichen zur Anwendung kommenden Mineralstoffe (z.B. opake oder durchsichtige Mineralien) unabhängig von deren optischen Eigenschaften erfassen. Entwickelt wurde vom Projektpartner Quelltech der Q8 Sensor. Beim Q8 dient als Messprinzip die chromatisch-konfokale Abstandsmessung. Sie verwendet die Dispersion von weissem Licht in einer Fokussierlinse um den Abstand einer reflektierenden Oberfläche zum Sensor zu bestimmen.

Für den Einsatz im fliessenden Verkehr wurde der Q8 Sensor über eine speziell gefertigte Höhenführung in die SKM integriert. Der Q8 Sensor muss in einen Abstand von der Strassenoberfläche von 72 mm mit einem Messbereich von +/- 7,5 mm geführt werden. Weiterhin wurde – zunächst ohne weitere Kenntnisse über das tatsächliche Verhalten – festgelegt, dass der Q8 Beschleunigungen von max. ca. 1 g aufnehmen können sollte, um die Optik im Q8 Sensor nicht zu zerstören.



Abb. 8.116 Teststellung Q8 und Höhenführung in der SKM

8.2.2 Forschungsstand, Anwendungsgrenzen und Potential

Das Verfahren zur berührungslosen Griffigkeit wurde im Rahmen des Forschungsprojektes «Ein schnelles optisches Messsystem zur Erfassung der Griffigkeit von Strassenoberflächen: OPTOgrip» entwickelt. Das Verfahren kann derzeit als Prototyp bezeichnet werden, welches in Zukunft weiterentwickelt werden soll. Grundsätzlich konnte ein Verfahren entwickelt werden, anhand dem die SKM-Werte aus den Texturdaten der Fahrbahnoberfläche berechnet werden können.

Bis zu einer netzweiten Anwendung sind allerdings weitere Forschungsaktivitäten erforderlich. Neben einer Optimierung der Höhenführung einhergehend mit einer Erhöhung der Anzahl nutzbarer Daten müssen in Zukunft auch Geschwindigkeiten bis 80 km/h erzielbar sein. Die bisherigen Erfahrungen wurden bei Fahrgeschwindigkeiten von bis zu 60 km/h gewonnen. Weiterhin muss der Einsatz auf Betonfahrbahnen und Fahrbahnmarkierungen weiter untersucht werden.

8.2.3 Einsatzzweck und Fragestellung im Bereich Trasse

Eine gute Griffigkeit von Fahrbahnoberflächen ist der wesentliche Aspekt hinsichtlich deren Sicherheitsbewertung. Die bisherige Erfassung im Rahmen der Bauabnahme bzw. während der Betriebsphase sieht immer die Messung bei einer definierten Wasserfilmdicke (in der Regel 0,5 mm) vor. Dies erhöht den zeitlichen und monetären Aufwand im Zuge der Messung erheblich. Eine berührungslose Erfassung der Griffigkeit, welche gleichzeitig an einem mobilen Messsystem ohne benetzte Fahrbahnoberfläche erfolgen kann, wäre im Hinblick auf Nachhaltigkeit und Wirtschaftlichkeit ein wesentlicher Fortschritt.

8.2.4 Datenerfassung, Messgrößen und Genauigkeit

Die Datenerfassung erfolgt mittels einem speziellen ultrahochschnellen Sensor berührungslos bei Fahrgeschwindigkeiten bis 60 km/h. Es wird die Textur der Fahrbahnoberfläche mit einem Messpunktabstand von 10 µm erfasst. Aufgrund der weiter zu optimierenden Höhenführung müssen in einem ersten Schritt die gültigen von den ungültigen Daten separiert werden. Die nutzbaren Daten können in das entwickelte Griffigkeitsmodell überführt und dort analysiert werden. Die unter Anwendung des Modells berechneten SKM-Werte weisen eine sehr gute Übereinstimmung mit den gemessenen SKM-Werten auf. Die absolute Abweichung der berechneten Griffigkeit von der gemessenen lag für 86% der Daten $\leq 0,05$ und für 95% der Daten $\leq 0,075 \mu_{SKM}$ -Einheiten.

8.2.5 Anwendungsbeispiele, Pilotanwendungen

Die berührungslose Griffigkeit wurde bislang nur im Projekt OPTOgrip eingesetzt.

8.2.6 Literaturverzeichnis

[141] Sonstige Literatur / Forschungsberichte

[142] Großmann, A. Schmidt, J., Sturzenhecker, , Ueckermann, A.: Ein schnelles Optisches Messsystem zur Erfassung der Griffigkeit von Straßenoberflächen: OPTOgrip. TIB Hannover, 2022.

[143] B.N.J. Persson, Theory of rubber friction and contact mechanics, Journal of Chemical Physics, (115) 8, S. 3840-3861, 2001.

[144] Ueckermann, A., Wang, D., Oeser, M., Steinauer, B. (2014), A contribution to noncontact skid resistance, International Journal of Pavement Engineering, DOI: 10.1080/10298436.2014.943216

8.3 ML-basierte Bilddatenverarbeitung zur Objekt- und Schadstellendetektion

8.3.1 Beschrieb der Technologie

Die im Rahmen der Photogrammetrie (siehe 7.24) erhobenen Oberflächenbilder werden, entsprechend der standardisierten Prozesse für die Ermittlung des Strassenzustands, üblicherweise durch geschultes Personal händisch gesichtet. Diese Art der Auswertung ist jedoch sehr zeitaufwendig und trotz intensiver Schulungen, aufgrund der Eintönigkeit des Arbeitsschritts einem gewissen menschlichen Fehler beaufschlagt.

Allgemeine Einführung

Es existieren daher schon seit vielen Jahren Bestrebungen diesen Prozess mit Maschinellen Lernverfahren zu automatisieren. Maschinelles Lernen bezeichnet einen Oberbegriff für die künstliche Erzeugung von Wissen auf Basis von Erfahrung. Dies umfasst eine sehr grosse Vielzahl von Verfahren und Methoden, die in der Regel selbständig auf Basis von Trainingsdaten ein statistisches Modell entwickelt, das dann an

bekannten Testdaten überprüft wird. Eine Validierung findet dann an unbekannten zusätzlichen Daten statt.

Der Trainingsvorgang kann anhand gelabelter Daten (Ausgaben sind für die Eingaben des Trainingsdatensatzes bekannt, „überwachtes Lernen“, „supervised learning“) oder ungelabelter Daten (Ausgaben unbekannt, der Algorithmus sucht selbst nach Zusammenhängen, „unüberwachtes Lernen“, „unsupervised learning“) erfolgen. Zu letzterem gehören auch statistische Verfahren des Clustering, also der Einsortierung von Daten in Gruppen, auch wenn die Art und Zahl der Gruppen vorher nicht unbedingt bekannt ist. Eine Spezialform des Maschinellen Lernens ist das „bestärkende Lernen“ („reinforcement learning“), bei dem die Ausgaben nicht bekannt sind, aber positive Ergebnisse statistisch „belohnt“ werden.

Verfahren des maschinellen Lernens werden inzwischen in vielen Bereichen eingesetzt, in denen sehr viele Daten vorliegen, die statistischen Zusammenhänge aber nicht oder nicht vollständig bekannt sind. Dies reicht von der Wahlforschung und der Wirtschaftsprognose bis zum Autonomen Fahren.

Der Erfolg des maschinellen Lernens hängt neben der Wahl der am besten geeigneten Methode und deren Parametern vor allem von der Zahl, der Qualität und der Aufbereitung der Trainingsdaten ab. Dabei muss besonders auch die Testphase beachtet werden – die Aufteilung eines Datensatzes in Test- und Trainingsdaten hat entscheidende Bedeutung auf die Ergebnisse und die scheinbare Genauigkeit der Prognosen. Oft liegen geprüfte und gelabelte Datensätze nur in geringem Umfang und nur für begrenzt variable Randbedingungen vor, so dass die Prognosen dann bei unbekannten Daten mit abweichenden Randbedingungen oft scheitern.

Daten können in sehr verschiedener Form als Eingangsdaten für das Maschinelle Lernen dienen. Es können direkte Messdaten sein (wie weiter unten einzelne Radarspuren oder Segmente aus Radargrammen), aber auch aus den Daten abgeleitete Features (z. B. Maximalamplituden, Frequenzgehalte, Zeitpunkte).

Neuronale Netzwerke werden in einer Vielzahl von Anwendungen in einem überwachten Lernprozess trainiert. Sie benötigen in diesem Fall, wie oben erläutert, gelabelte Datensätze. Vereinfacht gesagt, werden die Eingangsdaten (z. B. eine Radarspur, Bildpixel) über eine oder mehrere komplex vernetzte Schichten aus Zellen mit den Ausgangsdaten (z.B. Objekttyp, Schichtdicke, Entscheidung Einlagerung ja/nein) verknüpft. In der Trainingsphase bestimmt ein statistischer Algorithmus die rechnerischen Gewichte für die einzelnen Verbindungen zwischen den Zellen. In der Test- und Anwendungsphase werden diese Gewichte genutzt, um den Ausgangswerte zu prognostizieren.

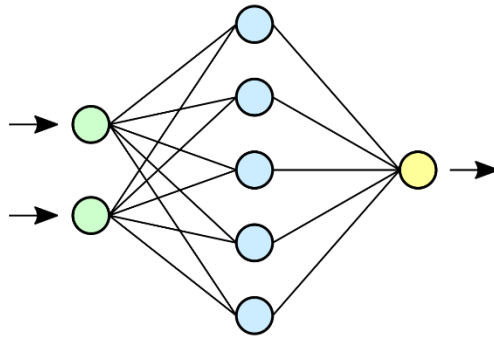


Abb. 8.117 Vereinfachte Darstellung eines neuronalen Netzwerkes mit zwei Eingängen (grün, z. B. Messdaten), einer Schicht aus „Neuronen“ (blau) und einem Ausgang (gelb, gesuchter Parameter). Die Art und Stärke der Verknüpfung der einzelnen Zellen wird in der Trainingsphase mit bekannten, gelabelten Daten „trainiert“. Quelle: Wikipedia, Dake/Mysik

ML-Verfahren zur Bilddatenverarbeitung

Seit dem ersten Verfahren im Jahr 1991 [145] wurden eine Vielzahl an unterschiedlicher Ansätzen zur automatischen visuellen Schadstellendetektion entwickelt.

Verfahren aus dem Bereich der klassischen Bildverarbeitung basieren dabei auf der Kombination von Techniken zur Reduktion von Beleuchtungseinflüssen mit Schwellwertverfahren, um Risse der Strassenoberfläche als lokale Minima im Bildraum zu detektieren [146][147][148][149][150].

Durch den erfolgreichen Einsatzes von Deep-Learning-Verfahren für die Lösung von bildbasierten Problemstellungen, rücken von Experten entworfene Merkmalsdetektoren und Fehlerfunktionen, jedoch immer weiter in den Hintergrund.

Verfahren des klassischen ML, wie z. B. Support Vector Machines [151] oder flache Neuronale Netzwerke [152] können in der Regel nicht direkt auf den Eingangsdaten (wie z. B. Bildern) eingesetzt werden, sondern benötigen eine problemspezifische Datenvorverarbeitung und Merkmalsextraktion, deren Design Expertenwissen erfordert und dementsprechend aufwändig umzusetzen ist. Verfahren aus der Gruppe des Deep Learnings (DL) hingegen benötigen diese Merkmalsextraktion nicht, wodurch Bilddaten als direkter Input Verwendung finden können. Sie bilden eine Untergruppe des ML und basieren auf tiefen Neuronalen Netzwerken. Durch die Tiefe und Struktur dieser Netzwerke kann auch die Merkmalsextraktion aus den Daten erlernt und damit optimal auf die Problemstellung angepasst werden. Dabei findet, verallgemeinernd ausgedrückt, in den ersten Schichten des Netzwerks eine Datenvorverarbeitung statt. Die tieferen Schichten lösen dagegen vorwiegend das in den Daten enthaltene Klassifikations- oder Regressionsproblem [153]. Aufgrund dieser Eigenschaft wurden mit DL einige der Durchbrüche des ML erzielt, deren Resultate die der vorherigen Verfahren automatischer Mustererkennung bei weitem übertrafen. Zu diesen Innovationen zählt etwa der Einsatz von tiefen neuronalen Faltungsnetzen (CNN) zur Bildklassifikation [154].

Obwohl die dem DL zugrundeliegenden Konzepte schon lange existieren, konnten sie erst mit der gestiegenen Rechenleistung moderner Hardware realisiert werden. Mit dem Einsatz von leistungsstarken, aber vergleichsweise günstigen Grafikkarten wurde eine Anwendung auch abseits der akademischen Forschung möglich. Für das Training leistungsfähiger Netzwerke werden in der Regel hunderttausende von Trainingsdaten benötigt, um alle Schichten eines Netzwerks zu trainieren.

Anforderungen an Trainingsdaten

Für das Training von CNN erfolgt in den meisten Fällen in Form des sogenannten Supervised-Learning. Dafür müssen geeignete Trainingsdaten bereitgestellt werden, die

die Diversität der Problemstellung möglichst gut abdecken, und für die genaue Zielwerte bekannt sind. Soll also ein Netz beispielsweise darauf trainiert werden Risssschäden pixelgenau zu segmentieren, so müssen für das Training zuerst Beispielfbilder dieser Schäden gesammelt werden, für die eine ebenso genau Markierung der Schäden vorliegt (Abb. 8.118).

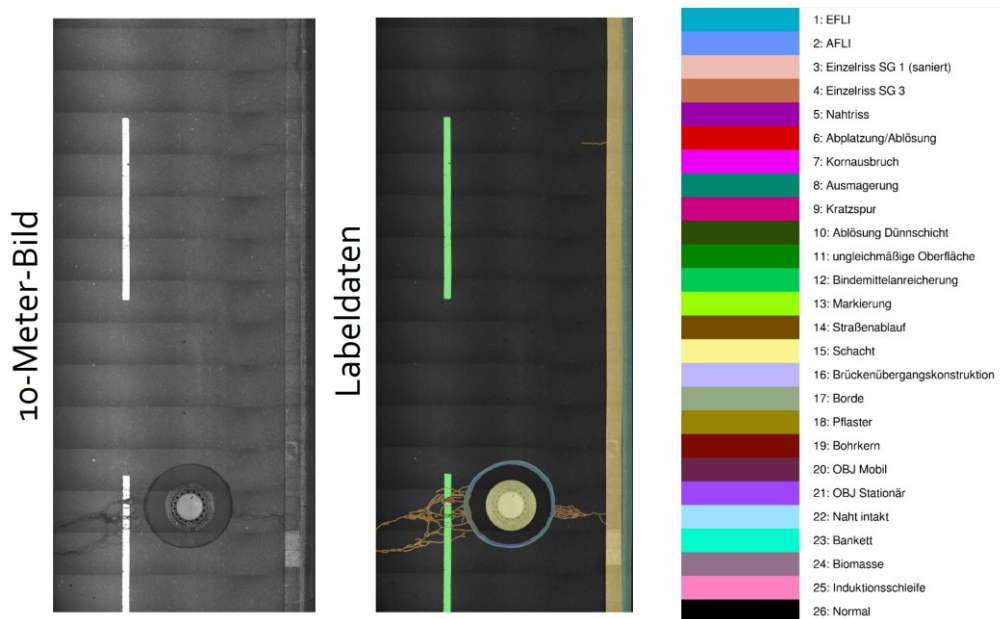


Abb. 8.118 Labeling von Oberflächenbildern durch pixelgenaue Schadens- und Objektmasken [161]

In Abhängigkeit von der Problemstellung und der Struktur des Netzwerkes werden in der Regel viele tausend Beispieldaten benötigt, um ein sinnvolles Training durchzuführen.

Für spezielle Anwendungsbereiche kann es jedoch mit grossem Aufwand verbunden sein, repräsentative Trainingsdaten zu gewinnen. Ausserdem steigt der Rechenaufwand für das Training mit zunehmender Anzahl an Trainingsdaten und kann – je nach eingesetzter Hardware – mehrere Tage oder Wochen in Anspruch nehmen.

Transfer Learning

In diesen Fällen stellt Transfer-Learning eine sehr leistungsfähige Alternative dar [155]. Hierbei wird das Netzwerk auf einer Domäne trainiert, in der viele Trainingsdaten verfügbar sind. Dafür stehen in der Forschung umfangreiche Datensätze, wie z. B. Imagenet [156] zur Verfügung, die allerdings im Allgemeinen nicht die Klassen umfassen, die in der Praxis der Strassenraumerfassung benötigt werden. Daher ist es notwendig, anwendungsspezifische Trainings- und Testdatensätze zu generieren. Diese können jedoch kleiner ausfallen, da die Modelle nach einem initialen Training auf den öffentlichen Datensätzen in der eigentlich gewünschten Anwendungsdomäne nur noch nachtrainiert werden müssen. Dabei hat sich gezeigt, dass insbesondere die ersten Schichten eines tiefen Neuronalen Netzes als universelle Merkmalsextraktoren fungieren, die sich auch bei sehr unterschiedlichen Anwendungsdomänen wiederverwenden lassen. Der Aufwand der Trainingsdatenbereitstellung kann daher deutlich verringert werden. Die Anwendung der Netzwerke wird somit günstiger und auch in Anwendungsgebieten interessant, für die eine Datengewinnung im grossen Massstab kaum möglich oder nicht wirtschaftlich erscheint.

8.3.2 Forschungsstand, Anwendungsgrenzen und Potential

Die Forschung im Bereich des Deep Learnings wird sehr stark durch Forschergruppen aus dem Bereich der automatisierten Bildverarbeitung, der Robotik und aus dem Bereich des autonomen Fahrens getrieben. Verfahren des Deep Learnings haben in den letzten Jahren in fast allen Bereichen der automatisierten Bildverarbeitung klassische ML-Verfahren abgelöst. Dabei existieren Verfahren, die Objekte in Bildern detektieren können und die

Position des Objekts über Detektionsrechtecke zurückgeben (Abb. 8.119 links) oder eine objektscharfe Segmentierung von Objekten ermöglichen. Bei den Segmentierungsverfahren wird noch einmal unterschieden zwischen den folgenden Problemklassen (Abb. 8.119 rechts):

Semantische Segmentierung – Jedem Bildpixel wird eine Objektklasse zugewiesen

Instanz Segmentierung – Jeder einzelnen Instanz von Objekten wird eine Maske zugewiesen.

Panoptische Segmentierung – Kombination aus Semantischer – und Instanzsegmentierung. Jedem Pixel wird eine Klasse zugewiesen und einzelnen Instanzen sind voneinander trennbar.

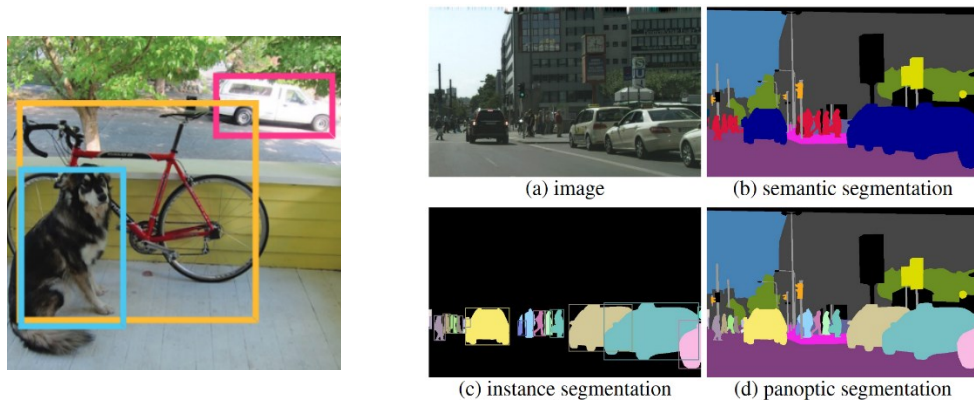


Abb. 8.119 Links: Objekte werden im Bild detektiert und als Klasse (z.B. Hund, Fahrrad, Auto) mit dem dazugehörigen Detektionsrechteck zurückgeliefert. Quelle: [157]. Rechts: Vergleich zwischen Semantischer Segmentierung (b), Instanz Segmentierung (c) und Panoptischer Segmentierung (d) für das Eingangsbild (a). Quelle: [158]

Grenzen für die Anwendung bestehen momentan vor allem bei Problemstellungen, die erweitertes Kontextwissen benötigen (z.B. stark verdeckte Objekte) oder bei Problemstellungen die für die Interpretation situatives, ingenieurstechnisches Fachwissen benötigen.

8.3.3 Einsatzzweck und Fragestellung im Bereich Trasse

Methoden des Deep Learning lassen sich für die Anonymisierung von Bilddaten verwenden, die im Bereich des Strassenraums aufgenommen werden und unter Umständen sensitive Daten enthalten können. Die Personen und Fahrzeug-/Kennzeichenerkennung ist eine in der Literatur vielfach bearbeitete Problemklasse und bildet Beispielsweise eine Subklasse der Problemstellung aus dem Imagenet Datensatz [156]. Durch die Detektion von Fahrzeugen und Personen in Bildern des Strassenumfelds können die entsprechenden Bereiche einfach anonymisiert werden.

Ein weiteres Einsatzfeld stellt die Inventar-/Objekterfassung aus Bildern des Strassenumfelds dar. Ähnliche Problemstellungen leiten sich bereits aus dem Bereich des autonomen Fahrens ab, in welchem beispielsweise die Erkennung von Strassenschildern, Ampeln und Fahrbahnmarkierungen eine wesentliche Rolle spielt.

Neben Objekten lassen sich aus Bildern des Strassenumfelds auch Informationen über die Vegetation extrahieren. Hierbei ist neben der Erfassung der Existenz auch die Klassifikation möglich, so dass beispielsweise die Erfassung von Baumbeständen (teil)automatisiert erfolgen kann. Eine weitere Problemstellung die mit dieser Technik automatisiert werden kann ist die Erkennung von gebietsfremden Problempflanzen (Neophyten).

Bei dem Einsatz von hochauflösenden Kameras oder bei der Verwendung von Oberflächenkameras ist auch die Erkennung von Schadstellen und Inventarobjekten der Strassenoberfläche (teil)automatisiert möglich.

8.3.4 Datenerfassung, Messgrößen und Genauigkeit

Das Verfahren stellt grundsätzlich keine Datenaufnahmetechnik, sondern nur eine Verarbeitungstechnik dar. Entsprechend richtet sich die erzielbare metrische Genauigkeit nach der verwendeten Sensortechnik. Die Ausgabe der Neuronalen Netzwerke kann grundsätzlich eine objektscharfe Genauigkeit erreichen.

8.3.5 Anwendungsbeispiele, Pilotanwendungen

Die Erkennung von Personen, Fahrzeugen und auch bestimmten Inventarobjekten der Strasse stellt im Bereich des autonomen Fahrens eine umfassend betrachtete Problemklasse dar. Es existieren daher zahlreiche Datensätze, die diese Objektklassen als Teilproblem enthalten (z.B. ImageNet [156] oder Cityscapes dataset [159]). Entsprechend gibt es in diesem Bereich eine grosse Anzahl an Publikationen mit Verfahren die für die Erkennung dieser Objekte eingesetzt werden können.

Für die Erfassung und Klassifikation Strassennaher Vegetation gab es beispielsweise ein Forschungsprojekt, welches sich mit der Erfassung von Neophyten beschäftigt hat. Dabei wurden seitlich zur Fahrtrichtung aufgenommene Bilder des Bewuchs an Seiten- und Mittelstreifen von Autobahnen aufgenommen und automatisiert auf Neophyten analysiert und im bereits vielversprechende Ergebnisse erzielen konnte [160].

Auch die Erkennung von Strassenschäden und Inventarobjekten aus Bildern der Strassenoberfläche wurde bereits in der Literatur betrachtet. So wurde beispielsweise im Rahmen eines Forschungsprojekts die automatisierte Erkennung der bei den Zustandserfassungen der D-A-CH-Länder verwendeten Schadenklassen aus Oberflächenbildern untersucht und ein grosses Potential für die Automatisierung mit Methoden des Deep Learnings festgestellt werden [161].

8.3.6 Literaturverzeichnis

Sonstige Literatur / Forschungsberichte

- [145] H. Lee, Application of machine vision techniques for the evaluation of highway pavements in unstructured environments, International Conference on Advanced Robotics' Robots in Unstructured Environments, 1425–1428, 1991.
- [146] Q. Zou, Y. Cao, Q. Li, Q. Mao, S. Wang, CrackTree: Automatic crack detection from pavement images," Pattern Recognition Letters, Volume 33, Nr. 3, 227–238, 2012.
- [147] L. Peng, W. Chao, L. Shuangmiao, F. Baocai, Research on Crack Detection Method of Airport Runway Based on Twice-Threshold Segmentation. International Conference on Instrumentation and Measurement, Computer, Communication and Control (IMCCC), 1716–1720, 2015.
- [148] H. Oliveira, P. L. Correia, „CrackIT - An image processing toolbox for crack detection and characterization. IEEE International Conference on Image Processing (ICIP). 798–802, 2014.
- [149] K. Fernandes, L. Ciobanu, Pavement pathologies classification using graph-based features. IEEE International Conference on Image Processing (ICIP), 793–797, 2014.
- [150] W. Kaddah, M. Elbouz, Y. Ouerhani, V. Baltazart, M. Desthieux, A. Alfalou, Optimized minimal path selection (omps) method for automatic and unsupervised crack segmentation within two-dimensional pavement images. The Visual Computer, 1–17, 2018.
- [151] A. J. Smola, B. Schölkopf, A tutorial on support vector regression, 2004.
- [152] K. Gurney, An introduction to neural networks. London, New York, 1997.
- [153] F. Chollet, F., Deep Learning with Python. Manning, 2017.
- [154] A. Krizhevsky, I. Sutskever, G. E. Hinton, ImageNet Classification with Deep Convolutional Neural Networks. Advances in Neural Information Processing Systems, 2012.
- [155] J. Yosinski, J. Clune, Y. Bengio, L. Hod, How transferable are features in deep neural networks? Proceedings of the 27th International Conference on Neural Information Processing Systems - Volume 2 (S. 3320-3328). Montreal: MIT Press, 2014.

-
- [156] J. Deng, W. Dong, R. Socher, L.-J. Li, L. Kai, F.-F. Li ImageNet: A large-scale hierarchical image database. 2009 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, 248-255, 2009.
-
- [157] J. Redmon, S. Divvala, R. Girshick, A. Farhadi, You Only Look Once: Unified, Real-Time Object Detection, Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, 779-788, 2016.
-
- [158] A. Kirillov, K. He, R. Girshick, C. Rother, P. Dollar, Panoptic Segmentation. Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, 9396-9405, 2019.
-
- [159] M. Cordts, M. Omran, S. Ramos, T. Rehfeld, M. Enzweiler, R. Benenson, U. Franke, S. Roth, and B. Schiele, The Cityscapes Dataset for Semantic Urban Scene Understanding, IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, 2016.
-
- [160] M. Nobis, C. Mayer, C. Ginzler, R. Timofte, Automatisierte Erfassung invasiver Neophyten an Autobahnen mit künstlicher Intelligenz, VSS2016/224.
-
- [161] R. Stricker, D. Aganian, J. Lembach, B. Stephan, M. Sesselmann, T. Naber, R. Spielhofer, M. Hahn, A. Hautz, Automatisierte Schadstellenerkennung für unterschiedliche Fahrbahnbeläge mittels Deep-Learning-Techniken (ASFaLT). Abschlussbericht, Forschungsprojekt im Rahmen des D-A-CH-Calls 2018, Finanzierung durch: Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft mbH, Project no. 869514
-

8.4 On Board Weighing

8.4.1 Beschrieb der Technologie

Durch den Einsatz von On-Board-Weighing-Systemen wird die Beladungsmessung direkt auf einem Fahrzeug ermöglicht. Mit diesen Systemen kann das Gesamtgewicht der Zuladung des Fahrzeugs bereits während des Ladeprozesses ermittelt werden. Es bietet den Betreibern der Fahrzeuge damit die Möglichkeit die zulässige Zuladung eines Fahrzeugs auszunutzen ohne diese zu überschreiten, womit ein möglichst verschleissarmer und sicherer Transport ermöglicht wird.

Das On-Board-Weighing-System besteht aus Lastsensoren, welche am Federungssystem des Fahrzeugs angebracht sind und einer zentralen Anzeige- und Verarbeitungseinheit, auf der die Beladung des Fahrzeugs abgelesen werden kann. In Abhängigkeit des auf dem Fahrzeug eingesetzten Federungssystems können die folgenden Lastsensoren zum Einsatz kommen.

Lastsensoren für Fahrzeuge mit mechanischen Federsystemen

Bei Fahrzeugen mit mechanischen Federsystemen erfolgt die Lastmessung über Kraftmessdosen (vgl. Kapitel 7.13 Kraftmessdosen im Teilbericht Kunstbauten). Die Kraftmessdosen messen dabei Biegung oder Scherung die bei Belastung an dem Federsystem des Fahrzeugs auftritt. Alternativ kann auch die aufliegende Gewichtskraft gemessen werden (z.B. die am Königszapfen eines Sattelzugs oder an den Auflagepunkten eines Containers) (Abb. 8.120).

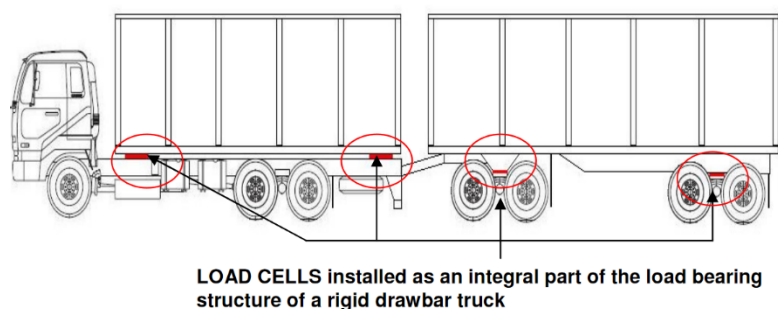


Abb. 8.120 Mögliche Positionierung der Kraftmessdosen an den Aufsatzpunkten eines Containers und an dem Federsystem des Anhängers, Quelle: [162].

Lastsensoren für Fahrzeuge mit Luftfederung

Bei Fahrzeugen mit Luftfederung wird in den Luftkreislauf ein zusätzlicher Luftdruckmesser eingebracht. Bei steigender Beladung des Fahrzeugs wird der Druck in dem Kreislauf für die Luftfederung erhöht. Dieser Erhöhung des Drucks kann gemessen werden, um Rückschlüsse auf die vorliegende Zuladung ziehen zu können.

Kalibrierung

Um eine korrekte Umrechnung der indirekt ermittelten Lastwerte in Gewichtsangaben zu ermöglichen, muss das System kalibriert werden. Dabei wird das Fahrzeug typischerweise die Messwerte des Fahrzeugs in beladenem und unbeladenem Zustand mit den Messwerten einer Fahrzeugwaage abgeglichen und als Kalibrierwerte in die Anzeige- und Verarbeitungseinheit eingespeichert.

8.4.2 Forschungsstand, Anwendungsgrenzen und Potential

On-Board-Weighing-Systeme werden bereits verbreitet in der Praxis eingesetzt. Die Sensoren bieten im Bereich des Flottenmanagements eine einfache und effiziente Möglichkeit, um die Beladung von Fahrzeugen zu optimieren und Überladungen schnell zu erkennen. Die Sensoren sind von verschiedenen Anbietern als Nachrüstlösung erhältlich und sind auch in Neufahrzeugen für einen geringen Aufpreis erhältlich [163] (ca. 1000.-2000 CHF). Die Präzision der Systeme ist allerdings sehr stark von einer korrekten und regelmässigen Kalibrierung abhängig [164].

8.4.3 Einsatzzweck und Fragestellung im Bereich Trasse

Einhalten der maximalen Zuladung der Fahrzeuge, um Verkehrssicherheit zu gewährleisten und um übermässigen Verschleiss des Fahrzeugs zu ermöglichen.

8.4.4 Datenerfassung, Messgrössen und Genauigkeit

Die Genauigkeit der Gewichtsmessung wird von unterschiedlichen Herstellern mit 2 bis 5 Prozent angegeben. Je nach eingesetzter Technik und gewünschter Genauigkeit sollte eine Kalibrierung etwa alle 1 bis 3 Jahre erfolgen [164].

8.4.5 Anwendungsbeispiele, Pilotanwendungen

Im Bereich des Flottenmanagements bereits weite Verbreitung.

8.4.6 Literaturverzeichnis**Sonstige Literatur / Forschungsberichte**

[162] TR Pletts, The Feasibility of Automatic On-Board Weighing Systems in the South African Sugarcrane Transport Industry, University of KwaZulu-Natal.

[163] William Todts, Weight sensors for lorries: Effective, affordable, reliable, Transport & Environment, 2014.

[164] William Todts, Weight sensors for lorries: effective, affordable, reliable. Studie durchgeführt von RappTrans, 19.12.2013.

[165] Radoičić, G., Jovanović, M. and Arsić, M. (2016), Experience with an On-board Weighing System Solution for Heavy Vehicles. ETRI Journal, 38: 787-797. <https://doi.org/10.4218/etrij.16.0115.0183>

[166] Krunal Maniar, Designing High-Performance On-Board Weighing (OBW) Systems in Commercial Vehicles, SBAA357 – June 2019 <https://www.ti.com/lit/wp/sbaa357/sbaa357.pdf?ts=1680699245503>

8.5 Streckenkontrolle - Auswertung von Mikroverkehrsdaten

Die Mobilität ist eines der wichtigsten Einflussfaktoren für eine nachhaltige Verkehrsraumnutzung. Mikroverkehrsdaten enthalten hierbei einzelne Verkehrsraumabschnitte die hochaufgelöst analysiert werden. Die Erfassung beinhaltet sowohl den motorisierten Individualverkehr als auch Radfahrer und Fussgänger. Analysiert werden kann das Verhalten von Radfahrern, der Verkehrsfluss an Knotenpunkten und die Auswirkungen des multimodalen Verkehrs. Hierbei können den Verkehrsteilnehmern unterschiedliche Objektklassen zugewiesen und deren gefahrenen Trajektorie unterschieden werden. Diese Daten können im Weiteren für die Optimierung von Verkehrsflüssen, Lichtsignalanlagen oder Regelanlagen und zur Detektion von Stauereignissen verwendet werden.

Mit diesem Ansatz entsteht ein Verkehrsnetz, welches intelligent die Steuerung von Verkehrsflüssen auf Basis von automatisch erhobenen Daten ermittelt. Daten, wie zum Beispiel die Verkehrsdichte, Wetterbedingungen oder Umweltbelastung, stammen von

Sensoren am Strassenrand, von Kontaktschleifen in der Fahrbahn oder von Sensoren im Fahrzeug selbst (z.B. GNSS oder Ultraschallsensoren).

Mit den gesammelten Daten lassen sich u.a. Ampeln oder Geschwindigkeitsregelanlagen verkehrsgerecht schalten, sodass unnötige Wartezeiten vermieden werden können. Weiterhin können Verkehrsströme umgeleitet oder Umweltzonen kurzfristig eingerichtet werden.

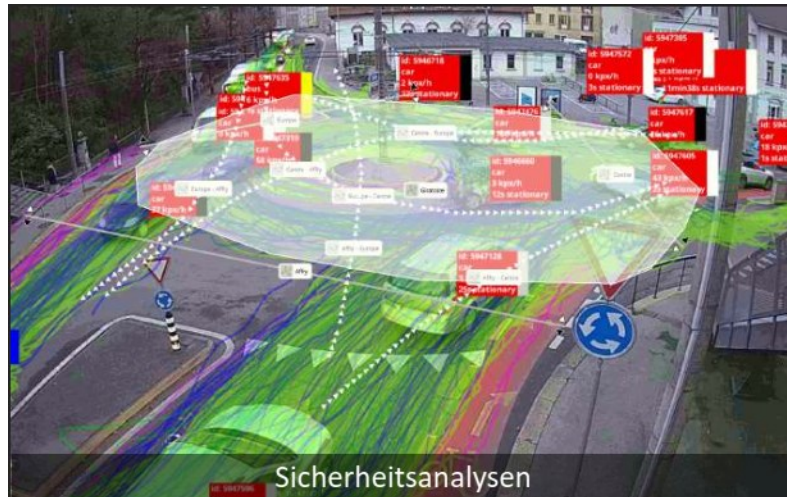


Abb. 8.121 Analyse eines Kreisverkehrs mit eingezeichneter Trajektorie und Flächennutzungshäufigkeit [SwissTraffic]

Durch zusätzliche Sensoren in Einsatzfahrzeugen können auch Ampelkreuzungen, welche die Zufahrt zum Trassee ermöglichen, rechtzeitig freigeräumt werden. Insgesamt kann die Verkehrslage um Kreuzungen oder des Trassees in Echtzeit bewertet, analysiert und die Schaltzyklen der Ampeln oder die Geschwindigkeitsregelanlage situationsabhängig angepasst werden. Eine Vernetzung mehrerer Systeme könnte dazu beitragen, dass Stau in belasteten Bereichen reduziert wird.

8.5.1 Beschrieb der Technologie

Die hier ausgeführte Technologie besteht aus verschiedenen Sensoren und Verfahren, die zu einem Prozessablauf gekoppelt sind. Als primärer Sensortyp kommen in der Regel Kamerasysteme oder Lidarsensoren zum Einsatz, welche an Masten oder Brücken einen Strassenabschnitt oder eine Kreuzung erfassen. Die Positionen der Sensoren müssen an den Befestigungen eingemessen und ggf. photogrammetrisch kalibriert werden.

Diese Sensordaten werden entweder Vorort mit einem Rechner vorverarbeitet oder direkt einer Cloudlösung zugeführt. In beiden Fällen extrahiert ein Detektionsalgorithmus aus den Bild- oder Punktwolkendaten kontinuierlich die Position der Verkehrsteilnehmer. Durch die Kalibrierung können diese Daten in georeferenzierte Positionen umgerechnet werden. Durch die Analyse aufeinanderfolgender Sensormessdaten kann der Verkehrsfluss extrahiert und die einzelnen Verkehrsteilnehmer als Messabfolge repräsentiert werden.

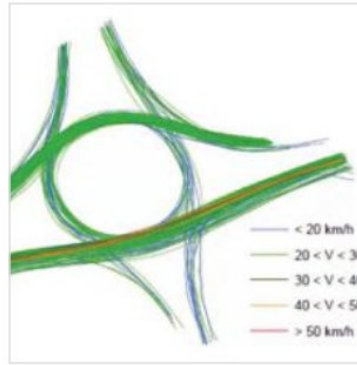
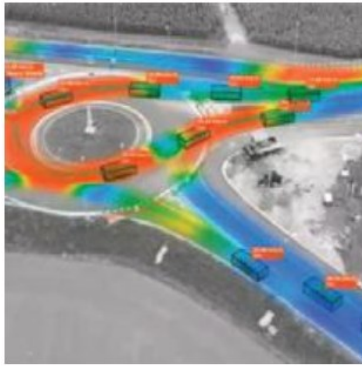


Abb. 8.122 Analysebild eines Kreisverkehrs mit entzerrter Geschwindigkeitsanalyse jeder einer Fahrspur entlang der Kreuzungssituation. [SwissTraffic]

8.5.2 Forschungsstand, Anwendungsgrenzen und Potential

Der Einsatz der Kamera-/Lidartechnologie für die Messung ist ein bewährtes und vielfach eingesetztes Verfahren. Neben Forschungsarbeiten sind auch bereits kommerzielle Lösungen verfügbar. Die Erfassung kann ohne Einschränkungen stattfinden und benötigt keine gesonderten Sicherungsmassnahmen. Die Messungen sind als Stichprobe anzusehen und eignen sich für eine partielle Überprüfung des Verkehrsraumes des Trassees.

8.5.3 Einsatzzweck und Fragestellung im Bereich Trasse

Der übergeordnete Einsatzzweck dieser Technologie besteht in der intelligenten Vernetzung zwischen verschiedenen Verkehrssystemen, -trägern und -teilnehmern durch Vehicle-to-Vehicle- und Vehicle-to-Infrastruktur-Kommunikation. Dieser Austausch von Daten von Kraftfahrzeugen untereinander sowie von Fahrzeugen und der Verkehrsinfrastruktur sind z. B. Warnung vor Stauende hinter der nächsten Kurve, Glatteis, Falschfahrer, usw.

Die Analyse der Abschnitte ist hierbei nur eine Stichprobe, in der aber folgende Punkte erfasst werden können:

- Stau des Überwachungsabschnittes
- Geschwindigkeit jedes Fahrzeuges
- Gefahrene Trajektorien im Überwachungsabschnittes
- Analyse besonders hoher Nutzungsbereiche
- Alarmierung Falschfahrer
- Analyse von Unfallschwerpunkten durch Ermittlung von Unfällen und Beinahe-Unfällen (Kollisionsverfolgung über die Trajektorien)

Abgeleitete Informationen

- Verkehrsregelung Geschwindigkeit, Rettungsgasse, Stau
- Verknüpfung mehrerer Überwachungsabschnitte → Verfolgen von Verkehrsströmen

8.5.4 Datenerfassung, Messgrößen und Genauigkeit

Die Erfassung der Kamerabilder erfolgt digital. Der Kamerastandort sollte so gewählt werden, dass die zu erfassenden Fahrzeuge mindestens mit 5-10 Pixeln abgebildet werden. I.d.R. kommt eine FullHD Kamera mit 1920 x 1080 Pixeln Auflösung, einem 120° Weitwinkel-Objektiv und eine Bildwiederholfrequenz von 30 fps,

Die aufbauende Datenerfassung findet digital statt. Das bezieht sich sowohl auf die Bestimmung der Erfassungswerte als auch auf den Weitertransport in einem gesicherten Datenformat. Für erstmalige Einmessung der Positionierung oder Lokalisierung ist ein separates GNSS Gerät nötig.

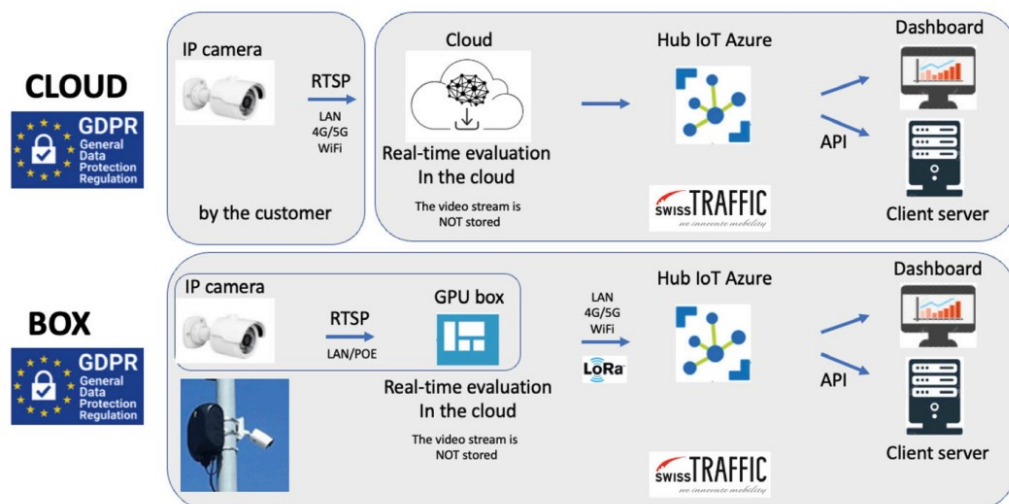


Abb. 8.123 Workflow der Verarbeitungskette zur Analyse der Mikroverkehrsdaten [SwissTraffic]

Der Messbereich und die zu erwartende Genauigkeiten hängt von dem eingesetzten Messsensor/Bildsensor ab. Folgende Richtwerte können für die Art von Sensoren angegeben werden:

- Trajektorien, relative Genauigkeit 0,1 -1 m
- Geschwindigkeitsmessung - Genauigkeit ~3-5 km/h

8.5.5 Anwendungsbeispiele, Pilotanwendungen

Das Forschungsprojekte KI4LSA und KI4PED untersuchen den Einsatz von Mikroverkehrsdaten und KI-Techniken für die intelligente Verkehrssteuerung auf Grundlage von Bild- und Lidarsensoren.

8.5.6 Literaturverzeichnis

Sonstige Literatur / Forschungsberichte

[167] SWISS TRAFFIC AI, Kamerabasierte Mikroverkehrsdatenerfassung

[168] Forschungsprojekt KI4LSA: Künstliche Intelligenz für LichtSignalAnlagen. Entwicklung von KI zur Verkehrsflussoptimierung.

[169] Forschungsprojekt KI4PED: Künstliche Intelligenz für die Steuerung von Fußgängerampeln

[170] Rehrl, Karl & Kranzinger, Stefan & Steinmaß, Markus & Wimmer, Michael. (2020). Live Dabei -Echtzeit-Verkehrsdatenerfassung als Grundlage für ein effektives Verkehrsmanagement

[171] Funktionale Anforderungen an Verkehrserfassungssysteme im Zusammenhang mit Lichtsignalanlagen
Forschungsauftrag VSS 2007/303 auf Antrag des Schweizerischen Verbandes der Strassen und Verkehrsfachleute (VSS) 1320, April 2010

8.6 Zustandsabgleich mit Augmented Reality + BIM

Übersetzt wird Augmented Reality (AR) mit „erweiterte Realität“ oder auch „angereicherter Realität“. Demnach werden in die reale Welt digitale Elemente eingefügt – direkt auf einem Bildschirm oder in einer Brille. Somit können für einen Betrachter digitale Elemente oder Informationen in die reale Sicht der Umwelt eingeblendet werden.

Bei AR handelt es sich dementsprechend um eine Kombination aus realer und virtueller Welt, bei der die reale Welt überwiegt. Im Gegensatz zur virtuellen Realität (VR) schafft AR keine neue Welt, sondern erweitert die bestehende reale Umgebung. Mittels AR wird die Realität entsprechend mit digitalen Inhalten ergänzt.

Die Nutzung ist realisiert durch mobile Geräte, wie beispielsweise Smartphones oder Tablets oder durch AR-Brillen. So ermöglicht beispielsweise die Umsetzung auf einem Handy die Kombination der durch die Handykamera aufgezeichneten Realität mit virtuellen Inhalten in Echtzeit. Durch verschiedene Benutzerschnittstellen kann in AR ebenfalls eine Interaktion mit den virtuellen Inhalten erfolgen.

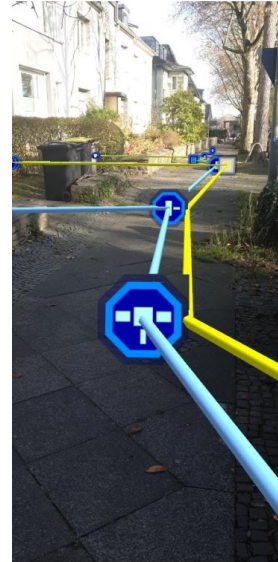


Abb. 8.124 Links: AR- Visualisierung mit einer Brille [media-as]. Rechts: AR-Einblendung einer Rohrleitung in eine live Aufnahme eines Handys [frox GmbH]

8.6.1 Beschrieb der Technologie

Es gibt verschiedene Varianten von AR-Umsetzungen. Diese unterscheiden sich hauptsächlich durch die verwendete Hard- und Software. Unterschieden wird grundsätzlich zwischen zwei AR-Varianten: markerbasiert und markerunabhängig. Die Wahl bestimmt darüber, wie Bilder und Informationen angezeigt werden.

Markerbasierte AR nutzt spezielle Marker, welche definiert in der realen Szene platziert werden. Werden diese Bezugspunkte im Bild erkannt, kann die Position und Ausrichtung der Kamera ermittelt werden. Durch die bekannte Position der Kamera können anschließend virtuelle Objekte oder zusätzliche Informationen in das Kamerabild projiziert werden.

Markerunabhängige AR ist aufwendiger, da es keine definierten Punkt gibt, durch welche die Realposition und -lage des Geräts ermittelt werden kann. Folglich muss das Gerät Objekte erkennen, wenn sie im Kamerabild erscheinen. Anhand eines Erkennungsalgorithmus sucht das Gerät nach Farben, Mustern und ähnlichen Merkmalen um festzustellen, um welches Objekt es sich handelt. Anschliessend orientiert es sich anhand von Zeit-, Beschleunigungsmesser-, GPS- sowie Kompassdaten, um Informationen oder Objekte in die Kamerabilder der realen Umgebung einzublenden.

AR-Systeme müssen Umgebungsdaten in Echtzeit verarbeiten, um die reale Welt und die digitale Ebene aufeinander abzustimmen. Damit die AR-Technologie funktioniert, wird eine hohe Rechenleistung benötigt, welche in der Regel durch das Gerät selbst zur Verfügung gestellt werden muss, um die Kameradaten mit geringen Latenzen mit der virtuellen Ebene überlagern zu können. Je besser die Qualität des Anzeigegeräts und der Kamera ist, desto realistischer erscheint die AR-Abbildung.

8.6.2 Forschungsstand, Anwendungsgrenzen und Potential

Der Einsatz der Technologie ist im Bereich Trasse noch nicht sehr verbreitet. Die Messungen sind als Kontrolle und Visualisierung anzusehen und eignen sich für eine Begehung oder Präsentation des Trassees.

Dieses Verfahren kann bei jeglicher Art von georeferenzierten Modellen die AR-fähig sind angewandt werden.

8.6.3 Einsatzzweck und Fragestellung im Bereich Trasse

Der Einsatz der Technologie ist im Facility Management und Bauwesen (Konstruktion, Fertigung und Wartung) anzusetzen. Die Möglichkeit geometrisch intensive CAD-Daten in Echtzeit in visuell akzeptable Modelle umzuwandeln, die eine glaubwürdige Realitätsabbildung realisiert, ist die Hauptanwendung von Augmented Reality

Die virtuelle Begehung des Trassees ist bei Bauvorhaben von Vorteil, da sich alle relevanten und auch nicht zwingend sichtbare Einbauten virtuell darstellen lassen. Durch die Kombination des Building Information Modelings und AR können Änderungen eines Bauvorhabens in Echtzeit visualisiert werden.

8.6.4 Datenerfassung, Messgrößen und Genauigkeit

Die Datenerfassung findet digital statt. Das bezieht sich auf die Bestimmung des Livebildes und auch der Projektion der 3D Daten in das Livebild. Für Erfassung der Positionierung oder Lokalisierung wird ein separates GNSS Gerät nötig.

Der Messbereich und die zu erwartende Genauigkeiten hängt von der eingesetzten Hardware und der Qualität des 3D-Modells ab. Folgende Richtwerte können für die Art von Sensoren angegeben werden:

- Kamerasystem Auflösung: 13 MP
- 8-Core-CPU (min. 2 Ghz)
- leistungsfähige GPU für KI- Anwendung

8.6.5 Anwendungsbeispiele, Pilotanwendungen

Die Techniken aus dem Feld der Virtual Reality und Augmented Reality werden zukünftig eine wachsende Rolle in der Visualisierung und Kontrolle von Bauwerken spielen. Zur Abschätzung der Technikfolgen gibt es eine Vielzahl an Vorstudien u.a. [175][176][177].

In verschiedenen Leuchtturmprojekten und Pilotstudien wurden die Potentiale digitaler Zwillinge und AR im Bereich des Bauwesens untersucht. Das übergeordnete Ziel ist dabei i. d. R. zeit- und kostensparender zu bauen und gleichzeitig die Qualität der Ausführung zu erhöhen [178][179].

Im Bereich von Infrastruktur- und Geodaten können AR-Systeme beispielsweise dazu dienen, Flurgrenzen in das Kamerabild eines handelsüblichen Tablets einzublenden [180]. Dies kann eine wichtige Hilfestellung bei klassischen Aussendienstaufgaben im Rahmen des Betriebs oder der Wartung von Infrastrukturen leisten. Vor allem bei oberflächlich nicht sichtbaren Infrastrukturen, wie beispielsweise unterirdischen Leitungen, ist das Potential von AR immens. Im Rahmen von Pilotversuchen wurden beispielsweise der Praxis-Einsatz von AR für das Infrastrukturmanagement von Gemeinden sowie die Nutzung von AR auf Baustellen durch Bauleitungen und Unternehmer untersucht [181].

Beispielhaft sind folgende Pilotstudien zu nennen:

BIMprove

Das Projekt BIMprove [182], welches von der EU finanziert wird, hat zum Ziel, die Effizienz und Ergebnisse der Gebäude- und Bauplanung sowie betreffender Betriebstätigkeiten mithilfe der Gebäudeinformationsmodellierung und digitaler Zwillingstechnologie zu

verbessern. Hierbei werden Menschen, Technologie und Prozesse vernetzt, um einen umfassenden digitalen Thread zu entwickeln, der kontinuierlich Abweichungen feststellt und den digitalen Zwilling entsprechend aktualisiert. Durch die Verwendung von Echtzeit-Daten können Baugesellschaften die Zuteilung von Ressourcen, Menschenströmen und Arbeitnehmersicherheit präziser planen.

DigitalTWIN

Ziel des Forschungsprojektes DigitalTWIN [183] war es, die Schnittstellen zwischen Planung, Fertigung, Montage, Betrieb sowie Rückbau durch IT-gestützte Werkzeuge zu ermöglichen und zu verbessern. Das Projektkonsortium untersuchte exemplarisch drei Anwendungsfälle: Wartungsunterstützung (Fassadenmonitoring), Qualitätssicherung (virtuelle Schweißprüfung) und AR-basierte Montageunterstützung (Gitterschalen-Konstruktion).

DIGEST

Vor dem Hintergrund des automatisierten und vernetzten Fahrens zielt das Forschungsprojekt DIGEST [184] darauf ab, einen digitalen Zwilling des Verkehrssystems Strasse zu schaffen, der alle Gegebenheiten, Situation sowie Umwelteinflüsse simuliert. DIGEST hat zum Ziel, durch gemeinsam mit dem Auftraggeber definierte Demonstratoren und Anwendungen aufzuzeigen, wie ein realistisches und hochpräzises digitales Abbild der Strasse in Form eines Digitalen Zwillings helfen kann, ein integriertes Informationsmanagement aufzubauen und verschiedene Herausforderungen beim Verkehrsmanagement für unterschiedliche Ausbaustufen des vernetzten und automatisierten Fahrens zu bewältigen. Zur Validierung des Digitalen Zwillings werden Testfelder wie das DLR Niedersachsen, Hallein und DigiTrans eingesetzt.

8.6.6 Literaturverzeichnis

Sonstige Literatur / Forschungsberichte

- [172] Hale, Kelly S. et al., Application of Virtual Environments, Handbook of Virtual Environments. Design, Implementation, and Applications. CRC Press, 2014.
- [173] Microsoft Dynamics 365 Guides, Was ist Augmented Reality oder AR? <https://dynamics.microsoft.com/de-de/mixed-reality/guides/what-is-augmented-reality-ar>. Abruf: 17.10.2022
- [174] Zollmann, Stefanie et al., Augmented Reality for Construction Site Monitoring and Documentation, Proceedings of the IEEE, vol. 102, no. 2, pp. 137-154, 2014
- [175] BAuA (Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin) (2016): Head-Mounted Displays – Arbeitshilfen der Zukunft. Bedingungen für den sicheren und ergonomischen Einsatz monokularer Systeme. baua: Praxis, Dortmund
- [176] Virtual und Augmented Reality Status quo, Herausforderungen und zukünftige Entwicklungen, Büro für Technikfolgen-Abschätzung beim Deutschen Bundestag (TAB), TA-Vorstudie, TAB-Arbeitsbericht Nr. 180, 2019, ISSN-Print: 2364-2599
- [177] Kai Reaver, Augmented reality as a participation tool for youth in urban planning processes: Case study in Oslo, Norway, 2023, doi: 10.3389/frvir.2023.1055930
- [178] Cristina De Hugo Silva, Angela et al., Using Augmented Reality in Different BIM Workflows, Augmented Reality and Its Application, IntechOpen, 2022.
- [179] Sabato, Emidio et al., BIM & Road safety – Applications of digital models from in-built safety evaluations to asset management, Transportation Research Procedia, Volume 69, pp. 815-822, 2023.
- [180] Kreutziger, Ulf et al., Entwicklung einer AR-Applikation für die Planung und Bodenordnung, zfv, 127, pp. 37-45, 2012.
- [181] Baublatt, Strassenbau : Augmented Reality lässt tief blicken, <https://baublatt.ch/baupraxis/strassenbau-augmented-reality-laesst-tief-blicken-29277>, Abruf: 04.04.2023
- [182] Forschungsvorhaben BIMprove, Laufzeit: 2020 - 2023, <https://bimprove-h2020.eu/project/>
- [183] Forschungsvorhaben DigitalTWIN, Laufzeit: 2018 – 2022, <https://d-twin.eu/>
- [184] Forschungsvorhaben DIGEST, Laufzeit: 2020 – 2022, <https://projekte.ffg.at/projekt/3894859>

8.7 ML-basierte Auswertung von Messdatenreihen

8.7.1 Beschrieb der Technologie

Aufgrund des sehr hohen Datenvolumens ist eine manuelle Auswertung von Messdatenreihen, wie sie beispielsweise bei Radarmessungen und abgeleiteten Produkten entstehen, ein sehr hoher Zeit- und Kostenfaktor. Ein netzwerkweiter Einsatz dieser Methode ist nur mit Teil- oder vollautomatisierter Auswertung denkbar.

Allgemein Einführung

Siehe Kapitel 8.3.1

ML-Verfahren zur Auswertung von Messdatenreihen

Mit neuronalen Netze lassen sich sowohl quantifizierte Parameter (z., B. Schichtdicke) als auch die Einordnung von Daten oder Datenbereichen in Gruppen bestimmen. Beides wurde für Radardaten in der wissenschaftlichen Literatur bereits erfolgreich demonstriert.

8.7.2 Forschungsstand, Anwendungsgrenzen und Potential

Ein Überblick über den Forschungsstand findet sich in [187]. Die grundsätzliche Anwendbarkeit wurde in zahlreichen wissenschaftlichen Studien demonstriert.

Die Anwendungsgrenzen liegen derzeit darin, dass nur für wenige Anwendungsszenarien ausreichend grosse, variantenreiche, und qualitätsgeprüfte Datensätze für das Training der Methoden zugänglich sind. Grundsätzlich sind Datensätze vorhanden, in der Regel aber proprietär. Infrastrukturbetreiber wie das ASTRA könnten hier helfen, indem sie in ihrem Auftrag akquirierte Daten zugänglich machen.

Ein weiteres Hindernis ist die Inkludierung in Standards und Regelwerke. Da die Verfahren in der Regel als „Black Box“ funktionieren, also viele Details dem Nutzer und Bewerter nicht zugänglich sind und sie zudem statistisch, und nicht deterministisch funktionieren, ist eine Validierung als Grundvoraussetzung für eine Standardisierung schwer. Hierzu laufen derzeit Forschungsprojekte, aber auch Initiativen z. B. beim DIN.

8.7.3 Einsatzzweck und Fragestellung im Bereich Trasse

Mögliche Einsatzzwecke sind z. B.

- Die automatisierte Dickenmessung von Schichten
- Die automatisierte Erkennung von Einlagerungen oder Einbauten
- Die automatisierte Erkennung von Anomaliezonen

Ähnliche Verfahren sind auch für die Auswertung von visuellen Daten, Ultraschalldaten oder anderen Daten mit grossem Volumen in Entwicklung oder Erprobung.

8.7.4 Datenerfassung, Messgrössen und Genauigkeit

Die Datenerfassung und Messgrössen entsprechen denen des konventionell ausgewerteten Radarverfahrens. Zur Präzision lassen sich noch keine abschliessenden Aussagen machen. Die Autoren der zitierten Studien geben Genauigkeiten bei der Dickenmessung und Trefferraten bei der Anomalieerkennung an, die einer manuellen Auswertung durch erfahrene Personen vergleichbar sind. An der Übertragbarkeit auf reale Feldstudien bestehen jedoch noch Zweifel, da den Studien oft nur geringe Datenmengen und konstante Randbedingungen zu Grunde liegen.

8.7.5 Anwendungsbeispiele, Pilotanwendungen

Abb. 8.125 demonstriert die Qualität der Bestimmung der Dicke einer Asphaltsschicht aus Radardaten mittels eines Neuralen Netzwerkes, hier eines „Multi-layer-Perceptrons“ [188]. Das System erhält Radarspuren als Eingangsdaten und wurde mit Ergebnissen eines erfahrenen Auswerters trainiert. In der Abbildung werden dann die Prognosen des Algorithmus mit den Ergebnissen des Auswerters verglichen. Nur an wenigen Stellen

weichen beide signifikant voneinander ab, was sich in der Praxis durch anschließende Datenverarbeitung (z. B. Filterung) sicher noch verbessern liesse. Allerdings ist der Einsatz auf ähnliche Messdaten (gleiches Radarsystem/Antenne, gleiche Bauweise) beschränkt.

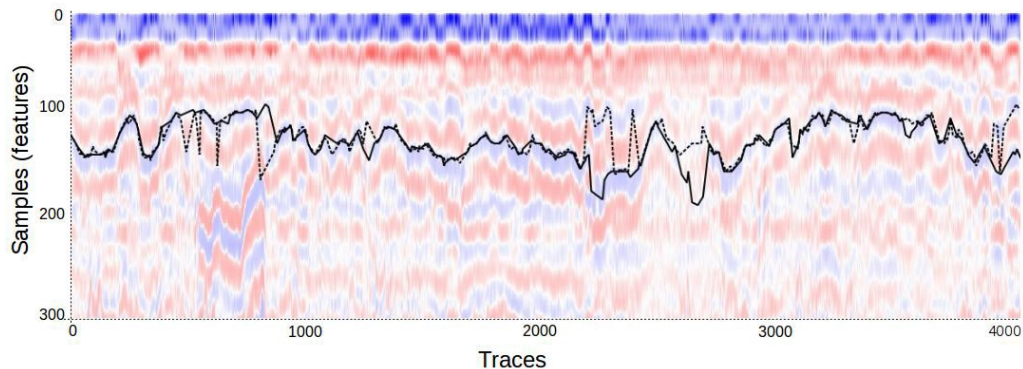


Abb. 8.125 Dickenmessung einer Asphaltschicht mit dem Radarverfahren. Durchgezogene Linien: Manuelle Interpretation. Gestrichelte Linie: Interpretation durch ein Neuronales Netzwerk [188]

Ein Schwerpunkt des Einsatzes von maschinellem Lernen für die Auswertung von Radardaten ist die Erkennung von Einlagerungen (z. B. Rohrleitungen, z. B. [185]). Einige Veröffentlichungen gehen darüber hinaus und zeigen die Segmentierung von Radardatensätzen im Hinblick auf verschiedenen Kriterien. Abb. 8.126 zeigt die Segmentierung eines Radardatensatzes mit Hilfe eines „Convolutional Neural Networks“ in Bezug auf Bereich mit ungestörtem Schichtaufbau (hier Asphalt), Einlagerungen und Schachtdeckeln.

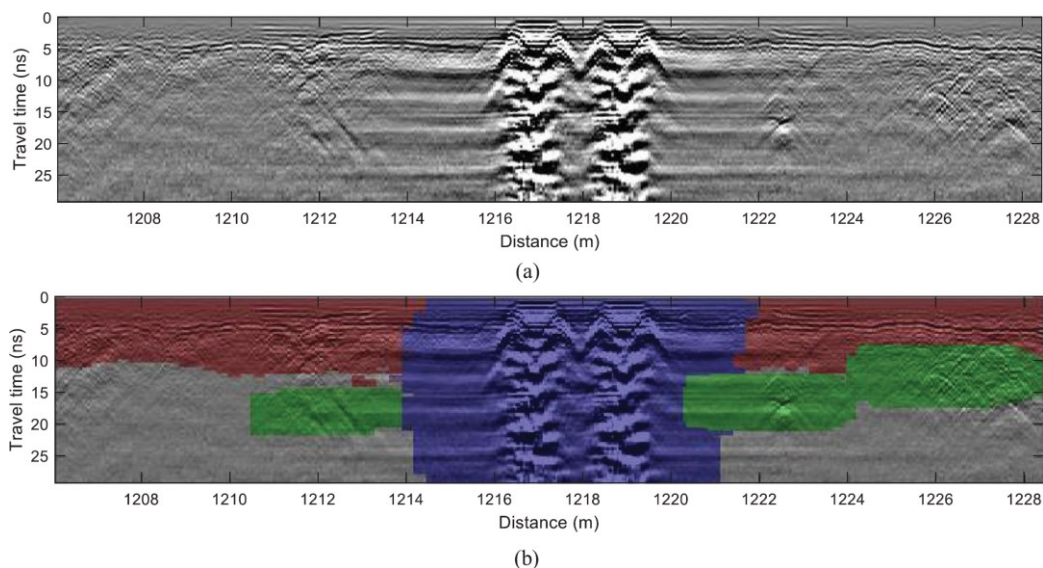


Abb. 8.126 Automatische Segmentierung einer Radarsektion (oben) mit einem Convolutional Neural Network (Ergebnis unten): Rot: Schichtgrenze, Grün: Anomalie/Einbauteil, Blau: Schachtdeckel [186]

8.7.6 Literaturverzeichnis

Sonstige Literatur / Forschungsberichte

- [185] Ishitsuka, K., Iso, S., Onishi, K., & Matsuoka, T. (2018). Object Detection in Ground-Penetrating Radar Images Using a Deep Convolutional Neural Network and Image Set Preparation by Migration. *International Journal of Geophysics*, 2018, 1–8. <https://doi.org/10.1155/2018/9365184>.
- [186] Kim, N., Kim, K., An, Y.-K., Lee, H.-J., & Lee, J.-J. (2020). Deep learning-based underground object detection for urban road pavement. *International Journal of Pavement Engineering*, 21(13), 1638–1650. <https://doi.org/10.1080/10298436.2018.1559317>

[187] Rasol, M., Pais, J. C., Pérez-Gracia, V., Solla, M., Fernandes, F. M., Fontul, S., Ayala-Cabrera, D., Schmidt, F., & Assadollahi, H. (2022). GPR monitoring for road transport infrastructure: A systematic review and machine learning insights. *Construction and Building Materials*, 324, 126686. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.126686>

[188] Sukhobok, Y. A., Verkhovtsev, L. R., & Ponomarchuk, Y. V. (2019). Automatic Evaluation of Pavement Thickness in GPR Data with Artificial Neural Networks. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 272(2), 022202. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/272/2/022202>

8.8 Einsatz von Robotern und UAVs zur zerstörungsfreien Prüfung

8.8.1 Beschrieb der Technologie

Zerstörungsfreie Prüfverfahren werden im Bereich Trasse derzeit entweder per Hand oder von PKW/leichten LKW aus durchgeführt. Aufgrund der sehr grossen Flächen wird immer wieder auch der Einsatz von Robotik und UAVs (Unmanned Aerial Vehicles, „Drohnen“) diskutiert. Im Bereich der Kunstbauten (siehe dort) wird daran wegen der oft schwierigen Zugänglichkeit von vielen Objekten systematisch geforscht und entwickelt, das Einsatzpotential ist dort hoch. Einen aktuellen Überblick gibt [189], woraus auch Abb. 8.127 und Tab. 8.31 entnommen wurden.

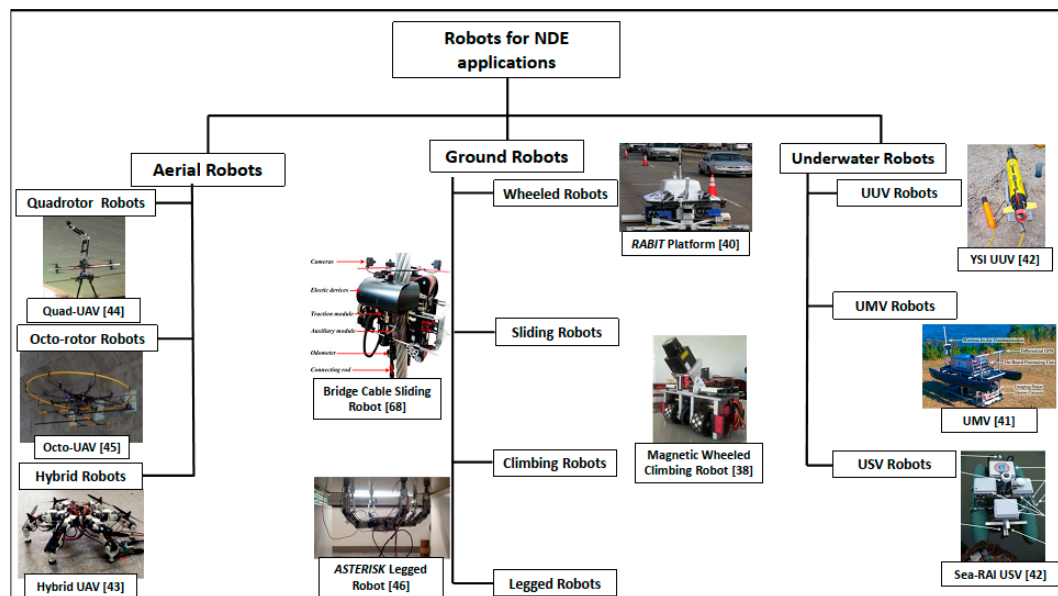


Abb. 8.127 Überblick über verschiedene Roboterplattformen für die zerstörungsfreie Prüfung im Bauwesen [189]

Die einzige bekannte Plattform, die es bisher annähernd zur Marktreife geschafft hat, ist der ursprünglich von der Rutgers Universität für die Federal Highway Agency (FHWA, USA) entwickelte RABIT [190]. Neben Einrichtungen zur visuellen Aufnahme und Navigation verfügt der RABIT über Sensorik für das Radarverfahren, akustische Verfahren (SASW, Impakt-Echo) und das elektrische Widerstandsverfahren. Das System ist primär auf die Untersuchung von Brückendecks aus Beton ausgelegt. Ursprünglicher Plan war, eine zweite Roboterplattform mit dem RABIT zu koppeln, die im Anschluss automatisiert Reparaturen ausführt. Ob dieses System jemals zur Einsatzreife kam, ist nicht bekannt. Das System ist grundsätzlich auch zur Untersuchung von Trassen geeignet, aber im Vergleich zu anderen Inspektionsfahrzeugen sehr langsam. Hier, wie auch für die anderen fahrenden Plattformen, ist eine Trassensperrung erforderlich.

Tab. 8.31 Überblick über verfügbare Roboterplattformen für die zerstörungsfreie Prüfung [190]: Wheeled: Fahrende Plattformen. Climbing: Kletternd. UAV: Fliegend. USV: Schwimmend. Die Zahlen beziehen sich auf die Literaturhinweise in der Veröffentlichung, aus der die Tabell entnommen worden ist (open access <https://dx.doi.org/10.3390/s20143954>).

Table 4. Comparison between the state-of-the-art NDE robotic platforms.

Robotic Platforms	Robot Type	NDE Sensors			
		Radar	Vision	Acoustics	Electric
RABIT [12,40,47,49,51,70,79,88,89,99]	Wheeled	1 GPR Array	1 Canon [®] Camera	IE and USW Arrays	1 ER Probe
ROCIM [51,88]	Wheeled		1 Canon [®] Camera		
ARA Lab Robot [37,50,90,91]	Wheeled	1 GPR Array	1 PrimeSense [®] Camera 1 Stereo Camera		2 ER Arrays
ETH Zurich Climbing Robot [59]	Climbing				1 Half-Cell Potential Mapper
BridgeBot [39]	Climbing		1 ArduCAM [®]		
Steel Bridge Climbing Robot [52,100,101]	Climbing		2 Cameras		1 Eddy Current Sensor
ABI Robot [56]	Climbing		1 Camera		
Caterpillar robot [58]	Climbing				
SkySweeper [71]	Climbing				
Cable Robot [57]	Sliding		4 CCD Cameras		
Cable Inspector [64,66]	Climbing		3 Cameras		
CCRobot-II [53,54,63]	Climbing				
MRC ² IN-II [68]	Sliding		1 Camera		
Quadrotor platform [81]	UAV				
Manipulator robot [44]	UAV				
Contact prism robot [84]	UAV				
Flying/walking platform [43]	Hybrid				
Octo-rotor platform [45]	UAV				
Quadrotor platform [76]	UAV		1 Camera		
Hammering platform [85]	UAV			1 IE sensor	
3D Mapper Robot [98]	UAV		1 3D LIDAR1 Camera		
DJI@Phantom [74]	UAV		1 Camera		
2D LRF Robot [77]	UAV		1 2D LRF with Mirrors		
Omni-Wheel Robot [83]	UAV		2 Cameras		
Infrared Imagery UAV [72]	UAV		1 IR camera1 RGB camera		
Underwater ROV [80]	USV		1 Camera		
Sea-RAI [41]	USV		4 Cameras		
Muddy Waters [42]	USV		1 Stereo RGB-D Camera1 ARIS@Sonar		
Videoray ROV [41]	USV		1 Camera1 Imaging Sonar		
YSI@Ecomapper [41]	USV		1 Side-Scan Sonar		

Red-shaded region shows that the specific type of NDE sensor was not incorporated in the particular robot platform developed.

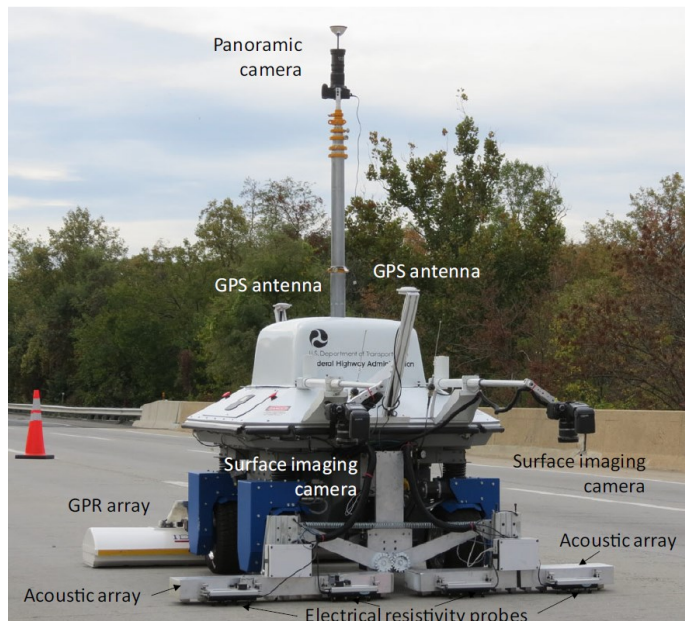


Abb. 8.128 Roboterplattform RABIT mit installierter ZfP-Sensortechnik [190]

8.8.2 Forschungsstand, Anwendungsgrenzen und Potential

Ein Überblick über den Forschungsstand findet sich in [189]. Die grundsätzliche Anwendbarkeit wurde in wissenschaftlichen Studien demonstriert. Allerdings sind alle fahrenden Plattformen bisher zu langsam, um im fahrenden Verkehr eingesetzt werden zu können. Fliegende Plattformen können aufgrund der Rechtslage ebenfalls nicht im oder über den fahrenden Verkehr eingesetzt werden. Daher ist momentan der Einsatz von konventionellen Messfahrzeugen effektiver.

Dies würde sich ändern, wenn sich das „Autonome Fahren“ mit der derzeitigen Geschwindigkeit weiterentwickelt. Auf dieser Basis liessen sich aus den momentan genutzten Fahrzeugen auch automatisch fahrende und navigierende Messfahrzeuge entwickeln, ohne dass eine komplexe Roboterplattform notwendig wäre.

8.8.3 Einsatzzweck und Fragestellung im Bereich Trasse

Grundsätzlich können alle im Report genannten zerstörungsfreien Prüfverfahren auf Roboterplattformen eingesetzt werden. Der Einsatz von UAVs beschränkt sich auf berührungsfreie Messverfahren, z. B. Radar.

Einsatzzweck und Fragestellung entspricht dem auf der Plattform eingesetzten einzelnen Messverfahren.

8.8.4 Datenerfassung, Messgrößen und Genauigkeit

Die Datenerfassung und die Messgrößen entsprechen den auf der Plattform eingesetzten Einzelmessverfahren. Die Verortung geschieht automatisch (z. B. DGPS), so dass kein signifikanter Unterschied in der Ortsgenauigkeit zu nicht automatisiertem Einsatz bestehen dürfte. Hierzu fehlen aber systematische Untersuchungen.

8.8.5 Anwendungsbeispiele, Pilotanwendungen

Das System RABIT wurde mehrfach auf Brückendecks zur Untersuchung der Fahrbahn eingesetzt. Abb. 8.129 zeigt das System im Einsatz auf der Pohatcong Brücke bei einem Validierungsversuch. Zusätzlich zu den RABIT-Messungen wurden mit der gleichen Sensorik auch manuelle Messungen durchgeführt.



Abb. 8.129 Das System RABIT auf der Pohatcong Bridge, USA [190].

Abb. 8.130 zeigt den Vergleich von manuellen Messungen mit denen des Systems RABIT. Qualitativ sind die Bilder für die beiden Messgrößen vergleichbar. Im Detail ergeben sich Unterschiede. So erscheinen die Bilder der RABIT-Messungen etwas mehr verrauscht. Dafür wurden sie um ein Mehrfaches schneller aufgenommen.

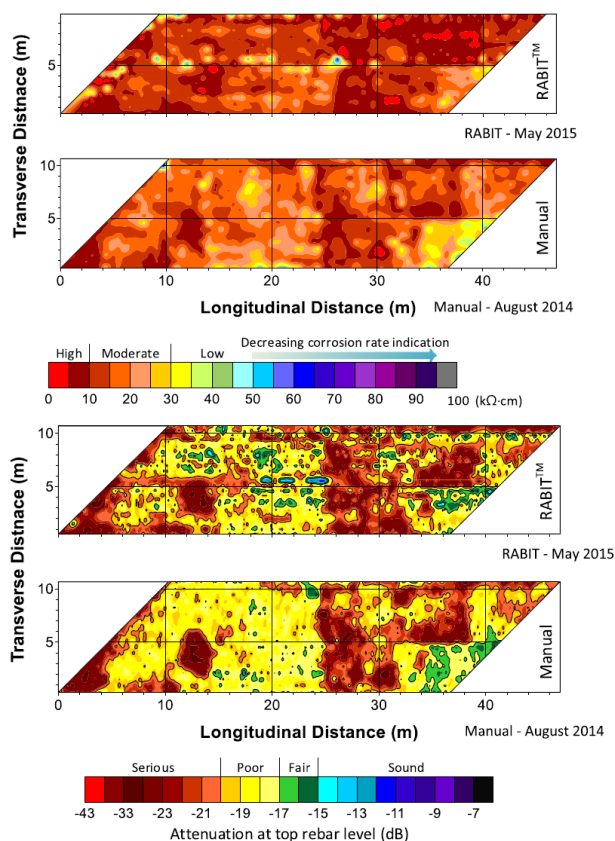


Abb. 8.130 Vergleich von mit RABIT erzielten Ergebnisse mit denen manueller Messungen auf der Pohatcong Bridge, USA [190]. Oben: Elektrische Widerstandsmessungen als Indikator für das Korrosionsrisiko. Unten Radarmessungen, hier Dämpfungswerte für das Echo von Bewehrungsstäben (ebenfalls Korrosionsindikator)

8.8.6 Literaturverzeichnis

Sonstige Literatur / Forschungsberichte

- [189] Ahmed, H., La, H. M., & Gucunski, N. (2020). Review of Non-Destructive Civil Infrastructure Evaluation for Bridges: State-of-the-Art Robotic Platforms, Sensors and Algorithms. *Sensors*, 20(14), 3954. <https://doi.org/10.3390/s20143954>
- [190] Gucunski, N., Basily, B., Kim, J., Yi, J., Duong, T., Dinh, K., Kee, S.-H., & Maher, A. (2017). RABIT: Implementation, performance validation and integration with other robotic platforms for improved management of bridge decks. *International Journal of Intelligent Robotics and Applications*, 1(3), 271–286. <https://doi.org/10.1007/s41315-017-0027-5>

9 Technologiebewertung

9.1 Relevante Gefährdungen im Teilsystem

Die Beurteilung einer relevanten Gefährdung im Teilsystem Trasse ergibt sich aus den grundlegenden Anforderungen hinsichtlich Sicherheit, Befahrbarkeit, Substanzerhaltung und Umwelt. Vorab ist für das Teilsystem Trasse anzumerken, dass sich eine Gefährdung für Leib und Leben – anders als bei den weiteren Teilsystemen – im Wesentlichen aus einer Gefährdung, nämlich einem nicht hinreichenden Kontakt zwischen Fahrbahn und Fahrzeug infolge Mängeln bzw. Schäden am Oberflächenzustand, ergibt. Exemplarisch ist hier eine mangelnde Fahrbahngriffigkeit einhergehend mit Aquaplaning genannt. Weiterhin können ebenfalls Einschränkungen im lichten Raum des Trassees zu erheblichen Gefährdungen für den Verkehrsteilnehmer führen. Schäden innerhalb der Konstruktion, z.B. Risse, mangelnde Verdichtung der Schichten ohne Bindemittel oder eine falsche Dübellage führen – wenn überhaupt – zu einer sekundären Gefährdung für den Verkehrsteilnehmer, die sich im Verlauf der Belastung wiederum an der Fahrbanoberfläche zeigt, und insofern hier nicht gesondert beschrieben wird. Unter einer sekundären Gefährdung wird vorliegend bspw. eine mangelnde Verdichtung der Schichten ohne Bindemittel angeführt, welche zu Setzungen der Fahrbahn und somit zu den Anforderungen hinsichtlich der Nutzung Längsunebenheiten führen kann.

Schäden an den Entwässerungseinrichtungen werden vorliegend nicht betrachtet.

9.1.1 Gefährdungen

Nachfolgende Abbildung zeigt die Gefährdungen einhergehend mit dem Einsatzzweck beziehungsweise auf die allgemeinen Anforderungen an das Teilsystem Trasse. Dies sind im Wesentlichen die Sicherheit, die Befahrbarkeit, die Substanz sowie die Umwelt. Ergänzend zur Gefährdung wird der Einsatzzweck einer Technologie angeführt, bspw. Sind dies bei der Fahrbahngriffigkeit die Rauheit und die Textur.

Massenbewegungen wie Steinschlag, Lawinen, Rutschungen etc. stellen für den Bereich des Trassees insbesondere in der Betriebsphase für den Strassennutzer eine grosse Gefährdung dar. Insofern ist es erforderlich, dass mögliche Massenbewegungen erkannt und überwacht werden. Während dem Bau und dem Betrieb kann eine Überwachung möglicher Massenbewegungen mittels geeigneter Messtechnik erfolgen, welche häufig auch direkt in ein Alarmierungssystem eingebunden ist. An dieser Stelle wird hinsichtlich der Gefährdung durch Massenbewegungen auf den Bereich «Tunnel» verwiesen.

	Gefährdung	Einsatzzweck
Sicherheit	Griffigkeit (mangelnde)	Rauheit [Reibwert μ]
		Textur [Rt in mm]
	Sichtbarkeit	Fahrbahnmark. / Reflexion [mcd/lx]
		Helligkeit
	Durchfahrtshöhe	Lichttraumprofil / Höhe [m]
Befahrbarkeit	Befahrbarkeit / Fahrkomfort (kurzwellig)	Längsebenheit (kurzwellig)
	Befahrbarkeit / Sicherheit / Tragfähigkeit SoB (langwellig)	Längsebenheit (langwellig)
	Verdrückung / Spurrinne	Querebenheit / Spurrinne in mm
	Aquaplaning	Querneigung [%]
Substanz	Oberflächenschäden (Risse, etc.)	Substanzmerkmale Oberfläche
	Dübellage	Einbauteile (Lage, Größe)
	mangelnde Tragfähigkeit / Verformung	Schichtdicken [mm] und -parameter (Dichte/ E-Modul etc).
		Anomalien im Material (Qualitativ/Quantitativ)
		Tragfähigkeit [Deflektion in μm]
		Achslast [kg]
Umwelt	Gesundheit	Lärmmessung [dB(A)]

Abb. 9.131 Übersicht Gefährdung und Einsatzzweck, Teilsystem Trassen

Sicherheit

Eine wesentliche Bedeutung hinsichtlich des Gefährdungspotentials für den Verkehrsteilnehmer stellt die vorhandene Griffigkeit der Fahrbahn und der Fahrbahnmarkierung dar, welche sich aus der Rauheit und der Textur der jeweiligen Oberfläche ergibt. Ergänzend zur Griffigkeit ist die Sichtbarkeit der Fahrbahnoberfläche und der Markierung ein wichtiger Parameter. Für die Fahrbahnoberfläche ist dies die Helligkeit, für die Markierung die Reflexionseigenschaften. Die Durchfahrtshöhe spiegelt sich durch das Lichttraumprofil wider.

Befahrbarkeit

Die Befahrbarkeit bzw. der Fahrkomfort einhergehend mit Verdrückungen bzw. Spurrinnen werden über die Längs- und Querebenheit bewertet. Hinsichtlich der Längsebenheit wird zwischen kurzweiliger und langweiliger Unebenheit unterschieden, welche einen differenten Einfluss auf den Fahrkomfort (kurzweilig) und die Sicherheit bzw. Tragfähigkeit der ungebundenen Schichten (langweilig) haben können.

Aquaplaning, ein wichtiges Kriterium hinsichtlich Sicherheit und Befahrbarkeit, ergibt sich aus der kombinierten Betrachtung der Gefährdungspotentiale „Verdrückung“ und/oder „Spurrinne“ einhergehend mit einer entsprechend geringen Querneigung.

Substanz

Mängel an dem Befestigungsaufbau einer Verkehrsfläche stellen zunächst keine mittelbare Gefährdung für den Verkehrsteilnehmer dar. Im Verlauf einer zunehmenden Schädigung können allerdings durch Oberflächenschäden wie bspw. Netzzrisse oder Ausbrüche entstehen, die im Weiteren zu einer mittelbaren Gefährdung für den Verkehrsteilnehmer führen. Zu den Gefährdungen, die sich aus der Substanz des Strassenaufbaus ergeben können, zählen Oberflächenschäden und eine mangelnde Tragfähigkeit / Verformung

sämtlicher im Aufbau vorkommender ungebundener und gebundener Schichten. Die Dübellage bei Betonfahrbahnen wird als nicht mittelbare Gefährdung angesehen, zumal der Betondeckenbau auf den Nationalstrassen der Schweiz eine untergeordnete Rolle spielt. Schräg liegende Dübel können Zugspannungen in der Betondecke hervorrufen, die einhergehend mit entsprechenden Beanspruchungen aus Verkehr und Temperatur zu Schäden an der Konstruktion führen können. Diese Schäden werden aber wiederum durch das Oberflächenbild bei Eintreten des Schadensbildes erkannt.

Umwelt

Verkehrsflächen führen mit ihrem Flächenverbrauch sowie die durch den Verkehr entstehenden Emissionen zu einer sehr hohen Gefährdung für den Menschen. In vorliegendem Fall sind dies Lärmemissionen, die gemäss unterschiedlicher Studien bis hin zum Herzinfarkt führen können.

9.1.2 Robustheit

Grundlage der Klassifizierung der Robustheit beim Teilsystem Trasse ist die Einteilung eines Streckenabschnittes in homogene Abschnitte unter Berücksichtigung des vorhandenen Aufbaus und weiterer Rahmenbedingungen aus der örtlichen Lage. Hierzu zählen z.B.:

- Bauweise (Asphalt, Pflaster, Beton)
- Verkehrsmenge (DTV)
- Umfeld: Anschnitt, Einschnitt, Damm
- Linienführung: Gefälle, Steigungen bzw. Längsneigungen $< \pm 2\%$

Grundsätzlich können weitere Parameter in die Bildung homogener Abschnitte einfließen, bspw. die Untergrundverhältnisse, unterschiedliche Einbauzeitpunkte in den Schichten etc. Dies führt in der Regel allerdings zu einem zu grossen Detaillierungsgrad. Die typische Länge von homogenen Abschnitten im PMS beträgt ca. 500 m bis 8,0 km. Darunter werden vorwiegend punktuelle Schäden verstanden, längere Abschnitte werden als „Netzlänge“ bezeichnet.

Das Teilsystem Trasse wird hinsichtlich der Klassifizierung der Robustheit unter Berücksichtigung der Gefährdung hinsichtlich der Örtlichkeit differenziert:

- Freie Strecke, Ausserorts
- Knotenpunkte
- Passstrasse
- Innerorts.

Aufbauend auf dieser generellen Unterteilung ergibt sich die Klassifizierung der Robustheit unter Betrachtung der Gefährdung, bspw. Unebenheiten (kurzweilig) auf einer Passstrasse. Dort wäre dann die Gefährdung für den Verkehrsteilnehmer, insbesondere Zweiradfahrern, hoch.

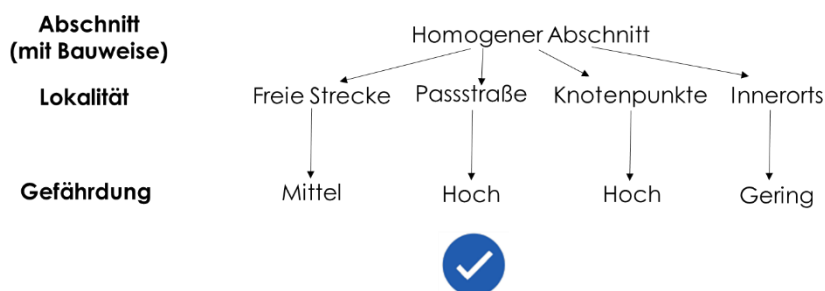


Abb. 9.132 Klassifizierung der Robustheit, Teilsystem Trassen

Kategorie	Netzbelastung	DTV
1	Gering	< 30.000
2	Mittel	30.000 bis 70.000
3	Hoch	> 70.000

Abb. 9.136 Kategorien Netzbezug

Eine abschliessende Bewertung Netzbezug/Umgebung erfolgt über eine Kreuzklassifizierung entsprechend nachfolgender Darstellung:

Kategorie	Netzbelastung	DTV	Ausweichroute		
			Umgebung	Lokal	Regional
Kategorie	Netzbelastung	DTV		1	2
				Gering	Mittel
1	Gering	< 30.000	1	2	3
2	Mittel	30.000 bis 70.000	2	4	6
3	Hoch	> 70.000	3	6	9

Abb. 9.137 Bewertung Netzbezug / Umwelt

Zur abschliessenden Bewertung der Kritikalität erfolgt eine Kreuzklassifizierung aus Netzbezug und Umgebung wie folgt:

Robustheit			Kritikalität		
			1	2	3
1	Gering				
2	Mittel				
3	Hoch				
			Gering	Mittel	Hoch
			1 oder 2	3 oder 4	6 oder 9
			Konsequenzen des Versagens		

Abb. 9.138 Bewertung der Kritikalität

Ein wesentlicher Aspekt im gesamten Bewertungsablauf stellt die Zuverlässigkeit des Indikators und die Zuverlässigkeit der Technologie dar. Über die Zuverlässigkeit des Indikators kann eine Technologie im Bewertungsablauf ausgeschlossen werden, da diese bspw. die Längsebenheit erfassen kann (z.B. 4 m-Latte), mit dieser allerdings kein Höhenlängsprofil und somit keine Bewertung von kurz- oder langwelligen Unebenheiten möglich ist. Die Aussagekraft eines Indikators wird wie folgt klassifiziert:

Zuverlässigkeit ZV 2

Kategorie	Aussagekraft Indikator für Gefährdung
0	keine
1	klein
2	mittel
3	gross

Abb. 9.139 Bewertung Aussagekraft eines Indikators

Ergänzend wird die Zuverlässigkeit einer Technologie wie folgt bewertet:

Zuverlässigkeit ZV 1

Kategorie	Technologieakzeptanz
1	Forschung notwendig
2	Pilotprojekt notwendig
3	im Einsatz

Abb. 9.140 Bewertung Aussagekraft einer Technologie

Ergänzend muss der zusätzliche Nutzen einer Technologie erfasst werden. Dieser erstreckt sich von «kein zusätzlicher Nutzen» (1) bis «sehr grosser zusätzlicher Nutzen» (5).

9.2.2 Beispiel

Als Beispiel dient ein fiktiver Streckenabschnitt mit folgenden Objektkennndaten:

- Nationalstrasse: N1
- Tragfähigkeit: T4
- DTV: 40.000 Fz/d
- Ausweichroute: Regionale Umfahrung gegeben
- Bauloslänge (homogener Abschnitt): 7 km
- Fahrbahn mit 2 Richtungsfahrstreifen
- Asphaltbauweise

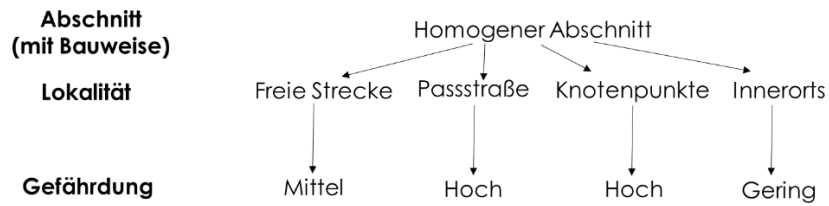
Als Gefährdung wurde kurzweilige Unebenheiten, die periodisch auftreten, festgestellt. Die Gefährdung betrifft demnach die Befahrbarkeit / Fahrkomfort.

Die Robustheit wurde, basierend auf den o.g. Objektdaten, wie folgt bewertet:

- Strassentyp: N1, Freie Strecke in Asphaltbauweise
- Grösse = 7 km (Kategorie 2)

Kategorie	Grösse	Bezug [km]	Erläuterung
1	Klein	< 0.5	punktuelter Schaden
2	Mittel	0.5 bis < 8.0	homogener Abschnitt
3	Gross	≥ 8	Netzlänge

- Robustheit = Mittel (Kategorie 2)



Kategorie	Robustheit in Abhängigkeit der Gefährdung
1	Gering
2	Mittel
3	Hoch

- Kritikalität, Teil Trasse = $2 \times 2 = 4$

Ergänzend erfolgt eine Bewertung des Netzbezuges / Umfeld wie folgt:

- Netzbelastung: DTV ca. 40.000 Fz/d
- Ausweichroute: Regional
- Bewertung „Konsequenz“ Trasse: $2 \times 2 = 4$

Kategorie	Netzbelastung	DTV	Ausweichroute		
			Umgebung	Lokal	Grossräumig
1	Gering	< 30.000	1 Gering	2 Mittel	3 Hoch
2	Mittel	30.000 bis 70.000	1 Gering	2 Mittel	3 Hoch
3	Hoch	> 70.000	1 Gering	2 Mittel	3 Hoch

Die Kritikalität für den Streckenabschnitt ergibt sich zusammengefasst wie folgt:

- Bewertung Robustheit Trasse: $2 \times 2 = 4$
- Bewertung „Konsequenz“ Trasse: $2 \times 2 = 4$
- Kritikalität = $4 \times 4 = 16$

Robustheit	Kritikalität		
	Gering	Mittel	Hoch
Gering			
Mittel		x	
Hoch			
Konsequenzen des Versagens			

Generell können als Technologien gemäss der entsprechenden Tabelle die Richtlatte, der Planograf, der Goniograf, das Laserscanning sowie die Triangulationssensoren zur Anwendung kommen. Sämtliche Technologien sind im Einsatz, ein Technisches Regelwerk steht zur Verfügung. Allerdings kann weder mit der Richtlatte noch mit dem Planograf ein Höhenlängsprofil ermittelt werden, so dass kurzweilige Unebenheiten nicht berechnet werden können. Die Aussagekraft des Indikators ist gleich „Null“.

Nachfolgende Tabelle zeigt übersichtlich die Bewertung der einzelnen Technologien in Abhängigkeit der Gefährdung. Die objektbezogenen Kosten ergeben sich aus den in Kapitel 7 aufgeführten Kosten für zwei unterschiedliche Messszenarien. Die unter der Spalte Kosten aufgeführten Kategorien beziehen sich auf eine punktuelle Messung mit einer Länge von 400 Metern, während sich die Kosten für das zusätzliche Ausmass auf ein Messszenario mit einer Länge von 10 km beziehen.

	Kritikalität		Objektbezogener Nutzen								Objektbezogene Kosten			
			Zuverlässigkeit Technologie	Aussagekraft Indikator		Zusätzlicher Nutzen		Resultierende Bewertung objektbezogenen Nutzen				Kosten		Kosten zusätzliches Ausmass
	untere Grenze	obere Grenze						untere Grenze	Zusätzlicher Nutzen (Ausmass)	obere Grenze	Zusätzlicher Nutzen (Ausmass)			
Richtlatte (4m Latte)	1	3	3 im Einsatz	0	keine	0	keiner	0	0	0	0	1,00	Sehr Klein	2,25 Klein
Planograf	1	3	3 im Einsatz	0	keine	0	keiner	0	0	0	0	1,00	Sehr Klein	3,00 Mittel
Goniograph	1	3	3 im Einsatz	1	klein	0	keiner	3	3	9	9	1,00	Sehr Klein	3,00 Mittel
Triangulationssensoren	1	3	3 im Einsatz	3	groß	3	mittel	9	12	27	30	1,25	Sehr Klein	3,50 Mittel
Laserscanner	1	3	3 im Einsatz	3	groß	5	groß	9	14	27	32	1,50	Sehr Klein	5,00 Sehr Gross

Abb. 9.141 Bewertung von Technologien in Abhängigkeit der Gefährdung „kurzweilige Unebenheiten“

Daraus kann gefolgert werden, dass in Anbetracht der definierten Gefährdung der Einsatz von Triangulationssensoren bzw. Laserscanner den grössten Nutzen hervorbringt. Dies ist übersichtlich in nachfolgender Abbildung dargestellt.

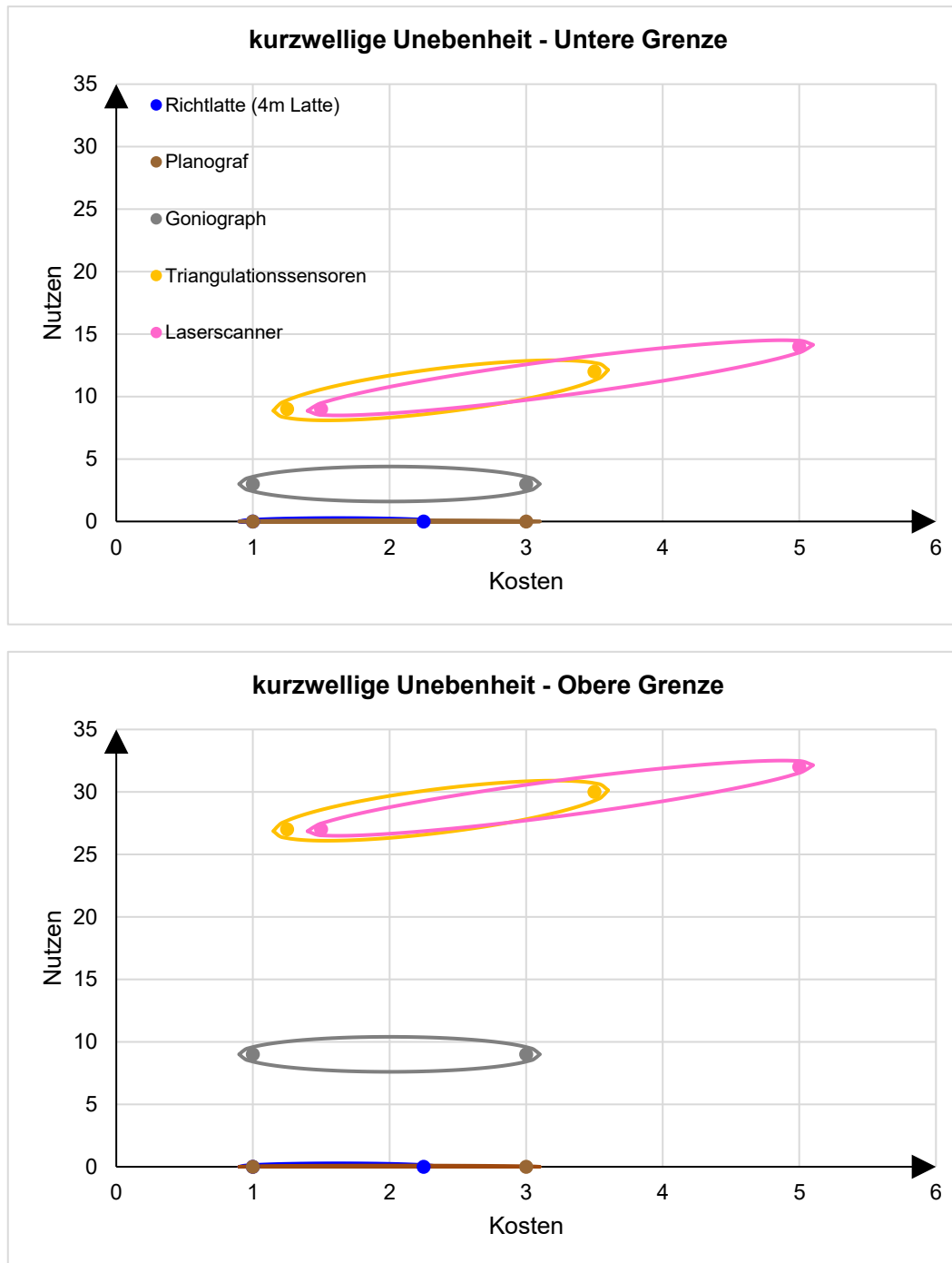


Abb. 9.142 Darstellung der Kosten/Nutzen-Diagramme (Untere – und obere Grenze) der Erfassungstechnologien für die Gefährdung „kurzwellige Unebenheiten“

Der oben genannte fiktive Streckenabschnitt auf der N1 dient als Grundlage weiterer Beispiele, die nachfolgend lediglich anhand der beschriebenen Gefährdung variiert werden.

Für die Gefährdung Fahrkomfort: «Langwellige Unebenheiten und Spurrinnen, Aquaplaning» ergibt sich das in der folgenden Tabelle Dargestellte Nutzen/Kosten Verhältnis.

	Kritikalität		Objektbezogener Nutzen									Objektbezogene Kosten				
			Zuverlässigkeit Technologie	Aussagekraft Indikator		Zusätzlicher Nutzen		Resultierende Bewertung objektbezogenen Nutzen				Kosten		Kosten zusätzliches Ausmass		
	untere Grenze	Zusätzlicher Nutzen (Ausmass)						obere Grenze	Zusätzlicher Nutzen (Ausmass)							
Richtlatte (4m Latte)	1	3	3	im Einsatz	0	keine	0	keiner	0	0	0	0	1,00	Sehr Klein	2,25	Klein
Planograf	1	3	3	im Einsatz	0	keine	0	keiner	0	0	0	0	1,25	Sehr Klein	3,00	Mittel
Goniograph	1	3	3	im Einsatz	0	keine	0	keiner	0	0	0	0	1,25	Sehr Klein	3,00	Mittel
Triangulationssensoren	1	3	3	im Einsatz	0	keine	0	keiner	0	0	0	0	1,50	Sehr Klein	2,00	Klein
Laserscanner	1	3	3	im Einsatz	3	groß	5	groß	9	14	27	32	1,50	Sehr Klein	5,00	Sehr Gross
Lichtschnittverfahren	1	3	3	im Einsatz	0	keine	0	keiner	0	0	0	0	1,50	Sehr Klein	5,00	Sehr Gross

Abb. 9.143 Bewertung von Technologien in Abhängigkeit der Gefährdung „Langwellige Unebenheiten und Spurrinnen, Aquaplaning“

Der Sachverhalt ist in der folgenden Grafik noch einmal getrennt für die Obere und die untere Grenze dargestellt.

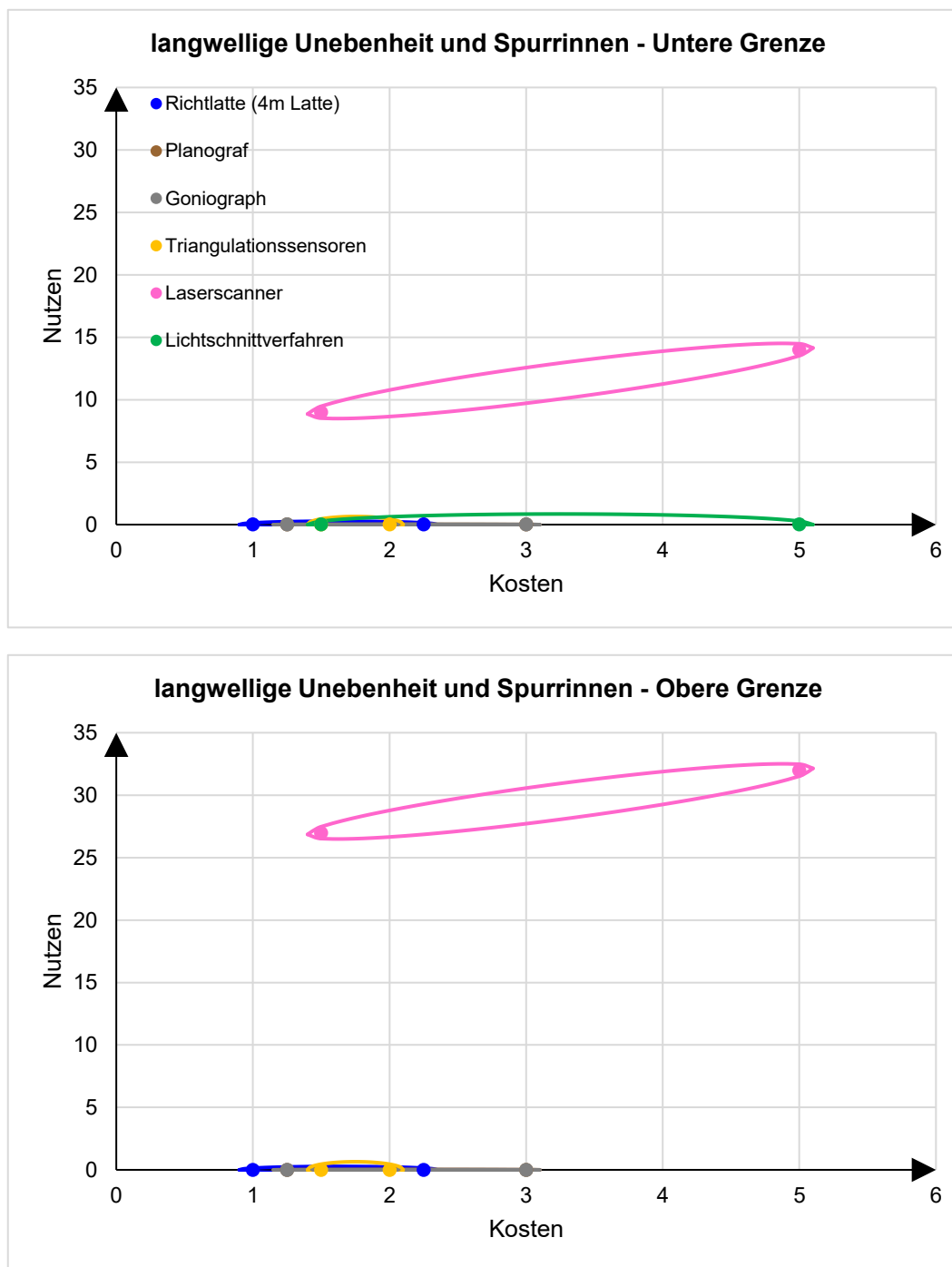


Abb. 9.144 Darstellung der Kosten/Nutzen- Diagramme (Untere – und obere Grenze) der Erfassungstechnologien für die Gefährdung „Langwellige Unebenheiten und Spurrinnen, Aquaplaning“

Für die Gefährdung «mangelnde Griffbarkeit» kommen potentiell die in der folgenden Tabelle aufgelisteten Technologien in Frage.

	Kritikalität		Objektbezogener Nutzen										Objektbezogene Kosten			
			Zuverlässigkeit Technologie	Aussagekraft Indikator		Zusätzlicher Nutzen		Resultierende Bewertung objektbezogenen Nutzen				Kosten		Kosten zusätzliches Ausmass		
	untere Grenze	Zusätzlicher Nutzen (Ausmass)						obere Grenze	Zusätzlicher Nutzen (Ausmass)							
Pendelgerät	1	3	3	im Einsatz	3	groß	0	keiner	9	9	27	27	1,00	Sehr Klein	5,00	Sehr Gross
Seitenkraftmessverfahren	1	3	3	im Einsatz	3	groß	0	keiner	9	9	27	27	1,00	Sehr Klein	2,00	Klein
definiert blockiertes Rad	1	3	3	im Einsatz	3	groß	0	keiner	9	9	27	27	1,00	Sehr Klein	1,75	Sehr Klein
definiert gebremstes Rad	1	3	3	im Einsatz	3	groß	0	keiner	9	9	27	27	1,00	Sehr Klein	1,75	Sehr Klein

Abb. 9.145 Bewertung von Technologien in Abhängigkeit der Gefährdung „mangelnde Griffigkeit“

Der Sachverhalt ist in der folgenden Grafik noch einmal getrennt für die obere und die untere Grenze dargestellt.

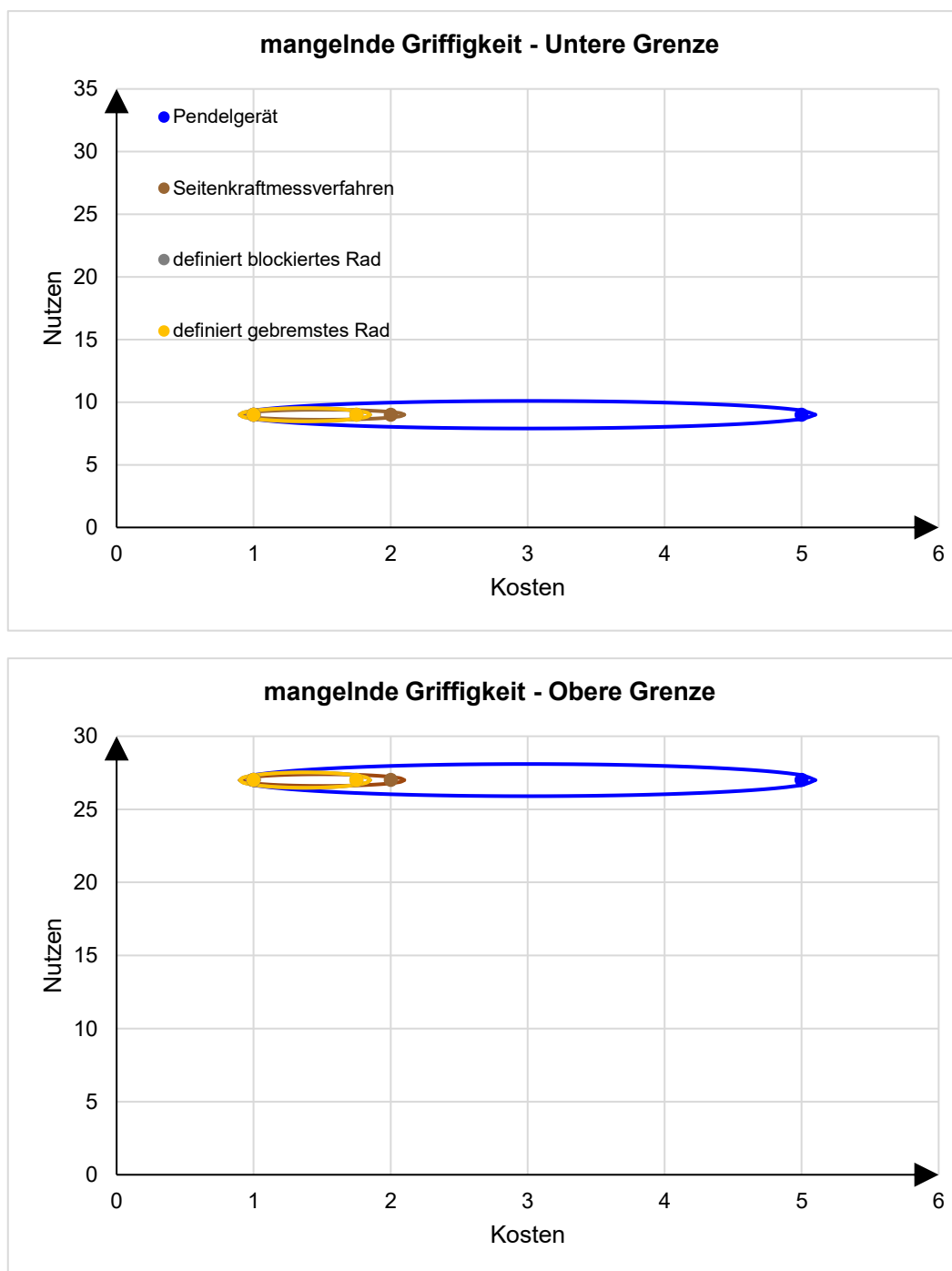


Abb. 9.146 Darstellung der Kosten/Nutzen- Diagramme (Untere – und obere Grenze) der Erfassungstechnologien für die Gefährdung „mangelnde Griffigkeit“

Bei der Betrachtung der Gefährdung Substanzmerkmale ergibt sich wiederum die folgende Tabelle.

	Kritikalität		Objektbezogener Nutzen										Objektbezogen		
			Zuverlässigkeit Technologie	Aussagekraft Indikator		Zusätzlicher Nutzen		Resultierende Bewertung objektbezognenen Nutzen				Kosten			
	untere Grenze	obere Grenze						untere Grenze	Zusätzlicher Nutzen (Ausmass)	obere Grenze	Zusätzlicher Nutzen (Ausmass)				
visuell	1	3	3 im Einsatz	1	klein	0	keiner	3	3	9	9	1,00	Sehr Klein	5,0	
Photogrammetrie	1	3	3 im Einsatz	3	groß	1	sehr klein	9	10	27	28	1,25	Sehr Klein	3,0	
Laserscanner	1	3	3 im Einsatz	2	mittel	3	mittel	6	9	18	21	1,25	Sehr Klein	3,0	
Lichtschnittverfahren	1	3	3 im Einsatz	2	mittel	2	klein	6	8	18	20	1,25	Sehr Klein	3,0	

Abb. 9.147 Bewertung von Technologien in Abhängigkeit der Gefährdung „Substanzmerkmale“

Der Sachverhalt ist in der folgenden Grafik noch einmal getrennt für die obere und die untere Grenze dargestellt.

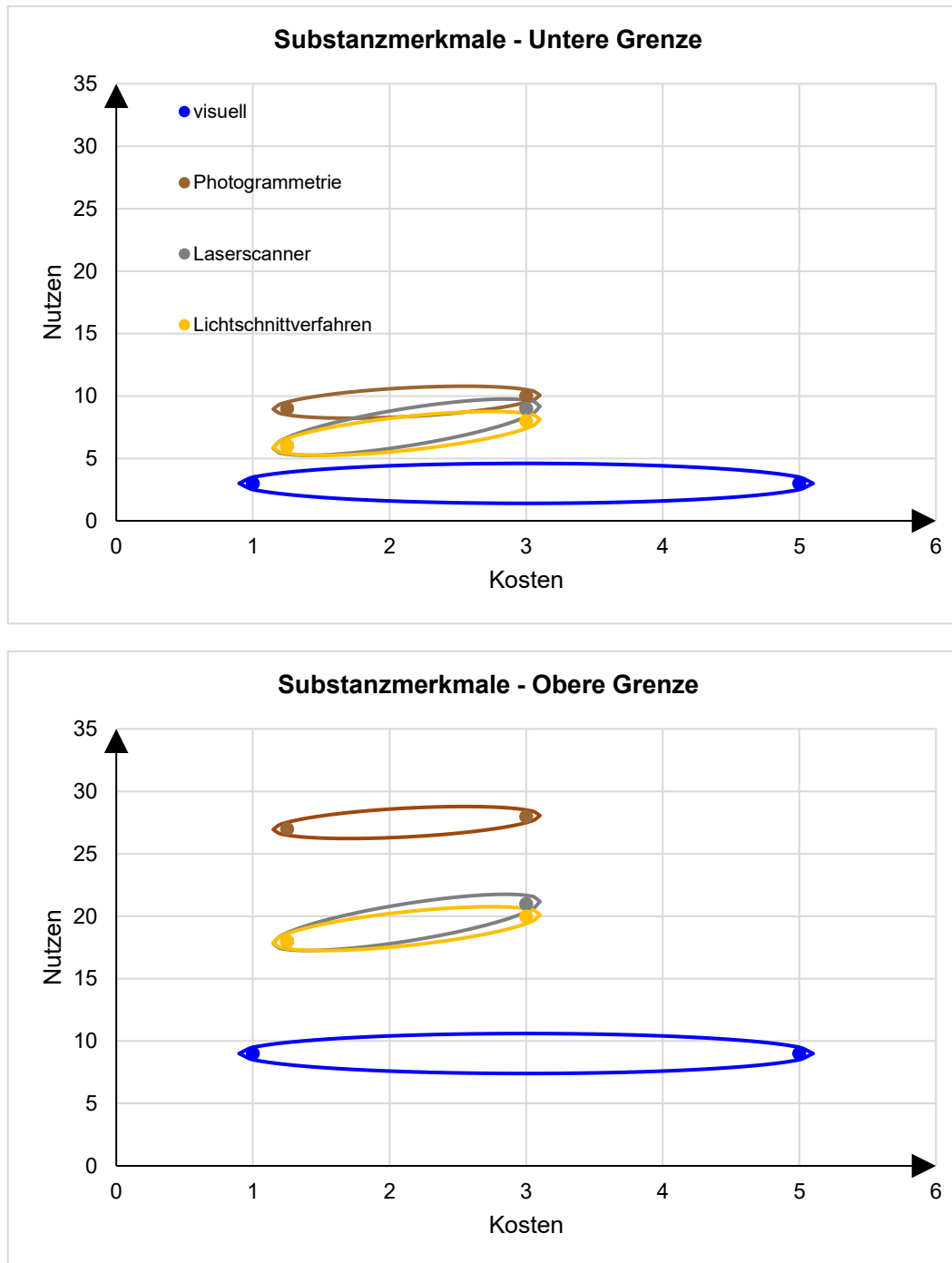


Abb. 9.148 Darstellung der Kosten/Nutzen- Diagramme (Untere – und obere Grenze) der Erfassungstechnologien für die Gefährdung „Substanzmerkmale“

9.3 Erstellen und Bewertung von Überwachungskonzepten

9.3.1 Erstellung eines Überwachungskonzepts

Analog der Vorgehensweise und Systematik in vielen europäischen Ländern und auch auf internationaler Ebene erfolgt auch in der Schweiz auf dem im Rahmen des Projektes zu betrachtenden Nationalstrassennetzes eine regelmässige und kontinuierliche Erfassung des Zustandes der Fahrbahnen, welches im Weiteren die Grundlage der systematischen Strassenerhaltung (Pavement Management System) darstellt. Allerdings gibt es in der

Schweiz, anders als beispielsweise in der Bundesrepublik Deutschland, keine einheitlich definierte Anforderung an die Erfassung bzw. die einzusetzende Sensorik einhergehend mit einer Standardisierung. Es wird, in Anlehnung an vorliegenden Projektergebnisse empfohlen, dies im Sinne eines hohen Qualitätsstandards einzuführen.

Im Wesentlichen bezieht sich das bisherige Überwachungskonzept für Schweizer Nationalstrassen – analog vieler anderer Länder – auf den Oberflächenzustand der Fahrbahn. Allerdings können durch diese Systematik nicht alle der oben definierten Gefährdungen wie Sicherheit, Befahrbarkeit, Substanz sowie Umwelt unmittelbar erfasst werden, sondern teilweise nur indirekt bzw. durch weitergehende Untersuchungen. Eben hier greift das nachfolgend erläuterte Überwachungskonzept.

Das nachfolgend erläuterte Überwachungskonzept sieht 3 Alternativen vor, wobei die Möglichkeiten 2 und 3 weiteren Entwicklungs- bzw. Forschungsbedarf beinhalten. Abb. 9.149 zeigt eine Übersicht, welche Gefährdungspotentiale durch die unterschiedlichen Alternativen abgedeckt werden können. Generell lässt sich die Gefährdung Gesundheit („Lärm“) durch die 3 Alternativen nicht erfassen. Allerdings liegt in der Schweiz eine Lärmkartierung vor, die generell die Grundlage von spezifischen weiteren Untersuchen ist und im Übrigen diese Systematik bereits praktiziert wird. Insofern wird diese Gefährdung vorliegend nicht weiter berücksichtigt.

Abb. 9.149 zeigt eine Übersicht der Gefährdungen ergänzt durch die 3 Überwachungskonzepte. Die Spalten der Überwachungskonzepte zeigen auf, welche Gefährdungen bzw. Parameter dem jeweiligen Stand entsprechen bzw. nach erfolgreicher Entwicklung bzw. Forschung entsprechen sollten (Ist) bzw. welche Parameter durch weiteren Einsatz von Technologien zu erfassen wären (möglich).

Vorab wird angemerkt, dass die Erfassung von Achslastdaten immer gesondert zu den hier vorgestellten Überwachungskonzepten erfolgen muss.

	Gefährdung	Einsatzzweck	ÜK 1		ÜK 2		ÜK 3	
			Ist	möglich	Ist	möglich	Ist	möglich
Sicherheit	Griffigkeit (mangelnde)	Rauheit [Reibwert μ]	✓		✓		✓	✓
		Textur [Rt in mm]	✓		✓			✓
	Sichtbarkeit	Fahrbahnmark. / Reflexion [mcd/lx]	✓		✓			
		Helligkeit		✓		✓		
	Durchfahrthöhe	Lichttraumprofil / Höhe [m]		✓	✓			
Befahrbarkeit	Befahrbarkeit / Fahrkomfort (kurzwellig)	Längsebenheit (kurzwellig)	✓		✓		✓	✓
	Befahrbarkeit / Sicherheit / Tragfähigkeit SoB (langwellig)	Längsebenheit (langwellig)	✓		✓			✓
	Verdrückung / Spurrinne	Querebenheit / Spurrinne in mm	✓		✓			✓
	Aquaplaning	Querneigung [%]	✓		✓			✓
Substanz	Oberflächenschäden (Risse, etc.)	Substanzmerkmale Oberfläche	✓		✓			✓
	Dübellage	Einbauteile (Lage, Größe)		✓	✓			✓
		Schichtdicken [mm] und -parameter (Dichte/ E-Modul etc.)		✓	✓			✓
	mangelnde Tragfähigkeit / Verformung	Anomalien im Material (Qualitativ/Quantitativ)		✓	✓			✓
		Tragfähigkeit [Deflektion in μm]		✓	✓			✓
		Achslast [kg]		✓		✓		✓

Abb. 9.149 Übersicht der Gefährdungen in Abgleich mit den Überwachungskonzepten 1 bis 3“

Das **Überwachungskonzept 1 (ÜK 1)** sieht eine Erweiterung des bisherigen Überwachungskonzeptes durch weitere – hier beschriebene – Überwachungsmöglichkeiten vor: Grundlage der Überwachung ist eine turnusmässige Zustandserfassung mit multifunktionalem Messsystem in einem Rhythmus von 4 oder 5 Jahren, wie es bislang praktiziert wird. Ein geeignetes Messverfahren ist bspw. das LCMS-System. Im Zuge der Messung erfolgt eine Erfassung der Längs- und Querebenheit (einschliesslich Querneigung), der Textureigenschaften und der Substanzmerkmale Oberfläche einhergehend mit einer automatisierten Zustandsbewertung. In der Regel wird der Strassenraum durch zumindest eine Frontkamera, ggf. noch Seiten- und Rückkameras erfasst. Eine ergänzende Erfassung des Strassenraums in 360° wird an dieser Stelle

dringend empfohlen, um bereits allein durch die Photogrammetrie Einschätzungen zu möglichen Naturgefahren (z.B. Hangrutschungen) treffen zu können.

Durch eine manuelle, teilautomatisierte oder vollautomatisierte Datenauswertung können den bereits bekannten Parametern (Ist) auch Hinweise zu Mängeln oder Schäden generiert werden und dort – entsprechend dem Bewertungsschema – gezielt weitere Untersuchungen mit entsprechender Technologie durchgeführt werden. Exemplarisch sei hinsichtlich der Gefährdung „Sicherheit“ die Durchfahrthöhe / Lichtraumprofil genannt. Anhand der – idealer Weise kalibrierten - Frontbilder lassen sich Bereiche erkennen, bei denen das Lichtraumprofil durch bspw. starken Bewuchs nicht eingehalten ist. Einhergehend mit der Anwendung des Bewertungsschemas und der Auswahl der infrage kommenden Technologien (z.B. Tachymetrie, Laserscanning) kann das Lichtraumprofil erfasst und bewertet werden.

Das **Überwachungskonzept 2 (ÜK 2)** sieht die Entwicklung bzw. den Aufbau eines multifunktionalen Messsystems vor, wie es bspw. bereits in den Niederlanden, Österreich (AIT) oder Deutschland (BAST) zum Einsatz kommt. An einen grossen LKW werden die einzelnen Komponenten (z.B. an das TSD als Trägerfahrzeug werden ein Georadar, ein System zur Erkennung der Reflexionseigenschaften von Fahrbahnmarkierungen, ein 360° Scanner und das System zur Messung der berührungslosen Griffbarkeit) angebracht, so dass nahezu vollumfänglich der Zustand der Fahrbahnen und dessen Umfeld erfasst werden kann. Organisatorische Aspekte (bei Fahrbahnen mit mehreren Fahrstreifen stellt sich die Frage, welcher Fahrstreifen befahren werden soll) können das Überwachungskonzept einschränken.

Das **Überwachungskonzept 3 (ÜK 3)** nutzt in einem ersten Schritt Fahrzeugdaten von Pkw. Dies sind in erster Linie Informationen zum Schlupf und zur Ebenheit. Da diese Informationen kontinuierlich von einer grossen Menge an Fahrzeugen geliefert werden, können Schachstellen zeitnah erkannt und entsprechend dem Bewertungsschema mit ergänzender, spezifischer Technologie erfasst und bewertet werden. Nachteilig ist in diesem Zusammenhang, dass Bildmaterial durch den Einsatz von Fahrzeugdaten nicht zur Verfügung steht.

Nachfolgend wird eine Bewertung der Überwachungskonzepte vorgenommen.

9.3.2 Bewertung von Überwachungskonzepten

ÜK 1 ist weltweit das am häufigste angewendete ÜK für den Bereich des Trassees. In erster Linie werden die Ebenheiten, die Griffbarkeit und das Oberflächenbild erfasst und bewertet. Ein wesentlicher Aspekt des ÜK 1 ist die Verfügbarkeit einer Visualisierung des Strassenraums.

Da die Technologieentwicklung in den vergangenen Jahren stark zugenommen hat, werden immer mehr Mobile Mapping Fahrzeuge mit einer noch umfangreicheren Sensorik entwickelt. Neben den oben genannten Parametern werden zusätzlich Georadarmessungen, Griffbarkeitsmessungen und/oder Tragfähigkeitsmessungen einhergehend mit 360° Scannern angeboten. Diese Systematik ist mit ÜK 2 beschrieben.

Anzumerken zu ÜK 2 ist in diesem Zusammenhang, dass ein System zur berührungslosen Erfassung der Griffbarkeit erst am Anfang der Entwicklung steht. In den Niederlanden bspw. wird die konventionelle Griffbarkeitsmessung über eine feuchte Fahrbahn bei diesem System in den hinteren Bereich des Fahrzeugs verlegt. Allerdings schränkt eine zeitgleiche konventionelle Griffbarkeitsmessung nicht nur das Messsystem ein, sondern auch die Erfassungsleistung. Der Vorteil eines solchen multifunktionalen Systems (auch ohne Griffbarkeit) ist, dass regelmässig vollumfänglich Informationen zum Trassee und dem umgebenden Raum einschliesslich der Böschungen zur Gefährdungsbeurteilung vorliegen.

ÜK 3 stellt möglicher Weise die Zukunft dar. Echtzeitdaten gepaart mit stationär erhobenen Informationen wie Wetter, Fahrzeugmengen, etc. können wertvolle Informationen zum Zustand des Trassees liefern, allerdings nicht zu der Umgebung. Auch die Ermangelung

von Bilddaten ist in diesem Zusammenhang als nachteilig zu bewerten. Allerdings können durch gezielte Untersuchungen auf problembehafteten Streckenabschnitten diese Daten über das vorliegend beschriebene Konzept gezielt auf die jeweilige Fragestellung (Gefährdung) erhoben werden.

Glossar

Abkürzung	Begriff	Bedeutung
AAR	Alkali-Aggregat-Reaktion	
ABS	Antiblockiersystem	System, welches einem Blockieren der Räder durch Reduktion des Bremsdrucks entgegenwirkt
AR	Augmented Reality	Angereicherte Realität
AUN	Allgemeine Unebenheit	
BAB	Bundesautobahn	
BHU	Bauherrenunterstützung	
BIM	Building Information Model	
BLP	Bewertetes Längsprofil	
BSA	Betriebs- und Sicherheitsausrüstungen	Elektromechanische Installationen
CAD	Computer Aided Design	
CCD	Charge-Coupled Device	Bauteil für den Transport elektrischer Ladung
CMOS	Complementary Metal-Oxide-Semiconductor	Halbleiterprozess zur Realisierung von Schaltungen
CNN	Convolutional Neural Network	Neuronales Faltungsnetzwerk
CPU	Central Processing Unit	Hauptprozessor
CPX	Close Proximity	Verfahren zur Rollgeräuschmessung
DGPS	Differential GPS	
DL	Deep Learning	Training/Anwendung von tiefen Neuronalen Netzwerken
DLC	Diamond-Like Carbon	Amorpher Kohlenstoff
DMI	Distance Measurement Unit	Wegstreckensensor
DTM	digitales Terrain Model	digitales Geländemodell
DTV	Durchschnittliche tägliche Verkehrsstärke	
EDM	Elektrooptischer Distanzmesser	
ETD	Evaluated Profile Depth	geschätzte Profiltiefe
FOG	Fibre Optic Gyroscope	Faser-optischer Kreisel
FWD	Falling Weight Deflectometer	
GIS	Geographisches Informationssystem	
GNSS	Global Navigation Satellite System	satellitengestütztes globales Navigationssystem
GPR	Ground Penetrating Radar	Bodenradar
GPS	Global Positioning System	globales Positionierungssystem
GSM	Global System for Mobile Communication	Telekommunikationsnetz
HD	High Definition	Hohe Bildauflösung
HRM	High Speed Road Monitoring	Mehrfachabtastung
HWD	Heavy Weight Deflectometer	
IMU	Inertial Measurement Unit	Inertiales Messsystem
INS	Inertialnavigationssysteme	
InSAR	Interferometric Synthetic Aperture Radar	Satellitengestützte Radarinterferometrie
IPI	In-place Inclinator	Ketteninklinometer
IRI	International Roughness Index	
KI	Künstliche Intelligenz	
KPI	Key Performance Indicator	Schlüsselindikator
LFC	Longitudinal Friction Coefficient	Längsreibungskoeffizient
LKW	Lastkraftwagen	
LOS	Line of Sight	Sichtlinie

Abkürzung	Begriff	Bedeutung
LWI	Längsebeneheitswirkindex	
MASW	Multi-channel Analysis of Surface Waves	Verfahren der Oberflächenwellenseismik
MEMS	Mikro-Elektro-Mechanisches System	
ML	Machine Learning	Machinelles Lernen
MM	Mobile Mapping	Erfassung raumbezogener Daten von einer mobilen Trägerplattform
MP	Mega Pixel	eine Million Bildpunkte (Pixel)
MPD	Mean Profile Depth	Mittlere Profiltiefe
MSD	Mean Segment Depth	
MTD	Mean Texture Depth	mittlere Texturtiefe
PC	Personal Computer	Einzelplatzrechner
PF	Profile Depth	Profiltiefe
PGR	Simulation der gleitenden Richtlatte	
PKW	Personenkraftwagen	
PMS	Projektmanagment-Software	
PSD	Power Spectral Density	Powerspektrum
RTK	Real Time Kinematic	Verfahren zu Bestimmung von Positionskoordinaten
SAR	Synthetic Aperture Radar	Radar mit synthetischer Apertur
SASW	Spectral Analysis of Surface Waves	Verfahren der Oberflächenwellenseismik
SHM	Structural Health Monitoring	
SKM	Seitenkraftmessverfahren	Messfahrzeug nach der methode des schräglaufenden Rads
SPB	Statistical Pass-By method	Verfahren zur Rollgeräuschmessung
SQM	Standard Querprofil Messgerät	
SRM	Stuttgarter Reibungsmesser	
SRT	Skid Resistance Tester	Messgerät zur Ermittlung der Griffigkeit
SXX	Standardabweichung der Differenz zum gleitenden Mittelwert	
TD	Texture Depth	Texturtiefe
TRL	Technology Readiness Level	
TSD	Traffic Speed Deflectometer	Fahrzeug zur Deflektionsmessung
UAV	Unmanned Aerial Vehicles	unbemanntes Fluggerät (bspw. Drohne)
ULF	Unbemanntes Luftfahrzeug	
UTM	Universal Transverse Mercator	Variante eines globalen Koordinatensystems
VR	Virtual Reality	Virtuelle Realität
WIM	Weigh In Motion	
WLP	Bewertetes Längsprofil	
ZaP	zerstörungsarme Prüfmethode	
ZEB	Zustandserfassung und Bewertung	
ZfP	zerstörungsfreie Prüfmethode	

Literaturverzeichnis

Normen

- [191] DIN EN ISO 13473-1:2021-11, Charakterisierung der Textur von Deckschichten unter Verwendung von Oberflächenprofilen - Teil 1: Bestimmung der mittleren Profiltiefe (ISO_13473-1:2019, korrigierte Fassung 2021-06); Deutsche Fassung EN_ISO_13473-1:2019.
- [192] SN-640510_2021-01, Eigenschaften der Fahrbahnoberfläche Grundnorm (SN-640510_2021-01), 2021.
- [193] SN-640511-1_EN-13036-1-D Oberflächeneigenschaften von Strassen und Flugplätzen; Prüfverfahren – Teil 1: Messung der Makrotexturtiefe der Fahrbahnoberfläche mit Hilfe eines volumetrischen Verfahrens (SN-640511-1_EN-13036-1-D), 2015.
- [194] DIN EN ISO 13473
- [195] SN 640 520, Grundlagen zur Revision der Normen über die visuelle Erhebung des Oberflächenzustands (SN 640 520), 2014.
- [196] SN-EN-13036-5_2020-04: Oberflächeneigenschaften von Strassen und Flugplätzen; Prüfverfahren - Teil 5: Bestimmung der Längsunebenheitsindizes
- [197] DIN 4760:1982-06, Gestaltabweichungen; Begriffe, Ordnungssystem.
- [198] VSS-40120, Linienführung; Quergefälle in Geraden und Kurven, Quergefallsänderung, 2019.

Dokumentationen / Berichte

- [199] Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen. Heft S 74. Verbundprojekt „Leiser Straßenverkehr 2“. Bergisch Gladbach, Januar 2012
- [200] Bundesministerium des Inneren (BMI), Nationale Strategie zum Schutz Kritischer Infrastrukturen (KRITIS-Strategie), Berlin: Bundesministerium des Innern, 2009.
- [201] Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen. Arbeitsausschuss Rauheit, Merkblatt zur Bewertung der Straßengriffigkeit bei Nässe M BGriff, Ausg. 2012 Hrsg., Köln: FGSV-Verl., 2012.
- [202] VSS-40925B, Erhaltungsmanagement der Fahrbahnen (EMF); Zustandserhebung und Indexbewertung, 2019.
- [203] Technische Prüfvorschriften für Ebenheitsmessungen auf Fahrbahnoberflächen in Längs- und Querrichtung - Teil: Berührungslose Messungen, Ausg. 2009 Hrsg., Köln: FGSV-Verl., 2009.
- [204] L. Löcherer, Hrsg., Technische Prüfvorschriften für Ebenheitsmessungen auf Fahrbahnoberflächen in Längs- und Querrichtung - Teil: Berührende Messungen, Ausgabe 2017 Hrsg., Köln: FGSV Verlag GmbH, 2018.
- [205] Richtlinien für die Anlage von Landstraßen, Ausg. 2012 Hrsg., Köln: FGSV-Verl., 2012.
- [206] C. Lippold, T. Lehmann, A. Vettors, W. Ressel und A. & Benner, „Entwurfshinweise zum sicheren sechsstreifigen Ausbau von Autobahnen,“ Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik, Heft 1018, p. 110, 2011.
- [207] Richtlinien für die Entwässerung von Straßen – RewS. In: Straße und Autobahn, Heft 4 / 2022, S. 293-300, 2021.
- [208] Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen. Arbeitsgruppe Infrastrukturmanagement, Arbeitspapier Tragfähigkeit von Verkehrsflächenbefestigungen - Teil A: Messsysteme, FGSV Verlag GmbH, 2020.

Sonstige Literatur / Forschungsberichte

- [209] BMWi gefördertes Forschungsprojekt StreetProbe - Automatische Datenerfassung zur Straßenzustandsüberwachung durch die Fahrzeugsensorik. Laufzeit: 05/2016 - 02/2019.
- [210] duraBAST - Versuchfeld für Validierung sowie Pilotanwendungen innovativer Technologien. <http://www.durabast.de>.
- [211] S. Velske, H. Mentlein und P. Eymann, Strassenbau, Strassenbautechnik, 6., neu bearb. Aufl. Hrsg., Neuwied: Werner, 2009.
- [212] T. Lundberg, P. Andrén, T. Wahlman, O. Eriksson, L. Sjögren und P. Ekdahl, „VTI rapport 961A | New technology for road surface measurement,“ 2018.
- [213] B. Wessel, C. Wiedemann und H. Ebner, „The role of context for road extraction from SAR imagery,“ 2003.
- [214] RVS 03.03.23 Linienführung und Trassierung, FGSV-Verl., 2014.

Auflistung der Änderungen

Ausgabe	Version	Datum	Änderungen
2024	1.00	24.05.2024	Erste Ausgabe

