



Christina Ehrhart, BSc

# Zustandserfassung von Stützbauwerken mittels dynamischem Laserscanning

## **MASTERARBEIT**

zur Erlangung des akademischen Grades

Diplom-Ingenieurin

Masterstudium Geomatics Science

eingereicht an der

**Technischen Universität Graz**

### **Betreuer**

Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Werner Lienhart  
Institut für Ingenieurgeodäsie und Messsysteme

Graz, März 2021

## EIDESSTATTLICHE ERKLÄRUNG

Ich erkläre an Eides statt, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig verfasst, andere als die angegebenen Quellen/Hilfsmittel nicht benutzt und die den benutzten Quellen wörtlich und inhaltlich entnommenen Stellen als solche kenntlich gemacht habe. Das in TUGRAZonline hochgeladene Textdokument ist mit der vorliegenden Masterarbeit identisch.

---

Datum, Unterschrift

# Kurzfassung

Stützbauwerke sind im Alpenraum fester Bestandteil der Straßen- und Schieneninfrastruktur. Von umso größerer Bedeutung ist die Gewährleistung der Tragfähigkeit aller Bauwerke über die gesamte Lebensdauer. Derzeit ist die Zustandserfassung und -beurteilung mit einem enormen Zeitaufwand, hohen Kosten und Sperren von Streckenabschnitten verbunden. In der vorliegenden Arbeit wird ein generischer Arbeitsfluss zur systematischen, raschen und kostengünstigen Grobdetektion von Bauwerken in kritischem Zustand aus dynamisch erfassten Laserscandaten definiert. Anhand zustandsrelevanter Parameter werden Problembauwerke selektiert, um im Bedarfsfall zielgerichtete Maßnahmen zu setzen. Auf praktischer, versuchsorientierter und messtechnischer Ebene werden die Möglichkeiten und Grenzen von mobilen Multisensorsystemen im Fließverkehr mit einer Fahrgeschwindigkeit von bis zu 100 km/h aufgezeigt und die Präzision zustandsrelevanter Parameter beurteilt.

# Abstract

Retaining structures are an integral part of road and rail infrastructure in the Alpine area. Therefore, it is crucial to guarantee safety over the operational lifespan of these structures. At present, condition assessment is time-consuming and of high costs. Moreover, the operation of driving lanes is temporarily suspended. This master thesis presents a generic routine to identify retaining structures in serious conditions using a mobile mapping system. In a systematic, rapid, and economic way relevant parameters are determined. In case of exceeding specified limits, further investigations may be done. Possibilities and restrictions of multi-sensor systems are evaluated experimentally with driving speed up to 100 km/h. Furthermore, this thesis determines the precision of condition-related parameters of retaining structures derived from mobile laser scanner data.

# Inhaltsverzeichnis

|          |  |           |
|----------|--|-----------|
| <b>1</b> | <b>Einleitung</b>  | <b>1</b>  |
| 1.1      | Motivation . . . . .   | 1         |
| 1.2      | Erfassung des Ist-Zustandes . . . . .                                  | 1         |
| 1.3      | Ziel und Aufbau der Arbeit . . . . .                                   | 3         |
| 1.4      | Forschungsprojekt SIBS . . . . .                                       | 3         |
| <b>2</b> | <b>Stützbauwerke</b>   | <b>6</b>  |
| 2.1      | Gliederung von Stützbauwerken . . . . .                                | 6         |
| 2.2      | Versagensszenarien und Schadensankündigung . . . . .                   | 8         |
| 2.2.1    | Versagensszenarien . . . . .   | 9         |
| 2.2.2    | Mögliche Schadensbilder . . . . .                                      | 10        |
| 2.3      | Grenzwerte für geometrische Veränderungen gemäß ÖNORM . . . . .        | 14        |
| 2.3.1    | Maximal aufnehmbare Neigungsänderung . . . . .                         | 14        |
| 2.3.2    | Gesamtsetzungen . . . . .  | 15        |
| 2.4      | Anforderungen an ein Überwachungssystem . . . . .                      | 15        |
| <b>3</b> | <b>Laserscanning auf mobilen Trägerplattformen</b>                     | <b>17</b> |
| 3.1      | Georeferenzierung der Scandaten . . . . .                              | 18        |
| 3.2      | Geometrische Objekterfassung mit mobilem Laserscanning . . . . .       | 19        |
| 3.2.1    | Technische Spezifikationen kommerzieller Laserscanner . . . . .        | 19        |
| 3.2.2    | Räumliche Auflösung von Scandaten . . . . .                            | 20        |
| 3.2.3    | Konfiguration der Scanner . . . . .                                    | 21        |
| 3.2.4    | Qualitätsanalyse . . . . .   | 24        |
| 3.3      | Kommerzielle Multisensorsysteme . . . . .                              | 25        |
| 3.4      | Anwendungen aus der Praxis . . . . .                                   | 27        |
| <b>4</b> | <b>Grobdetektion von Verdachtsbauten aus mobil erfassten Scandaten</b> | <b>30</b> |
| 4.1      | Generierung von Profilen . . . . .                                     | 31        |
| 4.2      | Neigungsberechnung . . . . .   | 32        |
| 4.3      | Flächenhafte Bauwerksanalyse . . . . .                                 | 35        |
| <b>5</b> | <b>Validierung der Methodik anhand realer Messdaten</b>                | <b>37</b> |
| 5.1      | Messsystem und Datenakquise . . . . .                                  | 37        |
| 5.1.1    | Amberg Mobile Mapping System . . . . .                                 | 37        |
| 5.1.2    | Versuchsfahrten . . . . .  | 38        |
| 5.1.3    | Datenaufbereitung . . . . .  | 40        |
| 5.2      | Detektion von Neigungsänderungen . . . . .                             | 40        |

|          |   |           |
|----------|---|-----------|
| 5.3      | Flächenhafte Bauwerksanalyse . . . . .                            | 47        |
| 5.4      | Zustandserfassung von Stützbauwerken aus Laserscandaten . . . . . | 52        |
| <b>6</b> | <b>Conclusio</b>  | <b>53</b> |
|          | <b>Literaturverzeichnis</b>                                       | <b>54</b> |
|          | <b>Anhang</b>   | <b>58</b> |
| A        | Übersicht relevanter Normen und Richtlinien . . . . .             | 58        |
| B        | Reflexionsvermögen von Styroporplatten . . . . .                  | 59        |
| C        | Kennwerte der robusten Neigungsberechnung . . . . .               | 60        |

# Abkürzungsverzeichnis

**BEV** Bundesamt für Eich- und Vermessungswesen

**DBSCAN** Dichtebasierte räumliche Clusteranalyse (Density-Based Spatial Clustering of Applications with Noise)

**DMI** Radsensor (Distance Measurement Indicator)

**FFG** Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft

**FOG** Glasfaserkreisel (Fibre Optic Gyroscope)

**GIS** Geografisches Informationssystem

**IMU** Inertialsensoreinheit (Inertial Measurement Unit)

**MAD** Mittlere absolute Abweichung (Median Absolute Deviation)

**MMS** Mobile Mapping System

**RANSAC** Robustes Schätzverfahren (Random Sample Consensus)

**RVS** Richtlinien und Vorschriften für das Straßenwesen

**SAR** Radar mit synthetischer Apertur (Synthetic Aperture Radar)

**SIBS** Sicherheitsbewertung bestehender Stützbauwerke

**SLS** Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit (Serviceability Limit State)

**TOF** Impulslaufzeitverfahren (Time Of Flight)

**UAV** Unbemanntes Flugobjekt (Unmanned Aerial Vehicles)

**ULS** Grenzzustand der Tragfähigkeit (Ultimate Limit State)

**VÖBU** Vereinigung Österr. Bohr-, Brunnenbau- und Spezialtiefbauunternehmen

# 1 Einleitung

## 1.1 Motivation

Stützbauwerke sind vor allem im Alpenraum fester Bestandteil der Straßen- und Schieneninfrastruktur. Nach Rebhan (2015a, S. 2) besitzt alleine die ÖBB rund 9400 unverankerte Stützbauwerke mit einem durchschnittlichen Bauwerksalter von knapp 80 Jahren. Der ASFINAG als Betreiber des hochrangigen Straßennetzes in Österreich obliegt die Erhaltung von zirka 2175 km Netzlänge mit insgesamt 66 km Stützbauwerke (Marte et al. 2014, S. 165–166). Für Nutzer der Infrastruktur hat die Verkehrssicherheit als auch die Streckenverfügbarkeit höchste Priorität. Aus diesem Grund ist die Erhebung des Ist-Zustandes von großer Bedeutung, um Mängel und Schäden rechtzeitig zu erkennen und zu beheben. Dennoch haben sich in jüngster Vergangenheit vermehrt, teilweise verheerende Schadensfälle ereignet. Nur ein Beispiel hierfür ist der scheinbar plötzliche Wandverbruch einer über 10 m hohen Winkelstützmauer an der A13 Brennerautobahn nahe der Hauptmautstelle Schönberg, Österreich im Jahr 2012. Die Trümmer des Bauwerks haben einen vorbeifahrenden LKW unter sich begraben (Abbildung 1-1), der Lenker kam dabei ums Leben.



Abbildung 1-1: Schadensbild des Wandverbruchs<sup>1</sup>

## 1.2 Erfassung des Ist-Zustandes

Zur Qualitätssicherung für die bauliche Erhaltung von Kunstbauten bestehen Rahmenbedingungen, die in Richtlinien und Vorschriften für das Straßenwesen (RVS) festgehalten werden. Diese sind in Österreich im Verwaltungsbereich des Autobahnen- und Schnellstraßennetzes zwingende Grundlage, für das restliche Straßen- und Schienennetz kommen sie als Stand der Technik zur Anwendung. Zur Überprüfung von geankerten Stützbauwerken gilt i.A. die RVS 13.03.21 (2013), für nicht geankerte Stützbauwerke die RVS 13.03.61 (2014).

---

<sup>1</sup>Quelle: <https://www.vienna.at/mauer-stuerzte-auf-a13-lkw-lenker-tot>

Diese RVS-Richtlinien sind ab einer Höhe von mindestens 1,5 m über der Geländeoberkante im Vier-Augen-Prinzip anzuwenden und sehen folgendes dreistufiges Überwachungsprogramm vor (RVS 13.03.21 2013, S. 4–9 und RVS 13.03.61 2014, S. 3–7):

– **Laufende Überwachung**

Sie wird mindestens einmal jährlich durchgeführt und beinhaltet die visuelle Feststellung von groben Schäden und auffälligen Veränderungen durch den Streckenkontrolldienst, sofern diese beim langsamen Vorbeifahren zu erkennen sind. Die schriftliche Aufzeichnung über die laufende Überwachung ist grundsätzlich nicht erforderlich.

– **Kontrolle**

Die Kontrolle dient der Feststellung von Veränderungen im Erhaltungszustand, beinhaltet also eine Bewertung des Ist-Zustandes, und erfolgt wiederum augenscheinlich, aber durch geschultes Fachpersonal. Sie beinhaltet außerdem die Überprüfung vorhandener Messeinrichtungen. Ein maximal dreijähriges Intervall ist einzuhalten.

– **Prüfung**

Bei der Prüfung wird der Erhaltungszustand von einer sachkundigen Ingenieurin oder von entsprechend geschultem Fachpersonal erhoben, dokumentiert und bewertet. Die Prüferin muss zudem die grundlegenden statischen Verhältnisse des zu prüfenden Objektes kennen. Die Prüfintervalle werden von der Prüferin selbst vorgegeben, haben aber in Zeitabständen von höchstens zwölf Jahren zu erfolgen.

Bei einem als kritisch eingestuften Stützbauwerk kann aufbauend auf die Prüfung eine Sonderprüfung eingeleitet werden. Erst für ein solches Problembauwerk werden geodätische und/oder geotechnische Messungen am Bauwerk oder Gelände durchgeführt. Das temporäre oder permanente Monitoring von Ingenieurbauwerken ist dann auf Grundlage der RVS 13.03.01 (2012) durchzuführen. Nach Marte et al. (2014, S. 173) ist im optimalen Fall bereits eine Messreihe aus vorangegangenen Deformationsmessungen vorhanden. Liegen bis dato keine messtechnischen Untersuchungen vor, müssen zur richtigen Interpretation der Daten über eine entsprechend lange Zeitspanne Folgemessungen veranlasst werden.

In der Regel ist die Anordnung von Deformationsmessungen allein von der Bewertung des Bauwerks durch das Fachpersonal abhängig. Gerade eben bei der Beurteilung des Ist-Zustandes kann es aber zu einigen Unklarheiten kommen. Marte et al. (2014, S.173) beschreibt nur die häufigsten Probleme, die bei der Erfassung und Bewertung des Erhaltungszustandes auftreten können (z.B. fehlende Beschreibung der Untergrundverhältnisse, nicht ausreichend dokumentierte ursprüngliche statische Berechnungen, nicht vorhande-



ne oder unvollständige Planungsunterlagen, unbekannter Zustand der nicht zugänglichen Bauwerksteile).

### 1.3 Ziel und Aufbau der Arbeit

Ziel der vorliegenden Arbeit ist die Definition eines generischen Arbeitsflusses zur systematischen, raschen und kostengünstigen Grobdetektion von Stützbauwerken in kritischem Zustand aus dynamisch erfassten Laserscandaten. Durch das Ableiten zustandsrelevanter Parameter sollen Problembauwerke selektiert werden, um im Bedarfsfall zielgerichtete Untersuchungen durchzuführen. Zusätzlich sollen auf praktischer, versuchsorientierter und messtechnischer Ebene die Systemmöglichkeiten und Grenzen aufgezeigt, sowie die erreichbare Präzision zustandsrelevanter Parameter beurteilt werden.

In Kapitel 2 werden verschiedene Bauweisen sowie Schadensbilder von Stützbauwerken beschrieben und Grenzwerte für Deformationen definiert. Kapitel 3 gibt einen Überblick über die derzeit am Markt verfügbaren mobilen Multisensorsysteme sowie deren Komponenten, Funktionsweise und Anwendungen. Eine detaillierte Beschreibung des Lösungsansatzes zur Ableitung zustandsrelevanter Parameter von Stützbauwerken aus Laserscandaten ist Kapitel 4 zu entnehmen. Die Validierung dieses Ansatzes anhand realer Messdaten erfolgt im Kapitel 5. Eine Zusammenfassung der Arbeit sowie zukunftsweisende Möglichkeiten dynamisch erfasster Laserscandaten für Bauwerksüberwachungen kann Kapitel 6 entnommen werden.

### 1.4 Forschungsprojekt SIBS

Noch am Tag des Wandverbruchs der Winkelstützmauer auf der Brennerautobahn (siehe Abbildung 1-1) wurde seitens der ASFINAG mit umfassenden Untersuchungen sämtlicher Stützbauwerke begonnen. Dabei stellte sich heraus, dass die Ist-Zustandserfassung mehrerer Jahrzehnte alter Stützbauwerke eine technisch äußerst schwierige Aufgabe ist und mit den bekannten Möglichkeiten eine Bewertung oft nicht zufriedenstellend ist (Rebhan 2015b, S. 6). Aus diesen Umständen entstand das Forschungsprojekt Sicherheitsbewertung bestehender Stützbauwerke (SIBS) mit der Vereinigung Österr. Bohr-, Brunnenbau- und Spezialtiefbauunternehmungen (VÖBU) als Projektwerber. Projektpartner des Forschungsprojektes, welches unter anderem in enger Zusammenarbeit mit der ASFINAG und der ÖBB als Projektunterstützer stand, waren universitäre Einrichtungen, Materialprüfanstalten und ein Ingenieurbüro. Die Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft (FFG) förderte die teilnehmenden Forschungsinstitutionen und Partner (FFG-Projektnummer: 853446).

Wie in Rebhan (2015b) beschrieben, war das Ziel des Forschungsprojektes die Entwicklung neuer zielführender Methoden zur Zustandserfassung und -bewertung von Stützbauwerken, um die Sicherheit als auch Funktionstüchtigkeit zu gewährleisten und Sanierungen im Bedarfsfall gezielt und zeitgerecht durchzuführen. Teil des Projektes war die Erarbeitung einer systematischen und kostengünstigen Methodik zur Grobdetektion von möglichen Problembauten. Im Rahmen des ersten Forschungsjahres wurde mittels Laserscanning-Technologie auf einem sich bewegenden Trägerfahrzeug die dreidimensionale Lage von sieben Stützbauwerken unterschiedlichen Typs erfasst (Nullmessung). Angaben zu den erfassten Bauwerken sind den Tabellen 1-1 bis 1-7 zu entnehmen. Die Akquirierung sowie Interpretation dieser Messdaten ist auch Teil der vorliegenden Masterarbeit.

Tabelle 1-1: Stützmauer Buchberg 2.2 (A3)

|                    |                     |   |
|--------------------|---------------------|---|
| <b>Art</b>         | Schwergewichtsmauer |  |
| <b>Baujahr</b>     | 1984                |   |
| <b>Länge</b>       | 85 m                |   |
| <b>Höhe</b>        | 6 m                 |   |
| <b>Material</b>    | Stahlbeton          |   |
| <b>Oberfläche</b>  | Beton schalrau      |   |
| <b>Überwachung</b> | tachymetrisch       |   |

Tabelle 1-2: Ankerwand Buchberg 2 (A4)


|                    |                |  |
|--------------------|----------------|--|
| <b>Art</b>         | Ankerwand      |  |
| <b>Baujahr</b>     | 1984           |  |
| <b>Länge</b>       | 255 m          |  |
| <b>Höhe</b>        | 6 m            |  |
| <b>Material</b>    | Stahlbeton     |  |
| <b>Oberfläche</b>  | Beton schalrau |  |
| <b>Überwachung</b> | tachymetrisch  |  |

Tabelle 1-3: Ankerwand Egger (A6)


|                    |                |  |
|--------------------|----------------|--|
| <b>Art</b>         | Ankerwand      |  |
| <b>Baujahr</b>     | keine Angabe   |  |
| <b>Länge</b>       | 370 m          |  |
| <b>Höhe</b>        | 18 m           |  |
| <b>Material</b>    | Stahlbeton     |  |
| <b>Oberfläche</b>  | Beton schalrau |  |
| <b>Überwachung</b> | tachymetrisch  |  |

Tabelle 1-4: Ankerwand Reittunnel (A9)

|                    |                           |  |
|--------------------|---------------------------|--|
| <b>Art</b>         | Ankerwand                 |  |
| <b>Baujahr</b>     | keine Angabe              |  |
| <b>Länge</b>       | 160 m                     |  |
| <b>Höhe</b>        | 25 m                      |  |
| <b>Material</b>    | kombinierte Materialien   |  |
| <b>Oberfläche</b>  | Beton schalrau, aufgelöst |  |
| <b>Überwachung</b> | tachymetrisch             |  |

Tabelle 1-5: Schwergewichtsmauer B99 (S1)



|                    |                          |   |
|--------------------|--------------------------|---|
| <b>Art</b>         | Schwergewichtsmauer      |  |
| <b>Baujahr</b>     | keine Angabe             |   |
| <b>Länge</b>       | 130 m                    |   |
| <b>Höhe</b>        | 8 m                      |   |
| <b>Material</b>    | keine Angabe             |   |
| <b>Oberfläche</b>  | Vorsatzschale rau        |   |
| <b>Überwachung</b> | keine messtechn. Prüfung |   |

Tabelle 1-6: Raumbitterwand B163 (S6)

|                    |                          |  |
|--------------------|--------------------------|--|
| <b>Art</b>         | Raumbitterwand           |  |
| <b>Baujahr</b>     | keine Angabe             |  |
| <b>Länge</b>       | 220 m                    |  |
| <b>Höhe</b>        | 5 m                      |  |
| <b>Material</b>    | keine Angabe             |  |
| <b>Oberfläche</b>  | aufgelöst, Bewuchs       |  |
| <b>Überwachung</b> | keine messtechn. Prüfung |  |

Tabelle 1-7: Steinschichtung L109 (S7)

|                    |                          |  |
|--------------------|--------------------------|--|
| <b>Art</b>         | Gewichtsmauer            |  |
| <b>Baujahr</b>     | keine Angabe             |  |
| <b>Länge</b>       | 80 m                     |  |
| <b>Höhe</b>        | 7 m                      |  |
| <b>Material</b>    | keine Angabe             |  |
| <b>Oberfläche</b>  | Stein gebrochen          |  |
| <b>Überwachung</b> | keine messtechn. Prüfung |  |

## 2 Stützbauwerke

Die ÖNORM EN 1997-1 (2014, S. 103) definiert, dass „Stützbauwerke alle Arten von Wänden oder Stützsystemen, bei denen Bauteile durch Kräfte aus dem gestützten Material beansprucht werden, umfassen“. Stützbauwerke dienen der Sicherung von steilen Böschungen oder natürlichen Geländesprüngen sowie zur Herstellung von horizontalen Flächen in Hanglagen (vgl. Rebhan 2015a, S. 7). Wie in Adam et al. (2007, S. 267) ausgeführt, bestehen solche Bauwerke zumeist aus massiven Baustoffen wie Beton und Steinen. Teilweise sind Stützbauwerke aber auch aus verstärkten Kunststoffen, Stahl- und Holzkonstruktionen sowie lebenden Pflanzen aufgebaut oder werden durch diese Materialien unterstützt.

Dieses Kapitel soll eine Übersicht von Stützbauwerken und deren konstruktiven Ausbildungen geben, Versagensmechanismen und mögliche Schadensankündigungen erläutern sowie deren Grenzwerte definieren. Eine Auswahl der für die vorliegende Arbeit relevanten Normen und Richtlinien hinsichtlich Entwurf, Bemessung, Erhaltung und Überwachung von Stützbauwerken sind Tabelle A-1 im Anhang A zu entnehmen.

### 2.1 Gliederung von Stützbauwerken

In der deutschen Literatur wird zumeist zwischen zwei Hauptgruppen von Stützbauwerken nach deren Tragverhalten unterschieden (Adam et al. 2007, S. 290–341):

- **Flache Stützbauwerke (Stützmauern)**

Druckkräfte werden im Bereich der Bauwerkssohle in den Boden eingeleitet. Erreicht wird diese Kräfteableitung über ein sehr hohes Mauergewicht, die Nutzung von Erdaufasten oder über eine große Aufstandsfläche.

- **Tiefe Stützbauwerke (Stützwände)**

Auftretende Lasten werden durch Anker oder durch Teil- oder Volleinspannung des Bauwerks im Bereich der Sohle in den Boden eingeleitet. Tief gegründete Stützbauwerke kommen vor allem bei weichem Baugrund zum Einsatz.

Stützmauern können nach ihrer Stützwirkung und Stützwände nach Art ihrer Beanspruchung feiner unterteilt werden (siehe Tabelle 2-1). Detaillierte Angaben zu den einzelnen Bauwerkstypen können beispielsweise Adam et al. (2007) und Boley (2012) entnommen werden.

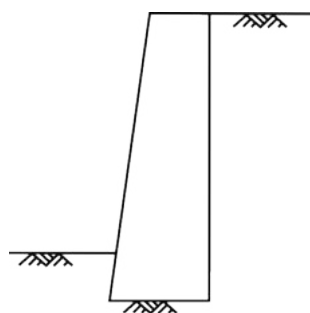
Trotz der klaren Gliederung von Stützbauwerken in flach und tief gegründete Stützbauwerke ist eine Zuordnung in der Praxis nicht immer einfach. An dieser Stelle soll angemerkt werden, dass im Eurocode 7 (ÖNORM EN 1997-1 2014, S. 103) drei Hauptarten von Stützbauwerken nach Art der Bemessung unterschieden werden (Gewichtsstützwände, im

Boden einbindende Wände und zusammengesetzte Wände). Diese Einteilung findet sich auch vermehrt im anglikanischen Sprachraum, soll hier aber nicht näher erläutert werden.

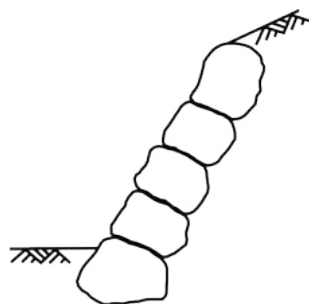
Tabelle 2-1: Einteilung von Stützbauwerken nach Adam et al. (2007)

| Flache Stützbauwerke<br>(Stützmauern)  | Tiefe Stützbauwerke<br>(Stützwände)   |
|--|---|
| Stützwirkung durch Eigengewicht:<br>– Gewichtsstützmauern, Trockenmauern   | Primär auf Biegung beanspruchte Wände:<br>– Spundwände<br>– Trägerbohlwände<br>– Pfahlwände<br>– Schlitzwände |
| Stützwirkung durch Eigengewicht und Erdauflast:<br>– Winkelstützmauern   | Primär auf Schub beanspruchte Wände:<br>– Brunnenwände<br>– Dübel, Stützscheiben                              |
| Stützwirkung durch Aktivierung des Erdkörpers (Verbundkonstruktion):<br>– Raumbatterwände<br>– Bewehrte Erde Konstruktionen<br>– Ankerwände (Elementwände)<br>– Nagelwände<br>– Gabionenwände<br>– Rippenwände | Auf Biegung und Schub beanspruchte Wände:<br>– Fangedämme   |

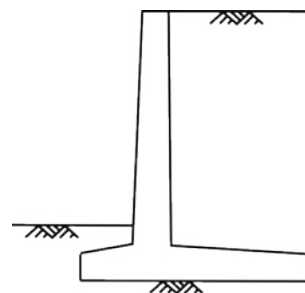
Die Abbildungen 2-1a bis 2-1h zeigen schematisch den Querschnitt einiger in Tabelle 2-1 angeführter Stützbauwerke. Darstellungen aller Bauwerkstypen sind Adam et al. (2007) zu entnehmen.



(a) Gewichtsmauer aus Beton



(b) Blocksteingewichtsmauer



(c) Winkelstützmauer

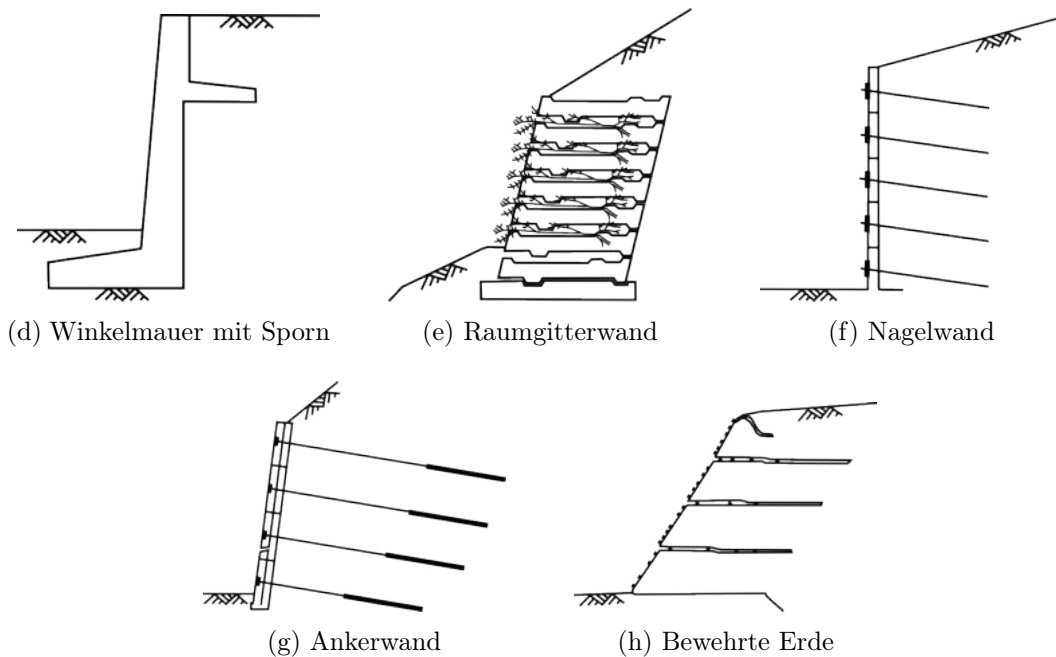


Abbildung 2-1: Schematische Darstellung der Querschnitte ausgewählter Stützbauwerke, angelehnt an Adam et al. (2007) und Brandl (2009)

## 2.2 Versagensszenarien und Schadensankündigung

In Kapitel 2.2.1 werden die maßgebenden Versagensszenarien (Grenzzustände) angeführt, die bei der Bemessung von Stützbauwerken nach der ÖNORM EN 1997-1 (2014) nachzuweisen sind. Die Unterscheidung zwischen dem Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit (Serviceability Limit State, SLS) und dem Grenzzustand der Tragfähigkeit (Ultimate Limit State, ULS) ist, vor allem im Hinblick auf die vorliegende Arbeit, bei der Definition von Grenzwerten (Kapitel 2.3) von Bedeutung. Der SLS definiert die Funktionsfähigkeit des Tragwerks, das Wohlbefinden der Nutzerin oder das Erscheinungsbild (z.B. Risse), wohingegen der ULS die Sicherheit von Personen und/oder des Tragwerks beschreibt (ÖNORM EN 1990, 2013).

Die Ankündigung von Versagensmechanismen durch geometrische Veränderungen des Bauwerks oder Schadensbilder an der Bauwerksoberfläche ist Voraussetzung für ein frühzeitiges Erkennen von nicht planmäßigen Entwicklungen. Nicht duktile (spröde) Systeme weisen ein plötzliches Versagen ohne Vorankündigung auf. Bei der Planung von Neubauten ist neben einem duktilen Systemverhalten auch zu berücksichtigen, dass die Ergebnisse von Überwachungsmaßnahmen auf das richtige Versagensszenario rückschließen lassen (Marte et al. 2014, S. 185). Das ist nicht immer einfach, da sich verschiedene Versagensszenarien durch ein und dasselbe Schadensbild ankündigen können. In diesem Zusammenhang liegt eine besondere Herausforderung bei der Zustandsbeurteilung bestehender

Stützbauwerke, da Planungsunterlagen und Dokumentationen der Bausubstanz nicht immer vorliegen. Diese Aufgabe soll nicht Gegenstand der vorliegenden Arbeit sein, weshalb an dieser Stelle auf Rebhan (2015a) verwiesen wird.

### 2.2.1 Versagensszenarien

In der DIN 1054 (2005) wird definiert, dass Stützbauwerke der Gruppe geotechnischer Bauwerke angehören, da die grundbauspezifischen Einwirkungen bei diesen Bauwerken überwiegen. Der Baugrund ist ebenso als Bauteil zu definieren, wie jedes andere Bauelement. Nach Boley (2012, S. 635) kann folgend zwischen innerer und äußerer Standsicherheit unterschieden werden. In der Praxis können Bruchmechanismen gleicher oder verschiedener Art nebeneinander auftreten.

#### – Innere Standsicherheit

Diese bezieht sich auf die Festigkeit bzw. das Versagen eines einzelnen Bauteils an sich, z.B. eines Ankers, einer Steife oder der Verbindung von Bauteilen.

#### – Äußere Standsicherheit

Hier wird ein gemeinsames Versagen des Baugrundes und des Bauwerks, ohne ein Versagen eines einzelnen Bauteils, untersucht.

Die Abbildungen 2-2 und 2-3 zeigen Beispiele für äußere und innere Versagensmechanismen ausgewählter Stützbauwerke. Eine Auflistung relevanter Versagensformen für unterschiedliche Bauwerkstypen, die bei der Bemessung von Stützbauwerken mindestens untersucht werden müssen, ist der ÖNORM EN 1997-1 (2014, S. 111–116) bzw. Weißenbach (2012) zu entnehmen.

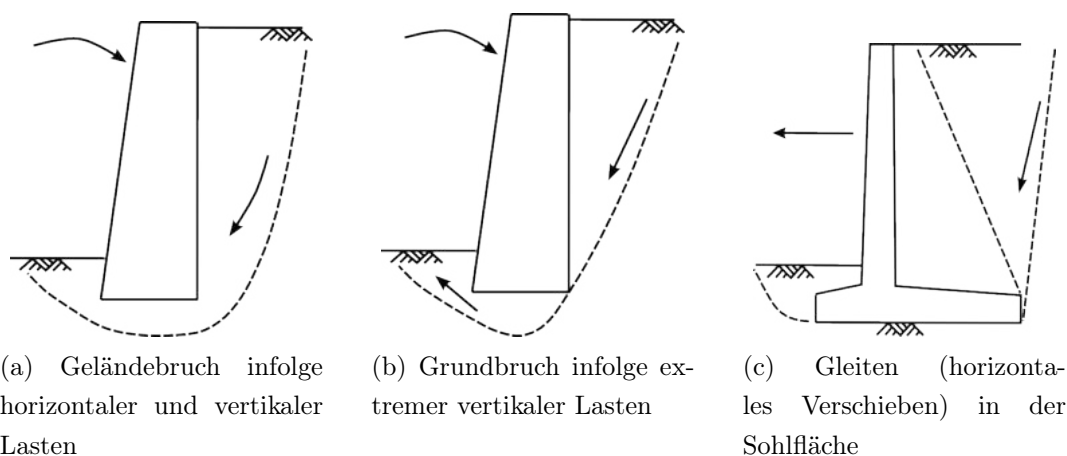


Abbildung 2-2: Äußere Versagensmechanismen nach ÖNORM EN 1997-1 (2014)

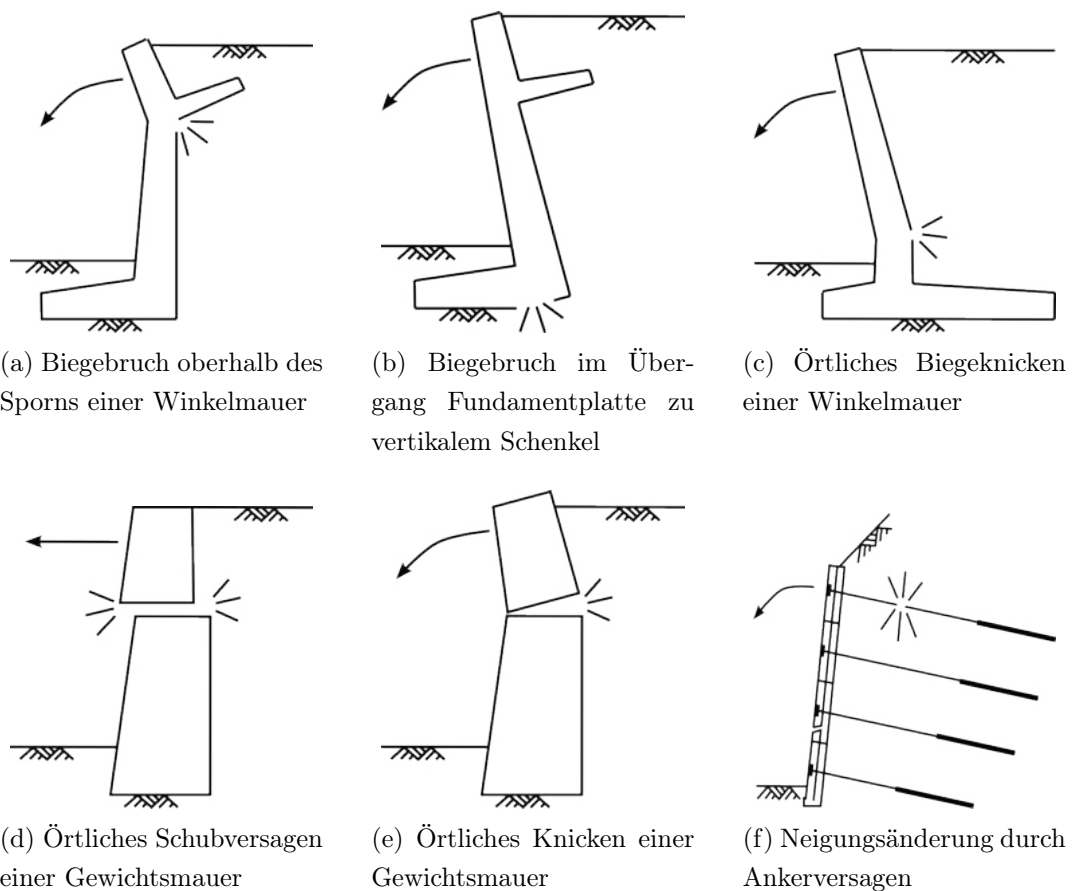


Abbildung 2-3: Innere Versagensmechanismen nach ÖNORM EN 1997-1 (2014)

### 2.2.2 Mögliche Schadensbilder

Wie in der Einleitung von Kapitel 2.2 bereits erwähnt, treten Schadensbilder als Ankündigung von Versagensmechanismen ausschließlich bei duktilen Systemen auf. Ist das Systemverhalten spröde, so kann ein Versagensszenario scheinbar plötzlich eintreten. Schadensbilder, die ein Versagen ankündigen können, werden in diesem Kapitel wie folgt unterteilt:

- Geometrische Veränderungen (Grundformen der Wandbewegung)
- Schadensbilder an der Bauwerksoberfläche
- Veränderungen im Boden



## Geometrische Veränderungen (Deformationen)

Wie in Heunecke et al. (2013, S. 92) erläutert, umfasst der Begriff Deformation im geodätischen Sprachgebrauch sowohl die Starrkörperbewegung als auch die Verformung eines Messobjekts. Nach DIN 18710-4 (2010, Anhang E) beschreibt eine Starrkörperbewegung alle Bewegungen eines starren Körpers gegenüber der Umgebung, ohne Änderung der inneren Geometrie. Verformungen hingegen umfassen Deformationen, die die Änderung der inneren Geometrie des Messobjekts mit sich bringen. Beispiele für beide Arten von Deformationen sind in Tabelle 2-2 angeführt.

Tabelle 2-2: Deformationen, Begriffseinteilung nach DIN 18710-4 (2010, Anhang E)

| Starrkörperbewegung   | Verformung   |
|---|--|
| Verschiebung (Translation):<br>Bewegung in eine bestimmte Richtung,<br>z.B. vertikale Verschiebungen (Setzung,<br>Hebung, Senkung), Gleiten | Verzerrung:<br>Dehnung entlang der Achsen eines<br>kartesischen Koordinatensystems und<br>Scherung zwischen diesen Achsen, z.B.<br>Dehnung, Stauchung, Schubverformung |
| Verdrehung (Rotation):<br>Drehung um eine bestimmte Achse, z.B.<br>Kippen, Schiefstellung   | Biegung, Durchbiegung, Verbiegung:<br>Verformung senkrecht zu einer konstruk-<br>tiven Achse   |
|   | Torsion, Verwindung:<br>Verformung um eine konstruktive Achse  |

Da in der Mechanik die Begriffe Verformung, Bewegung und Deformation gleichzusetzen sind, werden diese Ausdrücke in entsprechender fachspezifischer Literatur für ein und dieselben Vorgänge verwendet. In der ÖNORM B 4434 (1993, S. 7) werden für Stützkonstruktionen vier Grundformen der Wandbewegung unterschieden: Drehung um Fußpunkt, parallele Bewegung, Drehung um Kopfpunkt und Durchbiegung. Parallele Bewegungen und Drehungen beschreiben im geodätischen Sprachgebrauch eine Starrkörperbewegung, während die Durchbiegung eine Verformung darstellt.

Abbildung 2-4 und Abbildung 2-5 zeigen für Stützkonstruktionen relevante Starrkörperbewegungen bzw. Verformungen. Diese geometrischen Veränderungen der Bauwerke sind vor allem abhängig von der Nachgiebigkeit des Bodens und der Lage und Nachgiebigkeit von z.B. Verankerungen und Sporn. In der Praxis können Deformationen unterschiedlicher Art überlagert auftreten. Bei kritischen Bauwerken ist die Separierung der

einzelnen Bewegungsgrundformen Teil einer umfangreichen Überwachungsmessung.

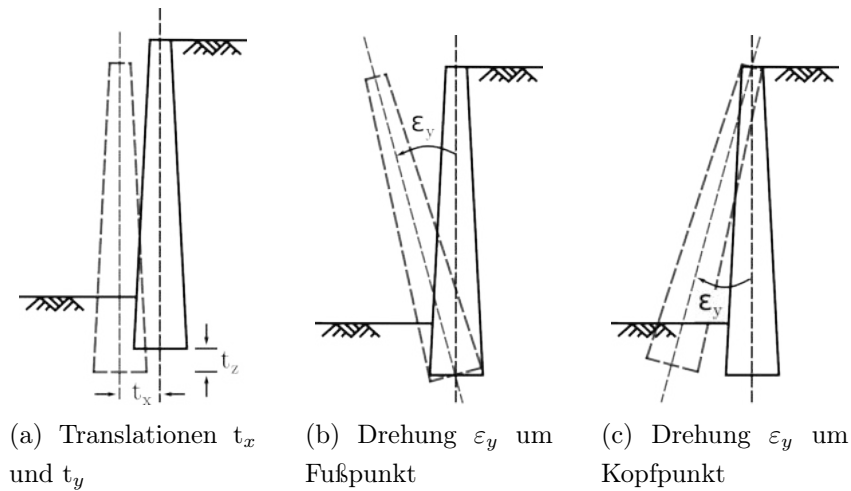


Abbildung 2-4: Starrkörperbewegung nach Heunecke et al. (2013, S. 94, Abb. 3-2)

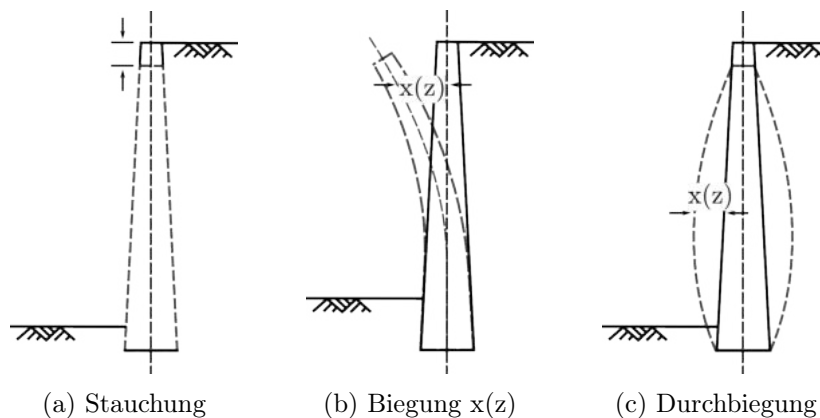


Abbildung 2-5: Verformung

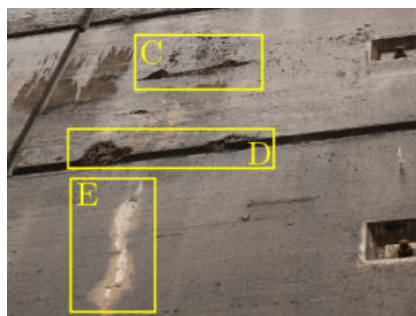
### Schadensbilder an der Bauwerksoberfläche

Schäden an der Betonoberfläche von Stützbauwerken umfassen Betonausblühungen, Aus-sinterungen, Tropfsteinbildungen, Betonabplatzungen und -absprengungen, Betonauslau-gungen, Betonkorrosion, Risse im Beton und Nester. Abbildung 2-6 zeigt solche Schäden an der Betonoberfläche einer Ankerwand. Die Unterscheidung dieser Mängel ist oft nicht eindeutig und obliegt in der Praxis der (subjektiven) Beurteilung der Prüferin.

Stahlbauteile bzw. metallische Bauteile im Allgemeinen reagieren mit der Luft und der Feuchtigkeit, können so korrodieren und bilden bspw. Rostflecken. Werden Kunst-stoffbauteile und Geotextilien nicht ausreichend imprägniert oder abgedeckt, nimmt die Festigkeit schnell ab. Dies führt schlussendlich zu sprödem Versagen.



(a) A Bewehrungskorrosion, B Aussinterung



(b) C Abplatzung zufolge Bewehrungskorrosion oder zu geringer Betondeckung (Frostschaden), D Frostschaden, E Aussinterung



(c) F Aussinterung

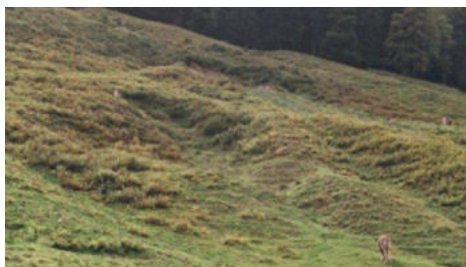


(d) G Frostschaden durch Bewehrungskorrosion

Abbildung 2-6: Mängel an der Betonkonstruktion einer Ankerwand<sup>2</sup>

### Veränderungen im Boden

Schadensbilder im Boden sind u.a. Erhebungen, Setzungen, Höhenversätze, Bodenauspülungen und Risse (Rebhan 2015a, S. 79). Abbildung 2-7a zeigt Geländeveränderungen, die auf immer wieder kehrende Rutschungen und Muren rückschließen lassen. In Abbildung 2-7b ist ein Böschungsbruch mit kreisförmiger Gleitfläche zu erkennen.



(a) Geländeveränderungen<sup>3</sup>



(b) Böschungsbruch<sup>4</sup>

Abbildung 2-7: Schadensbilder im Boden

<sup>2</sup>Quelle: IBG, TU Graz

<sup>3</sup>Quelle: <https://www.bfw.gv.at>

<sup>4</sup>Quelle: <https://de.wikipedia.org/wiki/Gleitkreisverfahren>

## 2.3 Grenzwerte für geometrische Veränderungen gemäß ÖNORM

Die ÖNORM EN 1997-1 (2014) definiert in Anhang H Zahlenwerte für maximal aufnehmbare Neigungsänderungen (Rotationen) sowie für Gesamtsetzungen (vertikale Verschiebungen). Für Verformungen (siehe Tabelle 2-2) werden keine Grenzwerte präzisiert. Es ist anzumerken, dass diese Angaben aus Normen für andere Bauwerkstypen übernommen wurden und sich im Allgemeinen auf Hoch- und Industriebauten beziehen. Als einzig allgemein gültige Richtwerte sollen sie hier aber dennoch angeführt werden.

### 2.3.1 Maximal aufnehmbare Neigungsänderung

Um einen Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit (SLS) zu vermeiden, liegt die maximal aufnehmbare Winkeländerung für offene Rahmenkonstruktionen, ausgekleidete Rahmen und tragende oder durchlaufende Mauerwände bezogen auf die zweifache Bauwerkshöhe zwischen  $1/2000$  rad und  $1/300$  rad. Welcher konkrete Grenzwert für die Gebrauchstauglichkeit angesetzt wird, ist für jedes Bauwerk im Einzelnen zu entscheiden. Der Grenzzustand der Tragfähigkeit (ULS) wird in Bezug auf die zweifache Bauwerkshöhe mit einer maximalen Verdrehung von  $1/150$  rad erreicht. Die maximal aufnehmbaren Neigungsänderungen bezogen auf die einfache Bauwerkshöhe sind Tabelle 2-3 zu entnehmen.  $SLS_1$  und  $SLS_2$  definieren dabei den Bereich, in welchem der Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit anzusetzen ist. Da die Verteilung der Neigungsänderung über die gesamte Bauwerkshöhe nahezu konstant ist, ist die Kopfverschiebung näherungsweise linear von der Neigung abhängig. Die Kopfverschiebung für verschiedene Bauwerkshöhen ist in Abbildung 2-9 dargestellt.

Beispiel: Für ein Bauwerk mit der Höhe  $h=15$  m liegt die maximal zulässige Winkeländerung für den Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit zwischen  $2/2000$  ( $SLS_1$ ) bzw.  $0,057^\circ$  und  $2/300$  ( $SLS_2$ ) bzw.  $0,382^\circ$ . Für das Erreichen des Grenzwertes der Tragfähigkeit ist die maximal zulässige Winkeländerung mit  $2/150$  bzw.  $0,764^\circ$  definiert. Bei einer starren Drehung um den Fußpunkt entspricht dies einer maximal zulässigen Kopfverschiebung zwischen  $1,5$  cm bzw.  $10,0$  cm für den Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit und  $20,0$  cm für den Grenzzustand der Tragfähigkeit (siehe Abbildung 2-8).

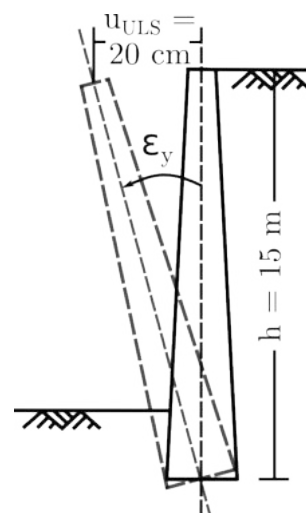


Abbildung 2-8: Kopfverschiebung im Grenzzustand der Tragfähigkeit,  $\epsilon_y = 0,764^\circ$

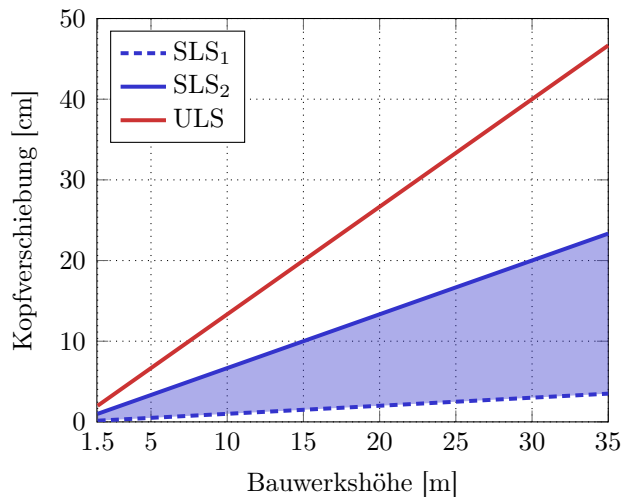


Tabelle 2-3: Maximal aufnehmbare Winkeländerungen bezogen auf die einfache Bauwerkshöhe

| SLS <sub>1</sub> | SLS <sub>2</sub> | ULS       |
|------------------|------------------|-----------|
| 2/2000 rad       | 2/300 rad        | 2/150 rad |
| 0,057°           | 0,382°           | 0,764°    |

Abbildung 2-9: Kopfverschiebungen bei unterschiedlichen Bauwerkshöhen

### 2.3.2 Gesamtsetzungen

„Bei den normalen Bauwerken mit Einzelfundamenten sind Gesamtsetzungen (siehe Abbildung 2-4a) bis zu  $t_z = 50$  mm (Tabelle 2-4) oft hinnehmbar. Auch größere gleichmäßige Setzungen können zulässig sein, wenn die Setzungsunterschiede innerhalb der Toleranzwerte bleiben und die Setzung nicht zu Schwierigkeiten mit Leitungsanschlüssen führt oder eine Verkantung verursacht usw.“ ÖNORM EN 1997-1 (2014, S. 175, Absatz 4).

Tabelle 2-4: Maximal zulässige Setzungen

|             |
|-------------|
| $t_z$ 50 mm |
|-------------|

Generell sind die Toleranzwerte mit dem jeweils vorliegenden Stützbauwerk abzustimmen. Liegen Planungsunterlagen vor, werden Grenzwerte in diesen oft festgehalten oder sind vom Bauwerkserhalter vorgegeben. Darüber hinaus kann es Setzungsunterschiede aus unterschiedlichen Schichtungen und Inhomogenitäten im Boden oder aus Mängeln in der Herstellung geben.

## 2.4 Anforderungen an ein Überwachungssystem

Mit den in Kapitel 2.2.2 angeführten möglichen Schadensbilder sowie deren Auswirkung auf die Geometrie des Bauwerks und den in Kapitel 2.3 definierten Grenzwerten sind die wesentlichen Anforderungen an ein Überwachungssystem festgelegt. In Tabelle 2-5 werden die bedeutensten, luftseitig erkennbaren geometrischen Veränderungen bei Bauwerksmängeln mit den Grenzwerten zusammengeführt und Beispiele für Sensoren genannt, mit welchen die Parameter des jeweiligen Schadensbilds direkt oder indirekt erfasst werden

können. Vermerkt werden zudem die nicht invasiven Messmethoden, welche keine Rückkoppelung auf das zu überwachende Objekt verursachen.

Tabelle 2-5: Sensoren zur Erfassung geometrischer Veränderungen bei Mängeln

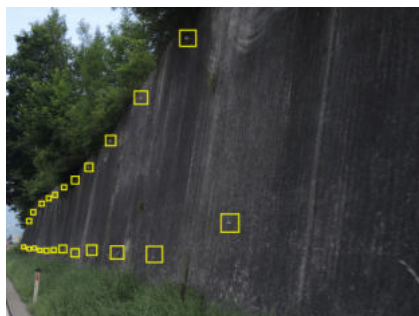
|                                     | SLS <sub>1</sub> | SLS <sub>2</sub> | ULS    | Beispiele für Sensoren  |
|-------------------------------------|------------------|------------------|--------|---|
| <b>Setzung</b>                      | –                | –                | 50 mm  | Schlauchwaage <sup>A</sup> , Tachymeter mit Reflektoren, Nivellier <sup>A</sup> , Synthetic Aperture Radar (SAR) <sup>B</sup> |
| <b>Kopfverschiebung<sup>C</sup></b> | 15 mm            | 100 mm           | 200 mm | Inklinometer, Tachymeter mit Reflektoren, Laserscanner <sup>B</sup> , SAR <sup>B</sup>  |
| <b>Neigung</b>                      | 0,057°           | 0,382°           | 0,764° | Inklinometer <sup>A</sup> , Tachymeter <sup>B</sup> , Laserscanner <sup>B</sup> , SAR <sup>B</sup>                            |
| <b>Verformung</b>                   | –                | –                | –      | Dehnmessstreifen <sup>A</sup> , Faseroptische Sensoren <sup>A</sup> , Laserscanner <sup>B</sup> , SAR <sup>B</sup>            |
| <b>Betonmängel</b>                  | –                | –                | –      | Kamera <sup>B</sup> , Laserscanner <sup>B</sup>   |

<sup>A</sup> Parameter direkt gemessen

<sup>B</sup> nicht invasive Messmethode

<sup>C</sup> bezogen auf eine Bauwerkshöhe  $h=15$  m, siehe Beispiel in Kapitel 2.3.1

Nicht zuletzt bedingt durch den erheblichen Aufwand und die damit verbundenen Kosten wird derzeit nur bei als kritisch eingestuften Stützbauwerken eine geodätische Überwachung im Rahmen einer Sonderprüfung durchgeführt (Kapitel 1.2). Dieses Monitoring beschränkt sich zumeist auf dreidimensionale Verschiebungsmessungen mit einer Totalstation. Die Deformationsmesspunkte werden in regelmäßig angeordneten Messquerschnitten gesetzt und mit Glasprismen oder Bireflectargets bestückt (Abbildung 2-10a). Bedeutender Nachteil dieser Messmethode ist die punktuelle Erfassung von geometrischen Veränderungen. So werden beispielsweise Betonabplatzungen, die ein Versagen ankündigen können, nur in Ausnahmefällen detektiert (Abbildung 2-10b). Messmethoden zur flächenhaften Objekterfassung (z.B. Laserscanning) weisen hier entscheidende Vorteile auf.



(a) Deformationspunkte (gelb)



(b) Nicht erkannte Schadstelle (rot)

Abbildung 2-10: Deformationsmessung mittels Totalstation

### 3 Laserscanning auf mobilen Trägerplattformen

Ein Mobile Mapping System (MMS) ist ein Multisensorsystem zur kinematischen Erfassung der Umgebung inklusive der Objekte in diesem Raum und besteht im Allgemeinen aus einem System zur Trajektorienbestimmung der Trägerplattform und Objektraumsensoren (Abbildung 3-1). Wie in Kapitel 3.1 ausgeführt, besteht ein terrestrisches System zur fortlaufenden Positionierung und Orientierung in der Regel aus zumindest einem GNSS-Empfänger, einer Inertialsensoreinheit (Inertial Measurement Unit, IMU) und einem Radsensor (Distance Measurement Indicator, DMI). Die Objekterfassung erfolgt je nach Anwendung mit verschiedensten Messverfahren (Scanner, Digital- und Videokameras, Ultraschallsensoren u.a.), wobei sich die vorliegende Arbeit auf Multisensorsysteme mit ein oder mehreren Laserscannern beschränkt und in Kapitel 3.2 näher erläutert wird. Vorausgesetzt wird immer, dass die relative Lage zwischen den einzelnen Sensoren bekannt ist und diese zeitlich synchronisiert sind.

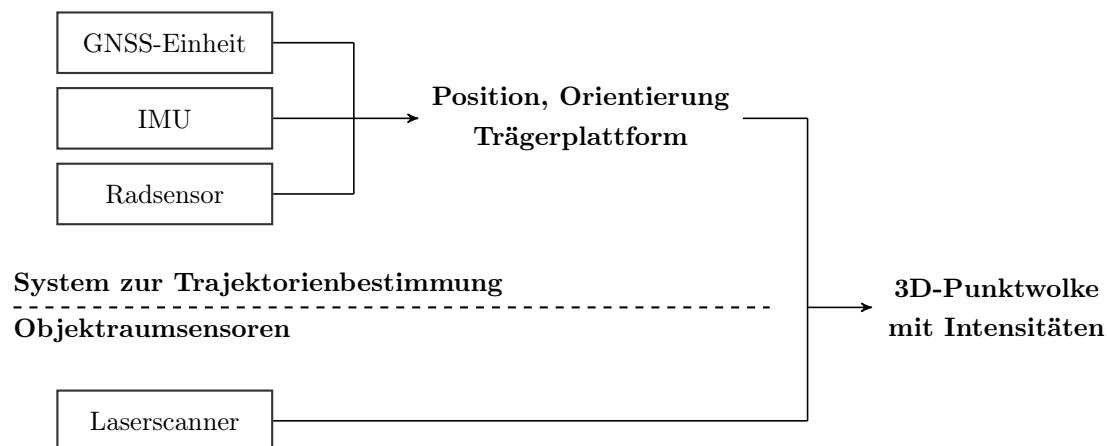


Abbildung 3-1: Komponenten und Prinzip des dynamischen Laserscanning

MMS unterscheiden sich nicht zuletzt durch ihre Trägerplattformen. Diese können Luft-, Wasser- sowie Landfahrzeuge (bemannt als auch unbemannt) sein. Klingbeil et al. (2014) beschreibt einen Trend zu weniger tragfähigeren Trägerplattformen, bedingt durch die immer kleiner und leichter werdenden Sensoren. Neben von Personen getragenen und handgeführten Systemen, hat die Popularität von besonders leichten unbemannten Luftfahrzeugen (Unmanned Aerial Vehicles, UAV) zugenommen. Die vorliegende Arbeit konzentriert sich in weiterer Folge aber ausschließlich auf straßen- bzw. schienengebundene Multisensorsysteme, deren Produktivität in der Produktpalette scanbasierter Messsysteme unübertroffen ist (Hesse et al. 2016, S. 132, Abb. 1). Einen Überblick solcher am Markt verfügbaren Komplettsysteme gibt Kapitel 3.3. Erprobte Anwendungsfelder sind Kapitel 3.4 zu entnehmen.

### 3.1 Georeferenzierung der Scandaten

Um räumliche Informationen aus dynamisch erfassten Laserscandaten in einem globalen Koordinatensystem  $g$  (*global system*) abzuleiten, muss zu jedem Zeitpunkt  $t_s$ , an dem eine Messung zu einem Punkt  $p$  erfolgt, die Position und Raumlage der Trägerplattform bekannt sein. Darüber hinaus ist durch Kalibrierung des Multisensorsystems die räumliche Information (Translation, Rotation) und zeitliche Synchronisierung der Sensoren zueinander zu bestimmen, um Messungen vom Scannerkoordinatensystem  $s$  (*sensor system*) ins Plattformkoordinatensystem  $b$  (*body system*) überzuführen. Abbildung 3-2 zeigt schematisch die Objekterfassung mittels Profilschanner sowie die Transformation der Scannermessungen in ein übergeordnetes Koordinatensystem. Kuhlmann und Klingbeil (2017, S. 96, (1)) beschreibt die Überführung des Koordinatentripels  $p$  mit Formel (3-1). Dabei definiert  $T_b^g$  eine zeitabhängige Koordinatentransformation (Translation, Rotation, Maßstab) vom Plattformkoordinatensystem  $b$  in ein globales System  $g$  und  $T_s^b$  eine Translation und Rotation vom Scannerkoordinatensystem  $s$  ins Plattformkoordinatensystem  $b$ .

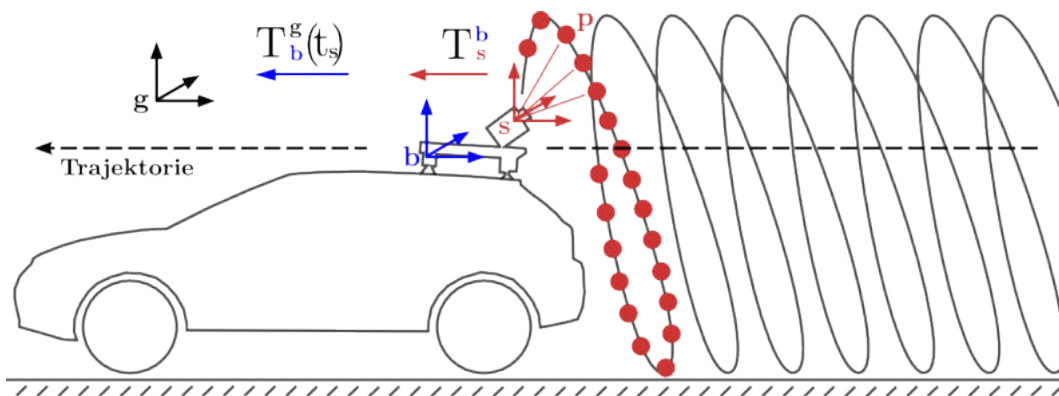


Abbildung 3-2: Georeferenzierung von dynamisch erfassten Laserscandaten

$$p^g = T_b^g(t_s) T_s^b p^s \quad (3-1)$$

Grundsätzlich kann die Transformation  $T_s^b$  während der Messfahrt als konstant angenommen werden, da die Scannerposition und -lage relativ zur Trägerplattform unverändert bleibt. Die Herausforderung liegt also darin, die Fahrzeugtrajektorie zuverlässig und mit hoher Frequenz zu bestimmen. Durch rechnerische Kombination der synchronisierten Sensordaten können Schwächen einzelner Messverfahren kompensiert werden. Die IMU überbrückt beispielsweise GNSS-Ausfälle und das Driftverhalten der IMU wird durch den Radsensor und GNSS-Daten kontrolliert. Aufgrund verschiedenster Messverfahren in diversen Koordinatensystemen und genügend Schnittstellen ist die Sensorfusionierung und -synchronisierung äußerst komplex. Abbildung 3-3 zeigt die Integration absoluter und relativer Sensoren, die mit entsprechenden Update-Algorithmen (Kalman-Filter) Navi-



gationslösungen liefern. Die Rohdaten der einzelnen Messverfahren werden zentral gefiltert und nicht vorprozessiert (*tightly coupled filter*). Die detaillierte Funktionsweise der Systeme sowie Filteralgorithmen zur Datenfusionierung sollen hier nicht weiter besprochen, aber auf entsprechende Literatur verwiesen werden (Hofmann-Wellenhof et al. 2003, Wendl 2011).

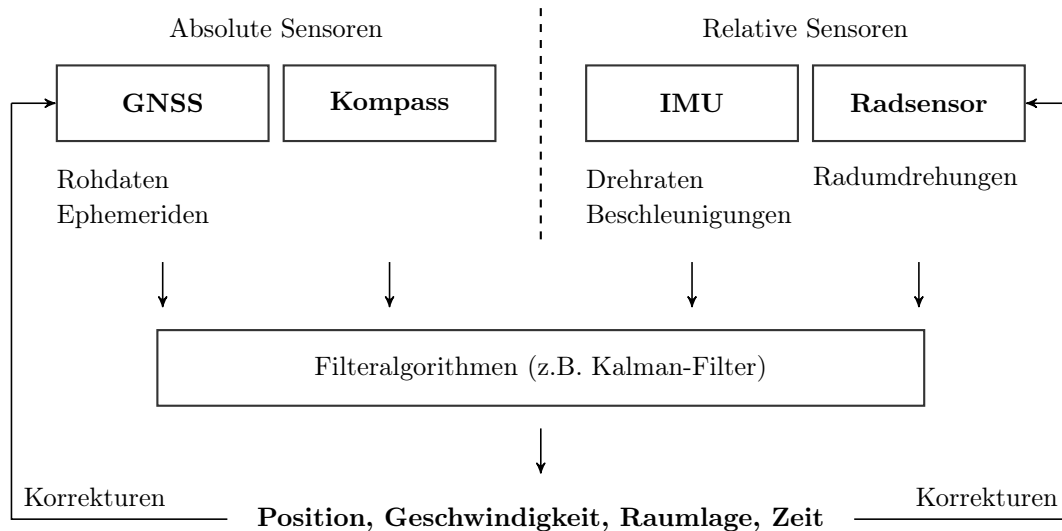


Abbildung 3-3: Integrierte Navigation mit zentraler Filterung

Üblicherweise wird die Trajektorie von straßengebundenen MMS nach Vorliegen der Daten zur relativen GNSS Positionierung im Postprocessing berechnet. Die Verbesserung der Trajektorie mit indirekten Verfahren durch die Objektraumsensoren (siehe Kuhlmann und Klingbeil, 2017, Kap. 2), z.B. anhand künstlicher oder natürlicher Passpunkte, erfolgt aufgrund des erheblichen Mehraufwands in kommerziellen Anwendungen kaum.

## 3.2 Geometrische Objekterfassung mit mobilem Laserscanning

### 3.2.1 Technische Spezifikationen kommerzieller Laserscanner

Bei Multisensorsystemen in terrestrischer Anwendung werden bevorzugt Profils Scanner eingesetzt. Panoramascanner, die auch auf bewegten Plattformen verwendet werden, operieren typischerweise im Profilmodus. Abbildung 3-2 zeigt, dass 2D-Scanner auf der Vorwärtsbewegung im Raum beruhen, bei der ein spiralförmiges 3D-Scanmuster entsteht. Neben einer hohen Messrate, ist die maximale Anzahl an Umdrehungen des Scankopfs pro Sekunde (Profiltrate) entscheidend, um selbst bei hohen Geschwindigkeiten den räumlichen Abstand zweier Scanlinien gering zu halten (siehe auch Abbildung 3-4 und Tabelle 3-2 in Kapitel 3.2.2 sowie Klingbeil et al. 2014, S. 25). Laserscanner, deren Messverfahren auf dem Impulslaufzeitverfahren (Time Of Flight, TOF) basiert, erzielen eine höhere Reich-

weite, wohingegen die Phasenmessungen höhere Messraten mit sich bringen. Die Angaben zu relativen und absoluten Genauigkeiten erfolgen in den Datenblättern der Hersteller sehr individuell und können als Richtwerte dienen. Zudem ist die Genauigkeit von der Distanz, dem Reflexionsvermögen der gescannten Oberfläche sowie dem Auftreffwinkel abhängig.

Technische Spezifikationen der Laserscanner, die für ingenieurgeodätische Anwendungen bei hohen Geschwindigkeiten von besonderer Bedeutung sind, sind in Tabelle 3-1 ersichtlich. Diese Scanner finden auch in den in Tabelle 3-3 angeführten kommerziellen MMS Verwendung.

Tabelle 3-1: Technische Spezifikationen kommerzieller Laserscanner<sup>1</sup>

|  | Scantyp                   | Verfahren | Profilrate<br>[Hz] | Messrate<br>[Pkte./Sek.] | Präzision<br>[mm] | Genauigkeit<br>[mm] |
|--|---------------------------|-----------|--------------------|--------------------------|-------------------|---------------------|
| <b>Amberg<br/>Profilier 6012<sup>2</sup></b> | Profil                    | Phase     | 200                | 1 Mio.                   | 0,5–3             | –                   |
| <b>Leica<br/>ScanStation P20</b>             | Panorama                  | TOF       | 100                | 1 Mio.                   | 1–9               | 3                   |
| <b>Pavement<br/>Profile Scanner</b>          | Profil                    | Phase     | 800                | 1 Mio.                   | 0,3               | –                   |
| <b>Riegl VQ-250</b>                          | Profil                    | TOF       | 100                | 300 Tsd.                 | 5                 | 10                  |
| <b>Riegl VQ-450</b>                          | Profil                    | TOF       | 200                | 550 Tsd.                 | 5                 | 8                   |
| <b>Riegl<br/>VUX-1HA</b>                     | Profil                    | TOF       | 250                | 1 Mio.                   | 3                 | 5                   |
| <b>Velodyne<br/>HDL-32E</b>                  | Vert./Horiz.<br>32 Kanäle | TOF       | 20                 | 2,2 Mio.                 | –                 | 20                  |
| <b>Z+F<br/>Profilier 9012</b>                | Profil                    | Phase     | 200                | 1 Mio.                   | 0,5–3             | –                   |

<sup>1</sup> Angaben sind dem Datenblatt des jeweiligen Herstellers entnommen

<sup>2</sup> baugleich mit Z+F Profiler 9012

### 3.2.2 Räumliche Auflösung von Scandaten

Die Dichte der 3D-Punktwolke ist bei mobilem Laserscanning von der Fahrzeuggeschwindigkeit, der Entfernung zum Objekt sowie der Profilrate und der Messrate abhängig. Diese Parameter bedingen sich auch gegenseitig. Abbildung 3-4 zeigt die Abhängigkeit der Profilabstände von der Profilrate des Scanners und der Fahrzeuggeschwindigkeit unter der Annahme, dass die Fortbewegung entlang einer Geraden erfolgt. Der Scanlinienabstand

wird umso größer, je geringer die Anzahl der Umdrehungen des Scankopfs pro Sekunde und je höher die Geschwindigkeit der Trägerplattform ist.

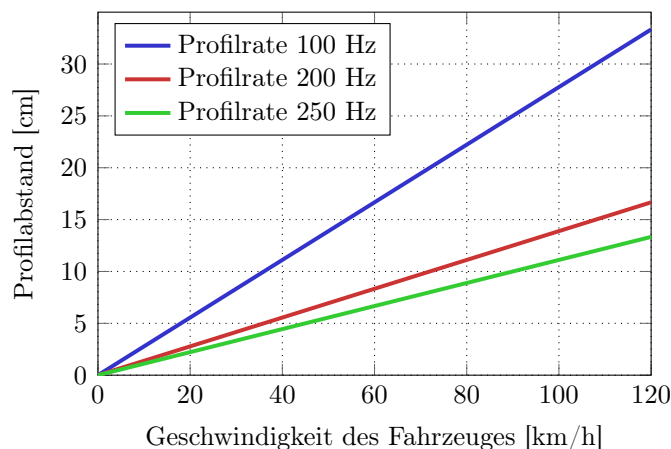


Abbildung 3-4: Punktdichte in Fahrtrichtung

Der Punktabstand innerhalb einer Profilebene wird bei einer großen Anzahl an Messungen pro Umdrehung (Messrate) geringer. Durch Verringerung der Profirate und kürzeren Distanzen zum Objekt wird der Punktabstand ebenso kleiner. Tabelle 3-2 ist der Punktabstand in der Profilebene für Abstände von 10 m, 15 m und 20 m und für die Spezifikationen der kommerziellen Laserscanner aus Tabelle 3-1 zu entnehmen. Zudem werden die Profilabstände für Fahrzeuggeschwindigkeiten zwischen 40 km/h und 100 km/h tabellarisch angeführt.

### 3.2.3 Konfiguration der Scanner

Die Orientierung des Scanners auf der Trägerplattform hat einen maßgeblichen Anteil an der Punktdichte sowie der Abdeckung des zu erfassenden Objekts (Scanschatten) und ist im Hinblick auf den Einsatz automatisierter Algorithmen auf die abgeleitete Punktwolke von großer Bedeutung. Neben der Ausrichtung kann die Verwendung weiterer Laserscanner diese Problematiken vermindern.

Wie Abbildung 3-5a zeigt, ermöglicht die horizontale Verdrehung des Laserscanners die Erfassung von Flächen, die orthogonal zur Trajektorie stehen. Allerdings wird die Distanz zu diesen Flächen größer, je größer der Winkel zwischen der Längsachse des Scanners und der Längsachse des Fahrzeugs wird und führt somit zu einer Reduktion der Punktdichte (Kapitel 3.2.2). Durch die vertikale Verdrehung des Scanners können solche Flächen, zumindest im Überkopf-Bereich, ebenso erfasst werden (siehe Abbildung 3-5b). Ein weiterer Vorteil besteht in der Abtastung von Objekten längs der Trajektorie (z.B. Stützbauwerke). Die Scanlinien von vertikal verdrehten Sensoren werden an diesen Objekten länger, das heißt auch, dass mehr Messpunkte auf dem Objekt liegen (Cahalane et al. 2015, S. 308

Tabelle 3-2: Räumliche Auflösung kommerzieller Scanner in kinematischer Anwendung<sup>1</sup>

|  | Profilabstand [cm] |         |         |          | Punktabstand in der Profilebene [cm] |      |      |
|--|--------------------|---------|---------|----------|--------------------------------------|------|------|
|  | 40 km/h            | 60 km/h | 80 km/h | 100 km/h | 10 m                                 | 15 m | 20 m |
| <b>Amberg Profiler 6012</b>              | 5,6                | 8,3     | 11,1    | 13,9     | 1,2                                  | 1,8  | 2,4  |
| <b>Leica ScanStation P20<sup>2</sup></b> | 11,1               | 16,7    | 22,2    | 27,8     | 0,6                                  | 0,9  | 1,2  |
| <b>Pavement Profile Scanner</b>          | 1,4                | 2,1     | 2,8     | 3,5      | max. Reichweite 5 m                  |      |      |
| <b>Riegl VQ-250</b>                      | 11,1               | 16,7    | 22,2    | 27,8     | 2,0                                  | 3,1  | 4,1  |
| <b>Riegl VQ-450</b>                      | 5,6                | 8,3     | 11,1    | 13,9     | 2,2                                  | 3,3  | 4,5  |
| <b>Riegl VUX-1HA</b>                     | 4,4                | 6,7     | 8,9     | 11,1     | 1,5                                  | 2,3  | 3,1  |
| <b>Velodyne HDL-32E<sup>2</sup></b>      | 55,6               | 83,3    | 111,1   | 138,9    | 0,2                                  | 0,3  | 0,3  |
| <b>Z+F Profiler 9012</b>                 | 5,6                | 8,3     | 11,1    | 13,9     | 1,2                                  | 1,8  | 2,4  |

<sup>1</sup> Annahme: Fortbewegung entlang einer Geraden

<sup>2</sup> Panoramascanner (kein Profils scanner)

bzw. Abbildung 3-5c). Da der Profilabstand in der Regel größer als der Punktabstand in der Profilebene ist (Tabelle 3-2), wird bei hohen Geschwindigkeiten zudem vermieden, dass schmalere Objekte übersehen werden.

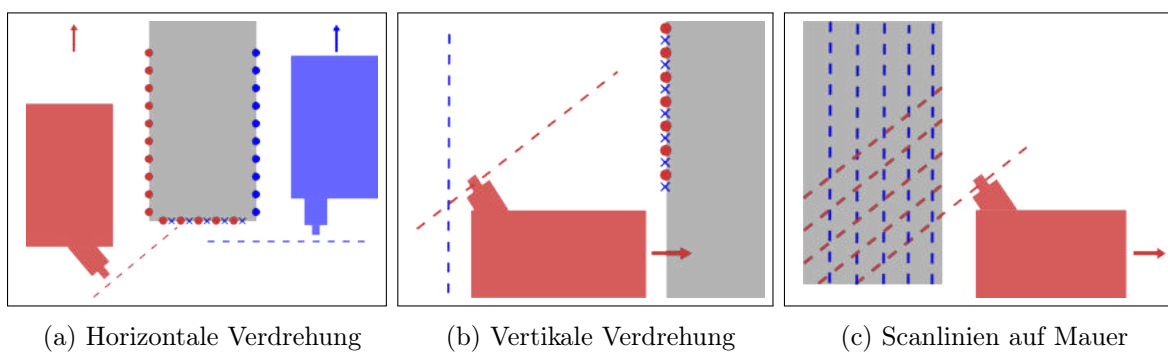
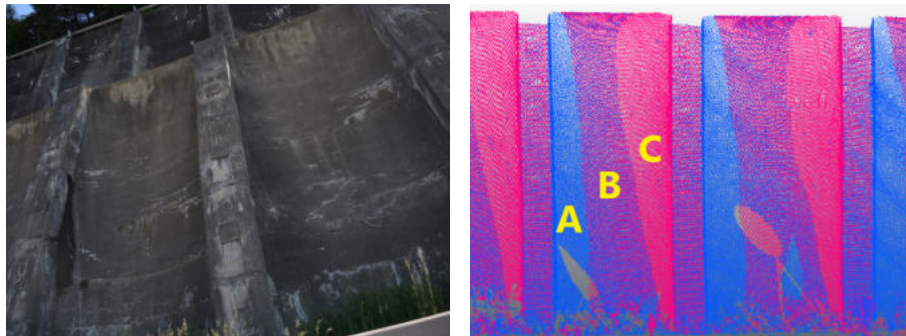


Abbildung 3-5: Scanner-Konfigurationen nach Cahalane et al. (2015)

Der Einsatz eines zweiten Laserscanners in symmetrischer Schmetterlingskonfiguration erhöht die Punktdichte und reduziert Scanschatten. Abbildung 3-6 zeigt anhand der Ankerwand A9 mit aufgelöster Oberfläche (Tabelle 1-4), dass sowohl der rechte (blau) als auch der linke (rot) Sensor Scanschatten produzieren. Durch die Verdrehung der beiden

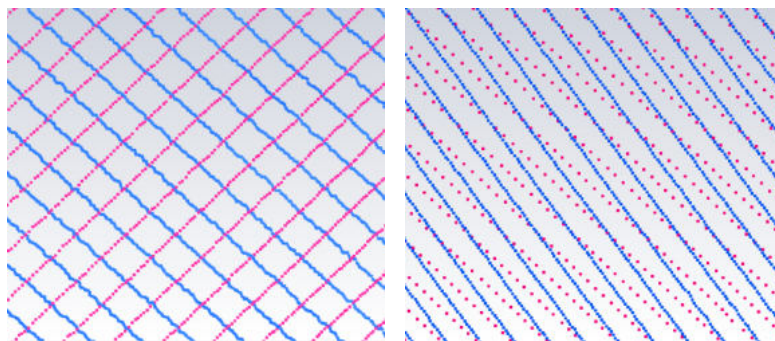
Sensoren zueinander, werden Bereiche, die vom linken Scanner nicht erfasst werden (A), durch den rechten Scanner abgedeckt. Umgekehrt werden Bereiche, die im Scanschatten des rechten Sensors liegen (C), vom linken Scanner erfasst. Flächen, die von beiden Sensoren abgetastet werden (B), weisen eine höhere Punktdichte auf.



(a) Detailbild Stützbauwerk A9 (b) Scanbild des rechten (blau) und linken (rot) Scanners

Abbildung 3-6: Scanschatten, Ankerwand A9

Das symmetrische Dual-Scanner-System ist optimiert für die Aufnahme des Objektraumes links und rechts der Trägerplattform gleichermaßen. So erzeugen die Scanlinien auf der Fahrbahnoberfläche ein rechtwinkliges Gittermuster (Abbildung 3-7a), wohingegen die Scanlinien beim Auftreffen auf eine vertikale Wand nahezu parallel werden (Abbildung 3-7b) oder sogar zusammen fallen können.



(a) Fahrbahn (b) Wand rechts der Trajektorie

Abbildung 3-7: Scanlinien eines Dual-Scanner-Systems in Schmetterlingskonfiguration

Anhand der verschieden dichten Scanlinien aus Abbildung 3-7b ist zu erkennen, dass die Distanzen der beiden Sensoren zu einem Objekt rechts der Trajektorie differieren. Dies resultiert nicht nur daraus, dass der rechte Scanner näher dem Objekt ist, sondern vielmehr aus der Position der Trägerplattform zum Zeitpunkt der Messung. Während der rechte Scanner einen bestimmten Bereich der Mauer vor dem Passieren erfasst, erfolgt

die Messung mit dem linken Scanner erst nach dem Vorbeifahren und zwar aus größerer Entfernung. Der zeitliche Versatz der beiden Messungen von ein und demselben Bereich kann in Bezug auf die Trajektorienbestimmung (z.B. Drift der IMU) von Bedeutung sein.

### 3.2.4 Qualitätsanalyse

Die Beurteilung der metrischen Genauigkeit von 3D-Punktwolken aus mobilen Multi-sensorsystemen ist nach Kuhlmann und Klingbeil (2017, S. 127) überaus komplex und Teil wissenschaftlicher Arbeiten. Üblicherweise wird die Unsicherheit abgeleiteter Größen mittels Fehlerfortpflanzung ermittelt. Alternativ kann die Qualität eines Messsystems empirisch bestimmt werden. Diese beiden Methoden zur Ableitung der metrischen Genauigkeit als Qualitätsparameter von MMS werden in Kuhlmann (2020) diskutiert und hier zusammengefasst.

#### Fehlerfortpflanzung

Um eine Varianzfortpflanzung rechnen zu können, müssen der funktionale Zusammenhang  $x = \varphi(l)$  zwischen den Beobachtungen  $l$  und den zu schätzenden Parametern  $x$ , alle Beobachtungsfehler sowie deren zugrundeliegende Verteilungsfunktionen bekannt sein.

Wie bereits in Kapitel 3.1 erklärt, wird die abgeleitete 3D-Punktwolke in einem übergeordneten System  $g$  nicht nur durch den Laserscanner selbst, sondern auch durch die Navigationssensorik (GNSS, IMU, DMI), die Objektraumsensorik (Scanner) sowie durch die Systemkalibrierung und Datensynchronisierung beeinflusst. Formel (3-2) zeigt die simplifizierte Beobachtungsgleichung für einen einzelnen Punkt der 3D-Punktwolke.

$$\begin{bmatrix} X_g \\ Y_g \\ Z_g \end{bmatrix} = \underbrace{\begin{bmatrix} t_x \\ t_y \\ t_z \end{bmatrix} + R_n^g(L, B)R_b^n(\varphi, \vartheta, \psi)}_{GNSS, IMU, DMI} \left[ \underbrace{\begin{bmatrix} \Delta X \\ \Delta Y \\ \Delta Z \end{bmatrix}}_{Systemkalibrierung} + R_s^b(\alpha, \beta, \gamma) \underbrace{\begin{bmatrix} 0 \\ d\sin(b) \\ d\cos(b) \end{bmatrix}}_{Scanner} \right] \quad (3-2)$$

Die Problematik in Bezug auf Multisensorsysteme ist, dass funktionale Beziehungen oft unbekannt, äußerst komplex (integrierte Navigation) oder ineinandergreifend (Systemkalibrierung) sind. Zudem sind Beobachtungen teilweise vorprozessiert (GNSS-Daten) bzw. sensorinterne Berechnungen unbekannt. Weiters erfolgt die Trajektorienbestimmung kommerzieller MMS in der Software des jeweiligen Herstellers. Die zugrundeliegenden Algorithmen sind oft zur Gänze unbekannt und nicht nachvollziehbar (Black Box). Die Schwierigkeit der Fehlerfortpflanzung inklusive sämtlicher funktionaler Beziehungen und Beobachtungsfehler verdeutlicht Kuhlmann (2020, S. 13 und S. 16).

## Empirische Untersuchung

Wird die Unsicherheit von Messsystemen empirisch bestimmt, muss als Referenz der *wahre* Objektraum vorliegen. Dies ist wohl kaum möglich, kann aber beispielsweise durch einen Versuchsaufbau approximiert werden, in welchem Referenzobjekte mit Sensoren größerer Genauigkeit erfasst werden. Bedeutend ist auch, anhand welcher Kriterien Differenzen gebildet werden (Punktwolkenvergleich, parameterbasierter Vergleich) und wie mittels Differenzen auf Messfehler geschlossen werden kann. Zusätzlich ist einzuschätzen, ob und wie sich Ergebnisse empirischer Untersuchungen auf Anwendungen mit verschiedenen Aufnahmebedingungen übertragen lassen.

### 3.3 Kommerzielle Multisensorsysteme

Neue technische und wirtschaftliche Herausforderungen und die rasche Entwicklung der Laserscanning-Technologie führen zu einer stark wachsenden Nachfrage nach MMS. Parallel dazu wächst die Anzahl an Dienstleistern und Systemen im Bereich der kinematischen Objekterfassung. Ein Auszug fahrzeuggestützter und am Markt verfügbarer Komplettsysteme aus dem hochpreisigen Segment des kinematischen Laserscanning ist Tabelle 3-3 zu entnehmen. Die Bezeichnungen sowie technischen Spezifikationen der Sensoren zur Trajektorienbestimmung können den frei zugänglichen Datenblättern der Hersteller entnommen werden. Allerdings soll erwähnt sein, dass die Sensoren kommerzieller Multisensorsysteme in aller Regel dem aktuellen Stand der Entwicklungen entsprechen und sehr hochwertig sind (Kuhlmann und Klingbeil 2017, S. 98).

Die Entwicklung kommerziell verfügbarer Komplettsysteme ist maßgeblich von der Arbeit zahlreicher Forschungsgruppen weltweit abhängig. Nach Caspary (2002, S. 281) waren zu Beginn der 1990er-Jahre die ersten fahrzeuggebundenen mobilen Messsysteme in Kanada und den USA einsatzfähig. Mit Visat wurde an der Universität Calgary ein videogrammetrisches System entwickelt, welches einen 50 m breiten Straßenkorridor mit einer Genauigkeit von 0,3 m erfasst (Schwarz et al., 1993). Nach knapp zehnjähriger Entwicklungszeit präsentierte das Institut für Geodäsie der Universität der Bundeswehr München das ebenso videogrammetrische Messfahrzeug KiSS (Kinematic Survey System, Heister et al. 1995) und wenige Jahre später das Nachfolgesystem MoSES (Mobiles Straßen-Erfassungssystem, Gräfe et al. 2001). Neben zwei digitalen Videokameras und analogen Kameras, die nach Hesse (2007, S. 16) eine empirisch bestimmte relative Objektpunktgenauigkeit von weniger als 0,1 m erreichen, ist MoSES mit Profilsclannern ausgestattet. Mit einer maximalen Profillrate von 75 Hz sind diese für Anwendungen bei höheren Geschwindigkeiten jedoch kein bedeutender Fortschritt. Das zeitgleich in Japan entwickelte VLMS (Vehicle-born Laser Mapping System, Manandhar und Shibasaki 2000) ist eines

der ersten MMS, welches Profils Scanner als primäre Objektraumsensoren verwendet. Die Kameras werden ausschließlich zur Texturierung verwendet. Durch die sehr geringe Profirate von 10 Hz und durchschnittlichen Fahrzeuggeschwindigkeiten von 40 km/h ist das System ausschließlich für Anwendungen im städtischen Bereich geeignet.

Tabelle 3-3: Multisensorsysteme für straßengebundene Kraftfahrzeuge<sup>1</sup>

|   |   | Position/Orientierung |     |                | Umgebungserfassung       |                |
|---|---|-----------------------|-----|----------------|--------------------------|----------------|
|   |   | GNSS                  | IMU | DMI            | Scanner                  | Kamera         |
|    | <b>Amberg MobileMapping System</b>        | ✓                     | ✓   | ✓              | 2x Amberg Profiler 6012  | ✓              |
|    | <b>Fraunhofer IPM Mobile Mapping</b>      | ✓                     | ✓   | ✓              | Pavement Profile Scanner | ✓              |
|    | <b>Leica Pegasus:Two</b>                  | ✓                     | ✓   | ✓ <sup>2</sup> | Leica ScanStation P20    | ✓              |
|   | <b>Riegl VMX-1HA</b>                      | ✓                     | ✓   | ✓              | 2x Riegl VUX-1HA         | ✓              |
|  | <b>Riegl VMX-450</b>                      | ✓                     | ✓   | ✓              | 2x Riegl VQ-450          | ✓              |
|  | <b>Siteco Road Scanner4</b>               | ✓                     | ✓   | ✓              | 2x Z+F Profiler 9012     | ✓              |
|  | <b>StreetMapperIV Single Survey Grade</b> | ✓                     | ✓   |                | Riegl VUX-1HA            | ✓ <sup>2</sup> |
|  | <b>Topcon IP-S3 HD1</b>                   | ✓                     | ✓   | ✓              | Velodyne HDL-32E         | ✓              |
|  | <b>Trimble MX 8</b>                       | ✓                     | ✓   | ✓              | 2x Riegl VQ-250          | ✓ <sup>2</sup> |
|  | <b>Trimble MX 9</b>                       | ✓                     | ✓   | ✓              | 2x Riegl VUX-1HA         | ✓              |
|  | <b>UltraCam Mustang</b>                   | ✓                     | ✓   | ✓ <sup>2</sup> | Velodyne HDL-32E         | ✓              |

<sup>1</sup> Bilder sind den Broschüren und Datenblättern der Hersteller entnommen

<sup>2</sup> optional



### 3.4 Anwendungen aus der Praxis

Die enorme technologische Entwicklung der einzelnen Sensoren zur kinematischen Objekterfassung öffnete in den letzten Jahren zahlreiche Anwendungsbereiche und der kommerzielle Einsatz von MMS konnte sich längst durchsetzen. Ein Auszug erprobter Einsatzmöglichkeiten von dynamischem Laserscanning in terrestrischer Anwendung ist folgender Aufzählung zu entnehmen. Eine umfangreiche Übersicht der Anwendungsfelder ist auch in Olsen et al. (2013, Kap. 3) zu finden.

– **Erfassung der Fahrbahnoberflächenbeschaffenheit**

Die Beschaffenheit der Fahrbahnoberfläche spielt im Straßenverkehr für die Sicherheit und den Komfort eine gewichtige Rolle. Das Fraunhofer IPM hat zur effizienten Erfassung der 3D-Straßenoberfläche ein mobiles Messsystem entwickelt, das selbst bei Fahrgeschwindigkeiten bis zu 80 km/h kleinste Unebenheiten von wenigen Zehntel-Millimetern erkennt. Kernstück ist der eigens entwickelte Laserscanner, der bezüglich Präzision und Geschwindigkeit bei Profilsclannern neue Maßstäbe setzt (Tabelle 3-1). Der Scanner wird auf einer Höhe von drei Metern am Messfahrzeug montiert und scannt die Straßenoberfläche quer zur Vorwärtsbewegung mit 800 Querprofilen und einer Million Entfernungsmessungen pro Sekunde. Nachteil des Pavement Profile Scanner ist die beschränkte Reichweite von 5 m (IPM, 2016).

– **Dynamische Lichtraumvermessung**

Eine weitverbreitete Anwendung von mobilem Laserscanning ist die Erfassung der Lichtraumverhältnisse, zum Beispiel als Teil der planungsbegleitenden Vermessung. In Nordrhein-Westfalen (Deutschland) wurden im Rahmen der Erstellung von Lageplänen für einen Brückenbau die Höhen von Hochspannungsleitungen mit einem straßenbasierten MMS erfasst, um bestimmte Abstände zu diesen Leitungen bereits bei der Planung der Baustelle einzuhalten (Husen, 2020).

Als Grundlage zur Genehmigung von Groß- und Schwerlasttransporten bieten mobile Laserscandaten auch bei der Ermittlung von Durchfahrtshöhen entscheidende Vorteile gegenüber tachymetrischer Aufnahmen. Die Erfassung der Daten entlang von Schnellstraßen und Autobahnen erfolgt schnell, ungefährdet vom Verkehr und ohne oder mit nur minimaler Einschränkung des Verkehrsflusses (Husen, 2020).

Abhängig von Sperrzeiten und der gewünschten Genauigkeit bietet das schweizerische Unternehmen Amberg Technologies Lösungen zur mobilen Datenerfassung in Anwendung auf Schiene, der Straße, in Tunnels, Kanälen oder Stollen. Diese Messsysteme finden auch hier überwiegend Verwendung in der Ermittlung der Lichtraumverhältnisse. Die akquirierten dreidimensionalen Daten dienen zur Erstellung von Lichtraumkarten mit eingefärbten Lichtraumverletzungen, zu Volumenberech-

nungen sowie zur standardisierten Visualisierung und Dokumentation des Zustandes der erfassten Infrastrukturobjekte wie Tunnelbauten (Amberg Technologies, 2015).

#### – **Detaillierte Erfassung von Grunddaten bei Eisenbahntrassen**

Mit dem Kauf eines MMS verfügt die STRABAG AG nicht nur konzernintern über ein Messsystem zur effizienten Datenerfassung, sondern stellt diese Dienstleistung auch für externe Aufträge zur Verfügung. Im Zuge der Elektrifizierung eines Streckennetzes in der Steiermark (Österreich) erhielt das Unternehmen den Auftrag zur Vermessung einer 51 km langen Gleisstrasse mittels mobilem Laserscanning. Gegenüber herkömmlicher tachymetrischer Aufnahmen bzw. statischer Laserscandaten können detailliertere Grunddaten deutlich schneller erfasst werden. Die generierte Punktwolke dient der Dokumentation der bestehenden Eisenbahntrasse und stellt die Basis für Entwurfs- und Ausführungsplanung<sup>5</sup>.

#### – **Mobile Kartierung der Straßeninfrastruktur**

Fahrzeugbasierte Messsysteme werden vermehrt zur Kartierung der Infrastruktur (Fahrbahnbegrenzungen, Leitplanken, Verkehrsschilder, SOS-Telefone, Straßenlampen, Trennlinien usw.) besonders entlang vielbefahrener Autobahnabschnitte eingesetzt. Die Datenerfassung erfolgt rasch und ohne Einschränkung des Fließverkehrs (Binder, 2015). Die vollautomatisierte Objekterkennung und -klassifizierung aus dreidimensionalen Punktwolken ist für eindeutige Objekte wie Straßenlaternen, Bäume und Straßenschilder bereits möglich, aber maßgeblich von der Punktdichte abhängig (Bendaanane et al., 2015).

Hochaktuelles und detailreiches Kartenmaterial mit Absolutgenauigkeiten von wenigen Zentimetern sind im Bereich des autonomen Fahrens unerlässlich. In der Steiermark (Österreich) wird ein Streckennetz von über 400 km Autobahnen und Schnellstraßen als Testregion für automatisiertes Fahren im öffentlichen Verkehrsraum aufgebaut. Zur Validierung automatisierter Fahrfunktionen werden hiervon hochauflösende und vollständige Referenzkarten der Verkehrsinfrastruktur erstellt. Die im Vorfeld verfügbaren Karten und Vermessungsgrundlagen können die Anforderungen an diese Referenzkarten unmöglich zur Gänze erfüllen, weshalb das gesamte Streckennetz mittels MMS und einer Geschwindigkeit von 80 km/h neu erfasst wurde. Ladstädter et al. (2019) beschreibt neben der konkreten Aufnahme der Straßeninfrastruktur einen Ansatz zur vollautomatisierten Generierung des Kartenmaterials. Aufgrund des immens hohen Personalaufwands für die bis dato manuell erstellten Karten für autonomes Fahren lagern kommerzielle Anbieter diese Arbeit vorwiegend in Billiglohnländer aus.

---

<sup>5</sup>Quelle: <https://3d-mapping.strabag.com>

#### – **3D-Erfassung des öffentlichen Straßenraumes in Städten**

In Regensburg (Deutschland) werden Scan- und Bilddaten zur Texturierung eines bestehenden 3D-Stadtmodells sowie zur Ergänzung des Stadtmodells mit z.B. Informationen zur Lage von Grünflächen, Radwegenetzen und Bushaltestellen eingesetzt. Durch die Einschaltung von 3D-Passpunkten können Genauigkeiten von bis zu einem Zentimeter in Lage und Höhe erreicht werden (Cloud-Vermessung, 2014).

Auch in der südostasiatischen Metropole Jakarta (Indonesien) wird der öffentliche Straßenraum mit einem fahrzeugbasierten MMS erfasst, um die durch das enorme Bevölkerungswachstum extremen Veränderungen der Infrastruktur festzuhalten. Anhand dieser Datengrundlage sollen Programme zur kontrollierten Ausdehnung der Stadt sowie zur Bestandsführung entwickelt werden (Lehmüller, 2015).

#### – **Kartierung von Forststraßen**

Zur Entwicklung von Programmen zur Bestandsführung, Bewertung sowie Analyse wurden in Norditalien Forstwege mit einem MMS dynamisch erfasst. Die flexible Konfiguration des eingesetzten MMS erlaubte die Montage auf einem Pick-Up als auch auf einem Quad, um selbst in steilem Gelände Daten zu akquirieren. Die erfassten Multimediadaten und geometrischen Informationen wurden in einem Geografischen Informationssystem (GIS) zusammengeführt (Siteco, 2015).

Wie auch Kuhlmann (2020, S. 3) erläutert, liegt der Schwerpunkt von MMS aktuell in der Erfassung und Visualisierung der Umgebung. Bis dato fanden sich kaum ingenieurgeodätische Anwendungen wie Deformationsanalysen, da verlässliche Algorithmen für Punktwolken aus mobilem Laserscanning fehlen. Neben der enormen Datenmenge liegt das Problem in der Synchronisierung der gesamten Sensorik sowie bei auftretenden Sensordriften und dem damit einhergehenden Genauigkeitsverlust, obwohl die einzelnen Komponenten kommerzieller Multisensorsysteme hochwertig und sehr präzise sind. Kapitel 4 soll mit einem Lösungsansatz zur robusten Ableitung zustandsrelevanter Parameter von Stützbauwerken aus dynamisch erfassten Scandaten eine ingenieurgeodätische Anwendung für MMS zeigen.

## 4 Grobdetektion von Verdachtsbauten aus mobil erfassten Scandaten

Der Lösungsansatz zur Selektierung von Stützbauwerken mit kritischen Zuständen aus kinematisch erfassten Laserscandaten basiert auf der Analyse von Querschnitten (Profilen). Anhand von Profilen orthogonal zur Fahrzeugtrajektorie werden Neigungsänderungen robust detektiert sowie Schadstellen an der Bauwerksoberfläche (z.B. Abplatzungen) erkannt. Der zugrundeliegende generische Arbeitsfluss ist in Abbildung 4-1 dargestellt.

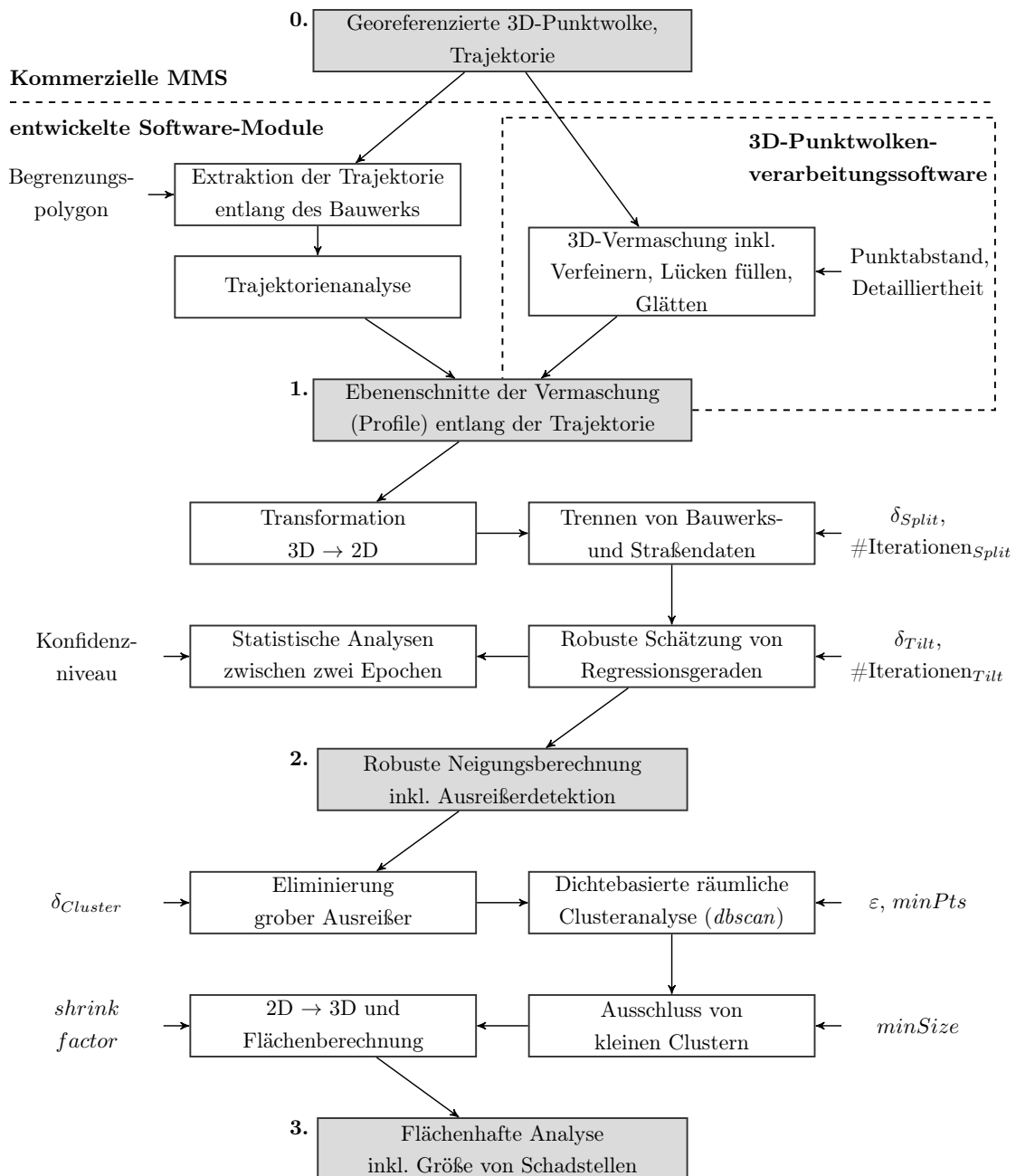


Abbildung 4-1: Lösungsansatz zur Grobdetektion von Verdachtsbauwerken

Die Verifizierung der Methodik anhand realer Messdaten eines mobilen Multisensorsystems ist Kapitel 5 zu entnehmen. Teilergebnisse zur Demonstration des Algorithmus in diesem Kapitel basieren auf denselben Daten.

## 4.1 Generierung von Profilen

Die Profile der Bauwerke sind das Ergebnis von Ebenenschnitten der (vermaschten) Punktwolke orthogonal zur Fahrzeugtrajektorie. Die Fahrzeugposition wird je nach Export-Einstellung in der kommerziellen Software des MMS-Anbieters anhand eines zeitlichen oder räumlichen Abstands diskretisiert (hier alle 2 m). In einem eigens implementierten Software-Modul wird das Trajektorienteilstück entlang eines jeden Bauwerks mittels Begrenzungs-polygon (*minimal bounding polygon*) extrahiert (siehe Abbildung 4-2) und die Datenqualität analysiert. Die Trajektorie wird auf Inhomogenitäten, wie Sprünge, untersucht und Parameter, die für ein gleichmäßiges Abtasten des Bauwerks relevant sind (Geschwindigkeit, Beschleunigung, euklidische Distanz zwischen zwei Positionslösungen), überprüft.

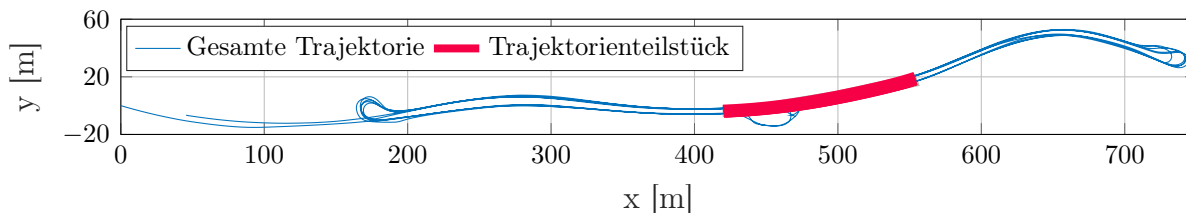


Abbildung 4-2: Fahrzeugtrajektorie mit extrahiertem Teilstück entlang der Mauer S1

Die Vermaschung der Punktwolken erfolgt in der kommerziellen Software 3DReshaper (siehe Abbildung 4-3b). Es sei angemerkt, dass auch andere Softwareprodukte zur Bearbeitung und Vermaschung von 3D-Punktwolken verwendet werden können. Die Parameter der Netzbildung (mittlerer Punktabstand, Filter für abweichende Punkte, Stärke der Glättung) sind auf das vorliegende Objekt sowie dessen Punktwolke abzustimmen. Einerseits soll die Punktwolke geglättet werden, um z.B. Messrauschen zu reduzieren, andererseits sind Details der Bauwerke zu erhalten. Abbildung 4-3c zeigt die in 3DReshaper berechneten Profile entlang eines vorgegebenen Pfades (Fahrzeugtrajektorie) mit einer Schrittweite von 0,05 m. Um die Profile weiter in eigens implementierten Modulen verwenden zu können, werden die Kantenpunkte dieser als Polylinien exportiert. Tabelle 4-1 gibt die Anzahl der Profile für jedes Stützbauwerk an.

Tabelle 4-1: Anzahl der Profile für eine Schrittweite von 0,05 m

| Bauwerk   | A3   | A4   | A6   | A9   | S1   | S7   |
|-----------|------|------|------|------|------|------|
| # Profile | 1500 | 4800 | 7020 | 2320 | 2593 | 1400 |

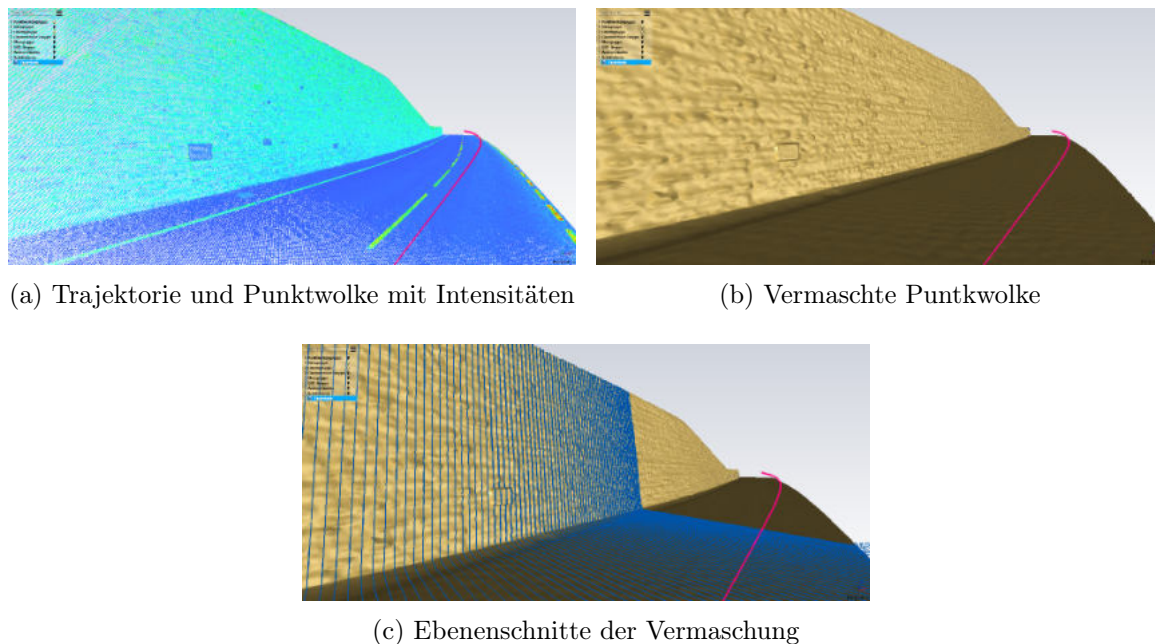


Abbildung 4-3: Generierung von Profilen in 3DReshaper, Mauer S1

Mathematisch beschreiben die Profile Schnittlinien zwischen der Vermaschung und Ebenen orthogonal auf einen definierten Pfad. Neben diesem Standardwerkzeug in Punktwolkenverarbeitungsprogrammen sind auch Funktionen zu finden, die bei der Profilerzeugung direkt auf die 3D-Punktwolke zugreifen. Dabei können Einstellungen zur Rauschminimierung, Ebenenstärke sowie Glättung getroffen werden.

## 4.2 Neigungsberechnung

Die Grundidee der Neigungsberechnung basiert auf der Schätzung von Geraden aus einem ausreißerbereinigten Datensatz (*consensus set*), der mit Hilfe des RANSAC-Algorithmus (Random Sample Consensus) iterativ gefunden wird. Der *consensus set* ist die größtmögliche Datenmenge innerhalb einer definierten Schranke  $\delta$ , die während einer fixen Anzahl an Iterationen eruiert wird. Im Vergleich zur Methode der kleinsten Quadrate ist der RANSAC-Algorithmus robust gegenüber einer großen Anzahl an Ausreißern und groben Fehlern (Fischler und Bolles, 1981).

In einem ersten Schritt werden die 3D-Koordinaten des globalen Koordinatensystems (hier UTM Zone 33N) in ein lokales 2D-Bauwerkssystem transformiert. In diesem System bleibt die Z-Achse (ellipsoidische Höhe) unverändert. Die Abszisse beschreibt den Horizontalabstand der Objektpunkte (X,Y) zum Ursprung (0,0). Einfachheitshalber wird der Rechtswert um den Minimalwert reduziert.

Weiters werden in jedem Profil die Punkte des Bauwerks von denen der Straße separiert. Dazu sucht der RANSAC-Algorithmus jene beiden Punkte, welche eine Gerade mit maximaler Punkteanzahl innerhalb der Schranke  $\delta_{Split}$  definieren. Anhand dieser Menge

wird eine Regressionsgerade geschätzt. Abhängig von der Höhe des Stützbauwerks im Vergleich zur Straßenbreite bildet die Regressionsgerade entweder die Fahrbahn oder das Bauwerk selbst ab (Abbildung 4-4a). Die Steigung der Geraden gibt darüber Aufschluss.  $\delta_{Split}$  bestimmt den maximal zulässigen Normalabstand der Kantenpunkte des Profils zu jener Geraden, die den *consensus set* definiert und ist großzügig auf die Rauheit der Bauwerksoberfläche inklusive Bewuchs abzustimmen (siehe Tabelle 4-2).

Tabelle 4-2: Eingangsparemeter der robusten Neigungsableitung

| Bauwerk                 | A3    | A4    | A6    | A9    | S1    | S7    |
|-------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| $\delta_{Split}$ [m]    | 0,05  | 0,05  | 0,10  | 0,20  | 0,20  | 0,20  |
| #Iterationen $_{Split}$ | 100   | 100   | 100   | 100   | 100   | 100   |
| $\delta_{Tilt}$ [m]     | 0,003 | 0,003 | 0,015 | 0,080 | 0,040 | 0,090 |
| #Iterationen $_{Tilt}$  | 200   | 200   | 200   | 200   | 200   | 200   |

Analog dazu wird aus den separierten Bauwerkspunkten wiederum ein *consensus set* ermittelt und eine Regressionsgerade geschätzt. Hier sind die Eingangsparemeter  $\delta_{Tilt}$ , #Iterationen $_{Tilt}$  aus Tabelle 4-2 sensitiver zu wählen, da die Geradenschätzung von Fugen, Ankerköpfen, Vegetation sowie Schadstellen an der Bauwerksoberfläche unbeeinflusst sein soll.  $\delta_{Tilt}$  ist so zu definieren, dass eben solche Merkmale als Ausreißer identifiziert werden (siehe Abbildung 4-4b und 4-4c). Eine Schwäche dieser Methode ist das Erkennen von regelmäßigen vertikalen Elementen, die sich über die gesamte Bauwerkshöhe ausdehnen (z.B vertikale Fugen, siehe Abbildung 4-6, Station 54 m). Ein Lösungsansatz hierfür könnte die Berechnung horizontaler Profile sein.

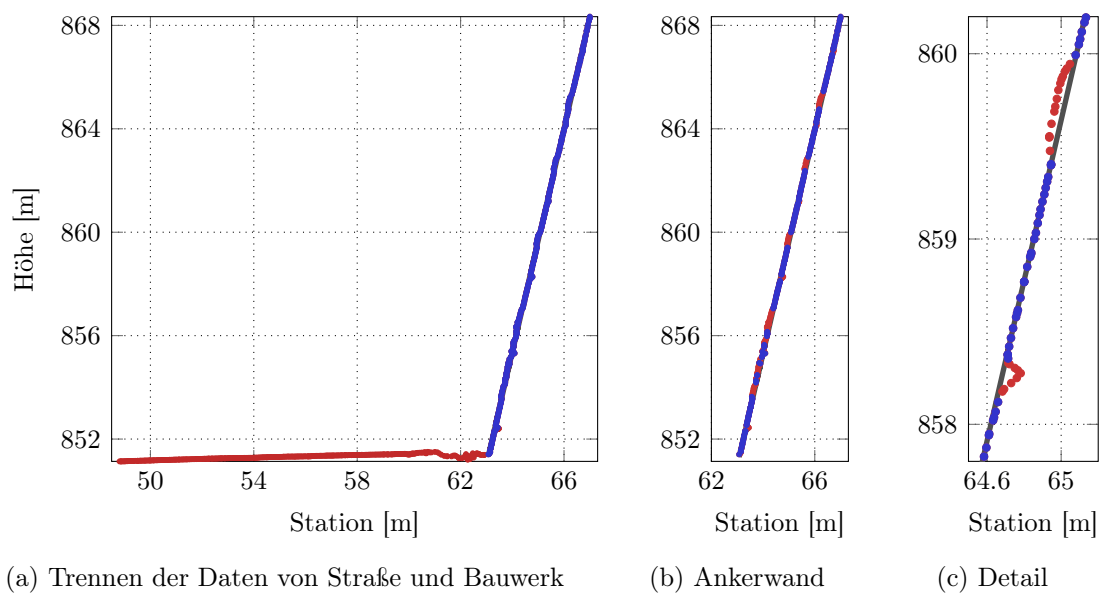


Abbildung 4-4: Robustes Schätzen von Regressionsgeraden, Ankerwand A6

Die Neigung eines jeden Profils wird in Bezug zur Ordinate (Z-Achse bzw. Höhe) gerechnet, die mit einer absoluten Genauigkeit von  $0,005^\circ$  bestimmt werden kann (siehe Kapitel 5.1.1). Alternativ kann der Winkel zwischen der Regressionsgeraden der Straße und der des Bauwerks ermittelt werden. Neben dem Neigungswert wird die Standardabweichung der Normalabstände sowie die Anzahl der Ausreißer im Verhältnis zur Anzahl der Kantenpunkte für jedes Profil dokumentiert. Tabelle C-1 in Anhang C zeigt diese Ergebnisse gemittelt über die gesamte Bauwerkslänge für jedes Stützbauwerk und alle Versuchsfahrten. Diese Werte lassen auf die Güte der empirisch bestimmten Eingangsparameter aus Tabelle 4-2 rückschließen.

Die Qualität der Neigungsberechnung wird durch Vergleiche verschiedener Messfahrten analysiert. Verglichen werden die Profile stationsweise über die gesamte Bauwerkslänge. Je nach Güte der GNSS-Positionierung des Trägerfahrzeuges differieren die Stationsdaten absolut. Wird der Abstand zwischen den Profilen (Schrittweite) klein gehalten, ist die Differenz aus der Positionierung vernachlässigbar, da kleinräumige Neigungsänderungen für Stützbauwerke untypisch sind (siehe Kapitel 2). Zudem ist die Berechnung der Regressionsgeraden unabhängig von Elementen der Bauwerksoberfläche (z.B. Ankerköpfe). Im Vergleich zweier Messfahrten einer Epoche (Annahme: keine Neigungsänderungen) zeigt sich, dass scheinbare Neigungsdifferenzen in Bereichen von vertikalen Fugen und Abschnitten mit geringer Bauwerkshöhe auftreten (Abbildung 4-5).

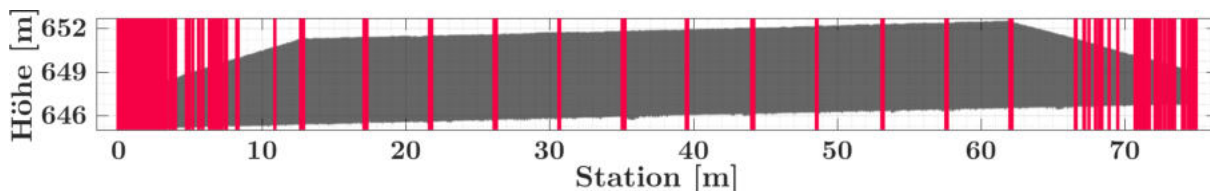


Abbildung 4-5: Ausreißer in den Neigungsdifferenzen, Gewichtsmauer A3

Anhand von Mehrfachfahrten innerhalb einer Epoche wird die minimal detektierbare Neigungsdifferenz berechnet. Diese beschreibt jene Neigungsänderung  $\Delta_{tilt}$  zwischen zwei Epochen, die vorliegen muss, um sie mit einer Sicherheitswahrscheinlichkeit von  $1-\alpha$  (hier 95 %) erkennen zu können. Es liegt ein statistischer Test von Mittelwerten mit unbekanntem und verschiedenen Varianzen vor, der einer Student-t-Verteilungsfunktion unterliegt. Die Nullhypothese  $H_0$

$$H_0 : \Delta_{tilt} = 0 \quad \text{mit} \quad H_A : \Delta_{tilt} \neq 0 \quad (4-1)$$

wird verworfen, wenn für die Testgröße  $\hat{t}$

$$|\hat{t}| > t_{f, 1-\frac{\alpha}{2}} \quad \text{mit} \quad \hat{t} = \frac{\Delta_{tilt}-0}{s_{\Delta_{tilt}}} \quad \text{und} \quad f = n - 1 \quad (4-2)$$



gilt. Für die minimal detektierbare Neigungsänderung  $\Delta_{tilt}$  folgt

$$|\Delta_{tilt}| > t_{f,1-\frac{\alpha}{2}} s_{\Delta_{tilt}}. \quad (4-3)$$

Der statistische Test setzt voraus, dass die Neigungsdifferenzen sowie deren Standardabweichung  $s_{\Delta_{tilt}}$  einer Normalverteilung folgen und von Ausreißern bereinigt sind. Ausreißer in den Neigungsdifferenzen, wie sie Abbildung 4-5 zeigt, werden mit der  $3\sigma$ -Methode

$$\delta_{\Delta_{tilt}} = \Delta_{tilt}^- \pm 3s \quad (4-4)$$

ermittelt und eliminiert. Für den Erwartungswert (Median) und die Dispersion (MAD, mittlere absolute Abweichung) werden robuste Schätzer verwendet. Die *robuste* Standardabweichung  $s$  aus Formel (4-5) ergibt sich aus dem Produkt von MAD und dem Kehrwert des 75%-Quantils der standardisierten Normalverteilung.

$$s = \frac{1}{z_{1-\frac{0,5}{2}}} MAD \quad \text{mit} \quad MAD = median(|\Delta_{tilt}^- - \Delta_{tilt}|) \quad (4-5)$$

### 4.3 Flächenhafte Bauwerksanalyse

Datengrundlage der flächenhaften Analyse sind die in der Neigungsberechnung bestimmten Normalabstände zur Regressionsgeraden aller Profile (Abbildung 4-6a und 4-6b). Mittels dichtebasierter räumlicher Clusteranalyse (Density-Based Spatial Clustering of Applications with Noise, DBSCAN) werden die Ausreißer gruppiert (Abbildung 4-6c) und anschließend deren Gruppengröße (Fläche, Volumen) ermittelt.

Um die rechenintensive Operation zu entlasten, werden in einem ersten Schritt grobe Fehler in den Ausreißern (z.B. Fehler in der Vermaschung) größer eines Grenzwertes  $\delta_{Cluster}$  eliminiert und die Daten nach ihren Vorzeichen separiert. DBSCAN basiert auf der Idee der Dichtegemeinschaft von Clustern, die eine beliebige geometrische Form annehmen können (Ester et al., 1996). Finden sich in einem Radius  $\varepsilon$  um einen Punkt zumindest  $minPts$  Punkte, werden diese einem Cluster zugewiesen. Cluster mit weniger als  $minSize$  Punkten und nicht zugeordnete Punkte werden als Rauschen identifiziert.

Um die Fläche und das Volumen eines Clusters zu berechnen, wird dieser eingegrenzt. Die Straffheit des begrenzenden Polygons wird mit dem *shrink factor* definiert. Ein *shrink factor* von 0 definiert eine konvexe Hülle, ein Wert von 1 zieht die Hülle kompakt um den Cluster. Für eine metrisch unverzerrte Flächen- und Volumsberechnung werden die Koordinaten der Cluster im ursprünglichen 3D-System verwendet.

Ziel der räumlichen Clusteranalyse ist die Gruppierung von Daten, die durch Schäden an der Bauwerksoberfläche (siehe Kapitel 2.2.2), durch bauwerkstypische Elemente,

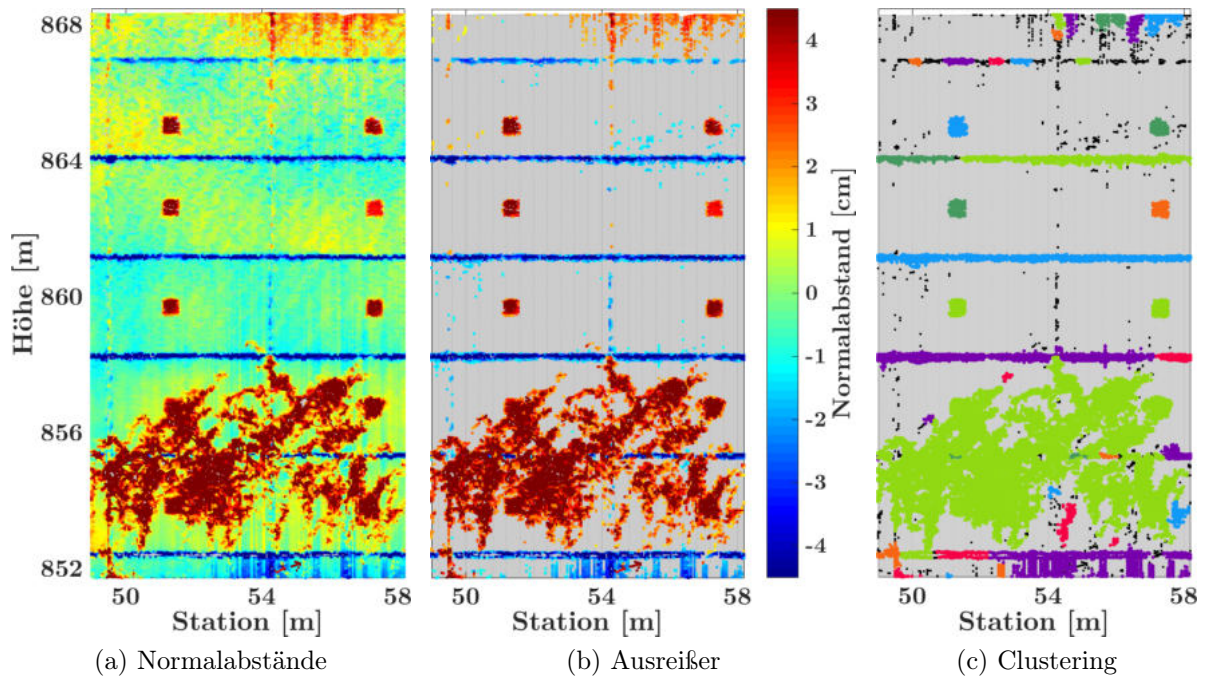


Abbildung 4-6: Räumliche Clusteranalyse der Normalabstände, Ankerwand A6

wie Fugen und Anker, oder durch Vegetation begründet ist. Entscheidend dafür ist die Definition der Eingangsparameter des Algorithmus, die auf jeden Bauwerkstyp sowie auf die Qualität und Dichte der Scandaten abgestimmt werden müssen. Tabelle 4-3 führt die empirisch ermittelten Werte für die erfassten Stützbauwerke der Versuchsfahrten an.

Tabelle 4-3: Eingangsparameter der räumlichen Clusteranalyse

| Bauwerk                | A3   | A4   | A6   | S1   |
|------------------------|------|------|------|------|
| $\delta_{Cluster}$ [m] | 0,10 | 0,10 | 0,20 | 0,20 |
| $\varepsilon$ [m]      | 0,10 | 0,15 | 0,15 | 0,10 |
| $minPts$               | 6    | 6    | 15   | 6    |
| $minSize$              | 20   | 20   | 20   | 40   |
| $shrink\ factor$       | 0,2  | 0,2  | 0,2  | 0,2  |

Die Punktdichte bei hohen Bauwerken, wie der Ankerwand A6 mit einer Höhe von 18 m, variiert stark. Eine Entfernungsänderung von 10 m reduziert die Punktdichte bereits um 12 mm (siehe auch Tabelle 3-2). Die Qualität der Vermaschung und folglich die Güte des Clusterings nimmt mit zunehmender Höhe ab. Abbildung 4-6 zeigt, dass Fugen, Ankerköpfe und Bewuchs im oberen Bereich der Wand beschränkt detektierbar sind.

## 5 Validierung der Methodik anhand realer Messdaten

### 5.1 Messsystem und Datenakquise

#### 5.1.1 Amberg Mobile Mapping System

Zur Validierung des generischen Arbeitsflusses aus Kapitel 4 stand das Messfahrzeug von Amberg Technologies (siehe Abbildung 5-1) zur Verfügung. Die vorliegende Methodik zur Zustandserfassung von Stützbauwerken beschränkt sich jedoch nicht auf dieses Messsystem. Die georeferenzierte 3D-Punktwolke sowie die Trajektorie als Basis des vorgestellten Algorithmus kann mit jedem kommerziellen MMS der neuesten Generation erfasst werden.

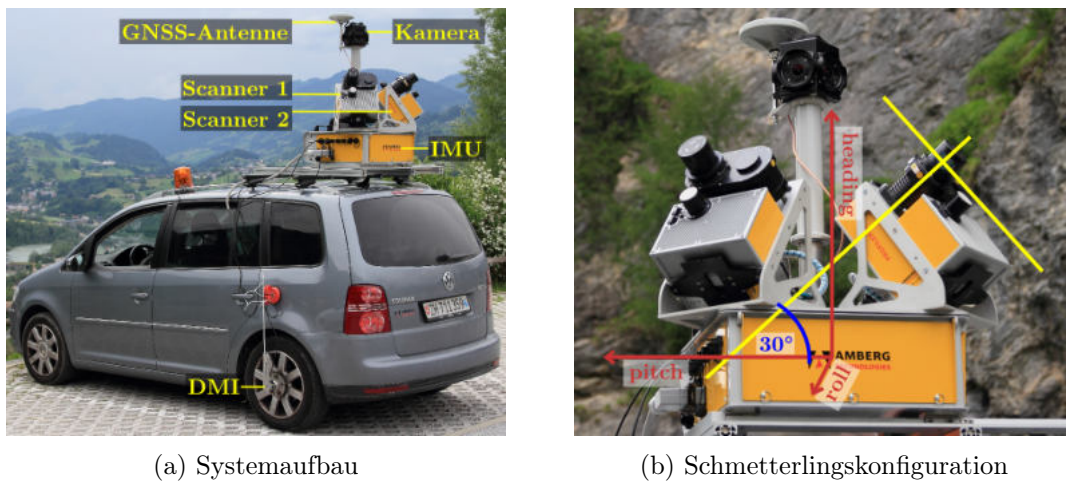


Abbildung 5-1: Amberg Mobile Mapping System

Das Amberg Mobile Mapping System ist ein kommerzielles Multisensorsystem der Firma SITECO Informatica, die die Messplattform unter dem Namen Siteco Road Scanner4 vertreiben. Das vorliegende MMS ist mit folgender Sensorik ausgestattet:

- **Applanix POS LV 510 zur Positionierung und Orientierung**

Das System besteht aus einer IMU-46 (Drift  $0,1^\circ/h$ , FOG-Drehratensensor) mit einer Datenaufzeichnung von 200 Hz und einem Radsensor mit einer Messrate von 1024 Pulsen pro Umdrehung. Der geodätische GNSS-Empfänger Trimble BD982 mit Antenne unterstützt GPS, Galileo, GLONASS, Compass und BeiDou sowie mehrere Frequenzen (L1, L2, L2C, L2E, L5). Im Datenblatt wird die absolute Systemgenauigkeit der gefilterten Trajektorie mit 2 cm in der Lage und 5 cm in der Höhe spezifiziert. Die Raumlage kann mit einer Genauigkeit von  $0,005^\circ$  um die Längs- und Querachse (roll, pitch) und  $0,015^\circ$  um die Vertikalachse (true heading) bestimmt werden.

– **2x Amberg Profiler 6012 (baugleich mit Z+F Profiler 9012)**

Das MMS von Amberg Technologies verfügt über zwei profilgebende 2D-Lasermesssysteme mit einer Messrate von je einer Million Punkte pro Sekunde, einer Profillrate von 200 Hz und einer maximalen Reichweite von 119 m. Die Präzision wird vom Hersteller mit 0,5 mm bis 3 mm spezifiziert (siehe Tabelle 3-1). Die beiden Profils Scanner sind in symmetrischer Schmetterlingskonfiguration am Trägerfahrzeug montiert und schließen um die Vertikalachse einen rechten Winkel ein. Um die Querachse sind die Laserscanner so verdreht, dass die Scanebenen mit der Vertikalachse einen Winkel von 30° einschließen (Abbildung 5-1b).

– **Point Grey/FLIR Ladybug5 (360°-Kamera)**

Das verwendete Kamerasystem Ladybug5 setzt sich aus sechs Einzelkameras mit je fünf Megapixel zusammen und deckt etwa 90% der Umgebung ab.

### 5.1.2 Versuchsfahrten

Am 8. Juni 2016 wurden im Großraum Bischofshofen in Salzburg (Österreich) Messfahrten mit dem MMS von Amberg Technologies durchgeführt. Dabei wurden die in Kapitel 1.4, Tabelle 1-1 bis 1-7 angeführten sieben Stützbauwerke erfasst. Die Messfahrten entlang dieser wurden bei unterschiedlichen Fahrgeschwindigkeiten (40 km/h bis 100 km/h) und variierenden Abständen zu den Bauwerken mehrfach wiederholt. Tabelle 5-1 gibt eine Übersicht aller Versuchsfahrten für jedes Bauwerk. Einschließlich des Systems zur Trajektorienbestimmung wurden 340 GB an Rohdaten erfasst.

Aufgrund der geografischen Lage der Stützbauwerke sowie der Möglichkeit zur Nutzung von Betriebsumkehren, erfolgten die Aufnahmen der Ankerwände A6 und A9 (Tauernautobahn A10) am Vormittag bei Sonnenschein und anschließend die Messfahrten entlang der Stützmauer A3 und Ankerwand A4 (Autobahnzubringer B311). Am Nachmittag wurden bei bedecktem Himmel und teilweise leichtem Regen die Bauwerke S1 (Bundesstraße B99), S6 (Bundesstraße B163) und S7 (Landesstraße L109) erfasst.

In enger Abstimmung mit der Autobahnmeisterei fanden die Messfahrten auf der Tauernautobahn trotz des gewöhnlich hohen LKW-Aufkommens ohne Rückhaltung des Verkehrs statt. Die Aufnahmen entlang der Bundes- und Landesstraßen wurden von der Straßenmeisterei begleitet. Während der Messfahrten wurde die Strecke abgesichert, um die Versuche ohne Beeinträchtigung anderer Verkehrsteilnehmer durchzuführen (siehe Tabelle 5-1, Nutzung des linken Fahrstreifens).

Tabelle 5-1: Übersicht der Versuchsfahrten

| Autobahn                 |             | Bundes- und Landesstraße       |                          |
|--------------------------|-------------|--------------------------------|--------------------------|
| Bezeichnung              | Anmerkung   | Bezeichnung                    | Anmerkung                |
| A3 – 60kmh – 1           |             | S1 – 60kmh – 1                 |                          |
| A3 – 60kmh – 2           |             | S1 – 60kmh – 2                 |                          |
| <b>A3</b> A3 – 80kmh – 5 |             | <b>S1</b> S1 – 60kmh – 3 – 2Sp | 2. Spur <sup>1</sup>     |
| A3 – 80kmh – 6 – 2Sp     | Überholspur | S1 – 60kmh – 4 – mPl           | mit Platten <sup>2</sup> |
| A3 – 100kmh – 7 – 2Sp    | Überholspur | S1 – 80kmh – 5 – mPl           | mit Platten <sup>2</sup> |
| A4 – 60kmh – 1           |             | S6 – 40kmh – 1                 |                          |
| A4 – 60kmh – 2           |             | S6 – 40kmh – 2                 |                          |
| <b>A4</b> A4 – 80kmh – 5 |             | <b>S6</b> S6 – 40kmh – 3 – 2Sp | 2. Spur <sup>1</sup>     |
| A4 – 80kmh – 6 – 2Sp     | Überholspur | S6 – 60kmh – 4                 |                          |
| A4 – 100kmh – 7 – 2Sp    | Überholspur |                                |                          |
| A6 – 60kmh – 1           |             | S7 – 60kmh – 1                 |                          |
| A6 – 60kmh – 2           |             | S7 – 60kmh – 2                 |                          |
| <b>A6</b> A6 – 80kmh – 5 |             | <b>S7</b> S7 – 60kmh – 4 – 2Sp | 2. Spur <sup>1</sup>     |
| A6 – 80kmh – 6 – 2Sp     | Überholspur | S7 – 40kmh – 5                 |                          |
| A6 – 100kmh – 7          |             |                                |                          |
| A9 – 60kmh – 1           |             |                                |                          |
| A9 – 60kmh – 2           |             |                                |                          |
| <b>A9</b> A9 – 80kmh – 5 |             |                                |                          |
| A9 – 80kmh – 6 – 2Sp     | Überholspur |                                |                          |
| A9 – 100kmh – 7          |             |                                |                          |

<sup>1</sup> Gegenfahrbahn (Fahrtrichtung unverändert) - Abstand zu Bauwerk wird kleiner

<sup>2</sup> zur Simulation von Oberflächenveränderungen

### Simulation: Oberflächenveränderung Bauwerk S1

Um die Möglichkeiten und Grenzen der dynamisch erfassten Laserscandaten hinsichtlich kleinflächiger Veränderungen aufzuzeigen, wurden an der Schwergewichtsmauer S1 (Tabelle 1-5) Hartschaumplatten unterschiedlicher Größen fixiert. Abbildung 5-2 zeigt die am Stützbauwerk angebrachten Platten, die das Hervortreten einzelner Steinblöcke der rauhen Vorsatzschale simulieren sollen. Die Maße der matt lackierten Hartschaumplatten aus Styropor sind Tabelle 5-2 zu entnehmen. Die Qualität der Rückstreuung des Laserlichts von den Probekörpern wurde in einem Experiment mit einer scannenden Totalstation untersucht. Die Ergebnisse sind in Anhang B ersichtlich.

Tabelle 5-2: Maße der Probekörper, Länge x Höhe x Stärke [cm]

| Platte P1         | Platte P2         | Platte P3         | Platte P4        |
|-------------------|-------------------|-------------------|------------------|
| 79,5 x 57,5 x 8,0 | 50,0 x 30,0 x 8,0 | 50,0 x 29,5 x 3,0 | 19,5 x 9,5 x 3,0 |

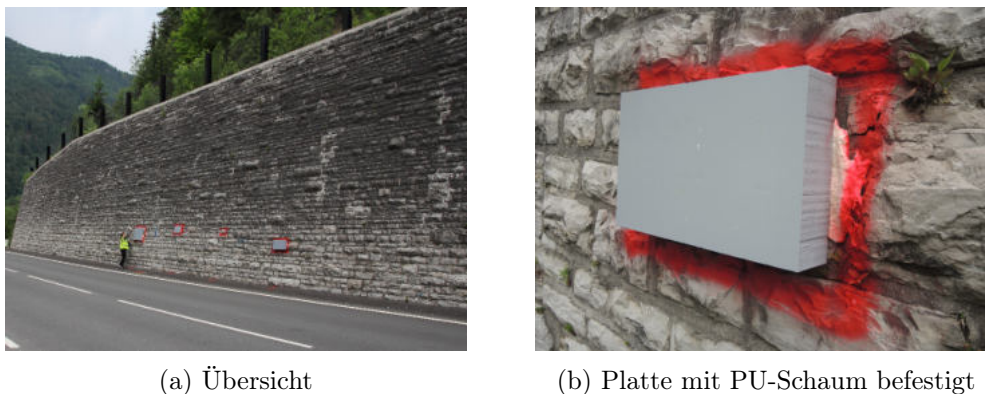


Abbildung 5-2: Montage von Hartschaumplatten auf der Schwergewichtsmauer S1

### 5.1.3 Datenaufbereitung

Die Messdaten der Versuchsfahrten mit dem Amberg Mobile Mapping System wurden in der MMS-Software von SITECO Informatica vorprozessiert. Zur Verbesserung der GNSS-Positionen standen RINEX Datensätze (Datenrate 1 Sekunde) von vier umliegenden Referenzstationen (Dienten, Gaisberg, Hauser Kaibling, Schareck) des Positionierungsdienstes vom Bundesamt für Eich- und Vermessungswesen (BEV) zur Verfügung. Mittels relativer GNSS-Positionierung sowie der IMU- und DMI-Daten wurde die Fahrzeugtrajektorie bestimmt (siehe Kapitel 3.1). Ergebnis der Datenaufbereitung und Grundlage des in Kapitel 4 vorgestellten Lösungsansatzes sind die Positionen und Orientierungen des Trägerfahrzeuges zu eindeutig definierten Zeitpunkten im UTM-System Zone 33N wie auch die georeferenzierte Punktwolke.

Die Kalibrierung des Komplettsystems erfolgte in der Schweiz vor der Anreise. Durch die neuerliche Montage in Salzburg (Österreich) kam es zu einer geringfügigen Verdrehung des Systemaufbaus im Vergleich zur Kalibrierfahrt. Diese begründet distanzabhängige Differenzen zwischen den Daten der beiden Laserscanner im Bereich von einem bis zehn Zentimetern. Eine erneute Kalibrierung mit natürlichen Passpunkten entlang der Messstrecke und einer wiederholten Georeferenzierung der Scandaten minimiert den Offset der beiden Punktwolken auf  $<1\text{ cm}@10\text{ m}$  und  $2\text{ cm}@20\text{ m}$ . Demzufolge ist eine Systemkalibrierung unmittelbar vor Beginn von Messfahrten für ingenieurgeodätische Anwendungen unabdingbar.

## 5.2 Detektion von Neigungsänderungen

Der in Kapitel 4.2 vorgestellte Auswertalgorithmus zielt darauf ab, Bauwerksneigungen in diskreten Profilen zu überwachen. Die Absolutneigungen dieser Bauwerksprofile beziehen sich dabei auf die Z-Achse des im Projekt verwendeten Koordinatensystems. Die Wiederholbarkeit der Neigungsbestimmung wird durch die Analyse von Mehrfachfahrten

innerhalb einer Messkampagne evaluiert. Tabelle 5-3 zeigt die minimale Neigungsänderung  $\Delta_{tilt}$ , die mit einer Sicherheitswahrscheinlichkeit von 95% detektiert werden kann. Die aus  $\Delta_{tilt}$  abgeleitete Kopfverschiebung bezieht sich auf die mittlere Bauwerkshöhe. Angeführt sind die Ergebnisse für Neigungsdifferenzen zwischen der Referenzfahrt 60kmh-1 und der Messfahrt 60kmh-2 (identische Bedingungen).

Tabelle 5-3: Minimal detektierbare Neigungsänderung  $\Delta_{tilt}$ , Referenz 60kmh-1

| Bauwerk                 | A3                        | A4    | A6                        | A9    | S1          | S6 | S7    |
|-------------------------|---------------------------|-------|---------------------------|-------|-------------|----|-------|
| $\pm \Delta_{tilt}$ [°] | 0,012                     | 0,011 | 0,046                     | 0,112 | 0,090       | –  | 0,721 |
| Kopfverschiebung [mm]   | 1,2                       | 1,2   | 14,4                      | 49,0  | 12,5        | –  | 88,1  |
|                         | SLS <sub>1</sub> : 0,057° |       | SLS <sub>2</sub> : 0,382° |       | ULS: 0,764° |    |       |

Diese Werte werden durch Vergleiche mit weiteren Versuchsfahrten bestätigt (siehe Tabelle C-2). Das heißt, die Neigungsberechnung anhand des vorgestellten Lösungsansatzes ist unabhängig von der Fahrzeuggeschwindigkeit (zwischen 40 km/h und 100 km/h) und des Abstandes zum Bauwerk (erster und zweiter Fahrstreifen). Feinheiten, die bei geringeren Geschwindigkeiten und kleineren Abständen detailreicher erfasst werden (z.B. Fugen, Anker), bleiben ohnedies unberücksichtigt. So haben auch kleinräumige Oberflächenveränderungen, wie sie auf der Schwergewichtsmauer S1 simuliert wurden, keinen Einfluss auf die Neigungswerte.

### Stützbauwerke A3, A4, A6 und S1

Im Vergleich der unterschiedlichen Bauwerkstypen zeigt sich deutlich, dass Neigungsänderungen bei Stützbauwerken mit glatten und geometrisch einfachen Oberflächen bedeutend früher erkannt werden. Die minimal detektierbaren Winkeländerungen der Gewichtsmauer A3 und der Ankerwand A4 liegen mit  $0,01^\circ$  um einen Faktor 5 unterhalb des in der ÖNORM EN 1997-1 (2014) definierten SLS<sub>1</sub>. Diese Winkeländerung beschreibt eine starre Kopfverschiebung von 1,2 mm, während die Kopfverschiebung für den SLS<sub>1</sub> 6,0 mm und den ULS 80 mm beträgt (Bauwerkshöhe 6 m). Die an sich glatte Bauwerks Oberfläche der Ankerwand A6 wies zum Zeitpunkt der Messfahrt einen starken Bewuchs bis zur Hälfte der Bauwerkshöhe auf (siehe Tabelle 1-3). Vegetation in solchem Ausmaß resultiert in Unsicherheiten in den Neigungswerten. Dennoch liegt die minimal detektierbare Neigungsänderung mit  $0,05^\circ$  deutlich unter dem ULS mit  $0,76^\circ$ . Dies gilt auch für die Schwergewichtsmauer S1 ( $\Delta_{tilt}=0,09^\circ$ ), deren raue Vorsatzschale sich, wie auch Bewuchs, auf die Präzision der Neigungsberechnung auswirkt.

Tabelle 5-4 dokumentiert für die Bauwerke A3, A4, A6 und S1 den Mittelwert *mean*, die Standardabweichung *std* sowie die Spannweite *range* der Neigungsdifferenzen nach der

Ausreißerdetektion. Ebenso sind die Grenzwerte der robusten Ausreißerdetektion  $\delta_{\Delta_{\text{tilt}}}$  und die Anzahl der Ausreißer im Verhältnis zur Anzahl der Profile angeführt. Wiederum werden die Zahlen für die Neigungsdifferenzen zwischen der Referenzfahrt 60kmh-1 und der Messfahrt 60kmh-2 angegeben.

Tabelle 5-4: Statistische Parameter der Berechnung von Neigungsdifferenzen

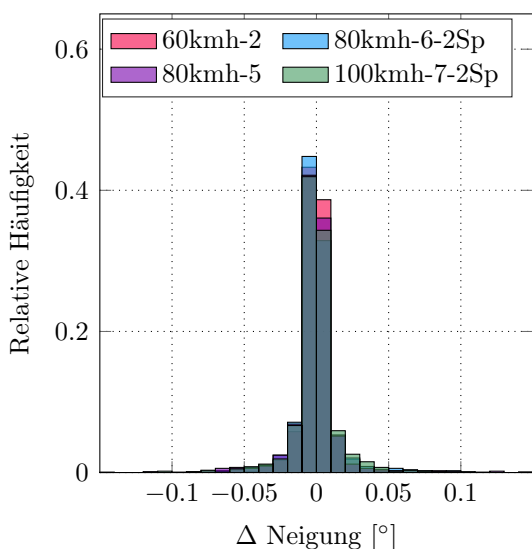
|           | mean    | $\pm$ std | range    | #out/#all | limits $\delta_{\Delta_{\text{tilt}}}$ |
|-----------|---------|-----------|----------|-----------|--|
| <b>A3</b> | -0,4 mm | 5,8 mm    | 34,2 mm  | 125/1500  | -0,018° ; +0,017°                      |
| <b>A4</b> | -1,6 mm | 5,8 mm    | 34,4 mm  | 432/4800  | -0,019° ; +0,016°                      |
| <b>A6</b> | -2,5 mm | 23,4 mm   | 136,4 mm | 756/7020  | -0,071° ; +0,066°                      |
| <b>S1</b> | -4,0 mm | 45,7 mm   | 255,3 mm | 202/2593  | -0,131° ; +0,126°                      |

Die nahezu identen statistischen Parameter der Schwergewichtsmauer A3 und der Ankerwand A4 zeigen einmal mehr, dass nicht der Bauwerkstyp, sondern vielmehr dessen Oberfläche entscheidend für eine präzise Neigungsbestimmung ist. Beide Bauwerke haben eine schalraue Betonoberfläche mit vertikalen Fugen alle 4,5 m. Die Ankerköpfe der 6 m hohen Ankerwand A4 mit einer Größe von 50 cm x 50 cm beeinflussen die Neigungsberechnung nicht. Ebenso zeigen die untersuchten Fahrzeuggeschwindigkeiten und Abstände zu den Bauwerken keine signifikanten Unterschiede. Die in Abbildung 5-3a und 5-4a dargestellten relativen Häufigkeiten der Neigungsdifferenzen aller Versuchsfahrten zur Referenzfahrt unterstreichen dies. Der Ausreißeranteil von knapp 10% wird in Form einer langschwänzigen Verteilung im Quantil-Quantil-Plot der Abbildungen 5-3b und 5-4b ersichtlich. In den Abbildungen 5-5a und 5-6a werden die Neigungsdifferenzen aller Versuchsfahrten entlang des Bauwerks aufgetragen. Zusammen mit den Abbildungen 5-5b und 5-6b wird die Lage der Ausreißer erkennbar. Neigungsdifferenzen treten bei den regelmäßigen vertikalen Fugen (A3 und A4), in Abschnitten mit einer Mauerhöhe <2 m (A3 und A4) und in Bereichen mit starkem Bewuchs über einen Großteil der Wandhöhe (A4) auf.

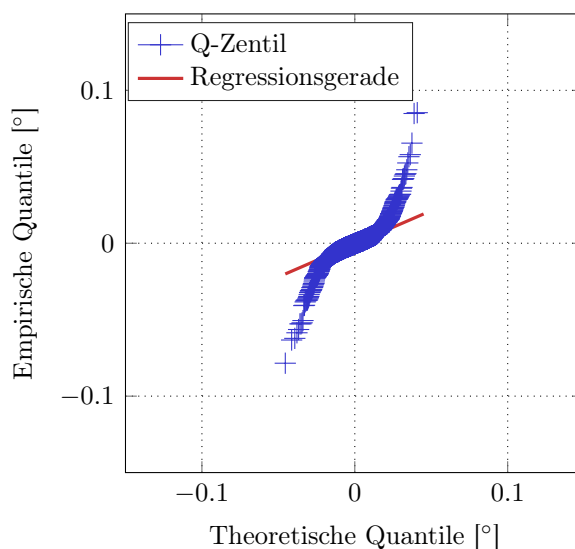
Die Oberflächen der Bauwerke A6 und S1 sind grundlegend verschieden. Die Schwergewichtsmauer S1 hat eine raue aber regelmäßige Vorsatzschale und weist im Randbereich eine Mauerhöhe von nur 2,5 m auf. Abgesehen von den Fugen und Ankern, ist die Oberfläche der 18 m hohen Ankerwand A6 an sich wesentlich glatter. Der starke Bewuchs reduziert aber ebenso wie geringe Bauwerkshöhen den *consensus set*. Wie bereits die Ergebnisse der Bauwerke A3 und A4 zeigen, führt ein kleinerer *consensus set* zu Unsicherheiten in der Neigungsberechnung eines Profils. Die Quantil-Quantil-Plots der Bauwerke A6 und S1 weisen beide einen Ausreißeranteil von 10% aus (Abbildung 5-7b und 5-8b). Wie Abbildung 5-10 zeigt, sind die Ausreißer der Gewichtsmauer S1 fast ausschließlich



auf die geringe Mauerhöhe zurückzuführen. Diese sind zudem kleiner als die Ausreißer der Ankerwand A6, welche sich zufolge der Vegetation über das gesamte Bauwerk verteilen (Abbildung 5-9). Aufgrund der rauen aber homogenen Oberfläche von S1 ist die Standardabweichung nach der Ausreißerelimination größer als die für A6 und somit auch der Wert für minimal detektierbare Neigungsänderungen.

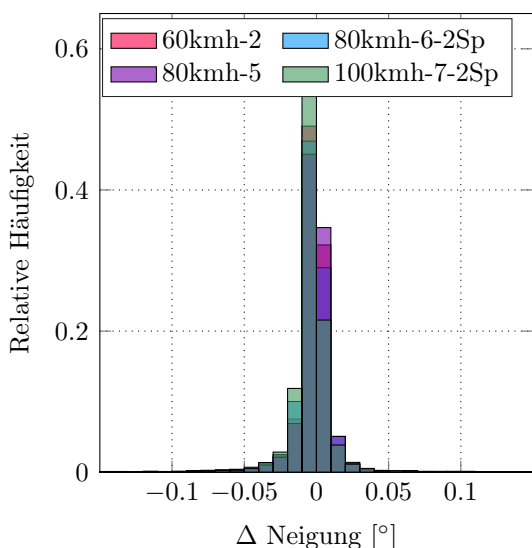


(a) Relative Häufigkeiten der Differenzen

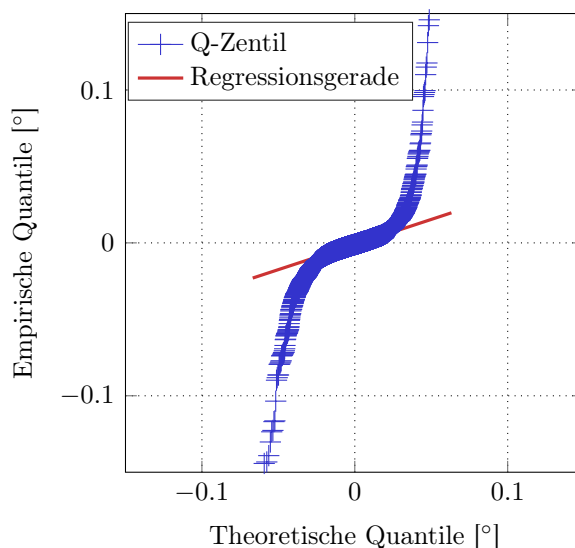


(b) QQ-Plot, A3-60kmh-2

Abbildung 5-3: Schwergewichtsmauer A3, Referenzfahrt A3-60kmh-1

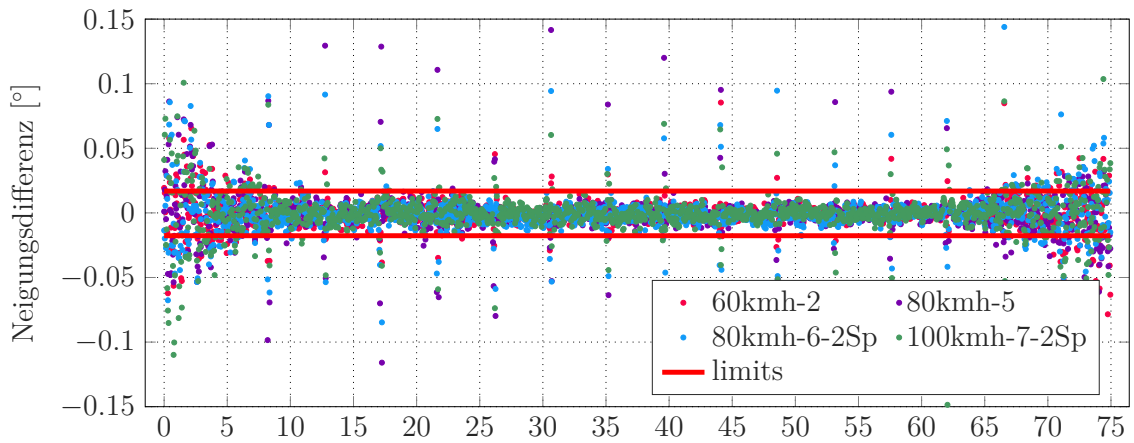


(a) Relative Häufigkeiten der Differenzen

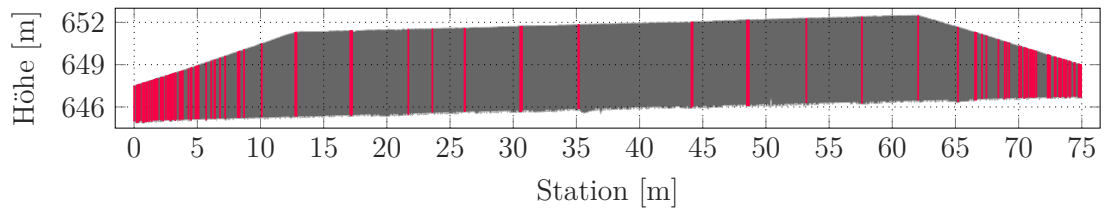


(b) QQ-Plot, A4-60kmh-2

Abbildung 5-4: Ankerwand A4, Referenzfahrt A4-60kmh-1

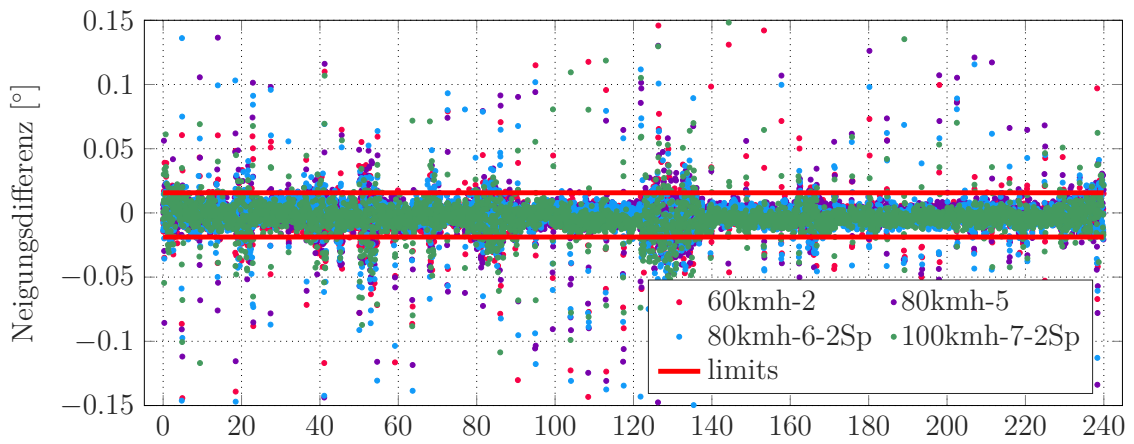


(a) Neigungsdifferenzen entlang der Station

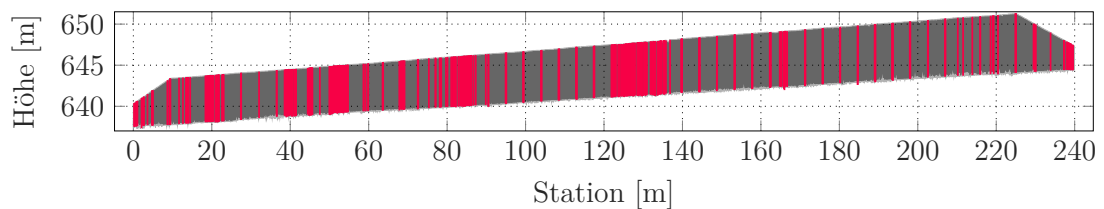


(b) Lage der Ausreißer in den Neigungsdifferenzen, Messfahrt A3-60kmh-2

Abbildung 5-5: Schwergewichtsmauer A3, Referenzfahrt A3-60kmh-1

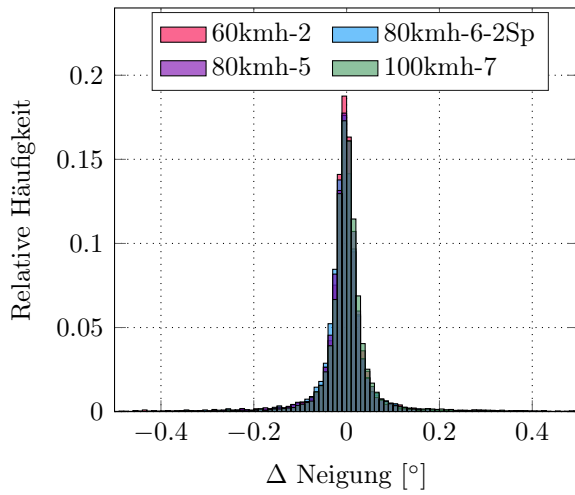


(a) Neigungsdifferenzen entlang der Station

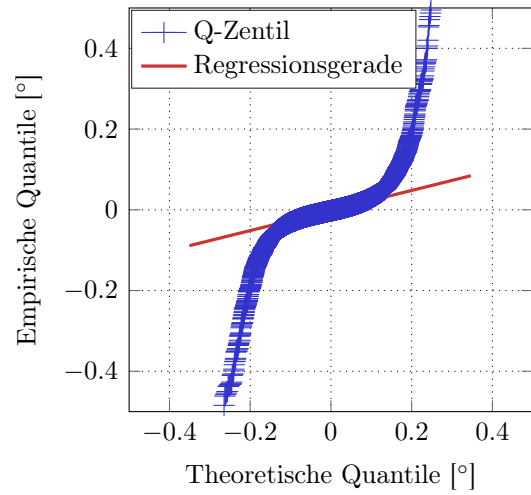


(b) Lage der Ausreißer in den Neigungsdifferenzen, Messfahrt A4-60kmh-2

Abbildung 5-6: Ankerwand A4, Referenzfahrt A4-60kmh-1

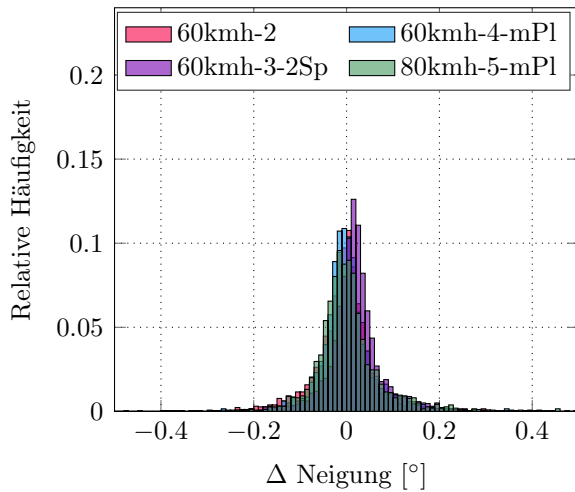


(a) Relative Häufigkeiten der Differenzen

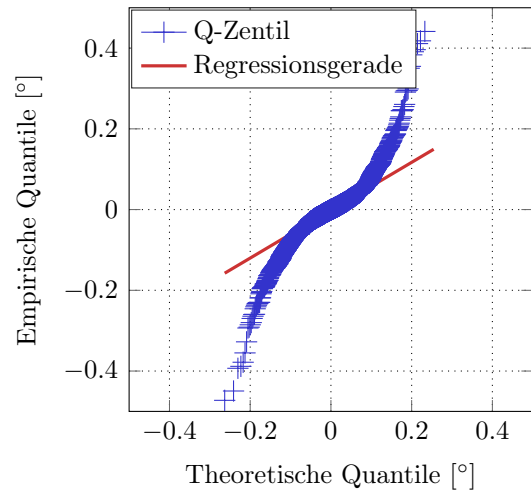


(b) QQ-Plot, A6-60kmh-2

Abbildung 5-7: Ankerwand A6, Referenzfahrt A6-60kmh-1

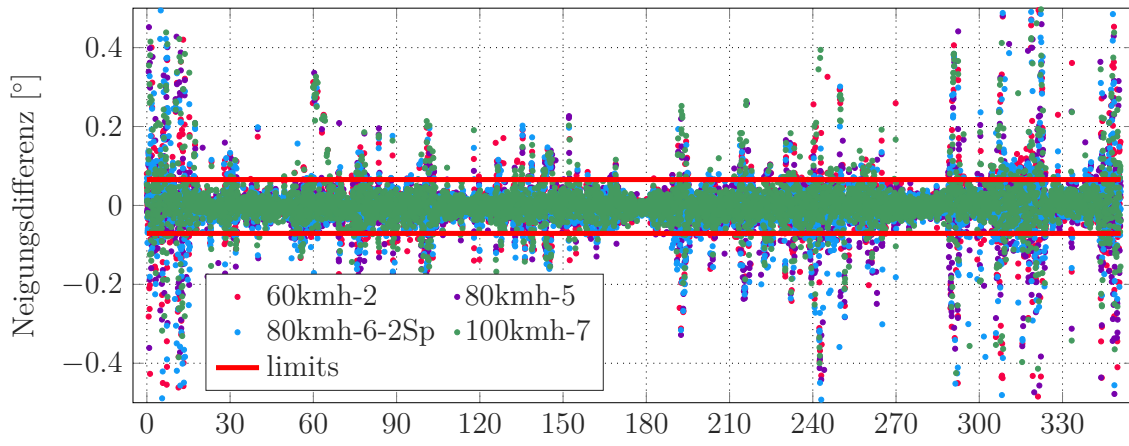


(a) Relative Häufigkeiten der Differenzen

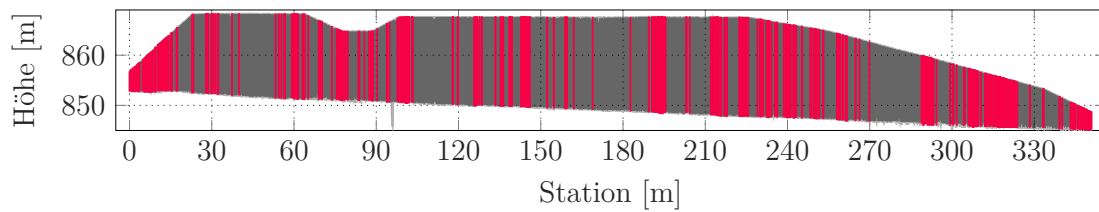


(b) QQ-Plot, S1-60kmh-2

Abbildung 5-8: Schwergewichtsmauer S1, Referenzfahrt S1-60kmh-1

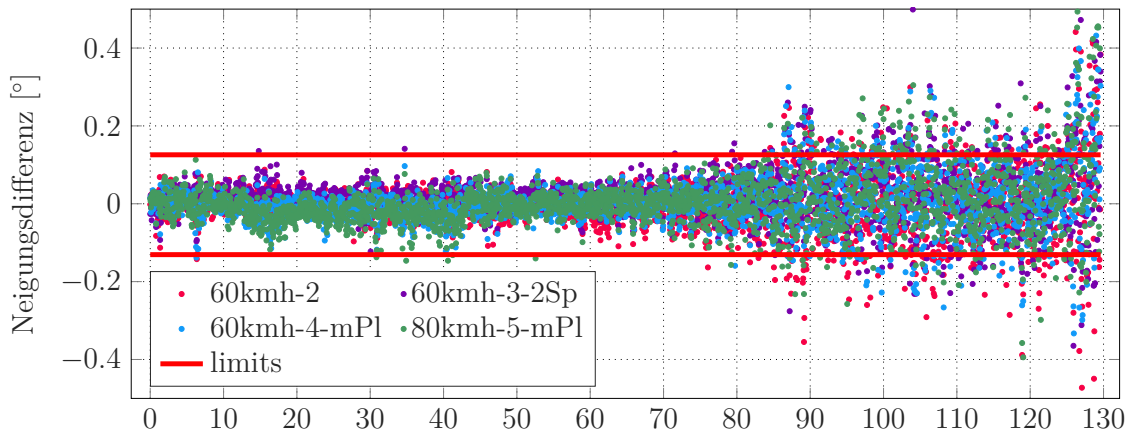


(a) Neigungsdifferenzen entlang der Station

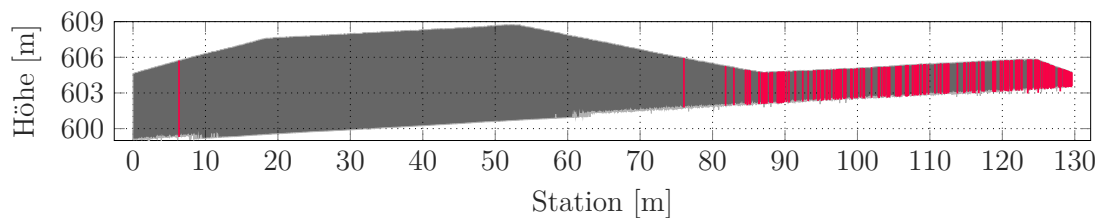


(b) Lage der Ausreißer in den Neigungsdifferenzen, Messfahrt A6-60kmh-2

Abbildung 5-9: Ankerwand A6, Referenzfahrt A6-60kmh-1



(a) Neigungsdifferenzen entlang der Station



(b) Lage der Ausreißer in den Neigungsdifferenzen, Messfahrt S1-60kmh-2

Abbildung 5-10: Schwergewichtsmauer S1, Referenzfahrt S1-60kmh-1

### **Ankerwand A9**

Bei der Untersuchung der Ankerwand A9 mit aufgelöster, schalrauer Oberfläche wird deutlich, dass der Algorithmus Querschnitte von Stützbauwerken voraussetzt, die näherungsweise einer Geraden entsprechen. Durch die Wölbung der Wand zwischen den geankerten Lisenen gleichen die Profile mehr einem Polynom 2. Grades. Signifikante Aussagen zur Bauwerksneigung können nicht getroffen werden. Die Berechnung könnte so adaptiert werden, dass der RANSAC-Algorithmus einen *consensus set* findet, der sich an einer anderen geometrischen Linie als dem linearen Polynom orientiert. Ungeachtet dessen, ist eine starre Kopfverschiebung solcher Stützbauwerke untypisch.

### **Raumgitterwand S6**

Für die Raumgitterwand S6 ist eine Neigungsberechnung mit dem vorgestellten Algorithmus nicht möglich. Durch den starken Bewuchs zum Zeitpunkt der Messfahrten (siehe Tabelle 1-6) ist bereits eine Vermaschung der Punktwolke ohne vorhergehender aufwendiger Bereinigung unmöglich. Zudem bietet die Wand mit einer durchschnittlichen Gitterbreite von 10 cm zu wenig Fläche für Laserscanner in dynamischer Anwendung. Bei einer Fahrzeuggeschwindigkeit von 80 km/h liegt der Profilabstand mit 11 cm bereits über der Gitterbreite (siehe Tabelle 3-2).

### **Steinschlichtung S7**

Starrkörperbewegungen, wie eine starre Kopfverschiebung, sind kein typisches Schadensbild von Blocksteingewichtsmauern. Vielmehr weisen diese Mauern innere geometrische Veränderungen (Verformungen) wie Stauchungen auf. Wie Abbildung 2-1b zeigt, beschreiben die Querschnitte von Steinschlichtungen durchaus lineare Polynome. Die Schätzung von Regressionsgeraden und die daraus abgeleiteten Normalabstände der Kantenpunkte sind für flächenhafte Analysen also durchaus informativ (siehe Kapitel 5.3).

## **5.3 Flächenhafte Bauwerksanalyse**

Anhand dichtebasierter räumlicher Clusteranalyse können Schadstellen als auch bauwerkstypische Elemente aus Scandaten einer Messfahrt abgeleitet werden. Entscheidend ist die Definition der Eingangsparameter, welche auf die Rauheit der Bauwerksoberfläche abgestimmt werden müssen. Abbildung 5-11 zeigt, dass die Anker entlang der Ankerwand A4 mit glatter Oberfläche eindeutig bestimmbar sind. Durch die geometrische Definition von bauwerkstypischen Elementen aus Plänen könnten diese von möglichen Schadstellen unterschieden werden.

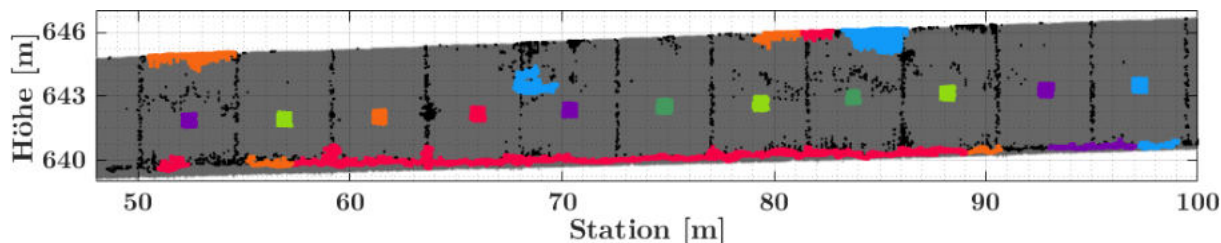


Abbildung 5-11: Dichtebasiertes räumliches Clustering, Ankerwand A4

### Schwergewichtsmauer S1 - Oberflächenveränderungen

Um die räumliche Clusteranalyse zu validieren, wurden vier Platten mit verschiedenen großen Flächen und Stärken (siehe Tabelle 5-2) auf der Maueroberfläche angebracht. Anhand der Messfahrten S1-60mkh-1 (ohne Platten) und S1-80kmh-5-mPl (mit Platten) werden im gelb markierten Bereich der Abbildung 5-12 Ausreißergruppen mittels DBSCAN gesucht. Abbildung 5-13 zeigt Normalabstände zu den Regressionsgeraden, die größer als die Schranke von  $\delta_{\text{tilt}}=4$  cm sind (siehe auch Tabelle 4-2). Überdurchschnittlich groß gebrochene Steine der rauhen Vorsatzschale (A, B) werden in beiden Messfahrten als Ausreißer detektiert, aber nur in der Versuchsfahrt mit 60 km/h Geschwindigkeit als Ausreißergruppe identifiziert (Abbildung 5-14). Die Punktdichte der Messfahrt mit 80 km/h ist zu gering, um A und B detailreich vermaschen zu können. Die künstlichen Platten P1 und P2 mit einer Stärke von 8 cm werden in der Messfahrt S1-80kmh-5-mPl als Ausreißer detektiert und auch geclustert (Abbildungen 5-13b und 5-14b). Die Platten P3 und P4 mit einer Stärke von 3 cm entsprechen der durchschnittlichen Größe der gebrochenen Steine der rauhen Vorsatzschale und werden richtigerweise nicht als Ausreißer identifiziert ( $\delta_{\text{tilt}}=4$  cm).

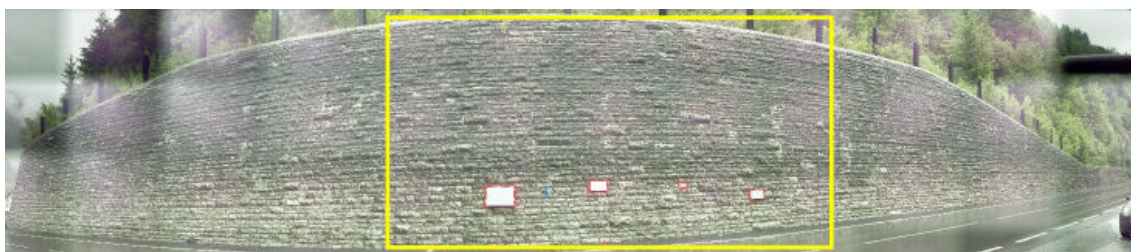


Abbildung 5-12: Panoramabild der Schwergewichtsmauer S1 mit den vier Platten

Wird eine Ausreißergruppe geclustert, kann ein begrenzendes Polygon erzeugt und dessen Fläche bestimmt werden. Abbildung 5-15 zeigt die in den Versuchsfahrten S1-60kmh-4-mPl und S1-80kmh-5-mPl erfassten Platten P1 und P2 sowie deren begrenzendes Polygon (*shrink factor* 0,2). Die tatsächliche Fläche  $A_{\text{sol}}$ , die Fläche des Clusters A sowie der relative Fehler  $\Delta A$  sind Tabelle 5-5 zu entnehmen. Zwischen der Messfahrt

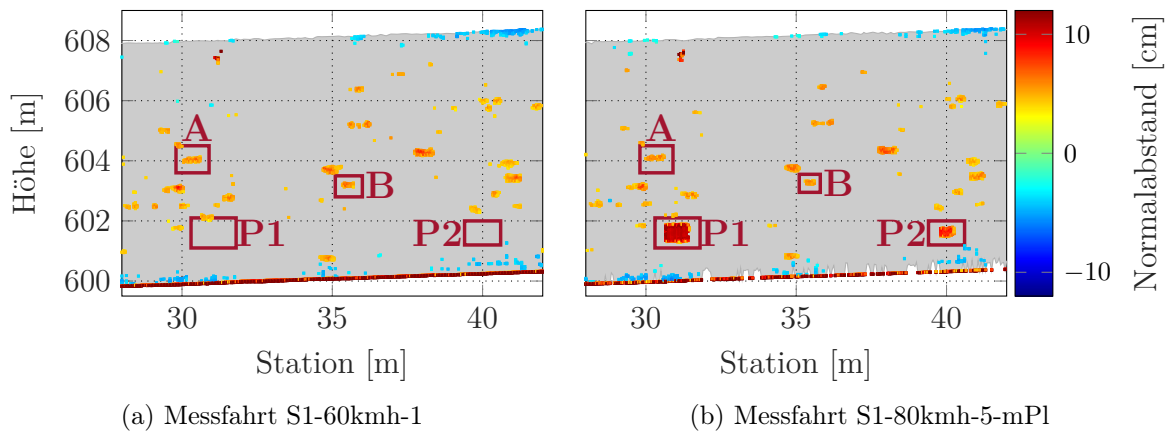


Abbildung 5-13: Ausreißer in den Normalabständen, Schwergewichtsmauer S1

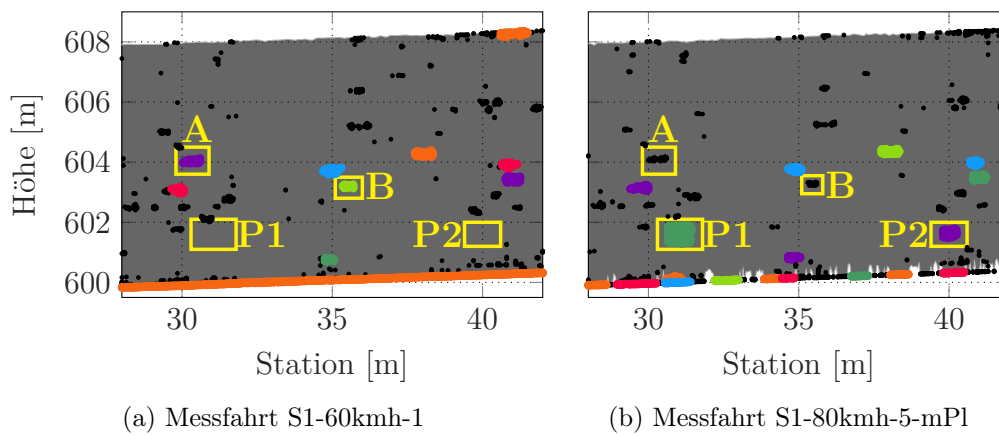


Abbildung 5-14: Clustering der Ausreißer, Schwergewichtsmauer S1

mit einer Fahrzeuggeschwindigkeit von 60 km/h und der Fahrt mit 80 km/h sind keine Unterschiede erkennbar, da die Punktdichte für die Objektgröße ausreichend ist. Der relative Fehler nimmt mit zunehmender Clustergröße ab. Die Fläche einer Ausreißergruppe kann als Richtwert für Sanierungsarbeiten dienen.

Tabelle 5-5: Relative Fehler der Flächenberechnungen

|                | Platte P1                            |                      |            | Platte P2                            |                      |            |
|----------------|--------------------------------------|----------------------|------------|--------------------------------------|----------------------|------------|
|                | $A_{\text{soll}}$ [dm <sup>2</sup> ] | A [dm <sup>2</sup> ] | $\Delta A$ | $A_{\text{soll}}$ [dm <sup>2</sup> ] | A [dm <sup>3</sup> ] | $\Delta A$ |
| S1-60kmh-4-mPl | 45,7                                 | 43,2                 | 5 %        | 15,0                                 | 11,7                 | 22 %       |
| S1-80kmh-5-mPl |                                      | 44,4                 | 3 %        |                                      | 11,5                 | 23 %       |

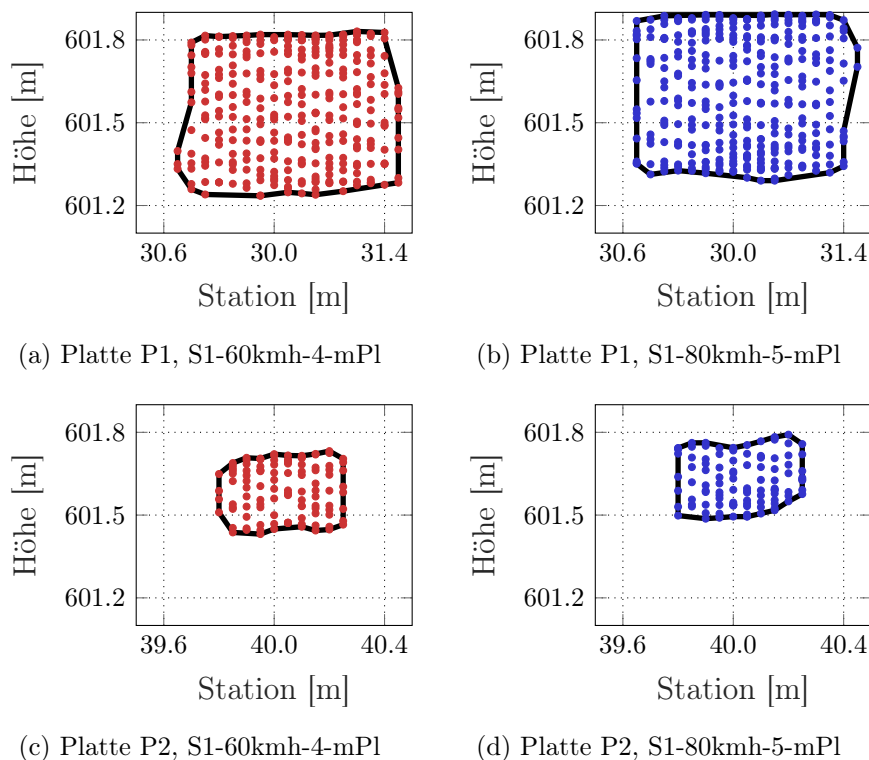


Abbildung 5-15: Begrenzendes Polygon der Cluster, Schwergewichtsmauer S1

### Ankerwand A6 - natürliche Schadstelle

Neben starkem Bewuchs, Fugen und Ankerköpfen, zeigt Abbildung 5-16b eine Betonabplatzung am Rande einer Ankerplatte. Diese bauwerkstypischen Elemente sowie die Schadstelle bleiben bei der Neigungsberechnung unberücksichtigt, da die Normalabstände zur Regressionsgeraden größer  $\delta_{tilt}=1,5\text{ cm}$  sind (Abbildung 5-17). Mittels DBSCAN können die Ausreißergruppen erkannt und geclustert werden. Um die Schadstelle von der horizontalen Fuge zu isolieren und dessen Größe zu bemessen, ist ein manuelles Eingreifen allerdings notwendig. Die Abbildungen 5-17b bis 5-17d zeigen, dass mit zunehmendem Abstand und zunehmender Fahrzeuggeschwindigkeit die Punktdichte und somit die Qualität des Clusterings abnimmt.

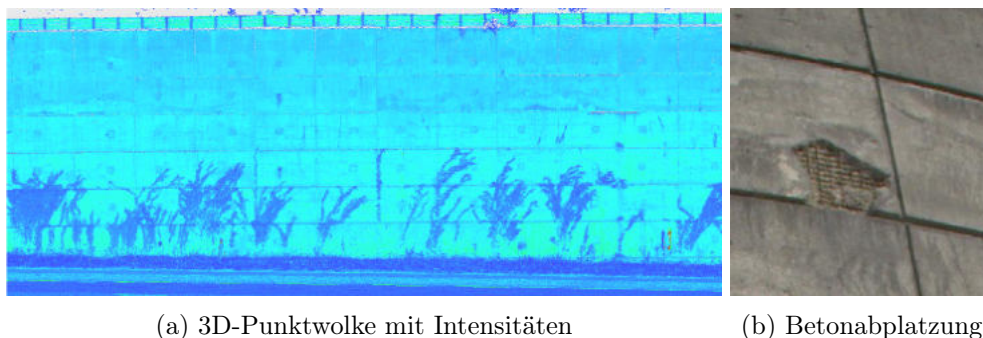


Abbildung 5-16: Intensitätsbild der Ankerwand A6 mit Foto einer Schadstelle



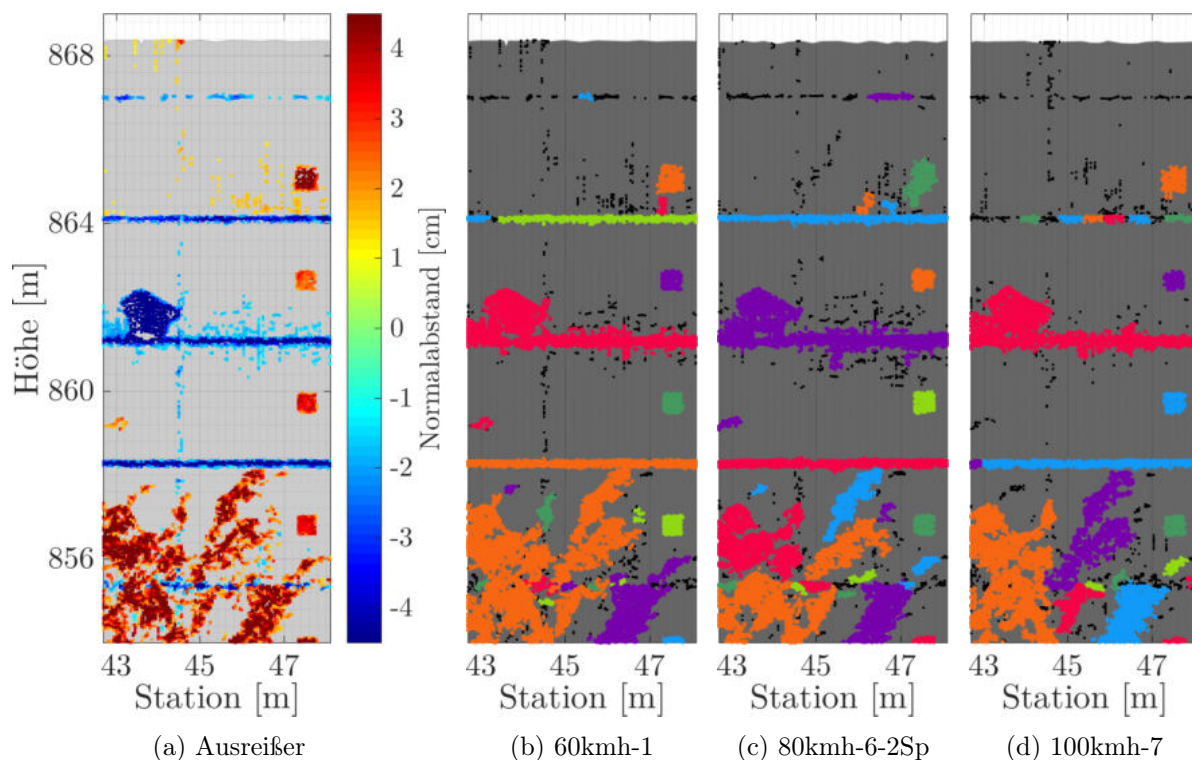


Abbildung 5-17: Einfluss von Geschwindigkeit und Abstand, Ankerwand A6

### Steinschlichtung S7

Obwohl Starrkörperverformungen nicht dem typischen Schadensbild von Steinschlichtungen entsprechen, liefern die Normalabstände der Regressionsgeraden durchaus einen Mehrwert. Werden grobe Fehler z.B. aus Vermaschungsfehlern aufgrund von Vegetation (B) entfernt, sind kleinräumige Stauchungen (A) aus nur einer Messfahrt zu erkennen (siehe Abbildung 5-18).

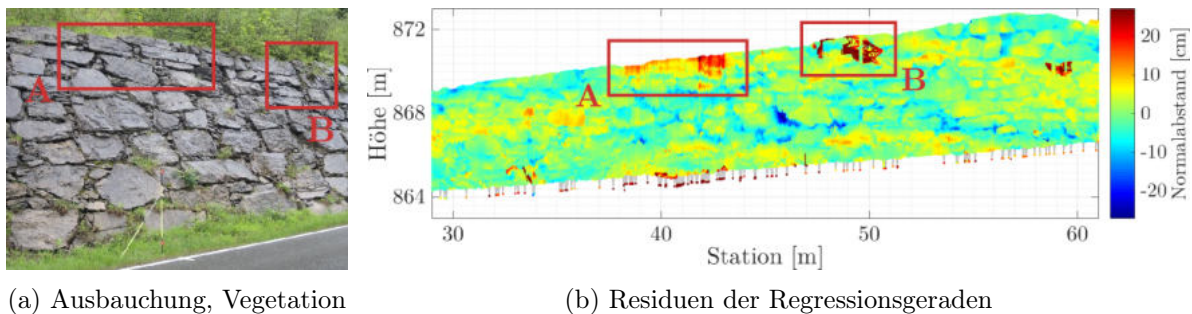


Abbildung 5-18: Messfahrt S7-60kmh-1, Steinschlichtung S7

## 5.4 Zustandserfassung von Stützbauwerken aus Laserscandaten

Bei duktilem Systemverhalten kündigt sich ein Bauwerksversagen unter anderem durch geometrische Veränderungen an. Drehungen um den Kopf- oder Fußpunkt, durch z.B. Biegebruch bei Winkelmauern oder korrosionsindiziertem Ankerversagen, können bei Stützbauwerken mit regelmäßigen Oberflächen und einer Geraden im Querschnitt mit einer Präzision von  $<0,05^\circ$  bestimmt werden. Die minimal detektierbaren Neigungsänderungen liegen damit deutlich unter dem in der ÖNORM EN 1997-1 (2014) definierten Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit (ULS:  $0,76^\circ$ ). Für Setzungen, Hebungen und Gleiten, das heißt, für parallele Bewegungen ohne Änderung der inneren Geometrie, ist eine wiederholbare Genauigkeit von  $<50$  mm nicht zu erreichen. Dieser Wert entspricht der maximal zulässigen Setzung nach der ÖNORM EN 1997-1 (2014) und steht der absoluten Systemgenauigkeit der gefilterten Trajektorie mit 5 cm (Amberg Mobile Mapping System) gegenüber. Schadensbilder, die ein Durchbiegen der Mauer zeigen, können flächenhaft erkannt werden.

Bauwerksversagen kann sich auch durch Mängel an der Betonkonstruktion ankündigen. Abplatzungen, zufolge von z.B. Bewehrungskorrosion oder Frostschäden, sind mittels flächenhafter Bauwerksanalyse zu erkennen. Die Bemessung der Schadstellen aus Scandaten kann für die Zustandsbeurteilung nützlich sein. Die Flächenermittlung funktioniert umso robuster, je größer die Schadstelle ist.

Untersuchungen an Stützbauwerken mit Höhen zwischen 1,50 m und 18 m zeigen, dass die Robustheit der Neigungsbestimmung mit zunehmender Bauwerkshöhe zunimmt. Die Neigungen sind dabei unbeeinflusst von Ankern, horizontalen Fugen und kleinflächigem Bewuchs. Großflächiger Bewuchs hingegen beeinflusst die Ergebnisse signifikant und sollte vor Messfahrten entfernt werden. Die Abstimmung der Eingangsparameter auf die Rauheit der Bauwerksoberfläche ist unbedingt erforderlich.

Die angegebene Präzision der Neigungsberechnung aus dynamisch erfassten Scandaten wird selbst bei Geschwindigkeiten bis 100 km/h erreicht. Eine Geschwindigkeitsreduktion bewirkt eine höhere Punktdichte, wodurch Mängel an der Betonkonstruktion detaillierter erfasst werden können. Die Einordnung in den Fließverkehr (80 km/h) und die Benützung der Fahrbahn mit geringstem Bauwerksabstand wird empfohlen. Ein Abstand zwischen Fahrzeugtrajektorie und Bauwerk von 3,5 m ist für Bauwerkshöhen bis 8 m ausreichend. Um Scanschatten zu vermeiden, werden MMS mit zwei Zeilenscannern empfohlen. Diese sind üblicherweise in Schmetterlingskonfiguration angeordnet. Eine Systemkalibrierung unmittelbar vor Beginn der Messfahrten ist unerlässlich, um den Ansprüchen ingenieur-geodätischer Anwendungen gerecht zu werden.

## 6 Conclusio

Die große Anzahl an Stützbauwerken im Alpenraum, ein durchschnittliches Bauwerkalter von 80 Jahren, steigende Verkehrslasten und Extremwetterereignisse erschweren die Bauwerkserhaltung zunehmend. Während die Ressourcen von Bund und Land zur laufenden Überwachung, Kontrolle und Prüfung begrenzt sind, treten vermehrt Schadensbilder auf. Die Prüfmethode zur Erfassung des Bauwerkzustandes sind zwar bewährt, erweisen sich aber als wenig effizient und beschränken die Streckenverfügbarkeit. Der in dieser Arbeit vorgestellte generische Arbeitsfluss zur Selektierung von Stützbauwerken in kritischem Zustand aus mobil erfassten Scandaten ist objektiv, kosten- und zeiteffizient. Es zeigt sich, dass kommerzielle mobile Multisensorsysteme hierfür auch im Fließverkehr bis zu einer Geschwindigkeit von 100 km/h eine geeignete Datengrundlage schaffen. Die Auswertung von Mehrfachfahrten belegt, dass die Neigungsberechnung mit einer Präzision von  $<0,02^\circ$  für Stützbauwerke mit glatter Oberfläche möglich ist. Auch Anomalien an der Betonoberfläche können anhand des Auswertalgorithmus automatisiert erkannt werden. Neben dynamisch erfassten Scandaten, können ebenso georeferenzierte statische Scans Grundlage der Auswertung sein, deren Akquisition bei einer großen Anzahl an Bauwerken jedoch zeitaufwändiger ist. Die Ableitung von Neigungen und die Detektion von Schadstellen aus Scandaten ist flächenhaft und hat somit einen entscheidenden Vorteil gegenüber der Erfassung diskreter Deformationsmesspunkte, wie dies bei herkömmlichen geodätischen Bauwerksüberwachungen üblich ist. Neigungsänderungen und oberflächliche Betonschäden sind geeignete zustandsrelevante Kenngrößen, da sie Indikatoren für zahlreiche Versagensszenarien sind.

Der vorliegende Algorithmus ist auf die Neigungsberechnung von Stützbauwerken mit Geraden im Querschnitt optimiert. Durch die Adaption der Eingangsparameter kann die Auswertung auf Stützbauwerke, deren Querschnitt einer beliebigen mathematischen Funktion entsprechen, und so auch auf andere Infrastrukturbauten ausgeweitet werden. Die Einführung von horizontalen Profilen, die Verknüpfung von Scan- und Bilddaten sowie eine objektbasierte Bauwerksanalyse bieten Potenzial, die Schadstellendetektion zu verbessern. Kommerzielle MMS erlauben die Einbindung weiterer Objektraumsensoren, z.B. Ultraschallsensoren und Thermokameras, welche die Identifizierung anderer zustandsrelevanter Schäden, wie Feuchtstellen, ermöglichen.

## Literaturverzeichnis

- Adam D., Bergmeister K., Florineth F. (2007): Stützbauwerke. In: Betonkalender 2007, Teil 1, 96. Jg. Berlin: Ernst & Sohn. ISBN 978-3-433-01833-0. S. 265–352.
- Amberg Technologies AG (2015): MobileMapping - Datenerfassung im Eiltempo. Amberg Technologies AG, Regensdorf, Schweiz. [https://ambergtechnologies.com/fileadmin/user\\_upload/amberg-technologies/downloads/Services/2012\\_Brochures/MobileMapping\\_DE.pdf](https://ambergtechnologies.com/fileadmin/user_upload/amberg-technologies/downloads/Services/2012_Brochures/MobileMapping_DE.pdf). Broschüre. 4 S.
- Bendaanane M., Eddahmani K., Sebari I. (2015): Urban Objects Extraction from 3D Laser Point Clouds Acquired by a Static Laser Scanner and a Mobile Mapping System. In: International Journal of Remote Sensing Applications (IJRSA), Volume 5. 12 S.
- Binder N. (2015): Revolution auf Rädern. In: Reporter 73 - Das Magazin der Leica Geosystems. Leica Geosystems AG, Heerbrugg, Switzerland. S. 3–5.
- Boley C. (2012): Böschungen und konstruktive Hangsicherungen, Baugruben. In: Handbuch Geotechnik, 1. Auflage. Wiesbaden: Vieweg+Teubner Verlag. ISBN 978-3-8348-0372-6. S. 623–779.
- Brandl H. (2009): Stützbauwerke und konstruktive Hangsicherungen. In: Grundbau-Taschenbuch, Teil 3: Gründungen und geotechnische Bauwerke, 7. Auflage. Berlin: Ernst & Sohn. ISBN 978-3-433-01846-0. S. 747–901.
- Cahalane C., Lewis P., McElhinney C.P., McCarthy T. (2015): Optimising Mobile Mapping System Laser Scanner Orientation. In: ISPRS International Journal of Geo-Information 2015, 4. S. 302–319.
- Caspary W. (2002): Von statischen zu kinematischen Messverfahren. In: zfv – Zeitschrift für Geodäsie, Geoinformation und Landmanagement, Heft 5/2002, 127. Jahrgang. S. 281.
- Cloud-Vermessung (2014): Regensburg rüstet sich für LoD3. In: Business Geomatics, Ausgabe 5-6. Cloud-Vermessung, Bad Windsheim, Deutschland. S. 4.
- DIN 1054 (2005): Baugrund - Sicherheitsnachweise im Erd- und Grundbau. Deutsches Institut für Normung. Ausgabe: 2005-01.
- DIN 18710-4 (2010): Ingenieurvermessung - Teil 4: Überwachung. Deutsches Institut für Normung. Ausgabe: 2010-09.

- Ester M., Kriegel H.P., Sander J., Xu X. (1996): A density-based algorithm for discovering clusters in large spatial databases with noise. In: Proceedings of the Second International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining (KDD-96). S. 226–231.
- Fischler M.A., Bolles R.C. (1981): Random sample consensus: a paradigm for model fitting with applications to image analysis and automated cartography. In: Communications of the ACM. Volume 24, Issue 6.
- Gräfe G., Caspary W., Heister H., Klemm J., Sever M. (2001): The road data acquisition system MoSES – determination and accuracy of trajectory data gained with the Applanix POS/LV. In: Proceedings 3rd International Symposium on Mobile-Mapping Technology, Kairo, Ägypten.
- Heister H., Caspary W., Hock C., Klemm J., Sternberg H. (1995): KiSS, a Hybrid Measuring System for Kinematic Surveying. In: Linkwitz K., Hangleiter U. (Hrsg.): High Precision Navigation 95. Dümmler Verlag, Bonn. S. 561–568.
- Hesse C. (2007): Ein Beitrag zur hochauflösenden kinematischen Objekterfassung mit terrestrischen Laserscannern. Doktorarbeit, München, Deutschland. 173 S.
- Hesse C., Weltzien K., Stromhardt A. (2016): Hochpräzises Mobile Mapping im Ingenieur- und Verkehrswegebau. In: Terrestrisches Laserscanning 2016 (TLS 2016) - Beiträge zum 154. DVW-Seminar am 28. und 29. November 2016 in Fulda, Band 85. DVW – Gesellschaft für Geodäsie, Geoinformation und Landmanagement e.V. ISBN 978-3-95786-106-1. S. 131–143.
- Heunecke O., Kuhlmann H., Welsch W., Eichhorn A., Neuner H. (2013): Auswertung geodätischer Überwachungsmessungen. In: Handbuch Ingenieurgeodäsie, 2. Auflage. Berlin: Wichmann. ISBN 978-3-87907-467-9. S. 91–132.
- Hofmann-Wellenhof B., Legat K., Wieser A. (2003): Navigation. Principles of Positioning and Guidance. Springer-Verlag Wien New York. ISBN 3-211-00828-4. 427 S.
- Husen B. (2020): Zum Einsatz von Punktwolken in der Straßenbauvermessung. Videobeitrag zum 194. DVW-Seminar Terrestrisches Laserscanning 2020 am 4. Dezember 2020. Seminar in digitalem Format.
- IPM (2016): Pavement Profile Scanner PPS. Fraunhofer-Institut für Physikalische Messtechnik IPM, Freiburg, Deutschland. <https://www.ipm.fraunhofer.de/content/dam/ipm/de/PDFs/produktblaetter/OF/LSC/Pavement-Profile-Scanner-de.pdf>. Produktblatt. 2 S.

- Klingbeil L., Lottes P., Kuhlmann H. (2014): Laserscanning-Technologie auf sich bewegendenden Plattformen. In: Terrestrisches Laserscanning 2014 (TLS 2014) - Beiträge zum 139. DVW-Seminar am 11. und 12. Dezember 2014 in Fulda, Band 78. DVW – Gesellschaft für Geodäsie, Geoinformation und Landmanagement e.V. ISBN 978-3-95786-010-1. S. 19–29.
- Kuhlmann H. (2020): Uncertainty modelling for kinematic multi-sensor systems. Beitrag zur Fachtagung der Deutschen Geodätischen Kommission (Abteilung Ingenieurgeodäsie) & der Gesellschaft zur Kalibrierung Geodätischer Messmittel vom 21.-23. September 2020 in Bad Lauterbach, Deutschland zum Thema Unsicherheitsmodellierung beim Einsatz komplexer Messsysteme.
- Kuhlmann H., Klingbeil L. (2017): Mobile Multisensorsysteme. In: Schwarz W. (Hrsg.): Ingenieurgeodäsie. Springer Spektrum, Berlin, Heidelberg. [https://doi.org/10.1007/978-3-662-47188-3\\_20](https://doi.org/10.1007/978-3-662-47188-3_20). ISBN 978-3-662-47187-6. S. 93–129.
- Ladstädter R., Luley P., Ladstätter S., Mayer H. (2019): UHD Mapping von Teststrecken für automatisiertes Fahren. In: Dreiländertagung der DGPF, der OVG und der SGPF in Wien, Österreich – Publikationen der DGPF, Band 28. Deutsche Gesellschaft für Photogrammetrie, Fernerkundung und Geoinformation. S. 175–187.
- Lehmüller K. (2015): Documenting urban realities. In: Reporter 73 - The Global Magazine of Leica Geosystems. Leica Geosystems AG, Heerbrugg, Switzerland. S. 6–8.
- Manandhar D, Shibasaki R. (2000): Geo-Referencing of Multi-Sensor Range Data for Vehicle-borne Laser Mapping System (VLMS). In: Proceedings of 21st Asian Conference on Remote Sensing (ACRS), Taipei, Taiwan. S. 932–937.
- Marte R., Kienreich R., Scharinger F., Stadler C. (2014): Überprüfung und Bewertung des Ist-Zustandes älterer Stützbauwerke im Straßennetz der ASFINAG. In: Beiträge zum 29. Christian Veder Kolloquium - Stützmaßnahmen in der Geotechnik, Heft 51. Technische Universität Graz, Gruppe Geotechnik Graz. ISBN 978-3-900484-68-2. S. 165–186.
- Olsen M.J., Roe G.V., Glennie C., Persi F. (2013): Guidelines for the Use of Mobile LIDAR in Transportation Applications. National Cooperative Highway Research Program (NCHRP), Report 748. National Academy of Sciences, Washington, D.C. ISBN 978-0-309-25914-9.
- Rebhan M. (2015a): Ist-Zustandserfassung und Bewertung bestehender, unverankerter Stützbauwerke. Masterarbeit, Technische Universität Graz. 270 S.

- Rebhan M. (2015b): „Sicherheitsbewertung bestehender Stützbauwerke“ Forschungsprojekt SIBS. In: VÖBU Forum, Ausgabe 38. Vereinigung Österreichischer Bohr-, Brunnenbau und Spezialtiefbauunternehmungen VÖBU. S. 6–7.
- RVS 13.03.01 (2012): Monitoring von Brüchen und anderen Ingenieurbauwerken. Österreichische Forschungsgesellschaft Straße–Schiene–Verkehr FSV. Ausgabe: 2012-02.
- RVS 13.03.21 (2013): Geankerte Stützbauwerke. Österreichische Forschungsgesellschaft Straße–Schiene–Verkehr FSV. Ausgabe: 2013-11.
- RVS 13.03.61 (2014): Nicht geankerte Stützbauwerke. Österreichische Forschungsgesellschaft Straße–Schiene–Verkehr FSV. Ausgabe: 2014-01.
- Schwarz K.P., Martell H.E., El-Sheimy N., Li R., Chapman M.A., Cosandier D. (1993): VISAT - A mobile highway survey system of high accuracy. In: Proceedings of the IEEE Vehicle Navigation and Information Systems Conference, 12.-15.10.1993, Ottawa, Kanada. S. 476–481.
- Siteco Informatica srl (2015): A flexible MMS for the Friuli Venezia Giulia Region. Siteco Informatica srl, Bologna, Italien. [http://www.sitecoinf.it/pdf/progetti/regione\\_friuli\\_eng.pdf](http://www.sitecoinf.it/pdf/progetti/regione_friuli_eng.pdf). Broschüre. 2 S.
- Weißbach A. (2012): Stützbauwerke. In: Kommentar zum Handbuch Eurocode 7 - Geotechnische Bemessungen: Allgemeine Regeln, Teil B: Kommentare zu den Abschnitten des Handbuchs EC 7-1, 1. Auflage. Berlin: Ernst & Sohn. ISBN 978-3-433-01528-5. S. 141–156.
- Wendl J. (2011): Integrierte Navigationssysteme. Sensordatenfusion, GPS und Inertiale Navigation, 2. Auflage. Oldenbourg Verlag München. ISBN 978-3-486-70439-6. 334 S.
- ÖNORM B 4434 (1993): Erd- und Grundbau - Erddruckberechnung. Austrian Standards Institute. Ausgabe: 1993-01.
- ÖNORM EN 1990 (2013): Eurocode - Grundlagen der Tragwerksplanung. Austrian Standards Institute. Ausgabe: 2013-03.
- ÖNORM EN 1997-1 (2014): Eurocode 7: Entwurf, Berechnung und Bemessung in der Geotechnik - Teil 1: Allgemeine Regeln. Austrian Standards Institute. Ausgabe: 2014-11.

## A Übersicht relevanter Normen und Richtlinien

Tabelle A-1 listet, ohne Anspruch auf Vollständigkeit, die für die vorliegende Arbeit relevanten Richtlinien und Normen hinsichtlich Entwurf, Bemessung, Erhaltung und Überwachung von Stützbauwerken auf und unterscheidet bezüglich dem überwiegenden Anwendungsbereich.

Tabelle A-1: Auswahl gültiger Richtlinien und Normen sowie deren Anwendungsbereich

|   |   |
|---|---|
| Anwendung im Bauwesen   | RVS 13.03.21 (2013)                                   |
|   | Geankerte Stützbauwerke                               |
|   | RVS 13.03.61 (2014)                                   |
|   | Nicht geankerte Stützbauwerke                         |
|   | DIN 1054 (2005)                                       |
|   | Baugrund - Sicherheitsnachweise im Erd- und Grundbau  |
|   | ÖNORM B 4434 (1993)                                   |
|   | Erd- und Grundbau - Erddruckberechnung                |
|   | ÖNORM EN 1990 (2013)                                  |
|   | Eurocode - Grundlagen der Tragwerksplanung            |
|   | ÖNORM EN 1997-1 (2014)                                |
| Eurocode 7: Entwurf, Berechnung und Bemessung in der Geotechnik - Teil 1: Allgemeine Regeln |   |
| Vermessung zur Überwachung  | RVS 13.03.01 (2012)                                   |
|   | Monitoring von Brücken und anderen Ingenieurbauwerken |
|   | DIN 18710-4 (2010)                                    |
|   | Ingenieurvermessung - Teil 4: Überwachung             |

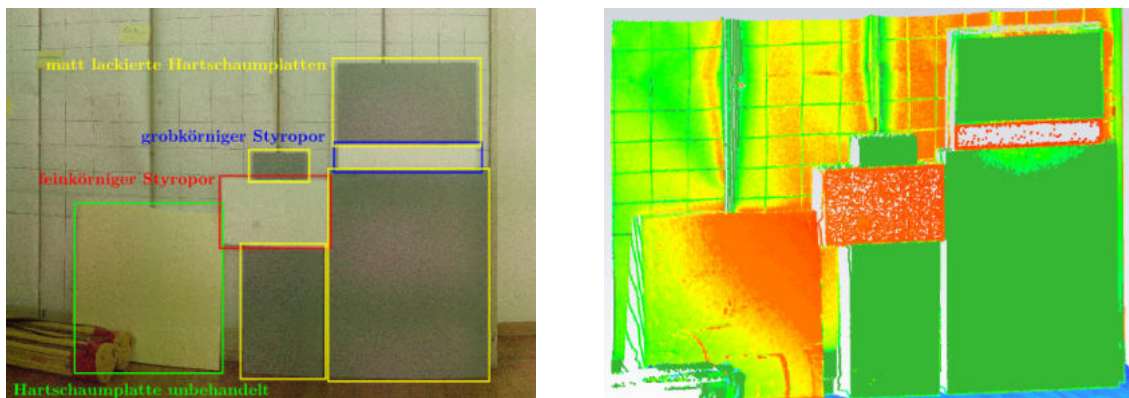


## B Reflexionsvermögen von Styroporplatten

In Vorbereitung auf die Simulation von Oberflächenveränderungen an Stützbauwerken wurden folgende vier Probekörper hinsichtlich ihrer Reflektivität und Eindringtiefe überprüft. Die Aufnahme erfolgte mit einer scannenden Totalstation (Leica Nova MS60).

- unbehandelte grobkörnige Styroporplatte
- unbehandelte feinkörnige Styroporplatte
- unbehandelte Hartschaumplatte
- matt lackierte Hartschaumplatte

Abbildung B-1 zeigt, dass im Vergleich die matt lackierten Hartschaumplatten eine geringere Rückstreuung des Signals zum Instrument aufweisen. Die Intensität ist bei den Probekörpern aus körnigerem Styropor zwar höher, bei diesen dringt das Licht aber deutlich unregelmäßiger tiefer ein bzw. streuen kaum Signal zurück (grobkörnige Styroporplatte). Das Ergebnis der Regressionsanalyse zeigt bedeutend höhere Streuungen für die körnige Styroporplatte als für die Hartschaumplatten (siehe Tabelle B-1).



(a) Panoramabild des Scanbereichs

(b) Intensitätsbild

Abbildung B-1: Reflexionseigenschaften, Instrument: Leica Nova MS60

Tabelle B-1: Regressionsebene: Normalabstände zwischen  $\pm 1,5$  mm

| Styropor   | Hartschaum  | Hartschaum    |
|------------|-------------|---------------|
| feinkörnig | unbehandelt | matt lackiert |
| 76,8%      | 95,7%       | 99,1%         |

## C Kennwerte der robusten Neigungsberechnung

Das Modul zur robusten Neigungsableitung basiert auf Profilen, die sich aus Kantenpunkten der vermaschten Punktwolke zusammensetzen. Neben der Neigung selbst, werden die Standardabweichungen der Normalabstände von geschätzten Regressionsgeraden (ohne Ausreißer) und die Anzahl der Ausreißer, welche die Geradenschätzung unbeeinflusst lassen, dokumentiert. Tabelle C-1 zeigt die mittlere Standardabweichung der Normalabstände  $\bar{s}$ , die Spannweite der Standardabweichungen  $R$  als auch die mittlere Ausreißerquote  $\overline{\text{out}}$  für die Regressionsgeraden über die gesamte Bauwerkslänge und zwar für alle Stützbauwerke (ohne S6) und jede Versuchsfahrt.

Tabelle C-1: Mittlere Standardabweichung der Normalabstände, Spannweite der Standardabweichungen und Prozentzahl der Ausreißer des RANSAC-Algorithmus

|           | #Profile | Fahrt                        | $\bar{s}$ [mm] | $R$ [mm] | $\overline{\text{out}}$ % |
|-----------|----------|------------------------------|----------------|----------|---------------------------|
| <b>A3</b> | 1500     | <i>A3 – 60kmh – 1</i>        | 0,7            | 1,4      | 47                        |
|           |          | <i>A3 – 60kmh – 2</i>        | 0,8            | 1,3      | 49                        |
|           |          | <i>A3 – 80kmh – 5</i>        | 0,7            | 1,5      | 46                        |
|           |          | <i>A3 – 80kmh – 6 – 2Sp</i>  | 0,8            | 1,3      | 38                        |
|           |          | <i>A3 – 100kmh – 7 – 2Sp</i> | 0,7            | 1,5      | 38                        |
| <b>A4</b> | 4800     | <i>A4 – 60kmh – 1</i>        | 1,1            | 1,6      | 44                        |
|           |          | <i>A4 – 60kmh – 2</i>        | 1,1            | 1,4      | 46                        |
|           |          | <i>A4 – 80kmh – 5</i>        | 1,1            | 1,6      | 44                        |
|           |          | <i>A4 – 80kmh – 6 – 2Sp</i>  | 1,1            | 1,5      | 36                        |
|           |          | <i>A4 – 100kmh – 7 – 2Sp</i> | 1,1            | 1,5      | 33                        |
| <b>A6</b> | 7020     | <i>A6 – 60kmh – 1</i>        | 7,4            | 8,3      | 34                        |
|           |          | <i>A6 – 60kmh – 2</i>        | 7,4            | 8,3      | 34                        |
|           |          | <i>A6 – 80kmh – 5</i>        | 7,4            | 8,9      | 35                        |
|           |          | <i>A6 – 80kmh – 6 – 2Sp</i>  | 7,4            | 7,8      | 34                        |
|           |          | <i>A6 – 100kmh – 7</i>       | 7,4            | 8,9      | 34                        |
| <b>A9</b> | 2320     | <i>A9 – 60kmh – 1</i>        | 32,4           | 50,8     | 20                        |
|           |          | <i>A9 – 60kmh – 2</i>        | 32,3           | 49,7     | 20                        |
|           |          | <i>A9 – 80kmh – 5</i>        | 32,2           | 49,8     | 20                        |
|           |          | <i>A9 – 80kmh – 6 – 2Sp</i>  | 32,2           | 51,4     | 20                        |
|           |          | <i>A9 – 100kmh – 7</i>       | 32,1           | 48,7     | 21                        |
| <b>S1</b> | 2593     | <i>S1 – 60kmh – 1</i>        | 12,6           | 15,2     | 2                         |
|           |          | <i>S1 – 60kmh – 2</i>        | 12,9           | 16,5     | 2                         |
|           |          | <i>S1 – 60kmh – 3 – 2Sp</i>  | 12,7           | 15,1     | 2                         |
|           |          | <i>S1 – 60kmh – 4 – mPl</i>  | 12,3           | 15,4     | 1                         |
|           |          | <i>S1 – 80kmh – 5 – mPl</i>  | 11,9           | 15,8     | 1                         |
| <b>S7</b> | 1400     | <i>S7 – 60kmh – 1</i>        | 35,9           | 43,0     | 3                         |
|           |          | <i>S7 – 60kmh – 2</i>        | 36,3           | 40,9     | 3                         |
|           |          | <i>S7 – 60kmh – 4 – 2Sp</i>  | 37,3           | 32,1     | 5                         |
|           |          | <i>S7 – 40kmh – 5</i>        | 36,2           | 40,8     | 4                         |

Um Neigungsänderungen mit einer Sicherheitswahrscheinlichkeit von 95% als solche erkennen zu können, muss die Neigungsdifferenz einen Wert größer  $\Delta_{tilt}$  annehmen. Dieser Wert wird anhand von Mehrfachfahrten eruiert, wobei die Fahrt 60kmh-1 stets als Referenz (Nullepoche) dient. In Tabelle 5-3 wird  $\Delta_{tilt}$  aus der Differenz der ersten und der zweiten Messfahrt bestimmt, welche unter identen Aufnahmebedingungen (Geschwindigkeit, Abstand) erfolgten. Tabelle C-2 zeigt, dass diese Werte auch im Vergleich mit allen weiteren Versuchsfahrten erzielt und bestätigt werden.

Werden die Daten der ersten Versuchsfahrt kopiert und anschließend die Neigungen neu berechnet (60kmh-1-!COPY!), zeigt sich, dass die Ergebnisse für die Bauwerke A3, A4 und S1 wiederholt werden können. Die Ankerwand A6 weist mit 0,022° die größte Differenz auf. Dies kann auf den starken Bewuchs zurückgeführt werden, der abschnittsweise die untere Hälfte des Bauwerks bedeckt.

Tabelle C-2: Minimal detektierbare Neigungsdifferenz  $\Delta_{tilt}$  [°]

| <b>Bauwerk</b>            | <b>A3</b>                 | <b>A4</b> | <b>A6</b>   | <b>S1</b> |
|---------------------------|---------------------------|-----------|-------------|-----------|
| 60kmh – 2                 | 0,012                     | 0,011     | 0,046       | 0,090     |
| 60kmh – 3 – 2Sp           | –                         | –         | –           | 0,076     |
| 60kmh – 4 – mPl           | –                         | –         | –           | 0,078     |
| 80kmh – 5                 | 0,013                     | 0,012     | 0,047       | 0,093     |
| 80kmh – 6 – 2Sp           | 0,013                     | 0,014     | 0,050       |           |
| 100kmh – 7                | 0,013                     | 0,013     | 0,049       |           |
| SLS <sub>1</sub> : 0,057° | SLS <sub>2</sub> : 0,382° |           | ULS: 0,764° |           |
| 60kmh – 1-!COPY!          | 0,000                     | 0,000     | 0,022       | 0,009     |