

**Fachveröffentlichung der
Bundesanstalt für Straßenwesen**

bast

Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt) - Forschungsprogramm Straßenwesen

Potenzial der satellitengestützten Überwachung von Straßenbauwerken

(FE 07.0263/2012/PRB)

Autoren:

Dr. Michael Riedmann

**Airbus Defence and Space GmbH,
Programmbereich Geo-Intelligence**

Dr. Jan Anderssohn

**Airbus Defence and Space GmbH,
Programmbereich Geo-Intelligence**

Maik Bindrich

**Airbus Defence and Space GmbH,
Programmbereich Geo-Intelligence**

Kurzfassung · Abstract

Für den Bereich des Straßenbaues steht mit der Radarinterferometrie ein Verfahren zur Verfügung, mit dem Bewegungsmessungen von Straßenbauwerken durchgeführt werden können.

Das Ziel des Forschungsprojektes war es, das Potential des satellitengestützten Monitorings für die Erfassung der Bewegungen von Straßenbauwerken zu untersuchen.

Hier wurden im ersten Teil der Studie Mindestmessauforderungen an die Aufnahmeparameter des Satelliten und an die Eigenschaften von Straßenbelägen abgeleitet. Eine möglichst hohe räumliche Auflösung der Satellitenbilder sowie möglichst raue Textur der Straßenbeläge erwiesen sich als entscheidende Aspekte für ein erfolgreiches Bewegungs-Monitoring von Straßen.

Im zweiten Teil der Studie wurde am Beispiel eines Dammbauwerks auf schlecht tragfähigem Boden ein Satelliten-Monitoring der Konsolidierungssetzungen durchgeführt. Wegen der geringen und inkonsistenten Rückstreuung des Oberflächenmaterials des Dammbauwerks wurden künstliche Radarreflektoren für diesen Zweck konzipiert und aufgestellt. Die Setzungsbewegung des Damms und der Reflektoren wurde zur Kontrolle auch terrestrisch vermessen.

Die Reflektoren lieferten ein ausreichend starkes Rückstreusignal. Durch Baustellentätigkeit wurden einige Reflektoren jedoch schief gestellt oder verschüttet. Zudem waren die Konsolidierungssetzungen eines Teils des Damms zuweilen so stark, so dass sie durch das Satelliten-Messverfahren mit TerraSAR-X Daten nicht mehr eindeutig aufgelöst werden konnten. Die satellitengestützte Bewegungsmessung der Pegelreflektoren, die von diesen beiden Fehlerquellen unbeeinflusst blieben, wichen im Mittel um etwa 5 mm von den Nivellementmessungen ab.

Das satellitengestützte Monitoring eines Überschüttdamms ist im Vergleich zur herkömmlichen terrestrischen Vermessung relativ kostenintensiv und rechnet sich erst beim Monitoring längerer Abschnitte von etwa 1,8 km, sowie bei einer großen Anzahl von zu erfassenden Messpunkten. Weiter ist das Verfahren nur zur Erfassung der weniger starken Restsetzungen geeignet.

Die Satellitenmessung eignet sich besonders für das Monitoring von Bodenbewegungen großflächige Bereiche mit vielen Messpixeln. Sub-Zentimeter Genauigkeiten der Bewegungsmessungen können hierbei erzielt werden.

Potential of Satellite-Based Monitoring of Road Structures

In the field of road construction, satellite radar interferometry may be applied to measure the movement of roads and road structures.

The aim of the study was to examine the potential of satellite-based movement monitoring of road structures.

In the first phase of the study, minimum measurement requirements were deduced regarding satellite acquisition parameters and characteristics of the road cover. Fine spatial resolution satellite images, as well as rough textures of road surfaces were shown to be essential for a successful movement monitoring.

In the second phase of the study, a satellite monitoring test was realized regarding the settlement of a dam with sand over-burden on badly bearing soil. As the sand of the dam did not reflect strongly and consistently back to the satellite, artificial pole reflectors were designed and installed for this purpose. The movement of the dam and of the reflectors was also measured via terrestrial levelling for verification purposes.

While the pole reflectors gave a strong backscatter signal back to the satellite, some were slanted and covered with sand due to nearby construction works. On top, the settlement of the eastern part of the dam was too large for it to be unambiguously resolved by radar interferometry with TerraSAR-X satellite data. For pole reflectors that did not suffer from these two error sources the satellite-based measurements deviated from those of the precise levelling campaign by roughly 5 mm.

The satellite-based monitoring of a dam with sand over-burden is only cost-efficient with respect to conventional terrestrial levelling, when its length is over 1.8 km. On top, only the slow remaining settlements of the dam can be measured with high accuracy.

Satellite measurements are especially suited to the monitoring of large-area ground movements with a large number of potential measurement pixels. These measurements can be realized with sub-centimeter accuracy.

Inhalt

1	Einleitung	6
2	Methode	6
2.1	Radarinterferometrie mit Satellitendaten.....	6
2.2	Literaturoauswertung.....	9
2.3	Verfahrensweise.....	10
2.3.1	Straßeneigenschaften	11
2.3.2	Aufnahmeparameter des Satelliten.....	11
2.3.3	Bestimmung potentieller Messpixel der Straßenbeläge.....	12
2.3.4	Störeinflüsse bei der Messpixelbestimmung von Straßenbelägen	12
3	Testgebiete	14
3.1	Testgebiet 1: Autobahnkreuze im Nordosten von Hannover, Niedersachsen	14
3.2	Testgebiet 2: Autobahn BAB A24 bei Neuruppin, Brandenburg	15
3.3	Testgebiet 3: Neubautrasse Bundesstraße B212 Ortsumgehung Berne, Niedersachsen	16
4	Datenaufnahme	18
4.1	Satellitendaten.....	18
4.2	Texturdaten	20
4.3	Nivellement Daten	21
5	Ergebnisse und Analyse	23
5.1	Rückstreuung der Straßenbeläge	23
5.2	Potentielle Messpixeldichte von Straßenbelägen	24
5.3	Bewegungsmonitoring eines Überschüttdamms mittels Pegelreflektoren (Testgebiet 3)	27
5.4	Vergleich mit terrestrisch ermittelten Bewegungsdaten	33
6	Diskussion weiterer Anwendungsmöglichkeiten	35
7	Schlussfolgerung	36
8	Abkürzungen	38
9	Literatur	39
10	Anlagen	40
10.1	Anlage 1 – Rückstreusignalstärke der Pegelreflektoren	40

Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt) -
Forschungsprogramm Straßenwesen

Potential der satellitengestützten Überwachung von Straßenbau- werken (FE 07.0263/2012/PRB)

Schlussbericht

Autoren:

Dr. Michael Riedmann, Airbus Defence and Space
GmbH, Programmbereich Geo-Intelligence

Dr. Jan Anderssohn, Airbus Defence and Space
GmbH, Programmbereich Geo-Intelligence

Maik Bindrich, Airbus Defence and Space
GmbH, Programmbereich Geo-Intelligence

1 Einleitung

Mit satellitengestützt aufgenommenen Radardaten ist die Bestimmung von Bodenbewegungen im Millimeterbereich möglich. Bisherige Auswertungen über Straßen zeigen, dass unter gewissen Umständen mit dem Verfahren der sog. Radarinterferometrie auch für Straßen eine Bodenbewegungsmessung möglich sein kann.

Das Ziel des Forschungsprojektes war es, das Potential des satellitengestützten Monitorings für die Erfassung der Bewegungen von Straßenbauwerken zu untersuchen.

In einem ersten Teilprojekt sollten dabei die Randbedingungen betrachtet werden, unter denen eine Straße ausreichend Messpixel für eine satellitengestützte Bewegungsmessung erzeugt. Hierfür wurden über ausgewählten Testgebieten Radarbilder aus unterschiedlichen Blickrichtungen des Satelliten aufgenommen. Als Testgebiete wurden die Autobahnen im Nordosten von Hannover, Niedersachsen und in der Nähe von Neuruppin, Brandenburg ausgewählt. Als Ergebnis wurden optimale Parameter für die Satellitenaufnahmen, sowie die Eignung unterschiedlicher Fahrbahnoberflächen für ein Bewegungsmonitoring abgeleitet.

In einem zweiten Arbeitsschritt sollte die Anwendung von Bewegungsmonitoring mittels Radarinterferometrie an Straßenbauwerken erprobt werden. Hierfür wurde ein Dammbauwerk in der Nähe von Oldenburg, Niedersachsen ausgewählt. Dabei

waren die zu erwartenden Bewegungen sowohl mit Radarinterferometrie, als auch mit terrestrischer Vermessung zu ermitteln und die Ergebnisse miteinander zu vergleichen.

Aus den Erfahrungen aus den ersten beiden Projektteilen, sollten abschließend weitere Anwendungsmöglichkeiten für das Straßenwesen erörtert werden.

2 Methode

2.1 Radarinterferometrie mit Satellitendaten

Mit satellitengestützten Radarsensoren können über das Verfahren der sog. Radarinterferometrie Bodenbewegungen im Millimeterbereich bestimmt werden.

Für das hier beschriebene Forschungsprojekt wurden Daten des deutschen Satelliten TerraSAR-X (TSX) verwendet. TerraSAR-X umkreist die Erde in einer Höhe von 514 km und kann dasselbe Gebiet nach 11 Tagen in der gleichen Geometrie aufnehmen. Der aktive Radarsensor schickt elektromagnetische Wellen zur Erdoberfläche. Mit einer Wellenlänge von 3,1 cm liegen sie im sogenannten X-Bandbereich (Wellenlängenbereich von 2,4 cm bis 3,75 cm). Die vom Satellitensensor ausgesandten Wellen werden zum Teil von der Erdoberfläche reflektiert. Das Echo der zurückgeworfenen Wellen wird vom Sensor aufgezeichnet und aus diesen Daten wird dann das Radarbild der Erdoberfläche berechnet. Jedes Messpixel entspricht dabei einer bestimmten Fläche auf dem Erdboden.

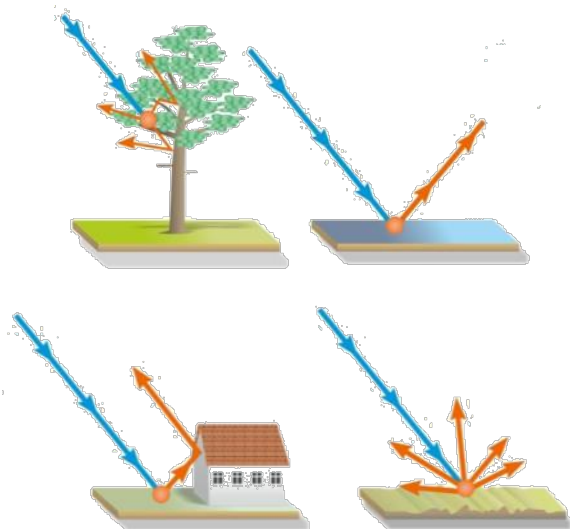


Bild 1: Rückstreuungseigenschaften verschiedener Oberflächen (von links oben nach rechts unten): Bäume (mehrfache Reflexionen), Wasser (spiegelnde Reflexion), Haus (Eckreflexion), raue Oberfläche (diffuse Reflexion).

Bild 1 zeigt die Rückstreuungseigenschaften verschiedener Oberflächen. Echos von Bäumen sind aufgrund von Mehrfachreflexionen für eine Bewegungsmessung ungeeignet. Auch die Echos von Wasseroberflächen können wegen spiegelnder Reflexionen nicht genutzt werden. Am besten eignen sich für eine Bodenbewegungsmessung die Echos von Eckreflexionen, z.B. an Häusercken, und von diffusen Reflexionen an rauen Oberflächen, z.B. eines Kiesbetts. Teil dieses Forschungsprojektes war es, die Rauigkeit von Straßenoberflächen und ihre Eignung als Flächensstreuer für Bodenbewegungsmessungen zu testen.

Der Vorteil von Radardaten ist generell, dass diese unabhängig von Wetterverhältnissen und der Beleuchtungssituation, also unabhängig von der Tageszeit, aufgenommen werden können.

Der Radarsensor kann die Wellenschwingung in einer bestimmten Richtung abstrahlen oder empfangen (siehe Bild 2). Verschieden polarisierte Wellen werden unterschiedlich von der Erdoberfläche reflektiert. Als HH-Polarisation wird dabei ein horizontal polarisiertes Senden und horizontal polarisiertes Empfangen bezeichnet. Von VV-Polarisation spricht man dagegen, wenn Wellen vertikal polarisiert gesendet und vertikal polarisiert empfangen werden. VV-polarisierte Wellen werden z.B. stärker von vertikalen Strukturen reflektiert als HH-polarisierte Wellen. Bei schwachen, diffusen Reflektoren, wie Straßenoberflächen mit vertikaler Textur kann somit ein erhöhtes Echo durch VV-Polarisation erzielt werden.

Der TerraSAR-X Satellit kann in verschiedenen Aufnahmemodi operieren. Mit der Auswahl des jeweiligen Modus beeinflusst man die räumliche Auflösung des Radarbildes und die Abdeckung des erfassten Aufnahmegebietes. So erzielt man mit dem des Staring SpotLight (ST) Modus die höchst mögliche die Auflösung. Die einzelnen Messpixel haben eine Größe von ca. 25 cm. Die hohe Auflösung ermöglicht aber nur einen Bildausschnitt von ca. 4,0 km mal 3,7 km.



Bild 2: Vertikal und horizontal polarisierte Wellen.

Mit dem TSX HighResolution SpotLight (HS) Modus ist die Auflösung geringer, da die Größe der Messpixel bei etwa 1 m liegt. Im HS-Modus kann aber ein Gebiet von ca. 10 km mal 5 km aufgenommen werden. Ein größeres Gebiet von ca. 30 km mal 50 km kann mit dem StripMap (SM) Modus erfasst werden. Die Auflösung ist mit einer Messpixelgröße von etwa 3 m aber deutlich geringer. Der Modus des Satellitensensors wird abhängig von der Größe des aufzunehmenden Zielobjektes oder nach der benötigten Auflösung gewählt.

Für jeden TSX Aufnahmemodus stehen zudem verschiedene Einfallswinkel im Bereich von 20° bis 55° zur Auswahl. Der Einfallswinkel wird als der lokale Zenitwinkel der Radarstrahlung auf die Erdoberfläche definiert. Je größer der Einfallswinkel ist, desto flacher trifft die einfallende Radarstrahlung auf den Erdboden.

Der TerraSAR-X Satellit umläuft die Erde im polarnahen Orbit auf einer Seite nach Norden (aufsteigender Orbit) und auf der anderen Seite nach Süden (absteigender Orbit).

Die satellitengestützte Radarinterferometrie benutzt das Phasensignal des Radarbildes, also die Position im Ablauf einer Wellenschwingung, um Bodenbewegungsmessungen für ein dichtes und großräumiges Netzwerk an Pixeln in einem bestimmten Beobachtungszeitraum abzuleiten.

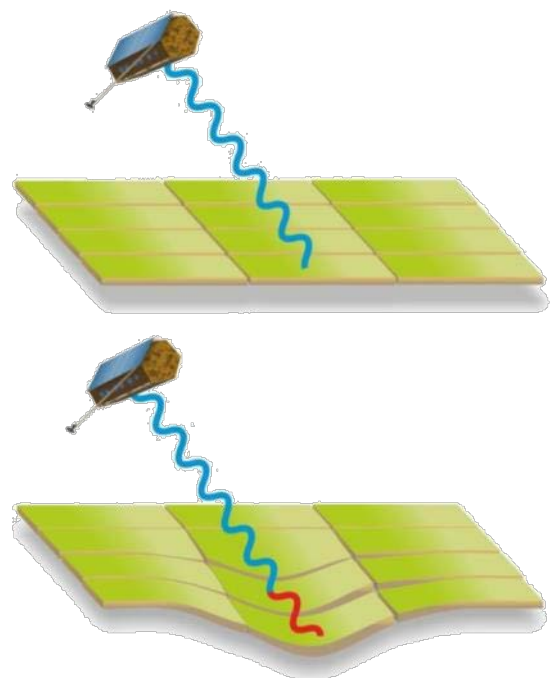


Bild 3: Prinzip der Bodenbewegungsmessung mittels TerraSAR-X Radardaten.

Bild 3 erklärt das Prinzip der Bodenbewegungsmessung: Für jedes Messpixel wird das Phasensignal der reflektierten Radarwelle Millimeter präzise gemessen. Durch den Phasenvergleich zweier Aufnahmen zu unterschiedlichen Zeitpunkten, kann die Bewegung eines Messpixels in Blickrichtung des Satellitensensors für diesen Zeitraum gemessen. In der Literatur finden sich verschiedene Methoden zur Berechnung der Bodenbewegung, z.B. (BAMLER und HARTL, 1998), (FERRETTI et al., 2001) und (WERNER et al., 2003).

Werden mehr als zwei Satellitenbilder aufgenommen, kann die Bewegung eines Messpixels mit der Zeit in Form einer Zeitserie dargestellt werden. Jede Satellitenaufnahme repräsentiert hierbei einen Messzeitpunkt (siehe Bild 4).

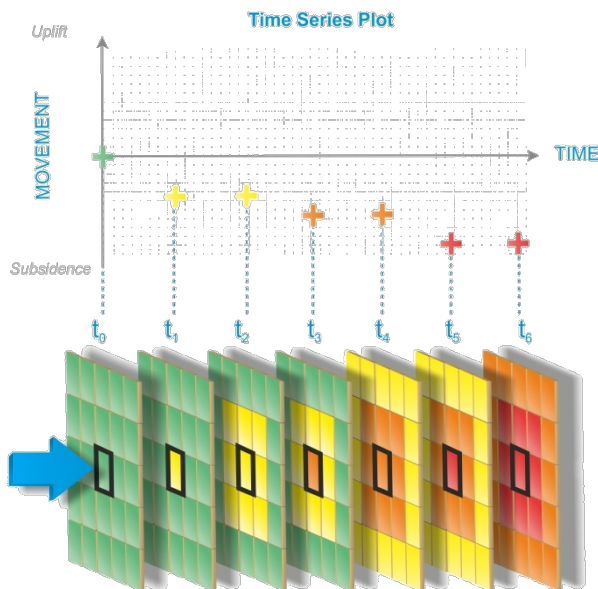


Bild 4: Prinzip der Zeitserienerstellung mittels mehrerer Aufnahmen. Beispiel der Zeitserie eines sich absenkenden Messpixels.

TerraSAR-X kann einen bestimmten Punkt auf der Erde nach 11 Tagen mit den gleichen Aufnahmeparametern erneut messen. Das Messintervall für eine Zeitserie beträgt also 11 Tage oder ein Mehrfaches davon.

Mit der Anzahl der Aufnahmen erhöht sich die Präzision der Bodenbewegungsbestimmung durch statistische Rauschreduktion. Ab etwa 16 Aufnahmen (entspricht bei TerraSAR-X einem Zeitraum von mind. 6 Monaten) können millimeter-präzise Bewegungsinformationen erwartet werden.

Für das Forschungsprojekt wurden zwei Berechnungsmethoden zur Erstellung von Zeitserien verwendet:

- die Persistent Scatterer Interferometry (PSI) Methode (z.B. FERRETTI et al., 2001) und
- die Small Baseline Subset (SBAS) Methode (z.B. BERARDINO et al., 2002; MORA et al., 2003).

Mit beiden Techniken und TerraSAR-X Daten können bereits Bewegungen des Erdbodens im Millimeterbereich detektiert werden.

Die PSI Methode stützt sich auf den oder die im Messpixel dominierenden Reflektoren, die stabil und über einen langen Zeitraum das Signal zum Satelliten zurückreflektieren, sog. Punktstreuer. Sehr gute Punktstreuer sind z.B. Eckreflektoren an Häusern (siehe Bild 1). Im Gegensatz hierzu konzentriert sich die SBAS Methode auf flächenhafte Streuer, in denen kein einzelner Reflektor dominiert, wie z.B. Straßenoberflächen.

Ein Nachteil der PSI Methode ist eine generell geringe Messpixeldichte über schwach reflektierenden Flächen, wie z.B. Straßenoberflächen. Zudem ist die Bestimmung von nicht-linearen und schnellen Bewegungen mit der PSI Methode suboptimal. Die SBAS Methode kann z.B. über Straßenoberflächen mehr Messpixel als PSI generieren und kann auch nicht-lineare Bewegungen gut bestimmen. Allerdings geschieht dies auf Kosten der räumlichen Auflösung und der Bewegungsinformation einzelner Punktstreuer.

Für den ersten Teil des Forschungsprojektes, der Abschätzung der Messpixeldichte von Straßenbelägen (flächenhafte Streuer) wurde deshalb die SBAS Methode angewandt. Für den zweiten Projektteil, das Bewegungsmonitoring eines Dammbauwerks mit Radarreflektoren als Punktstreuer, wurde die PSI Methode angewendet.

Als SBAS-Software wurde SARscape (Version Nr. 5.0) von sarmap S.A. verwendet. Die Berechnung der PSI Ergebnisse erfolgt mit der IPTA Software (Version 20.01.2015) von GAMMA Remote Sensing Research and Consulting AG (WERNER et al., 2003).

Die PSI und die SBAS Methode benötigen Erdbodenbedeckungen, die unverändert und ausreichend stark zum Satelliten zurück reflektieren. Die interferometrische Kohärenz eines Messpixels ist ein Maß für die Stabilität der Rückstreuung der entsprechenden Bodenbedeckung. Wächst z.B. auf einem vorher brach liegendem Acker Getreide, dann ändert sich durch den Bewuchs seine Rück-

streueigenschaft. Die Kohärenz ist in diesem Fall niedrig. Ändert sich die Art der Rückstreuung nicht, z.B. der Acker bleibt brach liegen, spricht man von hoher Kohärenz.

Die lokale Kohärenz errechnet sich aus dem Kreuzkorrelationskoeffizient eines TSX Szenenpaares über einem lokalen Fenster (einige Pixel große, bewegliche Matrix). Der Kohärenzwert liegt zwischen 0 (keine Kohärenz) und 1 (100%ige Kohärenz). Dabei bedeute keine Kohärenz, wenn sich die Rückstreuungseigenschaft des Messpixels vollständig verändert hat. 100%ige Kohärenz ist gegeben, wenn das Messpixel auf die gleiche Weise zu den zwei Aufnahmezeitpunkten zurückstreut. Der Kohärenzwert wird für alle Bildpixel wie folgt berechnet:

$$\hat{\gamma} = \frac{\sum_{n,m} u_1(n,m) \cdot u_2^*(n,m) \cdot e^{-j \cdot \phi(n,m)}}{\sqrt{\sum_{n,m} |u_1(n,m)|^2 \cdot \sum_{n,m} |u_2(n,m)|^2}}$$

wobei

$\hat{\gamma}$	Kohärenzwert für Messpixel [0,1]
n, m	Indices für das lokale Fenster
u, u^*	Komplexer bzw. konjugiert-komplexer Bildwert
$j \cdot \phi(n, m)$	Skalierter topographischer Phasenbeitrag

Die Anzahl der Pixel innerhalb des lokalen Fensters, die üblicherweise zur Berechnung der Kohärenz benutzt werden, liegt zwischen 16 und 40 (FLETCHER, 2007).

Die maximale Bewegungsrate, die mittels Radarinterferometrie und den TerraSAR-X-Satellitendaten eindeutig gemessen werden kann, liegt etwa bei 25 cm pro Jahr in Blickrichtung des Satellitensensors. Dabei muss aber alle 11 Tage eine Aufnahme realisiert werden. Ist dies nicht der Fall, dann reduziert sich die maximal zu messende Bewegungsrate um 7,8 mm pro nicht erfolgter Aufnahme.

Üblicherweise finden sich Anwendungen der satellitengestützten Bodenbewegungsmessungen im Bergbau, in der Erdöl- und Erdgasförderung oder bei unterirdischen Bauarbeiten, z.B. für Tunnelbaustellen. Das Verfahren der satellitengestützten Bodenbewegungsmessung hat sich in den letzten Jahren von der Forschung bis hin zur operativen Einsatzfähigkeit entwickelt und wird z.B. bei der Überwachung von Untergrundspeichern angewendet (PETRAT et al., 2010), (PETRAT et al., 2011).

2.2 Literaturlauswertung

Mit der Verfügbarkeit von hochauflösenden Satellitendaten des deutschen Radarsatelliten TerraSAR-X ergeben sich neue Anwendungsbereiche für das Straßenwesen. Im Vergleich zu herkömmlichen L- und C-Band Satelliten, wie z.B. ALOS PALSAR, RADARSAT, ERS oder ENVISAT, arbeitet TerraSAR-X mit einer geringeren Wellenlänge von 3,1 cm. Durch diese kurzwellige X-Band Strahlung erzeugen bereits Objektoberflächen von geringer Rauigkeit ein zeitlich stabiles Rückstreusignal.

Die Rauigkeit einer Straßenoberfläche wird über Texturprofile und deren Abstände von Spitzen und Tiefen beschrieben. Ein Maß für die Rauigkeit ist die mittlere Profiltiefe (Mean Profile Depth, MPD), d.h. die Differenz der oberen Profilsitzen zum mittleren Texturniveau (RADENBERG, 2014).

Gemäß (FARR, 1993) hat eine Straßenoberfläche bei einem Einfallswinkel von 45° ein detektierbares Rückstreusignal mittels TSX Daten, wenn der quadratische Mittelwert (QMW) der Höhenänderung der Fahrbahnoberfläche mindestens 2 mm beträgt. Die QMW Höhe entspricht hierbei ungefähr der MPD.

Der MPD-Wert liegt bei Fahrbahnoberflächen im Bereich von ca. 0,4 bis 0,8 mm für Betonoberflächen und bis zu 4 mm für offenporige Asphalte (PA) (Quelle: BAST). Betonoberflächen stellen somit für Satellitenmessungen einen kritischen Fall dar, da ihr MPD-Wert weit unter der oben genannten theoretischen Mindestrauigkeit von 2 mm liegt. Betonfahrbahnen kommen im Bundesfernstraßennetz fast ausschließlich auf Autobahnen vor. Für die Fertigung bei Betonoberflächen ist eine Oberflächenstrukturierung zur Erhöhung der Textur vorgeschrieben. Somit weisen die Oberflächen z. T. eine linienförmige Strukturierung in Längs- oder Querrichtung auf (Quelle: BAST), welche ein erhöhtes Rückstreusignal erzeugen könnte.

Bisherige Bodenbewegungsergebnisse von Airbus Defence and Space mit TerraSAR-X Daten zeigen, dass Straßen oftmals durch eine große Anzahl von Messpixeln charakterisiert werden (siehe Tab. 1). Diese Messpixel wurden nicht nur von Schutzplanken generiert und müssen daher auch von der Straßenoberfläche erzeugt worden sein. Schutzplanken sind gute Punktstreuer, da sie stark (wie andere Metallgegenstände auch) und konstant zum Satellit zurückreflektieren.

Die untersuchten Bereiche der A61 bei Mendig, sowie der A10 und der B5 bei Nauen verfügen über Leitplanken (siehe Tab. 1). Für das Testgebiet Staufen ist dies nicht der Fall, d.h. die Rauigkeit

Örtlichkeit	Lokalität	Satelliten-Aufnahmeparameter	Straßeneigenschaften
Mendig (Deutschland)	A61: (33) AS Wehr bis Überführung K 53	TSX SM, 22.01.12-02.06.12, Absteigend, HH Pol., 42,8° Einfallswinkel, 6:43 bzw. 7:43 Uhr	Waschbeton, Schutzplanken vorhanden
Staufen (Deutschland)	L 129: Einmündung K 4983 bis Einmündung L 123 L 125 (Ballrechter Straße - Grunerner Straße, Staufen): 75m nördlich Kreuzung Dorfstraße (Staufen, OT Grunern) bis Einmündung L 123 (Münstertäler Straße, Staufen) Im Steiner (Staufen) inkl. Verbindung zu L 129 / K 4983: Einmündung L 129 / K 4983 bis Einmündung Verbindung Dorfstraße (Staufen, OT Grunern)	TSX SM, 18.10.08-10.12.09, Aufsteigend, HH Pol., 39,2° Einfallswinkel, 18:16 bzw. 19:16 Uhr	Asphaltfeinbeton AC 5/8 D, 6-8 Meter breit, bis 3% Querneigung, keine Schutzplanken vorhanden
Nauen (Deutschland)	B5: Berge bis Unterführung K 6304 (Elstal) A 10 (Berliner Ring): Unterführung Westfalendamm (Brieselang) bis (26) AS Berlin-Spandau (inkl. Südabzweigung)	TSX SM, 24.05.09-30.04.10, Absteigend, HH Pol., 26,4° Einfallswinkel, 6:34 bzw. 7:34 Uhr	B5 und A10 hauptsächlich SMA 11, hauptsächlich Querneigung bis 4%, Schutzplanken vorhanden
Alkmaar (Niederlande)	A9: (12) AS Ring Alkmaar (West) bis etwa (11) AS Akersloot / Uitgeest Noord N 242 (Provincialeweg): Leeghwaterbrug bis etwa Überführung N 243 / N 244 (Nieuwe Schermerweg) N 243 (Nieuwe Schermerweg): N 242 AS Hoorn / Zaanstad bis etwa Einmündung Noordervaart (Nähe Noordervaart 131)	TSX SM, 05.02.09-10.04.10, Aufsteigend, HH Pol., 31,1° Einfallswinkel, 18:18 bzw. 19:18 Uhr	Schutzplanken vorhanden

Tab. 1: Beispielstraßen mit ausreichender Anzahl von Messpixeln (Quelle: Airbus Defence and Space, LandesBetrieb Mobilität Rheinland-Pfalz, Regierungspräsidium Freiburg (Abteilung Straßenwesen u. Verkehr), Landesbetrieb Straßenwesen Brandenburg, 2014).

keit der Straßenoberfläche hatte an dieser Stelle ausreichend Messpixel erzeugt.

Die bisherigen radarinterferometrischen Erfahrungen zeigen, dass neben Schutzeinrichtungen die Straßenbeschaffenheit, wie z.B. die Rauigkeit, Einfluss darauf hat, ob genügend Messpixel vorliegen oder nicht.

Aber auch die Aufnahmeparameter der Satellitendaten haben Einfluss auf die Menge der erzeugbaren Messpixel. So haben auch die Polarisation und der Einfallswinkel der Radarstrahlung einen erheblichen Einfluss auf den Grad der Rückstreuung.

In der Literatur wurde das Rückstreusignal von Asphalt- und Betonoberflächen (unbekannter Texturtiefe) für X-Band Sensoren unterschiedlicher Polarisation und Einfallswinkel veröffentlicht. Aus (ULABY und DOBSON, 1989) ist ersichtlich, dass

- 1) eine VV-Polarisation (vertikal sendend und vertikal empfangend) höhere Rückstreuwerte über einer Straßenoberfläche erzielt, als eine HH-Polarisation (horizontal sendend und horizontal empfangend) oder HV-Polarisation (horizontal sendend und vertikal empfangend). Die Untersuchungen beziehen sich auf X-Band und Einfallswinkel von zwischen 20° und 55°,
- 2) Rückstreusignale bei kleineren Einfallswinkeln größer sind als bei größeren Einfallswinkeln.

(LONG, 2001) untersuchte eine Asphalt- und Betonoberfläche mit VV-polarisierten X-Band Daten und verschiedenen Einfallswinkeln. Für alle Einfallswinkel zeigte Asphalt wegen seiner größeren Texturtiefe ein um etwa 5dB höheres Rückstreusignal als Beton. (SKOLNIK, 1970) und (TAYLOR, 1959) unterschieden zusätzlich zwischen rauem und glattem Asphalt und Beton. Für X-Band Daten (10 GHz) mit VV- und HH-Polarisation ließen sich rauher und glatter Beton gut voneinander unterscheiden, wohingegen eine Unterscheidung von rauem und glattem Asphalt kaum möglich war. (STILES, 1978) zeigte, dass rauher Asphalt bei X-Band Daten (8.6 GHz), 45° Einfallswinkel und HH- oder VV-Polarisation erstaunlicherweise weniger Rückstreusignal ergab als glatter Asphalt. Ursache hierfür könnte die unterschiedliche Granulierung der rauhen und glatten Asphaltflächen sein, die ebenso einen Einfluss auf das Rückstreusignal zu haben scheint (SCHULZ, 2011).

2.3 Verfahrensweise

Anhand von TSX Neuaufnahmen und Vor-Ort Untersuchungen sollte die Rückstreuung von Straßen systematisch analysiert werden. Dabei sollten die Straßeneigenschaften und Satelliten-Aufnahmeparameter näher betrachtet werden. Hieraus sollten Rückschlüsse auf die Mindestanforderungen an Straße und Satellitenaufnahmen gezo-

gen werden, damit ausreichend Messpixel für eine satellitengestützte Messung entstehen.

2.3.1 Straßeneigenschaften

Im Folgenden werden die Eigenschaften von Straßenoberflächen aufgelistet, die einen Einfluss auf die Erzeugung von Messpixeln haben.

- 1) Rauigkeit der Fahrbahnoberfläche, gemessen anhand der mittleren Profiltiefe. Die Rauigkeit bestimmt die Rückstreuung zum Satelliten und somit die Wahrscheinlichkeit, Bodenbewegungen messen zu können. Der MPD-Wert kann mit dem Verfahren der Streifenlichtprojektion bestimmt werden.
- 2) Material / Granulierung der Fahrbahnoberfläche. Gemäß den Ausführungen von (SCHULZ, 2011) könnte die Granulierung des Straßenbelags seine Rückstreuwerte beeinflussen (siehe 2.2).
- 3) Orientierung der Fahrbahn bzgl. der Blickrichtung des Satelliten. Die Orientierung der Fahrbahn ist relevant bei Abschattung durch straßennahe Objekte (z.B. Bäume) oder wenn Leitplanken oder -pfosten als Messpixel genutzt werden.
- 4) Neigung der Fahrbahn in Richtung des Satelliten bzgl. der Blickrichtung des Satelliten. Der lokale Einfallswinkel bestimmt, wie stark die raue Fahrbahnoberfläche zum Satelliten zurückstreut.
- 5) Breite der Straße und des Standstreifens. Die Messbarkeit eines Pixels hängt auch davon ab, ob es nur von der Straßenoberfläche ausgefüllt ist oder ob benachbarte Objekte (z.B. Bäume) mit hineinfallen und die Reflexion der Straßenoberfläche stören.
- 6) Verkehrsdichte. Die Bewegungsmessungen von Fahrbahnoberflächen erfordern regelmäßige Satellitenaufnahmen bei einem konstanten Rückstreuverhalten der Straße zu den unterschiedlichen Aufnahmezeitpunkten. Die Rückstreuung ändert sich aber, wenn z.B. Fahrzeuge die Fahrbahn verdecken. Bei Straßen mit hoher Verkehrsdichte (z.B. Autobahnen während der Hauptverkehrszeit oder bei Stau) während der Aufnahmezeit kann die messbare Fläche stark reduziert werden, was das Messergebnis negativ beeinflusst.
- 7) Rückstreuer. Die Existenz von stabilen Rückstreuern entlang von Fahrbahnen, wie z.B. Beschilderung, Leitplanken oder -pfosten, Straßenlaternen oder Lärmschutzwände, kann die Messpixeldichte positiv beeinflussen. Dabei sind das Material, die Ausrichtung zum Satelliten sowie die stabile Verankerung mit dem Straßenkörper von Bedeutung.

- 8) Art und Beschaffenheit des Fahrbahnunterbaus. Eine Metall-Brücke kann z.B. eine thermale Eigenbewegung aufweisen, die bei Bewegungsmessungen berücksichtigt werden muss.

Die Messung der Rauigkeit der Fahrbahnoberfläche erfolgt vor Ort mittels der Gray-Code Streifenlichtprojektion (kodierter Lichtansatz, siehe Bild 5). Mittels Projektor wird ein Streifenmuster auf die Oberfläche projiziert. Je nach Topologie der Oberfläche werden die projizierten Streifen verzerrt.

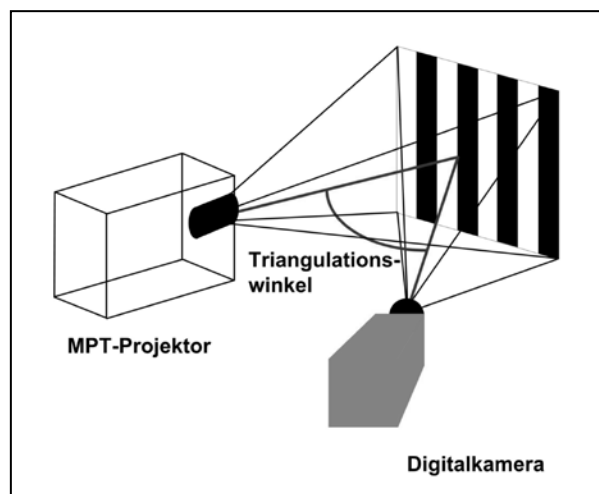


Bild 5: Streifenlichtprojektion (RADENBERG, 2014) in Anlehnung an [www.Breuckmann.com].

Diese Verzerrung ist ein Maß für die Abweichung der Objektoberfläche zu der ideellen Referenzebene. Mit Hilfe der Messsystemsoftware wird ein dreidimensionales Höhenbild der aufgenommenen Fahrbahnoberfläche berechnet. Die Höhenauflösung beträgt bei dem verwendeten Messgerät 0,006 mm, die laterale 0,053 mm. Aus diesem Höhenbild kann der MPD-Wert errechnet werden.

2.3.2 Aufnahmeparameter des Satelliten

Im Folgenden werden verschiedene Aufnahmeparameter aufgeführt, die die Erzeugung von Messpixeln beeinflussen:

- 1) Wellenlänge. Die bisherigen Erfahrungen zeigen, dass nur mit X-Band Daten eine signifikante Rückstreuung von Straßenkörpern messbar ist. Deshalb werden im Folgenden nur X-Band Daten betrachtet.
- 2) Räumliche Auflösung. Die Größe des Messpixels auf der Fahrbahn entscheidet, ob nur die Straßenoberfläche erfasst wird oder ob es zu einer „Vermischung mit benachbarter Vegetation“ kommt. Die Seitenlänge eines Pixels variiert für verschiedene Aufnahmemodi und Einfallswinkel.

winkel. Beim TSX Staring SpotLight Modus beträgt die Seitenlänge eines Messpixels ca. 0,25 m. Beim TSX HighResolution SpotLight Modus liegt sie dagegen bei etwa einem Meter.

- 3) Polarisation. VV-Polarisation erzielt für Straßenoberflächen die höchsten Rückstreuwerte und ist HH- oder HV-Polarisation daher vorzuziehen.
- 4) Einfallswinkel. Der Einfallswinkel der Radarstrahlung auf die Straßenoberfläche bestimmt auch die Größe der Messpixel und damit den Vermischungsgrad der Straße mit benachbarten Objekten innerhalb eines Messpixels. Zudem reflektiert die Fahrbahnoberfläche auf Radarbildern mit verschiedenen Einfallswinkeln unterschiedlich stark.
- 5) Azimutwinkel. Die Blickrichtung des Satelliten in Bezug auf die Himmelsrichtung spielt bei geneigten Oberflächen im Zusammenwirken mit der Fahrbahnorientierung eine entscheidende Rolle. Je nach Blickrichtung des Satelliten kann es zu einer Abschattung der Fahrbahnoberfläche durch straßennahe Objekte (z.B. Bäume) kommen. Im aufsteigenden Orbit hat TSX ein Blickrichtungs-Azimut von $78,5^\circ$, im absteigenden Orbit ein Azimut von $281,5^\circ$.
- 6) Aufnahmezeitpunkt. Auch der Aufnahmezeitpunkt hat einen Einfluss auf die Messpixeldichte. Bei Straßen hoher Verkehrsdichte kann es v.a. zur Hauptverkehrszeit oder bei Stau dazu führen, dass die Straßenoberfläche von den Autos ‚verdeckt‘ wird und keine ausreichende Anzahl von Messpixeln erzeugt werden kann. Über Deutschland ist die Aufnahmezeitspanne für TSX im aufsteigenden Orbit von 17:44 bis 18:18 Uhr (Winterzeit) und im absteigenden Orbit von 6:24 bis 6:52 Uhr (Winterzeit). Diese Zeiten entsprechen dem gegebenen Orbit am 01.09.2012.
- 7) Wetter. Wasser oder Schnee auf den Straßen verändern deren Rückstreuverhalten. Daher sollten nur Aufnahmen trockener Fahrbahnen zur Analyse genutzt werden.

Idealerweise sollte in der folgenden Analyse jeder der unter 2.3.1 und 2.3.2 angeführten Parameter untersucht werden, um Mindestmessauforderungen für die Straßenüberwachung abzuleiten. Einige Parameter, wie die Wellenlänge, die räumliche Auflösung, die Polarisation oder der Zeitpunkt der Satellitenbildaufnahme erlauben kaum Variationen. Für andere Parameter, wie der Einfallswinkel oder die Rauigkeit und Granulierung der Fahrbahnoberfläche steht eine relativ große Auswahl an möglichen Werten zur Verfügung.

Im Rahmen des Forschungsprojektes wurden zwei Testgebiete hinsichtlich verschiedener Aufnahmeparameter (hauptsächlich Einfallswinkel, Orbit)

ausführlich untersucht. Bei der Auswahl der Testgebiete wurde darauf Wert gelegt, dass möglichst viele Fahrbahnen unterschiedlicher Rauigkeit und verschiedener Granulierung vorhanden sind. Aber auch die zu erwartende Verkehrsdichte zum Zeitpunkt der Aufnahmen sowie mögliche Konflikte durch Baumaßnahmen wurden berücksichtigt.

2.3.3 Bestimmung potentieller Messpixel der Straßenbeläge

Das Ziel des Forschungsprojektes soll es später sein, durch Anwendung einer Zeitreihenanalyse die Größenordnung der Bewegungen einer Straße in Sichtlinie des Satellitensensors messen zu können. Eine Zeitserienanalyse bedingt aber mindestens 16 Aufnahmen, um millimeter-präzise Messungen zu erhalten (siehe 2.1). Bei einem Aufnahmeintervall von 11 Tagen beträgt der dafür notwendige Messzeitraum mindestens 6 Monate.

Um festzustellen, ob es bei radarinterferometrischen Auswertungen zu Messpixeln kommen könnte ohne eine komplette Zeitserienanalyse für jede Parametrierung durchzuführen, wird das Maß der interferometrischen Kohärenz herangezogen. Letztere lässt sich bereits mit wenigen Aufnahmen für Straßenbeläge hinreichend berechnen.

Die Kohärenz kann für alle möglichen TSX Bildpaare unterschiedlicher zeitlicher Separation ermittelt werden. Dabei können zwischen den TSX Aufnahmen minimal 11 Tage liegen und maximal der Zeitraum zwischen der ersten und letzten TSX Aufnahme.

2.3.4 Störeinflüsse bei der Messpixelbestimmung von Straßenbelägen

Bei der Bestimmung potentieller Messpixel von Straßenbelägen gibt es Störfaktoren, die es zu berücksichtigen gilt.

- 1) Nässe auf den Straßenbelägen verändert deren Reflexion zum Satelliten. Nur die Aufnahmen trockener Straßen sollten zur Messung verwendet werden.
- 2) Fahrzeuge auf der Fahrbahn reflektieren die Radarstrahlung zum Satelliten zurück und werfen einen Schatten auf den Belag. Bei Stillstand, z.B. im Stau, sind die Fahrzeuge direkt im Amplitudenbild erkennbar (siehe Bild 6). Bei Bewegung der Fahrzeuge 90° zur Satellitenflugrichtung wird ihre Reflexion versetzt in Satellitenflugrichtung dargestellt (siehe Bild 7). Bei Bewegung der Fahrzeuge in Satellitenflugrichtung wird die Reflexion verschwommen im

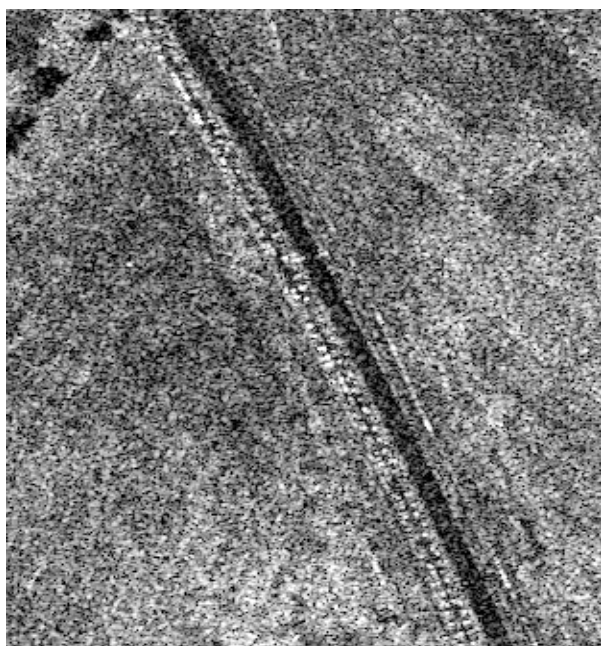


Bild 6: Stau auf der Autobahn A24 km 206,760 Fahrtrichtung Süd bei Neuruppin am 13.07.2013 um 18:43 Uhr. Ausschnitt TSX HS Amplitudenbilds (aufsteigender Orbit, Einfallswinkel 26,85°) © DLR e.V. 2014, Distribution Airbus DS Geo GmbH.

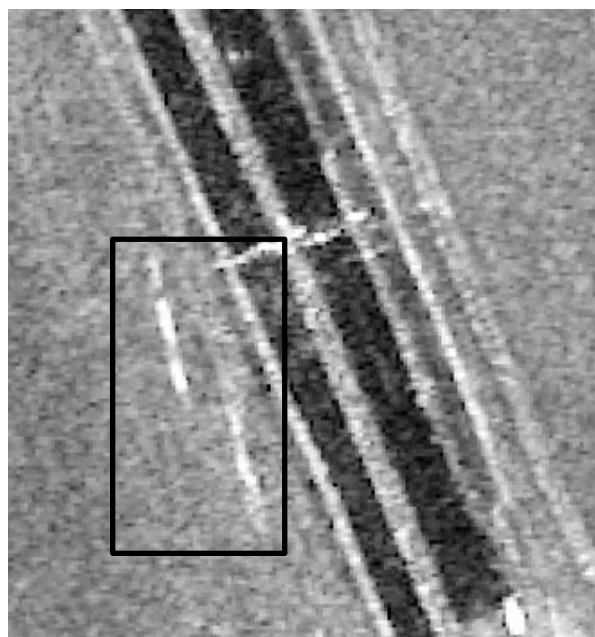


Bild 8: Reflexionen von Fahrzeugen mit Bewegung hauptsächlich in Satellitenflugrichtung (links neben dem Fahrstreifen auf der Wiese) – Autobahn A7 südlich des Autobahnkreuzes Hannover Kirchhorst. Ausschnitt TSX HS gemitteltes Amplitudenbild (aufsteigender Orbit, Einfallswinkel 20,73°) © DLR e.V. 2014, Distribution Airbus DS Geo GmbH.



Bild 7: Reflexionen von Fahrzeugen mit Bewegung hauptsächlich 90° zur Satellitenflugrichtung (weiße Punkte parallel zur Autobahn auf den Feldern) – Autobahn A2 östlich des Autobahnkreuzes Hannover Ost. Ausschnitt TSX HS gemitteltes Amplitudenbild (absteigender Orbit, Einfallswinkel 31,14°) © DLR e.V. 2014, Distribution Airbus DS Geo GmbH.

Amplitudenbild wiedergegeben (siehe Bild 8) (SUHANDT et al., 2005).

Die Wahrscheinlichkeit ist gering, dass bei einer erneuten Satellitenaufnahme Fahrzeuge bei fließendem Verkehr und einer mittleren Verkehrsdichte an derselben Stelle wieder erscheinen. Deshalb ist bei einer Zeitserienanalyse mit vielen Aufnahmen mit einem Bewegungsergebnis selbst dann zu

rechnen, wenn sich Fahrzeuge ein paar Male auf demselben Messpixel befanden. Allerdings sind Stau-Aufnahmen von dem Datenstapel zu entfernen, da sie zur Messung keinen Beitrag liefern.

- 3) Bäume in der Umgebung des Straßenrands sind starke Streuer und werfen ihren Schatten oder ihre Reflexion (Layover-Effekt) auf die Straße:
- Bei großen (flachen) Einfallswinkeln der Radarwellen können Bäume ihren Rarschatten entlang der Blickrichtung auf den Straßenbelag werfen (siehe Bild 9 links).
 - Bei kleinen (steilen) Einfallswinkeln kann die Reflexion der Baumkronen entgegen der Blickrichtung auf den Straßenbelag projiziert werden (Layover-Effekt, siehe Bild 9 rechts).

In beiden Fällen können an den Stellen der Abschattung bzw. Überlagerung keine Messpixel bestimmt werden. Die Stärke dieser Effekte hängt von dem Zusammenspiel des Abstands der Bäume zum Straßenrand, von der Höhe der Bäume und von der Blickrichtung des Satellitensensors (Einfalls- und Azimutwinkel) ab. Es lassen sich daher keine absoluten, allgemeingültigen Bedingungen ableiten, z.B. Angabe eines Mindestabstandes von Bäumen zum Straßenrand, die den Eintritt dieser Effekte ausschließen.

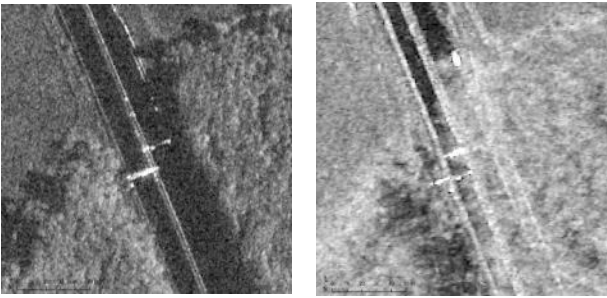


Bild 9: Effekte der östlichen Baumreihe auf den Straßenbelag der Autobahn A7 südlich des Autobahnkreuzes Hannover Kirchhorst. Ausschnitte TSX HS gemittelte Amplitudenbilder. Links Baumschatten (absteigender Orbit, Blickrichtung des Satelliten von rechts, Einfallswinkel $51,77^\circ$). Rechts Baum-Layover (aufsteigender Orbit, Blickrichtung des Satelliten von links, Einfallswinkel $20,73^\circ$). © DLR e.V. 2014, Distribution Airbus DS Geo GmbH.

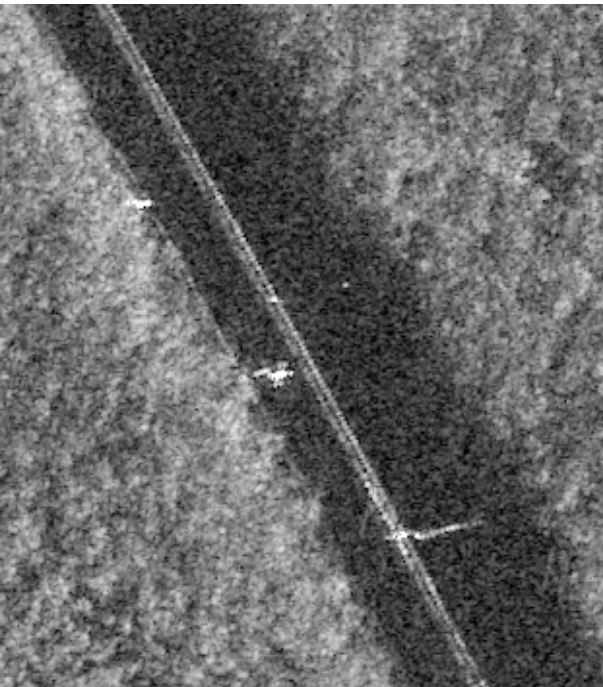


Bild 10: Oben Reflexionen von drei Schildern auf der Autobahn A7 südlich des Autobahnkreuzes Hannover Kirchhorst. Ausschnitt TSX HS gemitteltes Amplitudenbild (absteigender Orbit, Einfallswinkel $51,77^\circ$) © DLR e.V. 2014, Distribution AirbusDS Geo GmbH. Unten Foto vor Ort © Thomas Anderssohn.

Die günstigste Aufnahmegeometrie zur Verminderung dieser Effekte ist von einem Orbit zu realisieren, bei dem der Satellitensensor möglichst parallel zur Fahrbahnausrichtung blickt.

- 4) Brücken, Lärmschutzwände, Verkehrszeichenbrücken, Leitplanken oder Beschilderung (siehe Bild 10), zeichnen sich durch eine starke, zeitlich konstante Rückstreuung aus und ‚überstrahlen‘ oft die Streuung der benachbarten Messpixel der Straßenoberfläche. Die Analyse der Messpixel der Straßenbeläge wird dadurch zwar behindert, bei einer Zeitserienanalyse sind diese stabilen Rückstreuer aber willkommen.

3 Testgebiete

Die Testgebiete wurden in Zusammenarbeit mit der Ruhr Universität Bochum und der BASt ausgewählt. Bei der Auswahl der Gebiete 1 und 2 wurden verschiedenste Informationen zu den jeweiligen Straßeneigenschaften z.B. Material, Neigung und Breite der Fahrbahn, sowie die durchschnittliche tägliche Verkehrsstärke berücksichtigt.

Das dritte Testgebiet wurde für das satellitengestützte Monitoring ausgewählt. Es handelt sich um einen Überschüttdamm, dessen Setzungsbewegung gemessen wurde.

3.1 Testgebiet 1: Autobahnkreuze im Nordosten von Hannover, Niedersachsen

Das Testgebiet 1 liegt im Nordosten von Hannover und umfasst die Abschnitte der Autobahnen BAB A2, BAB A7 und BAB A37 im Bereich der Autobahnkreuze Kreuz Hannover-Ost, Kreuz Hannover-Kirchhorst und Kreuz Hannover-Buchholz. Im Testgebiet 1 wurden verschiedene Fahrbahnbeläge aus Asphalt und Beton untersucht (siehe Bild 11 und Tab. 2).

Die Verkehrsdichte der Autobahnen im Testgebiet variiert zwischen 60.000 und bis zu 90.000 Kraftfahrzeuge pro Tag. Die Standstreifen der untersuchten Streckenabschnitte weisen den gleichen Belag wie die Fahrstreifen auf. Das topographische Gelände ist relativ flach. Dadurch weisen die Fahrbahnen nur geringe Längsneigung auf. Es kann von einer Standard-Querneigung von 2,5% ausgegangen werden. Die Breite der Fahrstreifen entspricht den Standardbreiten für Autobahnen von jeweils 3,75 m. Der Standstreifen ist 2,5 m breit (Quelle: Niedersächsische Landesbehörde für Straßenbau und Verkehr, NLSStBV).

Bilder entfernt - Urheberrechte nicht geklärt

Bild 11: Testgebiet 1 (Autobahnkreuze im Nordosten von Hannover, weißes Polygon) mit TSX HS Abdeckung des aufsteigenden und absteigenden Orbits (gelbes bzw. grünes Rechteck). Hintergrundbild © Google Earth 2014.

Autobahn	Material	Größtkorn (mm)	Gestein
A2	Splittmastix-Asphalt (SMA)	8	Gabbro und / oder Diabas
	Offenporiger Asphalt (PA)	11	
	Offenporiger Asphalt (PA)	8	
A7	Waschbeton	8	
	Splittmastix-Asphalt (SMA)	11	Gabbro und / oder Diabas
	Grindingbeton	8	
A37 (B3)	Splittmastix-Asphalt (SMA)	11	Gabbro und / oder Diabas

Tab. 2: Fahrbahnbeläge im Testgebiet 1 Autobahnkreuze im Nordosten von Hannover (Quelle: NLStBV).

3.2 Testgebiet 2: Autobahn BAB A24 bei Neuruppin, Brandenburg

Das Testgebiet 2 umfasst einen ca. sechs Kilometer langen Abschnitt der Autobahn BAB A24 bei Neuruppin und entspricht der in 2009 in Betrieb genommenen Teststrecke zur Erprobung verschiedener Fahrbahnbeläge und –übergänge zur Lärminderung zwischen Ausfahrt AS 22 und AS 23 bei Betriebskilometer 206,000 bis 212,000 (siehe Bild 12 und Tab. 3).

Die Verkehrsdichte im Testgebiet beträgt etwa 45.000 Kraftfahrzeuge pro Tag. Die Standstreifen im Testgebiet sind mit dem gleichen Belag wie die Fahrstreifen ausgeführt. Das topographische Gelände ist relativ flach. Daher kann von geringer Längsneigung und der Standard-Querneigung von 2,5% ausgegangen werden.

Bild 12: Testgebiet 2 (Autobahn BAB A24 bei Neuruppin, weißes Polygon) mit TSX HS Abdeckung des aufsteigenden und absteigenden Orbits (gelbes bzw. grünes Rechteck). Hintergrundbild © Google Earth 2014.

Testfeld	Material	Größtkorn (mm)	Art der groben Gesteinskörnung	Rüttelstreifen
1	Splittmastix-Asphalt (SMA)	11	Granodiorit	Ja
2	Splittmastix-Asphalt (SMA)	8	Granodiorit	Ja
3-6	Offenporiger Asphalt (PA)	8	Eolit	Ja
7-8	Splittmastix-Asphalt (SMA)	11	Granodiorit	Ja
9	Splittmastix-Asphalt (SMA)	11	Granodiorit	Ja
10-11	Offenporiger Asphalt (PA)	8	Eolit	Nein
12-15	Offenporiger Asphalt (PA)	8	Eolit	Ja
16	Splittmastix-Asphalt (SMA)	11	Granodiorit	Ja
17-18	Lärmoptimierter Gußasphalt (PMA)	5	Granodiorit	Ja
19	Lärmoptimierter Gußasphalt (PMA)	5	Eolit	Nein

Tab. 3: Fahrbahnbeläge im Testgebiet 2 Autobahn A24 bei Neuruppin (Quelle: BASt).

Die Breite der Fahrstreifen entspricht den Standardbreiten für Autobahnen von jeweils 3,75 m, die breite der Standstreifen beträgt 2,50 m. Im Testgebiet 2 werden die Hauptfahrstreifen von den Standstreifen fast auf der gesamten Strecke durch einen Rüttelstreifen getrennt (siehe Tab. 3) (Quelle: BASt).

Die Fahrbahnen sind mit verschiedenen Asphaltbelägen ausgeführt. Als grobe Gesteinskörnung wurde vorrangig Granodiorit, ein magmatisches Gestein, sowie Eolit®, ein künstlicher Baustoff aus Elektroofenschlacke eingesetzt.

In der Studie sollte untersucht werden, ob die unterschiedlichen Arten grober Gesteinskörnung Einfluss auf die Messpixeldichte der jeweiligen Fahrbahnbeläge haben.

3.3 Testgebiet 3: Neubautrasse Bundesstraße B212 Ortsumgehung Berne, Niedersachsen

Als Teil des Testgebiets 3 wurde die Neubautrasse der Bundesstraße B212 im Bereich der Ortsumgehung Berne ausgewählt. An einem ca. 500 m langen Dammabschnitt wurde die Setzung gemessen (Baukilometer 4+080 bis 4+570) (siehe Bild 13).

**Bild entfernt -
Urheberrechte nicht
geklärt**

Bild 13: Testgebiet 3 (Überschüttdamm nordwestlich von Berne) mit TSX ST Abdeckung des absteigenden Orbits (gelbes Rechteck). Die gelben Punkte nördlich von Berne markieren die Position der Pegelreflektoren. Hintergrundbild © Google Earth 2014.

Bei dem Erdbauwerk handelt es sich um einen sogenannten Überschüttdamm. Der Untergrund im Untersuchungsgebiet wird aus schlecht tragfähigem Torf und Kleiboden aufgebaut. Der Grundwasserspiegel liegt nahe der Geländeoberfläche. Bei der Herstellung eines Damms im Überschüttverfahren, wird Sand über die Oberkante der geplanten Gradienten hinaus auf den Damm geschüttet. Durch die stärkere Auflast wird die Setzung des Untergrundes beschleunigt. Nach Abklingen der Setzungen wird die Überschüttung wieder abgetragen und der Straßenoberbau ausgeführt. Je nach Art und Mächtigkeit der schlecht tragfähigen Böden im Untergrund und je nach Höhe des zu er-

richtenden Dammbauwerkes stellen sich Setzungen von mehreren Dezimetern bis hin zu mehreren Metern ein. Wird in zu kurzer Zeit zu viel Schüttmaterial aufgebracht kann es zu einem Grundbruch kommen. Um das zu vermeiden erfolgt die Schüttung der Dämme in mehreren Phasen. Die Konsolidierungsphase bis zum Abklingen der Hauptsetzungen kann mehrere Jahre dauern. Um Schäden am Bauwerk zu vermeiden, müssen die eintretenden Setzungen über den gesamten Zeitraum immer wieder überprüft werden. Dies geschieht derzeit mittels terrestrischer Vermessung.

Das Oberflächenmaterial des untersuchten Überschüttdamms, Sand, teilweise mit Oberboden angegedeckt und begrünt, erzeugte kaum Messpixel. Daher wurden 20 ‚Pegelreflektoren‘ installiert.

Bei der Auswahl der Reflektoren mussten verschiedene Randbedingungen beachtet werden. Ein Eckreflektor aus Beton wäre aufgrund seines Eigengewichts von etwa 80 kg für die Anwendung auf der Baustelle eher ungeeignet. Für die Anwendung auf Überschüttdämmen müssen die Reflektoren transportabel sein, um sie im Zuge einer weiteren Dammaufschüttung versetzen zu können. Außerdem sind Herstellungskosten von etwa 400 € pro Stück vergleichsweise hoch.

Vor Beginn der Messungen wurden daher verschiedene Varianten von Reflektoren am 26.11.2013 installiert und mit hochauflösenden TSX ST Daten am 15.12.2013, 26.12.2013 und 17.01.2014 aufgenommen und getestet.

Um ein gutes Signal von einem Reflektor zu erhalten, sollte dieser etwa 100 Mal stärker als die Umgebung reflektieren, d.h. einen um 20 Dezibel (dB) höheren Rückstreuwert besitzen. Bei dem vorliegenden Umgebungsrauschen von Gras und Sand von etwa -8 bis -15 dB, sollte ein Reflektor deshalb eine Rückstreustärke von mindestens +12 dB besitzen. Es zeigte sich, dass die für die terrestrische Vermessung genutzten Pegelstangen alleine oder in Kombination mit einem Gitterrost nicht ausreichend stark reflektierten (maximal +5 dB wurden erreicht). Pegelstangen, an deren Fuß eine Stahlplatte mit einem Außendurchmesser von ca. 100 cm aufgesetzt wurde, erzeugten zwar eine signifikante, aber im Kontrast zur Rückstrahlung der Umgebung ungenügende Reflexionsstärke von maximal +10,5 dB.

Am geeignetsten erwies sich die Kombination der oben genannten Stahlplatte mit einem ca. 50 cm langen Zylinderrohr-Aufsatz (mit 12 cm Durchmesser) aus Stahl am Fuß der Pegelstange (siehe Bild 14). Dieser ‚Pegelreflektor‘ erzielte ein ausreichend starkes Reflexionssignal von über +12 dB.



Bild 14: Pegelreflektor installiert auf Überschüttdamm im Testgebiet 3. Foto © BASSt 2014.

Diese einfache und preisgünstige Konstruktion (etwa 90 € pro Reflektor) ermöglicht einerseits das leichte Installieren und andererseits das erneute Aufsetzen des Reflektors auf die Pegelstange

nach einem weiteren Aufschütten des Damms. Die Referenz zur Pegelstangenmessung ist weiterhin gegeben.

Allerdings besteht beim Einsatz der o.g. Pegelreflektoren die Gefahr, dass die Metallscheibe von Sand zugeweht wird. Aus diesem Grund zeigte ein Reflektor im Vorversuch zeitweilig kein Signal mehr. Weiter besteht aber auch die Gefahr, dass die relativ leichten Pegelreflektoren durch den Einfluss von Baustellenverkehr verschüttet, verkippt oder verschoben werden. Die regelmäßige Kontrolle der Reflektoren ist daher erforderlich.

Bild 17 illustriert die Standorte und Nummerierung der 20 am 24.04.2014 errichteten Pegelreflektoren. Sie wurden entlang der Dammkrone in Abständen von ungefähr 40 m voneinander errichtet. Bei der Verteilung der Reflektoren musste darauf geachtet werden, dass die Pegelstangen weit genug entfernt vom Rand der Dammkrone standen, um ein mögliches Verkippen der Metallscheiben ausschließen zu können. Bei der Installation der Reflektoren wurde darauf geachtet, dass die Metallscheiben möglichst eben auf dem Sand ausgerichtet wurden. Dafür war es notwendig, das Niveau der Sandoberfläche händisch auszugleichen. Der Stahlzylinder wurde mittig über dem Pegelrohr und

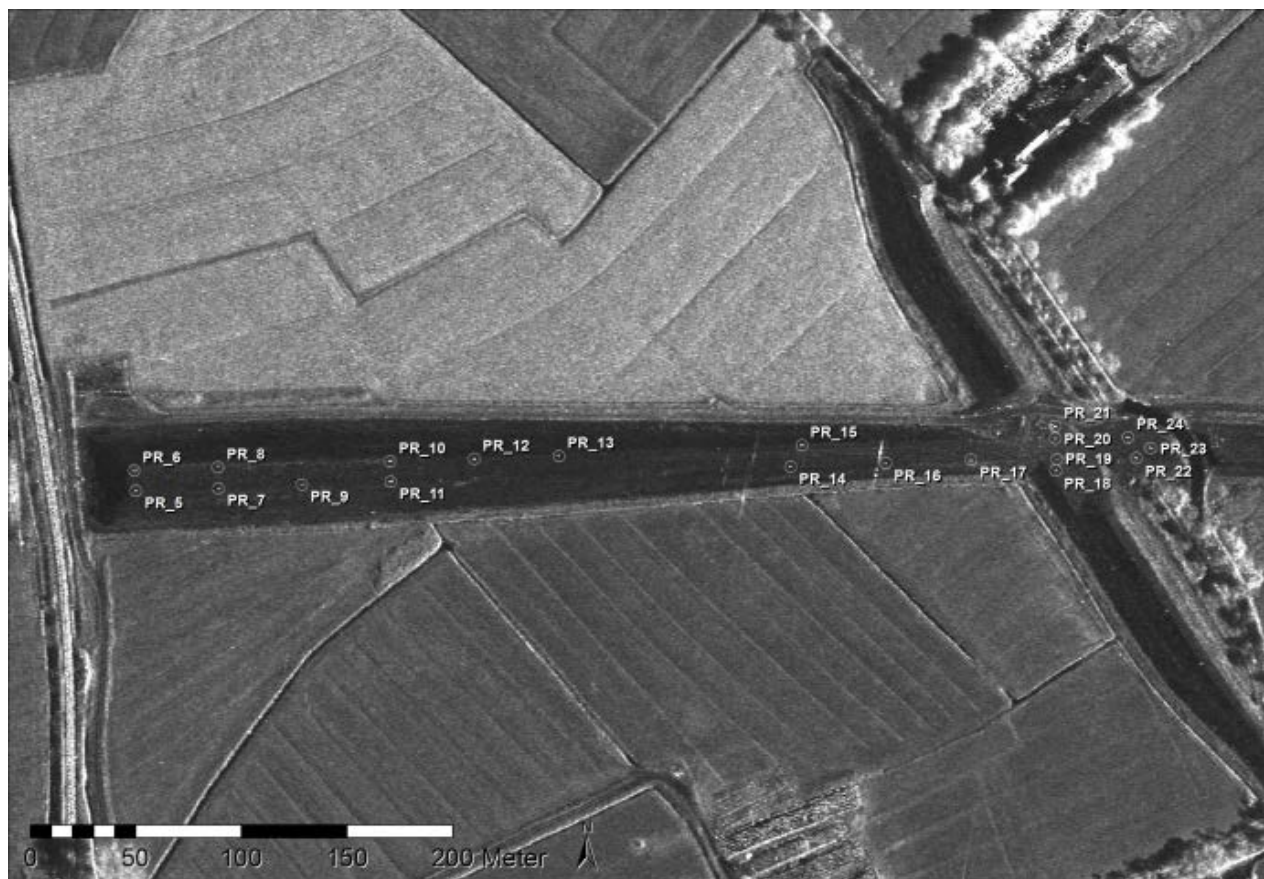


Bild 15: Standorte und Nummerierung der 20 Pegelreflektoren auf dem Überschüttdamm bei Berne. Hintergrund: Gemitteltes TerraSAR-X Amplitudenbild, © DLR e.V. 2014-2015, Distribution Airbus DS Geo GmbH.

der Metallscheibe ausgerichtet und mit Schnellkleber fixiert, um eine Verschiebung zu vermeiden. Abschließend wurden die Reflektoren nummeriert und ggf. von losem Sand gereinigt.

Im Laufe der Zeit entwickelten die Reflektoren eine starke Rostschicht. Diese beeinflusste die satellitengestützten Messungen jedoch nicht.

4 Datenaufnahme

4.1 Satellitendaten

Für die Testgebiete 1 und 2 wurden gemäß Kapitel 2.3.2 die Aufnahmeparameter in Tab. 4 gewählt.

Aufnahmeparameter	Wert	Variationen
Satellit	TerraSAR-X	0
Wellenlänge	3,1cm (X-Band)	0
Räumliche Auflösung	1m (HS Modus)	0
Polarisation	VV	0
Einfallswinkel	20° - 55°	2 (flache und steile Aufnahme)
Orbitgeometrie	Aufsteigend und absteigend	2

Tab. 4: Aufnahmeparameter und deren Variationen für Testgebiete 1 und 2.

Der HS Aufnahmemodus mit einer räumlichen Auflösung von 1 m wurde den gröber auflösenden Modi vorgezogen, damit unvermischte Pixel von den Fahrbahnbelägen aufgenommen werden können. Er deckt das Testgebiet im aufsteigenden und absteigenden Orbit gut ab (siehe Bild 11 und Bild 12).

Diese beiden Orbitgeometrien erlauben es, die Straße aus zwei unterschiedlichen Azimutwinkeln zu beobachten. Zudem wurden für jede Variation eine Aufnahme mit einem flachen und einem steilen Einfallswinkel gewählt, um dessen Einfluss auf die Messpixeldichte zu untersuchen.

In Tab. 5 sind die Aufnahmeparameter für das Testgebiet 3 zusammengestellt.

Aufnahmeparameter	Wert
Satellit	TerraSAR-X
Wellenlänge	3,1cm (X-Band)
Räumliche Auflösung	0,25m (ST Modus)
Polarisation	HH
Einfallswinkel	49,62°
Orbitgeometrie	Absteigend
Lokale Uhrzeit	7:33 (ab 30.03.2014)

Tab. 5: Aufnahmeparameter für Testgebiet 3.

Für das Monitoring des Überschüttdamms wurde der ST Modus mit der feinsten räumlichen Auflösung (0,25 m) gewählt, damit die Pegelreflektoren so klein als möglich ausfallen, um eine ausrei-

chende Rückstreuung zu erzeugen. (Die Größe der räumlichen Auflösung der Messpixel korreliert mit der notwendigen Reflektorgröße.) Zudem wurde die HH-Polarisation gewählt. Dadurch minimiert sich die Rückstreuung der Reflektor-Umgebung (Sand oder Vegetation) und die Reflektoren heben sich besser vom Hintergrund ab.

Für die Messungen im Testgebiet 3 wurde ein mittlerer Einfallswinkel gewählt, damit die Rückstreuung des Reflektors bei kleinen Abweichungen der Metallplatte von der Horizontalen noch ausreicht. Die Abdeckung der absteigenden Orbitgeometrie ist in Bild 13 dargestellt.

Die realisierten TerraSAR-X Aufnahmen für Testgebiet 1, 2 und 3 sind in Tab. 6, Tab. 7 und Bild 16 aufgelistet.

Der Aufnahmezeitraum für die Testgebiete 1 und 2 lag zwischen dem 01.06.2013 und dem 24.01.2014. Für die Analyse der Randbedingungen waren mindestens drei Aufnahmen notwendig für jede Variation der Aufnahmeparameter des Satelliten.

Um beurteilen zu können, ob die Satellitenaufnahmen nutzbar sind, werden Angaben zum Näsograd der untersuchten Straßen zum Zeitpunkt der Messungen benötigt. Aus diesem Grund wurden die Niederschlagsmengen der beiden Beobachtungsstationen des Deutschen Wetterdienstes Nr. 3552 (Neuruppin) und 2014 (Hannover) erfragt. Hier wurde sowohl die Tagesmenge, als auch die stündliche Menge des Niederschlags zum Zeitpunkt der Satellitenaufnahme bewertet. Zu den einzelnen Aufnahmezeitpunkten in der Messperiode von Juni 2013 bis Januar 2014 fielen kaum Niederschläge. Dadurch mussten nur wenige Aufnahmen ausgesondert werden.

Für das satellitengestützte Monitoring über dem Testgebiet 3 wurden insgesamt 25 Aufnahmen im 11-Tage-Rhythmus realisiert. Die Aufnahmeperiode begann kurz nach der Aufstellung der Pegelreflektoren am 02.05.2014 und endete am 21.01.2015.

Da TerraSAR-X ein kommerziell genutzter Satellit ist, kann es zu Aufnahmekonflikten mit anderen Nutzern kommen. Bevor die Aufnahmereihe für das Testgebiet 3 gestartet wurde, war z.B. ein Orbitwechsel wegen eines Konfliktes mit anderen kommerziellen Datenaufnahmen notwendig. Dies hatte keine Auswirkungen auf die Untersuchungen, da die Pegelreflektoren zum Zeitpunkt des Orbitwechsels noch nicht installiert waren.

Orbit	Azimetwinkel	Lokale Sommerzeit	Einfallswinkel	Fahrbahn	TerraSAR-X Daten
Aufsteigend	78,5°	18:52	20,73°	trocken	04.06.2013, 26.06.2013, 18.07.2013, 09.08.2013, 31.08.2013, 22.09.2013, 03.10.2013, 25.10.2013, 05.11.2013, 16.11.2013, 08.12.2013, 10.01.2014
				nass	27.11.2013, 19.12.2013
		19:18	53,81°	trocken	19.06.2013, 11.07.2013, 02.08.2013, 24.08.2013, 18.10.2013, 29.10.2013, 09.11.2013, 20.11.2013, 01.12.2013, 12.12.2013, 23.12.2013, 03.01.2014, 14.01.2014
Absteigend	281,5°	07:42	31,14°	trocken	11.06.2013, 22.06.2013, 03.07.2013, 14.07.2013, 05.08.2013, 16.08.2013, 27.08.2013, 07.09.2013, 29.09.2013, 21.10.2013, 01.11.2013, 15.12.2013, 06.01.2014, 17.01.2014
				nass	31.05.2013, 18.09.2013, 26.12.2013
		07:25	51,77°	trocken	01.06.2013, 04.07.2013, 15.07.2013, 26.07.2013, 19.09.2013, 30.09.2013
				nass	11.10.2013

Tab. 6: Aufnahmeparameter der realisierten TerraSAR-X Aufnahmen, sowie Nässegrad der Fahrbahn zum Aufnahmezeitpunkt für das Testgebiet 1 (Autobahnkreuze im Nordosten Hannovers).

Orbit	Azimetwinkel	Lokale Sommerzeit	Einfallswinkel	Fahrbahn	TerraSAR-X Daten
Aufsteigend	78,5°	18:43	26,85°	trocken	21.06.2013, 13.07.2013, 28.09.2013, 20.10.2013, 31.10.2013, 22.11.2013, 03.12.2013, 05.01.2014
				nass	25.12.2013
		19:01	49,01°	trocken	20.06.2013, 01.07.2013, 23.07.2013, 14.08.2013, 05.09.2013, 27.09.2013, 08.10.2013, 19.10.2013, 30.10.2013, 10.11.2013, 21.11.2013, 02.12.2013, 13.12.2013, 24.12.2013, 04.01.2014
				nass	16.09.2013
Absteigend	281,5°	07:33	27,49°	trocken	28.06.2013, 20.07.2013, 11.08.2013, 02.09.2013, 16.10.2013
				nass	24.09.2013
		07:16	49,40°	trocken	29.06.2013, 21.07.2013, 25.09.2013, 17.10.2013, 28.10.2013, 19.11.2013, 11.12.2013, 02.01.2014, 24.01.2014
				nass	12.08.2013, 03.09.2013

Tab. 7: Aufnahmeparameter der realisierten TerraSAR-X Aufnahmen, sowie Nässegrad der Fahrbahn zum Aufnahmezeitpunkt für das Testgebiet 2 (Autobahn A24 bei Neuruppin).

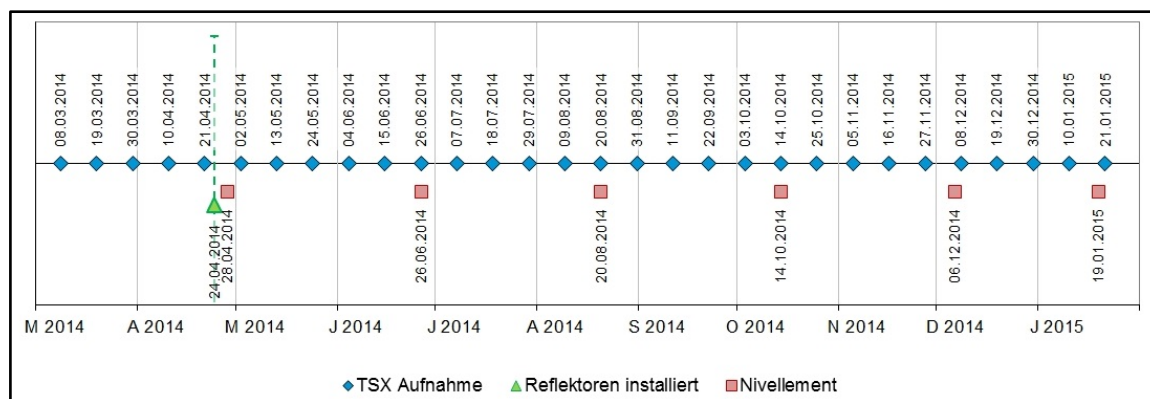


Bild 16: Zeitpunkte der TerraSAR-X Aufnahmen und der terrestrischen Nivellementmessungen für das Testgebiet 3 (Überschüttungsdamm nordwestlich von Berne, Oldenburg).

Autobahn	Straßenbelag	Messpunkt (km)	MPD Hauptfahrstreifen ± Standardabweichung (mm)	MPD Standstreifen ± Standardabweichung (mm)	Typischer MPD (mm)
Testgebiet 1: Autobahnkreuze im Nordosten Hannovers					
A2	SMA 8	216,750 (Fahrtrichtung Ost)	0,39 ± 0,03	0,68 ± 0,08	0,8
	PA 11	217,000 (Fahrtrichtung Ost)	1,55 ± 0,28	1,88 ± 0,25	1,50
	PA 8	222,000 (Fahrtrichtung Ost)	1,29 ± 0,18	1,32 ± 0,15	1,24
A7	SMA 11				1,00
	Waschbeton	140,000 (Fahrtrichtung Nord)		0,50 ± 0,05	0,66
	Grindingbeton	152,000 (Fahrtrichtung Nord)		0,38 ± 0,07 längs Fahrtr. 0,77 ± 0,05 quer Fahrtr.	0,46
A37(B3)	SMA 11				1,00
Testgebiet 2: Autobahn A24 bei Neuruppin					
A24 Fahrtrichtung Süd	TF1 - SMA 11				1,00
	TF2 - SMA 8				0,80
	TF3-6 - PA 8				1,24
	TF7-8 - SMA 11				1,00
A24 Fahrtrichtung Nord	TF9 - SMA 11				1,00
	TF10-11 - PA 8				1,24
	TF12-15 - PA 8	207,860		1,52 ± 0,11	1,24
	TF16 - SMA 11	207,350		1,23 ± 0,60	1,00
	TF17-18 PMA 5 Granodiorit	207,000		0,61 ± 0,10	0,67
	TF19 - PMA 5 Eolit	206,250		0,65 ± 0,03	0,67

Tab. 8: Mean Profile Depth (MPD) Rauigkeitsmessungen auf Hauptfahrstreifen und Standstreifen der Testgebiete 1 und 2 mit den jeweiligen Standardabweichungen und typischen MPD-Werten.

Zur Validierung der satellitengestützten Bewegungsmessungen wurden von der NLStBV-rGB OI jeweils zeitgleich terrestrische Messungen durchgeführt. Die Position der Reflektoren wurde von Mai 2014 bis Januar 2015 insgesamt sechsmal vermessen. Die einzelnen Messzeitpunkte sind Bild 16 zu entnehmen.

4.2 Texturdaten

Von der Ruhr Universität Bochum, Lehrstuhl für Verkehrswegebau wurden am 06.05.2014 und am 05.06.2014 auf ausgewählten Abschnitten in den Testgebieten 1 und 2 Texturmessungen durchgeführt. Hierzu wurde das Texturmessgerät MicroCAD Pico der Firma GF Messtechnik GmbH verwendet, welches auf dem Prinzip der Streifenlichtprojektion basiert. Die Ergebnisse der Messungen über den einzelnen Belägen sind in Tab. 8 zusammengefasst. Die Messungen fanden auf den Standstreifen und teilweise auch auf den Hauptfahrstreifen statt.

Generell lassen sich gemäß (RADENBERG, 2014) folgende Prinzipien ableiten:

- 1) Bei gleicher Asphaltart steigt mit zunehmendem Größtkorn der MPD-Wert, also die Rauigkeit des Belags.
- 2) Zwischen verschiedenen Asphaltarten mit gleichem Größtkorn wird der MPD-Wert im Wesentlichen vom Mörtelanteil beeinflusst. Mit steigendem Mörtelanteil sinkt der MPD-Wert. So nimmt der MPD Wert von offenporigem Asphalt (PA) zu lärmoptimiertem Gussasphalt (PMA) bis hin zu Splittmastix-Asphalt (SMA) immer weiter ab.

Beim Asphalt und Waschbeton sind somit Größtkorn und Mörtelanteil die zwei dominierenden Faktoren bzgl. der Rauigkeit dieser Beläge.

Grindingbeton ist ein durch Oberflächenrillierung behandelte Beton. Mit der Oberflächenbehandlung des frischen Betons wird eine Verbesserung der Griffigkeit (Rillen quer zur Fahrtrichtung) bzw. der Längsebenheit und des Lärmschutzes (Rillen längs zur Fahrtrichtung) erreicht. Auf dem untersuchten Abschnitt der BAB A7 im Testgebiet 1 weist die Betonfahrbahn eine Oberflächenstrukturierung längs zur Fahrbahn auf (SCHMOLKE, 2014). Auf den gemessenen Oberflächen werden die Texturparameter hauptsächlich durch den Li-

nienabstand der Rillen und deren Tiefe bestimmt. Der MPD-Wert wurde daher längs und quer zur Rillenrichtung bzw. zur Fahrtrichtung ermittelt. Da TSX im aufsteigenden und absteigenden Orbit mit einem mittleren Azimut von 78° nahezu quer zur Fahrtrichtung blickt, wurde ein Texturwert neu ermittelt, der dieser Blickrichtungsabweichung Rechnung trägt ($0,72 \pm 0,05$ mm).

Anders als die Korngröße, hat die Art der Gesteinskörnung für alle Belagstypen keinen nennenswerten Einfluss auf den MPD-Wert (RADENBERG, 2014).

Bei den Untersuchungen fiel auf, dass sich für den untersuchten SMA auf der BAB A2 (Testgebiet 1) ein deutlicher Unterschied zwischen den MPD Messungen auf dem Hauptfahrstreifen und dem Standstreifen ergab. Die Verkehrsbelastung auf dem Hauptfahrstreifen verursacht eine Nachverdichtung und dadurch eine Materialumlagerung im Asphalt. Dadurch kann der MPD Wert erheblich reduziert werden. Im untersuchten Bereich der BAB A2 verringerte sich der MPD-Wert auf dem Hauptfahrstreifen im Vergleich zum unbelasteten Standstreifen um etwa 40%.

Die untersuchten Abschnitte des PA 11 (offenporiger Asphalt mit Größtkorn 11 mm) und des PA 8 (offenporiger Asphalt mit Größtkorn 8 mm) auf der BAB A2 zeigen im Standstreifen wegen der geringeren Befahrung deutliche Verschmutzung. Dennoch sind beim PA 8 kaum signifikante Unterschiede zwischen den MPD Messungen auf Hauptfahrstreifen und Standstreifen festzustellen ($1,29$ bzw. $1,32$ mm). Die Unterschiede beim PA 11 sind gemäß (RADENBERG, 2014) nicht auf eine Verschmutzung im Standstreifen zurückzuführen (Hauptfahrstreifen $1,55$ mm, Standstreifen $1,88$ mm). Diese würde den MPD-Wert normalerweise senken, nicht erhöhen. Der PA 11 hat typischerweise einen MPD-Wert um $1,5$ mm. Gemäß der Angaben der NLStBV liegt auf dem Standstreifen aber auch ein PA 11 vor. Daher wird vermutet, dass die Differenzen in der gemessenen Rauigkeit ihre Ursache in der unterschiedlichen Materialzusammensetzung des Asphaltmischgutes beim Bau der verschiedenen Abschnitte zu unterschiedlichen Zeitpunkten hat.

Zur weiteren Analyse der ermittelten Daten rät (RADENBERG, 2014) für alle untersuchten Belagsarten die gemessenen MPD-Werte der Standstreifen zu nutzen. Die MPD-Werte der der Hauptfahrstreifen für Bereiche, in denen keine Messungen vorliegen müssten berechnet werden. Es wurde entschieden, für die weitere Analyse nur die MPD-Werte der Standstreifen zu nutzen.

Die Genauigkeit der MPD Messungen wurde durch die Standardabweichung geschätzt. Hohe Schwankungen wurden auf der A24 beim SMA 11 und auf der A2 beim PA 11 festgestellt. Da das 40 mm x 30 mm große Textur-Messfeld empfindlich auf Körner oder Poren von bereits 11 mm Durchmesser reagiert, ist eine erhöhte Standardabweichung bei Belägen mit hohem Größtkornwert (SMA 11) oder hoher Offenporigkeit (PA 11) zu erwarten (RADENBERG, 2014).

Der PA 8 auf der A24 zeigte ursprünglich eine hohe Standardabweichung ($1,88 \pm 0,59$ mm) aufgrund von anzunehmenden Mischgutfehlern (RADENBERG, 2014). Zwei Ausreißer der sechs Messungen der Messreihe für letzteren Belag wurden deshalb eliminiert.

Zusammenfassend konnten die typischen MPD-Messwerte für verschiedene Beläge bestätigt werden. Für die folgende Analyse sind aber folgende Fehlerquellen zu berücksichtigen:

- 1) Ungenauigkeit der MPD Messtechnik bei Belägen mit hohem Größtkornwert oder hoher Offenporigkeit,
- 2) Unterschiedliche Rauigkeit von Hauptfahrstreifen und Standstreifen, zumindest bei SMA Belägen,
- 3) Unterschiedliche Materialzusammensetzungen eines Belagtyps führen zu unterschiedlichen Rauigkeiten.

4.3 Nivellement Daten

Die Pegelreflektoren von Testgebiet 3 wurden von der Niedersächsischen Landesbehörde für Straßenbau und Verkehr, regionaler Geschäftsbereich Oldenburg (NLStBV-rGB Ol) in regelmäßigen Abständen terrestrisch per Nivellement vermessen, um eine unabhängige Kontrolle der Bewegungsmessungen per Satellit zu liefern. Bild 16 zeigt die Zeitpunkte der Nivellementmessung.

Hierbei wählte man immer denselben Punkt auf der Metallscheibe des Pegelreflektors im Bereich des Übergangs von Metallplatte zu Zylinderaufsatz. Zum Einloten und Halten der Nivellementslatte mussten die Vermesser die Metallscheibe des Pegelreflektors betreten. Da jedoch die Platten auf ebenen Untergrund installiert wurden, konnte eine Höhenänderung oder Schiefstellung der Platten durch das Betreten der Platten ausgeschlossen werden.

Als An- und Abschlusspunkte für das Nivellement dienten Höhenfestpunkte der Straßenbauverwaltung mit Höhenbezug Normalhöhennull (NHN). Gleichzeitig wurden auch die bei den Pegelreflek-

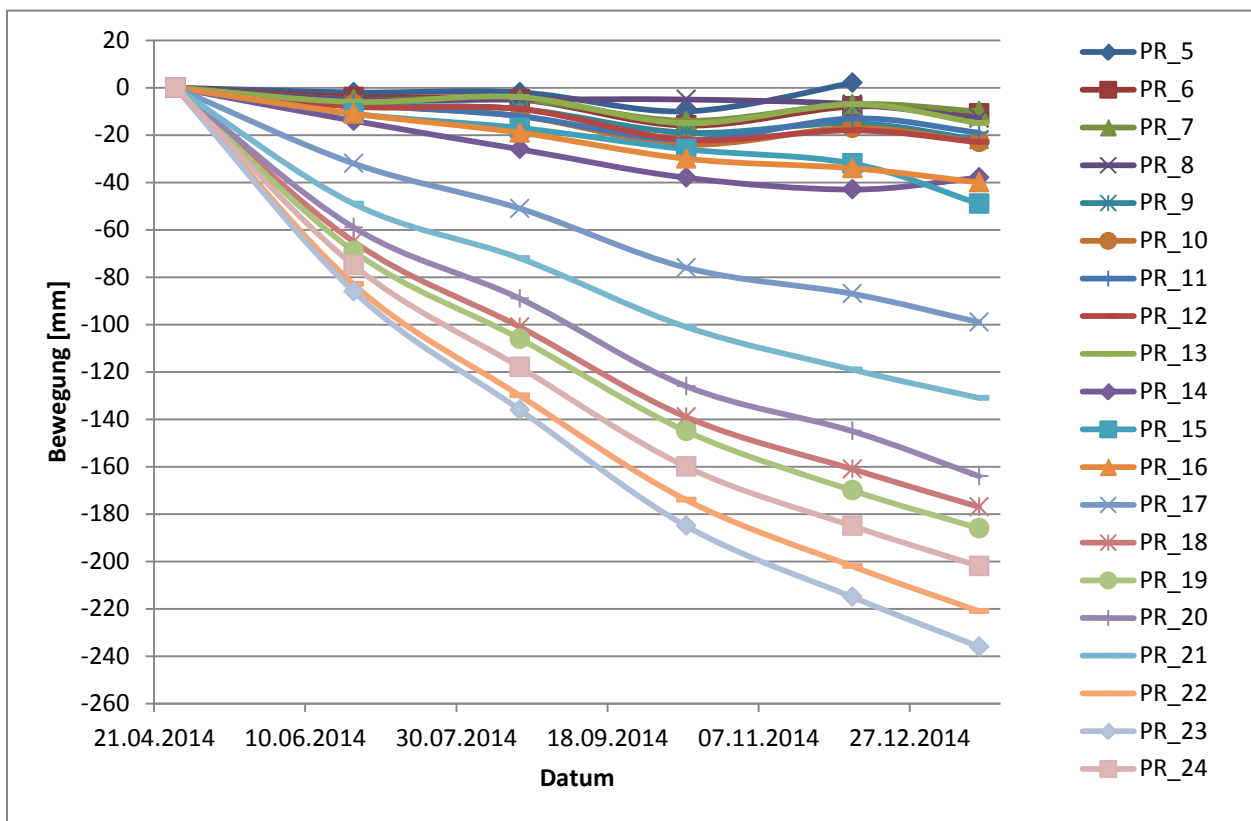
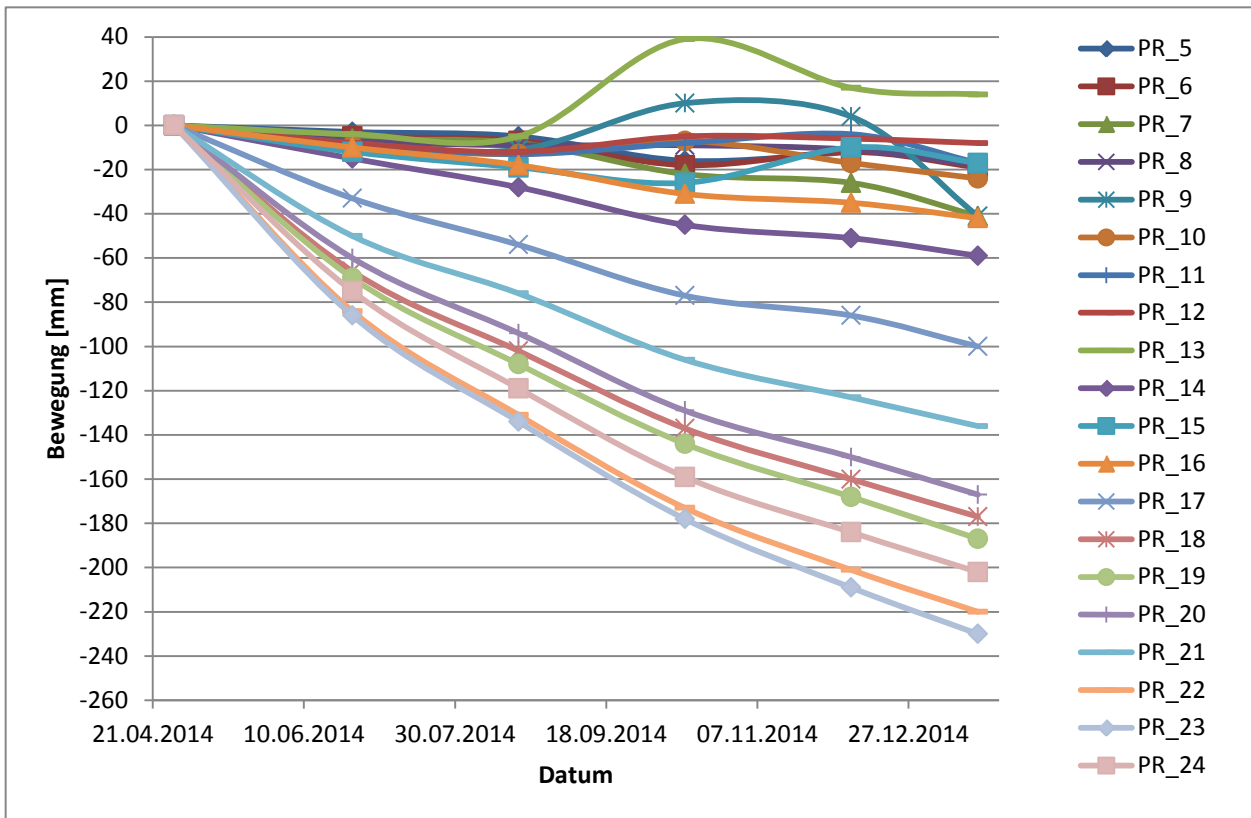


Bild 17: Relative Bewegungs-Zeitreihen abgeleitet von den Nivellementmessungen der Pegelreflektoren (oben) und der zugehörigen Pegelstangen (unten). Quelle: NLStBV-rGB OI.

toren befindlichen Setzungspegel des Schüttdammes (an Oberkante Rohr) gemessen.

Die Ergebnisse der Nivellementmessung der Pegelreflektoren und zugehöriger Pegelstangen sind in Bild 17 dargestellt. Hieraus ist erkennbar, dass sich die Pegelreflektoren im Westen des Damms durchschnittlich mit etwa 2 cm im Messzeitraum absenken, die Pegelreflektoren im Osten mit etwa 19 cm.

Die Bewegungen der Pegelreflektoren und zugehörigen Pegelstangen unterscheiden sich bei einigen Reflektoren stark voneinander. Die Abweichungen zwischen Pegelstangen- und Pegelreflektor-Bewegungen wurde mit dem QMW quantifiziert und zeigen im Bereich der Reflektoren PR_5 bis PR_15 die höchsten Werte (im Mittel etwa 12 mm), aber erst zum Messzeitpunkt 14.10.2014.

Der Grund für diese Abweichungen liegt gemäß der NLStBV-rGB OI hauptsächlich in dem Rückbau des Schüttdammes und den damit verbundenen Sandabtransporten und dem Befahren des Damms mit Baumaschinen zwischen dem 20.8.2014 und 14.10.2014. Dies betraf den Bereich um die Reflektoren PR_5 bis PR_15. Durch diese Aktivitäten wurden die Reflektoren zum Teil verschüttet, schief gestellt oder in ihrer Höhe verändert. Somit traten Unterschiede in den Nivellementmessungen der Pegelstangen und der Pegelreflektoren auf. Pegelreflektor PR_5 wurde vor dem 19.01.2015 aufgrund eines unbekanntes Ereignisses so stark in seiner Lage verändert, dass die zugehörige Messreihe durch die NLStBV-rGB OI nicht mehr fortgeführt werden konnte.

Die anderen Pegelreflektoren PR_16 bis PR_24 zeigen im Mittel zirka 2 mm Abweichung zwischen den Nivellementmessungen der Pegelreflektoren und denen der zugehörigen Pegelstange. Diese Größenordnung entspricht etwa der Messgenauigkeit des angewandten Ingenieurnivellements.

5 Ergebnisse und Analyse

Zur Untersuchung der optimalen Aufnahmegeometrie wurden in einem ersten Schritt die aus der Literatur bekannten Zusammenhänge (siehe Kapitel 2.2) untersucht. Danach wurde die Messpixeldichte für jeden Belag und die jeweilige Aufnahmegeometrie abgeschätzt.

5.1 Rückstreuung der Straßenbeläge

Die empirische Formel von (FARR, 1993) weist daraufhin, dass die Rückstreuung eines Straßenbelags mit seiner Rauigkeit ansteigt.

Das gemittelte Amplitudenbild der Satellitendaten (von trockenen Straßenoberflächen) einer Aufnahmegeometrie wurde in ein geokodiertes Reflexionsbild in Dezibel (dB) umgewandelt, wobei eine durchschnittliche Kalibrierungskorrektur angewandt wurde. Durch die zeitliche Mittelwertbildung wurde das Radarrauschen („Speckle“) erheblich reduziert.

Die einzelnen Straßenbeläge wurden dann händisch für das Reflexionsbild kartiert. Dieser Schritt war notwendig für jede Aufnahmegeometrie, da die in Abschnitt 2.3.4 beschriebenen Störeinflüsse sich je nach Blickrichtung und Einfallswinkel anders darstellten. Ziel war es, dass die Polygone für die Straßenbeläge keine Störeinflüsse enthalten.

Über die kartierten Polygone konnte dann ein mittlerer Reflexionswert in dB für jeden Straßenbelag und jede Aufnahmegeometrie extrahiert werden (siehe Tab. 9). Es ist nicht auszuschließen, dass die Störeinflüsse vollständig vom Analysten erkannt und eliminiert wurden. Deshalb ist auch in Tab. 9 die Standardabweichung als ein Maß der Genauigkeit angegeben.

Bild 18 und Bild 19 zeigen jeweils ein Punktdiagramm für Testgebiet 1 bzw. 2, bei dem die MPD-Werte gegen die Reflexionswerte des entsprechenden Straßenbelags geplottet sind (für alle Aufnahmegeometrien).

Aus den Diagrammen sind folgende Tendenzen erkennbar:

- 1) Je höher der MPD-Wert (Rauigkeit), desto höher der Rückstreuwert.
- 2) Je steiler (kleiner) der Einfallswinkel, desto höher ist die Reflexion. So gibt ein 22° flacherer Einfallswinkel bei einer Rauigkeit von 1,5 mm eine um etwa 2 dB verringerte Reflexion (siehe Bild 19). Für das Testgebiet Hannover liegen für unterschiedliche Einfallswinkel bei den weniger rauen Belägen geringere Unterschiede zwischen den Rückstreuungen der einzelnen Beläge vor.
- 3) Es gibt keine signifikanten Unterschiede zwischen Aufnahmen des aufsteigenden und denen des absteigenden Orbits. Dies liegt zum einen an der richtungs-unabhängigen Rückstreuungseigenschaft der Straßenbeläge (außer eventuell Grindingbeton) und zum anderen an der geringen Längs- und Querneigungen der Fahrbahnen innerhalb der Testgebiete.

Autobahn	Straßenbelag	Mittlerer Reflexionswert \pm Standardabweichung (dB)				Messpixeldichte (Pixel / ha)			
Testgebiet 1: Autobahnkreuze im Nordosten Hannovers									
		H_A_20	H_A_53	H_D_31	H_D_51	H_A_20	H_A_53	H_D_31	H_D_51
A2	SMA 8	-13,3 \pm 2,8	-14,2 \pm 2,2	-14,9 \pm 2,5	-14,7 \pm 2,1	980	142	2372	2541
	PA 11	-7,9 \pm 3,2	-11,9 \pm 2,6	-10,2 \pm 3,3	-12,3 \pm 2,5	2786	1339	5543	5726
	PA 8			-11,5 \pm 2,7				2561	
A7	SMA 11	-10,4 \pm 3,2	-13,5 \pm 2,5	-12,6 \pm 3,1	-13,9 \pm 2,3	2264	931	5575	5093
	Waschbeton	-16,8 \pm 2,2	-15,2 \pm 2,2	-18,1 \pm 1,8	-15,9 \pm 1,9	420	59	448	1589
	Grindingbeton	-15,7 \pm 2,3	-14,9 \pm 2,2	-16,4 \pm 2,2	-15,6 \pm 2,0	259	62	365	1695
A37(B3)	SMA 11	-13 \pm 2,9	-14,2 \pm 2,3	-14,9 \pm 2,7	-14,5 \pm 2,2	1160	181	2002	2257
Testgebiet 2: Autobahn A24 bei Neuruppin									
		N_A_26	N_A_49	N_D_27	N_D_49	N_A_26	N_A_49	N_D_27	N_D_49
A24 Fahr- richtung Süd	TF1 - SMA 11	-14,7 \pm 2,7	-15,8 \pm 2,0	-14,9 \pm 2,7	-16 \pm 2,3	2573	765	5364	1088
	TF2 - SMA 8	-13,2 \pm 2,9	-15 \pm 2,2	-14 \pm 2,8	-15,2 \pm 2,4	2680	1280	4862	1612
	TF3-6 - PA 8	-12,4 \pm 3,3	-14,6 \pm 2,4	-13,6 \pm 3,3	-15,1 \pm 2,5	6394	3636	8213	3477
	TF7-8 - SMA 11	-14,0 \pm 2,8	-15,4 \pm 2,1	-14,4 \pm 3,0	-15,8 \pm 2,4	5096	1440	5893	1533
A24 Fahr- richtung Nord	TF9 - SMA 11	-14,7 \pm 2,8	-16 \pm 2,0	-14,8 \pm 2,8	-15,9 \pm 2,3	4359	721	5812	1385
	TF10-11 - PA 8	-12,0 \pm 3,5	-14,8 \pm 2,4	-12,8 \pm 3,4	-14,7 \pm 2,6	6731	3500	7136	3778
	TF12-15 - PA 8	-12,8 \pm 3,2	-14,7 \pm 2,4	-12,8 \pm 3,4	-14,6 \pm 2,6	7088	3480	7924	3876
	TF16 - SMA 11	-14,8 \pm 2,8	-16 \pm 2,0	-14,7 \pm 2,8	-15,8 \pm 2,3	3515	709	5563	1579
	TF17-18 PMA 5 Granodiorit	-16,2 \pm 2,3	-16,6 \pm 1,9	-15,9 \pm 2,5	-16,5 \pm 2,1	1423	191	3210	420
	TF19 - PMA 5 Eolit		-16,4 \pm 1,9	-15,7 \pm 2,6	-16,3 \pm 2,3		288	2964	435

Tab. 9: Mittlerer Reflexionswert mit Standardabweichung (dB) und Messpixel-pixeldichte (Pixel / ha) für die Straßenbeläge in Testgebieten 1 und 2 und den spezifischen Aufnahmegeometrien (H_ Hannover, N_ Neuruppin, _A_ Ascending = aufsteigender Orbit, _D_ Descending = absteigender Orbit, _XX = XX° Einfallswinkel).

Die nicht vorhandene Rüttelstreifenmarkierung im Testgebiet 2 auf den Testfeldern 10 und 11 (A24 Fahrtrichtung Nord, PA 8) zeigt keine signifikanten Reflexionsunterschiede zu den Testfeldern 12 bis 15 (PA 8) mit Rüttelstreifen (siehe Tab. 9). Ebenso insignifikant sind die gemessenen Reflexionswerte der untersuchten Beläge mit unterschiedlichen Arten von grober Gesteinskörnung, wie z.B. Granodiorit (Testfelder 17-18, mit PMA 5) und Eolit (Testfeld 19, mit PMA 5).

5.2 Potentielle Messpixeldichte von Straßenbelägen

Die Abschätzung der potentiellen Messpixeldichte auf den verschiedenen Straßenbelägen erfolgte gemäß der in Abschnitt 2.3.3 beschriebenen Vorgehensweise.

Die Kohärenz-Berechnung wurde mittels der IPTA Software vorgenommen.

Messpixel wurden als qualitativ akzeptabel eingestuft, wenn ihr Kohärenzwert einen bestimmten Schwellenwert überschritten hat. In dieser Studie wurde der Schwellenwert 0,5 stellvertretend für noch akzeptable Messpixel benutzt.

Es wurden für alle möglichen Bildpaare Kohärenzkarten berechnet und aufgrund der Schwellwertbildung (Kohärenz größer gleich 0,5) Karten mit möglichen Messpixeln erstellt. Aus den letzteren Messpixel-Karten wurde eine Schnittmenge gebildet, um zeitlich stark instabile Messpixel auszuschließen. Hierbei wurden nur solche Messpixel-Kandidaten weiter verwendet, die auf 90% aller Bildpaar-Kohärenzkarten vorhanden waren.

Der Schwellenwert 90% bei der Schnittmengenbildung soll erlauben, dass sich die Reflexionseigenschaft eines Straßenbelag-Messpixels für 10% der

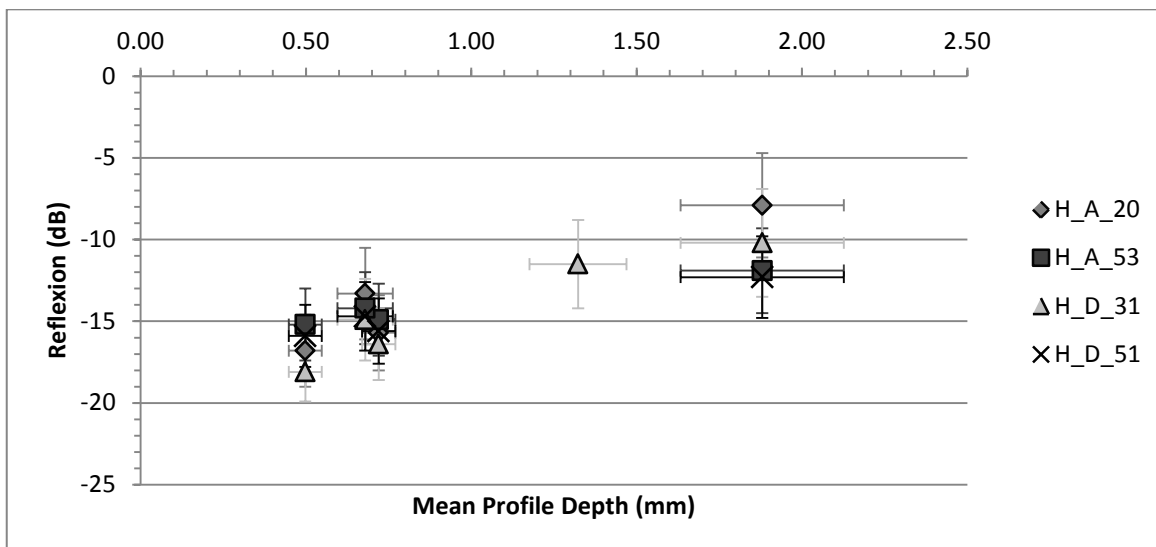


Bild 18: Mean Profile Depth (mm) versus Reflexion (dB) mit Fehlerindikatoren für Testgebiet 1 (Autobahnkreuze im Nordosten Hannovers) und entsprechende Aufnahmegeometrien (H_ Hannover, _A_ Ascending = aufsteigender Orbit, _D_ Descending = absteigender Orbit, _XX = XX° Einfallswinkel).

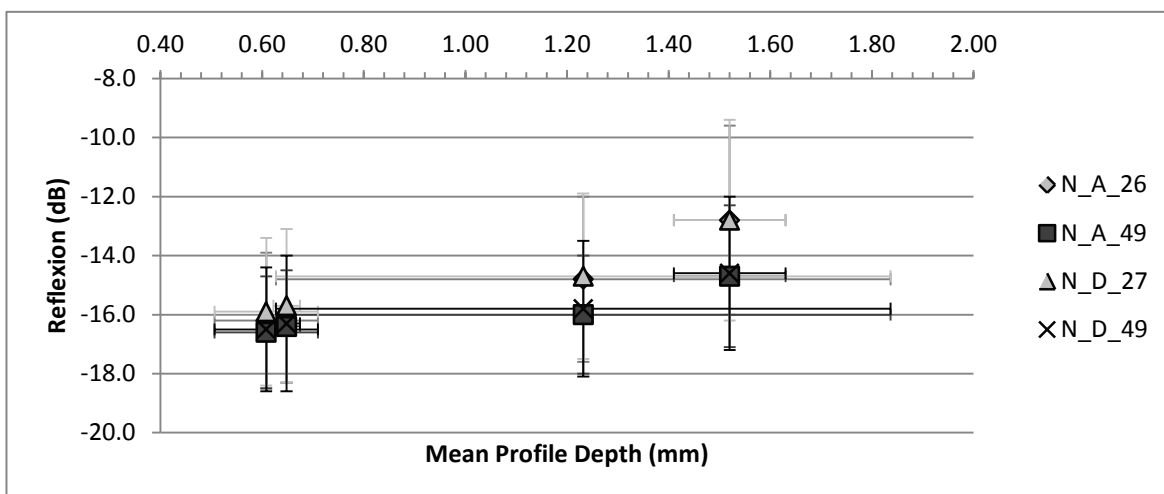


Bild 19: Mean Profile Depth (mm) versus Reflexion (dB) mit Fehlerindikatoren für Testgebiet 2 (Autobahn A24 bei Neuruppin) und entsprechende Aufnahmegeometrien (N_ Neuruppin, _A_ Ascending = aufsteigender Orbit, _D_ Descending = absteigender Orbit, _XX = XX° Einfallswinkel).

Aufnahmen ändern darf, z.B. durch ein Fahrzeug auf der Fahrbahn, es aber weiterhin als Messpixel gelten darf. Auf ähnliche Weise ignoriert die Zeitserienanalyse SBAS aus einer Vielzahl von Überbestimmungen die Bildpaare mit den geringsten Kohärenzwerten für ein spezifisches Messpixel. Der Schnittmengen-Schwellwert 90% wurde durch die Kalibrierung mit einer SBAS Zeitserienanalyse über dem Testgebiet Hannover (aufsteigender Orbit mit Einfallswinkel 53°) hergeleitet und mit zwei weiteren SBAS Ergebnissen validiert (Hannover

aufsteigender Orbit mit Einfallswinkel 20°, und Neuruppin aufsteigender Orbit mit Einfallswinkel 49°).

Die berechnete Messpixeldichte (in Pixel pro Hektar) ist in Tab. 9 aufgeführt. Bild 20 dient zur Veranschaulichung der unterschiedlichen Messpixeldichte von SMA 11 und Grindingbeton.

Anstelle einen direkten Zusammenhang zwischen der Rauigkeit der Straßenbeläge (MPD-Wert) und der jeweiligen Messpixeldichte herzustellen, wird dieser indirekt über die Reflexion abgeleitet. Der Vorteil hierbei ist, dass bei einer Untersuchung der Messpixeldichte in Abhängigkeit von der Reflexion

eines Straßenbelages eine größere Anzahl von Messpixeln verfügbar ist. Der MPD-Wert wurde nur auf einer Auswahl von Straßenbelägen gemessen (siehe Tab. 8).



Bild 20: Links Messpixeldichte auf der Autobahn A7 südlich Autobahnkreuz Hannover Ost (aufsteigender Orbit, Einfallswinkel 53,81°) © DLR e.V. 2014 und © Airbus DS Geo GmbH 2014. Deutliche Unterschiede sind zwischen dem SMA 11 auf Brücken und dem Grindingbeton (wenig Punkte) erkennbar. Diese unterschiedlichen Straßenbeläge sind auch im Luftbild (© Google Earth 2014) rechts sichtbar.

Bild 21 und Bild 22 stellen die Abhängigkeit zwischen der Reflexion und der Messpixeldichte für Testgebiet 1 bzw. 2 dar.

Es ist zu erwarten, dass bei steigender Reflexion sich die Messpixeldichte erhöht. Die Untersuchungen für das Testgebiet 1 stützt diese These nicht unmittelbar: die auf Bild 21 sichtbare Regressionsgerade hat ein Bestimmtheitsmaß R^2 von nur 0,27. Es ist aber generell der oben genannte Trend erkennbar. Für das Testgebiet 2 (siehe Bild 22) zeigt sich hingegen für obige Relation und die Regressionsgerade ein Bestimmtheitsmaß R^2 von 0,77. Hier besteht also ein 77%iger linearer Zusammenhang zwischen der gemessenen Reflexion des Straßenbelags und der Messpixeldichte.

Der schwächere lineare Zusammenhang bei Testgebiet 1 kann als Ursache die unvollständige Elimination der Störeinflüsse (z.B. durch Bäume) bei der Belagskartierung haben.

Da sich mit ansteigender Rauigkeit (MPD-Werten) die Reflexion erhöht und zunehmende Reflexionswerte zu einer Erhöhung der Messpixeldichte führen, kann abgeleitet werden, dass sich die Messpixeldichte mit ansteigender Rauigkeit (MPD-Werten) erhöht.

Bei der Erstellung der Diagramme (Bild 21 und Bild 22) wurden die Reflexion–Messpixeldichte Paare aller Aufnahmegeometrien aus Tab. 9 verwendet. Hierbei ist anzumerken, dass verschiedene Einfallswinkel unterschiedlich große Pixel generieren.

Bild entfernt - Urheberrechte nicht geklärt

Somit entstehen bei einem großen, flachen Einfallswinkel Pixel mit einer feineren räumlichen Auflösung als bei kleinen, steilen Einfallswinkeln.

Allerdings ist die Reflexion bei flachen Winkeln am geringsten. Steile Winkel leiden an der groben räumlichen Auflösung (Mischpixel), liefern aber eine starke Reflexion des Straßenbelags (siehe Tab. 9).

Hieraus leitet sich ab, dass ein mittlerer Einfallswinkel von etwa 35° bis 40° wohl am geeignetsten für ein Bewegungsmonitoring von Straßenbauwerken ist. Dies ist in Tab. 9 direkt ablesbar: die nahezu mittleren Winkel 31° (für Testgebiet 1) und 27° (für Testgebiet 2) erzeugen für alle Beläge die größte Messpixeldichte.

Priorität	Straßenbelag	MPD-Wert (mm)	Eignungsklasse
1	PA 11	1,88	Geeignet
2	PA 8	1,32	Geeignet
3	SMA 11	1,23	Geeignet
4	SMA 8	0,68	Geeignet
5	PMA 5	0,61	Geeignet
6	Waschbeton	0,50	Weniger Geeignet
7	Grindingbeton	0,38 / 0,77	Weniger Geeignet

Tab. 10: Priorität der getesteten Straßenbeläge hinsichtlich deren Eignung für ein Bewegungsmonitoring mit TSX HS Daten für mittlere Einfallswinkel von 35°-40°.

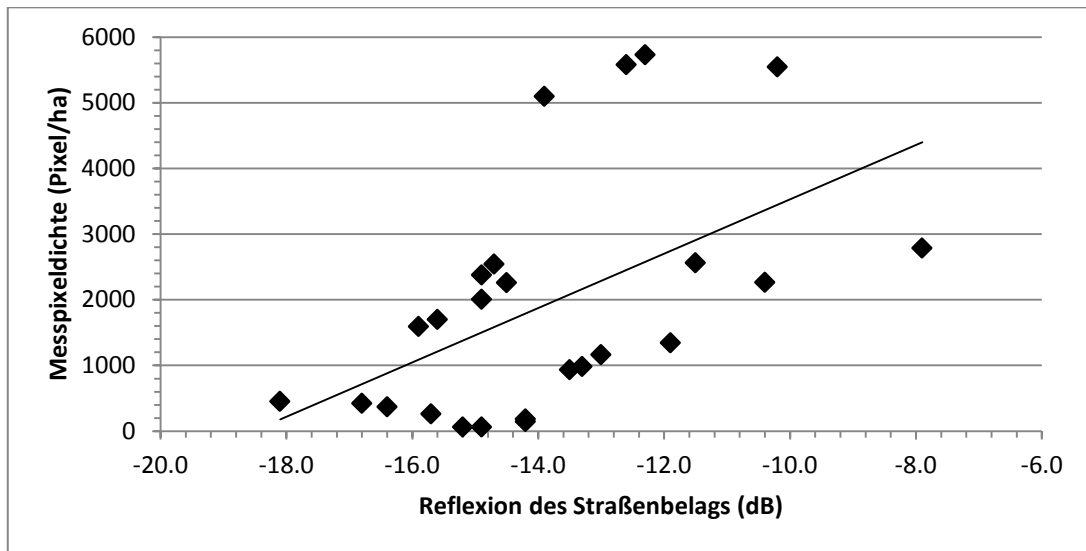


Bild 21: Messpixeldichte (Pixel / ha) versus Reflexion (dB) der Straßenbeläge für Testgebiet 1 (Autobahnkreuze Hannover Nordost). Die Regressionsgerade hat ein Bestimmtheitsmaß R^2 von 0,27.

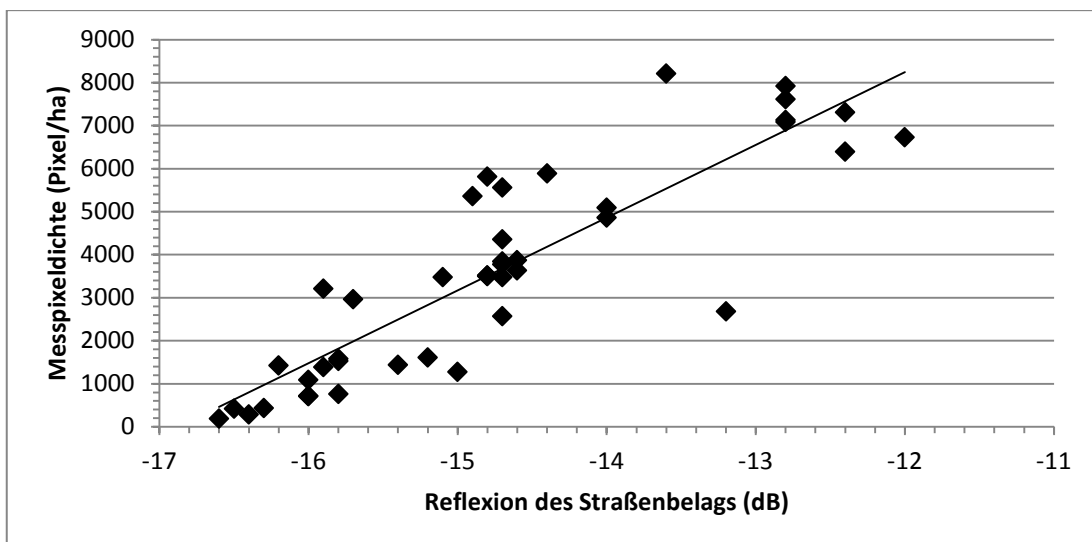


Bild 22: Messpixeldichte (Pixel / ha) versus Reflexion (dB) der Straßenbeläge für Testgebiet 2 (Autobahn A24 bei Neuruppin). Die Regressionsgerade hat ein Bestimmtheitsmaß R^2 von 0,77.

Bei der Beurteilung einer ausreichenden Messpunktdichte wurden die Beläge quantitativ anhand Tab. 9 und qualitativ anhand der Messpixelkarten (siehe z.B. Bild 20) beurteilt. Hierbei wurden die Beläge zur Bodenbewegungsbeobachtung priorisiert und bzgl. angenommener mittlerer Einfallswinkel hinsichtlich ihrer Eignung klassifiziert (siehe Tab. 10).

Aus der Eignungsanalyse geht hervor, dass ein MPD-Wert eines Straßenbelags von mindestens 0,4 notwendig ist, um für TSX HS Daten bei einem mittleren Einfallswinkel eine ausreichend große Anzahl an Messpixeln zu erzeugen. Die untersuchten Betonbeläge erwiesen sich für satellitengestützte Bewegungsmessungen als weniger gut ge-

eignet. Alle untersuchten Asphaltbeläge sind bei mittleren Einfallswinkeln für satellitengestützte Bewegungsmessungen geeignet.

5.3 Bewegungsmonitoring eines Überschüttdamms mittels Pegelreflektoren (Testgebiet 3)

Ein Teilziel des Forschungsprojektes war es, die Anwendung von Bewegungsmonitoring mittels Radarinterferometrie an Straßenbauwerken zu erproben. Dabei sollten die zu erwartenden Bewegung sowohl mit Radarinterferometrie, als auch mit terrestrischer Vermessung ermittelt und die Ergebnis-

se miteinander verglichen werden. Gewählt wurde hierfür ein nordwestlich von Berne bei Oldenburg gelegener Überschüttdamm (Testgebiet 3), der wegen der geringen Rückstreubeständigkeit seines Oberflächenmaterials mit künstlichen Pegelreflektoren versehen wurde (siehe Kapitel 3.3).

25 TerraSAR-X Szenen im hochauflösenden ST Modus wurden über den Pegelreflektoren des Testgebiets 3 im 11-Tage Rhythmus aufgenommen (siehe Kapitel 4.1). Ein Ausschnitt aus dem gemittelten Intensitätsbild ist in Bild 17 dargestellt. Im ersten Schritt der Analyse wurde die Sichtbarkeit der Reflektoren analysiert.

Die zeitliche Veränderung der Stärke des von den Reflektoren zum Satelliten zurückgeworfenen Signals kann als ein Maß der Sichtbarkeit der Reflektoren über den Messzeitraum hinweg gedeutet werden. Der genaue zeitliche Verlauf der Signale der Pegelreflektoren ist in Anlage 1 (Kapitel 10.1) dargestellt. Tab. 11 zeigt zusammenfassend den zeitlichen Mittelwert und die Standardabweichung der Amplitude des Rückstreusignals der einzelnen Pegelreflektoren. Die Größe der Standardabweichung um den zeitlichen Mittelwert ist ein Maß für die Beständigkeit der Reflektor-Rückstreuung.

Reflektor	Mittelwert (dB)	Standardabweichung (dB)	Anzahl der Ausfälle
PR_5	15.1	1.4	12
PR_6	15.1	0.8	0
PR_7	14.9	1.1	1
PR_8	15.1	0.5	2
PR_9	14.1	1.4	4
PR_10	14.7	0.7	1
PR_11	14.9	1.6	9
PR_12	15.3	1.4	1
PR_13	14.8	0.5	0
PR_14	12.3	1.5	7
PR_15	14.5	1.2	0
PR_16	15.0	0.4	0
PR_17	15.2	0.5	0
PR_18	14.5	0.5	0
PR_19	13.9	0.9	0
PR_20	13.3	1.7	0
PR_21	14.7	0.5	11
PR_22	14.9	0.6	0
PR_23	14.3	0.8	0
PR_24	14.6	1.1	0

Tab. 11: Zeitlicher Mittelwert und Standardabweichung der Stärke des Rückstreusignals der Pegelreflektoren (Ausfälle ausgenommen).

Die Stärke der Rückstreuung variierte bei allen Reflektoren über den Untersuchungszeitraum hinweg, unterschreitet allerdings in einigen Fällen den Wert +10 dB, welcher als unterer Schwellenwert für die vorliegende Umgebung gewählt wurde. Alle Signale, deren Stärke unterhalb dieses Schwellenwerts liegen, werden als zu schwach und deshalb als ‚Ausfall‘ klassifiziert (siehe Tab. 11) und von weiterführender Analyse ausgeschlossen.

Für die Umgebung der Pegelreflektoren wurde Gras angenommen, welches einen höheren Rückstreuwert hat als Sand: etwa -10 dB. Da ein Reflektor mindestens 100 Mal so stark reflektieren soll wie seine Umgebung (also einen um 20 dB größeren Rückstreuwert haben soll, wie in diesem Fall Gras), wurde der untere Schwellenwert auf +10 dB festgelegt.

Gründe für die Ausfälle der Reflektoren sind hauptsächlich in dem Rückbau des Schüttdammes und den damit verbundenen Sandtransporten zu suchen. Durch diese Aktivitäten wurden die Reflektoren zum Teil verschüttet, schief gestellt oder in ihrer Höhe verändert. Die Ausfälle fanden hauptsächlich bei den Reflektoren in dem von den Aktivitäten betroffenen Gebiet statt (PR_5 bis PR_15, siehe Tab. 11). Nach dem 22.09.2014 streute der Reflektor PR_21 nicht mehr ausreichend stark zum Satelliten zurück. Der Grund war wahrscheinlich der Verlust des Zylinders.

Werden die Ausfälle aus der Analyse herausgenommen, streuen alle Reflektoren mit Mittelwerten größer als +12 dB gemäß ihrem Design ausreichend stark (siehe Tab. 11).

Das vorliegende Design der Pegelreflektoren erwies sich somit generell als tauglich für den Einsatz auf einem Überschüttdamm, allerdings konnten die Metallscheiben leicht mit Sand zugeweht werden. Eine regelmäßige Kontrolle etwa alle sechs Wochen wie im vorliegenden Fall (zu den Zeitpunkten der Nivellementmessung) kann als ausreichend angesehen werden.

Für alle Reflektoren wurden Bewegungszeitserien mit der PSI Methode (siehe 2.1) erstellt. Hierzu wurde die südlich des Dammes gelegene Ortschaft Berne als Ort möglicher stabiler Referenzreflektoren mit in die Analyse einbezogen. Es wurden hierzu keine neuen Reflektoren aufgestellt, sondern die vorhandene, reflektierende Infrastruktur genutzt.

Bild 23 zeigt die Bewegungskarte für das Testgebiet 3 mit der durchschnittlichen jährlichen, vertikalen Bewegungsrate der Messpixel für den Zeitraum vom 02.05.2014 bis zum 21.01.2015. Die Bewegungen wurden in Blickrichtung des Satelliten

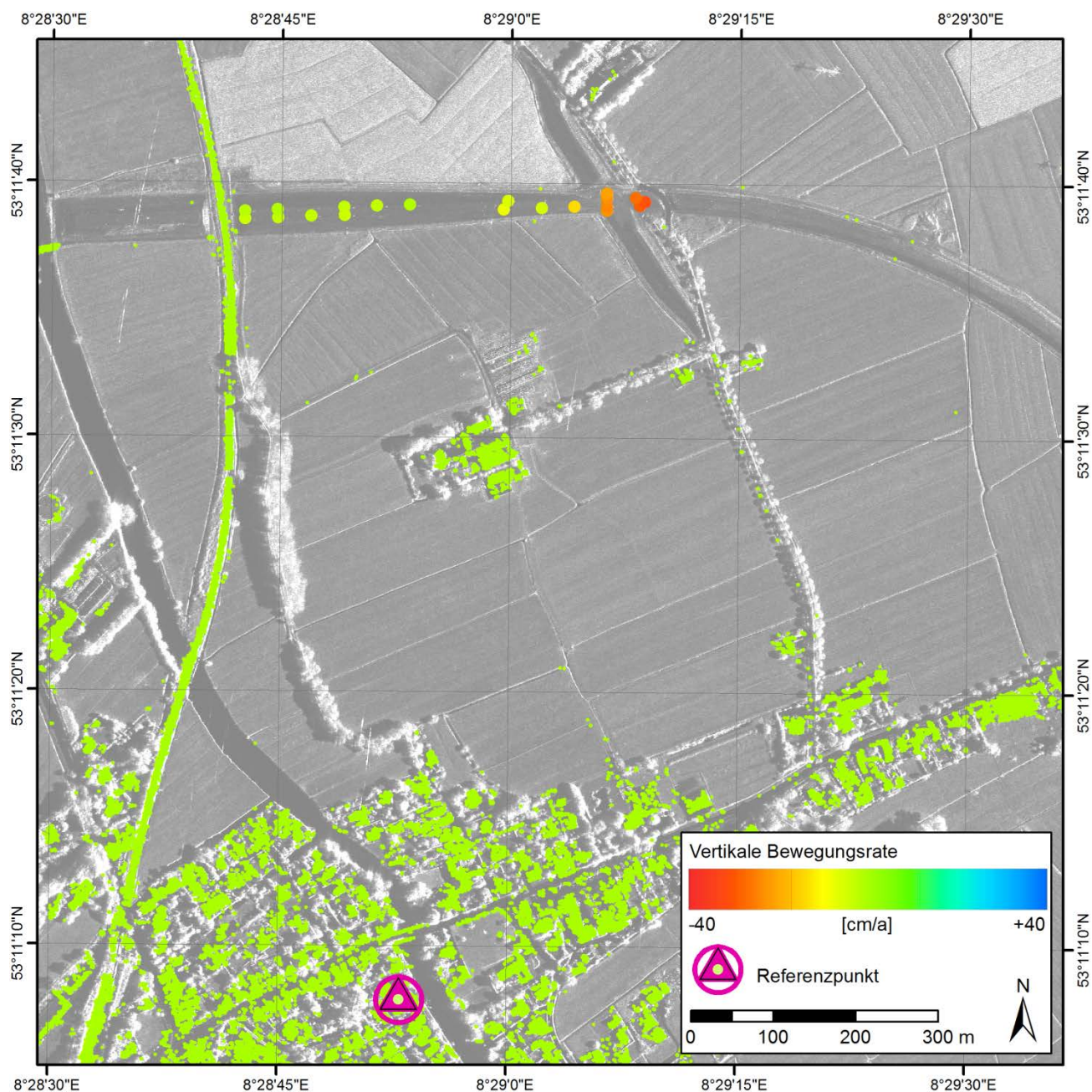


Bild 23: Bewegungskarte des Testgebiets 3 (Überschüttedamm bei Berne). Die durchschnittliche jährliche Bewegungsrate der Messpixel ist farbkodiert dargestellt (grün: stabil, rot: Absenkung, blau: Hebung). Hintergrund: gemittelttes TerraSAR-X Amplitudenbild. © DLR e.V. 2015 and © Airbus DS Geo GmbH 2015.

sensors gemessen und in die Vertikale projiziert, unter der Annahme, dass ausschließlich vertikale Bewegungen vorliegen. Die Karte zeigt alle signifikanten Absenkungsraten größer oder gleich 5 mm pro Jahr in Orange bis Rot.

Alle Bewegungen beziehen sich auf einen Referenzpunkt in Berne, der als bewegungslos angenommen wurde (Koordinaten siehe Tab. 12). Diese Annahme wurde dadurch bestätigt, dass sich die Messpixel innerhalb der Ortschaft im Mittel nicht bewegen (siehe Bild 23).

Geographische Breite [°]	Geographische Länge [°]	Höhe [m]
53,185524	8,481386	1,29

Tab. 12: Geographische Koordinaten in Dezimalgrad und Höhe in NHN des gewählten PSI Referenzpunktes.

Bild 24 zeigt eine Vergrößerung des Dammbereichs mit den Pegelreflektoren.

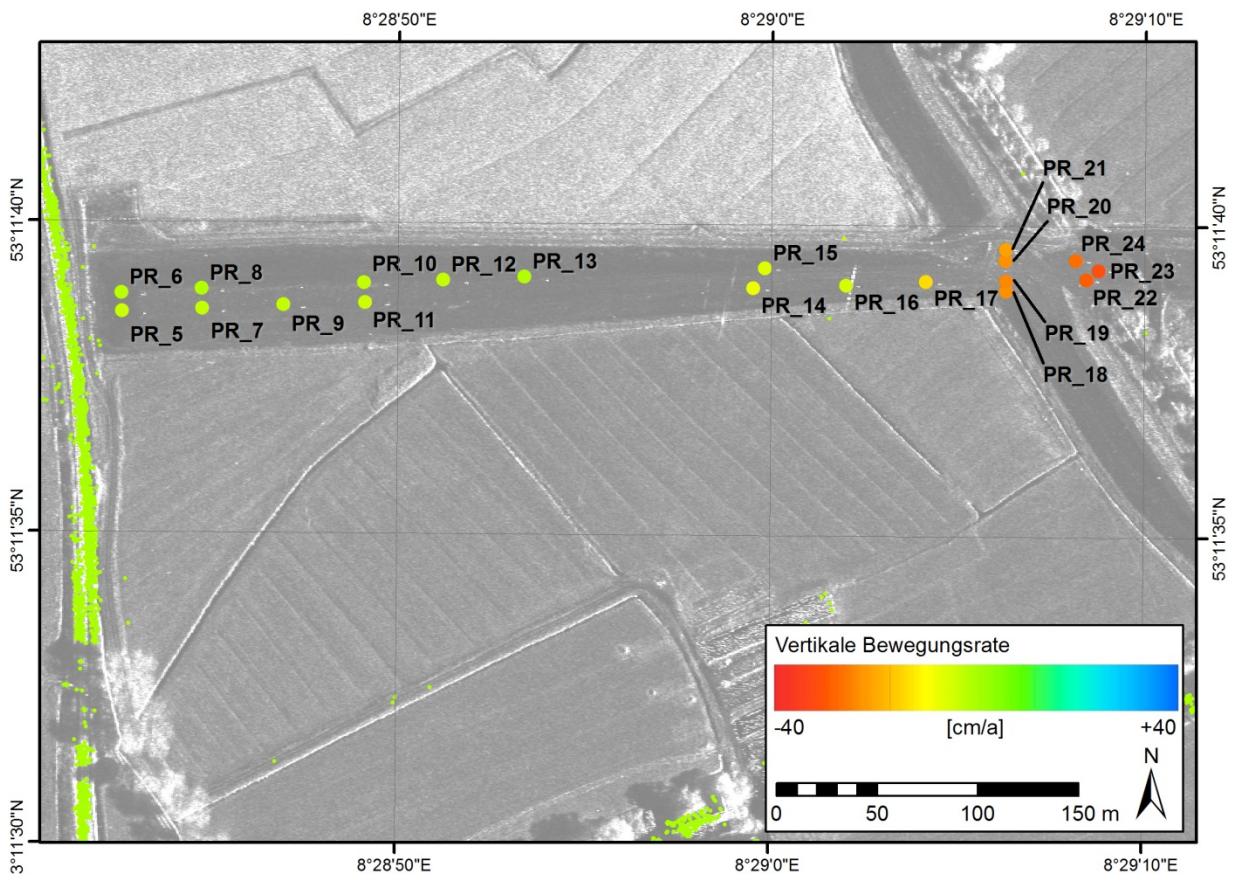


Bild 24: Zoom der Bewegungskarte des Testgebiets 3 in den Bereich des untersuchten Dammschnittes (Bild 23) © DLR e.V. 2015 and © Airbus DS Geo GmbH 2015.

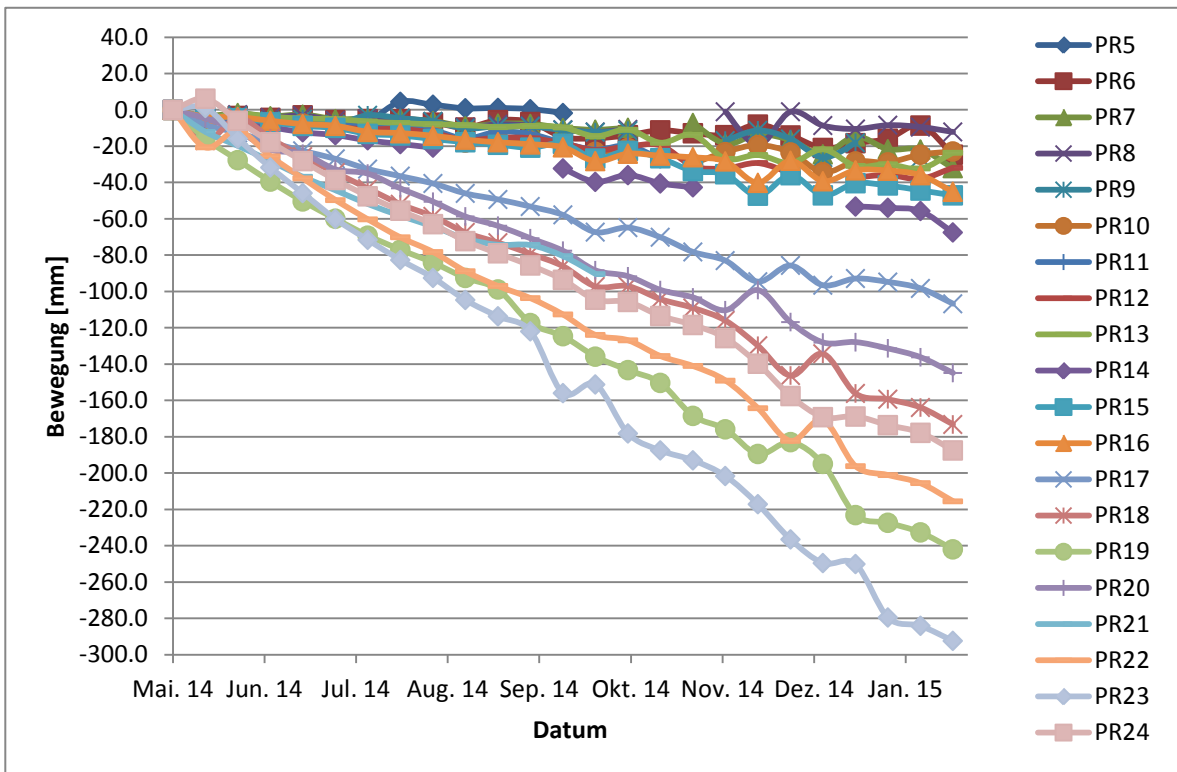


Bild 25: Zeitserie der Bewegung der Pegelreflektoren PR_5 bis PR_24 bzgl. des gewählten PSI Referenzpunktes.



Bild 26: Abgeleitete Bewegungskarte der satellitengestützten Messung für den Bereich des untersuchten Dammschnittes mit Linien gleicher Bewegungsrate (in cm pro Jahr.) © DLR e.V. 2015 and © Airbus DS Geo GmbH 2015.

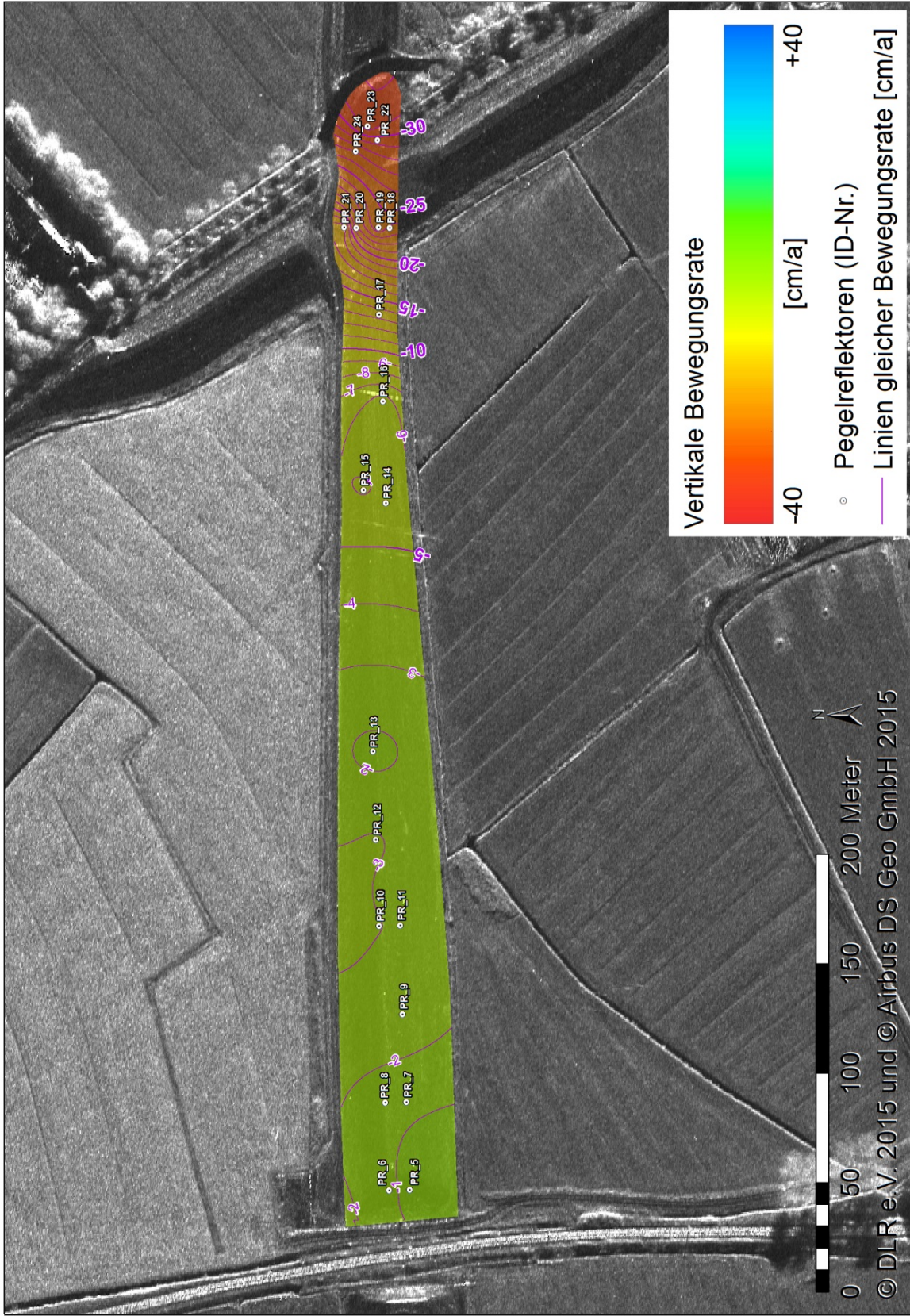


Bild 27: Abgeleitete Bewegungskarte der Nivellementmessungen für den Bereich des untersuchten Dammschnittes mit Linien gleicher Bewegungsrate (in cm pro Jahr). Hintergrundbild © DLR e.V. 2015, Distribution Airbus DS Geo GmbH, Nivellementdaten © NLSIBV-FGB OI 2015.

Bild 25 zeigt die per Satellit gemessene Bewegung der Pegelreflektoren PR_5 bis PR_24 gegen die Zeitachse. Bild 26 stellt eine interpolierte Bewegungskarte für den Bereich des gesamten untersuchten Dammabschnittes mit Linien gleicher Bewegungsrate dar.

Für jedes Messpixel wurde die Präzision der jährlichen Geschwindigkeit bestimmt. Generell kann für einen Zeitreihenpunkt eine theoretische Präzision von etwa 2 bis 4 mm angegeben werden (unter Benutzung von TerraSAR-X Daten). Die absolute Genauigkeit eines Messwertes innerhalb einer Zeitserie, d.h. der Unterschied zwischen Messergebnis und der Wahrheit, hängt von verschiedenen Parametern, wie z.B. Datenverfügbarkeit, Reflexionseigenschaft der Oberfläche eines Messpixels, zeitlich und räumliche Charakteristik des Bewegungsphänomens, gewählte Methode der Datenverarbeitung und gewählte Referenzpunkte ab. Die Genauigkeit kann nur im direkten Vergleich mit angenommenen wahren Werten, z.B. mit Ergebnissen von terrestrischem Nivellement wie in diesem Fall, bestimmt werden. Der Vergleich mit den Nivellementdaten wird in Abschnitt 5.4 durchgeführt.

5.4 Vergleich mit terrestrisch ermittelten Bewegungsdaten

Der Vergleich der satellitengestützten Bewegungsmessung mit den Nivellementdaten kann für Testgebiet 3 (siehe Abschnitt 5.3) qualitativ anhand der beiden abgeleiteten Bewegungskarten in Bild 26 (satellitengestützte Messung) und Bild 27 (Nivellement) durchgeführt werden. So scheinen die satellitengestützten Messungen die Bewegungen im östlichen Bereich des untersuchten Dammabschnittes mit bis zu 47 mm deutlich zu überschätzen.

In diesem Abschnitt soll die Genauigkeit der satellitengestützten Bewegungsmessung quantitativ bestimmt werden. Die terrestrischen Nivellementmessungen sollten hierzu als 'wahr' (also fehlerfrei) angenommen werden. Da die Reflexion am Pegelreflektor hauptsächlich durch die Reflektorscheibe und Zylinderaufsatz und nur zu einem geringen Anteil durch die Pegelstange entsteht, wäre die Nivellementmessung der Reflektorscheiben als Vergleichswert zur Genauigkeitsbestimmung zu nutzen.

Allerdings weichen die Nivellementmessungen zwischen den Reflektorplatten und zugehörigen Pegelstangen im Bereich PR_5 bis PR_15 signifikant voneinander ab (siehe 4.3), weshalb zusätz-

lich auch die Pegelstangenmessungen für die Genauigkeitsanalyse betrachtet werden.

Als Maß für die Genauigkeit wird der QMW der Differenzen zwischen den Absenkungen der Pegelreflektoren definiert, wie sie einerseits per Radarinterferometrie und andererseits per Nivellement hergeleitet wurden. Hierbei können die Absenkungswerte aus den unterschiedlichen Messverfahren direkt miteinander verglichen werden, da die terrestrische Messung in vier von sechs Fällen am selben Tag der Satellitenaufnahme stattfand. Nur am ersten und letzten Termin der Nivellementmessung gibt es einen Unterschied von vier bzw. zwei Tagen zum korrespondierenden Satellitenüberflug, welcher allerdings nur zu vernachlässigbar kleinen Abweichungen führt.

Da die per Radarinterferometrie bestimmten Messwerte ein gewisses Rauschen aufweisen, wurde zusätzlich ein linearer Trend über die Absenkungszeitreihen berechnet und die Differenz zu dem entsprechenden Trend der Nivellement-Zeitreihe als zweites Genauigkeitsmaß kalkuliert.

Tab. 13 zeigt die oben definierten Genauigkeitswerte für jeden Pegelreflektor, unter Benutzung der Nivellementmessungen von der Reflektorplatte und der Pegelstange.

ID	QMW (Platte) [mm]	QMW (Pegel) [mm]	Trend-Differenzen (Platte) [mm/Jahr]	Trend-Differenzen (Pegel) [mm/Jahr]
PR_5	4.9	3.8	37	15
PR_6	5.7	8.7	1	-8
PR_7	4.5	14.1	21	-20
PR_8	3.2	1.8	9	3
PR_9	17.5	6.5	-4	-2
PR_10	8.9	9.2	-10	-5
PR_11	11.0	3.0	-36	-24
PR_12	14.1	5.6	-46	-21
PR_13	35.2	8.1	-78	-26
PR_14	5.6	17.1	-2	-27
PR_15	21.4	6.9	-49	-5
PR_16	3.5	4.1	3	-1
PR_17	7.2	6.5	-11	-10
PR_18	26.7	27.0	-4	-3
PR_19	28.1	28.0	-79	-78
PR_20	26.5	23.2	22	17
PR_21	4.2	3.7	7	-5
PR_22	30.5	30.6	-2	0
PR_23	36.6	33.3	-113	-102
PR_24	33.0	33.1	-1	0

Tab. 13: QMW der Differenzen zwischen den per Satellit und Nivellement gemessenen Absenkungen der Pegelreflektoren, sowie die Differenzen im linearen Trend der Zeitreihen aus beiden Messverfahren (jeweils für Platten- und Pegel-Nivellement).

Das QMW-Genauigkeitsmaß erreicht für alle Pegelreflektoren durchschnittlich $1,6 \pm 1,2$ cm (Platte)

bzw. $1,4 \pm 1,1$ cm (Pegel). Der QMW für die Trend-Differenzen erreicht 4,2 cm/Jahr (Platte) bzw. 3,3 cm/Jahr (Pegel).

Aus Tab. 13 ist ersichtlich, dass für Reflektoren PR_5 bis PR_15 die QMW Werte sowie die Trend-Differenzen bzgl. der Platten- und Pegelmessungen signifikant voneinander abweichen. Dies ist ein weiteres Indiz dafür, dass die Reflektoren in diesem Bereich während des Rückbaus des Damms verändert wurden (Höhenversatz, Schiefstellung, Versandung der Reflektorplatten) und somit die Genauigkeitsanalyse für diese Reflektoren nicht belastbar ist.

Auffällig sind die Genauigkeitswerte der sich stark absenkenden Pegelreflektoren PR_18 bis PR_24 (ausgenommen PR_21): hohe QMW Werte von etwa $3,0 \pm 0,4$ cm und Trend-Differenzen bis zu 11 cm pro Jahr. Allen diesen Reflektoren ist gemeinsam, dass es im Bewegungszeitraum eine Höhenänderung gab, die größer war als sie für die Radarinterferometrie eindeutig erfassbar ist (siehe Kapitel 2.1). So verzeichneten die Pegelstangen dieser Pegelreflektoren bei der Nivellementmessung am 26.06.2014 für den Messzeitraum vom 28.04.2014 bis zum 26.06.2014 Senkungen von 5,9 bis 8,6 cm. Die durch Radarinterferometrie eindeutig ableitbare maximale vertikale Bewegungsrate liegt jedoch nur bei 6,0 cm für dieses Intervall: für jede der fünf TerraSAR-X Aufnahmen zwischen dem 28.04.2014 und dem 26.06.2014 sind etwa 12 mm vertikale Bewegung zur eindeutigen Bewegungsbestimmung zulässig. Trotz hoher QMW Werte, konnte dennoch der lineare Trend für die Reflektoren PR_18, PR_20, PR_22, und PR_24 gut bestimmt werden und deckt sich mit den Ergebnissen der terrestrischen Vermessung.

Weder von der Beeinflussung durch die Sandtransporte, noch von zu großen Absenkungen betroffen, stellen die Pegelreflektoren PR_16, PR_17 und PR_21 die zu erwartenden Genauigkeiten der Technik mit dem aktuellen Reflektordesign dar: die Bewegungsmessung eines Messpixels zu einem beliebigen Zeitpunkt hat eine Genauigkeit von etwa 5 mm, seine Bewegungsrate hingegen eine Genauigkeit von 8 mm pro Jahr.

Bei letzterer Betrachtung wurden die Nivellementmessungen als fehlerfrei angenommen, obwohl sie selbst mit einem Fehler von 1 bis 2 mm behaftet sind. Der Fehler der Nivellementmessung wächst mit der Länge des Nivellementzuges.

Die Ursachen für die obigen Ungenauigkeiten der satellitengestützten Bewegungsmessung lassen sich wie folgt zusammenfassen:

- 1) Methodenbedingt. Zur eindeutigen Bestimmung dürfen Bewegungen der Erdoberfläche zwischen zwei Satellitenaufnahmen nicht größer sein als ein Viertel der Wellenlänge des Sensors (TerraSAR-X Wellenlänge 3,1 cm). D.h. z.B. beim Gebrauch von TerraSAR-X Satellitendaten, dass sich der Boden innerhalb von 11 Tagen zwischen zwei Satelliten-Aufnahmen nicht mehr als etwa 7 mm in Blickrichtung des Satelliten bewegen darf. Durch eine Erhöhung der Aufnahmefrequenz oder die Wahl eines Sensors größerer Wellenlänge (z.B. C-Band im Wellenlängenbereich 3,75 bis 7,5 cm) bei gleichbleibender Aufnahmefrequenz könnten stärkere Senkungsbeträge eindeutig abgebildet werden.
- 2) Baustellenbedingt. Es wurde im Überwachungszeitraum bereits Sand vom Damm abgetragen. Durch die Arbeiten wurden die Reflektoren beeinträchtigt. Einige Reflektoren wurden verkippt oder verschüttet. Um die Reflektoren sollten daher in einem Sicherheitsabstand von zwei Metern keine Arbeiten stattfinden.

Ein Vergleich der Ergebnisse der satellitengestützten und terrestrischen Bewegungsmessung sollte neben einer Genauigkeitsanalyse auch die Kosten und die Vor- und Nachteile der einzelnen Methoden betrachten.

Generell hängen die Kosten einer satellitengestützten Bewegungsmessung von der Häufigkeit der Berichterstattung ab. Für das Testgebiet 3, dem Überschüttdamm bei Berne, ist diese Häufigkeit abhängig von der Höhe des Damms und der Stärke der damit verbundenen Setzungen. So ist kurz nach dem Sandauftrag mit hohen Setzungen zu rechnen und der Bedarf an einer regelmäßigen Berichterstattung hoch, z.B. jeden Monat. Dagegen reichen eine oder zwei Messungen pro Jahr um eventuelle Restsetzungen des Damms nach erfolgtem Sandabtrag zu überwachen. Eine Einschränkung der satellitengestützten Bewegungsmessung ist, dass erst ab etwa 16 Aufnahmen (bei einem 11-Tage-Intervall also nach etwa einem halben Jahr) millimeter-präzise Bewegungsinformationen ausgeliefert werden können. Das Verfahren eignet sich demnach hauptsächlich für die Überwachung der Restsetzungen eines Überschüttdamms. Nach den ersten sechs Monaten kann eine Berichterstattung dann aber monatlich erfolgen. Ein satellitengestütztes Monitoring des Überschüttdamms über sechs Monate im 11-Tage Aufnahmeintervall würde vom Programmbereich Geo-Intelligence von Airbus Defence and Space (Airbus DS) unter kommerziellen Bedingungen für ca. 22.000 € netto angeboten werden (unverbindliche Preisangabe, Stand Juli 2015, inklusive TerraSAR-

X Datenbestellung und –verarbeitung, exklusive TerraSAR-X Datenauslieferung). Jede weitere Untersuchung z.B. für die folgenden drei Monate mit jeweils acht Aufnahmen, beliefe sich auf etwa 14.000 € netto. Mit der Dauer eines Projekts und der Häufigkeit der Berichterstattung würde ein Preisnachlass von Airbus DS angeboten werden.

Die Kosten der terrestrischen Nivellementmessungen beliefen sich im vorliegenden Fall dagegen auf 390 € netto pro Messkampagne (Preisangabe NLStBV-rGB OI, Stand Juni 2015). D.h., die Kosten für 16 Messzeitpunkte (äquivalente Anzahl von Satellitenaufnahmen für einen sechsmonatigen Beobachtungszeitraum) würden 6.240 € netto betragen, und für acht Messzeitpunkte 3.120 € netto. Dabei können nach Angaben der NLStBV-rGB OI mit anderen, weniger genauen Höhenmessverfahren (z.B. mittels Tachymetern) und einer größeren Anzahl von Nivellementpunkten die Kosten pro Punkt reduziert werden.

Die obigen Kosten des Nivellements beziehen sich auf eine Höhenmessung von 20 Nivellementpunkten auf einem 500 m langen Dammabschnitt, die Kosten für die Satellitenmessung auf die Bewegungsmessung für ein Gebiet der Größe 4 km mal 3,7 km (siehe Bild 13). Eine Kosteneinsparung durch die Satellitenmessung wäre im obigen Beispiel erst dann gegeben, wenn der zu vermessende Dammabschnitt länger als 1800 m mit insgesamt über 70 Messpunkten gewesen wäre.

Das terrestrische Nivellement liefert hochgenaue und absolute Höhenmessungen, kann aber bei zunehmender Größe des zu überwachenden Gebietes und wachsender Häufigkeit der Messungen im Falle des Ingenieurnivellements kostenintensiv werden.

Kilometergroße Messgebiete können hingegen durch eine einzige Satellitenaufnahme abgedeckt werden, und dies mittlerweile mit einer feinen räumlichen Auflösung von weniger als einem Meter (z.B. TerraSAR-X ST Modus). Dadurch kann eine Vielzahl von möglichen Messpixeln auf kleinem Raum generiert werden.

Allerdings ist zu beachten, dass Messpixel für ein satellitengestütztes Bewegungsmonitoring nur für Erdbodenbedeckungen entstehen, welche unverändert und relativ stark zum Satelliten zurück reflektieren (siehe auch Kapitel 2.1). Mit Vegetation bedeckter Erdboden erzeugt kaum Messpixel, da sich sein Rückstreuverhalten aufgrund des Einflusses der Vegetationsperioden und des Windes ändert. D.h., über Äcker, Wiesen und Wälder werden deshalb nur eingeschränkt Messpixel erzeugt. Viele Messpixel werden z.B. in urbanem Gebiet vorge-

funden. Das zu untersuchende Gebiet muss vor jeder Bewegungsmessung von einem Experten hinsichtlich der möglichen resultierenden Messpixel dichte untersucht werden. Im Notfall müssen Reflektoren installiert werden, wie in dem Fall des Überschüttdamms.

Ein großer Vorteil des satellitengestützten Monitorings ist, dass es berührungslos und eventuell mit einem niedrigen Personaleinsatz vor Ort (nur bei der Wartung von Reflektoren) realisiert werden kann. Dies ist vor allem bei der Bewegungsmessung in Gefahrenbereichen ein entscheidender Faktor.

Wie bereits beschrieben, können bestimmte Arten von Bewegungen von den Satellitenmessungen nicht eindeutig erfasst werden, z.B. zu starke, oder zeitlich und räumlich abrupte Bodenbewegungen (z.B. ein plötzlich eintretender Erdfall oder Tagesbruch). Messbar sind hauptsächlich langsame und konstante Bewegungen, z.B. kriechende Setzungserscheinungen oder sich langsam absenkende Dolinen.

Deshalb ist für den vorliegenden Fall der Setzungsmessung eines Überschüttdamms der Einsatz der satellitengestützten Bewegungsmessung erst ab einer bestimmten Dammlänge kostengünstig und nur zum Monitoring der weniger starken Restsetzungen des Damms empfehlenswert.

Generell ist eine Kombination aus vereinzelt terrestrischer, punktueller Vermessung und satellitengestützter, großflächiger und häufiger Bodenbewegungsmessung zweckmäßig. Das terrestrische Nivellement könnte die satellitengestützten Messungen hinsichtlich absoluter Höhen und starker Setzungsbewegungen kalibrieren. Hierdurch könnte flächendeckend eine hohe Genauigkeit erzielt werden mit relativ geringem Personaleinsatz vor Ort.

6 Diskussion weiterer Anwendungsmöglichkeiten

Im Folgenden werden weitere potentielle Anwendungen der Radarinterferometrie für den Straßenbau erörtert.

Bei der Planung des Baus einer Straße werden ingenieurgeologische Gutachten über den Aufbau des Untergrundes eingeholt. Radarsatellitenmessungen könnten für diese Gutachten ergänzende Informationen über mögliche Bodenbewegungen im geplanten Trassenverlauf liefern, wenn Archivdaten verschiedenster Satelliten über dem Interessensgebiet vorliegen. Interessant wäre diese An-

wendung beispielsweise für Untersuchungen in Gebieten, in denen mit Hangrutschen, (Alt-)Bergbau oder Erdfällen gerechnet werden muss. Bei der Europäischen Raumfahrtagentur existiert z.B. ein für Europa flächendeckendes Archiv von C-Band Satellitendaten. Dieses ermöglicht eventuell eine Rekonstruktion von historischen Bewegungen des Erdbodens bis zurück in das Jahr 1992.

Die Untersuchungen und abgeleiteten Empfehlungen dieser Studie basieren ausschließlich auf der Benutzung von TerraSAR-X Satellitendaten (Wellenlänge 3,1 cm) mit einer räumlichen Auflösung von 0,25 bis 1 m. Bei der Wahl räumlich gröber aufgelösten Daten, z.B. des C-Band Satelliten Sentinel-1 (5 m x 20 m), werden Mischpixel des Straßenbelags mit der umliegenden Vegetation erzeugt. Diese Mischpixel werden hauptsächlich von der stärker strahlenden Vegetation geprägt sein, weshalb ein Bewegungsmonitoring von Straßen nur sehr eingeschränkt möglich sein wird. Für ein Bewegungsmonitoring von Überschüttdämmen wären Sentinel-1 Daten mit ihrer Wellenlänge von 6 cm geeignet, da sie etwa 50% mehr Senkung eindeutig abbilden können als andere X-Band Satelliten. Allerdings müssten für diesen Sensor größere Pegelreflektoren gebaut werden.

Da die Wiederholrate der Messung für den TerraSAR-X Satelliten 11 Tage beträgt, und vom Aufnahmezeitpunkt eines Satellitenbildes bis hin zur Lieferung des Monitoring-Produktes mehrere Wochen vergehen können, kann die Satellitentechnik momentan nicht als Echtzeit Alarmsystem zur Gefahrenabwehr, z.B. plötzlicher Hangrutsche dienen. Allerdings eignet sie sich für eine langfristige Beweissicherung und Dokumentation z.B. eines durch Tunnelbau beeinflussten Gebiets oder zur Überwachung von Bauwerken mit hohen Setzungen, die über längere Zeiträume abklingen müssen.

Weitere Anwendungen der Radarsatellitendaten für den Straßenbau sind z.B.

- die Erfassung des fließenden Verkehrs und Staus zwecks Verifizierung von herkömmlichen Verkehrsdaten, z.B. (SUCHANDT et al., 2010). Innerhalb weniger Minuten nach Datenempfang können Verkehrslagebilder und -daten erzeugt und an Nutzer weitergegeben werden, wie beispielsweise die aktuelle Reisezeit auf bestimmten Streckenabschnitten.
- die Erfassung der Belegung von LKW-Parkplätzen, z.B. (BÄßLER und RUNGE, 2013). Mit dem untersuchten Verfahren wurden bereits auf Einzellücken bezogene Detektionsgenauigkeiten von 88% (alle Blickwinkel) bzw. 92% (Blickwinkel > 40°) erreicht. Wurde aus-

schließlich die Gesamtbelegung betrachtet, in welcher sich voll-statt-leer- und leer-statt-voll-erkannte Lücken teilweise gegenseitig aufheben konnten, ergab sich eine scheinbar höhere „Trefferquote“ von 97%.

- die spurgenaue Vermessung der Verkehrswege z.B. (GROTE, 2014). Die Satellitenbilder nehmen zentimetergenaue Koordinaten von Bildpixeln auf, mit denen Kartenhersteller ihre Karten verbessern können. Die Position von Landmarken wie z.B. Straßenschildern kann damit präzise bestimmt werden, und zur Sicherheit der autonomen Navigation von Autos beisteuern.

Trotz der relativ hohen, momentan erreichbaren räumlichen Auflösung von kommerziellen Radarsatelliten (z.B. 25 cm des TerraSAR-X ST Modus) ist das Signal des Straßenbelags zu schwach, um die Beschaffenheit des Fahrbahnbelags (z.B. hinsichtlich der Anwesenheit von Schlaglöchern) zu beurteilen.

Die Daten von Radarsatelliten reagieren empfindlich auf den Wassergehalt der oberen Erdschichten und aus ihnen könnten großräumige Bodenfeuchte-Karten erstellt werden (KORNELSENA und COULIBALYA, 2013). Hierbei dringen L-Band Strahlen (Mikrowellen im Wellenlängenbereich von 15 cm bis 30 cm) tiefer in den Boden ein als kurzwelligere Radarstrahlung (wie z.B. X-Band oder C-Band) und werden weniger von der Rauigkeit und Vegetation der Erdoberfläche gestört. Damit liefern L-Band Daten eine genauere Schätzung des Bodenfeuchtegehalts (BALIK SANLI et al., 2008). So könnte der geschätzte Bodenfeuchtegehalt in ein Vorwarnsystem für rutschgefährdete Hänge eingebunden werden, in Kombination mit vernetzten Bewegungsmessern sowie mit Niederschlagsprognosen. Allerdings hat der seit 2014 operative Advanced Land Observing Satellite-2 (ALOS-2) mit dem L-Band Sensor PALSAR-2 eine Wiederholrate von nur 14 Tagen. Zusammen mit der Verzögerung der Bereitstellung der Satellitendaten nach der Aufnahme durch den Datenanbieter eignen sich diese Satellitendaten nicht für ein solches Vorwarnsystem.

7 Schlussfolgerung

Dieser Bericht stellt die Ergebnisse der Untersuchung der Mindestmessenanforderungen an Satelliten-Aufnahmeparameter und Straßenbelagseigenschaften dar, die notwendig sind, damit eine Straßenoberfläche in einem satellitengestützten Bewegungsmonitoring Messpixel erzeugt.

Die Untersuchungen basierten auf der Benutzung von TerraSAR-X Satellitendaten. Die folgenden Empfehlungen sind demnach speziell für die Verwendung von Satellitendaten dieser Wellenlänge (3,1 cm) abgeleitet worden.

Bzgl. der Aufnahmeparameter des Satelliten für die Anwendung im Bereich von Straßen gibt es folgende Empfehlungen:

- 1) Eine VV-Polarisation sollte gewählt werden.
- 2) Die räumliche Auflösung sollte so hoch wie möglich sein, um Mischpixel von Straße mit umliegender Vegetation zu vermeiden.
- 3) Ein mittlerer Einfallswinkel von etwa 35° bis 40° sollte gewählt werden.
- 4) Wenn Baumbewuchs am Straßenrand vorkommt, sollte der Satellit soweit als möglich entlang der Fahrbahnausrichtung blicken, um Verschattung zu vermeiden.
- 5) Zum Zeitpunkt der Satellitenaufnahme sollte der zu beobachtende Straßenabschnitt trocken sein, da die Reflexion der Fahrbahnoberfläche durch Nässe verändert wird.
- 6) Der Aufnahmezeitpunkt sollte bei möglichst geringer Verkehrsdichte gewählt werden.

Die Empfehlungen bzgl. der Straßeneigenschaften lauten wie folgt:

- 1) Der zu untersuchende Fahrbahnbelag sollte eine Rauigkeit mit einem MPD-Wert von mindestens 0,4 mm aufweisen. Asphaltflächen werden damit gut messbar sein. Bei Betonoberflächen richtet sich die Eignung nach der Blickrichtung des Satelliten sowie nach der Richtung der Oberflächenstruktur.
- 2) Das Vorkommen von Rüttelstreifen ist für satellitengestützte Bodenbewegungsmessungen unerheblich.
- 3) Auch die Arten der groben Gesteinskörnung des Fahrbahnbelags haben keinen Einfluss auf die Satellitenmessungen.
- 4) Die Neigung der Fahrbahn ist nur dann zu berücksichtigen, wenn sie Werte von mehr als 5° in Blickrichtung des Satelliten besitzt. In diesem Fall sollte der Winkel der abgesendeten Radarstrahlung entsprechend angepasst werden, um die empfohlenen 35° bis 40° lokalen Einfallswinkel zu erreichen.
- 5) Stabile Rückstreuer entlang der Fahrbahn, wie z.B. Schutzplanken, stellen wünschenswerte Messpixel zur Bodenbewegungsmessung dar.

Zudem wurde in dieser Studie am konkreten Beispiel eines Überschüttdamms nordwestlich von Berne bei Oldenburg (Testgebiet 3) ein satellitengestütztes Bewegungsmonitoring mittels Pegelreflektoren demonstriert. Alle Reflektoren strahlten

mit durchschnittlich 14 dB ausreichend stark zum Sensor zurück. Die hierbei erzielten Messergebnisse der Setzung des Damms wurden durch ein terrestrisches Nivellement verifiziert. Hierbei traten Ungenauigkeiten beim Nivellement zwischen Reflektor- und Pegelstangen-Messungen in dem westlichen Teil des Damms auf, auf dem bereits mit dem Sandabtrag begonnen wurde. Im östlichen Teil des Damms waren die Bewegungen der Reflektoren zu stark und konnten durch die Radarinterferometrie nicht mehr eindeutig aufgelöst werden. Die Pegelreflektoren, die von diesen beiden Phänomenen unbeeinflusst blieben zeigten durchschnittliche Abweichungen von den Nivellementmessungen von 5 mm.

Zur Erhöhung der Genauigkeit bei zukünftigen Setzungsmessungen von Überschüttdämmen mittels Radarinterferometrie und Pegelreflektoren, empfiehlt es sich daher:

- 1) Ein Satelliten-Messsystem zu wählen, welches den zu erwartenden Senkungsbetrag eindeutig abbilden kann, z.B. durch die Erhöhung der Aufnahmefrequenz, die Wahl eines Sensors größerer Wellenlänge (z.B. C-Band im Wellenlängenbereich 3,75 bis 7,5 cm) bei gleichbleibender Aufnahmefrequenz oder der Kombination mit terrestrischem Nivellement zur punktuellen Kalibrierung der Satellitenmessungen.
- 2) Um die Pegelreflektoren eine „Tabuzone“ von zwei Metern Radius einzurichten, damit sie durch Bauarbeiten und Baustellenverkehr nicht beeinträchtigt werden.

Das satellitengestützte Monitoring eines Überschüttdamms ist nur zur Messung der weniger starken Restsetzungen des Damms geeignet und rechnet sich gegenüber terrestrischer Verfahren erst ab einer Dammlänge von etwa 1,8 km. Hierbei ist zu beachten, dass der zu überwachende Abschnitt eines Dammbauwerks in der Regel nur etwa 500 m bis 1000 m lang ist. Demnach würde sich die Satellitenüberwachung für den Erdbau erst lohnen, wenn weitere Kosten gespart werden, z.B. die Bereitstellung kostenloser Satellitenbilddaten oder die Reduzierung der Aufnahmefrequenz und / oder der Berichterstattung bei sich wenig setzenden Dammschnitten.

Generell könnte eine Kombination aus vereinzelt terrestrischer punktueller Vermessung und satellitengestützter großflächiger und häufiger Bodenbewegungsmessung eine flächendeckend hohe Genauigkeit erzielen mit reduziertem Personaleinsatz vor Ort (v.a. in den durch Verkehr gefährdeten Bereichen).

8 Abkürzungen

Airbus DS	Airbus Defence and Space	TF	Testfeld
ALOS-2	Advanced Land Observing Satellite-2	TSX	TerraSAR-X
AS	Anschlussstelle	VV Polarisation	Sensor vertikal sendend und vertikal empfangend
BAST	Bundesanstalt für Straßenwesen	X-Band	Mikrowellen im Wellenlängenbereich von 2,4 cm bis 3,75 cm
C-Band	Mikrowellen im Wellenlängenbereich von 3,75 cm bis 7,5 cm		
dB	Dezibel		
DLR	Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt		
HH Polarisation	Sensor horizontal sendend und horizontal empfangend		
HS	TerraSAR-X HighResolution SpotLight Aufnahmemodus		
HV Polarisation	Sensor horizontal sendend und vertikal empfangend		
IPTA	Interferometric Point Target Analysis – Software of GAMMA Remote Sensing Research and Consulting AG		
L-Band	Mikrowellen im Wellenlängenbereich von 15 cm bis 30 cm		
MPD	Mean Profile Depth (mittlere Profiltiefe, hier als Maß für die Rauigkeit eines Fahrbahnbelags)		
NHN	Normalhöhennull		
NLStBV	Niedersächsische Landesbehörde für Straßenbau und Verkehr		
NLStBV-rGB OI	Niedersächsische Landesbehörde für Straßenbau und Verkehr, regionaler Geschäftsbereich Oldenburg		
OT	Ortsteil		
PA	Offenporiger Asphalt		
PMA	Lärmoptimierter Gussasphalt		
PR	Pegelreflektor		
PSI	Persistent Scatterer Interferometry		
QMW	Quadratischer Mittelwert		
SBAS	Small Baseline Subset Methode		
SM	TerraSAR-X StripMap Aufnahmemodus		
SMA	Splittmastix-Asphalt		
ST	TerraSAR-X Staring SpotLight Aufnahmemodus		

9 Literatur

- BALIK SANLI, F.; KURUCU Y.; TOLGA ESETLILI, M.; ABDIKANA, S.: Soil moisture estimation from RADARSAT-1, ASAR and PALSAR data in agricultural fields of Menemen Plane of western Turkey, The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Vol. XXXVII. Part B7, Beijing, 2008
- BAMLER, R.; HARTL, P.: Synthetic aperture radar interferometry – Topical review. Inverse Problems 14, R1-R54, IOP Publishing Limited (UK), 1998
- BÄßLER, M.; RUNGE, H.: LKW-Parken - Prototypische Entwicklung eines satellitenbasierten Erfassungssystems, Endbericht des DLR für die Autobahndirektion Südbayern, 2013
- FLETCHER, K.: InSAR Principles – Guidelines for SAR Interferometry Processing and Interpretation, Europäische Raumfahrtagentur (ESA) Publications, TM-19, February 2007
- FARR, T.G.: Radar interactions with geologic surfaces, Guide to Magellan Image Interpretation, NASA JPL Publication 93-24, CA USA, November 1, 1993, p.45, 1993
- FERRETTI, A.; PRATI, C.; ROCCA, F.: Permanent Scatterers in SAR interferometry. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing 39 (1), 8-20, 2001
- GROTE, S.: Validierungsprojekt - Die Revolution auf der Straße, Helmholtz Validierungsprojekt DriveMark des DLR, <http://www.helmholtz.de/artikel/die-revolution-auf-der-strasse-3131/>, 2014
- KORNELSENA, K.C.; COULIBALYA, P.: Advances in soil moisture retrieval from synthetic aperture radar and hydrological applications, Journal of Hydrology, Vol. 476, pp 460–489, 7 January 2013
- LONG, M, W.: Radar Reflectivity of Land and Sea, Third Edition, Artech House Inc., 2001
- PETRAT, L.; ANDERSSOHN, J.; RIEDMANN, M.: CO2 Storage: Monitoring of Related Surface Movements from Space – Potential for Central European Land Cover Conditions. Proceedings of “Second EAGE CO2 Geological Storage Workshop”, Berlin, Germany, March 12, 2010
- PETRAT, L.; FOKKER, P.; ZSCHOCKE, A.; PETRAT, K.: Surface Movements derived from Space: Valuable Information for Underground Reservoir and Geomechanical Processes. Proceedings of “Field Measurements in GeoMechanics, 8th International Symposium”, Berlin, Germany, September 12-16, 2011
- RADENBERG, M.: In-situ Texturmessungen und Querebenheitsmessungen auf der A2 und der A7 bei Hannover und der A24 bei Neuruppin, unveröffentlichter Untersuchungsbericht Nr. 472 602 0022/17, 17. Juni 2014 (inklusive zusätzlicher Erläuterungen im Juli 2014)
- SCHMOLKE, S.: Unveröffentlichte Erläuterungen während des Projekttreffens am 10.12.2014, sowie Emails vom 4.11.2014 und 17.12.2014
- SCHULZ, K.: TerraSAR-X2 requirements from SAR image analysis perspective, Final Report, Fraunhofer-Institut für Optronik, Systemtechnik und Bildauswertung IOSB, 84 pp, August 2011
- SKOLNIK, Radar Handbook, McGraw-Hill, 1970
- STILES, W.H.; ULABY, F.T.: Backscatter response of roads and road-side surfaces, Univ. of Kansas Center for Res., Inc., Lawrence, KS, RSL Tech. Rep. 377-1, July 1978
- SUCHANDT, S.; PALUBINSKAS, G.; RUNGE, H.; EINEDER, M.; MEYER, F.; SCHEIBER, R.: An Airborne SAR Experiment for Ground Moving Target Identification, Proceedings of “Workshop on High Resolution Earth Imaging for Geospatial Information”, Hannover, 2005
- SUCHANDT, S.; RUNGE, H.; BREIT, H.; STEINBRECHER, U.; KOTENKOV, A., BALSS, U.: Automatic Extraction of Traffic Flows Using TerraSAR-X Along-Track Interferometry, IEEE TRANSACTIONS ON GEOSCIENCE AND REMOTE SENSING, Vol. 48, No. 2, February 2010
- TAYLOR, R.C.: Terrain Return Measurements at X, Ku, and Ka Band, Convention Record, 1959, Pt 1, pp 19-26, 1959
- ULABY, F.T.; DOBSON, M.C.: Handbook of Radar Scattering Statistics for Terrain, Artech House Boston / London, 1989
- WERNER, C.; WEGMÜLLER, U.; STROZZI, T.; WIESMANN, A.: Interferometric point target analysis for deformation mapping. Proceedings of IGARSS'03, 7, 4362-4364, 2003

