



Öffentlicher Abschlussbericht für die Leibniz-Informationzentrum Technik und Naturwissenschaften und Universitätsbibliothek (TIB) an der Leibniz Universität Hannover

Projektpartner:

ALLSAT GmbH

Geo++ GmbH

**Leibniz Universität
Hannover,
Geodätisches Institut**

**Technische
Universität Clausthal,
Institute of
Geotechnology and
Mineral Resources**

Förderkennzeichen:

19F1147A

19F1147B

19F1147C

19F1147D

Verbundvorhaben:

Untersuchungen zur Eignung einer Datenfusion von Daten aus Open Data Quellen (GNSS- und SAR-Daten sowie Gebäude- und Verkehrsmodelle, insbesondere von SAPOS, BKG und Copernicus Prog) - OpenData4InfMon

Laufzeit des Vorhabens: 01.03.2023 - 31.08.2024

Berichtszeitraum: 01.03.2023 - 31.08.2024

Hannover, Clausthal-Zellerfeld im 03.2025

Gefördert durch:



**Bundesministerium
für Digitales
und Verkehr**

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Inhalt

1 Darstellung des Projekts.....	4
1.1 Motivation der Projektpartner	4
1.2 Verbundpartner	4
1.2.1 Geförderte Institutionen	4
1.2.2 Assoziierte Partner – Zusammenarbeit mit anderen Stellen	5
1.3 Projektziele	5
1.4 Zielgruppen.....	6
1.5 Wissenschaftlicher und technischer Ausgangspunkt.....	6
1.6 Bekanntgewordene Fortschritte auf dem Gebiet des Vorhabens bei Dritten.....	6
1.7 Generelle Projektidee	7
1.8 Zielsetzungen des Projekts und Forschungsfragen.....	7
2 Eingehende Darstellung	7
2.1 Untersuchungsobjekt	7
2.2 Methodik	9
3 Datenquellen	10
3.1 Open Data Quellen	10
3.2 Lokal erhobene Daten.....	12
4 Auswertung	13
4.1 GNSS	13
4.1.1 GNSS-Demonstrator	15
4.2 Ergänzende Sensorik vor Ort.....	16
4.3 Prozessierung Radar-Daten SAR von Sentinel-1	16
4.4 Gebäudemodelle-Klassifikation von Persistent Scatterer-Punkten unter Verwendung von LoD2-Gebäudemodellen und GIS-Software	21
4.5 Klassifizierung von Persistent Scatterer-Punkten mittels Maschinellen Lernens (KI) ...	23
4.6 Qualitätssicherung der SAR-Daten	26
4.6.1 Zeitliche Modellierung.....	26
4.6.2 Räumliche Modellierung	28
4.7 Datenfusion.....	33
5 Ergebnisse	33
5.1 Ergebnis-Portal	33
5.2 Bereitstellung der Daten für Dritte (Interessenten und Nutzer)	35
5.3 Aufzählung der wichtigsten wissenschaftlich-technischen und anderer wesentlicher Ergebnisse.....	36
5.4 Beiträge zu förderpolitischen Zielen	37
5.5 Anwender-Feedback.....	38
5.6 Veröffentlichung der Ergebnisse und Einbindung des wiss. Nachwuchses	39

6 Verwertbarkeit der Ergebnisse	39
7 Offene Fragen	39
8 Literatur	40
9 Abbildungsverzeichnis.....	41
10 Tabellenverzeichnis.....	43

1 Darstellung des Projekts

1.1 Motivation der Projektpartner

Die alternde Infrastruktur auf dem Landweg, der Schiene und dem Wasser erfordert bedeutende Ressourcen für die Sicherstellung der Betriebssicherheit. Das Monitoring von Deformationen, insb. an Brückenbauwerken und anderen wichtigen Infrastrukturen, verursacht durch Alterung, Materialermüdung und langsam (auch klimabedingt) verlaufende Bodenbewegungen, ist derzeit sehr kostenintensiv. Es gilt daher, massenhaft einsetzbare und kosteneffiziente Analyseverfahren anhand von Open Data kombiniert mit lokaler Sensorik zu entwickeln und zu testen, die es bisher nicht gibt.

Das Monitoring von Bewegungen an Bauwerken gewinnt durch Möglichkeiten zur (satellitenbasierten) berührungslosen Messung zusammen mit dauerhafter Installation und Fernüberwachung mittels Internets zunehmend an Bedeutung, um kritische Bauwerke und Infrastrukturen wirkungsvoll zu überwachen und im Schadensfall rechtzeitig zu warnen. Allerdings werden bisher meist Informationen bestimmter Sensoren isoliert betrachtet. Global Navigation Satellite System (GNSS)-Daten sowie Daten aus Synthetic Aperture Radar (SAR)-Messungen erlauben es, mit hoher Genauigkeit (wenige Millimeter), allerdings mit stark unterschiedlicher Ergebnis-Frequenz, Bewegungen zu quantifizieren. Insbesondere in urbanen Agglomerationsräumen mit aufgeklärten Bodenbewegungen müssen lokale Bewegungen mit regionalen Bewegungen kombiniert werden, um daraus Aufschluss über ein mögliches Gefährdungspotential für Infrastrukturbauwerke zu erhalten und geeignete Maßnahmen zur Prävention zu treffen.

Mit den GNSS-Daten der SAPOS- und BKG-Referenzstationen (BKG: Bundesamt für Kartografie und Geodäsie im Zuständigkeitsbereich des BMI) und den SAR-Daten von Sentinel-1 aus dem Erdbeobachtungsprogramm Copernicus existieren Geodaten, die im Sinne der Open Data Strategie der Bundesrepublik und der EU wesentliche Grundlage einer derartigen Beurteilung sein können.

Ziel des Vorhabens ist es, auf Basis frei verfügbarer Geodaten potentielle Risikogebiete mit gefährdeten Infrastrukturobjekten zu identifizieren, sowie zu verifizieren, inwieweit sich diese Daten mittels einer Datenfusion mit lokaler GNSS-Sensorik für die qualitativ hochwertige Identifikation von Deformationsschäden eignen.

1.2 Verbundpartner

1.2.1 Geförderte Institutionen

- a) Die ALLSAT GmbH, Hannover (<https://www.allsat.de>), im weiteren Verlauf dieses Berichts auch „ALLSAT“, mit den folgenden Projektschwerpunkten: Identifikation und Implementierung geeigneter lokaler GNSS-Sensorik zur Bauwerksüberwachung mit Bewegungsraten von wenigen mm / Jahr und deren Fusion mit den Open-Data Quellen aus SAPOS und BKG sowie Gesamtkoordination für das Projekt. Verantwortliche Leitung: Dipl.-Ing. Jürgen Ruffer
- b) Die Geo++ GmbH, Garbsen (<https://www.geopp.de>), im weiteren Verlauf dieses Berichts auch „Geo++“, mit den folgenden Projektschwerpunkten: Entwicklung von Auswerteverfahren für die Kombination von mehreren Consumer-Grade GNSS-Sensoren zu einem virtuellen Sensor, sodass neben den mm-Genauigkeiten beim Bauwerksmonitoring insb. die Zuverlässigkeit und Langzeitstabilität der Ergebnisse auch unter schwierigen GNSS-Empfangsbedingungen sichergestellt ist. Verantwortliche Leitung: Dr. Jannes Wübbena
- c) Das Geodätische Institut der Leibniz Universität Hannover (<https://www.gih.uni-hannover.de>), im weiteren Verlauf dieses Berichts auch „GIH“, mit den folgenden Projektschwerpunkten: Entwicklung von KI-basierten Klassifikatoren für die Beurteilung

der Qualität von Persistent Scatterer Interferometry (PSI)-Punkte unter Berücksichtigung der städtischen Bebauungsstruktur sowie Verkehrs- und Gebäudemodellen. Bereinigung der Daten von > 99 % der Ausreißer aus den PSI-Daten sowie Qualitätsanalyse durch punktbasierte Zeitreihenanalyse. Verantwortliche Leitung: Prof. Dr. Ing. Ingo Neumann

- d) Das Institute of Geotechnology and Mineral Resources der Technischen Universität Clausthal (<https://www.igmr.tu-clausthal.de>), im weiteren Verlauf dieses Berichts auch „TUC“, mit den folgenden Projektschwerpunkten: Raum-zeitliche Modellierung der Nachbarschaftsbeziehungen von PSI-Punkten mittels lokaler Patches und Flächenfunktionen, sodass neben der Zuverlässigkeit auch Genauigkeitssteigerungen mind. um den Faktor 2 bis 3 gegenüber den Einzelpunkten für die Fernerkundungsdaten erreicht werden. Verantwortliche Leitung: Prof. Dr. Ing. Jens-André Paffenholz

1.2.2 Assoziierte Partner – Zusammenarbeit mit anderen Stellen

- Die Bundesanstalt für Gewässerkunde (BfG) mit fachlicher Unterstützung und Austausch für die Beurteilung des Untersuchungsobjekts
- Die Wasserstraßen- und Schifffahrtsverwaltung des Bundes (hier: WSA Mittellandkanal und Elbe-Seitenkanal in Minden) mit fachlicher Unterstützung und Austausch für Installationen und Austausch für die Beurteilung der Ergebnisse
- Das Deutsche Zentrum für Schienenverkehrsforschung (DZSF) für den Austausch über mögliche Anwendungen des Vorhabens für die Infrastrukturen der Deutschen Bahn
- Das Amt für Geoinformation, Vermessung und Kataster der Stadt Essen für den Austausch über mögliche Anwendungen des Vorhabens für die Infrastrukturen einer Großstadt

Mit den genannten Stellen wurden im Verlauf des Vorhabens sowie zum Abschluss des Vorhabens wiederholt gemachte Erfahrungen sowie Gedanken zu Details der Untersuchungen und bestmöglichen Ergebnisdarstellungen ausgetauscht.

1.3 Projektziele

Übergeordnete Ziele dieses Vorhabens waren die Entwicklung, Test sowie Verifizierung eines kosteneffizienten Monitoring-Prozesses durch Generierung von Mehrwert durch Fusion von staatlich vorhandenen Open Data Quellen der Länder (GNSS, tlw. Gebäudemodelle) und insb. des Bundes (Copernicus-Programm, tlw. Gebäudemodelle, Verkehrswegedaten) und deren Kombination mit objektspezifischer lokaler GNSS-Sensorik.

Die smarten Teilziele der einzelnen Projektpartner waren:

ALLSAT GmbH: Identifikation und Implementierung geeigneter lokaler GNSS-Sensorik zur Bauwerksüberwachung mit Bewegungsraten von wenigen mm / Jahr und deren Fusion mit den Open Data Quellen aus SAPOS und BKG.

Geo++ GmbH: Entwicklung von Auswerteverfahren für die Kombination von mehreren Consumer-Grade GNSS-Sensoren zu einem virtuellen Sensor, sodass neben den mm-Genauigkeiten beim Bauwerksmonitoring insb. die Zuverlässigkeit und Langzeitstabilität der Ergebnisse auch unter schwierigen GNSS-Empfangsbedingungen sichergestellt ist.

Leibniz Universität Hannover: Entwicklung von KI-basierten Klassifikatoren für die Beurteilung der Qualität von PSI-Punkte unter Berücksichtigung der städtischen Bebauungsstruktur sowie Verkehrs- und Gebäudemodellen. Bereinigung der Daten von > 99% der Ausreißer aus den PSI-Daten sowie Qualitätsanalyse durch punktbasierte Zeitreihenanalyse.

Technische Universität Clausthal: Raum-zeitliche Modellierung der Nachbarschaftsbeziehungen von PSI-Punkten mittels lokaler Patches und Flächenfunktionen $Y =$

$f(x_{lok}, y_{lok}, z_{lok}, Zeit)$, sodass neben der Zuverlässigkeit auch Genauigkeitssteigerungen mind. um den Faktor 2 bis 3 gegenüber den Einzelpunkten für die Fernerkundungsdaten erreicht wird.

Die Validität des/der entwickelten Verfahren sollte an einem gut bekannten Untersuchungsobjekt vorgenommen werden, für das aus herkömmlichen Verfahren abgeleitete Deformationen im cm-Bereich bekannt sind (konkret an einem alten Brückenbauwerk des Wasserstraßenkreuzes Minden, s. 2.1 dieses Berichts).

1.4 Zielgruppen

Zu den Zielgruppen für das in diesem Vorhaben entwickelten Monitoringverfahren zählen insb. die Eigentümer und Betreiber kritischer Infrastrukturen, die einer langsamen Alterung und Abnutzung unterliegen bzw. durch langsame und kontinuierliche Bewegungen des Untergrunds sowie durch Witterungseinflüsse (z.B. Starkregenereignisse, Erosionen und Austrocknung) hervorgerufen werden können.

Konkret wurden folgende Zielgruppen im Vorfeld sowie während des Vorhabens und zum Abschluss einbezogen.

- die Bundesanstalt für Gewässerkunde
- das Wasserstraßen- und Schifffahrtsamt Mittellandkanal / Elbe-Seitenkanal (WSA Minden)
- Bundesanstalt für Wasserbau (BAW)
- das Deutsche Zentrum für Schienenverkehrsforschung (DZSF) beim Eisenbahnbundesamt
- das Amt für Geoinformation, Vermessung und Kataster der Stadt Essen
- das Austrian Institute for Technology (AIT)
- Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt)
- das BMDV-Expertennetzwerk

1.5 Wissenschaftlicher und technischer Ausgangspunkt

Die Prozessierung von GNSS- und SAR-Daten für das Monitoring von Bauwerken gehört seit einigen Jahren zum Stand der Technik (vgl. z. B. (Anghel, et al. 2016), (Glabsch 2018), (Qin, et al. 2017) sowie (Lehmann 2020)). Jedoch erfolgt zumeist keine gezielte Qualitätsanalyse der Daten und insb. werden die Daten nicht mittels mathematisch statistischer Ansätze fusioniert, was die Zuverlässigkeit und Aussagekraft der beobachteten Zustandsänderungen signifikant schwächt. Der Fusion der Datensätze kann entweder durch Beobachtung an einem geometrischen Punkt (z.B. (Spreckels, et al. 2020)), oder auch durch flächenhafte Fusion (Brockmeyer, Schnack und Jahn 2020) und (Mohammadivojdan, et al. 2020) erfolgen. Dies stellt sehr rudimentär dargestellt den Ausgangspunkt des Projektes dar, ohne wissenschaftlich-methodisch ins Detail zu gehen.

1.6 Bekanntgewordene Fortschritte auf dem Gebiet des Vorhabens bei Dritten

Im Verlauf des Vorhabens und bis zur Fertigstellung dieses Schlussberichts wurden folgende Arbeiten und Fortschritte auf dem Vorhabengebiet bekannt:

- Verfahren zur Kalibrierung von InSAR- und GNSS-Beobachtungen in einem Testfeld im Ruhrgebiet, veröffentlicht in avn. Allgemeine Vermessungsnachrichten. 4/2024
- Monitoring von Bodenbewegungen an Verkehrsinfrastruktur mittels Radarinterferometrie (InSAR) im BMDV-Forschungsvorhaben SAR4Infra von Landesbetrieb Straßenbau und Verkehr Schleswig-Holstein, GFZ Potsdam und Institut für Photogrammetrie und Geoinformation der Leibniz Universität Hannover.
- Vergleichende Untersuchungen des AIT im Projekt „VERBEWING“ zur Verformung von Ingenieurbauwerken am Beispiel der Autobahnbrücke Schlottwienbrücke mittels

InSAR-Daten von Sentinel-1 Messungen und Schlauchwagenmessungen sowie der Verwendung von Zentralen Wetterdaten des nationalen Wetterdienstes in Österreich.

- Unter der Leitung der TU Graz wurde zudem das Projekt InfraHealth abgeschlossen, in dem GNSS-Monitoring mit mm-Genauigkeiten gezeigt wurde. Allerdings lag dort der Fokus auf hochfrequenten Daten von hochwertigen Sensoren, was ein komplementärer Ansatz zum Low-Cost Monitoring-Ansatz dieses Projektes ist.

1.7 Generelle Projektidee

Im Projekt sollten Möglichkeiten der strengen Fusion von freien GNSS- und SAR-Daten sowie 3D-Stadtmodellen und Verkehrswegeplänen zum Zweck der besseren Beurteilung von Deformationen an Bauwerken in Kombination mit lokal installierter Sensorik untersucht werden, insb. an Infrastrukturen wie Bahntrassen, Energieleitungstrassen und (Brücken-) Bauwerken. Der Mehrwert der Daten wird insb. durch KI-Analyse und raum-zeitliche Parameterschätzung in Kombination mit lokalen GNSS-Daten generiert.

1.8 Zielsetzungen des Projekts und Forschungsfragen

Das Projekt adressierte vier zentrale Forschungsfragen:

1. Kann GNSS-Sensorik auch dann für das Bauwerksmonitoring eingesetzt werden, wenn keine Messpunkte mit guter Horizontfreiheit zur Verfügung stehen, indem mehrere GNSS-Sensoren am Bauwerk angebracht, zu einem virtuellen Beobachtungspunkt hoch-präzise vereinigt und gemeinsam ausgeglichen werden?
2. Ist die Qualität von massenhaften PSI-Zeitreihen aus SAR-Daten komplett automatisiert ableitbar, indem die bauliche Umgebung aus 3D-Stadtmodellen und Verkehrsnetzplänen und Nachbarschaftsbeziehungen in den SAR-Daten mit herangezogen werden?
3. Ist ein mind. 1D- bzw. 3D-Bewegungsmodell für die lokale Umgebung von Bauwerken aus PSI-Punkten durch eine räumliche Modellierung mittels lokaler Patches und insb. Freiformflächen (insb. B-Spline-Ansätzen) unter Berücksichtigung von 2. abzuleiten?
4. Wie und mit welcher Frequenz können die SAR- und GNSS-Daten optimal fusioniert werden, um eine bestmögliche Zustandsbeurteilung des Bauwerks für den Betreiber bzw. beteiligte Firmen bereitzustellen?

2 Eingehende Darstellung

2.1 Untersuchungsobjekt

Dabei handelt es sich um die alte Brückenüberführung des Mittellandkanals am Wasserstraßenkreuz Minden (Mittellandkanal/Weser) über die Weser. Vgl. Abbildung 1.



Abbildung 1: Luftaufnahme des Untersuchungsobjekts Alte Brücke des Mittellandkanals über die Weser. [BAW, 2020]

Konkret handelt es sich um die mit Wasser gefüllte ca. 370 m lange Trogrücke (Alte Kanalbrücke) über die Weser mit 8 Dreigelenkbögen, davon

- Strombögen (50 m), erbaut 1914, erneuert 1949 und
- 6 Flutbögen (32 m), erbaut 1914
- wobei sich die hauptsächliche Instrumentierung auf dem östlichen Strombogen in der Nähe der Scheitelfuge befand (s. Abbildung 2)

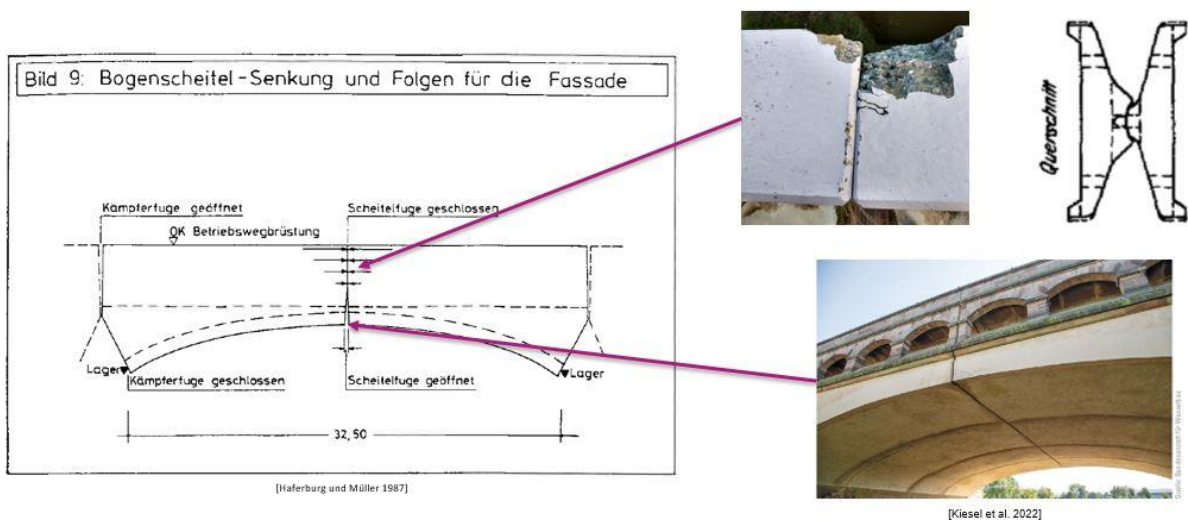


Abbildung 2: Scheitelfuge am östlichen Strombogen des Untersuchungsobjekts. [Hochschule Anhalt, 2025]

Als lokale Sensorstationen wurden zwei Multisensor-Stationen DCR600 inkl. Highend GNSS-Empfänger als lokale Referenzstationen installiert (s. Abbildung 3). Dies diente zum einen als Kontrolle für die Auswertung der SAR-Daten, zum anderen als Referenz für die erwarteten

Bewegungen auf der Brücke von wenigen cm. Die Multisensor-Station DCRS (S=Schleuse) wurde an einem gesicherten Ort außerhalb der Brücke installiert, ca. 500 m vom DCRB (B=Brücke) in östlicher Richtung auf einem Gelände, das nicht von den Deformationen an der Brücke betroffen sein sollte.

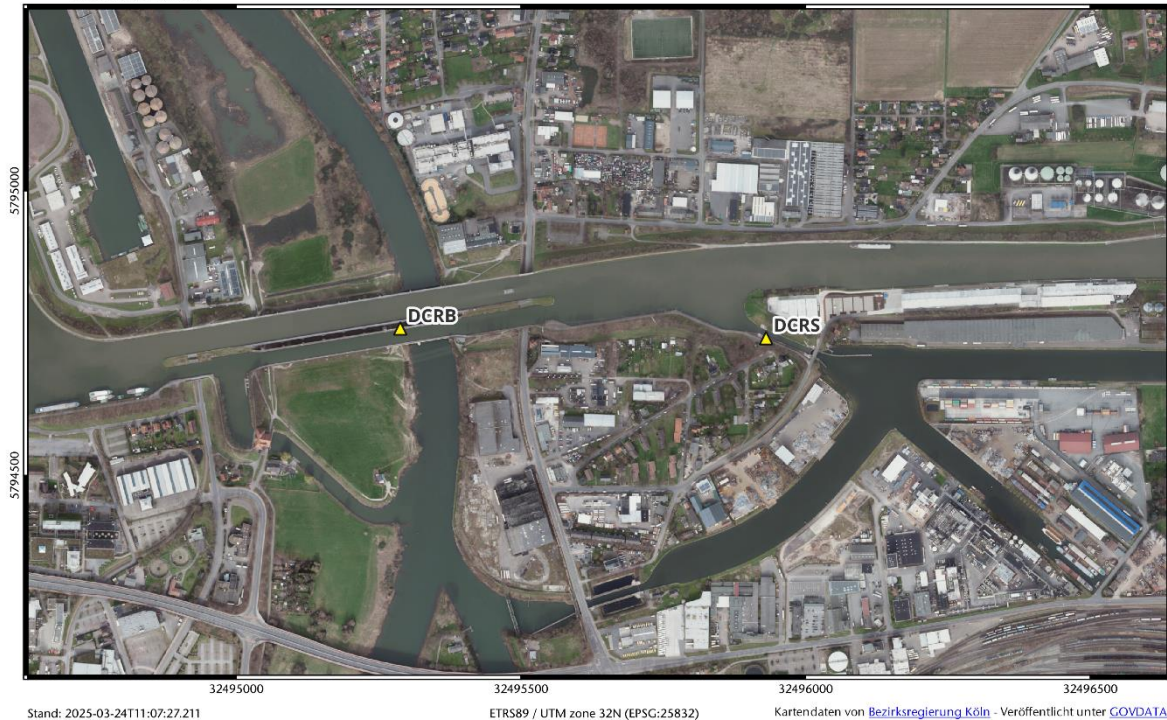


Abbildung 3: Luftbild der Untersuchungsumgebung des Wasserstraßenkreuzes Minden mit den 2 Standorten für die Doppelcorner-Reflektoren DCRB und DCRS.

2.2 Methodik

Der Einsatz geodätischer und geotechnischer Monitoringverfahren zur Überwachung von Bauwerken und Infrastrukturen leidet nach praktischen Erfahrungen der Antragsteller aus den vergangenen 10-15 Jahren unter kostspieligen instrumentellen Überwachungsmethoden, die daher nur selten und nur bei sehr kritischen Bauwerken genutzt werden. Die Messverfahren unter Einsatz präziser geodätischer GNSS-Empfänger (insb. mit Signalen von GPS und Galileo) verfügen über großes Potential, mm-genaue Ergebnisse in drei räumlichen Dimensionen (Lage und Höhe) mit hohen Taktraten (bis 1Hz) zu liefern.

Die Kombination mit frei verfügbaren Daten aus dem Erdbeobachtungsprogramm Copernicus (SAR-Daten) ermöglicht sowohl ein präventives Monitoring als auch den gezielten Einsatz von Massenmarkt-Sensoren an kritischen Bauwerken.

Insbesondere der GNSS-Einsatz an Bauwerken stößt auf Beschränkungen aufgrund von Empfangsstörungen an Bauwerksteilen, die die erreichbare Genauigkeit des Verfahrens stark beeinträchtigen können. Dieses Problem galt es vorrangig durch Neuentwicklung dieser Messmethode zu lösen.

Gleichzeitig erfordern derartige Monitoring-Verfahren die permanente Nutzung von GNSS-Messungen auf übergeordneten Punkten, die ungestört von Deformationen sind. Dies sind in der Regel Messstationen der sog. SAPOS-Referenzstationsnetze der Bundesländer und des Bundes (BKG), deren Beobachtungsdaten für die präzise Beobachtung an Bauwerken zwingend benötigt werden und i.d.R. frei zugänglich sind.

Um mit kostengünstigen GNSS-Ausrüstungen an Bauwerken und Infrastrukturen präventiv und überwachend tätig werden zu können, werden Informationen über das langfristige Verhalten von Bodenbewegungen und Bauwerken mit hoher Genauigkeit (*mm/Jahr*) benötigt, wie sie die Daten von Erdbeobachtungssatelliten des Copernicus-Programms ermöglichen. Ziel des Vorhabens ist die Fusion der genannten Daten auf regionaler und lokaler Ebene, um ein kommerziell nutzbares und kostengünstiges Monitoring von kritischer Infrastruktur zu ermöglichen.

Für die Untersuchung von Deformationen am Brückenbauwerk wurden zuerst die Anwender-Anforderungen (Problemstellung des Bauwerks, gewünschte Darstellungen der Messergebnisse, erforderliche Frequenz der Einzelergebnisse, benötigte Informationen zur Interpretation der Messergebnisse) mit Ingenieuren des Bauwerksbetreibers und Fachleuten anderer interessierter Institutionen (s. 1.4) abgestimmt und das geplante Messkonzept angepasst.

Für die Langzeitbeobachtung des Bauwerks (mind. ein vollständiger Jahreszyklus) wurden für die erwarteten Bauwerksbewegungen geeignete Beobachtungsorte identifiziert und für den gesamten Zeitraum so instrumentiert, dass sowohl präzise Messergebnisse mit den Satellitendaten von Copernicus (Sentinel-1) als auch mit GNSS-Daten kontinuierlich verfügbar sein sollten. Diese Daten sollten zusammen mit Aufzeichnungen der örtlichen Witterung (insb. der Bauwerkstemperatur) Aufschluss über das Bewegungsverhalten des instrumentierten Ortes erlauben.

Für die weitere Instrumentierung lokaler Deformationen wurden geeignete kostengünstige GNSS-Sensoren identifiziert und ebenfalls installiert. Die Messdaten wurden über Internet-Datentransfer an externe Server übertragen und in einer automatisierten Betrachtung aller Messstationen ausgewertet. Die Ergebnisse wurden schließlich in webbasierten Darstellungen visualisiert.

Für die Fusion der unterschiedlichen Messdaten wurden geeignete und mit Fachleuten des Bauwerksbetreibers abgestimmte Ergebnisse erzeugt und visualisiert, die sowohl längerfristige Trends als auch kurzzeitige Bewegungen genau genug erfassen sollten. Insbesondere die Wahl geeigneter Mess- und Auswertungsintervalle für regionale und auch für lokale Bewegungen wurden untersucht, um übersichtliche und aussagefähige Ergebnisse zu ermöglichen.

3 Datenquellen

3.1 Open Data Quellen

a) Sentinel-1 and Level of Detail 2 (LoD2)

Im Rahmen des Projekts werden offene Sentinel-1-Daten genutzt, die als frei verfügbare SAR-Daten im Rahmen des Copernicus-Programms von der Europäischen Weltraumorganisation (ESA) bereitgestellt werden. SAR operiert in Wellenlängen, die weder von Bewölkung noch von Lichtmangel beeinflusst werden, sodass eine Datenakquisition bei Tag und Nacht sowie unter sämtlichen Wetterbedingungen möglich ist. Dabei ermöglicht das C-SAR-Instrument von Sentinel-1 zuverlässige und wiederholte großflächige Überwachungen (Fletcher 2012).

Die Mission umfasst ursprünglich Sentinel-1A und Sentinel-1B, die denselben Orbit teilen. Aufgrund eines Stromausfalls bei Sentinel-1B am 23. Dezember 2021 erfolgte die weitere Datenakquisition zunächst ausschließlich mit Sentinel-1A. Seit dem 5. Dezember 2024 ist zudem Sentinel-1C in Betrieb. Für das Untersuchungsgebiet stehen dabei vier Hauptbahnen zur Verfügung (s. Abbildung 4):

- Aufsteigende Bahnen: Ascending 15 und Ascending 117
- Absteigende Bahnen: Descending 66 und Descending 139

Die unterschiedlichen Beobachtungsgeometrien dieser Bahnen liefern komplementäre Informationen, die für die präzise Deformationsanalyse mittels PSI unerlässlich sind.

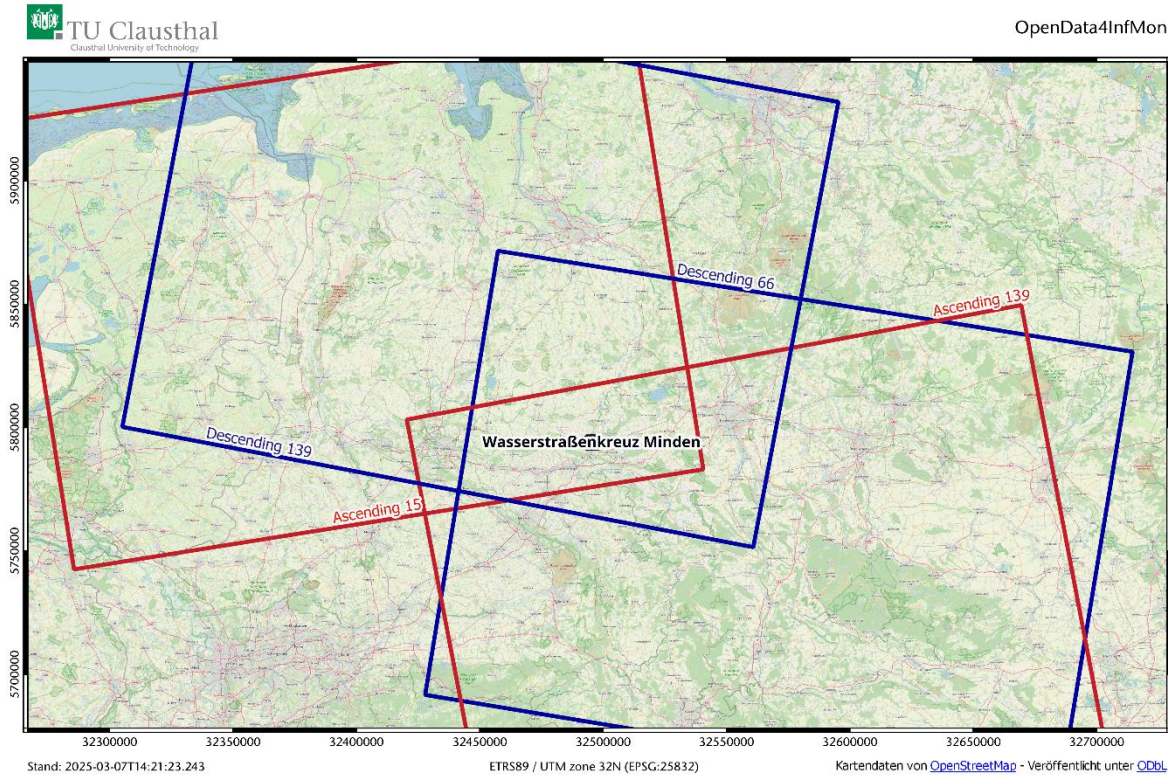


Abbildung 4: Die Abbildung zeigt die Sentinel-1A-Orbits, welche das Untersuchungsgebiet Wasserstraßenkreuz Minden überdecken. Dabei sind die aufsteigenden Bahnen (rot) sowie die absteigenden Bahnen (Lila) dargestellt.

Ein LoD2-Gebäudemodell (s. Abbildung 18) ist eine 3D-Darstellung, die detaillierte Dachstrukturen und standardisierte Dachformen, wie z. B. Giebel- oder Walmdächer, zusammen mit einem genau verallgemeinerten Grundriss enthält. Im Gegensatz zu den einfacheren LoD1-Modellen enthält das LoD2-Modell mehr geometrische Details der Dächer. In diesem Projekt werden die LoD2-Gebäudemodelle für die Klassifizierung von Persistent Scatterer (PS)-Punkten in Gebäudedächer und Boden verwendet.

b) GNSS-Referenzstationen

Die GNSS-Daten von öffentlich finanzierten Referenzstationen (in Deutschland vom BKG und von den im SAPOS-Verbund zusammengefassten Referenzstationen der Bundesländer) stehen Nutzern zunehmend kostenfrei zur Verfügung, allerdings bisher nicht flächendeckend für die Bundesrepublik. Von Interesse sind hier insb. die Rohdaten im sog. RINEX-Format mit einer Taktrate von 1 Sekunde. Diese stehen i.d.R. ab Anmeldung für eine Nutzung dauerhaft zur Verfügung, nicht jedoch rückwirkend für längere Zeiträume als einen Monat. Damit sind rückwirkenden Untersuchungen, wie sie für die SAR-Daten möglich sind, bisher nur für einen nicht zufriedenstellenden kurzen begrenzten Zeitraum möglich. Abbildung 5 gibt einen Überblick über die im Projekt genutzten GNSS-Referenzstationen.

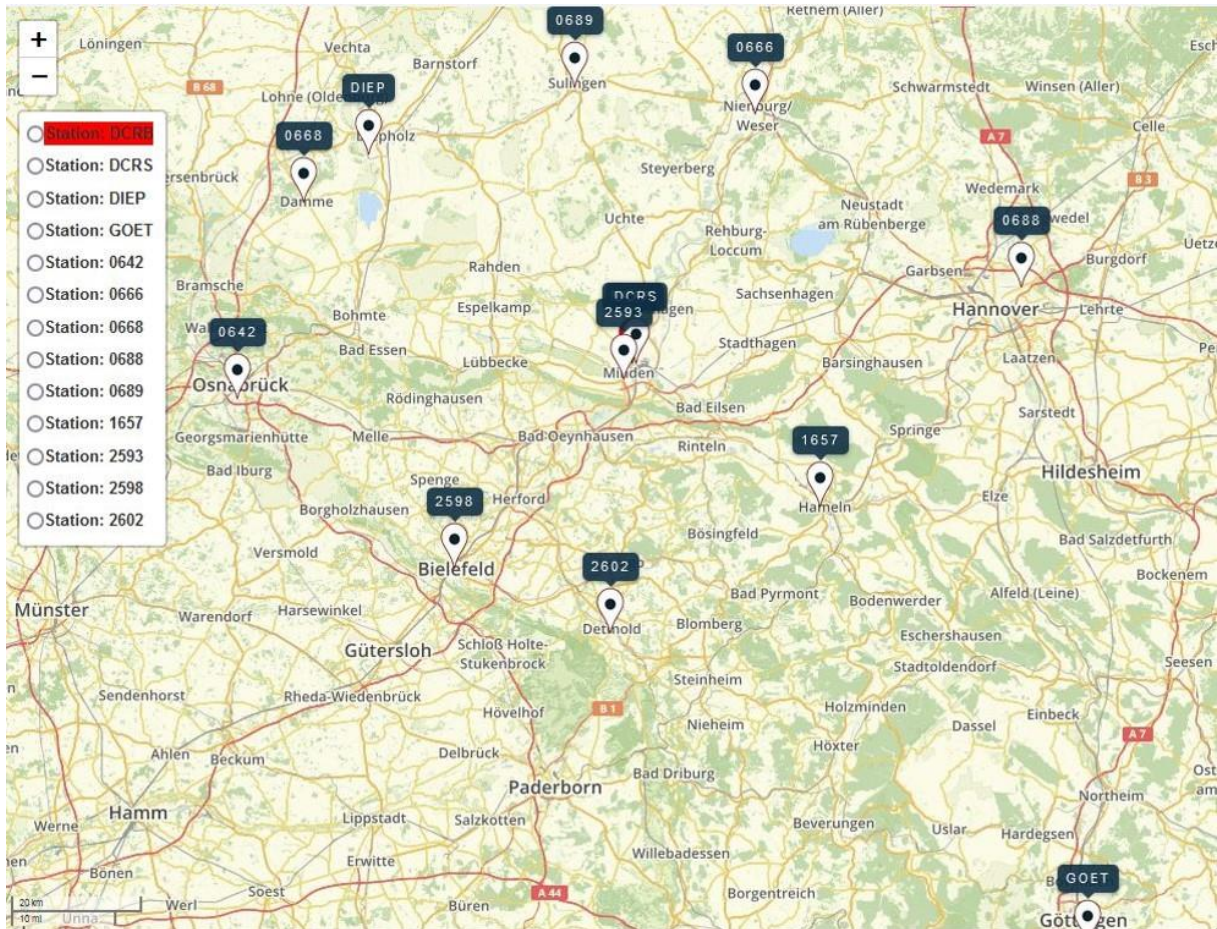


Abbildung 5: Genutzte GNSS-Referenzstationen (Darstellung aus GLOMON-Portal). [ALLSAT GmbH, 2025]

3.2 Lokal erhobene Daten

Bei den Daten der lokalen Sensorik handelte es sich um

- 2 Multisensor-Stationen mit je 1 Doppelcorner-Reflektor (DCR600) der ALLSAT und integrierter Mehrfrequenz GNSS-Antenne (Choke Ring) sowie angeschlossenen Mehrfrequenz GNSS-Empfänger als lokale Referenzen für die Kombination aus SAR-Daten von Sentinel-1 und GNSS-Daten von GPS und Galileo (s. Abbildung 6)
- 4 Temperatursensoren zur kontinuierlichen Messung der Bauwerkstemperatur an unterschiedlichen Stellen des Bauwerks
- 2 verschiedene Low-cost GNSS-Antennen und -Empfänger für Genauigkeitsuntersuchungen im Vergleich mit den hochwertigen GNSS-Anlagen der hochwertigen GNSS-Sensorik in den DCR600, und hier insb. unter schwierigen GNSS-Empfangsbedingungen, wie sie an Bauwerken häufig anzutreffen sind (s. Abbildung 7)



Abbildung 6: Multisensor-Station DCR600 auf der Brücke (DCRB). [ALLSAT GmbH, 2023]

Für die Low-cost GNSS-Ausstattung wurden aktuelle Geräte zweier verschiedener Hersteller ausgewählt, um deren Eignung für ein dauerhaftes Monitoring (Robustheit) und die erzielbaren Genauigkeiten eingehend zu untersuchen.

Es handelte sich dabei um Mehrfrequenz-Empfänger folgender Hersteller:

- Septentrio Mosaic
- uBlox FP9

sowie um Mehrfrequenz-Antennen der Hersteller Tallysman und uBlox mit zusätzlichen 12 cm Ground Planes, montiert auf dem Brückengeländer in der Nähe der Scheitelfuge und der Multisensor-Station DCRB.



Abbildung 7: Lowcost GNSS-Antennen auf der Brücke. [Geo++ GmbH, 2023]

4 Auswertung

4.1 GNSS

Bezüglich der GNSS-Auswertung wurde insb. die Herausforderung der ungünstigen Umgebungsbedingungen der Low-Cost-Sensoren bearbeitet. Der Einfluss der Sensorumgebung auf die GNSS-Messsignale lässt sich in drei Kategorien aufteilen:

1. Abschattungen: Objekte in der Sichtverbindung von Sensor zu GNSS-Satellit blockieren das Signal, sodass keine Messung zu diesem Satelliten (mit ausreichendem Signalpegel) stattfinden kann

2. Beugungen: Befinden sich Objekte nur teilweise in der Sichtlinie (präziser in der Fresnelzone) von Sensor zu Satellit, treten Beugungseffekte auf, die den Signalweg gegenüber der Sichtlinie verlängern
3. Mehrwegeeffekte: Trifft ein Signal sowohl über die Sichtlinie, als auch über (mind. einen) reflektierten Pfad im Sensor ein, entsteht eine Mehrwege-Interferenz. Diese kann das Signal je nach Phasenunterschied der Wege sowohl verzögert, als auch beschleunigt erscheinen lassen.

Alle drei Effekte waren bei der Installation am Untersuchungsobjekt zu beobachten. Die im Projekt verwendete GNSS-Auswertesoftware GNSMART kann dazu genutzt werden, die Größe dieser Effekte sichtbar zu machen. In Abbildung 8 ist dies beispielhaft für den Sensor auf dem Scheitelgelenk gezeigt. In der Auswertung wurden die mittleren Fehler der GNSS-Phasenbeobachtungen in den verschiedenen Blickrichtungen vom Sensor aus berechnet. Die Fehler schwanken dabei zwischen $\pm 15 \text{ mm}$. Die stärksten Effekte sind dabei von dem in der Nähe stehenden Doppelcorner-Reflektor verursacht, dem sowohl Abschattungen, Beugungen, als auch Mehrwege-Reflexionen zuzuordnen sind.

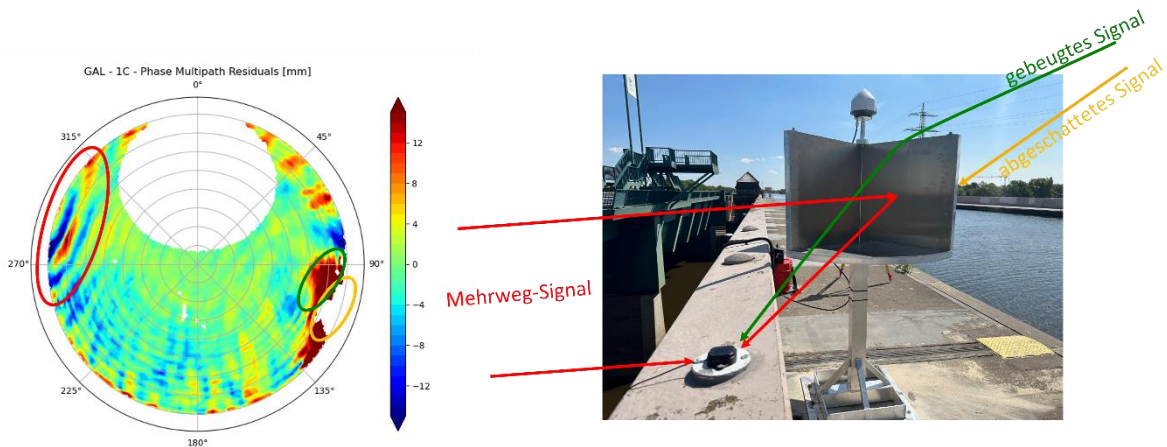


Abbildung 8: Umgebungseffekte des Sensors am Scheitelgelenk.

Um den Einfluss dieser Umgebungseffekte auf die Objektmonitoring-Performance zu untersuchen, wurden Simulationen durchgeführt. Hierbei wurde der Idealfall simuliert, dass keinerlei andere Fehler in den Beobachtungen vorhanden sind. Es wurden also sowohl Messrauschen, als auch atmosphärische Restfehler ignoriert, um den Einfluss der Umgebung bestmöglich zu isolieren. Die Ergebnisse sind in Abbildung 9 dargestellt.

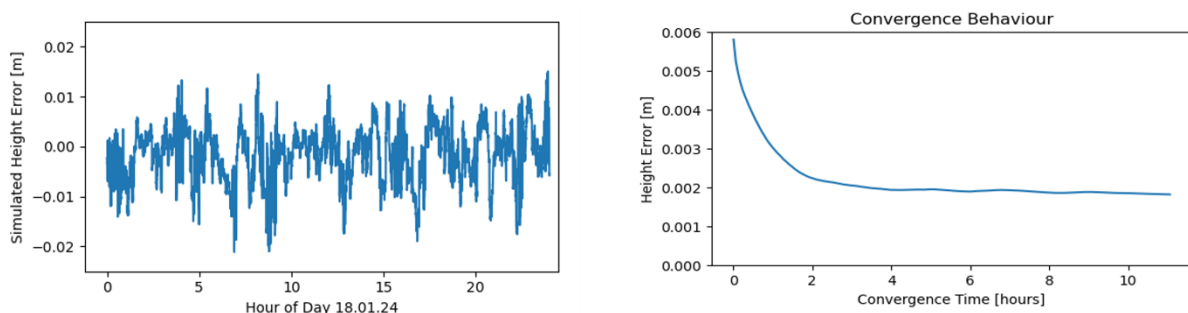


Abbildung 9: Simulierte Monitoringfehler in der Höhenkomponente. Nur die Umgebungseffekte der Low-Cost-Sensorik wurden berücksichtigt.

Während man im linken Teil der Abbildung 9 die Einzelepochenlösungen sieht, die in extremen Fällen bis zu 2 cm von der echten Position abweichen können, ist im rechten Teil das Konvergenzverhalten dargestellt. Hier ist deutlich zu erkennen, dass auch ein Mitteln über mehrere Stunden hinweg nicht zu Monitoring-Ergebnissen $\leq 1 \text{ mm}$ führt.

Diese Ergebnisse erlaubten den Schluss, dass ein Anbringen der gemessenen Umgebungseffekte als Korrekturparameter deutliche Verbesserungen der Monitoring-Genauigkeiten ermöglichen sollte. Um dies zu demonstrieren wurde ein 8-Tages-Datensatz aus dem Januar 2024 ausgewertet. Dabei wurde für jede Beobachtung die Blickrichtung ausgewertet, um dann die Korrektur gemäß des Patterns in Abbildung 8 vorzunehmen. Die Ergebnisse sind in Abbildung 10 dargestellt. Schon Einzelepochenlösungen ($1/sek$) ermöglichen Genauigkeiten mit einer RMS-Abweichung von 2,6 mm und nach 120 Minuten Mittlungsdauer können auch Genauigkeiten $< 1\text{ mm}$ gezeigt werden.

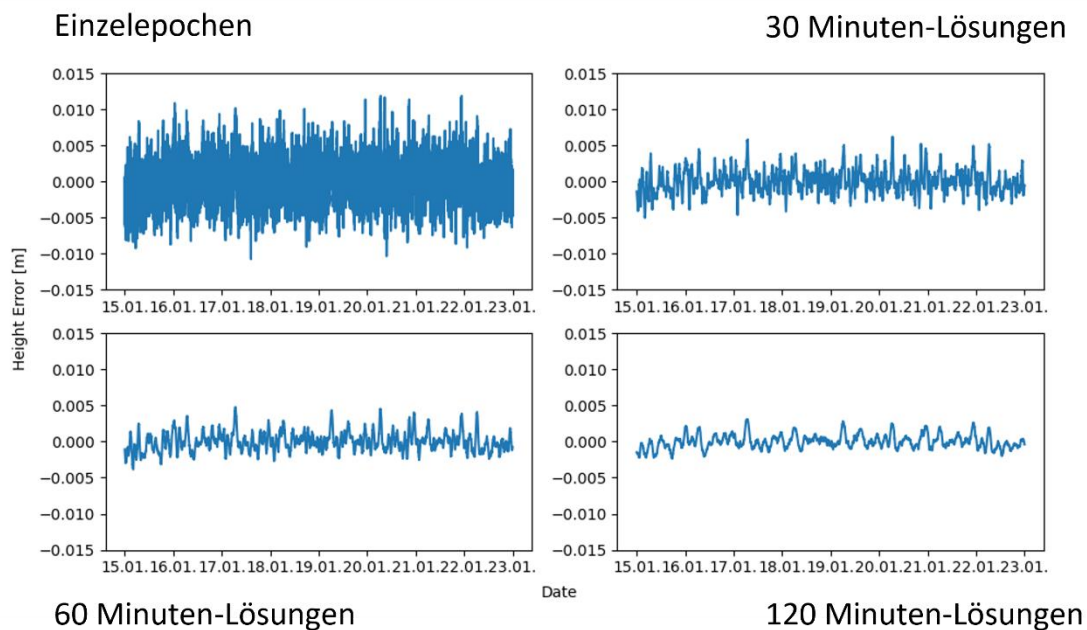


Abbildung 10: Höhenfehler nach Anbringen der Umgebungskorrektur. Die 4 Felder stellen unterschiedlich lange Auswertungsintervalle dar (Einzelepochen entsprechen 1 Sekunde).

4.1.1 GNSS-Demonstrator

Unabhängig von der Installation am Brückenbauwerk in Minden wurde auch das Bürogebäude der Geo++ mit vergleichbarer Sensorik ausgestattet. Insgesamt wurden vier Antennen montiert, wobei jeweils zweimal der u-blox ZED-F9P Empfänger mit der u-blox ANN-MB-00 Antenne und zweimal der Septentrio Mosaic-Go Empfänger mit der Tallysman TWI7972-Antenne verbaut wurden. Die Antennenpositionen wurden dabei so gewählt, dass möglichst große Unterschiede bzgl. der Umgebungseffekte zu sehen sind. In Abbildung 11 sind die Positionen der Sensoren auf dem Bürogebäude dargestellt.

Während der Sensor in Pos. 2 auf einem geodätischen Messpfeiler sehr gute Umgebungsbedingungen aufweist, ist der Sensor in Pos. 4 direkt neben einem etwa 3 Meter hohen Dachaufbau platziert, wodurch starke Abschattungs-, Beugungs- und Mehrwegeeffekte messbar sind, wie sie auch bei anspruchsvollen Monitoring-Objekten zu erwarten sind. Durch die initialen Auswertungen an dem Demonstrator konnte die Technologie entwickelt werden, die dann im Projekt verwendet wurde, um die Ergebnisse aus Abschnitt 4.1 zu erzielen.

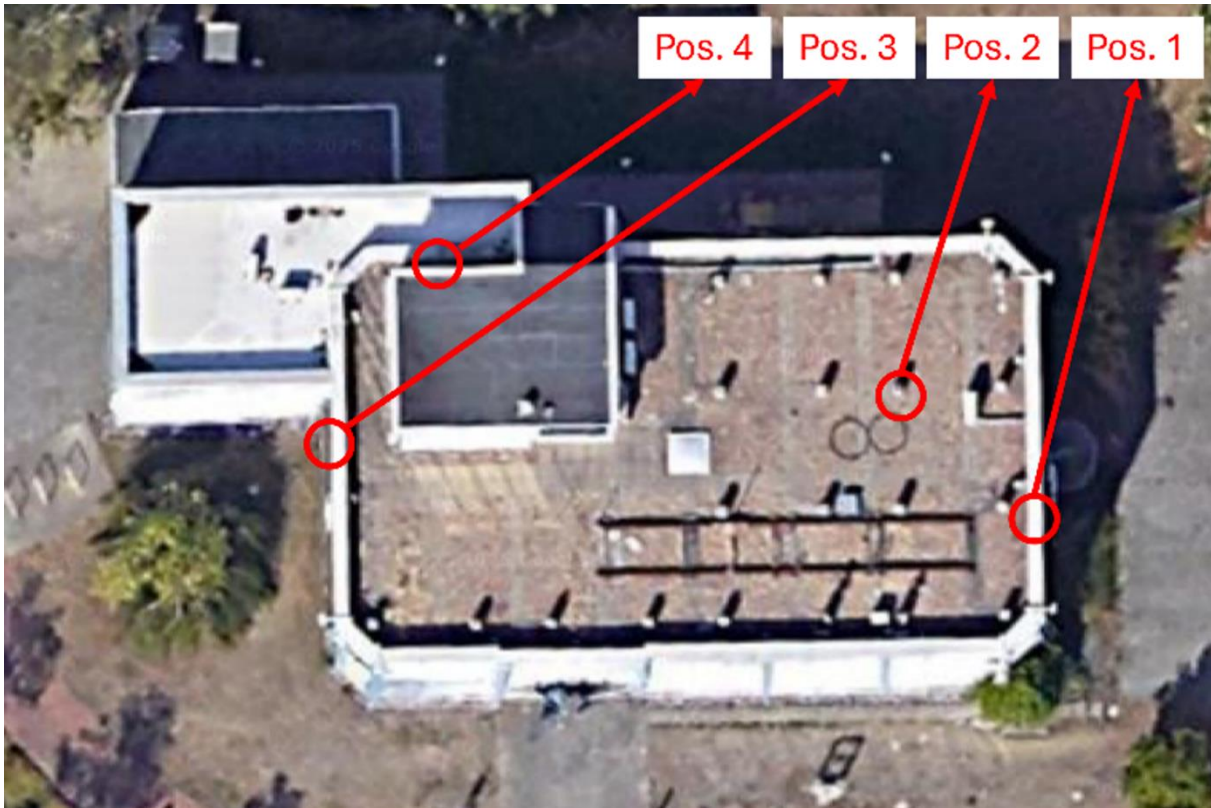


Abbildung 11: Positionen der Antennen auf dem Demonstrator-Gebäude.

4.2 Ergänzende Sensorik vor Ort

Neben der bereits beschriebenen Sensorik für GNSS- und InSAR-Messungen wurden ab Februar 2024 bis heute 3 Temperatursensoren an verschiedenen Stellen in das Bauwerk eingebracht, um die Wirkung von jahreszeitlichen und tageszeitlichen Temperaturänderungen zu erfassen und mit den detektierten Bauwerksbewegungen korrelieren zu können. Insbesondere die Wirkung der durch Sonneneinstrahlung hervorgerufenen Deformationen galt es damit zu erfassen.

Darüber hinaus wurde im Rahmen eines weiteren Forschungsprojekts von der Hochschule Anhalt und der ALLSAT, gefördert vom BMBF, neuartige prototypische Dehnungsmesssensorik an dem Untersuchungsbauwerk zeitgleich untersucht. Die Ergebnisse wurden u.a. im Ideensprint zu diesem Vorhaben am 07.02.2025 in einem Kurzvortrag vorgestellt.

Abhängig von der zu erwartenden Deformationscharakteristik eines Bauwerks kann auch eine andere geodätische oder geotechnische Sensorik integriert werden, sofern sich daraus weitergehende Erkenntnisse für ein Bauwerk erwarten lassen.

4.3 Prozessierung Radar-Daten SAR von Sentinel-1

Die Prozessierung der Sentinel-1-Daten mithilfe von ENVI SARscape Analytics Toolbox (AT) erstreckt sich von Dezember 2018 (ohne DCR) und Juli 2023 (mit DCR) bis August 2024 in einem monatlichen Zyklus. Dadurch werden kontinuierlich neue SAR-Daten und die daraus abgeleiteten PSI-Punkte (s. Abbildung 12) integriert, welche als Grundlage für Modellierungen und die Qualitätssicherung der Daten dienen. Im Zuge der Datenverarbeitung wurden verschiedene Kohärenzschwellen analysiert, um die optimale Qualität für die weiteren Schritte zu bestimmen. Bei einer Kohärenz von 0,4 umfasst man zwar eine sehr hohe Anzahl an PSI-Punkten, jedoch ist deren Qualität oft unzureichend (z. B. im Wasser). Setzt man hingegen die Kohärenz auf 0,9, so erhalten die verbleibenden PSI-Punkte zwar eine höhere Zuverlässigkeit, jedoch verringert sich die Gesamtanzahl derart stark, dass es zu Einschränkungen bei der maschinellen Klassifikation kommt. Infolgedessen wurden Kohärenzwerte zwischen 0,6 und

0,75 getestet. Die KI-basierten Auswertungen ergaben, dass eine Kohärenz von 0,75 die besten Ergebnisse für die vorliegende Fragestellung liefert. Folglich wurde 0,75 als Schwellenwert für alle Orbits (s. 3.1) festgelegt.



Abbildung 12: Die Abbildung zeigt PS-Punkte im Untersuchungsgebiet, farblich nach Kohärenzwerten codiert: Gelb (0,75–0,82), Grün (0,82–0,9) und Rot (0,9–0,99).

Eine besondere Herausforderung stellte die Sichtbarkeit der DCR auf der Brücke dar, da sie in den verarbeiteten Datensätzen nicht erkennbar war (s. Abbildung 13)

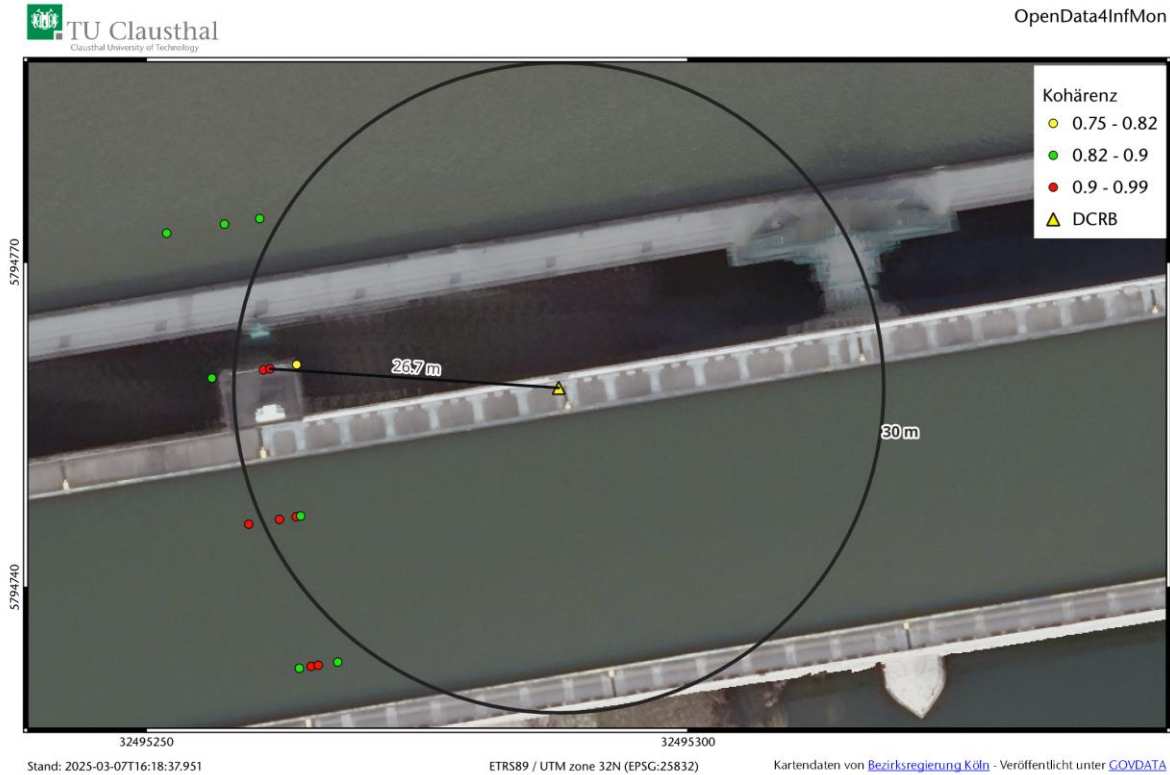


Abbildung 13: Die Abbildung zeigt, dass sich im direkten Umfeld des DCRB keine hochkohärenten PS-Punkte befinden; der nächste PS-Punkt mit hoher Kohärenz liegt in einer Entfernung von 26,7 m.

An einem anderen Standort mit gleicher DCR, jedoch in ebener Lage, ließ sich der Reflektor hingegen problemlos selbst in den Sentinel-1-Daten detektieren (s. Abbildung 14)



Abbildung 14: Die Abbildung zeigt das Gelände der Reichen Zeche, an dem ein baugleicher DCR installiert wurde, der in den Sentinel-1-Daten klar erkennbar ist.

Wie in Abbildung 15 ersichtlich, werden die Zeitreihen aller innerhalb eines 30-Meter-Radius um die DCRB liegenden Punkte berechnet. In Abbildung 13 ist zudem erkennbar, dass sich keine PSI-Punkte in unmittelbarer Nähe zur DCRB befinden. Bei der anschließenden Mittelwertbildung kommt neben der Distanz auch die Kohärenz jedes Punktes als Gewichts-faktor ($\text{Gewicht} = \text{Kohärenz} / \text{Distanz}$) zum Einsatz. Auf diese Weise erhalten PSI-punkte in unmittelbarer Nähe zur DCRB und mit hoher Kohärenz eine höhere Gewichtung als weiter entfernte oder mit weniger Kohärenz ausgestattete PSI-Punkte.

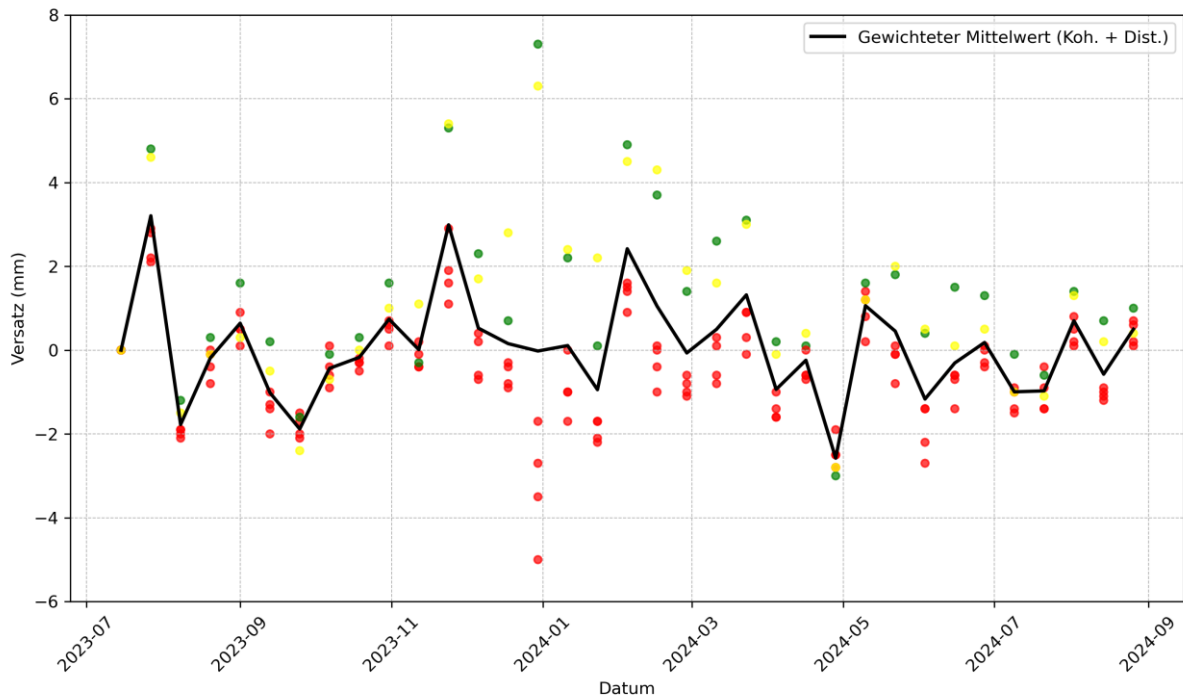


Abbildung 15: Die Abbildung zeigt Zeitreihen, in denen die Punkte entsprechend ihrer Kohärenz (0,75–0,82 gelb, 0,82–0,9 grün, 0,9–0,99 rot) eingefärbt sind. Die schwarze Kurve bildet den nach Distanz und Kohärenz gewichteten Durchschnitt ab.

Auch der Einsatz unterschiedlicher DEMs (SRTM und TanDEM-X mit 1-Arcsecond bzw. 3-Arcsecond-Auflösung) führte nicht zum gewünschten Ergebnis für die Brücke. Obwohl die DCR an der Schleuse sichtbar blieb (s. Abbildung 16), kommt es an der Brücke vermutlich zu Mehrwegeeffekten durch Wasseroberflächen und weitere metallische Strukturen in direkter Umgebung. Diese bewirken Phasenänderungen, die die zuverlässige Ableitung eines PSI-Punktes von der DCR verhindern.



Abbildung 16: Die Abbildung verdeutlicht, dass sich im direkten Umfeld des DCRS hochkohärente PS-Punkte befinden; der nächstgelegene hochkohärente PS-Punkt liegt in einer Entfernung von 3,5 m.

Wie in Abbildung 17 ersichtlich, werden die Zeitreihen aller innerhalb eines 30-Meter-Radius um die DCRS liegenden Punkte berechnet. Bei der anschließenden Mittelwertbildung kommt neben der Distanz auch die Kohärenz jedes Punktes als Gewichts-faktor zum Einsatz. Auf diese Weise erhalten PSI-punkte in unmittelbarer Nähe zur DCRS und mit hoher Kohärenz eine höhere Gewichtung als weiter entfernte oder mit weniger Kohärenz ausgestattete PSI-Punkte.

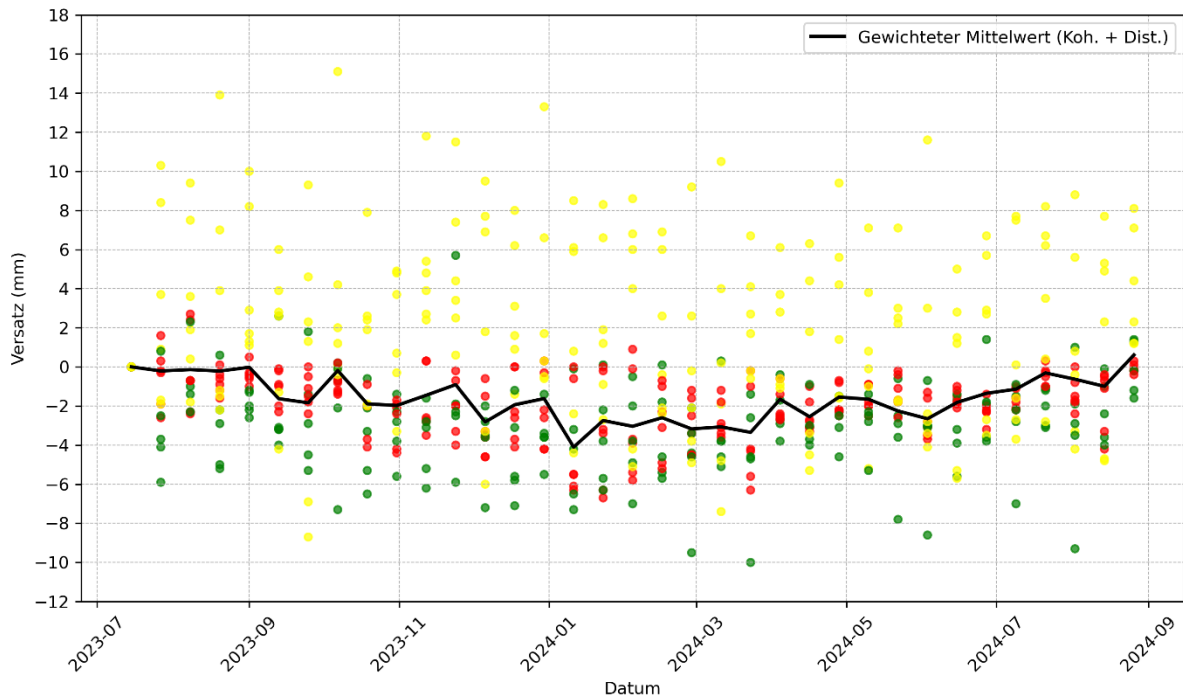


Abbildung 17: Die Abbildung zeigt Zeitreihen, in denen die Punkte entsprechend ihrer Kohärenz (0,75–0,82 gelb, 0,82–0,9 grün, 0,9–0,99 rot) eingefärbt sind. Die schwarze Kurve bildet den nach Distanz und Kohärenz gewichteten Durchschnitt ab.

4.4 Gebäudemodelle-Klassifikation von Persistent Scatterer-Punkten unter Verwendung von LoD2-Gebäudemodellen und GIS-Software

Die Zuverlässigkeit von PS-Punkten variiert in Abhängigkeit von den Material- und Struktureigenschaften der Objekte, auf denen sie sich befinden. Um diesen Unterschieden Rechnung zu tragen, werden die PS-Punkte in zwei Hauptgruppen eingeteilt: solche, die sich auf Gebäudedächern befinden, und solche, die sich auf dem Boden befinden. Diese Klassifizierung ist entscheidend für die Qualitätsbewertung der PS-Punkte sowie für die Deformationsanalyse, da unterschiedliche Oberflächentypen unterschiedliche Streueigenschaften in SAR-Daten aufweisen.

Eine der größten Herausforderungen bei der genauen Geolokalisierung von PS-Punkten ist der Layover-Effekt. Dieser tritt auf, wenn Objekte in unterschiedlichen Höhen denselben Abstand zum Radar haben und daher im SAR-Bild auf die gleiche Position projiziert werden. Wie von (Catalao, Raju und Nico 2020) beschrieben, kann dieser Effekt insb. in städtischen Gebieten mit Hochhäusern zu einer fehlerhaften Positionsbestimmung führen. Layover kann auch dazu führen, dass PS-Punkte an Gebäudefassaden so erscheinen, als ob sie sich auf dem Boden in der Nähe des Gebäudes befinden, was zu möglichen Fehlinterpretationen führt. Während in dieser Studie der Layover-Effekt aus Gründen der Vereinfachung nicht berücksichtigt wird, erkennen wir an, dass solche Verzerrungen zu Geolokalisierungsfehlern führen können. Eine erste Bewertung unseres Datensatzes zeigt, dass erhebliche Layover-Effekte begrenzt sind. Zukünftige Arbeiten werden dieses Problem jedoch durch die Verfeinerung der Geolokalisierungstechniken angehen, möglicherweise durch die Fusion von Daten mit hochauflösenden digitalen Höhenmodellen (DEMs) und durch die Nutzung hochauflösender TerraSAR-X-Bilder zur Verbesserung der Sentinel-1-Auflösung. Diese zusätzlichen Datensätze könnten die Lokalisierung der PS-Punkte verbessern und Mehrdeutigkeiten in komplexen städtischen Umgebungen reduzieren.

Für die Klassifizierung nutzen wir Gebäudemodelle der Stufe LoD2 (Abbildung 18), die eine detaillierte Darstellung von Gebäudestrukturen einschließlich Dächer und Wände bieten. Die

Klassifizierung wird mit GIS-Software, insb. QGIS, durchgeführt, wodurch eine effiziente Trennung der PS-Punkte basierend auf ihrer räumlichen Lage relativ zu den Gebäudegrundrissen ermöglicht wird (Omidalizarandi, et al. 2023). Durch das Überlagern des PS-Datensatzes mit den LoD2-Gebäudepolygonen werden PS-Punkte, die sich innerhalb der Gebäudegrundrisse befinden, als „Dachpunkte“ und solche außerhalb als „Bodenpunkte“ klassifiziert (Abbildung 19).

Ein entscheidender Faktor für die Zuverlässigkeit von PS-Punkten ist die Kohärenz, die die Konsistenz der Radarreflexionen über die Zeit hinweg beschreibt. In bewachsenen Gebieten ist die Kohärenz aufgrund der zeitlichen Dekorrelation, die durch Veränderungen in der Vegetationsstruktur verursacht wird, tendenziell geringer, wie von (Artese, et al. 2016) beschrieben. Um dieses Problem zu minimieren, wird bei der Verarbeitung der Sentinel-1-InSAR-Zeitseriendaten ein Kohärenz-Schwellenwert von 0,75 angewendet. Dadurch werden PS-Punkte mit niedriger Kohärenz – die typischerweise mit Vegetation in Verbindung stehen – bereits vor der Klassifizierung herausgefiltert. Somit werden PS-Punkte in bewachsenen Gebieten automatisch von der weiteren Analyse ausgeschlossen, wodurch potenzielle Fehler in der raum-zeitlichen Qualitätsmodellierung reduziert werden.

Nach der Klassifizierung werden die PS-Punkte einer zeitlichen Modellierung unterzogen, um wichtige Parameter zu schätzen. Dazu gehören deterministische Modellparameter (z. B. Geschwindigkeit), Korrelationsparameter (z. B. autoregressives (AR) Modell Ordnung 1) sowie stochastische und statistische Modellparameter (z. B. Standardabweichung, Kurtosis, Schiefe) (Omidalizarandi, et al. 2023). Diese Parameter dienen als zusätzliche Eingaben für eine auf maschinellem Lernen basierende Klassifikation, die darauf abzielt, PS-Punkte automatisch und zuverlässig zu klassifizieren.

Die Verwendung hochauflösender SAR-Bilder wie TerraSAR-X kann dazu beitragen, die Lokalisierung und Interpretation von PS-Punkten weiter zu verfeinern. Zukünftige Arbeiten werden das Potenzial dieser Datensätze zur Verbesserung der Klassifizierungsrobustheit und zur Minimierung von Geolokalisierungsunsicherheiten untersuchen.

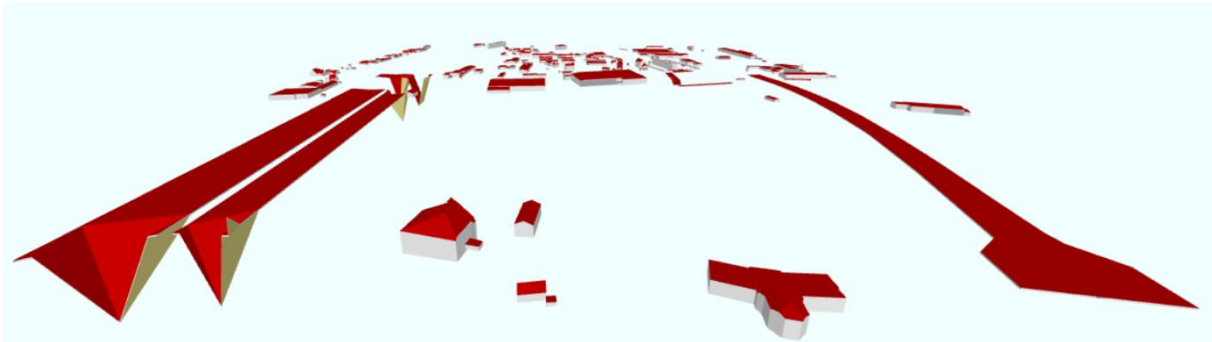


Abbildung 18: Darstellung des Teils des LoD2-Gebäudemodells in der Nähe der Kanalbrücke in Minden auf der Online-Plattform CityGMLViewer der HFT Stuttgart.



Abbildung 19: Die klassifizierten PS-Punkte fallen auf das Dach (rote Punkte) und auf den Boden (grüne Punkte), gelegen im Gebiet von Minden, Deutschland, dargestellt in QGIS. Für die Qualitätssicherung wurden die PS-Punkte in der Nähe der Brücke verworfen. DCRB-Corner-Reflektor mit GNSS-Empfänger auf der Brücke ist mit einem roten Dreieck dargestellt.

4.5 Klassifizierung von Persistent Scatterer-Punkten mittels Maschinellem Lernen (KI)

Wie bereits erwähnt, werden PS-Punkte in zwei Kategorien klassifiziert: Gebäudedächer und Boden. Diese Klassifizierung erfolgt mithilfe von LoD2-Gebäudemodellen und GIS-Software wie QGIS. Anschließend wird eine temporale Modellierung für diese beiden PS-Punktklassen durchgeführt, wodurch deterministische, korrelationsbezogene, stochastische und statistische Modellparameter geschätzt werden können. Zusätzlich werden einige Parameter aus der ENVI SARscape AT-Software abgeleitet.

In unserem ML-basierten Klassifikationsansatz wird für jede PSI-Zeitreihe eine Teilmenge von Merkmalen als unabhängige Variablen betrachtet. Diese Merkmale umfassen:

- 'Z': Höhe der PS-Punkte
- 'velocity': Mittlere Geschwindigkeit, geschätzt aus der temporalen Modellierung
- ' 1σ ': Standardabweichung, geschätzt aus der temporalen Modellierung
- 'AR(1)': Erster AR-Koeffizient, geschätzt aus der temporalen Modellierung
- 'skewness': Maß für die Asymmetrie der t-Verteilung um ihren Mittelwert, berechnet aus der temporalen Modellierung
- 'kurtosis': Maß für die "Tailedness" der t-Verteilung, berechnet aus der temporalen Modellierung
- 'R²': Bestimmtheitsmaß, berechnet aus der temporalen Modellierung
- 'MuSigma': Verhältnis des Mittelwerts zur Standardabweichung, wobei der Mittelwert aus der ENVI SARscape AT-Software stammt
- 'Vprecision': Schätzung der durchschnittlichen Präzision der Geschwindigkeitsmessung (*mm/Jahr*), aus der ENVI SARscape AT-Software
- 'Hcorrection': Höhenausgleich (in Metern) im Vergleich zum eingegebenen digitalen Höhenmodell, aus der ENVI SARscape AT-Software

Diese Merkmale dienen als Prädiktoren im Modell, während die abhängige Variable 'Roof' das Ziel der Vorhersage ist. Zeilen, in denen die Spalte 'Roof' den Wert 1 hat, entsprechen PS-Punkten auf Gebäudedächern, während Zeilen mit dem Wert 0 PS-Punkte auf dem Boden darstellen.

Anschließend wird eine Merkmalsnormalisierung durchgeführt, um eine faire Vergleichbarkeit der Variablen zu gewährleisten. Normalisierung ist häufig für maschinelle Lernmodelle erforderlich, da sie tendenziell besser funktionieren, wenn alle Merkmale auf derselben Skala liegen. Dazu werden verschiedene Wahrscheinlichkeitsverteilungen (z. B. Normal-, t-, Gamma- und Generalized Extreme Value (GEV)-Verteilungen) auf die Daten angepasst. Die beste Verteilung für jedes Merkmal wird basierend auf dem höchsten p-Wert ausgewählt. Anschließend werden die Merkmale mittels Z-Score-Normalisierung standardisiert, indem der Mittelwert subtrahiert und durch die Standardabweichung geteilt wird.

Die paarweise Korrelation zwischen den Merkmalen wird anhand der normalisierten Daten berechnet. Dies ergibt eine quadratische Matrix, in der jede Zahl den Korrelationskoeffizienten zwischen zwei Merkmalen repräsentiert. Eine Heatmap wird erzeugt, um diese Korrelationen zu visualisieren (Abbildung 20):

- Werte zwischen -1 und 1 zeigen die Stärke der Korrelation
- Warme Farben (z. B. Rot) zeigen eine starke positive Korrelation an
- Kalte Farben (z. B. Blau) zeigen eine starke negative Korrelation an

Diese Visualisierung hilft dabei, signifikante Zusammenhänge zwischen den Merkmalen und ihrer potenziellen Auswirkung auf die Zielvariable zu erkennen.

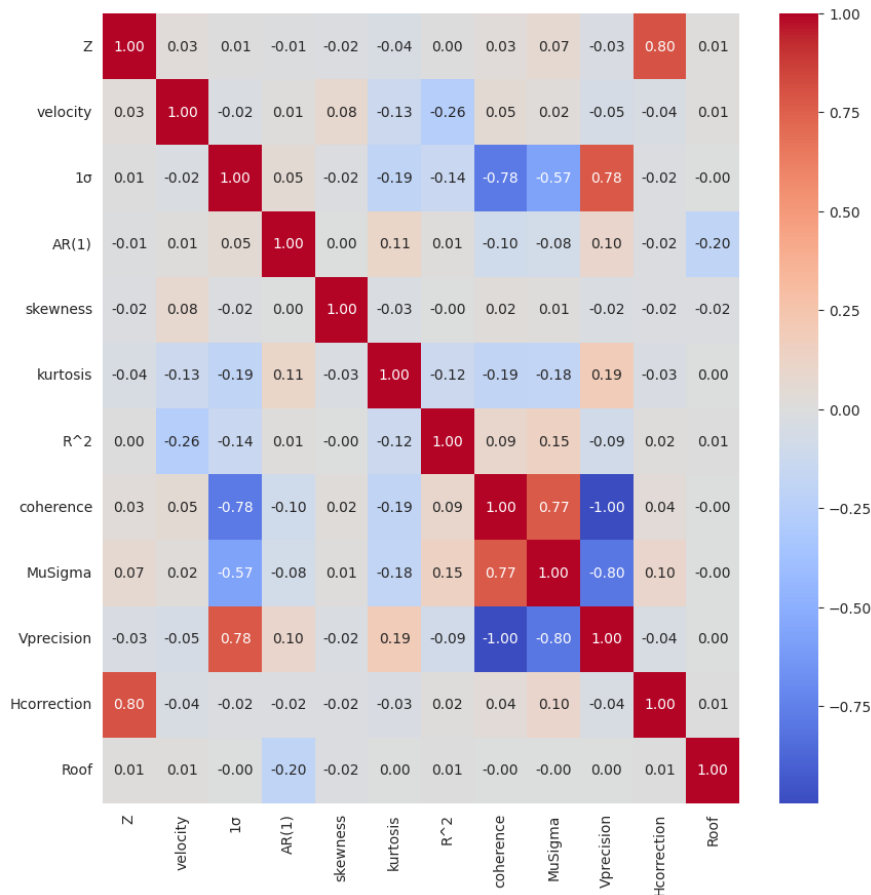


Abbildung 20: Korrelationsmatrix der PS (75 %).

Tabelle 1: Die Klassifizierungsergebnisse der einzelnen Klassen mit Genauigkeitsmetriken.

ML-Methodik	Anzahl der PS-Punkte		Kohärenz-basierte	Genauigkeitsmetriken					
			PS-Qualität	Precision	Recall	Accuracy	F1-score	AUC-ROC	AUC-PR
XGBoost	Dach	2552	75%	96.86%	96.87%	96.13%	96.86%	99.38%	98.91%
	Boden	5542							

Das Datenset wird in Trainings- (70%) und Testdaten (30%) aufgeteilt, um sicherzustellen, dass das Modell auf einem Teil der Daten trainiert und auf einem anderen evaluiert wird, wodurch Overfitting vermieden wird. Das Ziel dieser Analyse ist es, einen XGBoost-Klassifikator zu trainieren, seine Leistung anhand verschiedener Metriken zu bewerten und die Ergebnisse mit SHAP (SHapley Additive exPlanations)-Werten zu interpretieren, um die Bedeutung der Merkmale zu verstehen. Dieses Modell, eine leistungsstarke Methode des Gradient Boosting, wird häufig für Klassifikationsaufgaben eingesetzt. Nach dem Training werden die Modellvorhersagen anhand mehrerer Genauigkeitsmetriken bewertet: Balanced Accuracy, Precision, Recall, F1-Score, AUC-ROC (Fläche unter der Receiver Operating Characteristic-Kurve) und AUC-PR (Fläche unter der Precision-Recall-Kurve) (Tabelle 1).

Eine Konfusionsmatrix (Abbildung 21) wird erstellt, um die Klassifikationsleistung des Modells zu visualisieren. Sie zeigt die wahren Positiven, wahren Negativen, falschen Positiven und falschen Negativen an. Die Matrix wird normalisiert, um die Anteile korrekt klassifizierter Instanzen darzustellen und die Performance für verschiedene Klassen besser verständlich zu machen.

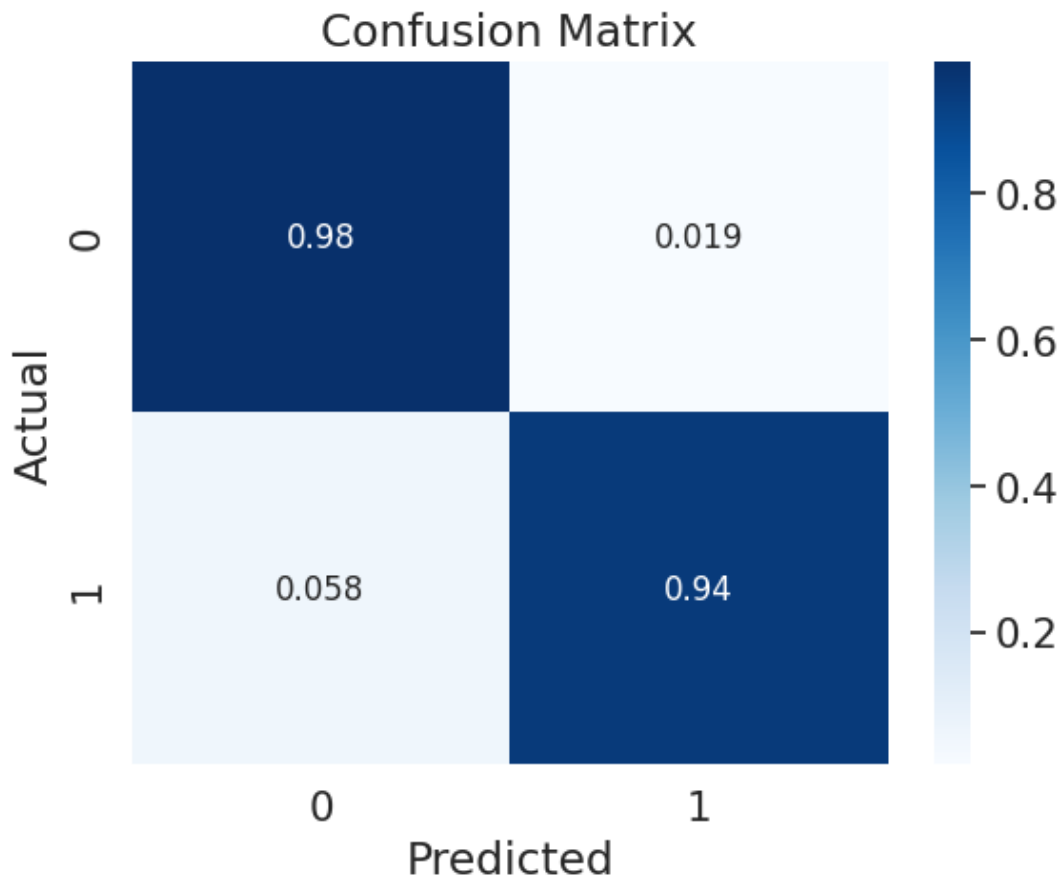


Abbildung 21: Konfusionsmatrix der PS (75 %).

Zur Interpretation der Modellvorhersagen werden SHAP-Werte berechnet. Diese Methode erklärt die Ausgabe von ML-Modellen, indem sie den Beitrag jedes Merkmals zur endgültigen

Vorhersage quantifiziert. Wie in der Abbildung 22 im SHAP-Summary-Plot zu sehen ist, hat AR(1) den größten Einfluss auf die Klassifizierungsergebnisse

- Das SHAP Summary Plot zeigt die Auswirkung jedes Merkmals auf die Modellvorhersagen
- Die Verteilung der SHAP-Werte für jedes Merkmal gibt Aufschluss darüber, welche Merkmale am einflussreichsten sind
- Zudem wird sichtbar, ob Merkmale positive oder negative Effekte auf die Vorhersagen haben

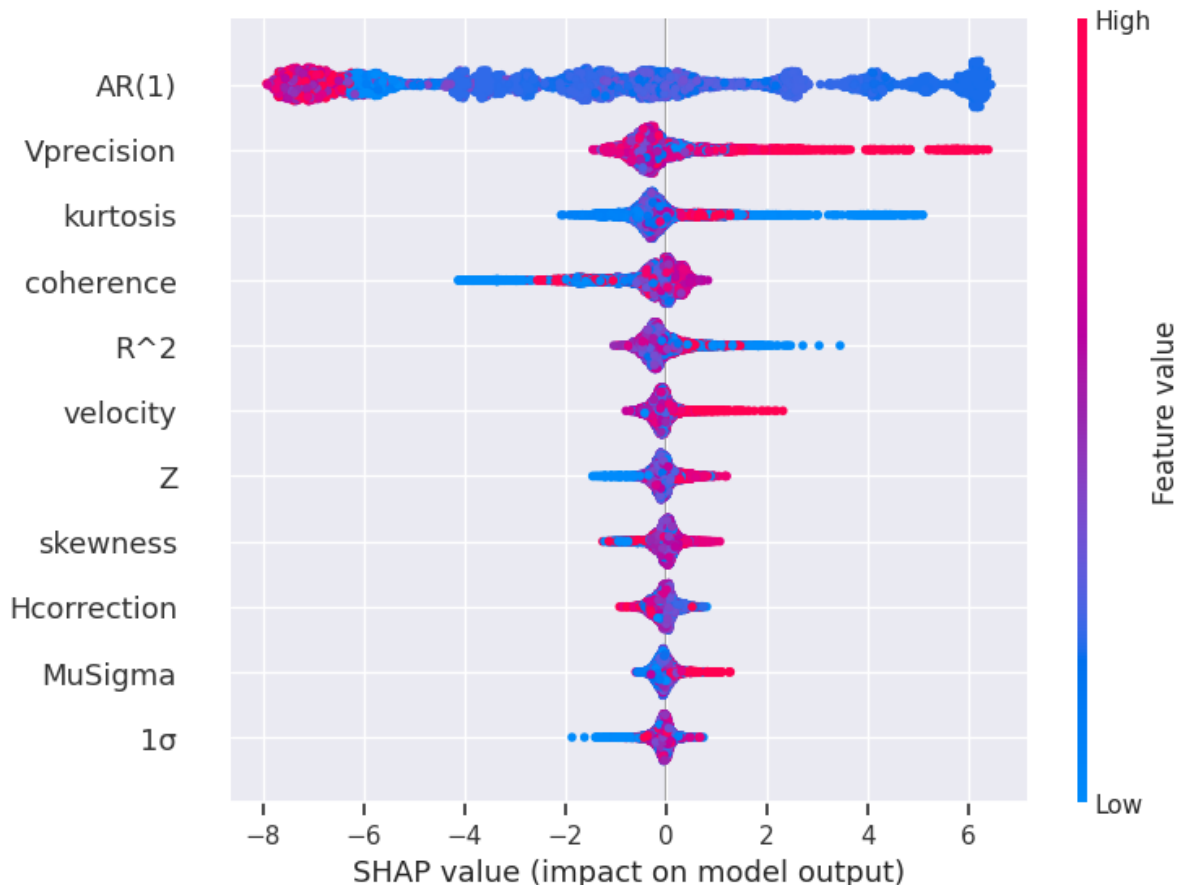


Abbildung 22: SHAP Zusammenfassung Plot.

Durch die Kombination von XGBoost-Klassifikation, Genauigkeitsmetriken und SHAP-Analyse wird sichergestellt, dass sowohl eine hohe Vorhersagegenauigkeit als auch eine gute Interpretierbarkeit des Modells erreicht wird.

4.6 Qualitätssicherung der SAR-Daten

Die Implementierung eines geeigneten räumlich-zeitlichen Qualitätsmodells der PS-Punkte ermöglicht es uns, die Signifikanz der Deformationen genau zu schätzen. Die raum-zeitliche Qualitätsmodellierung der PSI-Zeitreibendaten erfolgt in zwei Stufen (Omidalzarandi, et al. 2023):

4.6.1 Zeitliche Modellierung

PSI-Daten von Sentinel-1A, verarbeitet mit ENVI SARscape AT durch die TUC, werden mittels einer univariaten Zeitreihenanalyse untersucht. Da für den Überwachungszeitraum der Kanalbrücke in Minden (15. Juli 2023 – 26. August 2024) keine Sentinel-1B-Daten verfügbar sind, wird ausschließlich Sentinel-1A mit einem 12-tägigen Abtastintervall verwendet. Die

effektive Abtastfrequenz beträgt 30,4375 PSI-Messungen pro Jahr ($365,25/12$), wobei Datenlücken berücksichtigt sind.

- Datenlücken:
 - Kleinere Lücken werden durch lineare Interpolation gefüllt
 - Größere Lücken werden mittels vorwärts- und rückwärtsgerichteter AR-Modell-Extrapolation geschlossen, um eine konstante Abtastfrequenz sicherzustellen
- Frequenzextraktion:
 - Die PSI-Zeitreihe wird mit einem Polynom erster Ordnung detrended, bevor dominante Frequenzen extrahiert werden
 - Das Lomb-Scargle-Periodogramm wird zur Frequenzschätzung aus den ungleichmäßig beprobten PSI-Daten angewendet. Diese Methode reduziert Frequenzlecks und übertrifft traditionelle spektrale Dichteschätzungen.
 - Zur Entsaisonalisierung wird ein harmonisches Oszillationsmodell mit den aus dem Lomb-Scargle-Periodogramm extrahierten Frequenzen angepasst.
- Parameterschätzung:
 - Ein Beobachtungsmodell umfasst ein funktionales Modell (harmonisches Oszillationsmodell), ein AR Modell des farbigen Messrauschens und ein stochastisches Modell in Form einer skalierten t-Verteilung.
 - Der Generalized Expectation Maximization (GEM)-Algorithmus schätzt deterministische (Offset, Geschwindigkeit), korrelative (AR-Koeffizient) und stochastische (Skalierungsfaktor, Freiheitsgrade der t-Verteilung) Parameter gemeinsam (Omidalzarandi, et al. 2023); (Alkhatib, Kargoll und Paffenholz 2017).

Dieses umfassende Verfahren gewährleistet, dass sowohl Drift als auch harmonische Oszillationen effektiv modelliert und aus der PSI-Zeitreihe entfernt werden. Dadurch wird eine genauere Schätzung der Deformationsraten und eine verbesserte Analyse ermöglicht. Die Histogramme der Gesamtstandardabweichung und der mittleren Geschwindigkeit sind in den Abbildung 23 und Abbildung 24 [Links] dargestellt. Für das ausgewählte Gebiet in Minden wurden folgende Parameter geschätzt:

- Gesamtstandardabweichung: Mittelwert 1,12 mm, Standardabweichung 0,34 mm
- Geschwindigkeit: Mittelwert $-0,06$ mm/Jahr, Standardabweichung 0,3 mm/Jahr

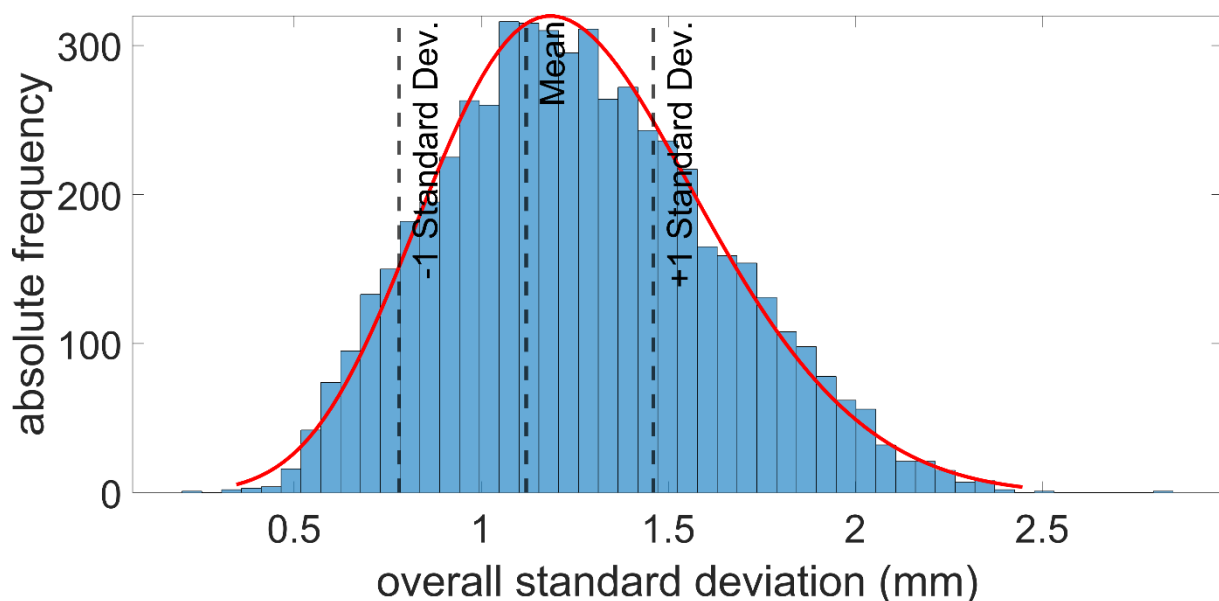


Abbildung 23: Histogramme der Gesamtstandardabweichung geschätzt aus der zeitlichen Modellierung für PS Punkte fallen auf den Boden.

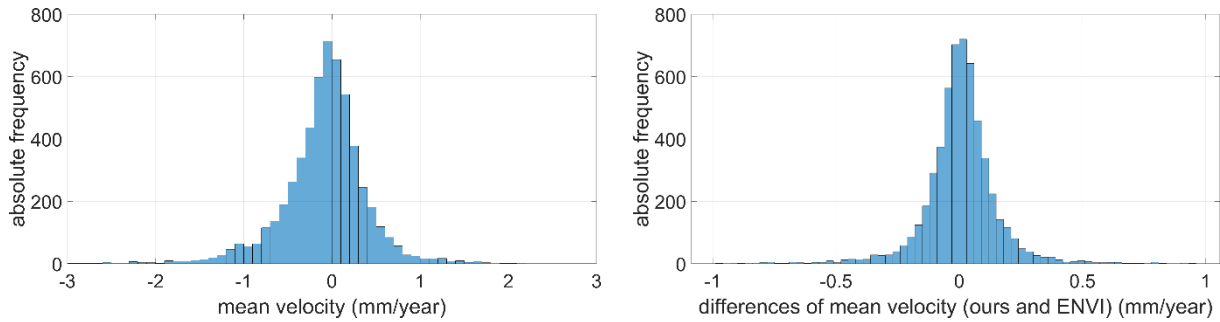


Abbildung 24: Histogramme der mittleren Geschwindigkeit, die aus der zeitlichen Modellierung für auf den Boden fallende PS-Punkte geschätzt wird [Links], Histogramme der Differenzen zwischen der mittleren Geschwindigkeit, die aus unserer zeitlichen Modellierung geschätzt wurde, und der aus ENVI SARscapeAT erhaltenen, für PS-Punkte, die auf den Boden fallen (Mittelwert 0,007, Standardabweichung 0,083) [Rechts].

Der Vergleich der geschätzten Geschwindigkeit mit den Ergebnissen aus ENVI SARscape AT zeigt eine geringe Abweichung mit einer mittleren Differenz von $0,007 \text{ mm/Jahr}$ und einer Standardabweichung von $0,083 \text{ mm/Jahr}$ (Abbildung 24 [Rechts]). Unsere zeitliche Analyse zeigt außerdem, dass PS-Punkte, die sich am Boden befinden, eine bessere Qualität aufweisen und weniger Autokorrektur benötigen als diejenigen, die sich auf den Dächern von Gebäuden befinden. Dies ist deutlich aus den Histogrammen des AR-Modells 1 ersichtlich (Abbildung 25).

Die endgültigen Schätzergebnisse liefern Offset, Geschwindigkeit, AR-Koeffizienten und stochastische Parameter. Diese Parameter werden zur ML-basierten Klassifikation von PS-Punkten verwendet.

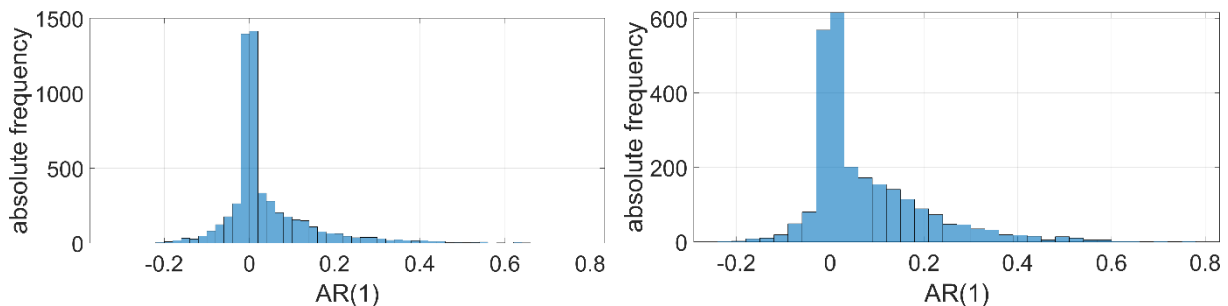


Abbildung 25: Histogramm des AR(1) aus der univariaten Zeitreihenanalyse für die PS-Punkte fallen auf den Boden (Mittelwert 0,0005, Standardabweichung 0,009) [Rechts] und auf das Dach (Mittelwert 0,073, Standardabweichung 0,115) [Links].

4.6.2 Räumliche Modellierung

Um die Interpretation von Bodenverformungsmustern zu verbessern, wird ein spatio-temporaler Modellierungsansatz angewendet, um die Beziehungen zwischen PS-Punkten zu analysieren. Dies erfolgt durch die Approximation lokaler geometrischer Patches mithilfe mathematischer Oberflächenmodelle wie B-Splines. Allerdings erschweren die ungleichmäßige Verteilung der PS-Punkte, erhebliche Datenlücken und ein hohes Rauschniveau den Oberflächenapproximationsprozess.

Frühere Studien wie die von (Mohammadivojdan, et al. 2020) haben gezeigt, dass deterministische Oberflächenapproximationstechniken, insb. die Multilevel B-Splines Approximation (MBA), stochastische Ansätze wie Kriging übertreffen, wenn es darum geht, Datenlücken zu bewältigen und gleichzeitig die rechnerische Effizienz aufrechtzuerhalten. Daher ist MBA eine bevorzugte Methode für die großflächige Deformationsmodellierung, insb. in Regionen, in denen hochauflösende Deformationsanalysen erforderlich sind.

Um räumliche Variationen in der Deformation zu erfassen, wird eine MBA-Oberfläche an die aus der temporalen Modellierung abgeleiteten Geschwindigkeitswerte angepasst. Dadurch

wird eine genauere und zuverlässigere Darstellung der Bodenverformungsmuster ermöglicht. Durch den Einsatz des MBA-Algorithmus können Probleme wie Datenlücken und Rauschen minimiert werden, während die komplexen Deformationsmerkmale über große Flächen erhalten bleiben. Diese Fähigkeit ist besonders wertvoll für die Überwachung natürlicher und zivilisatorischer Infrastrukturen, bei denen selbst geringe, aber signifikante Bodenbewegungen kritische Auswirkungen haben können.

Eine der zentralen Herausforderungen bei der B-Spline-Oberflächenanpassung besteht in der Balance zwischen Glätte und Genauigkeit. Während eine glatte Oberfläche eine kontinuierliche Darstellung von Deformationstrends bietet, könnten lokale Variationen, bei denen das Deformationsverhalten komplexer ist, übersehen werden. Die von (Lee, Wolberg und Shin 1997) eingeführte MBA-Methode adressiert dieses Problem durch eine iterative Verfeinerung der Oberfläche. Dabei wird die Oberfläche als eine lineare Kombination bikubischer Basisfunktionen und Steuerpunkte dargestellt, die in einem strukturierten Steuerpunktgitter (Control Lattice) angeordnet sind. Das Steuerpunktgitter dient als Rahmen zur Definition der Oberfläche, wobei die Steuerpunkte strategisch platziert werden, um die Approximation zu steuern.

Der MBA-Ansatz verbessert die Oberflächenmodellierung, indem das Steuerpunktgitter kontinuierlich verfeinert wird, wobei der Abstand zwischen den Steuerpunkten in jeder Iteration verringert wird. Dieser hierarchische Verfeinerungsprozess erzeugt eine Abfolge von zunehmend detaillierten Teiloberflächen, die in Summe das endgültige hochauflösende Deformationsmodell ergeben. Diese Strategie stellt sicher, dass feinere Details im Deformationsfeld erfasst werden, während gleichzeitig die Gesamtglätte der Oberfläche erhalten bleibt.

Um die Robustheit des MBA-Modells weiter zu verbessern, werden die Qualitätswerte der geschätzten Deformationsraten – wie Standardabweichungen – in den räumlichen Modellierungsprozess integriert. Da jede Verfeinerungsebene des MBA-Modells auf der vorhergehenden aufbaut, bestehen starke mathematische Korrelationen zwischen den Ebenen, was die Fehlerfortpflanzung und die stochastische Modellierung besonders herausfordernd macht.

Zur Bewältigung dieser Herausforderungen wird ein nichtparametrischer Bootstrapping-Ansatz mit einem 95% Konfidenzintervall verwendet, um die Stichprobenverteilung des MBA-Modells zu schätzen. Bootstrapping beinhaltet die Erzeugung mehrerer neu gezogener Stichproben aus den Originaldaten, wodurch eine Reihe von Bootstrap-Stichproben erstellt wird, die Variationen in den Eingangsdaten repräsentieren. Durch die Berechnung der Verteilung dieser Stichproben können Konfidenzintervalle für die Geschwindigkeitswerte bestimmt werden, wodurch eine Bewertung der Modellunsicherheit ermöglicht wird.

An einer bestimmten Position wird die Standardabweichung der Deformationsschätzung berechnet, indem für jede Bootstrap-Stichprobe eine Oberfläche angepasst wird. Die Vorhersagen an diesem Punkt werden dann aus allen Bootstrap-Stichproben abgeleitet, und die zugehörige Bootstrap-Standardabweichung wird basierend auf der Varianz dieser Vorhersagen berechnet. Dieses Verfahren ermöglicht die Schätzung punktwiser Standardfehler, die als Indikatoren für die Zuverlässigkeit der Geschwindigkeitswerte an jedem PS-Standort dienen. Durch die Integration von Bootstrapping in den MBA-Ansatz wird die Gesamtqualität der Deformationsmodellierung verbessert, indem eine umfassendere Fehlerbewertung bereitgestellt wird.

Die spatio-temporale Modellierung verbessert nicht nur die Genauigkeit der Deformationsschätzungen, sondern ermöglicht auch die Unterscheidung zwischen lokalen strukturellen Bewegungen und großflächigen Verschiebungen der Erdoberfläche. Diese

Differenzierung ist für die Überwachung von Infrastrukturen entscheidend, da sie eine präzisere Bewertung von deformationsrelevanten Prozessen wie Setzungen, Hebungen und Neigungen ermöglicht. Durch die Anwendung dieses Ansatzes innerhalb eines räumlichen Radius von etwa 1 km² um zivile Strukturen kann ein detaillierteres Verständnis der Deformationen erzielt werden.

Abbildung 26 zeigt die räumlich-zeitliche Modellierung der mittleren Geschwindigkeit (*mm/Jahr*), die aus unseren zeitlichen Analysen und für die PS-Punkte, die auf den Boden fallen, geschätzt wurde. Abbildung 27 zeigt die räumlich-zeitliche Modellierung, die durch unsere Modellierung für die mittlere Geschwindigkeit (*mm/Jahr*), die aus ENVI SARscape AT erhalten wurde, und für die PS-Punkte, die auf den Boden fallen, geschätzt wurde. Abbildung 28 zeigt die Differenzen zwischen den räumlich-zeitlichen Modellen der mittleren Geschwindigkeit aus unserer zeitlichen Analyse und der Geschwindigkeit aus ENVI SARscape AT (*mm/Jahr*). Abbildung 29 zeigt das Histogramm der Differenzen zwischen den räumlich-zeitlichen Modellen der mittleren Geschwindigkeit aus unserer zeitlichen Analyse und der Geschwindigkeit aus ENVI SARscape AT (*mm/Jahr*). Der Mittelwert und die Standardabweichung dieses Histogramms betragen 0,003 bzw. 0,085, was sich leicht vom Histogramm der Unterschiede aus unserer zeitlichen Analyse unterscheidet. Um einen besseren Eindruck von den Autokorrelationswerten zu erhalten, werden in Abbildung 30 die räumlich-zeitlichen Modelle der Autokorrelation der PSI-Daten für die auf den Boden fallenden Daten dargestellt.

Die Analyse bestätigt, dass die Genauigkeit der aus PSI abgeleiteten Verschiebungs-Zeitreihen im Bereich von etwa 1 mm liegt. Dieses Präzisionsniveau ist essenziell, um subtile, aber potenziell signifikante Deformationen zu erkennen, die die strukturelle Integrität beeinflussen oder auf zugrunde liegende geophysikalische Prozesse hinweisen könnten. Die Kombination aus spatio-temporaler Modellierung, der Integration von MBA-Oberflächenapproximation und Bootstrapping zur Unsicherheitsquantifizierung bietet ein robustes Framework für die fortgeschrittene Bodenverformungsanalyse.

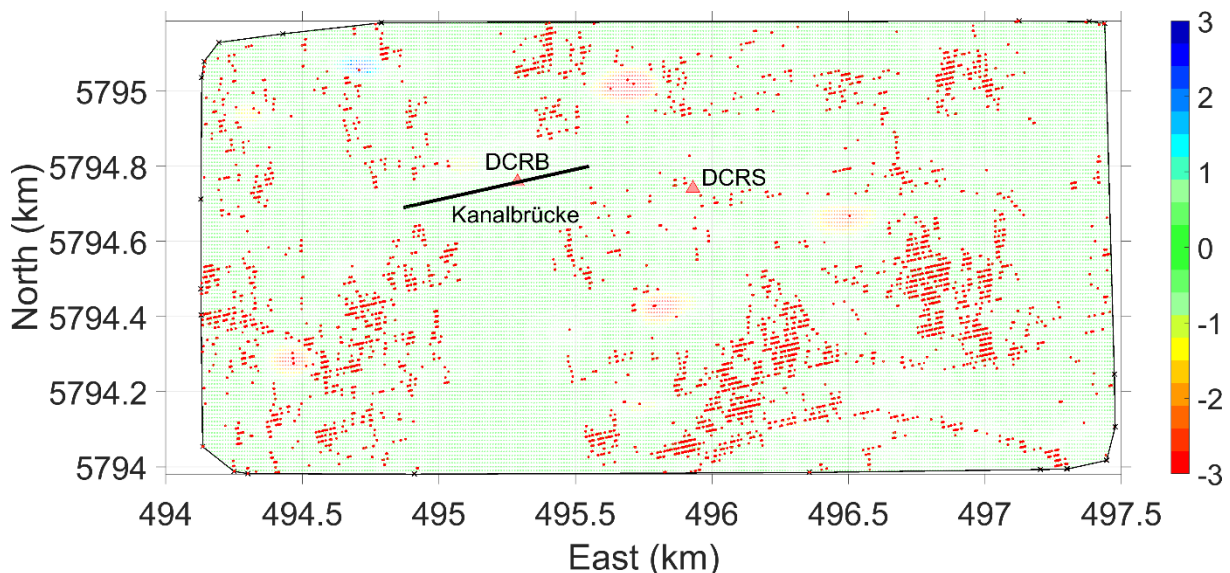


Abbildung 26: Räumlich-zeitliche Modellierung der mittleren Geschwindigkeit (*mm/Jahr*) aus unseren zeitlichen Analysen und für die PS-Punkte, die auf den Boden fallen.

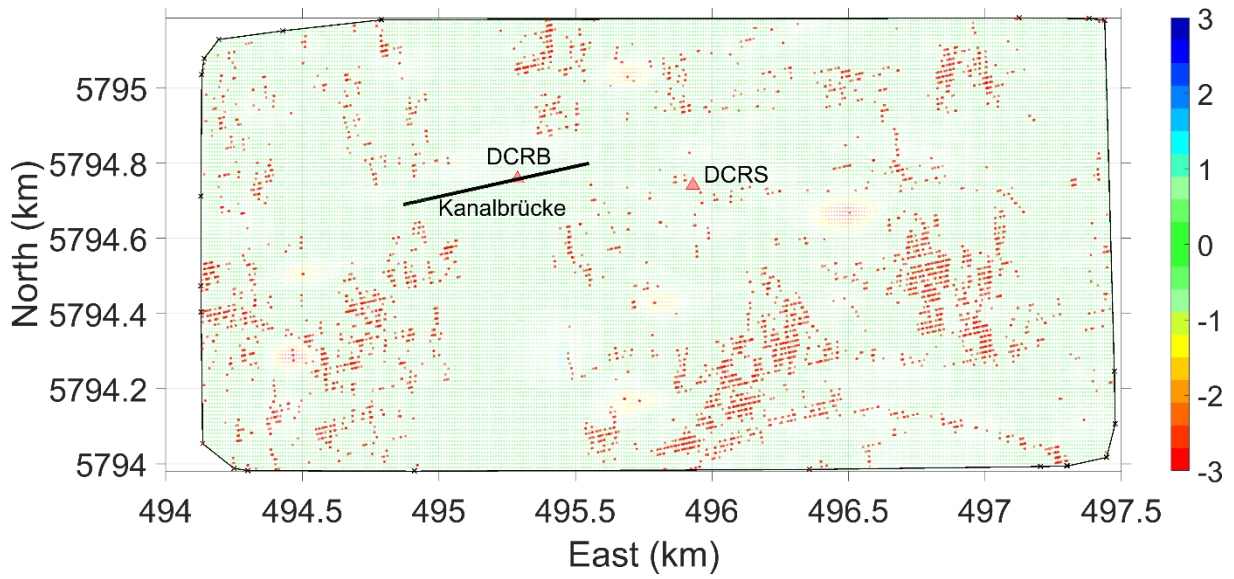


Abbildung 27: Räumlich-zeitliche Modellierung, geschätzt durch unsere Analysen für die mittlere Geschwindigkeit (mm/Jahr), die aus ENVI SARscape AT und für die PS-Punkte, die auf den Boden fallen, erhalten wurde.

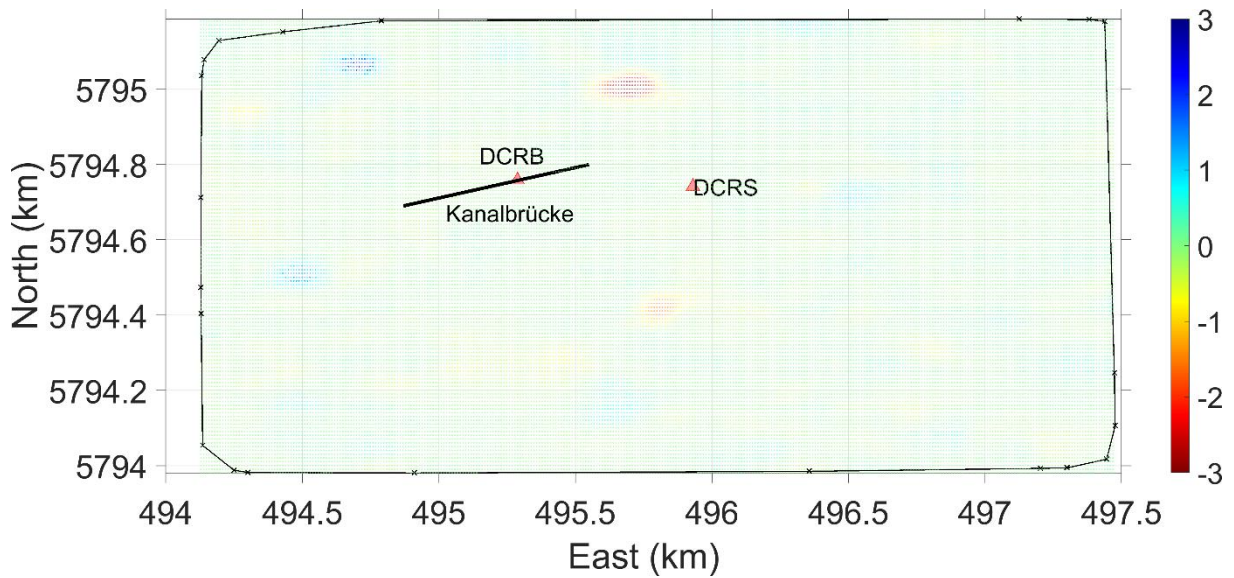


Abbildung 28: Differenzen zwischen den räumlich-zeitlichen Modellen der mittleren Geschwindigkeit aus unserer zeitlichen Analyse und der ENVI SARscape AT (mm/Jahr).

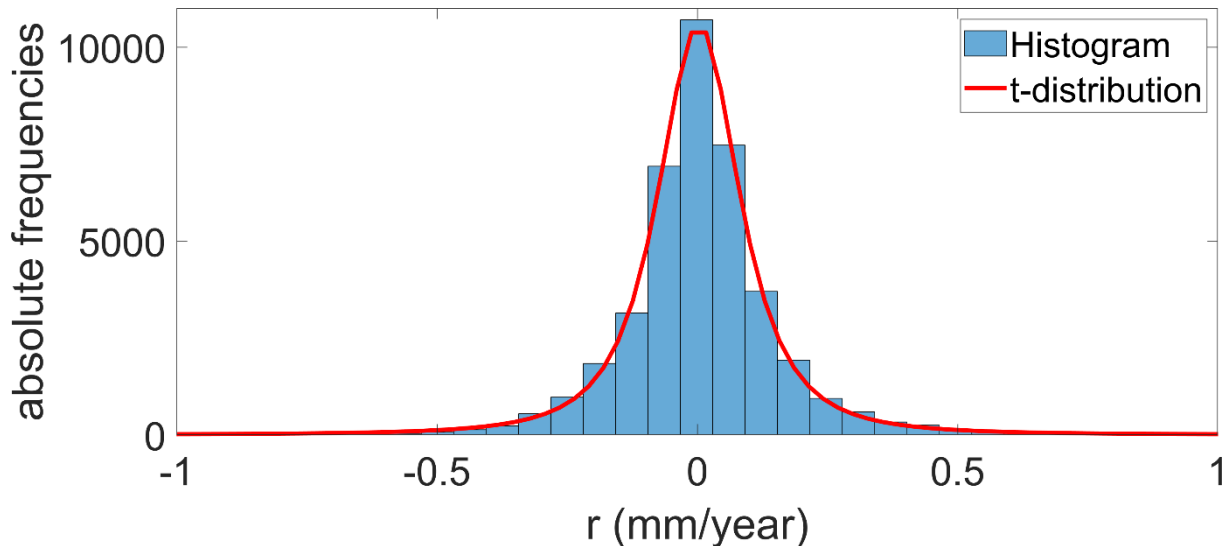


Abbildung 29: Histogramm der Differenzen zwischen den räumlich-zeitlichen Modellen der mittleren Geschwindigkeit aus unserer zeitlichen Analyse und der ENVI SARscape AT (mm/Jahr) (Mittelwert 0,003, Standardabweichung 0,085).

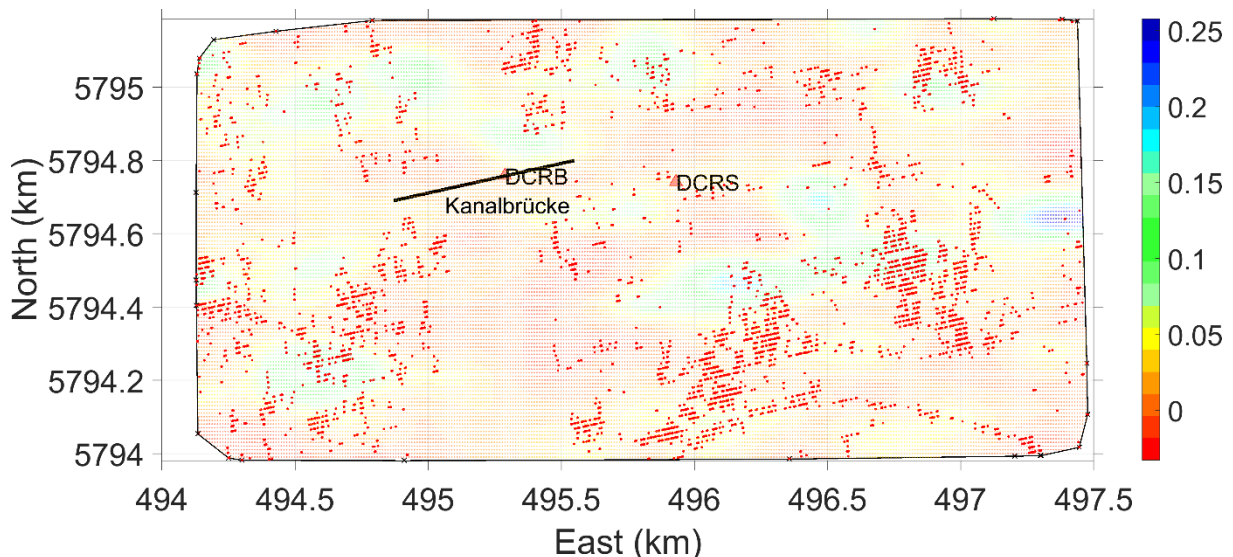


Abbildung 30: Räumlich-zeitlichen Modellen der Autokorrelation von PSI-Daten, die auf Boden fallen.

Die Qualitätsbeurteilung für die PS-Punkte, basierend auf der räumlich-zeitlichen Modellierung, wurde auf drei Fallstudien in Deutschland angewendet: Müggenburger Hauptdeich (Hamburg), Lombard- und Kennedy-Brücke (Hamburg) sowie Hengstlage (Niedersachsen). Aktuell wird das für das Projekt zentrale Bauwerk in Minden (Nordrhein-Westfalen) analysiert. Die folgenden Aussagen können bereits abgeleitet werden:

- Die dekorrelierten Standardabweichungen der PS-Punkte, die aus der räumlich-zeitlichen Modellierung gewonnen wurden, liegen im Bereich von 1 – 2 mm für 1σ . Dies ermöglicht eine deutlich realistischere Schätzung der Genauigkeit im Vergleich zur Genauigkeit, die aus den korrelierten Zeitreihen abgeleitet wird, die um den Faktor 2 – 3 optimistischer ausfällt.
- Zu Validierungszwecken wurden die Ergebnisse der räumlich-zeitlichen Modellierung für bestimmte Punkte im Gebiet Hengstlage mit den Nivellementdaten der Landesvermessung Niedersachsen verglichen. Die Analyse zeigt Unterschiede in der

Größenordnung von 1 – 3 Millimetern, was im Rahmen der ermittelten Genauigkeit zu erwarten ist.

- Das raum-zeitliche Qualitätsmodell der PS-Punkte bietet eine bessere und zuverlässigere Beurteilung der Deformationen als bisherige Ansätze.

4.7 Datenfusion

Im Projekt sollten insb. Möglichkeiten einer strengen Fusion von frei verfügbaren GNSS- und Radar-Daten sowie 3D-Stadtmodellen und Verkehrswegeplänen zum Zweck der besseren Beurteilung von Deformationen an Bauwerken in Kombination mit lokal installierter Sensorik untersucht werden. Der Mehrwert der Daten wird dabei insb. durch KI-Analysen und raum-zeitliche Parameterschätzung in Kombination mit lokalen GNSS-Daten generiert.

Hierbei wird zweistufig vorgegangen. Zunächst wird das Bewegungsverhalten der Objektumgebung mittels der Radardaten analysiert und Verdachtsbereiche für gefährdete Infrastruktur identifiziert. Stellt sich heraus, dass das Infrastrukturobjekt als gefährdet klassifiziert wird, kann es zusätzlich mit lokaler GNSS-Sensorik und ggf. Radarreflektoren ausgestattet werden. Die so gewonnenen Bewegungsraten aus der Umgebung mittels Radar und des Objektes mittels GNSS (und ggf. zusätzlich Radar) können somit zu einem aussagekräftigen relativen Bewegungsmodell kombiniert werden.

Dies wurde mit den in Kapitel 3 beschriebenen Daten aus GNSS- und InSAR-Daten von Sentinel-1 umgesetzt und prototypisch durch automatisierbare Auswertungen und Visualisierungen realisiert.

5 Ergebnisse

5.1 Ergebnis-Portal

Die Darstellung der Ergebnisse für Infrastruktur-Eigentümer und –Betreiber erforderte aufgrund der sowohl zeitlich als auch räumlich sehr unterschiedlich verfügbaren Daten eine ausführliche Analyse mit Fachleuten entsprechender Institutionen. Diese Analyse wurde früh im Projekt mit Mitarbeitenden von BfG, WSA Minden und DZSF durchgeführt und, soweit im Rahmen dieses Vorhabens möglich, entsprechend berücksichtigt.

Im Rahmen der Visualisierung der PSI-Ergebnisse wurde als Prototyp eine interaktive, webbasierte Kartendarstellung unter Nutzung der open-source JavaScript Bibliothek Leaflet erstellt¹. Diese interaktive Kartendarstellung dient der raumbezogenen Visualisierung der Resultate der PSI-Analyse und stellt die Ergebnisse in Form farbcodierter Punkte auf verschiedenen Hintergrundkarten wie OpenStreetMap oder OpenTopoMap dar. Bei einem Klick auf einen Punkt werden die folgenden Kenngrößen angezeigt:

- velocity - mittlere Verschiebungsgeschwindigkeit in *mm/Jahr*
- coherence - qualitativer Index für die Passung der interferometrischen Phasen
- MuSigma - Verhältnis von temporalem Mittel zu Standardabweichung
- Hprecision - geschätzte vertikale Genauigkeit in m
- Vprecision - geschätzte Geschwindigkeitsgenauigkeit in *mm/Jahr*
- lon/lat - Längen- und Breitengrad

In der angezeigten Abbildung 31 lassen sich die Zeitreihen mithilfe verschiedener Glättungsfunktionen wie „Gaussian“ oder „Moving Average“ filtern und interpretieren, um Verschiebungstrends übersichtlich darzustellen.

¹ Prototyp zur Darstellung der PSI-Ergebnisse basierend auf Leaflet: <https://potree.ige.tu-clausthal.de/leaflet/opendata4infmon.html>

Darüber hinaus wurden im Anschluss weitere Sensordaten in das GLOMON-Portal integriert, wodurch die Grundlage für eine noch detailliertere Überwachung von Verschiebungstrends geschaffen wurde.

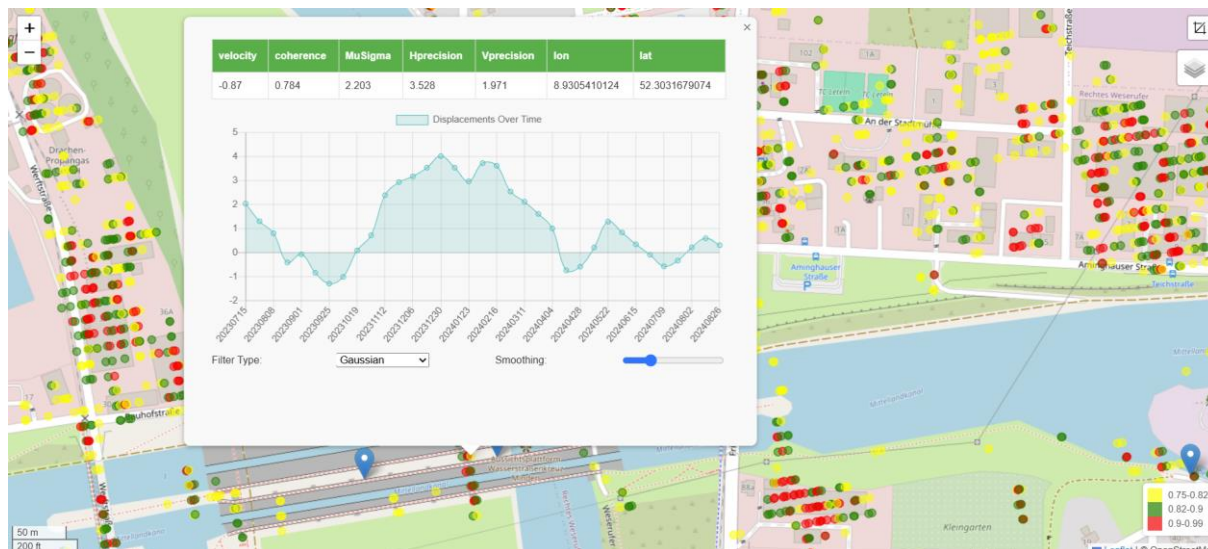


Abbildung 31: Interaktive, webbasierte Kartendarstellung, die die PSI-Parameter für einen ausgewählten Punkt in einem Zeitdiagramm dargestellt, während im Hintergrund eine OpenStreetMap-Karte die Position und farbliche Codierung der Verschiebungswerte angezeigt.

Die Daten aus GNSS-Messungen liegen i.d.R. im Sekundentakt oder höherfrequent vor. Allerdings lassen sich mm-genaue Ergebnisse bisher nur im sogenannten Post-Processing über 24 Stunden Daten-Akquisition erzielen. Ein Ziel dieses Vorhabens war es, die Ergebnisqualität durch Anpassung der Software des Projektpartners Geo++ so zu verbessern, dass entsprechende Ergebnisse mit einer Genauigkeit von 1 – 2 mm bereits mit einer Daten-Akquisition von < 12 Stunden sicher erzielbar werden.

Für die Darstellung der Monitoring-Ergebnisse musste das GLOMON-Portal der ALLSAT um diverse Komponenten erweitert werden.

Das GLOMON-Portal ist bisher eine webbasierte Online-Plattform zur Visualisierung von GNSS-Daten von beliebig vielen GNSS-Stationen und meteorologischen Wetteraufzeichnungen. Folgende Möglichkeiten stehen damit zur Verfügung (und wurden im Rahmen des Vorhabens erweitert):

- webbasiertes Portal mit Nutzerverwaltung und gesichertem Nutzerzugriff
- Detaildarstellungen zu einbezogenen GNSS-Stationen
- automatisierte Auswertung und Datenvisualisierung von GNSS Ergebnis-Zeitreihen
- GNSS Ergebnis-Darstellungen und visuelle Korrelation mit Meteodaten
- Download von GNSS-Rohdaten (im RINEX-Format)
- Alarmierung bei Überschreiten kritischer Werte
- Integration von Meteo-Stationen
- Darstellung von Luftbild-Karten des Messgebiets (mit Zoom-Möglichkeit)
- Integration von Messungen der Bauwerkstemperatur (neu)
- Integration von Informationen zu PSI-Punkten aus InSAR-Auswertungen (neu)
- Darstellungen der jeweils aktuellen Ergebnisse des Bodenbewegungsdienstes für Deutschland (neu)

Nachfolgend beispielhaft einige Darstellung aus dem GLOMON-Portal

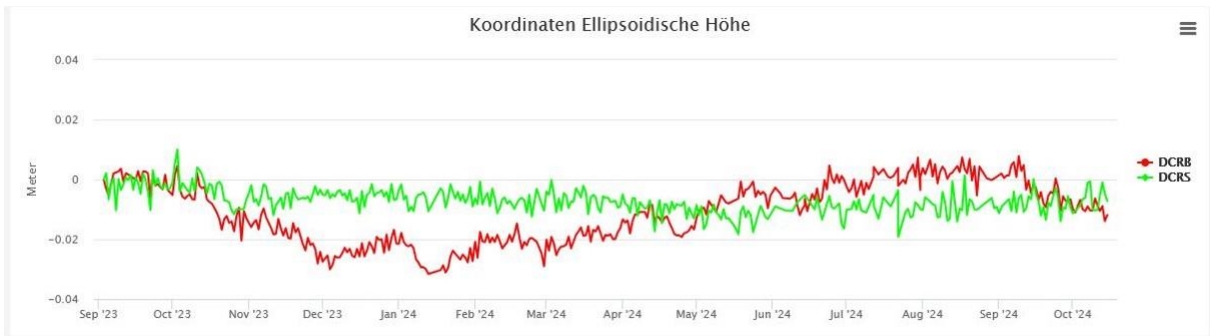


Abbildung 32: aus GLOMON Höhenänderung der GNSS-Stationen DCRB und DCRS über 14 Monate. [ALLSAT GmbH, 2024]



Abbildung 33: aus GLOMON Höhenänderung der GNSS-Station DCRB über 14 Monate, dazu die Zeitreihe der Bauwerktemperatur während des Messzeitraums (März-November 2024). [ALLSAT GmbH, 2024]

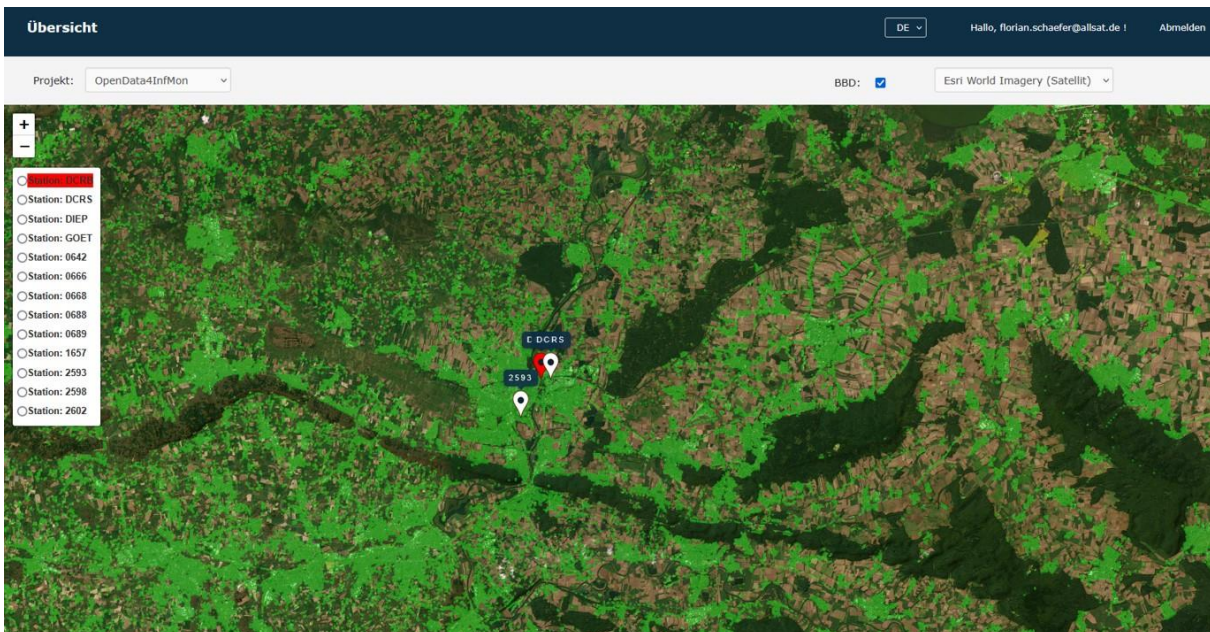


Abbildung 34: aus GLOMON Kartendarstellung mit Boden-Bewegungsdienst-Deutschland. [ALLSAT GmbH, 2025]

5.2 Bereitstellung der Daten für Dritte (Interessenten und Nutzer)

Insbesondere die Eingabe- und Ergebnisdaten von GNSS-Messungen sowie von meteorologischen Messdaten können über gesicherte Zugänge zum GLOMON-Portal für Dritte bereitgestellt werden.

Die Ausgaben umfassen Klassifizierungsergebnisse der PS-Punkte im SHP- oder CSV-Format, temporale Modellierungsergebnisse der PSI-Zeitreihen, die als zusätzliche Spalten zu den Rohverschiebungsdaten hinzugefügt werden, sowie ein räumlich-zeitliches Qualitätsmodell der PSI-Zeitreihen im GeoTIFF- oder SHP-Format. Die webbasierte

Integration erfolgt über das GLOMON-Portal (ALLSAT), dass die Visualisierung von GNSS-Daten, PS-Punkten des BodenBewegungsdienst Deutschland (BBD), PSI-Zeitreihen von Corner-Reflektoren und verarbeiteten PS-Punkten im Interessensgebiet mit einer Kohärenz von mehr als 75 % unterstützt. Zusätzlich können die InSAR Verschiebungszeitreihendaten über die TUC-Webplattform visualisiert werden. Diese Datenoutputs werden im Rahmen des Mobilität-mFUND-Projekts bereitgestellt. Abbildung 35 zeigt den Workflow für die Verarbeitung und Ausgabe von InSAR- und GNSS-Daten im OpenData4InfMon-Projekt.

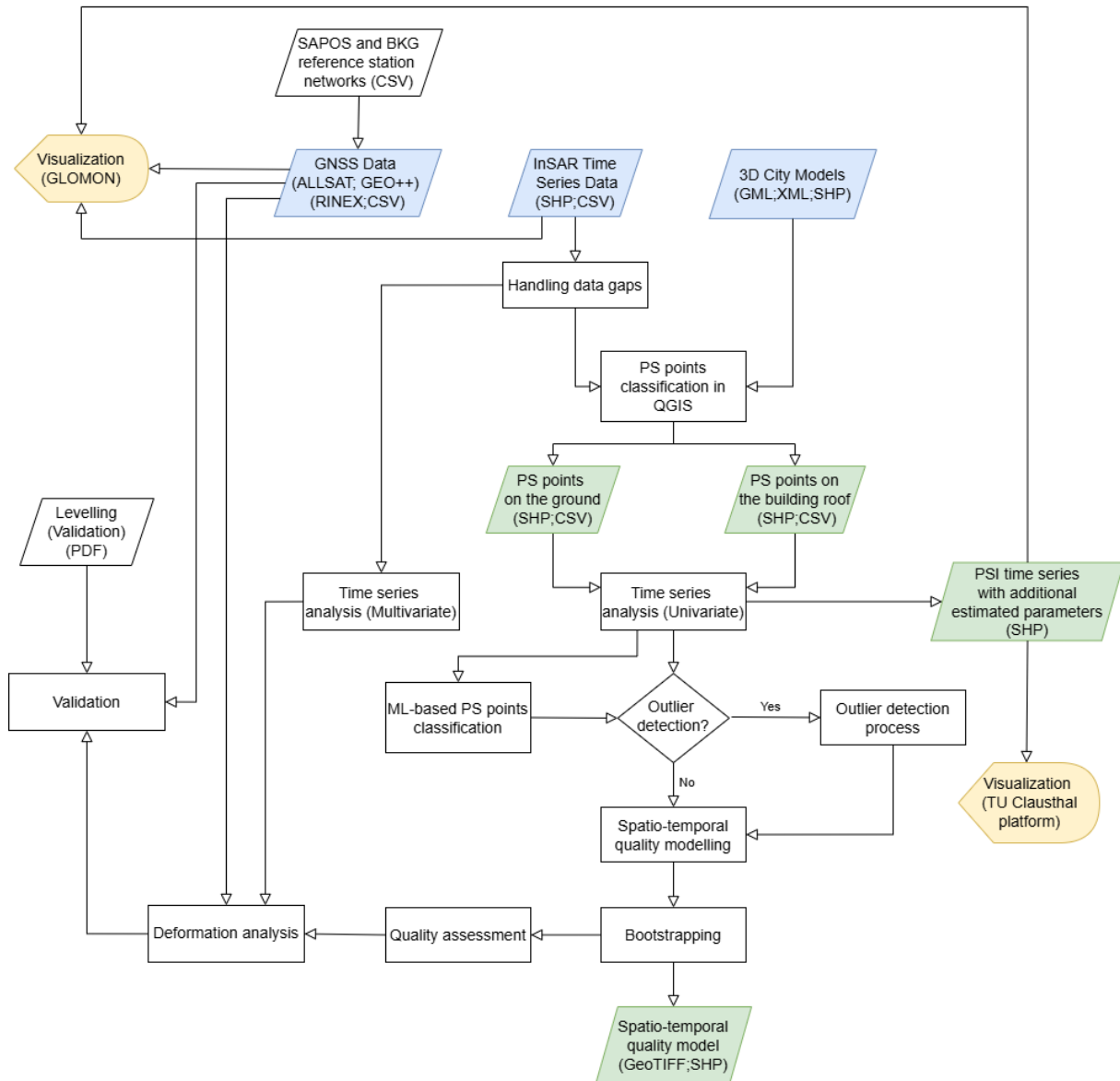


Abbildung 35: Workflow für die Verarbeitung von InSAR- und GNSS-Daten und Ausgaben im OpenData4InfMon-Projekt.

5.3 Aufzählung der wichtigsten wissenschaftlich-technischen und anderer wesentlicher Ergebnisse

Die Ergebnisse dieses Vorhabens sollten es ermöglichen, lokale Bewegungen an Bauwerken von regionalen Bewegungen der Erdoberfläche (quantifiziert mittels SAR-Daten) zu trennen, um so bessere Aussagen über bauwerksschädigende, deformationsrelevante Bewegungen (Senkungen, Hebungen und Kippungen, Rutschungen) und deren Trends zu erhalten. Es wurde erwartet, dass Genauigkeiten im Bereich von 1 – 2 mm (Bewegungsrate pro Jahr) nach Lage und Höhe erreicht und die wesentlichen Ergebnisse in Form einer Open Data-Plattform bereitgestellt werden können.

Dafür sollten insb. frei verfügbarer Geodaten potentielle Risikogebiete mit gefährdeten Infrastrukturen identifiziert werden. Weiterhin war zu verifizieren, inwieweit sich diese Daten mittels einer Datenfusion mit lokaler GNSS-Sensorik für die qualitativ hochwertige Identifikation von Deformationsschäden eignen.

Diese übergeordneten Ziele wurden in dem Vorhaben erreicht.

Die wichtigsten Ergebnisse nachfolgend noch einmal im Überblick:

- Über die Integration des Bodenbewegungsdienstes für die Bundesrepublik Deutschland in das Visualisierungsportal GLOMON können regionale Bodenbewegungen dargestellt werden und mit aktuellen Beobachtungen aus SAR und GNSS lokal verdichtet werden.
- Es wurde geeignete (Lowcost-) Sensorik implementiert, um eine kontinuierliche Bauwerksüberwachung mit Bewegungsraten von wenigen *mm/Jahr* sicher zu erfassen.
- Die Ergebnisse bisher bekannter Auswerteverfahren für hochgenaue GNSS-Messungen mit mm-Genauigkeit konnten durch verbesserte Auswerteverfahren bereits nach ca. 2 Stunden Datenakkumulation erreicht werden (vorher: 24 Stunden Datenakkumulation). Damit lässt sich aus solchen GNSS-Messungen nun auch ein Tagesgang für die Deformation von Bauwerken nachweisen.
- Es wurde demonstriert, dass die starken Umgebungseffekte, die bei GNSS-Monitoring insb. mit Lowcost-Sensorik auftreten, durch einen neuartigen Ansatz aus Kalibrierung und anschließender Korrektur ausreichend reduziert werden können, um mit hochwertiger Sensorik vergleichbare Monitoring-Ergebnisse zu erzielen.
- Zudem wurde in Simulationen und realen Messdatenauswertungen übereinstimmend gezeigt, dass ohne eine entsprechende Kalibrierung der Umgebungseffekte eine Konvergenz der Monitoringgenauigkeit in den sub-mm-Bereich erst nach sehr langen Zeiträumen ($> 24h$) stattfindet.
- Die Auswertung hat gezeigt, dass der Standort des Corner-Reflektors eine entscheidende Rolle spielt – beispielsweise sollte er nicht an Orten montiert werden, die von Wasser oder anderen künstlichen Objekten umgeben sind, welche Phasenstörungen in den reflektierten Wellen verursachen können.

5.4 Beiträge zu förderpolitischen Zielen

Die Nutzung von massenhaft erfassten Geodaten auf nationaler und internationaler Ebene erfordert aufgrund der riesigen Datenmengen (Big Data) geeignete KI-Strategien, um kontinuierlich und fortlaufend aktualisierte Ergebnisse zu erzeugen, die den zuständigen Fach-Aufsichtsbehörden, Bauunternehmen sowie Versicherungen realitätsnahe Entscheidungshilfen zur Verfügung stellen.

Das Projekt OpenData4InfMon etabliert einen datengestützten Ansatz durch die Integration frei verfügbarer Open-Source-Daten, wie z.B. Copernicus InSAR-Daten und 3D-Gebäudemodelle (LoD2) aus Deutschland. Diese Integration ermöglicht eine effiziente Klassifizierung von InSAR-Daten mithilfe von Machine-Learning-Algorithmen. Ein spatio-temporales Qualitätsmodell, insbesondere für bodengestützte InSAR-Daten, verbessert die Zuverlässigkeit von Deformationsbewertungen bei der Überwachung von Infrastrukturen und erhöht die Sicherheit, Prozesszuverlässigkeit und Nutzbarkeit von fusionierten Geodaten für Überwachungsanwendungen. Diese Beiträge stimmen mit der mFUND-Richtlinie zur „datenbasierten Analyse und dem Datenzugang“ überein, wie nachfolgend beschrieben:

- **Nachhaltige Ressourcennutzung und Sicherheit der Infrastruktur:** Ein hochgenaues und robustes räumlich-zeitliches Qualitätsmodell für Persistent Scatterer Interferometry (PSI) Daten wurde entwickelt und implementiert. Dieses Qualitätsmodell

ermöglicht eine zuverlässige Bewertung der Bedeutung von Deformationen in kritischen Bereichen und damit eine frühzeitige Erkennung von Strukturbewegungen. Anschließend unterstützt es gezielte Präventivmaßnahmen, die die Sicherheit der Infrastrukturen erhöhen und eine nachhaltige Ressourcennutzung durch eine kosteneffiziente, langfristige und großflächige Deformationsüberwachung fördern.

- **Innovation in der Analyse von Big Geodaten:** Im Rahmen des Projekts wurde ein fortschrittlicher mehrstufiger Ansatz zur räumlich-zeitlichen Qualitätsmodellierung eingeführt, der eine univariate Zeitreihenanalyse, Multilevel B-Splines (MBA) zur Oberflächenannäherung und Bootstrapping zur Quantifizierung der Unsicherheit umfasst. Diese Methoden verbessern Präzision und Genauigkeit der Qualitätsmodelle erheblich und steigern die Zuverlässigkeit von nationalen und internationalen Geodaten für die Deformationsüberwachung. Die Ansätze sind so implementiert, dass Sie auch für gesamte Bundesländer bzw. ganz Deutschland anwendbar sind, wenngleich weitere Optimierungen möglich sind.
- **Stärkung der lokalen und regionalen Wirtschaft:** Das entwickelte Qualitätsmodell und Deformationsüberwachungssystem unterstützten die proaktive Überwachung der Infrastruktur, insbesondere in geologisch sensiblen Regionen. Präzisere Bewertungen von Bodenbewegungen tragen dazu bei, Schäden an der Infrastruktur zu verhindern und so Reparaturkosten und wirtschaftliche Verluste zu verringern. Verbesserte Risikomanagementstrategien ermöglichen eine bessere Planung und Ausführung von Bauprojekten.
- **Gesteigerte Effizienz bei der automatischen und intelligenten Datenanalyse:** Durch die Automatisierung der PSI-Zeitreihenanalyse und die Integration von maschinellen Lernverfahren für die Klassifizierung von PS-Punkten (Persistent Scatterer) wurde die Verarbeitungszeit verkürzt. Diese Verbesserungen ermöglichen eine schnellere und genauere Erkennung von Bodenbewegungen und damit eine rechtzeitige Gefahrenabwehr und Entscheidungsfindung.
- **Wissenschaftliche Zusammenarbeit und Technologietransfer:** Das Projekt hat eine enge Zusammenarbeit zwischen Forschungseinrichtungen und Industriepartnern gefördert. Wissensaustausch und Technologietransfer haben die Anwendung der entwickelten Methoden auf verschiedene Infrastrukturen und Bauwerke des Bauwesens wie Brücken, Eisenbahnen, Autobahnen und Gebäude erweitert. Dies gewährleistet die nachhaltige Übernahme fortschrittlicher Verformungsanalyseansätze. Die Projektergebnisse können den Aufsichtsbehörden, Bauunternehmen und Versicherungsunternehmen aktuelle, datengestützte Entscheidungswerkzeuge zur Bewertung der Deformationsbedeutung bereitstellen.

Insbesondere wird durch die Robustifizierung der Daten mittels Ausreißerelimination und Datenglättung ein breiterer Zugang zur Nutzung der staatlich erzeugten Geodaten (Sentinel-1 und GNSS-Daten) ermöglicht. Der Austausch mit Experten verschiedener Behörden aus dem BMDV-Expertennetzwerk sowie den Mitarbeitenden der assoziierten Partner sollte die Öffnung und die Nutzung von Daten im Bereich des BMDV, des BMI sowie der Bundesländer (SAPOS) unterstützen.

5.5 Anwender-Feedback

Zu Beginn und im Verlauf der Vorhabens-Durchführung sowie mit dem Abschluss des Projekts am Wasserstraßenkreuz in Minden wurden Mitarbeitende von verschiedenen Infrastrukturbetreibern konsultiert und in verschiedenen Veranstaltungen über Zwischenergebnisse sowie über finale Ergebnisse informiert und Feedback eingeholt. Das führte insb. zu Beginn sowie im Verlauf des Vorhabens zu Anpassungen hinsichtlich der Instrumentierung am Bauwerk. Weiterhin wurden solche Rückmeldungen für die

Erweiterungen des GLOMON-Portals für die Visualisierung von Ergebnissen verwendet. Hinweise auf mögliche Ergänzungen vom AIT, die zur gleichen Zeit eine Autobahnbrücke in Österreich mit SAR-Daten beobachtet haben, konnten allerdings im Rahmen dieses Vorhabens nicht mehr umgesetzt werden.

Gleiches gilt für Hinweise von Mitarbeitenden der RAG Stiftung in Herne hinsichtlich der problematischen Platzierung der Multisensorstation DCRB auf der Brücke, die für eine bessere Auswertbarkeit der SAR-Daten an anderer Stelle hätte errichtet werden sollen.

5.6 Veröffentlichung der Ergebnisse und Einbindung des wiss. Nachwuchses

Die Projektergebnisse wurden bereits auf mehreren Konferenzen vorgestellt, z. B. GeoMonitoring 2024 an der TU Braunschweig (Neumann et al. 2024), Ideensprint in Hannover (Neumann et al. 2025) (Hybrid), Geokinematischer Tag 2024 in Freiberg (Omidalizarandi et al. 2024a) und EGU24 (Omidalizarandi et al. 2024b). Darüber hinaus haben wir einen Doktoranden, dessen Forschungsthema eng mit diesem Projekt verknüpft ist. Er hat kürzlich eine Fachzeitschriftenpublikation zum Thema „Change Point Detection“ in InSAR-Zeitreihen veröffentlicht (Shahryarinia et al. 2025). Als junger Wissenschaftler bringt er frische Perspektiven und wertvolle Fachkenntnisse in das Team ein.

6 Verwertbarkeit der Ergebnisse

Die mit dem hier beschriebenen Vorhaben bisher erzielten Ergebnisse lassen erkennen, dass sich mit dem methodischen Ansatz wirtschaftlich relevante Vorteile für das präventive Monitoring von Infrastruktur-Bauwerken erzielen lassen. Insbesondere die Einbeziehung ergänzender Messmethoden (am selben Bauwerk aus einem unterschiedlichen Forschungsvorhaben) zeigten die Möglichkeiten von Erweiterungen der hier gewählten Methodik.

Allerdings sind noch einige Fragestellungen insb. hinsichtlich der Verifizierung von SAR-Messungen mit Sentinel-1 Daten sowie der Datenfusion mit GNSS-Ergebnissen zu lösen, die eine direkte Verwertbarkeit unternehmerisch aktuell behindern.

Teilaspekte dieses Vorhabens wurden jedoch bereits von Infrastrukturbetreibern für konkrete Anwendungen angefragt. Hierbei handelt es sich um die Ergebnisse aus den GNSS-Messungen mit Lowcost-Empfängern und -Antennen für Überwachungsmaßnahmen, die bisher nicht kontinuierlich ausgeführt werden können.

7 Offene Fragen

Im Vergleich der ursprünglichen Vorhabenziele mit den erreichten Ergebnissen lassen sich die folgenden offenen und bisher nicht zufriedenstellend beantwortbaren Fragestellungen formulieren:

- Wie lassen sich die frei verfügbaren Geodaten (SAR-Daten von Sentinel-1, GNSS-Daten von SAPOS- und BKG-Referenzstationen, Verkehrs- und Gebäudemodelle) so automatisch auswerten und streng fusionieren, dass Infrastrukturbetreiber daraus geeignetes Beobachtungsmaterial für die Integration von geeigneter lokaler Lowcost-Sensorik für konkrete Bauwerke ableiten können?
- Wie lässt sich die Genauigkeit der PS-Geolokalisierung, insbesondere bei den Sentinel-1-Daten, aufgrund des Layover-Effekts und der relativ geringen räumlichen Auflösung der InSAR-Bilder verbessern, um eine zuverlässige Objektzuordnung der PSI Punkte zu ermöglichen?
- Für wie lange müssen hochwertige Multisensor-Stationen (s. 3.2) an einem Bauwerk für ein kontinuierliches Monitoring temporär installiert werden, um insb. für die Auswertung von SAR-Daten ausreichend gute Ergebnisse zu erzielen?

- Woher können GNSS-Referenzstations-Rohdaten für länger zurückliegende Zeiträume ($> 1 \text{ Jahr}$) bezogen werden, um diese mit historischen SAR-Daten von Sentinel-1 für eine konkrete Objektumgebung zu fusionieren?
- Lassen sich weitere frei verfügbare Daten (z.B. des Deutschen Wetterdienstes) für Deformationsuntersuchungen z.B. an Infrastrukturbauwerken in die Gesamtauswertung gut nutzbar integrieren?
- Wie zuverlässig lassen sich mehrere GNSS-Lowcost-Sensoren zu einem virtuellen Sensor kombinieren, sodass neben den mm-Genauigkeiten insb. die Zuverlässigkeit und Langzeitstabilität der Ergebnisse auch unter schwierigen GNSS-Empfangsbedingungen sichergestellt ist?
- Wie wirkt sich die Distanz zur nächsten verfügbaren Referenzstation quantitativ auf die Monitoring-Ergebnisse aus? Wann ist eine lokale Installation einer Referenzantenne unumgänglich?

8 Literatur

- Alkhatib, H., Kargoll, B., Paffenholz, J.-A. „Further results on a robust multivariate time series analysis in nonlinear models with autoregressive and t-distributed errors.“ *International Work-Conference on Time Series Analysis*, September 2017: 25-38.
- Anghel, A., et al. „Combining spaceborne SAR images with 3D point clouds for infrastructure monitoring applications.“ *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2016: 45–61.
- Artese, G., et al. „Monitoring of land subsidence in Ravenna municipality using integrated SAR-GPS techniques: Description and first results.“ *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences* 41 (2016): 23–28.
- Brockmeyer, M., Schnack, C., Jahn, C.-H. „Datenanalyse und flächenhafte Modellierung der PSI-Informationen des BodenBewegungsdienst Deutschlands für die Landesfläche Niedersachsens.“ *zfv*, 2020, 03 Ausg.: 154–167.
- Catalao, J., Raju, D., Nico, G. „InSAR maps of land subsidence and sea level scenarios to quantify the flood inundation risk in coastal cities: The case of Singapore.“ *Remote Sensing*, 2020: 296.
- Fletcher, K. „Sentinel-1: ESA's Radar Observatory Mission for GMES Operational Services.“ 2012.
- Glabsch, J. „Konzeption und Realisierung kosteneffizienter GNSS Monitoring-Systeme für ingenieurgeodätische Überwachungsmessungen.“ Dissertation, Universität der Bundeswehr München, 2018.
- Lee, S., Wolberg, G., Shin, S. Y. „Scattered data interpolation with multilevel B-splines.“ *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, 1997: 228–244.
- Lehmann, S. „Satellitengestütztes Setzungsmonitoring für das Trinkwassernetz.“ *VDV-Magazin*, 2020, 03 Ausg.: 208–212.
- Mohammadivojdan, B., Alkhatib, H., Brockmeyer, M., Jahn, C.-H., Neumann, I. „Surface based modelling of ground motion areas in lower saxony.“ *GeoMonitoring 2020*, Braunschweig, Deutschland. 2020.
- Neumann, I., Paffenholz, J.-A., Ruffer, J., Wübbena, J., Iqbal, W., Omidalizarandi, M. „OpenData4Infmon - Infrastrukturmonitoring mittels einer Fusion aus Open Data Quellen mit lokaler Sensorik.“ *GeoMonitoring 2024*, Braunschweig, Deutschland. 2024.

- Neumann, I., Paffenholz, J.-A., Ruffer, J., Wübbena, J., Iqbal, W., Omidalizarandi, M. „Lokalisierung von Gefährdungsbereichen für Infrastrukturbauwerke aus Open-Data-Quellen mittels KI und raumzeitlicher Modellierung.“ *Ideensprint 2025*, Hannover, Deutschland. 2025.
- Omidalizarandi, M., Mohammadivojdan, B., Alkhatib, H., Paffenholz, J.-A., Neumann, I. „On the quality checking of persistent scatterer interferometry data by spatial-temporal modelling.“ *Journal of Applied Geodesy*, 2023: 119–131.
- Omidalizarandi, M., Shahryarinia, K., Mohammadivojdan, B., Iqbal, W., Wübbena, J. B., Ruffer, J., Paffenholz, J.-A., & Neumann, I. „Accurate and large-scale monitoring of civil engineering infrastructures through quality ensured Persistent Scatterer Interferometry , corner reflectors, and GNSS equipment.“ *23. Geokinematischer Tag*, Freiberg, Saxony, Germany. 2024a.
- Omidalizarandi, M., Shahryarinia, K., Mohammadivojdan, B., Neumann, I. „Quality assessment of Persistent Scatterer Interferometry time series using vector-autoregressive-based spatio-temporal (VAR-ST-PS) modelling.“ In EGU General Assembly Conference Abstracts (p. 17912). 2024b.
- Qin, X., Liao, M., Yang, M., Zhang, L. „Monitoring structure health of urban bridges with advanced multi-temporal InSAR analysis.“ *Annals of GIS*, 2017, 4 Aug.: 293–302.
- Shahryarinia, K., Omidalizarandi, M., Heidarianbaei, M., Sharifi, M.A., Neumann, I. „Detecting change points in time series of inSAR persistent scatterers using deep learning models.“ *Appl Geomat*. 2025.
- Spreckels, V., et al. „GNSS, Nivellement und Radar – einheitliche Multisensor-Standorte als Referenzpunkte zur Überwachung von Bodenbewegungen.“ *GeoMonitoring 2020*, Braunschweig, Deutschland. 2020. 207–231.

9 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Luftaufnahme des Untersuchungsobjekts Alte Brücke des Mittellandkanals über die Weser. [BAW, 2020]	8
Abbildung 2: Scheitelfuge am östlichen Strombogen des Untersuchungsobjekts. [Hochschule Anhalt, 2025]	8
Abbildung 3: Luftbild der Untersuchungsumgebung des Wasserstraßenkreuzes Minden mit den 2 Standorten für die Doppelcorner-Reflektoren DCRB und DCRS.	9
Abbildung 4: Die Abbildung zeigt die Sentinel-1A-Orbits, welche das Untersuchungsgebiet Wasserstraßenkreuz Minden überdecken. Dabei sind die aufsteigenden Bahnen (rot) sowie die absteigenden Bahnen (Lila) dargestellt.	11
Abbildung 5: Genutzte GNSS-Referenzstationen (Darstellung aus GLOMON-Portal). [ALLSAT GmbH, 2025]	12
Abbildung 6: Multisensor-Station DCR600 auf der Brücke (DCRB). [ALLSAT GmbH, 2023]	13
Abbildung 7: Lowcost GNSS-Antennen auf der Brücke. [Geo++ GmbH, 2023]	13
Abbildung 8: Umgebungseffekte des Sensors am Scheitelgelenk.	14
Abbildung 9: Simulierte Monitoringfehler in der Höhenkomponente. Nur die Umgebungseffekte der Low-Cost-Sensorik wurden berücksichtigt.	14
Abbildung 10: Höhenfehler nach Anbringen der Umgebungskorrektur. Die 4 Felder stellen unterschiedlich lange Auswertungsintervalle dar (Einzelepochen entsprechen 1 Sekunde).	15
Abbildung 11: Positionen der Antennen auf dem Demonstrator-Gebäude.	16

Abbildung 12: Die Abbildung zeigt PS-Punkte im Untersuchungsgebiet, farblich nach Kohärenzwerten codiert: Gelb (0,75–0,82), Grün (0,82–0,9) und Rot (0,9–0,99).	17
Abbildung 13: Die Abbildung zeigt, dass sich im direkten Umfeld des DCRB keine hochkohärenten PS-Punkte befinden; der nächste PS-Punkt mit hoher Kohärenz liegt in einer Entfernung von 26,7 m.	18
Abbildung 14: Die Abbildung zeigt das Gelände der Reichen Zeche, an dem ein baugleicher DCR installiert wurde, der in den Sentinel-1-Daten klar erkennbar ist.....	18
Abbildung 15: Die Abbildung zeigt Zeitreihen, in denen die Punkte entsprechend ihrer Kohärenz (0,75–0,82 gelb, 0,82–0,9 grün, 0,9–0,99 rot) eingefärbt sind. Die schwarze Kurve bildet den nach Distanz und Kohärenz gewichteten Durchschnitt ab.	19
Abbildung 16: Die Abbildung verdeutlicht, dass sich im direkten Umfeld des DCRS hochkohärente PS-Punkte befinden; der nächstgelegene hochkohärente PS-Punkt liegt in einer Entfernung von 3,5 m.	20
Abbildung 17: Die Abbildung zeigt Zeitreihen, in denen die Punkte entsprechend ihrer Kohärenz (0,75–0,82 gelb, 0,82–0,9 grün, 0,9–0,99 rot) eingefärbt sind. Die schwarze Kurve bildet den nach Distanz und Kohärenz gewichteten Durchschnitt ab.	21
Abbildung 18: Darstellung des Teils des LoD2-Gebäudemodells in der Nähe der Kanalbrücke in Minden auf der Online-Plattform CityGMLViewer der HFT Stuttgart.	22
Abbildung 19: Die klassifizierten PS-Punkte fallen auf das Dach (rote Punkte) und auf den Boden (grüne Punkte), gelegen im Gebiet von Minden, Deutschland, dargestellt in QGIS. Für die Qualitätssicherung wurden die PS-Punkte in der Nähe der Brücke verworfen. DCRB-Corner-Reflektor mit GNSS-Empfänger auf der Brücke ist mit einem roten Dreieck dargestellt.	23
Abbildung 20: Korrelationsmatrix der PS (75 %).	24
Abbildung 21: Konfusionsmatrix der PS (75 %).	25
Abbildung 22: SHAP Zusammenfassung Plot.	26
Abbildung 23: Histogramme der Gesamtstandardabweichung geschätzt aus der zeitlichen Modellierung für PS Punkte fallen auf den Boden.	27
Abbildung 24: Histogramme der mittleren Geschwindigkeit, die aus der zeitlichen Modellierung für auf den Boden fallende PS-Punkte geschätzt wird [Links], Histogramme der Differenzen zwischen der mittleren Geschwindigkeit, die aus unserer zeitlichen Modellierung geschätzt wurde, und der aus ENVI SARscapeAT erhaltenen, für PS-Punkte, die auf den Boden fallen (Mittelwert 0,007, Standardabweichung 0,083) [Rechts].	28
Abbildung 26: Histogramm des AR(1) aus der univariaten Zeitreihenanalyse für die PS-Punkte fallen auf den Boden (Mittelwert 0,0005, Standardabweichung 0,009) [Rechts] und auf das Dach (Mittelwert 0,073, Standardabweichung 0,115) [Links].	28
Abbildung 27: Räumlich-zeitliche Modellierung der mittleren Geschwindigkeit (mm/Jahr) aus unseren zeitlichen Analysen und für die PS-Punkte, die auf den Boden fallen.	30
Abbildung 28: Räumlich-zeitliche Modellierung, geschätzt durch unsere Analysen für die mittlere Geschwindigkeit (mm/Jahr), die aus ENVI SARscape AT und für die PS-Punkte, die auf den Boden fallen, erhalten wurde.	31
Abbildung 29: Differenzen zwischen den räumlich-zeitlichen Modellen der mittleren Geschwindigkeit aus unserer zeitlichen Analyse und der ENVI SARscape AT (mm/Jahr). ...	31
Abbildung 30: Histogramm der Differenzen zwischen den räumlich-zeitlichen Modellen der mittleren Geschwindigkeit aus unserer zeitlichen Analyse und der ENVI SARscape AT (mm/Jahr) (Mittelwert 0,003, Standardabweichung 0,085).	32
Abbildung 31: Räumlich-zeitlichen Modellen der Autokorrelation von PSI-Daten, die auf Boden fallen.	32
Abbildung 32: Interaktive, webbasierte Kartendarstellung, die die PSI-Parameter für einen ausgewählten Punkt in einem Zeitdiagramm dargestellt, während im Hintergrund eine OpenStreetMap-Karte die Position und farbliche Codierung der Verschiebungswerte angezeigt.	34

Abbildung 33: aus GLOMON Höhenänderung der GNSS-Stationen DCRB und DCRS über 14 Monate. [ALLSAT GmbH, 2024]35

Abbildung 34: aus GLOMON Höhenänderung der GNSS-Station DCRB über 14 Monate, dazu die Zeitreihe der Bauwerkstemperatur während des Messzeitraums (März-November 2024). [ALLSAT GmbH, 2024].....35

Abbildung 35: aus GLOMON Kartendarstellung mit Boden-Bewegungsdienst-Deutschland. [ALLSAT GmbH, 2025].....35

Abbildung 36: Workflow für die Verarbeitung von InSAR- und GNSS-Daten und Ausgaben im OpenData4InfMon-Projekt.....36

10 Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Die Klassifizierungsergebnisse der einzelnen Klassen mit Genauigkeitsmetriken.25

Kurzfassung der Vorhabenbeschreibung

Im **OpenData4InfMon** Projekt sollen Möglichkeiten der strengen Fusion von freien GNSS- und SAR-Daten sowie 3DStadtmodellen und Verkehrswegeplänen zum Zweck der besseren Beurteilung von Deformationen an Bauwerken in Kombination mit lokal installierter Sensorik untersucht werden, insbesondere an Infrastrukturen wie Bahntrassen, Energie-Leitungstrassen und (Brücken-) Bauwerken. Der Mehrwert der Daten wird insbesondere durch KI-Analyse und raum-zeitliche Parameterschätzung in Kombination mit lokalen GNSS-Daten generiert. Die Ergebnisse sollen es ermöglichen, lokale Bewegungen an Bauwerken, von regionalen Bewegungen der Erdoberfläche (quantifiziert mittels SAR-Daten) zu trennen, um so bessere Aussagen über bauwerksschädigende, deformationsrelevante Bewegungen (Senkungen, Hebungen und Kippungen, Rutschungen) und deren Trends zu erhalten. Es wird erwartet, dass Genauigkeiten im Bereich von 1-2 mm (Bewegungsrate pro Jahr) nach Lage und Höhe erreicht und die wesentlichen Ergebnisse in Form einer Open Data-Plattform bereitgestellt werden können.