

# Copernicus-Dienst Rhein-Mosel

Copernicus-Dienst zur  
Unterstützung von  
Gefährdungsanalysen und  
Regionalplanung im Rhein-  
Mosel-Gebiet



Bundesanstalt für  
Geowissenschaften  
und Rohstoffe



Rheinland-Pfalz

LANDESAMT FÜR GEOLOGIE  
UND BERGBAU

Autor: Diplom-Geoökol. Corinna Wolf, B4.4 Fernerkundung

Ausführende Institution: Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR),  
Stilleweg 2, 30655 Hannover

Projekt: Copernicus-Dienst zur Unterstützung von Gefährdungsanalysen und  
Regionalplanung im Rhein-Mosel-Gebiet

BGR-Nr.: 05-3039-01

BMWi FKZ: 50EE1311

Datum: 29.02.2016

## Zusammenfassung

Das nationale Copernicus-Projekt „Copernicus-Dienst zur Unterstützung von Gefährdungsanalysen und Regionalplanungen im Rhein-Mosel-Gebiet“ dient der Unterstützung der operationellen Nutzung von Copernicus-Satellitendaten in Behörden. Im Rahmen der behördlichen Aufgabe der Gefährdungsanalyse wird in Zusammenarbeit mit dem Landesamt für Geologie und Bergbau Rheinland-Pfalz, Referat Ingenieurgeologie der Einsatz von Radarsatellitendaten zur Detektion von Geländebewegungen für das Projektgebiet Rhein-Mosel untersucht. In Vorbereitung der operationellen Nutzung von Sentinel-1 Daten wurden historische Radardaten der ESA-Satelliten ERS-1/2 und Envisat-ASAR verwendet (1995 bis 2000 und 2003 bis 2010). Daraus abgeleitete radarinterferometrische Bewegungsmessungen, basierend auf der Methodik der Persistent Scatterer Interferometrie (PSI), wurden ausgewertet und interpretiert. Insgesamt konnten für das Projektgebiet 730 Bewegungsgebiete kartiert und den Bewegungskategorien „Steilhang“, „Bergbau“, „Straßen und Schienen“, „Industrie und Gewerbe“ und „Anlagen und Sonstiges“ zugeordnet werden. Die Mehrheit der Bewegungen kommt in den Kategorien „Straßen und Schienen“ sowie „Industrie und Gewerbe“ vor. In der Kategorie „Bergbau“ korrelieren ca. 60% der Bewegungsgebiete mit dem Vorkommen vulkanischer Locker- und Festgesteine. Zahlreiche Geländebewegungen an Talhängen treten entlang der Mittel- und Untermosel zwischen Trier und Koblenz auf. Hierbei handelt es sich meist um fossile Großrutschungen in den Hunsrückschiefern des Devons, die nach der letzten Eiszeit an den steilen Talflanken entstanden und teilweise noch in Bewegung sind. Sieben Rutschungen im Gebiet zwischen Cochem und Bernkastel-Kues wurden in einer Detailanalyse mit hochauflösenden TerraSAR-X und RapidEye-Daten näher untersucht. Zur Detektion von Geländebewegungen wurden die PSI-Methode sowie das Small Baseline Subset (SBAS)-Verfahren angewandt. Eine weitere Detailstudie wurde für die Altbergbauggebiete Mendig und Mayen in der Osteifel durchgeführt. In diesen Gebieten bestehen potentielle Senkungs- und Einsturzgefährdungen durch unterirdische, oberflächennahe Hohlräume, die durch Basaltbergbau vom Mittelalter bis zur Mitte des 20. Jahrhunderts entstanden sind. Mit Hilfe der Bewegungsmessungen der TerraSAR-X-Daten (2011 bis 2013) konnten Bewegungsgebiete in Mendig und Mayen detektiert werden. Durch Auswertung der Zeitreihen konnten zudem die Bewegungsverläufe visualisiert werden. Jedoch zeigte sich, dass die Bewegungsdaten noch nicht flächendeckend genug sind, um operationell für landesbehördliche Gefährdungsanalysen als primäre und entscheidende Datenquelle eingesetzt zu werden. Hier besteht weiterer Forschungs- und Entwicklungsbedarf sowie Rückkopplung mit Datenprozessierern und Koordinierung mit weiteren Nutzergruppen. In diesem Zusammenhang entwickelte die BGR auch ein Dienstkonzept für einen operationellen, bundesweiten Boden-Bewegungsdienst basierend auf Sentinel-1-Daten. In den nächsten drei Jahren wird zunächst ein bundesweiter Datensatz von Bodenbewegungsdaten aufgebaut.

## Inhaltsverzeichnis

### Zusammenfassung

1	Einführung .....	5
2	Projektgebiet Rhein-Mosel .....	9
2.1	Charakterisierung des Untersuchungsgebietes .....	9
2.2	Datengrundlage und Methodik .....	12
2.3	Ergebnisse .....	22
3	Detailgebiete .....	37
3.1	Auswahl und Charakterisierung der Detailgebiete .....	37
3.2	Datengrundlage und Methodik .....	51
3.3	Ergebnisse .....	75
4	Diskussion der Ergebnisse .....	151
5	Implementierung von Fernerkundungsdaten in behördliche Arbeitsprozesse .....	155
6	Dissemination der Arbeitsergebnisse .....	160
7	Fazit und Ausblick .....	162
8	Literaturverzeichnis .....	163
9	Anhang .....	167

## 1 Einführung

Das von der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR), Arbeitsbereich Fernerkundung und dem Landesamt für Geologie und Bergbau Rheinland-Pfalz (LGB), Referat Ingenieurgeologie gestartete Vorhaben „Copernicus-Dienst zur Unterstützung von Gefährdungsanalysen und Regionalplanung im Rhein-Mosel-Gebiet“ (Projektlaufzeit Januar 2014 bis Dezember 2015) ist Teil der nationalen Initiative „Copernicus-Dienste für den öffentlichen Bedarf in Deutschland“, die vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) gefördert wird. Die Initiative steht im Kontext des EU-Programms „Copernicus“. Dabei handelt es sich um ein Programm der Europäischen Kommission und der Europäischen Weltraumorganisation ESA zur Schaffung eines europäischen Erdbeobachtungsdienstkonzeptes. Ein wesentlicher Teil der europäischen Initiative ist die Entwicklung von sieben Satellitenmissionen, den Copernicus Sentinels, um für die globale Umweltüberwachung die notwendige umfassende und einheitliche Datengrundlage zu schaffen. Da derzeit jedoch viele öffentliche Einrichtungen noch nicht ausreichend darauf vorbereitet sind, satellitengestützte Erdbeobachtungsinformationen in ihren Aufgabenbereichen optimal einzusetzen, werden Vorhaben zur Unterstützung der nationalen Nutzung von Copernicus durch dieses Förderprogramm unterstützt.

So haben die für Geologie und Bergbau zuständigen Ämter des Bundes und der Länder die Aufgabe, geologisch und ingenieurgeologisch relevante Sachverhalte zu verfolgen, in Bezug auf geologische und bergbaubezogene Gefährdungspotentiale beratend zu wirken sowie Aufsichtspflichten wahrzunehmen. In Abhängigkeit von der geologischen Situation und den besonderen Bedingungen im jeweiligen Bundesland sind Handlungsfelder durch ehemaligen oder aktiven Bergbau, durch natürliche Instabilitäten des Untergrundes, wie beispielsweise natürliche Hohlrumbaue und Hanginstabilitäten, durch die Nutzung des geologischen Untergrundes für die Gewinnung und Speicherung von Öl und Gas sowie auch in Verbindung mit Vorhaben der Tiefengeothermie gegeben.

Die in den zuständigen Landesbehörden wirkenden Geologen und Ingenieurgeologen setzen überwiegend bodengebundene Verfahren für Erkundungs- und Überwachungsaufgaben ein. Diese beinhalten unter anderem geophysikalische Verfahren, Bohrungen, Nivellements oder Kartierungen im Gelände. Diese Methoden liefern sukzessiv Daten an einzelnen Messpunkten und entlang von Profilen. Fehler und Ungenauigkeiten treten dann auf, wenn flächenhafte Aussagen für größere Untersuchungsgebiete abzuleiten sind. Solche Aussagen beruhen dann auf der Extrapolation von Punkt- und Profildaten in die Fläche und sind daher vielfach nur bedingt belastbar, was insbesondere bei Gefährdungs- und Risikoanalysen problematisch sein kann. Methoden der Fernerkundung, insbesondere satellitengestützte Verfahren, kommen nur vereinzelt zur Anwendung. Während die Nutzung von Luftbildern und von Airborne-Laser Scanning (ALS)-basierten Geländemodellen,

bereitgestellt von den jeweiligen Vermessungsämtern, inzwischen in fast allen geologischen Landesämtern erfolgt, trifft dies für satellitengestützte Daten noch nicht zu. Hier bestehen die Möglichkeit und der Bedarf, durch den Einsatz von flugzeug- und satellitengestützten Verfahren der Erdbeobachtung, insbesondere auch durch die Anwendung und Weiterentwicklung von radarinterferometrischen Methoden, einen Beitrag zur Verminderung von Informationslücken zu leisten, Arbeitsprozesse zu optimieren und bei flächenhaften Beobachtungen weitaus kostengünstigere Methoden zur Verfügung zu haben. Ein wesentliches Ziel ist es, über die Bereitstellung wirtschaftlicherer Verfahren wesentlich größere Gebiete mit Geogefahren in die Erkundung und Überwachung aufzunehmen.

Das Ziel des Projektes „Copernicus-Dienst Rhein-Mosel“ besteht darin, einen Beitrag zur weiteren Erschließung des Potenzials der flugzeug- und satellitengestützten Fernerkundung für die Wahrnehmung öffentlicher Aufgaben im nationalen und internationalen Kontext zu leisten und die Implementierung in bestehende bzw. neue behördliche Arbeitsprozesse nachhaltig zu unterstützen. Anhand der behördlichen Aufgabe der Gefährdungsanalyse wird für ein Untersuchungsgebiet in Rheinland-Pfalz der Nutzen von Fernerkundungsdaten aufgezeigt. Fernerkundungssensoren bzw. Verfahren der Fernerkundung besitzen auf Grund der Wellenlängen der genutzten elektromagnetischen Strahlung nur geringe Eindringtiefe in den Untergrund. Auflockerungen, sonstige Schwächezonen unter der Geländeoberfläche oder tektonisch aktive Bereiche in der oberen Erdkruste, welche zu Boden- und Hangbewegungen, Landabsenkungen, Erdfällen und Tagesbrüchen führen können, sind deshalb oft nur schwierig direkt zu erkennen. In den meisten Fällen führen solche im Untergrund ablaufende Prozesse zu Veränderungen an der Geländeoberfläche, deren Identifizierung und Bewertung indirekte Hinweise auf die verursachenden Prozesse liefern können. Solche typischen Veränderungen an der Geländeoberfläche werden als Diagnosemerkmale bezeichnet, welche im Falle einer fernerkundlichen Detektion als „Oberflächen-Indikatoren“ für „Untergrund-Situationen“ genutzt wurden (Kühn et al. 2004). Für eine Früherkennung von Gefahrensituationen ist es wiederum von Bedeutung, diese Oberflächenindikatoren in frühesten Stadien ihrer Entstehung zu identifizieren, das heißt, weit bevor diese im Gelände visuell wahrnehmbar werden. Solche Diagnosemerkmale sind zum Beispiel Lineamente, Frakturen, Klüfte und Abrisskanten, Geländeunebenheiten bzw. Störungen des natürlichen Reliefs, Depressionen, Bodenfeuchte- und Vegetationsanomalien. Diese Diagnosemerkmale besitzen Indiziencharakter; ihre Nutzung für Gefährdungseinschätzungen erfordert daher neben fernerkundlicher Expertise entsprechendes geologisches Wissen und Erfahrung sowie Überprüfungen im Gelände. Die Verlässlichkeit einer auf Fernerkundungsdaten basierenden Gefährdungsanalyse kann erheblich verbessert werden, wenn diese Diagnosemerkmale deckungsgleich in Daten unterschiedlicher Sensoren nachgewiesen werden. In

diesem Sinne ist es erforderlich, verschiedene Fernerkundungsmethoden kombiniert anzuwenden und mittels „Multisensor-Nachweis“ Informationen hoher Belastbarkeit zu erhalten.

Zur Detektion von Gefährdungen, die sich durch Geländebewegungen bemerkbar machen, wie beispielsweise Hangrutschungen und Landabsenkungen, wird zunächst eine übersichtsmäßige Kartierung von Bewegungen im Projektgebiet Rhein-Mosel durchgeführt. Hierzu wird die radarinterferometrische Methodik der Persistent Scatterer Interferometrie (PSI) eingesetzt. Als Datengrundlage werden historische Radardaten (1995 – 2010) der ESA-Satelliten ERS-1/2 und Envisat-ASAR verwendet. Die Ergebnisse dieser Übersichtskartierung werden im ersten Teil des Projektberichtes dargestellt. Im zweiten Teil des Berichtes werden Auswertungen für zwei Detailgebiete dargestellt. Die Auswahl dieser Gebiete basiert auf den Ergebnissen der vorangegangenen Übersichtskartierung von Bewegungsgebieten anhand der PSI-Datensätze von ERS-1/2 und Envisat-ASAR sowie weiteren Kriterien, wie zum Beispiel dem geologischen Hintergrund sowie dem Vorhandensein von zusätzlichen konventionellen Bewegungsmessungen (GPS, Inklinometer) zur Validierung. Es handelt sich zum einem um ein Gebiet der Mittelmosel, in dem eine besonders hohe Hangrutschgefährdung auftritt. Das zweite Detailgebiet befindet sich in der Osteifel. Hier bestehen in den Altbergbaugebieten Mendig und Mayen potentielle Senkungs- und Einsturzgefährdungen aufgrund von unterirdischen, oberflächennahen Abbauhohlräumen. Zur Detailanalyse der Bewegungen werden aktuelle, hochauflösende Satellitendaten von TerraSAR-X eingesetzt, auf die die beiden radarinterferometrischen Verfahren Persistent Scatterer Interferometrie (PSI) und Small Baseline Subset (SBAS) angewandt wurden. Zur Unterstützung von belastbaren Aussagen zur Gefährdungssituation werden zudem weitere Diagnosemerkmale mit Hilfe des Multi-Sensor-Ansatzes untersucht. Hierzu werden multispektrale Satellitendaten von RapidEye sowie Digitale Geländemodelle und Luftbilder herangezogen. Eine Übersicht der Auswertungen und Daten für das Projektgebiet Rhein-Mosel und die Detailgebiete ist in Tabelle 1 aufgeführt. Im Anschluss an die Diskussion der Ergebnisse wird die operationelle Nutzung von Sentinel-Daten für Gefährdungsanalysen sowie deren Implementierung in behördliche Arbeitsprozesse diskutiert. Abschließend wird die Dissemination der Arbeitsergebnisse vorgestellt sowie ein Ausblick auf die Einrichtung eines operationellen, bundesweiten Boden-Bewegungsdienstes gegeben.

Tabelle 1: Übersicht der Methodik, Daten und Auswertungen für das Projektgebiet Rhein-Mosel und die Detailgebiete.

Gebiet	Methodik	Daten	Auswertung
Projektgebiet Rhein-Mosel	Persistent Scatterer Interferometrie (PSI)	ERS-1/2 Ascending (1995 bis 2000) ERS-1/2 Descending (2003 bis 2010) Envisat-ASAR (2003 bis 2010)	Übersichtskartierung von Geländebewegungen, Klassifizierung der kartierten Bewegungsgebiete mit Landsat 8, Luftbildern und topographischen Karten
Detailgebiete	Persistent Scatterer Interferometrie (PSI), Small Baseline Subset (SBAS)	TerraSAR-X Ascending (2011 bis 2013) TerraSAR-X Descending (2012 bis 2013)	Detailauswertungen von Geländebewegungen, Zeitreihenanalysen
	Normalized Differenced Vegetation Index (NDVI)	RapidEye (April 2011, September 2012)	Detektion von Veränderungen der Vitalität der Vegetation
	Visuelle Interpretation	Digitale Geländemodelle (DGM10, DGM5, DGM1) Digitale Orthophotos DOP40	Detektion von Brüchen, Klüften, Abrisskanten, Depressionen, Geländeunebenheiten bzw. Störungen des natürlichen Reliefs



## 2 Projektgebiet Rhein-Mosel

Im Folgenden wird das sich in Rheinland-Pfalz befindende Untersuchungsgebiet „Rhein-Mosel“ sowie die Datengrundlage und Methodik der Untersuchungen von Geländebewegungen und linearer Strukturen vorgestellt. Die kartierten Bewegungsgebiete werden anschließend dargestellt.

### 2.1 Charakterisierung des Untersuchungsgebietes

Das Projektgebiet Rhein-Mosel befindet sich im Bundesland Rheinland-Pfalz und umfasst eine Größe von ca. 8.774 km<sup>2</sup>. Es beinhaltet den östlichen Teil des Mittelgebirges Eifel, das Moseltal zwischen Trier und Koblenz sowie das Mittelrheintal von Bingen über Koblenz bis zur Landesgrenze von Rheinland-Pfalz (Abbildung 1). Die Landschaft in der Eifel ist vor allem durch den tertiären Vulkanismus geprägt. Das Gebiet der Mosel ist durch geschwungene Täler und Weinbau charakterisiert.



Abbildung 1: Lage des Projektgebiets Rhein-Mosel (roter Rahmen) in Deutschland und Rheinland-Pfalz (Kartengrundlage: BKG).

Die Geologie im Untersuchungsgebiet besteht hauptsächlich aus marinen Ablagerungen des Unterdevons, zum Beispiel dem Hunsrückschiefer (siehe Signatur „dsHU“ in Abbildung 2), aber auch Sandstein (Signatur „so“) und Muschelkalk (Signatur „m“) aus der Trias. In der Osteifel kommen Gesteine des quartären Vulkanismus vor, wie zum Beispiel Basalt (Signatur „qp/+B“), Bimstuff (Signatur „qwAL“) und Phonolith-Tuffe (Signatur „qp/+Ph“). Die Flusstäler von Rhein und Mosel sind vor allem durch abgelagerte Sande und Kiese des Pleistozäns charakterisiert (Signatur „qs//f“).

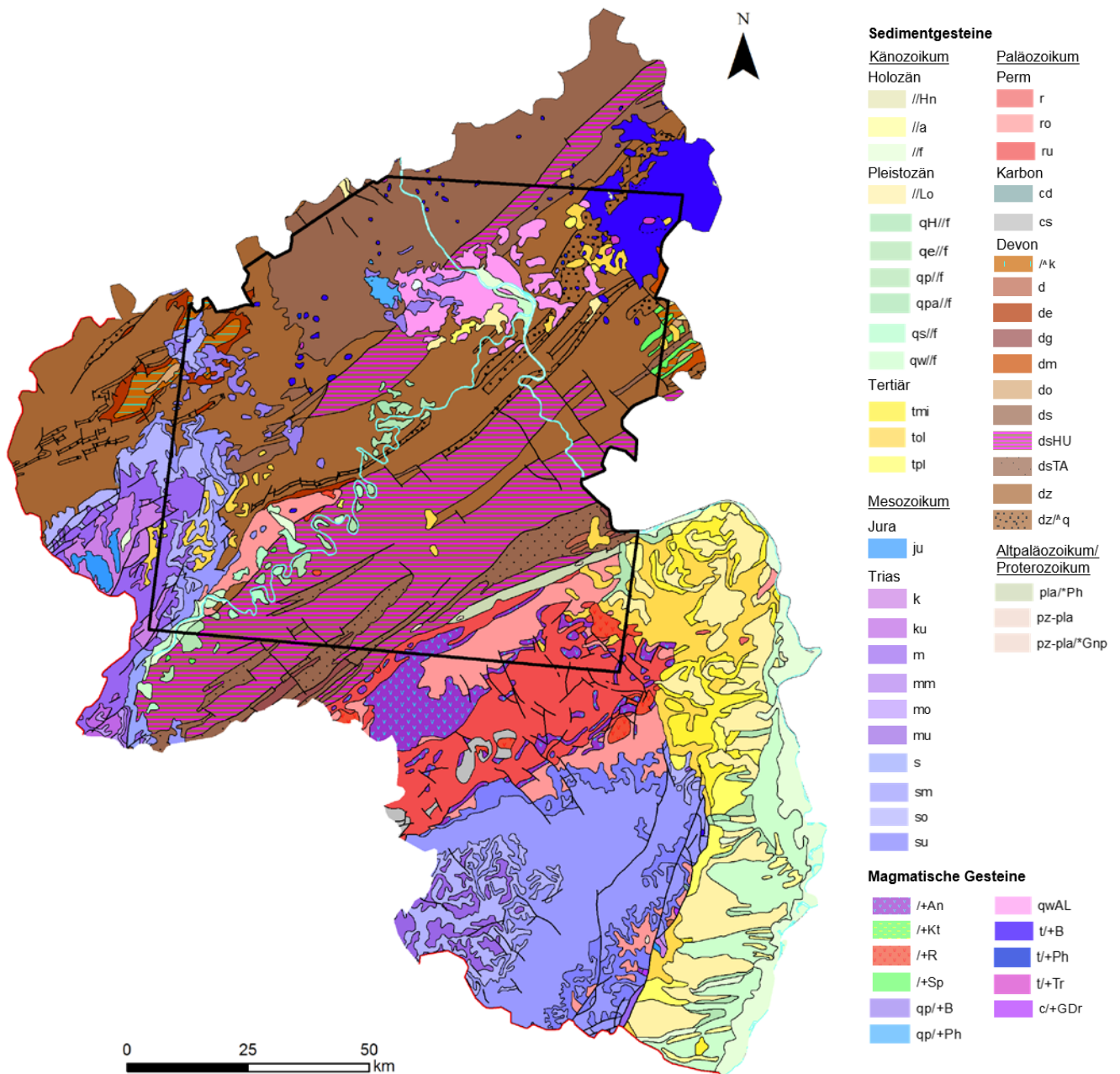


Abbildung 2: Geologie von Rheinland-Pfalz mit Lage des Projektgebietes (Geologische Karte 1:1.000.000 (GK1000, BGR), Ausschnitt für Rheinland-Pfalz, schwarzer Rahmen: Projektgebiet Rhein-Mosel).

Häufige in Rheinland-Pfalz auftretende Geogefahren sind Massenbewegungen an Hängen, Verkarstungen und Auslaugungen sowie Bodensenkungen und Setzungen bzw. Bergbaufolgen. Im Vergleich der deutschen Bundesländer kommen in Rheinland-Pfalz die höchste Zahl an Rutschungen vor, zu denen Rutsch-, Sturz- und Fließprozesse zählen. Im Projektgebiet treten die Rutschungen vor allem in den Hunsrückschiefen (Tonschiefer) des Devons an den Prallhängen der Mittelmosel auf. Es handelt sich hierbei meistens um fossile Großrutschungen, die nach der letzten Eiszeit an den steilen Talflanken entstanden sind. Beispielsweise beträgt die Größe der Großrutschung zwischen Bernkastel bis Zeltingen an der Mosel etwa 7 km<sup>2</sup> und der Höhenunterschied von Abrisskante zu Talniveau ca. 300 m. Die Gleitfläche befindet sich in einer Tiefe von bis zu über 60 m. Bei Starkregenereignissen treten an den Steilhängen der Mosel zudem Muren auf, die durch hohe Fließgeschwindigkeiten charakterisiert sind. Der hangabwärts fließende Strom aus Bodenmaterial, Felskörpern, Wasser und mitgerissener Vegetation weist ein großes Gefährdungspotential auf und führt insbesondere zu Schäden an Straßen- und Bahntrassen.

Zu den Georisiken gehören zudem Bodensenkungen und -setzungen sowie Hebungen. Setzungen treten aufgrund von Erhöhungen der Auflast oder durch Austrocknung toniger oder organischer Böden auf, die häufig in Talniederungen vorkommen. Die Austrocknung kann dabei durch Pflanzen, Grundwasserentnahme oder klimatischen Veränderungen verursacht werden. Schrumpffempfindliche Tone und Tonmergel führen bei Wasserentzug beispielsweise zu Bodensenkungen, die zu Schäden an Gebäuden und Infrastruktur führen können, z.B. Rissbildungen an historischen Gebäuden. Andererseits können bei Wasserzutritt auch Hebungen auftreten, beispielsweise durch Mineralumwandlungen oder das Quellen von Tonmineralen. Schrumpfungen und stark verformbare Böden können zu bauwerksunverträglichen Setzungsunterschieden führen, die Schäden zur Folge haben. Aber auch ungleichmäßige Bodenverhältnisse durch Auffüllungen können besondere Gründungsmaßnahmen notwendig machen.

Auch durch Bergbau geschaffene Hohlräume können Georisiken darstellen. So entstand beispielsweise in Mayen durch die Gewinnung von Basalt ein ausgedehntes Hohlraumssystem auf einer Fläche von mehr als 5 ha. Die Hohlräume mit Höhen von bis zu 14 m weisen nur eine geringe Überdeckung von 4 bis 10 m auf. Auf diesem Gebiet ereigneten sich bereits Tagesbrüche, Bodensenkungen und auch Einstürze von Hohlraumbereichen infolge eines Erdbebens im Jahr 1992. Ein weiteres Beispiel sind die Hohlraumssysteme in Mendig, die ebenfalls durch den Abbau von Basaltlava entstanden sind. Hier ereignete sich 1988 ein Tagesbruch am Sportplatz in Niedermendig (Landesamt für Geologie und Bergbau Rheinland-Pfalz, 2010).

## 2.2 Datengrundlage und Methodik

Zur Detektion von Geländebewegungen, die als Indikatoren für im Untergrund ablaufende Prozesse und Georisiken wie Hanginstabilitäten oder Bruch- und Senkungsgefährdungen fungieren können, werden Radarsatellitendaten verwendet. Im vorliegenden Kapitel werden diese Daten sowie deren radarinterferometrische Auswertung näher erläutert.

### 2.2.1 Bewegungsanalyse

Zur Analyse von Boden- und Geländebewegungen im Projektgebiet Rhein-Mosel kommt die Methodik der Persistent Scatterer Interferometrie (PSI) zum Einsatz. Hierfür werden historische Satellitendaten von ERS-1/2 und Envisat-ASAR verwendet. Zuletzt werden die zur Kartierung von Geländebewegungen verwendeten PSI-Datensätze vorgestellt.

#### 2.2.1.1 Persistent Scatterer Interferometrie (PSI)

Die Methodik Persistent Scatterer Interferometrie (PSI) ist ein Verfahren der Radarinterferometrie, das zur Auflösung zeitlicher und geometrische Dekorrelationen entwickelt wurde (Ferretti et al. 2000, 2001). Durch die Verwendung großer Datenmengen kann zudem das atmosphärische Signal geschätzt und korrigiert werden (Kampes 2006). Die Technik basiert auf einem Datenstapel von Synthetic Aperture Radar (SAR)-Szenen, die über einen längeren Zeitraum im Untersuchungsgebiet aufgenommen wurden. Die Phaseninformation des Radarsignals erlaubt die Detektion und Messung von Bewegungen von stabilen Reflektoren (PS, Persistent Scatterer) an der Erdoberfläche mit einer Genauigkeit von wenigen Millimetern pro Jahr. Bei den PS handelt es sich um ortsfeste Objekte, die das Radarsignal besonders stark reflektieren und somit ein gutes Messsignal liefern, zum Beispiel Gebäude, Strommasten, metallische Strukturen, nackte Felsen oder ähnliche Objekte. Die Messung erfolgt in Blickrichtung des Sensors (Line of Sight, LOS) (Abbildung 3).

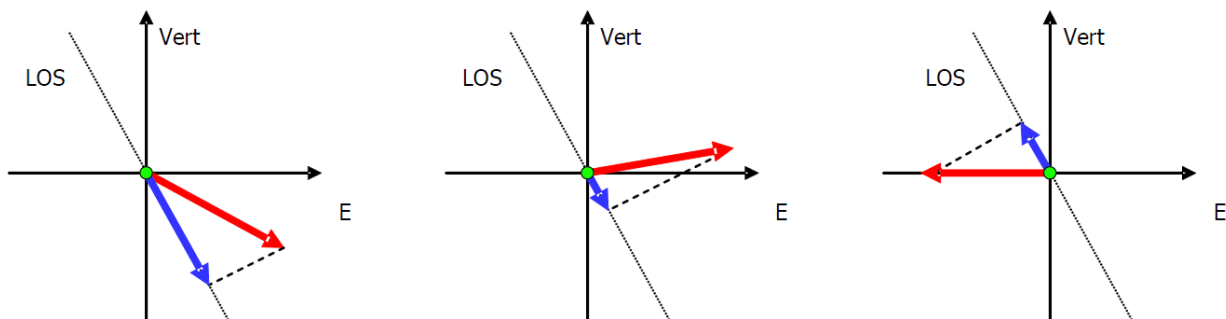


Abbildung 3: Messung unterschiedlichen Bewegungsrichtungen des Untergrundes in Blickrichtung des Sensors (Line of Sight, LOS): Vektor der Bodenbewegung (rot), Vektor der Messung des Sensors (blau) (Bateson et al. 2010).

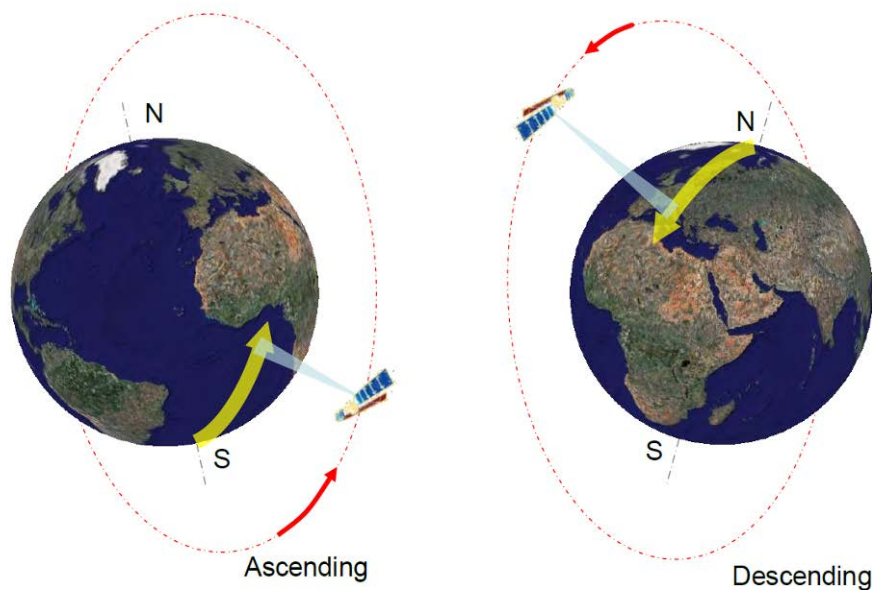


Abbildung 4: Aufsteigender (ascending) und absteigender (descending) Satellitenorbit (Bateson et al. 2010).

Für das Untersuchungsgebiet stehen SAR-Datensätze aus beiden Aufnahmerichtungen zur Verfügung, d.h. zum einem durch den aufsteigenden Satellitenorbit von Süden nach Norden (ascending mode) und den absteigenden Satellitenorbit von Norden nach Süden (descending mode) (Abbildung 4). Hierdurch können nach Osten und Westen gerichtete Komponenten der lokalen Bewegungen erfasst werden. Lediglich die Sensitivität von Bewegungen in Nord-Süd-Richtung sind sehr gering (Castelletto et al. 2010).

### 2.2.1.2 PSI-Prozessierungen

Die PSI-Prozessierung wurde nach einem offenen Ausschreibungsverfahren als Auftrag an das KMU TRIGIS GeoServices GmbH vergeben. Als Datengrundlage wurden kostenlos verfügbare Archivdaten der ESA von ERS-1/2 und Envisat-ASAR verwendet. Für das Untersuchungsgebiet Rhein-Mosel wurden die durchschnittlichen jährlichen Bewegungsraten in mm/Jahr sowie die dazu gehörige Zeitreihe im Ascending und Descending-Modus von ERS-1/2 und Envisat-ASAR-Daten berechnet. In Anlehnung an die im GMES Terrafirma Projekt erarbeiteten Spezifikationen für PSI-Produkte (Bateson et al. 2010) wurden dem Auftragnehmer die in Tabelle 2 und Tabelle 3 aufgeführten Anforderungen für die Berechnung der durchschnittlichen jährlichen Bewegungsrate und Zeitserie mitgeteilt, sowie Angaben für den Prozessierungsbericht (Tabelle 4) festgelegt. Alle Prozessierungen müssen als ESRI-Shapefile mit dem Lagebezug UTM, 32N, WGS84 vorgelegt werden. Des Weiteren wurden die Rohdaten aller verwendeten Satellitendaten von ERS-1/2 und Envisat-ASAR und jeweils ein Amplitudenbild (Multi-image reflectivity image (MIR)) als GeoTIFF Raster mit Lagebezug UTM 32N WGS84 gefordert.

Tabelle 2: Anforderungen zur Berechnung der durchschnittlichen jährlichen Bewegungsraten.

Feldname	Beschreibung
ID	Individuelle Kennung für jeden PS-Punkt
Rechtswert	UTM, 32N, WGS84
Hochwert	UTM, 32N, WGS84
Höhe	Höhe der Punkte zu NN
BEW	Durchschnittliche jährliche Bewegungsrate [mm/Jahr]
KOH	Kohärenz [Wertebereich >0 bis 1]*
SD	Standardabweichung für die durchschnittliche jährliche Bewegungsrate aufgrund unkompensierter atmosphärischer Fehler [mm/Jahr]

\*Der Kohärenzwert beschreibt die Güte der Bewegungsschätzung. Die Werte liegen hierbei zwischen 0 und 1, wobei Werte ab 0,6 gute Schätzwerte beschreiben.

Tabelle 3: Anforderungen zur Berechnung der PSI-Zeitreihen.

Feldname	Beschreibung
ID	Individuelle Kennung für jeden PS-Punkt
Rechtswert	UTM, 32N, WGS84
Hochwert	UTM, 32N, WGS84
Höhe	Höhe der Punkte zu NN
BEW	Durchschnittliche jährliche Bewegungsrate [mm/Jahr]
KOH	Kohärenz [Wertebereich >0 bis 1]
SD	Standardabweichung für die durchschnittliche jährliche Bewegungsrate aufgrund unkompensierter atmosphärischer Fehler [mm/Jahr]
JJJJMMTT	Startdatum der Bewegungsmessung relativ zur Masterszene [mm], z.B. 20140215
JJJJMMTT	Enddatum der Bewegungsmessung relativ zur Masterszene [mm], z.B. 20140215

Tabelle 4: Angaben und Formate für die Prozessierungsberichte.

Angaben	Formate
Verwendeter Satellit und Orbit	[Text]
Verwendete Software und Datum der Prozessierung	[Text]
Auswertemethode	[Text]
Zeitraum der Analyse	[TT.MM.JJJJ – TT.MM.JJJJ]
Anzahl der verwendeten Satellitenszenen	[Zahl]
Datumsangaben der verwendeten Satellitenszenen	[TT.MM.JJJJ]
Datum der Masterszene	[TT.MM.JJJJ]
Lage- und Höhengenaugigkeit der PS-Punkte	[m]
Verwendete Referenzdaten zur Georeferenzierung	[Text]
Verwendete Projektion	UTM, 32N, WGS84

Lage des Referenzpunktes (XY-Koordinaten)	ID des Punktes, Rechtswert und Hochwert in UTM, 32N, WGS84 [m]
Größe des prozessierten Gebietes	[km <sup>2</sup> ]
Anzahl der identifizierten PS-Punkte	[Zahl]
Durchschnittliche Dichte der PS-Punkte pro km <sup>2</sup>	[PS/km <sup>2</sup> ]
Durchschnittliche jährliche Bewegungsrate für das gesamte Prozessierungsgebiet	[mm/Jahr]
Basisstatistik der Bewegungen	Bewegungsklasse [mm/Jahr] und Punkte pro Bewegungsklasse [%]
Wertebereich der PS-Punkte, der als stabil angesehen werden kann mit Begründung	z.B. -1 bis +1 mm/Jahr
Standardabweichung der durchschnittlichen jährlichen Bewegungsrate	[Zahl]
Unkompensierte atmosphärische Fehler	[Text]
Sichtbare Neigungen oder Phasentrends	[Text]
Gibt es Gebiete für die es keine Prozessierungsergebnisse gibt? Wenn ja, wo und warum?	z.B. Verlust von Reflektoren/Kohärenz, vermutet signifikante nicht-lineare Bewegung, vermutete zu hohe Bewegungsraten
Beobachtungen/Auffälligkeiten/Besonderheiten	[Text]

### 2.2.1.3 ERS-1/2 und Envisat-ASAR-Datensätze

Historische SAR-Daten der ERS-1/2-Satelliten sind für den Zeitraum 1992 bis 2011 verfügbar. Im Jahr 2000 erlitt der ERS-2-Satellit jedoch einen Schaden am Kreiselstabilisationssystem, der dazu führte, dass der Orbit und die Ausrichtung des Satelliten nicht mehr die für die SAR-Interferometrie notwendigen Genauigkeiten einhalten konnte. Ab Januar 2001 sind vereinzelte Aufnahmen noch verwendbar, da diese aber sehr verstreut liegen, sind mit diesen Daten keine PSI-Prozessierungen durchführbar.

Die Datenarchivrecherche nach verfügbaren ERS-1/2-Satellitendaten für das Projektgebiet zeigte, dass für den Zeitraum Herbst 1993 bis Frühjahr 1995 keine Aufnahmen vorliegen. Aufgrund dieser großen zeitlichen Lücke ergaben sich zwei unterschiedliche Herangehensweisen für die PSI-Prozessierung. Zum einen kann die PSI-Berechnung für den gesamten Zeitraum 1992 bis 2000 erfolgen, wobei die maximal erfassbare Bewegungsrate nicht größer als 15 mm/Jahr betragen darf, um Phasenabwicklungsfehler für den Zeitraum der fehlenden Aufnahmen zu vermeiden. Zum anderen würde bei der Berechnung zweier Zeiträume, also bis Herbst 1993 und ab Frühjahr 1995, die maximal erfassbare Bewegungsrate aufgrund der einheitlichen zeitlichen Distanz zwischen den Aufnahmen bis zu 200 mm/Jahr betragen. Die Anzahl der Satellitenaufnahmen für den Zeitraum 1992 bis Herbst 1993 reichen jedoch für eine PSI-Auswertung nicht aus, so dass lediglich der Zeitraum ab Frühjahr 1995 bis Ende 2000 ausgewertet werden könnte. In Absprache mit dem

Auftragnehmer wurde der Zeitraum 1995 bis 2000 für eine PSI-Prozessierung festgelegt. Der verwendete ERS-1/-2 Datensatz der aufsteigenden Satellitenbahn (Ascending) besteht aus 67 Szenen der Tracks 29 und 487, die im Zeitraum von April 1995 und Juni 2000 aufgenommen wurden. Der ERS-1/2 Descending-Datensatz besteht aus 297 Radarszenen der Tracks 337 und 65, die den Zeitraum von April 1995 und Dezember 2000 abdecken. Die Abdeckung der beiden Datensätze ist im Prozessierungsbericht Nr. 1 „Abdeckung der Envisat- & ERS-Aufnahmen“ (siehe Anhang) beschrieben.

Für die PSI-Prozessierung von Envisat-ASAR-Daten im Ascending-Modus standen nicht genügend Archivaufnahmen zur Verfügung. Zur Berechnung der Bewegungsmessungen von Persistent Scatterer sind mindestens 20 bis 25 Aufnahmen des gleichen Orbits notwendig. Für einen Track, der den östlichen Teil des Untersuchungsgebietes abdeckt, waren lediglich 17 Aufnahmen verfügbar. Zur Abdeckung des Untersuchungsgebiets mit Envisat-ASAR-Daten des Descending-Modus wurden zwei Abschnitte des Tracks 337 zu je 100 x 100 km genutzt. Dieser Track deckt das Projektgebiet zu ca. 80% ab. Im östlichen Teil standen nicht genügend Aufnahmen für eine PSI-Prozessierung zur Verfügung (siehe Prozessierungsbericht Nr. 1 „Abdeckung der Envisat- & ERS-Aufnahmen“ im Anhang). Die verwendeten Daten liegen im Zeitraum Dezember 2003 bis September 2010.

#### 2.2.1.4 PSI-Datensätze

Alle Informationen zu den gelieferten PSI-Datensätzen von ERS-1/2 und Envisat-ASAR sind in den Prozessierungsberichten Nummer 2 bis 10 im Anhang aufgeführt. Tabelle 5 zeigt eine Übersicht der verwendeten Radarszenen und den erzielten PSI-Ergebnissen. Zur Übersichtsdarstellung der prozessierten PSI-Daten (Abbildung 5 bis Abbildung 6) wurden nur Daten mit einer Kohärenz größer als 0,6 ausgewählt. Zur Auswertung der Bewegungen im Projektgebiet wurden jedoch alle Daten berücksichtigt.

Tabelle 5: Übersicht der PSI-Daten von ERS-1/2 und Envisat-ASAR für das Projektgebiet.

Satellit	ERS-1/-2	ERS-1/-2	Envisat-ASAR
Orbit	Descending	Ascending	Descending
Anzahl Szenen	297	67	136
Zeitraum	April 1995 – Dezember 2000	April 1995 – Juni 2000	Dezember 2003 – September 2010
Gebietsgröße [km <sup>2</sup> ]	7.129	8.244	7.265
Anzahl PSI	1.662.832	393.524	2.638.119
Kohärenz	ab 0,45/0,50	ab 0,65/0,75	ab 0,46/0,50
Standardabweichung [mm/Jahr]	0,00 bis 0,90	0,15 bis 0,70	0,03 bis 1,00



Die Daten werden farbcodiert dargestellt. Aufgrund der Präzision von  $\pm 1$  mm/Jahr bei ERS-1/2 und Envisat-ASAR-Daten sowie der Gebietsgröße und der damit verbundenen Fehlerfortpflanzung, wird der als stabil angesehene Bereich auf  $\pm 2$  mm/Jahr festgelegt und mit grüner Farbe dargestellt. Hebungen werden mit Blautönen gekennzeichnet, Absenkungen mit gelber bis roter Farbe.

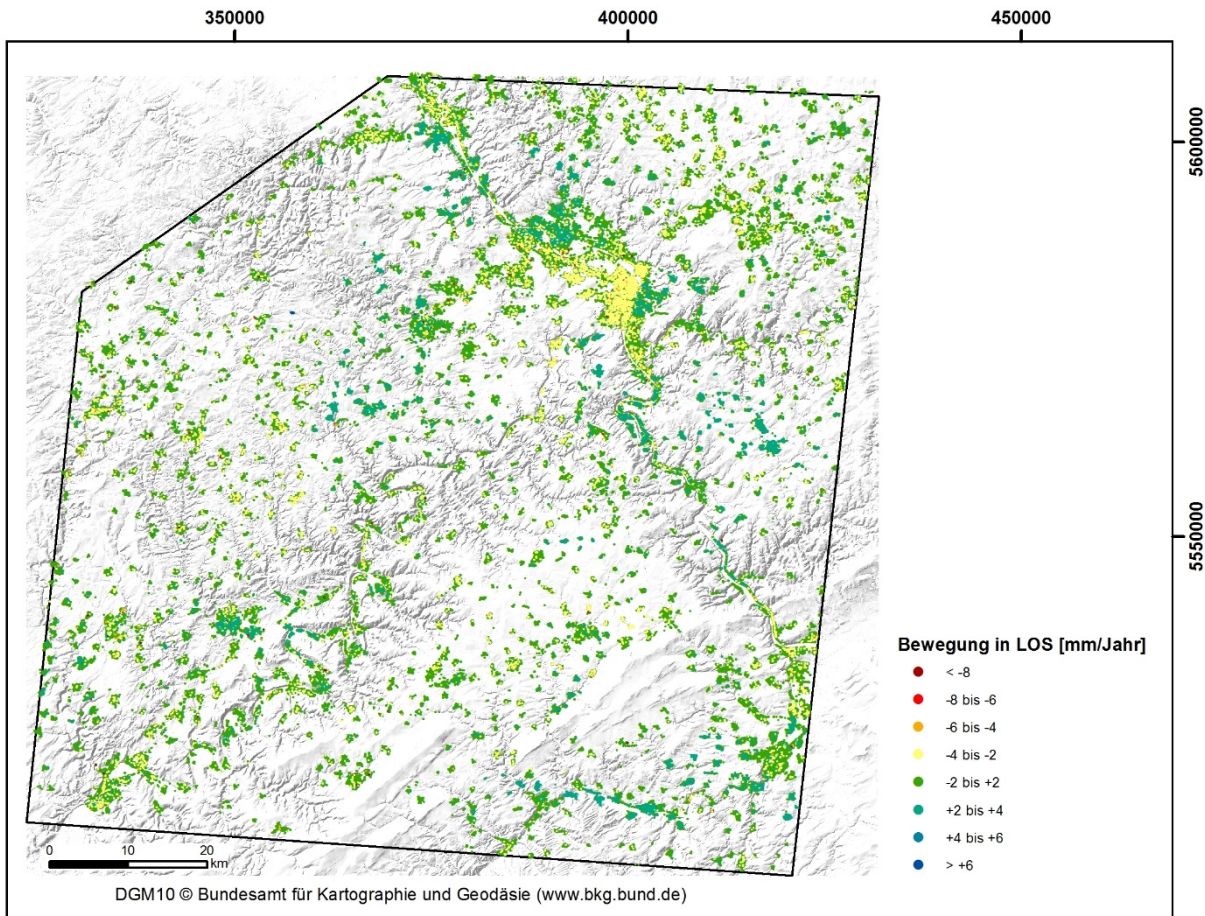


Abbildung 5: PSI-Ergebnis für den Datensatz ERS-1/-2 Descending Track 337 und Track 65 (Hintergrund: DGM10 des BKG, WGS84 UTM32N).

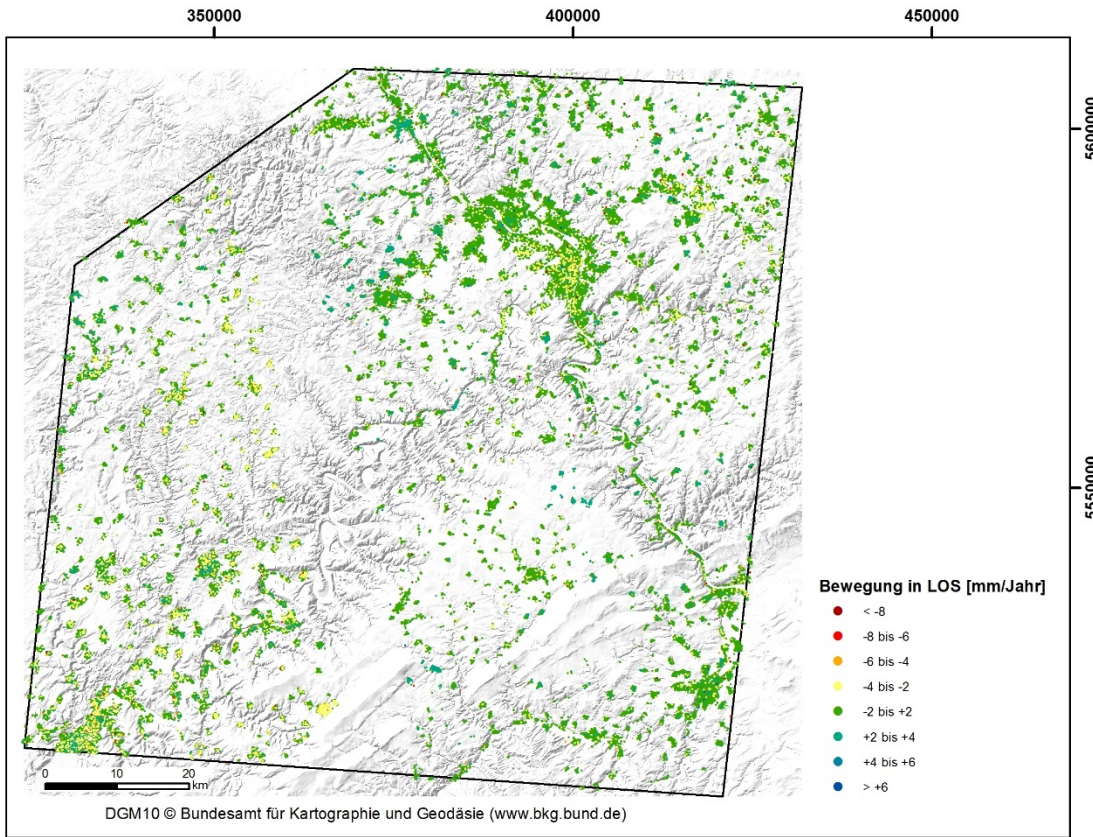


Abbildung 6: PSI-Ergebnis für den Datensatz ERS-1/-2 Ascending Track 29 und Track 487 (Hintergrund: DGM10 des BKG, WGS84 UTM32N).

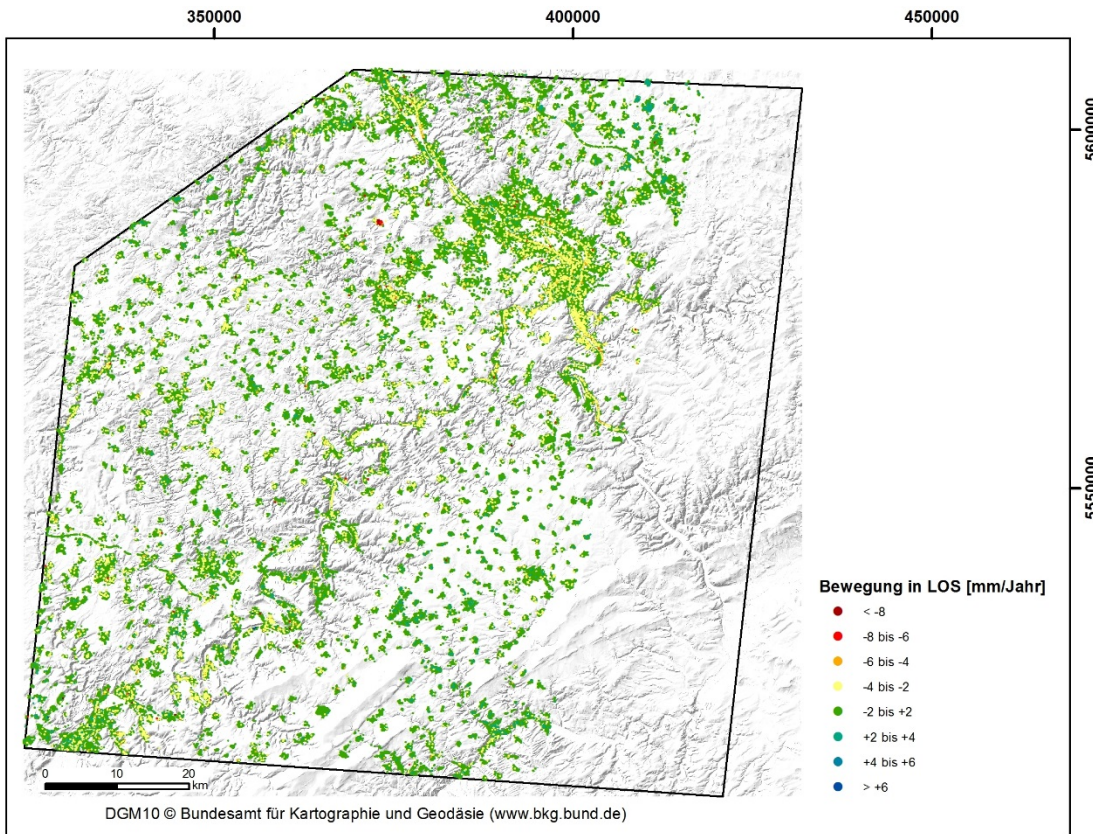


Abbildung 7: PSI-Ergebnis für den Datensatz Envisat-ASAR Descending Track 337 (Hintergrund: DGM10 des BKG, WGS84 UTM32N).

Ab dem Kohärenzwert von 0,6 weist der ERS-1/2-Descending-Datensatz ca. 770.000 PSI-Punkte auf, von denen ca. 96% im stabilen Bereich liegen. 2,2% zeigen Geländesenkungen, 2,1% Geländehebungen an. Im Ascending-Datensatz von ERS-1/2 befinden sich ca. 400.000 Punkte mit Kohärenzwerten ab 0,65 und 0,75. Knapp 97% der Daten zeigen stabiles Gelände an. Lediglich 1,2% der Punkte liegen im Bereich der Hebung mit Bewegungsraten von >2 mm/Jahr. 2,3% der Persistent Scatterer Punkte zeigen Landabsenkungen an. Im Envisat-ASAR-Datensatz befinden sich ca. 1,3 Mio. Punkte, von denen 98,5% stabil sind, 1,3% Absenkungen und nur 0,2% Hebungen anzeigen (Tabelle 6 und Abbildung 8).

Tabelle 6: Bewegungsstatistik der PSI-Daten von ERS-1/2 Descending und Ascending und Envisat-ASAR.

Datensatz	Anzahl PSI	Senkung	stabil	Hebung
ERS-1/2 Descending	767.439	16.513 (2,2%)	734.497 (95,7%)	16.429 (2,1%)
ERS-1/2 Ascending	393.074	9.075 (2,3%)	379.410 (96,5%)	4.589 (1,2%)
Envisat-ASAR	1.300.758	17.380 (1,3%)	1.281.025 (98,5%)	2.353 (0,2%)

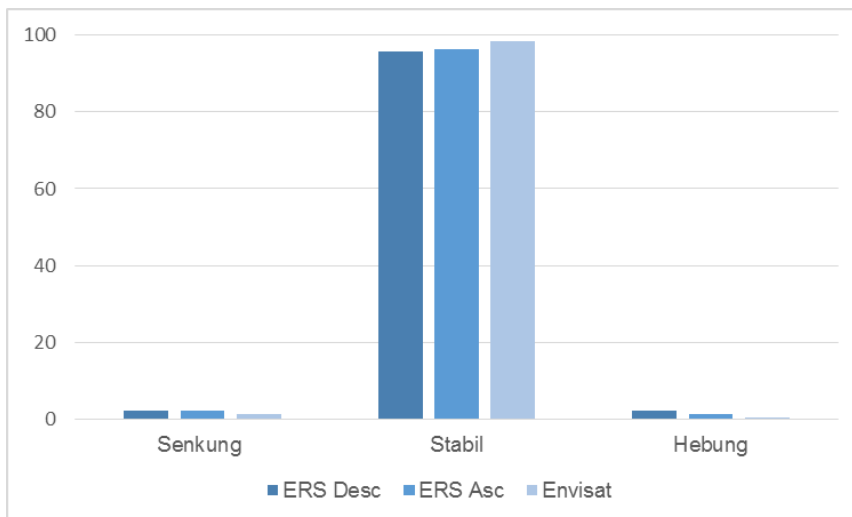


Abbildung 8: Prozentuale Verteilung der PSI-Daten nach Bewegungsrichtung (Senkung: <-2 mm/Jahr, stabil: -2 bis +2 mm/Jahr, Hebung: > 2 mm/Jahr).

### 2.2.1.5 Validierung

Das geologische Büro GeoConsult Rein wurde für die Implementierung der PSI-Daten von ERS-1/2 (Ascending und Descending) und Envisat-ASAR (Descending) in die GIS-Anwendungen des Landesamtes für Geologie und Bergbau Rheinland-Pfalz (LGB), Referat Ingenieurgeologie sowie die anschließende Validierung und integrierte Auswertung mit am LGB vorhandenen Datenbanken und Datensätzen beauftragt. Beim Datenimport sind hierbei die notwendigen Transformationen der Datensätze vorzunehmen. Die aus den PSI-Daten ermittelten Bewegungsgebiete und Bewegungsraten sind auf Plausibilität zu prüfen und zu validieren. Zu prüfen ist, ob die Lage und Ausdehnung der Bewegungsgebiete plausibel erscheinen. Für Gebiete in denen Feinnivellementdaten oder weitere Bewegungsmessungen (z.B. GPS, Inklinometer) zur Verfügung stehen, ist die Höhe der Bewegungsraten zu validieren. Zur Datenauswertung werden die Bewegungsdaten mit Inhalten der am LGB angesiedelten Datenbanken und Datensätzen gemeinsam verschnitten und analysiert. Folgende Datenbanken sind dabei zu berücksichtigen:

- Bekannte und vermutete Hangrutschungen (Rutschungsdatenbank, Hangstabilitätskarte)
- Altbergbau und bekannte Schadensereignisse (Senkungen, Fälle)
- Tektonische Störungen und Seismizität (Erdbebendatenbank)
- Feinnivellement oder weitere Bewegungsmessungen (z.B. GPS, Inklinometer)
- Vulkanologische Daten
- Daten zur Hangneigung, Hangform, Oberflächenformen etc., abgeleitet aus dem Airborne Laser Scanning (ALS) Höhenmodell
- Optional: weitere beim LGB zur Verfügung stehende Datensätze

Die Ergebnisse dieser Validierung und Datenauswertung durch das Büro GeoConsult Rein sind diesem Projektbericht angefügt (siehe Anhang).

## 2.2.2 Weitere Datensätze zur Auswertung der Geländebewegungen

Zur Auswertung der kartierten Bewegungsgebiete werden multispektrale Satellitendaten von Landsat 8, Luftbilder und topographischen Karten verwendet. Mit Hilfe dieser Daten sollen Landnutzungs- und Landbedeckungsinformationen abgeleitet- und mit den kartierten Bewegungsgebieten verschnitten werden. Tabelle 7 gibt einen Überblick über die verwendeten Satelliten- und Luftbilder sowie topographische Karten.

Tabelle 7: Übersicht der verwendeten Satelliten- und Luftbilder sowie topographische Karten.

Datensatz	Maßstab/Auflösung	Quelle
Digitale Orthophotos DOP40	Bodenauflösung 40 cm	Bundesamt für Kartographie und Geodäsie (BKG)
Topographische Karten	DTK25, DTK50, DTK100, DTK200, DTK500, DTK1000	BKG
Satellitenszene von Landsat 8 vom 27. März 2014		Earth Explorer Archive des U.S. Geological Survey

## 2.3 Ergebnisse

In diesem Kapitel werden die Ergebnisse der Bewegungskartierung dargestellt. Dabei wird zunächst auf die Ergebnisse der Bewegungskartierung und die dabei entwickelten Bewegungskategorien eingegangen, die nachfolgend näher erläutert und mit Beispielen belegt werden.

### 2.3.1 Bewegungskartierung

Für das Untersuchungsgebiet Rhein-Mosel wurden anhand der PSI-Prozessierungen der historischen ERS-1/2 und Envisat-ASAR-Satellitendaten Geländebewegungen im Maßstab 1:50.000 kartiert. Aufgrund der Vielzahl an Bewegungen im Untersuchungsgebiet wurden lediglich Geländeabsenkungen mit einer Bewegungsrate von geringer als -3 mm/Jahr berücksichtigt (Abbildung 9). Alle Shapefiles wurden INSPIRE-konform angelegt (feature type: *AbstractHazardArea*, D2.8.III.12 Data Specification on *Natural Risk Zones* – Technical Guidelines).

Im Datensatz ERS-1/2 Descending konnten 344 Bewegungen als Bewegungspolygone kartiert werden. 56 Polygone wurden anhand des Datensatzes ERS-1/2 Ascending ermittelt und 330 Polygone im Envisat-Descending-Datensatz. Insgesamt wurden somit 730 Bewegungen kartiert, die sich ergänzen oder auch teilweise überlappen oder überlagern. Da die Bewegungsgebiete auf Grundlänge von PSI-Daten unterschiedlicher zeitlicher Abschnitte kartiert wurden, die Daten teilweise auch nicht das komplette Rhein-Mosel-Gebiet abdecken und auch andere Aufnahmegeometrien aufweisen, wurden die finalen Bewegungspolygone nicht miteinander verschnitten. Zur Übersichtsdarstellung wurden die Bewegungsgebiete jedoch gemeinsam dargestellt (Abbildung 11).

### Bewegungskategorien

Die kartierten Bewegungspolygone wurden anschließend mit Landnutzungs- und Landbedeckungsinformationen aus Satellitenaufnahmen von Landsat 8, Luftbildern (DOP40, BKG) und topographischen Karten (BKG) verschnitten (Kapitel 2.2.2). Daraus abgeleitet wurden die fünf Bewegungskategorien „Steilhang“, „Bergbau“, „Straßen und Schienen“, „Industrie und Gewerbe“ und „Anlagen und Sonstiges“ festgelegt (Abbildung 10).

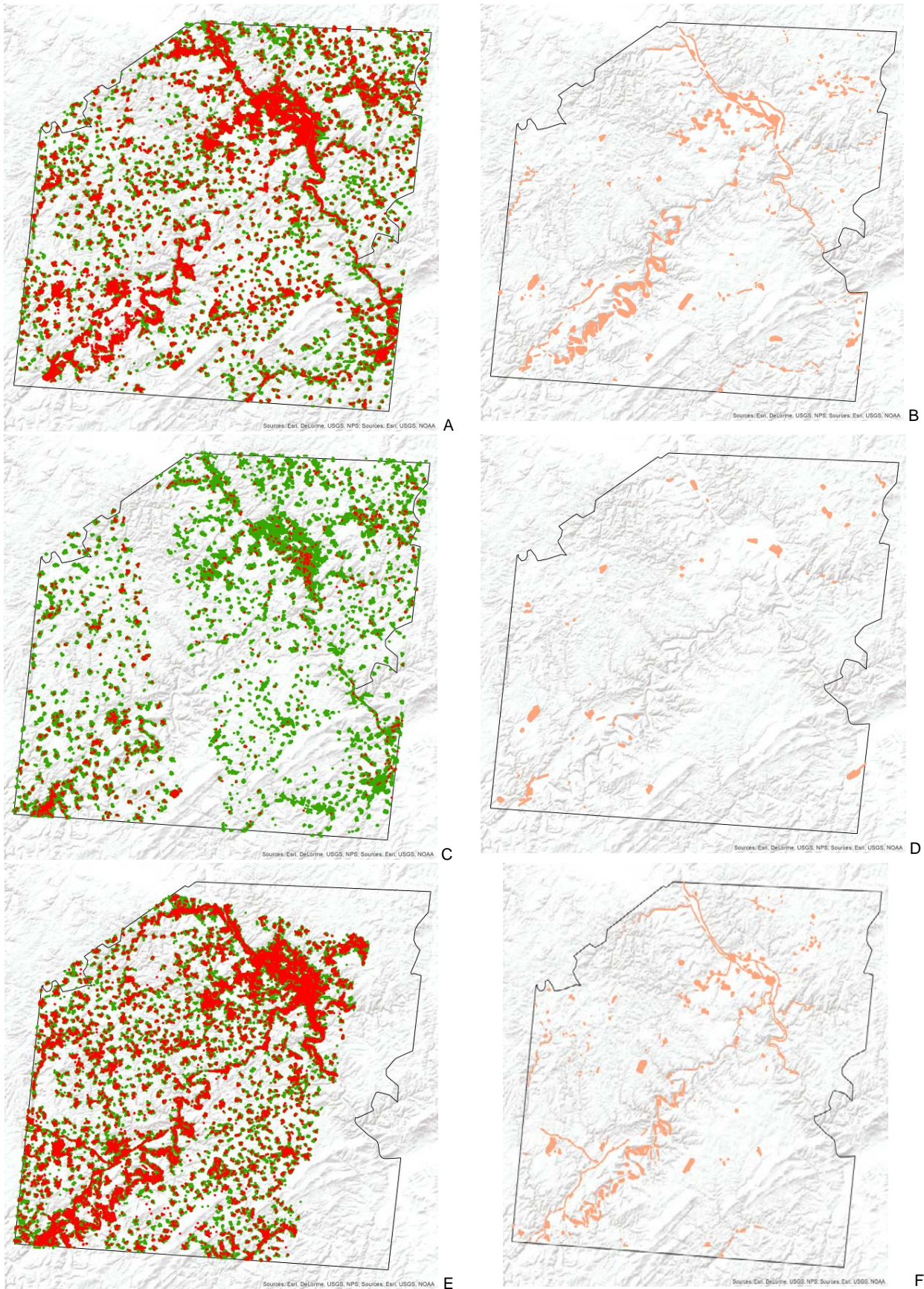


Abbildung 9: PSI-Prozessierung (linke Spalte, grün: stabile Punkte im Hintergrund, rot: Absenkungen geringer als -3 mm/Jahr) und Bewegungskartierung (rechte Spalte) für ERS-1/2 Descending-Datensatz (A und B), ERS-1/2 Ascending (C und D) und Envisat-ASAR Descending (E und F).



Abbildung 10: Beispiele für die Bewegungskategorien „Straße“ (A), „Bergbau“ (B), „Steilhang“ (C) und „Industrie und Gewerbe“ (D).

Das Ergebnis der Übersichtskartierung von Boden- und Geländebewegungen im Rhein-Mosel-Gebiet ist in Abbildung 11 dargestellt. Die Abbildung enthält die identifizierten Bewegungsgebiete aller verwendeten PSI-Datensätze. Die Verteilung der Bewegungspolygone auf die einzelnen Bewegungskategorien ist in Tabelle 8 und Abbildung 12 abgebildet.

Tabelle 8: Verteilung der Bewegungspolygone auf die Bewegungskategorien.

Datensatz	Steilhang	Bergbau	Straßen und Schienen	Industrie und Gewerbe	Anlagen und Sonstiges
ERS-1/-2 Descending	58	36	111	120	19
ERS-1/2 Ascending	3	5	23	23	2
Envisat-ASAR Descending	77	44	115	73	21



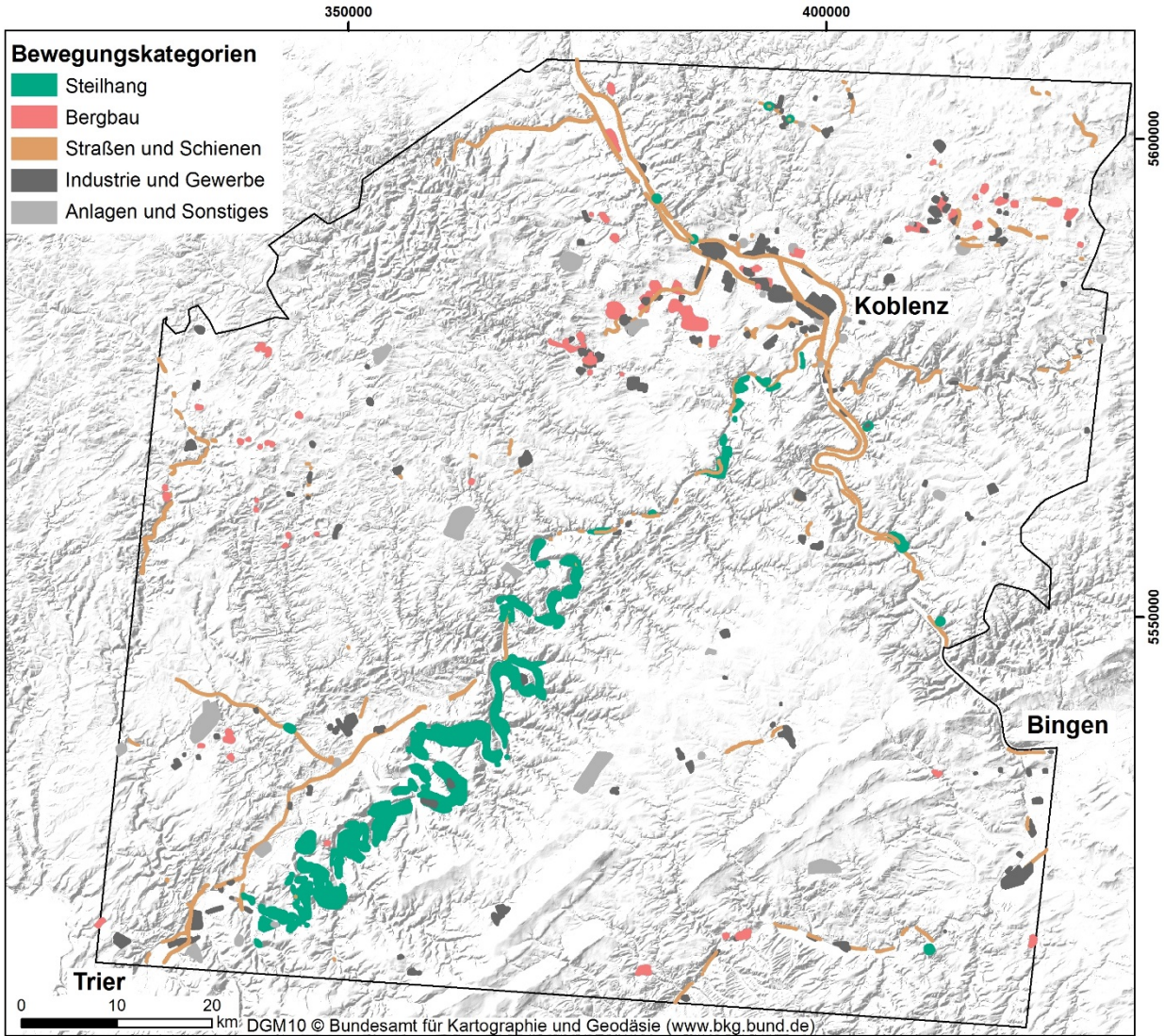


Abbildung 11: Ergebniskarte der Bewegungskartierung.

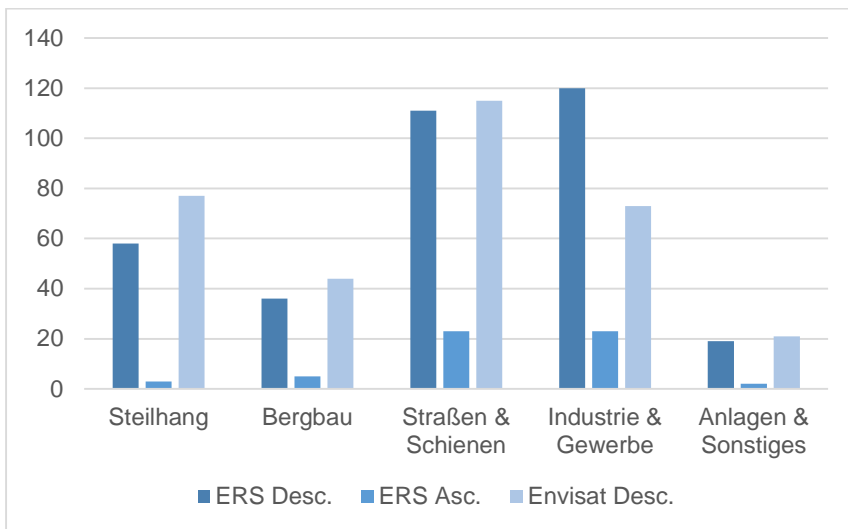


Abbildung 12: Anzahl der Bewegungspolygone nach Bewegungskategorie.

## Kategorie Steilhang

In der Kategorie „Steilhang“ wurden 138 Bewegungsgebiete kartiert. Die Geländebewegungen kommen vor allem entlang des Rheins und der Mosel vor (Abbildung 13). Am Rhein konnten Bewegungen bei Rheinbrohl, Leutersdorf, Braubach, Wellmich und Kaub festgestellt werden. In Kaub bewegt sich ein Hangbereich mit ca. -17 mm/Jahr im Zeitraum April 1995 bis Dezember 2000 abgeleitet aus ERS-1/2 Descending-Daten (Abbildung 14). Vermutlich handelt es sich hierbei um eine alte Halde vom Schieferbergbau. Die Bewegung könnte durch nachträgliche Kompaktion einer nicht verdichteten Halde, Instabilitäten im Untergrund oder Suffosion verursacht werden.

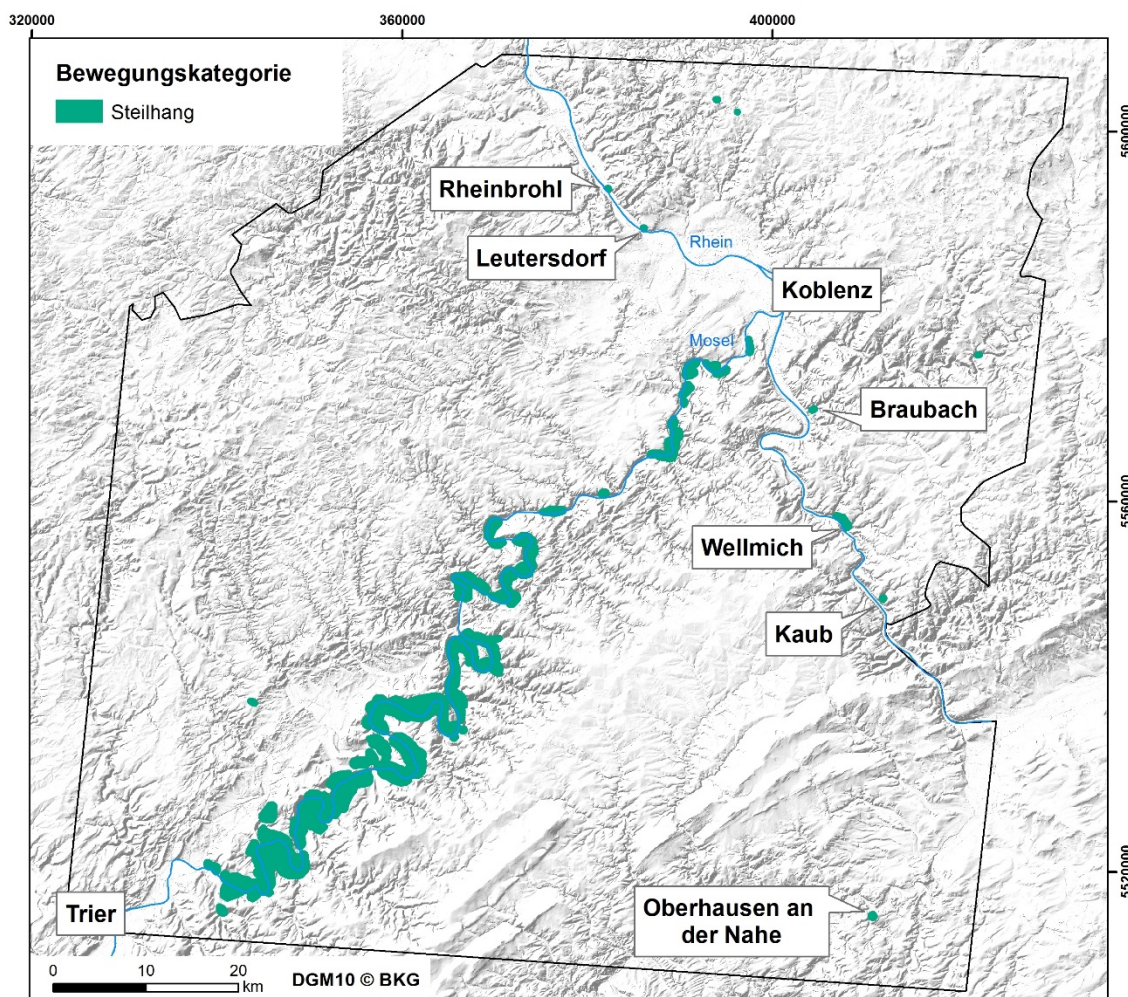


Abbildung 13: Bewegungskategorie „Steilhang“: Hangbewegungen treten vor allem entlang des Rheins und der Mosel auf (Hintergrund: DGM10, BKG, WGS84 UTM32N).

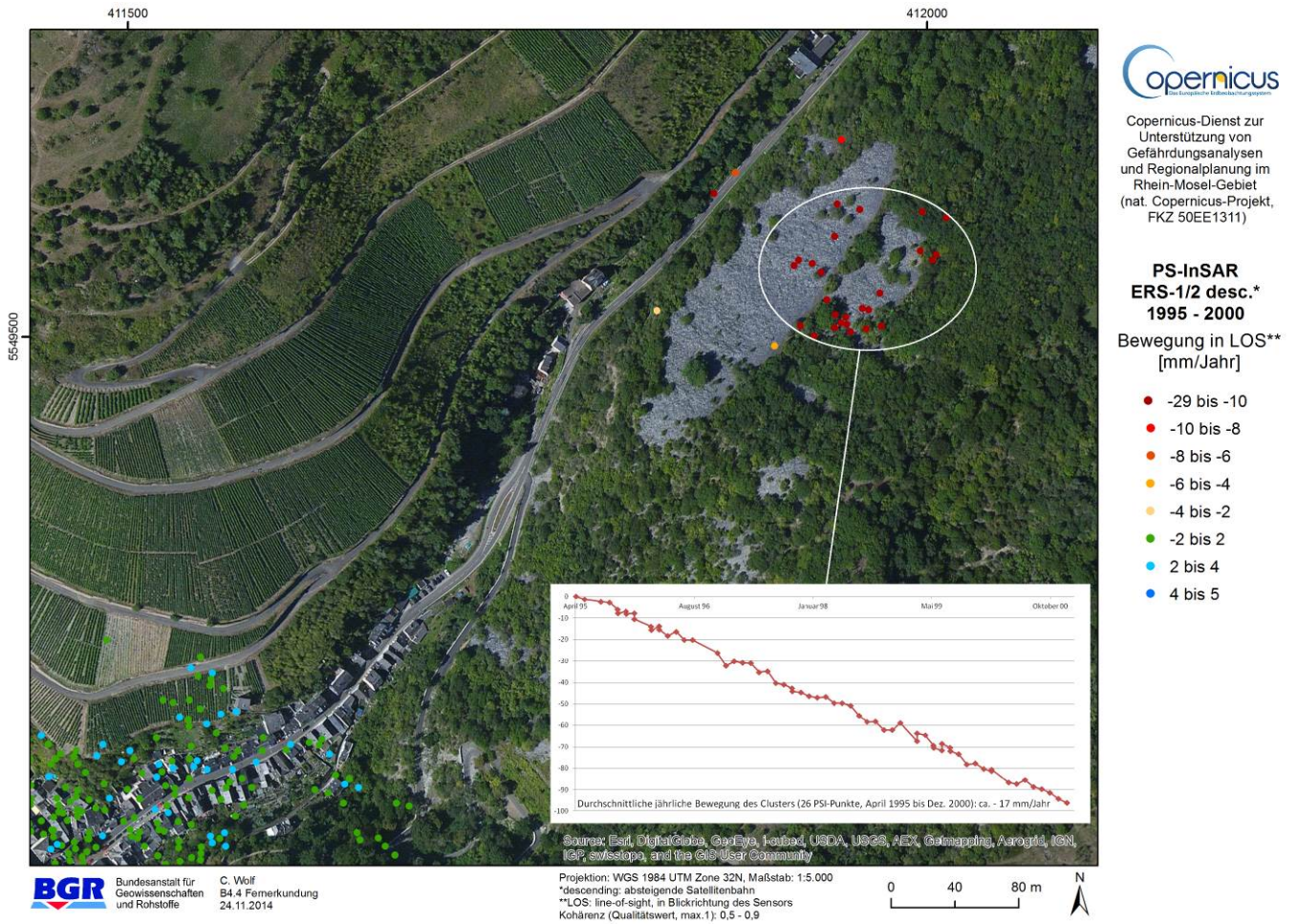


Abbildung 14: PSI-Daten mit Zeitreihe für einen Hangbereich bei Kaub.

In der Region Hunsrück/Nahe bewegt sich ein Hang bei Oberhausen an der Nahe. Die Bewegungsrate beträgt ca. -20 mm/Jahr für den Zeitraum 1995 bis 2000, ermittelt aus ERS-1/2 Descending-Daten. Die Zeitserie für ein Bewegungsgebiet mit 18 PSI-Punkten zeigt eine durchschnittliche jährliche Absenkung von 18 mm/Jahr von April 1995 bis Dezember 2000 (Abbildung 15). Für diesen Hangbereich weist die Rutschungsdatenbank von Rheinland-Pfalz drei Rutschungen sowie einen Steinschlag aus für 1982 (1 km<sup>2</sup>-Kachel). Auch in diesem Fall handelt es sich vermutlich um eine alte Halde des Schieferbergbaus, die sich durch Kompaktion oder Erosion bewegt.

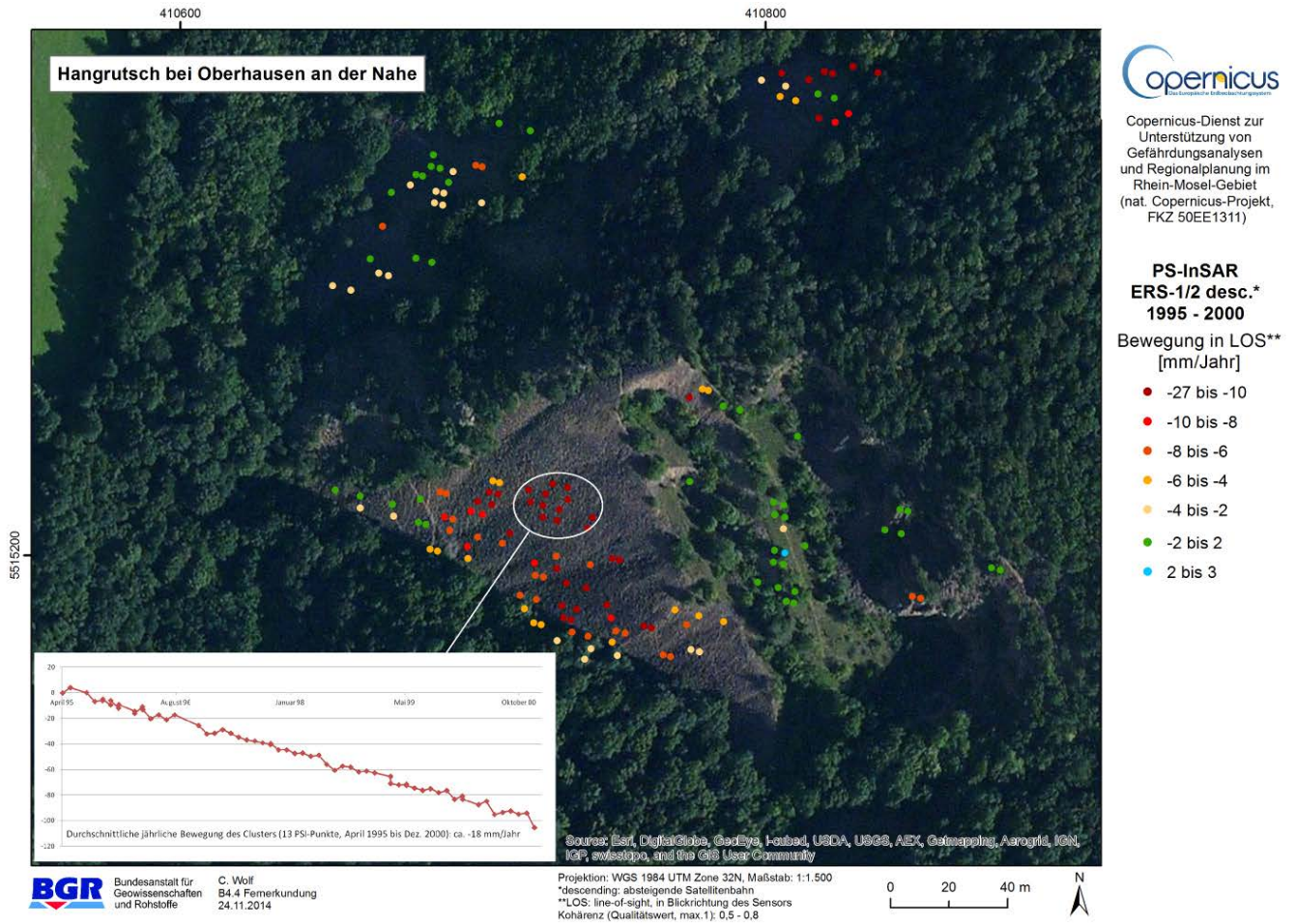


Abbildung 15: PSI-Daten mit Zeitreihe im Hangbereich bei Oberhausen an der Nahe.

Entlang der Mittel- und Untermosel zwischen Trier und Koblenz treten zahlreiche Geländebewegungen an den Talhängen auf. Beispielsweise kommen an einem Hang bei Trittenheim stärkere Bewegungen vor (Abbildung 16). Da die Bewegungen in Blickrichtung des Sensors gemessen wurden, kann es sich hierbei sowohl um horizontale Bewegungen als auch um Absenkungen handeln oder generell um eine hangabwärts gerichtete Bewegung. Die PSI-Daten wurden von dem Datensatz Envisat Descending Track 337 (2003 bis 2010, Blickrichtung nach Westen) abgeleitet. Die ca. 300 Messwerte am Hangbereich liegen zwischen -0,1 und ca. -30 mm/Jahr. Der Mittelwert der Geschwindigkeiten beträgt ca. -5 mm/Jahr. Vier PSI-Punkte weisen stärkere Bewegungen bis ca. -30 mm/Jahr auf, jedoch sind die Kohärenzwerte sehr gering. Die Punkte müssen daher individuell überprüft werden.

In der Hangstabilitätskarte 1:50.000 des LGB wurde dieser Bereich als nachgewiesenes Rutschgebiet und Gebiete mit Steinschlaggefährdungen ausgewiesen. Im Bereich der Moselbrücke Trittenheim wurde eine Kriechgeschwindigkeit von ca. 1 cm/Jahr festgestellt, die beim Bau der Brückenpfeiler berücksichtigt werden musste (Dürrewang, 2008, Abbildung 17).

Die Ursache für das Vorkommen relativ vieler Reflektoren (PS) am Hang ist höchstwahrscheinlich in den dort vorkommenden Metallgeländern begründet (Abbildung 18). Vor Ort sind einige Straßenschäden bemerkbar, die eventuell mit Bewegungen des Hanges korrelieren könnten (Abbildung 19).

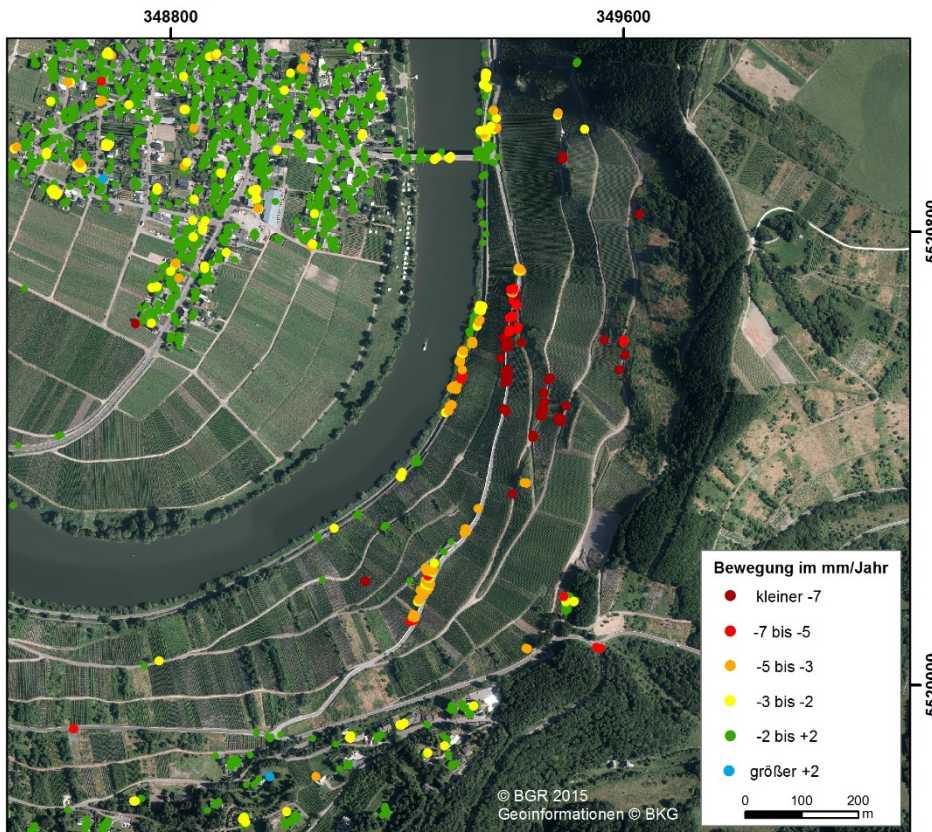


Abbildung 16: PSI-Daten an einem Hang bei Trittenheim (Envisat Descending, 2003 bis 2010, Hintergrund: DOP40 BKG, WGS84 UTM32N).

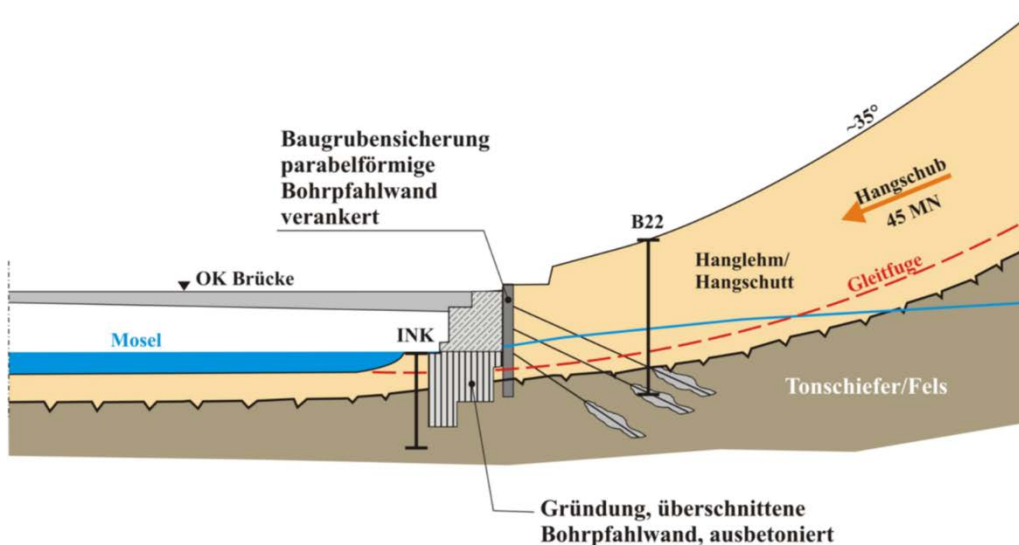


Abbildung 17: Abschirmung der Brückenpfeiler am Fuß des großen Rutschhanges (Dürrwang 2008).



Abbildung 18: Metallgeländer und Steinmauern prägen den Weinberghang bei Trittenheim (Fotos: C. Wolf, April 2015).



Abbildung 19: Straßenschäden im Weinberg (Foto: C. Wolf, April 2015).

### **Kategorie Bergbau**

Die 85 Bewegungen in der Kategorie „Bergbau“ wurden mit der Übersichtskarte der oberflächennahen Rohstoffe in Rheinland-Pfalz verschnitten (siehe Abbildung 20 und Abbildung 21). Es zeigt sich, dass mit 59% die Mehrheit der Bewegungspolygone in Gebieten vulkanischer Fest- und Lockergesteine vorkommt. Jeweils 16% kommen im Bereich Vulkanischer Festgesteine, Ton und Kaolin sowie im Bereich von Kies/Sand und Quarzkies/Quarzsand vor. Die restlichen 9% werden von Dachschiefer sowie Kalkstein und Mergelstein eingenommen.

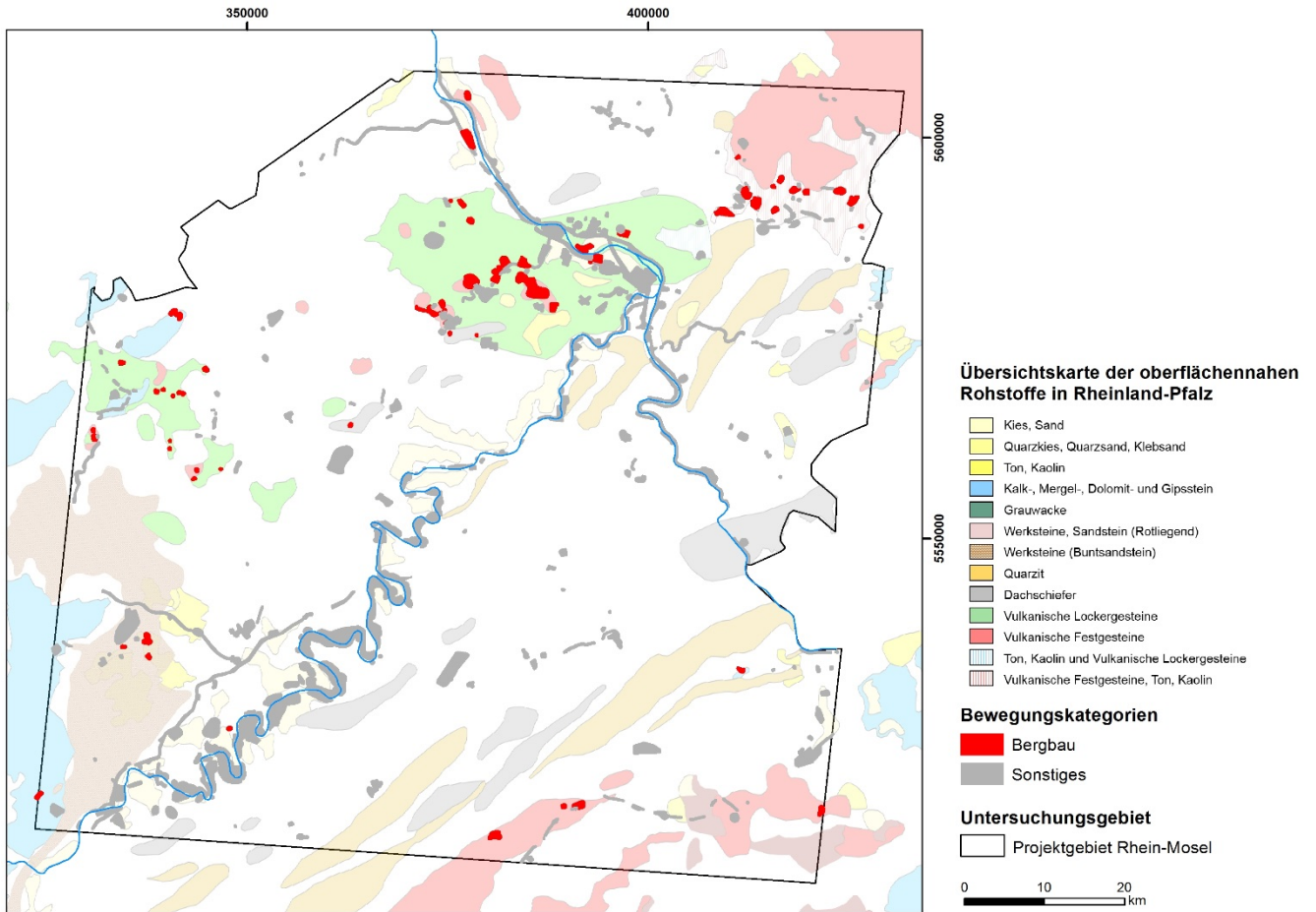


Abbildung 20: Vergleich der Bewegungskategorie „Bergbau“ mit der Übersichtskarte der oberflächennahen Rohstoffe in Rheinland-Pfalz (WGS84 UTM32N).

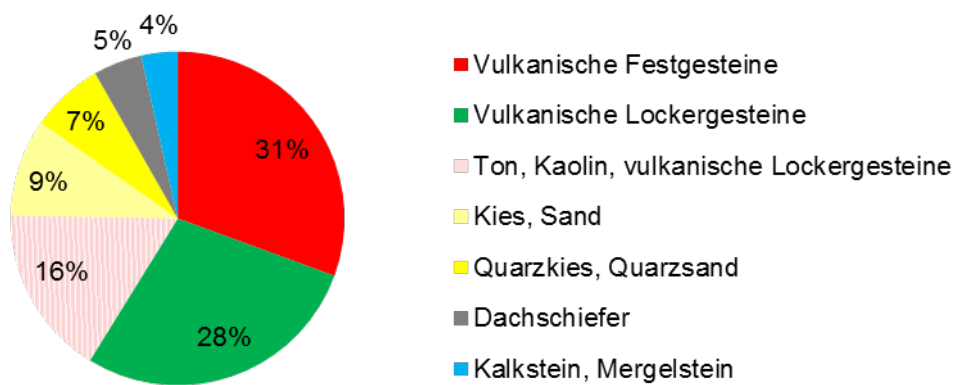


Abbildung 21 : Verteilung der Bewegungsklassen „Bergbau“ auf das Vorkommen oberflächennaher Rohstoffe in Rheinland-Pfalz.



## Kategorie Straßen und Schienen

In der Bewegungskategorie „Straßen und Schienen“ wurden 249 Bewegungspolygone erfasst. Die Mehrheit der Bewegungen konnte an der Bahnstrecke entlang des Rheins, sowie von Trier nach Koblenz festgestellt werden. Ein Abschnitt der Europastraße 42 ist ebenfalls gut erkennbar. Höchstwahrscheinlich werden die Bewegungen durch Erschütterungen des Verkehrs und Kompaktion von Gleisbetten verursacht.

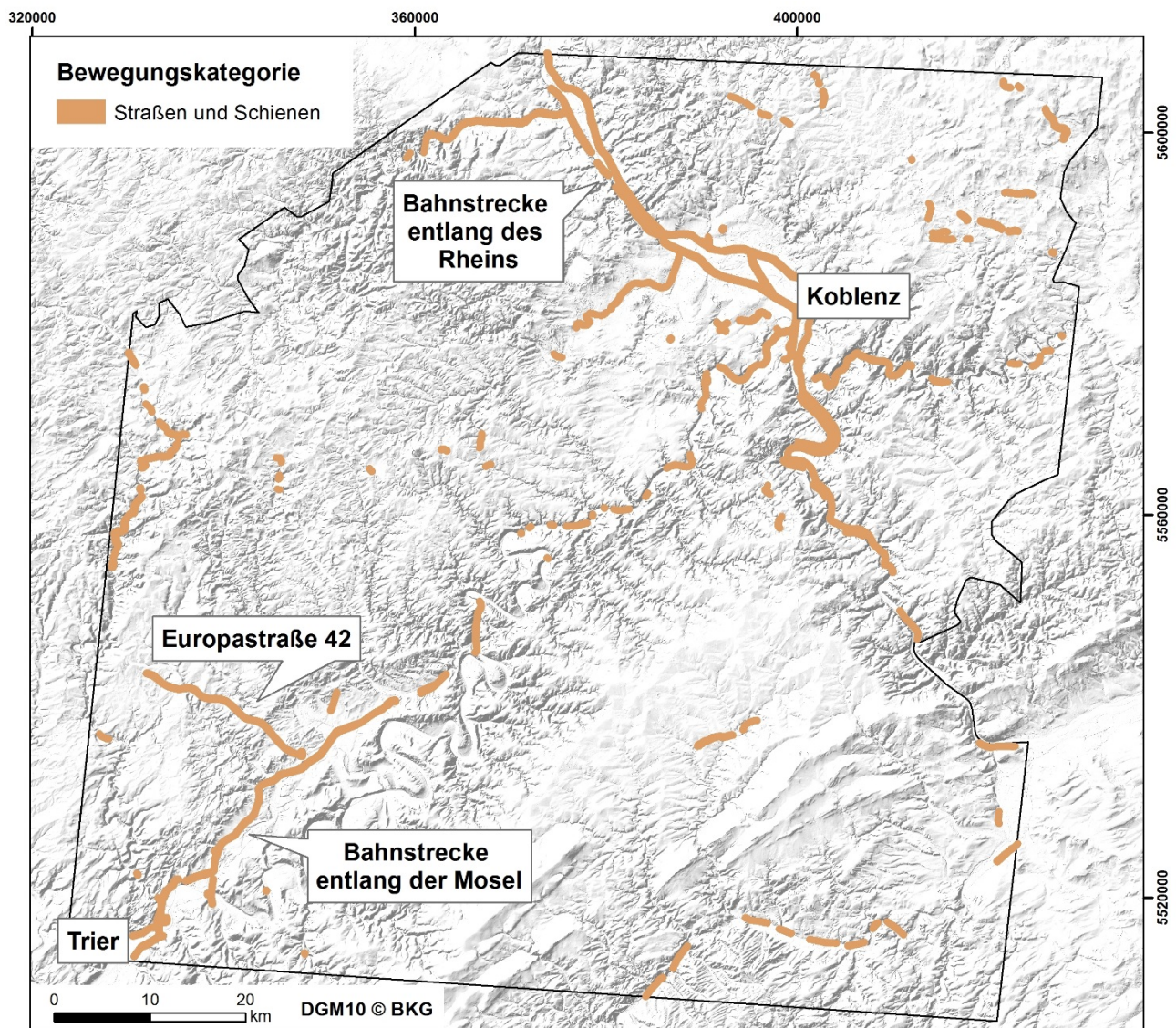


Abbildung 22: Bewegungskategorie „Straßen und Schienen“ (Hintergrund: DGM10, BKG, WGS84 UTM32N).

## Kategorie Industrie und Gewerbe

In der Bewegungskategorie „Industrie und Gewerbe“ wurden 216 Bewegungspolygone erfasst. Zum Beispiel können die Industriegebiete Rheinhafen in Koblenz, in Wittlich und Bad Kreuznach sehr gut detektiert werden (Abbildung 23). Industrie- und Gewerbegebiete bieten mit Gebäudekomplexen, Lagerhallen und elektrischen Anlagen ideale Bedingungen für die Reflexion des Radarsignals. Daher ist hier eine hohe Dichte von Persistent Scatterer und somit viele Bewegungsmessungen verfügbar. Vermutlich werden die Absenkungen durch Lastenveränderungen, z.B. durch Be- und Entlastungen von Lagerhallen in Industriegebieten, Bodenverdichtungen oder Gebäudesetzungen durch hohe Auflast verursacht.

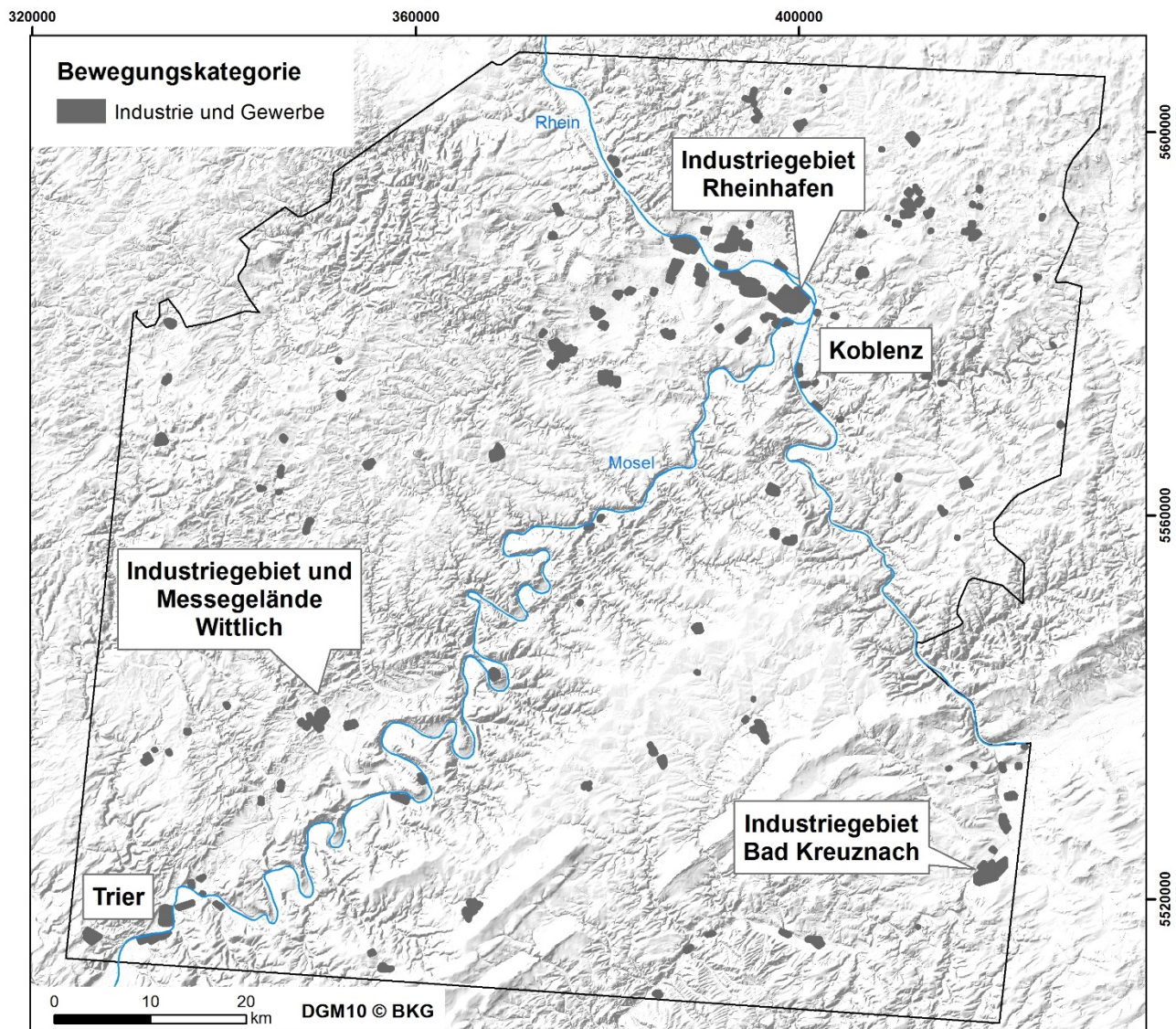


Abbildung 23: Bewegungskategorie „Industrie und Gewerbe“ (Hintergrund: DGM10, BKG, WGS84 UTM32N).

## Kategorie Anlagen und Sonstiges

In der Kategorie „Anlagen und Sonstiges“ werden Bewegungen von Deponien, Freizeitanlagen, Kasernen und Flugplätzen zusammengefasst. Des Weiteren werden Bewegungen unbekannter Ursache und ohne eindeutige Zuordnung zu Landnutzungs- oder Landbedeckungsklassen mit aufgeführt. Insgesamt beinhaltet die Kategorie 42 Bewegungspolygone (siehe Abbildung 24). Gut erkennbar sind beispielsweise die Flugplätze Büchel und Spangdahlem sowie der Flughafen Frankfurt-Hahn.

Eine bisher unbekante Bewegung konnte im Bereich der Ortsgemeinde Wehr in der Osteifel detektiert werden (siehe Abbildung 25). Die maximale Absenkung beträgt ca. 28 mm/Jahr. Die Ursache dieser Geländeabsenkung ist Gegenstand weiterer Untersuchungen.

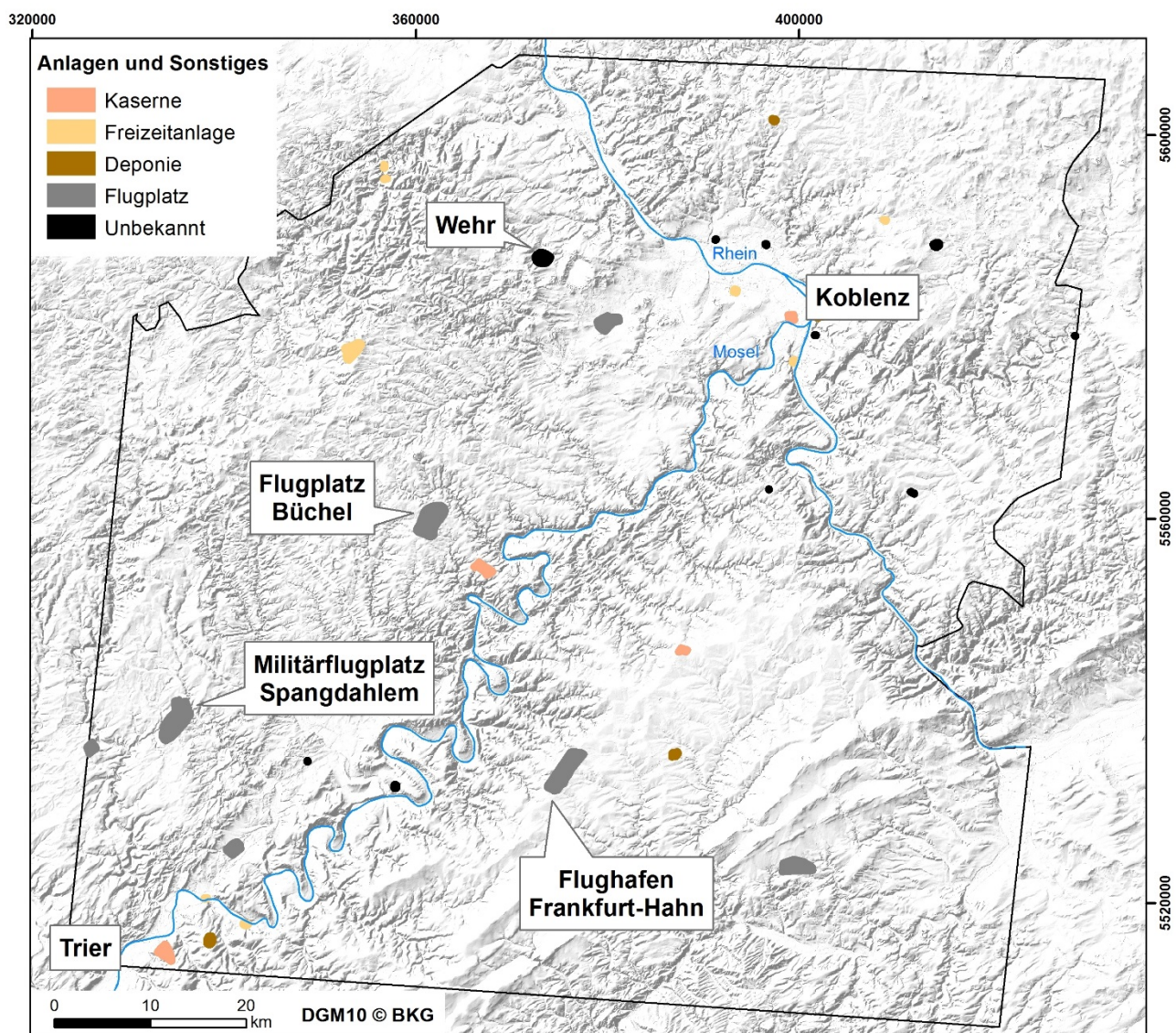


Abbildung 24: Die Bewegungskategorie „Anlagen und Sonstiges“ beinhaltet die Unterkategorien Kaserne, Freizeitanlage, Deponie, Flugplatz und Unbekannt (Hintergrund: DGM10, BKG, WGS84 UTM32N).



Copernicus-Dienst zur  
Unterstützung von  
Gefährdungsanalysen  
und Regionalplanung im  
Rhein-Mosel-Gebiet  
(nat. Copernicus-Projekt,  
FKZ 50EE1311)

**PS-InSAR  
Envisat ASAR desc.\*  
2003 - 2010**

Bewegung in LOS\*\*  
[mm/Jahr]

- -28 bis -10
- -10 bis -8
- -8 bis -6
- -6 bis -4
- -4 bis -2
- -2 bis 2

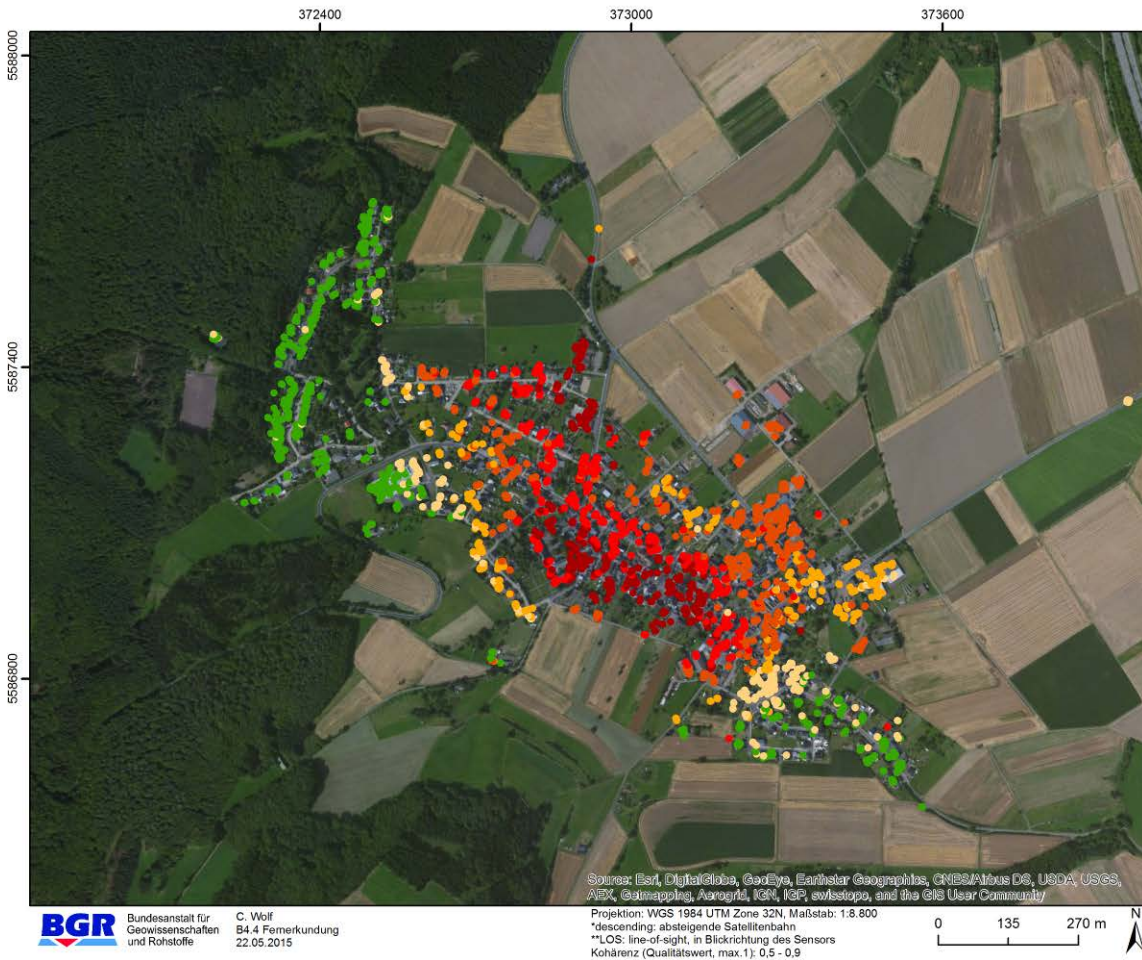


Abbildung 25: Geländeabsenkung in Wehr in der Osteifel.

### 3 Detailgebiete

Zur Detailanalyse von Geländebewegungen wurden zwei Detailgebiete ausgewählt, in denen Hangrutschgefährdungen bzw. Senkungs- und Einsturzgefährdungen auftreten. Die Kriterien zur Auswahl der Gebiete sowie deren Charakterisierung werden nachfolgend beschrieben. Die Bewegungsanalyse in größeren Maßstäben erfolgt unter Verwendung der Persistent Scatterer Interferometrie und Small Baseline Subset basierend auf hochauflösenden TerraSAR-X-Daten. Die verwendeten Daten sowie weitere angewandten Methoden werden betrachtet und die jeweiligen Ergebnisse für die Detailgebiete vorgestellt.

#### 3.1 Auswahl und Charakterisierung der Detailgebiete

Für gezielte Untersuchungen in größeren Maßstäben wurden zwei Gebiete ausgewählt, die bei der Übersichtskartierung von Geländebewegungen im Projektgebiet Rhein-Mosel auffällige Bewegungen aufwiesen. Zudem stehen sie aufgrund ihres geologischen Hintergrundes im besonderen Fokus der behördlichen Gefährdungsanalysen in Rheinland-Pfalz.

Zum einen handelt es sich um die **Altbergbauggebiete Mendig und Mayen** in der Osteifel, die potentielle Senkungs- und Einsturzgefährdungen aufweisen. Geophysikalische Untersuchungen lieferten bisher keine zufriedenstellenden Ergebnisse zur Detektion unbekannter Hohlräumebereiche. Daher soll in der Detailuntersuchung analysiert werden, inwieweit Fernerkundungsdaten einen Beitrag zum Auffinden der Hohlräumebereiche und Gefährdungssituationen liefern können.

Das zweite Detailgebiet befindet sich an der **Mosel zwischen Cochem und Bernkastel-Kues**. Dieser Abschnitt der Mosel weist zahlreiche nachgewiesene Hangrutschbereiche auf, deren Aktivität mit Hilfe von Fernerkundungsdaten analysiert werden sollen. Zudem stehen für einige Hangbereiche weitere Messdaten, wie zum Beispiel Inklinometer- und GPS-Messungen, zur Validierung der PSI- und SBAS-Bewegungsdaten zur Verfügung.

### 3.1.1 Altbergbaugebiete Mendig und Mayen in der Osteifel

Das Gebiet zur Detailuntersuchung befindet sich ca. 20 km westlich von Koblenz und umfasst die Ortschaften Mendig und Mayen in der Osteifel (Abbildung 26). Die Gebietsgröße beträgt ca. 154 km<sup>2</sup> und ist durch Ablagerungen des quartären Vulkanismus gekennzeichnet (Abbildung 27).

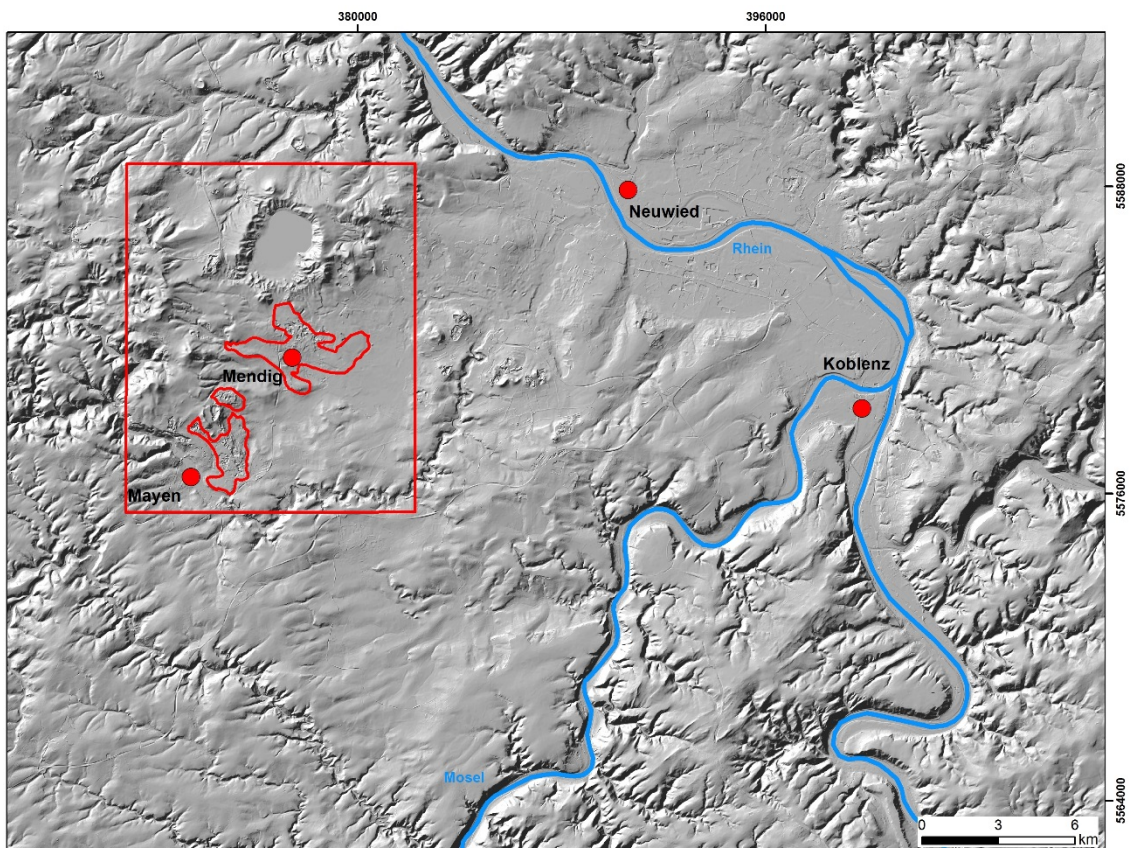


Abbildung 26: Lage des Untersuchungsgebietes in der Osteifel mit Lavaströmen von Mendig und Mayen (rote Polygone), abgeleitet aus der Vulkanologischen Karte der Osteifel (Hintergrund: geschummertes Relief von DGM10 (BKG, WGS84 UTM32N)).

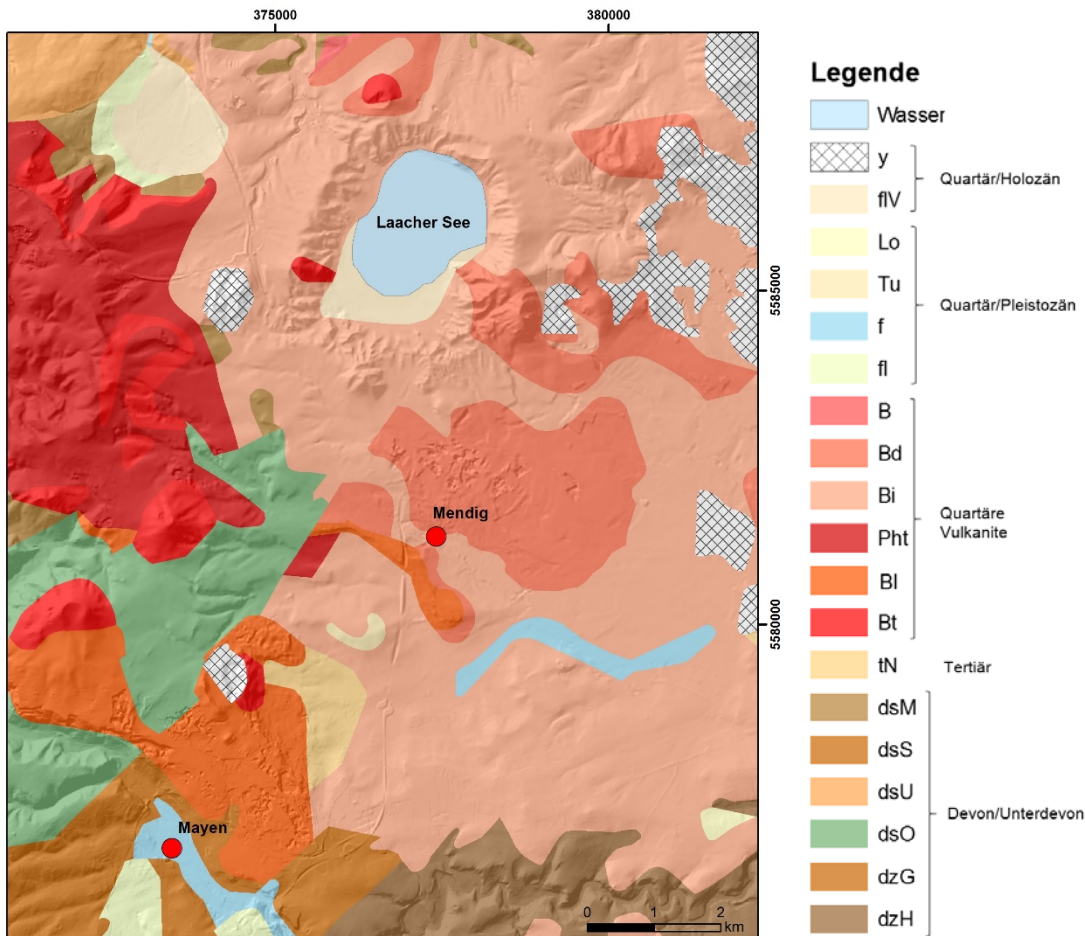


Abbildung 27: Geologie im Untersuchungsgebiet Mendig/Mayen (abgeleitet aus der GUEK300 (LGB), über geschummertem Relief (DGM10, BKG, WGS84 UTM32N).

## Mendig

In der Stadt Mendig in der Osteifel bedeckt der „Obere Niedermendiger Basaltstrom“ (siehe Signatur „Bd“ in Abbildung 27) ca. 40% der Gemarkungsfläche des Ortsteils Niedermendig. Dieser zwischen 15 und 25 m mächtige basaltische Lavastrom floss vor ca. 200.000 Jahren aus. Geochemisch handelt es sich dabei um Tephrit, historisch hat sich jedoch die Bezeichnung Basalt eingebürgert und wird daher beibehalten. Seit dem Mittelalter (die früheste Datierung ist bis ins 10. Jahrhundert möglich) bis etwa 1964 wurde der Basalt untertägig abgebaut, da er aufgrund seiner Porosität von ca. 15 bis 29 Vol-% und guter Bearbeitbarkeit für die Herstellung hochwertiger Mühlsteine besonders geeignet war. Bis ins 20. Jahrhundert wurden die Mühlsteine weltweit vertrieben. Aufgrund einer hohen Überdeckung aus einer ca. 2 Meter mächtigen Lössschicht und etwa 10 bis 20 Meter mächtigen Deckschicht aus Bims (Abbildung 28, Abbildung 29) erfolgte die Basaltgewinnung im Untertagebau. Im 20. Jahrhundert erfolgte der Abbau in zahlreichen Tagebauen, von denen im Jahr 2002 nur noch 6 in Betrieb waren. Der Basalt wurde hauptsächlich zur Herstellung von Werksteinen und als Korngemisch und Schüttgut verwendet (Wehinger, 2004, Pohl 2012).

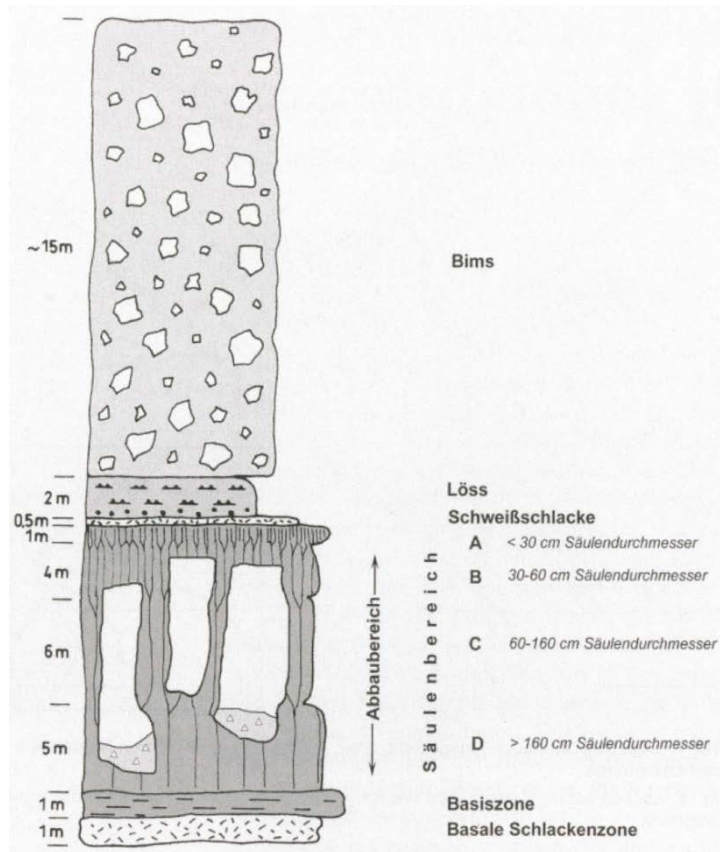


Abbildung 28: Geologisches Vertikalprofil des Oberen Niedermendig Basaltstroms (Rogall 2002).



Abbildung 29: Vertikalprofil im Gelände am Rand eines Tagebaus in Mendig (Foto: C. Wolf, September 2014).



Der untertägige Abbau erfolgte über ca. 15 Meter tiefe Schächte mit Durchmessern von 5 bis 8 Metern. Die Abbaukammern sind durchschnittlich 4 Meter hoch, wobei auch Höhen von über 10 Metern vorkommen. Die Firste der Kammern wurden durch Pfeiler abgestützt, die alle 6 bis 8 Meter stehen gelassen wurden. Die Pfeilerquerschnitte sind sehr unregelmäßig und reichen von wenigen Dezimetern bis zu 5 Metern. Zur Sicherung wurden zusätzlich Holzbalken, Holzkeile, Eisenbolzen und metallische Umgürtungen eingesetzt sowie künstlich Stützpfiler aus alten Mühlsteinen oder Ziegelsteinen errichtet. Diese Sicherungen sind jedoch durch Verrottung und Verrostung meist in schlechten Zuständen und die Basaltpfiler weisen aufgrund von Überbelastung Spalt- und Scherbrüche auf. Über Tage stattfindender Bimsabbau und anschließende Geländeauffüllungen führen zu langfristigen Lastenänderungen und zu Umlagerung der Gebirgsspannungen, was zu starken Schäden an den Stützpfilern und Hohlräumfirsten und vereinzelt zu Tagesbrüchen führt. Zum Beispiel ereignete sich im März 1988 am Sportplatz von Niedermendig ein größerer Tagesbruch mit einem Durchmesser von mehr als 10 Metern (Rogall & Broman, 2009, Pohl 2012, Abbildung 30).



Abbildung 30: Tagesbruch am Sportplatz von Niedermendig (Rogall & Broman 2009).

In Folge des Tagesbruches sowie im Zuge des geplanten Ausbaus der Landstraße in Mendig führte das Geologische Landesamt Rheinland-Pfalz zwischen 1991 und 1995 eine ingenieurgeologische Kartierung im Bereich der beiden Hauptdurchgangsstraßen in Mendig (jeweils 100 Meter breite Abschnitte entlang der Brauerstraße und der Landstraße L113) durch. Von insgesamt 193 aufgenommenen Hohlräumen wiesen 37 hohe- und 9 eine sehr hohe Gefährdung bezüglich ihrer Standsicherheit auf. Zur Sicherung der Straße gegen mögliche Tagesbrüche wurde ein Geotextil unter der Fahrbahn verlegt. Zum Monitoring der Verformungen während des Straßenbaus wurden 146 Felsspione an den Klüften und Spalten installiert (Rogall & Broman, 2009).

Für drei Hohlraumbereiche unterhalb der Brauerstraße, die sehr hohe Einsturzgefährdungen aufwiesen, wurden Sanierungsmaßnahmen durchgeführt. Hierzu wurden zwei Hohlraumbereiche verfüllt und in einem weiteren Hohlraum zur Stützung eines geschwächten Restpfeilers zwei zusätzlichen Bullflex-Gewebe-Stützpfiler errichtet (Rogall, 2002. Beispiele siehe Abbildung 31 und Abbildung 32).



Abbildung 31: Schwer beschädigte Basaltpfiler mit Messmarkierungen (Foto: C. Wolf, Februar 2014).



Abbildung 32: Ein schwer beschädigte Basaltpfeiler mit Messmarkierungen wird durch zwei Bullflexpfeiler unterstützt (Foto: C. Wolf, Februar 2014).

Zur Detektion weiterer unterirdischer Hohlräume wurden vom Landesamt für Geologie und Bergbau Rheinland-Pfalz zahlreiche weitere Maßnahmen geplant und durchgeführt (Rogall & Wehinger, 2011):

- Vermessung 3D-Laser-Scanning: Erstellung einer 2-dimensionalen Karte
- Geotechnische Aufnahme: Erfassungsbögen
- Fotodokumentation
- Geophysik: Geoelektrik, Magnetik, Gravimetrie, Seismik: erste Ergebnisse nicht befriedigend
- Rechnerische Modellierung FEM Finite Element Modell: vereinfachte Randbedingungen mit ersten Ergebnissen, Weiterentwicklung und Verfeinerung sinnvoll
- Gefährdungsmatrix von Pfeilern: Aufnahme aller Elemente, die die Stabilität der Pfeiler beeinflussen, Einstufung in eine Gefährdungsklasse (siehe auch Amstutz et al. 2013)
- Gefahrenkarten: aus Hohlraumkarte und Firstkarte (siehe auch Amstutz et al. 2014)

Aufgrund unbefriedigender Ergebnisse zur Detektion unbekannter Hohlräume und zur Beurteilung möglicher Senkungs- und Einsturzgefährdungen wurden nun radarinterferometrische Bewegungsmessungen eingesetzt.

## Mayen

Beim Ausbruch des Bellerberg-Vulkansystems zwischen Ettringen, Kottenheim und Mayen (Abbildung 33) vor ca. 200.000 Jahren wurden zunächst Schlackenwälle mit mehreren Ausbruchsschloten gebildet. Im Laufe der vulkanischen Aktivität entstanden die Flanken des Vulkans, im Westen der Ettringer Bellerberg und im Osten der Kottenheimer Büden. Die nach Norden und Süden geöffneten Schlackenwälle ließen die Lava nach Norden, Westen und Süden ausströmen. Der nördliche Winfeld-Lavastrom bildete das Kottenheimer Winfeld, die südlichen Lavaströme von Ettringen und Mayen vereinigten sich und bildeten das Ettringer Lay und das Mayener Grubenfeld. Der Mayener Lavastrom ist ca. 3,5 km lang und wird von Löß und Bimstufen mit einer Mächtigkeit von 4 bis 6 Metern überdeckt. Unterhalb der ca. 2 Meter mächtigen Topbrekzie folgt das Siegel (ca. 2 Meter mächtig) und die abbauwürdigen Schienen mit einer Mächtigkeit von 9 bis 15 Metern (Abbildung 34). Die Schienen sind bis zu 9 Meter lang und der Durchmesser beträgt zwischen einem und drei Metern. Abschließend folgt der nicht abbauwürdige Dielstein (Abbildung 35, Harms & Mangartz, 2002. Pohl, 2012).

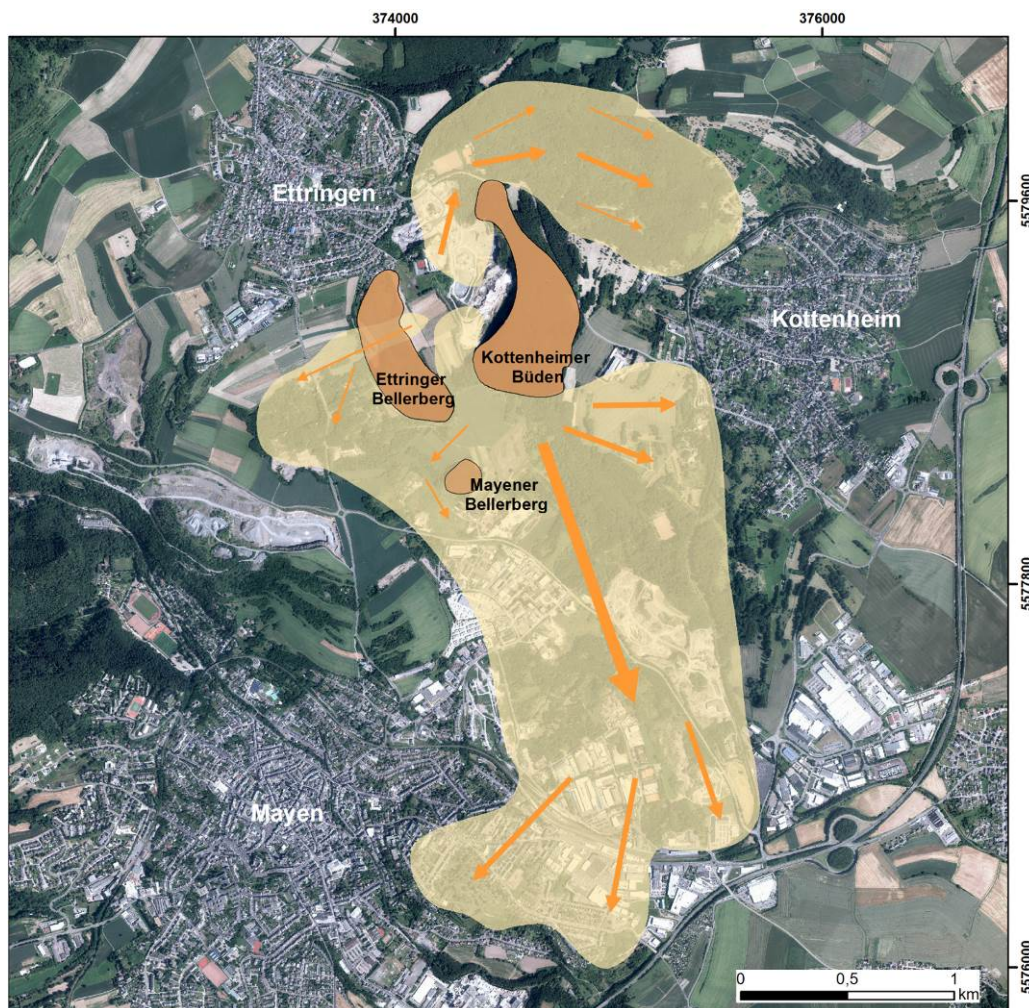


Abbildung 33: Kraterbereich der Bellerberg-Vulkangruppe (Ettringer Bellerberg und Kottenheimer Büden bilden die Flanken) mit Fließrichtungen der Lavaströme (abgeleitet aus Harms & Mangartz (2002) sowie Schmincke & Bogaard (1990), Hintergrund: Digitale Orthophotos DOP40 (BKG), WGS84 UTM32N).

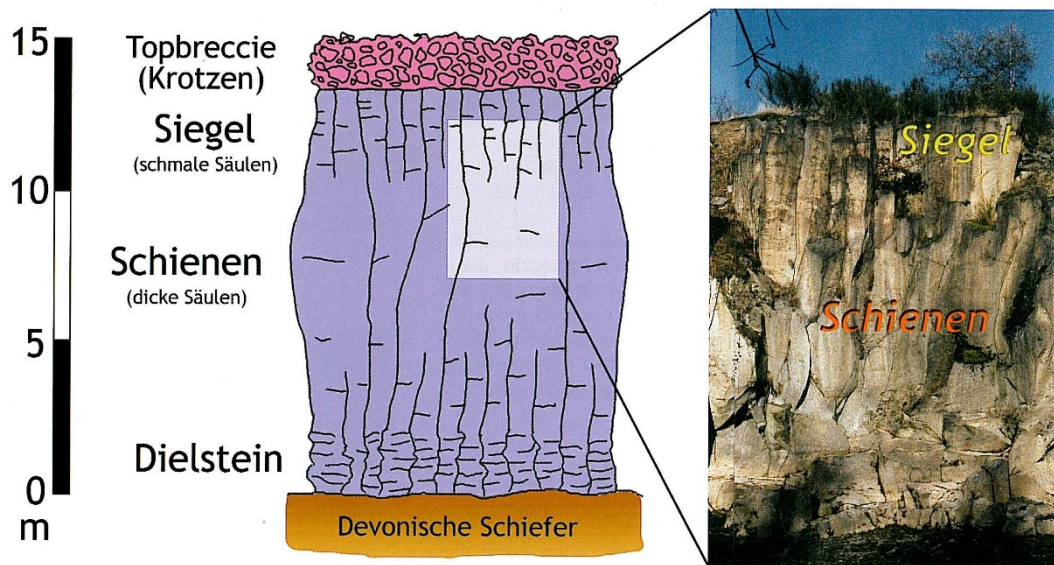


Abbildung 34: Aufbau des 10 bis 15 m mächtigen Mayener Lavastroms: die Topbreccie aus schlackeartigen Bruchstücken überdeckt die dünnen Säulen (Siegel) und die unregelmäßig geformten dicken Säulen (Schienen), darunter befindet sich in 7 bis 8 Meter Tiefe der sehr brüchige Dielstein ohne ausgeprägte Säulenstruktur (Harms & Mangartz 2002).

Die natürliche Porosität des Gesteins wurde bereits seit 7.000 v. Chr. zur Herstellung von Reibsteinen zum Mahlen von Getreide sehr geschätzt. Der Abbau erfolgte seit dem im Tagebau beginnend an den Rändern des Lavastroms. Der Abbau und die Nutzung intensivierte sich immer weiter, so dass in der Römerzeit (bis 450 n. Chr.) die Mühlsteine bis zu den Britischen Inseln exportiert wurden. Im Mittelalter (bis 14/15. Jahrhundert) erfolgte der Übergang zum Untertagebau, wobei kleine Basaltsäulen stehen gelassen wurden und ein natürliches Gewölbe bilden (Harms & Mangartz, 2002). Diese natürlichen Gewölbe wurden teilweise durch Holzkeile oder Unterzüge mit Eichenbalken oder Eisenstiften gesichert. Der Basalt wurde über senkrechte Schächte mit Durchmesser von etwa 4 bis 6 Meter an die Erdoberfläche transportiert. Um den Schacht sowie in den Hallen wurden natürliche Basalt Pfeiler stehen gelassen (Schulze, 1828).

Mit zunehmender Nachfrage nach Schotter für Bahn- und Straßenbau intensivierte sich der Abbau weiter, so dass ab 1850 immer mehr Tagebaue eröffnet wurden. Seit 1950 entstanden moderne Tiefbrüche, die mit der Zeit die alten Brüche aufdeckten. Bis in die jüngste Zeit stellt der Basaltbergbau einer der bedeutendsten Wirtschaftszweige in Mayen und Umgebung dar (Harms & Mangartz, 2002).

Die untertägigen Hohlräume wurden aufgrund ihrer Kühle und Luftfeuchtigkeit ab der zweiten Hälfte des 19. Jahrhunderts als Gär- und Lagerkeller genutzt. Heute beherbergt das Mayener Grubenfeld mehr als 50.000 Fledermäuse und gehört zum europäischen Flora-Fauna-Habitat-Gebiet. Zur Sicherung des Lebensraums der Flora und Fauna sowie zum Erhalt der Zugänglichkeit der Hohlräume wurden im Rahmen des Naturschutzgroßprojektes „Mayener Grubenfeld“ des NABU in

einer ersten Übersichtsnahe die Schäden der Hohlräume vermessen und aufgenommen. Trotz einiger Schäden ist der Zustand der bis zu 170 Jahre alten Hohlräume bemerkenswert, da diese ursprünglich nicht für eine dauerhafte Standsicherheit angelegt wurden. Anschließend wurden bergmännische- bzw. geotechnische Sicherungsmaßnahmen aufgrund akuter Gefährdungen durch Stein- und Firstfall sowie Pfeilerbrüchen und Böschungsbruch im Zugangsbereich der untertägigen Hohlräume durchgeführt. Hierbei wurden Beräumungen und Fixierungen durchgeführt sowie Unterstützungsbauwerke errichtet (Wehinger et al. 2010a, 2010b). In der Vergangenheit ereigneten sich bereits Tagesbrüche, Bodensenkungen und auch Einstürze von Hohlraumbereichen infolge eines Erdbebens im Jahr 1992 (Landesamt für Geologie und Bergbau Rheinland-Pfalz 2010).



Abbildung 35: Mayener Grubenfeld mit Grubenkränen auf gemauerten Kransockeln und Anschnitt eines gemauerten Schachtes. Schmalen Säulen (Siegel) und dicke Säulen (Schienen) des Mayener Lavastroms. (Foto: C. Wolf, April 2015).

### 3.1.2 Hangrutsche im Moseltal

Im Projektgebiet Rhein-Mosel treten Rutschungen vor allem in den Hunsrückschiefen (Tonschiefer) des Devons an den Prallhängen der Mittelmosel auf. Es handelt sich hierbei meistens um fossile Großrutschungen, die nach der letzten Eiszeit an den steilen Talflanken entstanden sind (Landesamt für Geologie und Bergbau Rheinland-Pfalz 2010). Vor allem der Bereich zwischen Trier und Cochem ist stark von Rutschungen, Steinschläge und Felsstürzen betroffen (Rogall & Möbus, 2005). Hier konnte auch ein unmittelbarer Zusammenhang zwischen Großrutschungen und lokaler Geologie aufgezeigt werden (Bock et al. 2012). Nordwestlich ausgerichtete Hänge werden dabei als besonderes rutschempfindlich eingestuft (Bock et al. 2013). Als Detailgebiet wurde daher ein Bereich der Mittelmosel zwischen den Städten Bernkastel-Kues und Cochem ausgewählt (Abbildung 36 und Abbildung 37).

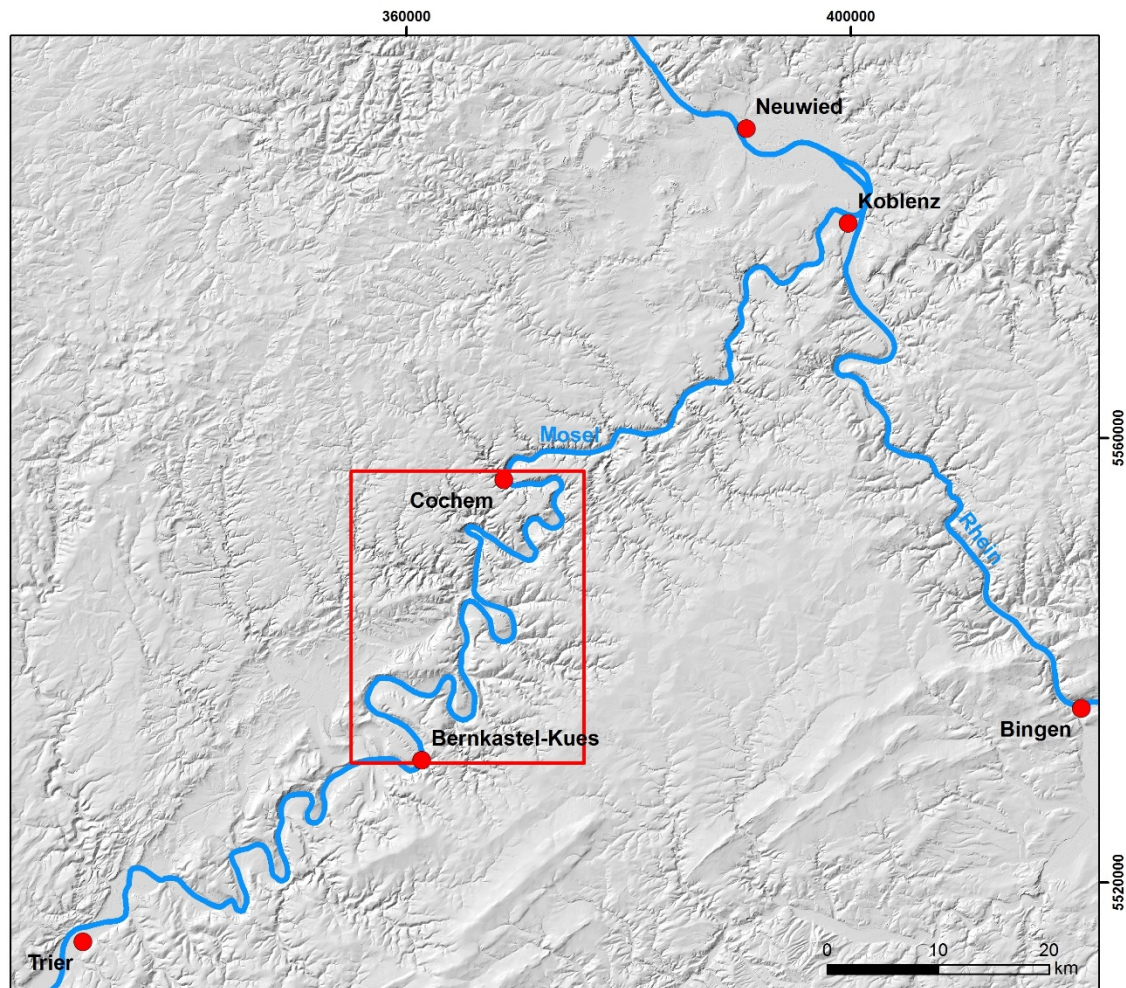


Abbildung 36: Lage des Detailgebietes „Mosel“ zwischen Bernkastel-Kues und Cochem (WGS84 UTM32N).

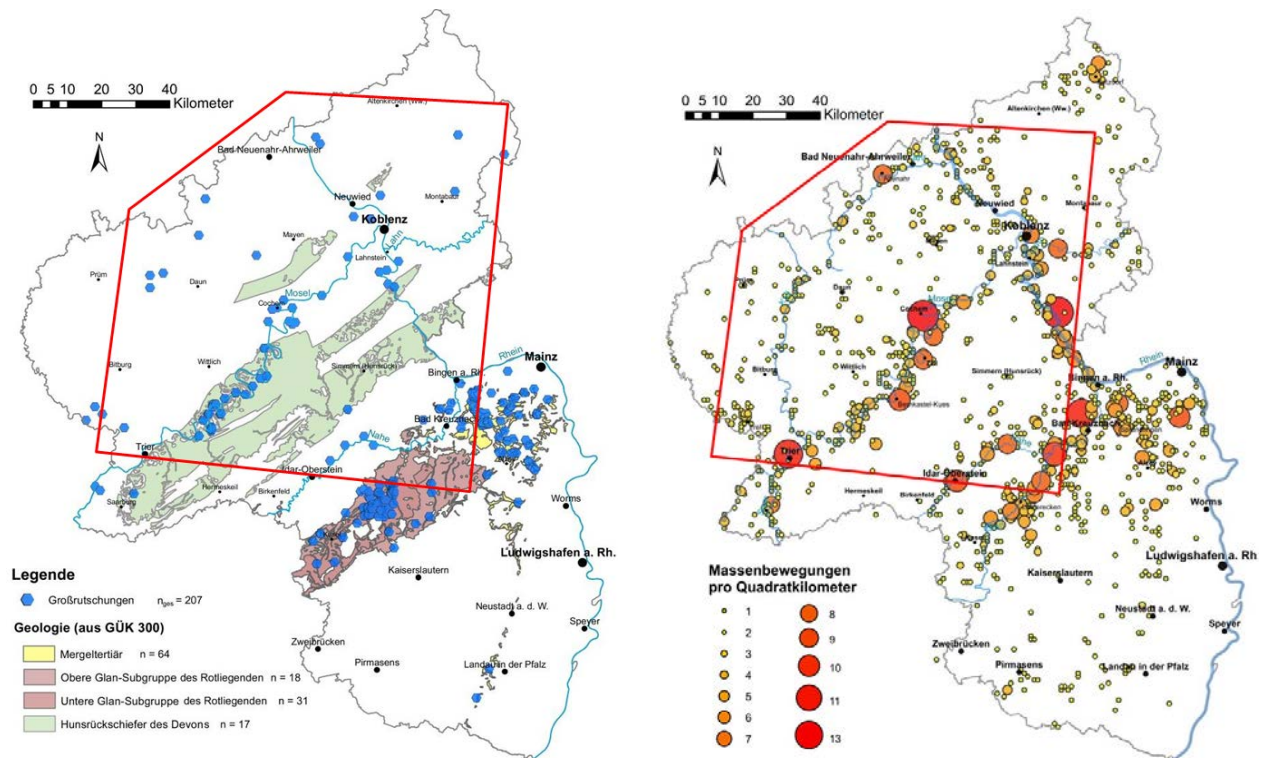


Abbildung 37: Karte der Großrutschungen (links) und Massenbewegungen (rechts) in Rheinland-Pfalz auf Basis der Rutschungsdatenbank des LGB mit Umriß des Projektgebietes Rhein-Mosel (roter Rahmen. Bock et al. 2012).

Der Bereich der Mittelmosel ist durch enge Kerbtäler und einen stark mäandrierenden Flusslauf mit ausgeprägten Gleit- und Prallhängen charakterisiert. Während die Gleithänge meist relativ flach sind, weisen die Prallhänge zum Teil Neigungen von bis zu 40° auf. Die Neigung der meisten Prallhänge liegt jedoch unter 30°. Nach Süden, Südwesten oder Südosten exponierte Hänge werden für Weinbau genutzt, obere Hangabschnitte und nach Norden exponierte Hanglagen sind häufig bewaldet. An steilen Prallhängen und in tief eingeschnittenen Seitentälern treten Schieferfelsen mit geringer Vegetationsbedeckung auf. Kleine Städte und Ortschaften liegen am Hangfuß und auf Gleithängen. Der Untergrund zwischen Bernkastel-Kues und Bullay besteht aus Hunsrückschiefer des Unterdevons (Abbildung 38). Hierbei handelt es sich um Ton- und Schluffsteine mit dünnen Lagen von Dachschiefer und Feinsandstein. Während der variszischen Gebirgsbildung im Karbon wurden die Gesteine verfaltet und geschiefert. So weisen die Gesteine neben Schichtung und Schieferung auch Längs-, Quer- und Diagonalklüfte auf. Vor ca. 33,9 Mio. Jahren bildete sich das erste Flusssystem der Mosel aus. Vor 600.000 Jahren verstärkte sich die Hebung des Rheinischen Schildes und im Wechsel der Kalt- und Warmzeiten begann die Mosel ihr heutiges Engtal mit Mittel- und Niederterrassen auszubilden. Die Eintiefung der Mosel fand am Übergang zu den Warmzeiten statt. In der Elster-Kaltzeit bildete sich die obere Mittelterrasse aus Kiese und Sanden, die untere Mittelterrasse wurde am Ende der Saale-Kaltzeit ausgebildet. Die schnelle Eintiefung der Mosel führte zu relativ steilen Flanken mit hoher Reliefenergie und geringer Hangstabilität. Im mittleren



Moseltal treten vorwiegend großräumige, tief greifende Rutschungen an den Prallhängen und äußeren Mäanderbögen auf. Die Rutschhänge weisen Neigungen zwischen  $16^\circ$  und  $38^\circ$  und vertikale Höhendifferenzen zwischen 130 und 270 Metern auf. Die höheren Hangbereiche sind konkav geformt und weisen Risse und Spalten auf, während der untere Bereich durch eine konvexe vorgewölbte Form gekennzeichnet ist. Somit lassen sich die Rutschhänge in ein Abrissgebiet, eine mittlere Bewegungszone und einen Rutschungsfuß gliedern. Generell sind die Rutschungen an das Vorkommen von Hunsrückschiefer gebunden. Die Gründe der Massenverlagerungen im Moseltal liegen vor allem an der geringen Gebirgsscherfestigkeit des Hunsrückschiefers verursacht durch geringe Gesteinsfestigkeit und teilweise tief reichende tektonische Auflockerungen. Das rasche Einschneiden der Mosel führte durch Entlastung zu einer Gebirgsentspannung und der Freilegung der aufgelockerten Gesteinspartien. Geogen auslösende Faktoren sind wahrscheinlich jahrelange überdurchschnittliche Niederschläge mit tief reichender Durchfeuchtung und ansteigendem Grundwasserspiegel, die zu einer Erhöhung der Auflast und einer Verringerung der Scherfestigkeit auf Trennflächen führt (Rogall & Möbus, 2005. Rogall, 2014). Beispielsweise führte Schneeschmelze in Verbindung mit ergiebigen Regenfällen zu über 200 Rutschungen im Mainzer Becken (Landesamt für Geologie und Bergbau Rheinland-Pfalz, 2010). Zu den anthropogenen Faktoren gehören zusätzliche Auflasten durch flächenhafte Auffüllungen, Abgrabungen, lokale Unterschneidungen sowie Aufstau von Grund- oder Oberflächenwasser und Bewässerung (Rogall & Möbus, 2005. Rogall, 2014).

Vermutlich haben sich die meisten Rutschungen an der Mosel im Laufe des jüngeren Quartärs ereignet. Einige dieser Rutschungen sind heute noch aktiv und führen zu Geländeverformungen, Rissen in Straßen und Wegen, Schiefstellungen von Gebäuden sowie Verengungen und Auslenkungen des Mosellaufs. Hierbei handelt es sich um Kriechbewegungen alter Rutschmassen, die teilweise der Phase der Nachbewegung und Konsolidierung zugeordnet werden können (Rogall & Möbus, 2005. Rogall, 2014).

Innerhalb der Rutschgebiete kommen an steilen Felswänden und Abrisskanten aber auch an unbewachsenen Hängen mit mehr als  $30^\circ$  Neigung Steinschläge und Felsstürze vor. Diese Massenbewegungen sind hauptsächlich durch natürliche Ursachen begründet, wie z.B. durch Entspannung und Freilegung infolge der Moseleinschneidung, Gefügauflockerungen durch Frost-Tauwechsel, ungünstig einfallende Trennflächen, Unterschneidungen durch Herauswitterung weicherer Schichte und Wurzeldruck. Anthropogen bedingte Ursachen sind die Anlage von Steilböschungen durch Straßenbau und weiteren Baumaßnahmen. Die Steinschläge und Felsstürze können durch Eisdruck, Starkregen und Schneeschmelze oder Einflüsse von Pflanzen und Tieren sowie Erschütterungen und stärkere Erdbeben ausgelöst werden (Rogall & Möbus, 2005. Rogall, 2014).

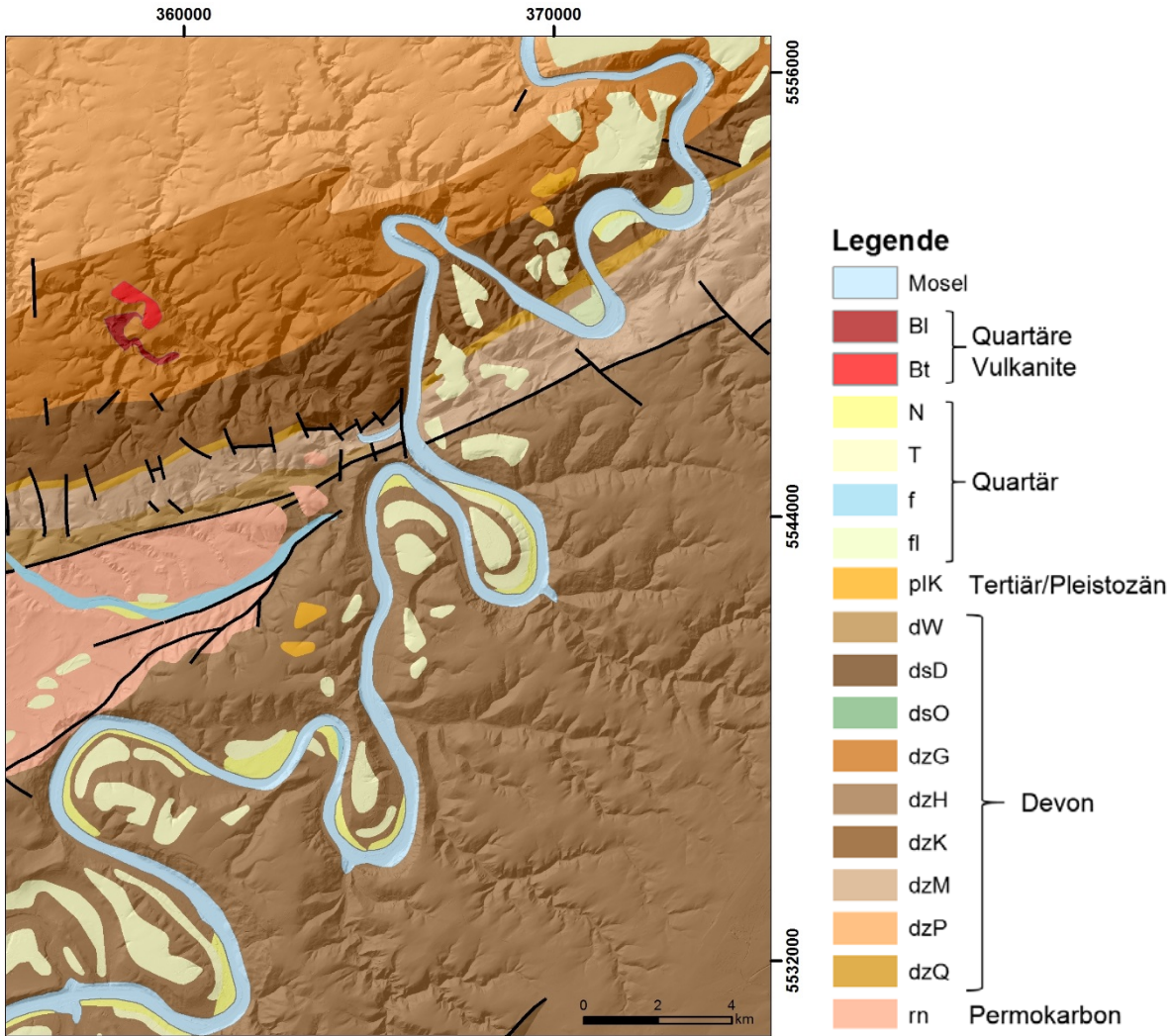


Abbildung 38: Geologie im Untersuchungsgebiet Mosel zwischen Bernkastel-Kues und Cochem. Abgeleitet aus GUEK300 mit Verwerfungen (LGB) über DGM5 (LVermGeo). WGS84 UTM32N.

## 3.2 Datengrundlage und Methodik

In diesem Kapitel werden die Methoden und Daten der Auswertungen der Detailgebiete dargestellt. Zum einen handelt es sich um eine Analyse von Boden- und Geländebewegungen, zum anderen um die Identifizierung weiterer Indikatoren für geogene Gefährdungen.

### 3.2.1 Bewegungsanalyse

Bei der Bewegungsanalyse kommt erneut die Persistent Scatterer Interferometrie (PSI) zum Einsatz. Die Methodik wird hier jedoch durch ein weiteres Verfahren der Radarinterferometrie, dem Small Baseline Subset (SBAS)-Verfahren, ergänzt. Beide Methoden werden auf hochauflösende SAR-Daten des TerraSAR-X-Satelliten angewendet.

#### 3.2.1.1 *Persistent Scatterer Interferometrie (PSI)*

Die Methodik der Persistent Scatterer Interferometrie wurde bereits in Kapitel 2.2.1.1. beschrieben. Das Verfahren konnte bereits erfolgreich zu geologischen Gefährdungsanalysen wie zum Beispiel bei Landabsenkungen, Erdbeben und Hangrutschen eingesetzt werden (Ferretti et al. 2000, Colesanti et al. 2003a, b; Canuti et al. 2004, Colesanti & Waswoski, 2004, Ferretti et al. 2005). So konnten zum Beispiel Aktivitätszustände von Hangrutschen bestimmt werden, z.B. eine fortschreitende Hebung in der Akkumulationszone, die durch stark beschädigte Gebäude bestätigt wurde, sowie geringfügige Senkungen oder Stillstand im oberen Abschnitt des Hangrutes (Meisina et al. 2006).

#### 3.2.1.2 *Small Baseline Subset (SBAS)*

Im Vergleich zur PSI-Methodik, bei der die Bewegungen für Punktoobjekte geschätzt werden, erlaubt das Small Baseline Subset (SBAS)-Verfahren die Analyse von Deformationsmessungen von großen korrelierten Flächen. Die Pixel dieser Fläche oder des Objektes weisen dabei ähnliche Reflexionswerte auf (Ferretti et al. 2011). Zur Berechnung werden multi-temporale interferometrische Datenpaare mit geringem Orbit-Abstand (small spatial baseline) und kurzen Zeitspannen (temporal baseline) verwendet (Berardino et al. 2002, Lanari et al. 2004). Die Methodik wird in dieser Studie auf SAR-Daten von ERS-1/2, Envisat-ASAR und TerraSAR-X angewandt. Wie der Vergleich von SBAS-Daten von C-Band-Satelliten (Envisat und Radarsat-1) mit einem X-Band-Satellit (COSMO-SkyMed) zeigt, erhöht sich die räumliche Dichte der kohärenten Pixel von 650 Punkte/km<sup>2</sup> bei Envisat-SAR-Daten und 1.000 Punkte/km<sup>2</sup> bei Radarsat-1 zu 4.200 Punkte/km<sup>2</sup> bei COSMO-SkyMed, was einem Anstieg von 320% bzw. 550% entspricht (Bonano et al. 2013). Aus diesem Grunde wurden auch in dieser Studie zusätzlich zu den C-Band Daten für die Detailgebiete X-Band Daten eingesetzt.

### **3.2.1.3 TerraSAR-X-Datensätze**

Für die PSI- und SBAS-Prozessierungen der Detailgebiete benötigten TerraSAR-X-Daten wurden beim TerraSAR-X Science Service System beantragt. Hierzu wurde das Proposal GEO2684 eingereicht (siehe Anhang). Die Verwendung von 150 Archivszenen bis zum 31.12.2013 wurde für die Detailgebiete Mendig (Descending Orbit, Track 154, Strip 13) und Mosel (Ascending Orbit, Track 116, Strip 11) genehmigt.

### **3.2.1.4 PSI- und SBAS-Prozessierung**

Die Datenprozessierung wurde vom KM Unternehmen TRIGIS im Auftrag der BGR durchgeführt. Die zur PSI- und SBAS-Prozessierung verwendeten TerraSAR-X-Daten sind in den Prozessierungsberichten Nummer 11 bis 16 aufgeführt (siehe Anhang).

Als Höhenmodell wurde für die Prozessierung von Mendig das Digitale Geländemodell DGM10 des BKG verwendet. Für die Prozessierung des Gebietes an der Mosel konnten die DGM5-Daten des LVerGeo angewandt werden (siehe Kapitel 3.2.2.3).

Der Lieferumfang umfasst die PSI- und SBAS-Prozessierungen der TerraSAR-X-Daten sowie jeweils Amplitudenbilder (Multi-image reflectivity image (MIR)) als GeoTIFF Raster in WGS84 UTM32N.

### 3.2.1.5 Überprüfung der PSI- und SBAS-Datensätze für Mendig/Mayen

Die Überprüfung und Validierung der PSI- und SBAS-Datensätze für das Projektgebiet Mendig/Mayen erfolgte anhand der Checkliste des PanGeo Production Manuals (Version 1.3, Oktober 2012).

#### **Visualisierung mit Legende**

Zur Überprüfung wurden die Daten zunächst visualisiert. Hierzu wurde eine Farblegende definiert. Aufgrund der hohen Auflösung von TerraSAR-X-Daten und einer kleinen Gebietsgröße (geringe Fehlerfortpflanzung) wurden Bewegungen zwischen  $\pm 1$  mm/Jahr als stabiler Bereich definiert (siehe hierzu auch Kapitel 2.2.1.4). Die Abstufung der Farben erfolgt in Schritten von jeweils 2 mm/Jahr. Die Farben verlaufen von dunkelblau bis türkisgrün für Hebungen über grün für stabile Bereiche zu gelb, orange und dunkelrot für Absenkungen. Gebiete höchster Absenkungen (geringer als  $-7$  mm/Jahr) werden mit dunkelroter Farbe dargestellt. Die größten Hebungen ab  $+5$  mm/Jahr werden mit dunkelblauer Farbe abgebildet.

#### **Überprüfung der Geokodierung**

Die Geokodierung der Daten wurde anhand markanter Linien im Gelände überprüft. Sollte ein linearer Offset gleicher Magnitude und Richtung auftreten, so können die Daten durch eine Verschiebung der Koordinaten korrigiert werden. Zur Überprüfung wurde der Mendiger Flugplatz herangezogen. In den PSI- und SBAS-Datensätzen folgen die Datenpunkte der Landebahn bzw. den umgebenen Zäunen und angrenzenden Straßen (Abbildung 39 und Abbildung 40). Eine Korrektur der Koordinaten ist daher nicht notwendig.



Abbildung 39: Überprüfung der Geokodierung der PSI-Daten am Mendiger Flugplatz (Hintergrund: Amplitudenbild TSX).



Abbildung 40: Überprüfung der Geocodierung der SBAS-Daten am Mendiger Flugplatz (Hintergrund: Amplitudenbild TSX).

### ***Überprüfung sichtbarer Neigungen oder Phasentrends***

Signifikanten Phasentrends aufgrund unkompensierter Orbitfehler konnten in keiner der beiden Datensätze festgestellt werden (siehe Prozessierungsberichte Nr. 11 und 12 im Anhang).

### ***Überprüfung der Referenzpunkte***

Zur PSI-Prozessierung wird das Projektgebiet in mehrere Teilgebiete unterteilt und erst abschließend zu einem Gesamtgebiet zusammengefügt. Für jedes Teilgebiet ist mindestens ein Referenzpunkt nötig, der von der Software automatisch anhand der besten Reflektoren identifiziert wird. Im Falle der PSI-Prozessierung für das Gebiet Mendig/Mayen wurden 122 Referenzpunkte berechnet und verwendet (Abbildung 41). Zur SBAS-Prozessierung des Projektgebiets wurden 32 Referenzpunkte ausgewählt (Abbildung 42).

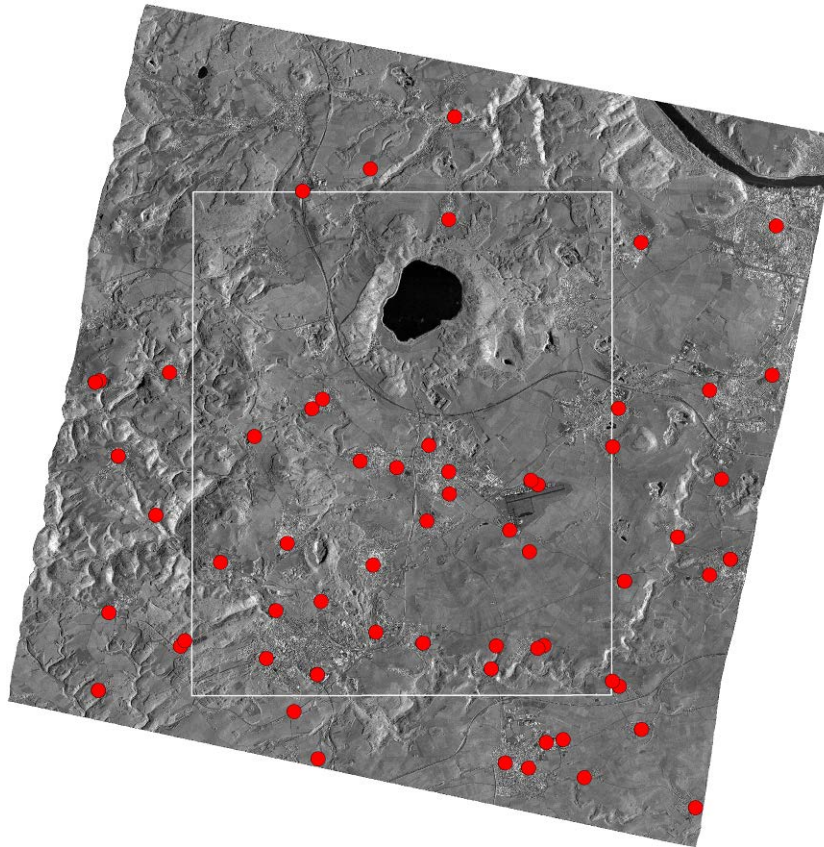


Abbildung 41: Räumliche Verteilung der Referenzpunkte der PSI-Prozessierung mit Projektgebiet Mendig/Wehr (weißer Rahmen) (Hintergrund: Amplitudenbild TSX).

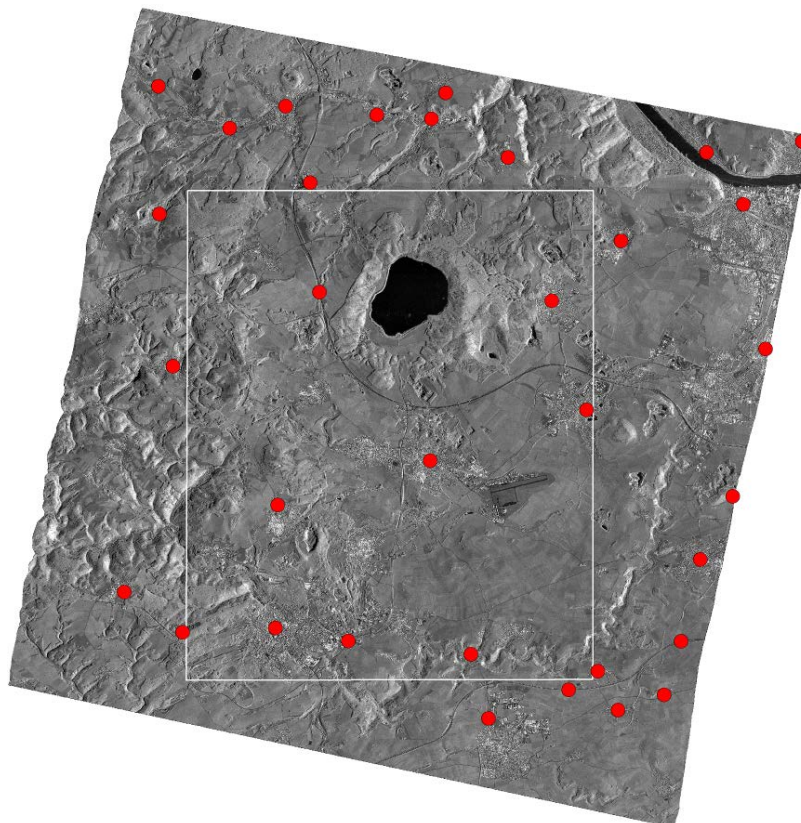


Abbildung 42: Räumliche Verteilung der Referenzpunkte der SBAS-Prozessierung mit Projektgebiet Mendig/Wehr (weißer Rahmen) (Hintergrund: Amplitudenbild TSX).

### 3.2.1.6 PSI-Datensatz Mendig/Mayen

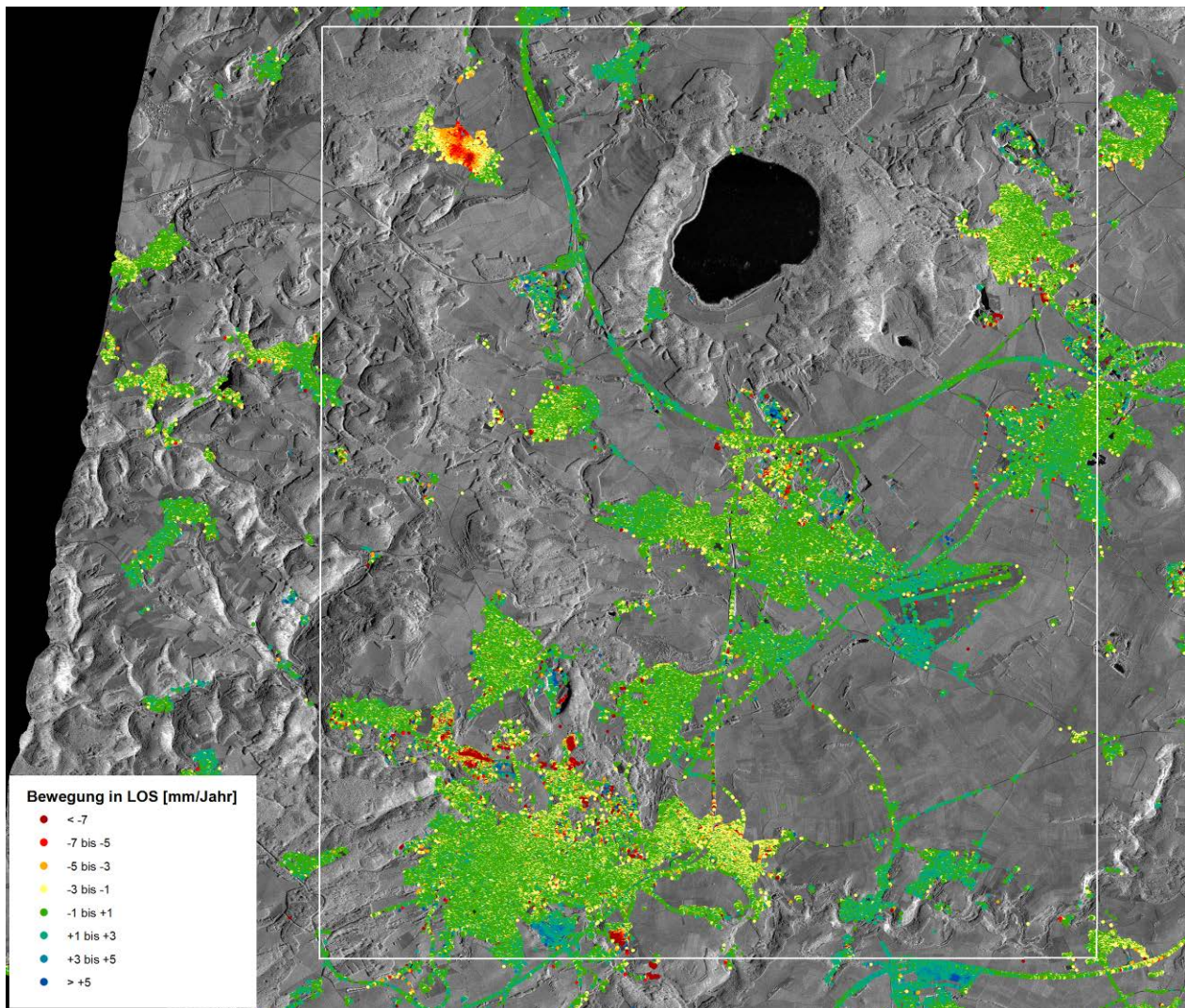


Abbildung 43: PSI-Daten im Untersuchungsgebiet Mendig/Mayen (weißer Rahmen) (Hintergrund: Amplitudenbild TSX).

Das PSI-Ergebnis für das Projektgebiet Mendig/Mayen (ca. 141 km<sup>2</sup>) beinhaltet 1.445.209 Punkte, was einer durchschnittlichen Dichte von ca. 10.250 PS/km<sup>2</sup> entspricht (Abbildung 43). Die Mehrzahl der Werte der PSI-Messungen liegt im stabilen Bereich von +/- 1 mm/Jahr und im Bereich leichter Hebung und Senkung (Klasse 1 bis 3 mm/Jahr, Klasse -1 bis -3 mm/Jahr, Tabelle 9). Mit weniger als 0,1% treten vereinzelte Ausreißer mit Werten kleiner als -30 mm/Jahr und größer als +30 mm/Jahr auf. Diese Punkte liegen in Bergbaugebieten und müssen individuell geprüft werden. Das PSI-Ergebnis wurde daher nicht generell um Ausreißer bereinigt. Die Verteilung der Kohärenzwerte ist in Abbildung 44 dargestellt. Die Werte sind im Projektgebiet sehr hoch und betragen im Mittelwert ca. 0,8. Das Minimum liegt dabei bei 0,6, der maximale Wert bei 0,98.



Tabelle 9: Statistik des PSI-Ergebnisses für Mendig/Mayen.

Klasse [mm]	Anzahl PSI	%
$\leq -30$	1.365	0,1
$>-30$ und $\leq -7$	9.938	0,7
$>-7$ und $\leq -5$	10.648	0,7
$>-5$ und $\leq -3$	27.895	1,9
$>-3$ und $\leq -1$	196.345	13,6
$>-1$ und $\leq 1$	963.984	66,7
$>1$ und $\leq 3$	215.307	14,9
$>3$ und $\leq 5$	15.195	1,1
$>5$ und $\leq 30$	4.515	0,3
$>30$	17	0,001

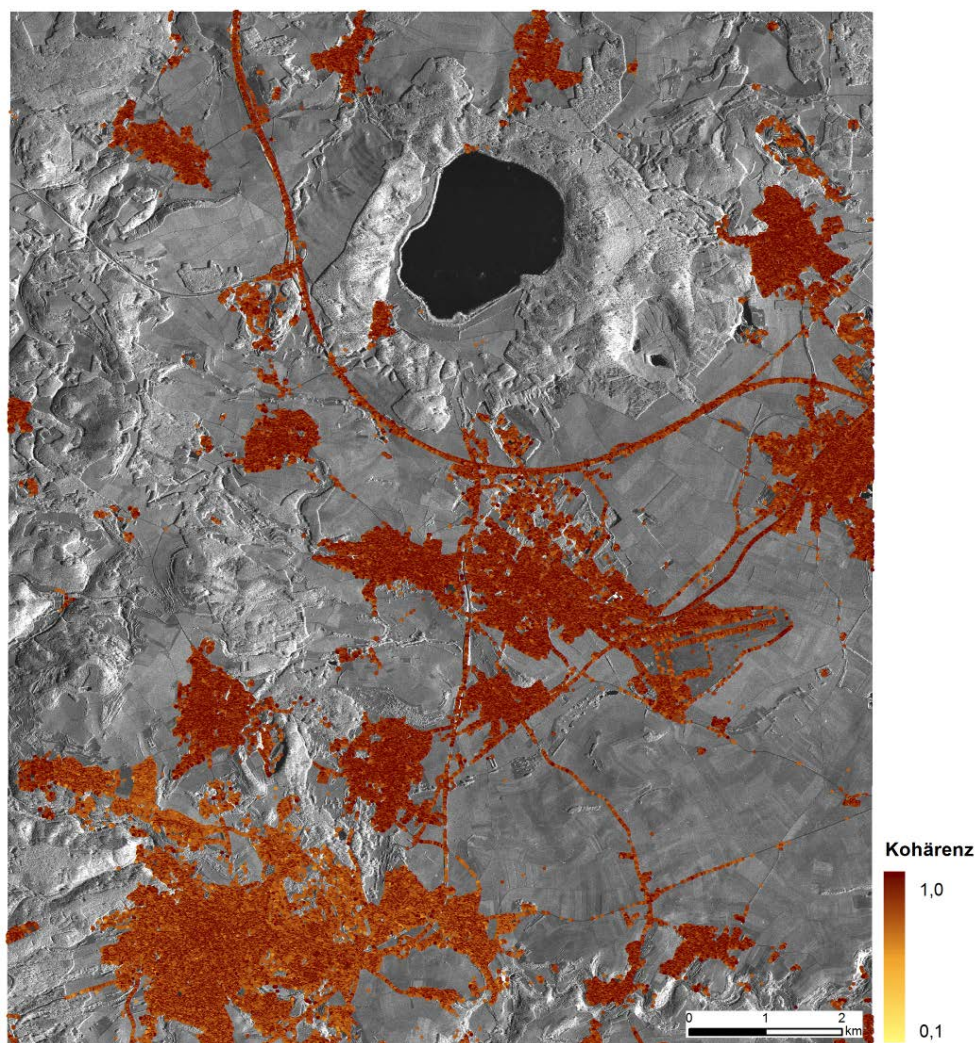


Abbildung 44: Räumliche Verteilung der Kohärenzwerte der PSI-Prozessierung für das Projektgebiet Mendig/Mayen.

### 3.2.1.7 SBAS-Datensatz Mendig/Mayen

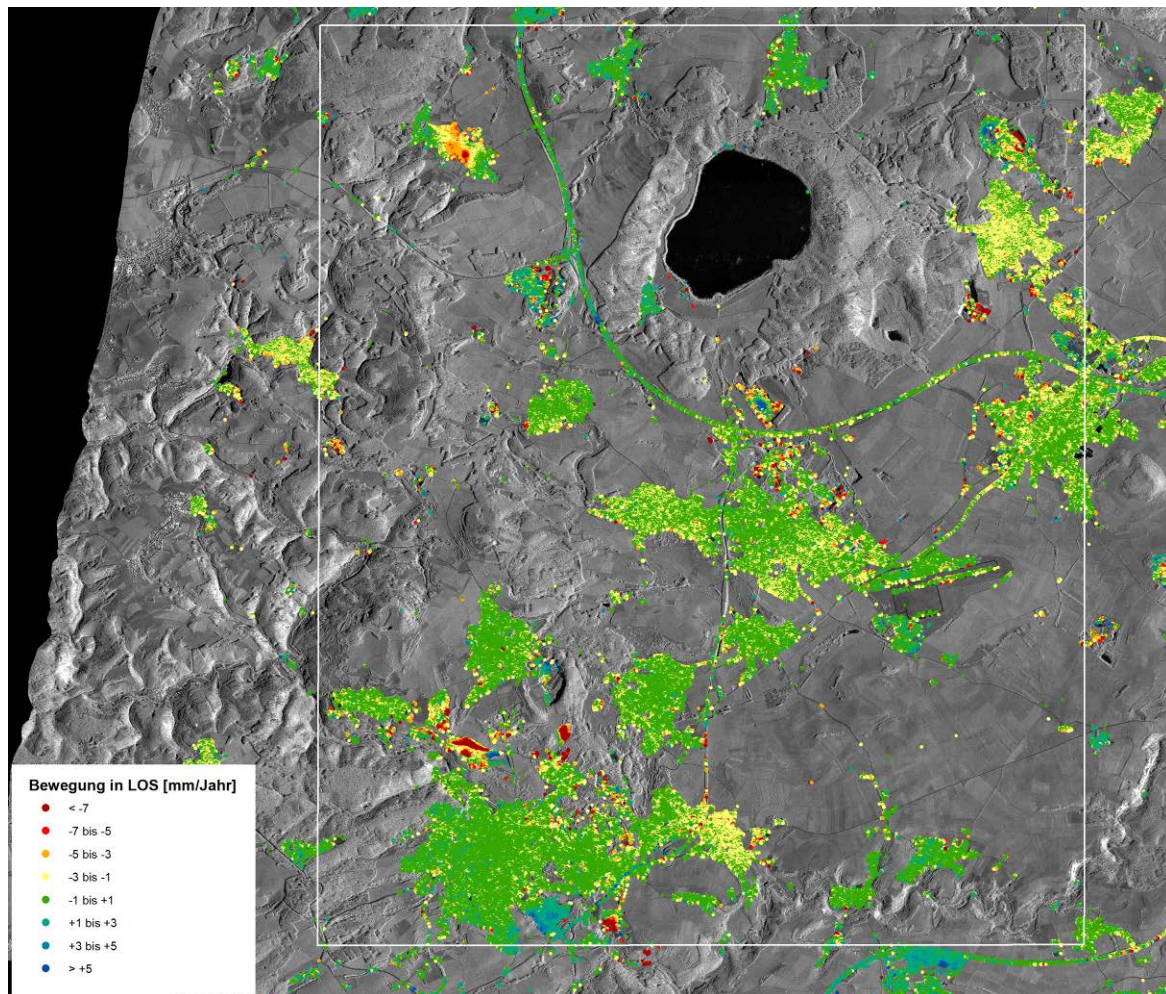


Abbildung 45: SBAS-Daten im Untersuchungsgebiet Mendig/Mayen (weißer Rahmen) (Hintergrund: Amplitudenbild TSX).

Das Ergebnis der SBAS-Prozessierung für das Projektgebiet Mendig/Mayen ist in Abbildung 45 dargestellt. Für das ca. 141 km<sup>2</sup> große Gebiet ergeben sich 338.251 Punkte mit einer durchschnittlichen Dichte von ca. 2.400 SBAS-Punkten pro km<sup>2</sup>. Das Mittel der Werte liegt im stabilen Bereich und beträgt -0,5 mm/Jahr. Fast 70% der Daten kommen in diesem stabilen Bereich von +/- 1 mm/Jahr vor (Tabelle 10). In den Bereichen leichter Senkung (-1 bis -3 mm/Jahr) und leichter Hebung (+1 bis +3 mm/Jahr) liegen ca. 20% bzw. 7% der Daten vor. Mit weniger als 0,1% treten nur vereinzelte Ausreißer mit Werten kleiner als -30 mm/Jahr auf. Diese Punkte liegen in Bergbaugebieten und müssen individuell geprüft werden. Das SBAS-Ergebnis wurde daher nicht generell um Ausreißer bereinigt.

Die Verteilung der Kohärenzwerte der SBAS-Prozessierung ist in Abbildung 46 dargestellt. Die Werte sind im Projektgebiet unterschiedlich verteilt. Im westlichen Teil ist die Kohärenz generell schlechter. Dies könnte mit einer schlechteren Phasenabwicklung oder Restatmosphäreinflüssen zusammenhängen. Das Minimum der Kohärenzwerte beträgt 0,1, das Maximum ca. 0,9.

Tabelle 10: Statistik des SBAS-Ergebnisses für Mendig/Mayen.

Klasse	Anzahl PSI	%
$\leq -30$	438	0,1
$>-30$ und $\leq -7$	2.457	0,7
$>-7$ und $\leq -5$	1.896	0,6
$>-5$ und $\leq -3$	7.555	2,2
$>-3$ und $\leq -1$	67.976	20,1
$>-1$ und $\leq 1$	232.726	68,8
$>1$ und $\leq 3$	22.146	6,5
$>3$ und $\leq 5$	2.378	0,7
$>5$ und $\leq 16$	679	0,2

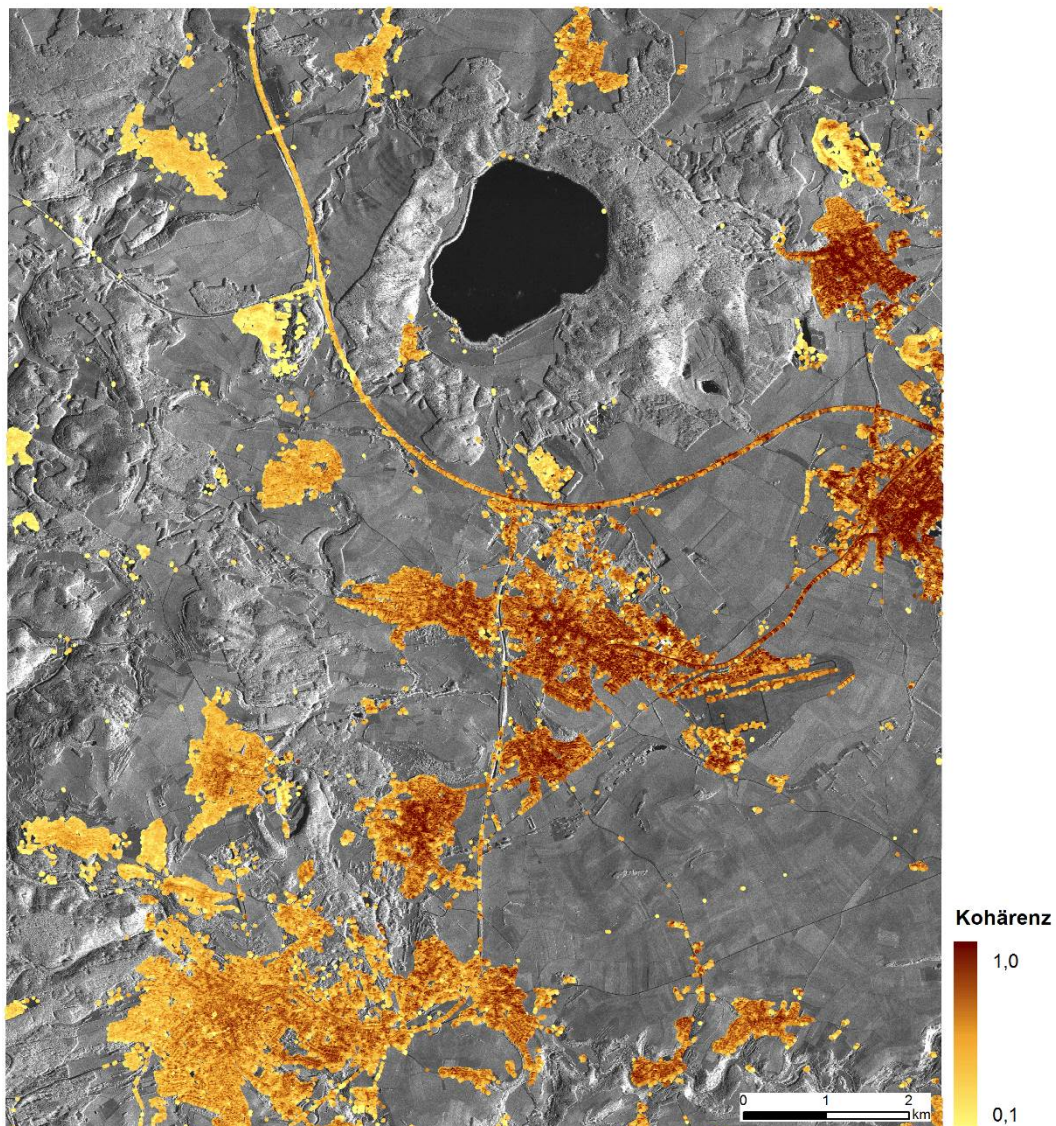


Abbildung 46: Räumliche Verteilung der Kohärenzwerte der SBAS-Prozessierung für das Projektgebiet Mendig/Mayen.

### **3.2.1.8 Überprüfung der PSI- und SBAS-Datensätze für die Mosel**

Die Überprüfung der PSI- und SBAS-Datensätze für das Projektgebiet Mosel wurde anhand der Checkliste des PanGeo Production Manuals (Version 1.3, Oktober 2012) durchgeführt.

#### **Visualisierung mit Legende**

Zur Überprüfung wurden die Daten zunächst visualisiert. Hierzu wurde eine Farblegende den Daten erstellt. Aufgrund der hohen Auflösung von TerraSAR-X-Daten und einer kleinen Gebietsgröße (geringe Fehlerfortpflanzung) wurden Bewegungen zwischen  $\pm 1$  mm/Jahr als stabiler Bereich definiert (siehe hierzu auch Kapitel 2.2.1.4). Die Abstufung der Farben erfolgt in Schritten von jeweils 2 mm/Jahr. Der Farbverlauf verläuft von dunkelblau und türkisgrün für Hebungen über grün für stabile Bereiche zu gelb, orange und dunkelrot für Absenkungen. Gebiete höchster Absenkungen (geringer als  $-7$  mm/Jahr) werden mit dunkelroter Farbe dargestellt. Die größten Hebungen ab  $+5$  mm/Jahr werden mit dunkelblauer Farbe abgebildet.

#### **Überprüfung der Geokodierung**

Die Geokodierung der Daten wurde anhand markanter Linien im Gelände überprüft. Zur Überprüfung wurde der Flughafen Frankfurt-Hahn gewählt, der sich am Rand des Projektgebietes befindet. In den PSI- und SBAS-Datensätzen folgen die Datenpunkte der Landebahn bzw. den umgebenen Zäunen und angrenzenden Straßen (Abbildung 47 und Abbildung 48). Die Geokodierung ist zufriedenstellend.

#### **Überprüfung sichtbarer Neigungen oder Phasentrends**

Signifikante Phasentrends aufgrund unkompensierter Orbitfehler konnten in keiner der prozessierten PSI- und SBAS-Datensätze festgestellt werden (siehe Prozessierungsberichte Nr. 13 bis 16 im Anhang).

#### **Überprüfung der Referenzpunkte**

Zur PSI-Prozessierung wird das Projektgebiet in mehrere Teilgebiete unterteilt und erst abschließend zu einem Gesamtgebiet zusammengefügt. Für jedes Teilgebietes ist mindestens ein Referenzpunkt nötig, der von der Software automatisch anhand der besten Reflektoren identifiziert wird. Im Falle der PSI-Prozessierung für das Moselgebiet wurden 316 Referenzpunkte im Track 116 und 76 Referenzpunkte im Track 154 verwendet (Abbildung 49). Bei der SBAS-Prozessierung wurden 90 Referenzpunkte im Ascending-Datensatz Track 116 und 56 Referenzpunkte im Descending-Orbit Track 154 ausgewählt (Abbildung 50).



Abbildung 47: Überprüfung der Geokodierung der PSI-Daten (Track 116 links und Track 154 rechts) am Flughafen Frankfurt-Hahn (Hintergrund: DOP40).



Abbildung 48: Überprüfung der Geokodierung der SBAS-Daten (Track 116 links und Track 154 rechts) am Flughafen Frankfurt-Hahn (Hintergrund: DOP40).

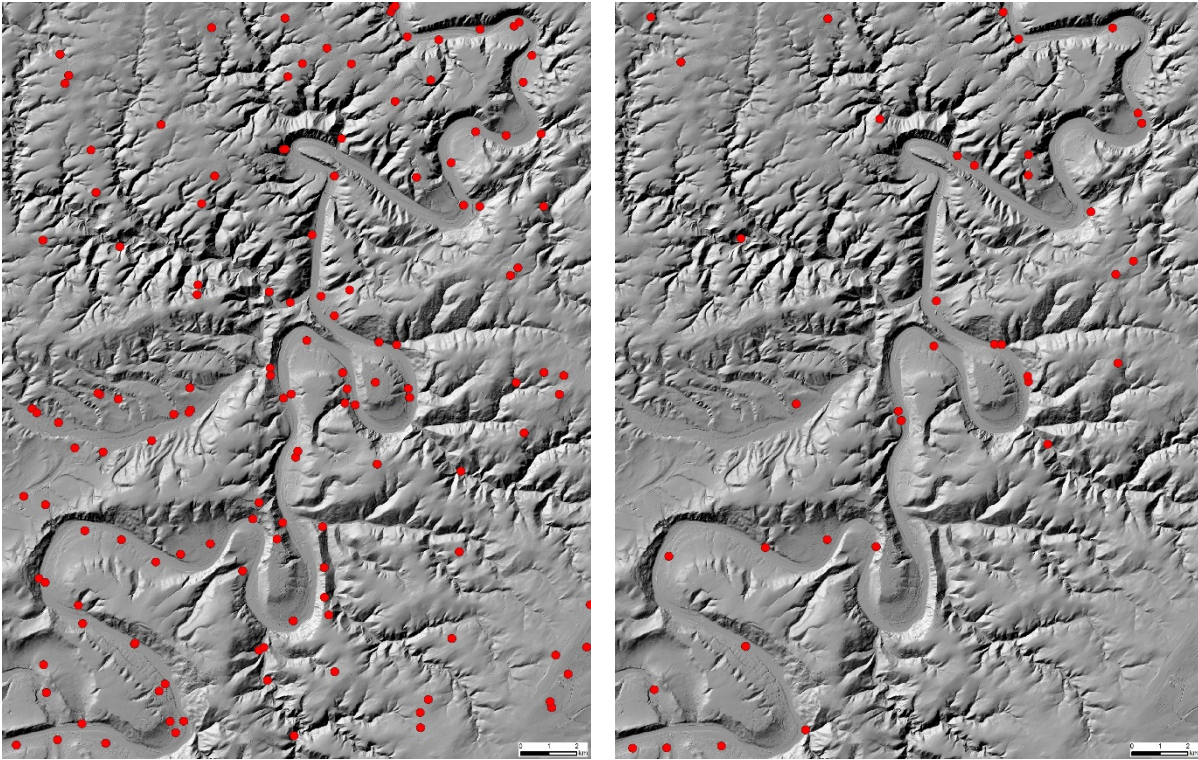


Abbildung 49: Räumliche Verteilung der Referenzpunkte der PSI-Prozessierung im Projektgebiet Mosel für Track 116 (links) und Track 154 (rechts) (Hintergrund: Digitales Geländemodell DGM5 (LVermGeo)).

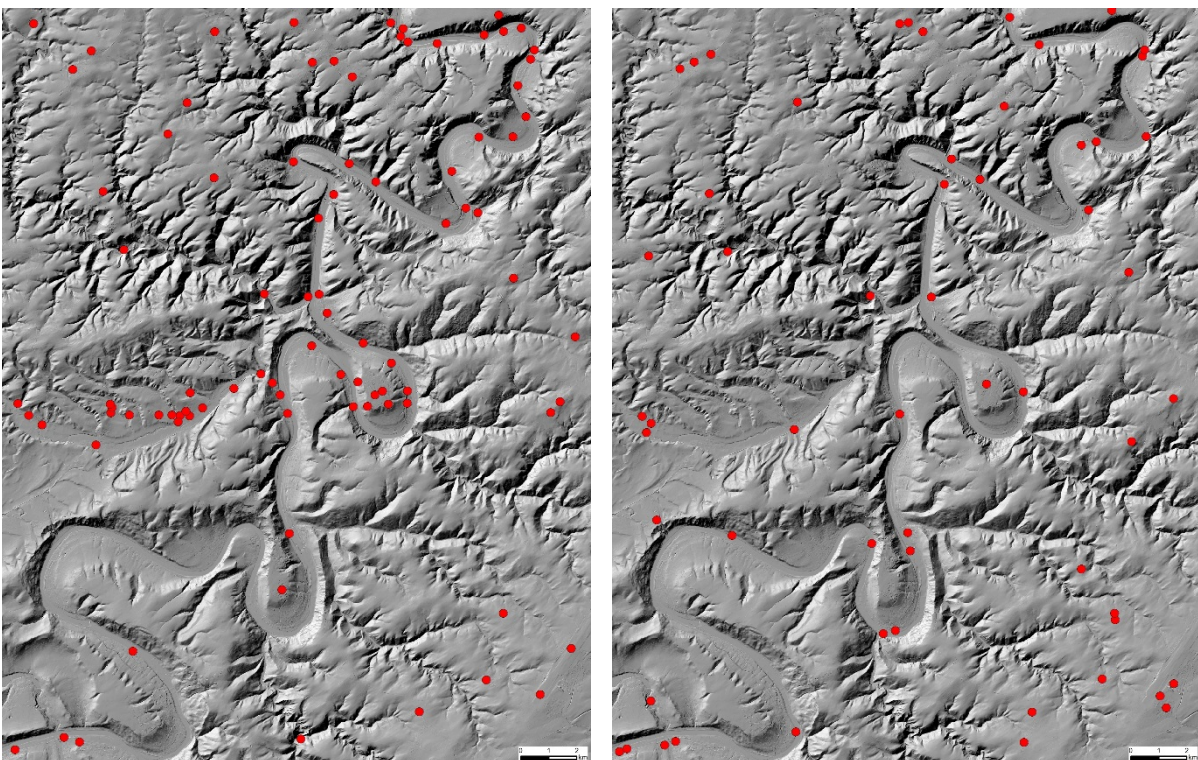


Abbildung 50: Räumliche Verteilung der Referenzpunkte der SBAS-Prozessierung im Projektgebiet Mosel für Track 116 (links) und Track 154 (rechts) (Hintergrund: Digitales Geländemodell DGM5 (LVermGeo)).

### 3.2.1.9 PSI-Datensätze Mosel

Der PSI-Datensatz des Ascending-Orbits Track 116 wurde für ein Gebiet von ca. 530 km<sup>2</sup> berechnet. Insgesamt konnten 2.195.788 PSI-Punkte identifiziert werden, was einer durchschnittlichen Dichte von ca. 4.143 Punkten pro km<sup>2</sup> entspricht. Das Ergebnis der PSI-Prozessierung ist in Abbildung 51 dargestellt. Im Datensatz ist ein lokaler Senkungsbereich im Stadtteil Wehlen von Bernkastel-Kues auffällig, der in dieser Form in den anderen PSI- und SBAS-Datensätzen nicht auftritt. Dieser Datensatz wurde jedoch drei Mal mit verschiedenen Parametern prozessiert und jedes Mal wurde ein ähnliches Ergebnis erzielt, so dass es sich hierbei wahrscheinlich um keinen Modellfehler handelt.

Die Mehrzahl der Werte der PSI-Messungen im Ascending-Datensatz Track 116 (etwa 70%) liegen im stabilen Bereich von +/- 1 mm/Jahr (Tabelle 11). Im Bereich leichter Hebungen und Senkungen (Klasse +1 bis +3 mm/Jahr und Bewegungsklasse -1 bis -3 mm/Jahr) kommen 19,2 bzw. 8,8% der Daten vor. Im Bereich stärkerer Absenkungen mit Geschwindigkeiten zwischen -3 und -7 mm/Jahr treten ca. 1,3%. Mit etwa 0,1% treten vereinzelte Ausreißer mit Werten kleiner als -30 mm/Jahr und größer als +30 mm/Jahr auf. Da diese Punkte individuell überprüft werden müssen, wurde das PSI-Ergebnis nicht generell um diese vermeintlichen Ausreißer bereinigt. Die Verteilung der Kohärenzwerte ist in Abbildung 52 dargestellt. Die Werte sind im Projektgebiet sehr hoch und betragen im Mittelwert ca. 0,75. Das Minimum liegt dabei bei 0,6, der maximale Wert bei 0,99.

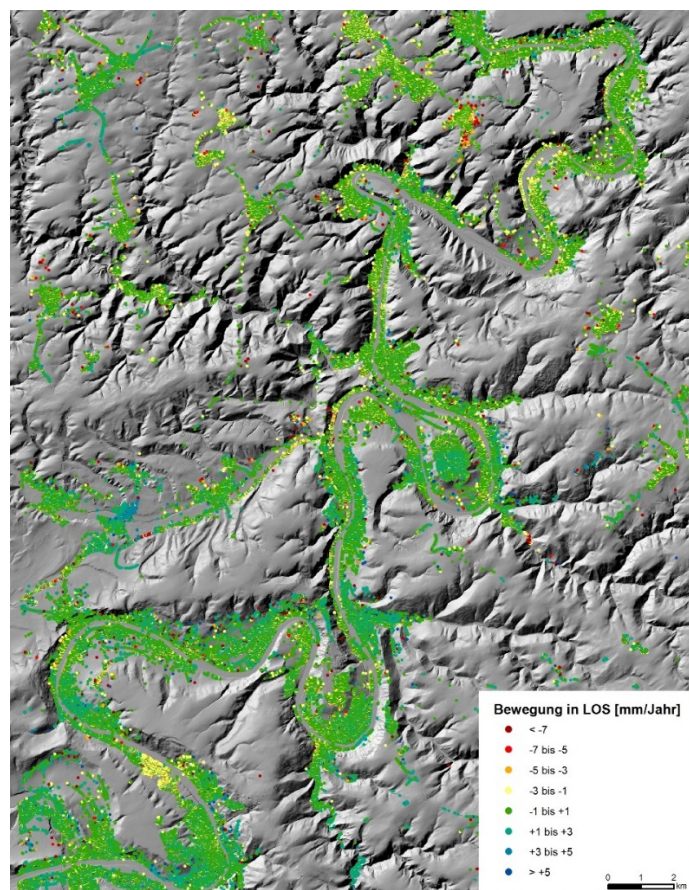


Abbildung 51: Ergebnis der PSI-Prozessierung von Track 116 (Hintergrund: DGM5, LVermGeo).

Tabelle 11: Statistik des PSI-Ergebnisses für Track 116.

Klasse	Anzahl PSI	%
$\leq -30$	147	0,01
$>-30$ und $\leq -7$	6.599	0,3
$>-7$ und $\leq -5$	6.100	0,3
$>-5$ und $\leq -3$	22.231	1,0
$>-3$ und $\leq -1$	192.679	8,8
$>-1$ und $\leq 1$	1.513.409	68,9
$>1$ und $\leq 3$	422.534	19,2
$>3$ und $\leq 5$	25.229	1,2
$>5$ und $\leq 30$	6.820	0,3
$>30$	40	0,00

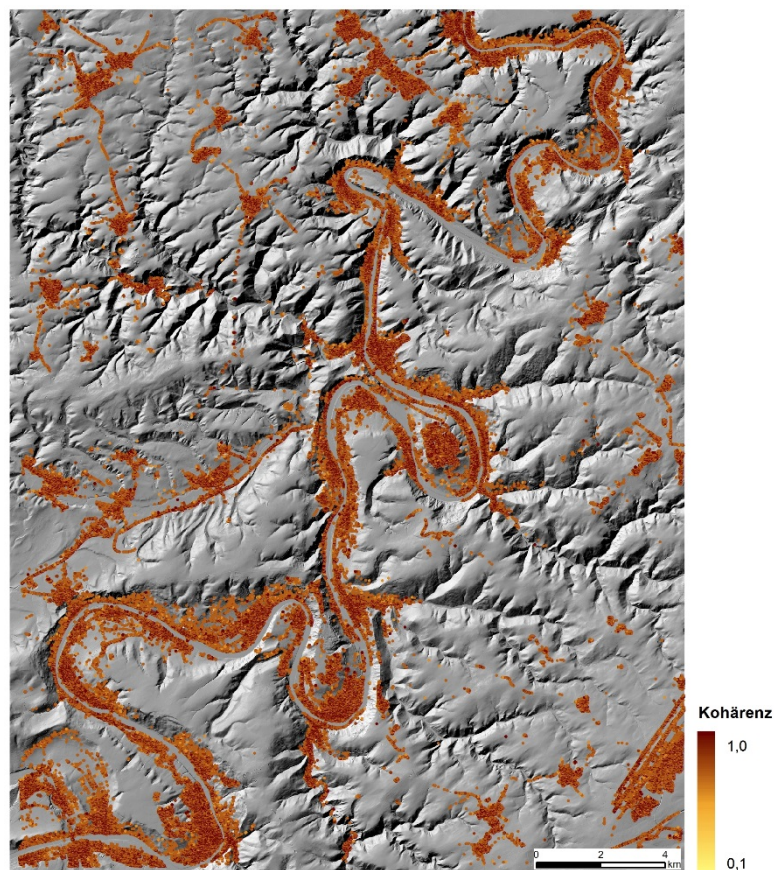


Abbildung 52: Räumliche Verteilung der Kohärenzwerte der PSI-Prozessierung für Track 116.



Im PSI-Datensatz des Descending-Orbits Track 154 wurden in einem Gebiet von ca. 530 km<sup>2</sup> etwa 2.145.624 PSI-Punkte erzielt. Dies entspricht einer durchschnittlichen Dichte von etwa 4.048 Punkte pro km<sup>2</sup>. Abbildung 53 zeigt das PSI-Ergebnis für den Descending Orbit Track 154. Hierbei ist der Absenkungsbereich im Gebiet Bernkastel-Kues auffällig. Durch eine erneute Teilprozessierung konnte dieser Bereich optimiert werden (Abbildung 53). Ca. 70% der PSI-Punkte liegen im stabilen Bereich von  $\pm 1$  mm/Jahr (Tabelle 12). Bewegungsmessungen im Bereich leichter Hebung und Senkung (Bewegungsklasse  $+1$  bis  $+3$  mm/Jahr und Klasse  $-1$  bis  $-3$  mm/Jahr) kommen mit ca. 10% und 17% vor. Im Bereich stärkerer Hebung ab  $+3$  mm/Jahr liegen ca. 0,8% der PSI-Daten. Im stärkeren Bereich der Senkung ab  $-3$  mm/Jahr kommen ca. 2% der Messwerte vor. 140 PSI-Punkte liegen außerhalb von  $\pm 30$  mm/Jahr. Hierbei handelt es sich wahrscheinlich um Ausreißer, die individuell geprüft werden müssen. Das PSI-Ergebnis wurde daher nicht generell um Ausreißer bereinigt. Die Verteilung der Kohärenzwerte ist in Abbildung 54 dargestellt. Die Werte sind im Projektgebiet sehr hoch und betragen im Mittelwert ca. 0,75. Das Minimum liegt dabei bei 0,6, der maximale Wert bei 0,99.

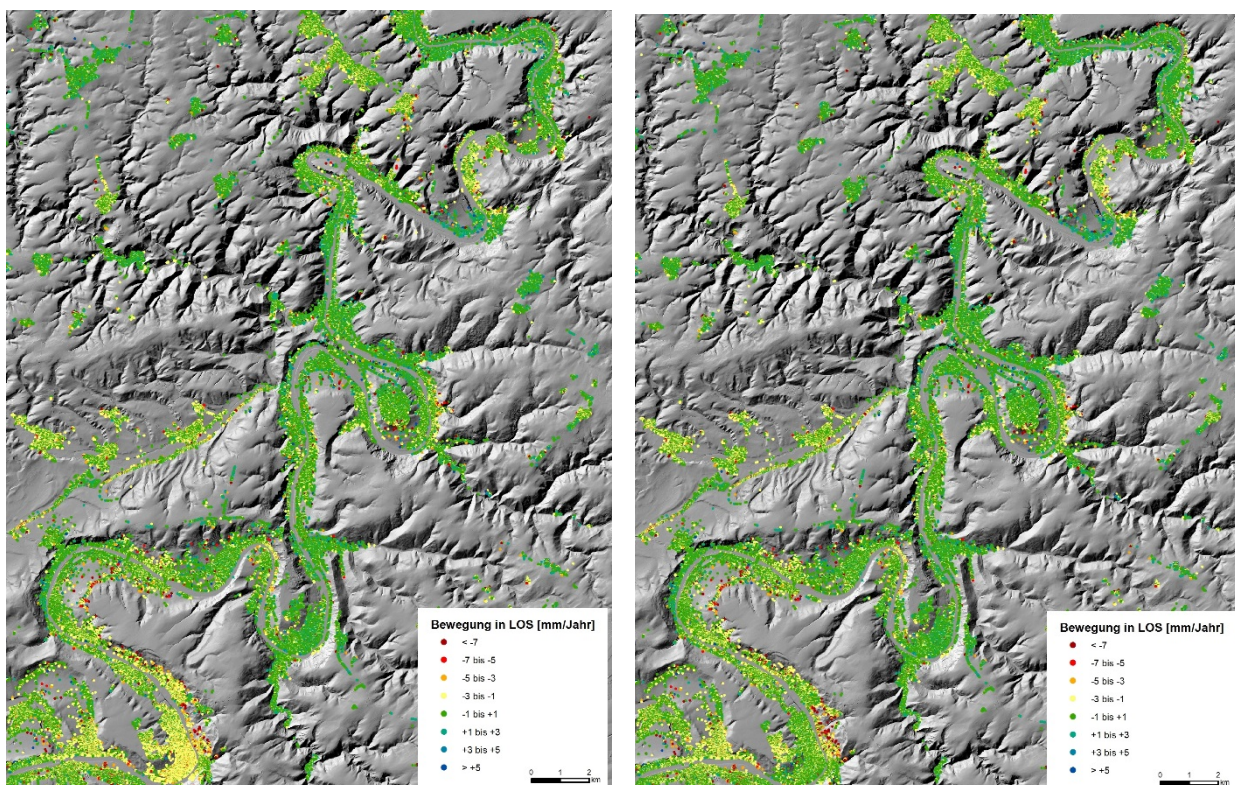


Abbildung 53: Ergebnis der PSI-Prozessierung von Track 154 (links) und mit optimierter Teilprozessierung für den Bereich Bernkastel-Kues (rechts) (Hintergrund: DGM5, LVermGeo).

Tabelle 12: Statistik des PSI-Ergebnisses für Track 154.

Klasse	Anzahl PSI	%
$\leq -30$	91	0,00
$>-30$ und $\leq -7$	6.428	0,3
$>-7$ und $\leq -5$	7.471	0,3
$>-5$ und $\leq -3$	33.535	1,6
$>-3$ und $\leq -1$	363.253	16,8
$>-1$ und $\leq 1$	1.515.425	69,9
$>1$ und $\leq 3$	225.497	10,4
$>3$ und $\leq 5$	12.804	0,6
$>5$ und $\leq 30$	4.094	0,2
$>30$	49	0,00

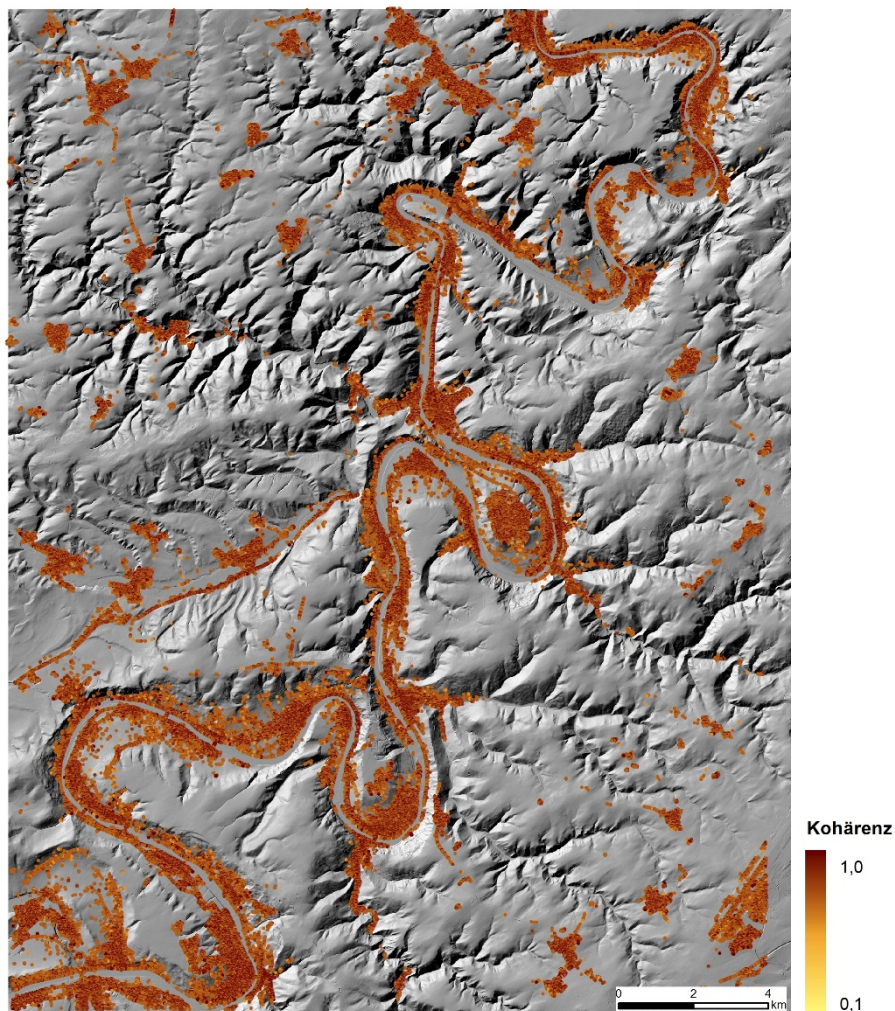


Abbildung 54: Räumliche Verteilung der Kohärenzwerte der PSI-Prozessierung für Track 154.

### 3.2.1.10 SBAS-Datensätze Mosel

Die SBAS-Prozessierung für den TerraSAR-X-Ascending-Datensatz von Track 116 lieferte 667.991 SBAS-Punkte für ein Gebiet von ca. 530 km<sup>2</sup>. Dies entspricht einer durchschnittlichen Dichte von ca. 1.260 Punkten pro km<sup>2</sup>. Das SBAS-Ergebnis von Track 116 ist in Abbildung 55 dargestellt. Mit etwa 61% kommt die Mehrheit der Daten im stabilen Bereich von +/- 1 mm/Jahr vor (Tabelle 13). In der Bewegungsklasse von +1 bis +3 mm/Jahr sind ca. 15% und in Klasse -1 bis -3 mm/Jahr ca. 20% der SBAS-Daten vorhanden. Lediglich 1,2% kommen im Wertebereich von größer +3 mm/Jahr vor. Geländeabsenkungen mit Werten von geringer als -3 mm/Jahr liegen mit ca. 2,5% vor. Im SBAS-Datensatz sind keine größeren Ausreißer vorhanden. Lediglich ein Messpunkt besitzt den Wert -35,7 mm/Jahr.

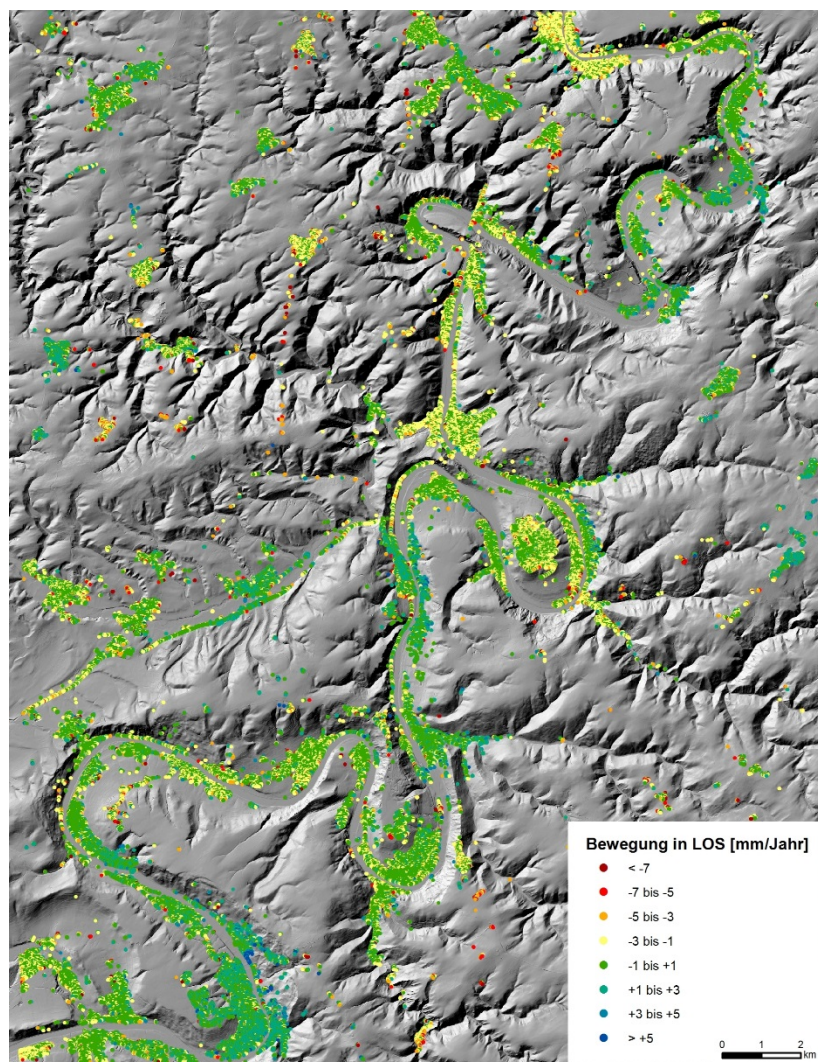


Abbildung 55: SBAS-Ergebnis im Untersuchungsgebiet Mosel für Track 116 (Hintergrund: DGM5 LVermGeo).

Tabelle 13: Statistik des SBAS-Ergebnisses für Track 116.

Klasse	Anzahl PSI	%
$\leq -30$	1	0,0
$>-30$ und $\leq -7$	1.016	0,2
$>-7$ und $\leq -5$	2.360	0,4
$>-5$ und $\leq -3$	12.347	1,9
$>-3$ und $\leq -1$	135.613	20,3
$>-1$ und $\leq 1$	406.038	60,9
$>1$ und $\leq 3$	101.488	15,2
$>3$ und $\leq 5$	6.734	1,0
$>5$ und $\leq 30$	1.286	0,2

Die Verteilung der Kohärenzwerte der SBAS-Prozessierung ist in Abbildung 56 dargestellt. Die Werte sind im Projektgebiet unterschiedlich verteilt. Vor allem im nordöstlichen Teil kommen geringere Kohärenzwerte vor. Die Werte im Projektgebiet bewegen sich zwischen 0,17 und 0,82.

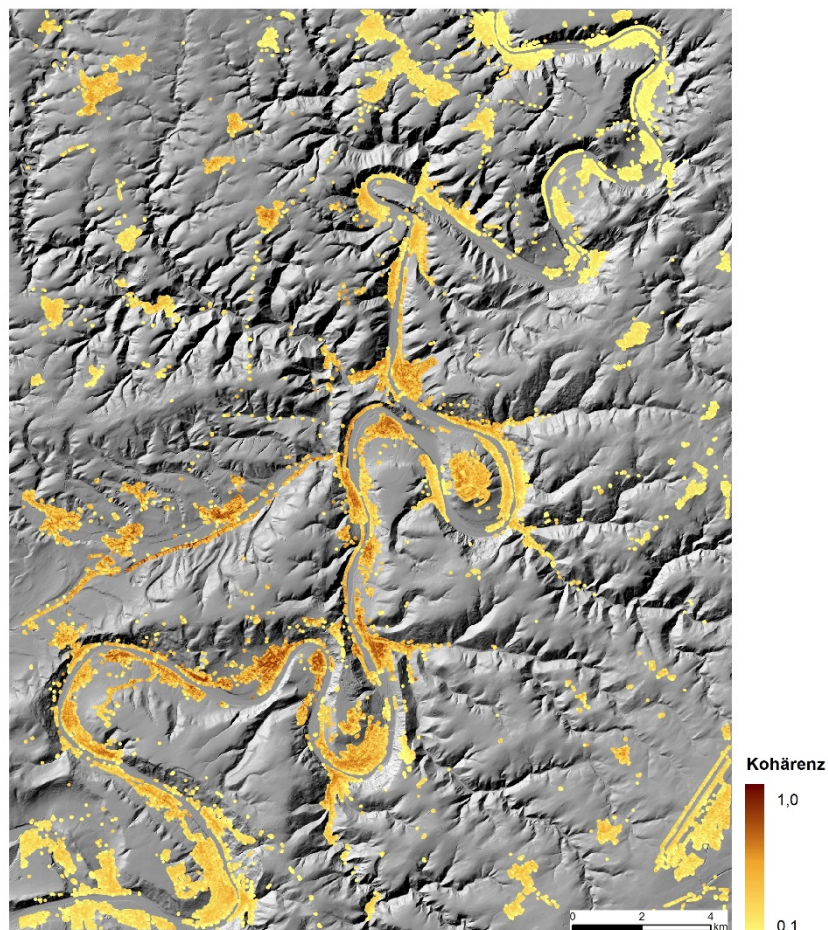


Abbildung 56: Räumliche Verteilung der Kohärenzwerte der SBAS-Prozessierung für Track 116.

Die SBAS-Prozessierung für den TerraSAR-X-Descending-Datensatz von Track 154 lieferte 560.814 SBAS-Punkte für ein Gebiet von ca. 530 km<sup>2</sup>. Dies entspricht einer durchschnittlichen Dichte von ca. 1.056 Punkten pro km<sup>2</sup>. Das SBAS-Ergebnis von Track 154 ist in Abbildung 57 dargestellt. Die knappe Mehrheit der Daten (ca. 53%) kommt im stabilen Bereich von +/- 1 mm/Jahr vor (Tabelle 14). Knapp 30% der Daten liegen im Bereich leichter Hebungen (+1 bis +3 mm/Jahr). Etwa 17,5% der Daten liegen im Bereich von Geländeabsenkungen mit Werten geringer als -1 mm/Jahr. Im SBAS-Datensatz kommen keine größeren Ausreißer vor. Lediglich ein Messpunkt besitzt den Wert -31,7 mm/Jahr.

Die Verteilung der Kohärenzwerte der SBAS-Prozessierung ist in Abbildung 58 dargestellt. Die Werte im Projektgebiet bewegen sich zwischen 0,1 und 0,76.

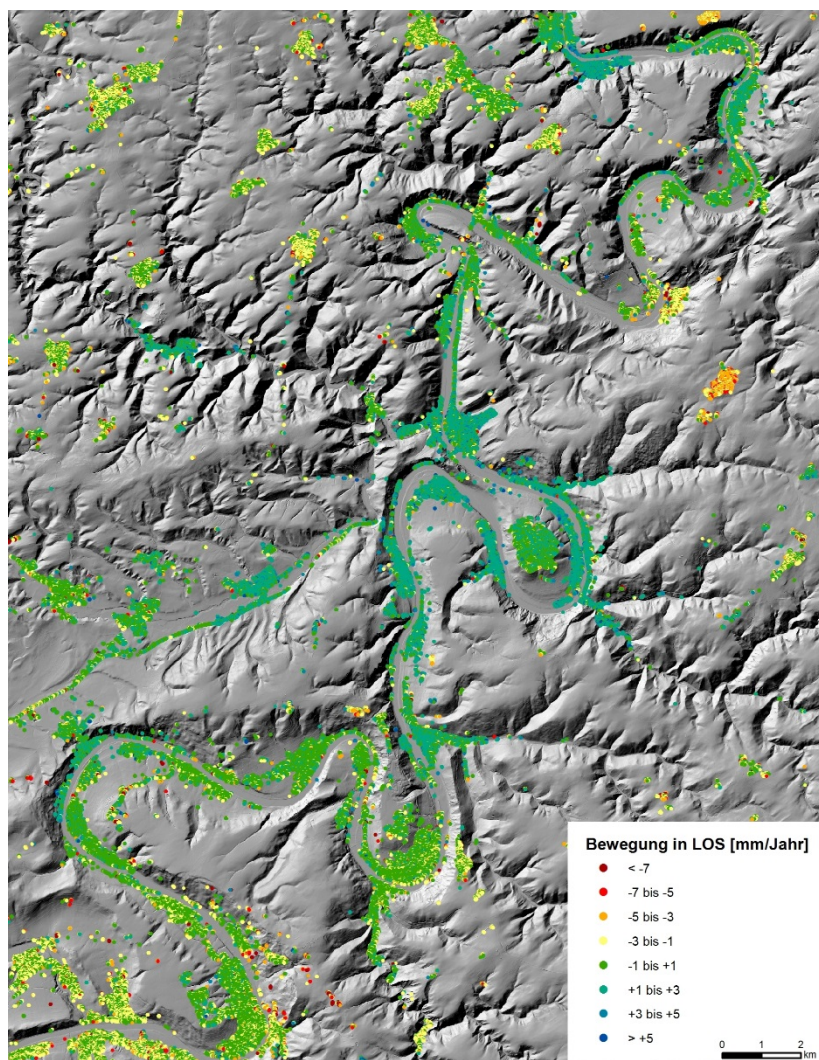


Abbildung 57: SBAS-Ergebnis im Untersuchungsgebiet Mosel für Track 154 (Hintergrund: DGM5 LVermGeo).

Tabelle 14: Statistik des SBAS-Ergebnisses für Track 154.

Klasse	Anzahl PSI	%
$\leq -30$	1	0,0
$>-30$ und $\leq -7$	873	0,2
$>-7$ und $\leq -5$	1.758	0,3
$>-5$ und $\leq -3$	10.962	2,0
$>-3$ und $\leq -1$	83.333	14,9
$>-1$ und $\leq 1$	297.958	53,1
$>1$ und $\leq 3$	158.513	28,3
$>3$ und $\leq 5$	6.558	1,2
$>5$ und $\leq 30$	858	0,2

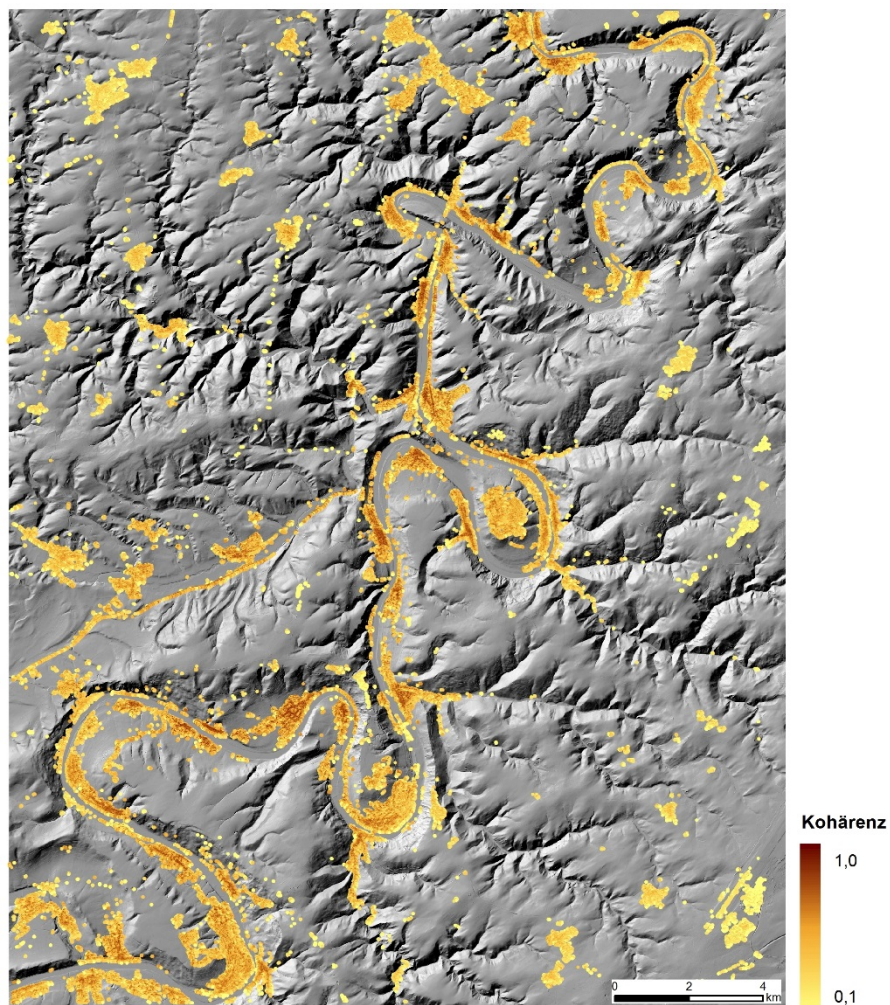


Abbildung 58: Räumliche Verteilung der Kohärenzwerte der SBAS-Prozessierung für Track 154.

### 3.2.2 Indikatoren für geogene Gefährdungen

Zur Identifizierung weiterer Indikatoren für geogene Gefährdungen, wie zum Beispiel Veränderungen der Vitalität der Vegetation, wird der Vegetationsindex NDVI basierend auf RapidEye-Daten herangezogen. Zur Analyse der Detailgebiete wurden weiterhin Digitale Geländemodelle sowie weitere Daten und Karten verwendet.

#### 3.2.2.1 Vegetationsindex NDVI

Zur Detektion von Veränderungen der Vitalität der Vegetation sowie sonstigen auffälligen Oberflächenveränderungen wird der Vegetationsindex NDVI berechnet.

Der Normalized Differenced Vegetation Index (NDVI) spiegelt das Maß der Vitalität der Vegetation wieder. Er wird aus Daten des nahen Infrarots (NIR) und des roten Spektralbereichs (R) berechnet:

$$\text{NDVI} = \frac{\text{NIR} - \text{R}}{\text{NIR} + \text{R}}$$

Durch die Normierung können nur Werte zwischen -1 und +1 vorkommen. Sie führt zudem dazu, dass Unterschiede in den Beleuchtungsverhältnissen sowie Einflüsse der Geländeneigung weitestgehend kompensiert werden. In der Regel wird die Vitalität der Vegetation farbcodiert dargestellt, wobei Bereiche ohne Vegetation mit brauner und Bereiche dichter Vegetation mit grüner Farbe dargestellt werden.

#### 3.2.2.2 RapidEye

RapidEye-Daten von 2012 stehen bundesweit kostenfrei über eine Lizenz für die Nutzung bei Einrichtungen des Bundes und der Länder über das Bundesamt für Kartographie und Geodäsie (BKG) zur Verfügung. Die bundesweit verfügbaren Daten sind in Abbildung 59 dargestellt. Für das Projektgebiet sind Datensätze von August und September 2012 verfügbar. Diese sind für die beschriebene Auswertemethodik nur bedingt geeignet, da Aufnahmen möglichst von vor Beginn der Vegetationsperiode benötigt würden.

Aus diesem Grund wurden weitere für öffentliche Einrichtungen kostenfrei verfügbare RapidEye-Daten der ESA beantragt, die im Rahmen der Copernicus-Initiative finanziert werden. Es konnten insgesamt fünf Szenen (vom 8. April 2011, 18. April 2011 und 25. April 2011) genutzt werden.

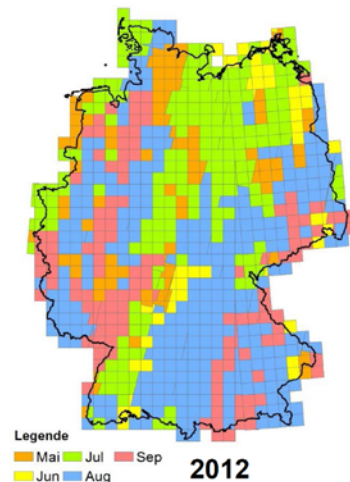


Abbildung 59: Verfügbaren Daten von RapidEye von 2012 für das Bundesgebiet (Andreas Busch (BKG), Vortrag Nationales Forum für Fernerkundung und Copernicus, 8.4.2014).

### 3.2.2.3 Digitale Geländemodelle

Zur Auswertung von Indikatoren für Geländebewegungen wie beispielsweise Depressionen, Abrisskanten, Geländeunebenheiten, Klüfte und Frakturen standen für verschiedene Gebiete Digitale Geländemodelle unterschiedlicher Auflösungen zur Verfügung (Tabelle 15). Das Digitale Geländemodell mit einer Gitterweite von 10 Metern und einer Abdeckung für das gesamte Projektgebiet wurde über eine Nutzungslizenz über das BKG bezogen. Für das Detailgebiet Mosel zwischen Bernkastel-Kues und Cochem (546 km<sup>2</sup>) wurde das DGM5 vom Landesamt für Vermessung und Geobasisinformation Rheinland-Pfalz sowie für das Detailgebiet Mendig (6 km<sup>2</sup>) ein hochauflösendes Digitales Geländemodell mit Rasterweite von 1 Meter beschafft.

Tabelle 15: Übersicht der Digitalen Geländemodelle.

Datensatz	Abdeckung	Datenherr	Datenkosten
DGM10	Projektgebiet Rhein-Mosel	BKG	Interne Bereitstellung mit Lizenz
DGM5 (2008 - 2011)	Detailgebiet Mosel (546 km <sup>2</sup> )	Landesamt für Vermessung und Geobasisinformation Rheinland-Pfalz (LVerGeo)	2.092 Euro (Stand 2015, 20,00 €/km incl. Flächenstaffelrabatt ab 500km <sup>2</sup> , abzüglich 80% Rabatt für Forschungs- zwecke)
DGM1 (2008/2009)	Detailgebiet Mendig (6 km <sup>2</sup> )	LVerGeo	96 Euro (Stand 2015, 80,00 €/km <sup>2</sup> , abzüglich 80% Rabatt für Forschungszwecke)



### 3.2.2.4 Weitere Daten und Karten

Zur Auswertung wurden weiterhin die in Tabelle 16 aufgeführten Satelliten- und Luftbilder sowie Daten und Karten verwendet.

Tabelle 16: Übersicht der verwendeten Luftbilder und Karten.

Datensatz	Maßstab	Quelle
Vulkanologische Karte der Osteifel	1:50.000	Schmincke & Bogaard (1990)
Übersichtskarte der oberflächennahen Rohstoffe in Rheinland-Pfalz	1:50.000	LGB
Geologische Übersichtskarte von Rheinland-Pfalz (GÜK)	1:300.000	LGB
GÜK300 Verwerfungen	1:300.000	LGB
Hangstabilitätskarte (Rutschungen, Steinschlag)	1:5.000	LGB
Rutschungsdatenbank	---	LGB
Mendig: Umriss der Bergbaue abgeleitet aus der Preußischen Uraufnahme von 1847 (Abbildung 60)	---	LGB
Mendig: Hohlraumkarte (Abbildung 61)	---	LGB
Mendig: Gefahrenkarte	1:200	LGB
Mayen: Kartierung Grubenfeld Mayen: Übersichtsplan der „Grube Nagelsky“	---	Dipl. Geogr. J. Kling 2008, im Auftrag des NABU Rheinland-Pfalz

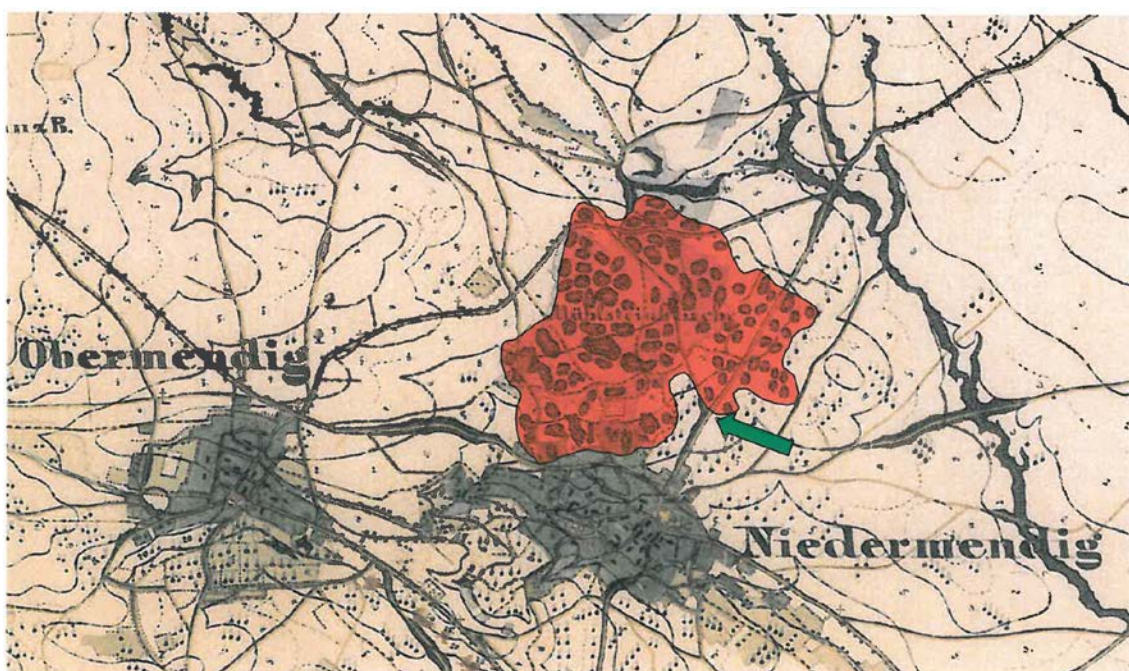


Abbildung 60: Preußische Uraufnahme von 1847 (Rogall & Wehinger, 2011).

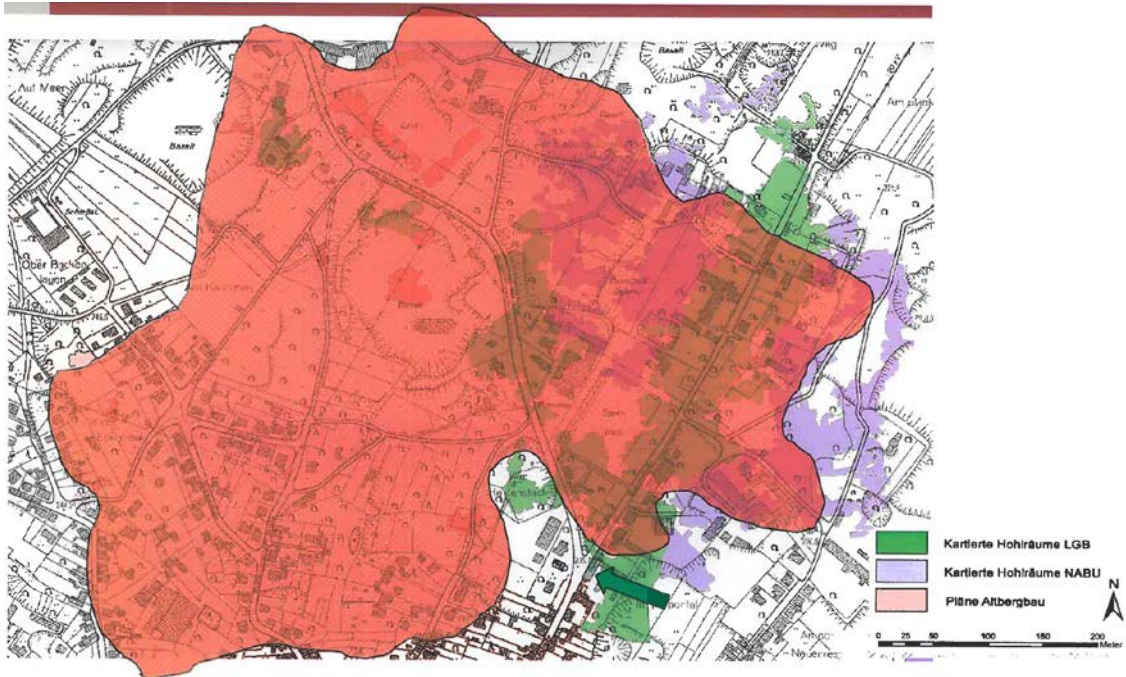


Abbildung 61: Umriss der Bergbaue abgeleitet aus der preußischen Uraufnahme von 1847 über der Hohlraumkarte von Mendig (Rogall & Wehinger, 2011).

### 3.3 Ergebnisse

Im Folgenden werden die Ergebnisse der Bewegungsanalysen sowie der Vegetationsanalysen und Geländeuntersuchungen für die Altbergbaugebiete in Mendig und Mayen sowie die Hangrutschbereiche an der Mosel dargestellt.

#### 3.3.1 Altbergbaugebiet Mendig

Zur Analyse der Bewegungsdaten wurden zunächst die historischen Datensätze von ERS-1/2 (1995 bis 2000) und Envisat ASAR (2003 bis 2010) mit den aktuellen Daten von TerraSAR-X (2012 bis 2013) verglichen. Hierfür wurde ein Ausschnitt der Daten gewählt, der aus den Karten von Mendig über bekannte und kartierte Hohlräume abgeleitet wurde. Die räumliche Verteilung der PSI-Daten der vier PSI-Datensätze sind in Abbildung 62 bis Abbildung 65 dargestellt. In dem ca. 1,4 km<sup>2</sup> großen Gebiet kommen in den historischen Datensätzen von ERS-1/2 und Envisat ASAR zwischen ca. 200 und 2.000 PSI-Punkte vor (Tabelle 17). Im Gegensatz dazu bietet der PSI-Datensatz von TerraSAR-X ca. 24.500 Punkte, was einer Dichte von ca. 17.200 PS/km<sup>2</sup> entspricht. Somit weist dieser Datensatz 12 bis 112-fach mehr Punkte/km<sup>2</sup> auf, als die Datensätze von ERS-1/2 und Envisat ASAR (siehe hierzu Kapitel 3.2.1.2: Erhöhung der räumlichen Dichte bei X-Band im Vergleich zu C-Band Daten).

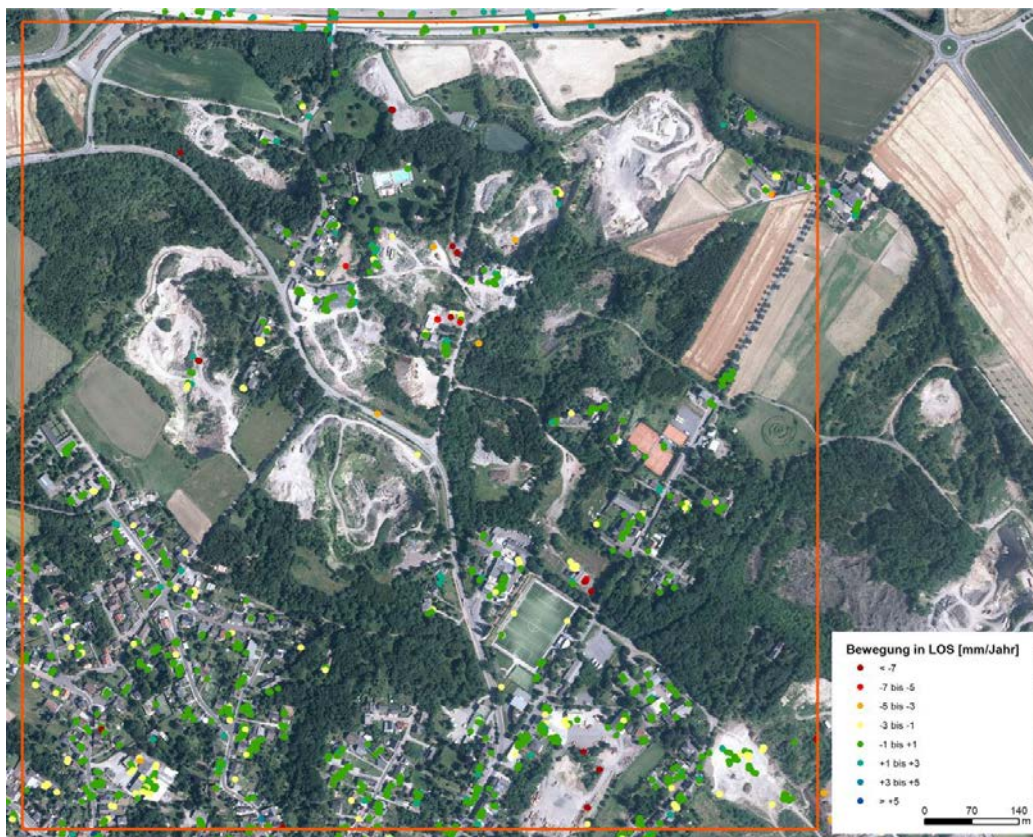


Abbildung 62: PSI-Daten vom ERS-1/2-Descending-Datensatz Track 337 über Digitalen Orthophotos DOP40 vom BKG.

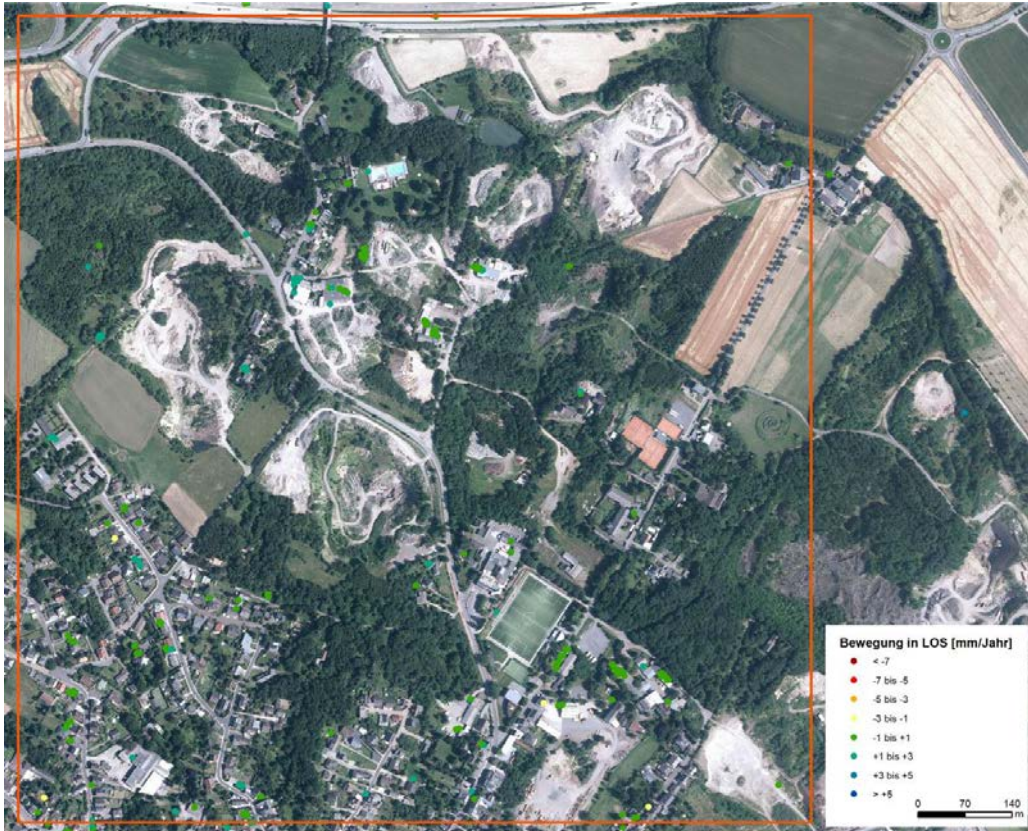


Abbildung 63: PSI-Daten vom ERS-1/2-Ascending-Datensatz Track 487 über Digitalen Orthophotos DOP40 vom BKG.



Abbildung 64: PSI-Daten vom Envisat-ASAR-Descending-Datensatz Track 337 über Digitalen Orthophotos DOP40 vom BKG.

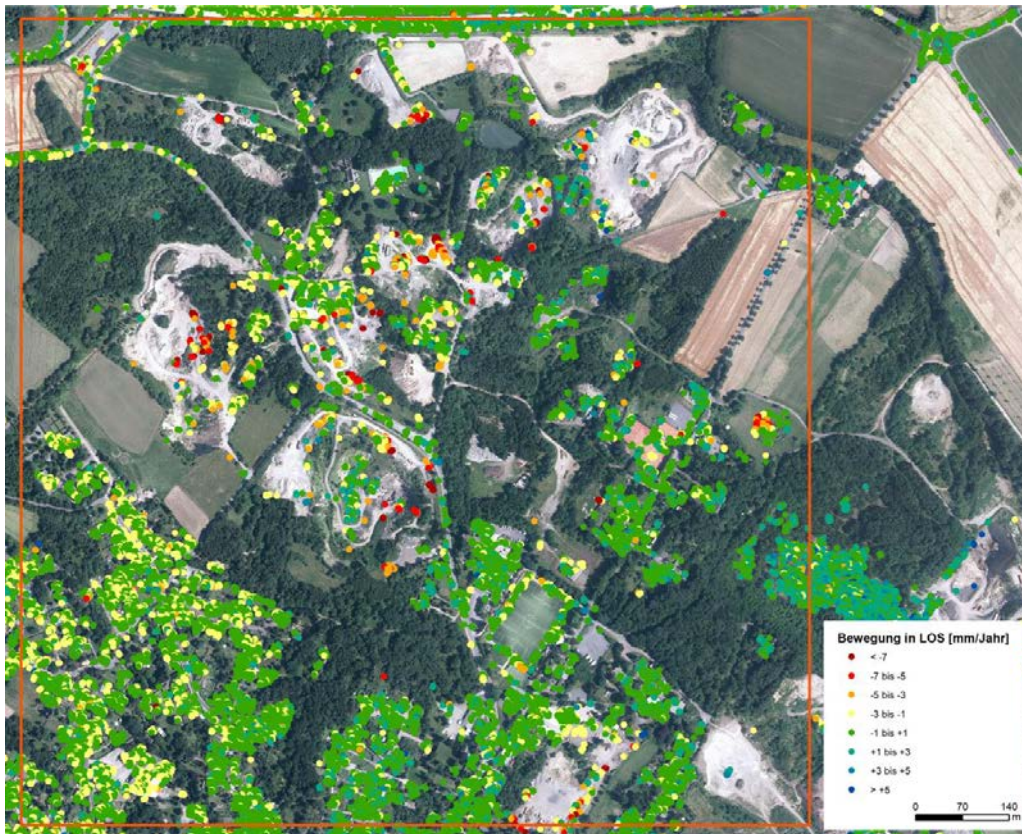


Abbildung 65: PSI-Daten vom TerraSAR-X-Descending-Datensatz Track 154 über Digitalen Orthophotos DOP40 vom BKG.

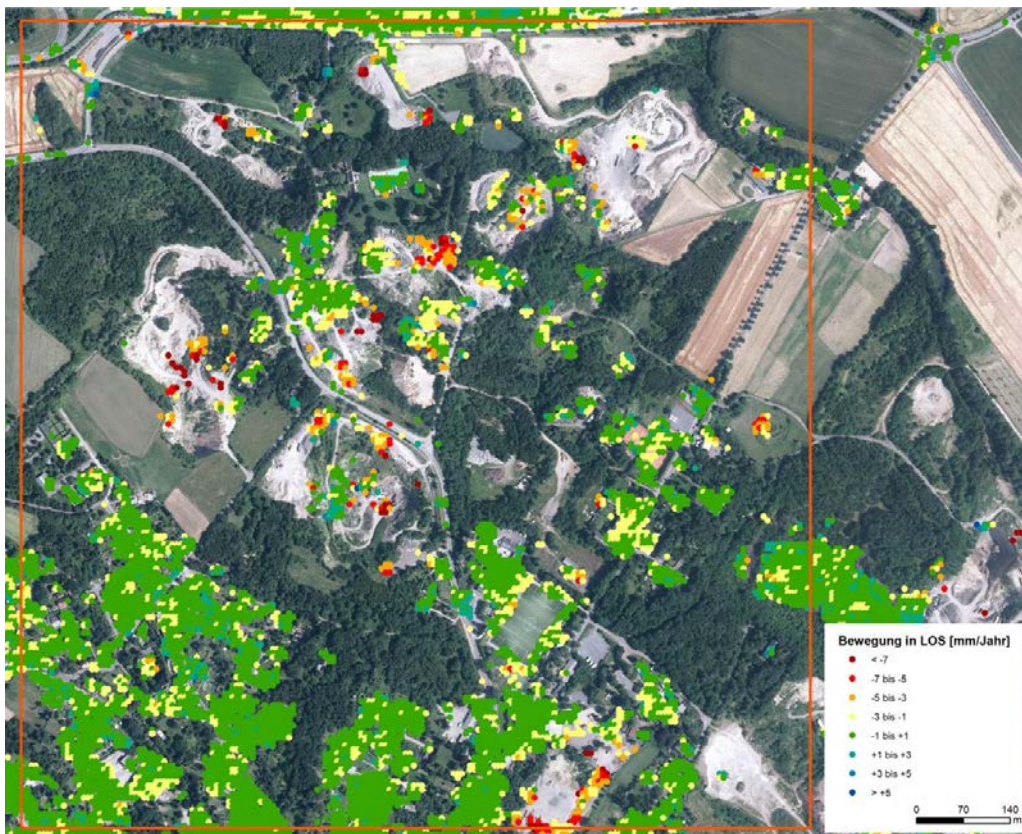


Abbildung 66: SBAS-Daten vom TerraSAR-X-Descending-Datensatz Track 154 über Digitalen Orthophotos DOP40 vom BKG.

Die PSI- und SBAS-Prozessierungen der TerraSAR-X-Daten (Abbildung 65 und Abbildung 66) wurden für den gewählten Ausschnitt entsprechend der ERS-1/2- und Envisat-Daten ausgewertet. Gebiete mit Bewegungsraten geringer als -1 mm/Jahr wurden in großen Maßstäben ab 1:10.000 kartiert. Den Bewegungsgebieten wurden Bewegungskategorien zugewiesen, die aus Luftbildern, Digitalen Orthophotos (DOP40) und Geländebegehungen bestimmt wurden. Die resultierenden sechs Kategorien sind Halden, Gebäude, Industrie und Gewerbe, Sportplatz, Tagebau und Sonstiges (Abbildung 67).

Tabelle 17: Anzahl der PSI-Punkte und Dichte für die ERS-1/2-, Envisat ASAR- und TerraSAR-X-Datensätze.

Datensatz	Anzahl PSI-Punkte	Dichte [PS/km <sup>2</sup> ]
ERS-1/2 Descending Track 337	1.189	838
ERS-1/2 Ascending Track 487	218	154
Envisat ASAR Descending Track 337	1.980	1.395
TerraSAR-X Descending Track 154	24.474	17.247

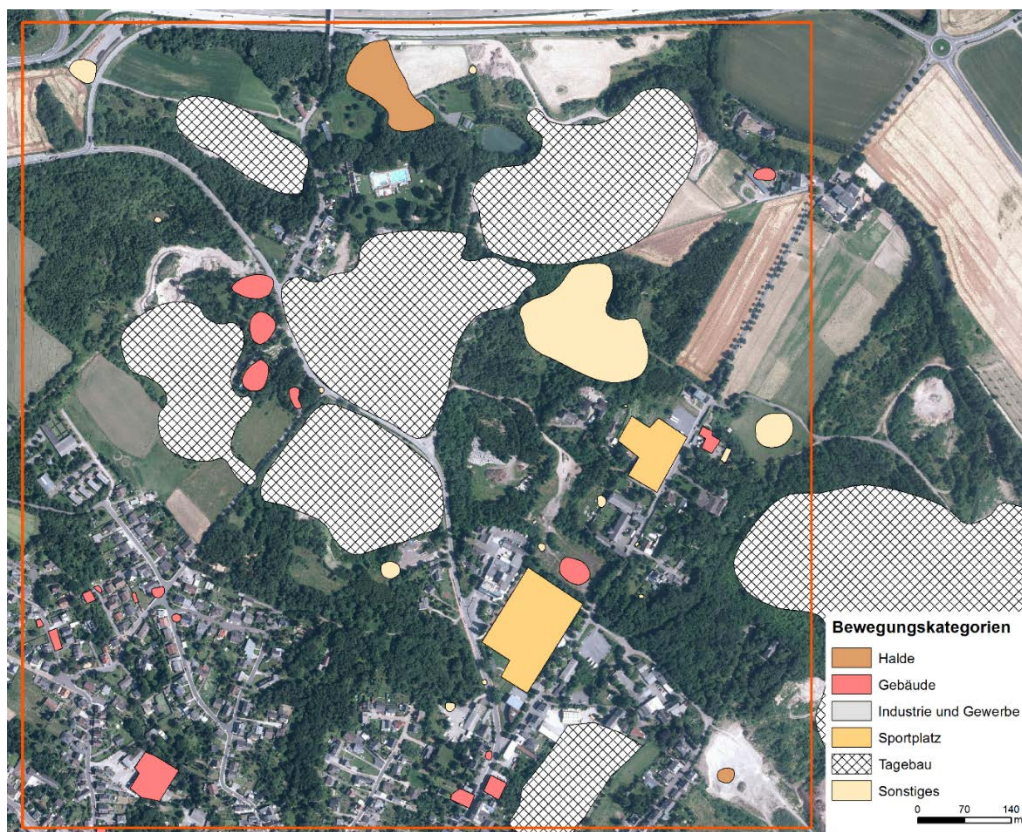


Abbildung 67: Ergebnisse der Bewegungskartierung für Mendig anhand der PSI- und SBAS-Datensätze.

Zur detaillierten Auswertung der PSI- und SBAS-Bewegungsdaten der TerraSAR-X-Daten wurden 6 Bewegungsgebiete ausgewählt (Abbildung 68 und Abbildung 69). Die Statistiken zu den ausgewerteten Bewegungsgebieten sind in Tabelle 18 und Tabelle 19 aufgeführt. Bei Bewegungsgebiet 1 handelt es sich um einen Steinkreisel im Nordosten von Mendig. Bewegungsgebiete 2, 3 und 5 liegen hinter Gebäuden in der Brauerstraße. Bewegungsgebiet 4 befindet sich auf dem Gebiet der „Petershütte“ nördlich vom Sportplatz. Hierbei handelt es sich um einen Risikobereich, da die Basaltpfeiler unter Tage sehr stark beschädigt sind (Abbildung 70). Vermutlich sind die starken Schäden mit einem benachbarten Tagesbruch begründet, der zusätzlichen Druck auf die Pfeiler ausübt. Bewegungsgebiet 6 liegt neben einem Tagebau an der Laacher-See-Straße. Die Zeitreihen der Bewegungsgebiete 1 bis 6 von PSI und SBAS sind in Abbildung 71 bis Abbildung 81 zu sehen.

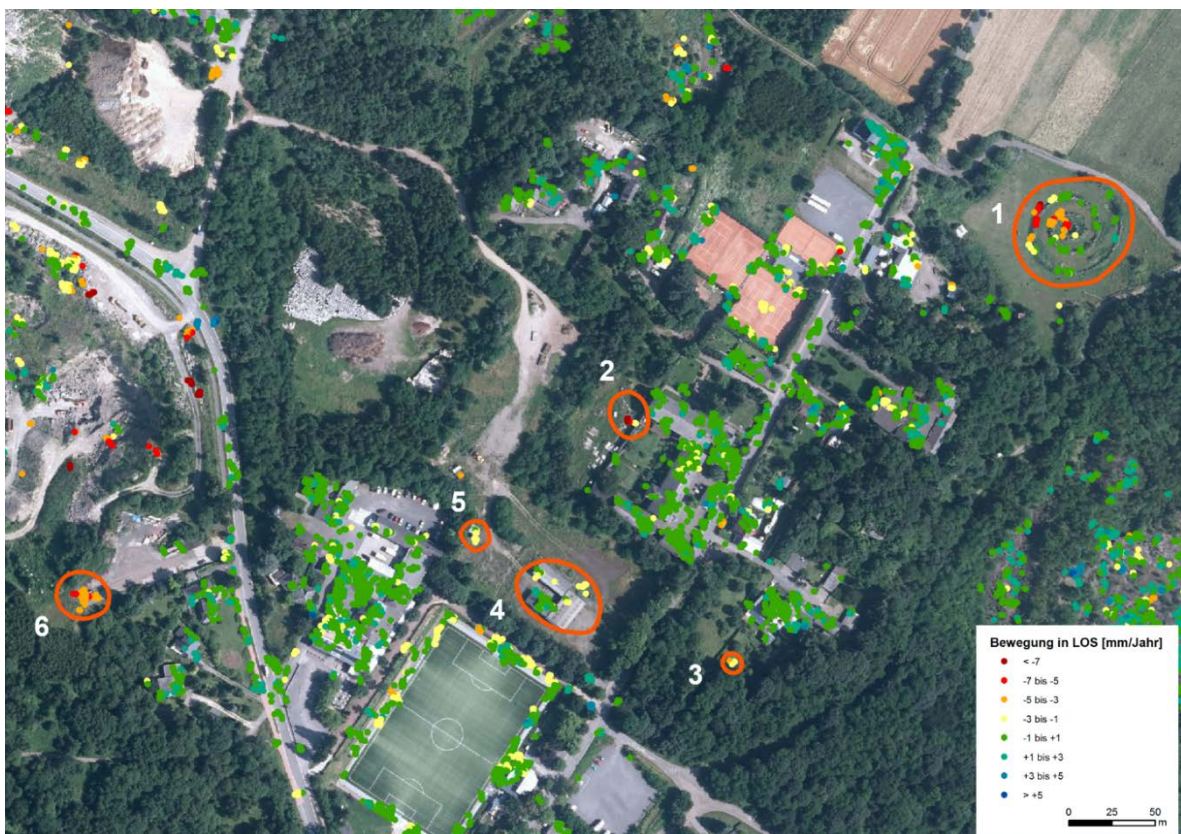


Abbildung 68: Übersicht der Lage der Bewegungsgebiete 1 bis 6 mit PSI-Daten der TerraSAR-X-Prozessierung (Hintergrund: DOP40, BKG).

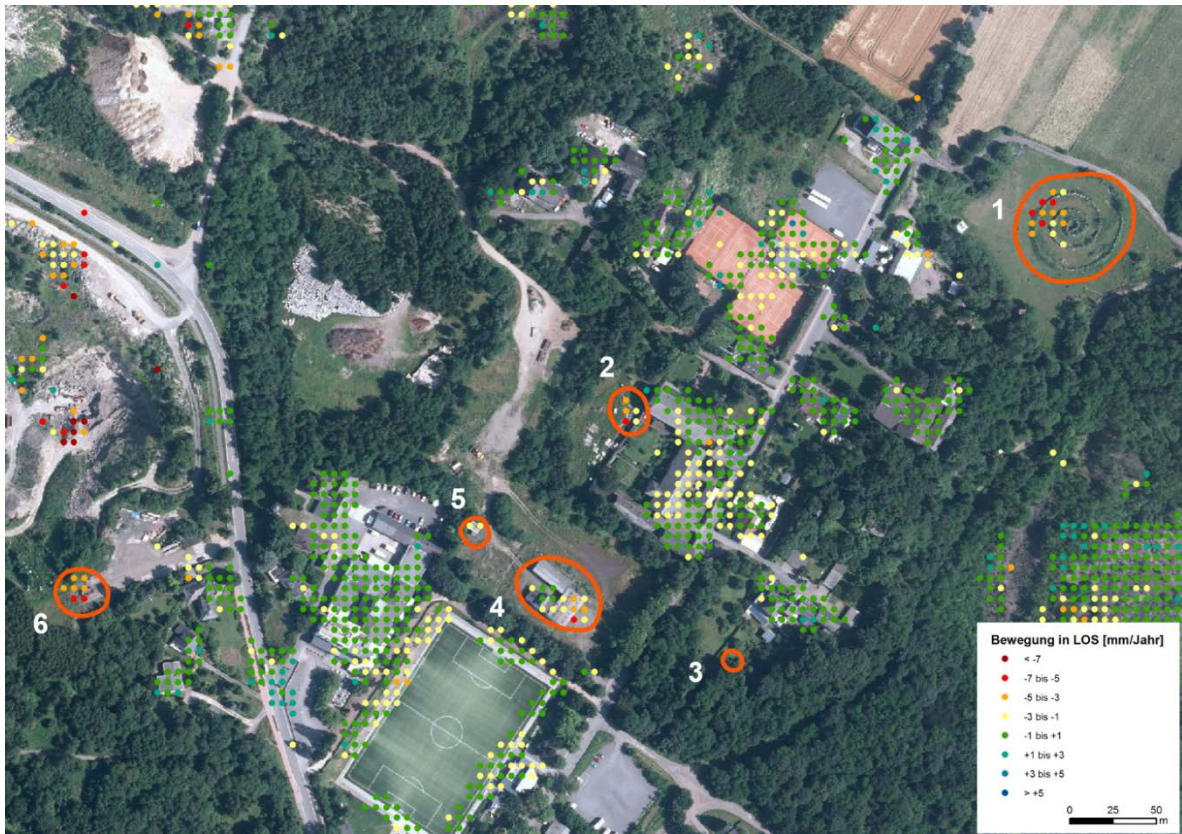


Abbildung 69: Übersicht der Lage der Bewegungsgebiete 1 bis 6 mit SBAS-Daten der TerraSAR-X-Prozessierung (Hintergrund: DOP40, BKG).



Abbildung 70: Zerbrochene und stark beschädigte Basaltpfiler unter Tage unter der Petershütte (Foto: C. Wolf, Februar 2014).



Tabelle 18: Statistik des PSI-Ergebnisses für die Bewegungsgebiete 1 bis 6.

	Anzahl Punkte	PSI Minimum [mm/Jahr]	PSI Maximum [mm/Jahr]	PSI Mittelwert [mm/Jahr]
Gebiet 1	114	-7,4	1,6	-2,1
Gebiet 2	6	-9,1	-1,7	-5,8
Gebiet 3	4	-4,0	-2,6	-3,0
Gebiet 4	47	-2,5	2,1	-0,5
Gebiet 5	8	-2,0	-0,6	-1,4
Gebiet 6	27	-6,2	-3,3	-4,7

Tabelle 19: Statistik des SBAS-Ergebnisses für Bewegungsgebiete 1 bis 6.

	Anzahl Punkte	SBAS Minimum [mm/Jahr]	SBAS Maximum [mm/Jahr]	SBAS Mittelwert [mm/Jahr]
Gebiet 1	15	-6,4	-1,6	-4,2
Gebiet 2	5	-6,0	-2,8	-3,9
Gebiet 3	--	--	--	--
Gebiet 4	15	-5,0	-0,4	-2,1
Gebiet 5	2	-2,7	-2,2	-2,5
Gebiet 6	7	-5,1	-4,1	-4,7

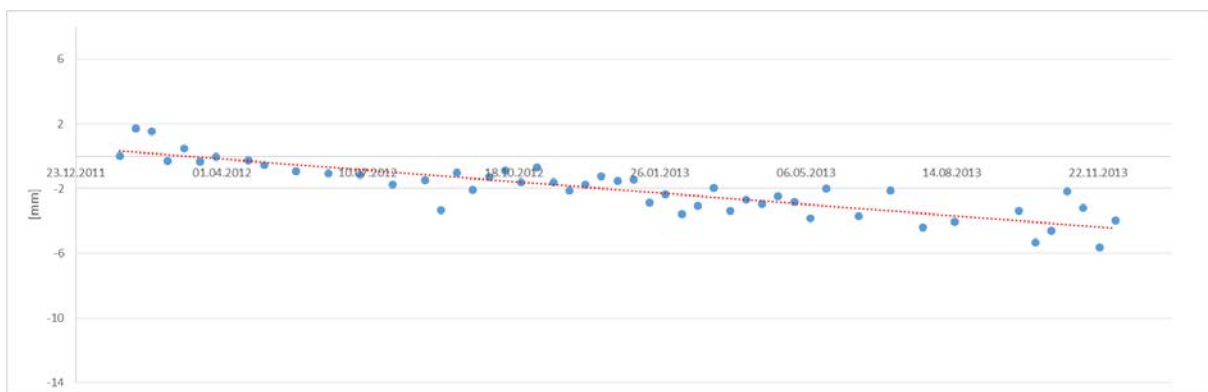


Abbildung 71: Zeitserie des Mittelwerts der PSI-Daten für Bewegungsgebiet 1 (blaue Punkte) mit linearer Trendlinie (rote Linie).



Abbildung 72: Zeitserie des Mittelwerts der SBAS-Daten für Bewegungsgebiet 1 (blaue Punkte) mit linearer Trendlinie (rote Linie).



Abbildung 73: Zeitserie des Mittelwerts der PSI-Daten für Bewegungsgebiet 2 (blaue Punkte) mit linearer Trendlinie (rote Linie).



Abbildung 74: Zeitserie des Mittelwerts der SBAS-Daten für Bewegungsgebiet 2 (blaue Punkte) mit linearer Trendlinie (rote Linie).

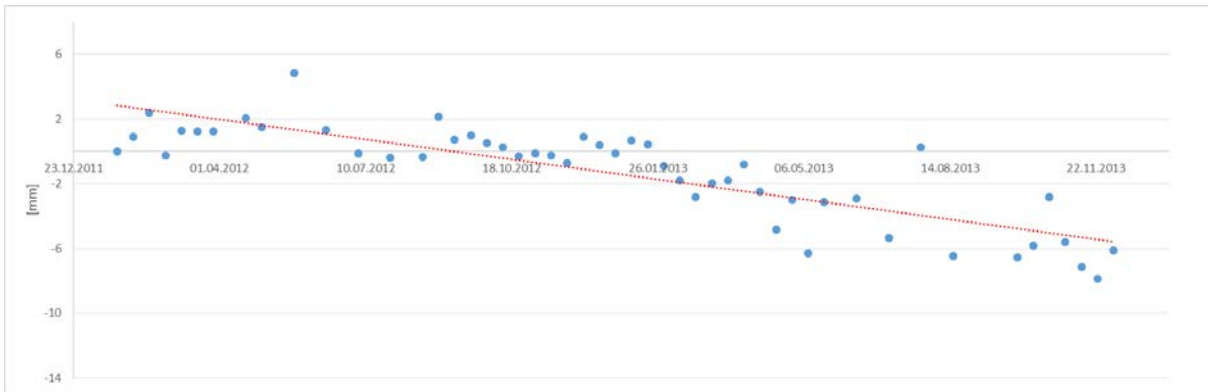


Abbildung 75: Zeitserie des Mittelwerts der PSI-Daten für Bewegungsgebiet 3 (blaue Punkte) mit linearer Trendlinie (rote Linie).



Abbildung 76: Zeitserie des Mittelwerts der PSI-Daten für Bewegungsgebiet 4 (blaue Punkte) mit linearer Trendlinie (rote Linie).



Abbildung 77: Zeitserie des Mittelwerts der SBAS-Daten für Bewegungsgebiet 4 (blaue Punkte) mit linearer Trendlinie (rote Linie).



Abbildung 78: Zeitserie des Mittelwerts der PSI-Daten für Bewegungsgebiet 5 (blaue Punkte) mit linearer Trendlinie (rote Linie).



Abbildung 79: Zeitserie des Mittelwerts der SBAS-Daten für Bewegungsgebiet 5 (blaue Punkte) mit linearer Trendlinie (rote Linie).



Abbildung 80: Zeitserie des Mittelwerts der PSI-Daten für Bewegungsgebiet 6 (blaue Punkte) mit linearer Trendlinie (rote Linie).

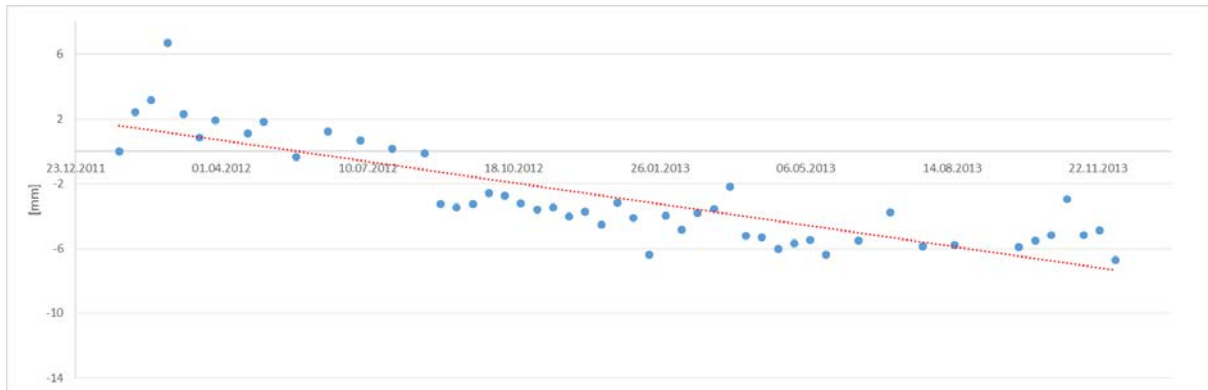


Abbildung 81: Zeitserie des Mittelwerts der SBAS-Daten für Bewegungsgebiet 6 (blaue Punkte) mit linearer Trendlinie (rote Linie).

Für den Bereich des Sportplatzes, an dem sich der Tagesbruch ereignet hatte, sowie an der Brauerei, an der es zu einem Wassereintrich kam, sind in den PSI- und SBAS-Daten keine signifikanten Auffälligkeiten erkennbar.

Bisher ist es noch unklar, wie weit es Hohlräume in den bebauten Bereich gibt. Unter Umständen könnte der Abbau bis ins Stadtzentrum gereicht haben. Allerdings handelt es sich eher um den Randbereich des Abbaus und lediglich kleinräumigere Hohlräume sind wahrscheinlich. Allerdings kommen vor allem an der Grenze von Hohlräumen Spannungen im Untergrund vor.

Im Jahre 2003 wurden einige Häuser an der Straße „Auf Wehserth“ über bekannten Hohlräumen gebaut. Der Envisat-ASAR-Datensatz von 2003 bis 2010 zeigt einige geringfügige Absenkungen an. Diese könnten mit der Setzung von Baugrund und Gebäuden zusammenhängen. Mit Hilfe der PSI- und SBAS-Datensätze von 2012 bis 2013 konnten für diesen Bereich jedoch keine Bewegungen festgestellt werden. Dies würde die Vermutung einer Gebäude- und Baugrundsetzung nach Fertigstellung der Neubauten unterstützen und keinen Zusammenhang mit unterirdischen Hohlräumen nahelegen.

Im Bereich eines Spielplatzes an der Hansastrasse ereignete sich in der Vergangenheit eine Absenkung der Geländeoberfläche. Ursache dieser Absenkung könnten Schachtverfüllungen oder instabile Gewölbe sein. Trotz potentieller Radarreflektoren wie ein Trafokasten, Schaukeln und Masten kommen in diesem Gebiete keine PSI- und SBAS-Daten vor. Ein Grund hierfür könnte sein, dass der Spielplatz von Bäumen und Büschen umgeben ist, die das Radarsignal potentieller Reflektoren negativ beeinflusst und daher kein kohärentes Signal empfangen und ausgewertet werden kann. In dem umgebenden Wohngebiet werden pro Neubau zwei tiefe Bohrungen verlangt. Jedoch kam es beispielsweise auch schon vor, dass in einer alten Karte Schächte verzeichnet waren, bei den Bohrungen jedoch keine Hohlräume angetroffen wurden. Es könnte jedoch auch sein, dass bei der Bohrung ein Basalt-Stützpfiler getroffen wurde und sich dennoch Hohlräume unter dem Neubau befinden, die jedoch nicht erbohrt wurden. Da das Wohngebiet jedoch immer

weiter bebaut wurde und Baulücken geschlossen wurden, ist die Auswertung mit PSI- und SBAS-Daten schwierig, da es sich bei auftretenden geringfügigen und kleinräumig verteilten Absenkungen ebenso um Gebäude- und Baugrundsetzungen handeln könnte. Zudem unterscheidet sich die Bewegung des Untergrundes je nachdem, ob alte Tagebaue aufgefüllt wurden oder ob noch der ursprüngliche Bims über den Hohlräumen erhalten blieb. Im Falle von Auffüllungen kann es zu Setzungen kommen, die sich an der Oberfläche abpausen, während der Bims Gewölbe ausbilden kann, die keine Oberflächenbewegung sichtbar machen. Sollte beispielsweise die Wiederauffüllung eines Tagesbruchbereiches um 30 cm absacken, so stellt dies für das Gebäude an der Erdoberfläche kein dramatisches Problem dar, da hier lediglich ein Zehntel, also 3 cm Absenkung ankommen würde, was z.B. lediglich zu kleineren Schäden wie z.B. Rissen im Gebäude führen würden (LGB).

Da aus den PSI- und SBAS-Daten keine signifikanten Absenkungsbereiche für das Wohngebiet abgeleitet werden konnten und zudem keine weiteren Indizien für Geländebewegungen wie beispielsweise Depressionen, Abrisskanten und Vegetationsanomalien aus dem Digitalen Geländemodell DGM1, Luftbildern oder dem NDVI-Ergebnis von RapidEye-Daten abgeleitet werden konnten, wird auf eine weitere Auswertung der Daten im bebauten Gebiet verzichtet. Bei Verdachtsflächen müssten die Daten individuell geprüft und mit weiteren Informationen ausgewertet werden.

### 3.3.2 Altbergbaugebiet Mayen

Zunächst wurden die PSI-Datensätze von ERS-1/2 Ascending und Descending und Envisat-ASAR Descending mit dem TerraSAR-X-Datensatz Descending Track 154 verglichen. Hierfür wurde ein Bereich des Mayener Grubenfeldes gewählt, der die Ausdehnung der Kartierung von Kling (2008) sowie der Geländebegehung abdeckt. Abbildung 82 und Abbildung 83 zeigen die räumliche Verteilung der PSI-Daten der genannten Datensätze in diesem Beispielgebiet. Die dazu gehörige Statistik mit Anzahl der Punkte und Dichte je Datensatz ist in Tabelle 20 dargestellt. Es zeigt sich, dass im TerraSAR-X-Datensatz 45-mal mehr Daten als im ERS-1/2-Descending-Datensatz und 270-mal mehr Daten als im ERS-1/2-Ascending-Datensatz vorkommen. Auch weist er 16-mal mehr Punkte als der Envisat-ASAR Descending-Datensatz auf. Abgeleitet aus dem ca. 0,2 km<sup>2</sup> großen Gebiet ergibt sich eine Dichte von ca. 20.000 PS/km<sup>2</sup> für den TerraSAR-X-Datensatz, während die Datensätze von ERS-1/2 und Envisat ASAR lediglich Werte von ca. 70 bis 1.200 PS/km<sup>2</sup> aufweisen.

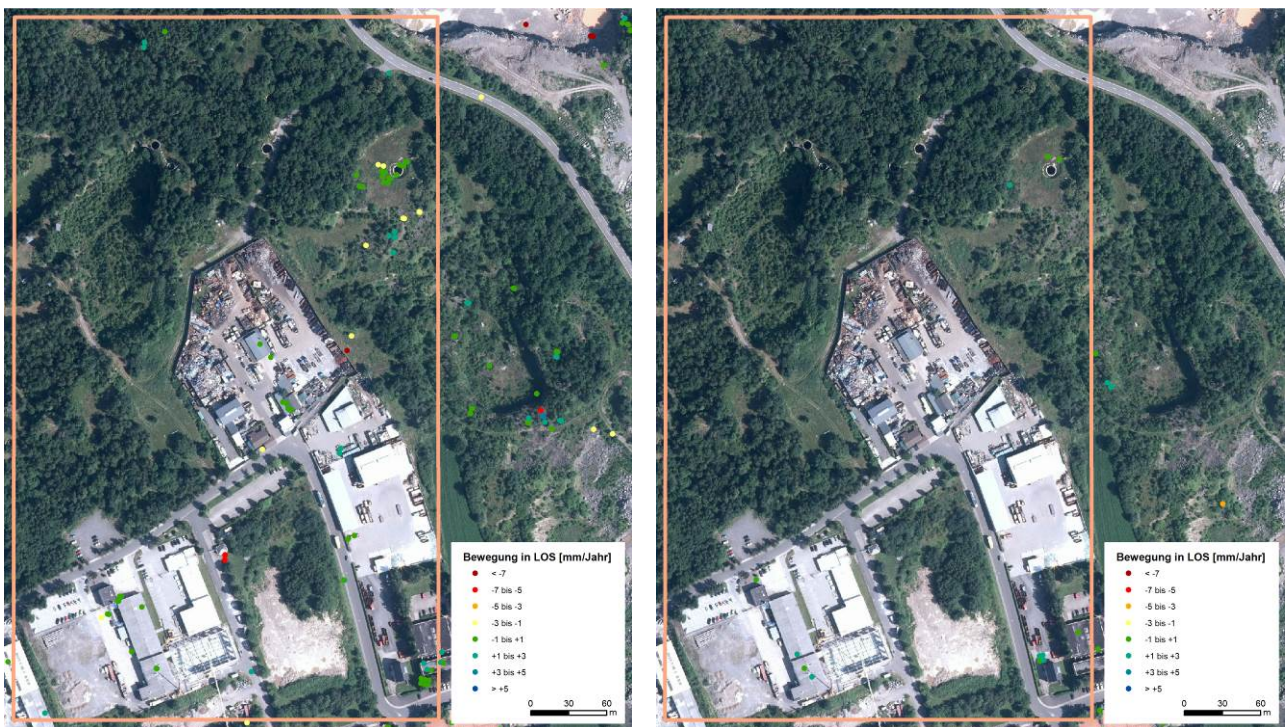


Abbildung 82: PSI-Daten von ERS-1/2-Descending-Datensatz Track 337 (links) und Ascending-Datensatz Track 487 (rechts) im Beispielgebiet über Digitalen Orthophotos DOP40 vom BKG.

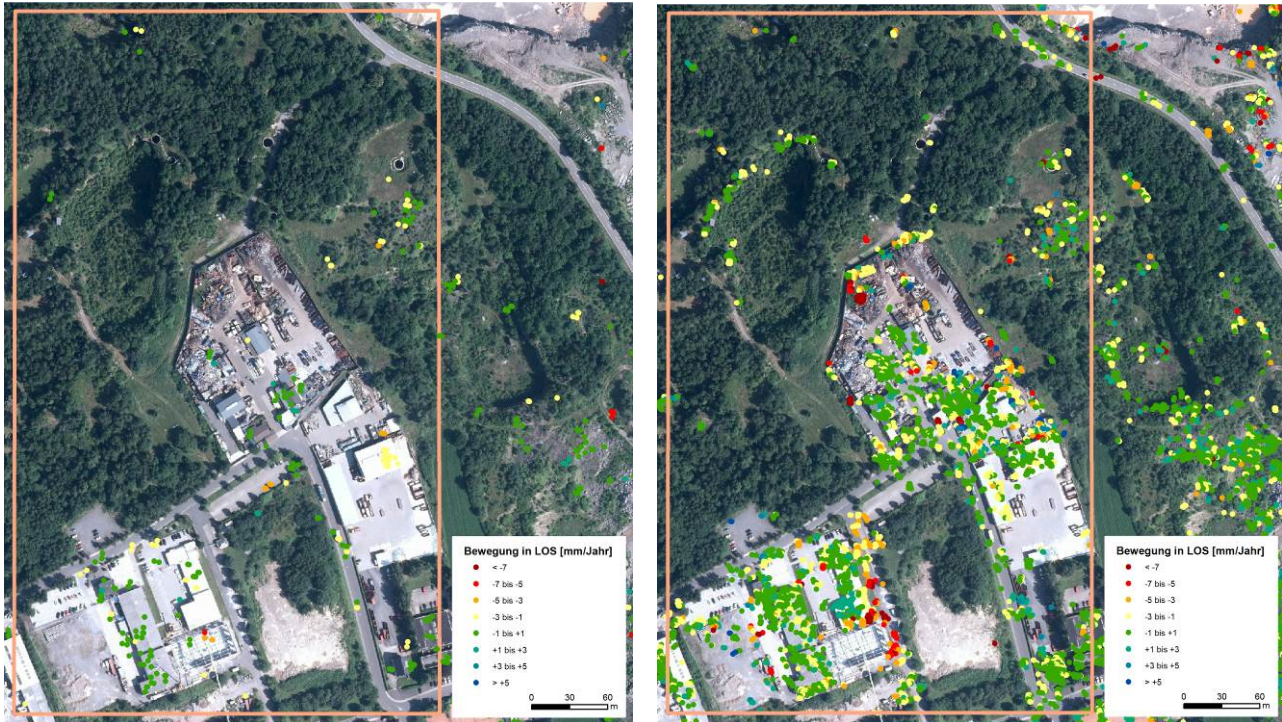


Abbildung 83: PSI-Daten von Envisat ASAR-Descending-Datensatz Track 337 (links) und TerraSAR-X-Descending-Datensatz Track 154 (rechts) im Beispielgebiet über Digitalen Orthophotos DOP40 vom BKG.

Tabelle 20: Anzahl der PSI-Punkte und Dichte für die ERS-1/2-, Envisat ASAR- und TerraSAR-X-Datensätze.

Datensatz	Anzahl PSI-Punkte	Dichte [PS/km <sup>2</sup> ]
ERS-1/2 Descending Track 337	78	425
ERS-1/2 Ascending Track 487	13	71
Envisat ASAR Descending Track 337	217	1.182
TerraSAR-X Descending Track 154	3.484	18.973

### Auswertung der TerraSAR-X-Daten für das Mayener Grubenfeld

Anschließend wurden die PSI- und SBAS-Prozessierungen der TerraSAR-X-Daten für das Mayener Grubenfeld und die nähere Umgebung ausgewertet. In Abbildung 84 und Abbildung 85 sind die Ergebnisse der beiden Prozessierungen für diesen Untersuchungsbereich dargestellt. Die Bewegungen von geringer als -1 mm/Jahr wurden als Bewegungsgebiete kartiert und den einzelnen, bei der Übersichtskartierung definierten (Kapitel 2.3.1) Bewegungskategorien zugewiesen (Abbildung 86).



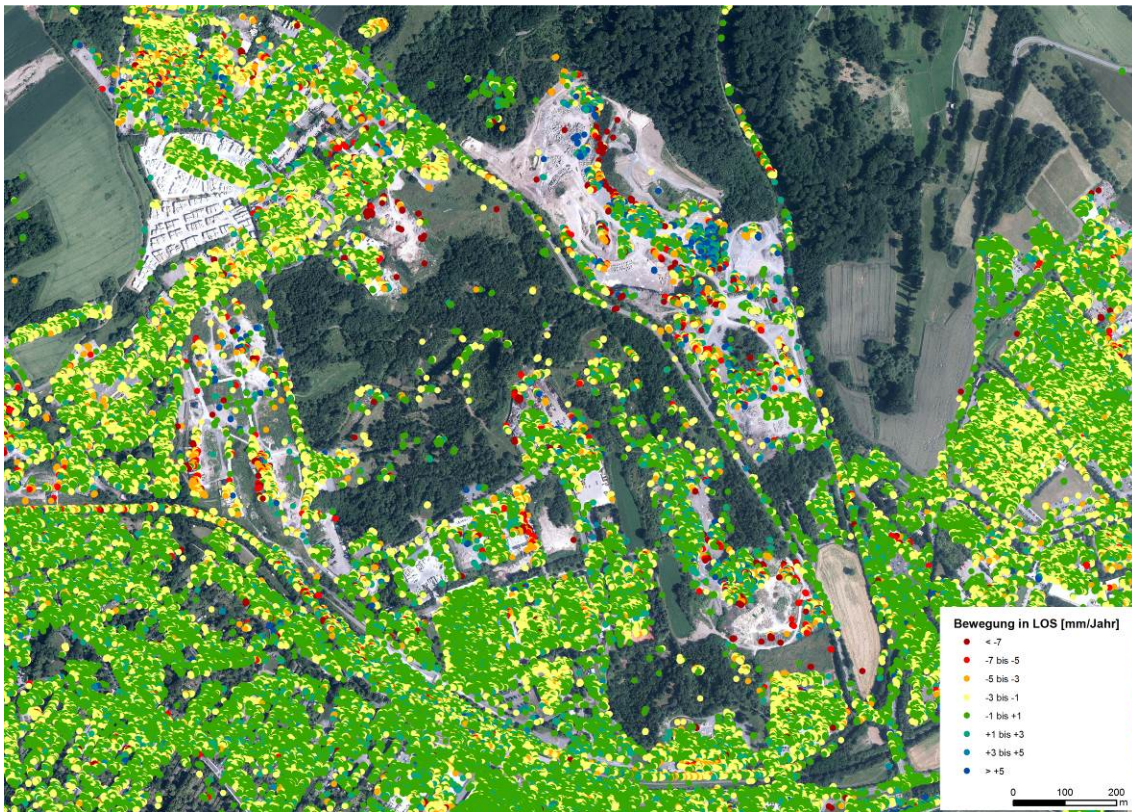


Abbildung 84: PSI-Daten im Bereich des Mayener Grubenfeldes und der näheren Umgebung.

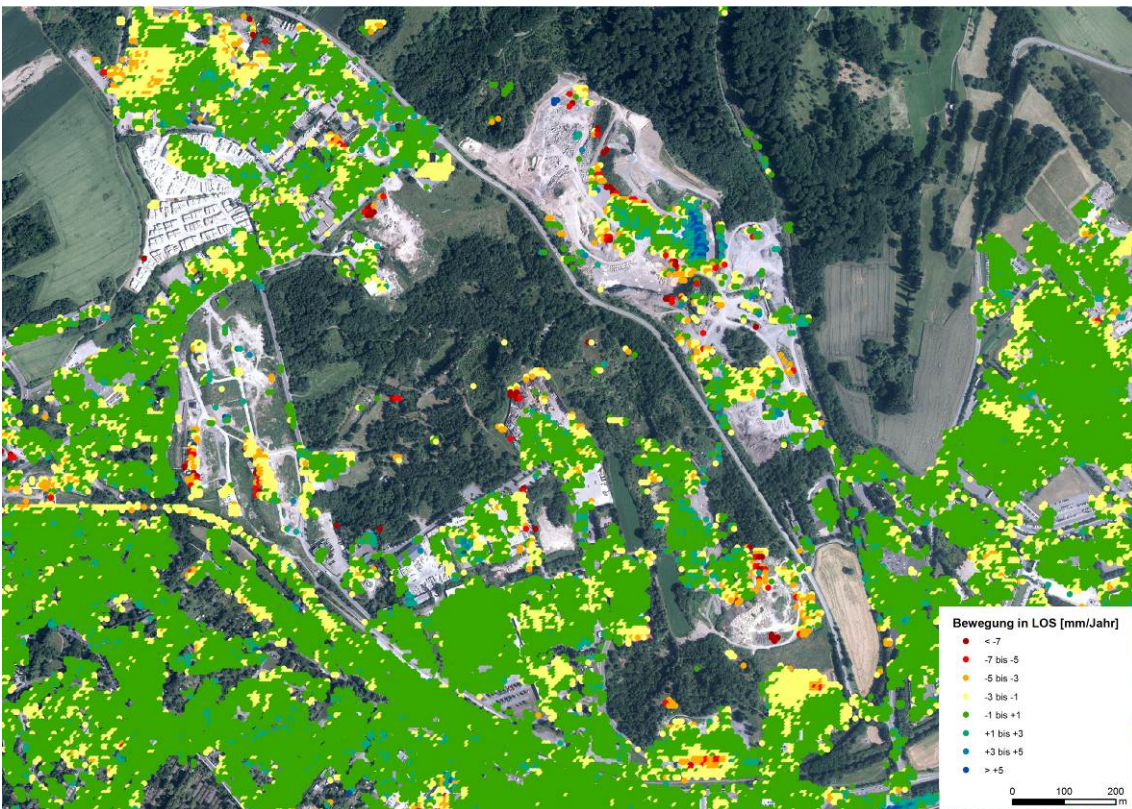


Abbildung 85: SBAS-Daten im Bereich des Mayener Grubenfeldes und der näheren Umgebung.

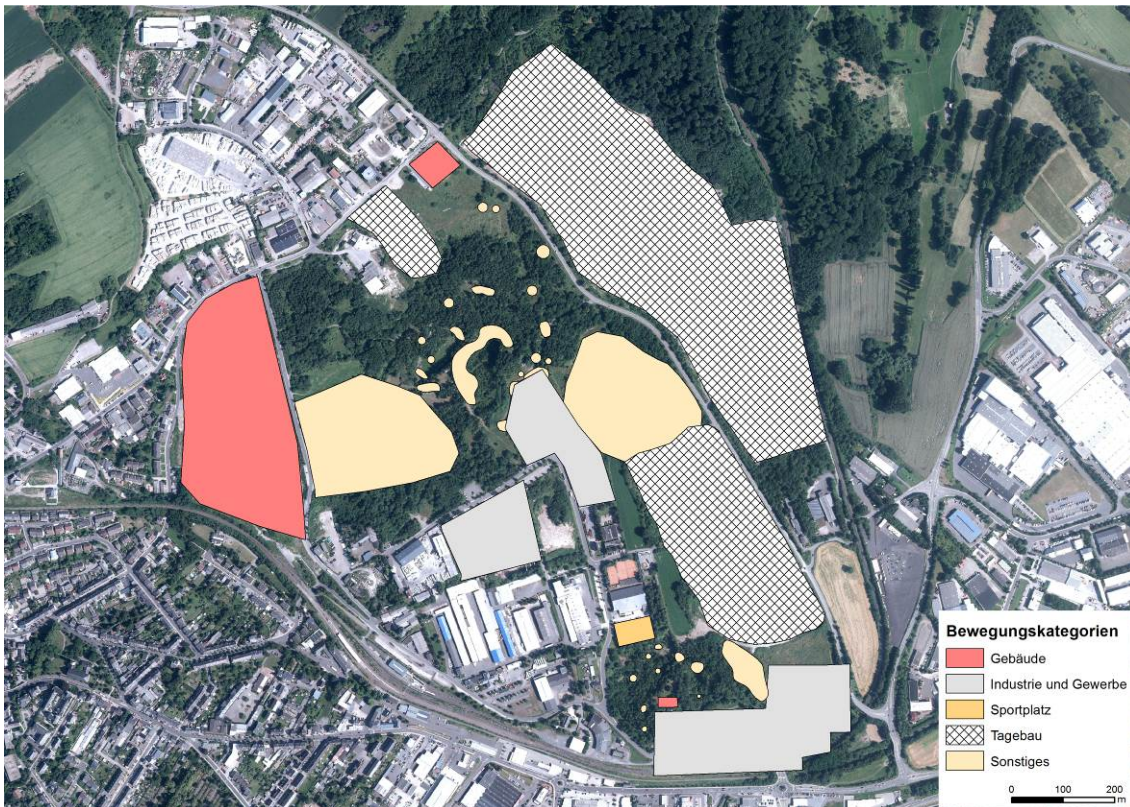


Abbildung 86: Ergebnisse der Bewegungskartierung anhand der PSI- und SBAS-Datensätze.

Die Untersuchung der PSI- und SBAS-Ergebnisse erfolgte für den Bereich des Mayener Grubenfeldes, der in der Kartierung von Kling (2008) abgedeckt wurde sowie für das angrenzende bebaute Gebiet. Unterirdische Hohlräume stehen in diesem Bereich in Tiefen von ca. 7 Metern an, an einigen Stellen jedoch auch bereits in 1 Meter Tiefe. Straßenschäden am Rand des bebauten Gebietes weisen auf mögliche Bewegungen des Untergrundes hin, die eine Erkundung oder Monitoring des Gebietes notwendig machen (Abbildung 87).

Im Bereich zweier alter Tagebaue sowie entlang eines Weges wurden beispielhaft die PSI-Daten ausgewertet. Im SBAS-Ergebnis lagen für diesen Bereich nur 2 Datenpunkte mit sehr geringen Kohärenzwerten vor, die daher nicht näher betrachtet wurden. Zur Auswertung der PSI-Daten wurden zunächst 12 Bewegungsgebiete erstellt (Abbildung 88). Die ersten 5 Bewegungsgebiete befinden sich am Rand des ersten Tagebaus (Abbildung 89), Bewegungsgebiet 12 im Bereich des zweiten Tagebaubereichs (Abbildung 97). Die Bewegungsgebiete 6 und 7 (Abbildung 91 und Abbildung 92) liegen im Bereich gemauerter Schächte an der nordöstlichen Seite der Grube und Bewegungsgebiet 10 an einem gemauerten Schacht neben dem Weg (Abbildung 95). Bewegungsgebiete 8 und 11 (Abbildung 93 und Abbildung 96) befinden sich am Wegrand, Bewegungsgebiet 9 liegt im Bereich des Tores zum abgesperrten Naturschutzgelände (Abbildung 94).



Abbildung 87: Straßenschäden am Rande des Mayener Grubenfeldes weisen auf mögliche Bewegungen des Untergrundes hin und machen eine weitere Erkundung bzw. Monitoring des Gebietes erforderlich.

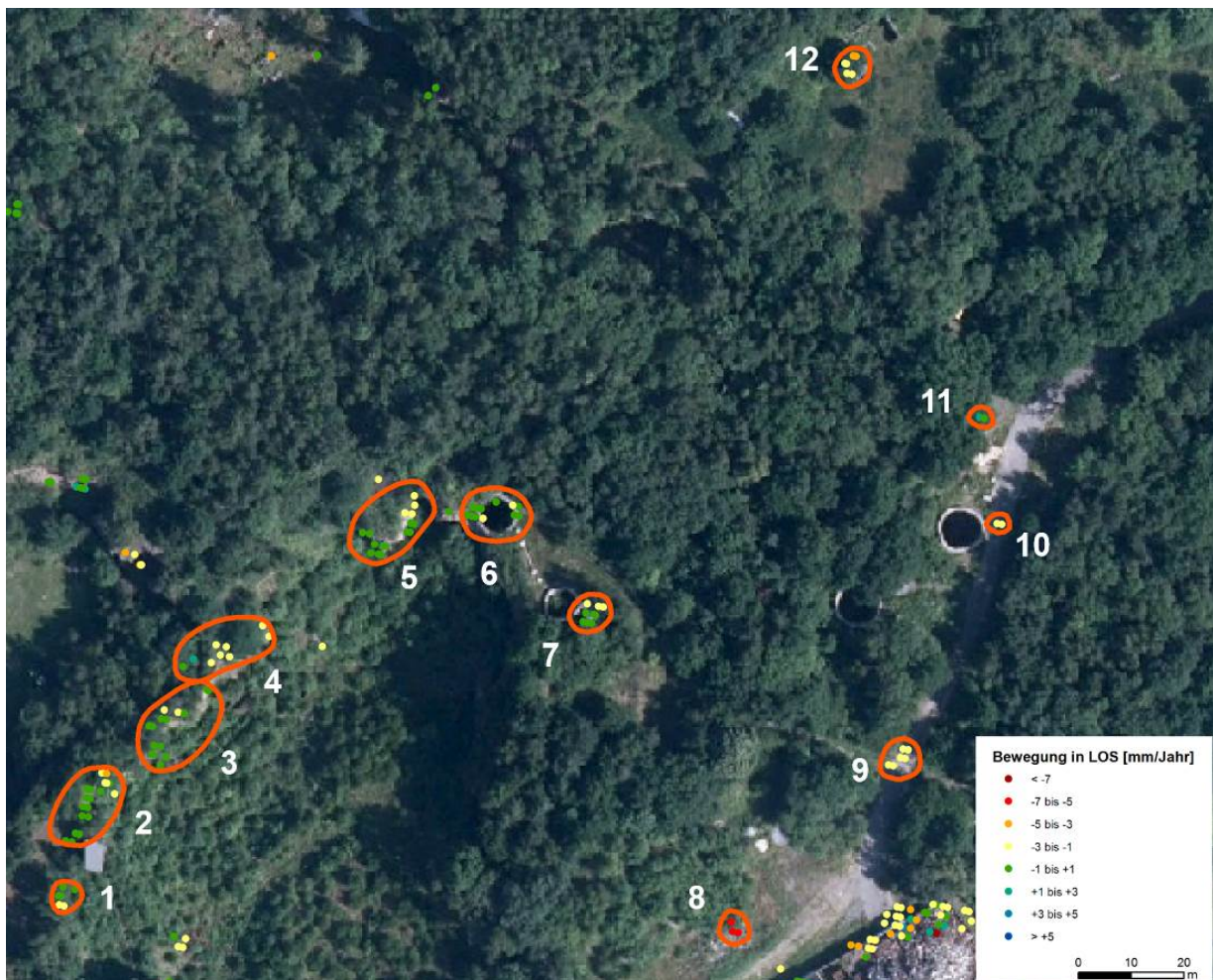


Abbildung 88: Übersicht der Lage der Bewegungsgebiete 1 bis 12 mit PSI-Daten der TerraSAR-X-Prozessierung.

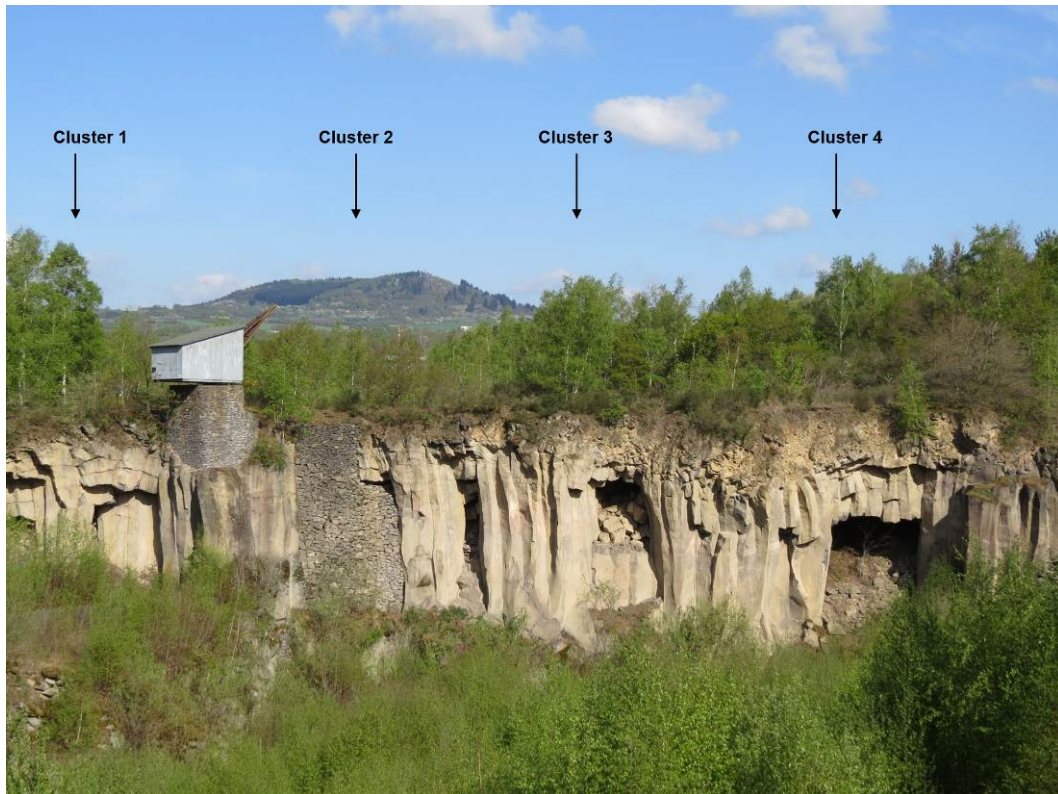


Abbildung 89: Ungefähre Positionen der Bewegungsgebiete (Cluster) 1 bis 4 am Rand des Tagesbaus (Foto: C. Wolf, April 2015).



Abbildung 90: Ungefähre Position von Bewegungsgebiet 5 im Gelände am Rand des Tagesbaus. Im linken Bereich befindet sich ein vom Tagebau angeschnittener gemauerter ehemaliger Schacht (Foto: C. Wolf, April 2015).



Abbildung 91: Ungefähre Position von Bewegungsgebiet 6 im Bereich eines gemauerten Schachtes am nordöstlichen Rand des Tagebaus (Foto: C. Wolf, April 2015).



Abbildung 92: Ungefähre Position von Bewegungsgebiet 7 im Bereich eines gemauerten Schachtes (Foto: C. Wolf, April 2015).



Abbildung 93: Ungefähre Position von Bewegungsgebiet (Cluster) 8 am Wegrand (Foto: C. Wolf, April 2015).



Abbildung 94: Ungefähre Position von Bewegungsgebiet (Cluster) 9 im Bereich des Tores zum abgesperrten Naturschutzgebiet (Foto: C. Wolf, April 2015).



Abbildung 95: Ungefähre Position von Bewegungsgebiet 10 im Bereich eines gemauerten Schachtes am Wegrand (Foto: C. Wolf, April 2015).



Abbildung 96: Ungefähre Position von Bewegungsgebiet (Cluster) 11 am Wegrand mit gemauertem Schacht im Vordergrund (Foto: C. Wolf, April 2015).



Abbildung 97: Ungefähre Position von Bewegungsgebiet (Cluster) 12 am Rand des zweiten Tagebaus (Foto: C. Wolf, April 2015).

Die Anzahl der Persistent Scatterer pro Bewegungsgebiet sowie deren Minimal- und Maximalwerte und Mittelwerte sind in Tabelle 21 aufgeführt. Für die Bewegungsgebiete wurden zudem die Zeitserien analysiert. Abbildung 98 bis Abbildung 109 zeigen die Zeitdiagramme der Mittelwerte der Bewegungsgebiete.

Tabelle 21: Statistik der PSI-Daten für die Bewegungsgebiete 1 bis 12.

	Anzahl Punkte	PSI Minimum [mm/Jahr]	PSI Maximum [mm/Jahr]	PSI Mittelwert [mm/Jahr]
Gebiet 1	6	-1,7	0,3	-0,7
Gebiet 2	21	-3,6	0,6	-0,6
Gebiet 3	15	-1,4	0,5	-0,4
Gebiet 4	10	-2,6	1,0	-1,5
Gebiet 5	17	-2,1	1,3	-0,4
Gebiet 6	13	-1,4	-0,2	-0,6
Gebiet 7	9	-1,7	0,2	-0,7
Gebiet 8	3	-6,7	-5,3	-5,9
Gebiet 9	6	-2,0	-1,2	-1,6
Gebiet 10	2	-2,0	-1,8	-1,9
Gebiet 11	2	-0,2	1,0	0,4
Gebiet 12	6	-4,4	-1,7	-2,9



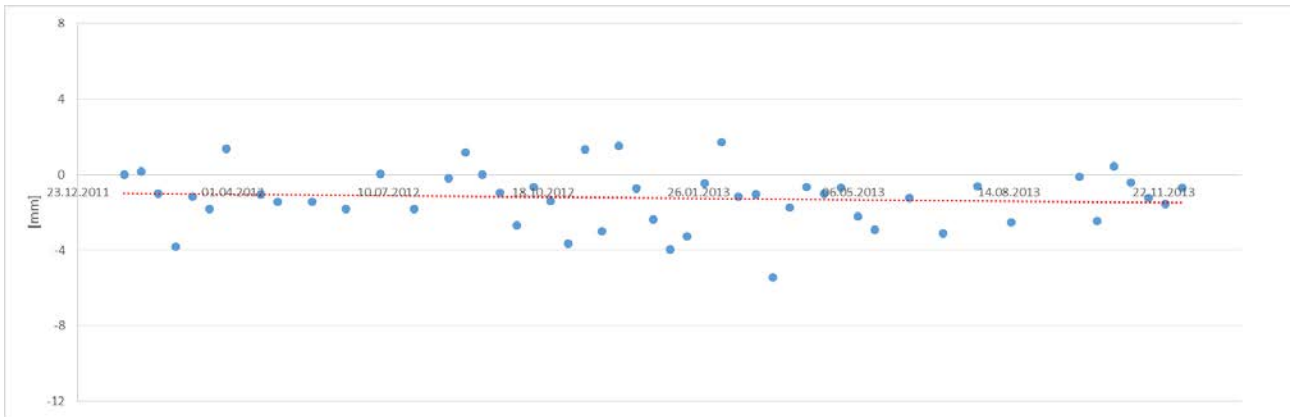


Abbildung 98: Zeitserie des Mittelwerts für Bewegungsgebiet 1 (blaue Punkte) mit linearer Trendlinie (rote Linie).

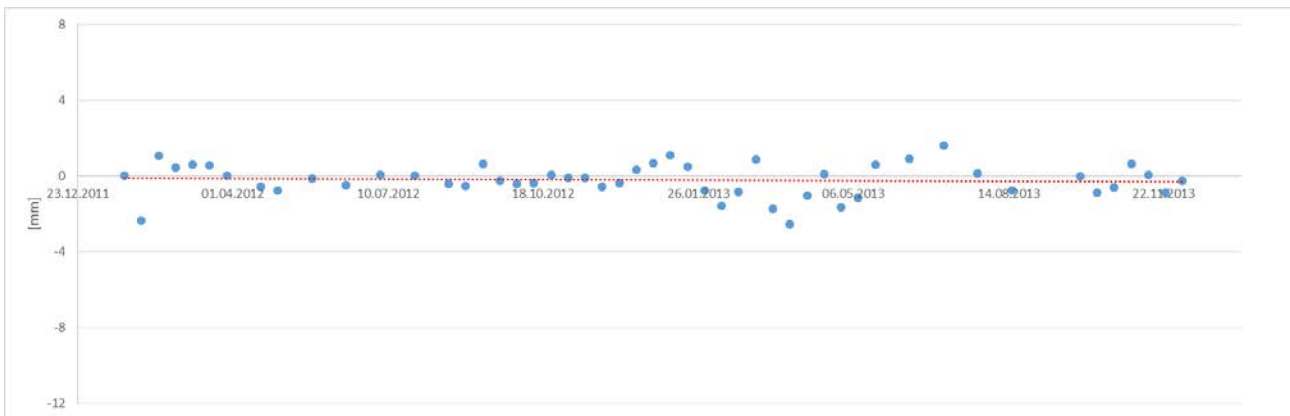


Abbildung 99: Zeitserie des Mittelwerts für Bewegungsgebiet 2 (blaue Punkte) mit linearer Trendlinie (rote Linie).



Abbildung 100: Zeitserie des Mittelwerts für Bewegungsgebiet 3 (blaue Punkte) mit linearer Trendlinie (rote Linie).

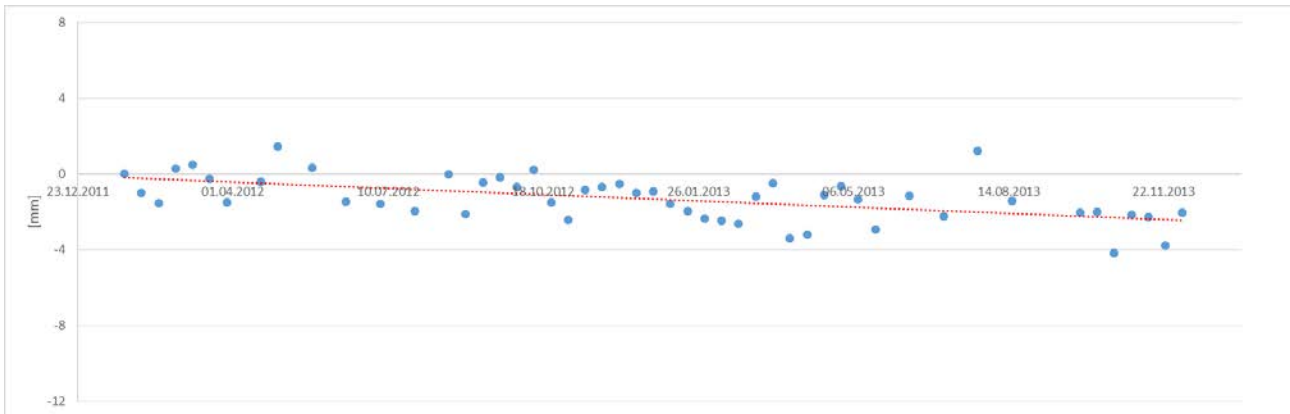


Abbildung 101: Zeitserie des Mittelwerts für Bewegungsgebiet 4 (blaue Punkte) mit linearer Trendlinie (rote Linie).

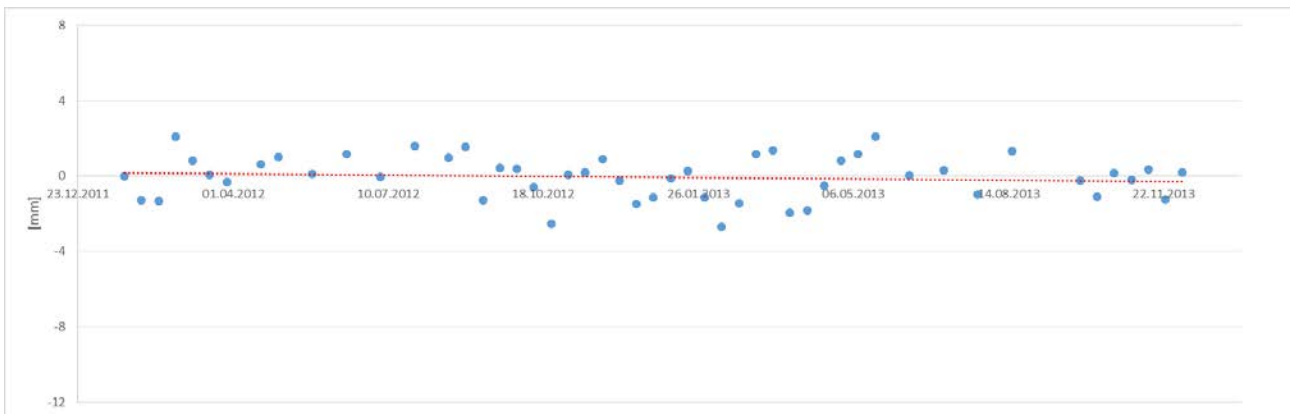


Abbildung 102: Zeitserie des Mittelwerts für Bewegungsgebiet 5 (blaue Punkte) mit linearer Trendlinie (rote Linie).

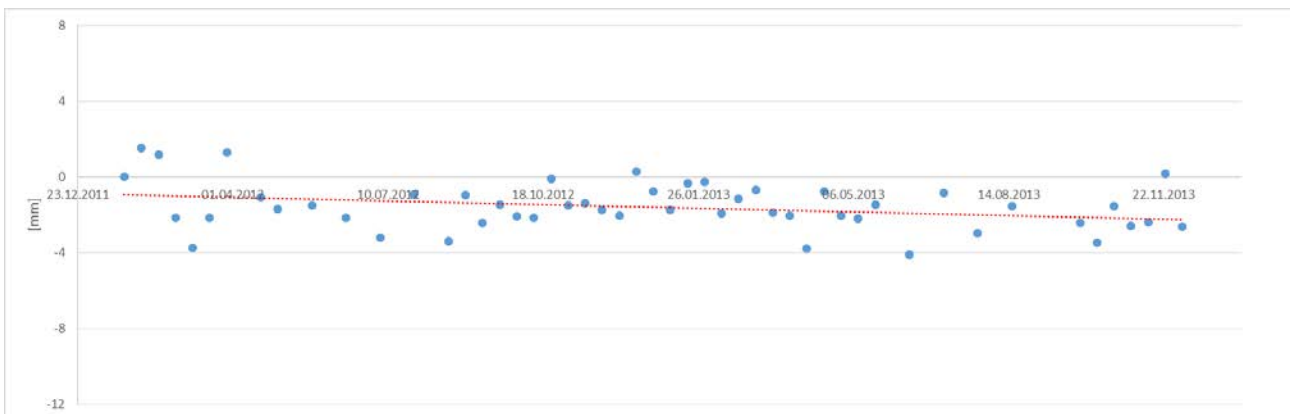


Abbildung 103: Zeitserie des Mittelwerts für Bewegungsgebiet 6 (blaue Punkte) mit linearer Trendlinie (rote Linie).

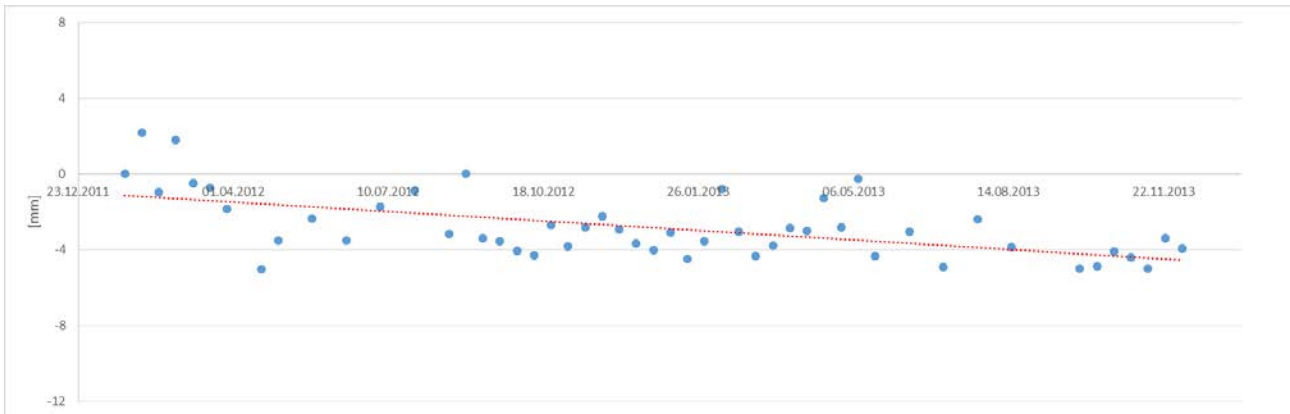


Abbildung 104: Zeitserie des Mittelwerts für Bewegungsgebiet 7 (blaue Punkte) mit linearer Trendlinie (rote Linie).

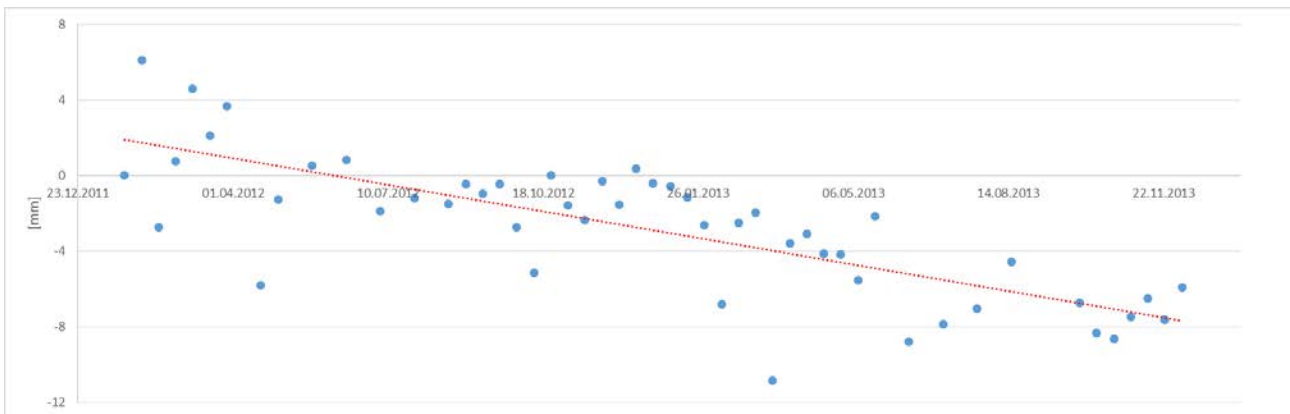


Abbildung 105: Zeitserie des Mittelwerts für Bewegungsgebiet 8 (blaue Punkte) mit linearer Trendlinie (rote Linie).

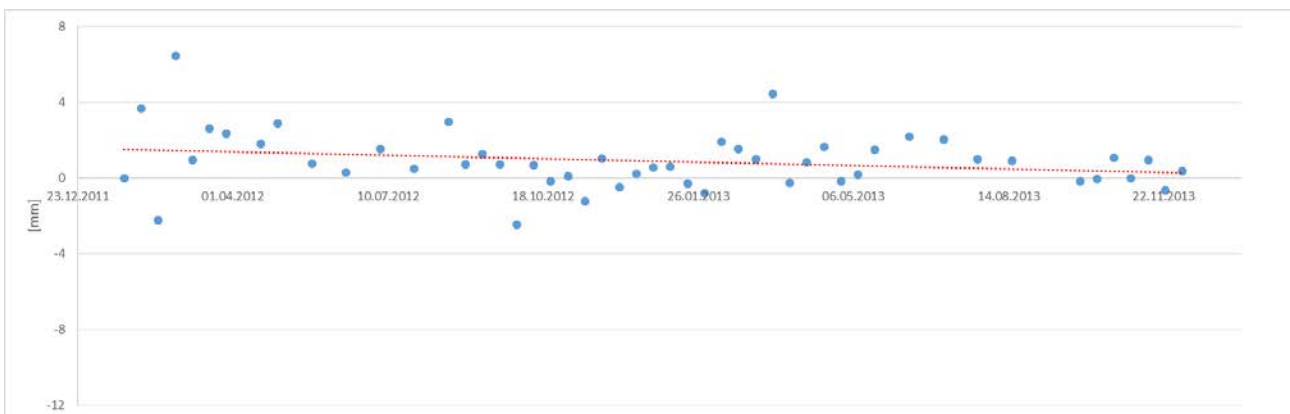


Abbildung 106: Zeitserie des Mittelwerts für Bewegungsgebiet 9 (blaue Punkte) mit linearer Trendlinie (rote Linie).

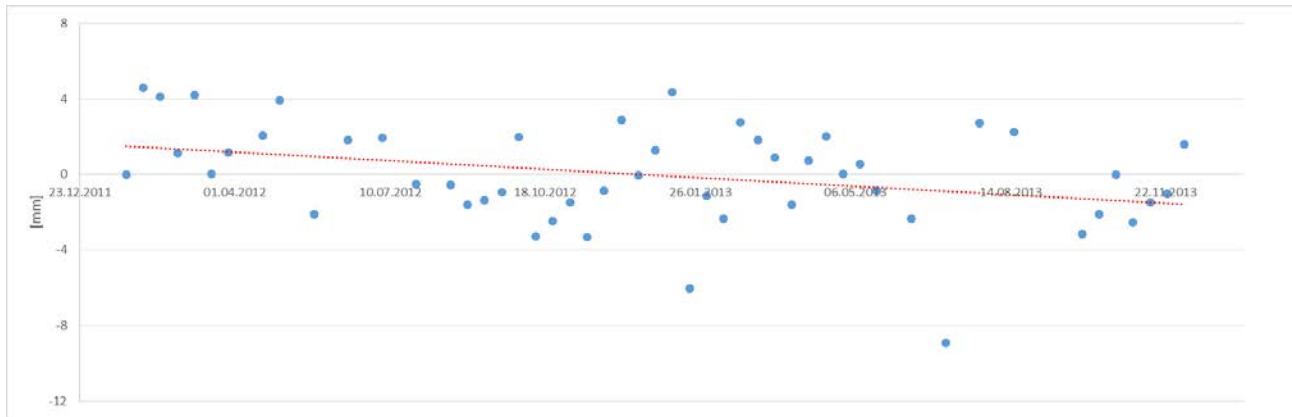


Abbildung 107: Zeitserie des Mittelwerts für Bewegungsgebiet 10 (blaue Punkte) mit linearer Trendlinie (rote Linie).

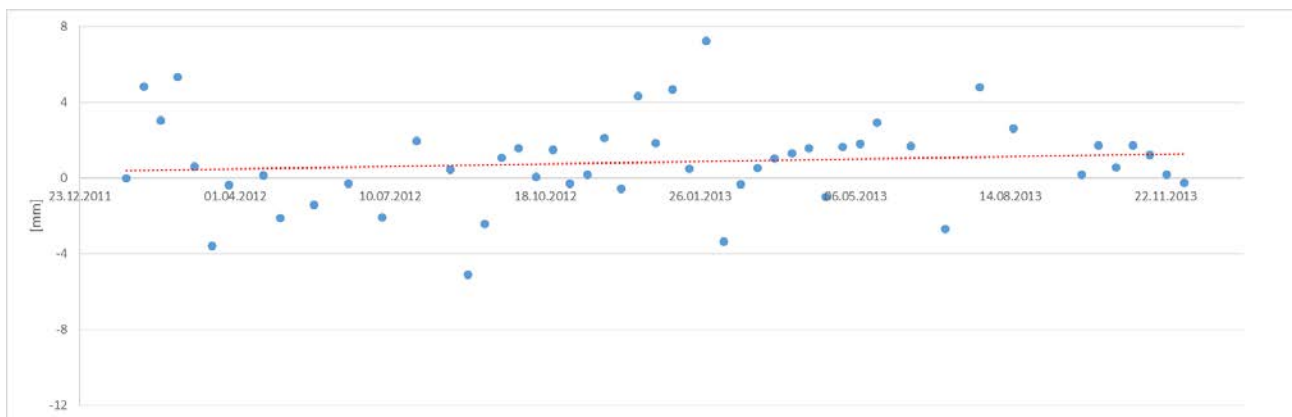


Abbildung 108: Zeitserie des Mittelwerts für Bewegungsgebiet 11 (blaue Punkte) mit linearer Trendlinie (rote Linie).

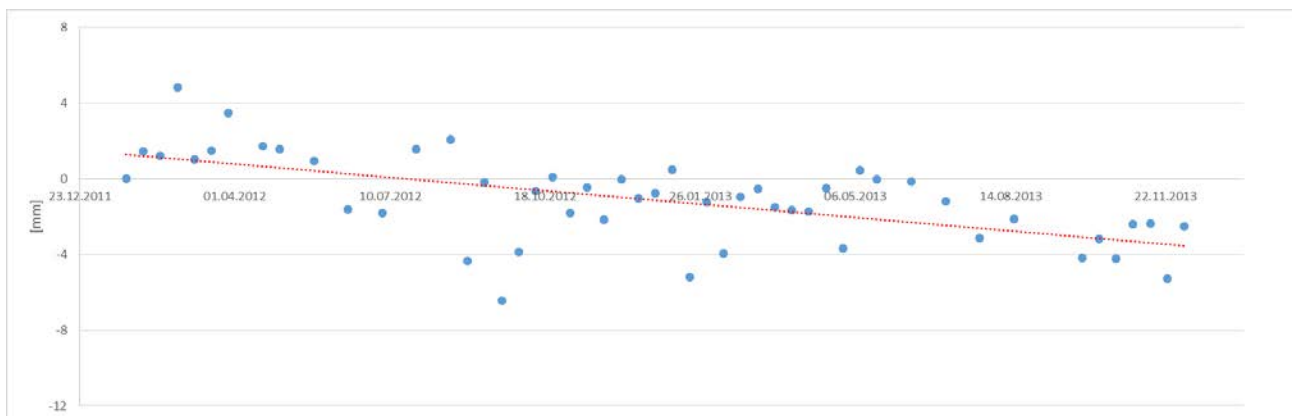


Abbildung 109: Zeitserie des Mittelwerts für Bewegungsgebiet 12 (blaue Punkte) mit linearer Trendlinie (rote Linie).

Die Bewegungsanalyse für das bebaute Gebiet ist von besonderer Bedeutung, da hier keine Informationen über unterirdische Hohlräume vorliegen. Das Gebiet, in dem hauptsächlich Gewerbe angesiedelt ist, wurde in den letzten 5 bis 10 Jahren bebaut. In vereinzelt durchgeführten Baugrunderkundungen wurden Hohlräume entdeckt, weiterhin wurden jedoch keine weiteren Erkundungen durchgeführt.

Für das bebaute Gebiet sind die Ergebnisse der PSI- und SBAS-Prozessierung in Abbildung 110 und Abbildung 111 dargestellt. In beiden Datensätzen wurden jeweils 6 Bewegungsgebiete für Gebiete mit den stärksten Bewegungen festgelegt. Lagemäßig korrelieren die Bewegungsgebiete der PSI- und SBAS-Datensätze bis auf die Positionen von Bewegungsgebiete 4 und 5. Die Ursache dieser nicht identischen Bewegungsgebiete liegt unter anderem an den verschiedenen Messmethoden. Beim PSI-Verfahren werden stabile Objekte an der Erdoberfläche detektiert, während beim SBAS-Verfahren Mischflächen betrachtet werden. Die Minimal- und Maximalwerte der Bewegungen sowie die Mittelwerte sind in Tabelle 22 und Tabelle 23 aufgeführt. Für den Bereich der Straßenschäden konnte keine signifikanten Bewegungen festgestellt werden.

Da es sich bei diesem Untersuchungsgebiet vor allem um bebautes oder versiegeltes Gelände handelt, können keine weiteren Indizien für Geländebewegungen wie beispielsweise Depressionen, Abrisskanten und Vegetationsanomalien aus dem Digitalen Geländemodell DGM10, Luftbildern oder dem NDVI-Ergebnis von RapidEye-Daten abgeleitet werden.

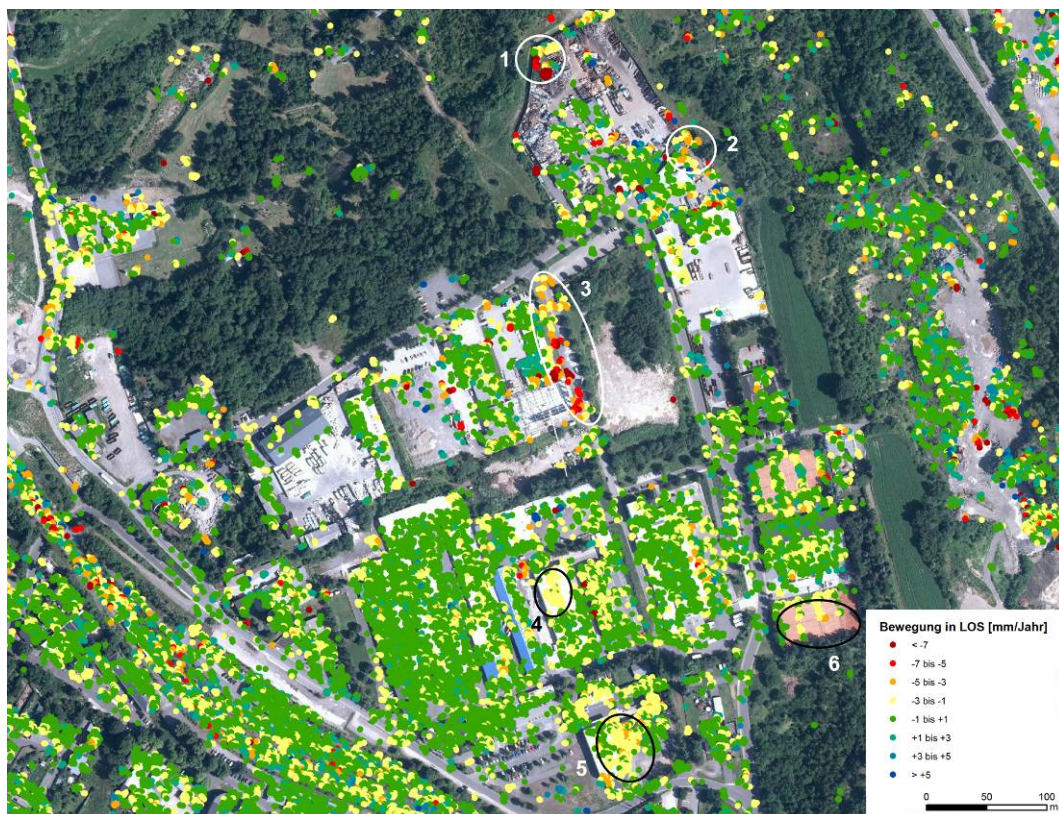


Abbildung 110: PSI-Ergebnis für das bebaute Gebiet mit Lage der Bewegungsgebiete 1 bis 6.

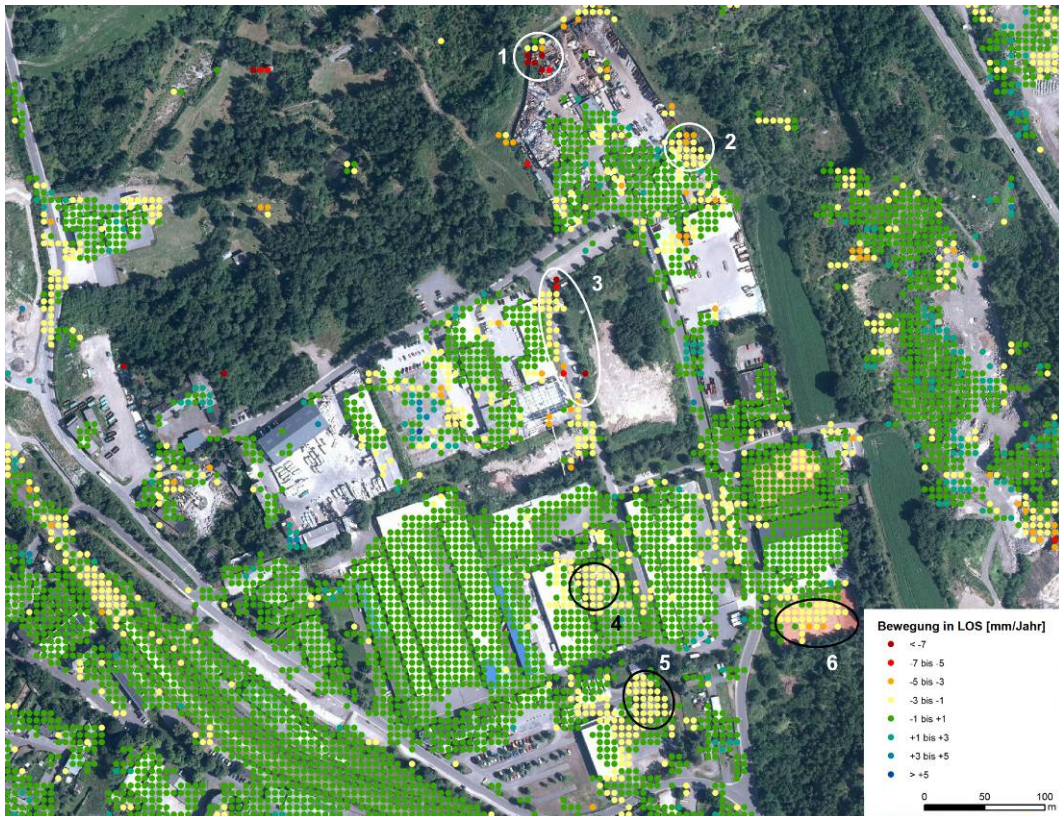


Abbildung 111: SBAS-Ergebnis für das bebauten Gebiet mit Lage der Bewegungsgebiete 1 bis 6.

Tabelle 22: Statistik des PSI-Ergebnisses für Bewegungsgebiete 1 bis 6 im bebauten Gebiet.

	Anzahl Punkte	PSI Mittelwert [mm/Jahr]
Gebiet 1	57	-4,5
Gebiet 2	64	-2,3
Gebiet 3	161	-3,9
Gebiet 4	62	-1,7
Gebiet 5	185	-1,8
Gebiet 6	62	-1,6

Tabelle 23: Statistik des SBAS-Ergebnisses für Bewegungsgebiete 1 bis 6 im bebauten Gebiet.

	Anzahl Punkte	SBAS Mittelwert [mm/Jahr]
Gebiet 1	11	-5,5
Gebiet 2	15	-2,0
Gebiet 3	32	-2,2
Gebiet 4	37	-1,2
Gebiet 5	36	-1,4
Gebiet 6	31	-1,7

### 3.3.3 Hangrutsche an der Mosel

Zur Analyse von Hangrutschen an der Mittelmosel wurden PSI- und SBAS-Bewegungsdaten abgeleitet aus TerraSAR-X-Daten verwendet sowie Ergebnisse der NDVI-Berechnung von RapidEye-Satellitendaten von April 2011 und September 2010. Des Weiteren stand das Digitale Geländemodell DGM5 des Landesamtes für Vermessung und Geobasisinformation von Rheinland-Pfalz sowie Digitale Luftbilder des Bundesamtes für Kartographie und Geodäsie mit einer Bodenauflösung von 40 cm zur Verfügung. Zur Interpretation der Fernerkundungsdaten wurde zudem die Hangstabilitätskarte vom Landesamt für Geologie und Bergbau Rheinland-Pfalz (LGB) verwendet. Zur Analyse wurden 7 Gebiete ausgewählt, die im unmittelbaren Interesse des LGB stehen. Hierbei handelt es sich um die in Abbildung 112 dargestellten Gebiete, die im Folgenden näher beschrieben werden.

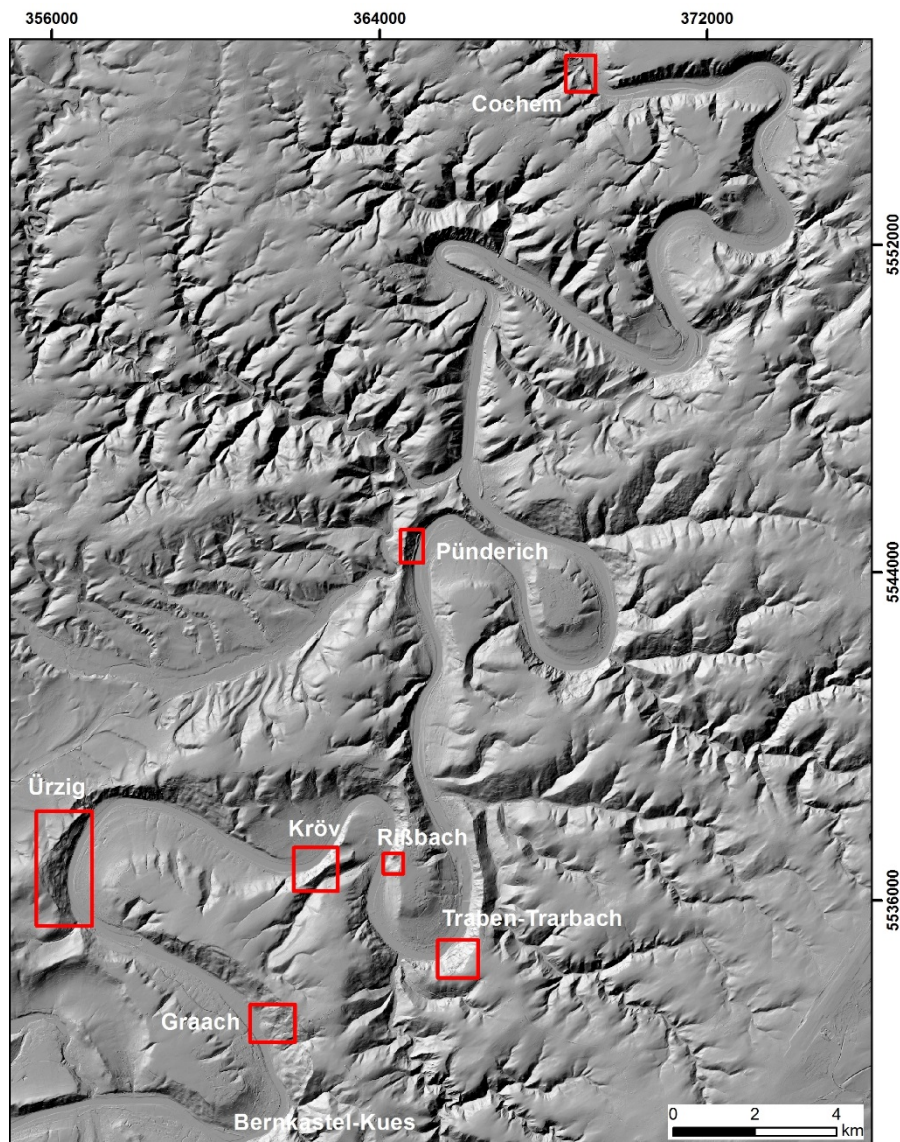


Abbildung 112: Digitales Geländemodell DGM5 für den Bereich der Mittelmosel zwischen Bernkastel-Kues und Cochem mit den 7 Untersuchungsgebieten (WGS84 UTM32N).

### 3.3.3.1 Graacher Schäferei

Von Bernkastel-Kues bis nach Zeltingen erstreckt sich ein ausgedehntes Rutschgebiet (Abbildung 113). Die Teilrutschung „Graacher Schäferei“ befindet sich direkt nördlich von Bernkastel-Kues am rechten Ufer der Mosel. Die Rutschmasse reicht von der Hunsrückhochfläche in 400 m ü. NN bis zur Mosel bei 100 m ü. NN (Abbildung 114) und ist ca. 970 m lang. Die Hangneigung beträgt durchschnittlich 17° und im mittleren Hangbereich bis zu 23°. Der morphologisch sehr auffällige, mächtige Schuttfächer am Hangfuß reicht bis zum Südrand der Ortschaft Graach (Abbildung 115, Abbildung 116).

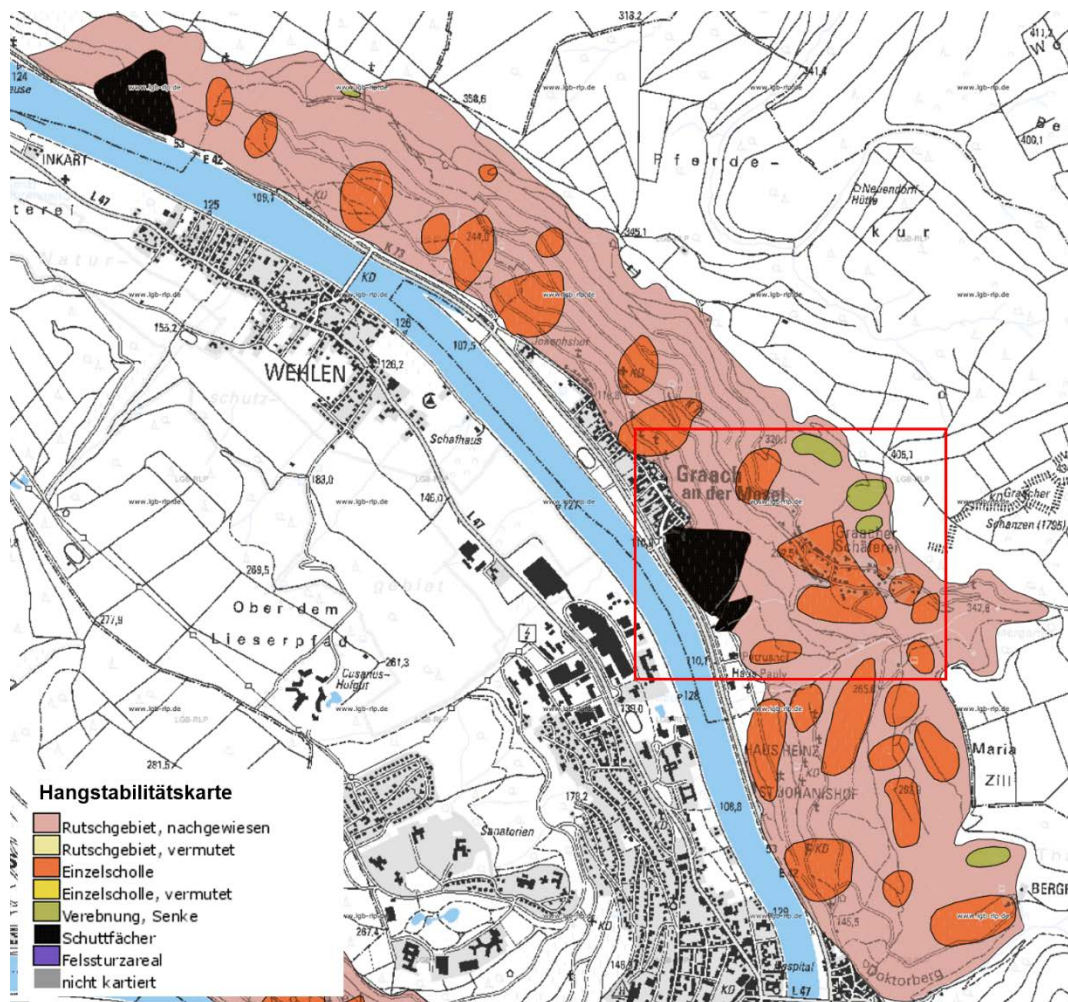


Abbildung 113: Ausschnitt der Hangstabilitätskarte Mittelmosel 1:20.000 für das nachgewiesene Rutschgebiet zwischen Bernkastel-Kues und Zeltingen mit der Rutschung „Graacher Schäferei“ (roter Rahmen, Landesamt für Geologie und Bergbau/Kartenviewer).



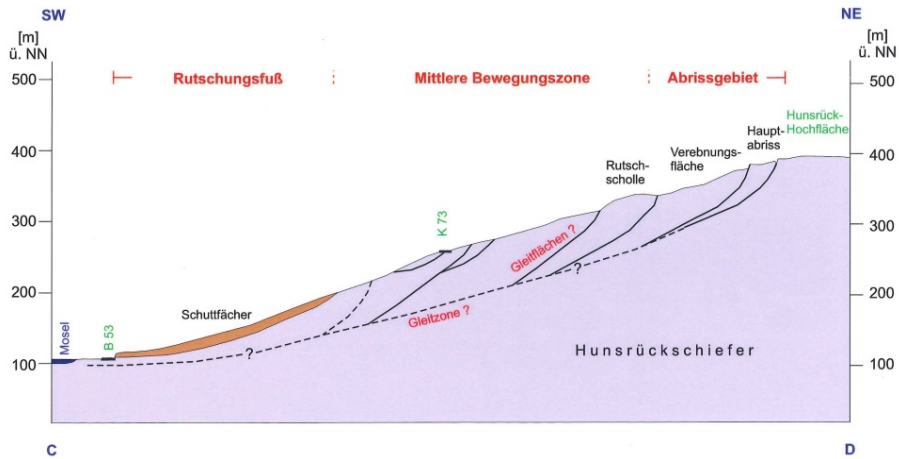


Abbildung 114: Profilschnitt durch den Hang nördlich der Graacher Schäferei (Rogall, 2014).

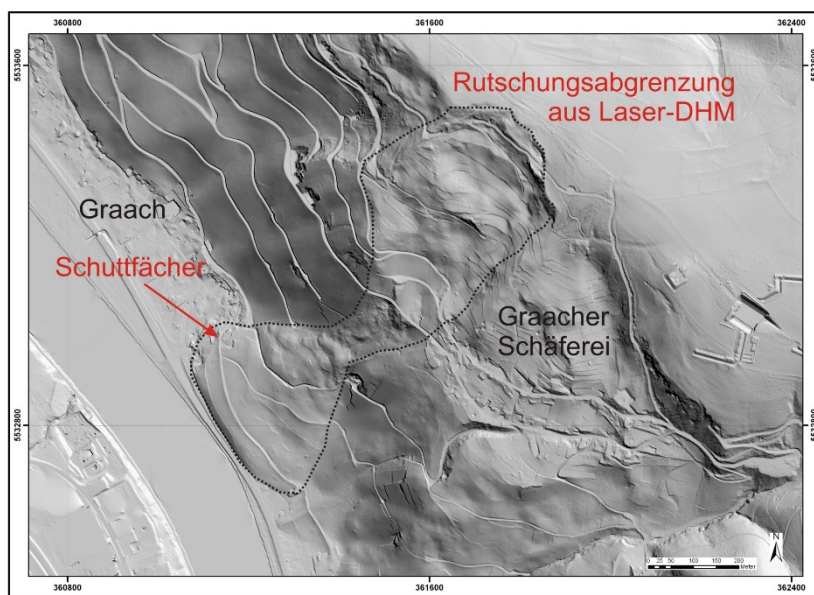


Abbildung 115: Fließrutschung bei Graach im digitalen Geländemodell (Bock et al. 2013).



Abbildung 116: Geländefoto des Hangrutsches bei Graach mit ausgedehntem Schuttfächer (Foto: C. Wolf, September 2014).

Der Schuttfächer ist das Ergebnis einer Fließrutschung, die sich im Holozän ausgebildet hat. Ausgelöst durch starken Wasserdruck überdeckte die Gleitung den Hangfuß sowie Teile der Niederterrasse mit bis zu 15 Meter Schutt und bildete einen Schuttfächer aus. Weite Teile dieser Kriechrutschung befinden sich in der Phase der Nachbewegung und Konsolidierung, die sich durch Schäden an Häusern und Straßen bemerkbar machen. Zudem weisen beschädigte Trockenmauern, verkippte Rebenzeilen und Straßenschäden an der Fahrbahn der K73 am Ortseingang der Graacher Schäferei auf die weitere Aktivität der Rutschung hin (Abbildung 117). Zudem wird der Schuttfächer am Hangfuß durch den Aufstau der Rutschmassen weiter angehoben. (Rogall & Möbus 2005, Rogall 2014).

Laut Auskunft des Landesamtes für Geologie und Bergbau Rheinland-Pfalz befindet sich die Gleitfläche in einer Tiefe zwischen 3,5 und 10 Meter (Durchschnitt ca. 6 Meter Tiefe). Auf anstehendes Gestein trifft man in einer Tiefe von 60 Metern, bei Felsen im Hang handelt es sich lediglich um Schollen und nicht um anstehendes Gestein. Die Hauptbewegung tritt vor allem in der Mitte des Hanges auf, in dem kein Weinanbau möglich ist und der Hang mit Büschen bewachsen ist. In diesem Bereich hat sich der Hang vermutlich um 10 bis 12 Meter in 100 Jahren bewegt. Zur Hangüberwachung wurde vom Landesbetrieb Mobilität Rheinland-Pfalz eine Analyse von TerraSAR-X-Daten beauftragt. Hierfür wurden auch einige künstliche Reflektoren, sogenannte Corner Reflektoren im Hang installiert (Abbildung 118). Die ermittelten Bewegungsraten in Hangrichtung aus dem Zeitraum August 2009 bis Dezember 2013 liegen bei maximal 2 cm/Jahr für Reflektoren am Randbereich der Rutschung und bei ca. 5 cm/Jahr am Beginn der Hangrutschzone (Riedmann et al. 2015, Abbildung 119). Die zusätzlich installierten Inclinometer zeigen eine Bewegungsgeschwindigkeit von ca. 1 cm/Jahr an (Wehinger, 2015). Der Vektor der Hangbewegung ist in horizontaler Richtung viermal größer als vertikal. An der Straße vor der Graacher Schäferei wurde eine Senkung festgestellt. Zur mittelfristigen Stabilisierung dieser Senkung wurden Erdbetonpatten in 20 Meter Tiefe eingebracht. Zudem treten bei künstlichen Veränderungen des Hanges, wie beispielsweise bei Hanganschnitten, Schäden auf. So wurde durch die Anlage eines Wirtschaftsweges im Weinberg ein Schaden von ca. 1 Mio. EUR verursacht (Abbildung 120, Auskunft LGB).



Abbildung 117: Impressionen aus dem Gelände: verkippte und zerbrochene Weinbergsmauern weisen auf eine aktive Rutschung hin (Fotos: C. Wolf, Februar 2014).



Abbildung 118: Corner Reflektor im Hang bei Graach (Foto: C. Wolf, Februar 2014).

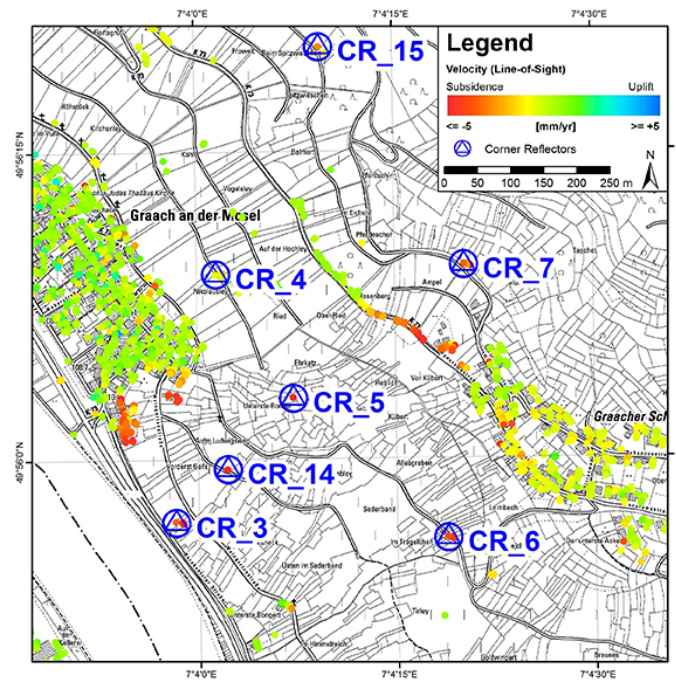


Abbildung 119: Bodenbewegungskarte mit Standorten der Corner Reflektoren (CR) ([www.geo-airbusds.com](http://www.geo-airbusds.com)).



Abbildung 120: Rutschungssanierung (Foto: C. Wolf, September 2014).

Die PSI- und SBAS-Daten der TerraSAR-X-Daten von Ascending Orbit (Track 116) und Descending Orbit (Track 154) für den Graacher Hang sind in Abbildung 121 und Abbildung 122 dargestellt. Im Ascending Orbit erfolgt die Radarmessung der Hangbewegung entgegen. Die nach Westen gerichtete Bewegung des Hanges bewegt sich dem Sensor entgegen (blaue Farbe). Im Descending Orbit blickt der Sensor in Hangrichtung, so dass sich die hangabwärts gerichtete Bewegung des Hanges weg vom Sensor bewegt (rote Farbe).

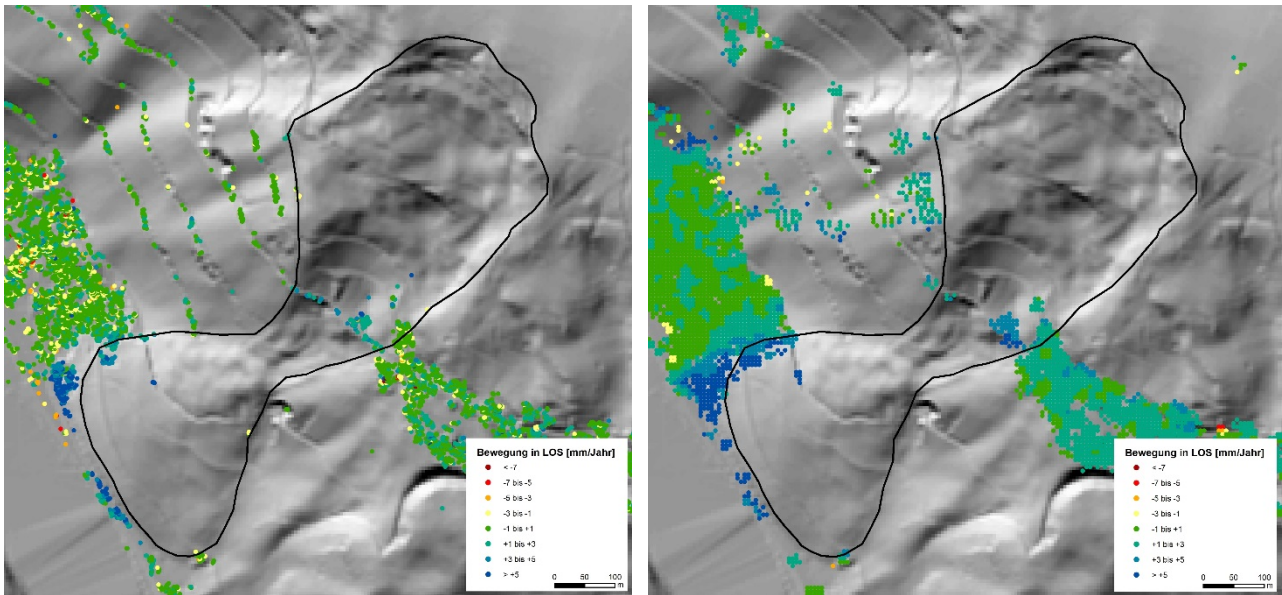


Abbildung 121: PSI- (links) und SBAS-Daten (rechts) der TerraSAR-X-Daten von Track 116 (11/2001 – 12/2013) mit Umriss des Hangrutschbereiches abgeleitet aus DGM5 (Hintergrund: DGM5, LVermGeo).

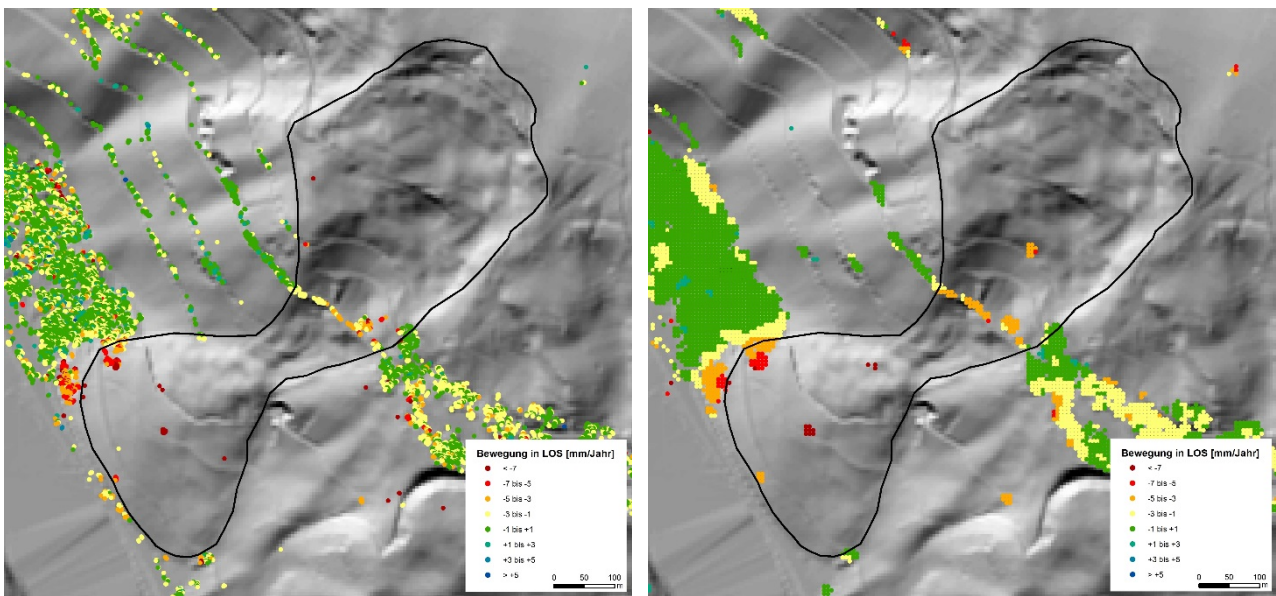


Abbildung 122: PSI- (links) und SBAS-Daten (rechts) der TerraSAR-X-Daten von Track 154 (01/2012 – 12/2013) mit Umriss des Hangrutschbereiches abgeleitet aus DGM5 (Hintergrund: DGM5, LVermGeo).

Zur detaillierten Auswertung wurden zwei Bereiche ausgewählt, für die Zeitreihenanalysen der PSI- und SBAS-Prozessierungen der TerraSAR-X-Daten durchgeführt wurden (Tabelle 24). Die Lagen der beiden Standorte sind in Abbildung 123 dargestellt. Der erste Bereich befindet sich am Ortseingang der Graacher Schäferei. Der zweite Bereich befindet sich am Hangfuß am südlichen Rand der Ortschaft Graach.

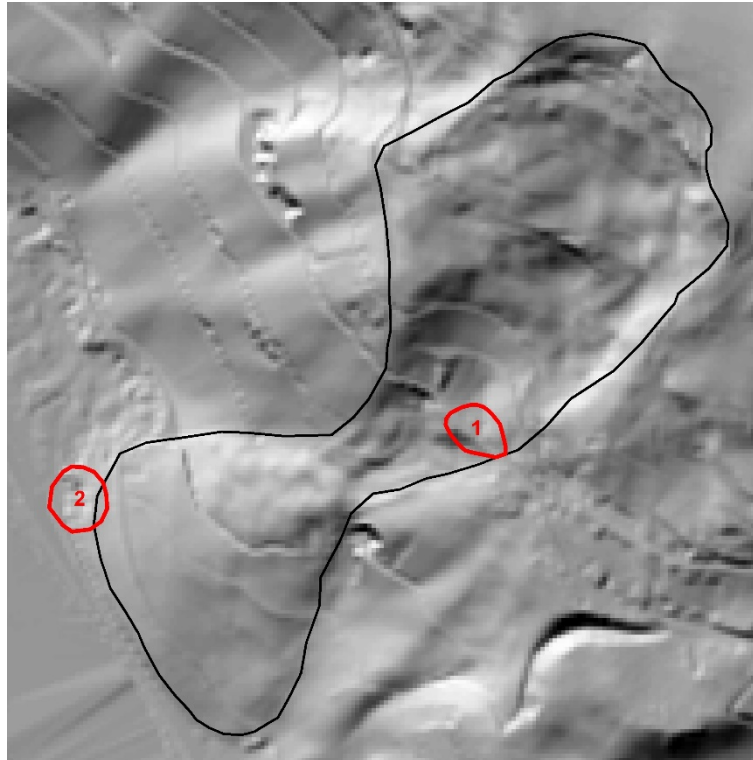


Abbildung 123: Lage der beiden Bereiche, für die Zeitreihenanalysen der PSI- und SBAS-Daten von TerraSAR-X-Daten durchgeführt wurden (Hintergrund: DGM5, LVermGeo).

Die Zeitserien der PSI- und SABS-Punkte der Ascending und Descending Datensätze von TerraSAR-X für Standorte 1 und 2 sind in Abbildung 124 bis Abbildung 131 dargestellt. Gezeigt wird jeweils der Mittelwert der PSI- und SBAS-Punkte mit einer linearen Trendlinie. Hierbei ist auffällig, dass die Bewegungsmessungen im Messzeitraum einen mehr oder weniger nicht-linearen Verlauf zeigen. Womöglich handelt es sich hierbei um saisonale Schwankungen.

Tabelle 24: Durchschnitt der Bewegungsmessungen der PSI- und SBAS-Prozessierungen für die beiden Standorte der Zeitreihenanalysen.

Standort	PSI Track 116	SBAS Track 116	PSI Track 154	SBAS Track 154
1	+2,4 mm/Jahr (119 Punkte)	+4,5 mm/Jahr (46 Punkte)	-3,5 mm/Jahr (110 Punkte)	-3,5 mm/Jahr (26 Punkte)
2	+5,4 mm/Jahr (404 Punkte)	+5,8 mm/Jahr (100 Punkte)	-4,7 mm/Jahr (283 Punkte)	-3,9 mm/Jahr (77 Punkte)

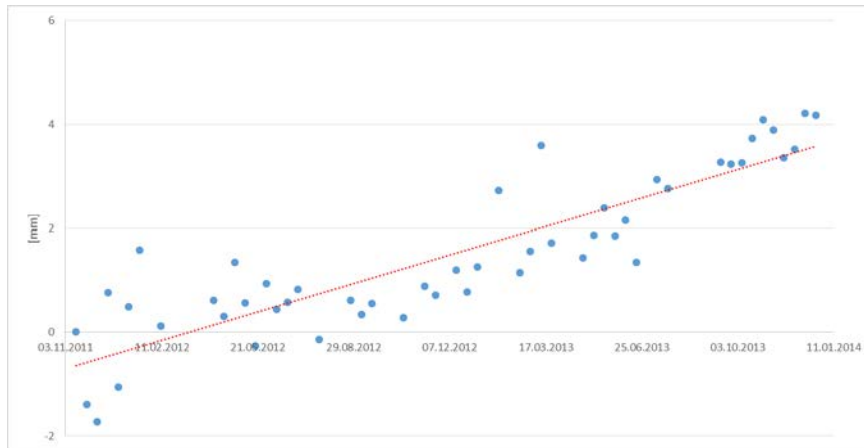


Abbildung 124: Zeitserie des Mittelwerts für 119 PSI-Punkte von Track 116 für Standort 1 (blaue Punkte) mit linearer Trendlinie (rote Linie).

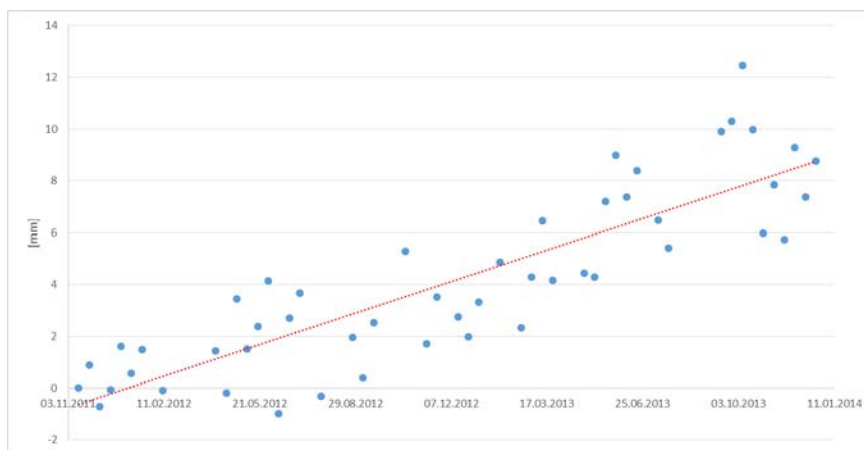


Abbildung 125: Zeitserie des Mittelwerts für 46 SBAS-Punkte von Track 116 für Standort 1 (blaue Punkte) mit linearer Trendlinie (rote Linie).

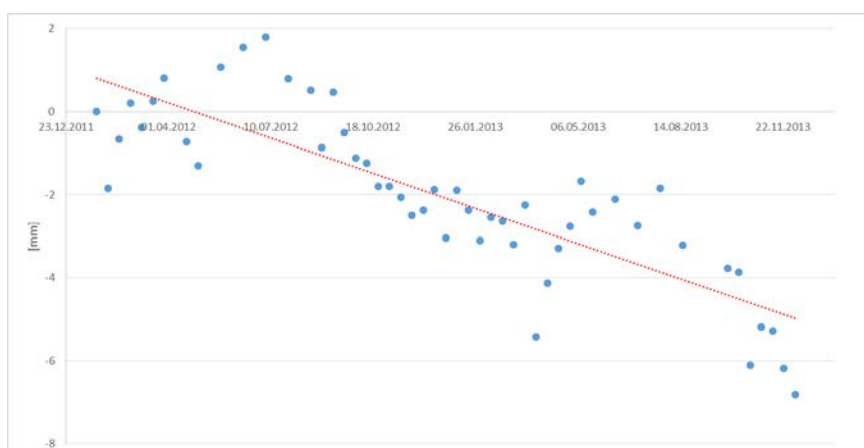


Abbildung 126: Zeitserie des Mittelwerts für 110 PSI-Punkte von Track 154 für Standort 1 (blaue Punkte) mit linearer Trendlinie (rote Linie).



Abbildung 127: Zeitserie des Mittelwerts für 26 PSI-Punkte von Track 154 für Standort 1 (blaue Punkte) mit linearer Trendlinie (rote Linie).

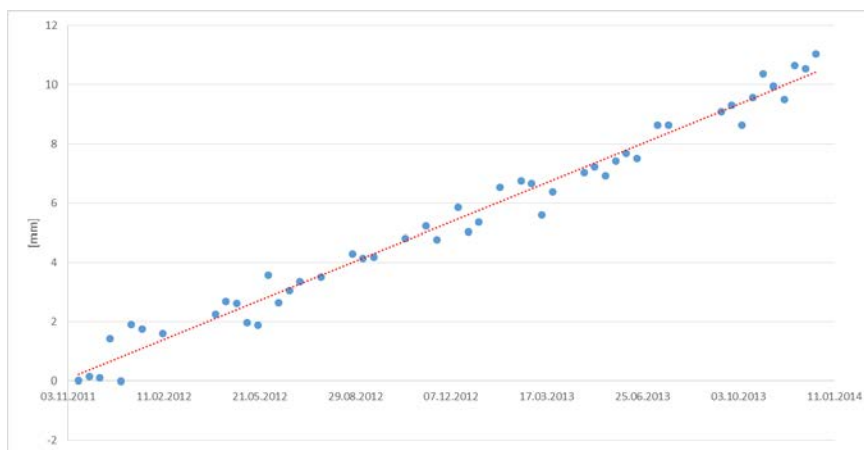


Abbildung 128: Zeitserie des Mittelwerts für 404 PSI-Punkte von Track 116 für Standort 2 (blaue Punkte) mit linearer Trendlinie (rote Linie).

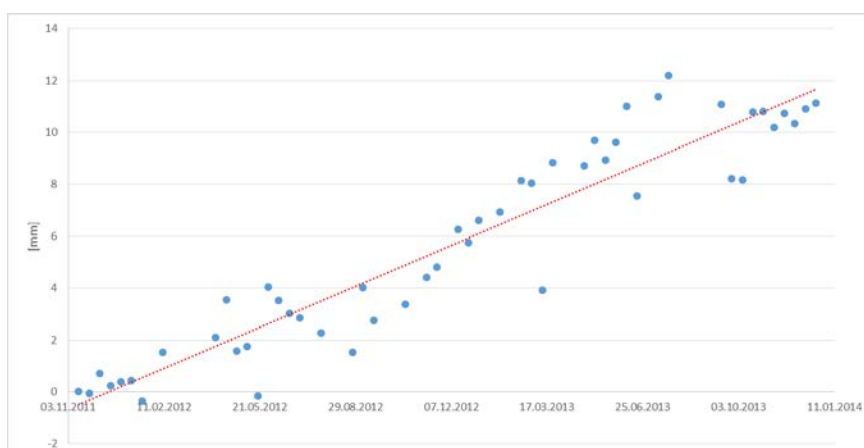


Abbildung 129: Zeitserie des Mittelwerts für 100 SBAS-Punkte von Track 116 für Standort 2 (blaue Punkte) mit linearer Trendlinie (rote Linie).





Abbildung 130: Zeitserie des Mittelwerts für 283 PSI-Punkte von Track 154 für Standort 2 (blaue Punkte) mit linearer Trendlinie (rote Linie).



Abbildung 131: Zeitserie des Mittelwerts für 77 SBAS-Punkte von Track 154 für Standort 2 (blaue Punkte) mit linearer Trendlinie (rote Linie).

Zur Hangüberwachung wurden einige Corner Reflektoren und Inklinometer im Hang installiert (Abbildung 132). Zum Vergleich mit den Prozessierungen der TerraSAR-X-Daten (2011 bis 2013) wurden vier Messungen ausgewählt, in deren Umgebung von 30 Metern PSI- und SBAS-Daten verfügbar sind. Hierbei handelt es sich um drei GPS-Messungen an den Corner Reflektoren 15, 4 und 6 sowie Inklinometermessungen an Standort INK1/K73 (Abbildung 132). Am Standort CR15 wurden mit GPS eine horizontale Bewegungsgeschwindigkeit von 12 mm/Jahr im Zeitraum 11/2010 bis 03/2012 gemessen. Für diesen Standort sind im Umkreis von 30 Metern 7 SBAS-Punkte der Prozessierung des Descending Datensatzes von TerraSAR-X verfügbar. Sie ergeben eine durchschnittliche Bewegung von -2,7 mm/Jahr für den Zeitraum 01/2012 bis 12/2013. Am Standort von Corner Reflektor 4 wurden mit GPS 14 mm/Jahr gemessen. In diesem Bereich zeigen die PSI-Daten von Track 116 +0,4 mm/Jahr (Mittelwert aus 4 Punkten), im Track 154 -0,8 mm/Jahr (Mittelwert aus 39 Punkten) und im SBAS-Datensatz von Track 154 +0,3 mm/Jahr (Mittelwert aus 9 Punkten). Diese Messungen der PSI- und SBAS-Daten liegen im stabilen Bereich von +/-1 mm/Jahr. Am Standort INK1/K73 wurden mit einem Inklinometer Bewegungen von +3 mm/Jahr gemessen. Die Bewegungen von Track 116 liegen bei +2,4 mm/Jahr (PSI) und +4,8 mm/Jahr (SBAS). Die Daten von Track 154 zeigen eine Bewegung von -3,2 mm/Jahr (PSI) und -3,5 mm/Jahr (SBAS) an. Die unterschiedlichen Vorzeichen der Bewegungen lassen auf eine horizontale Bewegung von ca. 2 bis 3 mm/Jahr schließen. Dies ist vergleichbar mit der Inklinometermessung von +3 mm/Jahr im Zeitraum 10/2007 bis 4/2012. Am Standort von Corner Reflektor 6 wurden mit GPS +7 mm/Jahr gemessen. Die im Umkreis von 30 Metern verfügbaren Daten des Tracks 154 zeigen Bewegungen von -4,3 mm/Jahr (PSI) und -3,7 mm/Jahr (SBAS) an (Tabelle 25).

Tabelle 25: GPS- und Inklinometermessungen, PSI- und SBAS-Daten an vier ausgewählten Standorten.

Standort	Messung	PSI Track 116 Ascending Blickrichtung Osten	SBAS Track 116 Ascending Blickrichtung Osten	PSI Track 154 Descending Blickrichtung Westen	SBAS Track 154 Descending Blickrichtung Westen
CR15	GPS 12 mm/Jahr	---	---	---	-2,7 mm/Jahr (7 Punkte)
CR4	GPS 14 mm/Jahr	+0,4 mm/Jahr (4 Punkte)	---	-0,8 mm/Jahr (39 Punkte)	+0,3 mm/Jahr (9 Punkte)
INK1/K73	INK 3 mm/Jahr	+2,4 mm/Jahr (49 Punkte)	+4,8 mm/Jahr (26 Punkte)	-3,2 mm/Jahr (72 Punkte)	-3,5 mm/Jahr (13 Punkte)
CR6	GPS 7 mm/Jahr	---	---	-4,3 mm/Jahr (12 Punkte)	-3,7 mm/Jahr (8 Punkte)

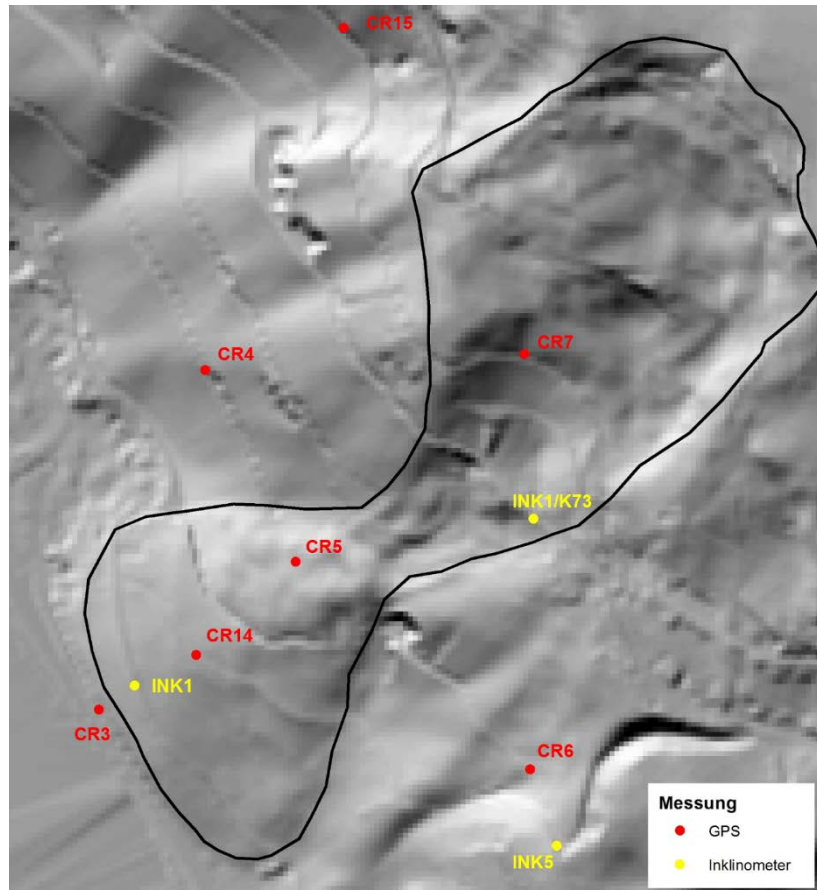


Abbildung 132: GPS- und Inklinometermessungen am Rutschhang Graach abgeleitet aus dem Lageplan Hangüberwachung von Mai 2012 (LGB) (Hintergrund: DGM5, LVermGeo).

Beim Vergleich der Datensätze von GPS, Inklinometer sowie der PSI- und SBAS-Prozessierungen müssen jedoch die unterschiedlichen Messrichtungen und -zeiträume berücksichtigt werden. Die horizontalen GPS-Messungen erfolgten im Zeitraum von November 2010 bis März 2012. Die installierten Inklinometer messen Bewegungen horizontal in der Falllinie des Hanges, wobei die realen Bewegungen meist unterschätzt werden. Die genannten Messungen erfolgten im Zeitraum von Oktober 2007 bis April 2012. Die TerraSAR-X-Daten wurden im Zeitraum November 2011 bis Dezember 2013 aufgenommen. Die Bewegungsmessungen erfolgen in Blickrichtung des Sensors (LOS, Line-of-Sight), d.h. nahezu nach Osten ( $7,44^\circ$ ) im Ascending Orbit und nach Westen im Descending Orbit. Der Vergleich der Datensätze besitzt daher nur Indiziencharakter.

Im Luftbild sind die Auswirkungen der Hangbewegung erkennbar. So kann der mittlere Teil des Hangrutschs, in dem die größten Bewegungsraten vorkommen, nicht für Weinbau genutzt werden. In diesem Abschnitt ist der Hang lediglich mit Büschen bewachsen. Die Analyse der NDVI-Ergebnisse von RapidEye-Szenen vom 8. April 2011 und 9. September 2012 ergab keine auffälligen Veränderungen der Vitalität der Vegetation.

### 3.3.3.2 Ürzig

Südlich von Ürzig erstreckt sich ein ausgedehntes Rutschgebiet am Prallhang der Mosel mit einer Länge von ca. 2,5 km und einer Breite von bis zu 660 Meter. In diesem Rutschgebiet befinden sich die Rutschungen „Rothenberg“ und „Ürziger Lay“ (Abbildung 133). Die Rutschung „Rothenberg“ ist ca. 510 Meter lang und erstreckt sich vom Rothenberg auf 280 m ü. NN bis zur Mosel auf 100 m ü. NN. Die durchschnittliche Hangneigung beträgt 22°, wobei der untere Bereich steiler (25°) und der obere Bereich flacher (16°) ist. Der Hauptabriss der Rutschung befindet sich 280 m ü. NN innerhalb der Wittlicher Rotliegendesedimente und bildet eine 3 Meter hohe, 40° steile Geländekante aus, die in eine 10 bis 20 Meter lange und ca. 100 Meter breite Verebnungsfläche auf 240 m ü. NN übergeht (Abbildung 134, Rogall & Möbus 2005, Rogall 2014).

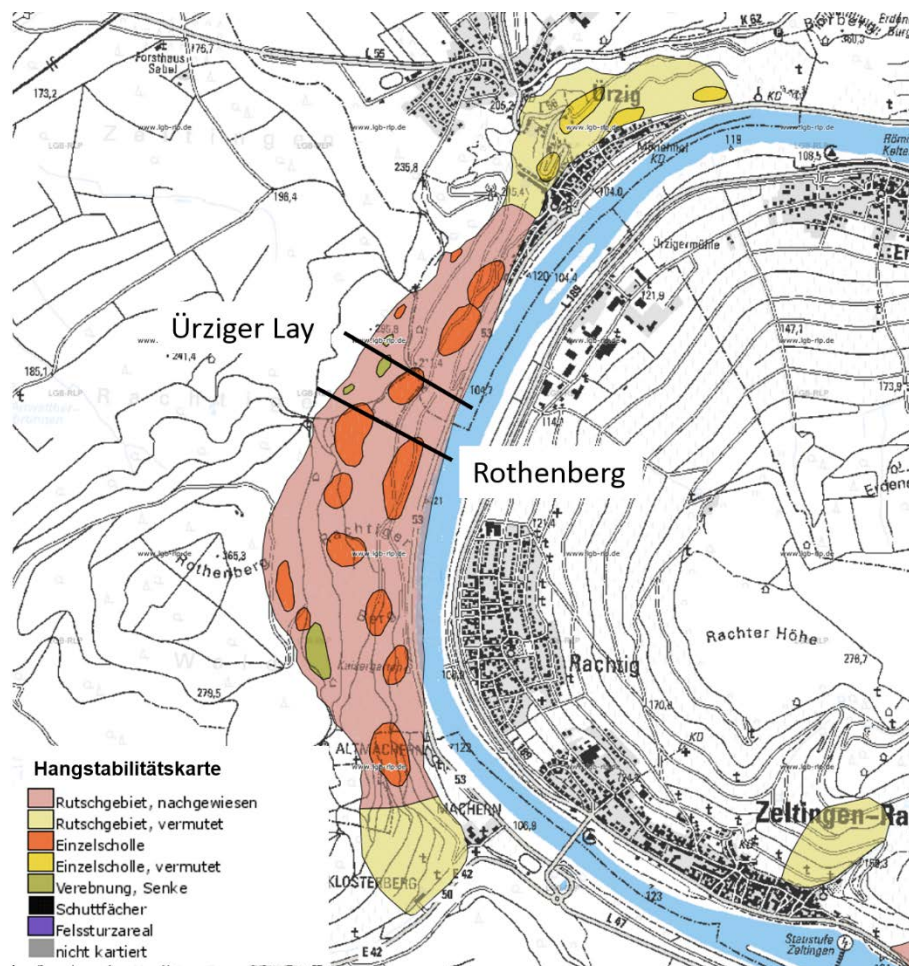


Abbildung 133: Ausschnitt der Hangstabilitätskarte Mittelmosel 1:20.000 für das Rutschgebiet südlich der Ortschaft Ürzig (Landesamt für Geologie und Bergbau/Kartenviewer).

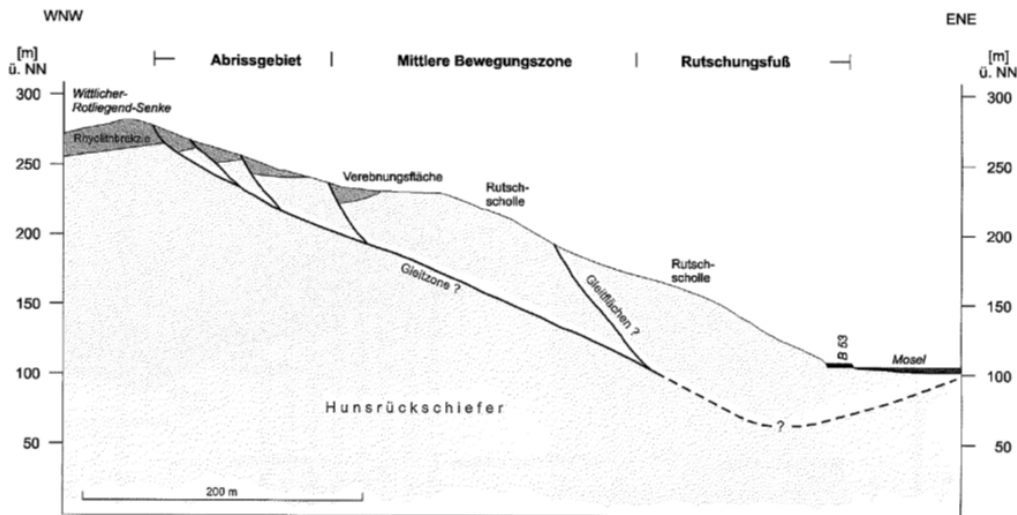


Abbildung 134: Profilschnitt durch die Rutschung „Rothenberg“ (Rogall & Möbus 2005).

Die Rutschung „Ürziger Lay“ ist geologisch und morphologisch sehr ähnlich der Rutschung „Rothenberg“, die sich 250 Meter südwestlich befindet. Der Hauptabbriss auf 285 m ü. NN bildet eine 10 Meter hohe und mit 45° bis 50° sehr steile Geländekante, die in eine Verebnungsfläche auf 240 m ü. NN übergeht. Mehrere Zerrgräben im oberen Bereich der Rutschmasse weisen auf weitere Abrisse hin. Die Rutschung ist 450 Meter lang mit einer durchschnittlichen Hangneigung von 23°. Charakteristisch ist die Felsrippe „Ürziger Lay“, eine abgerutschte Rutschscholle, die sich auf ca. 140 m ü. NN am Hangfuß befindet (Abbildung 135, Rogall & Möbus 2005). Abgesehen von diesen beiden Rutschungen weist die Hangstabilitätskarte Mittelmosel 1:20.000 zahlreiche weitere Einzelschollen auf (Abbildung 133).

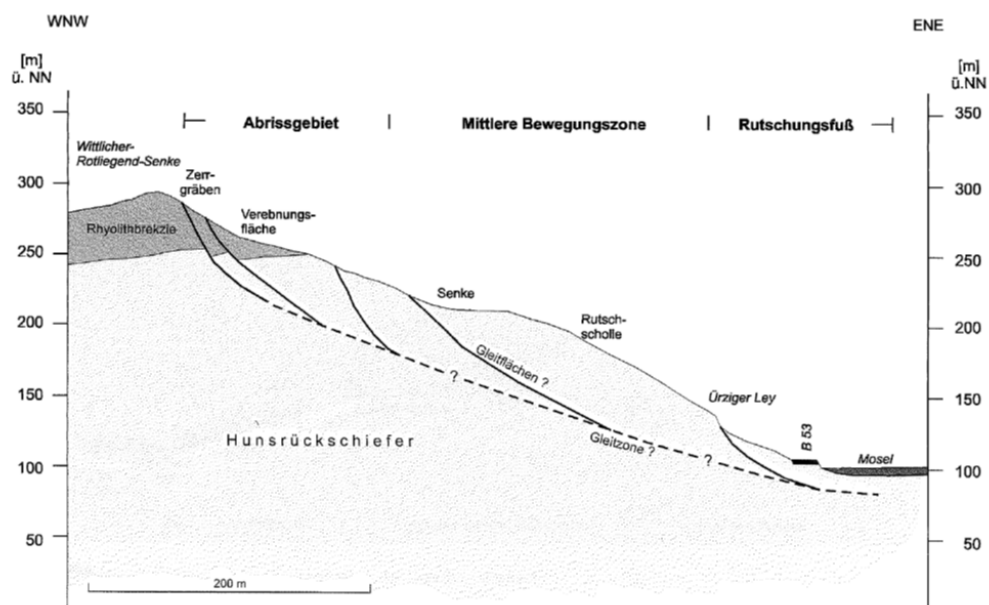


Abbildung 135: Profilschnitt durch die Rutschung „Ürziger Lay“ (Rogall & Möbus 2005).

In Abbildung 136 und Abbildung 137 sind die PSI- und SBAS-Prozessierungen der TerraSAR-X-Daten für den Bereich des Prallhanges bei Ürzig dargestellt. Da der obere Hangbereich mit Wald bewachsen ist, sind in diesem Bereich keine PSI- oder SBAS-Messungen verfügbar.

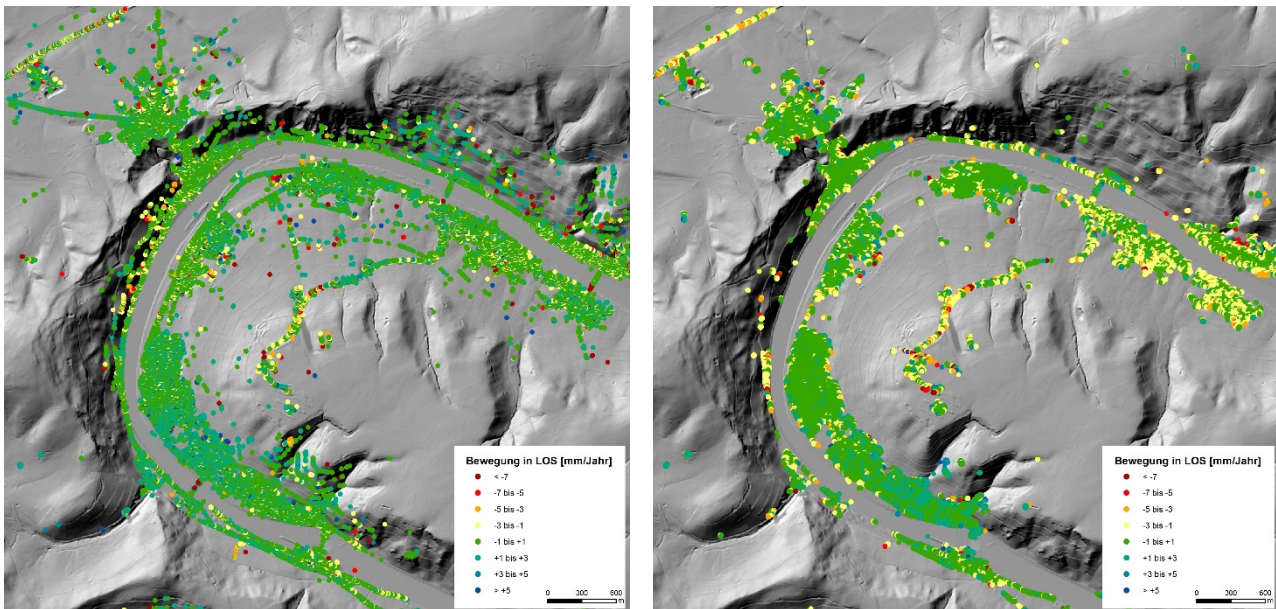


Abbildung 136: PSI- (links) und SBAS-Daten (rechts) von TerraSAR-X Ascending Orbit 116 (Blickrichtung Osten) für den Prallhang der Mosel bei Ürzig.

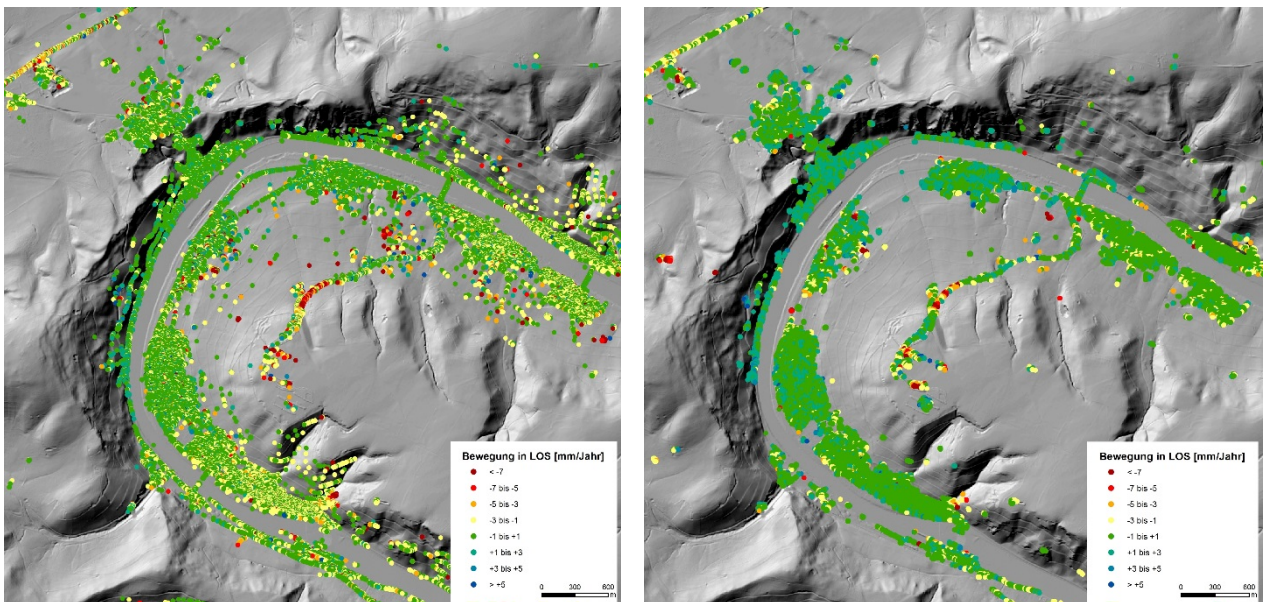


Abbildung 137: PSI- (links) und SBAS-Daten (rechts) von TerraSAR-X Descending Orbit 154 (Blickrichtung Westen) für den Prallhang der Mosel bei Ürzig.

Zur Detailanalyse wurden für den Hangbereich zwischen Ürzig und dem Kloster Machern die PSI- und SBAS-Daten ausgewertet. Hierzu wurden aus den Bewegungsmessungen Gebiete mit Bewegungen von geringer als  $-1$  mm/Jahr als Bewegungsgebiete kartiert. Die Ergebnisse dieser Kartierung sind in Abbildung 138 dargestellt. Vom PSI-Datensatz Ascending Orbit Track 116 ließen sich 9 Gebiete abgrenzen, vom SBAS-Datensatz des gleichen Orbits 8 Bewegungsbereiche. Aus den Daten des PSI-Datensatzes vom Descending Orbit Track 154 wurden drei Gebiete abgeleitet. Im SBAS-Datensatz des gleichen Orbits wurde ein Bewegungsgebiet detektiert.

Aus dem Luftbild DOP20 (BKG) vom 20. Juli 2013 ließen sich einige auffällige Hangbereiche identifizieren. In diesen Bereichen ist die Vegetation nicht so ausgeprägt vorhanden, wie in den anderen Hangbereichen. Diese Bereiche wurden im Maßstab 1:5.000 kartiert (Abbildung 139). Die kartierten Bereiche wurden mit den Ergebnissen der NDVI-Berechnung von RapidEye-Daten verglichen (Abbildung 140). Das NDVI-Ergebnis von April 2011 zeigt keine eindeutigen Übereinstimmungen mit den auffälligen, vegetationsarmen Bereichen aus dem Luftbild, während im NDVI-Ergebnis von September 2012 die Bereiche sehr gut erkennbar sind (geringe NDVI-Werte im Bereich der aus dem Luftbild kartierten Hangbereiche). Des Weiteren ergeben sich auch keine Korrelationen der Ergebnisse von NDVI mit den in der Hangstabilitätskarte kartierten Einzelschollen und Verebnungsflächen im Rutschgebiet.

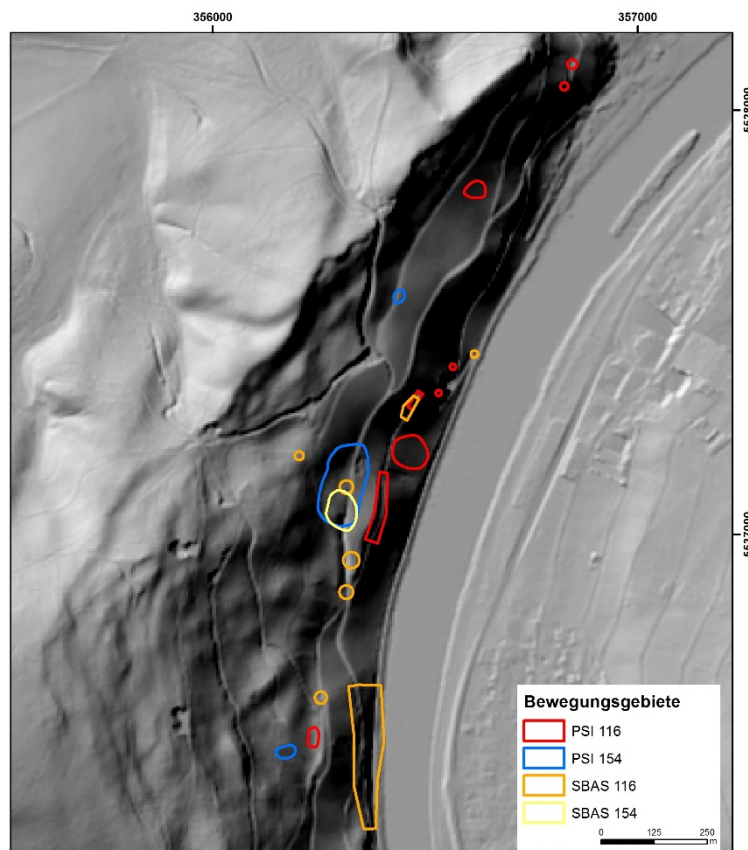


Abbildung 138: Ergebnis der Bewegungskartierung für den Hangrutschbereich südlich von Ürzig.



Abbildung 139: Kartierung auffälliger Hangbereiche (vegetationsarme Bereiche, rote Polygone) im Maßstab 1:5.000 aus dem Luftbild DOP40 (BKG, Aufnahme vom 20.7.2013).

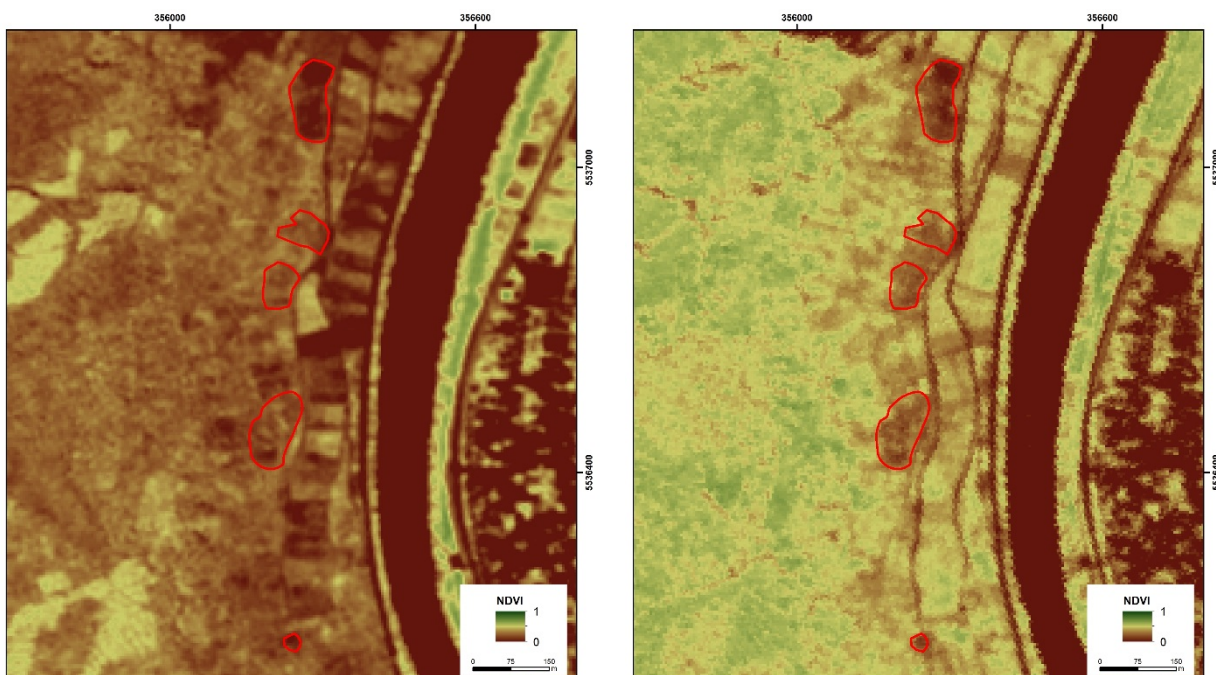


Abbildung 140: NDVI-Ergebnisse von April 2011 (links) und September 2012 (rechts) von RapidEye-Daten für einen Teil des Hanges südlich von Ürzig mit kartieren auffälligen Bereichen aus dem Luftbild (rote Polygone).



Für einen ausgewählten Bereich, in dem sowohl vegetationsarme Bereiche als auch Bewegungsdaten von beiden PSI-Datensätzen und dem SBAS-Datensatz von Track 116 vorkommen, wurden Zeitserienanalysen durchgeführt (Abbildung 141). Im PSI-Datensatz des Ascending Orbit Track 116 sind in diesem Bereich 7 Punkte verfügbar, die eine Bewegung von durchschnittlich  $-5,6$  mm/Jahr anzeigen. Die 5 ausgewählten Punkte des SBAS-Datensatzes im gleichen Orbit liegen ca. 75 Meter nördlich. Diese Daten zeigen eine Bewegung von ca.  $-1,7$  mm/Jahr an. Die 7 PSI-Punkte aus dem Descending Datensatz von Track 154 liegen weiter oben am Hang. 5 Punkte zeigen eine Bewegung in Richtung des Sensors an ( $+3,5$  mm/Jahr), zwei Punkte zeigen in die entgegengesetzte Richtung ( $-2,3$  mm/Jahr, Tabelle 26). Die Distanz zwischen den entgegengesetzten Bewegungsraten beträgt 12 Meter. Abbildung 142 zeigt die Zeitserie zu den 7 PSI-Punkten von Track 116. Es handelt sich um eine annähernd lineare Bewegung. Die SBAS-Daten (Abbildung 143) weisen aufgrund geringere Kohärenzwerte größere Schwankungen auf. Abbildung 144 zeigt die beiden Zeitreihen für die 5 Punkte mit positiven Werten und die beiden, 12 Meter entfernten, Punkte mit negativen Werten.

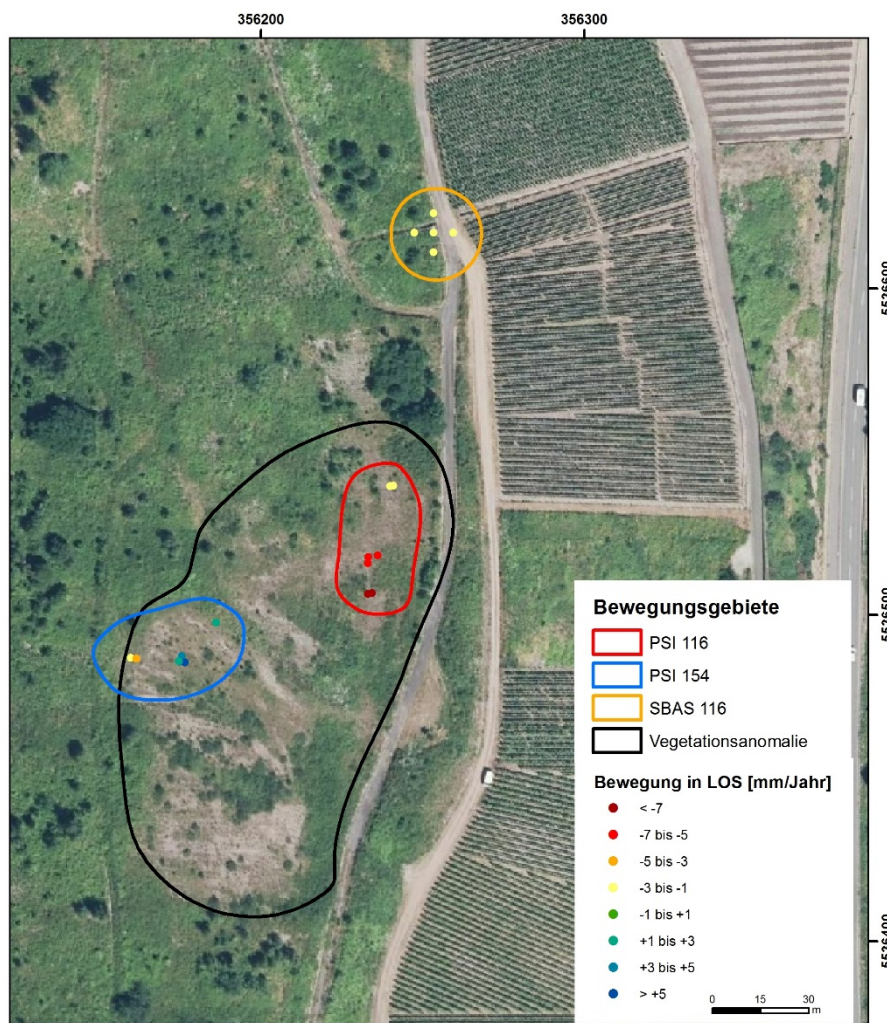


Abbildung 141: Ausgewählter Bereich für die Zeitreihenanalysen.

Tabelle 26: Statistik der ausgewählten Bereiche der Zeitreihenanalysen.

	Anzahl Punkte	Minimale Bewegung [mm/Jahr]	Maximale Bewegung [mm/Jahr]	Bewegung (Durchschnitt) [mm/Jahr]
PSI 116 Ascending (Blickrichtung Osten)	7	-8,1	-2,5	-5,6
SBAS 116 Ascending (Blickrichtung Osten)	5	-1,9	-1,4	-1,7
PSI 154 Descending (Blickrichtung Westen)	7	-3,0	+5,7	+1,9



Abbildung 142: Zeitserie des Mittelwerts der 7 PSI-Punkte von Track 116 (blaue Punkte) mit linearer Trendlinie (rote Linie).

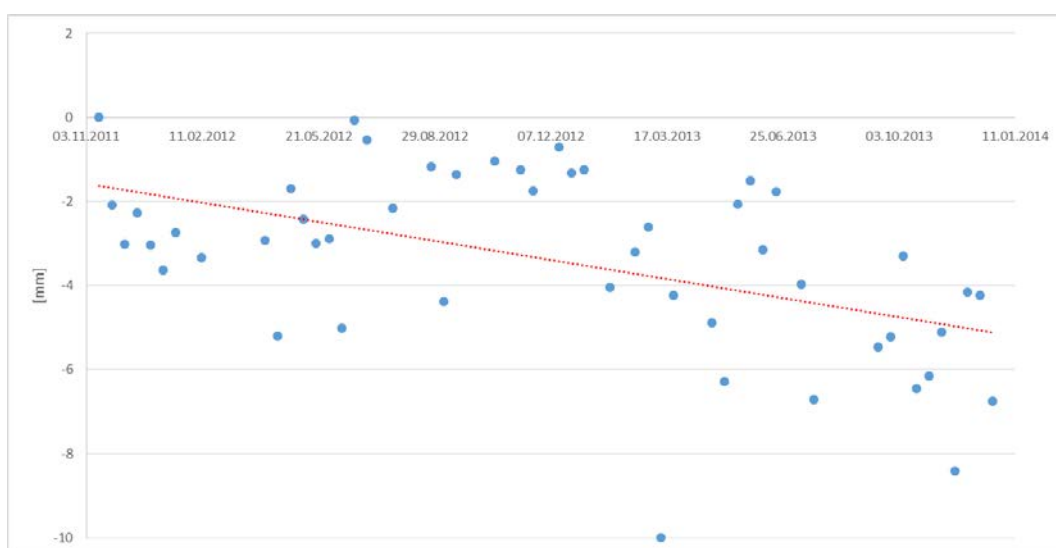


Abbildung 143: Zeitserie des Mittelwerts der 5 SBAS-Punkte von Track 116 (blaue Punkte) mit linearer Trendlinie (rote Linie).

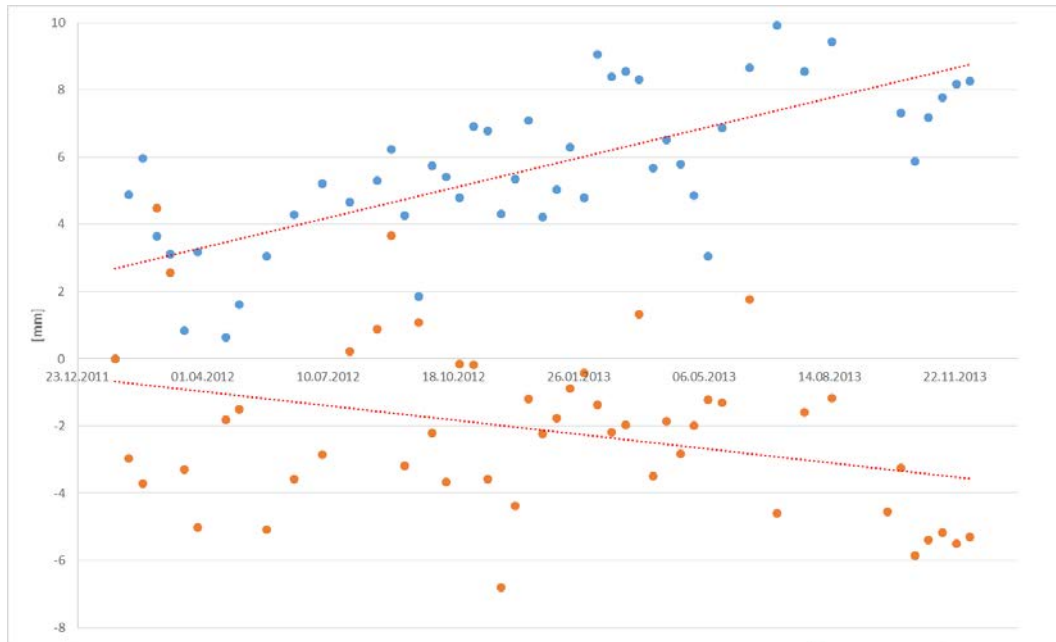


Abbildung 144: Zeitserien der Mittelwerte von 5 SBAS-Punkten mit positiven Werten (blaue Punkte) und von 2 Punkten mit negativen Werten (orangene Punkte) von Track 154 mit linearer Trendlinien (rote Linien).

### 3.3.3.3 Kröv

Gegenüber der Ortschaft Kröv befindet sich eine 75 bis 85° steile, etwa 80 Meter hohe Felswand aus angewitterten, unterdevonischen Tonschiefern (Abbildung 145). Teilweise wird die Felswand von bis zu 5 Meter mächtigen sandigen und kiesigen Terrassenablagerungen des Quartärs überdeckt. Im Tonschiefer selbst sind dünne quarzitische Lagen eingeschaltet. Parallel zur Schichtung bzw. Schieferung kommen bis zu 30 cm mächtige Quarzgänge vor. Am Fuß der Felswand schließt sich eine Halde aus abgestürzten plattigen Gesteinsbruchstücken an. Der Höhenunterschied von der Oberkante der Felswand bis zur Mosel am Hangfuß beträgt ca. 162 Meter. Im Jahr 1992 wurde ein 30 m langer Spalt im Felskörper entdeckt. Die anschließend durchgeführten Messungen ergaben eine andauernde Kippbewegung des Schieferfelsens mit zunehmender Beschleunigung ohne externe Einflüsse. Dies machte einen unmittelbar bevorstehenden unkontrollierten Absturz sehr wahrscheinlich. Zur Gefahrenabwehr wurden im Mai und September 1992 zwei Sprengungen durchgeführt und der Fels kontrolliert zum Absturz gebracht. Dabei wurden jeweils ca. 30.000 m<sup>3</sup> Gestein abgetragen (Krauter et al. 1993).

Abseits der Felswand ist der Moselhang bewaldet (Abbildung 146), daher konnten in diesem Bereich keine PSI- oder SBAS-Daten gemessen werden. Von den vier prozessierten Datensätzen liefert nur der PSI-Datensatz des Ascending Orbit Track 116 (Blickrichtung Osten) Bewegungsdaten für den Bereich des nach Nordwesten einfallenden Felshanges (Abbildung 147).

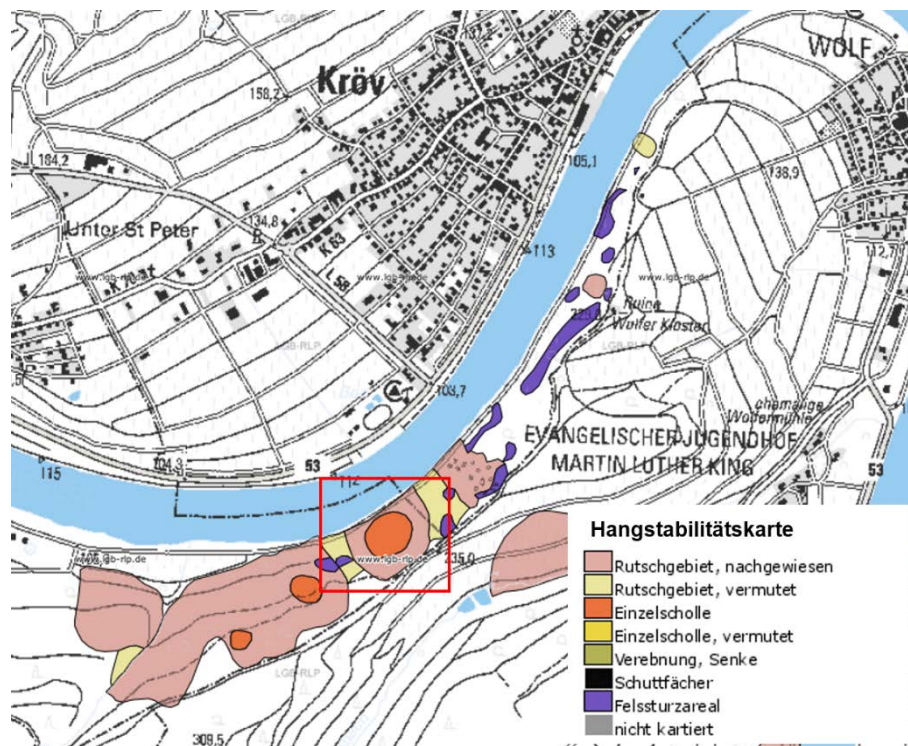


Abbildung 145: Ausschnitt der Hangstabilitätskarte Mittelmosel 1:20.000 für den Kröver Felshang (roter Rahmen, Landesamt für Geologie und Bergbau/Kartenvierer).



Abbildung 146: Kröver Felshang (Foto: C. Wolf, September 2014).

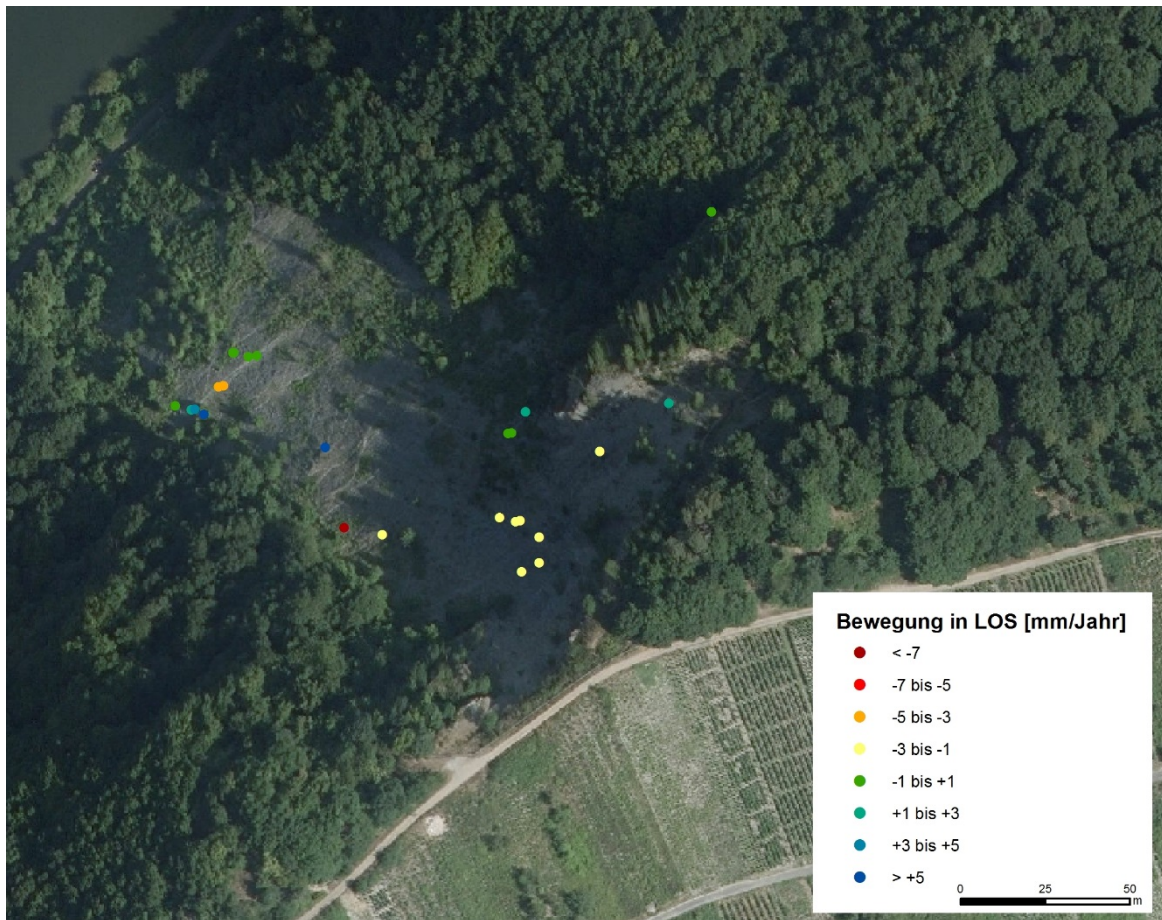


Abbildung 147: PSI-Daten von Ascending Orbit Track 116 im Bereich des Kröver Felshanges (Hintergrund: DOP40, BKG).

Die 25 PSI-Punkte zeigen unterschiedliche Bewegungsrichtungen von -10,8 mm/Jahr bis +16,0 mm/Jahr an. Da die Radarmessung in Blickrichtung des Sensors erfolgt (Line-of-Sight, Blickrichtung Osten), ergibt eine hangabwärts gerichtete Bewegung nach Nordwesten eine Bewegung zum Sensor (blaue Farben). Im oberen Hangbereich bewegen sich die Reflektoren weg vom Sensor, d.h. sie besitzen eine Bewegungskomponente nach Osten. Die Zeitserien-Auswertung des Mittelwerts der 6 PSI-Punkte im oberen Hangbereich zeigt sehr große Sprünge, was auf große Streuung der Werte und eine geringe Verlässlichkeit der Daten hinweist (Abbildung 148).

Die NDVI-Ergebnisse der RapidEye-Szenen vom 8. April 2011 und 9. September 2012 lassen den Felshang bei Kröv aufgrund einer geringeren Vegetationsbedeckung leicht erkennen (geringe NDVI-Werte, Abbildung 149). Weiterhin lassen sich jedoch keine weiteren Indikatoren für Hangbewegungen aus den Ergebnissen des NDVI ableiten.

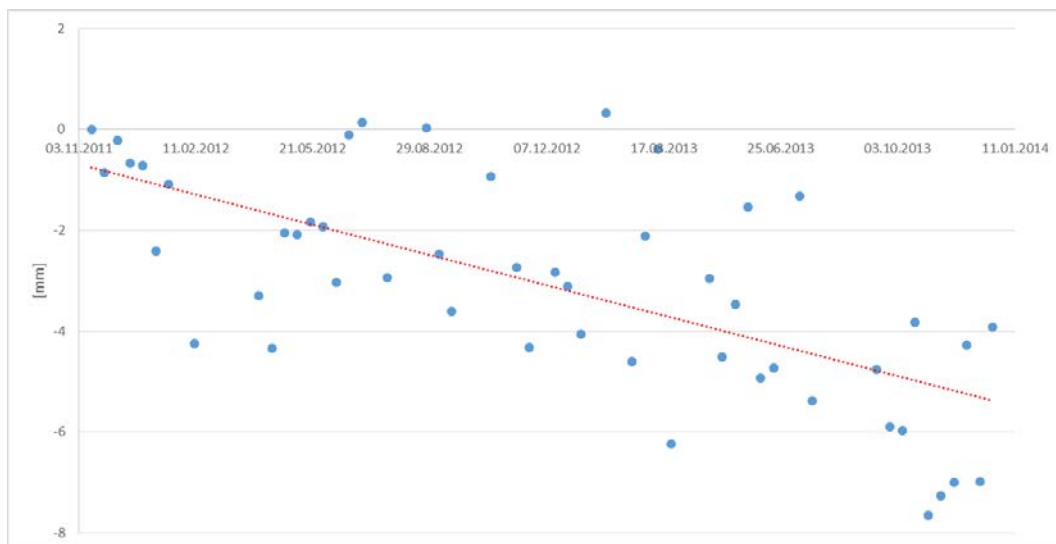


Abbildung 148: Zeitserie des Mittelwertes von 6 PSI-Punkten im oberen Hangbereich von Track 116 (blaue Punkte) mit linearer Trendlinie (rote Linie).

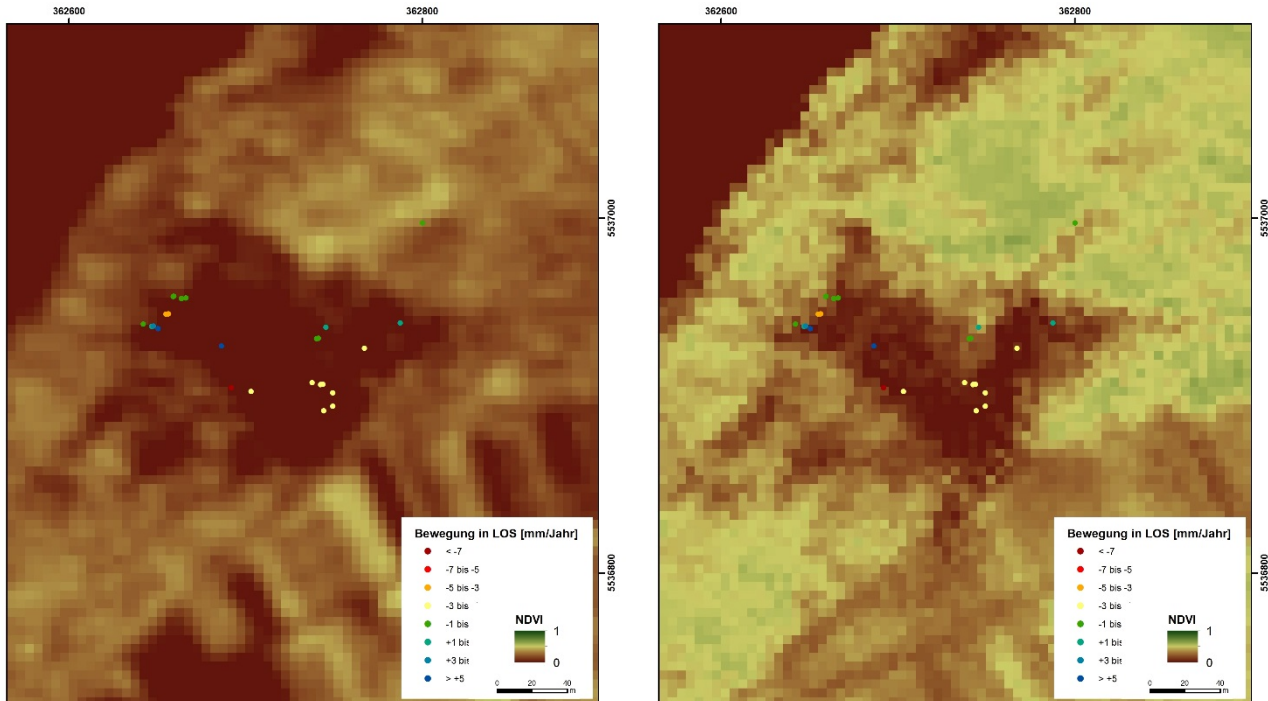


Abbildung 149: NDVI-Ergebnis der RapidEye-Szene von April 2011 (links) und September 2012 (rechts) mit PSI-Punkten von Track 116 für den Kröver Felshang.

### 3.3.3.4 Rißbach (Moselbrücke Wolf)

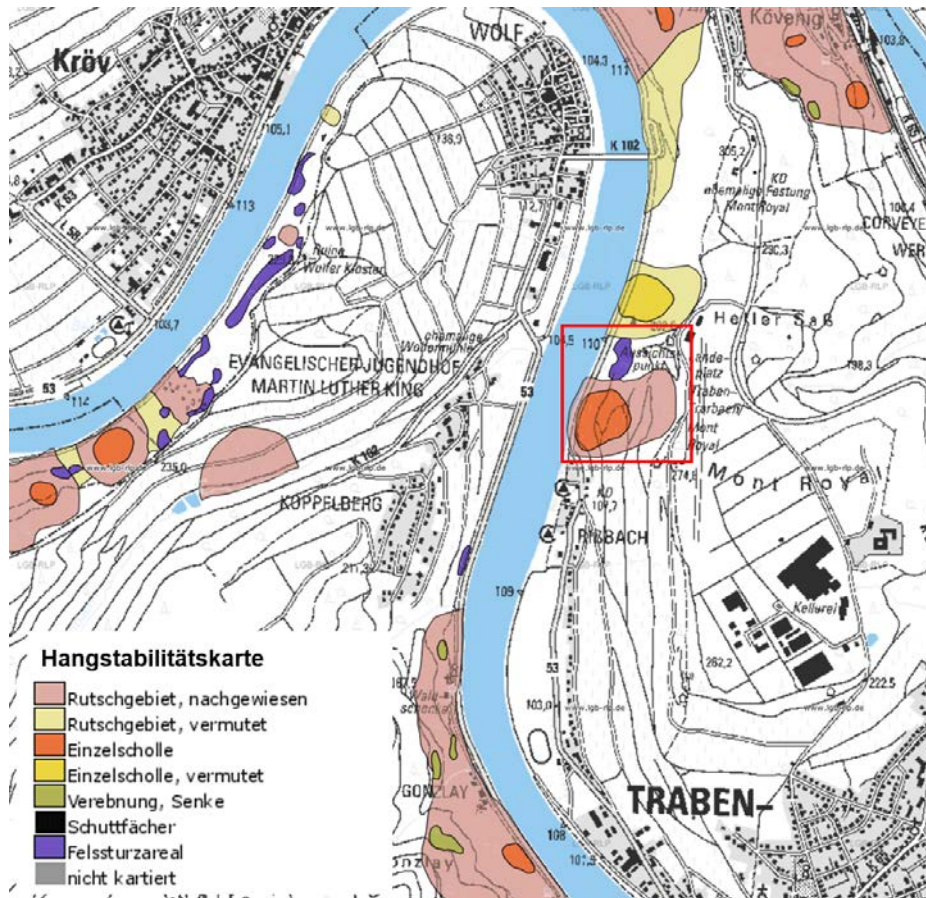


Abbildung 150: Ausschnitt der Hangstabilitätskarte des LGB für den Bereich Rißbach (roter Rahmen) (Landesamt für Geologie und Bergbau/Kartenviewer).

Nördlich des Stadtteils Rißbach am östlichen Moselufer befindet sich ein nachgewiesenes Rutschgebiet (Abbildung 150). In diesem Hang wurde vom Landesbetrieb Mobilität Rheinland-Pfalz eine Hangüberwachung im Zuge des Neubaus der B53 Moselbrücke Wolf durchgeführt. Die neue Moselbrücke dient als Ortsumgehung für die Stadtteile Trabren, Rißbach und Wolf. Der Bau der Brücke mit einer Bauzeit von ca. 3 Jahren wurde im Juli 2012 beauftragt (Abbildung 151). Während des Baus wurden umfangreiche Hangsicherungsarbeiten auf beiden Moselseiten durchgeführt. Die Verkehrsfreigabe erfolgte im Oktober 2015 (Landesbetrieb Mobilität Rheinland-Pfalz).

Die Rutschung setzt sich aus unterschiedlichen Schollen und Gleitflächen zusammen. Während die obere Abrisskante im Digitalen Geländemodell gut zu identifizieren ist, ist die seitliche Abgrenzung schwierig. Im Hang ist zudem eine Verebnungsfläche vorhanden. Eine Bohrung zeigte verlehnte als auch felsige Bereiche im Gestein, in dem horizontale Schieferungen vorliegen. Inklinometermessungen zeigten vertikale Bewegungen von ca. 2 cm und horizontale Bewegungen von 1 cm an (Auskunft des Landesamtes für Geologie und Bergbau Rheinland-Pfalz).



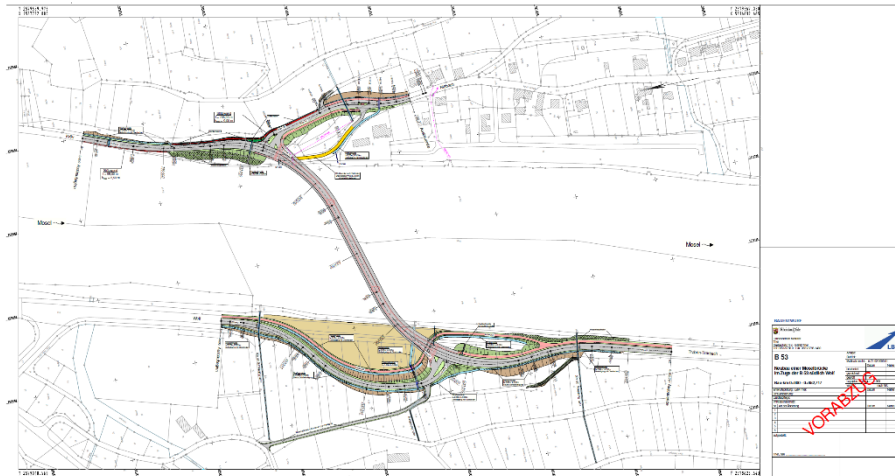


Abbildung 151: Übersichtslageplan der Moselbrücke Wolf (Landesbetrieb Mobilität Rheinland-Pfalz).

In den vorhandenen PSI- und SABS-Datensätzen, abgeleitet aus TerraSAR-X-Daten von 2012 und 2013, konnten nur im PSI-Datensatz von Descending-Orbit Track 154 (Blickrichtung Westen) Messwerte im Hangbereich festgestellt werden (Abbildung 152). Die Mehrzahl der Reflektoren liegt dabei nicht in der Rutschmasse, sondern entlang des Weinbergweges. Die dort vorkommenden Metallgeländer stellen ideale Reflektoren für das Radarsignal da (Abbildung 153, Abbildung 154). Einige Messwerte kommen jedoch wahrscheinlich auch von kahlen Felsen.

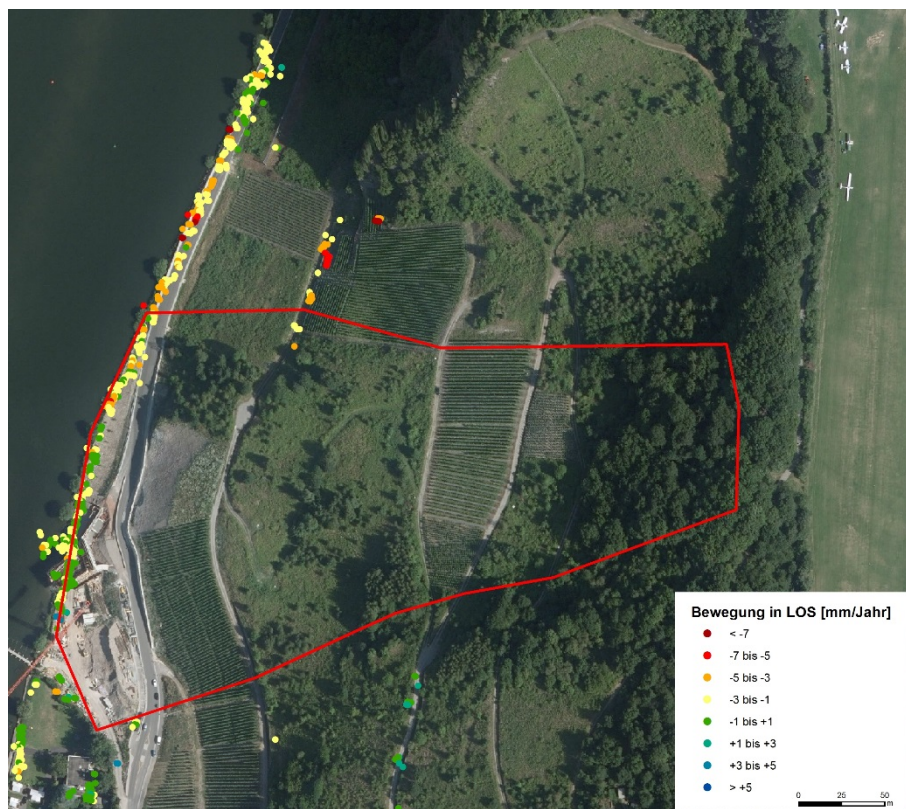


Abbildung 152: PSI-Daten von Track 154 an der Rutschung nördlich von Reißbach (roter Rahmen: Rutschmasse abgeleitet aus dem Plan „Überwachungsnetz Reißbach Stand 10/2013“, Hintergrund: DOP40 BKG).



Abbildung 153: Geländefoto im Bereich der gemessenen PSI-Daten (Foto: C. Wolf, September 2014).



Abbildung 154: Die Metallgeländer stellen ideale Persistent Scatterer dar (Foto: C. Wolf, September 2014).

Zur detaillierten Analyse wurden 4 Bewegungsgebiete ausgewählt (Abbildung 155). Die Auswahl erfolgte für Daten, die ein räumliches Cluster bilden und in der gleichen oder benachbarten Bewegungsklasse vorkommen. Für diese Bereiche wurde der Mittelwert berechnet und als Zeitdiagramm dargestellt (Abbildung 156). Die Messwerte weisen große Streuungen auf. Die Statistik zu den 4 Bewegungsgebieten ist in Tabelle 27 aufgeführt.



Abbildung 155: Ausgewählte Bewegungsgebiete für die Zeitreihenanalyse (PSI-Daten von Track 154).

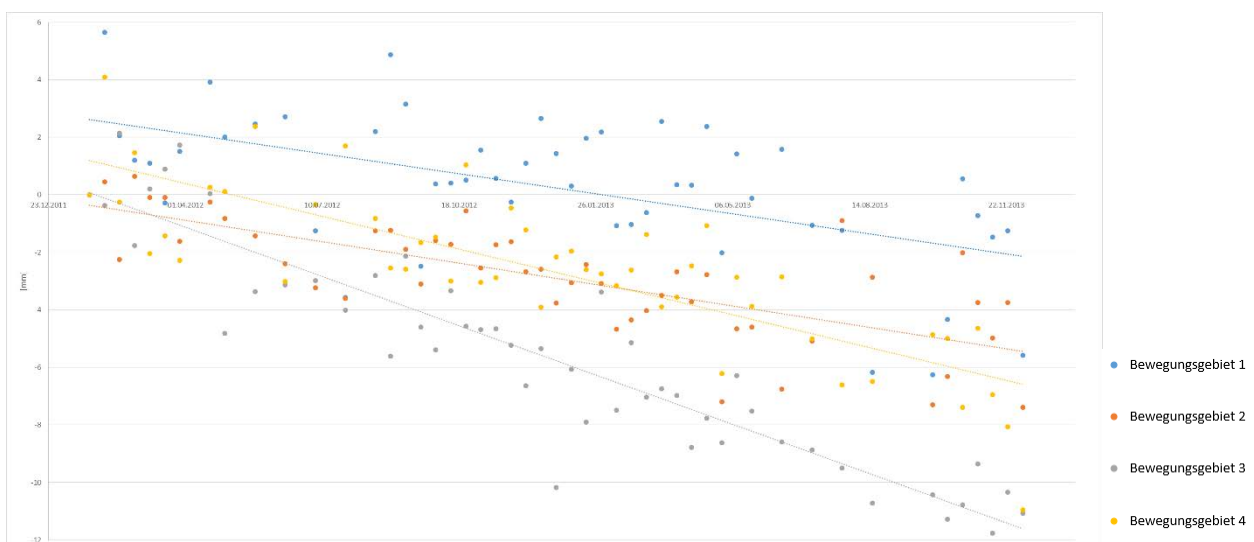


Abbildung 156: Mittelwerte der vier Bewegungsgebiete am Hang nördlich von Reißbach mit lineareren Trendlinien (PSI-Daten von Track 154).

Zur Hangüberwachung wurden vom Landesbetrieb Mobilität Rheinland-Pfalz geodätische Messpfeiler sowie Inklinometer installiert (Abbildung 157). In unmittelbarer Nähe zu den PSI-Daten befindet sich lediglich der Messpfeiler RB1 (Abbildung 158). Da die TerraSAR-X-Daten von Track 154 im Zeitraum vom 22.01.2012 bis 04.12.2013 aufgenommen wurden und die GPS-Messungen an Pfeiler RB1 für den Zeitraum 15.01.2013 bis 2.07.2014 vorliegen, bietet sich als vergleichbarer Zeitraum das Jahr 2013 an. Die gemessenen Horizontalverschiebungen an Pfeiler RB1 liegen zwischen 1 bis 8 mm im Bezug zur Nullmessung am 15. Januar 2013 (Abbildung 159). Die Höhenänderungen betragen zwischen -3 und +11 mm. Im Rahmen der Messgenauigkeit von ca. 10 mm kann aus diesen Messungen für 2013 keine eindeutige Hangbewegung abgeleitet werden. Die ca. 30 Meter entfernt liegenden PSI-Punkte von Bewegungsgebiet 1 zeigen für 2013 eine Geschwindigkeit von -0,8 mm/Jahr an, was ebenfalls im stabilen Bereich liegt. Die Ergebnisse der NDVI-Berechnung von RapidEye-Daten vom 8. April 2011 und 9. September 2012 ergaben keine auffälligen Hinweise für Veränderungen der Vitalität der Vegetation, die auf Hangbewegungen hinweisen können.

Tabelle 27: Statistik der vier Bewegungsgebiete im Hang Reißbach (PSI-Daten von Track 154, Descending, Blickrichtung Westen).

	Anzahl Punkte	PSI Minimum [mm/Jahr]	PSI Maximum [mm/Jahr]	PSI Mittelwert [mm/Jahr]
Gebiet 1	4	-2,5	-2,1	-2,3
Gebiet 2	9	-4,2	-1,5	-3,3
Gebiet 3	13	-6,0	-5,3	-5,6
Gebiet 4	6	-4,9	-3,8	-4,5



Abbildung 157: Lage der Messpfieiler und Inclinometer (abgeleitet aus „Überwachungsnetz Rißbach Stand 10/2013“) in der Rutschmasse (rote Linie) am Hang nördlich von Rißbach.



Abbildung 158: Foto des Messpfieilers RB 1 (Foto: C. Wolf, September 2014).

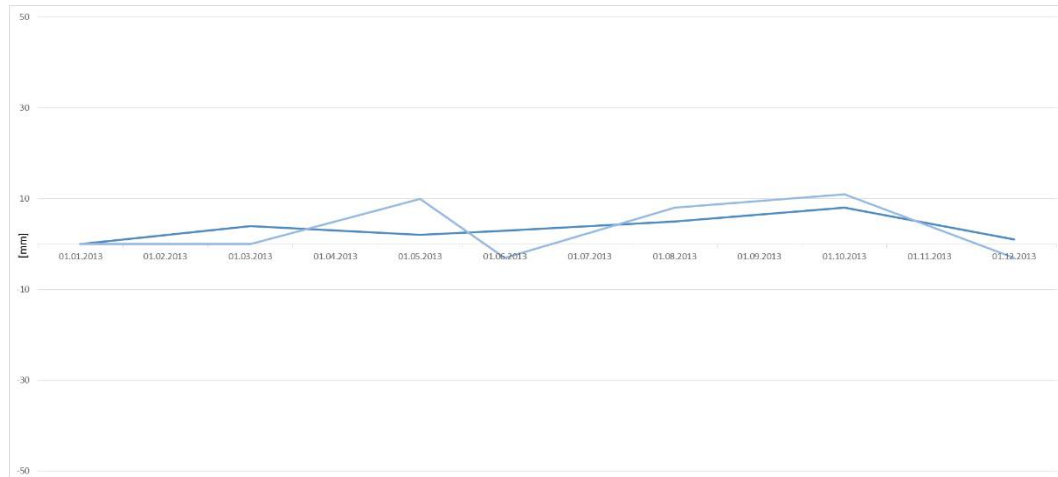


Abbildung 159: GPS-Messungen von Pfeiler RB1 für das Jahr 2013: Horizontalverschiebung (dunkelblau) und Höhenänderung (hellblau) in Millimetern (Bezug zur Nullmessung vom 15.1.2013) (Daten: Landesbetrieb Mobilität Rheinland-Pfalz).

### 3.3.3.5 Traben-Trarbach (Dollschied)

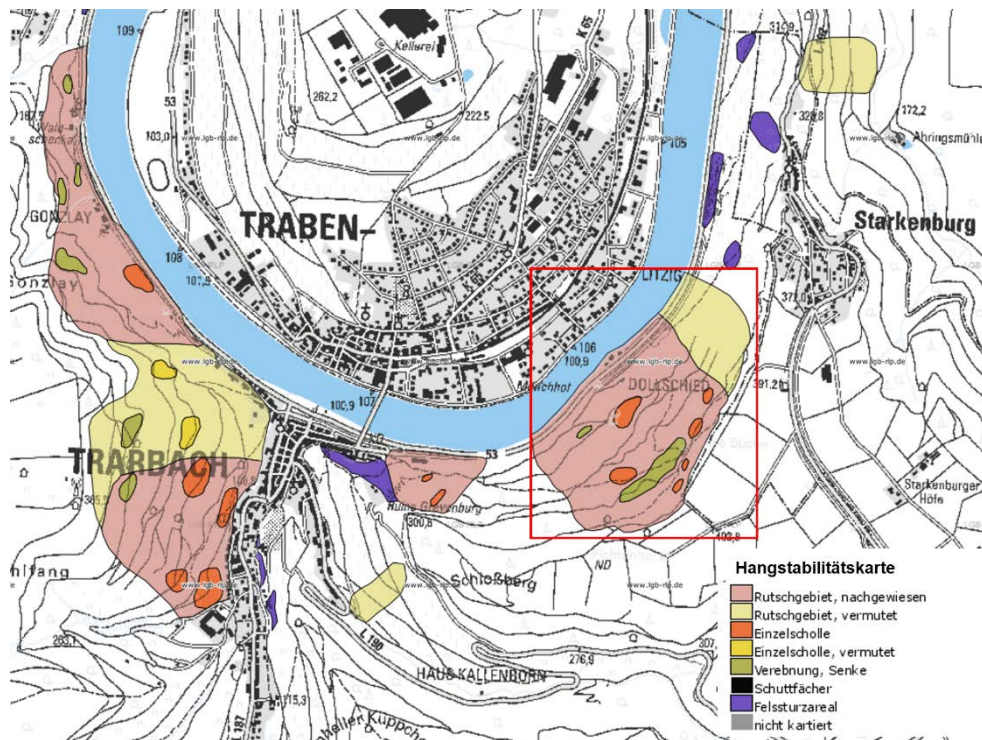


Abbildung 160: Ausschnitt der Hangstabilitätskarte 1:20.000 für den Bereich Dollschied (roter Rahmen) (Landesamt für Geologie und Bergbau/Kartenviewer).

Östlich der Ortschaft Trarbach befindet sich die Rutschung „Dollschied“ (Abbildung 160). Die Größe der Rutschmasse mit einer Breite von 750 m und einer Länge von 620 m beträgt 0,38 km<sup>2</sup>. Der Hang hat eine durchschnittliche Neigung von 24° und ist nach Nordwesten ausgerichtet. Der Hauptabbriss befindet sich in 365 m Höhe (ü. NN) und ist als 10 Meter hohe nahezu senkrecht stehende Felskante ausgebildet (Abbildung 161, Abbildung 162). Im südlichen Abschnitt befindet sich eine abgesetzte Teilscholle auf 380 m Höhe ü. NN und bildet eine kleine Geländestufe mit 5 Meter Versatzhöhe aus. Auf 310 m Höhe ü. NN befindet sich eine ca. 350 m breite Verebnungsfläche, die von Feuchtstellen durchsetzt ist. Die Rutschmasse befindet sich vermutlich in einer aktiven Kriechbewegung. So weist beispielsweise die Bundesstraße B53, die am Fuß des Hanges verläuft, Unebenheiten im Fahrbahnbelag auf. Zudem wird die Mosel im Bereich der Rutschmassen um ca. 40 Meter eingengt (Abbildung 162, Rogall & Möbus, 2005. Rogall, 2014). Die Bewegungsrate beträgt vermutlich zwischen 1 bis 4 cm/Jahr (Auskunft Landesamt für Geologie und Bergbau Rheinland-Pfalz).

Im Bereich der Rutschmasse kommen aufgrund des Waldbewuchses kaum PSI- und SBAS-Punkte vor. Lediglich an der Straße sowie an einigen Gebäuden am Hangfuß sind Messpunkte verfügbar (Abbildung 163 und Abbildung 164).

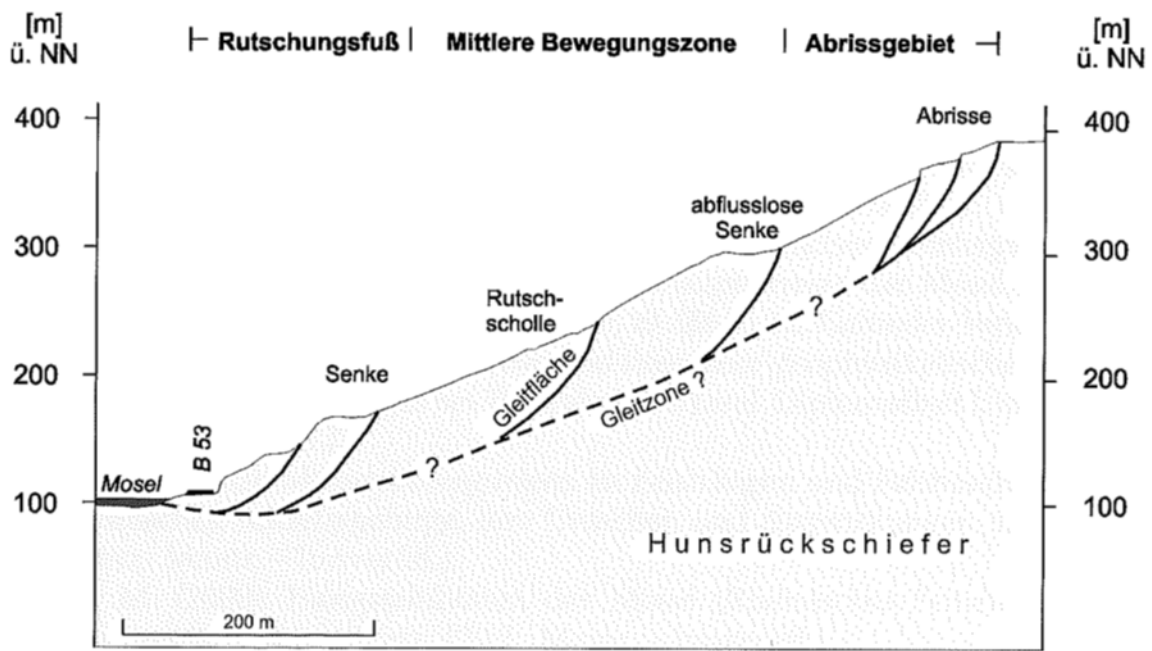


Abbildung 161: Geländeschnitt durch die Rutschung Dollschied (Rogall & Möbus, 2005).



Abbildung 162: Fast senkrecht stehende Abrisskante im Gelände (links) und Einengung und Auslenkung der Mosel bei Traben-Trarbach (rechts) (Foto: C. Wolf, September 2014).



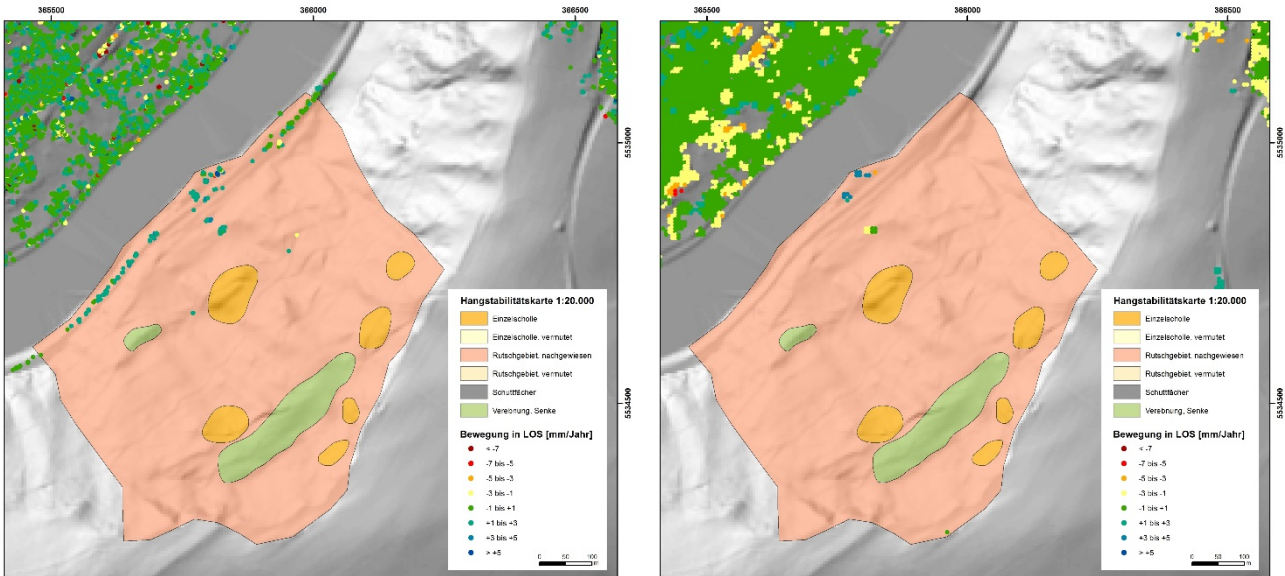


Abbildung 163: PSI- (links) und SBAS-Daten (rechts) von Ascending Orbit Track 116 (Blickrichtung Osten) für das Rutschgebiet Trarbach (Ausschnitt Hangstabilitätskarte) über dem Digitalen Geländemodell DGM5 (LVermGeo, WGS84 UTM32N).

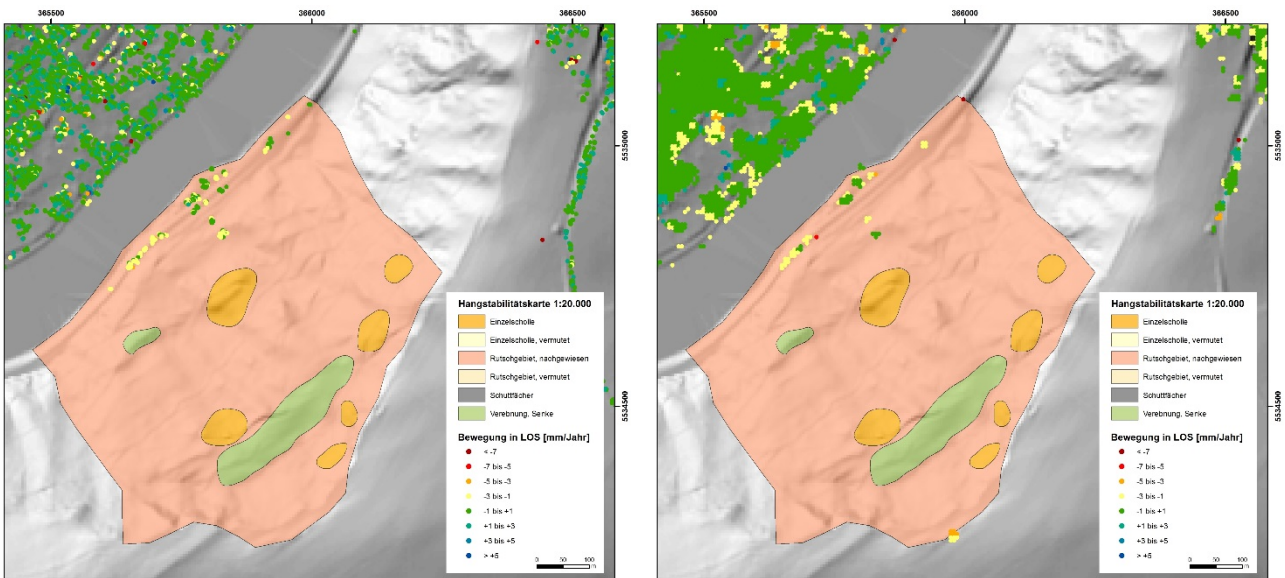


Abbildung 164: PSI- (links) und SBAS-Daten (rechts) von Descending Orbit Track 154 (Blickrichtung Westen) für das Rutschgebiet Trarbach (Ausschnitt Hangstabilitätskarte) über dem Digitalen Geländemodell DGM5 (LVermGeo).

Zur detaillierten Analyse wurde ein Bereich ausgewählt, an dem Messpunkte aus allen vier Datensätzen zur Verfügung stehen (Abbildung 165 und Abbildung 166). Hierbei handelt es sich um einige Gebäude und die Straße am Hangfuß. Zum besseren Vergleich wurden die Gebäude sowie die Straße nummeriert (siehe Abbildung 167).



Abbildung 165: PSI- (links) und SBAS-Punkte (rechts) von Track 116 für den ausgewählten Bereich am Hangfuß (Hintergrund: DOP40, BKG).



Abbildung 166: PSI- (links) und SBAS-Punkte (rechts) von Track 154 für den ausgewählten Bereich am Hangfuß (Hintergrund: DOP40, BKG).



Abbildung 167: Nummerierung der Gebäude und der Straße zum Vergleich der PSI- und SBAS-Messpunkte.

Die durchschnittlichen Bewegungen sowie Anzahl der Messpunkte für die 6 Standorte ist in Tabelle 28 aufgeführt. Die Bewegung zum Sensor im Ascending-Orbit und stabile Werte im Descending-Orbit weisen auf eine hangabwärts gerichtete Bewegung hin.

Im NDVI-Ergebnis vom September 2012 ist im Bereich der in der Hangstabilitätskarte kartierten Verebnungsfläche eine auffällig vitalere Vegetation (hoher NDVI) erkennbar (Abbildung 168 links). Vermutlich führt hier die erhöhte Bodenfeuchtigkeit in der abflusslosen Senke zu einem besseren Vegetationswachstum. Im NDVI-Ergebnis vom April 2011 sind hingegen keine auffälligen Bereiche erkennbar (Abbildung 168 rechts).

Tabelle 28: PSI- und SBAS-Messungen (durchschnittliche jährliche Bewegungsrate und Anzahl der Messpunkte) für 6 Standorte am Hangfuß bei Trarbach.

Standort	PSI 116	SBAS 116	PSI 154	SBAS 154
Standort 1 (Haus)	+2,2 mm/Jahr 37 PSI-Punkte	+3,4 mm/Jahr 5 SBAS-Punkte	-0,7 mm/Jahr 60 PSI-Punkte	-0,6 mm/Jahr 12 SBAS-Punkte
Standort 2 (Haus)	+1,4 mm/Jahr 15 PSI-Punkte	+3,9 mm/Jahr 4 SBAS-Punkte	-0,5 mm/Jahr 38 PSI-Punkte	-0,8 mm/Jahr 10 SBAS-Punkte
Standort 3 (Haus)	+1,8 mm/Jahr 20 PSI-Punkte	+0,8 mm/Jahr 3 SBAS-Punkte	-1,1 mm/Jahr 21 PSI-Punkte	-2,4 mm/Jahr 4 SBAS-Punkte
Standort 4 (Straße)	+2,4 mm/Jahr 7 PSI-Punkte	---	-0,6 mm/Jahr 26 PSI-Punkte	---
Standort 5 (Haus)	+2,8 mm/Jahr 6 PSI-Punkte	--	-0,7 mm/Jahr 15 PSI-Punkte	-1,2 mm/Jahr 3 SBAS-Punkte
Standort 6 (Haus)	+1,8 mm/Jahr 35 PSI-Punkte	-0,95 mm/Jahr 8 SBAS-Punkte	-1,2 mm/Jahr 31 PSI-Punkte	-0,3 mm/Jahr 4 SBAS-Punkte

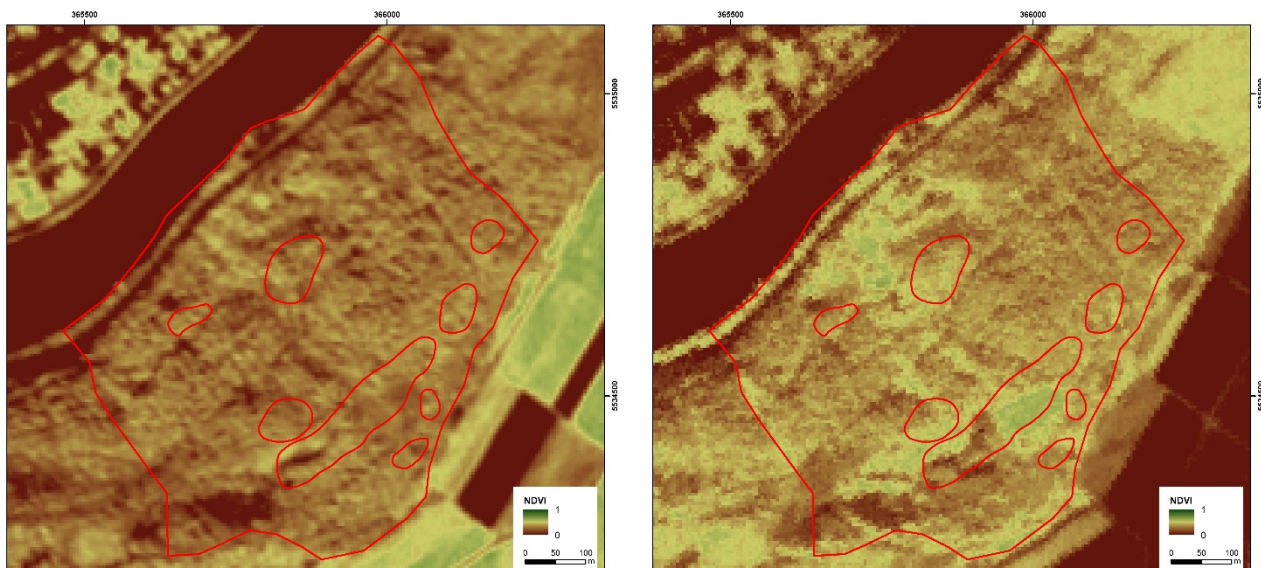


Abbildung 168: NDVI-Ergebnis von April 2011 (links) und September 2012 (rechts) für die Rutschung bei Trarbach mit Umrissen der Hangstabilitätskarte 1:20.000 (LGB) (WGS84 UTM32N) .

### 3.3.3.6 Pünderich

Das Rutschgebiet Pünderich befindet sich am östlichen Ufer der Mosel an einem Prallhang zwischen den Ortschaften Reil und Pünderich (Abbildung 169). Der Hang ist nach Ost-Südost exponiert und nimmt eine Breite von ca. 300 Metern und eine Höhe von ca. 160 Metern ein. Die Hangneigung liegt bei größer als  $45^\circ$  im oberen Abrissbereich,  $40^\circ$  bis  $45^\circ$  im mittleren Abschnitt und zwischen  $20^\circ$  und  $25^\circ$  im unteren Bereich des Hanges. Die Rutschmasse besteht überwiegend aus devonischen Sedimentgesteinen, die metamorph überprägt wurden. So ist das Gestein aus Wechselfolgen von Quarziten, quarzitären Sandsteinen, Siltsteinen, sandigen Schiefen und Tonschiefen aufgebaut, wobei die Tonschiefer und sandigen Tonschiefer dominieren (Krauter et al. 2012). Die Tonschiefer des Unterdevons sind durch tektonische Beanspruchung gefaltet und geschiefert (Werner, 1997). Die hohe tektonische Beanspruchung wird durch stark vernässte Böschungsbereiche und mehrere Wasseraustritte deutlich (Krauter, 1996). Abbildung 170 zeigt das kinematische Modell des Rutschkörpers mit einer Gleitfläche in ca. 30 Meter Tiefe (Krauter et al. 2012). Eine weitere Gleitfläche verläuft im Hangschutt (Wehinger, 2015).

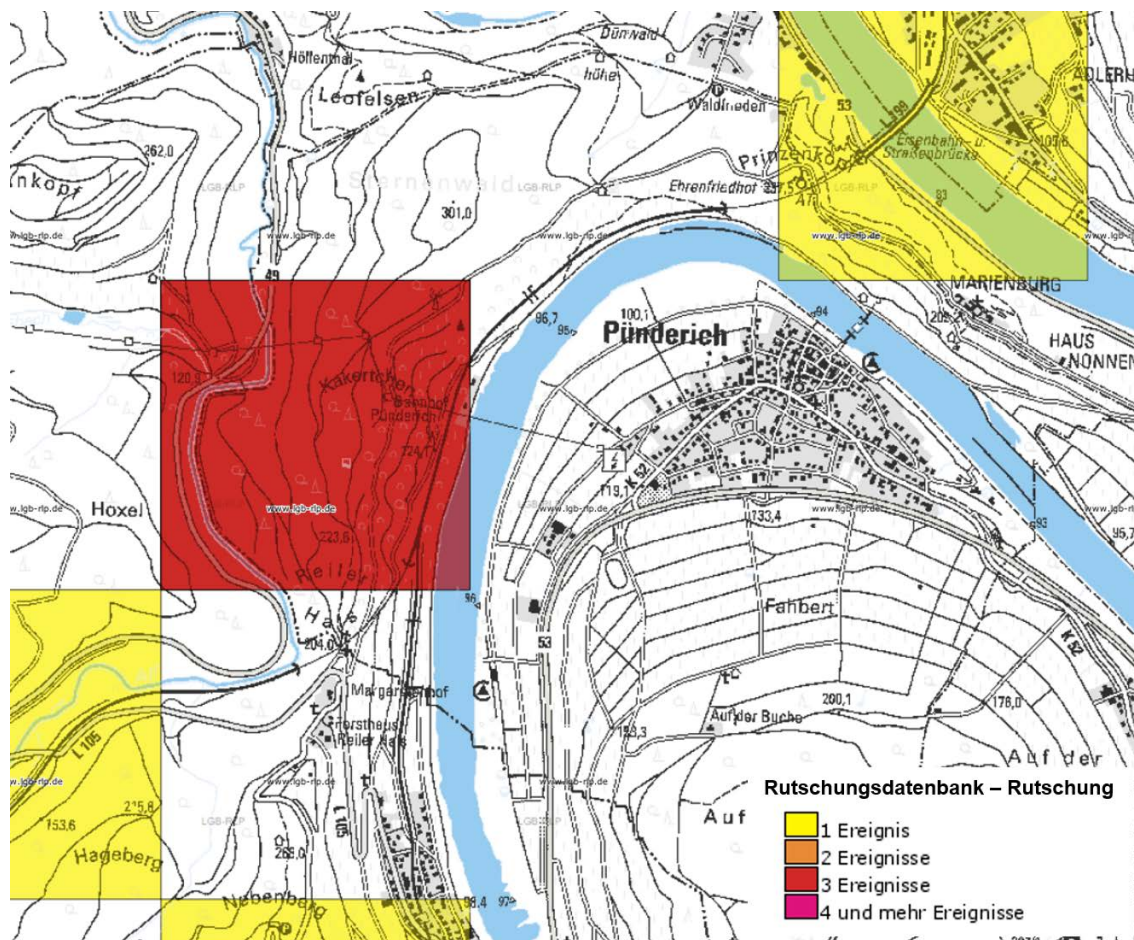


Abbildung 169: Ausschnitt aus der „Rutschungsdatenbank – Rutschung“ für den Bereich Pünderich (Landesamt für Geologie und Bergbau/Kartenviewer).

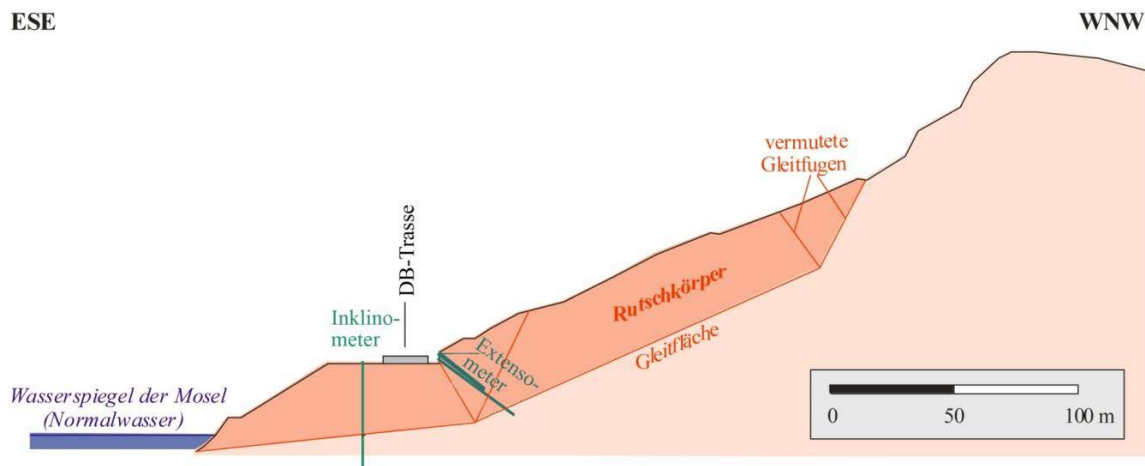


Abbildung 170: Kinematisches Modell der Rutschung Pünderich (E. Krauter, Forschungsstelle Rutschungen Universität Mainz, 1996).

In den letzten Jahrzehnten kamen immer wieder Rutschungen vor, die von den Winzern beobachtet wurden (Krauter, 1996). Eine Rutschung wurde beispielsweise im Frühjahr 1963 durch die Anlage eines Wirtschaftsweges im stark durchfeuchteten Gelände verursacht. Im Bereich der Hauptabbrisskante entstanden 1995 mehrere Risses Schäden an einem Wirtschaftsweg (Krauter et al. 2012). Ein weiterer Hinweis auf das rutschungsanfällige Gelände gibt die auffällige Morphologie, die im Digitalen Geländemodell gut sichtbar wird (Abbildung 171). So sind die Abrisskante und Akkumulationszonen oberhalb der Bahntrasse gut erkennbar. Die Mosel wird in diesem Bereich um etwa 15 Meter eingeengt (Wehinger, 2015).

Zur Sicherung des Hanges und des Bahnbetriebs werden kontinuierlich Bewegungsmessungen durchgeführt. Die geodätischen Vermessungen zeigen einen deutlichen Zusammenhang mit den Niederschlagsmengen der Wetterstation Bernkastel-Kues (Krauter, 1996). So zeigt sich eine deutliche Beschleunigung der Bewegungen bei hohen Niederschlagsmengen im Winter und im Frühjahr. Im November 2000 wurden zur kontinuierlichen Überwachung Extensometer installiert, die für den Zeitraum 2001 bis 2003 jährliche Bewegungsraten von bis zu 5,8 mm/Jahr anzeigten. Die Maxima lagen dabei zwischen 9,1 und 18,8 mm/Jahr. Ein Vergleich mit den Moselwasserständen ergab eine starke Beschleunigung der Hangbewegung unmittelbar nach Hochwasserperioden zum Ende des Winters bzw. zu Frühlingsbeginn (Abbildung 172). Zudem konnte ein Zusammenhang zwischen der Bewegungsbeschleunigung im Frühjahr 2001 und einem hohen Grundwasserstand ermittelt werden. In 2004 und 2005 wurden geringere Bewegungsraten festgestellt (0,9 mm/Jahr im äußeren Bereich, 0,2 bis 1,5 mm/Jahr im zentralen Bereich), während in den Jahren 2007 bis 2010 wieder höhere Bewegungsraten gemessen wurden (0,8 mm/Jahr, Maxima 2,0 bis 3,3 mm/Jahr). Diese Böschungsbewegungen konnten wieder den Moselwasser-Hochständen im Spätwinter und Frühling zugeordnet werden (Lauterbach & Feuerbach, 2010).

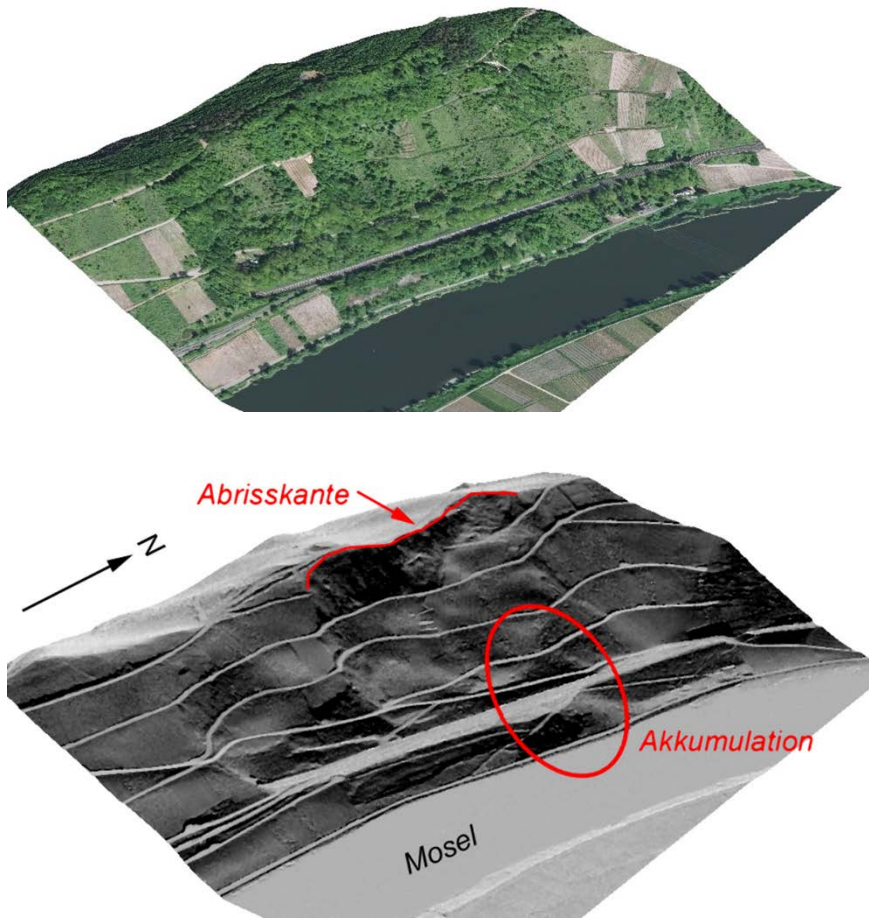


Abbildung 171: Digitales Geländemodell mit Luftbildern (oben) und Markierung der Abrisskante und des Akkumulationsbereiches (unten) (Wehinger, 2015).

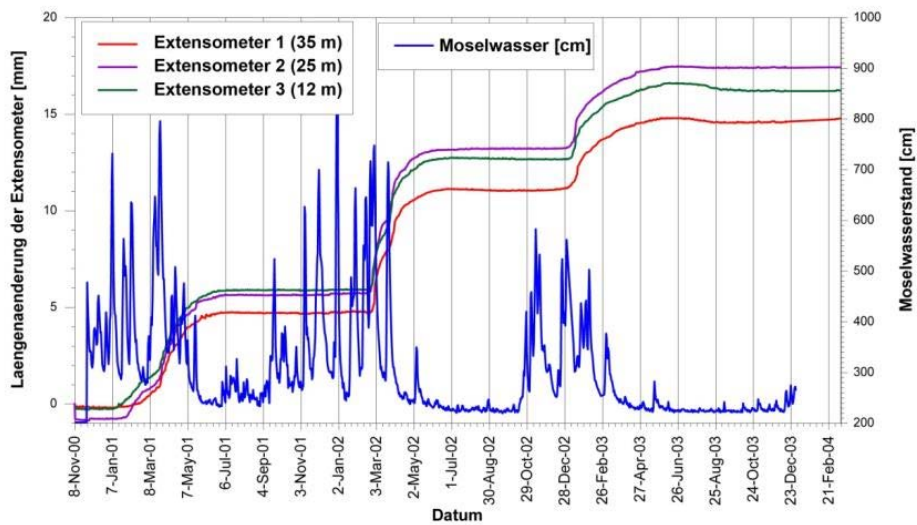


Abbildung 172: Korrelation der Längenänderung der Extensometer mit dem Moselwasserstand (E. Krauter, Forschungsstelle Rutschungen Universität Mainz, 2014).

PSI- und SBAS-Daten der TerraSAR-X-Daten von 2011 bis 2013 treten vorwiegend entlang der Bahntrasse auf. Im Hang kommen die Daten an einem Strommast, entlang eines Wirtschaftsweges im Weinberg und an einigen Gebäuden neben der Mosel nördlich des ausgewiesenen Rutschgebietes vor (Abbildung 173 und Abbildung 174). Zur Auswertung geeignet sind lediglich die Bewegungsmessungen entlang eines Wirtschaftsweges, die in den beiden PSI-Datensätzen vorkommen. Zur näheren Untersuchung wurden die Daten im nördlichen Bereich des Rutschgebietes ausgewählt.

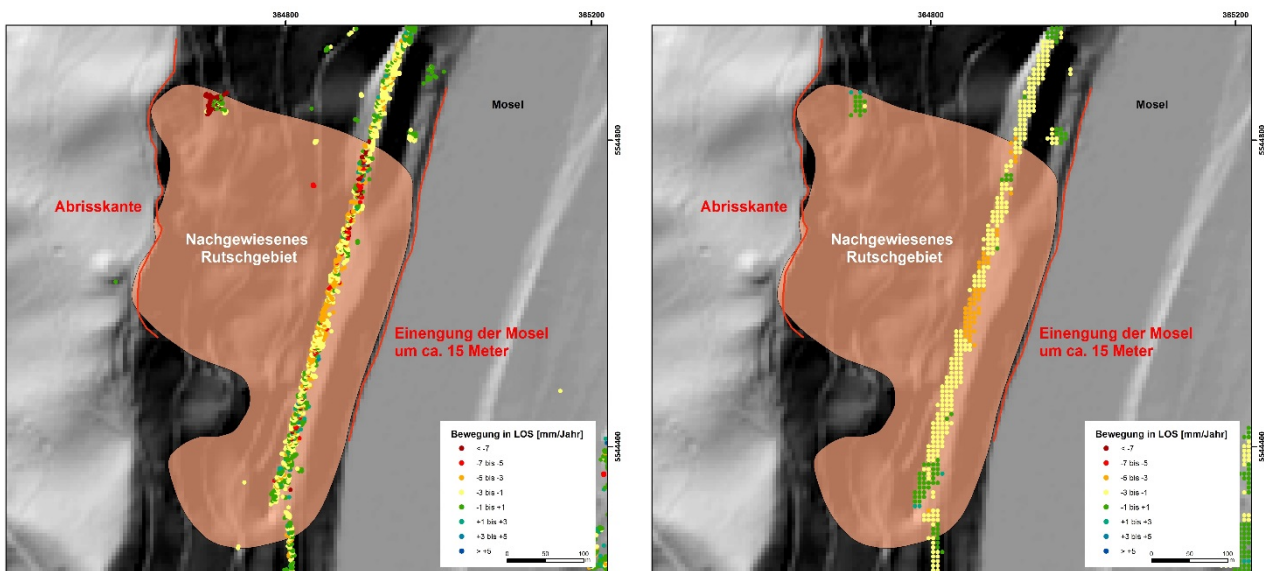


Abbildung 173: PSI- (links) und SBAS-Daten (rechts) vom Ascending Orbit Track 116 (Blickrichtung Osten) für den Rutschhang Pünderich (DGM5 LVerMGeo).

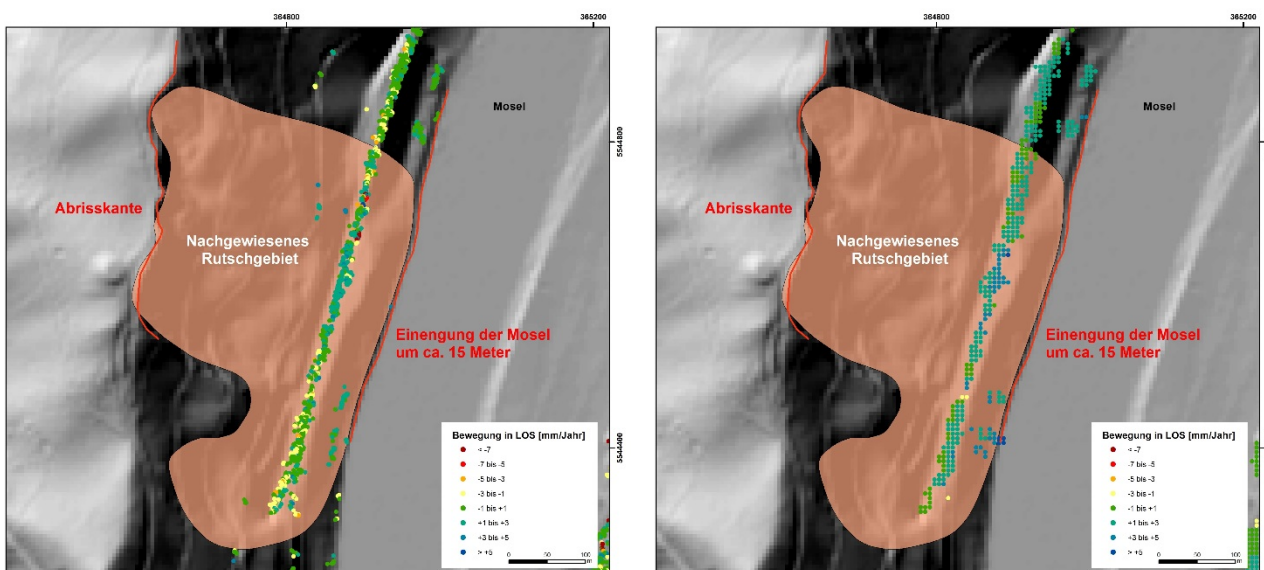


Abbildung 174: PSI- (links) und SBAS-Daten (rechts) vom Descending Orbit Track 154 (Blickrichtung Westen) für den Rutschhang Pünderich (DGM5 LVerMGeo).

Abbildung 175 und Abbildung 176 verdeutlichen die Aufnahmegerichtung des Sensors und die Bewegungsrichtung der Messungen. Im Ascending Orbit von Track 116 können mit den PSI-Daten zwei Bewegungsbereiche erfasst werden. Im nördlichen Teil liegen 4 PSI-Messungen vor, die eine durchschnittliche jährliche Bewegung von ca. -2,3 mm/Jahr in östliche Richtung (hangabwärts) anzeigen. Südlich davon liegen vier weitere PSI-Punkte, die mit -6,7 mm/Jahr eine stärkere hangabwärts gerichtete Bewegung anzeigen.

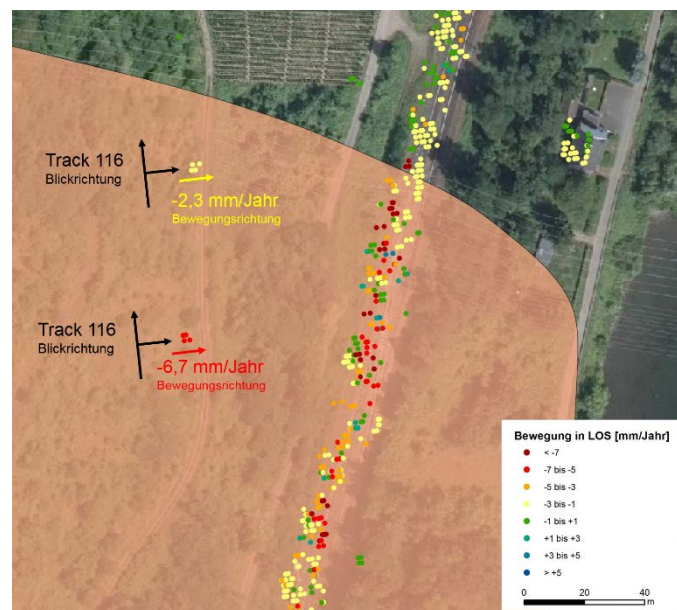


Abbildung 175: PSI-Daten von Tack 116 im nördlichen Bereich des Rutschgebietes Pünderich (rote Fläche) mit Blickrichtung des Sensors nach Osten (Hintergrund: DOP40 BKG).

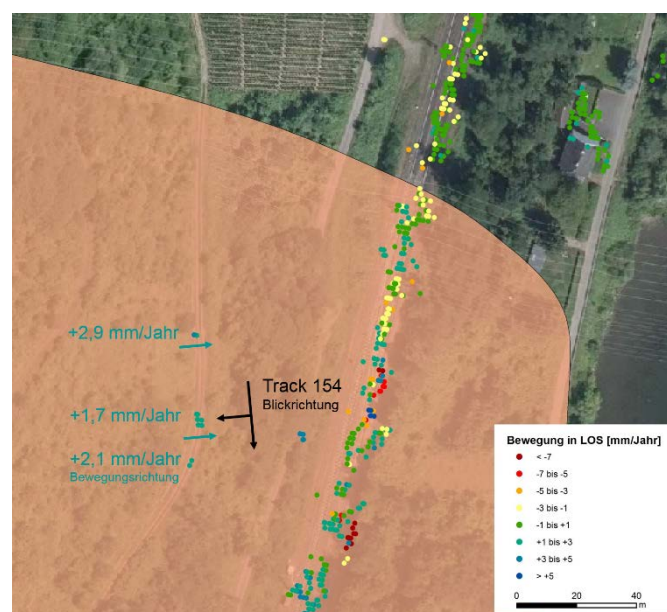


Abbildung 176: PSI-Daten von Tack 154 im nördlichen Bereich des Rutschgebietes Pünderich (rote Fläche) mit Blickrichtung des Sensors nach Westen (Hintergrund: DOP40 BKG).



Im PSI-Datensatz von Descending Orbit Track 154 liegen auf dem Wirtschaftsweg in drei Bereichen Messungen vor. In nördlichen Bereich liegen 2 PSI-Punkte, die eine durchschnittliche jährliche Bewegungsrate von +2,9 mm/Jahr anzeigen. Die Bewegung erfolgt hin zum Sensor, d.h. ebenfalls in Hangrichtung nach Osten. Die 6 PSI-Punkte südlich davon zeigen eine Bewegung von ca. +1,7 mm/Jahr an. 12 Meter entfernt liegen zwei weitere PSI-Punkte, die eine Bewegungsrate von +2,1 mm/Jahr anzeigen. Abbildung 177 zeigt die Zeitserien zu den beschriebenen PSI-Punkten aus Track 116. Bei der in Abbildung 178 gezeigten Zeitserien für die PSI-Punkte aus Track 154 sind die großen Sprünge in den Daten auffällig.



Abbildung 177: Zeitserie für PSI-Daten von Track 116 für zwei Bewegungsbereiche (Mittelwert aus jeweils 4 Punkten mit linearer Trendlinie).

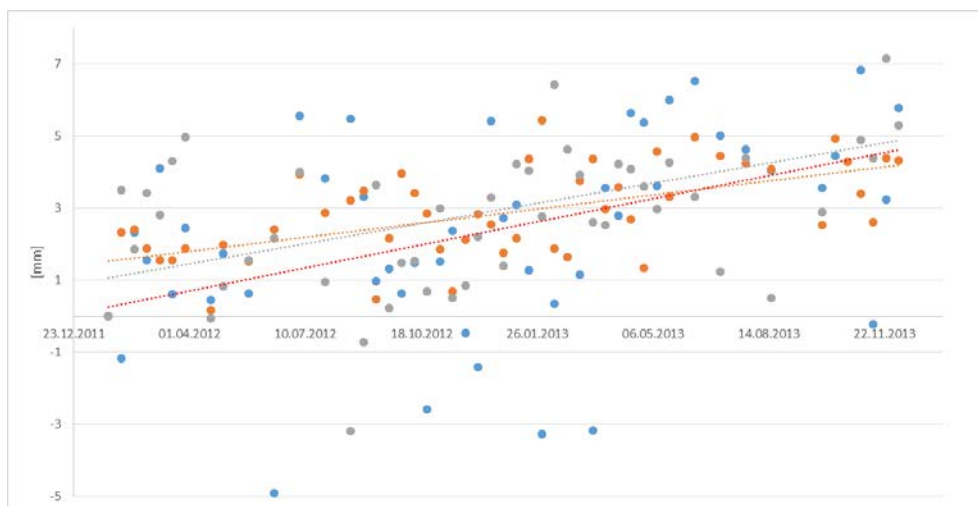


Abbildung 178: Zeitserie für PSI-Daten von Track 154 für drei Bewegungsbereiche (Mittelwert aus zwei mal zwei und 6 PSI-Punkten mit linearer Trendlinie).

### 3.3.3.7 Cochem

Für den Bereich Cochem sind in der Rutschungsdatenbank vom Landesamt für Geologie und Bergbau Rheinland-Pfalz mehrere Gebiete mit Steinschlag ausgewiesen (Abbildung 179). An einem Hangbereich südlich der Ortschaft Cochem ereigneten sich bereits seit Januar 1930 mehrere Teilstürze. Der Hang besteht aus festen Grauwackebänken des Devons mit einer Streichrichtung nach Nordosten und einem Einfallen nach Nordwesten, die von zahlreichen Klüften durchzogen sind. Auf einer Länge von 180 Metern zeigte sich die allmähliche Bewegung des Hanges anhand von herausgedrückten Gesteinsblöcken und zerbrochenen Weinbergsmauern. Im April 1932 beschleunigte sich die Bewegung durch Frühjahrsniederschläge, die die Nässe in die Klüfte tief eindringen ließ. Parallel zur Mosel verlaufende Spalten zeigen eine Tiefe von bis zu 6 Metern und eine Weite von bis zu 1 Meter. Am 19. April 1932 ereignete sich ein größerer Teilsturz, bei dem ca. 20.000 m<sup>3</sup> Gestein abstürzten und den am Hangfuß befindlichen Steinbruch auffüllten (Abbildung 180 und Abbildung 181, Michels 1932). Der Hangbereich, der bisher nicht saniert wurde, wird derzeit mit Reflektoren überwacht. Die Messungen zeigen eine Bewegung von ca. 1 cm/Jahr (Auskunft LGB). Wie das Geländefoto von April 2015 zeigt, ist der Hang hauptsächlich mit Büschen und Bäumen bewachsen (Abbildung 182). Am unbewachsenen Hangfuß stehen die Gesteinstrümmer direkt an, so dass sie ideale Reflektoren für das Radarsignal darstellen.

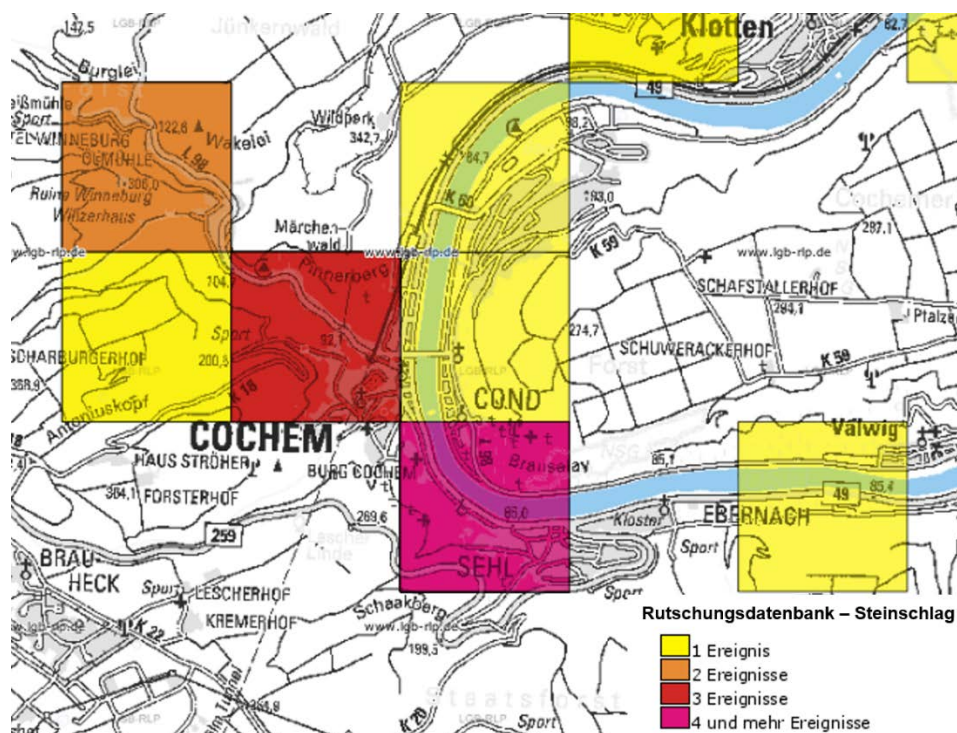


Abbildung 179: Ausschnitt aus der „Rutschungsdatenbank – Steinschlag“ für den Bereich Cochem (Landesamt für Geologie und Bergbau/Kartenviewer).

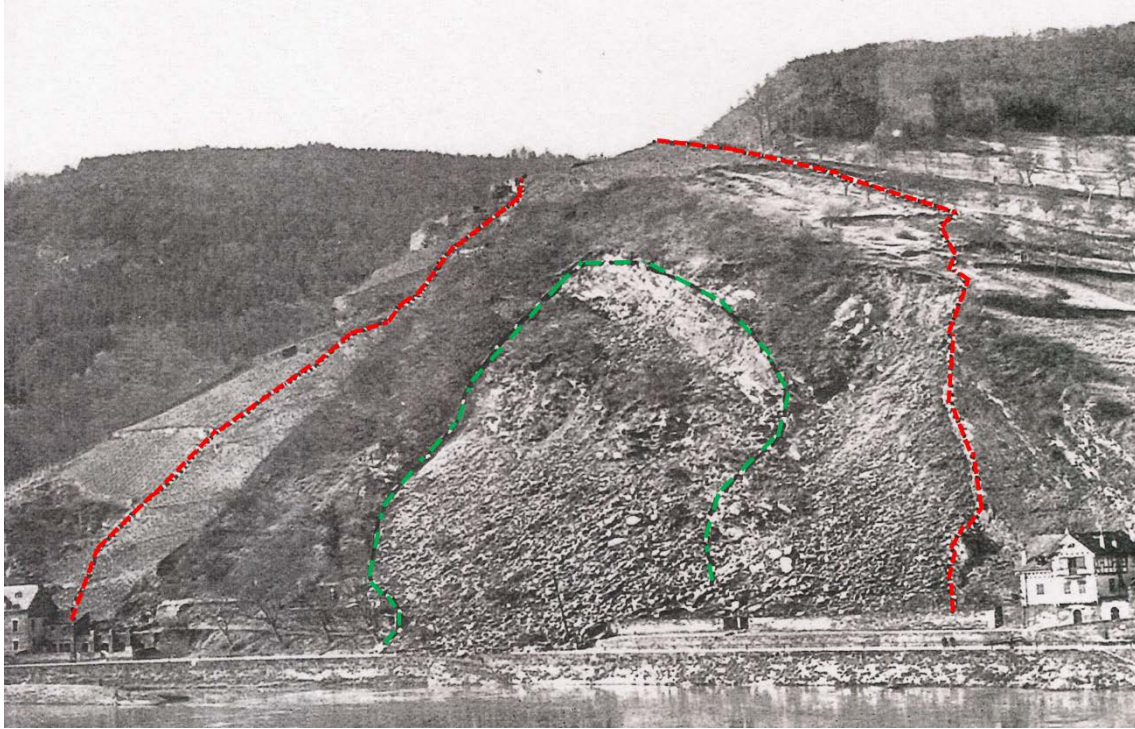


Abbildung 180: Foto des Rutschgebietes von 1932 mit Grenze des gesamten Abrissgebietes (rot) und Abrissgebiet vom 19. und 20. April 1932 (grün) (verändert nach Michels 1932).

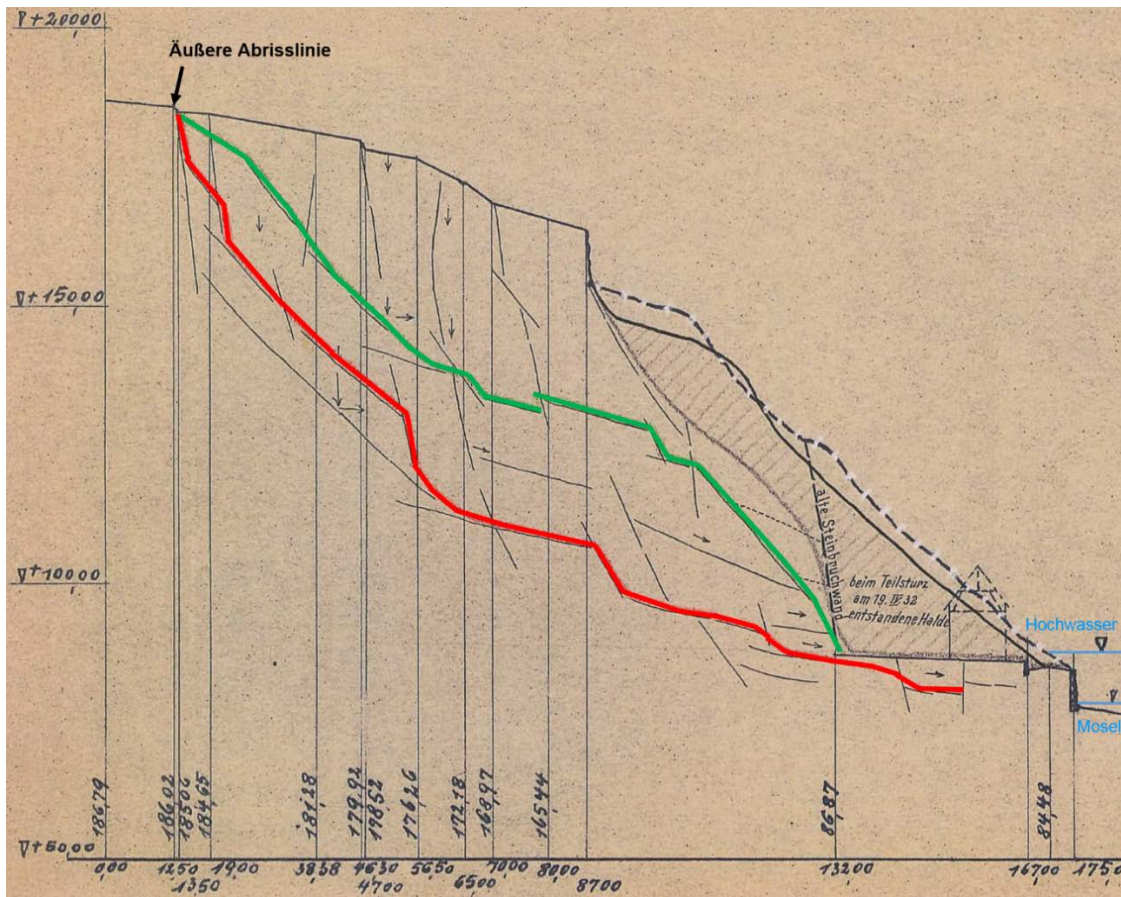


Abbildung 181: Profil des Bergrutsch Cochem vom 25. April 1932 (verändert nach Michels 1932).



Abbildung 182: Geländefoto des Rutschhanges (C. Wolf, April 2015).

Die am Hangfuß vorkommenden Bewegungsmessungen der PSI- und SBAS-Datensätze von TerraSAR-X sind in Abbildung 183 und Abbildung 184 dargestellt. Tabelle 29 gibt die Messwerte der jeweils am stärksten vorkommenden Bewegungsklasse an. Lediglich der SBAS-Datensatz des Descending Orbits zeigt keine Bewegungen an. Die Messwerte liegen hier zwischen -0,9 und +0,7 mm/Jahr.

Tabelle 29: Statistik der Bewegungsdaten am Hangfuß für die jeweils am stärksten vorkommende Bewegungsklasse.

	Anzahl Punkte	Bewegung Minimum [mm/Jahr]	Bewegung Maximum [mm/Jahr]	Bewegung Mittelwert [mm/Jahr]
PSI 116 Ascending, Blickrichtung Osten	39 (Bewegungsklasse <-7 mm/Jahr)	-23	-7	-13
SBAS 116 Ascending, Blickrichtung Osten	12 (Bewegungsklasse <-7 mm/Jahr)	-16	-8	-12
PSI 154 Descending, Blickrichtung Westen	24 (Bewegungsklasse -1 bis -3 und Klasse -5 bis -7)	-6	-1	-3

Da der Messungen des Ascending-Datensatzes in Line-of-Sight etwa der Hangrichtung entsprechen, werden die Bewegungen fast vollständig vom Bewegungsvektor der Messung erfasst. Die Messungen des Descending-Datensatzes erfolgen hingegen gegen den Hang, so dass die Bewegungen in Hangrichtung nicht richtig erfasst werden können. Daher zeigen die beiden PSI- und SBAS-Datensätze des Descending Orbits nur geringere oder keine Bewegungen an. Zur Zeitserienanalyse wurden daher auch nur die Messungen des PSI-Datensatzes des Ascending Orbits (Blickrichtung Osten) verwendet. Im Vergleich zum SBAS-Datensatz weisen sie höhere Kohärenzwerte und daher eine höhere Verlässlichkeit auf. Zur Zeitreihenanalyse wurden die zuvor beschriebenen 39 PSI-Punkte am Hangfuß der Rutschung verwendet (Abbildung 185).

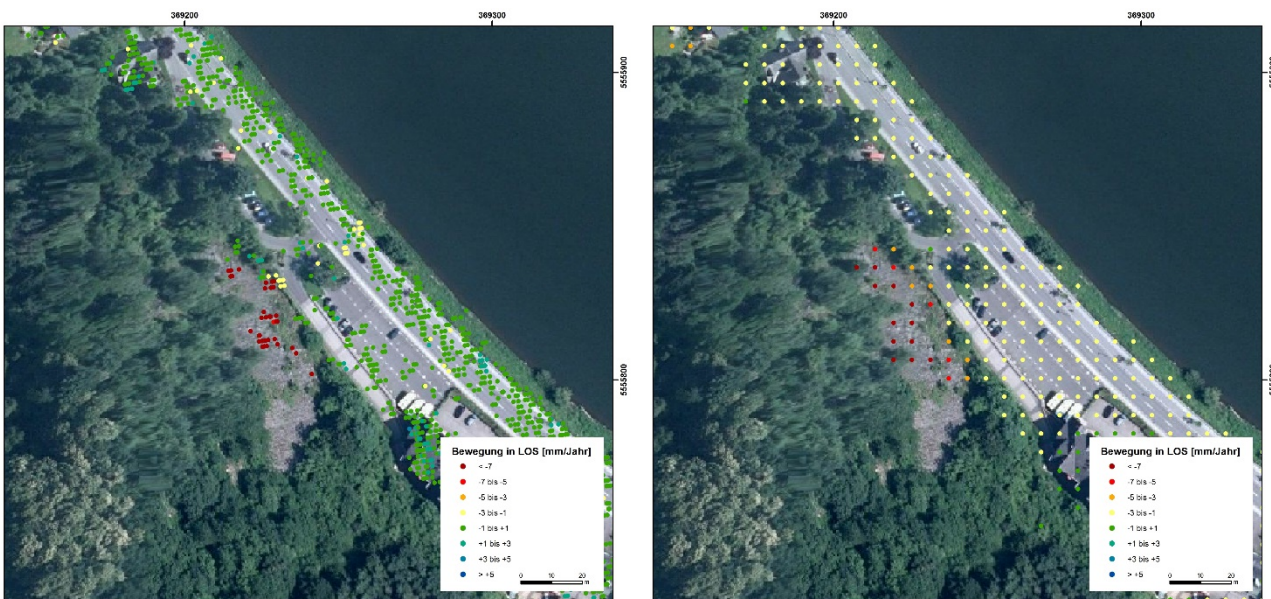


Abbildung 183: PSI- (links) und SBAS-Daten (rechts) des Ascending Orbit Track 116 am Rutschhang südlich von Cochem.

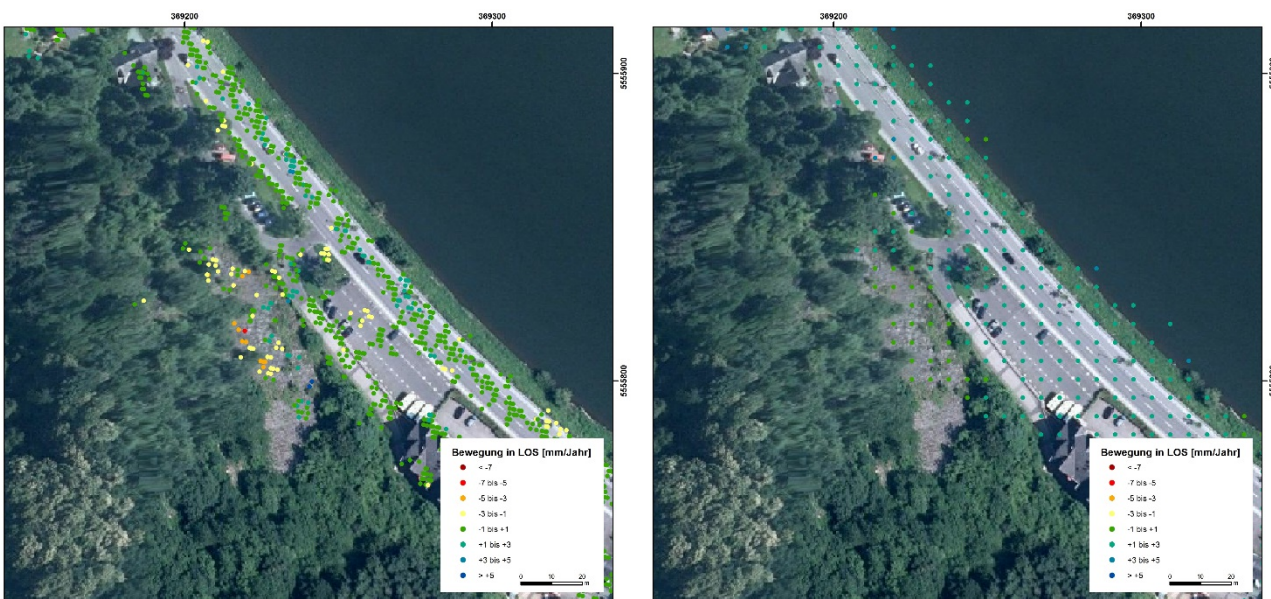


Abbildung 184: PSI- (links) und SBAS-Daten (rechts) des Descending Orbit Track 154 am Rutschhang südlich von Cochem.



Abbildung 185: Zeitserie der 39 PSI-Punkte vom Ascending Datensatz Orbit Track 116 (Blickrichtung Osten) vom Hangfuß der Rutschung Cochem (Mittelwert und lineare Trendlinie).

#### 4 Diskussion der Ergebnisse

Anhand der radarinterferometrischen Bewegungsmessungen für das Projektgebiet Rhein-Mosel konnten zahlreiche Bewegungsgebiete erfasst werden. So konnte eine Übersicht der Geländebewegungen im Rhein-Mosel-Gebiet geschaffen werden. Die flächendeckende Information über Geländebewegungen ist zudem sehr wichtig, um bereits bekannte Gefährdungen, wie zum Beispiel Hangrutschbereiche zu überwachen und um z.B. auf Beschleunigungen von Rutschungen reagieren und die notwendigen Maßnahmen einleiten zu können. So konnten beispielsweise für den bereits ausgewiesenen Hangrutschbereich bei Trittenheim (Abbildung 16) viele Messdaten, vermutlich aufgrund der Reflexion an Metallgeländern, ausgewertet werden. Das weitere Ziel wäre nun die differenzierte Analyse des Hanges, um die Bewegungen von Teilbereichen der Rutschung besser erfassen zu können, wofür eine flächenhaftere Abdeckung der Rutschung wünschenswert wäre. Mit Hilfe der Übersichtskartierung von Geländebewegungen konnten zudem unbekannte Bewegungen, wie zum Beispiel bei Kaub (Abbildung 14) identifiziert werden. Die Analyse von Bodenbewegungen dient der Bewertung von Geogefährdungen in Rheinland-Pfalz sowie der Früherkennung von Bewegungen, damit Schadenereignisse verhindert oder vermindert werden können. Da bei der Auswertung jedoch mehr als 15 Jahre alte Satellitendaten verwendet wurden, können für die Bewegungsgebiete keine unmittelbar notwendigen Maßnahmen abgeleitet werden. Sollten aktuelle Satellitendaten oder weitere Messungen jedoch zeigen, dass diese Bewegungen bis heute anhalten, so würde eine Geländeprüfung vor Ort notwendig sein. Durch den Einsatz von Sentinel-1-Daten können zukünftig auch aktuelle Daten ausgewertet werden, da Sentinel-1 Daten flächendeckend mit einer Wiederholungsrate von 6/12 Tagen verfügbar sind. Somit könnten Bewegungen dauerhaft überwacht und bei entsprechender Gefährdungssituation die nötigen Sicherungsmaßnahmen eingeleitet werden. Zur Unterstützung der Gefährdungsanalyse können auch multispektrale Daten des Sentinel-2 dienen. Das Multispektral-Instrument MSI liefert optische Bilder im sichtbaren und Kurzwellen-Infrarot-Bereich in 13 Spektralkanälen mit einer Auflösung von bis zu zehn Metern (DLR, 2015). Aus diesen Daten können weitere Informationen zur Gefährdungsanalyse abgeleitet werden, wie zum Beispiel Veränderungen in der Vegetation, aber auch Abrisskanten oder abflusslose Senken.

Für Bewegungsanalysen in großen Maßstäben wurden in dieser Studie TerraSAR-X und RapidEye-Daten verwendet. Wie gezeigt werden konnte, erhöht sich die Datendichte drastisch im Vergleich zu ERS-1/2 und Envisat-ASAR-Daten (Kapitel 3.3.1 und 3.3.2). Die erhöhte Datendichte erlaubte eine detaillierte Bewegungsanalyse in **Mendig** (Kapitel 3.3.1). Für die Petershütte, für die kritische Zustände Untertage bekannt sind, ergaben die PSI- und SBAS-Daten Absenkungen von ca. -0,5 bzw. -2 mm/Jahr im Zeitraum Januar 2012 bis Dezember 2013. Dieser Bereich sollte



Abbildung 186: Gelockerte und absturzgefährdete Glocken im Mayener Grubenfeld am Rand des untersuchten Tagebruches (Foto: C. Wolf, April 2015).

weiter überwacht werden. Die Absenkungen in den anderen Bewegungsgebieten sollten auch näher untersucht werden, sowie die Ursache der Bewegungen geklärt werden, um evtl. weitere Maßnahmen zur Sicherung von Hohlräumebereichen einleiten zu können. Für das bebaute Gebiet in Mendig konnten keine signifikanten Absenkungen festgestellt werden. Verdachtsmomente müssen im Einzelfall geprüft werden.

In **Mayen** wurden 12 Bewegungsgebiete untersucht, für die Absenkungen festgestellt werden konnten (Kapitel 3.3.2). Die Punktedichte ist allerdings zu gering, um belastbare Aussagen zur Gefährdung treffen zu können. Zudem konnten die Bereiche entlang der Tagebaugrube vor Ort im Gelände nicht näher untersucht werden, da der Bereich aufgrund von Einsturzgefährdungen nicht begangen werden kann (Abbildung 186). Im angrenzenden bebauten Gebiet konnten ebenfalls Geländebewegungen detektiert werden (Abbildung 110 und Abbildung 111). Die Ursachen der Bewegungen liegen vermutlich an Gebäude- und Baugrundsetzungen (z.B. Bewegungsgebiet 3), Lastenänderungen, Bodenverdichtungen oder thermischen Ausdehnungen. Da es sich bei einigen Reflektoren höchstwahrscheinlich um Fahnen- und Lichtmasten, Straßenschilder, Metallzäune oder ähnliches handelt, die nicht tief gegründet sind, werden hierbei lediglich Bewegungen des oberen Bodens wiedergespiegelt. Aussagen über bisher unbekannte unterirdische Abbauhohlräume konnten daher basierend auf diesen Bewegungsinformationen nicht getroffen werden. Hierzu müssten nähere Untersuchungen durchgeführt werden. Im Rahmen der Messgenauigkeit können jedoch weite Teile des Gewerbegebietes als stabil betrachtet werden. Auch für den Bereich der



auftretenden Straßenschäden konnten anhand der PSI- und SBAS-Daten keine Bewegungen festgestellt werden.

Im Gebiet der **Mittelmosel** wurde der Hangbereich bei **Graach** ausgewertet (Kapitel 3.3.3.1). Die PSI- und SBAS-Auswertung von TerraSAR-X-Daten ergab hauptsächlich Messdaten in den Ortschaften Graach und Graacher Schäferei. Zur Analyse des Hangbereiches standen nur einige Daten in der Mitte des Hanges und am Hangfuß zur Verfügung. Anhand der verfügbaren Ascending und Descending Datensätze konnte die hangabwärts gerichtete Bewegung des Hanges näher bestimmt werden. Vermutlich handelt es sich um hauptsächlich horizontale Bewegungen. Der Vergleich der Bewegungsmessungen mit Messwerten von GPS und Inklinometer stützt diese Aussage. Aufgrund unterschiedlicher Messrichtungen und -zeiträume besitzt dieser Vergleich jedoch nur Indiziencharakter. Die Analyse der Zeitreihen lässt saisonale Schwankungen der Bewegungen vermuten. Genauere Auswertungen sollten mögliche Korrelationen zu Niederschlägen, Wasserstand der Mosel und Temperaturen sowie weiteren Einflussfaktoren prüfen. Aufgrund der Hangbewegungen ist im mittleren Hangbereich kein Weinbau möglich. Der Hang ist in diesem Bereich mit Büschen bewachsen. Ansonsten ergeben sich keine weiteren Auffälligkeiten anhand des Vegetationsindex NDVI von RapidEye-Daten. Zur Bestimmung der Aktivität des Hanges sind daher vor allem die PSI- und SBAS-Prozessierungen von TerraSAR-X hilfreich. Allerdings besteht auch hier der Bedarf an einer flächenhafteren Abdeckung des Hanges mit Bewegungsmessungen. Potentielle Reflektoren wie große Felsen, Straßen und Metallgeländer sind vorhanden, die aber in den bisherigen Prozessierungen keine Datenpunkte lieferten. Hier besteht weiterer Forschungs- und Entwicklungsbedarf. Möglicherweise fallen einige Punkte aufgrund der langen Zeitreihen aus der Prozessierung heraus. Zum Beispiel können durch umgekippte Mauern und Sanierungsmaßnahmen Messpunkte verloren gehen. Hier könnten Auswertungen für kürzere Zeiträume (mindestens 20 Aufnahmen, dies entspricht ca. 7 Monaten bei Daten von TerraSAR-X) evtl. mehr Messpunkte liefern. Des Weiteren wäre eine SBAS-Auswertung von schneefreien Radarszenen aus der Winterperiode sinnvoll, um die Datendichte weiter zu erhöhen.

Für den Hangbereich bei **Ürzig** (Kapitel 3.3.3.2) zeigten sich auffällige Bereiche mit geringer Vegetationsbedeckung. Das NDVI-Bild von September 2012 zeigte für diese Bereiche auffällig niedrige Werte. Hier müssten die Bereiche in einer multitemporalen Analyse der Vegetationsbedeckung über mehrere Jahre betrachtet werden, um dauerhaft auffällige Hangebereiche zu identifizieren. Zudem müssten diese auffälligen Bereiche vor Ort überprüft werden.

Im Rutschhang von **Kröv** (Kapitel 3.3.3.3) lieferte lediglich ein PSI-Datensatz Messwerte. Die Bewegungsmessungen weisen große Streuungen auf, so dass die Belastbarkeit der Bewegungsraten mit einer geringen Verlässlichkeit zu bewerten sind.

Im Rutschgebiet **Rißbach** (Kapitel 3.3.3.4) kommen keine PSI- und SBAS-Daten vor. Daher kann keine Bewegungs- und Gefährdungsanalyse durchgeführt werden. Messwerte am Rand der Rutschung, die vor allem durch die Reflexion an Metallgeländern verursacht werden, zeigen in den Zeitreihen große Streuungen an.

Der Rutschhang von **Traben-Trarbach** (Kapitel 3.3.3.5) liegt im Wald, weshalb zur Bewegungsanalyse kaum Messwerte zur Verfügung stehen. Allerdings sind die vernässten Verebnungsbereiche im NDVI-Ergebnis von RapidEye-Daten gut erkennbar (hohe Werte).

In **Pünderich** (Kapitel 3.3.3.6) sind ebenfalls kaum Bewegungsmessungen vorhanden. Lediglich einige Messwerte an einem Weinbergsweg liefern Bewegungsinformationen. Die Zeitreihen weisen große Sprünge auf. Eine flächige Bewegungsanalyse oder eine Abgrenzung von Teilflächen ist mit dieser Datenlage nicht möglich.

Beim Rutschhang in **Cochem** (Kapitel 3.3.3.7) kommen Bewegungsmessungen am Hangfuß vor, da der unbewachsene Gesteinsschutt gute Reflektoren darstellt. Die Zeitserie zeigt eine lineare Bewegung an. An diesem Standort lässt sich die Bedeutung von zwei Datensätzen unterschiedlicher Orbits gut demonstrieren: während die Bewegung in Hangrichtung vom Ascending Orbit gut erfasst werden kann, liefert die Messung vom Descending Orbit, z.B. der SBAS-Datensatz, keine Bewegungen. So könnten bei der Verwendung nur eines Datensatzes diese Hangbewegungen leicht übersehen werden.

## **5 Implementierung von Fernerkundungsdaten in behördliche Arbeitsprozesse**

Im Folgenden werden die Einbindung von Fernerkundungsdaten in behördliche Arbeitsprozesse sowie der nationale Nutzerbedarf und die Entwicklung eines bundesweiten Boden-Bewegungsdienstes diskutiert.

### **Einbindung in behördliche Arbeitsprozesse**

Die Arbeitsergebnisse dieser Studie zeigten, dass die radarinterferometrischen Bewegungsdaten die Anforderungen zur behördlichen Gefährdungsanalyse noch nicht umfassend erfüllen. So werden für die Bewertung von Hangrutschen und Altbergbaugebieten flächendeckende Daten benötigt wie beispielsweise zur Abgrenzung von Teilbereichen von Rutschungen sowie zur Ausweisung von Gefährdungszonen in Altbergbaugebieten und zur Detektion unbekannter Hohlräume. Zum Beispiel konnten im Gebiet der Mittelmosel nur wenige Punkte auf den Rutschhängen detektiert werden (z.B. Abbildung 147 und Abbildung 152). Für eine Abgrenzung von Bewegungszonen im Hang verfügen die bereitgestellten PSI- und SBAS-Daten über eine nicht ausreichende Datendichte. Auch im Altbergbaugebiet Mendig lieferten die Daten lediglich einige Verdachtspunkte (Kapitel 3.3.1). Im westlichen Stadtgebiet konnten keine eindeutigen Bewegungszonen identifiziert werden. Hier besteht der Bedarf nach weiterer Forschung und Entwicklung der Methode sowie Erfahrungsaustausch und Rückkopplung mit Datenprozessierern und Entwicklern. Mit wachsender Qualität der Daten können die Einsatzmöglichkeiten für behördliche Aufgaben jedoch immer mehr erweitert werden. Hierzu müssten die Bodenbewegungsdaten in eine standardmäßige Mapserveranwendung implementiert werden, in der weitere Datensätze zur Ableitung von z.B. Gefährdungsanalysen vorliegen, wie zum Beispiel Daten der Geologie, Hydrogeologie, Seismizität etc., aber auch von Rutschgebieten (wie beispielsweise in Rheinland-Pfalz). Mit einem operationellen Copernicus-Dienst, basierend auf Radarsatellitendaten von Sentinel-1, der regelmäßig aktuelle Bodenbewegungsdaten liefert, könnten Bodenbewegungen erfasst und überwacht werden. Des Weiteren dienen die Bewegungsdaten der Früherkennung von Gefährdungen. Mit Hilfe einer Archivdatenbank können zudem bei eintretenden Schadensereignissen historische Daten gesichtet werden, um zu prüfen, inwieweit frühzeitige Anzeichen erkennbar waren, die evtl. neu eingeordnet werden müssen, Verursacher identifiziert und zukünftige Schadensvermeidung abgeleitet werden kann. Zudem könnten der Beginn der Bewegung, sowie Informationen über den Bewegungsprozess ermittelt werden. Für Auswertungen in größeren Maßstäben würden aber auch, wie hier in der Studie gezeigt, hochauflösende Daten, zum Beispiel von TerraSAR-X, benötigt werden.

Um die radarinterferometrischen Daten richtig nutzen zu können, müssen in den Behörden weitere fachliche Kompetenzen aufgebaut und in diesem Zuge auch die Personalsituation dem neuen Aufgabenbereich angepasst werden. Zudem sollte die gemeinsame Nutzung von

Fernerkundungsdaten auf Länderebene koordiniert und finanziert werden, zum Beispiel über die Staatlichen Geologische Dienste.

### **Nutzerbedarf in Deutschland**

Der Nutzerbedarf des Landesamtes für Geologie und Bergbau Rheinland-Pfalz lässt sich ähnlich auf den bundesweiten Bedarf an Bodenbewegungsdaten übertragen. Mögliche Einsatzbereiche der radarinterferometrischen Bewegungsdaten sind (exemplarisch):

- Permanente Hangrutschungen entlang der Steilküste der Insel Rügen (Mecklenburg-Vorpommern), in der Alpenregion (Bayern), sowie in unterschiedlicher Ausprägung in fast allen Bundesländern,
- Bergbaufolgeschäden im Ruhrgebiet (Nordrhein-Westfalen), im Raum Stassfurt-Mansfeld (Sachsen-Anhalt), in der Lausitz (Brandenburg), im Siegerland und Lahn-Dill-Gebiet (Nordrhein-Westfalen, Rheinland-Pfalz und Hessen), im Harz (Niedersachsen und Sachsen-Anhalt), im Erzgebirge (Sachsen) sowie in Gebieten mit aktivem Kali- und Steinsalzbergbau (Niedersachsen, Hessen und Sachsen-Anhalt),
- Bruch- und Senkungsgefährdungen durch Subrosion und Karst im Harzvorland (Sachsen-Anhalt und Thüringen) und in anderen urbanen Siedlungs- und Ballungsräumen (z.B. Hamburg und Lüneburg),
- Bodenbewegungen in Verbindung mit der Förderung und Untergrundspeicherung von Erdöl und Erdgas (Niedersachsen, Mecklenburg-Vorpommern, Bayern) sowie mit der Erschließung von geothermischen Energieressourcen (Baden-Württemberg, Bayern),
- Landabsenkungen durch Bodenkompaktion, Planungs- und Gründungsfehler (z.B. Bremerhaven und Siedlungsflächen bundesweit)

Zur Erfassung und Diskussion dieses Nutzerbedarfs in Deutschland veranstaltete die BGR zwei Copernicus-Workshops zum Thema „Detektion und Monitoring von Geogefahren – Oberflächen- und Massenbewegungen mittels Radarinterferometrie“ am 27. Mai 2014 und 20. Mai 2015 in Hannover. An diesen Veranstaltungen nahmen Vertreter von Landes- und Bundesbehörden sowie Forschungseinrichtungen und Unternehmen teil. Auf den Workshops wurde der Nutzerbedarf für eine bundesweite fernerkundliche Detektion von Bodenbewegungen mittels SAR-Interferometrie identifiziert. Die Hauptanwendungen der Nutzer wurden in der Diskussion und durch Fragebögen erfasst. Es handelt sich um Regionalplanungen, Infrastrukturmonitoring, Umweltschutz, Notfallkartierungen und Hochwasserschutz (Kalia, 2015). Die mit Bodenbewegungen einhergehenden Prozesse je Bundesland sind in Tabelle 30 dargestellt.

Tabelle 30: Auswahl an Bewegungsprozessen in Deutschland (nach Kalia, 2015).

Bewegungsprozess	Bundesland
Erdgasförderung	Niedersachsen
Bodenkompaktion in Küstengebieten	Niedersachsen, Schleswig-Holstein
Salztektonik	Niedersachsen, Schleswig-Holstein
(Alt-) Bergbau, Grubenwasseranstieg	Nordrhein-Westfalen, Saarland, Rheinland-Pfalz, Hessen, Sachsen-Anhalt, Baden-Württemberg, Niedersachsen, Mecklenburg-Vorpommern
Hangrutsche	Rheinland-Pfalz, Baden-Württemberg, Niedersachsen, Mecklenburg-Vorpommern
Subrosion	Hessen, Sachsen-Anhalt, Niedersachsen, Thüringen
Torfschwund	Niedersachsen, Baden-Württemberg, Mecklenburg-Vorpommern
Keine Angaben: Brandenburg, Sachsen, Bayern	

### Einrichtung eines bundesweiten Boden-Bewegungsdienst (BBD)

Im Zuge der Copernicus-Initiative entwickelt die BGR das Dienstkonzept „Radarinterferometrie, Bodenbewegung, Geologie für behördliche Anwendungen“. Hierbei wurde die nationale Diskussion zum Copernicus-Dienste-Konzept in Bundes- und Landesbehörden durch Fachveranstaltungen, Entwicklung konkreter Handlungsvorschläge und die Umsetzung der Pilotstudie „Erdgasförderung“ in Niedersachsen initiiert und gefördert. In der Pilotstudie wurde ein Wide-Area PSI Produkt auf Basis von ERS-1/2 Daten prozessiert und ausgewertet (Abbildung 187). Hierbei hat die BGR die Fachexpertise der Kalibrierung, Validierung und Verknüpfung der bundesweit verfügbaren Geo- und Vermessungsdaten mit Satellitendaten aufgebaut (Frei et al. 2015). Ein erster Test-Datensatz wurde bereits in die Geodateninfrastruktur der BGER (GDI-BGR) eingebunden, in dem eine interaktive Überlagerung mit bundesweiten Geodaten möglich ist (Kalia, 2015).

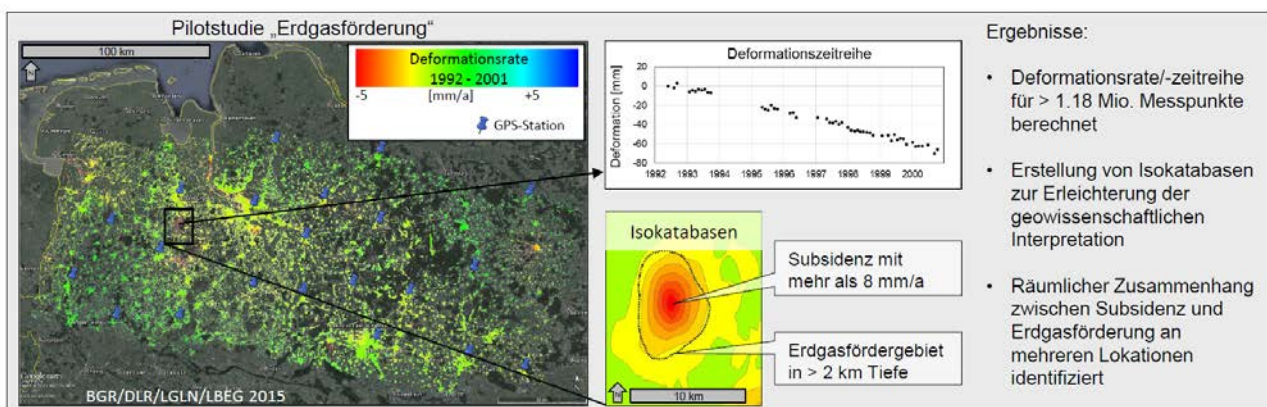


Abbildung 187: Ergebnisse der Pilotstudie „Erdgasförderung“ (Frei et al. 2015).

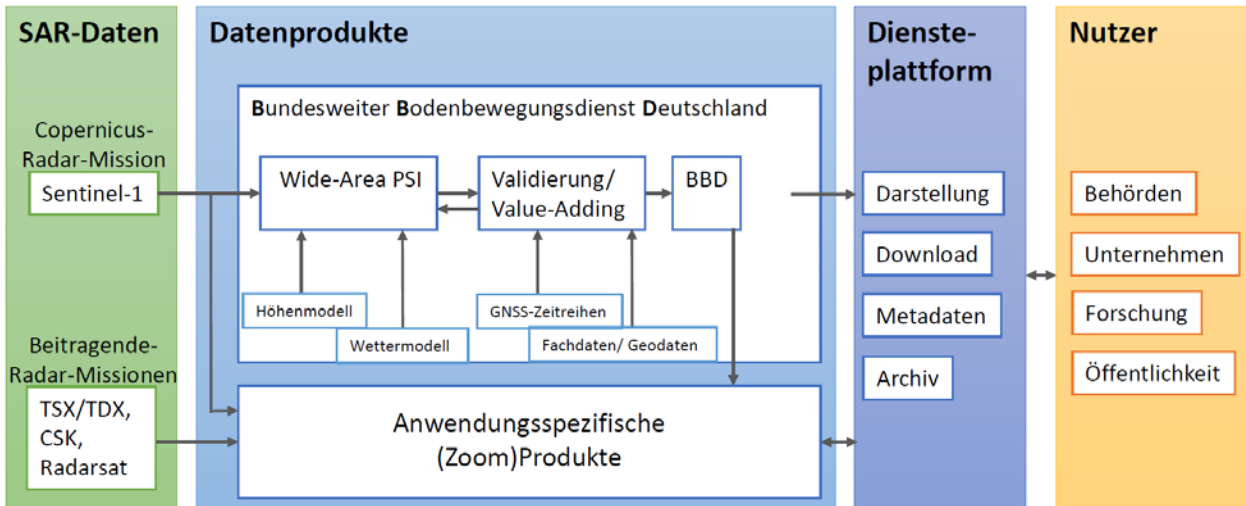


Abbildung 188: Konzept des Boden-Bewegungsdienstes Deutschlands (BBD) (Frei et al. 2015).

Das Konzept des Boden-Bewegungsdienstes Deutschland (BBD) ist in Abbildung 188 dargestellt. Auf Basis von Radardaten des Copernicus-Satelliten Sentinel-1 soll zunächst ein Wide-Area PSI berechnet werden. Nach einer anschließenden Validierung und Value-Adding wird der Boden-Bewegungsdienst über eine Dienstplattform bereitgestellt. Die bundesweite Bodenbewegungskarte dient der Übersichtsbetrachtung von Bodenbewegungen sowie als bedeutsame Argumentationsgrundlage für Detailuntersuchungen und zur Unterstützung der politischen Entscheidungsfindung (u.a. Infrastrukturplanung, Standortwahlgesetz). Eine Aktualisierung der Daten soll im Jahresrhythmus erfolgen. Da die Anforderungen aus Behörden regional sehr unterschiedlich sind, wird ein qualitätsgesicherter Basisdatensatz (Minimum-Datenlevel) basierend auf frei verfügbaren Sentinel-1A/B erstellt. Die Vorteile dieser bundesweiten Bodenbewegungsdaten sind die homogene Konsistenz der Ergebnisse (durch Verwendung einer Datenverarbeitungskette) sowie eine Validierung mit Vermessungsdaten (SAPOS/GNSS) und GeoDaten (Kalia, 2014. Frei et al. 2015). Zur Validierung ist ein 3-stufiges Vorgehen geplant (Abbildung 189).



Abbildung 189: Validierung der SAR-Datenprodukte (Frei et al. 2015).

Zur Beobachtung speziellerer Prozesse bzw. einzelner Objekte (z.B. Hangrutsche, Moore, Talsperren, Dämme etc.) werden zusätzlich (sehr) hoch aufgelöste SAR-Daten zur kleinräumigen und detaillierten Vermessung benötigt. Hierzu sind anwendungsspezifische InSAR-Produkte (Zoom-Produkt) auf Basis von TerraSAR-X, TanDEM-X, COSMO-SkyMed oder Radarsat angedacht. Um in akuten Schadensfällen schnell reagieren zu können, sind zudem zeitlich hochauflösende Analysen erforderlich. Zum Beispiel könnte die Entwicklung einer Hangkriechbewegung zu einer potentiellen Hangrutschung durch Starkniederschläge mit TerraSAR-X-Daten mit einer Wiederkehrzeit von 11 Tagen erfasst werden. Die hochauflösende radarinterferometrische Bewegungsmessung für solche Anwendungen würde als Sonderprodukt angeboten werden (Kalia, 2014).

Zum Aufbau des Boden-Bewegungsdienstes wird nun bis 2019 ein bundesweiter Datensatz aufgebaut. Nach einer anschließenden Evaluierung soll der Boden-Bewegungsdienst mit laufender Aktualisierung etabliert, sowie anwendungsorientierte Produkte entwickelt werden (Frei et al. 2015).

## 6 Dissemination der Arbeitsergebnisse

Die Einbindung von Fernerkundungsverfahren in behördliche Aufgaben ist in erster Linie eine Frage der Schaffung von Akzeptanz in einem Bereich, der aktuell durch vor allem terrestrische Beobachtungsmethoden dominiert wird. Einen Beitrag zur Schaffung dieser Akzeptanz erfolgte durch die gezielte Information potentieller Verwertungspartner auf Fachveranstaltungen sowie durch Vorträge und Workshops. So wurde zu Beginn des Projektes eine Pressemitteilung der BGR am 3. März 2014 herausgegeben (siehe Anhang). Im Rahmen des Kick-Off Meetings des DLR am 20. März 2014 in Bonn wurden die Präsentationsfolien zum Projekt „Copernicus-Dienst Rhein-Mosel“ veröffentlicht ([http://www.d-gmes.de/sites/default/files/dokumente/Copiloten/Wolf\\_Copernicus-Rhein-Mosel.pdf](http://www.d-gmes.de/sites/default/files/dokumente/Copiloten/Wolf_Copernicus-Rhein-Mosel.pdf)). Des Weiteren erfolgen Einträge in die Umweltforschungsdatenbank UFORDAT des Umweltbundesamts mit der Datensatznummer 01049404 ([http://doku.uba.de/aDISWeb/app?service=direct/0/Home/\\$DirectLink&sp=Swww-gates.uba.de%3A4111](http://doku.uba.de/aDISWeb/app?service=direct/0/Home/$DirectLink&sp=Swww-gates.uba.de%3A4111), siehe Anhang) und in die Datenbank nationaler Copernicus Projekte ([www.d-gmes.de](http://www.d-gmes.de), Projekt 34, siehe Anhang). Auf der Veranstaltung Nationales Forum für Fernerkundung und Copernicus 2014 wurde im Rahmen des Workshops „B.3 Detektion und Monitoring von Geogefahren – Oberflächen- und Massenbewegungen“ am 8. April 2014 der Vortrag „Anwendung der Radarinterferometrie zur Bewegungsdetektion und Gefährdungsanalyse“ gehalten. Der Vortrag beinhaltete einen Überblick über das Verfahren der Radarinterferometrie sowie Informationen über das Projekt Copernicus-Dienste-Konzept Rhein-Mosel (siehe Anhang). Am 27. Mai 2014 fand in der BGR ein Copernicus-Workshop zum Thema „Detektion und Monitoring von Geogefahren – Oberflächen- und Massenbewegungen“ statt. Ziel des Workshops war es, Nutzeranforderungen für die Entwicklung eines Copernicus-Dienstkonzeptes zu ermitteln. Die Veranstaltung diente dem Erfahrungsaustausch bei der Nutzung von Bodenbewegungsmessungen mittels Radarinterferometrie für behördliche Aufgaben und der fachlichen Diskussion der Nutzeranforderungen an zukünftige Copernicus-Datenprodukte sowie Anforderungen an die geowissenschaftliche Interpretationsebene. Der Workshop bot zugleich eine Plattform, um mit Landes- und Bundesbehörden, Forschungseinrichtungen und Unternehmen in Kontakt zu treten und war Anstoß für gegenseitige Unterstützungen bei der Implementierung von Fernerkundungsdaten in behördliche Arbeitsabläufe.

Bei der Tagung GeoMonitoring, 5. bis 6. März 2015 in Clausthal-Zellerfeld, wurde das Projekt vorgestellt, sowie ein vierseitiger Beitrag im Tagungsband veröffentlicht (Wolf, 2015). Vom 11. bis 15. Mai 2015 fand in Berlin das 36th International Symposium on Remote Sensing of Environment (ISRSE36) statt. Hierbei wurde ein Poster präsentiert (siehe Anhang). Am 19. Mai wurden die Arbeitsergebnisse beim Hauskolloquium des Geozentrums mit den Institutionen BGR, LBEG und LIAG vorgestellt und diskutiert. Ein zweiter Copernicus Workshop wurde am 20. Mai 2015 an der BGR in Hannover durchgeführt, bei dem das Projekt Copernicus-Dienst Rhein-Mosel als Poster



präsentiert wurde. Im Workshop wurden den potentiellen Nutzern aus Landes- und Bundesbehörden sowie Forschungseinrichtungen und Unternehmen aktuelle Anwendungen der satellitengestützten Radarinterferometrie vorgestellt. In der Diskussionsrunde zum Thema „Anforderung an einen Oberflächenbewegungsdienst aus Nutzersicht“ wurden Produkthanforderungen, Validierung, Interoperabilität, Implementierung und Fragen des Zugangs zu einem bundesweiten Boden-Bewegungsdienstes behandelt.

Am 3. November 2015 wurden im Rahmen des Copernicus Symposium in Berlin die Projektergebnisse sowie der Nutzerbedarf präsentiert. In einer abschließenden Diskussionsrunde wurden die derzeitigen Hemmnisse einer operationellen Nutzung von Sentinel-Daten sowie die Nutzerforderungen behandelt. Zu den genannten Hemmnissen zählen der Datenzugang, die Auflösung der Daten, fehlendes Know-how bzw. Ausbildung sowie fehlenden personelle und finanzielle Mittel in den Behörden. Zudem wurde der Mehrwert der Nutzung von Fernerkundungsdaten in den Behörden und Kommunen bisher nicht erkannt. Anforderungen einzelner Nutzer sind flächendeckende Daten mit hoher räumlicher und zeitlicher Auflösung, insbesondere für Fragen der Vegetationskartierung im land- und forstwirtschaftlichen Bereich. Die geforderte räumliche Auflösung kann allerdings von operationellen Copernicus-Diensten nicht erfüllt werden. Hier sollten die Genauigkeitsanforderungen überdacht werden, da im Gegenzug Messwerte in der Fläche und Daten mit hoher Aktualität eingesetzt werden können. Weitere Anforderungen sind die Definition von Standardprodukten, die geometrisch und radiometrisch korrigiert sowie georeferenziert sind. Diese vorverarbeiteten Produkte sollen mit einfachen Nutzungslizenzen versehen und der Zugang zu diesen Daten sollte vereinfacht werden. Auch sollten kombinierte Produkte entwickelt werden, in denen Fernerkundungsdaten und Daten traditioneller Methoden gemeinsam genutzt werden. Zudem sollten die Landesbehörden Synergien aus Radardaten, Optik und in-situ Daten nutzen. Zur Unterstützung des Einsatzes von Copernicus-Daten soll ein zentraler Einstieg auf der Copernicus-in-Deutschland-Homepage ([www.d-copernicus.de](http://www.d-copernicus.de)) mit einem operationellen Helpdesk eingerichtet, sowie Workshops, Summer Schools und E-learning angeboten werden. An konkreten Anwendungsbeispielen sollte der quantitative und qualitative Mehrwert aufgezeigt werden. Zudem sollte die Implementierung gefördert werden und Verbundprojekte mit Behörden, Wirtschaft und Forschung angeregt werden. Die Fachkoordinatoren sollen ein Netzwerk mit Fachkompetenz aufbauen, Kontakte zu Themenexperten aus den Behörden vermitteln und somit für eine verbesserte Vernetzung der Akteure sorgen. Beim anschließenden Nationalen Forum für Fernerkundung und Copernicus 2015 „Copernicus Erfolgreich Nutzen“ wurde das Projekt im Workshop C.2 „Copernicus – (K)ein Thema für Land und Kommune?“ sowie als Posterbeitrag vorgestellt (siehe Anhang).

## 7 Fazit und Ausblick

Diese Studie hat gezeigt, wie Fernerkundungsdaten zur Gefährdungsanalyse eingesetzt werden können. Mithilfe der radarinterferometrischen Bewegungsdaten basierend aus ERS-1/2 und Envisat-ASAR-Daten konnten mehr als 700 Bewegungsgebiete im Projektgebiet Rhein-Mosel kartiert werden. Mit aktuellen Satellitendaten von Sentinel-1 können diese Bereiche weiter überwacht werden und bei Veränderungen der Bewegungen, zum Beispiel Beschleunigungen von Hangrutschbereichen, entsprechende Sicherungsmaßnahmen getroffen werden. Zudem können neue Geländebewegungen detektiert werden, die beispielsweise in Altbergbaugebieten auftreten können. Durch die Entwicklung eines bundesweiten Boden-Bewegungsdiensts können die Sentinel-Daten in Zukunft bereitgestellt und für behördliche Aufgaben operationell eingesetzt werden.

Die Detailstudien mit PSI- und SBAS-Prozessierungen von TerraSAR-X-Daten zeigten, dass eine sehr viel höhere Datendichte erreicht werden kann und diese somit für Detailanalysen geeignet sind. Anhand von Zeitreihenanalysen konnte zudem der Verlauf der Bewegungen untersucht werden. Zum Beispiel zeigten einige Verläufe deutliche nicht-lineare Bewegungen, die auf saisonale Schwankungen oder Korrelationen mit Niederschlägen hindeuten können. Derzeit werden jedoch die Anforderungen an flächenhafte Daten nicht vollständig erfüllt. So lieferten die Daten nicht die gewünschte Datendichte zur Abgrenzung von Teilbereichen im Gelände kartierter Rutschungen. Hier besteht weiterer Forschungs- und Entwicklungsbedarf. Zum Beispiel können durch kürzere Zeiträume oder durch die Prozessierung von schneefreien Winterszenen die Datendichte erhöht werden. Zudem bieten sich weitere Möglichkeiten der räumlichen und zeitlichen Filterung und Interpolationsverfahren an. Mit validierten flächendeckenden Bewegungsdaten könnten zum Beispiel aus Gefahrenhinweiskarten aktuelle Gefahrenkarten mit Bewegungsinformationen abgeleitet werden.

Zur weiteren Unterstützung der Implementierung von Copernicus-Daten in behördliche Arbeitsprozesse sollten die beim Nationalen Forum für Fernerkundung und Copernicus diskutierten Vorschläge umgesetzt werden. So sollte die Implementierung beispielsweise durch die Förderung von Verbundprojekten von Behörden, Wirtschaft und Forschung weiter unterstützt werden. Auf Arbeitsebene sollten die Fachkoordinatoren an Themenexperten aus Behörden weitervermitteln und die Akteure besser vernetzen. Zudem sollten Schulungen, Workshops und Fachveranstaltungen durchgeführt werden.

## 8 Literaturverzeichnis

- Amstutz, G.; Bock, B., Wehinger, A. & Rogall, M. (2014): Erstellen einer GIS-gestützten Gefahrenkarte für die oberflächennahen Hohlräume in Mendig (Vordereifel). *Mainzer geowissenschaftliche Mitteilungen* (42), S. 99-120, Mainz
- Amstutz, G.; Wehinger, A. & Rogall, M. (2013): Entwicklung einer Gefährdungsmatrix für tragende Pfeiler der bergbaulichen Hohlräume in Mendig (Vordereifel). *Mainzer geowissenschaftliche Mitteilungen* (41), S. 213-246, Mainz
- Bateson, L.; Novali, F. & Cooksley, G. (2010): TerraFirma User Guide. Version 8, 15<sup>th</sup> October 2010, online unter <[http://www.terrafirma.eu.com/images\\_all\\_site/documents/user\\_guide/TerraFirma%20User%20Guide%20Oct%202010.pdf](http://www.terrafirma.eu.com/images_all_site/documents/user_guide/TerraFirma%20User%20Guide%20Oct%202010.pdf)> (20.07.2015)
- Berardino, P.; Fornaro, G.; Lanari, R. & Sansosti, E. (2002): A new algorithm for surface deformation monitoring based on small baseline differential interferograms. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* 40(11), 2375-2383
- Bock, B.; Wehinger, A. & Krauter, E. (2012): Hanginstabilitäten in Rheinland-Pfalz – Ergebnisse der Rutschungsdatenbank Rheinland-Pfalz, *Mainzer geowiss. Mitt.* 40: 147-180
- Bock, B.; Wehinger, A. & Krauter, E. (2013): Hanginstabilitäten in Rheinland-Pfalz – Auswertung der Rutschungsdatenbank Rheinland-Pfalz für die Testgebiete Wißberg, Lauterecken und Mittelmosel“, *Mainzer geowiss. Mitt.* 41: 103-122
- Bonano, M.; Manunta, M.; Pepe, A.; Paglia, L. & Lanari, R. (2013): From previous C-band to new X-band SAR systems: assessment of the DInSAR mapping improvement for deformation time-series retrieval in urban areas. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* 51(4), 1973-1984
- Buchroithner, M. (1984): Quantitative evaluation of the major fracture pattern in Austria. *Geologische Rundschau* 73(1), 399-418
- Canuti, P.; Casagli, N.; Ermini, L.; Fanti, R. & Farina, P. (2004): Landslide activity as a geoinicator in Italy: significance and new perspectives from remote sensing. *Environmental Geology* 45, 907–919
- Castelletto, N., Ferronato, M., Gambolati, G., Janna, C.; Teatini, P.; Marzorati, D.; Cairo, E.; Colombo, D.; Ferretti, A.; Bagliani, A. & Mantica, S. (2010): 3D geomechanics in UGS projects. A comprehensive study in northern Italy. *ARMA, American Rock Mechanics Association* 10-185
- Cengiz, O.; Sener, E. & Yagmurlu, F. (2006): A satellite image approach to the study of lineaments, circular structures and regional geology in the Golcuk Crater district and its environs (Isparta, SW Turkey). *Journal of Asian Earth Sciences* 27, 155-163
- Colesanti, C.; Ferretti, A.; Novali, F.; Prati, C. & Rocca, F. (2003a): SAR monitoring of progressive and seasonal ground deformation using the Permanent Scatterers Techniques. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* 41(7), 1685–1701
- Colesanti, C.; Ferretti, A.; Prati, C. & Rocca, F. (2003b): Monitoring landslides and tectonic motion with the Permanent Scatterers Technique. *Engineering Geologist* 68, 3–14
- Colesanti, C. & Wasowski, J. (2004): Satellite SAR interferometry for wide-area slope hazard detection and site-specific monitoring of slow landslides. *Proceedings 9th International Symposium on Landslides*, 28 Juni –2 Juli 2004, Rio de Janeiro, 795–802
- Cooksley, G.; Strozzi, T.; Adam, N.; Moretti, S., Stramondo, S.; Zimmermann, K.; Kruiver, P. & Van Leijen, F. (2013): S5 Service Portfolio Specifications Version 6.1, June 2013. Online unter <<http://www.terrafirma.eu.com/Documents/dossiers/stage3/S5%20Serviceportfolio%20specifications%20V6.1.pdf>> (20.07.2015)
- Copernicus Space Component Data Access Portfolio: Data Warehouse 2014 – 2020. Online unter [https://copernicusdata.esa.int/documents/12833/14545/DAP\\_Release\\_Phase\\_2\\_1.0\\_final](https://copernicusdata.esa.int/documents/12833/14545/DAP_Release_Phase_2_1.0_final) (28.08.2015)
- Crósta, A. P. & Moore, J. McM. (1989): Geological mapping using Landsat Thematic Mapper imagery in Almeria Province, south-east Spain. *International Journal of Remote Sensing* 10(3), 505-514
- Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. (DLR) (2015): Erdbeobachtung – Unseren Planeten erkunden, vermessen und verstehen. M&E Druckhaus GmbH, Troisdorf

- Dürrewang, R. (2008): Bauwerke in instabilen Hängen. Mitteilungen der Schweizerischen Gesellschaft für Boden- und Felsmechanik: Heft 157 Kriechprobleme in der Geotechnik. Herbsttagung, 7. November 2008, Zürich.
- European Space Agency (2013): Sentinel-1 User Handbook (1. September 2013), online unter <[https://earth.esa.int/documents/247904/685163/Sentinel-1\\_User\\_Handbook](https://earth.esa.int/documents/247904/685163/Sentinel-1_User_Handbook)> (27.05.2015)
- Ferretti, A.; Fumagalli, A.; Novali, F.; Prati, C.; Rocca, F. & Rucci, A. (2011): A new algorithm for processing interferometric data-stacks: SqueeSAR. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing 49(9), 3460-3470
- Ferretti, A.; Prati, C. & Rocca, F. (2000): Nonlinear subsidence rate estimation using Permanent Scatterers in differential SAR interferometry. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing 38, 2202–2212
- Ferretti, A.; Prati, C. & Rocca, F. (2001): Permanent Scatterers in SAR interferometry. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing 39, 8–20.
- Ferretti, A.; Prati, F.; Rocca, N.; Casagli, N.; Farina, P. & Young, B. (2005): Permanent Scatterers Technology: a powerful state of the art tool for historic and future monitoring of landslides and other terrain instability phenomena. International Conference on Landslide Risk Management, Vancouver, 31 Mai –3 Juni 2005, 1–9
- Frei, M.; Kalia, A. & Lege, T. (2015): Bundesweites Monitoring von Bodenbewegungen mit Copernicus. Vortrag im Fachworkshop D.1 – Die Herausforderung: Deutschland-Monitoring. Nationales Forum für Fernerkundung und Copernicus 2015 Copernicus Erfolgreich Nutzen vom 3.11 – 5.11.2015 in Berlin, online unter <[http://www.d-copernicus.de/sites/default/files/dokumente/Forum\\_2015/Frei\\_BGR.pdf](http://www.d-copernicus.de/sites/default/files/dokumente/Forum_2015/Frei_BGR.pdf)>
- Geospatial Innovation Facility (GIF) (2008): Landsat Spectral Band Information. Online unter <<http://gif.berkeley.edu/documents/Landsat%20Band%20Information.pdf>> (27.07.2015)
- Harms, E. & Mangartz, F. (2002): Vom Magma zum Mühlstein. Eine Zeitreise durch die Lavaströme des Bellerberg-Vulkanismus. Vulkanpark-Forschungen Band 5, Verlag des Römisch-Germanischen Zentralmuseums, Mainz
- INSPIRE Thematic Working Group Natural Risk Zones (2013): D2.8.III.12 Data Specification on Natural Risk Zones – Technical Guidelines. European Commission Joint Research Centre, 2013-12-10
- Integrated Geospatial Education & Technology Training (iGETT): Landsat Spectral bands. Online unter <[http://igettdelmar.edu/Resources/Remote%20Sensing%20Technology%20Training/Landsat\\_bands-sm.pdf](http://igettdelmar.edu/Resources/Remote%20Sensing%20Technology%20Training/Landsat_bands-sm.pdf)> (27.07.2015)
- Kalia, A. (2014): Copernicus-Workshop in der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR) in Hannover am 27.05.2014, Thema: „Detektion und Monitoring von Geogefahren – Oberflächen und Massenbewegungen“ – Zusammenfassung. Interner Bericht.
- Kalia, A. (2015): Aktueller Stand des Copernicus-Dienstkonzeptes. Vortrag beim BGR Copernicus Workshop „Detektion und Monitoring von Geogefahren – Oberflächen- und Massenbewegungen mittels Radarinterferometrie“, 27. Mai 2014 in Hannover
- Kampes, B. M. (2006): Radar Interferometry: Persistent Scatterer Technique. Springer, Dordrecht
- Kappas, M. (1994): Fernerkundung nah gebracht. Dümmler Verlag, Bonn.
- Kling, Joern (2008): Der unterirdische Basaltlava-Abbau bei Mayen. In: Mayener Basaltlava - Zeitzeuge aus den Tiefen der Vulkaneifel / hrsg. von Johannes Netz.- Mayen, 2008. - ISBN 978-3-00-025591-5. - S. 69-90. - III. - ISBN 978-3-00-025591-5
- Krauter, E. (1996): Ingenieurgeologisch-geotechnisches Gutachten „Rutschung Reil-Pünderich, Az.: Pün-96“, geo-international, Mainz (unveröffentlicht)
- Krauter, E.; Feuerbach, J. & Schröder, U. (1993): Felsrutschung Kröv (Mosel) – Kinematik und Gefahrenabwehr. 9. Nationale Tagung für Ingenieurgeologie, 12. bis 15. Mai 1993, Garmisch-Partenkirchen
- Krauter, E.; Kumerics, Christine; Feuerbach, Johannes; Lauterbach, Manuel (2012): Abschätzung der Risiken von Hang- und Böschungsrutschungen durch die Zunahme von Extremwetterereignissen. Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen – Straßenbau Heft S75
- Kühn, F., Hörig, B. & Budziak, D. (2004): Detecting Unstable Ground by Multisensor Remote Sensing. Photogrammetrie, Fernerkundung, Geoinformation, No. 2, 101-109, Schweizerbart, Stuttgart

- Lanari, R.; Mora, O.; Manunta, M.; Mallorquà, J. J.; Berardino, P. & Sansosti, E. (2004): A small-baseline-approach for investigation deformations on full-resolution differential SAR interferograms. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* 42(7), 1377-1386
- Landesamt für Geologie und Bergbau Rheinland-Pfalz (2010): Steinland-Pfalz. Geologie und Erdgeschichte von Rheinland-Pfalz. 2. Auflage. E. Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung, Stuttgart
- Landesbetrieb Mobilität Rheinland-Pfalz: B53 Moselbrücke Wolf, online unter <<https://www.lbm.rlp.de/Bauprojekte/B-53-Moselbruecke-Wolf>> (02.10.2015)
- Lauterbach, M. & Feuerbach, J. (2010): Ingenieurgeologisch-geotechnischer Zwischenbericht: Kontrollmaßnahmen im Bereich der Rutschung Pünderich an der DB-Strecke Koblenz-Perl (3010) zwischen Bahn-km 61,600 u. 62,100, geointernational, Mainz (unveröffentlicht)
- Meisina, C.; Zucca, F.; Fossati, D.; Ceriani, M. & Allievi, J. (2006): Ground deformation monitoring by using the Permanent Scatterers Technique: The example of the Oltrepo Pavese (Lombardia, Italy). *Engineering Geology* 88, 240–259
- Michels, F. (1932): Der wandernde Berg bei Cochem a. d. Mosel. *Natur und Museum* (62): 253-258, Frankfurt a. M.
- PanGeo Deliverable 3.5 Production Manual Version 1.3 (Oktober 2012), online unter [http://www.pangeoproject.eu/sites/default/files/pangeo\\_other/D3.5-PanGeo-Production-Manual-v1.3.pdf](http://www.pangeoproject.eu/sites/default/files/pangeo_other/D3.5-PanGeo-Production-Manual-v1.3.pdf) (06.08.2015)
- Pohl, M. (2012): Steinreich. Mülsteine, Tuff und Trass aus der östlichen Vulkaneifel und ihr Markt. Eine vergleichende Analyse vorindustrieller Produktions- und Handelsstrukturen. Deutsches Bergbau-Museum, Bochum.
- Riedmann, M.; Lang, O. & Bindrich, M. (2015): TerraSAR-X basierte Hangrutschüberwachung bei Graach, Rheinland-Pfalz. Tagungsband GeoMonitoring 2015, 5. bis 6. März 2015 in Clausthal-Zellerfeld
- Rogall, M. (2002): Stabilisierung und Verfüllung unterirdischer Hohlräume. Beispiel eines ehemaligen Basaltbergbaus in der Eifel, *Felsbau* 20 (3), 52-59
- Rogall, M. (2014): Gefahrenhinweiskarte Mittelmosel – Rutschungen und Steinschläge 1:50.000. Landesamt für Geologie und Bergbau Rheinland-Pfalz, Mainz
- Rogall, M. & Broman, J. (2009): Tagesbruchsicherung einer Landesstraße in einem ehemaligen Bergbaugebiet in der Eifel, *Geotechnik* 32 (1), 37-43
- Rogall, M. & Möbus, H. (2005): Hangstabilitätskarte Mittelmosel 1:20.000 Bereich Bernkastel-Kues. Landesamt für Geologie und Bergbau Rheinland-Pfalz, Mainz
- Rogall, M. & Wehinger, A. (2011): Standsicherheit von Hohlräumen in Niedermendig (Pilotprojekt): Bürger- und Bürgerinnen-Information am 21. Dezember 2011 in Mendig, online unter [http://www.lgb-rlp.de/fileadmin/internet/pdf/mendig\\_lgb\\_21122011.pdf](http://www.lgb-rlp.de/fileadmin/internet/pdf/mendig_lgb_21122011.pdf) (10.08.2015)
- Schmincke, H. & Bogaard, P. (1990): Vulkanologische Karte der Osteifel (1:50.000). Hrsg.: Van den Bogaard, P. & Schmincke, H., Geologisches Landesamt Rheinland-Pfalz, Mainz
- Schmitzek, D.: Verarbeitung und Manipulation digitaler Bilder: Filter und Faltungen. Online unter <<http://www.techfak.uni-bielefeld.de/~cbauckha/MuVdBDData/04-DanielS-Filter.pdf>> (22.07.2014)
- Schulze (1828): Die Mülsteinbrüche zwischen Mayen und dem Laacher See. *Archiv für Bergbau und Hüttenwesen*. Hrsg. Von Karsten, C.J.B., Berlin (Abschrift von Schmidt, Klaus, Mendig, 2000)
- Solomon, S. & Ghebream, W. (2006): Lineament characterization and their tectonic significance using Landsat TM data and field studies in the central highlands of Eritrea. *Journal of African Earth Sciences* 46, 371-378
- Uhl, A. (2006): Grundlagen Bildverarbeitung. Online unter <<http://www.coby.sbg.ac.at/~uhl/img/Process.pdf>> (22.07.2015)
- Universität Karlsruhe, Institut für Photogrammetrie und Fernerkundung (IPF) (2003): Digitale Bildverarbeitung. Online unter <<http://www.geoinformation.net/>> (22.07.2015)
- Werner, C. (1997): Kinematik und Ursache der Rutschung Reil-Pünderich an der Mosel, Diplomarbeit, Johannes-Gutenberg-Universität, Mainz (unveröffentlicht)

Wehinger, A. (2004): Der Obere Niedermendiger Basaltstrom – Lagerstätte und Bergbau. Mainzer geowissenschaftliche Mitteilungen, Mainz Oktober 2004, 32, S.113-132

Wehinger, A. (2015): Überblick und Eigenschaften zu Massenbewegungen in Rheinland-Pfalz. Vortrag beim BGR Copernicus Workshop, 20. Mai 2015, BGR Hannover.

Wehinger, A., Friedrich, T. & Lux, J.(2010a): Altbergbausicherung in Mayen (Vordereifel) – Einsatz von Epoxidharz zur flächigen Verklebung. Glückauf 146 (10), 500-505

Wehinger, A., Friedrich, T. & Lux, J. (2010b): Sicherung von Untertageanlagen ehemaligen Basaltbergbaus im Mayener Grubenfeld (Vordereifel). 10. Altbergbau-Kolloquium, 4. bis 6. November 2010, Freiberg

Wolf, C. (2015): Copernicus-Dienst zur Unterstützung von Gefährdungsanalysen und Regionalplanung im Rhein-Mosel-Gebiet. Tagungsband GeoMonitoring 2015, Herausgeber: Busch, W. und Knospe, S. 5. bis 6. März 2015 in Clausthal-Zellerfeld.

## 9 Anhang

Prozessierungsbericht [Nummer 1]: PSInSAR-Prozessierung für das Untersuchungsgebiet in der Rhein-Mosel-Region. Abdeckung der Envisat- & ERS-Aufnahmen, 10.09.2014.....	Anhang Seite 01
Prozessierungsbericht [Nummer 2]: PSInSAR-Prozessierung für das Untersuchungsgebiet in der Rhein-Mosel-Region. ERS-1/ERS-2 – Track 29, 05.09.2014.....	Anhang Seite 06
Prozessierungsbericht [Nummer 3]: PSInSAR-Prozessierung für das Untersuchungsgebiet in der Rhein-Mosel-Region. ERS-1/ERS-2 – Track 487, 19.09.2014.....	Anhang Seite 12
Prozessierungsbericht [Nummer 4]: PSInSAR-Prozessierung für das Untersuchungsgebiet in der Rhein-Mosel-Region. Teilgebiet 1: ERS-1/ERS-2 – Track 337, 27.08.2014.....	Anhang Seite 22
Prozessierungsbericht [Nummer 5]: PSInSAR-Prozessierung für das Untersuchungsgebiet in der Rhein-Mosel-Region. Teilgebiet 2: ERS-1/ERS-2 – Track 337, 29.08.2014.....	Anhang Seite 28
Prozessierungsbericht [Nummer 6]: PSInSAR-Prozessierung für das Untersuchungsgebiet in der Rhein-Mosel-Region. Teilgebiet 3: ERS-1/ERS-2 – Track 337, 29.08.2014.....	Anhang Seite 35
Prozessierungsbericht [Nummer 7]: PSInSAR-Prozessierung für das Untersuchungsgebiet in der Rhein-Mosel-Region. Teilgebiet 1: ERS-1/ERS-2 – Track 65, 29.08.2014.....	Anhang Seite 41
Prozessierungsbericht [Nummer 8]: PSInSAR-Prozessierung für das Untersuchungsgebiet in der Rhein-Mosel-Region. Teilgebiet 2: ERS-1/ERS-2 – Track 65, 29.08.2014.....	Anhang Seite 48
Prozessierungsbericht [Nummer 9]: PSInSAR-Prozessierung für das Untersuchungsgebiet in der Rhein-Mosel-Region. Teilgebiet 1: Envisat – Track 337, 31.07.2014.....	Anhang Seite 61
Prozessierungsbericht [Nummer 10]: PSInSAR-Prozessierung für das Untersuchungsgebiet in der Rhein-Mosel-Region. Teilgebiet 2: Envisat – Track 337, 21.08.2014.....	Anhang Seite 69
Prozessierungsbericht [Nummer 11]: PSInSAR-Prozessierung für das Untersuchungsgebiet Mendig in der Rhein-Mosel-Region. TerraSAR-X – Orbit 154, 31.07.2015.....	Anhang Seite 75
Prozessierungsbericht [Nummer 12]: SBAS-Prozessierung für das Untersuchungsgebiet Mendig in der Rhein-Mosel-Region. TerraSAR-X – Orbit 154, 31.07.2015.....	Anhang Seite 83
Prozessierungsbericht [Nummer 13]: PSInSAR-Prozessierung für das Untersuchungsgebiet Mosel in der Rhein-Mosel-Region. TerraSAR-X – Orbit 116, 03.09.2015.....	Anhang Seite 92
Prozessierungsbericht [Nummer 14]: PSInSAR-Prozessierung für das Untersuchungsgebiet Mosel in der Rhein-Mosel-Region. TerraSAR-X – Orbit 154, 31.08.2015.....	Anhang Seite 106
Prozessierungsbericht [Nummer 15]: SBAS-Prozessierung für das Untersuchungsgebiet Mosel in der Rhein-Mosel-Region. TerraSAR-X – Orbit 116, 28.08.2015.....	Anhang Seite 114
Prozessierungsbericht [Nummer 16]: SBAS-Prozessierung für das Untersuchungsgebiet Mosel in der Rhein-Mosel-Region. TerraSAR-X – Orbit 154, 28.08.2015.....	Anhang Seite 125
Veröffentlichter Antrag GEO2684 auf der Webseite <a href="http://www.terrasar-x.dlr.de">www.terrasar-x.dlr.de</a> .....	Anhang Seite 135
Pressemitteilung der BGR vom 03.03.2014.....	Anhang Seite 136
Eintrag in die Umweltforschungsdatenbank, Datensatznummer 01049404.....	Anhang Seite 137
Eintrag in die Datenbank nationaler Copernicus Projekte.....	Anhang Seite 138
Auszug aus dem Programm des Nationalen Forums für Fernerkundung und Copernicus 2014.....	Anhang Seite 139
Beitrag im Tagungsband GeoMonitoring 2015, 5. bis 6. März 2015 in Clausthal-Zellerfeld.....	Anhang Seite 140
Posterbeitrag zur Konferenz ISRSE.....	Anhang Seite 144
Poster beim Nationalen Forum für Fernerkundung und Copernicus 2015 „Copernicus Erfolgreich Nutzen“ vom 3.11 – 5.11.2015 in Berlin.....	Anhang Seite 145
Bericht „Datenauswertung und Evaluierung von PSI-Bewegungsdaten aus ERS1/2 und ASAR-Fernerkundungsdaten für Testgebiete in der Rhein-Mosel-Region“ (GeoConsult Rein).....	Anhang Seite 146

# PROZESSIERUNGSBERICHT

---

PSInSAR-Prozessierung für das Untersuchungsgebiet  
in der Rhein-Mosel-Region

Abdeckung der Envisat- & ERS-Aufnahmen

---

Michael Mares

10.09.2014



Bundesanstalt für  
Geowissenschaften und Rohstoffe

# TRIGIS

Die Welt der Geodaten



## 1. Hintergrund

Dieses Dokument liefert eine Übersicht der für das Projekt genutzten Aufnahmen der Satelliten Envisat, sowie ERS-1 und ERS-2. Jeder Satellit liefert Aufnahmen aus einer sogenannten aufsteigenden Umlaufbahn (Ascending Orbits) und einer absteigenden Umlaufbahn (Descending Orbits). Im Rahmen des Projekts wurden die Daten beider Umlaufbahnen des jeweiligen Satelliten ausgewertet.

Da für die Durchführung einer PSI-Auswertung mindestens ca. 25 Aufnahmen des gleichen Orbits notwendig sind, lagen von den Satelliten nicht immer ausreichend viele Aufnahmen aus der jeweiligen Umlaufbahn vor. Daraus ergeben sich Lücken in der Abdeckung des Projektgebiets. Zum besseren Verständnis dieser Lücken in den PSI-Ergebnissen erfolgt die Darstellung der Abdeckung der verfügbaren und im Projekt genutzten Satellitenaufnahmen.

Da die Umlaufbahn jeder Aufnahme einige Kilometer von der Umlaufbahn der anderen Aufnahmen des gleichen Orbits abweichen kann, verringert sich die auswertbare Fläche ebenfalls um einige Kilometer im Vergleich zu den unten ausgewiesenen Rahmen der jeweiligen Orbits.

## 2. Envisat – Descending Orbits

Abbildung 1 zeigt die Übersicht des Projektgebiets (gelber Umring), sowie die Abdeckung der Satellitenaufnahmen des Track 337. Zur vollständigen Abdeckung in nord-südlicher Ausdehnung mussten zwei Ausschnitte zu je 100 km x 100 km genutzt werden. Östlich des Tracks 337 lagen nicht genügend Aufnahmen zur Durchführung einer PSI-Analyse vor.

Im Rahmen der Archivrecherche zeigte sich zudem, dass keiner der verfügbaren Ascending-Orbits ausreichend viele Aufnahmen für eine PSI-Auswertung besitzt.

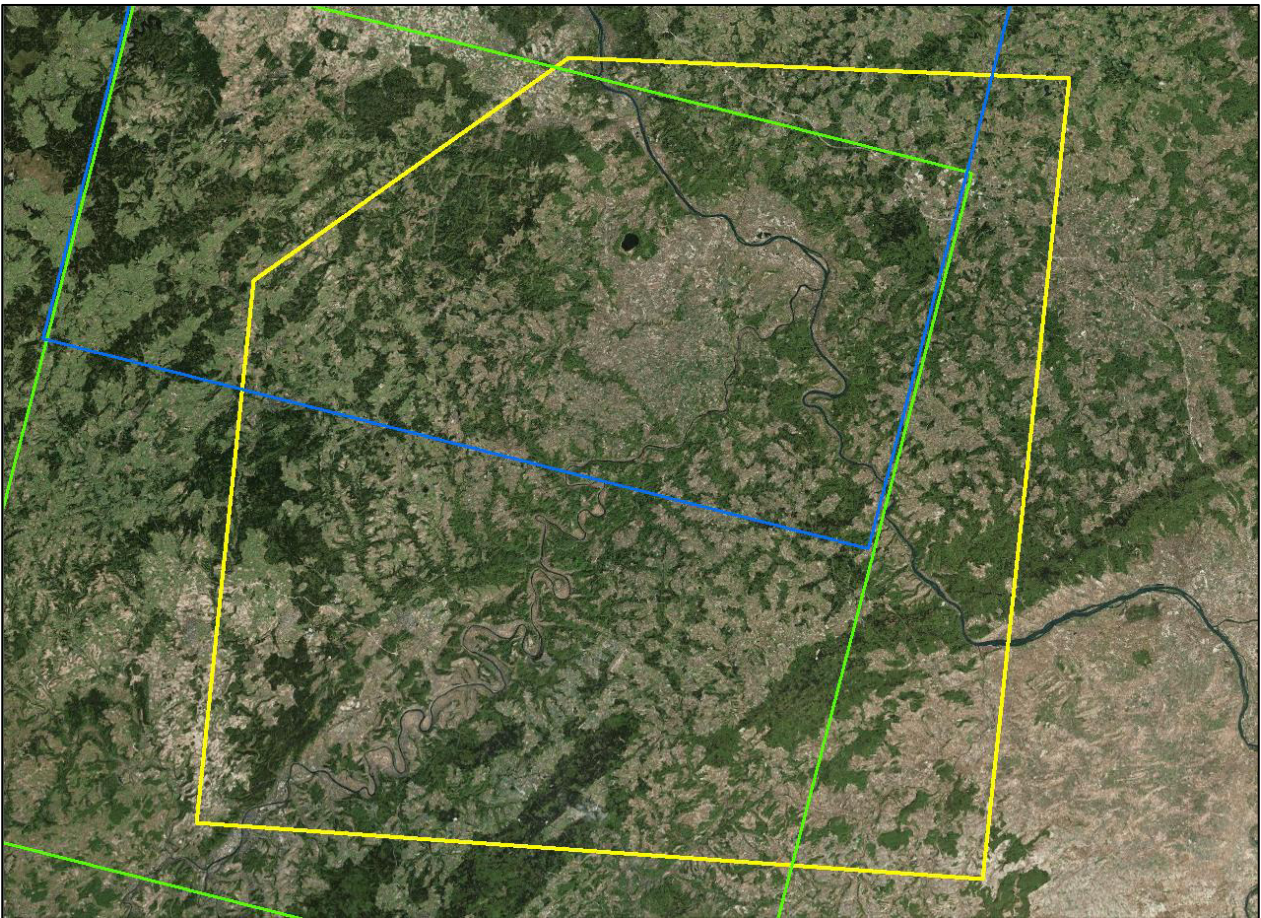


Abbildung 1: Übersicht des Projektgebiets und der Envisat-Abdeckung

### 3. ERS-1/ERS-2 – Descending orbits

Übersicht 2 zeigt die Abdeckung der „Descending Orbits“ der ERS-Satelliten. Der rote Rahmen markiert die Abdeckung des Tracks 337, die beiden blauen Rahmen die Abdeckung des Track 65. Auf der Basis beider Orbits war eine Abdeckung des gesamten Projektgebiets möglich.

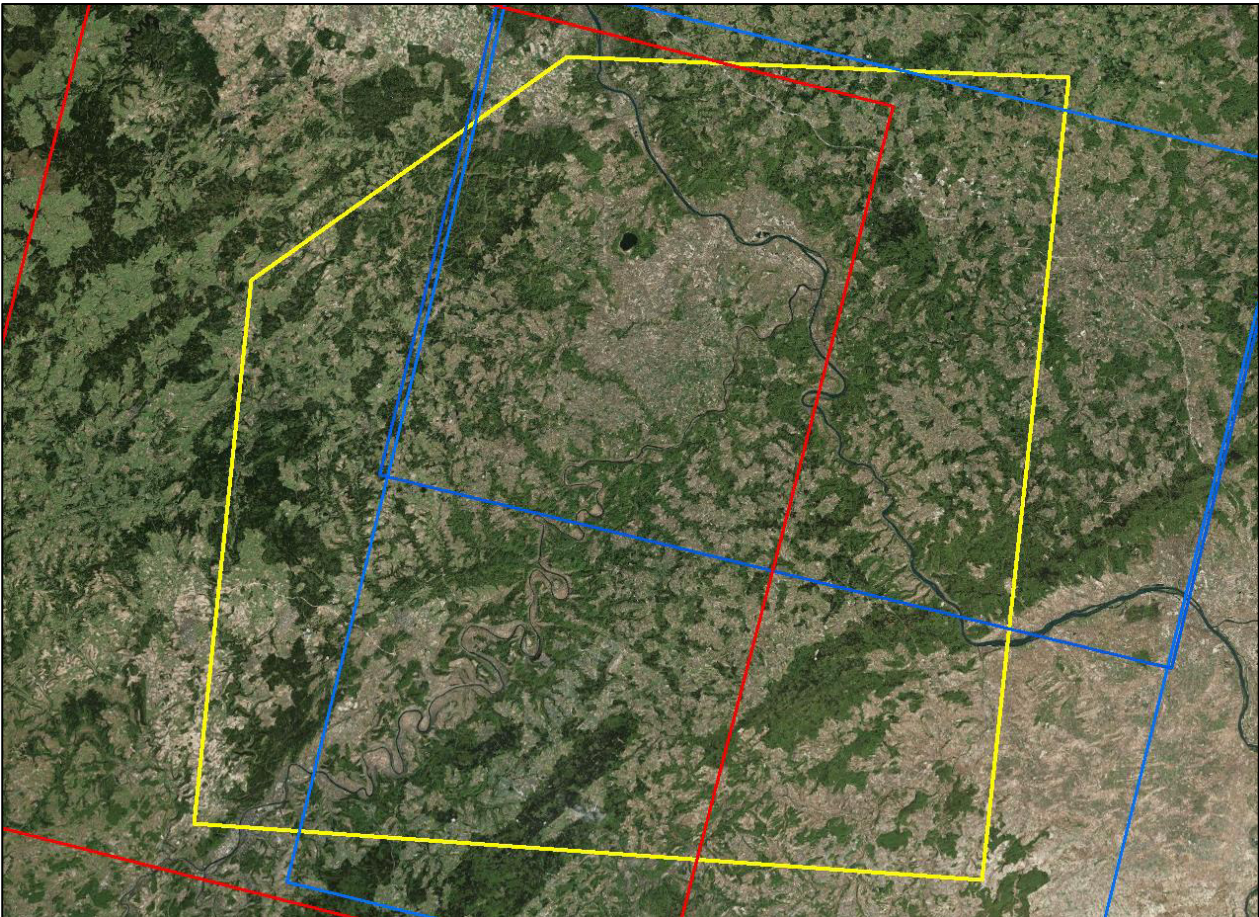


Abbildung 2: Übersicht der "Descending Orbits" der ERS-Satelliten

## 4. ERS-1/ERS-2 – Ascending Orbits

Abbildung 3 zeigt die Abdeckung des Tracks 29 (roter Rahmen), sowie des Tracks 487 (blauer Rahmen). Wie zu erkennen ist, ergibt sich zwischen den beiden Umlaufbahnen eine Lücke, welche auch nicht durch eine weitere Umlaufbahn aufgefüllt werden konnte.

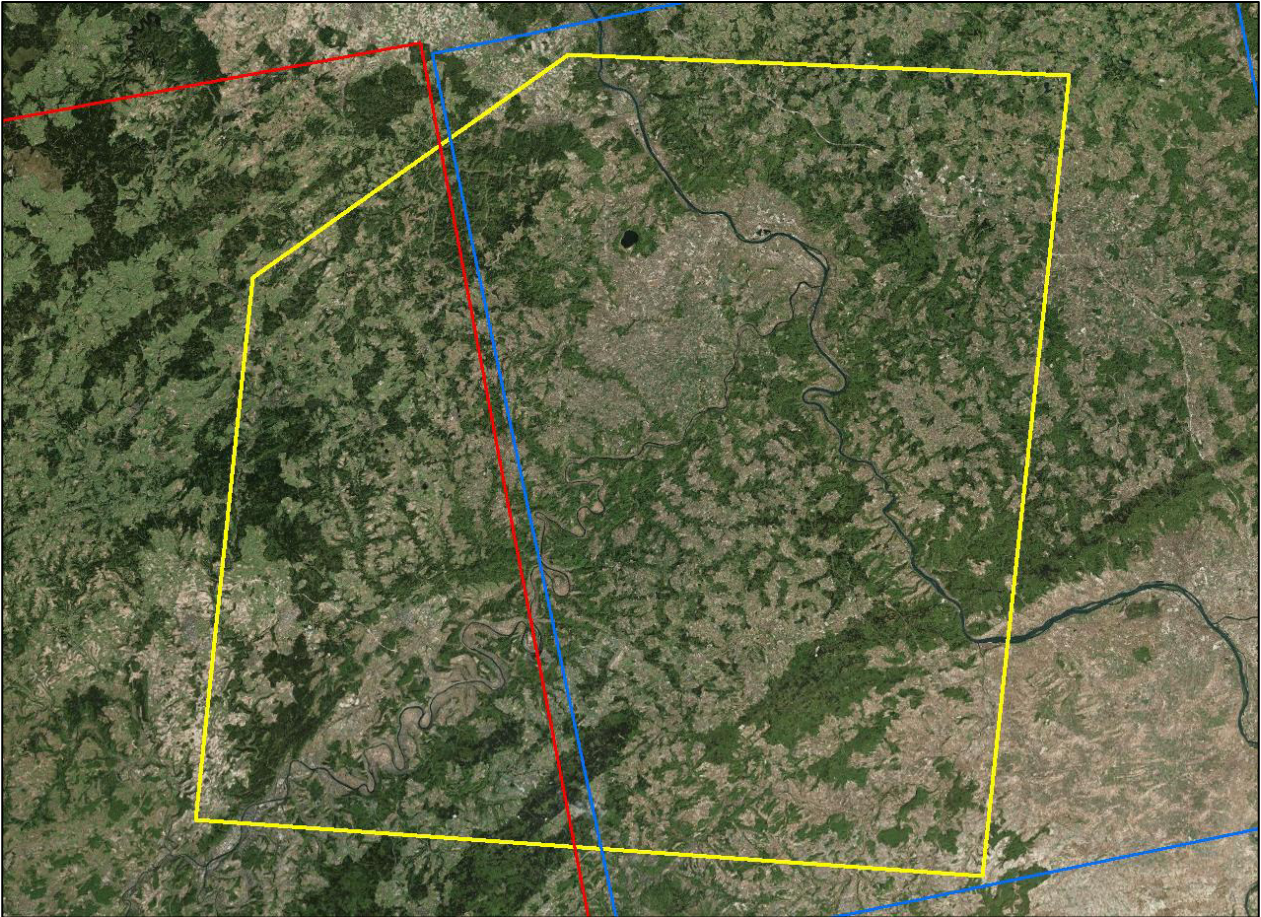


Abbildung 3: Übersicht der "Ascending Orbits" der ERS-Satelliten

# PROZESSIERUNGSBERICHT

---

PSInSAR-Prozessierung für das Untersuchungsgebiet  
in der Rhein-Mosel-Region

ERS-1/ERS-2 - Track 29

---

Michael Mares

05.09.2014



Bundesanstalt für  
Geowissenschaften und Rohstoffe

# TRIGIS

Die Welt der Geodaten

## Inhalt

1.	Erläuterungen zum Auswerteverfahren.....	3
1.1	RADAR-Fernerkundung.....	3
1.2	Synthetic Aperture Radar (SAR).....	3
1.3	Interferometrie.....	3
1.4	Persistent Scatterer-Analyse (PSInSAR).....	3
2.	Datengrundlage und Projektgebiet.....	4

## 1. Erläuterungen zum Auswerteverfahren

Zum besseren Verständnis der Ergebnisse werden im Folgenden kurz die theoretischen Grundlagen der SAR-Interferometrie erläutert.

### 1.1 RADAR-Fernerkundung

Das Auswertungsverfahren der SAR (Synthetic Aperture Radar) Interferometrie beruht auf der Analyse von Radio Detection and Ranging-Satellitenaufnahmen (RADAR). RADAR stellt ein sogenanntes aktives Aufnahmesystem dar, welches im Gegensatz zu passiven Systemen, die zu messende Strahlung selbst erzeugt. Das Verfahren ist somit von der Sonne unabhängig. Weiterhin kann die langwellige Radarstrahlung Wolken fast ungehindert passieren. Diese Eigenschaften ermöglichen es, im Gegensatz zu Luftbildern oder optischen Satellitenaufnahmen, tageszeit- und wetterunabhängig Aufnahmen eines Gebiets zu erstellen. Das System liefert daher mit hoher Zuverlässigkeit Informationen des Untersuchungsgebietes.

### 1.2 Synthetic Aperture Radar (SAR)

Klassische RADAR Systeme mit realer Apertur (RAR) unterliegen der Einschränkung, dass die Bodenauflösung abhängig von der Größe der Antenne des Satelliten ist. Ein Satellit würde für eine Bodenauflösung von wenigen Metern eine kilometerlange Antenne benötigen. Da ein solches System im Weltraum nicht stabil zu betreiben ist, bedient man sich der Methode des Radar mit synthetischer Apertur (SAR). Erreicht wird dies durch die Auswertung der Dopplerfrequenzverschiebung des Radar-Echos, welche durch die Mehrfachbeleuchtung jedes Bodenelements während des Überflugs entsteht. Auf eine weitere Beschreibung des Verfahrens wird an dieser Stelle verzichtet.

### 1.3 Interferometrie

Beim Empfang des von der Erdoberfläche reflektierten Radarsignals erfolgt parallel zur Aufzeichnung der Stärke des Radarechos auch die Aufzeichnung der Phase der elektro-magnetischen Strahlung. Die Phase stellt den Schwingungszustand des elektrischen Feldes dar. Dieser Schwingungszustand ist abhängig von der Entfernung des Satelliten zur Erdoberfläche, also der Weglänge vom Erdboden bis zur Antenne des Satelliten. Diese ändert sich aufgrund der Höhe der Erdoberfläche und eventueller Bodenbewegungen. Durch den Vergleich zweier SAR-Aufnahmen kann so für jedes Bildelement die entsprechende Phasenvarianz bestimmt werden.

Zusätzlich zu den RADAR-Informationen wird ein hochgenaues digitales Geländemodell (DGM) zur Eliminierung des Reliefeinfluss benötigt. Präzise Umlaufbahnparameter des Satelliten zum Zeitpunkt der Aufnahme ermöglichen eine hochgenaue Verortung der Aufnahmen. Die Darstellung der Phasenvarianzen für jedes Bildelement (Pixel) erfolgt in dem sogenannten Interferogramm.

### 1.4 Persistent Scatterer-Analyse (PSInSAR)

Unter Persistent Scatterer werden Punktstrahler mit einem besonders starken und zeitlich konstanten Rückstreusignal bezeichnet. Diese Punktstrahler befinden sich meist an künstlichen Objekten wie Gebäuden, Brücken usw., können jedoch auch natürlicher Herkunft sein und z.B. an größeren Felsen entstehen. Diese Punktstrahler besitzen eine besonders günstige Orientierung zum Satelliten, wodurch sie einen Großteil der einfallenden Radarstrahlung zum Sensor zurückstreuen. Der Punktstrahler kann eine Größe von wenigen Dezimetern haben, stellt jedoch für das entsprechen-

de Pixel, welches erheblich größer ist, das dominante Rückstreusignal dar. Phasenvarianzen lassen sich somit auf Bewegungen dieses einzelnen Punktes zurückführen. Die Punktrahler weisen zudem auch über Jahre hinweg eine hohe Kohärenz auf, so dass diese Punkte innerhalb einer Zeitreihe in jeder Aufnahme identifiziert und mit jeder anderen Aufnahme verglichen werden können.

Im Zuge der Auswertung erfolgt eine Atmosphärenkorrektur jeder Aufnahme, so dass die Genauigkeit der Bewegungsanalyse im Vergleich zur DInSAR-Auswertung deutlich gesteigert werden kann. Die Bewegungsangabe erfolgt in der Schrägsicht des Sensors.

## 2. Datengrundlage und Projektgebiet

- **Verwendeter Satellit und Orbit:**
  - ERS-1 & ERS-2, Ascending Orbit, Track 29
- **Verwendete Software und Datum der Prozessierung:**
  - SARscape, Version 5.0.001
  - Prozessierung erfolgte von August – September 2014
- **Auswertemethode:**
  - Persistent-Scatterer-Interferometrie (Erläuterung s.o.)
- **Zeitraum der Analyse:**
  - 11.04.1995 – 10.05.2000
- **Datumsangaben der verwendeten Satellitenszenen**  
11.04.1995, 20.06.1995, 25.07.1995, 03.10.1995, 04.10.1995, 26.03.1996, 30.04.1996,  
01.05.1996, 04.06.1996, 05.06.1996, 09.07.1996, 14.08.1996, 22.10.1996, 11.03.1997,  
16.04.1997, 20.05.1997, 21.05.1997, 25.06.1997, 29.07.1997, 30.07.1997, 03.09.1997,  
07.10.1997, 08.10.1997, 01.04.1998, 05.05.1998, 06.05.1998, 10.06.1998, 14.07.1998,  
19.08.1998, 22.09.1998, 23.09.1998, 05.01.1999, 06.01.1999, 09.02.1999, 20.04.1999,  
25.05.1999, 26.05.1999, 04.08.1999, 26.01.2000, 10.05.2000
- **Datum der Masterszene:**
  - 01.04.1998
- **Lage- und Höhengenaugigkeit der PS-Punkte:**
  - ~ 5 m



- Lage der Referenzpunkte: ID, Koordinaten in UTM, Zone 32 N

ID	Rechtswert	Hochwert
1	328828	5552622
2	340393	5560720
3	349521	5555019
4	333421	5567879
5	341268	5572193
6	355271	5571943
7	345133	5581934
8	340123	5586747
9	345133	5581934
10	329786	5514431
11	348451	5519227
12	348451	5519227
13	326752	5523354
14	335343	5535041
15	364726	5527758
16	330567	5538826
17	334663	5537637
18	356673	5542090

- Größe des Prozessierungsgebiets:
  - ~ 2.580 km<sup>2</sup>
- Anzahl der identifizierten PSI-Punkte
  - 196.731
- Durchschnittliche Dichte der PS-Punkte pro km<sup>2</sup>
  - 76
- Durchschnittliche jährliche Bewegungsrate für das gesamte Prozessierungsgebiet
  - -0,22 mm/Jahr
- Wertebereich der PS-Punkte, der als stabil angesehen werden kann
  - Das Ergebnis wurde hinsichtlich vorhandener Ausreißer und instabiler Punkte manuell bereinigt. Bei den vorhandenen Punkten handelt es sich somit um stabile PS-Punkte.
- Standardabweichung der durchschnittlichen jährlichen Bewegungsrate
  - 0,96 mm/Jahr
- Unkompensierte atmosphärische Fehler
  - Unkompensierte atmosphärische Fehler treten bei einzelnen Punktgruppen in Form von Sprüngen teils bis zu 25 mm zwischen zwei Aufnahmetermen auf. Die Auswirkungen auf die mittlere jährliche Punktbeziehung sind jedoch vernachlässigbar.

- Sichtbare Neigung oder Phasentrends
  - Es konnte kein signifikanter Phasentrend festgestellt werden.
- Gebiete, für welche keine Prozessierungsergebnisse vorliegen:
  - In Teilen der Nordeifel mit geringer Besiedlungsdichte konnten einzelne Dörfer mit nur sehr wenigen, oder keinen PSI-Punkten erfasst werden.
- Auffälligkeiten:
  - In kleinen, peripheren Ortslagen mit geringer PS-Punktdichte kann es zu stärkeren Schwankungen des Zeit-Bewegungsverlaufs kommen. Die Ursache liegt in stärkeren atmosphärischen Restfehlern, da in diesen Gebieten eine Kompensation der Atmosphäre nur begrenzt möglich ist.
- Erläuterungen zu der Spaltenbezeichnung in der Shapefile-Datei
  - ID: Individuelle Kennung jedes Punktes
  - X: Rechtswert (UTM 32 N, WGS84)
  - Y: Hochwert (UTM 32 N, WGS84)
  - Z: Höhe (Höhe über NN)
  - Velocity: Durchschnittliche jährliche Bewegungsrate [mm/Jahr]
  - Coherence: Kohärenz [Wertebereich >0 bis 1]
  - V\_Precision: Standardabweichung der durchschnittlichen jährlichen Bewegungsrate aufgrund unkompensierter atmosphärischer Fehler [mm/Jahr]
  - D\_JJJJMMTT: Bewegung [mm] für den jeweiligen Aufnahmetermin bezogen auf die erste Aufnahme (Nullmessung)

# PROZESSIERUNGSBERICHT

---

PSInSAR-Prozessierung für das Untersuchungsgebiet  
in der Rhein-Mosel-Region

ERS-1/ERS-2 - Track 487

---

Michael Mares

19.09.2014



Bundesanstalt für  
Geowissenschaften und Rohstoffe

# TRIGIS

Die Welt der Geodaten

## Inhalt

1.	Erläuterungen zum Auswerteverfahren .....	3
1.1	RADAR-Fernerkundung.....	3
1.2	Synthetic Aperture Radar (SAR) .....	3
1.3	Interferometrie .....	3
1.4	Persistent Scatterer-Analyse (PSInSAR).....	3
2.	Datengrundlage und Projektgebiet.....	4

## 1. Erläuterungen zum Auswerteverfahren

Zum besseren Verständnis der Ergebnisse werden im Folgenden kurz die theoretischen Grundlagen der SAR-Interferometrie erläutert.

### 1.1 RADAR-Fernerkundung

Das Auswertungsverfahren der SAR (Synthetic Aperture Radar) Interferometrie beruht auf der Analyse von Radio Detection and Ranging-Satellitenaufnahmen (RADAR). RADAR stellt ein sogenanntes aktives Aufnahmesystem dar, welches im Gegensatz zu passiven Systemen, die zu messende Strahlung selbst erzeugt. Das Verfahren ist somit von der Sonne unabhängig. Weiterhin kann die langwellige Radarstrahlung Wolken fast ungehindert passieren. Diese Eigenschaften ermöglichen es, im Gegensatz zu Luftbildern oder optischen Satellitenaufnahmen, tageszeit- und wetterunabhängig Aufnahmen eines Gebiets zu erstellen. Das System liefert daher mit hoher Zuverlässigkeit Informationen des Untersuchungsgebietes.

### 1.2 Synthetic Aperture Radar (SAR)

Klassische RADAR Systeme mit realer Apertur (RAR) unterliegen der Einschränkung, dass die Bodenauflösung abhängig von der Größe der Antenne des Satelliten ist. Ein Satellit würde für eine Bodenauflösung von wenigen Metern eine kilometerlange Antenne benötigen. Da ein solches System im Weltraum nicht stabil zu betreiben ist, bedient man sich der Methode des Radar mit synthetischer Apertur (SAR). Erreicht wird dies durch die Auswertung der Dopplerverschiebung des Radar-Echos, welche durch die Mehrfachbeleuchtung jedes Bodenelements während des Überflugs entsteht. Auf eine weitere Beschreibung des Verfahrens wird an dieser Stelle verzichtet.

### 1.3 Interferometrie

Beim Empfang des von der Erdoberfläche reflektierten Radarsignals erfolgt parallel zur Aufzeichnung der Stärke des Radarechos auch die Aufzeichnung der Phase der elektro-magnetischen Strahlung. Die Phase stellt den Schwingungszustand des elektrischen Feldes dar. Dieser Schwingungszustand ist abhängig von der Entfernung des Satelliten zur Erdoberfläche, also der Weglänge vom Erdboden bis zur Antenne des Satelliten. Diese ändert sich aufgrund der Höhe der Erdoberfläche und eventueller Bodenbewegungen. Durch den Vergleich zweier SAR-Aufnahmen kann so für jedes Bildelement die entsprechende Phasenvarianz bestimmt werden.

Zusätzlich zu den RADAR-Informationen wird ein hochgenaues digitales Geländemodell (DGM) zur Eliminierung des Reliefeinflusses benötigt. Präzise Umlaufbahnparameter des Satelliten zum Zeitpunkt der Aufnahme ermöglichen eine hochgenaue Verortung der Aufnahmen. Die Darstellung der Phasenvarianzen für jedes Bildelement (Pixel) erfolgt in dem sogenannten Interferogramm.

### 1.4 Persistent Scatterer-Analyse (PSInSAR)

Unter Persistent Scatterer werden Punktstrahler mit einem besonders starken und zeitlich konstanten Rückstreusignal bezeichnet. Diese Punktstrahler befinden sich meist an künstlichen Objekten wie Gebäuden, Brücken usw., können jedoch auch natürlicher Herkunft sein und z.B. an größeren Felsen entstehen. Diese Punktstrahler besitzen eine besonders günstige Orientierung zum Satelliten, wodurch sie einen Großteil der einfallenden Radarstrahlung zum Sensor zurückstreuen. Der Punktstrahler kann eine Größe von wenigen Dezimetern haben, stellt jedoch für das entsprechen-

de Pixel, welches erheblich größer ist, das dominante Rückstreusignal dar. Phasenvarianzen lassen sich somit auf Bewegungen dieses einzelnen Punktes zurückführen. Die Punktrahler weisen zudem auch über Jahre hinweg eine hohe Kohärenz auf, so dass diese Punkte innerhalb einer Zeitreihe in jeder Aufnahme identifiziert und mit jeder anderen Aufnahme verglichen werden können.

Im Zuge der Auswertung erfolgt eine Atmosphärenkorrektur jeder Aufnahme, so dass die Genauigkeit der Bewegungsanalyse im Vergleich zur DInSAR-Auswertung deutlich gesteigert werden kann. Die Bewegungsangabe erfolgt in der Schrägsicht des Sensors.

## 2. Datengrundlage und Projektgebiet

- **Verwendeter Satellit und Orbit:**
  - ERS-1 & ERS-2, Ascending Orbit, Track 487
- **Verwendete Software und Datum der Prozessierung:**
  - SARscape, Version 5.0.001
  - Prozessierung erfolgte von August – September 2014
- **Auswertemethode:**
  - Persistent-Scatterer-Interferometrie (Erläuterung s.o.)
- **Zeitraum der Analyse:**
  - 08.04.1995 – 11.06.2000
- **Datumsangaben der verwendeten Satellitenszenen**  
08.04.1995, 18.06.1995, 04.11.1995, 05.11.1995, 27.04.1996, 28.04.1996, 06.07.1996, 07.07.1996, 15.09.1996, 24.11.1996, 02.02.1997, 13.04.1997, 22.06.1997, 31.08.1997, 09.11.1997, 22.02.1998, 03.05.1998, 12.07.1998, 20.09.1998, 14.03.1999, 17.04.1999, 18.04.1999, 26.06.1999, 27.06.1999, 04.09.1999, 05.09.1999, 11.06.2000
- **Datum der Masterszene:**
  - 31.08.1997
- **Lage- und Höhengenaugigkeit der PS-Punkte:**
  - ~ 5 m
- **Lage der Referenzpunkte: ID, Koordinaten in UTM, Zone 32 N**

ID	Rechtswert	Hochwert
1	392242	5536255
2	411694	5533001
3	389345	5541283
4	397696	5543445
5	414677	5552215
6	385715	5555919
7	401998	5562429

8	413543	5562112
9	414060	5589696
10	420586	5590566
11	411702	5591414
12	417667	5591588
13	417728	5592578
14	405324	5599031
15	413885	5599934
16	421414	5597320
17	374047	5572897
18	379802	5580777
19	384506	5574984
20	367829	5585325
21	375609	5581526
22	388080	5587309
23	377574	5590967
24	381801	5595260
25	367000	5555168
26	385689	5555913
27	393847	5565571
28	373693	5567075
29	377125	5564579
30	373827	5577119
31	388076	5587308
32	404529	5581086
33	424512	5586006
34	427429	5586573
35	414056	5589695
36	420582	5590565
37	424597	5592599
38	402317	5603573
39	420591	5600349
40	423929	5603944
41	397778	5580108
42	407822	5576174
43	388071	5587307
44	394392	5585652
45	414074	5589698
46	381792	5595258
47	399272	5595417
48	402340	5603578
49	376597	5591140

50	385148	5590179
51	370670	5593971
52	369470	5600767
53	381752	5595248
54	361481	5600459
55	374007	5612890
56	383689	5610675
57	376615	5591140
58	399285	5595418
59	361602	5600484
60	377597	5599678
61	397534	5607642
62	360004	5611245
63	373920	5612872
64	387420	5609695
65	413017	5535114
66	423436	5537048
67	425632	5537415
68	411915	5545812
69	422193	5545684
70	408759	5553842
71	413511	5562106
72	425021	5552672
73	392196	5536245
74	399429	5544523
75	402391	5547910
76	414628	5552204
77	385639	5555903
78	413496	5562103
79	397357	5539088
80	389342	5541282
81	378499	5543942
82	382720	5543597
83	391594	5547287
84	374914	5563130
85	385714	5555918
86	391857	5557529
87	416761	5565347
88	422617	5563824
89	429818	5566939
90	412236	5570233
91	421629	5567536



92	409569	5576633
93	421811	5579730
94	424416	5585800
95	378499	5543942
96	384961	5548378
97	389358	5547955
98	373815	5554726
99	378628	5559228
100	385687	5555913
101	373693	5567075
102	377172	5564585
103	383715	5570121
104	383044	5538488
105	387557	5539775
106	382056	5542160
107	379623	5546250
108	382367	5547401
109	384959	5548377
110	384962	5557228
111	389741	5559611
112	391884	5562084
113	381639	5560647
114	393848	5565572
115	385938	5567975
116	387545	5565204
117	396607	5569446
118	384939	5548373
119	385664	5555908
120	374898	5563127
121	377182	5564587
122	384960	5557227
123	373693	5567075
124	376106	5570685
125	383779	5570134
126	386623	5587584
127	388091	5587311
128	377587	5590969
129	391240	5597438
130	401209	5596811
131	377604	5599686
132	395192	5599568
133	402354	5603581

134	384865	5511189
135	391140	5516453
136	393508	5514627
137	377951	5520957
138	390970	5523799
139	395635	5522521
140	378184	5533900
141	384494	5529028
142	392192	5536245
143	385679	5555911
144	405972	5567041
145	413516	5562107
146	387534	5565201
147	393897	5565582
148	383713	5570120
149	397732	5580094
150	407822	5576174
151	385709	5555917
152	391853	5557528
153	374914	5563130
154	384980	5557232
155	387563	5565207
156	373709	5567079
157	383741	5570122
158	390348	5579736
159	419574	5573781
160	423114	5574660
161	424598	5577157
162	421830	5579734
163	428976	5580115
164	418106	5582836
165	423909	5581365
166	429315	5582091
167	412305	5514226
168	403786	5515476
169	414578	5518113
170	411275	5521162
171	418943	5522196
172	378754	5507785
173	403786	5515477
174	377920	5520950
175	411843	5521345

176	382691	5536611
177	392217	5536250
178	401487	5540661
179	403786	5515476
180	414579	5518113
181	418943	5522196
182	392278	5536262
183	413114	5535138
184	416725	5528023
185	422263	5545698
186	377956	5520958
187	393492	5514624
188	403786	5515476
189	381530	5524866
190	385844	5533816
191	399475	5536712
192	377036	5535370
193	392247	5536256
194	394830	5537848

- Größe des Prozessierungsgebiets:
  - ~ 5.664 km<sup>2</sup>
- Anzahl der identifizierten PSI-Punkte
  - 196.793
- Durchschnittliche Dichte der PS-Punkte pro km<sup>2</sup>
  - 35
- Durchschnittliche jährliche Bewegungsrate für das gesamte Prozessierungsgebiet
  - 0,1 mm/Jahr
- Wertebereich der PS-Punkte, der als stabil angesehen werden kann
  - Das Ergebnis wurde hinsichtlich vorhandener Ausreißer und instabiler Punkte manuell bereinigt. Bei den vorhandenen Punkten handelt es sich somit um stabile PS-Punkte.
- Standardabweichung der durchschnittlichen jährlichen Bewegungsrate
  - 1,16 mm/Jahr
- Unkompensierte atmosphärische Fehler
  - Unkompensierte atmosphärische Fehler treten bei einzelnen Punktgruppen in Form von Sprüngen teils bis zu 25 mm zwischen zwei Aufnahmetermenin auf. Die Auswirkungen auf die mittlere jährliche Punktbeuwegung sind jedoch vernachlässigbar.
- Sichtbare Neigung oder Phasentrends
  - Es konnte kein signifikanter Phasentrend festgestellt werden.

- Gebiete, für welche keine Prozessierungsergebnisse vorliegen:
  - Einige Ortschaften weisen aufgrund der Beschaffenheit der Zeitreihe (geringe Anzahl der Aufnahmen, Verteilung der Aufnahmetermine) nur eine geringe PSI-Punktdichte, oder gar keine PSI-Punkte auf.
  
- Auffälligkeiten:
  - In kleinen, peripheren Ortslagen mit geringer PS-Punktdichte kann es zu stärkeren Schwankungen des Zeit-Bewegungsverlaufs kommen. Die Ursache liegt in stärkeren atmosphärischen Restfehlern, da in diesen Gebieten eine Kompensation der Atmosphäre nur begrenzt möglich ist.
  
- Erläuterungen zu der Spaltenbezeichnung in der Shapefile-Datei
  - OBJECTID: Individuelle Kennung jedes Punktes
  - X: Rechtswert (UTM 32 N, WGS84)
  - Y: Hochwert (UTM 32 N, WGS84)
  - Z: Höhe (Höhe über NN)
  - Velocity: Durchschnittliche jährliche Bewegungsrate [mm/Jahr]
  - Coherence: Kohärenz [Wertebereich >0 bis 1]
  - V\_Precision: Standardabweichung der durchschnittlichen jährlichen Bewegungsrate aufgrund unkompensierter atmosphärischer Fehler [mm/Jahr]
  - D\_JJJJMMTT: Bewegung [mm] für den jeweiligen Aufnahmetermin bezogen auf die erste Aufnahme (Nullmessung)

# PROZESSIERUNGSBERICHT

---

PSInSAR-Prozessierung für das Untersuchungsgebiet  
in der Rhein-Mosel-Region

Teilgebiet 1: ERS-1/ERS-2 - Track 337

---

Michael Mares

27.08.2014



Bundesanstalt für  
Geowissenschaften und Rohstoffe

# TRIGIS

Die Welt der Geodaten

## Inhalt

1.	Erläuterungen zum Auswerteverfahren.....	3
1.1	RADAR-Fernerkundung.....	3
1.2	Synthetic Aperture Radar (SAR).....	3
1.3	Interferometrie.....	3
1.4	Persistent Scatterer-Analyse (PSInSAR).....	3
2.	Datengrundlage und Projektgebiet.....	4

## 1. Erläuterungen zum Auswerteverfahren

Zum besseren Verständnis der Ergebnisse werden im Folgenden kurz die theoretischen Grundlagen der SAR-Interferometrie erläutert.

### 1.1 RADAR-Fernerkundung

Das Auswertungsverfahren der SAR (Synthetic Aperture Radar) Interferometrie beruht auf der Analyse von Radio Detection and Ranging-Satellitenaufnahmen (RADAR). RADAR stellt ein sogenanntes aktives Aufnahmesystem dar, welches im Gegensatz zu passiven Systemen, die zu messende Strahlung selbst erzeugt. Das Verfahren ist somit von der Sonne unabhängig. Weiterhin kann die langwellige Radarstrahlung Wolken fast ungehindert passieren. Diese Eigenschaften ermöglichen es, im Gegensatz zu Luftbildern oder optischen Satellitenaufnahmen, tageszeit- und wetterunabhängig Aufnahmen eines Gebiets zu erstellen. Das System liefert daher mit hoher Zuverlässigkeit Informationen des Untersuchungsgebietes.

### 1.2 Synthetic Aperture Radar (SAR)

Klassische RADAR Systeme mit realer Apertur (RAR) unterliegen der Einschränkung, dass die Bodenauflösung abhängig von der Größe der Antenne des Satelliten ist. Ein Satellit würde für eine Bodenauflösung von wenigen Metern eine kilometerlange Antenne benötigen. Da ein solches System im Weltraum nicht stabil zu betreiben ist, bedient man sich der Methode des Radar mit synthetischer Apertur (SAR). Erreicht wird dies durch die Auswertung der Dopplerfrequenzverschiebung des Radar-Echos, welche durch die Mehrfachbeleuchtung jedes Bodenelements während des Überflugs entsteht. Auf eine weitere Beschreibung des Verfahrens wird an dieser Stelle verzichtet.

### 1.3 Interferometrie

Beim Empfang des von der Erdoberfläche reflektierten Radarsignals erfolgt parallel zur Aufzeichnung der Stärke des Radarechos auch die Aufzeichnung der Phase der elektro-magnetischen Strahlung. Die Phase stellt den Schwingungszustand des elektrischen Feldes dar. Dieser Schwingungszustand ist abhängig von der Entfernung des Satelliten zur Erdoberfläche, also der Weglänge vom Erdboden bis zur Antenne des Satelliten. Diese ändert sich aufgrund der Höhe der Erdoberfläche und eventueller Bodenbewegungen. Durch den Vergleich zweier SAR-Aufnahmen kann so für jedes Bildelement die entsprechende Phasenvarianz bestimmt werden.

Zusätzlich zu den RADAR-Informationen wird ein hochgenaues digitales Geländemodell (DGM) zur Eliminierung des Reliefeinfluss benötigt. Präzise Umlaufbahnparameter des Satelliten zum Zeitpunkt der Aufnahme ermöglichen eine hochgenaue Verortung der Aufnahmen. Die Darstellung der Phasenvarianzen für jedes Bildelement (Pixel) erfolgt in dem sogenannten Interferogramm.

### 1.4 Persistent Scatterer-Analyse (PSInSAR)

Unter Persistent Scatterer werden Punktstrahler mit einem besonders starken und zeitlich konstanten Rückstreusignal bezeichnet. Diese Punktstrahler befinden sich meist an künstlichen Objekten wie Gebäuden, Brücken usw., können jedoch auch natürlicher Herkunft sein und z.B. an größeren Felsen entstehen. Diese Punktstrahler besitzen eine besonders günstige Orientierung zum Satelliten, wodurch sie einen Großteil der einfallenden Radarstrahlung zum Sensor zurückstreuen. Der Punktstrahler kann eine Größe von wenigen Dezimetern haben, stellt jedoch für das entsprechen-

de Pixel, welches erheblich größer ist, das dominante Rückstreusignal dar. Phasenvarianzen lassen sich somit auf Bewegungen dieses einzelnen Punktes zurückführen. Die Punktrahler weisen zudem auch über Jahre hinweg eine hohe Kohärenz auf, so dass diese Punkte innerhalb einer Zeitreihe in jeder Aufnahme identifiziert und mit jeder anderen Aufnahme verglichen werden können.

Im Zuge der Auswertung erfolgt eine Atmosphärenkorrektur jeder Aufnahme, so dass die Genauigkeit der Bewegungsanalyse im Vergleich zur DInSAR-Auswertung deutlich gesteigert werden kann. Die Bewegungsangabe erfolgt in der Schrägsicht des Sensors.

## 2. Datengrundlage und Projektgebiet

- **Verwendeter Satellit und Orbit:**
  - ERS-1 & ERS-2, Descending Orbit, Track 337
- **Verwendete Software und Datum der Prozessierung:**
  - SARscape, Version 5.0.001
  - Prozessierung erfolgte von Juli – August 2014
- **Auswertemethode:**
  - Persistent-Scatterer-Interferometrie (Erläuterung s.o.)
- **Zeitraum der Analyse:**
  - 03.05.1995 – 23.11.2000
- **Datumsangaben der verwendeten Satellitenszenen**  
03.05.1995, 07.06.1995, 12.07.1995, 17.08.1995, 21.09.1995, 26.10.1995, 30.11.1995,  
04.01.1996, 13.03.1996, 14.03.1996, 17.04.1996, 18.04.1996, 22.05.1996, 26.06.1996,  
01.08.1996, 05.09.1996, 10.10.1996, 14.11.1996, 19.12.1996, 23.01.1997, 27.02.1997,  
08.05.1997, 12.06.1997, 17.07.1997, 21.08.1997, 25.09.1997, 08.01.1998, 23.04.1998,  
28.05.1998, 02.07.1998, 06.08.1998, 10.09.1998, 15.10.1998, 28.01.1999, 03.03.1999,  
07.04.1999, 08.04.1999, 12.05.1999, 13.05.1999, 16.06.1999, 17.06.1999, 22.07.1999,  
26.08.1999, 30.09.1999, 09.12.1999, 13.01.2000, 16.02.2000, 23.03.2000, 27.04.2000,  
01.06.2000, 10.08.2000, 14.09.2000, 19.10.2000, 23.11.2000
- **Datum der Masterszene:**
  - 28.05.1998
- **Lage- und Höhengenaugigkeit der PS-Punkte:**
  - ~ 5 m



- Lage der Referenzpunkte: ID, Koordinaten in UTM, Zone 32 N

ID	Rechtswert	Hochwert
1	393646	5608803
2	389198	5610217
3	393646	5608803
4	402432	5604096
5	386447	5606379
6	374805	5609515
7	393791	5600147
8	388091	5602548
9	374885	5604531

- Größe des Prozessierungsgebiets:
  - ~ 315 km<sup>2</sup>
- Anzahl der identifizierten PSI-Punkte
  - 46.209
- Durchschnittliche Dichte der PS-Punkte pro km<sup>2</sup>
  - 147
- Durchschnittliche jährliche Bewegungsrate für das gesamte Prozessierungsgebiet
  - -0,36 mm/Jahr
- Wertebereich der PS-Punkte, der als stabil angesehen werden kann
  - Das Ergebnis wurde hinsichtlich vorhandener Ausreißer und instabiler Punkte manuell bereinigt. Bei den vorhandenen Punkten handelt es sich somit um stabile PS-Punkte.
- Standardabweichung der durchschnittlichen jährlichen Bewegungsrate
  - 1,0 mm/Jahr
- Unkompensierte atmosphärische Fehler
  - Unkompensierte atmosphärische Fehler treten bei einzelnen Punktgruppen in Form von Sprüngen teils bis zu 25 mm zwischen zwei Aufnahmetermen auf. Die Auswirkungen auf die mittlere jährliche Punktbewegung sind jedoch vernachlässigbar.
- Sichtbare Neigung oder Phasentrends
  - Es konnte kein signifikanter Phasentrend festgestellt werden.
- Gebiete, für welche keine Prozessierungsergebnisse vorliegen:
  - - / -
- Auffälligkeiten:
  - In kleinen, peripheren Ortslagen mit geringer PS-Punktdichte kann es zu stärkeren Schwankungen des Zeit-Bewegungsverlaufs kommen. Die Ursache liegt in stärkeren at-

mosphärischen Restfehlern, da in diesen Gebieten eine Kompensation der Atmosphäre nur begrenzt möglich ist.

■ Erläuterungen zu der Spaltenbezeichnung in der Shapefile-Datei

- ID: Individuelle Kennung jedes Punktes
- X: Rechtswert (UTM 32 N, WGS84)
- Y: Hochwert (UTM 32 N, WGS84)
- Z: Höhe (Höhe über NN)
- Velocity: Durchschnittliche jährliche Bewegungsrate [mm/Jahr]
- Coherence: Kohärenz [Wertebereich >0 bis 1]
- V\_Precision: Standardabweichung der durchschnittlichen jährlichen Bewegungsrate aufgrund unkompensierter atmosphärischer Fehler [mm/Jahr]
- D\_JJJMMTT: Bewegung [mm] für den jeweiligen Aufnahmetermin bezogen auf die erste Aufnahme (Nullmessung)

# PROZESSIERUNGSBERICHT

---

PSInSAR-Prozessierung für das Untersuchungsgebiet  
in der Rhein-Mosel-Region

Teilgebiet 2: ERS-1/ERS-2 - Track 337

---

Michael Mares

29.08.2014



Bundesanstalt für  
Geowissenschaften und Rohstoffe

# TRIGIS

Die Welt der Geodaten

## Inhalt

1.	Erläuterungen zum Auswerteverfahren.....	3
1.1	RADAR-Fernerkundung.....	3
1.2	Synthetic Aperture Radar (SAR).....	3
1.3	Interferometrie.....	3
1.4	Persistent Scatterer-Analyse (PSInSAR).....	3
2.	Datengrundlage und Projektgebiet.....	4

## 1. Erläuterungen zum Auswerteverfahren

Zum besseren Verständnis der Ergebnisse werden im Folgenden kurz die theoretischen Grundlagen der SAR-Interferometrie erläutert.

### 1.1 RADAR-Fernerkundung

Das Auswertungsverfahren der SAR (Synthetic Aperture Radar) Interferometrie beruht auf der Analyse von Radio Detection and Ranging-Satellitenaufnahmen (RADAR). RADAR stellt ein sogenanntes aktives Aufnahmesystem dar, welches im Gegensatz zu passiven Systemen, die zu messende Strahlung selbst erzeugt. Das Verfahren ist somit von der Sonne unabhängig. Weiterhin kann die langwellige Radarstrahlung Wolken fast ungehindert passieren. Diese Eigenschaften ermöglichen es, im Gegensatz zu Luftbildern oder optischen Satellitenaufnahmen, tageszeit- und wetterunabhängig Aufnahmen eines Gebiets zu erstellen. Das System liefert daher mit hoher Zuverlässigkeit Informationen des Untersuchungsgebietes.

### 1.2 Synthetic Aperture Radar (SAR)

Klassische RADAR Systeme mit realer Apertur (RAR) unterliegen der Einschränkung, dass die Bodenauflösung abhängig von der Größe der Antenne des Satelliten ist. Ein Satellit würde für eine Bodenauflösung von wenigen Metern eine kilometerlange Antenne benötigen. Da ein solches System im Weltraum nicht stabil zu betreiben ist, bedient man sich der Methode des Radar mit synthetischer Apertur (SAR). Erreicht wird dies durch die Auswertung der Dopplerverschiebung des Radar-Echos, welche durch die Mehrfachbeleuchtung jedes Bodenelements während des Überflugs entsteht. Auf eine weitere Beschreibung des Verfahrens wird an dieser Stelle verzichtet.

### 1.3 Interferometrie

Beim Empfang des von der Erdoberfläche reflektierten Radarsignals erfolgt parallel zur Aufzeichnung der Stärke des Radarechos auch die Aufzeichnung der Phase der elektro-magnetischen Strahlung. Die Phase stellt den Schwingungszustand des elektrischen Feldes dar. Dieser Schwingungszustand ist abhängig von der Entfernung des Satelliten zur Erdoberfläche, also der Weglänge vom Erdboden bis zur Antenne des Satelliten. Diese ändert sich aufgrund der Höhe der Erdoberfläche und eventueller Bodenbewegungen. Durch den Vergleich zweier SAR-Aufnahmen kann so für jedes Bildelement die entsprechende Phasenvarianz bestimmt werden.

Zusätzlich zu den RADAR-Informationen wird ein hochgenaues digitales Geländemodell (DGM) zur Eliminierung des Reliefeinflusses benötigt. Präzise Umlaufbahnparameter des Satelliten zum Zeitpunkt der Aufnahme ermöglichen eine hochgenaue Verortung der Aufnahmen. Die Darstellung der Phasenvarianzen für jedes Bildelement (Pixel) erfolgt in dem sogenannten Interferogramm.

### 1.4 Persistent Scatterer-Analyse (PSInSAR)

Unter Persistent Scatterer werden Punktstrahler mit einem besonders starken und zeitlich konstanten Rückstreusignal bezeichnet. Diese Punktstrahler befinden sich meist an künstlichen Objekten wie Gebäuden, Brücken usw., können jedoch auch natürlicher Herkunft sein und z.B. an größeren Felsen entstehen. Diese Punktstrahler besitzen eine besonders günstige Orientierung zum Satelliten, wodurch sie einen Großteil der einfallenden Radarstrahlung zum Sensor zurückstreuen. Der Punktstrahler kann eine Größe von wenigen Dezimetern haben, stellt jedoch für das entsprechen-

de Pixel, welches erheblich größer ist, das dominante Rückstreusignal dar. Phasenvarianzen lassen sich somit auf Bewegungen dieses einzelnen Punktes zurückführen. Die Punktrahler weisen zudem auch über Jahre hinweg eine hohe Kohärenz auf, so dass diese Punkte innerhalb einer Zeitreihe in jeder Aufnahme identifiziert und mit jeder anderen Aufnahme verglichen werden können.

Im Zuge der Auswertung erfolgt eine Atmosphärenkorrektur jeder Aufnahme, so dass die Genauigkeit der Bewegungsanalyse im Vergleich zur DInSAR-Auswertung deutlich gesteigert werden kann. Die Bewegungsangabe erfolgt in der Schrägsicht des Sensors.

## 2. Datengrundlage und Projektgebiet

- **Verwendeter Satellit und Orbit:**
  - ERS-1 & ERS-2, Descending Orbit, Track 337
- **Verwendete Software und Datum der Prozessierung:**
  - SARscape, Version 5.0.001
  - Prozessierung erfolgte von Juli – August 2014
- **Auswertemethode:**
  - Persistent-Scatterer-Interferometrie (Erläuterung s.o.)
- **Zeitraum der Analyse:**
  - 12.07.1995 – 28.12.2000
- **Datumsangaben der verwendeten Satellitenszenen**  
12.07.1995, 17.08.1995, 21.09.1995, 26.10.1995, 30.11.1995, 04.01.1996, 13.03.1996,  
14.03.1996, 17.04.1996, 18.04.1996, 22.05.1996, 26.06.1996, 31.07.1996, 01.08.1996,  
05.09.1996, 10.10.1996, 19.12.1996, 23.01.1997, 08.05.1997, 12.06.1997, 17.07.1997,  
21.08.1997, 25.09.1997, 30.10.1997, 12.02.1998, 19.03.1998, 23.04.1998, 28.05.1998,  
02.07.1998, 06.08.1998, 10.09.1998, 15.10.1998, 19.11.1998, 24.12.1998, 28.01.1999,  
03.03.1999, 04.03.1999, 07.04.1999, 08.04.1999, 12.05.1999, 13.05.1999, 16.06.1999,  
17.06.1999, 22.07.1999, 26.08.1999, 30.09.1999, 04.11.1999, 09.12.1999, 13.01.2000,  
16.02.2000, 17.02.2000, 23.03.2000, 27.04.2000, 01.06.2000, 10.08.2000, 14.09.2000,  
19.10.2000, 23.11.2000, 28.12.2000
- **Datum der Masterszene:**
  - 10.10.1996
- **Lage- und Höhengenaugigkeit der PS-Punkte:**
  - ~ 5 m

■ Lage der Referenzpunkte: ID, Koordinaten in UTM, Zone 32 N

ID	Rechtswert	Hochwert
1	366480	5605806
2	354619	5604434
3	354619	5604434
4	359468	5588404
5	345601	5594066
6	341706	5590492
7	360692	5572007
8	353670	5583115
9	339976	5586855
10	392374	5588021
11	388795	5587790
12	378686	5600930
13	391988	5585211
14	386009	5587488
15	374466	5575860
16	374466	5575860
17	374466	5575860
18	374466	5575860
19	360654	5572017
20	338599	5572071
21	335993	5575095
22	354145	5556959
23	340102	5558766
24	334925	5567245
25	353001	5539184
26	340100	5550753
27	327941	5555177
28	392364	5561517
29	382942	5567552
30	360674	5572011
31	385275	5533038
32	373482	5554793
33	373482	5554793
34	385275	5533038
35	369762	5543124
36	352970	5539192
37	349709	5541246
38	334906	5539345

39	330480	5538889
40	344675	5530357
41	338682	5524905
42	322520	5537179
43	349709	5541246
44	349709	5541246
45	349709	5541246
46	385268	5533040
47	364524	5532471
48	355311	5532698
49	383994	5514492
50	365488	5527014
51	361485	5528122
52	383994	5514492
53	383994	5514492
54	355039	5519699

- Größe des Prozessierungsgebiets:
  - ~ 3.180 km<sup>2</sup>
- Anzahl der identifizierten PSI-Punkte
  - 937.994
- Durchschnittliche Dichte der PS-Punkte pro km<sup>2</sup>
  - 295
- Durchschnittliche jährliche Bewegungsrate für das gesamte Prozessierungsgebiet
  - -0,25 mm/Jahr
- Wertebereich der PS-Punkte, der als stabil angesehen werden kann
  - Das Ergebnis wurde hinsichtlich vorhandener Ausreißer und instabiler Punkte manuell bereinigt. Bei den vorhandenen Punkten handelt es sich somit um stabile PS-Punkte.
- Standardabweichung der durchschnittlichen jährlichen Bewegungsrate
  - 2,25 mm/Jahr
- Unkompensierte atmosphärische Fehler
  - Unkompensierte atmosphärische Fehler treten bei einzelnen Punktgruppen in Form von Sprüngen teils bis zu 25 mm zwischen zwei Aufnahmetermen auf. Die Auswirkungen auf die mittlere jährliche Punktbeziehung sind jedoch vernachlässigbar.
- Sichtbare Neigung oder Phasentrends
  - Es konnte kein signifikanter Phasentrend festgestellt werden.
- Gebiete, für welche keine Prozessierungsergebnisse vorliegen:
  - - / -



- Auffälligkeiten:
  - In kleinen, peripheren Ortslagen mit geringer PS-Punktdichte kann es zu stärkeren Schwankungen des Zeit-Bewegungsverlaufs kommen. Die Ursache liegt in stärkeren atmosphärischen Restfehlern, da in diesen Gebieten eine Kompensation der Atmosphäre nur begrenzt möglich ist.
  
- Erläuterungen zu der Spaltenbezeichnung in der Shapefile-Datei
  - OBJECTID: Individuelle Kennung jedes Punktes
  - X: Rechtswert (UTM 32 N, WGS84)
  - Y: Hochwert (UTM 32 N, WGS84)
  - Z: Höhe (Höhe über NN)
  - Velocity: Durchschnittliche jährliche Bewegungsrate [mm/Jahr]
  - Coherence: Kohärenz [Wertebereich >0 bis 1]
  - V\_Precision: Standardabweichung der durchschnittlichen jährlichen Bewegungsrate aufgrund unkompensierter atmosphärischer Fehler [mm/Jahr]
  - D\_JJJMMTT: Bewegung [mm] für den jeweiligen Aufnahmetermin bezogen auf die erste Aufnahme (Nullmessung)

# PROZESSIERUNGSBERICHT

---

PSInSAR-Prozessierung für das Untersuchungsgebiet  
in der Rhein-Mosel-Region

Teilgebiet 3: ERS-1/ERS-2 - Track 337

---

Michael Mares

29.08.2014



Bundesanstalt für  
Geowissenschaften und Rohstoffe

# TRIGIS

Die Welt der Geodaten

## Inhalt

1.	Erläuterungen zum Auswerteverfahren.....	3
1.1	RADAR-Fernerkundung.....	3
1.2	Synthetic Aperture Radar (SAR).....	3
1.3	Interferometrie.....	3
1.4	Persistent Scatterer-Analyse (PSInSAR).....	3
2.	Datengrundlage und Projektgebiet.....	4

## 1. Erläuterungen zum Auswerteverfahren

Zum besseren Verständnis der Ergebnisse werden im Folgenden kurz die theoretischen Grundlagen der SAR-Interferometrie erläutert.

### 1.1 RADAR-Fernerkundung

Das Auswertungsverfahren der SAR (Synthetic Aperture Radar) Interferometrie beruht auf der Analyse von Radio Detection and Ranging-Satellitenaufnahmen (RADAR). RADAR stellt ein sogenanntes aktives Aufnahmesystem dar, welches im Gegensatz zu passiven Systemen, die zu messende Strahlung selbst erzeugt. Das Verfahren ist somit von der Sonne unabhängig. Weiterhin kann die langwellige Radarstrahlung Wolken fast ungehindert passieren. Diese Eigenschaften ermöglichen es, im Gegensatz zu Luftbildern oder optischen Satellitenaufnahmen, tageszeit- und wetterunabhängig Aufnahmen eines Gebiets zu erstellen. Das System liefert daher mit hoher Zuverlässigkeit Informationen des Untersuchungsgebietes.

### 1.2 Synthetic Aperture Radar (SAR)

Klassische RADAR Systeme mit realer Apertur (RAR) unterliegen der Einschränkung, dass die Bodenauflösung abhängig von der Größe der Antenne des Satelliten ist. Ein Satellit würde für eine Bodenauflösung von wenigen Metern eine kilometerlange Antenne benötigen. Da ein solches System im Weltraum nicht stabil zu betreiben ist, bedient man sich der Methode des Radar mit synthetischer Apertur (SAR). Erreicht wird dies durch die Auswertung der Dopplerfrequenzverschiebung des Radar-Echos, welche durch die Mehrfachbeleuchtung jedes Bodenelements während des Überflugs entsteht. Auf eine weitere Beschreibung des Verfahrens wird an dieser Stelle verzichtet.

### 1.3 Interferometrie

Beim Empfang des von der Erdoberfläche reflektierten Radarsignals erfolgt parallel zur Aufzeichnung der Stärke des Radarechos auch die Aufzeichnung der Phase der elektro-magnetischen Strahlung. Die Phase stellt den Schwingungszustand des elektrischen Feldes dar. Dieser Schwingungszustand ist abhängig von der Entfernung des Satelliten zur Erdoberfläche, also der Weglänge vom Erdboden bis zur Antenne des Satelliten. Diese ändert sich aufgrund der Höhe der Erdoberfläche und eventueller Bodenbewegungen. Durch den Vergleich zweier SAR-Aufnahmen kann so für jedes Bildelement die entsprechende Phasenvarianz bestimmt werden.

Zusätzlich zu den RADAR-Informationen wird ein hochgenaues digitales Geländemodell (DGM) zur Eliminierung des Reliefeinfluss benötigt. Präzise Umlaufbahnparameter des Satelliten zum Zeitpunkt der Aufnahme ermöglichen eine hochgenaue Verortung der Aufnahmen. Die Darstellung der Phasenvarianzen für jedes Bildelement (Pixel) erfolgt in dem sogenannten Interferogramm.

### 1.4 Persistent Scatterer-Analyse (PSInSAR)

Unter Persistent Scatterer werden Punktstrahler mit einem besonders starken und zeitlich konstanten Rückstreusignal bezeichnet. Diese Punktstrahler befinden sich meist an künstlichen Objekten wie Gebäuden, Brücken usw., können jedoch auch natürlicher Herkunft sein und z.B. an größeren Felsen entstehen. Diese Punktstrahler besitzen eine besonders günstige Orientierung zum Satelliten, wodurch sie einen Großteil der einfallenden Radarstrahlung zum Sensor zurückstreuen. Der Punktstrahler kann eine Größe von wenigen Dezimetern haben, stellt jedoch für das entsprechen-

de Pixel, welches erheblich größer ist, das dominante Rückstreusignal dar. Phasenvarianzen lassen sich somit auf Bewegungen dieses einzelnen Punktes zurückführen. Die Punktrahler weisen zudem auch über Jahre hinweg eine hohe Kohärenz auf, so dass diese Punkte innerhalb einer Zeitreihe in jeder Aufnahme identifiziert und mit jeder anderen Aufnahme verglichen werden können.

Im Zuge der Auswertung erfolgt eine Atmosphärenkorrektur jeder Aufnahme, so dass die Genauigkeit der Bewegungsanalyse im Vergleich zur DInSAR-Auswertung deutlich gesteigert werden kann. Die Bewegungsangabe erfolgt in der Schrägsicht des Sensors.

## 2. Datengrundlage und Projektgebiet

- **Verwendeter Satellit und Orbit:**
  - ERS-1 & ERS-2, Descending Orbit, Track 337
- **Verwendete Software und Datum der Prozessierung:**
  - SARscape, Version 5.0.001
  - Prozessierung erfolgte von Juli – August 2014
- **Auswertemethode:**
  - Persistent-Scatterer-Interferometrie (Erläuterung s.o.)
- **Zeitraum der Analyse:**
  - 12.07.1995 – 28.12.2000
- **Datumsangaben der verwendeten Satellitenszenen**  
12.07.1995, 17.08.1995, 21.09.1995, 26.10.1995, 30.11.1995, 04.01.1996, 13.03.1996,  
14.03.1996, 17.04.1996, 18.04.1996, 22.05.1996, 26.06.1996, 31.07.1996, 01.08.1996,  
05.09.1996, 10.10.1996, 19.12.1996, 23.01.1997, 08.05.1997, 12.06.1997, 17.07.1997,  
21.08.1997, 25.09.1997, 30.10.1997, 12.02.1998, 19.03.1998, 23.04.1998, 28.05.1998,  
02.07.1998, 06.08.1998, 10.09.1998, 15.10.1998, 19.11.1998, 24.12.1998, 28.01.1999,  
03.03.1999, 04.03.1999, 07.04.1999, 08.04.1999, 12.05.1999, 13.05.1999, 16.06.1999,  
17.06.1999, 22.07.1999, 26.08.1999, 30.09.1999, 04.11.1999, 13.01.2000, 16.02.2000,  
17.02.2000, 23.03.2000, 27.04.2000, 01.06.2000, 10.08.2000, 14.09.2000, 19.10.2000,  
23.11.2000, 28.12.2000
- **Datum der Masterszene:**
  - 10.10.1996
- **Lage- und Höhengenaugigkeit der PS-Punkte:**
  - ~ 5 m

- Lage der Referenzpunkte: ID, Koordinaten in UTM, Zone 32 N

ID	Rechtswert	Hochwert
1	348070	5515073
2	338122	5521497
3	338122	5521497
4	379954	5509265
5	348070	5515073
6	333739	5517582
7	369679	5505232
8	344772	5511786
9	330551	5514297

- Größe des Prozessierungsgebiets:
  - ~ 315 km<sup>2</sup>
- Anzahl der identifizierten PSI-Punkte
  - 44.707
- Durchschnittliche Dichte der PS-Punkte pro km<sup>2</sup>
  - 142
- Durchschnittliche jährliche Bewegungsrate für das gesamte Prozessierungsgebiet
  - -0,32 mm/Jahr
- Wertebereich der PS-Punkte, der als stabil angesehen werden kann
  - Das Ergebnis wurde hinsichtlich vorhandener Ausreißer und instabiler Punkte manuell bereinigt. Bei den vorhandenen Punkten handelt es sich somit um stabile PS-Punkte.
- Standardabweichung der durchschnittlichen jährlichen Bewegungsrate
  - 1,9 mm/Jahr
- Unkompensierte atmosphärische Fehler
  - Unkompensierte atmosphärische Fehler treten bei einzelnen Punktgruppen in Form von Sprüngen teils bis zu 25 mm zwischen zwei Aufnahmetermen auf. Die Auswirkungen auf die mittlere jährliche Punktbeziehung sind jedoch vernachlässigbar.
- Sichtbare Neigung oder Phasentrends
  - Es konnte kein signifikanter Phasentrend festgestellt werden.
- Gebiete, für welche keine Prozessierungsergebnisse vorliegen:
  - - / -

- Auffälligkeiten:
  - In kleinen, peripheren Ortslagen mit geringer PS-Punktdichte kann es zu stärkeren Schwankungen des Zeit-Bewegungsverlaufs kommen. Die Ursache liegt in stärkeren atmosphärischen Restfehlern, da in diesen Gebieten eine Kompensation der Atmosphäre nur begrenzt möglich ist.
  
- Erläuterungen zu der Spaltenbezeichnung in der Shapefile-Datei
  - ID: Individuelle Kennung jedes Punktes
  - X: Rechtswert (UTM 32 N, WGS84)
  - Y: Hochwert (UTM 32 N, WGS84)
  - Z: Höhe (Höhe über NN)
  - Velocity: Durchschnittliche jährliche Bewegungsrate [mm/Jahr]
  - Coherence: Kohärenz [Wertebereich >0 bis 1]
  - V\_Precision: Standardabweichung der durchschnittlichen jährlichen Bewegungsrate aufgrund unkompensierter atmosphärischer Fehler [mm/Jahr]
  - D\_JJJJMMTT: Bewegung [mm] für den jeweiligen Aufnahmetermin bezogen auf die erste Aufnahme (Nullmessung)

# PROZESSIERUNGSBERICHT

---

PSInSAR-Prozessierung für das Untersuchungsgebiet  
in der Rhein-Mosel-Region

Teilgebiet 1: ERS-1/ERS-2 - Track 65

---

Michael Mares

29.08.2014



Bundesanstalt für  
Geowissenschaften und Rohstoffe

# TRIGIS

Die Welt der Geodaten



## Inhalt

1.	Erläuterungen zum Auswerteverfahren.....	3
1.1	RADAR-Fernerkundung.....	3
1.2	Synthetic Aperture Radar (SAR).....	3
1.3	Interferometrie.....	3
1.4	Persistent Scatterer-Analyse (PSInSAR).....	3
2.	Datengrundlage und Projektgebiet.....	4

## 1. Erläuterungen zum Auswerteverfahren

Zum besseren Verständnis der Ergebnisse werden im Folgenden kurz die theoretischen Grundlagen der SAR-Interferometrie erläutert.

### 1.1 RADAR-Fernerkundung

Das Auswertungsverfahren der SAR (Synthetic Aperture Radar) Interferometrie beruht auf der Analyse von Radio Detection and Ranging-Satellitenaufnahmen (RADAR). RADAR stellt ein sogenanntes aktives Aufnahmesystem dar, welches im Gegensatz zu passiven Systemen, die zu messende Strahlung selbst erzeugt. Das Verfahren ist somit von der Sonne unabhängig. Weiterhin kann die langwellige Radarstrahlung Wolken fast ungehindert passieren. Diese Eigenschaften ermöglichen es, im Gegensatz zu Luftbildern oder optischen Satellitenaufnahmen, tageszeit- und wetterunabhängig Aufnahmen eines Gebiets zu erstellen. Das System liefert daher mit hoher Zuverlässigkeit Informationen des Untersuchungsgebietes.

### 1.2 Synthetic Aperture Radar (SAR)

Klassische RADAR Systeme mit realer Apertur (RAR) unterliegen der Einschränkung, dass die Bodenauflösung abhängig von der Größe der Antenne des Satelliten ist. Ein Satellit würde für eine Bodenauflösung von wenigen Metern eine kilometerlange Antenne benötigen. Da ein solches System im Weltraum nicht stabil zu betreiben ist, bedient man sich der Methode des Radar mit synthetischer Apertur (SAR). Erreicht wird dies durch die Auswertung der Dopplerfrequenzverschiebung des Radar-Echos, welche durch die Mehrfachbeleuchtung jedes Bodenelements während des Überflugs entsteht. Auf eine weitere Beschreibung des Verfahrens wird an dieser Stelle verzichtet.

### 1.3 Interferometrie

Beim Empfang des von der Erdoberfläche reflektierten Radarsignals erfolgt parallel zur Aufzeichnung der Stärke des Radarechos auch die Aufzeichnung der Phase der elektro-magnetischen Strahlung. Die Phase stellt den Schwingungszustand des elektrischen Feldes dar. Dieser Schwingungszustand ist abhängig von der Entfernung des Satelliten zur Erdoberfläche, also der Weglänge vom Erdboden bis zur Antenne des Satelliten. Diese ändert sich aufgrund der Höhe der Erdoberfläche und eventueller Bodenbewegungen. Durch den Vergleich zweier SAR-Aufnahmen kann so für jedes Bildelement die entsprechende Phasenvarianz bestimmt werden.

Zusätzlich zu den RADAR-Informationen wird ein hochgenaues digitales Geländemodell (DGM) zur Eliminierung des Reliefeinfluss benötigt. Präzise Umlaufbahnparameter des Satelliten zum Zeitpunkt der Aufnahme ermöglichen eine hochgenaue Verortung der Aufnahmen. Die Darstellung der Phasenvarianzen für jedes Bildelement (Pixel) erfolgt in dem sogenannten Interferogramm.

### 1.4 Persistent Scatterer-Analyse (PSInSAR)

Unter Persistent Scatterer werden Punktstrahler mit einem besonders starken und zeitlich konstanten Rückstreusignal bezeichnet. Diese Punktstrahler befinden sich meist an künstlichen Objekten wie Gebäuden, Brücken usw., können jedoch auch natürlicher Herkunft sein und z.B. an größeren Felsen entstehen. Diese Punktstrahler besitzen eine besonders günstige Orientierung zum Satelliten, wodurch sie einen Großteil der einfallenden Radarstrahlung zum Sensor zurückstreuen. Der Punktstrahler kann eine Größe von wenigen Dezimetern haben, stellt jedoch für das entsprechen-

de Pixel, welches erheblich größer ist, das dominante Rückstreusignal dar. Phasenvarianzen lassen sich somit auf Bewegungen dieses einzelnen Punktes zurückführen. Die Punktrahler weisen zudem auch über Jahre hinweg eine hohe Kohärenz auf, so dass diese Punkte innerhalb einer Zeitreihe in jeder Aufnahme identifiziert und mit jeder anderen Aufnahme verglichen werden können.

Im Zuge der Auswertung erfolgt eine Atmosphärenkorrektur jeder Aufnahme, so dass die Genauigkeit der Bewegungsanalyse im Vergleich zur DInSAR-Auswertung deutlich gesteigert werden kann. Die Bewegungsangabe erfolgt in der Schrägsicht des Sensors.

## 2. Datengrundlage und Projektgebiet

- **Verwendeter Satellit und Orbit:**
  - ERS-1 & ERS-2, Descending Orbit, Track 65
- **Verwendete Software und Datum der Prozessierung:**
  - SARscape, Version 5.1
  - Prozessierung erfolgte von Juli – August 2014
- **Auswertemethode:**
  - Persistent-Scatterer-Interferometrie (Erläuterung s.o.)
- **Zeitraum der Analyse:**
  - 14.04.1995 – 09.12.2000
- **Datumsangaben der verwendeten Satellitenszenen**  
14.04.1995, 19.05.1995, 28.07.1995, 02.09.1995, 07.10.1995, 10.11.1995, 11.11.1995,  
15.12.1995, 23.02.1996, 30.03.1996, 04.05.1996, 08.06.1996, 12.07.1996, 17.08.1996,  
30.11.1996, 04.01.1997, 08.02.1997, 15.03.1997, 19.04.1997, 24.05.1997, 28.06.1997,  
02.08.1997, 06.09.1997, 10.10.1997, 11.10.1997, 15.11.1997, 20.12.1997, 24.01.1998,  
28.02.1998, 04.04.1998, 09.05.1998, 13.06.1998, 18.07.1998, 22.08.1998, 26.09.1998,  
31.10.1998, 05.12.1998, 09.01.1999, 19.03.1999, 20.03.1999, 24.04.1999, 28.05.1999,  
29.05.1999, 02.07.1999, 03.07.1999, 06.08.1999, 07.08.1999, 11.09.1999, 16.10.1999,  
20.11.1999, 25.12.1999, 28.01.2000, 29.01.2000, 08.04.2000, 13.05.2000, 17.06.2000,  
22.07.2000, 26.08.2000, 30.09.2000, 04.11.2000, 09.12.2000
- **Datum der Masterszene:**
  - 15.11.1997
- **Lage- und Höhengenaugigkeit der PS-Punkte:**
  - ~ 5 m

■ Lage der Referenzpunkte: ID, Koordinaten in UTM, Zone 32 N

ID	Rechtswert	Hochwert
1	426979	5610649
2	426979	5610649
3	416187	5612486
4	416187	5612486
5	402760	5616189
6	402760	5616189
7	388819	5613963
8	388819	5613963
9	427850	5589698
10	426979	5610649
11	413571	5599522
12	407366	5602076
13	407366	5602076
14	395202	5608969
15	395202	5608969
16	388819	5613963
17	427850	5589698
18	427850	5589698
19	413571	5599522
20	407341	5594667
21	405111	5600446
22	395220	5604510
23	387785	5600368
24	387785	5600368
25	432286	5582024
26	427850	5589698
27	416075	5587612
28	407341	5594667
29	400262	5590155
30	391707	5594190
31	387509	5600130
32	387509	5600130
33	432286	5582024
34	417198	5587972
35	416075	5587612
36	405143	5586128
37	396614	5586859
38	392754	5585206
39	389348	5586270
40	389348	5586270

41	425423	5573108
42	414628	5574177
43	414628	5574177
44	402052	5582074
45	394813	5585688
46	392754	5585206
47	389348	5586270
48	380721	5583115
49	426880	5569067
50	414628	5574177
51	414628	5574177
52	402618	5571225
53	399390	5577680
54	390399	5579560
55	382341	5578311
56	380721	5583115

- Größe des Prozessierungsgebiets:
  - ~ 660 km<sup>2</sup>
- Anzahl der identifizierten PSI-Punkte
  - 155.015
- Durchschnittliche Dichte der PS-Punkte pro km<sup>2</sup>
  - 235
- Durchschnittliche jährliche Bewegungsrate für das gesamte Prozessierungsgebiet
  - -0,1 mm/Jahr
- Wertebereich der PS-Punkte, der als stabil angesehen werden kann
  - Das Ergebnis wurde hinsichtlich vorhandener Ausreißer und instabiler Punkte manuell bereinigt. Bei den vorhandenen Punkten handelt es sich somit um stabile PS-Punkte.
- Standardabweichung der durchschnittlichen jährlichen Bewegungsrate
  - 1,66 mm/Jahr
- Unkompensierte atmosphärische Fehler
  - Unkompensierte atmosphärische Fehler treten bei einzelnen Punktgruppen in Form von Sprüngen teils bis zu 25 mm zwischen zwei Aufnahmetermenin auf. Die Auswirkungen auf die mittlere jährliche Punktbeugung sind jedoch vernachlässigbar.
- Sichtbare Neigung oder Phasentrends
  - Es konnte kein signifikanter Phasentrend festgestellt werden.
- Gebiete, für welche keine Prozessierungsergebnisse vorliegen:
  - - / -

- Auffälligkeiten:
  - In kleinen, peripheren Ortslagen mit geringer PS-Punktdichte kann es zu stärkeren Schwankungen des Zeit-Bewegungsverlaufs kommen. Die Ursache liegt in stärkeren atmosphärischen Restfehlern, da in diesen Gebieten eine Kompensation der Atmosphäre nur begrenzt möglich ist.
  
- Erläuterungen zu der Spaltenbezeichnung in der Shapefile-Datei
  - OBJECTID: Individuelle Kennung jedes Punktes
  - X: Rechtswert (UTM 32 N, WGS84)
  - Y: Hochwert (UTM 32 N, WGS84)
  - Z: Höhe (Höhe über NN)
  - Velocity: Durchschnittliche jährliche Bewegungsrate [mm/Jahr]
  - Coherence: Kohärenz [Wertebereich >0 bis 1]
  - V\_Precision: Standardabweichung der durchschnittlichen jährlichen Bewegungsrate aufgrund unkompensierter atmosphärischer Fehler [mm/Jahr]
  - D\_JJJMMTT: Bewegung [mm] für den jeweiligen Aufnahmetermin bezogen auf die erste Aufnahme (Nullmessung)

# PROZESSIERUNGSBERICHT

---

PSInSAR-Prozessierung für das Untersuchungsgebiet  
in der Rhein-Mosel-Region

Teilgebiet 2: ERS-1/ERS-2 - Track 65

---

Michael Mares

29.08.2014



Bundesanstalt für  
Geowissenschaften und Rohstoffe

# TRIGIS

Die Welt der Geodaten

## Inhalt

1.	Erläuterungen zum Auswerteverfahren.....	3
1.1	RADAR-Fernerkundung.....	3
1.2	Synthetic Aperture Radar (SAR).....	3
1.3	Interferometrie.....	3
1.4	Persistent Scatterer-Analyse (PSInSAR).....	3
2.	Datengrundlage und Projektgebiet.....	4



## 1. Erläuterungen zum Auswerteverfahren

Zum besseren Verständnis der Ergebnisse werden im Folgenden kurz die theoretischen Grundlagen der SAR-Interferometrie erläutert.

### 1.1 RADAR-Fernerkundung

Das Auswertungsverfahren der SAR (Synthetic Aperture Radar) Interferometrie beruht auf der Analyse von Radio Detection and Ranging-Satellitenaufnahmen (RADAR). RADAR stellt ein sogenanntes aktives Aufnahmesystem dar, welches im Gegensatz zu passiven Systemen, die zu messende Strahlung selbst erzeugt. Das Verfahren ist somit von der Sonne unabhängig. Weiterhin kann die langwellige Radarstrahlung Wolken fast ungehindert passieren. Diese Eigenschaften ermöglichen es, im Gegensatz zu Luftbildern oder optischen Satellitenaufnahmen, tageszeit- und wetterunabhängig Aufnahmen eines Gebiets zu erstellen. Das System liefert daher mit hoher Zuverlässigkeit Informationen des Untersuchungsgebietes.

### 1.2 Synthetic Aperture Radar (SAR)

Klassische RADAR Systeme mit realer Apertur (RAR) unterliegen der Einschränkung, dass die Bodenauflösung abhängig von der Größe der Antenne des Satelliten ist. Ein Satellit würde für eine Bodenauflösung von wenigen Metern eine kilometerlange Antenne benötigen. Da ein solches System im Weltraum nicht stabil zu betreiben ist, bedient man sich der Methode des Radar mit synthetischer Apertur (SAR). Erreicht wird dies durch die Auswertung der Dopplerfrequenzverschiebung des Radar-Echos, welche durch die Mehrfachbeleuchtung jedes Bodenelements während des Überflugs entsteht. Auf eine weitere Beschreibung des Verfahrens wird an dieser Stelle verzichtet.

### 1.3 Interferometrie

Beim Empfang des von der Erdoberfläche reflektierten Radarsignals erfolgt parallel zur Aufzeichnung der Stärke des Radarechos auch die Aufzeichnung der Phase der elektro-magnetischen Strahlung. Die Phase stellt den Schwingungszustand des elektrischen Feldes dar. Dieser Schwingungszustand ist abhängig von der Entfernung des Satelliten zur Erdoberfläche, also der Weglänge vom Erdboden bis zur Antenne des Satelliten. Diese ändert sich aufgrund der Höhe der Erdoberfläche und eventueller Bodenbewegungen. Durch den Vergleich zweier SAR-Aufnahmen kann so für jedes Bildelement die entsprechende Phasenvarianz bestimmt werden.

Zusätzlich zu den RADAR-Informationen wird ein hochgenaues digitales Geländemodell (DGM) zur Eliminierung des Reliefeinfluss benötigt. Präzise Umlaufbahnparameter des Satelliten zum Zeitpunkt der Aufnahme ermöglichen eine hochgenaue Verortung der Aufnahmen. Die Darstellung der Phasenvarianzen für jedes Bildelement (Pixel) erfolgt in dem sogenannten Interferogramm.

### 1.4 Persistent Scatterer-Analyse (PSInSAR)

Unter Persistent Scatterer werden Punktstrahler mit einem besonders starken und zeitlich konstanten Rückstreusignal bezeichnet. Diese Punktstrahler befinden sich meist an künstlichen Objekten wie Gebäuden, Brücken usw., können jedoch auch natürlicher Herkunft sein und z.B. an größeren Felsen entstehen. Diese Punktstrahler besitzen eine besonders günstige Orientierung zum Satelliten, wodurch sie einen Großteil der einfallenden Radarstrahlung zum Sensor zurückstreuen. Der Punktstrahler kann eine Größe von wenigen Dezimetern haben, stellt jedoch für das entsprechen-

de Pixel, welches erheblich größer ist, das dominante Rückstreusignal dar. Phasenvarianzen lassen sich somit auf Bewegungen dieses einzelnen Punktes zurückführen. Die Punktrahler weisen zudem auch über Jahre hinweg eine hohe Kohärenz auf, so dass diese Punkte innerhalb einer Zeitreihe in jeder Aufnahme identifiziert und mit jeder anderen Aufnahme verglichen werden können.

Im Zuge der Auswertung erfolgt eine Atmosphärenkorrektur jeder Aufnahme, so dass die Genauigkeit der Bewegungsanalyse im Vergleich zur DInSAR-Auswertung deutlich gesteigert werden kann. Die Bewegungsangabe erfolgt in der Schrägsicht des Sensors.

## 2. Datengrundlage und Projektgebiet

- **Verwendeter Satellit und Orbit:**
  - ERS-1 & ERS-2, Descending Orbit, Track 65
- **Verwendete Software und Datum der Prozessierung:**
  - SARscape, Version 5.1
  - Prozessierung erfolgte von Juli – August 2014
- **Auswertemethode:**
  - Persistent-Scatterer-Interferometrie (Erläuterung s.o.)
- **Zeitraum der Analyse:**
  - 14.04.1995 – 09.12.2000
- **Datumsangaben der verwendeten Satellitenszenen**  
14.04.1995, 19.05.1995, 28.07.1995, 02.09.1995, 06.10.1995, 07.10.1995, 10.11.1995, 11.11.1995, 15.12.1995, 16.12.1995, 23.02.1996, 24.02.1996, 29.03.1996, 30.03.1996, 04.05.1996, 08.06.1996, 12.07.1996, 17.08.1996, 30.11.1996, 04.01.1997, 08.02.1997, 15.03.1997, 19.04.1997, 24.05.1997, 28.06.1997, 02.08.1997, 06.09.1997, 10.10.1997, 11.10.1997, 15.11.1997, 20.12.1997, 24.01.1998, 28.02.1998, 04.04.1998, 09.05.1998, 13.06.1998, 18.07.1998, 22.08.1998, 26.09.1998, 31.10.1998, 05.12.1998, 09.01.1999, 19.03.1999, 20.03.1999, 24.04.1999, 28.05.1999, 29.05.1999, 02.07.1999, 03.07.1999, 06.08.1999, 07.08.1999, 11.09.1999, 16.10.1999, 20.11.1999, 25.12.1999, 28.01.2000, 29.01.2000, 08.04.2000, 13.05.2000, 17.06.2000, 22.07.2000, 26.08.2000, 30.09.2000, 04.11.2000, 09.12.2000
- **Datum der Masterszene:**
  - 15.11.1997
- **Lage- und Höhengenaugigkeit der PS-Punkte:**
  - ~ 5 m

■ Lage der Referenzpunkte: ID, Koordinaten in UTM, Zone 32 N

ID	Rechtswert	Hochwert
1	440543	5583065
2	440543	5583065
3	440543	5583065
4	440543	5583065
5	440543	5583065
6	440543	5583065
7	440543	5583065
8	440543	5583065
9	440543	5583065
10	440543	5583065
11	440543	5583065
12	440543	5583065
13	433249	5576355
14	432631	5577586
15	429059	5580380
16	423149	5581370
17	423149	5581370
18	417976	5583082
19	415643	5582862
20	407714	5584910
21	406808	5584481
22	405148	5586129
23	399587	5587207
24	398612	5587433
25	433249	5576355
26	433247	5576356
27	426849	5577356
28	421124	5577317
29	421124	5577317
30	418433	5579417
31	410782	5581087
32	409119	5578484
33	408077	5581992
34	400718	5582733
35	398869	5583078
36	397817	5582620
37	433759	5571285

38	433346	5573398
39	425423	5573110
40	425423	5573110
41	422558	5575977
42	414606	5574184
43	414155	5574998
44	409338	5576047
45	402674	5578981
46	400713	5578495
47	396681	5580293
48	396681	5580293
49	433341	5566023
50	426865	5569073
51	426280	5568831
52	419983	5571849
53	419983	5571849
54	414606	5574184
55	414104	5574716
56	409338	5576047
57	403676	5574178
58	400248	5576136
59	399913	5577714
60	395981	5575174
61	432677	5564168
62	429957	5565843
63	425599	5567140
64	419345	5567845
65	415363	5565992
66	413401	5567915
67	411909	5566962
68	408668	5571966
69	402629	5571225
70	401460	5574282
71	395981	5575174
72	395981	5575174
73	432637	5559886
74	430105	5563332
75	423034	5561635
76	419685	5562384
77	416491	5564289
78	412953	5564180
79	411909	5566962

80	405915	5566901
81	403466	5569753
82	399249	5568215
83	393931	5569334
84	393928	5569335
85	430155	5557473
86	426233	5558714
87	423034	5561635
88	418425	5561215
89	418425	5561215
90	412953	5564180
91	410271	5564062
92	402655	5562096
93	399650	5565182
94	399650	5565182
95	393775	5566261
96	393928	5569335
97	431208	5554077
98	424479	5555313
99	420513	5554033
100	417051	5557796
101	414791	5557718
102	408781	5557977
103	407838	5556989
104	403384	5560103
105	401818	5561876
106	395362	5560101
107	392341	5561514
108	392448	5562943
109	427437	5550761
110	427437	5550761
111	420513	5554033
112	414647	5552612
113	411954	5553770
114	409051	5555290
115	409051	5555290
116	406096	5558115
117	396887	5555905
118	395697	5556658
119	392341	5561514
120	392341	5561514
121	429560	5549034

122	420650	5549921
123	420650	5549921
124	414645	5552613
125	413978	5552354
126	409333	5550681
127	407843	5550223
128	402659	5554158
129	396887	5555905
130	395697	5556658
131	392414	5557894
132	392414	5557894
133	424706	5543548
134	420646	5545057
135	420646	5545057
136	415855	5545028
137	411770	5546052
138	409333	5550681
139	407843	5550223
140	402325	5548036
141	396906	5551509
142	394856	5553940
143	391738	5553844
144	391738	5553844
145	428301	5539490
146	424788	5538304
147	417250	5540742
148	415855	5545028
149	411770	5546052
150	406908	5547417
151	402325	5548036
152	402325	5548036
153	397513	5545480
154	391824	5547727
155	389055	5547808
156	440543	5583065
157	424389	5535292
158	421889	5535724
159	418686	5537699
160	416038	5541366
161	410574	5542798
162	405538	5539273
163	401208	5540583

164	401208	5540583
165	397513	5545480
166	391824	5547727
167	389057	5547807
168	440543	5583065
169	422756	5533924
170	420629	5535140
171	420062	5535267
172	415637	5535937
173	410143	5536068
174	405538	5539273
175	401208	5540583
176	397114	5537783
177	394936	5540852
178	391845	5541417
179	389042	5543731
180	440543	5583065
181	423903	5532022
182	421040	5528599
183	416121	5533932
184	413701	5532950
185	411324	5533790
186	402895	5537626
187	399663	5536851
188	397114	5537783
189	393158	5538756
190	393161	5538755
191	387096	5537714
192	440543	5583065
193	422106	5528960
194	421040	5528599
195	415001	5528892
196	411377	5526990
197	408966	5528027
198	411324	5533790
199	395248	5532298
200	395248	5532298
201	395248	5532298
202	390377	5535201
203	386074	5533193
204	440543	5583065
205	420072	5523455

206	419693	5523822
207	416175	5524447
208	411377	5526990
209	408966	5528027
210	401946	5525812
211	401946	5525812
212	395248	5532298
213	392612	5530007
214	388640	5530662
215	386074	5533193
216	440543	5583065
217	419994	5521424
218	419991	5521425
219	414292	5522184
220	408765	5520835
221	408176	5521004
222	402256	5522812
223	399998	5524196
224	393062	5523979
225	389697	5526825
226	389697	5526825
227	386014	5528959
228	440543	5583065
229	420875	5517377
230	416417	5518086
231	412354	5517549
232	408765	5520835
233	408176	5521004
234	402256	5522812
235	399875	5523801
236	394740	5522184
237	393062	5523979
238	385939	5525808
239	385939	5525808
240	440543	5583065
241	420417	5514404
242	414100	5514157
243	414100	5514157
244	407716	5516772
245	407716	5516772
246	401482	5515777
247	398197	5517250



248	393592	5518793
249	392483	5517540
250	385382	5521507
251	385382	5521507
252	440543	5583065
253	415700	5512582
254	415700	5512582
255	409827	5513385
256	406650	5513424
257	406650	5513424
258	401482	5515777
259	396098	5516943
260	392487	5517539
261	388771	5515531
262	387681	5517250
263	384751	5520362
264	440543	5583065
265	440543	5583065
266	440543	5583065
267	440543	5583065
268	440543	5583065
269	440543	5583065
270	440543	5583065
271	392707	5514695
272	392707	5514695
273	388771	5515531
274	385716	5515520
275	382245	5516981
276	440543	5583065
277	440543	5583065
278	440543	5583065
279	440543	5583065
280	440543	5583065
281	440543	5583065
282	440543	5583065
283	440543	5583065
284	440543	5583065
285	440543	5583065
286	440543	5583065
287	440543	5583065
288	440543	5583065
289	440543	5583065

290	440543	5583065
291	440543	5583065
292	440543	5583065
293	440543	5583065
294	440543	5583065
295	440543	5583065
296	440543	5583065
297	440543	5583065
298	440543	5583065
299	440543	5583065
300	440543	5583065

- Größe des Prozessierungsgebiets:
  - ~ 2.659 km<sup>2</sup>
- Anzahl der identifizierten PSI-Punkte
  - 478.907
- Durchschnittliche Dichte der PS-Punkte pro km<sup>2</sup>
  - 180
- Durchschnittliche jährliche Bewegungsrate für das gesamte Prozessierungsgebiet
  - -0,24 mm/Jahr
- Wertebereich der PS-Punkte, der als stabil angesehen werden kann
  - Das Ergebnis wurde hinsichtlich vorhandener Ausreißer und instabiler Punkte manuell bereinigt. Bei den vorhandenen Punkten handelt es sich somit um stabile PS-Punkte.
- Standardabweichung der durchschnittlichen jährlichen Bewegungsrate
  - 1,71 mm/Jahr
- Unkompensierte atmosphärische Fehler
  - Unkompensierte atmosphärische Fehler treten bei einzelnen Punktgruppen in Form von Sprüngen teils bis zu 25 mm zwischen zwei Aufnahmetermen auf. Die Auswirkungen auf die mittlere jährliche Punktbewegung sind jedoch vernachlässigbar.
- Sichtbare Neigung oder Phasentrends
  - Es konnte kein signifikanter Phasentrend festgestellt werden.
- Gebiete, für welche keine Prozessierungsergebnisse vorliegen:
  - - / -
- Auffälligkeiten:
  - In kleinen, peripheren Ortslagen mit geringer PS-Punktdichte kann es zu stärkeren Schwankungen des Zeit-Bewegungsverlaufs kommen. Die Ursache liegt in stärkeren atmosphärischen Restfehlern, da in diesen Gebieten eine Kompensation der Atmosphäre nur begrenzt möglich ist.

- Erläuterungen zu der Spaltenbezeichnung in der Shapefile-Datei
  - OBJECTID: Individuelle Kennung jedes Punktes
  - X: Rechtswert (UTM 32 N, WGS84)
  - Y: Hochwert (UTM 32 N, WGS84)
  - Z: Höhe (Höhe über NN)
  - Velocity: Durchschnittliche jährliche Bewegungsrate [mm/Jahr]
  - Coherence: Kohärenz [Wertebereich >0 bis 1]
  - V\_Precision: Standardabweichung der durchschnittlichen jährlichen Bewegungsrate aufgrund unkompensierter atmosphärischer Fehler [mm/Jahr]
  - D\_JJJMMTT: Bewegung [mm] für den jeweiligen Aufnahmeterrin bezogen auf die erste Aufnahme (Nullmessung)

# PROZESSIERUNGSBERICHT

---

PSInSAR-Prozessierung für das Untersuchungsgebiet  
in der Rhein-Mosel-Region

Teilgebiet 1: Envisat - Track 337

---

Stand: Juli 2014

Michael Mares

31.07.2014



Bundesanstalt für  
Geowissenschaften und Rohstoffe

# TRIGIS

Die Welt der Geodaten

## Inhalt

1.	Erläuterungen zum Auswerteverfahren .....	3
1.1	RADAR-Fernerkundung.....	3
1.2	Synthetic Aperture Radar (SAR) .....	3
1.3	Interferometrie .....	3
1.4	Persistent Scatterer-Analyse (PSInSAR).....	3
2.	Datengrundlage und Projektgebiet.....	4

## 1. Erläuterungen zum Auswerteverfahren

Zum besseren Verständnis der Ergebnisse werden im Folgenden kurz die theoretischen Grundlagen der SAR-Interferometrie erläutert.

### 1.1 RADAR-Fernerkundung

Das Auswertungsverfahren der SAR (Synthetic Aperture Radar) Interferometrie beruht auf der Analyse von Radio Detection and Ranging-Satellitenaufnahmen (RADAR). RADAR stellt ein sogenanntes aktives Aufnahmesystem dar, welches im Gegensatz zu passiven Systemen, die zu messende Strahlung selbst erzeugt. Das Verfahren ist somit von der Sonne unabhängig. Weiterhin kann die langwellige Radarstrahlung Wolken fast ungehindert passieren. Diese Eigenschaften ermöglichen es, im Gegensatz zu Luftbildern oder optischen Satellitenaufnahmen, tageszeit- und wetterunabhängig Aufnahmen eines Gebiets zu erstellen. Das System liefert daher mit hoher Zuverlässigkeit Informationen des Untersuchungsgebietes.

### 1.2 Synthetic Aperture Radar (SAR)

Klassische RADAR Systeme mit realer Apertur (RAR) unterliegen der Einschränkung, dass die Bodenauflösung abhängig von der Größe der Antenne des Satelliten ist. Ein Satellit würde für eine Bodenauflösung von wenigen Metern eine kilometerlange Antenne benötigen. Da ein solches System im Weltraum nicht stabil zu betreiben ist, bedient man sich der Methode des Radar mit synthetischer Apertur (SAR). Erreicht wird dies durch die Auswertung der Dopplereffektverschiebung des Radar-Echos, welche durch die Mehrfachbeleuchtung jedes Bodenelements während des Überflugs entsteht. Auf eine weitere Beschreibung des Verfahrens wird an dieser Stelle verzichtet.

### 1.3 Interferometrie

Beim Empfang des von der Erdoberfläche reflektierten Radarsignals erfolgt parallel zur Aufzeichnung der Stärke des Radarechos auch die Aufzeichnung der Phase der elektro-magnetischen Strahlung. Die Phase stellt den Schwingungszustand des elektrischen Feldes dar. Dieser Schwingungszustand ist abhängig von der Entfernung des Satelliten zur Erdoberfläche, also der Weglänge vom Erdboden bis zur Antenne des Satelliten. Diese ändert sich aufgrund der Höhe der Erdoberfläche und eventueller Bodenbewegungen. Durch den Vergleich zweier SAR-Aufnahmen kann so für jedes Bildelement die entsprechende Phasenvarianz bestimmt werden.

Zusätzlich zu den RADAR-Informationen wird ein hochgenaues digitales Geländemodell (DGM) zur Eliminierung des Reliefeinflusses benötigt. Präzise Umlaufbahnparameter des Satelliten zum Zeitpunkt der Aufnahme ermöglichen eine hochgenaue Verortung der Aufnahmen. Die Darstellung der Phasenvarianzen für jedes Bildelement (Pixel) erfolgt in dem sogenannten Interferogramm.

### 1.4 Persistent Scatterer-Analyse (PSInSAR)

Unter Persistent Scatterer werden Punktstrahler mit einem besonders starken und zeitlich konstanten Rückstreusignal bezeichnet. Diese Punktstrahler befinden sich meist an künstlichen Objekten wie Gebäuden, Brücken usw., können jedoch auch natürlicher Herkunft sein und z.B. an größeren Felsen entstehen. Diese Punktstrahler besitzen eine besonders günstige Orientierung zum Satelliten, wodurch sie einen Großteil der einfallenden Radarstrahlung zum Sensor zurückstreuen. Der Punktstrahler kann eine Größe von wenigen Dezimetern haben, stellt jedoch für das entsprechen-

de Pixel, welches erheblich größer ist, das dominante Rückstreusignal dar. Phasenvarianzen lassen sich somit auf Bewegungen dieses einzelnen Punktes zurückführen. Die Punktrahler weisen zudem auch über Jahre hinweg eine hohe Kohärenz auf, so dass diese Punkte innerhalb einer Zeitreihe in jeder Aufnahme identifiziert und mit jeder anderen Aufnahme verglichen werden können.

Im Zuge der Auswertung erfolgt eine Atmosphärenkorrektur jeder Aufnahme, so dass die Genauigkeit der Bewegungsanalyse im Vergleich zur DinSAR-Auswertung deutlich gesteigert werden kann. Die Bewegungsangabe erfolgt in der Schrägsicht des Sensors.

## 2. Datengrundlage und Projektgebiet

- **Verwendeter Satellit und Orbit:**
  - Envisat, Descending Orbit, Track 337
  
- **Verwendete Software und Datum der Prozessierung:**
  - SARscape, Version 5.0.001
  - Prozessierung erfolgte von Juni – Juli 2014
  
- **Auswertemethode:**
  - Persistent-Scatterer-Interferometrie (Erläuterung s.o.)
  
- **Zeitraum der Analyse:**
  - 18.12.2003 – 02.09.2010
  
- **Datumsangaben der verwendeten Satellitenszenen**
  - 18.12.2003, 22.01.2004, 26.02.2004, 01.04.2004, 06.05.2004, 10.06.2004, 15.07.2004, 19.08.2004, 23.09.2004, 28.10.2004, 02.12.2004, 06.01.2005, 10.02.2005, 21.04.2005, 26.05.2005, 30.06.2005, 04.08.2005, 08.09.2005, 13.10.2005, 17.11.2005, 22.12.2005, 26.01.2006, 02.03.2006, 11.05.2006, 15.06.2006, 20.07.2006, 24.08.2006, 28.09.2006, 02.11.2006, 07.12.2006, 11.01.2007, 15.02.2007, 22.03.2007, 26.04.2007, 31.05.2007, 05.07.2007, 09.08.2007, 13.09.2007, 18.10.2007, 22.11.2007, 27.12.2007, 31.01.2008, 06.03.2008, 10.04.2008, 15.05.2008, 19.06.2008, 24.07.2008, 28.08.2008, 02.10.2008, 06.11.2008, 11.12.2008, 15.01.2009, 19.02.2009, 26.03.2009, 30.04.2009, 04.06.2009, 09.07.2009, 13.08.2009, 17.09.2009, 22.10.2009, 26.11.2009, 31.12.2009, 04.02.2010, 15.04.2010, 20.05.2010, 24.06.2010, 29.07.2010, 02.09.2010
  
- **Datum der Masterszene:**
  - 02.11.2006
  
- **Lage- und Höhengenaugigkeit der PS-Punkte:**
  - ~ 5 m

■ Lage der Referenzpunkte: ID, Koordinaten in UTM, Zone 32 N

ID	POINT_X	POINT_Y
1	407111,8	5594626,7
2	407111,8	5594626,7
3	394773,7	5590373,3
4	405492,2	5582743,4
5	395672,7	5583832,2
6	392433,8	5585038,4
7	399583,6	5576449,9
8	399583,6	5576449,9
9	390439,1	5579978,5
10	388647,6	5515051,8
11	388647,6	5515051,8
12	377907,1	5510494,1
13	387727,8	5509390,5
14	384321,0	5509614,5
15	377907,1	5510494,1
16	386783,9	5508563,3
17	377907,1	5510494,1
18	377907,1	5510494,1
19	382062,4	5595350,9
20	378448,6	5603136,8
21	369349,0	5604199,3
22	387118,0	5587414,2
23	382062,4	5595350,9
24	369349,0	5604199,3
25	379899,0	5580876,8
26	372934,2	5576398,4
27	372934,2	5576398,4
28	351950,2	5521308,0
29	351950,2	5521308,0
30	345708,3	5527084,8
31	352602,8	5513939,1
32	349915,5	5518058,1
33	347471,0	5520568,1
34	352602,8	5513939,1
35	352602,8	5513939,1
36	348259,4	5514991,7
37	360413,1	5603975,1
38	346364,4	5610431,3
39	337884,1	5612425,0
40	356544,5	5594595,9



41	347005,9	5597489,0
42	336024,5	5600453,7
43	353782,0	5583052,1
44	338351,5	5587075,5
45	336024,5	5600453,7
46	402499,2	5604607,3
47	395587,1	5604900,3
48	402499,2	5604607,3
49	402499,2	5604607,3
50	395587,1	5604900,3
51	371309,7	5611969,1
52	404969,6	5600315,8
53	384588,6	5605634,3
54	378445,0	5603137,8
55	393684,6	5537802,8
56	382968,4	5538407,6
57	380094,6	5543961,8
58	395500,3	5532758,7
59	385359,5	5532983,9
60	376094,6	5533549,8
61	395619,1	5522463,8
62	385654,2	5522733,6
63	369617,3	5523011,6
64	368840,9	5544738,0
65	366848,0	5550437,2
66	348100,9	5540164,0
67	364802,9	5532403,3
68	362380,0	5537750,4
69	348100,9	5540164,0
70	369613,2	5523012,7
71	361598,4	5528062,4
72	352357,9	5532319,6
73	343158,2	5549552,4
74	343158,2	5549552,4
75	336911,4	5545874,1
76	345129,1	5541755,7
77	336911,4	5545874,1
78	322311,7	5538724,9
79	344759,6	5530299,5
80	330567,3	5538833,7
81	322311,7	5538724,9
82	402475,0	5562134,1

83	399385,8	5565143,2
84	390619,2	5572318,9
85	406726,3	5558566,2
86	392023,2	5562452,9
87	385281,6	5563351,5
88	385401,3	5548131,5
89	385401,3	5548131,5
90	379592,4	5546241,8
91	379157,9	5570021,3
92	373402,6	5576704,5
93	368410,4	5566773,0
94	377323,1	5564525,9
95	368410,4	5566773,0
96	368410,4	5566773,0
97	373578,4	5554734,8
98	366853,3	5550431,7
99	356465,4	5558689,2
100	346644,5	5575304,7
101	342910,4	5574559,4
102	336649,4	5582293,2
103	346644,5	5575304,7
104	339909,8	5569077,6
105	333405,5	5567801,4
106	345260,5	5562002,3
107	340618,5	5560863,9
108	330394,0	5561453,1
109	337963,9	5521351,6
110	327193,1	5531990,1
111	318076,3	5529136,1
112	337963,9	5521351,6
113	332172,2	5516771,4
114	318076,3	5529136,1
115	333400,2	5515018,8
116	329811,1	5513852,9
117	320901,0	5514986,5

- Größe des Prozessierungsgebiets:
  - ~ 6.800 km<sup>2</sup>
- Anzahl der identifizierten PSI-Punkte
  - 2.459.345

- Durchschnittliche Dichte der PS-Punkte pro km<sup>2</sup>
  - 362
- Durchschnittliche jährliche Bewegungsrate für das gesamte Prozessierungsgebiet
  - -0,45 mm/Jahr
- Wertebereich der PS-Punkte, der als stabil angesehen werden kann
  - Das Ergebnis wurde hinsichtlich vorhandener Ausreißer und instabiler Punkte manuell be-reinigt. Bei den vorhandenen Punkten handelt es sich somit um stabile PS-Punkte.
- Standardabweichung der durchschnittlichen jährlichen Bewegungsrate
  - 1,25 mm/Jahr
- Unkompensierte atmosphärische Fehler
  - Unkompensierte atmosphärische Fehler treten bei einzelnen Punktgruppen in Form von Sprüngen teils bis zu 25 mm zwischen zwei Aufnahmetermenen auf. Die Auswirkungen auf die mittlere jährliche Punktbewegung sind jedoch vernachlässigbar.
- Sichtbare Neigung oder Phasentrends
  - Sichtbare Neigungen, oder Phasentrends konnten im Rahmen der Auswertung nicht fest-gestellt werden
- Gebiete, für welche keine Prozessierungsergebnisse vorliegen:
  - Da Track 337 nur ca. 80 % des Projektgebiets abdeckt, liegen nach Osten Ergebnisse nur bis zur Stadt St. Goar vor. Für den restlichen Teil des Projektgebiets lag keine ausrei-chende Anzahl an Aufnahmen aus einem anderen Orbit vor.
- Auffälligkeiten:
  - In kleinen, peripheren Ortslagen mit geringer PS-Punktdichte kann es zu stärkeren Schwankungen des Zeit-Bewegungsverlaufs kommen. Die Ursache liegt in stärkeren at-mosphärischen Restfehlern, da in diesen Gebieten eine Kompensation der Atmosphäre nur begrenzt möglich ist.
- Erläuterungen zu der Spaltenbezeichnung in der Shapefile-Datei
  - ID: Individuelle Kennung jedes Punktes
  - X: Rechtswert (UTM 32 N, WGS84)
  - Y: Hochwert (UTM 32 N, WGS84)
  - Z: Höhe (Höhe über NN)
  - Velocity: Durchschnittliche jährliche Bewegungsrate [mm/Jahr]
  - Coherence: Kohärenz [Wertebereich >0 bis 1]
  - V\_Precision: Standardabweichung der durchschnittlichen jährlichen Bewegungsrate aufgrund unkompensierter atmosphärischer Fehler [mm/Jahr]
  - D\_JJJJMMTT: Bewegung [mm] für den jeweiligen Aufnahmetermin bezogen auf die erste Aufnahme (Nullmessung)

# PROZESSIERUNGSBERICHT

---

PSInSAR-Prozessierung für das Untersuchungsgebiet  
in der Rhein-Mosel-Region

Teilgebiet 2: Envisat - Track 337

---

Michael Mares

21.08.2014



Bundesanstalt für  
Geowissenschaften und Rohstoffe

# TRIGIS

Die Welt der Geodaten

## Inhalt

1.	Erläuterungen zum Auswerteverfahren.....	3
1.1	RADAR-Fernerkundung.....	3
1.2	Synthetic Aperture Radar (SAR).....	3
1.3	Interferometrie.....	3
1.4	Persistent Scatterer-Analyse (PSInSAR).....	3
2.	Datengrundlage und Projektgebiet.....	4

## 1. Erläuterungen zum Auswerteverfahren

Zum besseren Verständnis der Ergebnisse werden im Folgenden kurz die theoretischen Grundlagen der SAR-Interferometrie erläutert.

### 1.1 RADAR-Fernerkundung

Das Auswertungsverfahren der SAR (Synthetic Aperture Radar) Interferometrie beruht auf der Analyse von Radio Detection and Ranging-Satellitenaufnahmen (RADAR). RADAR stellt ein sogenanntes aktives Aufnahmesystem dar, welches im Gegensatz zu passiven Systemen, die zu messende Strahlung selbst erzeugt. Das Verfahren ist somit von der Sonne unabhängig. Weiterhin kann die langwellige Radarstrahlung Wolken fast ungehindert passieren. Diese Eigenschaften ermöglichen es, im Gegensatz zu Luftbildern oder optischen Satellitenaufnahmen, tageszeit- und wetterunabhängig Aufnahmen eines Gebiets zu erstellen. Das System liefert daher mit hoher Zuverlässigkeit Informationen des Untersuchungsgebietes.

### 1.2 Synthetic Aperture Radar (SAR)

Klassische RADAR Systeme mit realer Apertur (RAR) unterliegen der Einschränkung, dass die Bodenauflösung abhängig von der Größe der Antenne des Satelliten ist. Ein Satellit würde für eine Bodenauflösung von wenigen Metern eine kilometerlange Antenne benötigen. Da ein solches System im Weltraum nicht stabil zu betreiben ist, bedient man sich der Methode des Radar mit synthetischer Apertur (SAR). Erreicht wird dies durch die Auswertung der Dopplerverschiebung des Radar-Echos, welche durch die Mehrfachbeleuchtung jedes Bodenelements während des Überflugs entsteht. Auf eine weitere Beschreibung des Verfahrens wird an dieser Stelle verzichtet.

### 1.3 Interferometrie

Beim Empfang des von der Erdoberfläche reflektierten Radarsignals erfolgt parallel zur Aufzeichnung der Stärke des Radarechos auch die Aufzeichnung der Phase der elektro-magnetischen Strahlung. Die Phase stellt den Schwingungszustand des elektrischen Feldes dar. Dieser Schwingungszustand ist abhängig von der Entfernung des Satelliten zur Erdoberfläche, also der Weglänge vom Erdboden bis zur Antenne des Satelliten. Diese ändert sich aufgrund der Höhe der Erdoberfläche und eventueller Bodenbewegungen. Durch den Vergleich zweier SAR-Aufnahmen kann so für jedes Bildelement die entsprechende Phasenvarianz bestimmt werden.

Zusätzlich zu den RADAR-Informationen wird ein hochgenaues digitales Geländemodell (DGM) zur Eliminierung des Reliefeinfluss benötigt. Präzise Umlaufbahnparameter des Satelliten zum Zeitpunkt der Aufnahme ermöglichen eine hochgenaue Verortung der Aufnahmen. Die Darstellung der Phasenvarianzen für jedes Bildelement (Pixel) erfolgt in dem sogenannten Interferogramm.

### 1.4 Persistent Scatterer-Analyse (PSInSAR)

Unter Persistent Scatterer werden Punktstrahler mit einem besonders starken und zeitlich konstanten Rückstreusignal bezeichnet. Diese Punktstrahler befinden sich meist an künstlichen Objekten wie Gebäuden, Brücken usw., können jedoch auch natürlicher Herkunft sein und z.B. an größeren Felsen entstehen. Diese Punktstrahler besitzen eine besonders günstige Orientierung zum Satelliten, wodurch sie einen Großteil der einfallenden Radarstrahlung zum Sensor zurückstreuen. Der Punktstrahler kann eine Größe von wenigen Dezimetern haben, stellt jedoch für das entsprechen-

de Pixel, welches erheblich größer ist, das dominante Rückstreusignal dar. Phasenvarianzen lassen sich somit auf Bewegungen dieses einzelnen Punktes zurückführen. Die Punktrahler weisen zudem auch über Jahre hinweg eine hohe Kohärenz auf, so dass diese Punkte innerhalb einer Zeitreihe in jeder Aufnahme identifiziert und mit jeder anderen Aufnahme verglichen werden können.

Im Zuge der Auswertung erfolgt eine Atmosphärenkorrektur jeder Aufnahme, so dass die Genauigkeit der Bewegungsanalyse im Vergleich zur DInSAR-Auswertung deutlich gesteigert werden kann. Die Bewegungsangabe erfolgt in der Schrägsicht des Sensors.

## 2. Datengrundlage und Projektgebiet

- **Verwendeter Satellit und Orbit:**
  - Envisat, Descending Orbit, Track 337
- **Verwendete Software und Datum der Prozessierung:**
  - SARscape, Version 5.0.001
  - Prozessierung erfolgte von Juli – August 2014
- **Auswertemethode:**
  - Persistent-Scatterer-Interferometrie (Erläuterung s.o.)
- **Zeitraum der Analyse:**
  - 18.12.2003 – 02.09.2010
- **Datumsangaben der verwendeten Satellitenszenen**
  - 18.12.2003, 22.01.2004, 26.02.2004, 01.04.2004, 06.05.2004, 10.06.2004, 15.07.2004, 19.08.2004, 23.09.2004, 28.10.2004, 02.12.2004, 06.01.2005, 10.02.2005, 21.04.2005, 26.05.2005, 30.06.2005, 04.08.2005, 08.09.2005, 13.10.2005, 17.11.2005, 22.12.2005, 26.01.2006, 02.03.2006, 11.05.2006, 15.06.2006, 20.07.2006, 24.08.2006, 28.09.2006, 02.11.2006, 07.12.2006, 11.01.2007, 15.02.2007, 22.03.2007, 26.04.2007, 31.05.2007, 05.07.2007, 09.08.2007, 13.09.2007, 18.10.2007, 22.11.2007, 27.12.2007, 31.01.2008, 06.03.2008, 10.04.2008, 15.05.2008, 19.06.2008, 24.07.2008, 28.08.2008, 02.10.2008, 06.11.2008, 11.12.2008, 15.01.2009, 19.02.2009, 26.03.2009, 30.04.2009, 04.06.2009, 09.07.2009, 13.08.2009, 17.09.2009, 22.10.2009, 26.11.2009, 31.12.2009, 04.02.2010, 15.04.2010, 20.05.2010, 24.06.2010, 29.07.2010, 02.09.2010
- **Datum der Masterszene:**
  - 02.11.2006
- **Lage- und Höhengenaugigkeit der PS-Punkte:**
  - ~ 5 m

- Lage der Referenzpunkte: ID, Koordinaten in UTM, Zone 32 N

ID	POINT_X	POINT_Y
1	382458	5605339
2	373105	5608871
3	372324	5615994
4	382458	5605339
5	378459	5603132
6	360424	5603967
7	382077	5595345
8	378459	5603132
9	360424	5603967
10	413938	5603155
11	407220	5603457
12	396272	5613474
13	411437	5599460
14	404768	5600860
15	395586	5604902
16	413261	5591340
17	391951	5592513
18	391951	5592513

- Größe des Prozessierungsgebiets:
  - ~ 465 km<sup>2</sup>
- Anzahl der identifizierten PSI-Punkte
  - 178.774
- Durchschnittliche Dichte der PS-Punkte pro km<sup>2</sup>
  - 384
- Durchschnittliche jährliche Bewegungsrate für das gesamte Prozessierungsgebiet
  - -0,07 mm/Jahr
- Wertebereich der PS-Punkte, der als stabil angesehen werden kann
  - Das Ergebnis wurde hinsichtlich vorhandener Ausreißer und instabiler Punkte manuell bereinigt. Bei den vorhandenen Punkten handelt es sich somit um stabile PS-Punkte.
- Standardabweichung der durchschnittlichen jährlichen Bewegungsrate
  - 1,0 mm/Jahr
- Unkompensierte atmosphärische Fehler
  - Unkompensierte atmosphärische Fehler treten bei einzelnen Punktgruppen in Form von Sprüngen teils bis zu 25 mm zwischen zwei Aufnahmetermen auf. Die Auswirkungen auf die mittlere jährliche Punktbeziehung sind jedoch vernachlässigbar.



- Sichtbare Neigung oder Phasentrends
  - Ein vorhandener Phasentrend wurde in Nordwest-Südost-Richtung festgestellt und nachträglich aus der mittleren Bewegungsrate herausgerechnet. Der Restfehler beträgt ca. 1 mm/Jahr zwischen dem nord-westlichen und dem süd-östlichen Rand des Projektgebiets.
- Gebiete, für welche keine Prozessierungsergebnisse vorliegen:
  - Da Track 337 nur ca. 80 % des Projektgebiets abdeckt, liegen nach Osten Ergebnisse nur bis zur Stadt St. Goar vor. Für den restlichen Teil des Projektgebiets lag keine ausreichende Anzahl an Aufnahmen aus einem anderen Orbit vor.
- Auffälligkeiten:
  - In kleinen, peripheren Ortslagen mit geringer PS-Punktdichte kann es zu stärkeren Schwankungen des Zeit-Bewegungsverlaufs kommen. Die Ursache liegt in stärkeren atmosphärischen Restfehlern, da in diesen Gebieten eine Kompensation der Atmosphäre nur begrenzt möglich ist.
- Erläuterungen zu der Spaltenbezeichnung in der Shapefile-Datei
  - ID: Individuelle Kennung jedes Punktes
  - X: Rechtswert (UTM 32 N, WGS84)
  - Y: Hochwert (UTM 32 N, WGS84)
  - Z: Höhe (Höhe über NN)
  - Velocity: Durchschnittliche jährliche Bewegungsrate [mm/Jahr]
  - Coherence: Kohärenz [Wertebereich >0 bis 1]
  - V\_Precision: Standardabweichung der durchschnittlichen jährlichen Bewegungsrate aufgrund unkompensierter atmosphärischer Fehler [mm/Jahr]
  - D\_JJJJMMTT: Bewegung [mm] für den jeweiligen Aufnahmetag bezogen auf die erste Aufnahme (Nullmessung)

# PROZESSIERUNGSBERICHT

---

PSInSAR-Prozessierung für das Untersuchungsgebiet  
Mendig in der Rhein-Mosel-Region

TerraSAR-X - Orbit 154

---

Michael Mares

31.07.2015



Bundesanstalt für  
Geowissenschaften und Rohstoffe

# TRIGIS

Die Welt der Geodaten

## Inhalt

1.	Erläuterungen zum Auswerteverfahren .....	3
1.1	RADAR-Fernerkundung.....	3
1.2	Synthetic Aperture Radar (SAR) .....	3
1.3	Interferometrie .....	3
1.4	Persistent Scatterer-Analyse (PSInSAR).....	3
2.	Datengrundlage und Projektgebiet.....	4
3.	Lage der Referenzpunkte: ID, Koordinaten in UTM, Zone 32 N .....	5
4.	Projektgebiet und statistische Parameter des Ergebnisses .....	8

## 1. Erläuterungen zum Auswerteverfahren

Zum besseren Verständnis der Ergebnisse werden im Folgenden kurz die theoretischen Grundlagen der SAR-Interferometrie erläutert.

### 1.1 RADAR-Fernerkundung

Das Auswertungsverfahren der SAR (Synthetic Aperture Radar) Interferometrie beruht auf der Analyse von Radio Detection and Ranging-Satellitenaufnahmen (RADAR). RADAR stellt ein sogenanntes aktives Aufnahmesystem dar, welches im Gegensatz zu passiven Systemen, die zu messende Strahlung selbst erzeugt. Das Verfahren ist somit von der Sonne unabhängig. Weiterhin kann die langwellige Radarstrahlung Wolken fast ungehindert passieren. Diese Eigenschaften ermöglichen es, im Gegensatz zu Luftbildern oder optischen Satellitenaufnahmen, tageszeit- und wetterunabhängig Aufnahmen eines Gebiets zu erstellen. Das System liefert daher mit hoher Zuverlässigkeit Informationen des Untersuchungsgebietes.

### 1.2 Synthetic Aperture Radar (SAR)

Klassische RADAR Systeme mit realer Apertur (RAR) unterliegen der Einschränkung, dass die Bodenauflösung abhängig von der Größe der Antenne des Satelliten ist. Ein Satellit würde für eine Bodenauflösung von wenigen Metern eine kilometerlange Antenne benötigen. Da ein solches System im Weltraum nicht stabil zu betreiben ist, bedient man sich der Methode des Radar mit synthetischer Apertur (SAR). Erreicht wird dies durch die Auswertung der Dopplereffektverschiebung des Radar-Echos, welche durch die Mehrfachbeleuchtung jedes Bodenelements während des Überflugs entsteht. Auf eine weitere Beschreibung des Verfahrens wird an dieser Stelle verzichtet.

### 1.3 Interferometrie

Beim Empfang des von der Erdoberfläche reflektierten Radarsignals erfolgt parallel zur Aufzeichnung der Stärke des Radarechos auch die Aufzeichnung der Phase der elektro-magnetischen Strahlung. Die Phase stellt den Schwingungszustand des elektrischen Feldes dar. Dieser Schwingungszustand ist abhängig von der Entfernung des Satelliten zur Erdoberfläche, also der Weglänge vom Erdboden bis zur Antenne des Satelliten. Diese ändert sich aufgrund der Höhe der Erdoberfläche und eventueller Bodenbewegungen. Durch den Vergleich zweier SAR-Aufnahmen kann so für jedes Bildelement die entsprechende Phasenvarianz bestimmt werden.

Zusätzlich zu den RADAR-Informationen wird ein hochgenaues digitales Geländemodell (DGM) zur Eliminierung des Reliefeinflusses benötigt. Präzise Umlaufbahnparameter des Satelliten zum Zeitpunkt der Aufnahme ermöglichen eine hochgenaue Verortung der Aufnahmen. Die Darstellung der Phasenvarianzen für jedes Bildelement (Pixel) erfolgt in dem sogenannten Interferogramm.

### 1.4 Persistent Scatterer-Analyse (PSInSAR)

Unter Persistent Scatterer werden Punktstrahler mit einem besonders starken und zeitlich konstanten Rückstreusignal bezeichnet. Diese Punktstrahler befinden sich meist an künstlichen Objekten wie Gebäuden, Brücken usw., können jedoch auch natürlicher Herkunft sein und z.B. an größeren Felsen entstehen. Diese Punktstrahler besitzen eine besonders günstige Orientierung zum Satelliten, wodurch sie einen Großteil der einfallenden Radarstrahlung zum Sensor zurückstreuen. Der Punktstrahler kann eine Größe von wenigen Dezimetern haben, stellt jedoch für das entsprechen-

de Pixel, welches erheblich größer ist, das dominante Rückstreusignal dar. Phasenvarianzen lassen sich somit auf Bewegungen dieses einzelnen Punktes zurückführen. Die Punktrahler weisen zudem auch über Jahre hinweg eine hohe Kohärenz auf, so dass diese Punkte innerhalb einer Zeitreihe in jeder Aufnahme identifiziert und mit jeder anderen Aufnahme verglichen werden können.

Im Zuge der Auswertung erfolgt eine Atmosphärenkorrektur jeder Aufnahme, so dass die Genauigkeit der Bewegungsanalyse im Vergleich zur DInSAR-Auswertung deutlich gesteigert werden kann. Die Bewegungsangabe erfolgt in der Schrägsicht des Sensors.

## 2. Datengrundlage und Projektgebiet

- **Verwendeter Satellit und Orbit:**
  - TerraSAR-X, Descending Orbit, Orbit 154
- **Verwendete Software und Datum der Prozessierung:**
  - SARscape, Version 5.1
  - Prozessierung erfolgte von März – Juli 2015
- **Auswertemethode:**
  - Persistent-Scatterer-Interferometrie (Erläuterung s.o.)
- **Zeitraum der Analyse:**
  - 22.01.2012 – 04.12.2013
- **Datumsangaben der verwendeten Satellitenszenen**

22.01.2012	02.02.2012	13.02.2012	24.02.2012	06.03.2012	17.03.2012	28.03.2012
19.04.2012	30.04.2012	22.05.2012	13.06.2012	05.07.2012	27.07.2012	18.08.2012
29.08.2012	09.09.2012	20.09.2012	01.10.2012	12.10.2012	23.10.2012	03.11.2012
14.11.2012	25.11.2012	06.12.2012	17.12.2012	28.12.2012	08.01.2013	19.01.2013
30.01.2013	10.02.2013	21.02.2013	04.03.2013	15.03.2013	26.03.2013	06.04.2013
17.04.2013	28.04.2013	09.05.2013	20.05.2013	11.06.2013	03.07.2013	25.07.2013
16.08.2013	29.09.2013	10.10.2013	21.10.2013	01.11.2013	12.11.2013	23.11.2013
04.12.2013						
- **Datum der Masterszene:**
  - 06.12.2012
- **Lage- und Höhengenaugigkeit der PS-Punkte:**
  - ~ 2 m

### 3. Lage der Referenzpunkte: ID, Koordinaten in UTM, Zone 32 N

ID	Rechtswert	Hochwert
1	386701,0	5587977,2
2	383050,2	5587530,6
3	378003,7	5590928,4
4	375729,4	5589525,2
5	373894,9	5588923,2
6	373894,9	5588923,2
7	386595,7	5583946,2
8	382435,6	5583045,5
9	377846,0	5588150,6
10	373894,9	5588923,2
11	373894,9	5588923,2
12	373894,9	5588923,2
13	384895,0	5583540,7
14	382435,6	5583045,5
15	377312,4	5582048,4
16	374146,6	5583034,5
17	373894,9	5588923,2
18	373894,9	5588923,2
19	385222,7	5581131,7
20	384037,4	5579568,6
21	382284,4	5582007,7
22	380265,6	5580986,2
23	380071,9	5581100,7
24	377844,8	5581337,0
25	376438,8	5581450,0
26	374436,5	5583298,2
27	374436,5	5583298,2
28	372595,6	5582288,7
29	370297,0	5584019,2
30	368407,8	5583794,5
31	368296,2	5583745,3
32	385459,5	5578964,0
33	384037,4	5579568,6
34	382608,6	5578377,9
35	380265,6	5580986,2
36	380071,9	5581100,7
37	377864,3	5580728,7
38	376438,8	5581450,0
39	375450,8	5581619,1

40	372595,6	5582288,7
41	372595,6	5582288,7
42	368915,3	5581764,3
43	368915,3	5581764,3
44	368407,8	5583794,5
45	384896,8	5578542,5
46	382608,6	5578377,9
47	382608,6	5578377,9
48	380029,6	5579168,1
49	379491,1	5579752,1
50	377252,4	5580002,9
51	375801,0	5578811,7
52	373479,0	5579400,8
53	373479,0	5579400,8
54	369930,7	5580157,5
55	369930,7	5580157,5
56	368915,3	5581764,3
57	368915,3	5581764,3
58	384520,6	5572251,8
59	382459,0	5575534,8
60	380416,7	5576635,1
61	380254,8	5576558,5
62	379131,2	5576623,0
63	377155,3	5576700,6
64	375878,1	5576992,0
65	374399,3	5577831,2
66	373174,3	5577578,7
67	371677,9	5578879,2
68	369930,7	5580157,5
69	368658,8	5577523,9
70	368296,2	5583745,3
71	383058,7	5574371,4
72	382459,0	5575534,8
73	382269,4	5575671,5
74	379000,0	5576001,3
75	378999,4	5576001,4
76	377155,3	5576700,6
77	374296,6	5575852,2
78	374296,6	5575852,2
79	372920,4	5576280,5
80	370594,4	5576613,3
81	368658,8	5577523,9

82	368658,8	5577523,9
83	368296,2	5583745,3
84	383058,7	5574371,4
85	383058,7	5574371,4
86	380939,7	5574091,9
87	380489,2	5574019,3
88	378999,4	5576001,4
89	377155,3	5576700,6
90	374297,5	5575853,8
91	374296,6	5575852,2
92	372920,4	5576280,5
93	370718,2	5576760,7
94	368378,8	5575420,4
95	368378,8	5575420,4
96	368296,2	5583745,3
97	384520,6	5572251,8
98	381511,5	5573066,1
99	380007,6	5573325,1
100	379375,6	5573458,1
101	378999,4	5576001,4
102	377155,3	5576700,6
103	374314,1	5573568,0
104	373669,7	5574847,3
105	372920,4	5576280,5
106	370718,2	5576760,7
107	368378,8	5575420,4
108	368378,8	5575420,4
109	368378,8	5575420,4
110	383058,7	5574371,4
111	383058,7	5574371,4
112	380939,7	5574091,9
113	380007,6	5573325,1
114	378999,4	5576001,4
115	377155,3	5576700,6
116	377155,3	5576700,6
117	385459,5	5578964,0
118	385459,5	5578964,0
119	385459,5	5578964,0
120	385459,5	5578964,0
121	385459,5	5578964,0
122	385459,5	5578964,0



## 4. Projektgebiet und statistische Parameter des Ergebnisses

- Größe des Prozessierungsgebiets:
  - ~ 360 km<sup>2</sup>
- Anzahl der identifizierten PSI-Punkte
  - 3.323.434
- Durchschnittliche Dichte der PS-Punkte pro km<sup>2</sup>
  - ~ 9.345
- Durchschnittliche jährliche Bewegungsrate für das gesamte Prozessierungsgebiet
  - 0,01 mm/Jahr
- Wertebereich der PS-Punkte, der als stabil angesehen werden kann
  - Das Ergebnis wurde hinsichtlich vorhandener Ausreißer und instabiler Punkte manuell bereinigt. Bei den vorhandenen Punkten handelt es sich somit um stabile PS-Punkte.
- Standardabweichung der durchschnittlichen jährlichen Bewegungsrate
  - 2,44 mm/Jahr
- Unkompensierte atmosphärische Fehler
  - Es konnten keine signifikanten atmosphärischen Restfehler festgestellt werden.
- Sichtbare Neigung oder Phasentrends
  - Es konnte kein signifikanter Phasentrend festgestellt werden.
- Gebiete, für welche keine Prozessierungsergebnisse vorliegen:
  - -/-
- Auffälligkeiten:
  - -/-
- Erläuterungen zu der Spaltenbezeichnung in der Shapefile-Datei
  - ID: Individuelle Kennung jedes Punktes
  - X: Rechtswert (UTM 32 N, WGS84)
  - Y: Hochwert (UTM 32 N, WGS84)
  - Z: Höhe (Höhe über NN)
  - Velocity: Durchschnittliche jährliche Bewegungsrate [mm/Jahr]
  - Coherence: Kohärenz [Wertebereich >0 bis 1]
  - V\_Precision: Standardabweichung der durchschnittlichen jährlichen Bewegungsrate aufgrund unkompensierter atmosphärischer Fehler [mm/Jahr]
  - D\_JJJJMMTT: Bewegung [mm] für den jeweiligen Aufnahmetermin bezogen auf die erste Aufnahme (Nullmessung)

# PROZESSIERUNGSBERICHT

---

SBAS-Prozessierung für das Untersuchungsgebiet  
Mendig in der Rhein-Mosel-Region

TerraSAR-X - Orbit 154

---

Michael Mares

31.07.2015



Bundesanstalt für  
Geowissenschaften und Rohstoffe

# TRIGIS

Die Welt der Geodaten

## Inhalt

1.	Erläuterungen zum Auswerteverfahren .....	3
1.1	RADAR-Fernerkundung.....	3
1.2	Synthetic Aperture Radar (SAR) .....	3
1.3	Interferometrie .....	3
1.4	Small-BASeline-Interferometrie (SBAS) .....	3
2.	Datengrundlage und Projektgebiet.....	6
3.	SBAS-Netzwerk.....	7
4.	Lage der Referenzpunkte: ID, Koordinaten in UTM, Zone 32 N .....	8
5.	Projektgebiet und statistische Parameter des Ergebnisses .....	9

## 1. Erläuterungen zum Auswerteverfahren

Zum besseren Verständnis der Ergebnisse werden im Folgenden kurz die theoretischen Grundlagen der SAR-Interferometrie erläutert.

### 1.1 RADAR-Fernerkundung

Das Auswertungsverfahren der SAR (Synthetic Aperture Radar) Interferometrie beruht auf der Analyse von Radio Detection and Ranging-Satellitenaufnahmen (RADAR). RADAR stellt ein sogenanntes aktives Aufnahmesystem dar, welches im Gegensatz zu passiven Systemen, die zu messende Strahlung selbst erzeugt. Das Verfahren ist somit von der Sonne unabhängig. Weiterhin kann die langwellige Radarstrahlung Wolken fast ungehindert passieren. Diese Eigenschaften ermöglichen es, im Gegensatz zu Luftbildern oder optischen Satellitenaufnahmen, tageszeit- und wetterunabhängig Aufnahmen eines Gebiets zu erstellen. Das System liefert daher mit hoher Zuverlässigkeit Informationen des Untersuchungsgebietes.

### 1.2 Synthetic Aperture Radar (SAR)

Klassische RADAR Systeme mit realer Apertur (RAR) unterliegen der Einschränkung, dass die Bodenauflösung abhängig von der Größe der Antenne des Satelliten ist. Ein Satellit würde für eine Bodenauflösung von wenigen Metern eine kilometerlange Antenne benötigen. Da ein solches System im Weltraum nicht stabil zu betreiben ist, bedient man sich der Methode des Radar mit synthetischer Apertur (SAR). Erreicht wird dies durch die Auswertung der Dopplerverschiebung des Radar-Echos, welche durch die Mehrfachbeleuchtung jedes Bodenelements während des Überflugs entsteht. Auf eine weitere Beschreibung des Verfahrens wird an dieser Stelle verzichtet.

### 1.3 Interferometrie

Beim Empfang des von der Erdoberfläche reflektierten Radarsignals erfolgt parallel zur Aufzeichnung der Stärke des Radarechos auch die Aufzeichnung der Phase der elektro-magnetischen Strahlung. Die Phase stellt den Schwingungszustand des elektrischen Feldes dar. Dieser Schwingungszustand ist abhängig von der Entfernung des Satelliten zur Erdoberfläche, also der Weglänge vom Erdboden bis zur Antenne des Satelliten. Diese ändert sich aufgrund der Höhe der Erdoberfläche und eventueller Bodenbewegungen. Durch den Vergleich zweier SAR-Aufnahmen kann so für jedes Bildelement die entsprechende Phasenvarianz bestimmt werden.

Zusätzlich zu den RADAR-Informationen wird ein hochgenaues digitales Geländemodell (DGM) zur Eliminierung des Reliefeinflusses benötigt. Präzise Umlaufbahnparameter des Satelliten zum Zeitpunkt der Aufnahme ermöglichen eine hochgenaue Verortung der Aufnahmen. Die Darstellung der Phasenvarianzen für jedes Bildelement (Pixel) erfolgt in dem sogenannten Interferogramm.

### 1.4 Small-BASeline-Interferometrie (SBAS)

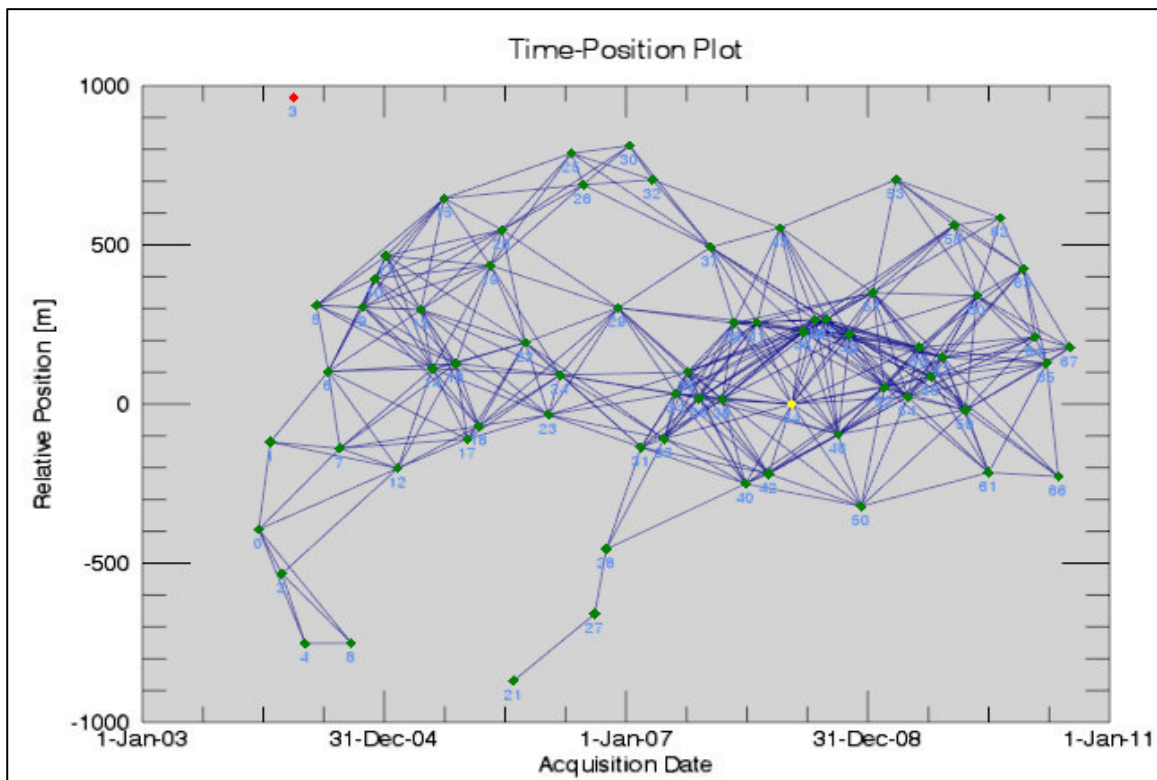
Das SBAS-Verfahren basiert auf dem Prinzip der DInSAR-Analyse. Zur Präzisierung der Ergebnisse werden jedoch Interferogramme für eine Vielzahl von sich überschneidenden Aufnahmezeitpunkten erstellt. Da somit für einen Zeitabschnitt viele sich überlappende Bewegungsberechnungen (zwischen allen Kombinationsmöglichkeiten) vorliegen, werden Störkomponenten besser beseitigt und die Genauigkeit deutlich erhöht.

Abbildung 1 zeigt die Verknüpfung der einzelnen Aufnahmezeitpunkte einer Zeitreihe über einen Zeitraum von ca. 7 Jahren. Die Aufnahmezeitpunkte sind hier in einem Koordinatensystem aufgetragen, welches sich aus der räumlichen Basislinie (Y-Achse) und der zeitlichen Basislinie (X-Achse) aufspannt.

Jeder Satellit bewegt sich auf definierten Umlaufbahnen. Innerhalb der Umlaufbahn schwankt die Flugbahn eines Satelliten um einige hundert Meter. Die räumliche Basislinie gibt die Distanz des Satelliten im Orbit zu den Zeitpunkten der Radaraufnahmen an. Da ab einer bestimmten räumlichen Basislinie (kritische Basislinie) eine Auswertung der Phasendifferenzen nicht mehr möglich ist, werden nur solche Aufnahmen kombiniert, welche eine räumliche Basislinie von 50 % der kritischen Basislinie nicht überschreiten. So wird sichergestellt, dass für jedes Aufnahme paar eine Phasendifferenzbestimmung möglich ist.

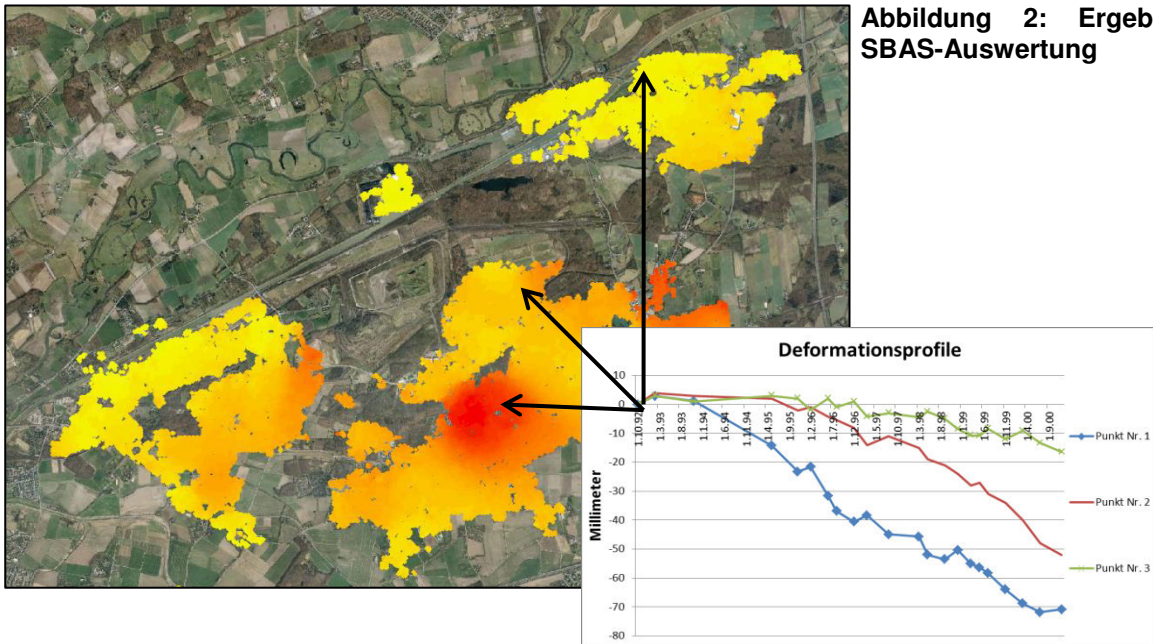
Die zeitliche Basislinie bezeichnet den Zeitraum zwischen den jeweiligen Satellitenaufnahmen. Mit zunehmender zeitlicher Distanz reduziert sich die Möglichkeit, die Phasendifferenzen zwischen den Aufnahmen zu bestimmen.

Im Rahmen der Auswertung muss somit ein Kompromiss zwischen dem Bestreben zur Erstellung eines möglichst dichten Netzwerks (hohe Redundanz) und dem Verlust der Auswertbarkeit gefunden werden, welcher sich bei großen räumlichen und zeitlichen Basislinien ergibt.



**Abbildung 1: Verknüpfung von Aufnahmezeitpunkte**

Das Endergebnis ist eine georeferenzierte Rasterdatei, in welcher für jedes Bildelement die Bodenbewegung ausgegeben wird (Abb. 2). Die Informationsdichte entspricht der räumlichen Auflösung der verwendeten Satellitendaten (z.B. 3m, 10m, 25m). Die Bewegungsangabe erfolgt in der Schrägsicht des Sensors.



## 2. Datengrundlage und Projektgebiet

- **Verwendeter Satellit und Orbit:**
  - TerraSAR-X, Descending Orbit, Orbit 154
- **Verwendete Software und Datum der Prozessierung:**
  - SARscape, Version 5.1
  - Prozessierung erfolgte von März – Juli 2015
- **Auswertemethode:**
  - Small-BASeline-Interferometrie (SBAS, Erläuterung s.o.)
- **Zeitraum der Analyse:**
  - 22.01.2012 – 04.12.2013

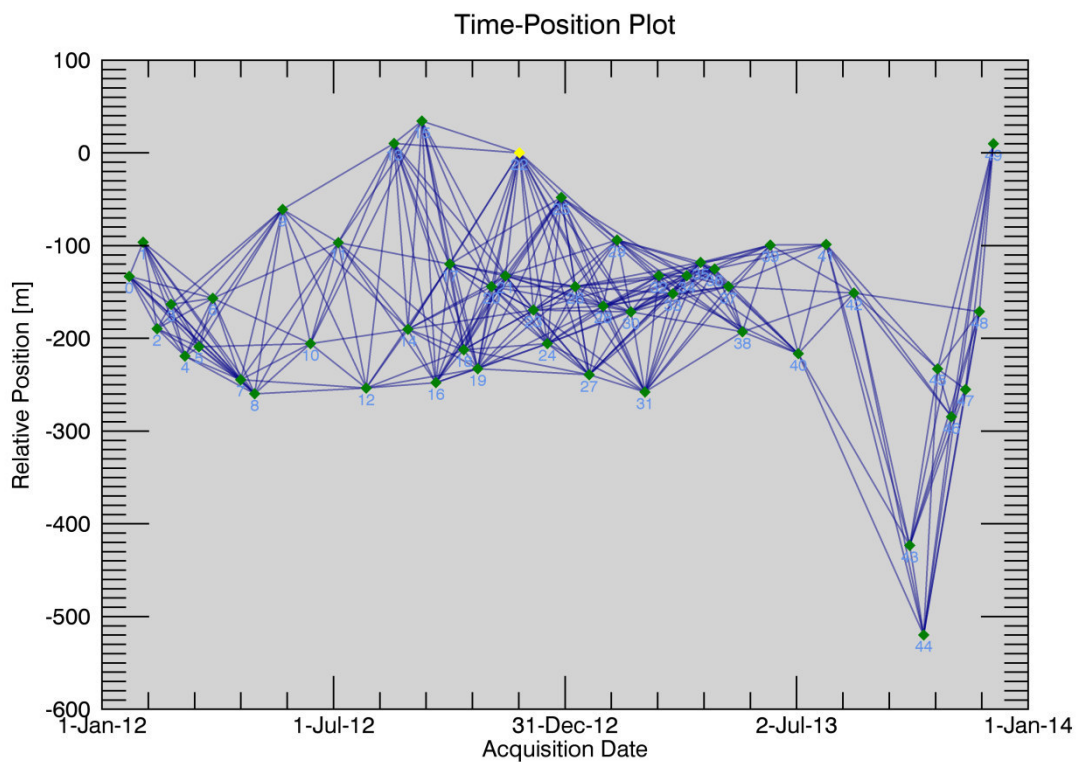
- **Datumsangaben der verwendeten Satellitenszenen**

22.01.2012	02.02.2012	13.02.2012	24.02.2012	06.03.2012	17.03.2012	28.03.2012
19.04.2012	30.04.2012	22.05.2012	13.06.2012	05.07.2012	27.07.2012	18.08.2012
29.08.2012	09.09.2012	20.09.2012	01.10.2012	12.10.2012	23.10.2012	03.11.2012
14.11.2012	25.11.2012	06.12.2012	17.12.2012	28.12.2012	08.01.2013	19.01.2013
30.01.2013	10.02.2013	21.02.2013	04.03.2013	15.03.2013	26.03.2013	06.04.2013
17.04.2013	28.04.2013	09.05.2013	20.05.2013	11.06.2013	03.07.2013	25.07.2013
16.08.2013	29.09.2013	10.10.2013	21.10.2013	01.11.2013	12.11.2013	23.11.2013
04.12.2013						

- **Datum der Masterszene:**
  - 06.12.2012
- **Lage- und Höhengenaugigkeit der PS-Punkte:**
  - ~ 2 m

## 3. SBAS-Netzwerk

- Anzahl der Aufnahmen: 50
- Anzahl der nicht nutzbaren Aufnahmen (rot): 0
- Anzahl der Master-Aufnahmen: 44
- Super-Master: 25.11.2012
- Anzahl der ausgewerteten Bildpaare: 308
- Maximal zulässige Basislinie [% der kritischen Basislinie]: 35 %





## 4. Lage der Referenzpunkte: ID, Koordinaten in UTM, Zone 32 N

ID	Rechtswert	Hochwert
1	386455	5588510
2	387072	5584490
3	386155	5580390
4	385424	5589960
5	383035	5587500
6	379880	5589820
7	382076	5582800
8	377714	5581380
9	381104	5585830
10	378141	5591610
11	377749	5590890
12	374361	5589120
13	376216	5591000
14	373680	5591240
15	372110	5590630
16	370123	5591800
17	370530	5584010
18	373457	5580150
19	385248	5578630
20	384241	5574870
21	382392	5575520
22	381575	5575010
23	384713	5576360
24	382959	5574440
25	379340	5574210
26	378851	5576000
27	373387	5576730
28	375425	5576370
29	369172	5577730
30	370800	5576610
31	374621	5586070
32	370154	5588250
33	388100	5590260

## 5. Projektgebiet und statistische Parameter des Ergebnisses

- Größe des Prozessierungsgebiets:
  - ~ 360 km<sup>2</sup>
- Anzahl der identifizierten SBAS-Punkte
  - 732.130
- Durchschnittliche Dichte der SBAS-Punkte pro km<sup>2</sup>
  - ~ 2.033
- Durchschnittliche jährliche Bewegungsrate für das gesamte Prozessierungsgebiet
  - -0,27 mm/Jahr
- Wertebereich der PS-Punkte, der als stabil angesehen werden kann
  - Das Ergebnis wurde hinsichtlich vorhandener Ausreißer und instabiler Punkte manuell bereinigt. Bei den vorhandenen Punkten handelt es sich somit um stabile PS-Punkte.
- Standardabweichung der durchschnittlichen jährlichen Bewegungsrate
  - 1,79 mm/Jahr
- Unkompensierte atmosphärische Fehler
  - Es konnten keine signifikanten atmosphärischen Restfehler festgestellt werden.
- Sichtbare Neigung oder Phasentrends
  - Es konnte kein signifikanter Phasentrend festgestellt werden.
- Gebiete, für welche keine Prozessierungsergebnisse vorliegen:
  - -/-
- Auffälligkeiten:
  - -/-
- Erläuterungen zu der Spaltenbezeichnung in der Shapefile-Datei
  - ID: Individuelle Kennung jedes Punktes
  - X: Rechtswert (UTM 32 N, WGS84)
  - Y: Hochwert (UTM 32 N, WGS84)
  - Z: Höhe (Höhe über NN)
  - Velocity: Durchschnittliche jährliche Bewegungsrate [mm/Jahr]
  - Coherence: Kohärenz [Wertebereich >0 bis 1]
  - V\_Precision: Standardabweichung der durchschnittlichen jährlichen Bewegungsrate aufgrund unkompensierter atmosphärischer Fehler [mm/Jahr]
  - D\_JJJJMMTT: Bewegung [mm] für den jeweiligen Aufnahmetermin bezogen auf die erste Aufnahme (Nullmessung)

# PROZESSIERUNGSBERICHT

---

PSInSAR-Prozessierung für das Untersuchungsgebiet  
Mosel in der Rhein-Mosel-Region

TerraSAR-X - Orbit 116

---

Michael Mares

03.09.2015



Bundesanstalt für  
Geowissenschaften und Rohstoffe

# TRIGIS

Die Welt der Geodaten

## Inhalt

2.	Erläuterungen zum Auswerteverfahren .....	3
1.1	RADAR-Fernerkundung.....	3
1.2	Synthetic Aperture Radar (SAR) .....	3
1.3	Interferometrie .....	3
1.4	Persistent Scatterer-Analyse (PSInSAR).....	3
3.	Datengrundlage und Projektgebiet.....	5
	Lage der Referenzpunkte: ID, Koordinaten in UTM, Zone 32 N .....	6
4.	Projektgebiet und statistische Parameter des Ergebnisses .....	14

## 2. Erläuterungen zum Auswerteverfahren

Zum besseren Verständnis der Ergebnisse werden im Folgenden kurz die theoretischen Grundlagen der SAR-Interferometrie erläutert.

### 1.1 RADAR-Fernerkundung

Das Auswertungsverfahren der SAR (Synthetic Aperture Radar) Interferometrie beruht auf der Analyse von Radio Detection and Ranging-Satellitenaufnahmen (RADAR). RADAR stellt ein sogenanntes aktives Aufnahmesystem dar, welches im Gegensatz zu passiven Systemen, die zu messende Strahlung selbst erzeugt. Das Verfahren ist somit von der Sonne unabhängig. Weiterhin kann die langwellige Radarstrahlung Wolken fast ungehindert passieren. Diese Eigenschaften ermöglichen es, im Gegensatz zu Luftbildern oder optischen Satellitenaufnahmen, tageszeit- und wetterunabhängig Aufnahmen eines Gebiets zu erstellen. Das System liefert daher mit hoher Zuverlässigkeit Informationen des Untersuchungsgebietes.

### 1.2 Synthetic Aperture Radar (SAR)

Klassische RADAR Systeme mit realer Apertur (RAR) unterliegen der Einschränkung, dass die Bodenauflösung abhängig von der Größe der Antenne des Satelliten ist. Ein Satellit würde für eine Bodenauflösung von wenigen Metern eine kilometerlange Antenne benötigen. Da ein solches System im Weltraum nicht stabil zu betreiben ist, bedient man sich der Methode des Radar mit synthetischer Apertur (SAR). Erreicht wird dies durch die Auswertung der Dopplerverschiebung des Radar-Echos, welche durch die Mehrfachbeleuchtung jedes Bodenelements während des Überflugs entsteht. Auf eine weitere Beschreibung des Verfahrens wird an dieser Stelle verzichtet.

### 1.3 Interferometrie

Beim Empfang des von der Erdoberfläche reflektierten Radarsignals erfolgt parallel zur Aufzeichnung der Stärke des Radarechos auch die Aufzeichnung der Phase der elektro-magnetischen Strahlung. Die Phase stellt den Schwingungszustand des elektrischen Feldes dar. Dieser Schwingungszustand ist abhängig von der Entfernung des Satelliten zur Erdoberfläche, also der Weglänge vom Erdboden bis zur Antenne des Satelliten. Diese ändert sich aufgrund der Höhe der Erdoberfläche und eventueller Bodenbewegungen. Durch den Vergleich zweier SAR-Aufnahmen kann so für jedes Bildelement die entsprechende Phasenvarianz bestimmt werden.

Zusätzlich zu den RADAR-Informationen wird ein hochgenaues digitales Geländemodell (DGM) zur Eliminierung des Reliefeinflusses benötigt. Präzise Umlaufbahnparameter des Satelliten zum Zeitpunkt der Aufnahme ermöglichen eine hochgenaue Verortung der Aufnahmen. Die Darstellung der Phasenvarianzen für jedes Bildelement (Pixel) erfolgt in dem sogenannten Interferogramm.

### 1.4 Persistent Scatterer-Analyse (PSInSAR)

Unter Persistent Scatterer werden Punktstrahler mit einem besonders starken und zeitlich konstanten Rückstreusignal bezeichnet. Diese Punktstrahler befinden sich meist an künstlichen Objekten wie Gebäuden, Brücken usw., können jedoch auch natürlicher Herkunft sein und z.B. an größeren Felsen entstehen. Diese Punktstrahler besitzen eine besonders günstige Orientierung zum Satelliten, wodurch sie einen Großteil der einfallenden Radarstrahlung zum Sensor zurückstreuen. Der Punktstrahler kann eine Größe von wenigen Dezimetern haben, stellt jedoch für das entsprechen-

de Pixel, welches erheblich größer ist, das dominante Rückstreusignal dar. Phasenvarianzen lassen sich somit auf Bewegungen dieses einzelnen Punktes zurückführen. Die Punktrahler weisen zudem auch über Jahre hinweg eine hohe Kohärenz auf, so dass diese Punkte innerhalb einer Zeitreihe in jeder Aufnahme identifiziert und mit jeder anderen Aufnahme verglichen werden können.

Im Zuge der Auswertung erfolgt eine Atmosphärenkorrektur jeder Aufnahme, so dass die Genauigkeit der Bewegungsanalyse im Vergleich zur DInSAR-Auswertung deutlich gesteigert werden kann. Die Bewegungsangabe erfolgt in der Schrägsicht des Sensors.

### 3. Datengrundlage und Projektgebiet

- **Verwendeter Satellit und Orbit:**
  - TerraSAR-X, Ascending Orbit, Orbit 116
  
- **Verwendete Software und Datum der Prozessierung:**
  - SARscape, Version 5.1.2
  - Prozessierung erfolgte von April – August 2015
  
- **Auswertemethode:**
  - Persistent-Scatterer-Interferometrie (Erläuterung s.o.)
  
- **Zeitraum der Analyse:**
  - 14.11.2011 – 23.12.2013

- **Datumsangaben der verwendeten Satellitenszenen**

14.11.2011, 25.11.2011, 06.12.2011, 17.12.2011, 28.12.2011, 08.01.2012, 19.01.2012,  
10.02.2012, 05.04.2012, 16.04.2012, 27.04.2012, 08.05.2012, 19.05.2012, 30.05.2012,  
10.06.2012, 21.06.2012, 02.07.2012, 24.07.2012, 26.08.2012, 06.09.2012, 17.09.2012,  
20.10.2012, 11.11.2012, 22.11.2012, 14.12.2012, 25.12.2012, 05.01.2013, 27.01.2013,  
18.02.2013, 01.03.2013, 12.03.2013, 23.03.2013, 25.04.2013, 06.05.2013, 17.05.2013,  
28.05.2013, 08.06.2013, 19.06.2013, 11.07.2013, 22.07.2013, 15.09.2013, 26.09.2013,  
07.10.2013, 18.10.2013, 29.10.2013, 09.11.2013, 20.11.2013, 01.12.2013, 12.12.2013,  
23.12.2013

Datum der Masterszene:  
22.11.2012

Lage- und Höhengenaugigkeit der PS-Punkte:  
~ 2 m

## Lage der Referenzpunkte: ID, Koordinaten in UTM, Zone 32 N

ID	Rechtswert	Hochwert
1	355823	5539365
2	355823	5539365
3	355823	5539365
4	361739	5542435
5	361739	5542435
6	365052	5542854
7	365050	5542854
8	367592	5542611
9	369473	5543201
10	369472	5543203
11	373309	5543403
12	373309	5543403
13	374842	5542993
14	374842	5542993
15	356117	5542481
16	358453	5543037
17	359182	5542826
18	361740	5542433
19	361740	5542435
20	364587	5543662
21	365317	5542995
22	367305	5543184
23	368435	5544853
24	369472	5543203
25	369064	5544756
26	374293	5543771
27	374293	5543771
28	374293	5543771
29	356117	5542481
30	358455	5543037
31	358531	5542985
32	361969	5546536
33	361969	5546536
34	364574	5543930
35	365868	5544900
36	366857	5545786
37	368435	5544851
38	369064	5544756
39	373110	5547217



40	373110	5547217
41	374293	5543771
42	374293	5543771
43	356507	5548477
44	356507	5548477
45	359230	5548237
46	361969	5546536
47	362006	5546883
48	364544	5546630
49	365289	5546258
50	366376	5546481
51	367391	5546696
52	369064	5544756
53	373110	5547217
54	373366	5547494
55	373366	5547494
56	374284	5549671
57	356507	5548477
58	356507	5548477
59	359232	5548237
60	359232	5548237
61	362006	5546884
62	364544	5546630
63	364544	5546630
64	366064	5548664
65	366853	5550756
66	369772	5550711
67	371446	5549717
68	372020	5549674
69	374284	5549671
70	374284	5549671
71	356507	5548477
72	356507	5548477
73	359232	5548237
74	359230	5548237
75	362144	5549774
76	364544	5546630
77	365037	5551694
78	366853	5550756
79	366854	5550756
80	369772	5550711
81	371446	5549717

82	372020	5549674
83	374197	5552253
84	374197	5552253
85	356507	5548477
86	358386	5550170
87	358386	5550170
88	358386	5550170
89	362607	5550747
90	362607	5550749
91	365037	5551694
92	366854	5550756
93	366853	5550756
94	369772	5550711
95	370998	5551225
96	371871	5552331
97	372956	5552190
98	374197	5552253
99	356507	5548477
100	358386	5550170
101	358208	5551674
102	360693	5552576
103	360693	5552576
104	365037	5551694
105	365101	5551708
106	365101	5551708
107	367106	5552083
108	369010	5553407
109	370281	5554167
110	372956	5552190
111	373559	5554091
112	373864	5555035
113	357282	5554041
114	357282	5554041
115	357282	5554041
116	360693	5552576
117	360693	5552578
118	362607	5550749
119	365197	5554285
120	365717	5554746
121	367455	5554734
122	369438	5555705
123	370565	5555598

124	372033	5555976
125	373239	5556081
126	373415	5556218
127	357282	5554041
128	357420	5554335
129	357420	5554335
130	357420	5554335
131	360693	5552578
132	362492	5556026
133	365103	5556363
134	366589	5555297
135	366590	5555295
136	368866	5556583
137	368936	5556736
138	372033	5555976
139	373239	5556081
140	373415	5556216
141	357110	5555079
142	357111	5555080
143	357110	5555079
144	357420	5554335
145	362492	5556026
146	362492	5556026
147	365104	5556363
148	365105	5556365
149	366589	5555297
150	369011	5556796
151	369011	5556796
152	355823	5539365
153	355823	5539365
154	355823	5539365
155	361495	5531374
156	365415	5530859
157	365415	5530859
158	366859	5533134
159	366859	5533134
160	369908	5531139
161	369908	5531139
162	374572	5531861
163	374572	5531861
164	374572	5531861
165	375159	5533040

166	355553	5530522
167	357015	5530713
168	358733	5530592
169	361015	5531361
170	361211	5530962
171	361495	5531374
172	365415	5530859
173	365415	5530859
174	366859	5533134
175	369907	5531679
176	370190	5532138
177	371026	5534307
178	374521	5532067
179	374521	5532067
180	375817	5533999
181	355553	5530522
182	357893	5531281
183	358730	5530592
184	360628	5532439
185	361495	5531374
186	364472	5532827
187	364472	5532827
188	366859	5533134
189	366859	5533134
190	370190	5532138
191	371026	5534307
192	371026	5534307
193	374717	5533712
194	375159	5533040
195	375817	5533999
196	356626	5532392
197	356626	5532390
198	359750	5534118
199	359767	5534142
200	360844	5532691
201	364175	5533896
202	364349	5533995
203	365383	5534935
204	366657	5535146
205	371026	5534307
206	371026	5534307
207	374717	5533712

208	374717	5533712
209	375953	5535512
210	375953	5535512
211	356524	5533375
212	357906	5534836
213	359750	5534118
214	359767	5534142
215	360844	5532691
216	363593	5536715
217	365383	5534935
218	365383	5534935
219	366501	5535774
220	371026	5534307
221	371026	5534307
222	371286	5537393
223	375953	5535512
224	375953	5535512
225	375953	5535512
226	356357	5536448
227	356578	5536306
228	357753	5535493
229	360515	5537036
230	361391	5537310
231	363593	5536715
232	364811	5537843
233	366490	5536833
234	366491	5536833
235	368374	5540510
236	368374	5540510
237	371286	5537393
238	375953	5535512
239	375953	5535512
240	375953	5535512
241	356357	5536448
242	356576	5536306
243	357985	5538144
244	359287	5537821
245	361389	5537312
246	362445	5537682
247	363952	5538564
248	365013	5538429
249	366429	5538284

250	368374	5540510
251	368374	5540510
252	371341	5540260
253	371341	5540260
254	373587	5541626
255	375953	5535512
256	374842	5542993
257	356589	5539067
258	356589	5539067
259	357985	5538144
260	359287	5537821
261	362445	5537682
262	364179	5539146
263	364179	5539146
264	365476	5540755
265	365551	5540971
266	368374	5540510
267	369524	5542880
268	371343	5540260
269	371341	5540260
270	373587	5541626
271	375004	5543661
272	375004	5543661
273	356589	5539067
274	356589	5539067
275	357635	5541080
276	358633	5540937
277	360369	5541344
278	361151	5542284
279	365476	5540755
280	365551	5540971
281	367224	5542679
282	367592	5542613
283	369522	5542880
284	369524	5542880
285	371343	5540260
286	373309	5543403
287	374842	5542993
288	375004	5543661
289	356282	5542338
290	357052	5541991
291	357052	5541991

292	358634	5540937
293	361151	5542284
294	361687	5542350
295	361724	5543219
296	364587	5543669
297	365316	5542995
298	367590	5542611
299	368310	5543415
300	369468	5543202
301	373309	5543403
302	373309	5543403
303	375004	5543661
304	375004	5543661
305	356282	5542338
306	356282	5542338
307	358452	5543037
308	358454	5543037
309	361151	5542284
310	361724	5543219
311	361724	5543219
312	364587	5543662
313	367154	5543756
314	367154	5543756
315	368310	5543415
316	369468	5543202

## 4. Projektgebiet und statistische Parameter des Ergebnisses

- Größe des Prozessierungsgebiets:
  - ~ 530 km<sup>2</sup>
- Anzahl der identifizierten PSI-Punkte
  - 2.195.788
- Durchschnittliche Dichte der PSI-Punkte pro km<sup>2</sup>
  - ~ 4.143
- Durchschnittliche jährliche Bewegungsrate für das gesamte Prozessierungsgebiet
  - 0,24 mm/Jahr
- Wertebereich der PS-Punkte, der als stabil angesehen werden kann
  - Das Ergebnis wurde hinsichtlich vorhandener Ausreißer und instabiler Punkte manuell bereinigt. Bei den vorhandenen Punkten handelt es sich somit um stabile PS-Punkte.
- Standardabweichung der durchschnittlichen jährlichen Bewegungsrate
  - 1,50 mm/Jahr
- Unkompensierte atmosphärische Fehler
  - Es konnten keine signifikanten atmosphärischen Restfehler festgestellt werden.
- Sichtbare Neigung oder Phasentrends
  - Es konnte kein signifikanter Phasentrend festgestellt werden.
- Gebiete, für welche keine Prozessierungsergebnisse vorliegen:
  - -/-
- Auffälligkeiten:
  - -/-
- Erläuterungen zu der Spaltenbezeichnung in der Shapefile-Datei
  - ID: Individuelle Kennung jedes Punktes
  - X: Rechtswert (UTM 32 N, WGS84)
  - Y: Hochwert (UTM 32 N, WGS84)
  - Z: Höhe (Höhe über NN)
  - Velocity: Durchschnittliche jährliche Bewegungsrate [mm/Jahr]
  - Coherence: Kohärenz [Wertebereich >0 bis 1]
  - V\_Precision: Standardabweichung der durchschnittlichen jährlichen Bewegungsrate aufgrund unkompensierter atmosphärischer Fehler [mm/Jahr]
  - D\_JJJJMMTT: Bewegung [mm] für den jeweiligen Aufnahmetermin bezogen auf die erste Aufnahme (Nullmessung)



# PROZESSIERUNGSBERICHT

---

PSInSAR-Prozessierung für das Untersuchungsgebiet  
Mosel in der Rhein-Mosel-Region

TerraSAR-X - Orbit 154

---

Michael Mares

31.08.2015



Bundesanstalt für  
Geowissenschaften und Rohstoffe

# TRIGIS

Die Welt der Geodaten

## Inhalt

1.	Erläuterungen zum Auswerteverfahren .....	3
1.1	RADAR-Fernerkundung.....	3
1.2	Synthetic Aperture Radar (SAR) .....	3
1.3	Interferometrie .....	3
1.4	Persistent Scatterer-Analyse (PSInSAR).....	3
2.	Datengrundlage und Projektgebiet.....	5
3.	Lage der Referenzpunkte: ID, Koordinaten in UTM, Zone 32 N .....	6
4.	Projektgebiet und statistische Parameter des Ergebnisses .....	8

## 1. Erläuterungen zum Auswerteverfahren

Zum besseren Verständnis der Ergebnisse werden im Folgenden kurz die theoretischen Grundlagen der SAR-Interferometrie erläutert.

### 1.1 RADAR-Fernerkundung

Das Auswertungsverfahren der SAR (Synthetic Aperture Radar) Interferometrie beruht auf der Analyse von Radio Detection and Ranging-Satellitenaufnahmen (RADAR). RADAR stellt ein sogenanntes aktives Aufnahmesystem dar, welches im Gegensatz zu passiven Systemen, die zu messende Strahlung selbst erzeugt. Das Verfahren ist somit von der Sonne unabhängig. Weiterhin kann die langwellige Radarstrahlung Wolken fast ungehindert passieren. Diese Eigenschaften ermöglichen es, im Gegensatz zu Luftbildern oder optischen Satellitenaufnahmen, tageszeit- und wetterunabhängig Aufnahmen eines Gebiets zu erstellen. Das System liefert daher mit hoher Zuverlässigkeit Informationen des Untersuchungsgebietes.

### 1.2 Synthetic Aperture Radar (SAR)

Klassische RADAR Systeme mit realer Apertur (RAR) unterliegen der Einschränkung, dass die Bodenauflösung abhängig von der Größe der Antenne des Satelliten ist. Ein Satellit würde für eine Bodenauflösung von wenigen Metern eine kilometerlange Antenne benötigen. Da ein solches System im Weltraum nicht stabil zu betreiben ist, bedient man sich der Methode des Radar mit synthetischer Apertur (SAR). Erreicht wird dies durch die Auswertung der Dopplereffektverschiebung des Radar-Echos, welche durch die Mehrfachbeleuchtung jedes Bodenelements während des Überflugs entsteht. Auf eine weitere Beschreibung des Verfahrens wird an dieser Stelle verzichtet.

### 1.3 Interferometrie

Beim Empfang des von der Erdoberfläche reflektierten Radarsignals erfolgt parallel zur Aufzeichnung der Stärke des Radarechos auch die Aufzeichnung der Phase der elektro-magnetischen Strahlung. Die Phase stellt den Schwingungszustand des elektrischen Feldes dar. Dieser Schwingungszustand ist abhängig von der Entfernung des Satelliten zur Erdoberfläche, also der Weglänge vom Erdboden bis zur Antenne des Satelliten. Diese ändert sich aufgrund der Höhe der Erdoberfläche und eventueller Bodenbewegungen. Durch den Vergleich zweier SAR-Aufnahmen kann so für jedes Bildelement die entsprechende Phasenvarianz bestimmt werden.

Zusätzlich zu den RADAR-Informationen wird ein hochgenaues digitales Geländemodell (DGM) zur Eliminierung des Reliefeinflusses benötigt. Präzise Umlaufbahnparameter des Satelliten zum Zeitpunkt der Aufnahme ermöglichen eine hochgenaue Verortung der Aufnahmen. Die Darstellung der Phasenvarianzen für jedes Bildelement (Pixel) erfolgt in dem sogenannten Interferogramm.

### 1.4 Persistent Scatterer-Analyse (PSInSAR)

Unter Persistent Scatterer werden Punktstrahler mit einem besonders starken und zeitlich konstanten Rückstreusignal bezeichnet. Diese Punktstrahler befinden sich meist an künstlichen Objekten wie Gebäuden, Brücken usw., können jedoch auch natürlicher Herkunft sein und z.B. an größeren Felsen entstehen. Diese Punktstrahler besitzen eine besonders günstige Orientierung zum Satelliten, wodurch sie einen Großteil der einfallenden Radarstrahlung zum Sensor zurückstreuen. Der Punktstrahler kann eine Größe von wenigen Dezimetern haben, stellt jedoch für das entsprechen-

de Pixel, welches erheblich größer ist, das dominante Rückstreusignal dar. Phasenvarianzen lassen sich somit auf Bewegungen dieses einzelnen Punktes zurückführen. Die Punktrahler weisen zudem auch über Jahre hinweg eine hohe Kohärenz auf, so dass diese Punkte innerhalb einer Zeitreihe in jeder Aufnahme identifiziert und mit jeder anderen Aufnahme verglichen werden können.

Im Zuge der Auswertung erfolgt eine Atmosphärenkorrektur jeder Aufnahme, so dass die Genauigkeit der Bewegungsanalyse im Vergleich zur DInSAR-Auswertung deutlich gesteigert werden kann. Die Bewegungsangabe erfolgt in der Schrägsicht des Sensors.

## 2. Datengrundlage und Projektgebiet

- **Verwendeter Satellit und Orbit:**
  - TerraSAR-X, Descending Orbit, Orbit 154
  
- **Verwendete Software und Datum der Prozessierung:**
  - SARscape, Version 5.1
  - Prozessierung erfolgte von März – Juli 2015
  
- **Auswertemethode:**
  - Persistent-Scatterer-Interferometrie (Erläuterung s.o.)
  
- **Zeitraum der Analyse:**
  - 22.01.2012 – 04.12.2013
  
- **Datumsangaben der verwendeten Satellitenszenen**

22.01.2012	02.02.2012	13.02.2012	24.02.2012	06.03.2012	17.03.2012	28.03.2012
19.04.2012	30.04.2012	22.05.2012	13.06.2012	05.07.2012	27.07.2012	18.08.2012
29.08.2012	09.09.2012	20.09.2012	01.10.2012	12.10.2012	23.10.2012	03.11.2012
14.11.2012	25.11.2012	06.12.2012	17.12.2012	28.12.2012	08.01.2013	19.01.2013
30.01.2013	10.02.2013	21.02.2013	04.03.2013	15.03.2013	26.03.2013	06.04.2013
17.04.2013	28.04.2013	09.05.2013	20.05.2013	11.06.2013	03.07.2013	25.07.2013
16.08.2013	29.09.2013	10.10.2013	21.10.2013	01.11.2013	12.11.2013	23.11.2013
04.12.2013						
  
- **Datum der Masterszene:**
  - 06.12.2012
  
- **Lage- und Höhengenaugigkeit der PS-Punkte:**
  - ~ 2 m

### 3. Lage der Referenzpunkte: ID, Koordinaten in UTM, Zone 32 N

ID	Rechtswert	Hochwert
1	373685	5553006
2	372784	5556033
3	369443	5555647
4	368891	5556600
5	362645	5556373
6	357417	5554822
7	356346	5556421
8	373827	5552650
9	369786	5550791
10	369789	5551524
11	367868	5551148
12	364501	5552803
13	362645	5556373
14	357417	5554822
15	373527	5547742
16	372018	5549496
17	369786	5550791
18	367262	5551486
19	364501	5552803
20	362645	5556373
21	357417	5554822
22	372893	5547278
23	368834	5544772
24	368579	5544784
25	366513	5546322
26	359554	5548553
27	359554	5548553
28	359554	5548553
29	372980	5544114
30	369787	5543450
31	368834	5544772
32	366421	5544712
33	361517	5542654
34	361517	5542654
35	359554	5548553
36	373827	5552650
37	373827	5552650
38	365152	5542401
39	365152	5542401

40	361517	5542654
41	361517	5542654
42	359554	5548553
43	370476	5541227
44	370476	5541227
45	369754	5543647
46	365264	5542070
47	365261	5542069
48	360422	5537550
49	356981	5537235
50	370476	5541227
51	370476	5541227
52	364363	5537580
53	364363	5537580
54	362627	5537835
55	360422	5537550
56	356981	5537235
57	370476	5541227
58	370476	5541227
59	364363	5537580
60	364363	5537580
61	359719	5534038
62	359719	5534038
63	356981	5537235
64	370476	5541227
65	370476	5541227
66	361858	5531058
67	361858	5531058
68	359719	5534038
69	359719	5534038
70	356469	5532492
71	370476	5541227
72	370476	5541227
73	370476	5541227
74	370476	5541227
75	358855	5530493
76	356910	5530427

## 4. Projektgebiet und statistische Parameter des Ergebnisses

- Größe des Prozessierungsgebiets:
  - ~ 530 km<sup>2</sup>
- Anzahl der identifizierten PSI-Punkte
  - 2.145.624
- Durchschnittliche Dichte der PS-Punkte pro km<sup>2</sup>
  - ~ 4.048
- Durchschnittliche jährliche Bewegungsrate für das gesamte Prozessierungsgebiet
  - -0,28 mm/Jahr
- Wertebereich der PS-Punkte, der als stabil angesehen werden kann
  - Das Ergebnis wurde hinsichtlich vorhandener Ausreißer und instabiler Punkte manuell bereinigt. Bei den vorhandenen Punkten handelt es sich somit um stabile PS-Punkte.
- Standardabweichung der durchschnittlichen jährlichen Bewegungsrate
  - 1,51 mm/Jahr
- Unkompensierte atmosphärische Fehler
  - Es konnten keine signifikanten atmosphärischen Restfehler festgestellt werden.
- Sichtbare Neigung oder Phasentrends
  - Es konnte kein signifikanter Phasentrend festgestellt werden.
- Gebiete, für welche keine Prozessierungsergebnisse vorliegen:
  - -/-
- Auffälligkeiten:
  - -/-
- Erläuterungen zu der Spaltenbezeichnung in der Shapefile-Datei
  - OBJECTID: Individuelle Kennung jedes Punktes
  - X: Rechtswert (UTM 32 N, WGS84)
  - Y: Hochwert (UTM 32 N, WGS84)
  - Z: Höhe (Höhe über NN)
  - Velocity: Durchschnittliche jährliche Bewegungsrate [mm/Jahr]
  - Coherence: Kohärenz [Wertebereich >0 bis 1]
  - V\_Precision: Standardabweichung der durchschnittlichen jährlichen Bewegungsrate aufgrund unkompensierter atmosphärischer Fehler [mm/Jahr]
  - D\_JJJJMMTT: Bewegung [mm] für den jeweiligen Aufnahmetermin bezogen auf die erste Aufnahme (Nullmessung)



# PROZESSIERUNGSBERICHT

---

SBAS-Prozessierung für das Untersuchungsgebiet  
Mosel in der Rhein-Mosel-Region

TerraSAR-X - Orbit 116

---

Michael Mares

28.08.2015



Bundesanstalt für  
Geowissenschaften und Rohstoffe

# TRIGIS

Die Welt der Geodaten

## Inhalt

<b>2.</b>	<b>Erläuterungen zum Auswerteverfahren .....</b>	<b>3</b>
1.1	RADAR-Fernerkundung.....	3
1.2	Synthetic Aperture Radar (SAR) .....	3
1.3	Interferometrie .....	3
1.4	Small-BASeline-Interferometrie (SBAS) .....	3
<b>3.</b>	<b>Datengrundlage und Projektgebiet.....</b>	<b>6</b>
<b>4.</b>	<b>SBAS-Netzwerk.....</b>	<b>7</b>
<b>5.</b>	<b>Lage der Referenzpunkte: ID, Koordinaten in UTM, Zone 32 N .....</b>	<b>8</b>
<b>6.</b>	<b>Projektgebiet und statistische Parameter des Ergebnisses .....</b>	<b>11</b>

## 2. Erläuterungen zum Auswerteverfahren

Zum besseren Verständnis der Ergebnisse werden im Folgenden kurz die theoretischen Grundlagen der SAR-Interferometrie erläutert.

### 1.1 RADAR-Fernerkundung

Das Auswertungsverfahren der SAR (Synthetic Aperture Radar) Interferometrie beruht auf der Analyse von Radio Detection and Ranging-Satellitenaufnahmen (RADAR). RADAR stellt ein sogenanntes aktives Aufnahmesystem dar, welches im Gegensatz zu passiven Systemen, die zu messende Strahlung selbst erzeugt. Das Verfahren ist somit von der Sonne unabhängig. Weiterhin kann die langwellige Radarstrahlung Wolken fast ungehindert passieren. Diese Eigenschaften ermöglichen es, im Gegensatz zu Luftbildern oder optischen Satellitenaufnahmen, tageszeit- und wetterunabhängig Aufnahmen eines Gebiets zu erstellen. Das System liefert daher mit hoher Zuverlässigkeit Informationen des Untersuchungsgebietes.

### 1.2 Synthetic Aperture Radar (SAR)

Klassische RADAR Systeme mit realer Apertur (RAR) unterliegen der Einschränkung, dass die Bodenauflösung abhängig von der Größe der Antenne des Satelliten ist. Ein Satellit würde für eine Bodenauflösung von wenigen Metern eine kilometerlange Antenne benötigen. Da ein solches System im Weltraum nicht stabil zu betreiben ist, bedient man sich der Methode des Radar mit synthetischer Apertur (SAR). Erreicht wird dies durch die Auswertung der Dopplerverschiebung des Radar-Echos, welche durch die Mehrfachbeleuchtung jedes Bodenelements während des Überflugs entsteht. Auf eine weitere Beschreibung des Verfahrens wird an dieser Stelle verzichtet.

### 1.3 Interferometrie

Beim Empfang des von der Erdoberfläche reflektierten Radarsignals erfolgt parallel zur Aufzeichnung der Stärke des Radarechos auch die Aufzeichnung der Phase der elektro-magnetischen Strahlung. Die Phase stellt den Schwingungszustand des elektrischen Feldes dar. Dieser Schwingungszustand ist abhängig von der Entfernung des Satelliten zur Erdoberfläche, also der Weglänge vom Erdboden bis zur Antenne des Satelliten. Diese ändert sich aufgrund der Höhe der Erdoberfläche und eventueller Bodenbewegungen. Durch den Vergleich zweier SAR-Aufnahmen kann so für jedes Bildelement die entsprechende Phasenvarianz bestimmt werden.

Zusätzlich zu den RADAR-Informationen wird ein hochgenaues digitales Geländemodell (DGM) zur Eliminierung des Reliefeinflusses benötigt. Präzise Umlaufbahnparameter des Satelliten zum Zeitpunkt der Aufnahme ermöglichen eine hochgenaue Verortung der Aufnahmen. Die Darstellung der Phasenvarianzen für jedes Bildelement (Pixel) erfolgt in dem sogenannten Interferogramm.

### 1.4 Small-BASeline-Interferometrie (SBAS)

Das SBAS-Verfahren basiert auf dem Prinzip der DInSAR-Analyse. Zur Präzisierung der Ergebnisse werden jedoch Interferogramme für eine Vielzahl von sich überschneidenden Aufnahmezeitpunkten erstellt. Da somit für einen Zeitabschnitt viele sich überlappende Bewegungsberechnungen (zwischen allen Kombinationsmöglichkeiten) vorliegen, werden Störkomponenten besser beseitigt und die Genauigkeit deutlich erhöht.

Abbildung 1 zeigt die Verknüpfung der einzelnen Aufnahmezeitpunkte einer Zeitreihe über einen Zeitraum von ca. 7 Jahren. Die Aufnahmezeitpunkte sind hier in einem Koordinatensystem aufgetragen, welches sich aus der räumlichen Basislinie (Y-Achse) und der zeitlichen Basislinie (X-Achse) aufspannt.

Jeder Satellit bewegt sich auf definierten Umlaufbahnen. Innerhalb der Umlaufbahn schwankt die Flugbahn eines Satelliten um einige hundert Meter. Die räumliche Basislinie gibt die Distanz des Satelliten im Orbit zu den Zeitpunkten der Radaraufnahmen an. Da ab einer bestimmten räumlichen Basislinie (kritische Basislinie) eine Auswertung der Phasendifferenzen nicht mehr möglich ist, werden nur solche Aufnahmen kombiniert, welche eine räumliche Basislinie von 50 % der kritischen Basislinie nicht überschreiten. So wird sichergestellt, dass für jedes Aufnahme paar eine Phasendifferenzbestimmung möglich ist.

Die zeitliche Basislinie bezeichnet den Zeitraum zwischen den jeweiligen Satellitenaufnahmen. Mit zunehmender zeitlicher Distanz reduziert sich die Möglichkeit, die Phasendifferenzen zwischen den Aufnahmen zu bestimmen.

Im Rahmen der Auswertung muss somit ein Kompromiss zwischen dem Bestreben zur Erstellung eines möglichst dichten Netzwerks (hohe Redundanz) und dem Verlust der Auswertbarkeit gefunden werden, welcher sich bei großen räumlichen und zeitlichen Basislinien ergibt.

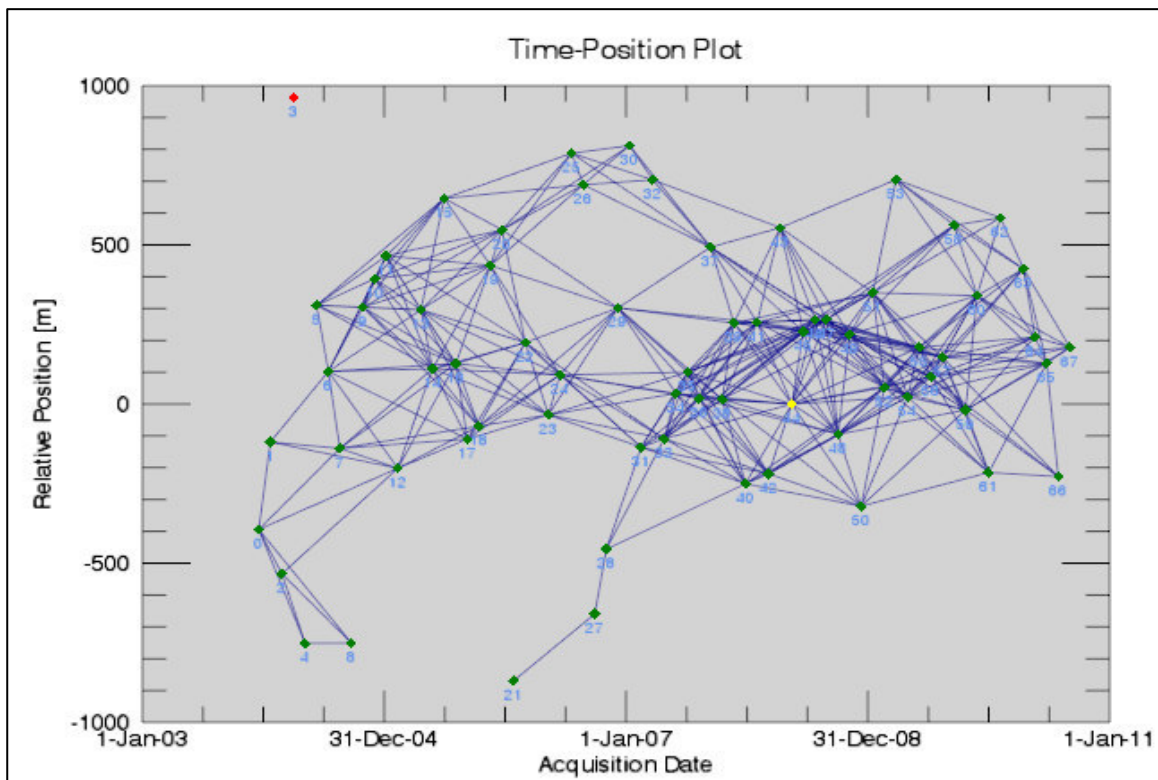
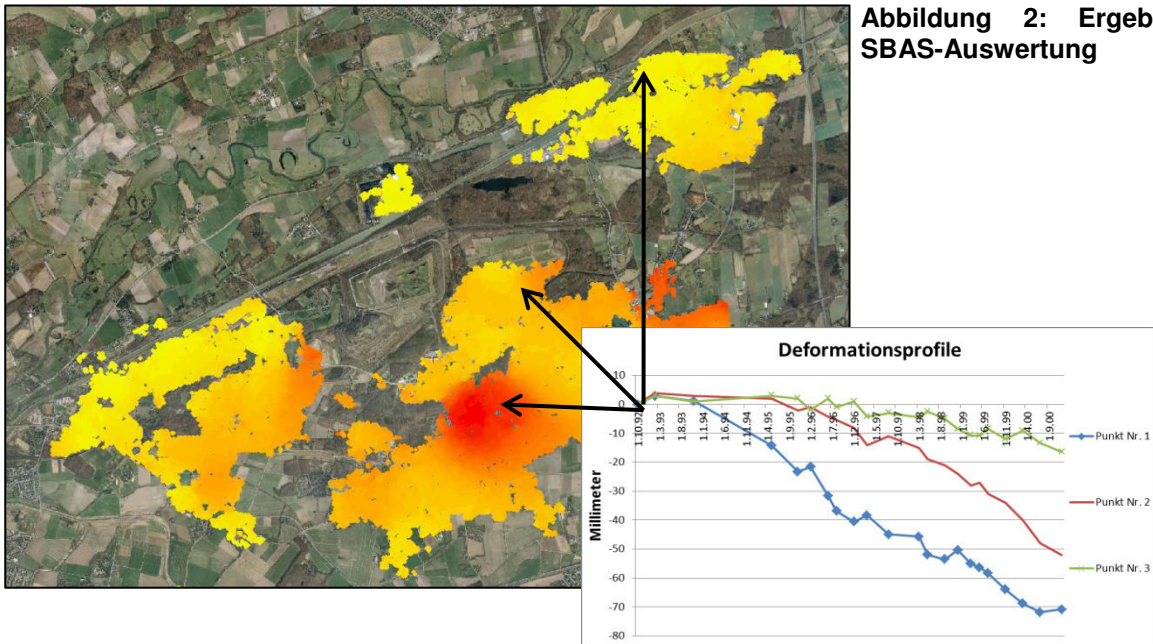


Abbildung 1: Verknüpfung von Aufnahmezeitpunkte

Das Endergebnis ist eine georeferenzierte Rasterdatei, in welcher für jedes Bildelement die Bodenbewegung ausgegeben wird (Abb. 2). Die Informationsdichte entspricht der räumlichen Auflösung der verwendeten Satellitendaten (z.B. 3m, 10m, 25m). Die Bewegungsangabe erfolgt in der Schrägsicht des Sensors.



### 3. Datengrundlage und Projektgebiet

- **Verwendeter Satellit und Orbit:**
  - TerraSAR-X, Ascending Orbit, Orbit 116
- **Verwendete Software und Datum der Prozessierung:**
  - SARscape, Version 5.1.2
  - Prozessierung erfolgte von Juni – August 2015
- **Auswertemethode:**
  - Small-BASeline-Interferometrie (SBAS, Erläuterung s.o.)
- **Zeitraum der Analyse:**
  - 14.11.2011 – 23.12.2013

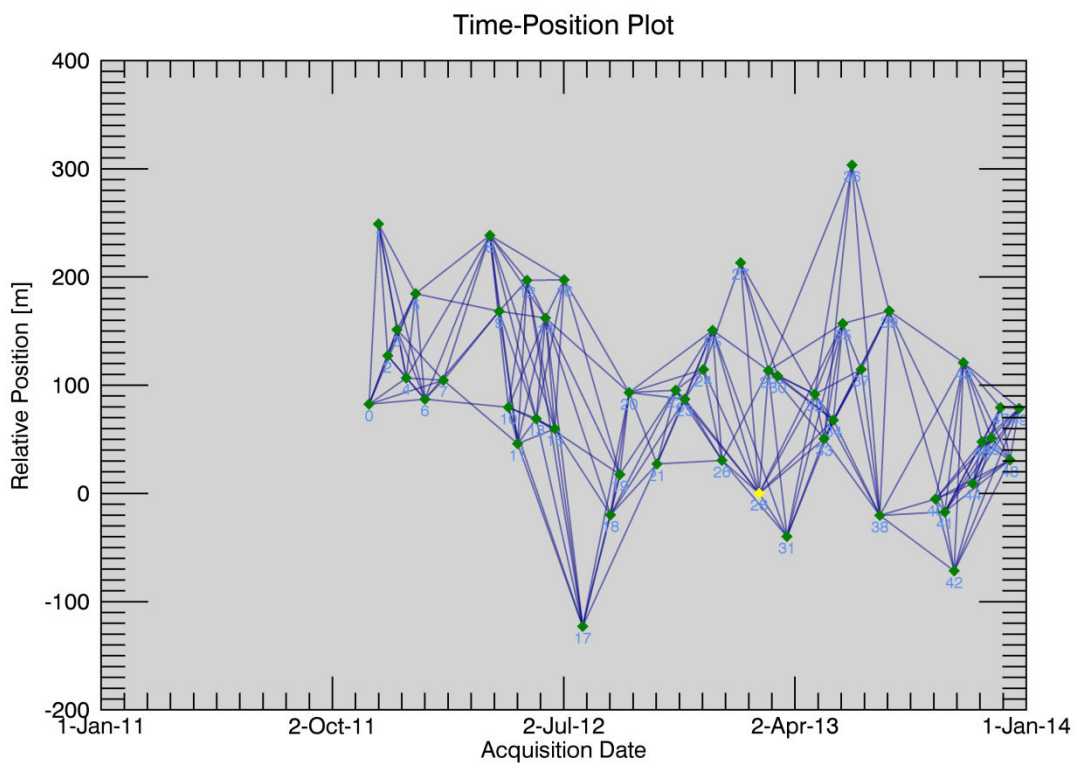
- **Datumsangaben der verwendeten Satellitenszenen**

14.11.2011	25.11.2011	06.12.2011	17.12.2011	28.12.2011	08.01.2012	19.01.2012
10.02.2012	05.04.2012	16.04.2012	27.04.2012	08.05.2012	19.05.2012	30.05.2012
10.06.2012	21.06.2012	02.07.2012	24.07.2012	26.08.2012	06.09.2012	17.09.2012
20.10.2012	11.11.2012	22.11.2012	14.12.2012	25.12.2012	05.01.2013	27.01.2013
18.02.2013	01.03.2013	12.03.2013	23.03.2013	25.04.2013	06.05.2013	17.05.2013
28.05.2013	08.06.2013	19.06.2013	11.07.2013	22.07.2013	15.09.2013	26.09.2013
07.10.2013	18.10.2013	29.10.2013	09.11.2013	20.11.2013	01.12.2013	12.12.2013
23.12.2013						

- **Datum der Masterszene:**
  - 18.02.2013
- **Lage- und Höhengenaugigkeit der PS-Punkte:**
  - ~ 2 m

## 4. SBAS-Netzwerk

- Anzahl der Aufnahmen: 50
- Anzahl der nicht nutzbaren Aufnahmen (rot): 0
- Anzahl der Master-Aufnahmen: 42
- Super-Master: 18.02.2013
- Anzahl der ausgewerteten Bildpaare: 217
- Maximal zulässige Basislinie [% der kritischen Basislinie]: 35 %



## 5. Lage der Referenzpunkte: ID, Koordinaten in UTM, Zone 32 N

ID	Rechtswert	Hochwert
1	374536	5542540
2	375409	5545240
3	369439	5542870
4	369446	5543310
5	368883	5544300
6	368771	5542840
7	368027	5542760
8	367523	5542750
9	367088	5543890
10	368557	5543300
11	367687	5543630
12	365187	5542500
13	364921	5543170
14	364650	5543590
15	364240	5543910
16	363283	5543400
17	362174	5542700
18	361710	5542420
19	361367	5542430
20	361580	5542580
21	361084	5542450
22	361737	5543240
23	360617	5542450
24	359577	5542450
25	358913	5542530
26	358952	5542730
27	358888	5542830
28	355609	5542860
29	355994	5542440
30	366049	5544920
31	367880	5545020
32	366598	5546080
33	366315	5546750
34	365921	5546670
35	364364	5546770
36	359372	5548340
37	358632	5550420
38	362583	5550910
39	360937	5552470



40	365398	5551480
41	366835	5550310
42	366286	5549460
43	368323	5550760
44	367384	5551410
45	373221	5547330
46	357557	5554770
47	358220	5555430
48	356169	5556400
49	362600	5556120
50	361619	5553580
51	365426	5556440
52	366843	5555070
53	366074	5555030
54	367490	5554510
55	368857	5556430
56	369213	5555950
57	369463	5555750
58	369298	5556230
59	372686	5556710
60	371952	5549660
61	371521	5549830
62	370812	5549280
63	371031	5551140
64	371989	5552360
65	373195	5552370
66	373663	5553090
67	373369	5554200
68	373828	5555140
69	373957	5555470
70	373492	5556250
71	372866	5556130
72	372166	5556010
73	370509	5555700
74	365255	5538220
75	364990	5536220
76	357255	5530950
77	357801	5530790
78	355513	5530510
79	369867	5531870
80	372250	5533000
81	374168	5532480

82	375267	5534120
83	365662	5530900
84	356467	5542100
85	358379	5541380
86	361300	5542210
87	374872	5542920
88	372859	5535380
89	359693	5534030
90	368294	5543160

## 6. Projektgebiet und statistische Parameter des Ergebnisses

- Größe des Prozessierungsgebiets:
  - ~ 530 km<sup>2</sup>
- Anzahl der identifizierten SBAS-Punkte
  - 667.991
- Durchschnittliche Dichte der SBAS-Punkte pro km<sup>2</sup>
  - ~ 1.260
- Durchschnittliche jährliche Bewegungsrate für das gesamte Prozessierungsgebiet
  - -0,16 mm/Jahr
- Wertebereich der PS-Punkte, der als stabil angesehen werden kann
  - Das Ergebnis wurde hinsichtlich vorhandener Ausreißer und instabiler Punkte manuell bereinigt. Bei den vorhandenen Punkten handelt es sich somit um stabile PS-Punkte.
- Standardabweichung der durchschnittlichen jährlichen Bewegungsrate
  - 1,37 mm/Jahr
- Unkompensierte atmosphärische Fehler
  - Es konnten keine signifikanten atmosphärischen Restfehler festgestellt werden.
- Sichtbare Neigung oder Phasentrends
  - Es konnte kein signifikanter Phasentrend festgestellt werden.
- Gebiete, für welche keine Prozessierungsergebnisse vorliegen:
  - -/-
- Auffälligkeiten:
  - -/-
- Erläuterungen zu der Spaltenbezeichnung in der Shapefile-Datei
  - ID: Individuelle Kennung jedes Punktes
  - X: Rechtswert (UTM 32 N, WGS84)
  - Y: Hochwert (UTM 32 N, WGS84)
  - Z: Höhe (Höhe über NN)
  - Velocity: Durchschnittliche jährliche Bewegungsrate [mm/Jahr]
  - Coherence: Kohärenz [Wertebereich >0 bis 1]
  - V\_Precision: Standardabweichung der durchschnittlichen jährlichen Bewegungsrate aufgrund unkompensierter atmosphärischer Fehler [mm/Jahr]
  - D\_JJJJMMTT: Bewegung [mm] für den jeweiligen Aufnahmetermin bezogen auf die erste Aufnahme (Nullmessung)

# PROZESSIERUNGSBERICHT

---

SBAS-Prozessierung für das Untersuchungsgebiet  
Mosel in der Rhein-Mosel-Region

TerraSAR-X - Orbit 154

---

Michael Mares

28.08.2015



Bundesanstalt für  
Geowissenschaften und Rohstoffe

# TRIGIS

Die Welt der Geodaten

## Inhalt

<b>2.</b>	<b>Erläuterungen zum Auswerteverfahren .....</b>	<b>3</b>
<b>1.1</b>	<b>RADAR-Fernerkundung.....</b>	<b>3</b>
<b>1.2</b>	<b>Synthetic Aperture Radar (SAR) .....</b>	<b>3</b>
<b>1.3</b>	<b>Interferometrie .....</b>	<b>3</b>
<b>1.4</b>	<b>Small-BASeline-Interferometrie (SBAS) .....</b>	<b>3</b>
<b>3.</b>	<b>Datengrundlage und Projektgebiet.....</b>	<b>6</b>
<b>4.</b>	<b>SBAS-Netzwerk.....</b>	<b>7</b>
<b>5.</b>	<b>Lage der Referenzpunkte: ID, Koordinaten in UTM, Zone 32 N .....</b>	<b>8</b>
<b>6.</b>	<b>Projektgebiet und statistische Parameter des Ergebnisses .....</b>	<b>10</b>

## 2. Erläuterungen zum Auswerteverfahren

Zum besseren Verständnis der Ergebnisse werden im Folgenden kurz die theoretischen Grundlagen der SAR-Interferometrie erläutert.

### 1.1 RADAR-Fernerkundung

Das Auswertungsverfahren der SAR (Synthetic Aperture Radar) Interferometrie beruht auf der Analyse von Radio Detection and Ranging-Satellitenaufnahmen (RADAR). RADAR stellt ein sogenanntes aktives Aufnahmesystem dar, welches im Gegensatz zu passiven Systemen, die zu messende Strahlung selbst erzeugt. Das Verfahren ist somit von der Sonne unabhängig. Weiterhin kann die langwellige Radarstrahlung Wolken fast ungehindert passieren. Diese Eigenschaften ermöglichen es, im Gegensatz zu Luftbildern oder optischen Satellitenaufnahmen, tageszeit- und wetterunabhängig Aufnahmen eines Gebiets zu erstellen. Das System liefert daher mit hoher Zuverlässigkeit Informationen des Untersuchungsgebietes.

### 1.2 Synthetic Aperture Radar (SAR)

Klassische RADAR Systeme mit realer Apertur (RAR) unterliegen der Einschränkung, dass die Bodenauflösung abhängig von der Größe der Antenne des Satelliten ist. Ein Satellit würde für eine Bodenauflösung von wenigen Metern eine kilometerlange Antenne benötigen. Da ein solches System im Weltraum nicht stabil zu betreiben ist, bedient man sich der Methode des Radar mit synthetischer Apertur (SAR). Erreicht wird dies durch die Auswertung der Dopplerverschiebung des Radar-Echos, welche durch die Mehrfachbeleuchtung jedes Bodenelements während des Überflugs entsteht. Auf eine weitere Beschreibung des Verfahrens wird an dieser Stelle verzichtet.

### 1.3 Interferometrie

Beim Empfang des von der Erdoberfläche reflektierten Radarsignals erfolgt parallel zur Aufzeichnung der Stärke des Radarechos auch die Aufzeichnung der Phase der elektro-magnetischen Strahlung. Die Phase stellt den Schwingungszustand des elektrischen Feldes dar. Dieser Schwingungszustand ist abhängig von der Entfernung des Satelliten zur Erdoberfläche, also der Weglänge vom Erdboden bis zur Antenne des Satelliten. Diese ändert sich aufgrund der Höhe der Erdoberfläche und eventueller Bodenbewegungen. Durch den Vergleich zweier SAR-Aufnahmen kann so für jedes Bildelement die entsprechende Phasenvarianz bestimmt werden.

Zusätzlich zu den RADAR-Informationen wird ein hochgenaues digitales Geländemodell (DGM) zur Eliminierung des Reliefeinfluss benötigt. Präzise Umlaufbahnparameter des Satelliten zum Zeitpunkt der Aufnahme ermöglichen eine hochgenaue Verortung der Aufnahmen. Die Darstellung der Phasenvarianzen für jedes Bildelement (Pixel) erfolgt in dem sogenannten Interferogramm.

### 1.4 Small-BASeline-Interferometrie (SBAS)

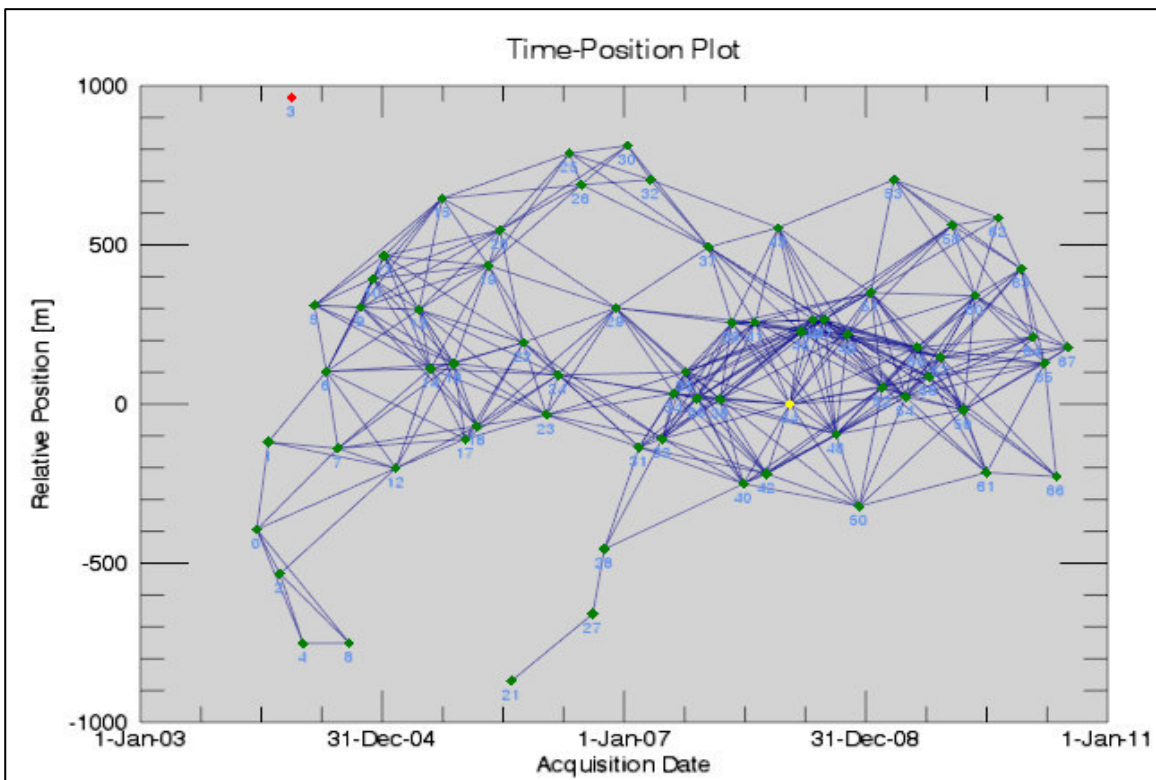
Das SBAS-Verfahren basiert auf dem Prinzip der DInSAR-Analyse. Zur Präzisierung der Ergebnisse werden jedoch Interferogramme für eine Vielzahl von sich überschneidenden Aufnahmezeitpunkten erstellt. Da somit für einen Zeitabschnitt viele sich überlappende Bewegungsberechnungen (zwischen allen Kombinationsmöglichkeiten) vorliegen, werden Störkomponenten besser beseitigt und die Genauigkeit deutlich erhöht.

Abbildung 1 zeigt die Verknüpfung der einzelnen Aufnahmezeitpunkte einer Zeitreihe über einen Zeitraum von ca. 7 Jahren. Die Aufnahmezeitpunkte sind hier in einem Koordinatensystem aufgetragen, welches sich aus der räumlichen Basislinie (Y-Achse) und der zeitlichen Basislinie (X-Achse) aufspannt.

Jeder Satellit bewegt sich auf definierten Umlaufbahnen. Innerhalb der Umlaufbahn schwankt die Flugbahn eines Satelliten um einige hundert Meter. Die räumliche Basislinie gibt die Distanz des Satelliten im Orbit zu den Zeitpunkten der Radaraufnahmen an. Da ab einer bestimmten räumlichen Basislinie (kritische Basislinie) eine Auswertung der Phasendifferenzen nicht mehr möglich ist, werden nur solche Aufnahmen kombiniert, welche eine räumliche Basislinie von 50 % der kritischen Basislinie nicht überschreiten. So wird sichergestellt, dass für jedes Aufnahme paar eine Phasendifferenzbestimmung möglich ist.

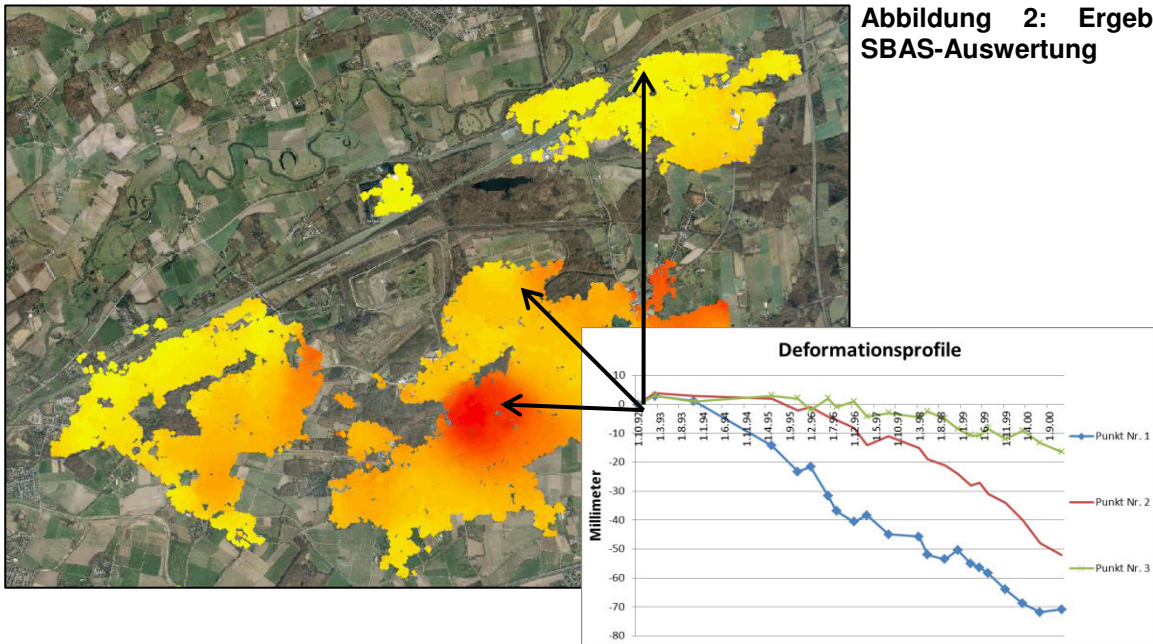
Die zeitliche Basislinie bezeichnet den Zeitraum zwischen den jeweiligen Satellitenaufnahmen. Mit zunehmender zeitlicher Distanz reduziert sich die Möglichkeit, die Phasendifferenzen zwischen den Aufnahmen zu bestimmen.

Im Rahmen der Auswertung muss somit ein Kompromiss zwischen dem Bestreben zur Erstellung eines möglichst dichten Netzwerks (hohe Redundanz) und dem Verlust der Auswertbarkeit gefunden werden, welcher sich bei großen räumlichen und zeitlichen Basislinien ergibt.



**Abbildung 1: Verknüpfung von Aufnahmezeitpunkte**

Das Endergebnis ist eine georeferenzierte Rasterdatei, in welcher für jedes Bildelement die Bodenbewegung ausgegeben wird (Abb. 2). Die Informationsdichte entspricht der räumlichen Auflösung der verwendeten Satellitendaten (z.B. 3m, 10m, 25m). Die Bewegungsangabe erfolgt in der Schrägsicht des Sensors.





### 3. Datengrundlage und Projektgebiet

- **Verwendeter Satellit und Orbit:**
  - TerraSAR-X, Descending Orbit, Orbit 154
- **Verwendete Software und Datum der Prozessierung:**
  - SARscape, Version 5.1.2
  - Prozessierung erfolgte von April – August 2015
- **Auswertemethode:**
  - Small-BASeline-Interferometrie (SBAS, Erläuterung s.o.)
- **Zeitraum der Analyse:**
  - 22.01.2012 – 04.12.2013

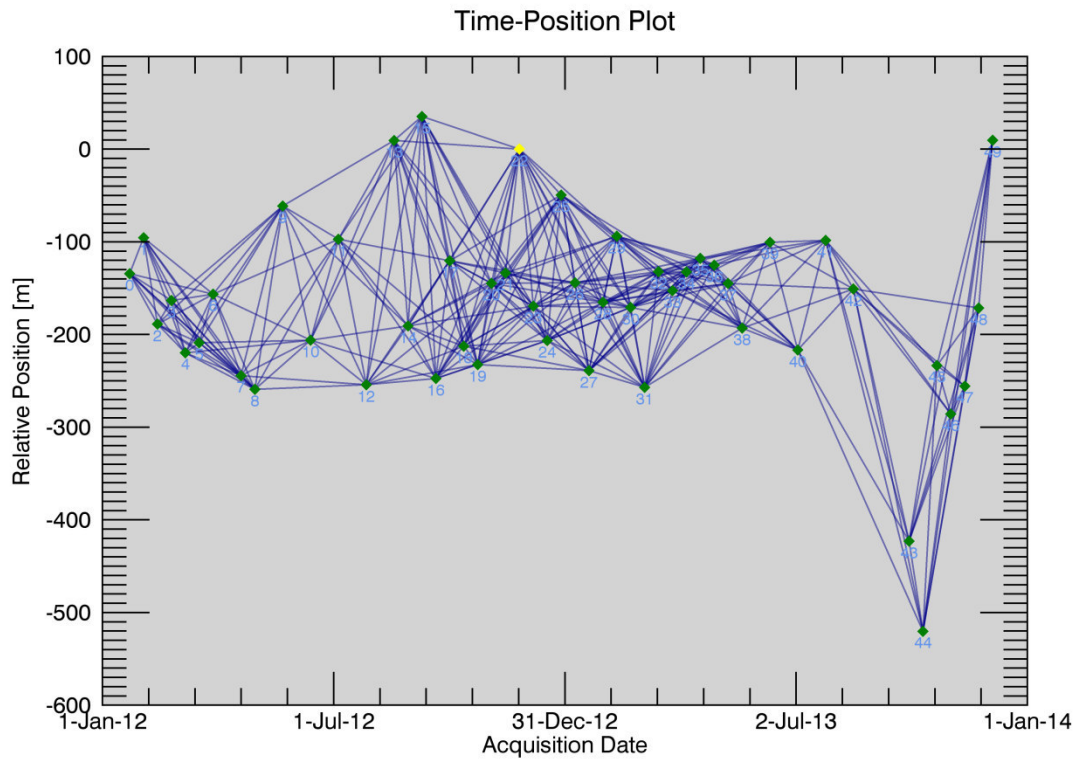
- **Datumsangaben der verwendeten Satellitenszenen**

22.01.2012	02.02.2012	13.02.2012	24.02.2012	06.03.2012	17.03.2012	28.03.2012
19.04.2012	30.04.2012	22.05.2012	13.06.2012	05.07.2012	27.07.2012	18.08.2012
29.08.2012	09.09.2012	20.09.2012	01.10.2012	12.10.2012	23.10.2012	03.11.2012
14.11.2012	25.11.2012	06.12.2012	17.12.2012	28.12.2012	08.01.2013	19.01.2013
30.01.2013	10.02.2013	21.02.2013	04.03.2013	15.03.2013	26.03.2013	06.04.2013
17.04.2013	28.04.2013	09.05.2013	20.05.2013	11.06.2013	03.07.2013	25.07.2013
16.08.2013	29.09.2013	10.10.2013	21.10.2013	01.11.2013	12.11.2013	23.11.2013
04.12.2013						

- **Datum der Masterszene:**
  - 06.12.2012
- **Lage- und Höhengenaugigkeit der PS-Punkte:**
  - ~ 2 m

## 4. SBAS-Netzwerk

- Anzahl der Aufnahmen: 50
- Anzahl der nicht nutzbaren Aufnahmen (rot): 0
- Anzahl der Master-Aufnahmen: 44
- Super-Master: 06.12.2012
- Anzahl der ausgewerteten Bildpaare: 327
- Maximal zulässige Basislinie [% der kritischen Basislinie]: 35 %



## 5. Lage der Referenzpunkte: ID, Koordinaten in UTM, Zone 32 N

ID	Rechtswert	Hochwert
1	365262	5542480
2	368349	5543550
3	369657	5543270
4	373400	5547540
5	371972	5549760
6	371715	5552070
7	372246	5552200
8	374026	5552380
9	373889	5555250
10	373965	5555470
11	372798	5556870
12	370223	5555650
13	369172	5556630
14	366090	5556110
15	365265	5556400
16	365580	5556450
17	368116	5550850
18	367102	5551580
19	368983	5553460
20	361630	5553600
21	357464	5554790
22	357964	5555040
23	358564	5555310
24	366851	5550670
25	366386	5546660
26	364218	5546700
27	359153	5548280
28	356351	5548120
29	358503	5550340
30	374992	5543030
31	372925	5535150
32	372901	5535380
33	374738	5532010
34	374513	5532430
35	375003	5532870
36	369687	5530780
37	369971	5531860
38	372459	5533030
39	361522	5541930

40	356438	5542150
41	356111	5542400
42	356269	5541820
43	365552	5538250
44	365636	5537600
45	364280	5537870
46	365109	5534760
47	364684	5534650
48	359313	5538160
49	356634	5538700
50	361578	5531150
51	356424	5532250
52	357301	5530810
53	356917	5530680
54	355311	5530450
55	355571	5530550
56	371721	5536950

## 6. Projektgebiet und statistische Parameter des Ergebnisses

- Größe des Prozessierungsgebiets:
  - ~ 530 km<sup>2</sup>
- Anzahl der identifizierten SBAS-Punkte
  - 560.814
- Durchschnittliche Dichte der SBAS-Punkte pro km<sup>2</sup>
  - ~ 1.056
- Durchschnittliche jährliche Bewegungsrate für das gesamte Prozessierungsgebiet
  - -0,21 mm/Jahr
- Wertebereich der PS-Punkte, der als stabil angesehen werden kann
  - Das Ergebnis wurde hinsichtlich vorhandener Ausreißer und instabiler Punkte manuell bereinigt. Bei den vorhandenen Punkten handelt es sich somit um stabile PS-Punkte.
- Standardabweichung der durchschnittlichen jährlichen Bewegungsrate
  - 1,48 mm/Jahr
- Unkompensierte atmosphärische Fehler
  - Es konnten keine signifikanten atmosphärischen Restfehler festgestellt werden.
- Sichtbare Neigung oder Phasentrends
  - Es konnte kein signifikanter Phasentrend festgestellt werden.
- Gebiete, für welche keine Prozessierungsergebnisse vorliegen:
  - -/-
- Auffälligkeiten:
  - -/-
- Erläuterungen zu der Spaltenbezeichnung in der Shapefile-Datei
  - OBJECTID: Individuelle Kennung jedes Punktes
  - X: Rechtswert (UTM 32 N, WGS84)
  - Y: Hochwert (UTM 32 N, WGS84)
  - Z: Höhe (Höhe über NN)
  - Velocity: Durchschnittliche jährliche Bewegungsrate [mm/Jahr]
  - Coherence: Kohärenz [Wertebereich >0 bis 1]
  - V\_Precision: Standardabweichung der durchschnittlichen jährlichen Bewegungsrate aufgrund unkompensierter atmosphärischer Fehler [mm/Jahr]
  - D\_JJJJMMTT: Bewegung [mm] für den jeweiligen Aufnahmetermin bezogen auf die erste Aufnahme (Nullmessung)

## Summary of Proposal GEO2684

<b>Title</b>	<b>Copernicus service in support of geohazard assessment and regional planning in the region Rhine-Moselle</b>
<b>Investigator</b>	Wolf, Corinna - Bundesanstalt f r Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR), Gef hrdungsanalysen, Fernerkundung
<b>Team Member</b>	Dr. Motagh, Mahdi - GFZ Helmholtz Centre, Department of Geodesy and Remote Sensing Mr. Mares, Michael - TRIGIS GeoServices GmbH, Remote Sensing
<b>Summary</b>	<p>The two-year project Copernicus service in support of geohazard assessment and regional planning in the region Rhine-Moselle , started by the Federal Institute for Geosciences and Natural Resources (BGR) and the State Authority for Geology and Mining of Rhineland-Palatinate (LGB) is part of the national Copernicus development programme in Germany. The project is funded by DLR Space Administration (DLR RFM) on behalf of the Federal Ministry for Economic Affairs and Energy (BMWi, FKZ 50 EE 1311). The aim of the project is to develop and test a Copernicus Service for geohazard assessment and regional planning in Rhineland-Palatinate, in order to support public tasks. PSI-processing of historic ERS-1/-2 and Envisat-ASAR data in the region Rhine-Moselle was conducted. Based on the ground motion data, two study areas are selected for further detailed geohazard analysis. The first test area is located in the town Mendig, where historic extensive near-surface underground basalt mining leads to subsidence and sinkholes. In the second study area, along the Moselle Valley between Cochem and Bernkastel-Kues, landslide areas are investigated. These detailed ground motion analysis are based on PSI- and SBAS-processing of TerraSAR-X StripMap data of ascending and descending orbits.</p>

**Back** to list of proposals

## Pressemitteilung

Hannover, den 03.03.2014

### Untersuchung von Geogefahren

## Wissenschaftler starten nationales Copernicus-Projekt

Bodenbewegungen, Hanginstabilitäten und Einsturzgefahren sind die Themen des jetzt von der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR) und dem Landesamt für Geologie und Bergbau Rheinland-Pfalz (LGB) gestarteten Projektes „Copernicus-Dienst zur Unterstützung von Gefährdungsanalysen und Regionalplanung im Rhein-Mosel-Gebiet“.

Die beteiligten Wissenschaftler führen während des Projektes erstmals satellitengestützte Messungen zu den Geländebewegungen im Rhein-Mosel-Gebiet durch. Die Ergebnisse werden kartiert und in Bewegungszonen eingeteilt, um in Zukunft mögliche Geogefahren besser abschätzen zu können.

Das Projekt steht im Kontext des EU-Programms „Copernicus“. Im Rahmen dieses Programms entwickelt die Europäische Weltraumorganisation (ESA) ein satellitengestütztes Erdbeobachtungsdienstkonzept. Es soll die Nutzung von Erdbeobachtungsdaten durch Satelliten verbessern. Zur nationalen Umsetzung dieser Initiative werden Vorhaben aus dem Bereich „Copernicus-Dienste für den öffentlichen Bedarf in Deutschland“ vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) gefördert.

Das Vorhaben „Copernicus-Dienst zur Unterstützung von Gefährdungsanalysen und Regionalplanung im Rhein-Mosel-Gebiet“ ist Teil dieser Initiative. Ziel ist es neue Einsatzmöglichkeiten der geowissenschaftlichen Fernerkundung zu testen und für öffentliche Aufgaben zu nutzen.

### Weitere Informationen zum Thema Gefährdungsanalysen:

[http://www.bgr.bund.de/DE/Themen/Erdbeben-Gefaehrdungsanalysen/erdbeben-gefaehrungsanalysen\\_node.html](http://www.bgr.bund.de/DE/Themen/Erdbeben-Gefaehrdungsanalysen/erdbeben-gefaehrungsanalysen_node.html)

### Fachliche Ansprechpartnerin:

Diplom-Geoökologin Corinna Wolf, Tel.: 0511-643-3082, E-Mail: [corinna.wolf@bgr.de](mailto:corinna.wolf@bgr.de)

Pressesprecher: Andreas Beuge, Tel.: 0511 643 2679, Mobil: 0170 8569662,  
E-Mail: [andreas.beuge@bgr.de](mailto:andreas.beuge@bgr.de), Internet: <http://www.bgr.bund.de>

<b>Angaben zur UFORDAT</b>	
Datensatznummer	01049404
Originalthema	Copernicus-Dienst zur Unterstützung von Gefährdungsanalysen und Regionalplanung im Rhein-Mosel-Gebiet
Institution	► <a href="#">Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR), Fachbereich B4.4 Gefährdungsanalyse / Fernerkundung</a>
Projektleiter	Dr. Wolf, Corinna
Laufzeit	1.12.2013-31.12.2015
1. Kurzfassung	<p>1. Vorhabenziel: Die für Geologie und Bergbau zuständigen Ämter haben die Aufgabe, bezüglich Gefahrenpotenzialen beratend zu wirken und Aufsichtspflichten wahrzunehmen. Methoden der Fernerkundung kommen dabei nur sporadisch zur Anwendung. Hier besteht ein weites Handlungsfeld bei gleichzeitigem Defizit an Geoinformationen. Ziel des Vorhabens ist es, Beiträge zur weiteren Erschließung des Potenzials der Flugzeug- und Satelliten-gestützten Erdbeobachtung für die Wahrnehmung öffentlicher Aufgaben zu leisten und Implementierungen in behördliche Arbeitsprozesse zu unterstützen. Am Beispiel von geologisch-geotechnischen Fragestellungen von Rheinland-Pfalz soll ein Dienste-Konzept (Copernicus-Dienst) entwickelt und getestet werden. Aspekte der Übertragbarkeit auf ein breites Feld von behördlichen Aufgaben finden dabei Berücksichtigung. 2. Arbeitsplanung: Der Projektbeginn erfolgte im Januar 2014, bei zweijähriger Laufzeit. Wesentliche Schritte sind Recherchen und Datenbeschaffung, PSI-Prozessierungen, Komplexinterpretation erho-bener Daten und Informationen; Ausarbeitung und Begründung eines Copernicus-Dienstes mit Handlungsempfehlungen, Berichterstattung und Dissemination der Projektergebnisse zur Nutzung in öffentlichen Verwaltungen. 3. Ergebnisverwertung: Copernicus-Dienste-Konzept, Workflow und Handlungsempfehlungen sollen der Länder übergreifenden Ad-hoc-AG Geologie der Staatlichen Geologischen Dienste und dem Länderausschuss Bergbau der Bergämter Deutschlands vorgestellt und gemeinsame Nutzungsempfehlungen vorgeschlagen werden. Es wird angestrebt, einen Konsultationspunkt für Copernicus-Dienste einzurichten, der über die Vorhabenergebnisse informiert, Implementierungen von Copernicus-Diensten in den Ländern beratend begleitet und über relevante Fortschritte im Bereich der Fernerkundung informiert. Bei der BGR führen die Ergebnisse zur unmittelbaren Erweiterung ihrer Expertise bei der Beratung von Wirtschaft und Politik sowie der internationalen geowissenschaftlichen Zusammenarbeit. (Deutsch)</p>
Schlagwörter	Lagerstättenkunde; Aufsichtspflicht; Fernerkundung; Geoinformation; Flugzeug; Behörde; Geotechnik; Planung; Öffentliche Dienste; Öffentlicher Dienst; Berichtswesen; Verwaltung; Geologie; Gutachten; Politikberatung; Internationale Zusammenarbeit; Regionalplanung; Erdbeobachtung; Beobachtungssatellit; Bildflug; Fernerkundungsdaten; Risikoanalyse; Satellitengestützte Fernerkundung; Datengewinnung; Informationsgewinnung;
Geographische Schlagwörter	Rhein; Mosel; Rheinland-Pfalz
Leistungsplansystematik	IB2013 Forschungsvorhaben - Pilot- und Demonstrationsvorhaben
Umweltklasse(n)	NL30 (Methoden der Informationsgewinnung (Bioindikation, Fernerkundung, Kartierung, ökologische Modellierung, ...)) BO71 (Boden: Bodenkunde und -geologie) EN70 (Umweltaspekte von Energie und Rohstoffen: Grundlagen, Hintergrundinformationen und übergreifende Fragen)
Finanzierung	► <a href="#">Bundesministerium für Wirtschaft und Energie</a> (Forschungskennzahl: 50EE1311) , Förder-summe: 219670 EUR



---

## Copernicus-Dienst zur Unterstützung von Gefährdungsanalysen und Regionalplanung im Rhein-Mosel-Gebiet

### Kurzbeschreibung

Derzeit sind öffentliche Einrichtungen noch nicht ausreichend darauf vorbereitet, Satelliten-gestützte Erdbeobachtungsinformationen in ihren Aufgabenbereichen optimal einzusetzen. Zur Unterstützung werden Vorhaben im Rahmen des Nationalen Copernicus Förderprogramms vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) gefördert. Das von der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR) und dem Landesamt für Geologie und Bergbau Rheinland-Pfalz (LGB) gestartete Projekt „Copernicus-Dienst zur Unterstützung von Gefährdungsanalysen und Regionalplanung im Rhein-Mosel-Gebiet“ ist Teil dieser Initiative. Am Beispiel von behördlichen Fragestellungen des Landes Rheinland-Pfalz sollen neue Einsatzmöglichkeiten der geowissenschaftlichen Fernerkundung getestet und das Potential zur Wahrnehmung öffentlicher Aufgaben untersucht werden.

Zur Identifizierung von Geogefahren- und Bewegungszonen ist zunächst eine übersichtsmäßige Kartierung von Geländebewegungen anhand von satellitenradargestützter Bewegungsmessungen im Rhein-Mosel-Gebiet vorgesehen. Basierend auf ersten Zwischenergebnissen sollen drei Teilgebiete bzw. Gefährdungszonen für exemplarische Detailuntersuchungen ausgewählt und bearbeitet werden. Im unmittelbaren Focus stehen derzeit mögliche Bodenbewegungen in Form von Hebungen und Senkungen in der Vulkaneifel, welche heute noch als vulkanisch aktiv gilt, Senkungs- und Einsturzgefährdungen im Gebiet der Stadt Mendig als Folge des großflächigen untertägigen und oberflächennahen Basaltbergbaus vom Mittelalter bis zur Mitte des 20. Jahrhunderts sowie Hanginstabilitäten im Moseltal.

### Primäre thematische Zuordnung

Landüberwachung

### Federführende Behörde/Institution

Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR)

### Ansprechpartner

**Titel:**

**Vorname:** Corinna

**Name:** Wolf

**Institution / Behörde:** Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR)

**Telefon:** 0511-643-3082

**E-Mail:** Corinna.Wolf@bgr.de

### Beteiligte Partner-Behörden/Institutionen

Landesamt für Geologie und Bergbau (LGB), Rheinland-Pfalz

### Laufzeit

Januar 2014 bis Dezember 2015

### Status der Aktivität

begonnen

**Workshop B.3****Detektion und Monitoring von Geogefahren - Oberflächen- und Massenbewegungen****Dienstag, 08.04.2014, 16.30 - 18.00 Uhr**

**Organisation und Moderation:** Dr.-Ing. Thomas Lege, Dr. Michaela Frei und Andre Kalia, Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR)

**Hintergrund**

Anwendungen satellitengestützter Fernerkundungsdaten ergänzen in verschiedenen Ländern bereits erfolgreich und effizient die Detektion und das Monitoring von Oberflächen- und Massenbewegungen als Standardmethode auch auf behördlicher Ebene (z.B. Norwegen, Italien, Kanada).

Im Workshop wird in der Einführung kurz das Basis-Know-How in Erinnerung gerufen. Pilotische Anwendungen, Anforderungen und aktuelle Entwicklungen auch der rechtlichen Rahmenbedingungen werden vorgestellt. So sollen intensive Diskussionen und ein Austausch über zukünftige Nutzungen und Lösungsansätze angeregt werden.

**Impulsvorträge**

1. Anwendung der Radarinterferometrie zur Bewegungsdetektion und Gefährdungsanalyse, C. Wolf, BGR
2. Aktueller Stand und zukünftige Anforderungen zum Einsatz von Fernerkundungsverfahren in die markscheiderische Praxis im Bergbau, N. Benecke et al., Deutscher Markscheiderverein e. V.
3. Nutzungspotenziale der SAR-Interferometrie in Niedersachsen und Anforderungen an die Fernerkundungsdaten, Dr. S. Viola, J. Fritz, U. Sommer, Landesamt für Bergbau, Energie und Geologie

# Copernicus-Dienst zur Unterstützung von Gefährdungsanalysen und Regionalplanung im Rhein-Mosel-Gebiet

CORINNA WOLF

Für den zukünftigen Einsatz von Sentinel-Satellitendaten für die Erfüllung öffentlicher Aufgaben soll die Implementierung von Fernerkundungsdaten in behördliche Arbeitsprozesse exemplarisch anhand von Gefährdungsanalysen im Rhein-Mosel-Gebiet erarbeitet werden. Zur Anwendung kommt hierbei ein Multi-Sensor-Ansatz, um Diagnosemerkmale deckungsgleich in verschiedenen Fernerkundungsdaten nachzuweisen und somit Informationen mit hoher Belastbarkeit zu erhalten. Zur Detektion von Geländebewegungen im Projektgebiet wird das Verfahren der Persistent Scatterer Interferometrie (PSI) eingesetzt. Basierend auf Bewegungsmessungen von ca. 4,6 Mio. Persistent Scatterer Punkten konnten in einer ersten übersichtsmäßigen Kartierung mehr als 700 Bewegungsgebiete identifiziert werden.

## 1. Einführung

Die für Geologie und Bergbau zuständigen Ämter des Bundes und der Länder haben die Aufgabe, geologisch und ingenieurgeologisch relevante Sachverhalte zu verfolgen, in Bezug auf geologische und bergbaubezogene Gefährdungspotentiale beratend zu wirken, sowie Aufsichtspflichten wahrzunehmen. Die in den Behörden wirkenden Geologen setzen für die Erkundung und das Monitoring bisher überwiegend bodengebundene Verfahren der Erdbeobachtung ein. Methoden der Fernerkundung, insbesondere satellitengestützte Verfahren, kommen nur sporadisch zur Anwendung.

Ziel des hier vorgestellten Vorhabens ist es daher, einen Beitrag zur weiteren Erschließung des Potenzials der flugzeug- und satellitengestützten Fernerkundung für die Wahrnehmung öffentlicher Aufgaben im nationalen und internationalen Kontext zu leisten und die Implementierung in bestehende bzw. neue behördliche Arbeitsprozesse nachhaltig zu unterstützen. Es soll exemplarisch, am Beispiel von geologisch-geotechnischen Fragestellungen von Rheinland-Pfalz, ein Dienste-Konzept entwickelt und getestet werden. Aspekte der Übertragbarkeit methodischer Ansätze und von Implementierungsvorschlägen auf ein breites Feld von behördlichen Aufgaben im Geosektor finden dabei Berücksichtigung. Der Copernicus-Dienst wird sich dabei in seiner operationellen Umsetzung am künftigen Einsatz kostenfreier Sentinel-1/-2 Daten orientieren.

Das Copernicus-Dienste-Konzept wird anhand von Gefährdungsanalysen im Rhein-Mosel-Gebiet erarbeitet. Das ca. 10.000 km<sup>2</sup> grosse Untersuchungsgebiet umfasst die Vulkaneifel, das Moseltal zwischen Trier und Koblenz, sowie das Mittelrheintal von Bingen über Koblenz bis zur Landesgrenze von Rheinland-Pfalz.

## 2. Methodik & Daten

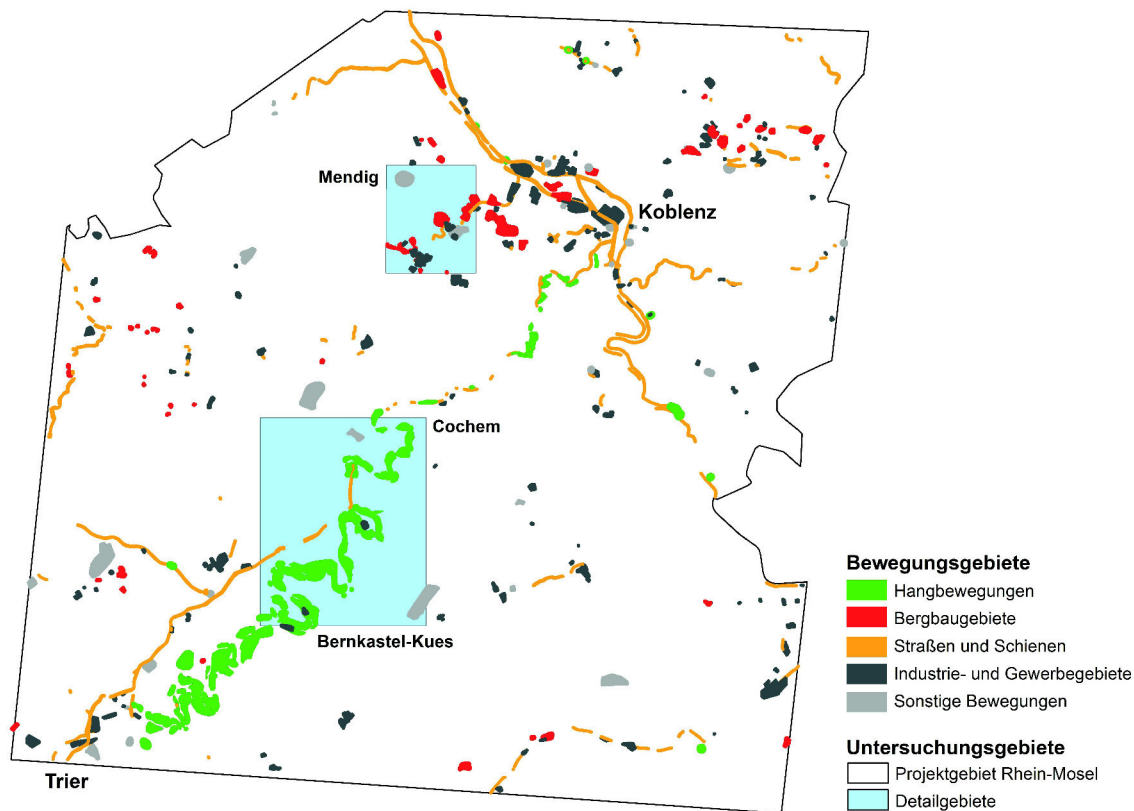
Zur Gefährdungsanalyse kommen Fernerkundungsdaten unterschiedlicher Sensoren zum Einsatz, um Diagnosemerkmale deckungsgleich in verschiedenen Daten nachzuweisen und somit Informationen mit hoher Belastbarkeit zu erhalten. Zur Detektion von millimetergenauen Geländebewegungen werden zwei Verfahren der differentiellen Radarinterferometrie eingesetzt: die Persistent Scatterer Interferometrie (PSI) und das Small Baseline Subset (SBAS)-Verfahren. Zunächst wurden PSI-Prozessierungen historischer ERS-1/-2 und Envisat-Satellitendaten durchgeführt, um eine übersichtsmässige Kartierung von Bewegungsgebieten anzufertigen. Basierend auf diesen Zwischenergebnissen sollen für zwei Detailgebiete weitere PSI- und SBAS-Prozessierungen von hochauflösenden TerraSAR-X-Daten vorgenommen werden. Unter Verwendung von multispektralen Satellitendaten von Landsat 8 und Rapid-Eye, Luftbildern und eines Digitalen Höhenmodells sollen weitere Indikatoren für geogene Gefährdungen wie beispielsweise Lineamente, Klüfte, Abrisskanten, Bodenfeuchte- und Vegetationsanomalien detektiert werden.

## 3. Ergebnisse

Für die PSI-Prozessierungen wurden Datensätze der auf- und absteigenden Orbits der ERS1/2-Satelliten erstellt. Für den Datensatz des absteigenden Orbits wurden ca. 300 Radarszenen verwendet, die einen Zeitraum von April 1995 bis Dezember 2000 abdecken. Sie lieferten für ein Gebiet von ca. 7.000 km<sup>2</sup> ca. 1,6 Mio. Persistent Scatterer Punkte. Dabei handelt es sich um ortsfeste Objekte an der Erdoberfläche, die das Radarsignal stark reflektieren und somit über den gesamten Messzeitraum ein stabiles Signal liefern. Der Datensatz des absteigenden Orbits basiert auf ca. 100 Radarszenen, die zwischen April 1995 und Juni 2000 aufgenommen wurden. Für ein Gebiet von ca. 8.000 km<sup>2</sup> stehen ca. 400.000 PS-Punkte für die Bewegungsanalyse zur Verfügung.

Vom ASAR-Sensor des Envisat-Satelliten wurden zwischen Dezember 2003 und September 2010 ca. 140 Radarszenen im absteigenden Orbit aufgenommen, die für die PSI-Prozessierung verwendet werden konnten. Die Daten decken ein Gebiet von ca. 7.000 km<sup>2</sup> ab und lieferten Bewegungsmessungen von ca. 2,6 Mio. stabilen Objekten an der Erdoberfläche.

Auf Grundlage dieser Bewegungsdaten konnten im Projektgebiet mehr als 700 Bewegungsgebiete identifiziert und kartiert werden (Abb. 1). Die Bewegungsgebiete wurden nach einer ersten vorläufigen Interpretation auf Grundlage von Satelliten- und Luftbildern den Kategorien Hangbewegungen, Bergbauggebiete, Strassen und Schienen, Industrie- und Gewerbegebiete sowie sonstige Bewegungen zugeordnet. Die Mehrzahl der Bewegungen treten entlang von



**Abbildung 1:** Ergebnisse der Kartierung von Bewegungsgebieten im Projektgebiet Rhein-Mosel auf Basis von PSI-Prozessierungen von ERS-1/2 und Envisat-ASAR-Satellitendaten.

Strassen und Eisenbahnschienen sowie in Industrie- und Gewerbegebieten aufgrund von Erschütterungen durch den Verkehr oder Lastenveränderungen auf. Weitere zahlreiche Bewegungen der Erdoberfläche werden durch Bergbauaktivitäten verursacht.

Für gezielte Untersuchungen in grösseren Masstäben wurden zwei auffällige Bewegungsgebiete identifiziert. Zum einen handelt es sich dabei um das Gebiet der Mittelmosel zwischen Cochem und Bernkastel-Kues. Nach einer Analyse von Massenbewegungen kommt an der Mittelmosel die überwiegende Zahl an Hangrutschungen in Rheinland-Pfalz vor. Hier konnte auch festgestellt werden, dass ein unmittelbarer Zusammenhang zwischen Grossrutschungen und lokaler Geologie besteht (BOCK ET AL. 2012). Nordwestlich ausgerichtete Hänge werden dabei als besonderes rutschempfindlich eingestuft (BOCK ET AL. 2013).

Das weitere Gebiet für die Detailuntersuchung liegt in einem Altbergbauggebiet in der Vulkaneifel. Hier wurde seit dem Mittelalter bis zur Mitte des 20. Jahrhunderts unter Tage Basalt abgebaut. Die oberflächennahen Abbaukammern werden fast ausschliesslich von den verbleibenden Restpfeilern gestützt. Veränderungen von Spannungszuständen führten jedoch zu Schäden an den stützenden Pfeilern und lokal ereigneten sich Tagesbrüche (ROGALL & BROMEN 2009, ROGALL 2002, AMSTUTZ ET AL. 2014). Geophysikalische Untersuchungen lieferten bisher keine zufriedenstellenden Ergebnisse, daher soll in diesem Projekt untersucht

werden, ob weitere Indikatoren für Bodenbewegungen und Gefährdungen aus Fernerkundungsdaten abgeleitet werden können.

## Literatur

- BOCK, B., WEHINGER, A. & E. KRAUTER (2012): Hanginstabilitäten in Rheinland-Pfalz – Ergebnisse der Rutschungsdatenbank Rheinland-Pfalz, Mainzer geowiss. Mitt. 40, pp. 147 – 180.
- BOCK, B., WEHINGER, A. & E. KRAUTER (2013): Hanginstabilitäten in Rheinland-Pfalz – Auswertung der Rutschungsdatenbank Rheinland-Pfalz für die Testgebiete Wissberg, Lauterecken und Mittelmosel, Mainzer geowiss. Mitt. 41, pp. 103 – 122.
- ROGALL, M. & J. BROMEN (2009): Tagesbruchsicherung einer Landesstrasse in einem ehemaligen Bergbaugebiet in der Eifel, Geotechnik 32 (1), pp. 37 – 43.
- ROGALL, M. (2002): Stabilisierung und Verfüllung unterirdischer Hohlräume. Beispiel eines ehemaligen Basaltbergbaus in der Eifel, Felsbau 20 (3), pp. 52 – 59.
- AMSTUTZ, G., BOCK, B., WEHINGER, A. & M. ROGALL (2014): Erstellen einer GIS-gestützten Gefahrenkarte für die oberflächennahen Hohlräume in Mendig (Vordereifel), Mainzer geowiss. Mitt. 42, pp. 99 – 120.

# Copernicus service in support of geohazard assessment and regional planning in the region Rhine-Moselle

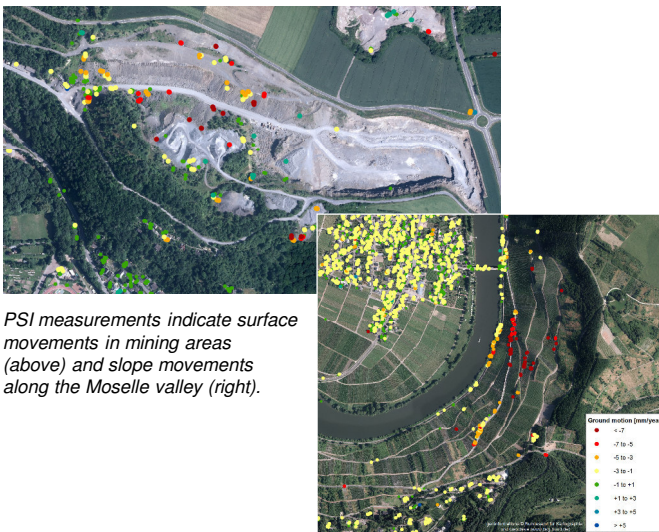
Federal Institute for Geosciences and Natural Resources (BGR), Geological Survey and Mining Authority of Rhineland-Palatinate (LGB)

## BACKGROUND

The aim of the project is to develop the further acceptance of airborne and satellite-based remote sensing applications for public tasks in the national and international context and to support the sustainable implementation in public work processes. The service concept is developed and tested based on the public task of geohazard assessment and regional planning in the federal state Rhineland-Palatinate to improve and support public tasks with modern remote sensing data.

### Copernicus Service Rhine-Moselle

- ▶ **Duration:** 01/01/2014 – 31/12/2015
- ▶ **Systems:** ERS-1, ERS-2, Envisat ASAR, TerraSAR-X, Landsat 8, RapidEye, ALS
- ▶ **Development Program:** Copernicus Pilot Program
- ▶ **Contact:**  
Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe  
Corinna Wolf  
0049-511-643-3082  
Corinna.Wolf@bgr.de



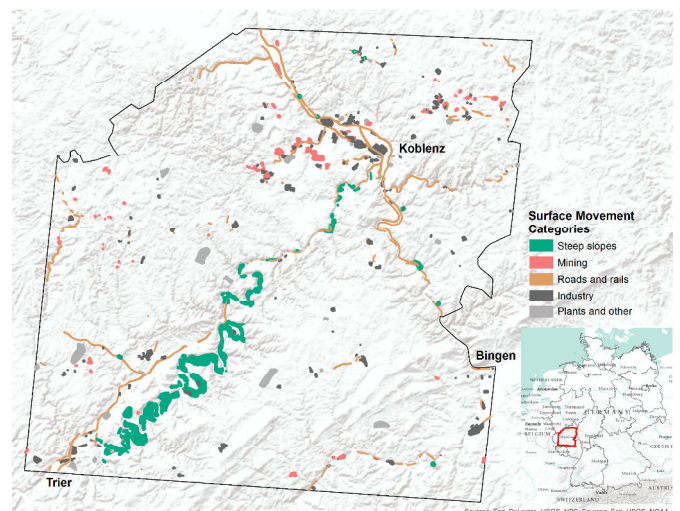
PSI measurements indicate surface movements in mining areas (above) and slope movements along the Moselle valley (right).

## METHODOLOGY

The geohazard assessment is based on remote sensing data from different sensors, as the evidence of indicators in different data improves the reliability of the analysis. The Persistent Scatterer Interferometry (PSI) based on radar satellite data is used for the identification of surface movements. Earth observation data from multispectral satellites with medium and high resolution and airborne systems are investigated to detect further indicators for geohazards, like cracks, fissures, soil wetness and vegetation anomalies.

## INTERIM RESULTS

Based on PSI measurements, more than 700 movements could be identified and mapped in the project area. The movements are classified based on land use and land cover information from aerial photos and satellite scenes. The selected categories of surface movements are steep slopes, mining, roads and rails, industry and plants. The majority of the surface movements occur along roads and rails and in industrial estates. Further movements of the earth's surface are caused by mining activities. Slope movements occur mainly in the Middle Moselle area between Trier and Koblenz.



Results of the surface movement mapping 1:50,000 in the 10,000 km<sup>2</sup> wide investigation area Rhine-Moselle. Anhang Seite 144

# Copernicus-Dienst zur Unterstützung von Gefährdungsanalysen und Regionalplanung im Rhein-Mosel-Gebiet

Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR), Landesamt für Geologie und Bergbau Rheinland-Pfalz (LGB)

## Copernicus-Dienst Rhein-Mosel

Am Beispiel der **behördlichen Aufgabe der Gefährdungsanalyse** soll das Potential von Fernerkundungsdaten zur Wahrnehmung öffentlicher Aufgaben untersucht, sowie ein Dienste-Konzept entwickelt und getestet werden. Dieser Copernicus-Dienst soll mit seinen methodischen Ansätzen auf ein breites Feld von behördlichen Aufgaben im Geosektor anwendbar sein und orientiert sich in seiner operationellen Umsetzung am künftigen Einsatz von **Sentinel-1/-2-Daten**. Die Bearbeitung des Untersuchungsgebietes Rhein-Mosel (Abb. 1) erfolgt in enger Zusammenarbeit mit dem Landesamt für Geologie und Bergbau Rheinland-Pfalz (LGB).

Für die Gefährdungsanalyse werden Fernerkundungsdaten unterschiedlicher Sensoren eingesetzt, um Diagnosemerkmale deckungsgleich in verschiedenen Daten nachzuweisen (**Multi-Sensor-Nachweis**) und somit Informationen mit hoher Belastbarkeit zu erhalten. Zur Detektion von millimetergenauen Geländebewegungen wird das Verfahren der **Persistent Scatterer Interferometrie (PSI)** angewandt. Diese Methodik liefert Bewegungsmessungen für stabile Reflektoren an der Erdoberfläche (Abb. 2). Unter Hinzuziehung von Satellitendaten von Landsat 8 und RapidEye, Luftbildern und Digitalen Geländemodellen werden weitere Indikatoren für geogene Gefährdungen detektiert.



Abb. 1: Lage des Untersuchungsgebietes in Deutschland und Rheinland-Pfalz.



Abb. 2: Reflexion des Radarsignals an stabilen Objekten der Erdoberfläche, sogenannte Persistent Scatterer (PS), typische Reflektoren sind z.B. Gebäude, Anlagen, Brücken, Strommasten und Felsen.

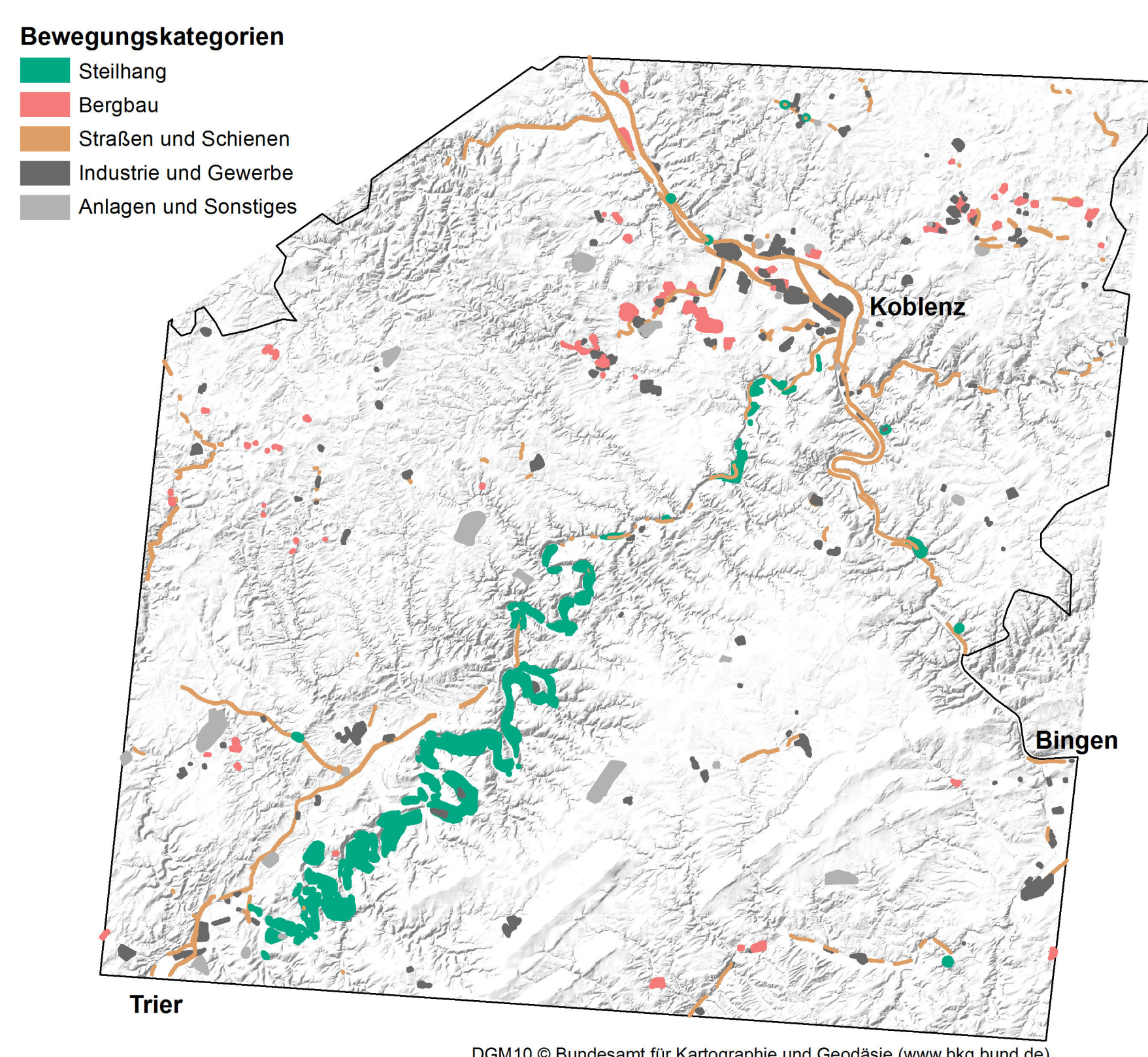
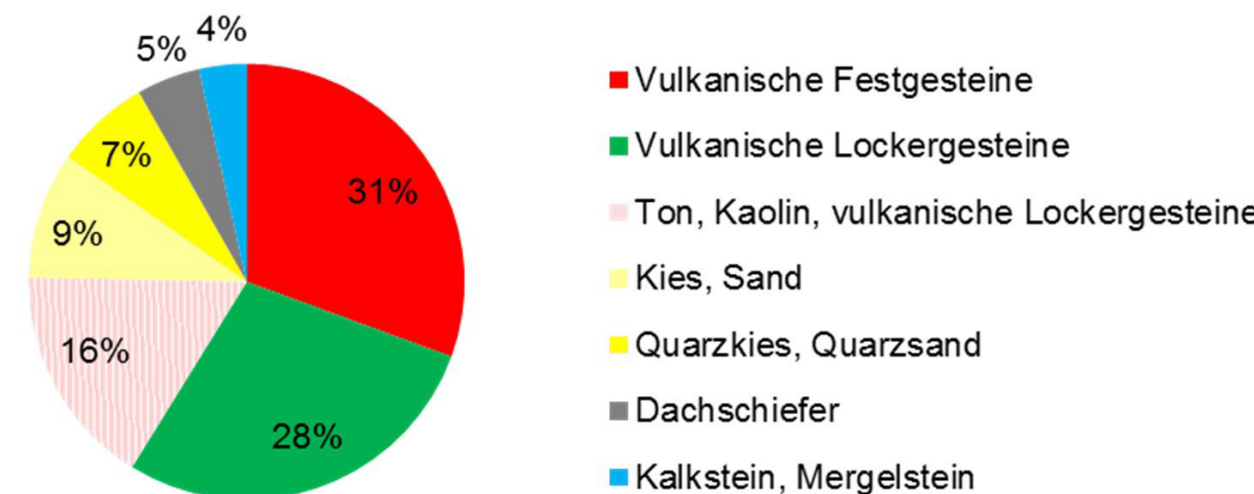


Abb. 4: Ergebnisse der Bewegungskartierung anhand von PSI-Daten basierend auf Satellitendaten von ERS-1/2 und Envisat-ASAR (1995 bis 2000 bzw. 2003 bis 2010).

Abb. 5: Korrelation der Kategorie „Bergbau“ mit der Karte „Vorkommen oberflächennaher Rohstoffe“.



## Bodenbewegungskartierung

Anhand der PSI-Daten wurden Gebiete mit Bewegungsraten von geringer als  $-3$  mm/Jahr kartiert. Insgesamt konnten für das Projektgebiet mehr als **700 Bewegungsgebiete** identifiziert werden, die den Kategorien Steilhang, Bergbau, Straßen und Schienen, Industrie und Gewerbe zugeordnet wurden (Abb. 4). Die Mehrzahl der Bewegungen treten entlang von Straßen und Schienen sowie in Industrie- und Gewerbegebieten auf. In der Kategorie Bergbau korrelieren ca. 60% der kartierten Bewegungspolygone mit **Abbaubereichen vulkanischer Locker- und Festgesteine** (Abb. 5).

## Hangbewegungen Mittelmosel

Hangbewegungen konnten vor allem zwischen Trier und Cochem festgestellt werden. In den dort vorkommenden Hunsrücksschiefern (v.a. Tonschiefer) treten verstärkt **Rutschungen, Steinschläge und Felsstürze** auf. Im Gelände sind die Rutschungen z.B. durch beschädigte Trockenmauern erkennbar. Anhand von Bewegungsmessungen von hochauflösenden **TerraSAR-X-Daten** konnten genauere Informationen über Hangbewegungen zwischen Cochem und Berncastel-Kues ermittelt werden (Abb. 6).

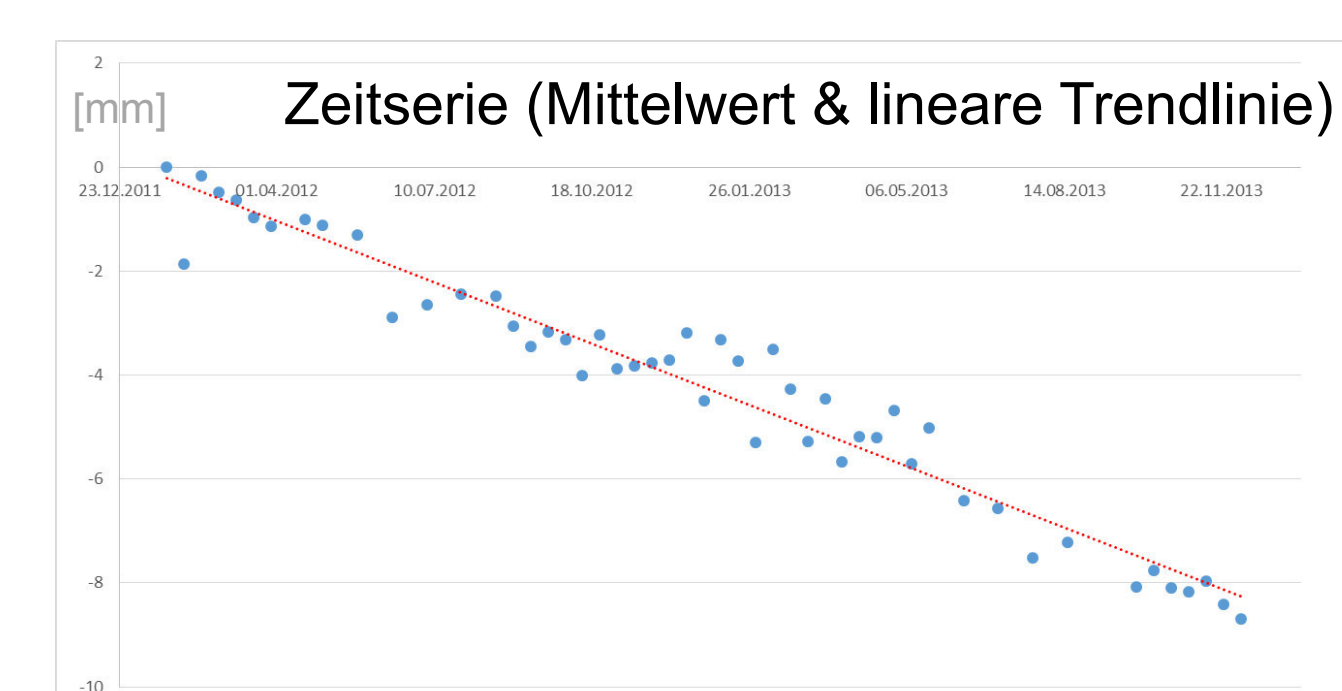
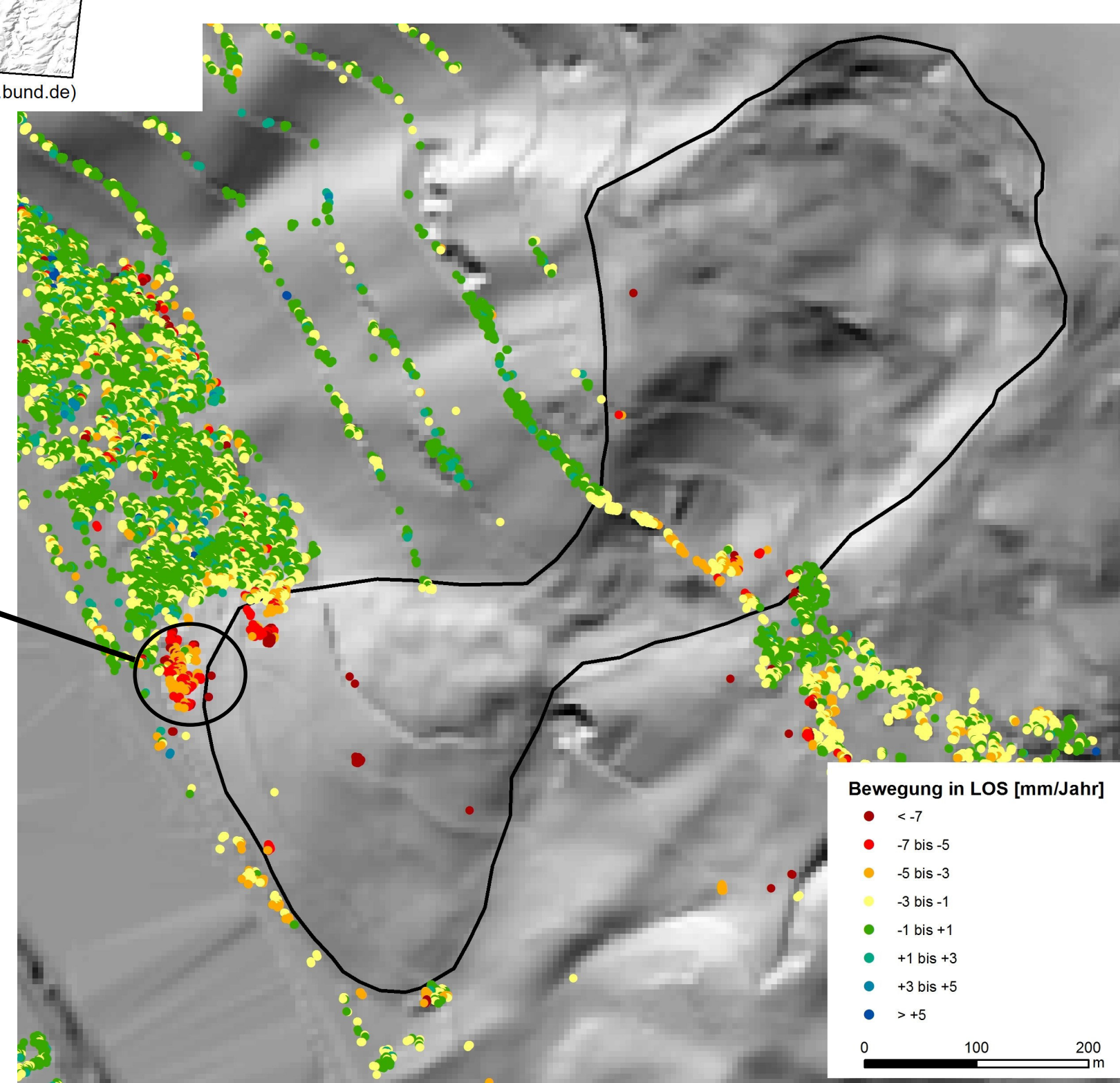


Abb. 6: PSI-Messungen zeigen Bewegungen an einem Moselhang (TerraSAR-X von 2012 bis 2013, Hintergrund: DGM5 (LVerMGeo) mit Rutschmasse (schwarze Linie)).



## Altbergbau Mendig

Infolge eines großflächigen, untertägigen und oberflächennahen Basaltbergbaus vom Mittelalter bis zur Mitte des 20. Jahrhunderts bestehen im Gebiet der Stadt Mendig potentielle **Senkungs- und Einsturzgefährdungen** (überbelastete Stützpfeiler, Abb. 7). Infolge eines Tagesbruches (Abb. 8) wurde das LGB mit der Erkundung und Kartierung der vorhandenen Hohlräume beauftragt. Fernerkundungsdaten sollen nun das **Auffinden bisher unbekannter unterirdischer Hohlräume** ermöglichen und weitere Hinweise für mögliche Gefährdungen liefern.



Abb. 8: Tagesbruch von 1988 am Sportplatz in Mendig (Foto: LGB).

Abb. 7: Stark beanspruchter Basalt-Stützpfeiler.





# Bericht

## Datenauswertung und Evaluierung von PSI-Bewegungsdaten aus ERS 1/2 und ASAR-Fernerkundungsdaten für Testgebiete in der Rhein-Mosel-Region

**GeoConsult Rein**



Privatdozent Dr. rer. nat. habil. Bert Rein

in Zusammenarbeit mit dem  
**Landesamt für Geologie und Bergbau Rheinland-Pfalz**



im Auftrag der  
**Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe**



**Bundesanstalt für  
Geowissenschaften und Rohstoffe**

24.11.2015

## Gliederung

1.	Kurzbeschreibung der Zielsetzung des Projektes	7
2.	Am Landesamt für Geologie und Bergbau RLP (LGB RLP) für das Projekt verfügbare PSI-Bewegungsdaten	9
3.	Regionaler Vergleich PSI-NIVP-Bewegungen (Beispiel Südeifel)	14
4.	Lokaler Vergleich PSI-/NIVP-Bewegungen – Beispiel Wehr	22
5.	Bodenbewegungen in der Großrutschung Graach/Mosel	30
6.	Bodenbewegungen – Altbergbau (Beispiel Mendig/Eifel)	51
7.	Bodenbewegungen - Bergbau (Beispiel Mayen/Eifel)	64
8.	Regionale relative Bewegungsmuster	75
9.	Einsatzmöglichkeiten in der behördlichen Arbeit	91
10.	Ausblick	96
	Referenzen	98

## Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Am LGB RLP für das Projekt verfügbare PSI-Datensätze	9
Tabelle 2:	Vergleich PSI-NIVP- Bewegungsraten der Feinnivellementlinien 20-22	16
Tabelle 3:	Teilgebiete im Graacher Rutschhang	35

## Abbildungsverzeichnis

Abb. 1	Räumliche Abdeckung der PSI-Daten der Datensätze ASTRIUM-ERS337 und ASTRIUM-ASAR337.	10
Abb. 2	Räumliche Abdeckung der PSI-Daten der Datensätze TRIGIS-ERS337 und TRIGIS-ASAR337 mit Teilgebieten für Prozessierung.	11
Abb. 3:	Räumliche Abdeckung der PSI-Daten der Datensätze TRIGIS-ERS65, TRIGIS-ERS29 und TRIGIS-ASAR487 mit Teilgebieten für Prozessierung.	12

Abb. 4	Feinnivellement-Bewegungsraten entlang der Feinnivellementlinien 20-21.	13
Abb. 5	Zeitliche Abdeckung der PSI-Daten im Vergleich zu der letzten Feinnivellementbeobachtungsperiode.	15
Abb. 6	Topografische Charakterisierung der NIVP – Teil1	18
Abb. 7	Topografische Charakterisierung der NIVP – Teil2	19
Abb. 8	Karten der PSI-Bewegungsraten.	20
Abb. 9	Nivellementlinie 204.	23
Abb. 10	PSI-Bewegungsraten ASAR 12/2003-9/2010 und Feinnivellement-Bewegungsraten 1990-2012/13.	24
Abb. 11	Vergleich PSI- und Nivpunktbeziehung in der Ortslage Wehr (Astrium-ERS337/ASAR337).	25
Abb. 12	Vergleich PSI- und Nivpunktbeziehung in der Ortslage Wehr (TRIGIS ERS337/ASAR337).	26
Abb. 13	Vergleich PSI- und Nivpunktbeziehung in der Ortslage Wehr (TRIGIS ERS337/ASAR337, nur PSI mit Kohärenz $\geq 0,6$ ).	27
Abb. 14	Rutschgebiete im Bereich Graach-Kroev (Ausschnitt aus Hangstabilitätskarte Mittelmosel.	30
Abb. 15	Hangneigungsmodell. Bereich der aktiven Großrutschung zwischen Graach und Graacher Schäferei.	31
Abb. 16	Dem Höhenmodell überlagertes Luftbild mit Lage der geodätisch vermessenen Corner Reflektoren und Inklinometer im Zentrum der aktiven Rutschung.	33
Abb. 17	Lage und Bewegungsraten der PSI für Teilgebiete im Graacher Rutschhang.	36
Abb. 18	Zeitliche Verläufe: PSI Teilbereich 1 in Abb. 17 u. Tab. 3. A-D alle PSI, E-F nur PSI mit Kohärenz $\geq 0,6$ .	38

Abb. 19	Zeitliche Verläufe: PSI Teilbereich 2 in Abb. 17 u. Tab. 3. A-D alle PSI, E-F nur PSI mit Kohärenz $\geq 0,6$ .	39
Abb. 20	Zeitliche Verläufe: PSI Teilbereich 3 in Abb. 17 u. Tab. 3. A-D alle PSI, E-F nur PSI mit Kohärenz $\geq 0,6$ .	40
Abb. 21	Zeitliche Verläufe: PSI Teilbereich 4 in Abb. 17 u. Tab. 3. A-D alle PSI, E-F nur PSI mit Kohärenz $\geq 0,6$ .	41
Abb. 22	Zeitliche Verläufe: PSI Teilbereich 5 in Abb. 17 u. Tab. 3. A-D alle PSI, E-F nur PSI mit Kohärenz $\geq 0,6$ .	42
Abb. 23	Zeitliche Verläufe: PSI Teilbereich 6 in Abb. 17 u. Tab. 3. A-D alle PSI, E-F nur PSI mit Kohärenz $\geq 0,6$ .	43
Abb. 24	Zeitliche Verläufe: PSI Teilbereich 7 in Abb. 17 u. Tab. 3. A-D alle PSI, E-F nur PSI mit Kohärenz $\geq 0,6$ .	44
Abb. 25	Zeitliche Verläufe: PSI Teilbereich 8 in Abb. 17 u. Tab. 3. A-D alle PSI, E-F nur PSI mit Kohärenz $\geq 0,6$ .	45
Abb. 26	Zeitliche Verläufe: PSI Teilbereich 9 in Abb. 17 u. Tab. 3. A-D alle PSI, E-F nur PSI mit Kohärenz $\geq 0,6$ .	46
Abb. 27	Zeitliche Verläufe: PSI Teilbereich 10 in Abb. 17 u. Tab. 3. A-D alle PSI, E-F nur PSI mit Kohärenz $\geq 0,6$ .	47
Abb. 28	Zeitliche Verläufe: PSI Teilbereich 11 in Abb. 17 u. Tab. 3. A-D alle PSI, E-F nur PSI mit Kohärenz $\geq 0,6$ .	48
Abb. 29	Luftbild und Hangneigungskarte von Mendig mit Basalttagebauten im Norden und Risszeichnung bekannter Hohlräume. Risikoabschätzung bezüglich Standfestigkeit der Hohlräume entlang der Brauergasse.	52
Abb. 30	PSI-Bewegungsraten am Referenzpunkt der von Astrium prozessierten Daten.	53
Abb. 31	PSI-Bewegungsraten am Referenzpunkt der von Astrium prozessierten Daten nach Nivellementanpassung der Bewegungsraten.	54

Abb. 32	PSI-Bewegungsraten im Stadtgebiet von Mendig	55
Abb. 33	Risikoabschätzung bezüglich Standfestigkeit der Hohlräume im südlichen Bereich der Brauergasse.	57
Abb. 34	PSI-Bewegungsraten (Astrium ERS337/ASAR337) im südlichen Bereich der Brauergasse.	58
Abb. 35	PSI-Bewegungsraten (TRIGIS ERS337/ASAR337) im südlichen Bereich der Brauergasse.	59
Abb. 36	Abb. 36 Zeiliche Verläufe der PSI-Bewegung (TRIGIS ERS337/ASAR337) im südlichen Bereich der Brauergasse.	60
Abb. 37	PSI-Bewegungsraten (TRIGIS ERS337/ASAR337, Kohärenz $\geq$ 0,6) im südlichen Bereich der Brauergasse.	61
Abb. 38	Luftbild und Reliefdarstellung mit Ausschnitt aus der geologischen Karte Ostvulkaneifel.	65
Abb. 39	PSI-Bewegungsraten im Stadtgebiet von Mayen.	66
Abb. 40	PSI-Bewegungsraten im Stadtgebiet von Mayen nach Nivellementanpassung.	67
Abb. 41	PSI-Bewegungsraten im nördlichen Stadtgebiet von Mayen mit Anomalie-Clustern A-D.	68
Abb. 42	PSI-Bewegungsraten südlich von Mayen mit Anomalie-Clustern E-F.	69
Abb. 43	PSI-Bewegungsraten südlich von Mayen mit Anomalie-Clustern E-F nach Nivellementanpassung.	70
Abb. 44	Luftbild der Grube Katzenberg mit Hangneigungskarte und Grubenschnitt.	71
Abb. 45	Zeitlicher Verlauf der PSI-Bewegung am Schieferbergwerk Katzenberg/Fa. Rathscheck.	72
Abb. 46	Ausschnitt aus der Geologischen Übersichtskarte 1:300.000 von	76

RLP und Karte der Erdbebenherde seit dem Jahr 2000.

Abb. 47	TRIGIS-ERS337 / 65, alle PSI.	78
Abb. 48	TRIGIS-ERS337 / 65, nur PSI mit Kohärenz $\geq 0,6$ .	79
Abb. 49	TRIGIS-ERS337 / 65, Kohärenz $\geq 0,6$ und Betrag der Bewegungsrate größer dem 1,96-fachen der Standardabweichung.	80
Abb. 50	TRIGIS-ERS337 / 65, alle PSI, Bewegungsklasse -1 mm/a bis + 1mm/a als oberste Ebene angeordnet/geplottet.	81
Abb. 51	TRIGIS-ASAR337, alle PSI.	82
Abb. 52	TRIGIS-ASAR337, nur PSI mit Kohärenz $\geq 0,6$ .	83
Abb. 53	TRIGIS-ASAR337, Kohärenz $\geq 0,6$ und und Betrag der Bewegungsrate größer als das 1,96-fachen der Standardabweichung.	84
Abb. 54	TRIGIS-ASAR337, alle PSI, Bewegungsklasse -1 mm/a bis + 1mm/a als oberste Ebene angeordnet/geplottet.	85
Abb. 55	TRIGIS-ERS29/487, nur PSI mit Kohärenz $\geq 0,6$ .	86
Abb. 56	TRIGIS-ERS29/487, Kohärenz $\geq 0,6$ und Betrag der Bewegungsrate größer als das 1,96-fache der Standardabweichung.	87
Abb. 57	TRIGIS-ERS29/487, alle PSI, Bewegungsklasse -1 mm/a bis + 1mm/a als oberste Ebene angeordnet/geplottet.	88

## Anlagen

- Anlage A TRIGIS ERS337 und ASAR337 PSI- und Corner Reflektor (GPS)-Bewegungsraten und Hangneigung.
- Anlage B TRIGIS ERS337 und ASAR337 PSI- und Corner Reflektor (GPS)-Bewegungsraten und Hangkrümmung.

## 1. Kurzbeschreibung der Zielsetzung des Projektes

Die für Geologie und Bergbau zuständigen Ämter haben die Aufgabe, bezüglich Gefahrenpotenzialen beratend zu wirken und Aufsichtspflichten wahrzunehmen. Methoden der Fernerkundung kommen dabei nur sporadisch zur Anwendung. Hier besteht ein weites Handlungsfeld bei gleichzeitigem Defizit flächiger Informationen zur Situationsbeurteilung. Ziel des Vorhabens ist es, Beiträge zur weiteren Erschließung des Potenzials der Flugzeug- und Satelliten-gestützten Erdbeobachtung für die Wahrnehmung öffentlicher Aufgaben zu leisten und Implementierungen in behördliche Arbeitsprozesse zu unterstützen.

In diesem Teilprojekt mit einem Umfang von 145 Arbeitsstunden soll der Nutzen und das potential historischer Fernerkundungsdaten von ERS 1/2 und ASAR und daraus gewonnener „Permanent Scatterer (PSI)“-Bewegungen für Anwendungen des Landesamtes für Geologie und Bergbau Rheinland-Pfalz (LGB), Referat Ingenieurgeologie untersucht werden. Zu der PSI-Analyse alternative Methoden der Bewegungsanalysen, auch auf Grundlage neuerer Fernerkundungsdatensätze mit höherer räumlicher und zeitlicher Auflösung (z.B. TerraSAR-X), sind nicht Gegenstand dieses Teilprojektes.

Mit den Datensätzen des LGB sollen die aus den PSI-Daten ermittelten Bewegungsgebiete und Bewegungsraten auf Plausibilität geprüft und validiert werden.. Zu prüfen ist, ob die Lage und Ausdehnung der Bewegungsgebiete plausibel erscheinen. Für Gebiete in denen Feinnivellementdaten oder weitere Bewegungsmessungen zur Verfügung stehen, ist die Höhe der Bewegungsraten zu validieren.

Im Zuständigkeitsbereich des Landesamtes für Geologie und Bergbau sind u.a. Geogefahren und Bergbaufolgen. Im Projektfokus stehen davon:

- Hanginstabilitäten im Moseltal
- Senkungs- und Einsturzgefährdungen im Gebiet der Stadt Mendig als Folge des großflächigen untertägigen und oberflächennahen Basaltbergbaus vom Mittelalter bis zur Mitte des 20. Jahrhunderts
- mögliche Bodenbewegungen in Form von Hebungen und Senkungen in der Vulkaneifel, welche heute noch als vulkanisch aktiv gilt.

Ausgehend von diesen Testgebieten sollen aus den Fernerkundungsdaten Planungsinformationen für Gefährdungsanalysen und Regionalplanung abgeleitet und das Potential der historischen Erdbeobachtungsdaten im Vergleich zu den bisher eingesetzten Methoden und Auswerteverfahren bewertet werden, sowie der Nutzen und die Grenzen der Satellitendaten für den Einsatz bei behördlichen Aufgaben des LGB.



## 2. Am Landesamt für Geologie und Bergbau RLP (LGB RLP) für das Projekt verfügbare PSI-Bewegungsdaten

Der für das Projekt am Landesamt für Geologie und Bergbau Rheinland-Pfalz (LGB RLP) zur Verfügung stehende Datenbestand an PSI-Daten ist in Tabelle 1 zusammen gefasst. Die räumliche Abdeckung der PSI-Daten und die Umriss der Teilgebiete für die PSI-Prozessierung zeigen die Abbildungen 1-3. Die Datensätze ERS65, ERS337\_TG1 und ASAR337\_TG2 liegen außerhalb des Projektgebietes.

Neben den im Projektauftrag zu bearbeitenden von TRIGIS prozessierten Daten sind am LGB RLP für Track 337 (Descending) zusätzlich von der Firma ASTRION prozessierte Daten von ERS und ASAR verfügbar.

**Tabelle 1: Am LGB RLP für das Projekt verfügbare PSI-Datensätze**

Datensatz	PSI alle	PSI Kohärenz $\geq 0,6$	PSI Kohärenz $\geq 0,6$ Vel $\leq -1,96\sigma_s$ oder Vel $\geq 1,96\sigma_s$	PSI Kohärenz $\geq ?$ Vel $\leq -1,96\sigma_s$ oder Vel $\geq 1,96\sigma_s$
<b>Descending orbits</b>				
ASTRIUM_ERS337	293798			178021 (61 %)
ASTRIUM_ASAR337	503856			189540 (38 %)
TRIGIS_ERS337_TG1	46209	29230 (63 %)	11886 (25,7%)	
TRIGIS_ERS337_TG2	937994	419733 (45 %)	166766 (17,8)	
TRIGIS_ERS337_TG3	44707	17609 (39 %)	6767 (15,1)	
TRIGIS_ERS65_TG1	22515	8983 (40 %)	5645 (25,1 %)	
TRIGIS_ERS65_TG2	478581	216393 (45 %)	128173 (26,8 %)	
TRIGIS_ASAR337_TG1_G1	845170	431224 (51 %)	27936 (3,3 %)	
TRIGIS_ASAR337_TG1_G2	546178	260032 (48 %)	8810 (1,6 %)	
TRIGIS_ASAR337_TG1_G3	586015	292970 (50 %)	17681 (3,0 %)	
TRIGIS_ASAR337_TG1_G4	481982	223741 (46 %)	77406 (16,1)	
<b>Ascending orbits</b>				
TRIGIS_ERS29	196731	196731 (100 %)	54700 (27,8 %)	
TRIGIS_ERS487	196343	196343 (100 %)	60666 (30,9 %)	

Die Prozessierung durch ASTRIUM erfolgte jeweils für die Gesamtszenenabdeckung und die Bewegungsraten wurden in Vertikalbewegungen umgerechnet [1]. Der Höhenbezugspunkt für die Umrechnung liegt am Flugplatz Mendig (vgl. Kapitel 6).

Vor der Prozessierung durch TRIGIS wurden die Datenszenen in Teilgebiete zerlegt für die, die PSI-Extraktion getrennt erfolgte. Die Angabe der Bewegungsraten erfolgt in Richtung der Line of Sight (LOS) [2-10].

Für die ASTRIUM-prozessierten Daten liegen keine Informationen zur Kohärenz vor. Eine spätere Datenselektion erfolgte deshalb auf Basis der Standardabweichungen, indem ein Subset der PSI-Punkte angelegt wurde, deren Hebung das 1,96-fache der Standardabweichung ( $vel \geq 1,96\sigma_s$ ) überschreitet oder deren Senkung schneller als das 1,96-fache der Standardabweichung ist ( $vel \leq -1,96\sigma_s$ ).

Für die TRIGIS-prozessierten Daten wurden jeweils zwei Subsets extrahiert. Die erste Filterung erfolgte über die Kohärenz ( $\geq 0,6$ ), die zweite Filterung wie für die ASTRIUM-prozessierten Daten über die Standardabweichung.

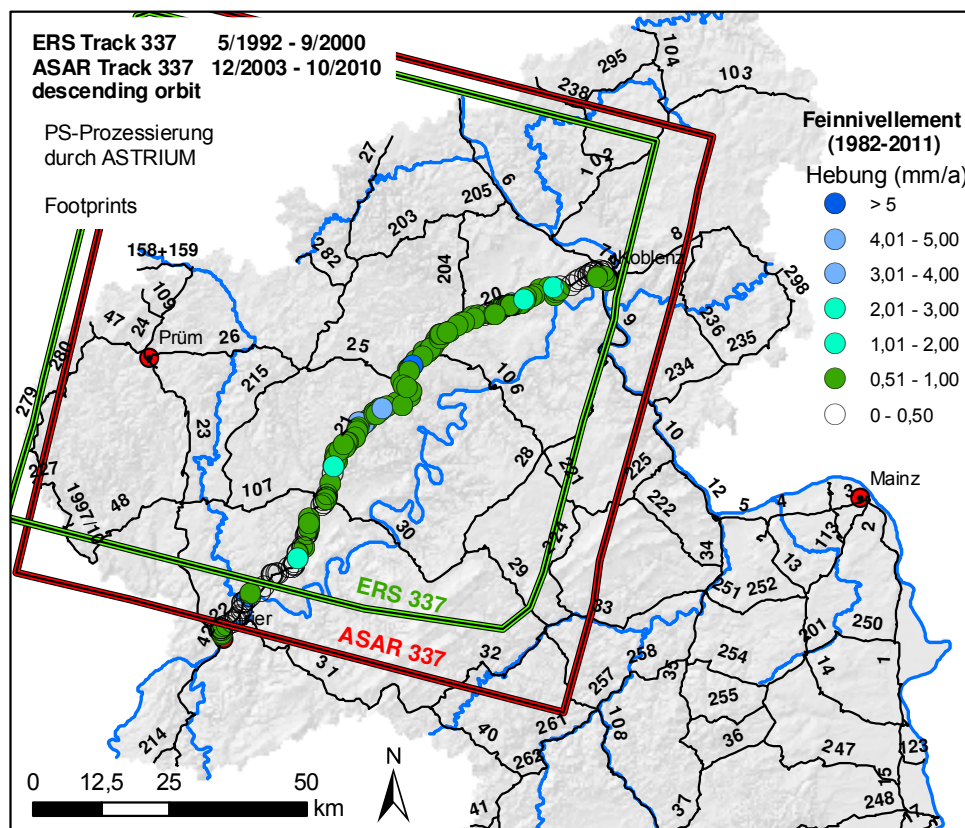
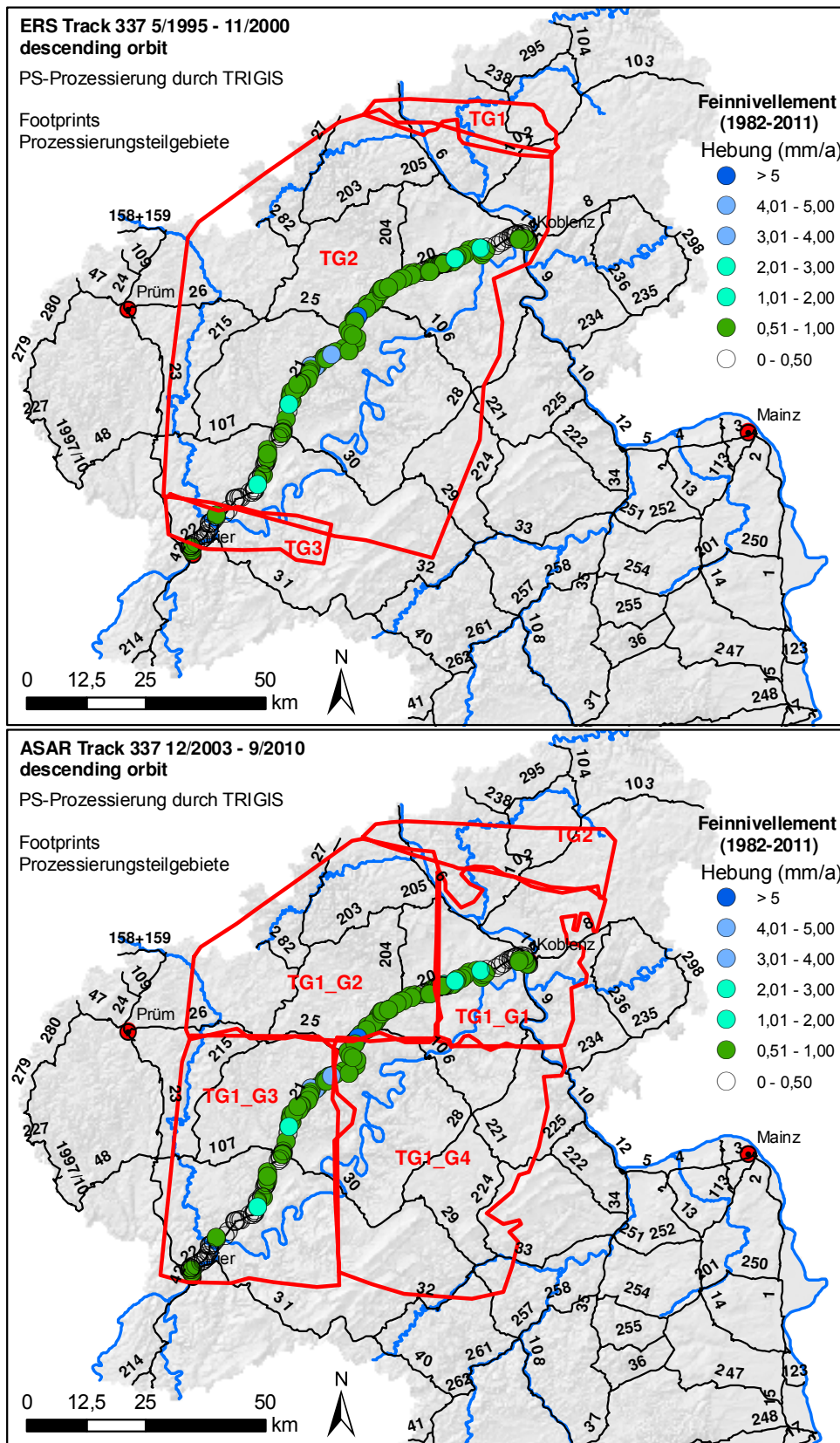
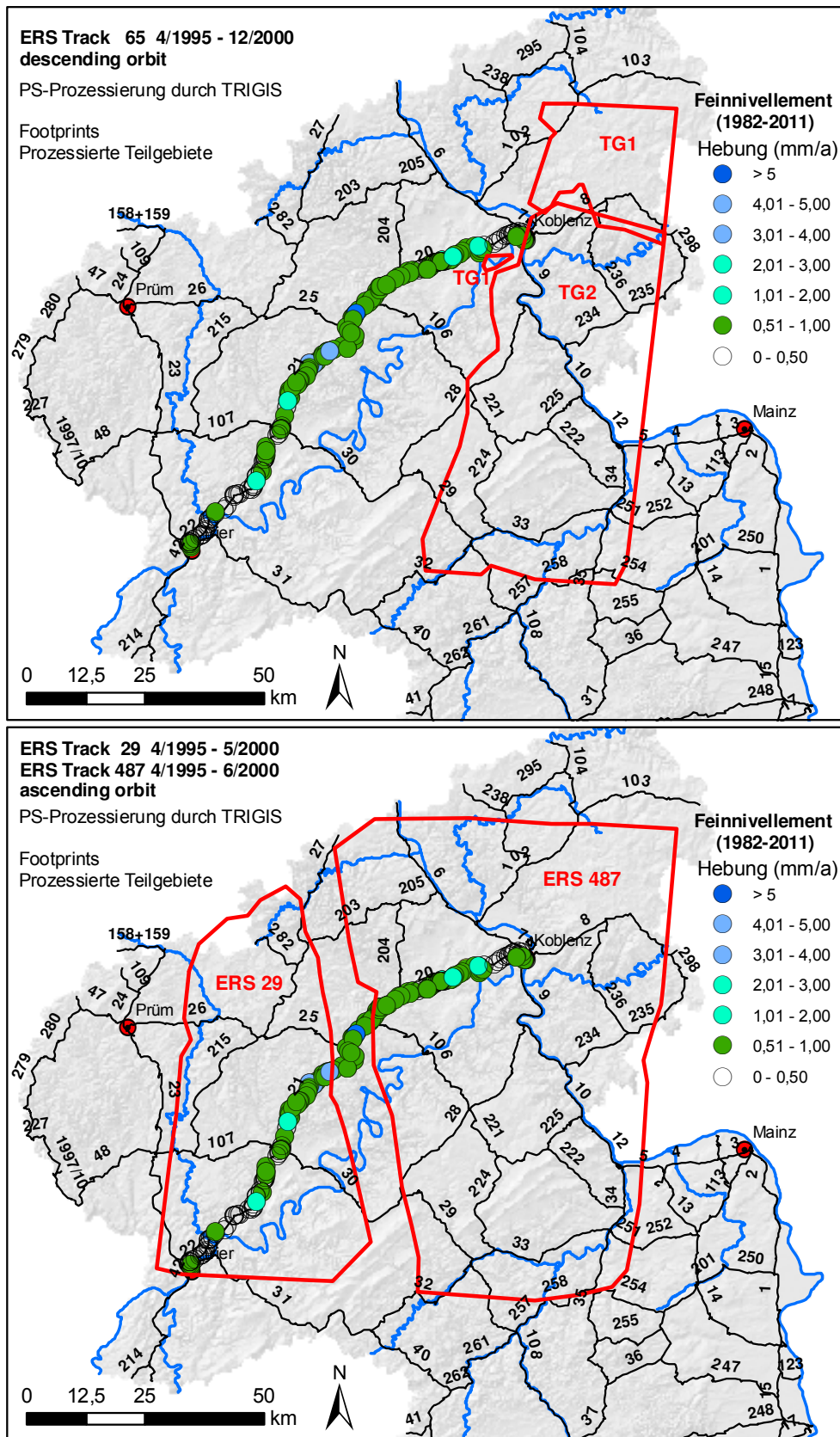


Abbildung 1: Räumliche Abdeckung der PSI-Daten der Datensätze ASTRIUM-ERS337 und ASTRIUM-ASAR337.



**Abbildung 2:** Räumliche Abdeckung der PSI-Daten der Datensätze TRIGIS-ERS337 und TRIGIS-ASAR337 mit Teilgebieten für Prozessierung.



**Abbildung 3:** Räumliche Abdeckung der PSI-Daten der Datensätze TRIGIS-ERS65, TRIGIS-ERS29 und TRIGIS-ASAR487 mit Teilgebieten für Prozessierung.

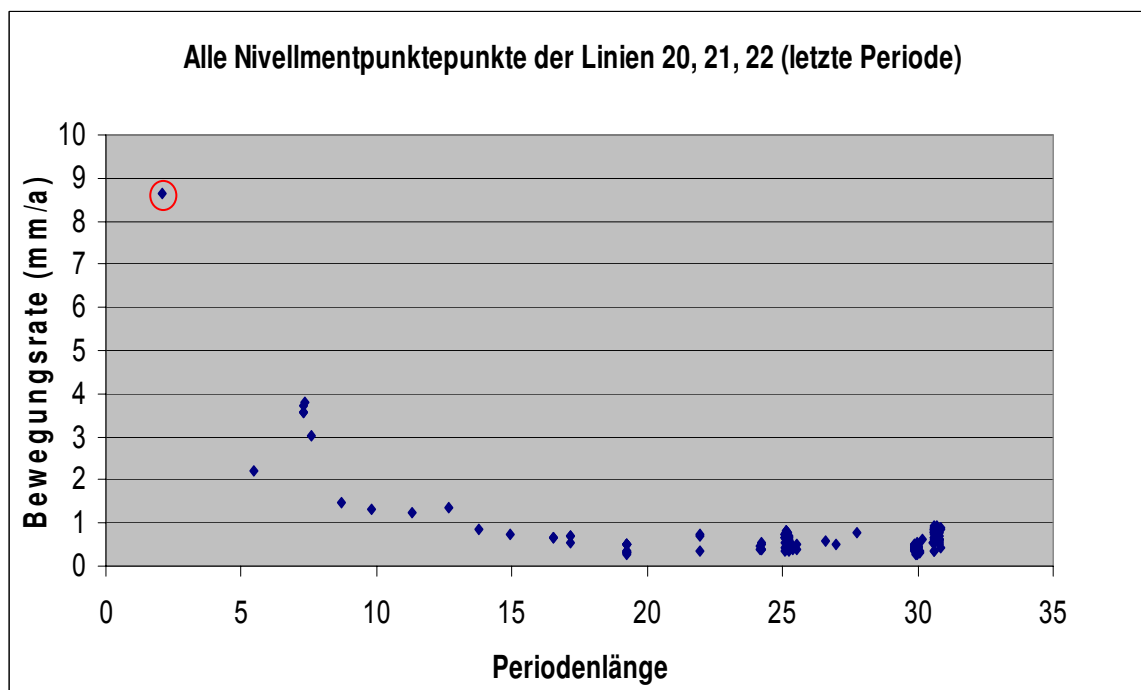
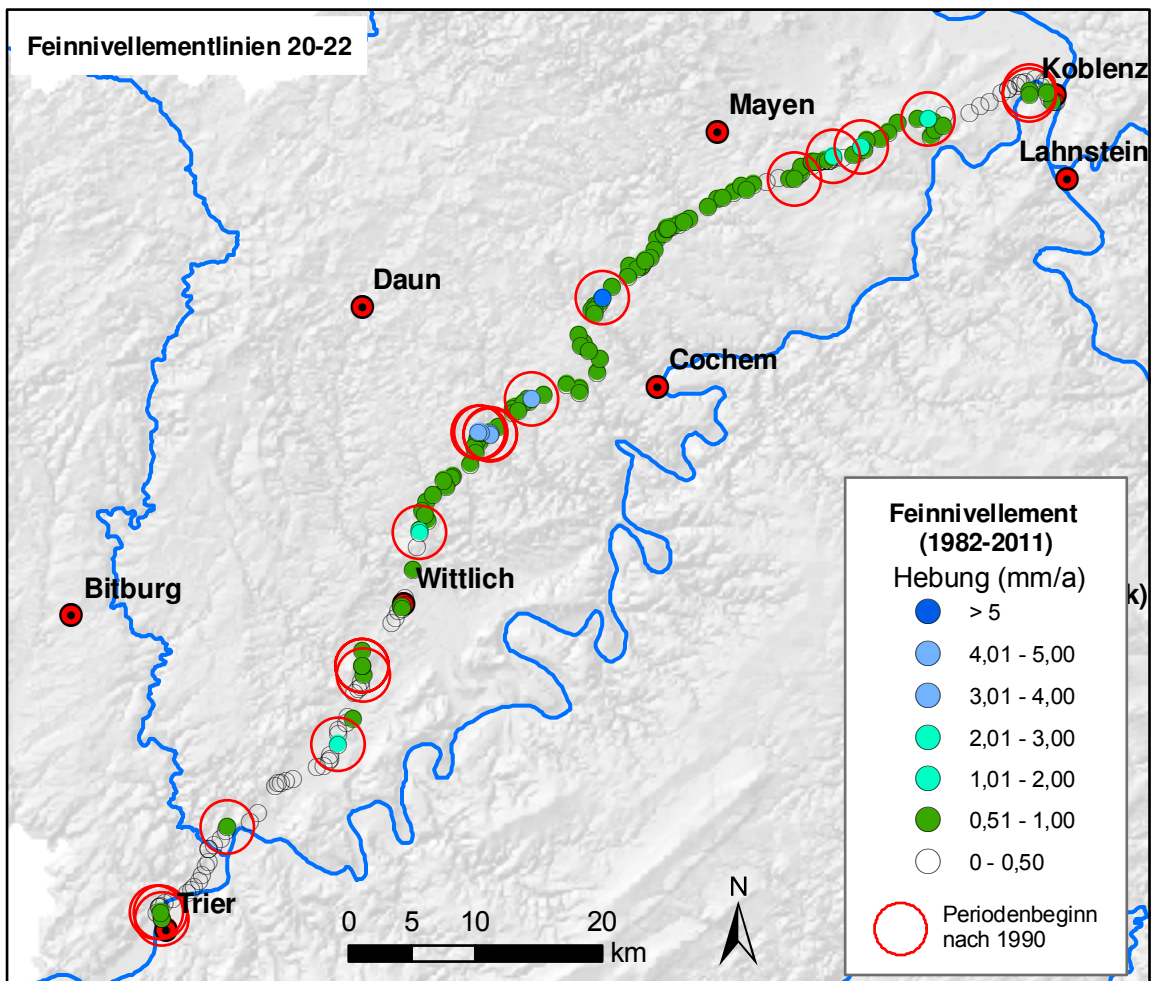


Abbildung 4: Feinnivellement-Bewegungsraten entlang der Feinnivellementlinien 20-22 [11].

### 3. Regionaler Vergleich PSI-NIVP-Bewegungen (Beispiel Südeifel)

Vordringlicher Projektauftrag war es die satellitengestützten Bewegungsdaten in Bezug zu setzen zu bodengebundenen geodätischen Vermessungen.

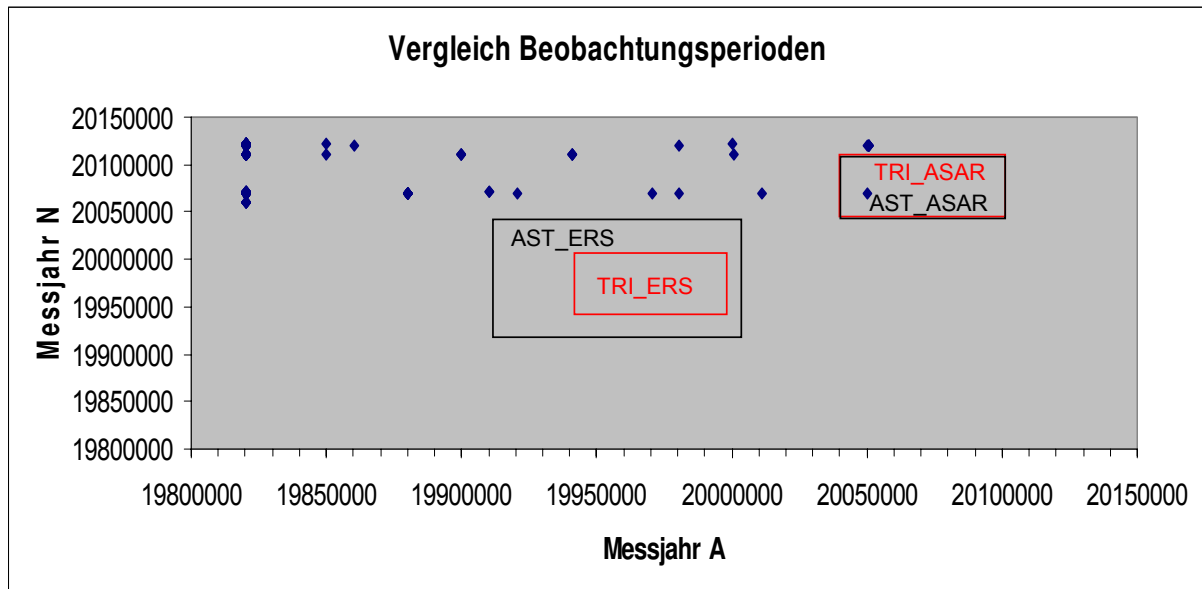
Alle Datensätze innerhalb des Projektgebietes von Eifel und Moselhängen werden nur von einer Linienserie 1. Ordnung, durch die Feinnivellementlinien 20-22, von Trier bis Koblenz durchlaufen. Die Nivellementpunkte (NIVP) dieser Linien wurden deshalb für einen ersten Vergleich herangezogen.

Die Freien Höhen der durch das Landesamt für Vermessung und Geobasisinformationen (LVERMGEO) zur Verfügung gestellten Feinnivellementdaten [11] sind am Startpunkt der Feinnivellementlinie 20 in Koblenz (Nullpunkt) angehalten (pers. Mitteilung Hr. Moritz/LVERMGEO). In Bezug zu diesem Nullpunkt wurden entlang der Nivellementlinien nur neutrale oder positive Bewegungsraten während der letzten Periode (1982-2011) gemessen (Abb. 4). Nur für einzelne NIVP liegt der Periodenbeginn im Jahr 1990 oder später (Abb. 4) und ist damit annähernd vergleichbar dem Beobachtungszeitraum der Satellitendaten bzw. den daraus ermittelten Bewegungsraten.

Der nachfolgende Vergleich setzt somit voraus, dass die Bewegungsrichtung über den Vergleichszeitraum gleichsinnig und die Bewegungsgeschwindigkeit mehr oder wenig stetig war. In Abbildung 4 scheint sich aber eine tendenzielle Zunahme der Bewegungsrate mit verkürzter Periodenlänge anzudeuten. Die Periodenlänge des Nivellementpunktes mit der höchsten Bewegungsrate ( $>8$  mm/a) beträgt nur 2 Jahre

Die Problematik der Vergleichbarkeit von in größerem zeitlichen Abstand vermessenen Nivellementpunkten verdeutlicht auch Abbildung 5. Hier sind die Zeitpunkte der vorletzten (Messjahr A) und letzten Wiedervermessung (Messjahr N) der Nivellementpunkte der Linien 20-22 gegeneinander geplottet. Im Vergleich dazu sind die Beobachtungszeiträume der PSI-Auswertung als Rechtecke dargestellt. Es wird deutlich, dass eine Vergleichbarkeit über unterschiedliche Zeitscheiben abgeleiteter Bewegungsraten nur unter der Annahme stetiger Bewegungsraten besteht. Dies ist bei den nachfolgenden Betrachtungen zu berücksichtigen.

Zum Vergleich von NIVP-Daten zu satellitenvermessenen PSI wurden alle PSI je Datenszene innerhalb 15 Metern um die Nivellementpunkte aus den Datensätzen für eine statistische Auswertung extrahiert.



**Abbildung 5:** Zeitliche Abdeckung der PSI-Daten im Vergleich zu der letzten Feinnivellementbeobachtungsperiode.

Tabelle 2 zeigt eine Zusammenfassung der Auswertung. Die Anzahl der PSI-Punkte in NIVP-Nachbarschaft ist in der Spalte „Count (PSI)“ gegeben. Je PSI-Datenszene wurde der Mittelwert über alle extrahierten Nivellement- und PSI-Punkte berechnet. Unter der Rubrik \*\_individuals errechnet sich der in der Tabelle dargestellte Wert als Mittelwert alle PSI-Punkte innerhalb 15 Metern um die NIVP, ungeachtet dessen durch wie viele PSI-Punkte die Nachbarschaft eines Nivellementpunktes dargestellt wird. In der Rubrik \*\_dissolve dagegen wird zuerst der Mittelwert je PSI-Datencluster je NIVP berechnet, bevor daraus der Mittelwert über alle NIVP mit PSI-Daten innerhalb 15 Metern Nachbarschaft berechnet wird. In der rechten Hälfte von Tabelle 2 ist diese Auswertung auf die PSI-Punkte mit einer Kohärenz  $\geq 0,6$  beschränkt. Da für die ASTRIUM-prozessierten Karten die Information zur Kohärenz nicht vorliegt, konnten diese Berechnungen für diese Datenszenen nicht ausgeführt werden.

Die Differenzen der Mittelwerte zwischen den PSI- und NIVP je Datenszene betragen maximal 1,5 mm, wobei sich die Differenz für den Datensatz „TRIGIS\_ASAR337...TG1 G2 von 1,53 mm/a auf 1,18 mm/a erniedrigt, wenn ein bereits zuvor erwähnter extremer NIVP hinsichtlich Bewegungsrate ( $>8$  mm/a) und Periodenlänge (nur 2 Jahre) von den Berechnungen ausgeschlossen wird.

**Tabelle 2:** Vergleich von Bewegungsraten im Feinnivellment und von Permanent Scatterern im Umkreis von 15 Metern um die Nivelllementpunkte (NIVP) (dissolved – Mittelwert nach 'Dissolve' per NIVP).

	all Permanent Scatterer			Permanent Scatterer coherence >=0.6				
	PSI velocity (mean) mm/a	NIVP velocity mm/a	Count (PSI) f	Diff. Velocity mm/a	PSI velocity (mean) mm/a	NIVP velocity mm/a	Count (PSI) f	Diff. Velocity mm/a
AST_ASAR_individuals	-0.80	0.60	90	1.40				
AST_ASAR_dissolved	-0.82	0.67	42	<b>1.49</b>				
AST_ERS_individuals	0.42	1.02	52	0.60				
AST_ERS_dissolved	0.53	0.84	30	<b>0.31</b>				
TRIGIS_ERS_487asc_individuals	-0.50	0.43	29	0.93	-0.50	0.43	29	0.93
TRIGIS_ERS_487asc_dissolved	-0.37	0.48	12	<b>0.85</b>	-0.37	0.48	12	<b>0.85</b>
TRIGIS_ERS_29asc_individuals	-0.34	0.58	161	0.92	-0.34	0.58	161	0.92
TRIGIS_ERS_29asc_dissolved	-0.33	0.61	39	<b>0.94</b>	-0.33	0.61	39	<b>0.94</b>
TRIGIS_ASAR_337desc_individuals TG1 G1	-0.42	0.49	213	0.91	-0.47	0.49	125	0.96
TRIGIS_ASAR_337desc_dissolved TG1 G1	-0.49	0.49	24	<b>0.98</b>	-0.51	0.48	19	<b>0.99</b>
TRIGIS_ASAR_337desc_individuals TG1 G2	-0.21	0.87	125	1.08	-0.1	0.8	66	0.90
TRIGIS_ASAR_337desc_dissolved TG1 G2	-0.44	1.09	19	<b>1.53</b>	-0.07	1.3	13	<b>1.37</b>
TRIGIS_ASAR_337desc_dissolved TG1 G2**	-0.52	0.66	18	<b>1.18</b>	-0.06	0.69	12	<b>0.75</b>
TRIGIS_ASAR_337desc_individuals TG1 G3	0.00	0.57	450	0.57	-0.03	0.54	274	0.57
TRIGIS_ASAR_337desc_dissolved TG1 G3	0.02	0.63	61	<b>0.61</b>	-0.06	0.55	42	<b>0.61</b>
TRIGIS_ASAR_337desc_individuals TG1 G4	-0.06	0.59	41	0.65	-0.17	0.59	22	0.76
TRIGIS_ASAR_337desc_dissolved TG1 G4	-0.18	0.60	6	<b>0.79</b>	-0.07	0.58	4	<b>0.65</b>
TRIGIS_ERS_337desc_individuals TG2	-0.54	0.59	344	1.13	-0.49	0.59	197	1.08
TRIGIS_ERS_337desc_dissolved TG2	-0.52	0.65	64	<b>1.18</b>	-0.51	0.64	44	<b>1.15</b>
TRIGIS_ERS_337desc_individuals TG3	0.28	0.41	49	0.13	0.30	0.41	21	0.11
TRIGIS_ERS_337desc_dissolved TG3	0.14	0.41	7	<b>0.28</b>	0.33	0.39	4	<b>0.06</b>



Die Differenzen zwischen den Bewegungsdifferenzen auf Basis aller PSI und derer mit einer Kohärenz  $\geq 0,6$  sind geringfügig, wahrscheinlich nicht zuletzt wegen der ausgesuchten Lage der NIVP.

In grafischer Form sind die Ergebnisse, der auf allen Punkten, ungeachtet der Kohärenz, berechneten Mittelwerte in den Abbildungen 6-7 dargestellt. In der oberen Grafik jeder Abbildung sind über ihre Ostkoordinaten (ERTS89 UTM32) die Bewegungsraten der PSI-Punkte und der NIVP geplottet. Für die PSI-Punkte sind neben dem Mittelwert auch die Minimal- und Maximalwerte der PSI-Cluster dargestellt. In der unteren Grafik sind die topografische Höhe, die Hangneigung (gemittelt über 30m Umkreis) und die Orientierung zur Line of Sight dargestellt. Eine systematische Abweichung der Bewegungsraten im Zusammenhang von topographischer Höhe, Exposition oder Hangneigung ist nicht erkennbar, zumal die Hangneigungen mit wenigen Ausnahmen im Bereich  $< 10^\circ$  liegen.

Eine systematische Überschätzung der Bewegungsrate im Vergleich zu den NIVP ergibt sich für den Datensatz TRI\_ASAR\_TG1\_G2 (Abb. 7) nur dann, wenn ein extremer NIVP (s.o.) und seine korrespondierenden PSI-Punkte nicht von der Berechnung eliminiert werden.

Vergleicht man in den Datensätzen mit der größten räumlichen Abdeckung die Bewegungsraten der von ASTRIUM prozessierten Daten von ERS Track 337 und ASAR Track 337 so ergibt sich schon bei oberflächlicher Betrachtung eine Diskrepanz (Abb. 8).

Um die Überlagerung von Datenpunkten in einer kleinmassstäbigen Darstellung zu vermeiden (Abb. 8, oben) wurden über eine Interpolation (Kriging [12], 6 Punkte) zwischen den PSI-Punkten Rasterkarten der durch das Kriging geschätzten Bewegungen in der Fläche berechnet.

Gemäß den Bewegungsanalysen der ERS-Daten aus den 1990er Jahren hebt (Abb. 8) sich der Bereich der Eifel und im Norden, im Übergang zur Niederrheinischen Bucht ist ein groß angelegtes Senkungsfeld aufgrund von Sumpfungmaßnahmen erkennbar. In der folgenden, durch die ASAR-Daten abgebildeten Zeitscheibe (2003-2010) verwandelt sich fast das gesamte Gebiet der Eifel ebenfalls in ein Senkungsgebiet.

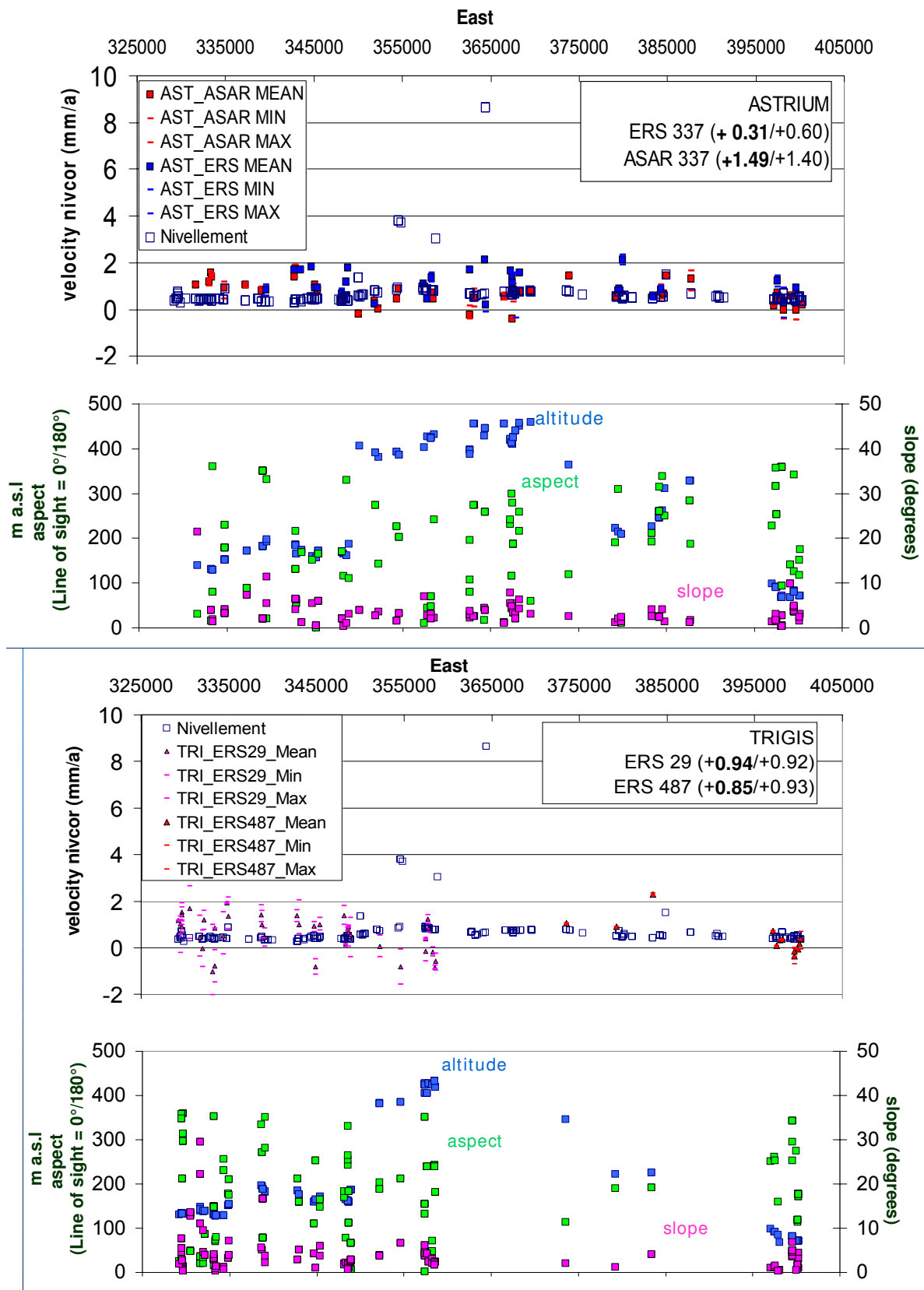


Abbildung 6 Topografische Charakterisierung der NIVP – Teil1.

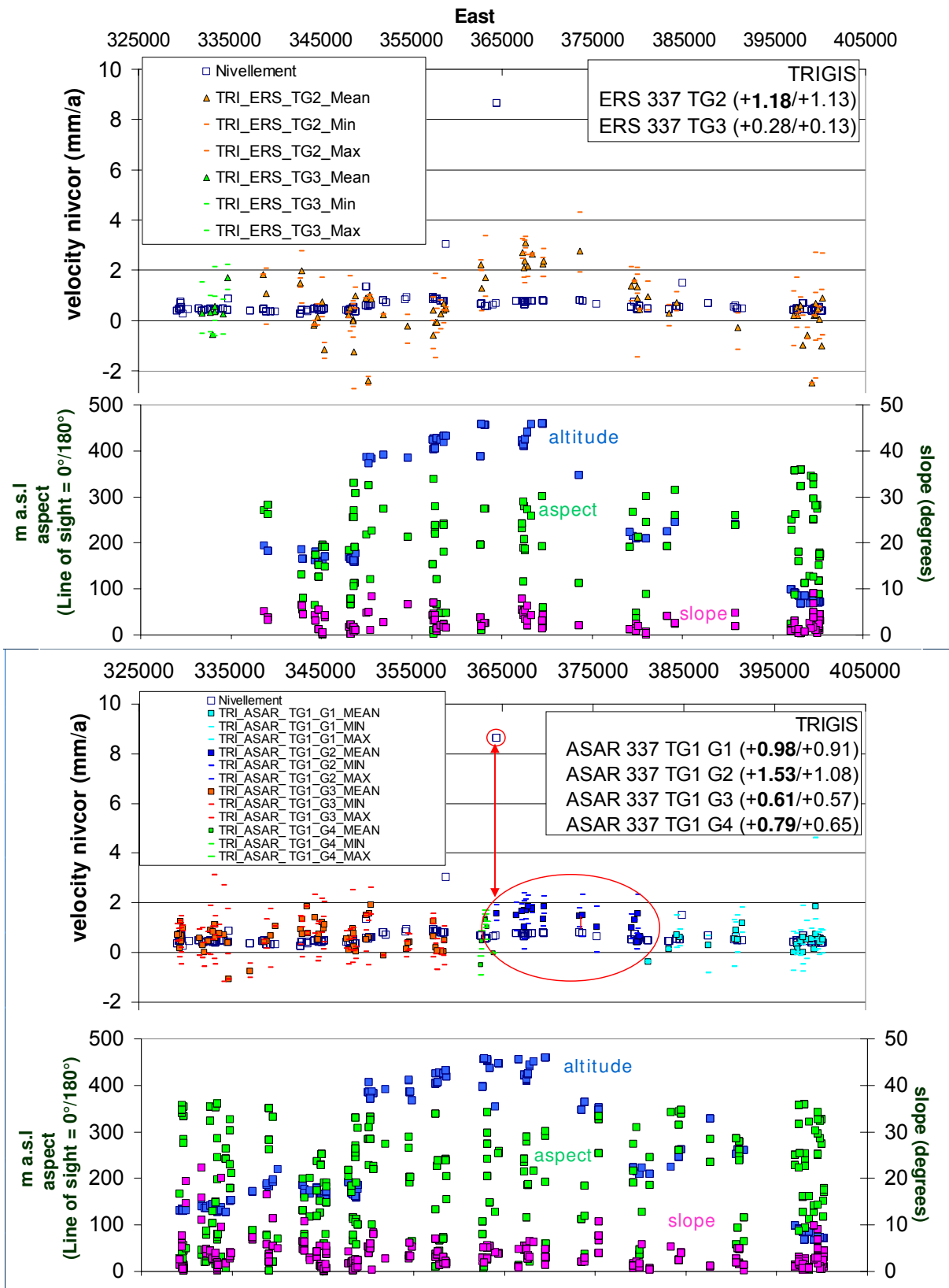
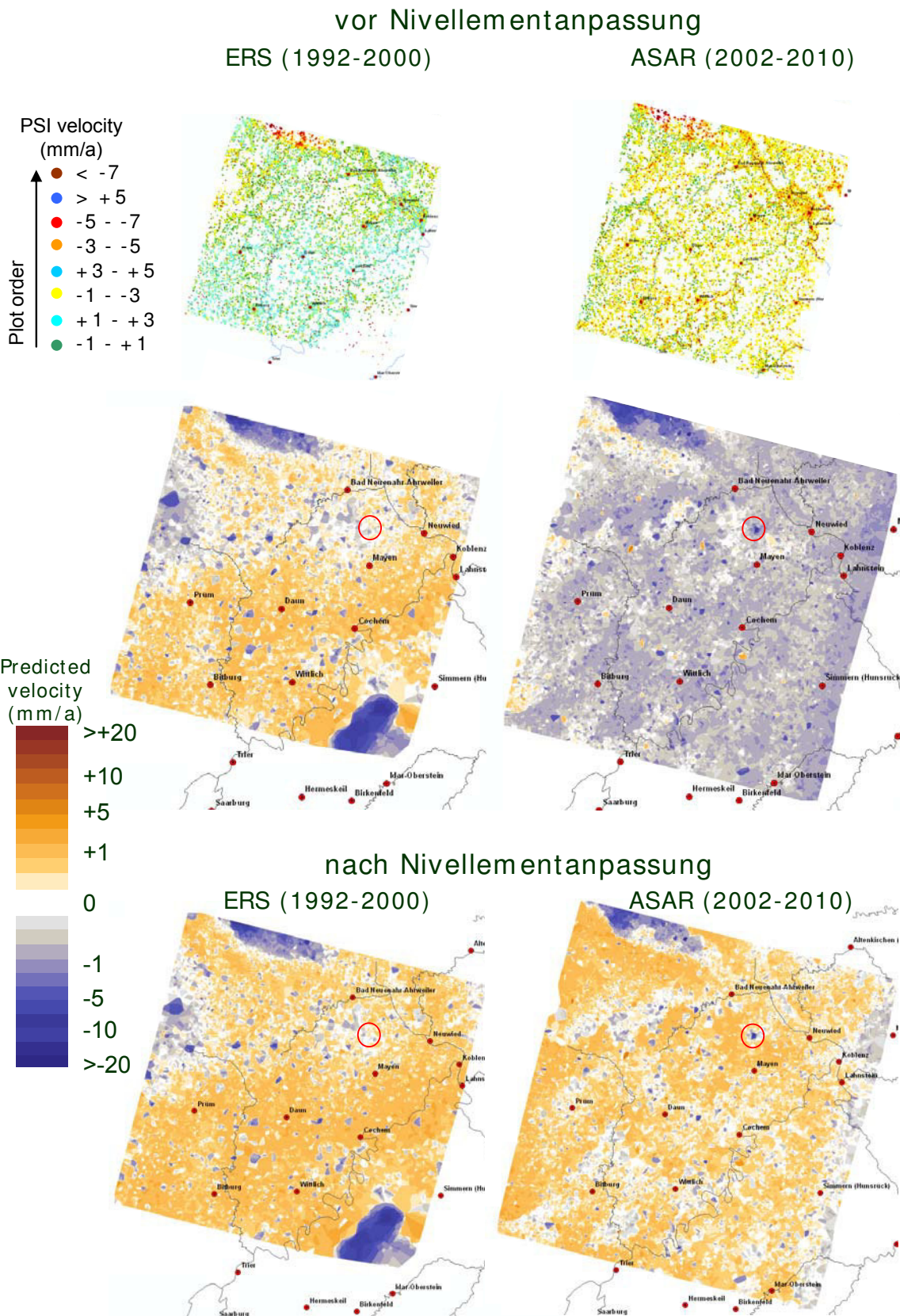


Abbildung 7 Topografische Charakterisierung der NIVP – Teil2



**Abbildung 8** Karten der PSI-Bewegungsraten. Obere Bildzeile: PSI mit Bewegungsraten vor Nivellementanpassung; Mittlere Bildzeile Interpolation der originären PSI-Bewegungen (Kriging, 6 Punkte); untere Bildzeile - Interpolation der Nivellement-angepassten PSI-Bewegungen (Kriging, 6 Punkte); (roter Kreis – Wehrer Kessel, s. Folgekapitel).

Korrigiert man die geschätzten PSI-Bewegungsraten um die in Tabelle 2 dargestellten Differenzen zwischen den mittleren Nivellementpunktegeschwindigkeiten und PSI-Geschwindigkeiten, so bleibt die Eifel großräumig weiterhin ein Hebungsgebiet.

Die geringen in Tabelle 2 festgestellten Differenzen können somit bereits eine unterschiedliche regionale Bewertung bewirken.

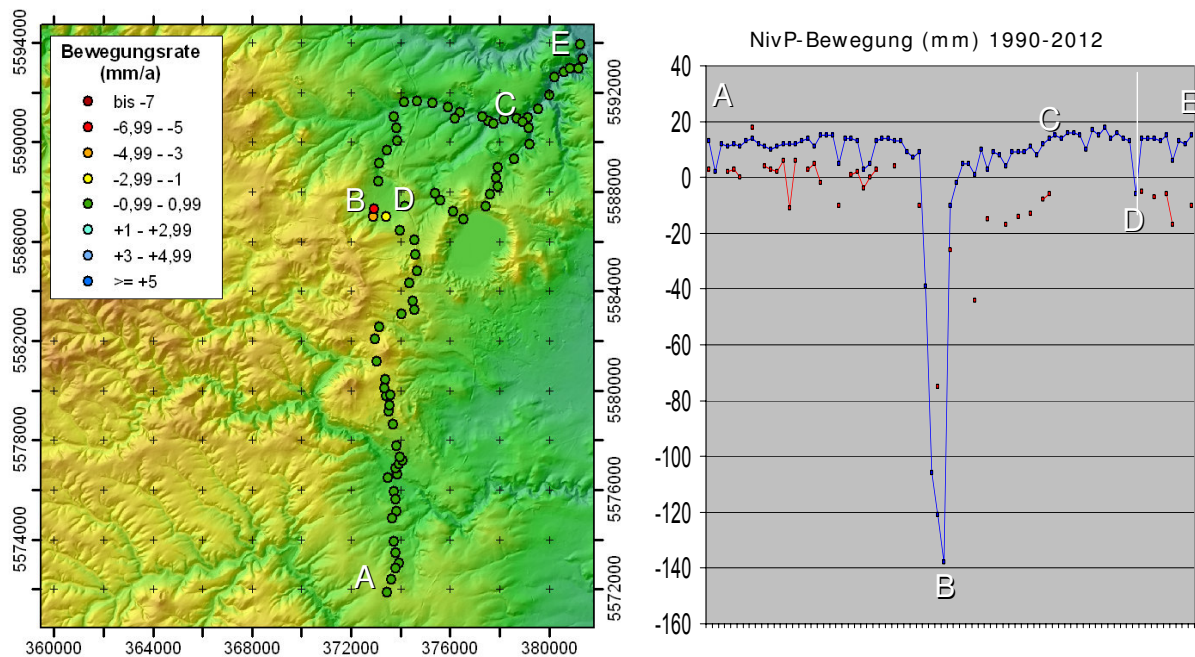
Aufgrund der vergleichbaren äußeren Fehler von Nivellementnetz und PSI-Daten, aufgrund der unterschiedlich langen betrachteten Zeitscheiben und aufgrund der unterschiedlichen Bezugspunkte kann aber keine Wertung vorgenommen werden welche Daten die Realität der Absolutbewegungen besser abbilden. Im vorliegenden Fall wurde das Nivellementnetz willkürlich als Bezugsnetz gewählt, da diese Daten in ein größeres räumliches Bezugssystem eingebunden sind. Ändert sich aber der Bewegungssinn innerhalb der Nivellementperiode tatsächlich, dann führt die Nivellementanpassung der für kürzere Perioden gewonnenen PSI-Bewegungen zu einem Verlust oder zur Unterdrückung dieser Information, dass sich der Bewegungssinn der Eifel möglicherweise nach 2000 von Hebung zu Senkung geändert hat.

## 4. Lokaler Vergleich PSI-/NIVP-Bewegungen – Beispiel Wehr

Während der Periode vor der letzten DHHN-Erneuerung (2006/12) wurden im Projektgebiet die stärksten Höhenänderungen im Bereich des Wehrer Kessels gemessen, mit Absenkungsbeträgen bis 140 mm seit der letzten Nivellierung im Jahr 1990 (Daten LVERMGEO RLP [11]). Aufgrund der vergleichsweise kurzen Periodenlänge, kommt der Beobachtungszeitraum der Nivellementlinie außerdem der des Beobachtungszeitraums für die PSI-Datenauswertung nahe. Diese Linie erschien somit geeignet für einen lokalen Vergleich der NIVP- und PSI-Bewegungen.

Die durch den Wehrer Kessel verlaufende Nivellementlinie 204 schließt in Kehrig (Südende der Punktserie in Abb. 9) an die Nivellementlinie 1. Ordnung Nummer 20 an, die im vorangegangenen Kapitel zusammen mit den anschließenden Linien 21 und 22 als Bezugssystem gewählt wurde.

Die Urmessung der Nivellementpunkte auf Linie 204 erfolgte im Oktober 1958, die erste Wiedervermessung im August/Okttober 1990 [11]. Das Ergebnis dieser Vermessung ist im Diagramm in Abbildung 9 durch die roten Punkte/Linie dargestellt. Während der Vermessungen im Jahr 1990 wurden der Linie weitere Höhenpunkte hinzugefügt, sodass die blaue Linie, die die Veränderung zwischen 1990 und der letzten Wiedervermessung von Oktober 2012 bis Januar 2013 zeigt über mehr Stützstellen verfügt. Der Graphik ist zu entnehmen, dass ein NivP (bei B in Abb. 9) bereits zwischen 1958 und 1990 eine Absenkung um etwa 70 mm erfahren hat. Von 1990 bis 2012 hat dieser Nivellementpunkt eine weitere Absenkung um 140 mm im Vergleich zum Ursprung der Linie erfahren, seit 1958 somit mehr als 20 cm. Auch ein benachbarter Punkt im nördlichen Teil des Kessels hatte sich zwischen 1958 und 1990 mehr als 40 mm gesenkt. Aufgrund der Neuanlage von Höhenpunkten 1990 zeichnet die letzte DHHN-Erneuerung ein differenzierteres Bild. Die durch das LVERMGEO während der letzten DHHN-Erneuerung beobachtete großflächige Hebung der Eifel um durchschnittlich 20 mm (mündl. Komm. Hr. Berg, LVERMGEO) zeigt sich auch in den meisten Nivellementpunkten der Linie 204. Im Bereich des Wehrer Kessels jedoch ist eine starke Senkungstendenz an vier NIVP (zwei überlagern sich im Massstab der Abb. 9) innerhalb der Ortschaft Wehr im südlichen Randbereich des Kessels zu erkennen.



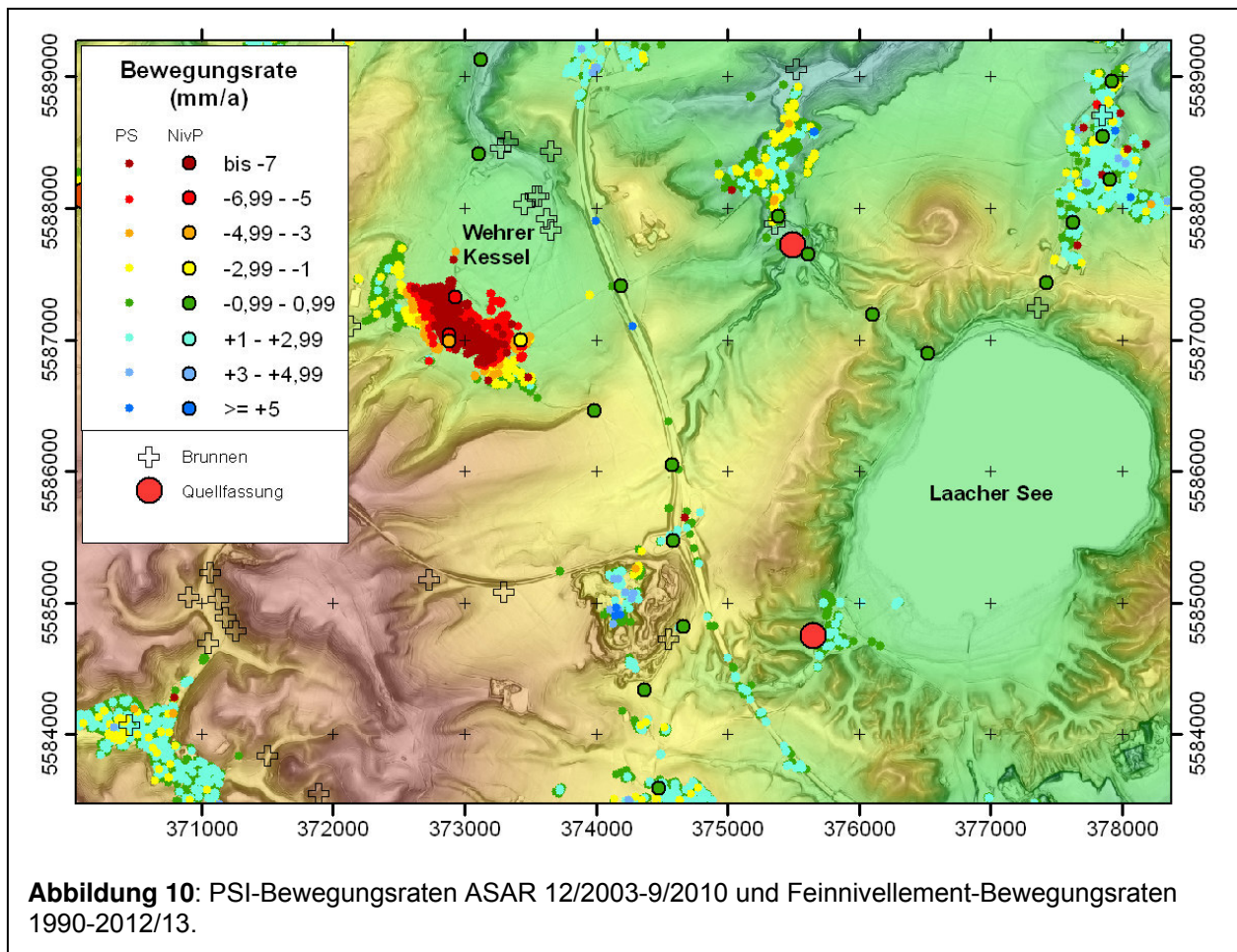
**Abbildung 9:** Nivellamentlinie 204 A→B→D→E. A- Anbindung an Niv-Linie20, B-Wehrer Kessel. Links: Bewegungsrateschicht der NIVPe während der Periode 8/1990-01/2013  
Rechts: Bewegung während der Perioden 1958-1990 und 1990-2012/13.

Die nach Norden auf der Nivellamentlinie anschließenden Nivellamentlinien liegen bereits außerhalb des Bereichs der Sedimente eines ehemaligen Sees im Kessel.

Die Abbildung 10 zeigt die nähere Umgebung der Ortschaft Wehr. Der Wehrer Kessel liegt nur 3 Kilometer westlich des Laacher See, des jüngsten Vulkanes der Osteifel. Im nördlichen Bereich des Wehrer Kessels werden über mehrere Brunnen kohlensäurehaltige Wässer zur industriellen Gewinnung von Kohlendioxid gefördert. Nach Abscheidung des Kohlendioxid werden die Wässer zu dem nach Norden aus dem Kessel fließenden Wirrbach geleitet.

Die industrielle Kohlensäureförderung aus dem wahrscheinlich größten Kohlensäurevorkommen in Mitteleuropa geht bis in das Jahr 1966 zurück. Zwischen 1996 und 2001 wurden vier zusätzliche Tiefbrunnen bis in 600-1000 Meter Tiefe zur Steigerung der Produktion in Betrieb genommen. Die Lage der Brunnen im nördlichen tiefsten Teil des Kessels ist aus Abbildung 10 ersichtlich. Die Bewegungsrateschichten der PSI-Daten im Bereich der mehrer hundert Meter weiter südlich gelegenen Ortschaft Wehr zeigen wie die Nivellamentpunktbewegungen eine starke Absenkung mindestens

seit den Jahren 2003/2004 an. Im nördlichen Bereich des Kessels sind keine Permanent Scatterer für eine Bewegungsanalyse vorhanden.

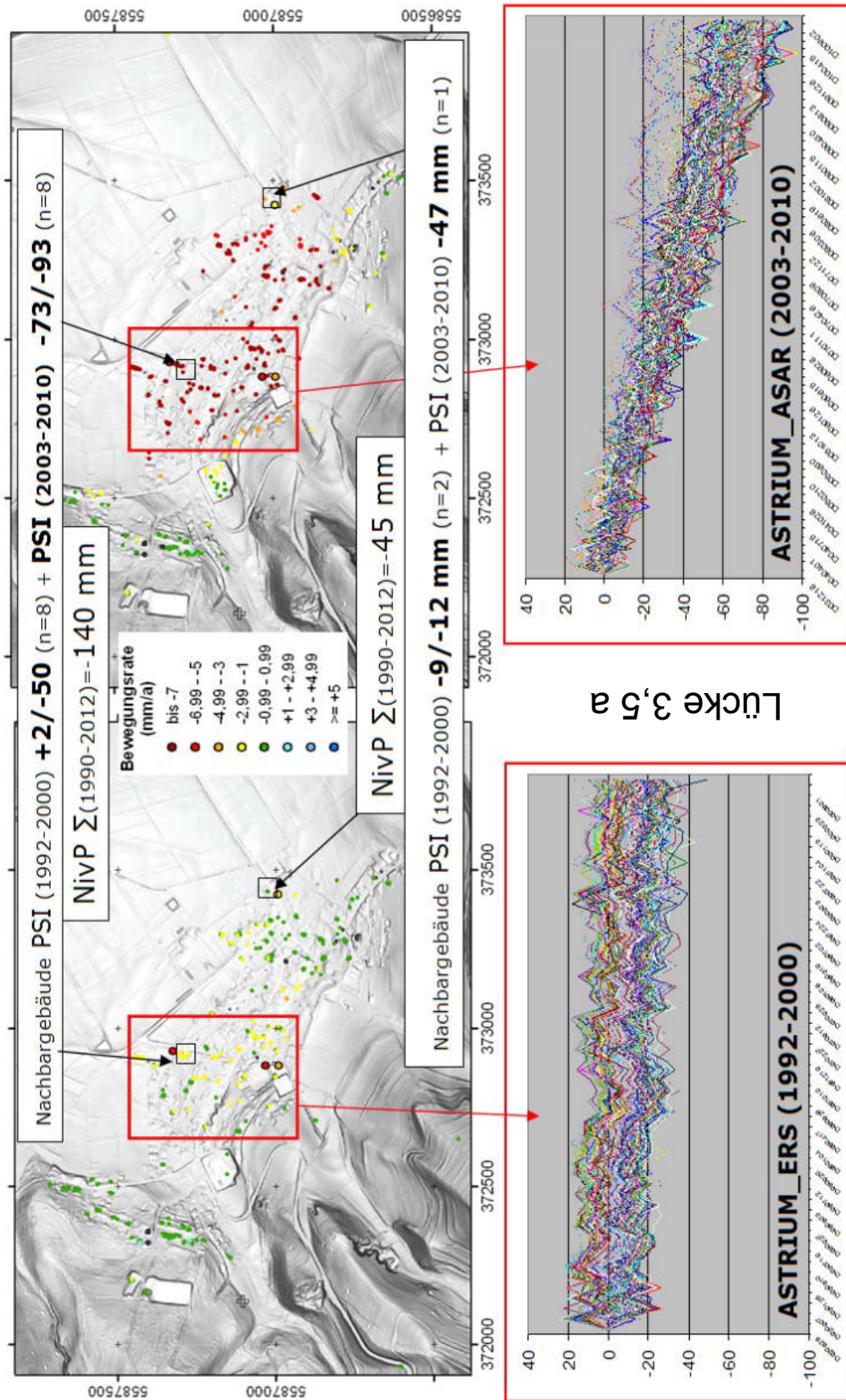


In den folgenden Abbildungen 11-13 erfolgt ein zeitlich differenzierter Vergleich der NIVP-Bewegungen mit den PSI-Bewegungsdaten.

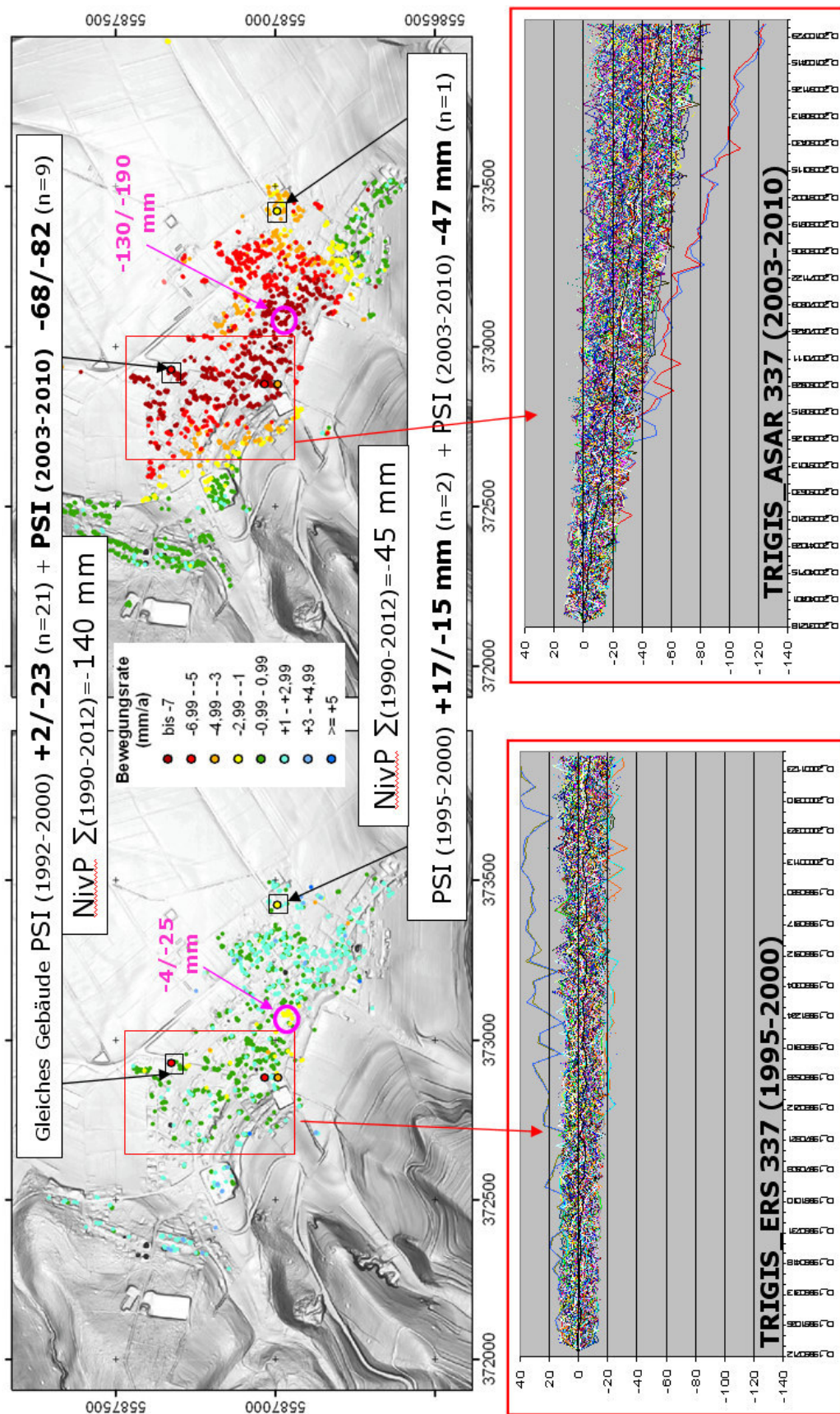
Es werden zwei NIVP näher betrachtet. Der im nördlichen Teil des Dorfes liegende NIVP (WN) mit einer Absenkung von 140 mm zwischen 1990-2012 und ein NIVP (WO) am Ostrand des Ortes mit 45 mm Absenkung während des gleichen Zeitraumes.

Am Gebäude mit dem Nivpunkt WN selbst sind in den ASTRIUM-prozessierten Daten keine Permanent Scatterer ausgebildet, aber acht am Nachbargebäude, die jeweils in den ERS und ASAR-Daten erkennbar sind. Die PSI-Bewegungen der acht Punkte liegen zwischen +2 bis -50 mm. Im mit 3,5 Jahren Lücke anschließende Beobachtungszeitraum der ASAR-Daten erfahren alle Punkte eine Absenkung um -73 bis -93 mm. Berücksichtigt man jeweils die Bewegungsminima und – maxima so erhält man über die Permanent Scatterer eine Absenkung des Nachbargebäudes von -71 bis

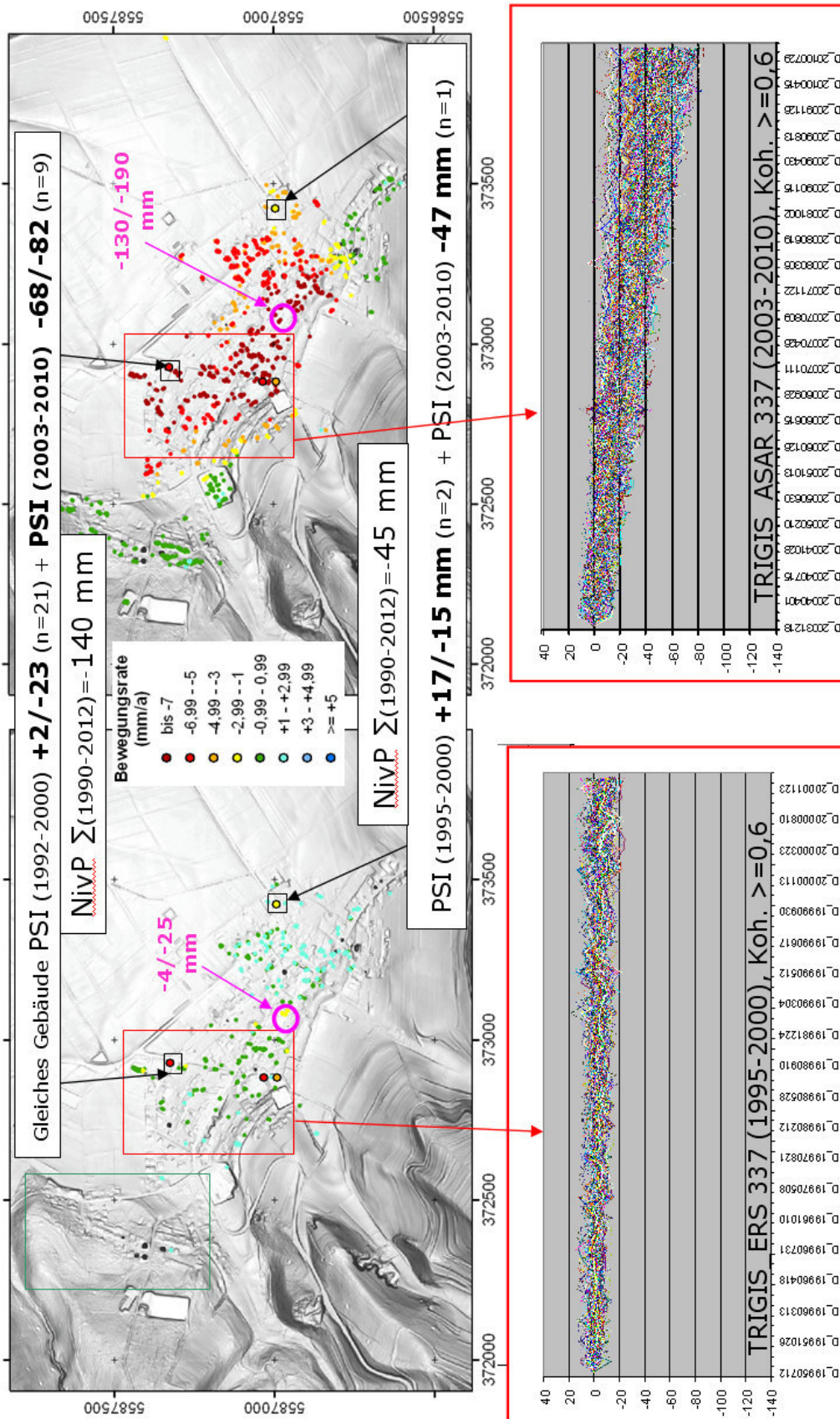




**Abbildung 11** Vergleich PSI- und Nivpunktbewegung in der Ortslage Wehr (Astrium-ERS337/ASAR337).



**Abbildung 12** Vergleich PSI- und Nivpunktbeugung in der Ortslage Wehr (TRIGIS ERS337/ASAR337).



**Abbildung 13:** Vergleich PSI- und Nivpunktbeugung in der Ortslage Wehr (TRIGIS ERS337/ASAR337, nur PSI mit Kohärenz >=0,6).

-143 mm In Anbetracht des auf Grund eines 2 Jahre späteren Beginns des Satellitenbeobachtungszeitraumes, einer 3,5-jährigen Lücke zwischen 2000 und Ende 2003 und einem 2 Jahre früheren Ende des Beobachtungszeitraumes, insgesamt 7,5 Jahre kürzeren Beobachtungszeitraumes im Vergleich zu den NIVP-Vermessungen, kommen damit beide Verfahren trotzdem zu annähernd ähnlichen Bewegungsabschätzungen für beide Gebäude. Aus den Verläufen im unteren Teil der Abbildungen wird auch ersichtlich, dass die Absenkungen vor 2000 langsamer verliefen und spätestens 2003 eine anhaltende Beschleunigung der Bewegungen stattgefunden hat. Die dargestellten Verläufe bilden alle PSI innerhalb der roten Rechtecke ab. Vor allem die Fehljahre in den PSI-Beobachtungsreihen nach 2010 im Vergleich zur NIVP-Periode dürften den Vergleich beeinflussen.

Der NIVP WO (-45 mm, 1990-2012) wird in den ASTRIUM-prozessierten Daten ebenfalls nur durch Daten des Nachbargebäudes repräsentiert. In der durch die ERS-Daten betrachteten Zeitscheibe senkten sich die beiden Scatterer am Nachbargebäude um -9 bis -12 mm. Während der ASAR-Beobachtungsreihe wird am gleichen Gebäude nur ein Scatterer erkannt, der sich mit -47 mm senkt, der gleichen Absenkung die über die gesamte Nivellementperiode am Nachbargebäude gemessen wurde.

Erschwerend zu den Diskrepanzen hinsichtlich Beobachtungslängen kommt, dass Gebäudeteile sich unterschiedlich stark durch Sackung, Kippung oder Drehung absenken können und am gleichen Gebäude dann auch Stellen mit Hebung entstehen können.

Der gleiche Vergleich wie zuvor mit den ASTRIUM-prozessierten Daten wurde mit den von TRIGIS prozessierten Daten ausgeführt (Abb. 12). Hier ist zu beachten, dass die ERS-Zeitscheibe im Vergleich zu der ASTRIUM-Auswertung nicht 1992, sondern erst 1995 beginnt. Die Dauer der Beobachtungslänge der PSI ist somit insgesamt 10 Jahre kürzer als die NIVP Periode.

Der NIVP WN wird in den TRIGIS-Daten durch 21 (ERS) bzw. 9 (ASAR) Scatterer am gleichen Gebäude abgebildet. Die ERS-Scatterer ergeben Bewegungen zwischen +2 bis -23 mm, die ASAR-Daten eine beschleunigte Absenkung von -68 bis -82 mm. Die maximale beobachtete Absenkung von 105 mm in einem Teilzeitraum der NIVP-Beobachtung, ist damit scheinbar 35 mm geringer als die Differenz der

Nivellementbeobachtung. Berücksichtigt man die fehlenden Bewegungsdaten mit wahrscheinlich langsamer Absenkung von 2000-2003 (~10 mm) und beschleunigter Absenkung von 2011-2012 (~20-30 mm), so ergeben sich nach Interpolation und Extrapolation wieder vergleichbare oder stärkere Absenkungen in den PSI-Daten.

Im Umfeld von WO verteilen sich die Scatterer auf unterschiedliche Gebäude mit Bewegungen von +17 mm bis -15 mm in den ERS-Daten und einem Scatterer mit einer Absenkung von -47 mm zwischen Ende 2003 und 2010.

In Abbildung 13 sind nur PSI-Daten mit einer Kohärenz  $\geq 0,6$  berücksichtigt. Diese Filterung hat in diesem Beispiel keinen Einfluß auf die zuvor dargestellten Bewegungsdaten.

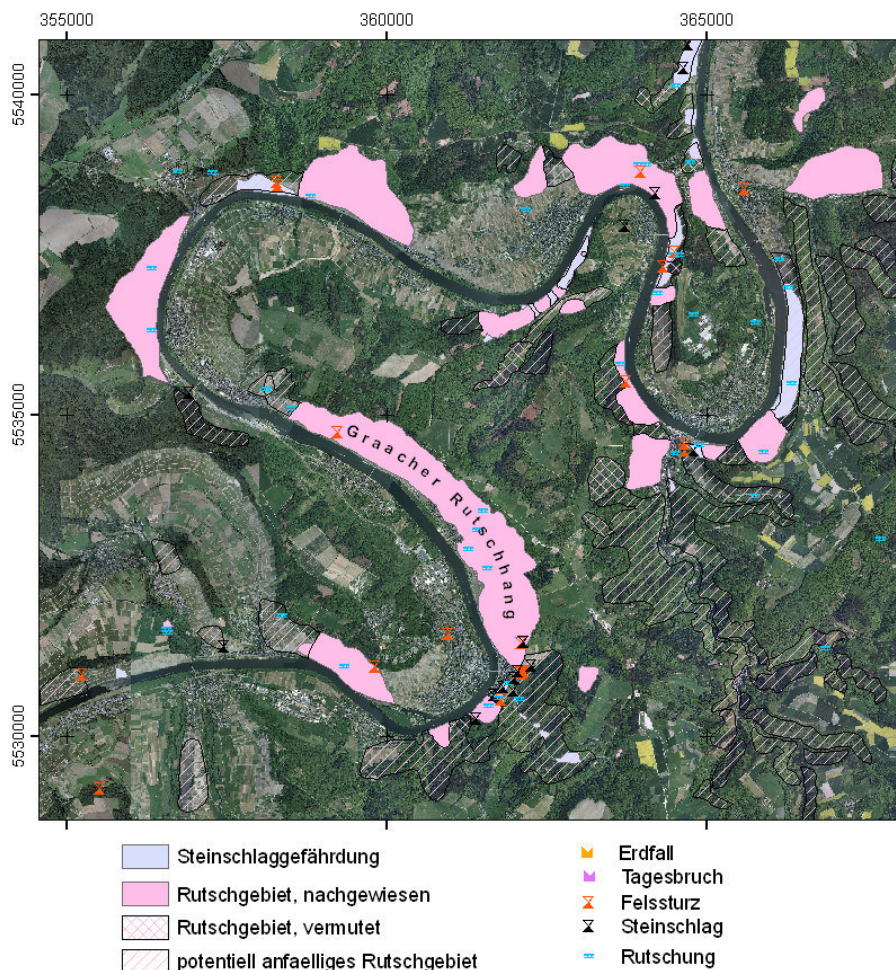
Das Senkungszentrum in Wehr wird durch die Nivellementpunkte nicht erfasst. Es liegt sowohl in der ERS- als auch in der ASAR-Datenreihe stabil im zentralen südlichen Bereich des Ortes. In den Abbildungen 12 und 13 ist das Zentrum der bekannten Absenkung mit einem magenta-farbenen Kreis markiert. Die in den Satellitendaten dokumentierte Absenkung innerhalb dieses Bereiches betrug zwischen 1995-2010 mehr als 200 mm.

Die Bewegungsabschätzungen vermutlich auf Sumpfungsmassnahmen zurückzuführender Absenkungen liefern sowohl in den Nivellementpunkt- wie auch in den PSI-Geschwindigkeiten übereinstimmende Ergebnisse.

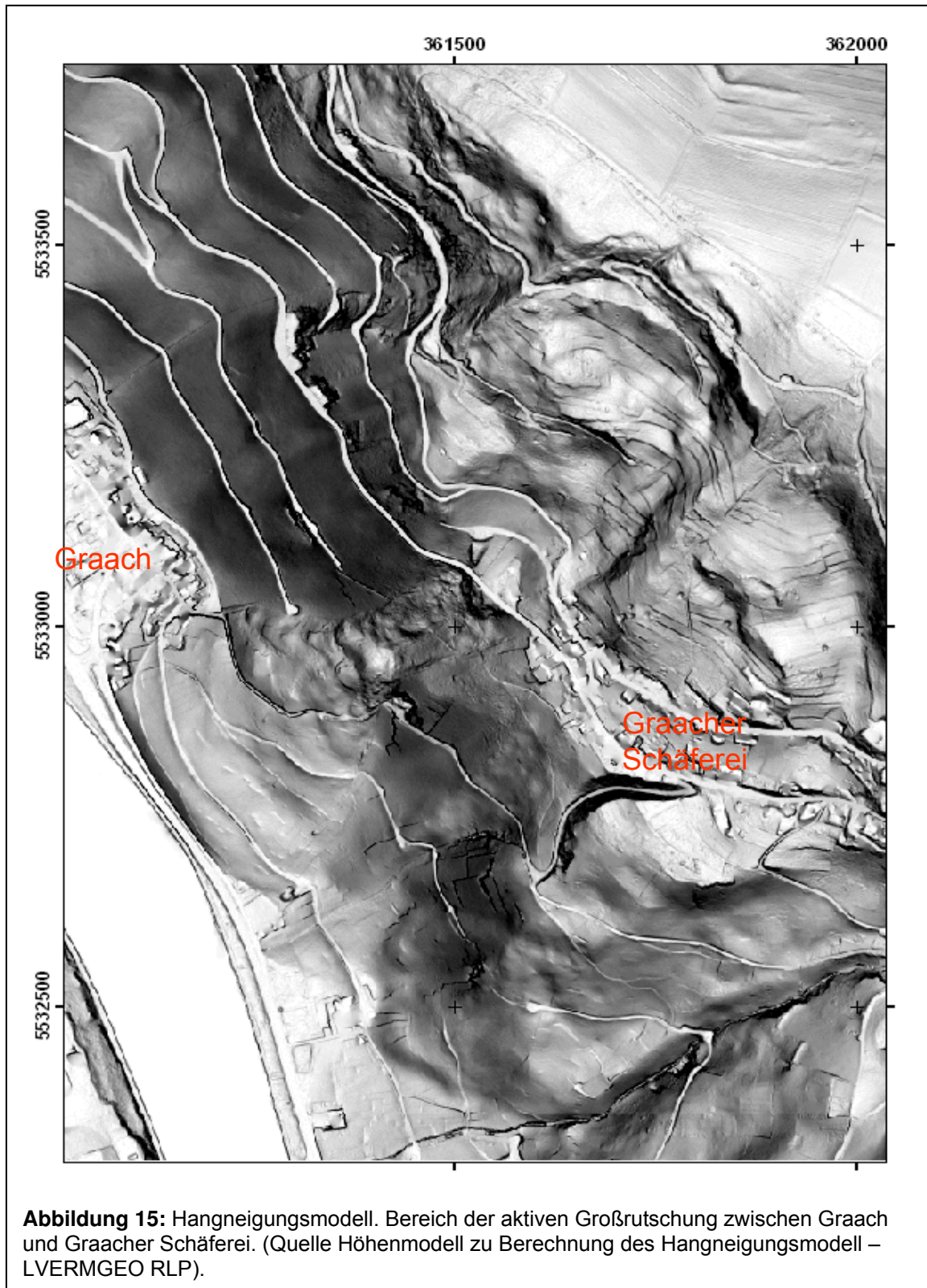
Auf Grund der dichten Datenlage der PSI-Daten konnte darüber hinaus innerhalb der Ortslage Wehr das Senkungszentrum identifiziert werden, das mangels Nivellementpunkten in diesem Bereich bisher nicht detektiert war. Bodenbewegungen außerhalb der Ortslage und innerhalb des Kessels können aber mangels PSI nicht in der Fläche beurteilt werden.

## 5. Bodenbewegungen in der Großrutschung Graach

An der Mittelmosel sind zahlreiche, natürlich entstandene Großrutschungen bekannt, die in der Regel den Hang auf der gesamten Höhe betreffen und sich meist auf die Prallhänge konzentrieren (Abb. 14). Für die Großrutschungen ist es charakteristisch, dass die Teil-Bewegungen sowohl räumlich als auch zeitlich nicht gleichmäßig verlaufen [14]. Vor allem letzterer Umstand widerspricht damit grundsätzlichen Annahmen, die einer Bewegungsschätzung von Permanent Scatterern zu Grunde liegen. Dieses Testgebiet stellt somit für die Bewegungsanalyse eine besondere Herausforderung dar.



**Abbildung 14:** Rutschgebiete im Bereich Graach-Kroev (Ausschnitt aus Hangstabilitätskarte Mittelmosel (LGB RLP, [13])).



Das Areal junger Rutschungen ist in LIDAR-Höhen- und Hangneigungsmodellen leicht erkenn- und abgrenzbar (Abb. 15). Zahlreiche ältere, z.T. inaktive Rutschungen, sind

zusätzlich in der Hangstabilitätskarte „Mittelmosel“ des LGB RLP ausgewiesen (Abb. 14, [13]).

Das gesamte Rutschareal Graach auf der Nordostflanke der Mosel umfasst etwa 50 Hektar, wovon etwa 15 Hektar als aktive Rutschung eingestuft werden [14]. Rutschungen wurden hier bereits für den Anfang des 20. Jahrhunderts beschrieben. Weiter wird berichtet, dass mit Inklinometern in den 1980er Jahren Bewegungen im Zentimeterbereich je Monat gemessen wurden und dass hier zwei verschiedene Rutschungstypen, die ursächlich zusammenhängen, zu unterscheiden sind: Zum einen eine zuerst eingetretene Lockergesteinsrutschung, deren Rutschmassen im unteren Hangteil akkumuliert und heute noch in Bewegung sind. Zum anderen eine Felsrutschung im oberen Hangteil [14].

Seit 2007 werden geodätische Punkte (Inklinometeransatzpunkte, Corner Reflektoren) innerhalb der Großrutschung mit modernen geodätischen Methoden nach Lage und Höhe durch den Landesbetrieb Mobilität (LBM) vermessen [15]. Die Lage der geodätischen Messpunkte innerhalb der Rutschung zeigt Abbildung 16.

Im Rahmen der Flurbereinigung von Graach wurden auf Vorschlag des LGB im Auftrag des DLR im Jahr 2007 insgesamt acht Kernbohrungen im Graacher Rutschhang geteuft. Diese wurden teilweise zu Inklinometermessstellen ausgebaut. Der große Vorteil der Inklinometer-Messungen ist die Möglichkeit zur Ermittlung der Gleittiefe. Tatsächlich kann mit den Messstellen INK 1 und INK 5 eindeutig die Tiefe der Gleitfugen in ca. 25 m bzw. ca. 12 m Tiefe unter Geländeoberfläche nachgewiesen werden. In der Kernbohrung BK 7 (in Teilbereich 6 in Abb. 17) sind Rutschmassen bis in 62,4 m Tiefe unter Geländeoberfläche erbohrt [14]. Die Bewegung in den Bohrungen ist nach Südwesten gerichtet, was auch durch die GPS-Messungen der Inklinometeransatzpunkte bestätigt wird [14, 15].

Corner Reflektoren, für die aktuelle Hangüberwachung durch den Landesbetrieb Mobilität aufgestellt, werden durch den LBM fortlaufend auch geodätisch vermessen. Die Auswertung der TerraSAR-X Daten zur Beobachtung der Corner Reflektoren erfolgt durch die Firma Astrium Services. Die Corner Reflektoren CR3 – CR8 wurden am 6. Oktober 2010, fünf weitere ein Jahr später am 16. Oktober 2011 aufgestellt. CR 8 war als Bezugspunkt in einem mutmaßlich unbewegten Gelände gedacht. Da die ersten Messungen des Kontrollpunktes CR 8 dies nicht bestätigten [14] wurden mit Reflektor CR 17 in Nähe zu CR8 auf der Hunsrück-Hochfläche und mit





**Abbildung 16** Dem Höhenmodell überlagertes Luftbild mit Lage der geodätisch vermessenen Corner Reflektoren und Inklinometer im Zentrum der aktiven Rutschung (Luftbild, Geländemodell – LVERMGEO RLP)

Reflektor CR 13 auf der Eifelseite weitere Kontrollpunkte im mutmaßlich unbewegten Gelände hergestellt. Auch diese Punkte erwiesen sich als nicht stabil.

In den Anlagen A und B mit großmassstäbigen Karten sind die Ergebnisse der GPS-Vermessungen [15] bis November 2014 zusammengefasst. Neben grossmassstäbigen Darstellungen der Hangneigung und Hangkrümmung, ist der zeitliche Verlauf der Bewegung der GPS-Punkte (Corner Reflektoren) getrennt nach Horizontal- und Vertikalbewegung dargestellt. Desweiteren die Bewegungsrichtung im Koordinatennetz.

Im Mittel ist die generelle Bewegungsrichtung, wie schon zuvor in kürzeren Zeitreihen beobachtet [14] in Hangrichtung nach SSW bis SW gerichtet. Der Corner Reflektor mit der stärksten Bewegung (CR05) bildet davon eine Ausnahme und wandert nach WSW bzw. W (Anlagen A und B). Dieser Reflektor liegt am Ausgang des „Flaschenhalses“ im oberen Bereich des Divergenzbereiches des Schuttkegels (Abb. 16), kurz unterhalb des Rutschungsabschnittes, in dem die stärksten Bewegungen angenommen werden müssen. In den Karten der Hangkrümmung (Anlage B) erscheint dieser Bereich wie auch die darüber liegenden Bereiche der Rutschung mit schnell wechselnde wulstigen Strukturen, in denen konvexe (Hebung, braun) und konkave Hangpartien (blau) wechseln. In der Hangform im Streichen des Hanges erscheinen diese im Bereich der erwarteten stärksten Hangbewegung im Flaschenhals und im Divergenzbereich des oberen Schuttkegels nahezu wie Fluidalstrukturen/Strömungslinien.

Die Verschiebung des Corner Reflektors CR 05 im oberen Schuttkegel betrug zwischen November 2011 und dem gleichen Monat in 2014 in der Horizontalen 20 cm, bei einer Absenkung um 7,5 cm.

Die am weitesten zurückreichenden geodätischen Vermessungen betreffen die Inklinometerstandorte und reichen bis in das Jahr 2007 zurück. Die ersten Corner Reflektoren wurden im Oktober 2010 errichtet [14].

Die Zeitreihen der Corner Reflektoren haben somit keine zeitliche Überschneidung mit den aus ERS- und ASAR-Daten abgeleiteten PSI, die in diesem Projekt bearbeitet werden sollen. Zu den Inklinometermessungen besteht eine zeitliche Überlappung von nur knapp 3 Jahren. Hinsichtlich der Bewegung der Inklinometer ist aber eine Dämpfung der Bewegung um etwa den Faktor 2 [14] zu berücksichtigen.

Mithilfe der ERS und ASAR- Daten sollten räumlich differenzierte Bewegungsschätzungen für die beiden letzten Jahrzehnte erfolgen. Potentielle Permanent Scatterer für die interferometrische Auswertung stellen die die Wege begleitenden und auch abseits der Wege innerhalb der Weinberge vorkommenden Weinbergsmauern und Metallgeländer dar.

Ungünstig für die Beobachtung ist allerdings die Ausrichtung der Rutschung senkrecht zur Line of Sight und der Weinbergsmauern überwiegend mehr oder weniger parallel dazu (Abb. 15-16, siehe v.a. auch großmassstäbige Anlagen A und B).

Es ist in Erinnerung zu rufen, dass die von Astrium prozessierten Bewegungsraten auf einen Referenzpunkt bei Mayen bezogen sind [1] und in vertikale Bewegungen umgerechnet sind. Die TRIGIS-prozessierten Daten haben keinen Referenz-Nullpunkt und sie stellen Bewegungen in Line of Sight dar [2-10].

Die Abbildung 17 zeigt die räumliche Verteilung der detektierten PSI. Aufgrund geomorphologischer Kriterien wurden 11 Teilgebiete definiert.

Tabelle 3: Teilgebiete im Graacher Rutschhang

1	Altes Rutschgebiet nördlich und östlich Graach
2	Ortslage Graach
3	Ortslage Graach angrenzend an Schuttkegel der aktiven Großrutschung
4	Schuttkegel der Großrutschung
5	Gebiet stärkster Hangbewegung
6	Gebiet zwischen Abrisskante und Talverengung
7	Ortslage Graacher Schäferei
8	Rutschhang/Steilhang unterhalb Graacher Schäferei
9	Hangfußbereich
10	Rutschhang südlich Taleinschnitt östlich d. Graacher Schäferei
11	Gewerbegebiet Kues mit Referenzpunkt für TerraSAR-X Auswertung (Astrium Services) für derzeit laufendes Hangmonitoring

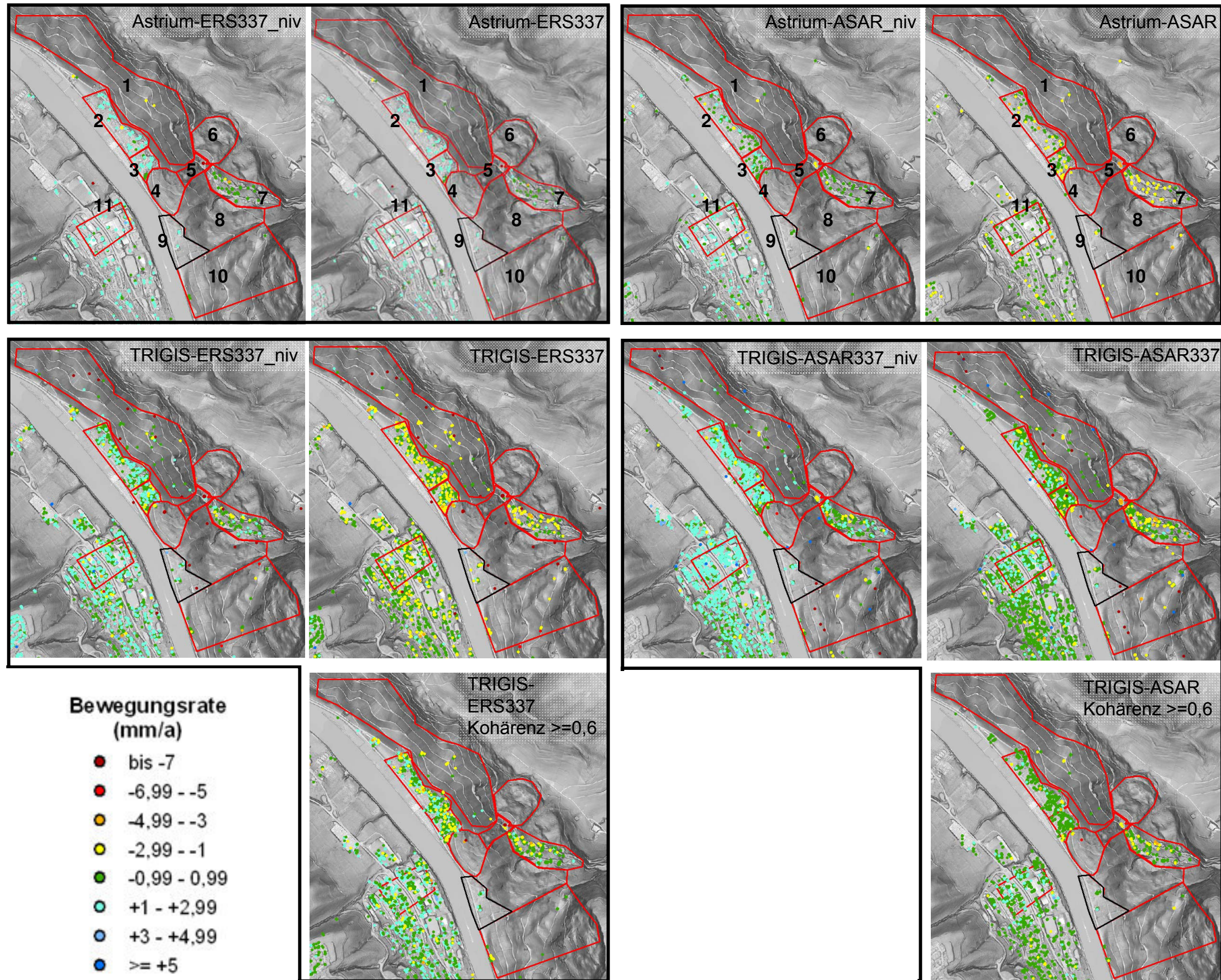


Abbildung 17 Lage und Bewegungsraten der PSI für Teilgebiete des Graacher Rutschhanges

Im Bereich der Ortschaften wurden eine Vielzahl von Permanent Scatterer identifiziert, im Bereich der interessierenden Rutschhänge aber nur wenige.

In Abbildung 17 sind jeweils die Bewegungsgeschwindigkeiten und die Nivellementangepaßten Bewegungsgeschwindigkeiten (vgl. Tab. 2) aller PSI der Prozessierungen durch Astrium und TRIGIS dargestellt. Die Nivellementanpassung der Bewegungsraten wirkt sich auf die Astrium prozessierten ERS-Daten mit +0,3 mm/a und die ASAR-Daten mit +1,5 mm/a aus. Die TRIGIS-prozessierten ERS-Daten (TG2) wurden um + 1,2 mm/a und die ASAR-Daten (TG1 G4, Tab. 2) um + 0,8 mm/a korrigiert. Die Nivellement-korrigierten Bewegungsraten berücksichtigen die seit den 1980ern im Nivellementnetz regional beobachtete Hebungstendenz in der Eifel. Für die nachfolgenden lokalen Betrachtungen sind diese Korrekturen eher störend, weil im Hang abwärts bewegte Teile so bei geringen Bewegungen u.U. in der durchschnittlichen Geschwindigkeit sogar Hebung anzeigen.

Nur für die TRIGIS-prozessierten Daten liegen Angaben zur Kohärenz vor. Nach Eliminierung der PSI mit einer Kohärenz  $\geq 0,6$  verblieben die in der unteren Abbildungszeile von Abbildung 17 dargestellten PSI. Innerhalb der Rutschungen und ausserhalb der Siedlungen verbleiben nur vereinzelt PSI. Von den PSI mit erhöhter und hoher Bewegungsrate sind nur wenige erhalten z.B. Reflexionen eines Hochspannungsmastes innerhalb des Schuttkegels

Aus diesem Grunde werden für die Teilgebiete die zeitlichen Verläufe aller PSI und der Kohärenz-gefilterten Subsets dargestellt (Abb. 18 – 28) .

Der Referenzpunkt für die TerraSAR-X Daten liegt innerhalb des Gebietes 11 (Abb. 17 u. Abb. 28), die genaue Lage ist dabei den Anlagen A und B zu entnehmen. Mit Ausnahme der Astrium-prozessierten ERS-PSI ergibt sich für die anderen Datensätze in diesem Gebiet ein mittlerer neutraler Bewegungsvektor mehr oder weniger entlang der Nulllinie. Bezüglich des Referenz-Nullwertes können die TRIGIS-prozessierte Daten und Astrium prozessierte TerraSAR-X- und ASAR-Daten damit als vergleichbar gelten. Die zeitlichen Verläufe in der Ortslage Graach (Gebiet 2+3, Abb. 19-20) sind nahezu identisch denen im Gebiet 11 (Abb. 28). Ein extremer Ausreißer stellt ein PSI mit 45 cm Absenkung dar. Der Scatterer ist in einem Wingert in Ortsrandlage am Fuß des Rutschhanges verortet, in unmittelbarer Nähe zu kleineren Nebengebäuden. Der andere Scatterer liegt 60 Meter entfernt vom Rutschhangfuß isoliert innerhalb des Ortes. Die Kohärenz beider Punkte ist geringer als 0,6.

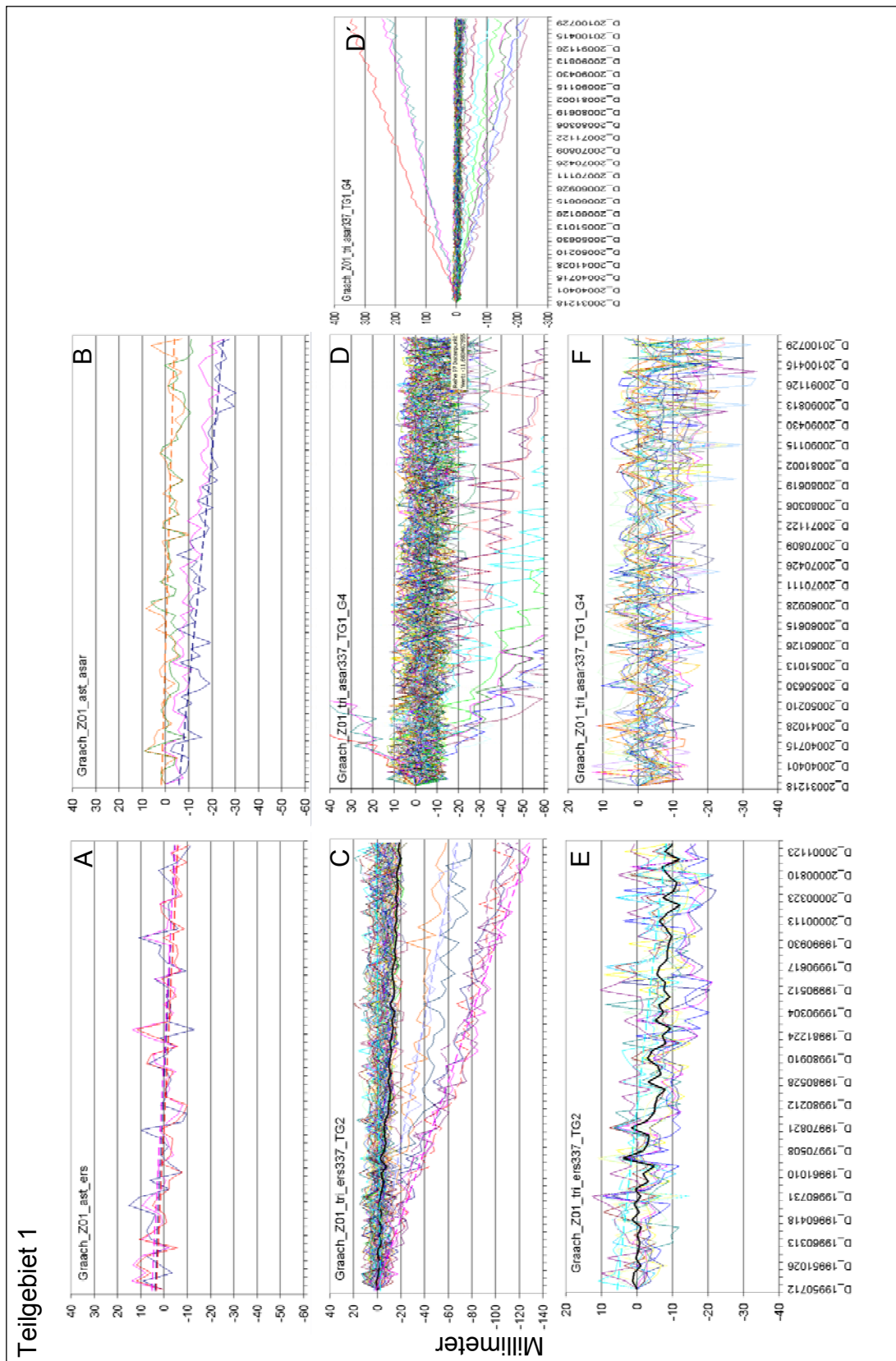
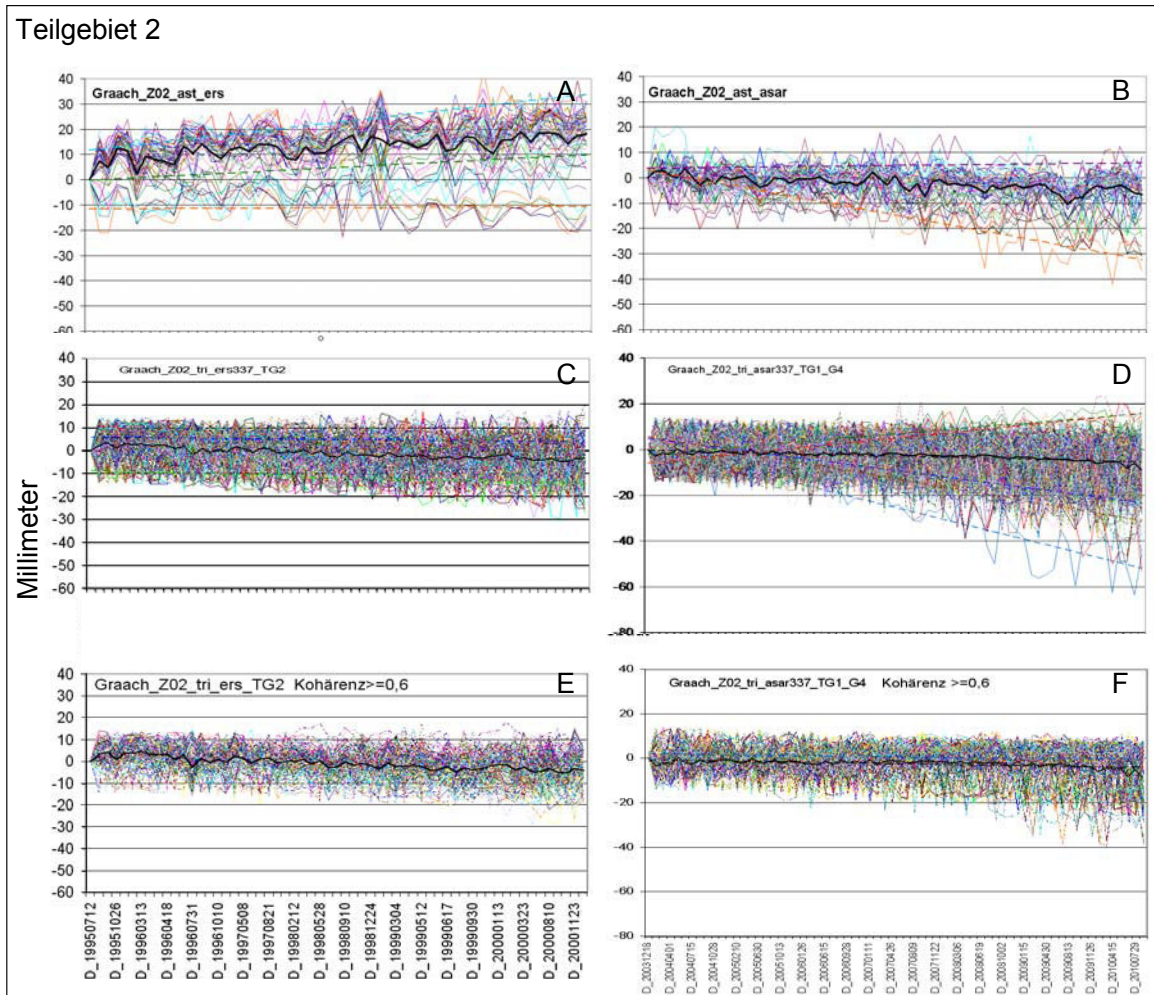
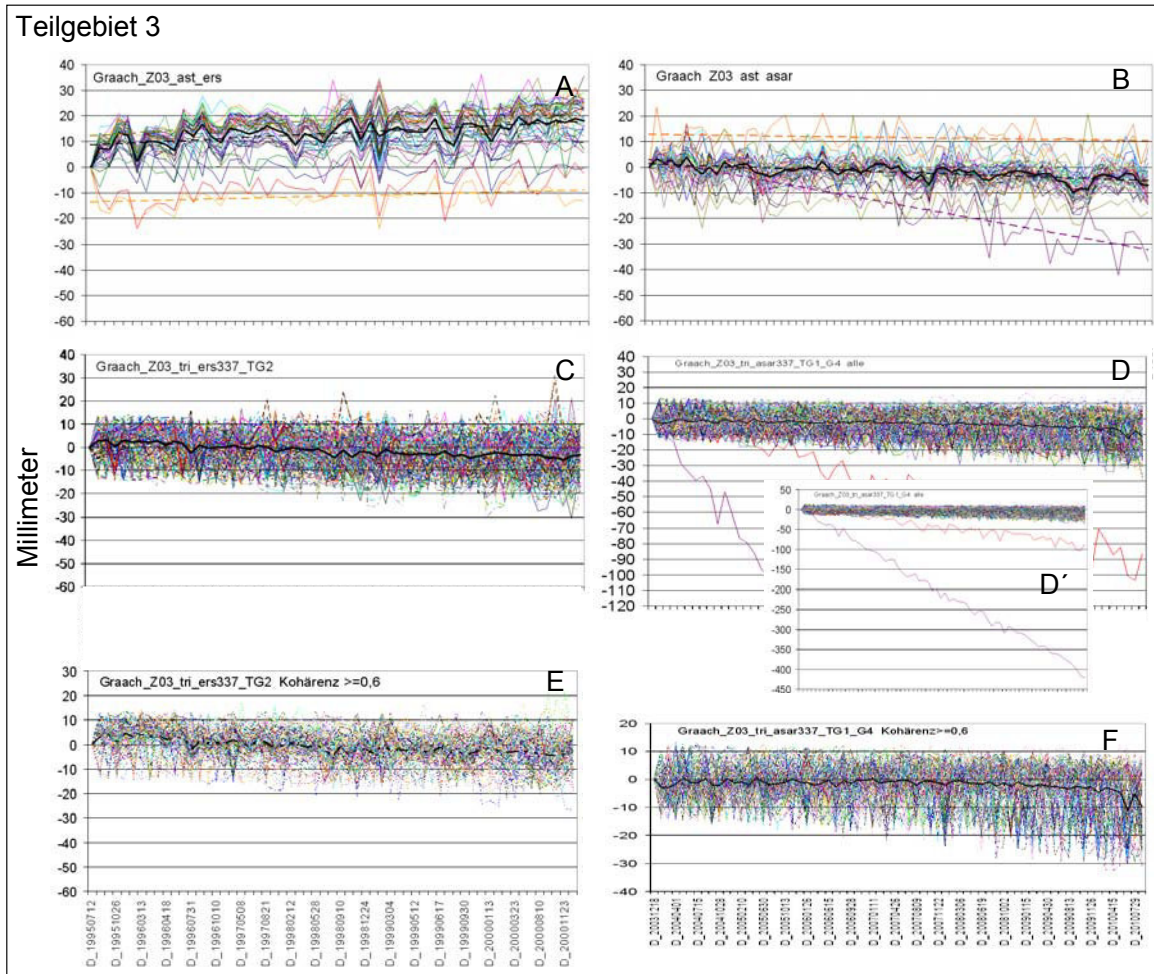


Abbildung 18: Zeitliche Verläufe: PSI Teilbereich 1 in Abb. 17 u. Tab. 3. A-D alle PSI, E-F nur PSI mit Kohärenz  $\geq 0,6$ .



**Abbildung 19:** Zeitliche Verläufe: PSI Teilbereich 2 in Abb. 17 u. Tab. 3.  
A-D alle PSI, E-F nur PSI mit Kohärenz  $\geq 0,6$ .



**Abbildung 20:** Zeitliche Verläufe: PSI Teilbereich 3 in Abb. 17 u. Tab. 3. A-D alle PSI, E-F nur PSI mit Kohärenz >=0,6.



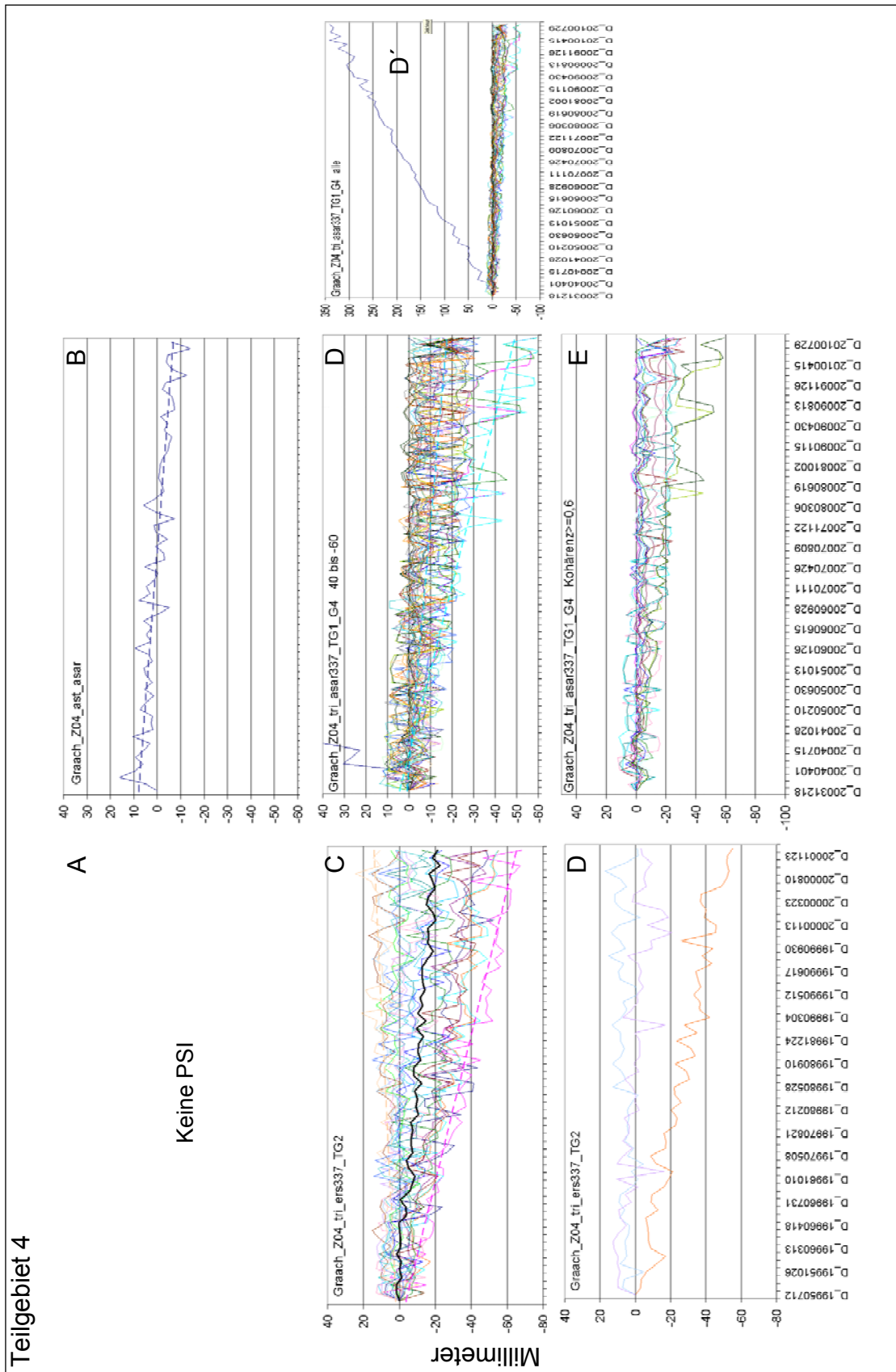


Abbildung 21: Zeitliche Verläufe: PSI Teilbereich 4 in Abb. 17 u. Tab. 3. A-D alle PSI, E-F nur PSI mit Kohärenz  $\geq 0,6$ .

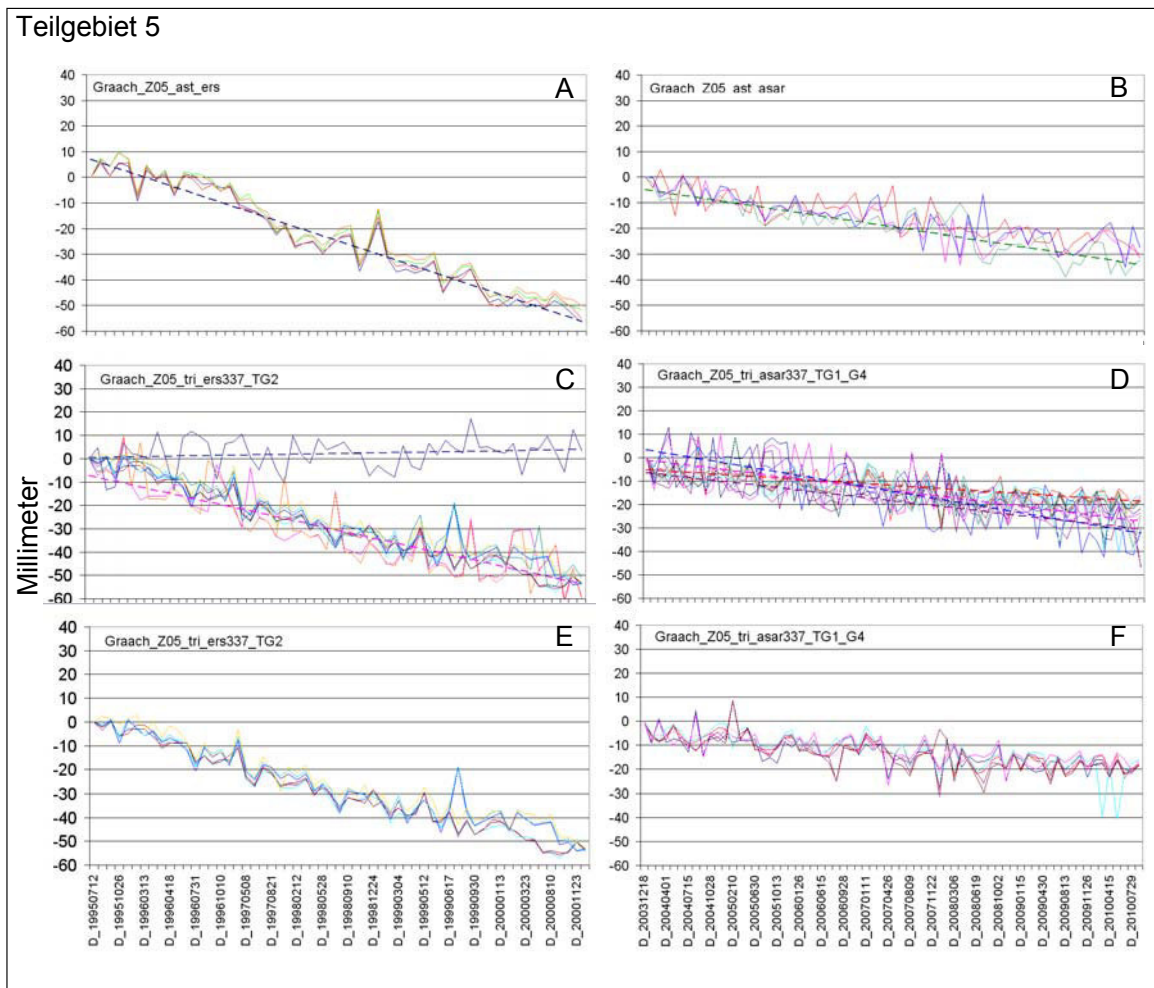
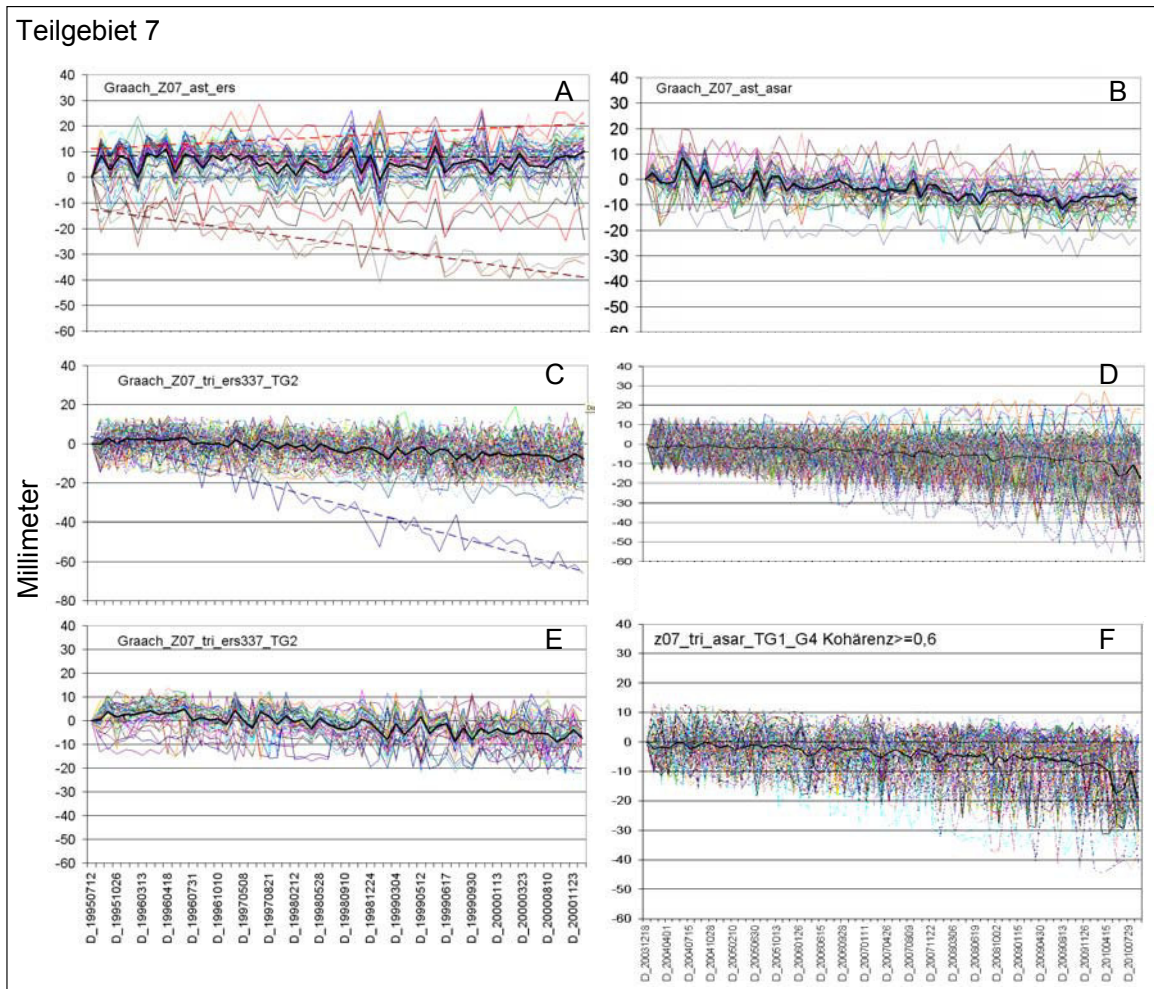
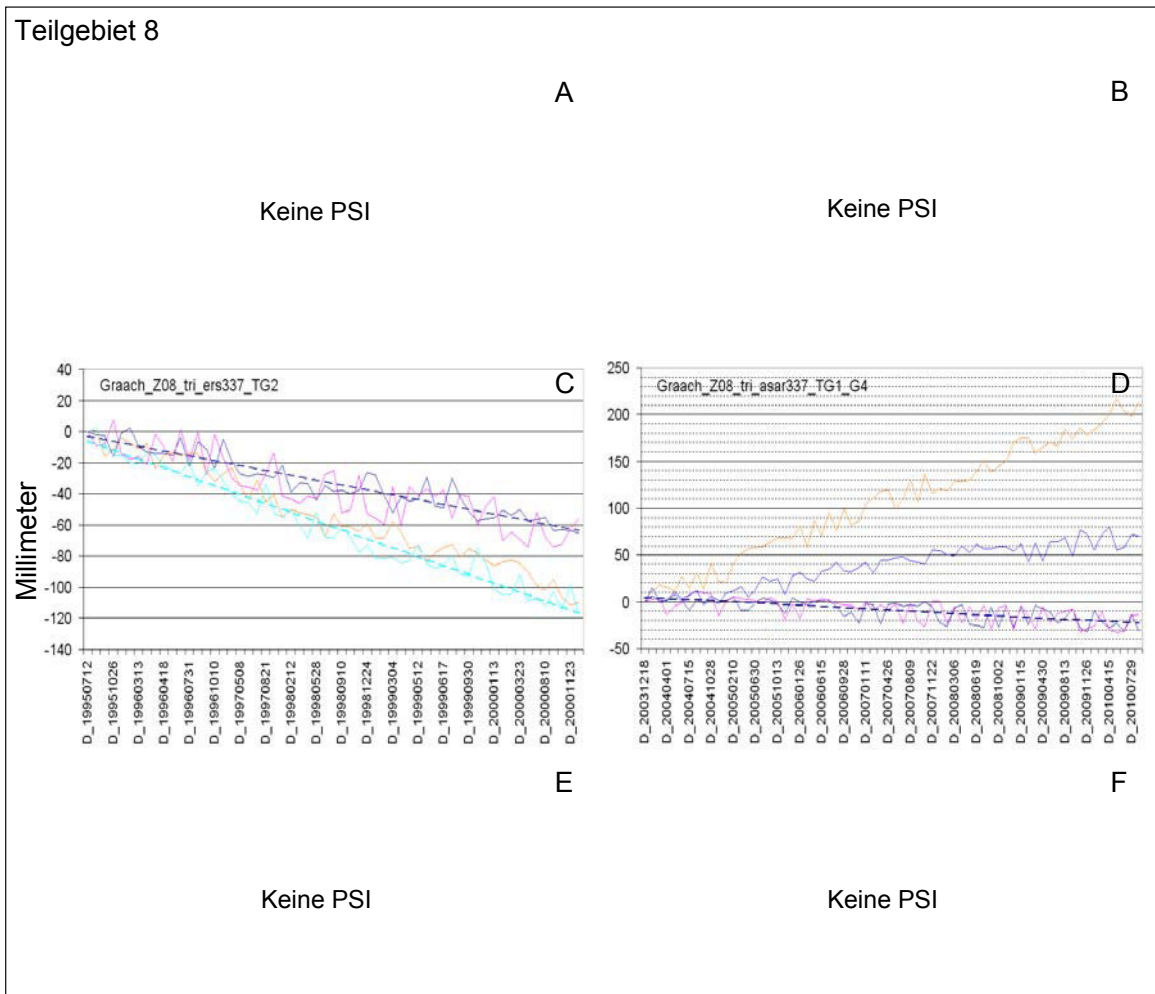


Abbildung 22: Zeitliche Verläufe: PSI Teilbereich 5 in Abb. 17 u. Tab. 3.  
A-D alle PSI, E-F nur PSI mit Kohärenz  $\geq 0,6$ .

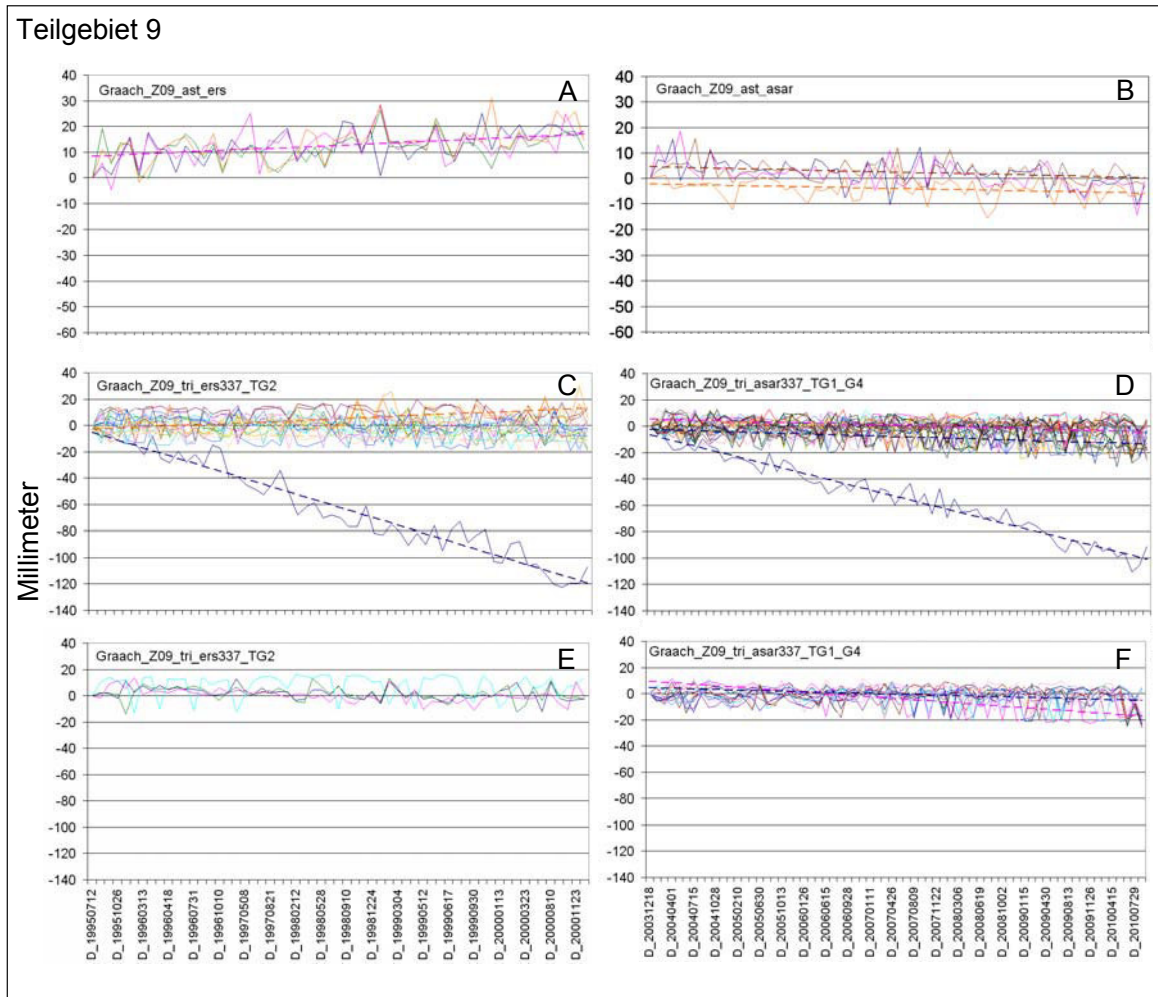




**Abbildung 24:** Zeitliche Verläufe: PSI Teilbereich 7 in Abb. 17 u. Tab. 3.  
A-D alle PSI, E-F nur PSI mit Kohärenz  $\geq 0,6$ .



**Abbildung 25:** Zeitliche Verläufe: PSI Teilbereich 8 in Abb. 17 u. Tab. 3. A-D alle PSI, E-F nur PSI mit Kohärenz  $\geq 0,6$ .



**Abbildung 26:** Zeitliche Verläufe: PSI Teilbereich 9 in Abb. 17 u. Tab. 3. A-D alle PSI, E-F nur PSI mit Kohärenz  $\geq 0,6$ .

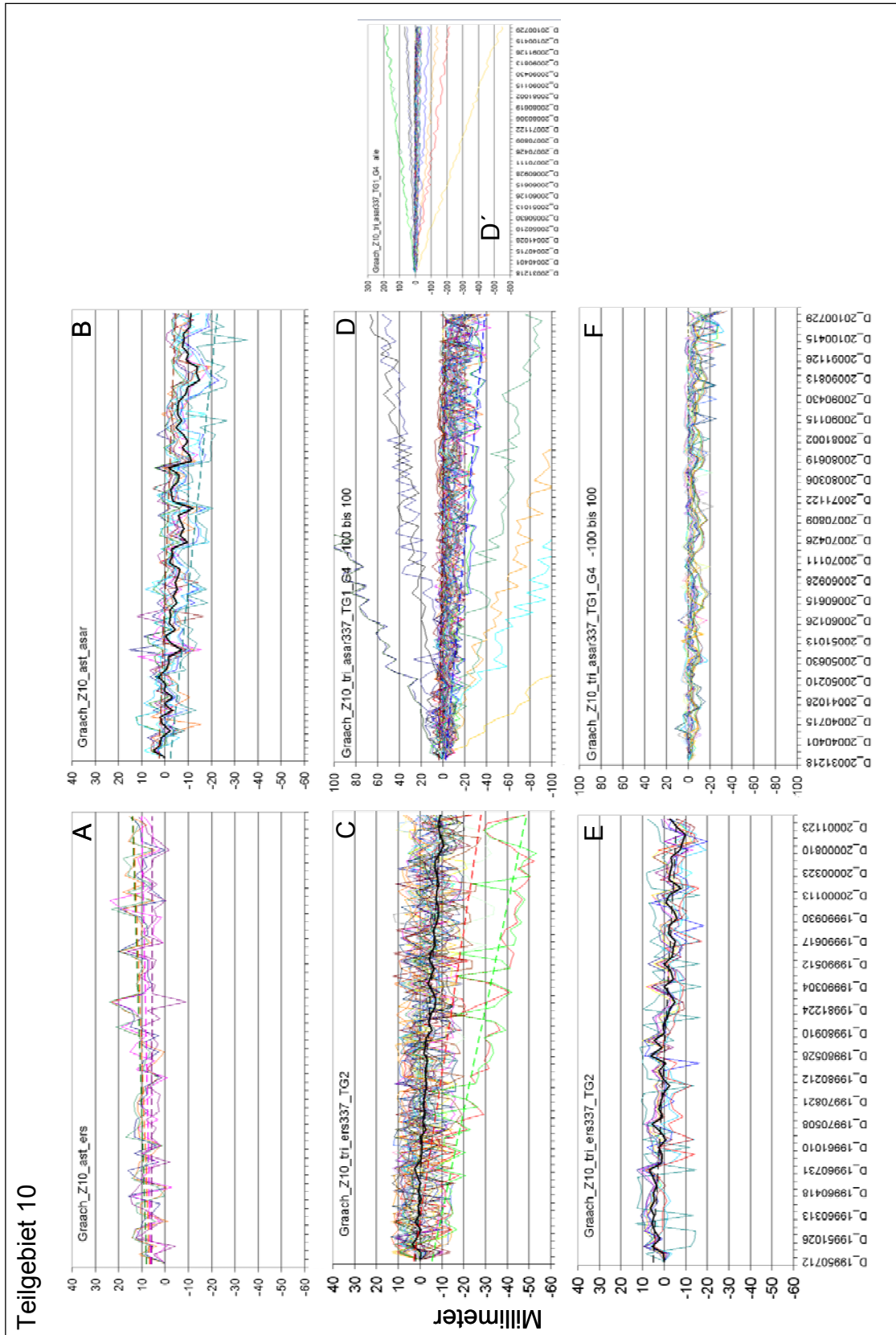
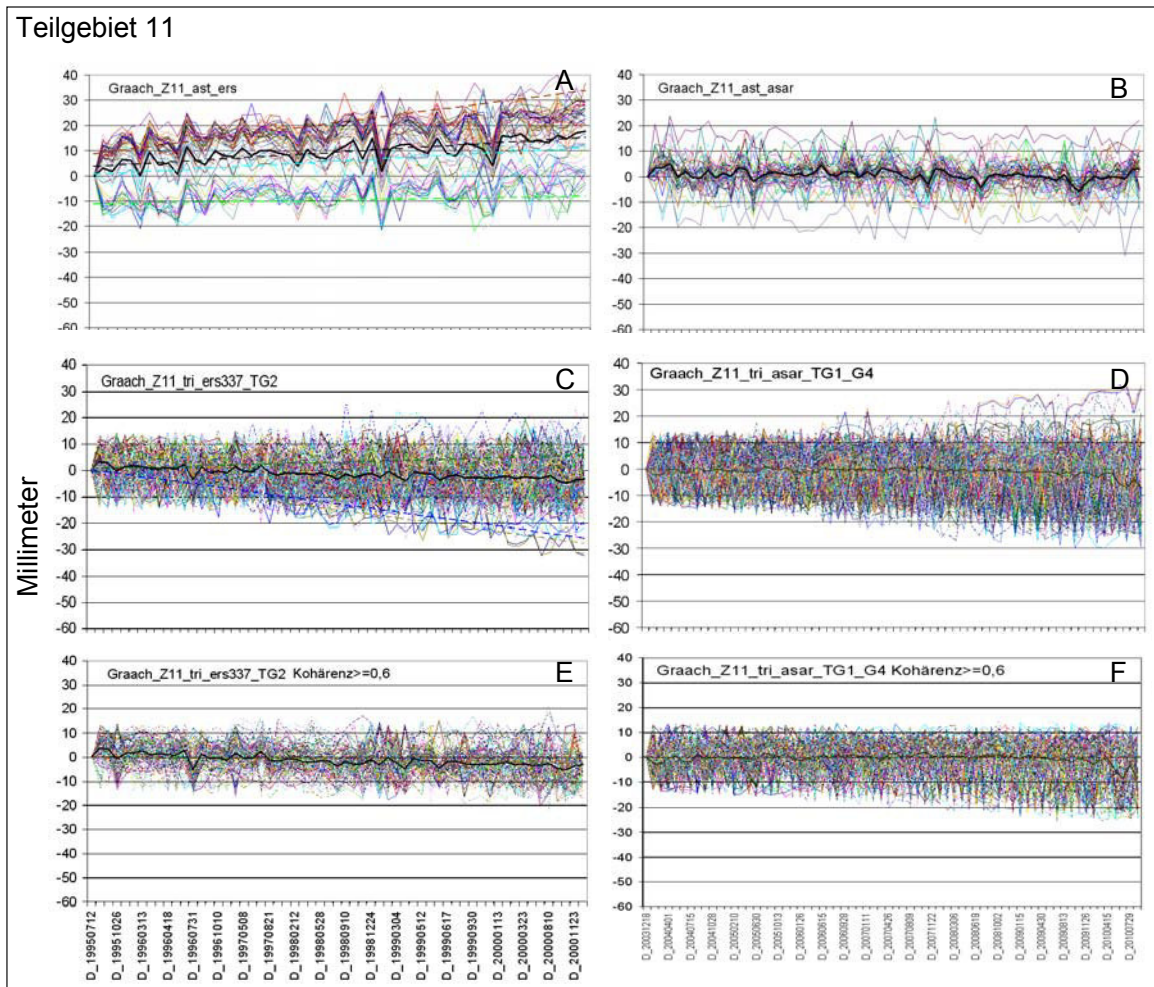


Abbildung 27: Zeitliche Verläufe: PSI Teilbereich 10 in Abb. 17 u. Tab. 3. A-D alle PSI, E-F nur PSI mit Kohärenz  $\geq 0,6$ .



**Abbildung 28:** Zeitliche Verläufe: PSI Teilbereich 11 in Abb. 17 u. Tab. 3. A-D alle PSI, E-F nur PSI mit Kohärenz  $\geq 0,6$ .

Das Gleiche wie für die Gebiete 11, 2+3 gilt auch für Gebiet 9. Die beiden Ausreißer in den TRIGIS-prozessierten Daten mit scheinbarer Absenkung um 10-12 cm liegen knapp oberhalb der Tiefenlinie (Graben) am Rande eines Weinbergs. Hier könnten tatsächlich Hangbewegungen die Ursache sein. Der andere Punkt liegt 70 Meter entfernt zu diesem in einem ebenen Wingert. Die nächstgelegenen PSI zu diesen beiden Punkten liegen 150-190 Meter entfernt an der Mosel.

Innerhalb der Ortslage der Graacher Schäferei sind die detektierten Bewegungen auch gering, mit einer in der Summe schwachen Absenkung. Sowohl in der hang- als auch der talseitigen Ortsrandlage existieren aber auch PSI mit einer Absenkung von 3-4 cm zwischen Dezember 2003 und September 2010.

In der Wurzelregion der Rutschung (Gebiet 6) nordwestlich oberhalb der Graacher



Schäferei wurde nur ein einzelner PSI (TRIGIS-ERS) detektiert, mit 3 cm Absenkung, aber einer geringen Kohärenz von 0,51.

In der Zone mutmaßlich stärkster Bewegung (Gebiet 5), der Verengung zwischen Wurzelregion und Schuttkegel, existieren PSI nur von einem Gebäude in dem wahrscheinlich stabilsten Teil von Gebiet 5 nördlich der K73. In dem am stärksten bewegten hangabwärts folgenden Teil, der deshalb auch von jeder Nutzung ausgenommen ist, wurden keine PSI detektiert (Abb. 17, Anlagen A und B). Einheitlich kommen alle verfügbaren Auswertungen der ERS und ASAR-Daten zu dem Ergebnis, dass Bewegung in den ERS-Daten mehr als doppelt so schnell waren wie in dem durch die ASAR-Daten dokumentierten Zeitraum (Abb. 22).

Auch in dem Schuttkegel (Gebiet 4) der aktiven Rutschung ist die Datenlage spärlich. Es existiert ein Cluster von PSI in Verbindung mit einem Hochspannungsmast nur in den TRIGIS-prozessierten Daten (Abb. 17). Die detektierten Bewegungen erreichen bis zu 6 cm innerhalb beider Beobachtungszeiträume. Die GPS-Vermessungen des LBM eines 70 Meter südlich des Hochspannungsmastes gelegenen Corner Reflektors (CR 14) im Zentrum des Schuttkegels ergaben dort Bewegungen von 54 mm in der Horizontalen und -4 mm in der Vertikalen innerhalb 3 Jahren (11/2011 – 11/2014). Weitere PSI im Schuttkegel mit Absenkungen von durchschnittlich jeweils 2 cm liegen in Ortsrandlage von Graach. Ein Permanent Scatterer im südlichen Randbereich des Schuttkegels (Abb. 17 ) zeigt in den ASAR-Daten eine starke Hebung von 35 cm an (Abb. 21 ). Trotz einer Kohärenz kleiner 0,6 ist das Ergebnis für diesen PSI durchaus plausibel, da in diesem Bereich der Schuttkegel vor dem Gegenhang staut und die Hangkrümmung in Gefällerrichtung konvex ist.

Südlich der Hauptrutschungszone liegt Gebiet 8 unterhalb der Ortschaft Graacher Schäferei, südlich daran an schließt sich Gebiet 10 auf dem Gegenhang. Beide sind durch eine bereits im Mittelhang verflachende Tiefenlinie getrennt (Abb. 16 u. Anlage A).

Unmittelbar unterhalb der Graacher Schäferei hat in 2015 eine großflächige Rutschung stattgefunden, die größere Teile des nordwestlichen Teil von Gebiet 8 betraf. Das Zentrum der Rutschung lag bei CR 06 und nördlich davon. Die GPS-Vermessung von CR 06 ergab in den drei Jahren zuvor, zwischen 2011-2014, eine Horizontalbewegung von 19 mm bei einer Absenkung um 9 mm.

Nur in den TRIGIS-prozessierten Datensätzen sind PSI für das Gebiet 8 detektiert. Die

wenigen PSI aus den ERS-Daten zeigen Bewegungen zwischen 6 und 12 cm zwischen 1995-2000 an. Keine dieser PSI hat jedoch eine Kohärenz  $\geq 0,6$ . Das gleiche gilt für die PSI aus den ASAR-Daten. Stärkere Bewegungen von PSI sind hier als Hebungen mit Beträgen von 5-20 cm ausgeprägt.

Nach Filterung über die Kohärenzschwelle von  $\geq 0,6$  zeigen die PSI im Gebiet 10 keine wesentlichen Bewegungen an. In den ungefilterten Datensätzen sind in den TRIGIS-prozessierten Datensätzen aber rutschungstypisch sowohl starke Hebungen (bis 16 cm) als auch Senkungen (bis 45 cm) sichtbar.

Das Gebiet 1 liegt in den Hängen oberhalb von Graach. Auch hier zeigen die TRIGIS-prozessierten Daten z.T. beträchtliche Absenkbewegungen aber auch Hebungen an (Abb. 18 ). In den Datensätzen mit einer Kohärenz  $\geq 0,6$  verbleiben aber nur PSI mit geringen Bewegungen. Die GPS-Vermessung von drei Corner Reflektoren (CR 04, CR 15, CR 16) ergab für die beiden im Oberhang positionierten Messpunkte (CR15, CR 16) Hebungen von 3-7 mm und eine Absenkung von 8 mm an dem im oberen Unterhang gelegenen CR 04 (Anlage A, B).

Trotz zahlreicher theoretisch möglicher Corner Reflektoren wie Weinbergsmauern, Metallgeländern und Felsnasen konnten im Graacher Rutschgebiet außerhalb der Ortschaften nur wenige PSI detektiert werden. Ursache dafür ist möglicherweise die ungünstige Ausrichtung eines Teils der Weinbergsmauern parallel zur Line of Sight.

Eine weitere Ursache für die geringe Ausbeute an PSI ist mit einiger Wahrscheinlichkeit die rutschungstypisch un stetig Bewegung mit negativem Einfluß auf die Kohärenz, aber nicht zuletzt das häufige mechanische Versagen von Geländeelementen oder Bauteilen in der Landschaft, das zur Zerstörung von potentiellen PSI führt (jüngstes Beispiel CR 06). Eine kürzeres und gleitendes Zeitfenster mit unterschiedlichen Masterszenen zur PSI-Extraktion und Analyse könnte möglicherweise zu einer Erhöhung der Anzahl an PSI-Punkten führen, vergleichbar der aus TerraSAR-X Auswertungen für den Graacher Rutschhang durch die Firma Astrium Services (mündl. Mitteilung Hr. Wehinger, LGB RLP).

Mit der derzeitigen Auswertemethode der ERS- und ASAR-Daten ist keine ausreichende Datengrundlage für die flächendeckende Bewertung von Rutschhängen für die behördliche Risikobewertung zu erreichen.

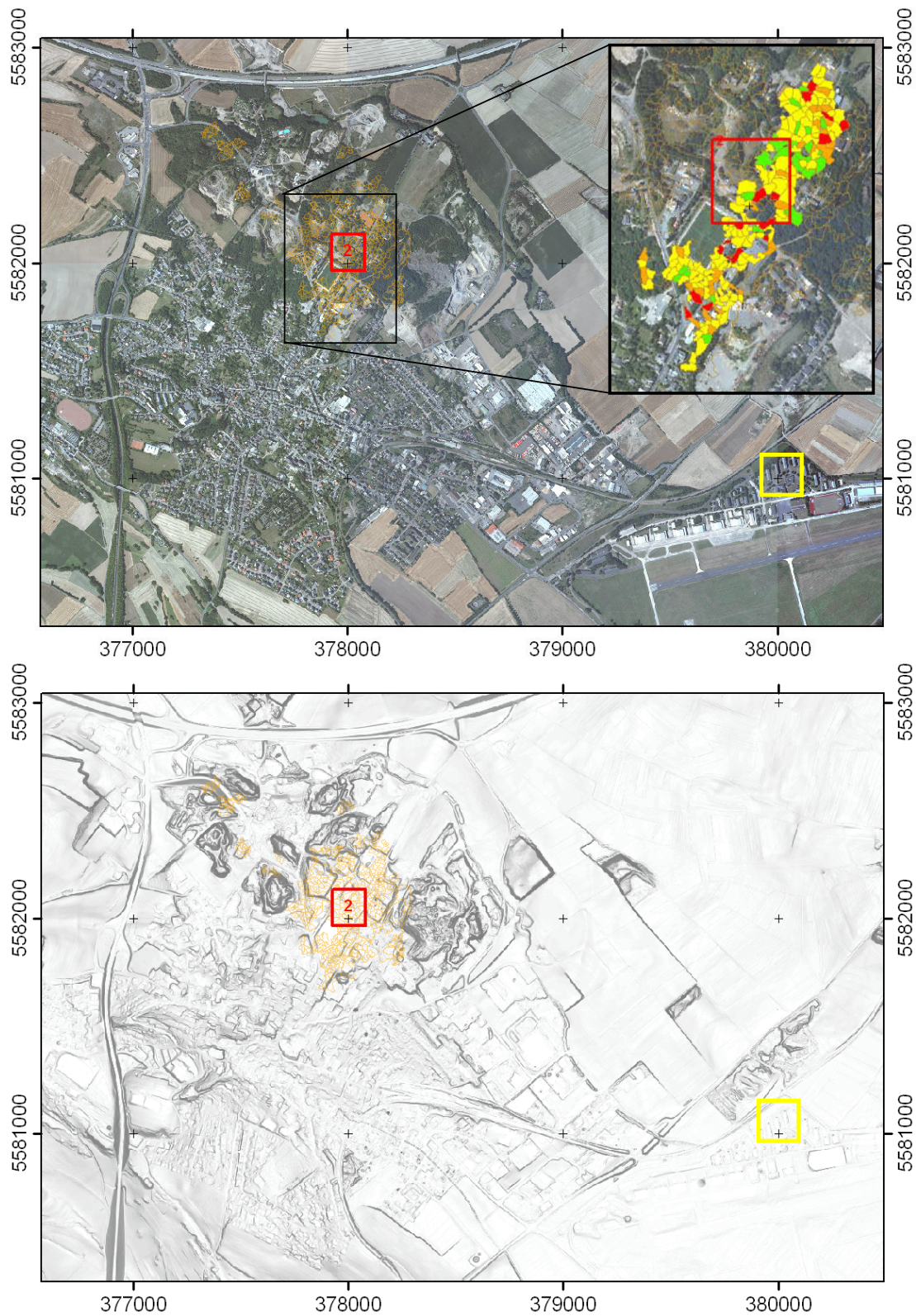
## 6. Bodenbewegungen – Altbergbau (Beispiel Mendig/Eifel)

Seit dem 16. Jahrhundert und bis in die 1960er Jahre wurde in Mendig untertägiger Basaltabbau betrieben (LGB RLP). Weitbekannt sind die daraus produzierten Mendiger Mühlsteine. Eine Nachnutzung der Hohlräume erfolgte u.a. zur Lagerung von Bier, das von Brauereien in der Brauergasse gebraut wurde.

Die Lage und genaue Abgrenzung des untertägigen Abbaugbietes ist weitgehend unbekannt. Zwar wurden zwischen 1989 - 1995 bereits 90.000 Quadratmeter untertägiger Hohlräume durch das Landesamt für Geologie und Bergbau kartiert, die Gesamtabbaufäche wird aber auf rund 500.000 Quadratmeter geschätzt. Von etwa der Hälfte der dabei entstandenen Hohlräume wird vermutet, dass sie verfüllt, oder zumindest nicht mehr zugänglich sind. Seit 2010 erfolgte eine Laservermessung bekannter Hohlräume in einem 750 m langen Feld beiderseits der Brauerstraße und deren Risikobewertung hinsichtlich Standsicherheit. In Abbildung 29 ist das Ergebnis dieser Kartierung dargestellt. Vom LGB RLP wurden daraufhin für einige unterhalb der Brauerstrasse liegende Hohlräume Sanierungsmassnahmen empfohlen und veranlasst. Das bekannteste Schadensereignis war ein Tagesbruch am 2.3.1988, in dem die Eckfahne des Sportplatzes inklusive einiger Quadratmeter des Spielfeldes, der angrenzenden Zuschauertribüne und ein Teil der Böschung oberhalb der Tribüne verschwanden.

In Abbildung 29 sind auch die z.T. noch produzierenden Basalttagebaue nördlich Mendig zu erkennen.

Südöstlich Mendig liegt der Flugplatz Mendig. Kasernengebäude nördlich des Flugfeldes (gelbes Rechteck in Abb. 29) stellen den Referenzpunkt für die Bewegungsanalyse der Astrium-prozessierten Daten dar [1]. Die Abbildungen 30 und 31 zeigen jeweils die originären (Abb. 30) und Nivellement-angepassten (Abb. 31) Bewegungsraten der PSI-Punkte für einige dieser Kasernengebäude, um eine Vergleichbarkeit zwischen den Daten für den Raum Mendig/Mayen herzustellen. Gemäß der Lagetreue der PSI erscheint die Topografie-Korrektur in den Astrium-prozessierten Daten besser. Mit Ausnahme der PSI aus den TRIGIS-produzierten ERS-Daten (Abb. 30, Mitte links) liefern die andern Datensätze vergleichbare Bewegungsgeschwindigkeiten, zumindest innerhalb der für die Darstellung gewählten



**Abbildung 29** Luftbild und Hangneigungskarte von Mendig mit Basalttagebauen im Norden und Risszeichnung (braune Polygone) bekannter Hohlräume. Risikoabschätzung bezüglich Standfestigkeit der Hohlräume entlang der Brauergasse von gering (grün) bis hoch (rot) (Quelle: LGB RLP). Luftbild und Laserhöhenmodell zur Berechnung der Hangneigungen (LVERMGEO RLP)

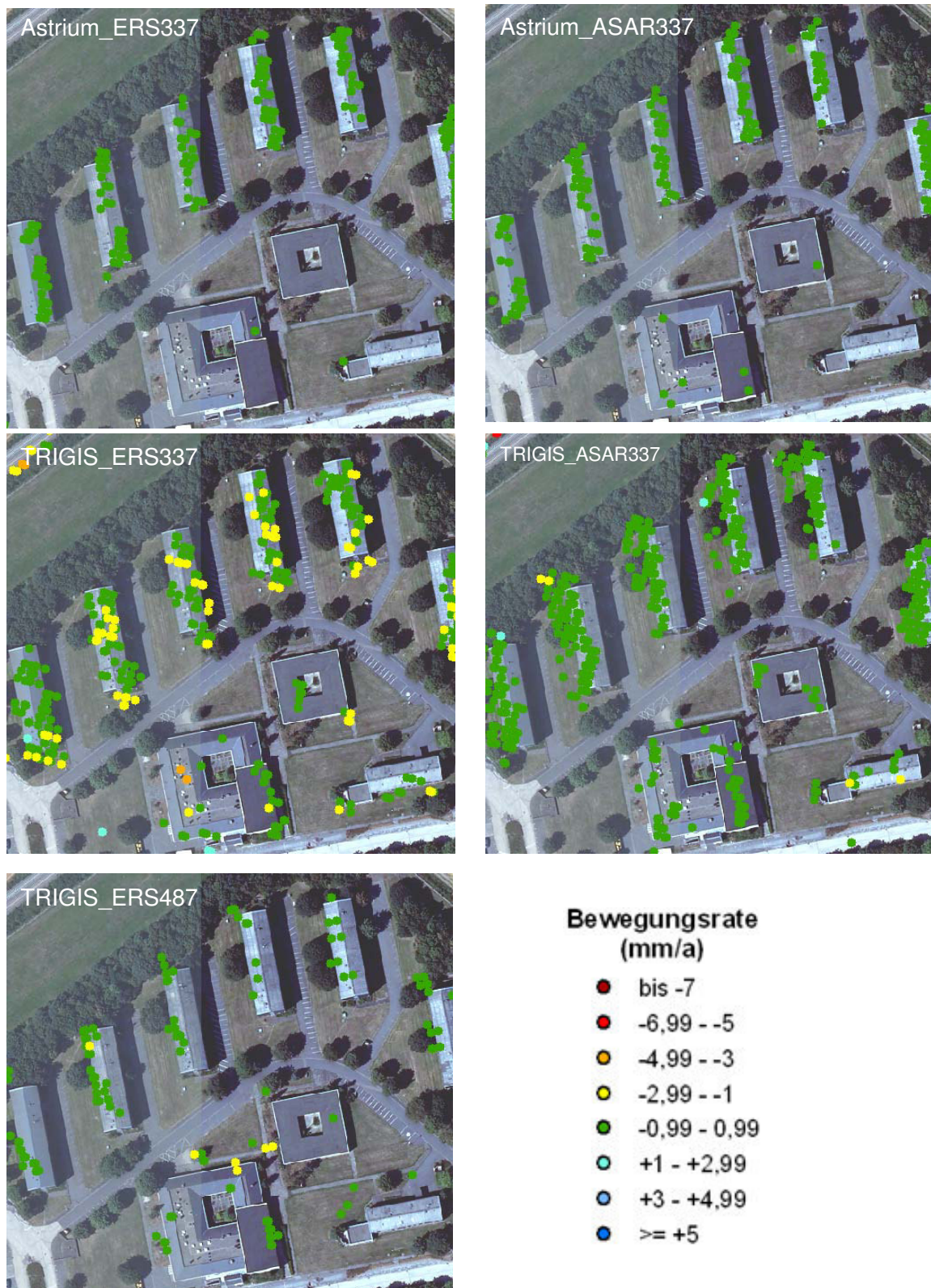
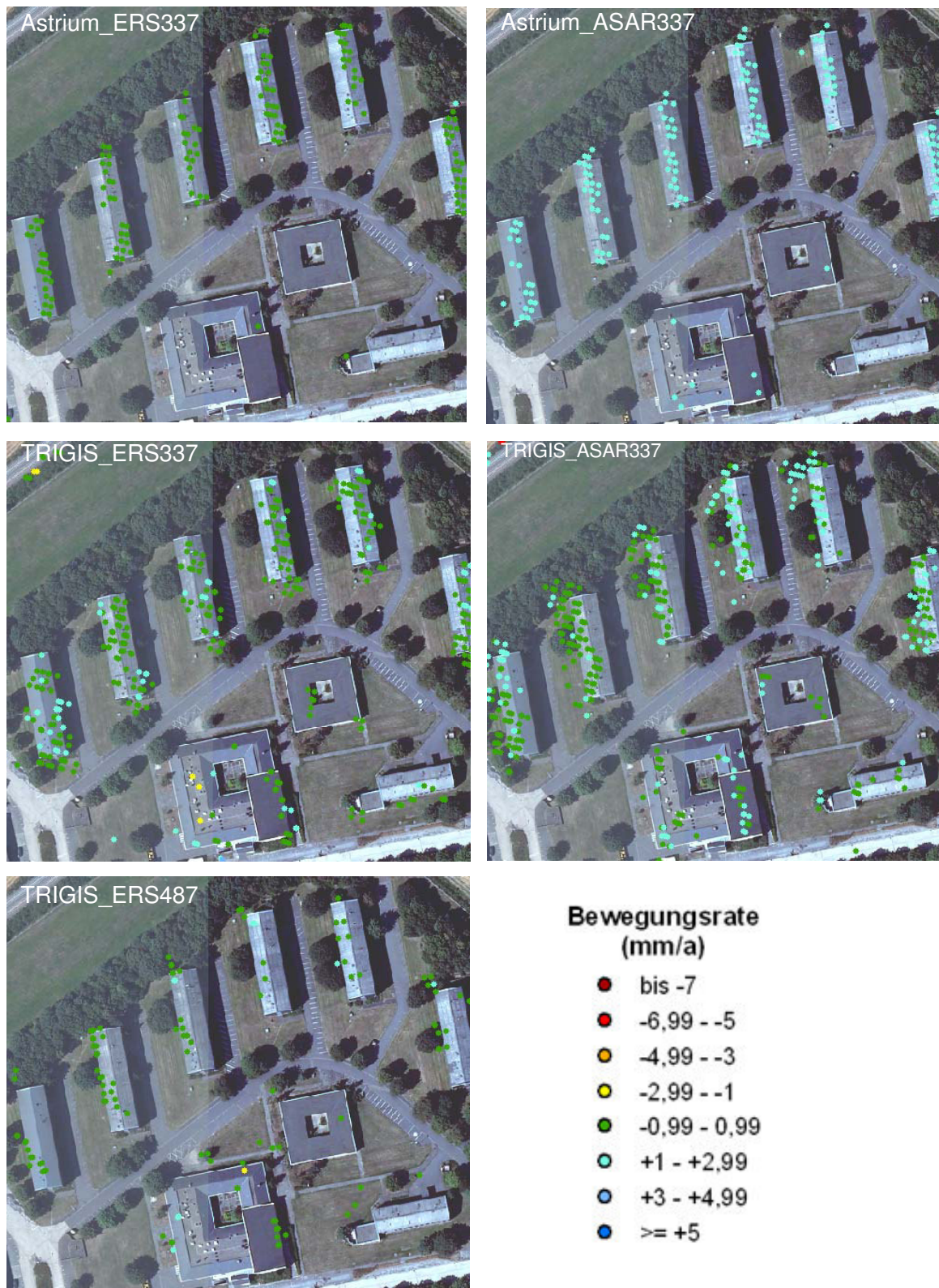


Abbildung 30 PSI-Bewegungsraten am Referenzpunkt der von Astrium prozessierten Daten.



**Abbildung 31** PSI-Bewegungsraten am Referenzpunkt der von Astrium prozessierten Daten nach Nivellemtanpassung der Bewegungsraten.

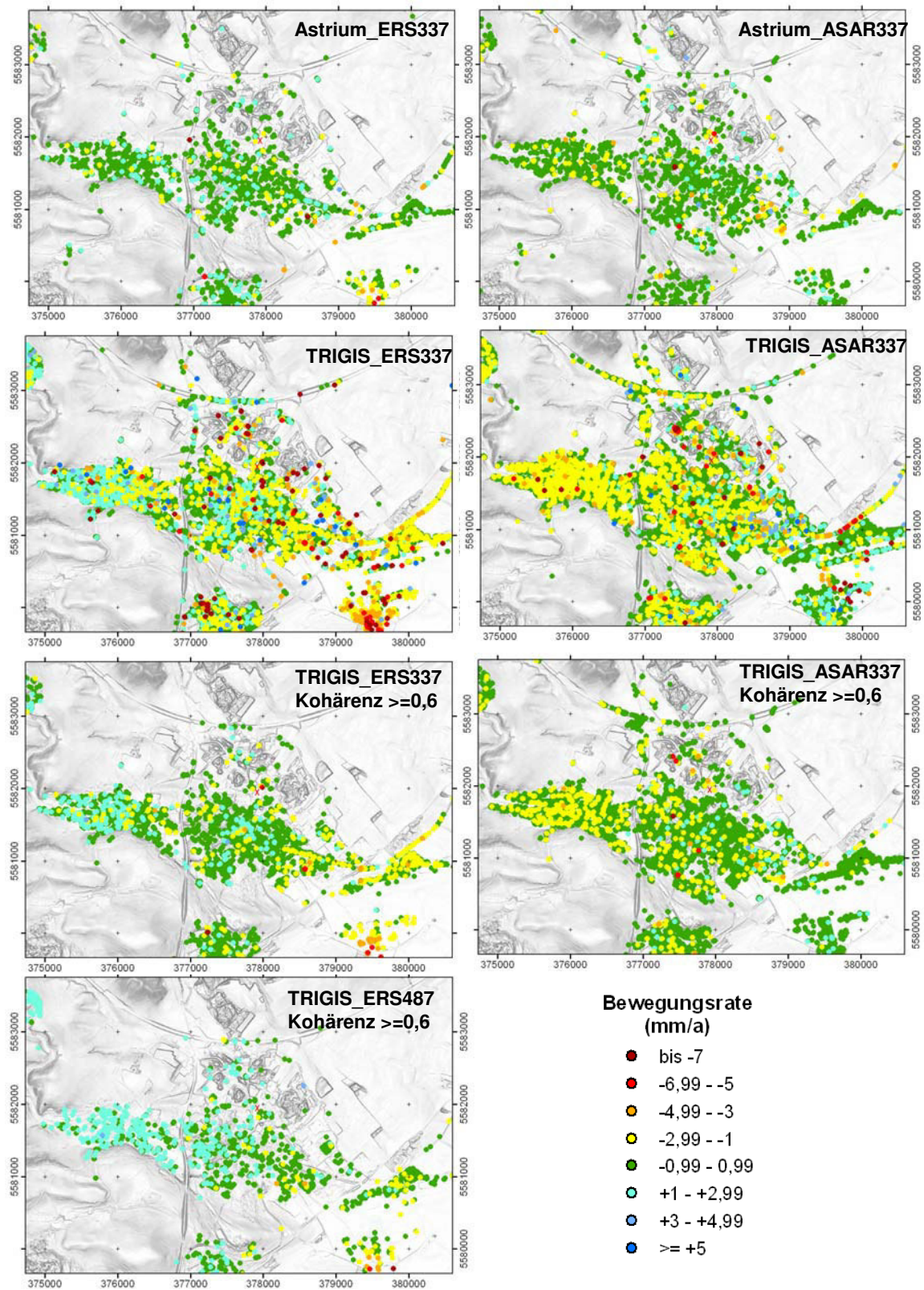


Abbildung 32 PSI-Bewegungsraten im Stadtgebiet von Mendig

Klasseneinteilung. In Abbildung 31 sind auf die gleiche Art und Weise die Nivellement-angepassten Geschwindigkeiten dargestellt, die bereits von der regionalen Hebungstendenz überprägt sind (vgl. Tab. 2).

Der bekannte untertägige Bergbau und auch die subrezenten und rezenten Tagebaubetriebe liegen allesamt im nördlichsten Randbereich bzw. nördlich außerhalb des Stadtgebietes.

In der Übersichtsdarstellung der PSI für Mayen (Abb. 32) ist dieser Bereich erst einmal unauffälliger als andere Kartenbereich.

In den TRIGIS-prozessierten ERS-Daten auffällig ist ein Bereich scheinbarer Hebung in den westlichsten Stadtteilen. Die Astrium-prozessierten ERS-Daten zeigen diesen Ost-West-Trend nicht. In der nachfolgenden Zeitscheibe der Beobachtung durch ASAR scheint sich dieser Trend zu verkehren und die östlichen Stadtteile erscheinen eher als Senkungsgebiet.

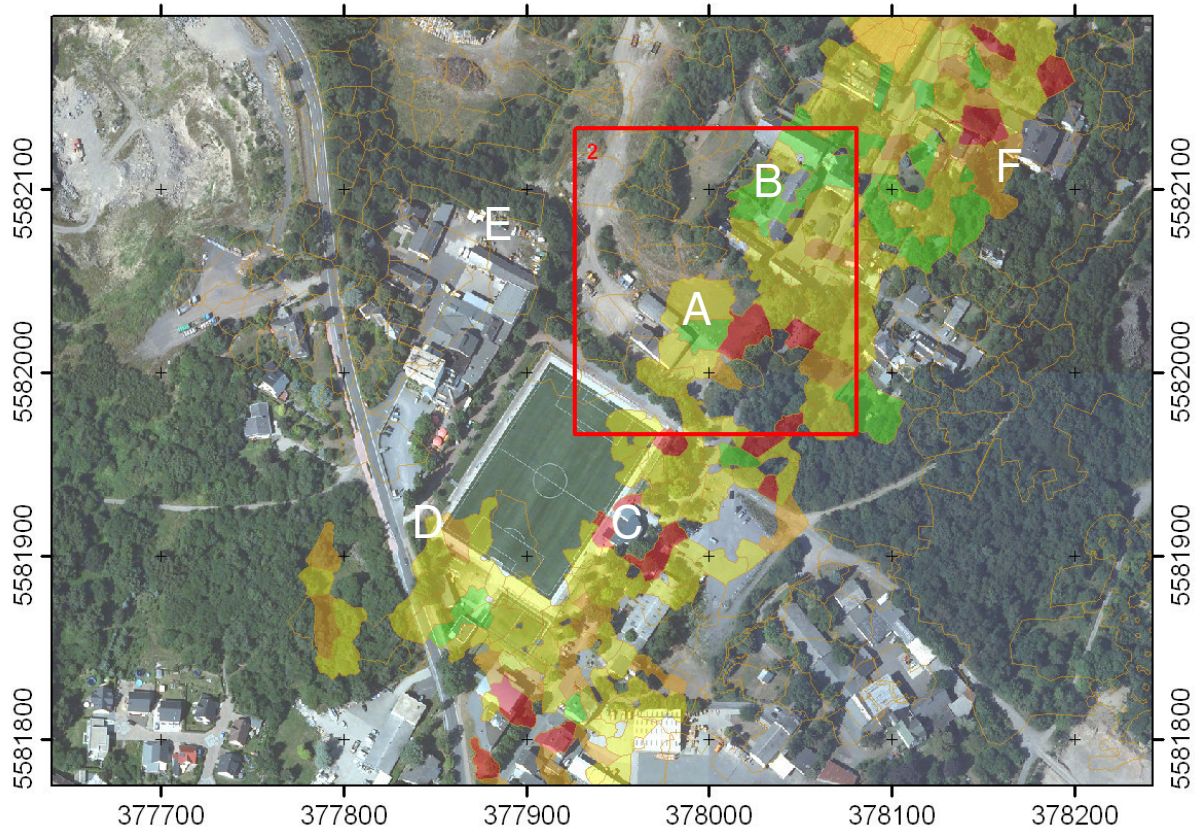
Auffällig in der älteren Zeitscheibe (ERS) ist auch ein Senkungsbereich südlich des Flugplatzes. Im Zentrum und Maximum des Absenkungsbereiches liegen die Reginaris-Kohlensäurebrunnen (Kohlensäureproduktion). Im angrenzenden nördlichen Bereich der Anomalie ist eine Verpackungsfirma (Kartonagen, Papier) ansässig. Nach 2003 ist in der Fläche keine vergleichbare weitere Absenkung erkennbar.

Eine Anomalie mit vergleichbarer Ausdehnung fehlt in den unterhöhlten Bereichen im Norden und nördlich der Stadt. Im Bereich der Tagebaue befinden sich PSI mit stärkerer Absenkung, die aber Kohärenzen  $<0,6$  besitzen (Abb 32 und Abb. 37).

Im Bereich der Brauergasse wird wegen der dort existierenden Bebauung ein vordringlicher Bedarf der Bodenbewegungsbeobachtung durch das LGB RLP gesehen. Die bereits aus Abbildung 29 bekannte Risikokarte des LGB RLP ist in Abbildung 33 dem Luftbild überlagert. In der Südwestecke des Sportfeldes („D“ in Abb. 33ff) war 1988 der Tagesbruch aufgetreten. Besonderes Interesse seitens des LGB RLP besteht an dem rot umrahmten Bereich in den nachfolgenden Abbildungen. In dem Gebäude „B“ (in Abb. 33ff) ist der Einstieg in das Besucherbergwerk. In diesem Bereich wird den gesicherten Hohlräumen ein geringes Risiko (grün) zugesprochen. Südlich („A“, „C“) und östlich („F“) des Besucherbergwerkes existieren aber auch Hohlräume, die als bedenklich klassifiziert sind (gelb, orange, rot).

In den von Astrium prozessierten Daten sind nur wenige PSI für diesen Bereich verfügbar. Im Bereich des Bergwerkzugangs mit gering eingeschätztem Risiko wurde

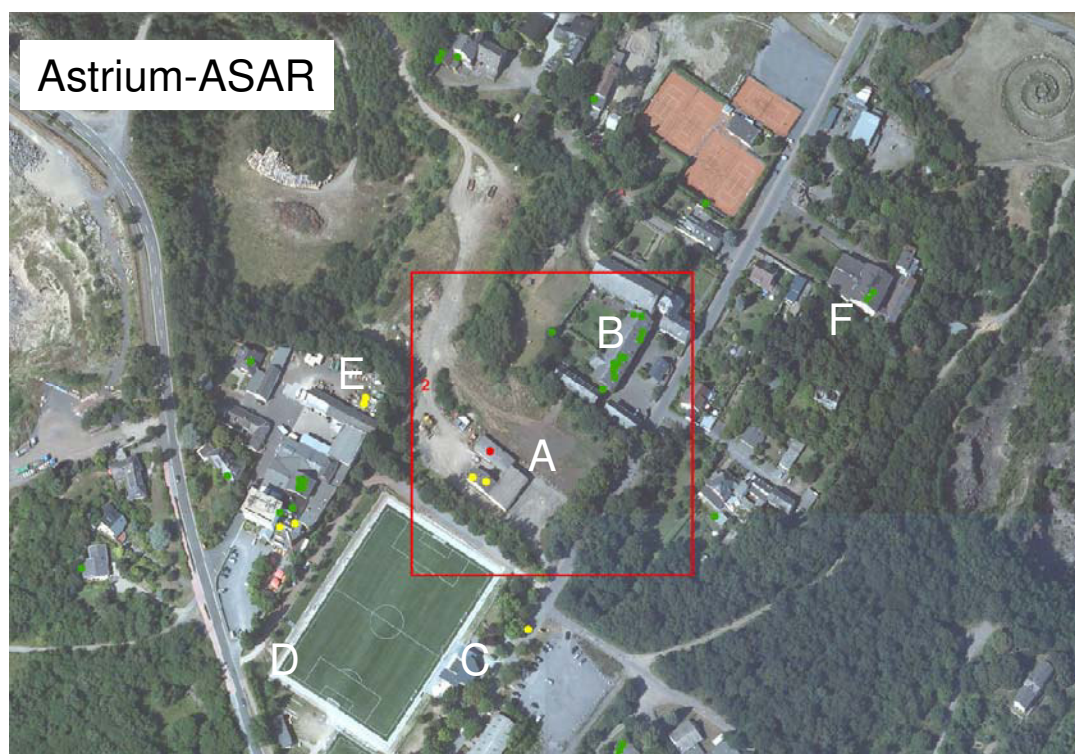
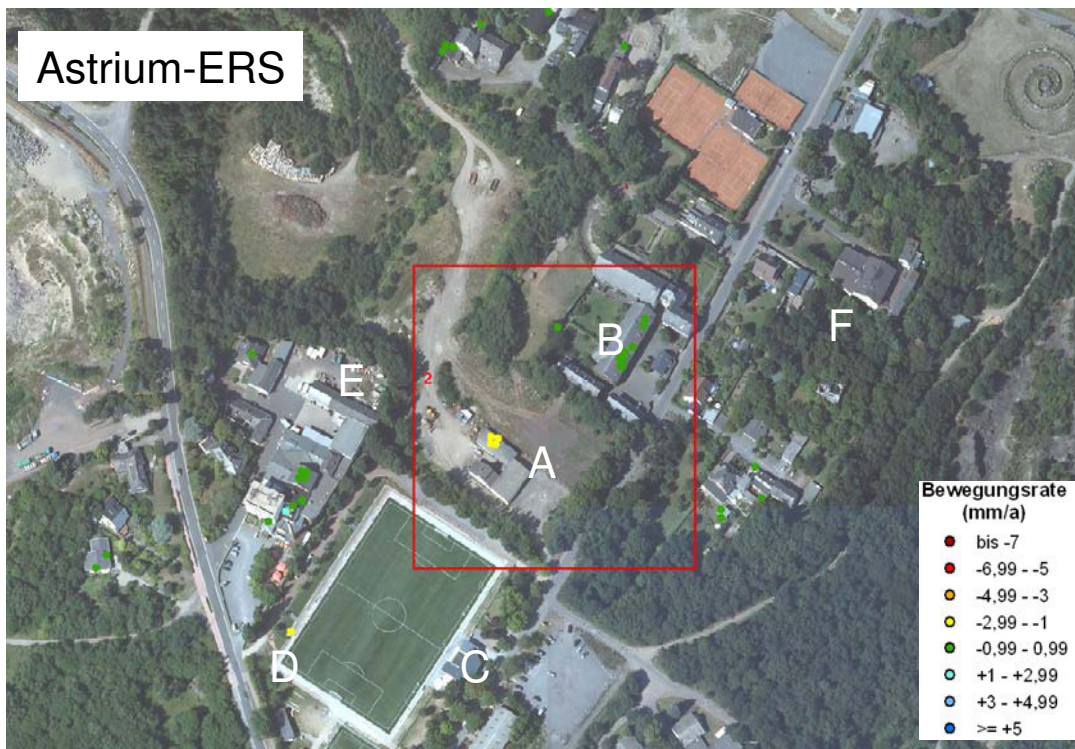




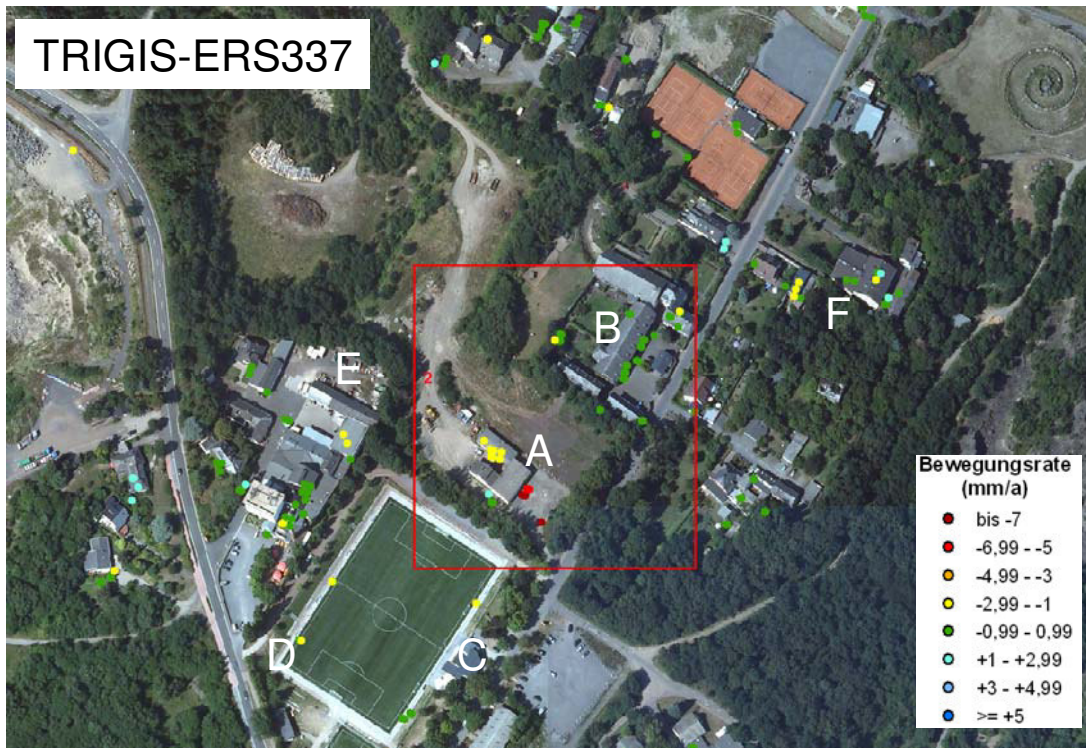
**Abbildung 33** Risikoabschätzung bezüglich Standfestigkeit der Hohlräume im südlichen Bereich der Brauergasse. Geringes Risiko (grün) bis hohes Risiko (rot) (Quelle: LGB RLP). Luftbild LVERMGEO.

durch die PSI keine nennenswerte Bewegungen festgestellt. Bewegungsraten zwischen -1 mm/a bis -3 mm/a werden in den Astrium-ERS-Daten im Bereich des Gebäudes nördlich des Sportfeldes („B“) detektiert. In den ASAR-Daten ist ein PSI-Punkt sogar der Bewegungsklasse -5 mm/a bis -7 mm/a zugeordnet. Es sei hier erinnert, dass für die von Astrium prozessierten PSI keine Werte zur Kohärenz vorliegen. Da aber über das gesamte Prozessierungsgebiet durchgängig eine geringere oder lokal ähnliche Datendichte im Vergleich zu den TRIGIS-Daten mit einer Kohärenz  $\geq 0,6$  existiert, kann diese als Minimalanforderung auch für die Astrium-PSI angenommen werden. Innerhalb der ERS-Zeitscheibe kann aber auch der um 3 Jahre längere Betrachtungszeitraum für eine Reduktion der über diesen längeren Zeitraum stabilen PSI eine Ursache sein.

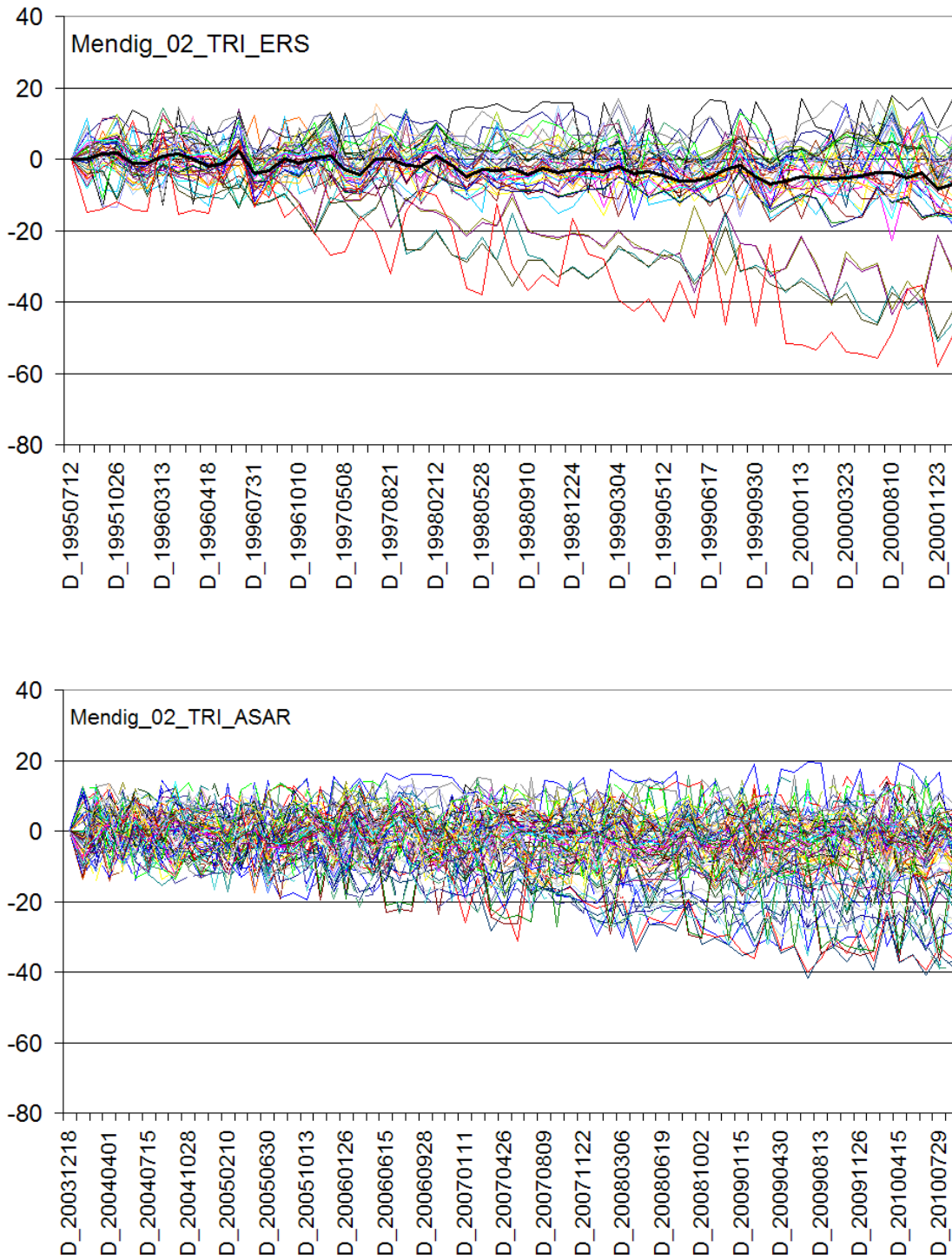
Die TRIGIS-PSI klassifizieren die Gebäude am Einstieg zum Besucherzentrum („B“) ebenfalls als ohne Bewegung (Abb. 35). Die zeitlichen Verläufe der PSI-Punktbewegungen sind für alle PSI innerhalb des rot umrandeten Rahmens in Abbildung 36 dargestellt. Das kleinere Gebäude („B“) nördlich des Fußballplatzes und



**Abbildung 34** PSI-Bewegungsdaten (Astrium ERS337/ASAR337) im südlichen Bereich der Brauergasse. Luftbild – LVERMGEO RLP.



**Abbildung 35** PSI-Bewegungsdaten (TRIGIS ERS337/ASAR337) im südlichen Bereich der Brauergasse. Luftbild – LVERMGEO RLP.



**Abbildung 36** Zeiliche Verläufe der PSI-Bewegung (TRIGIS ERS337/ASAR337) im südlichen Bereich der Brauergasse.

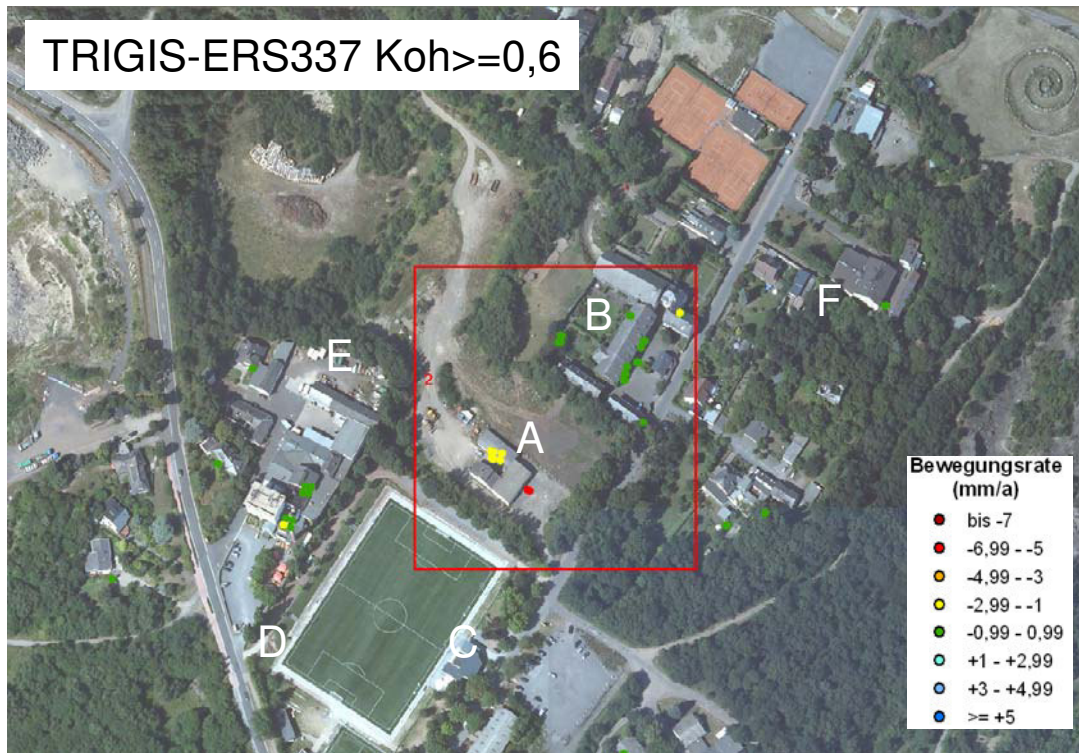


Abbildung 37 PSI-Bewegungsraten (TRIGIS ERS337/ASAR337, Kohärenz $\geq$ 0,6) im südlichen Bereich der Brauergasse. Luftbild – LVERMGEO RLP.

der Bereich östlich davon, mit einem erhöhtem Standsicherheitsrisiko im Untergrund, zeigt aber in beiden Zeitscheiben (ERS, ASAR) jeweils mehrere PSI mit -1 mm/a bis mehr als -7 mm/a Absenkung in den ERS-Daten und ebenfalls negative Bewegungen bis -7 mm/a in den ASAR-Daten.

Weitere Punkte mit Absenkung (-3 mm/a bis -5 mm/a) finden sich nördlich der Brauerei („E“) über Hohlräumen noch nicht klassifizierten Risikos. PSI mit geringer Absenkung (-1 mm/a - -3 mm/a) befinden sich am zentralen östlichen Spielfeldrand („C“) über Hohlräumen hohen Risikos. In den ERS-Daten erscheint zusätzlich ein kleines Cluster von PSI mit schwachen negativen Bewegungen in einem Bereich hohen Hohlraumrisikos im nordöstlichen Bereich der Karte („F“).

Die oben beschriebenen Bewegungen sind durchaus plausibel, obwohl in den Karten der PSI-Punkte mit einem Kohärenzwert von mindestens 0,6 einige dieser plausiblen PSI verschwinden und auf diesem Kohärenzniveau lediglich PSI im Bereich des Besucherbergwerkeinstiegs („B“), nördlich der Brauerei („E“) und nördlich des Fußballtores („A“) verbleiben.

Es ist deshalb eine grundsätzliche Frage zur Interpretation von PSI in überbautem Gelände über Hohlräumen zu stellen. Die Steifigkeit von Gebäuden, vor allem von großen Gebäuden oder Elemente auf Flächenversiegelungen mit Tragschichten (z.B. Netze zur Sicherung über überbauten Hohlräumen), können in der Fläche durchaus PSI erzeugen, die keine Bewegung anzeigen. Vereinzelt PSI mit Bewegung innerhalb von benachbarten bewegungslosen PSI können u.U. den entscheidenden Hinweis auf ein mechanisches Versagen von Gebäudeteilen liefern, obwohl vielleicht bereits Teile der Überbauung einen Verbruch überbrücken und nur auf Grund der Eigensteifigkeit noch keine Senkung in den PSI erkennbar ist. Auch ist im Falle eines oder wiederholten mechanischen Versagens an Gebäudeteilen oder im Untergrund eher nicht mit einer stetigen Bewegungsrate, sondern abrupten Änderungen zu rechnen und entsprechend negativen Auswertung auf die Kohärenzwerte solcher PSI. Auch Hebung und Senkung innerhalb des gleichen Gebäudes kann ein Hinweis auf Torsionsbewegungen über unterschiedlich setzungsanfälligem Baugrund oder einseitiger Unterhöhlung sein.

Zumindest bei der Interpretation von PSI aus Daten von ERS und ASAR, deren Einzelszenen mit großem zeitlichen Abstand von etwa einem Monat zueinander

aufgenommenen Daten wurden, sollte dies berücksichtigt und auch einzelnen Werten Bedeutung zugemessen werden, bis deren Fehlerhaftigkeit belegt ist.

## 7. Bodenbewegungen - Bergbau (Beispiel Mayen)

Im Norden der Stadt Mayen wird seit mehr als 7000 Jahren in zwei 10-30 Meter mächtigen Lavaströmen Basalt abgebaut (Abb. 38). Seit etwa 1400 erfolgte die Gewinnung unter den bis 10 Meter mächtigen Deckschichten auch bergmännisch untertage. Ein Teil dieser Grubenhohlräume wurde später durch Basalttagebaue ausgeräumt. Der großflächige Basaltbergbau in Mayen endete in den 1970er Jahren mangels Wirtschaftlichkeit. Heute existiert noch ein Abbau der Firma Mayko im östlichen „Mayener Lavastrom“.

Südöstlich von Mayen wird seit mindestens der Römerzeit Schiefer abgebaut. Die Schachtförderung wurde im Jahr 1870 eingeführt. Die drei Tiefbaubetriebe Katzenberg, Reiff und Glückauf wurden auf der 4. Sohle zu einem Bergwerk zusammengeschlossen [16].

Der heutige Hauptförderschacht wurde 1959 in Betrieb genommen, durchteuft die Halde und reicht bis in 220 Meter Teufe. Der heute zur Bewetterung dienende Glückauf-Tagesschacht reicht bis zur 5. Sohle. Die derzeit tiefste Abbausohle liegt in einer Teufe von 300 Metern. Der Schiefer wird in vier Lagern abgebaut. Das Bergwerk der Firma Rathscheck ist heute nach Fördermengen das größte Schieferbergwerk Europas.

Die beiden Abbildungen 39 und 40 zeigen die PSI-Bewegungsraten für das weitere Stadtgebiet von Mayen inklusive der umgebenden Bergbaulandschaften zum einen im von den prozessierenden Firmen ausgelieferten Zustand (Abb. 39) zum anderen nach der Nivellementanpassung (Abb. 40). Im übrigen verläuft die im Beispiel Wehrer Kessel (vgl. Kap. 4) betrachtete Nivellementlinie 204 von Süden nach Norden durch das zentrale Stadtgebiet.

In den nicht nivellementangepaßten Daten (Abb. 39) erscheint Mayen in den ASAR-Daten wie der überwiegende Teil der Eifel als Senkungsgebiet (vgl. Abb. 8).

Nach Nivellement-Anpassung (Abb. RR) spiegeln die PSI-Bewegungen die regional im überregionalen Nivellementnetz beobachtete Hebung der südlichen Eifel wider. An der Lage der Anomalien ändert sich dadurch nichts, aber aufgrund der veränderten Farbgebung durch die Klasseneinteilung treten diese Anomalien stärker hervor.

Im nördlichen Stadtgebiet sind vor allem in den ASAR-Daten vier Bereiche vermehrter Senkung zu erkennen. Die Anomalie-Cluster „A“ und „B“ (vgl. Abb. 40 und 41) liegen innerhalb Steinbrüchen, Anomalie „C“ betrifft die Fläche eines Gewerbegebietes zwischen aufgelassenen Tagebauen gelegen und die PSI der Anomalie „D“ liegen auf einer jung



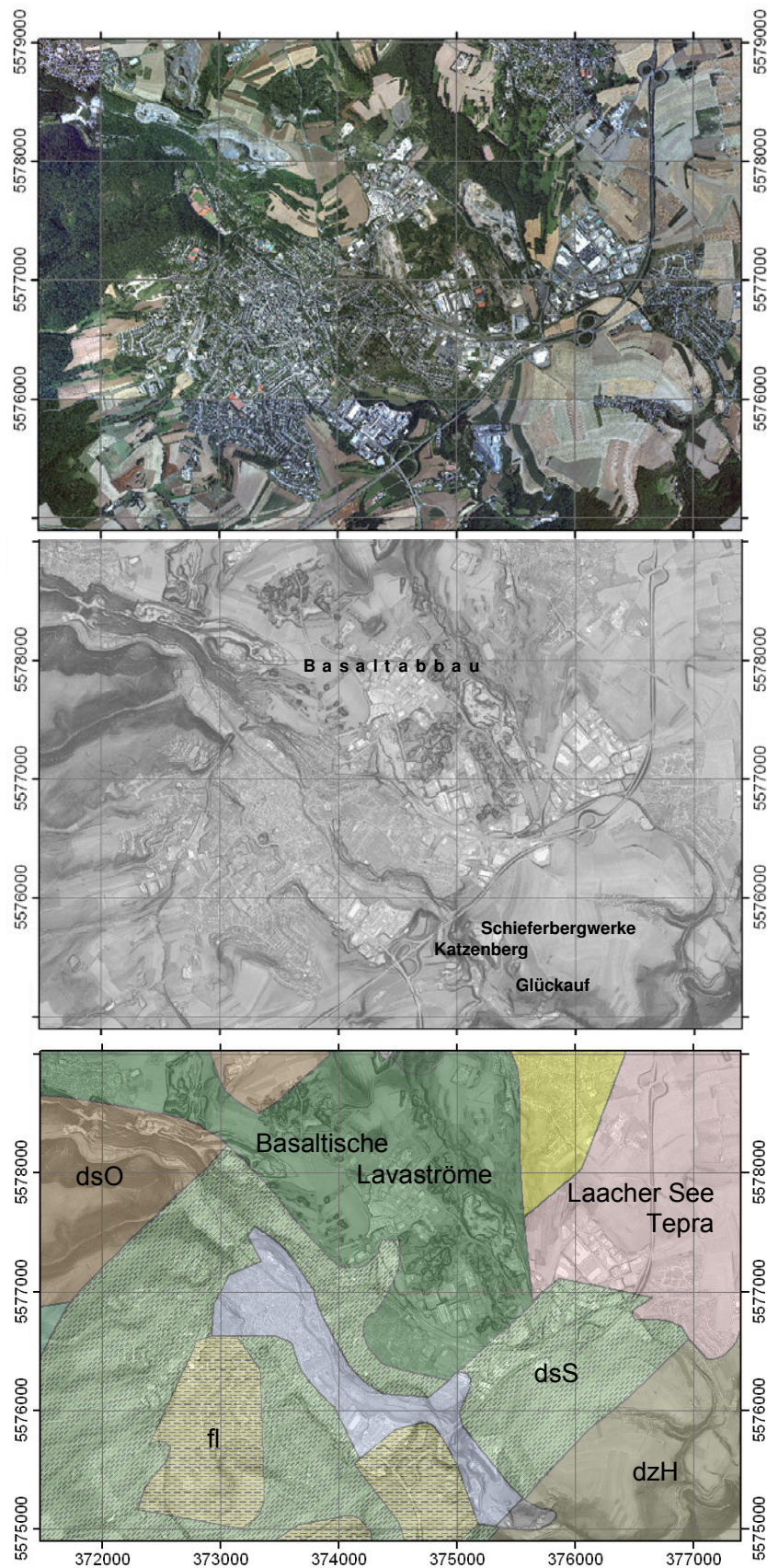


Abbildung 38 Luftbild [11], Reliefdarstellung (Mitte) mit Ausschnitt aus der Geologischen Übersichtskarte 1:300,000 von RLP [17].

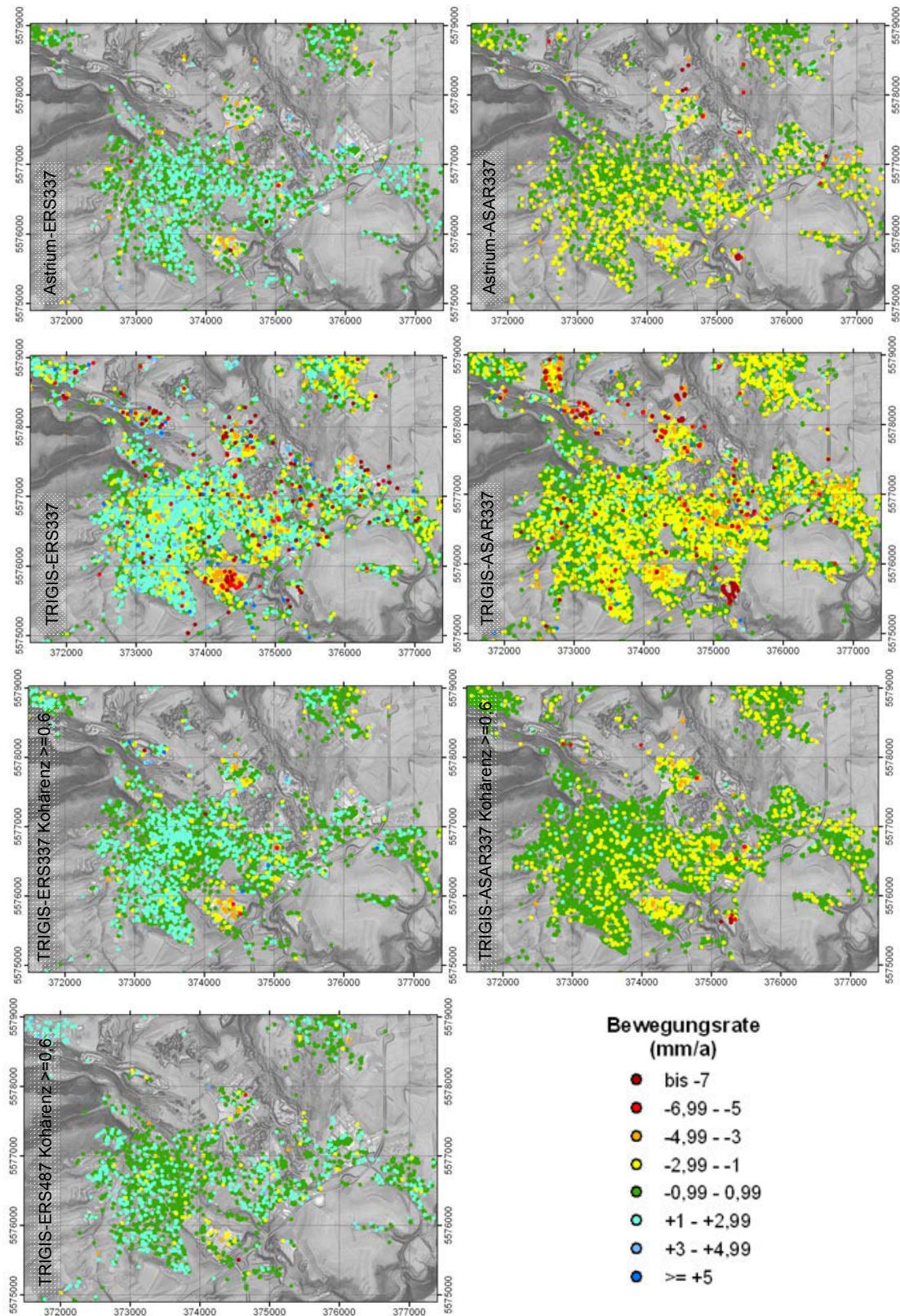


Abbildung 39 PSI-Bewegungsraten im Stadtgebiet von Mayen.

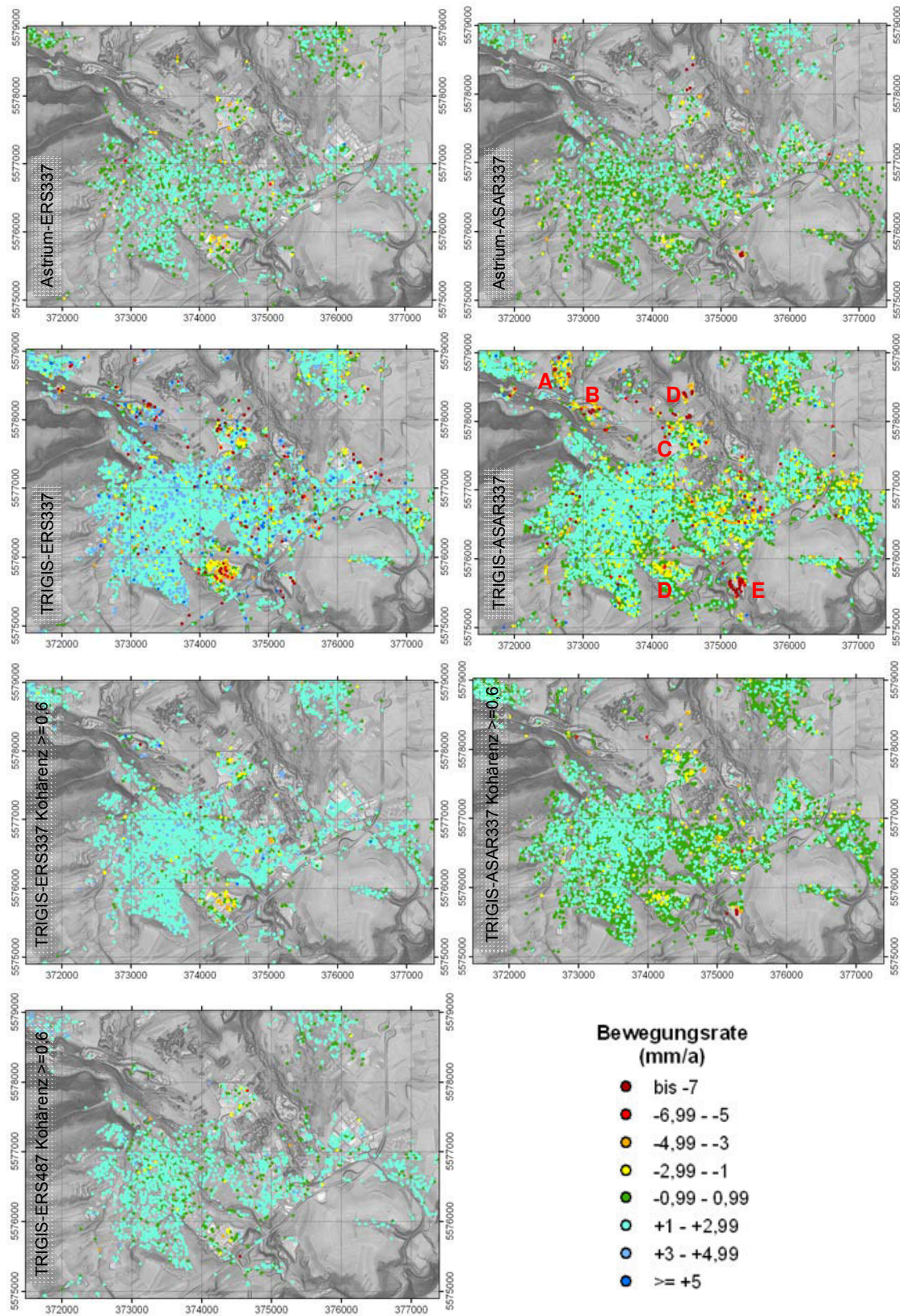


Abbildung 40 PSI-Bewegungsraten im Stadtgebiet von Mayen nach Nivellementanpassung.

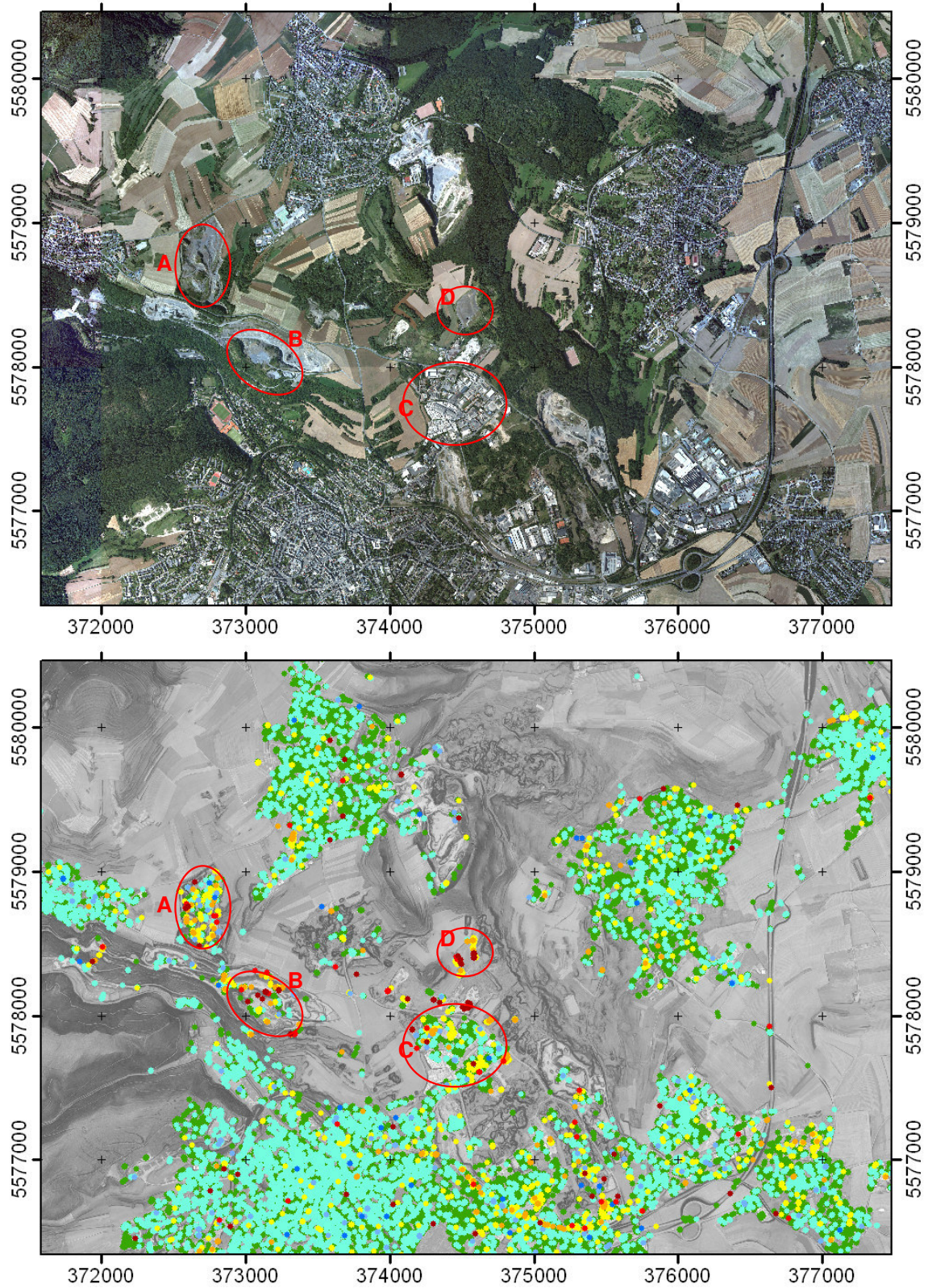


Abbildung 41 PSI-Bewegungsraten im nördlichen Stadtgebiet von Mayen mit Anomalie-Clustern A-D.

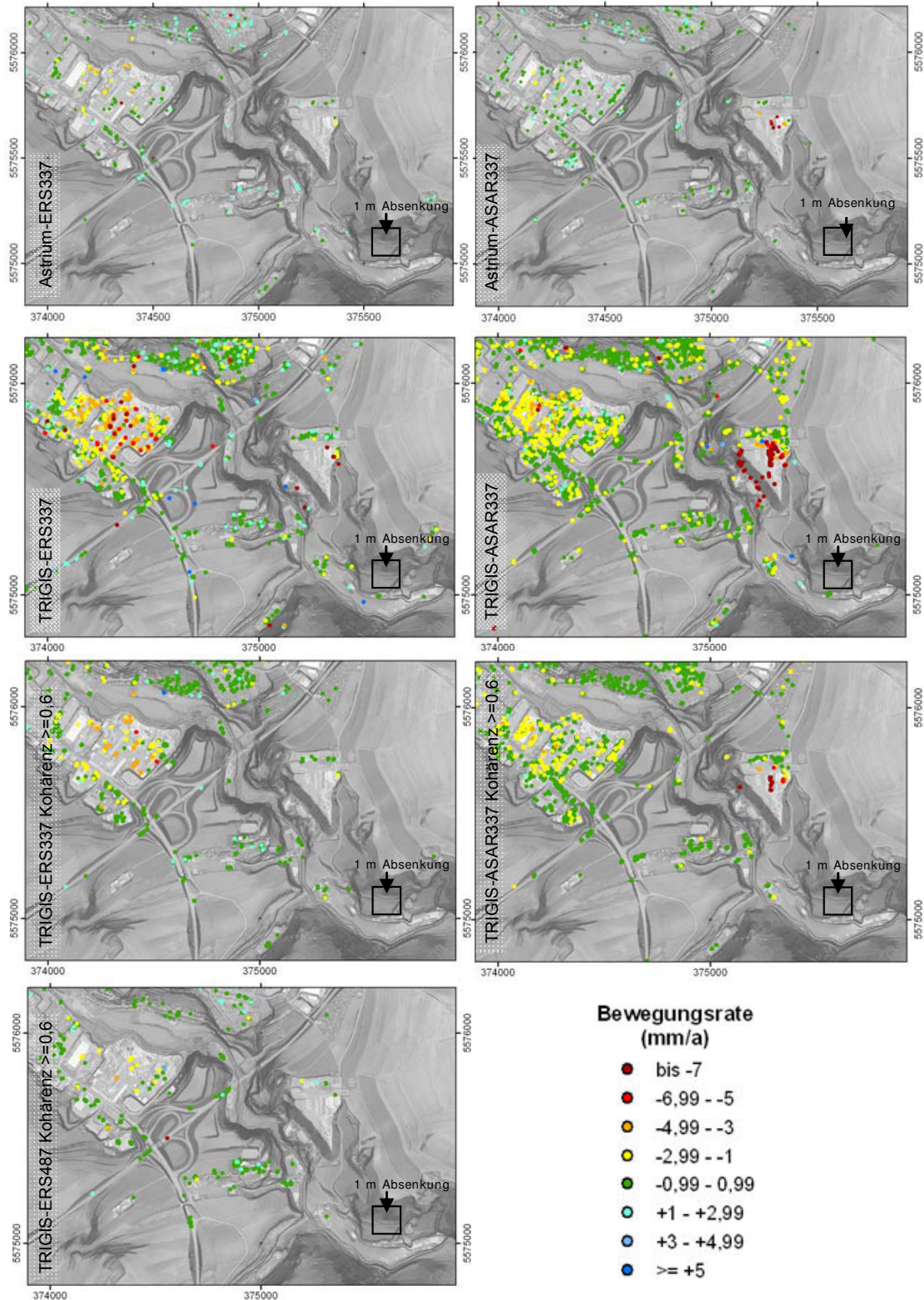


Abbildung 42 PSI-Bewegungsraten südlich von Mayen mit Anomalie-Clustern E-F.

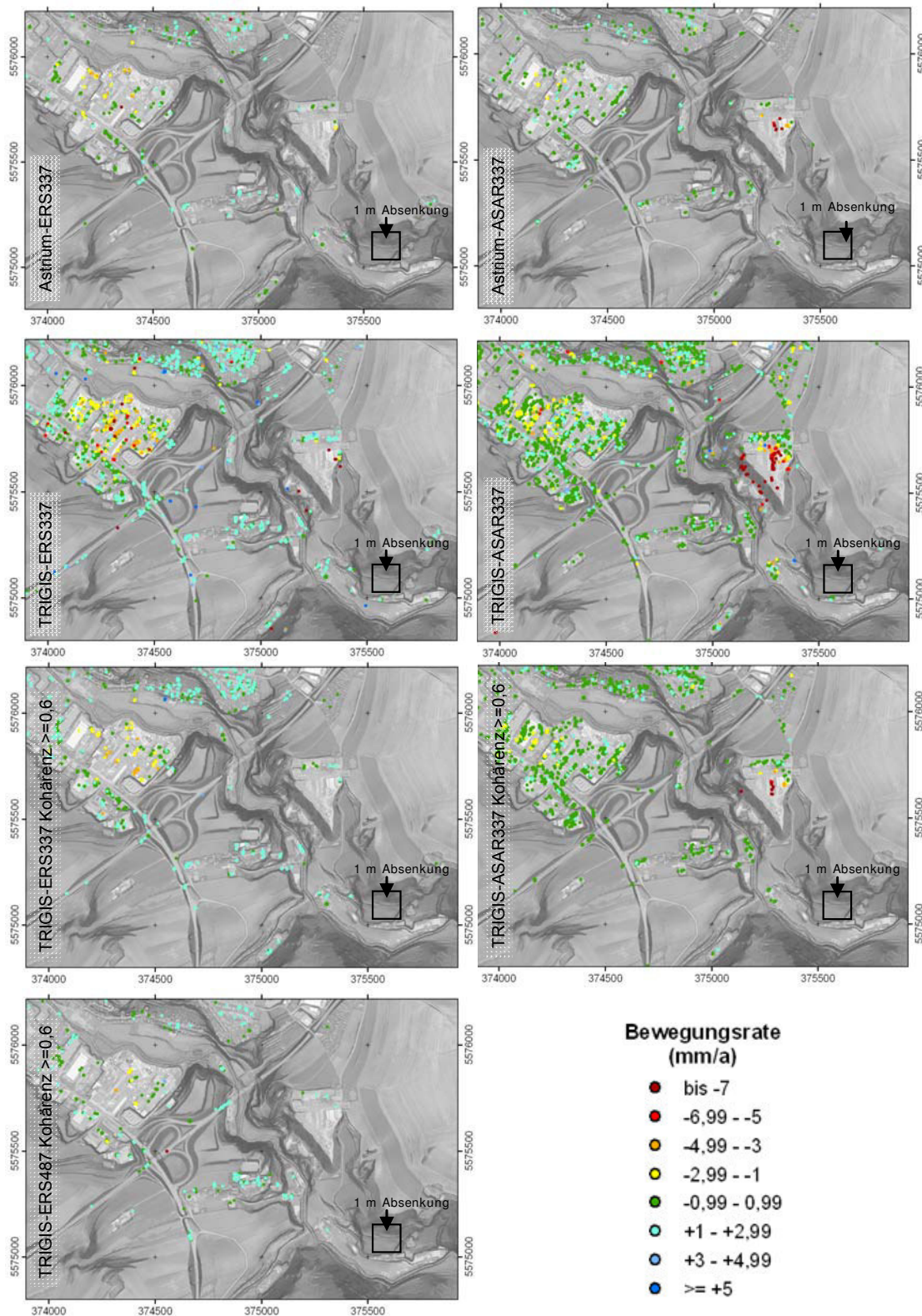


Abbildung 43 PSI-Bewegungsraten südlich von Mayen mit Anomalie-Clustern E-F nach Nivellementanpassung.

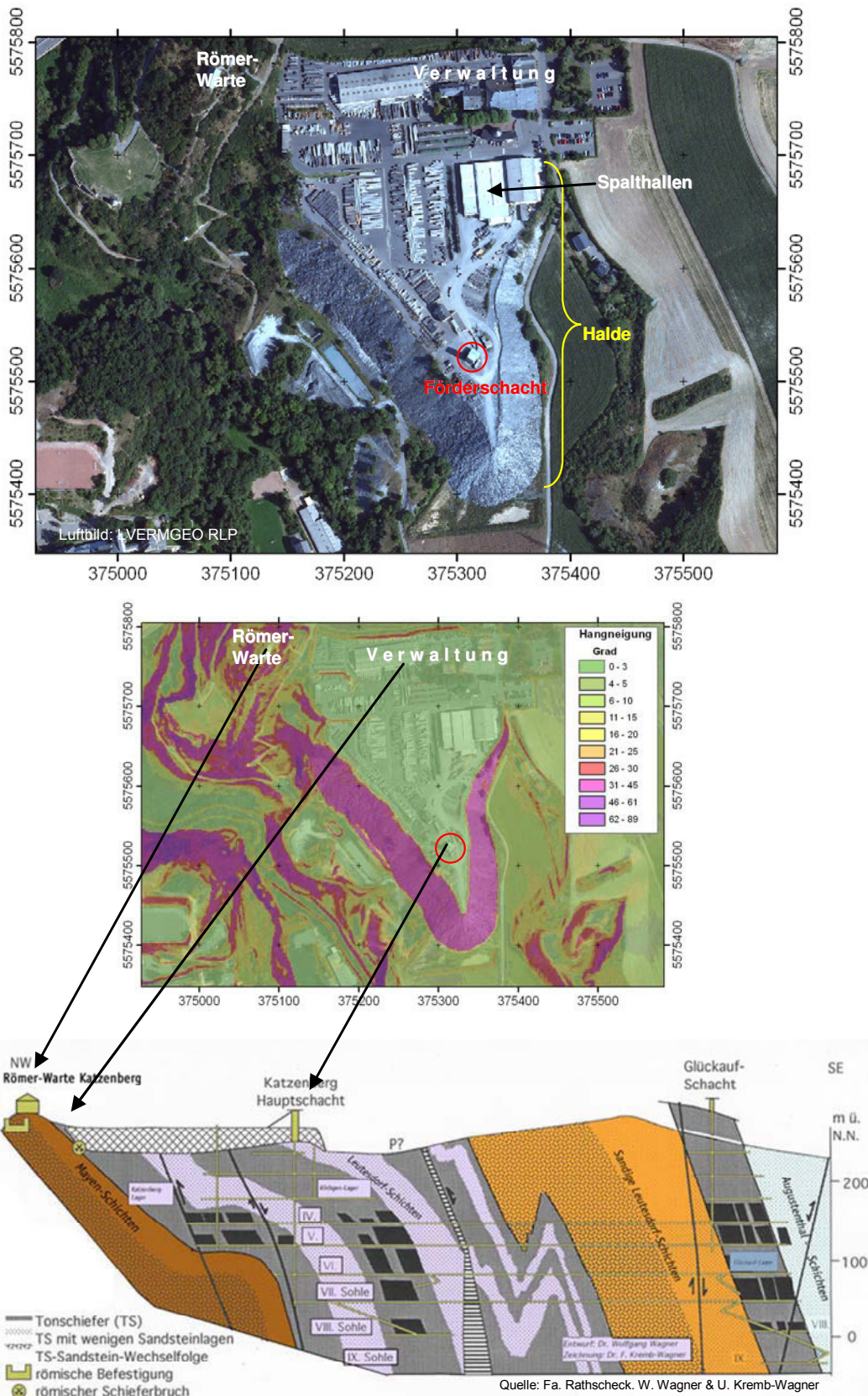


Abbildung 44 Luftbild [11] der Grube Katzenberg mit Hangneigungskarte (Mitte) und Grubenschnitt (W. Wagner & F. Kremb-Wagner, Fa. Rathscheck, [16])

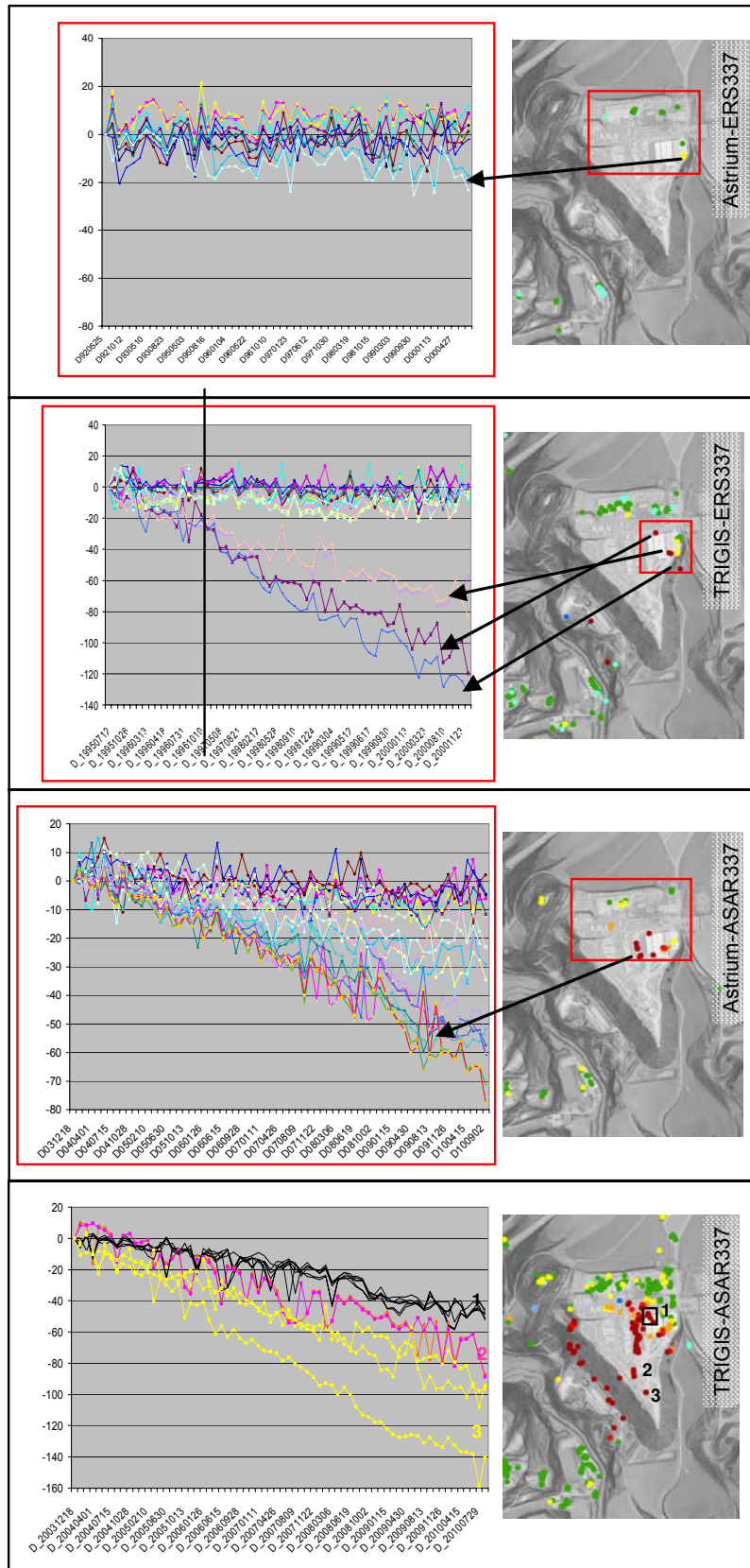


Abbildung 45 Zeitlicher Verlauf der PSI-Bewegung am Schieferbergwerk Katzenberg/Fa. Rathscheck.



abgedeckten ehemaligen Deponiefläche.

Zwei weitere Anomalien sind südlich von Mayen erkennbar. Die Abbildungen 42 und 43 zeigen analog denen für das ganze Stadtgebiet (Abb. 39, 40) den Bereich der Anomalien „E“ und „F“.

Von den nördlichen Anomalien verbleibt in den Kohärenz-gefilterten Datensätzen (Kohärenz  $\geq 0,6$ ) lediglich eine schwach ausgeprägte Anomalie „C“ (Abb. 40), während die südlichen Anomalien auch in den gefilterten Datensätzen erkennbar bleiben.

Die Anomalie „E“ betrifft die Fläche einer Papierfabrik und Anomalie „F“ das größte Schieferbergwerk Europas, die Grube Katzenberg der Firma Rathscheck, die bereits in der Einführung zu diesem Kapitel vorgestellt wurde.

Da die Anomalie „E“ auf der Fläche der Papierfabrik wahrscheinlich nicht mit Bergbau in Zusammenhang steht, fokussieren sich die weiteren Betrachtungen auf die Anomalie „F“ im Zusammenhang mit dem untertägigen Schieferbergwerk Katzenberg der Firma Rathscheck.

Die auffälligen PSI der Anomalie liegen im zentralen Bereich des heutigen Bergwerkes. In den Abbildungen 42 und 43 sind in der südöstlichen Ecke Hinweise enthalten auf einen Bereich südlich des ehemaligen eigenständigen Schieferbergwerkes Glückauf. In diesem Bereich wurden während der letzten Jahrzehnte Absenkungen um etwa einen Meter beobachtet. In keinem der PSI-Datensätze ist diese Absenkung mangels PSI abgebildet.

Der 1959 in Betrieb genommene neue Förderschacht der Grube Katzenberg (Abb. 44) liegt im vorderen Bereich einer aus Abraum aufgeschütteten Schieferhalde, die das umliegende Relief um bis zu 45 Meter überragt. Der Böschungswinkel der Halden beträgt  $35^{\circ}$ - $45^{\circ}$  (Abb. 44). Die Verwaltungsgebäude liegen nördlich der Halde. Südlich davon die Spalthallen in denen die Schieferblöcke in Schieferplatten gespalten werden.

Der Schnitt NW-SE-Schnitt durch das Bergwerksgebäude (Abb 44) stammt von Wagner & Kremb-Wagner und ist auf den Webseiten der Firma Rathscheck veröffentlicht (Ref.).

Sowohl in den von Astrium als auch von TRIGIS prozessierten PSI ist der Bereich der nördlichsten Betriebsgebäude (u.a. Verwaltung) in den ERS- und ASAR-Daten stabil (Abb. 45). Dargestellt sind die nicht Nivellement-angepaßten Bewegungsraten, so dass eine mögliche systematische, bereits zuvor beschriebene Abweichung in den ASAR-Daten zu berücksichtigen ist.

In den TRIGIS-ERS-Daten sind auch PSI für die Spalthallen verfügbar, die eine Absenkung um mehr als 10 cm zwischen 1995-2000 anzeigen (zeitliche Verläufe in Abb. 45)

Auch auf Grund von Umbauten im Freilager mit zusätzlichen potentiellen Reflektoren sind in der ASAR-Zeitscheibe mehr PSI detektiert. Sowohl die Astrium- als auch die TRIGIS-prozessierten ASAR-Daten zeigen, dass sich die in den TRIGIS-ERS-Daten festgestellte Absenkung um weitere 5-6 cm fortsetzt. Für den südlichen Bereich der Halde liefert nur der TRIGIS-ASAR-Datensatz PSI, die dort am Schacht (3 in Abb. 45) Absenkungen zwischen 10-14 cm anzeigen und an einem Haus (2) nordwestlich davon Senkung von etwa 8 cm. Das Hallendach (3) senkte sich um mehr als 4 cm in Übereinstimmung mit den Astrium-prozessierten PSI.

Nach Filterung über die Kohärenzschwelle von  $\geq 0,6$  bleiben die zuvor diskutierten PSI- mit stärker Bewegung nicht erhalten, sondern lediglich PSI südlich der Spalthallen im Bereich des Freilagers.

Warum die Reflektoren im Dachbereich weniger verlässlich hinsichtlich Kohärenz sind ist nicht erkennbar. Ein jahreszeitlicher, thermisch bedingter Gang in den Bewegungen ist jedenfalls nicht erkennbar.

Die aus ERS- und ASAR-Daten prozessierten PSI liefern für den Bereich der unbebauten Bergbauflächen nur wenige PSI. Diese Anzahl ist weiter reduziert, wenn die Anforderungen an die Kohärenz der PSI erhöht wird. Bereits bei einem Grenzwert der Kohärenz von  $\geq 0,6$  bleiben außerhalb der Siedlungs- und Gewerbeflächen für eine flächige Beurteilung des Basalt-Altbergbaus keine Informationen übrig.

Auch im Bereich der untertägigen Schieferbergwerke sind bekannte Senkungen über den südlichen Bergwerksteilen mit mehr als 1 Meter Absenkung nicht durch PSI repräsentiert. Lediglich die oberirdischen Gebäude von Bergwerk und Verarbeitungshallen und Verwaltung liefern PSI, die eine Setzung der Halde und darauf befindlicher Gebäude anzeigen.

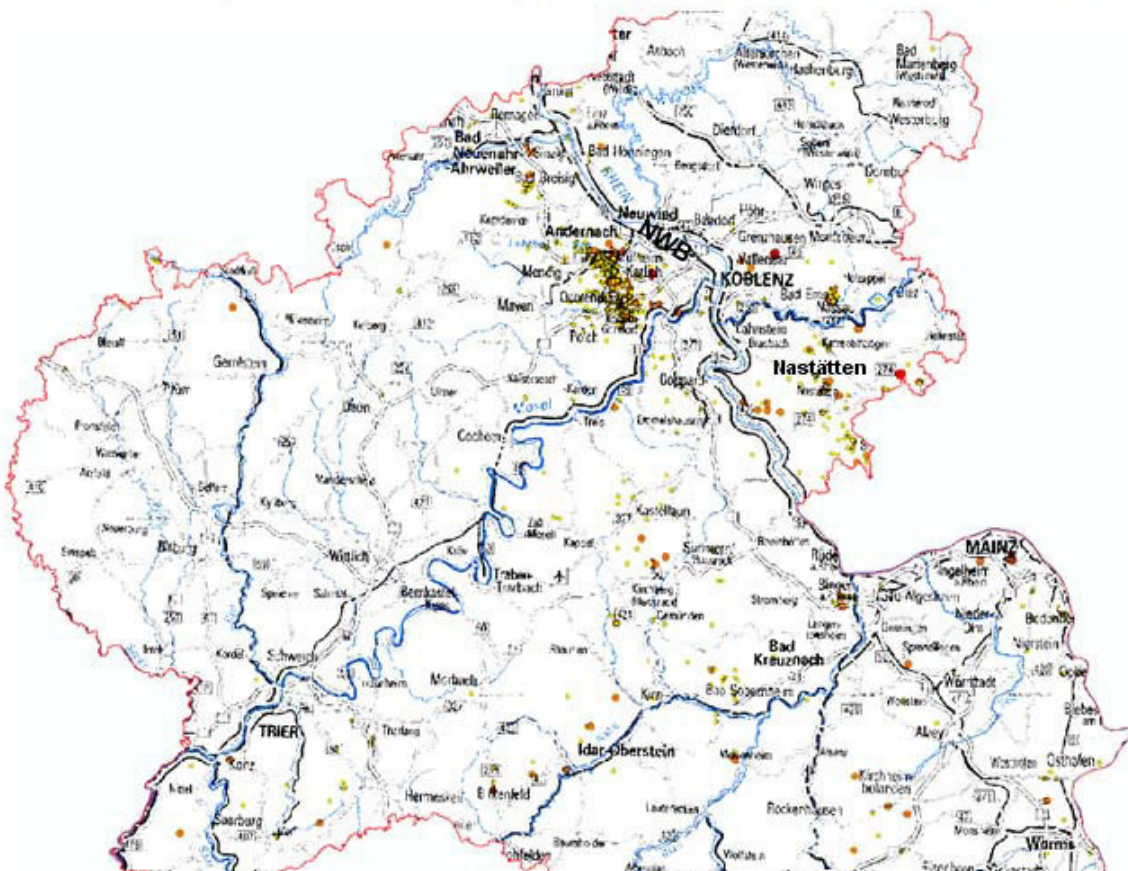
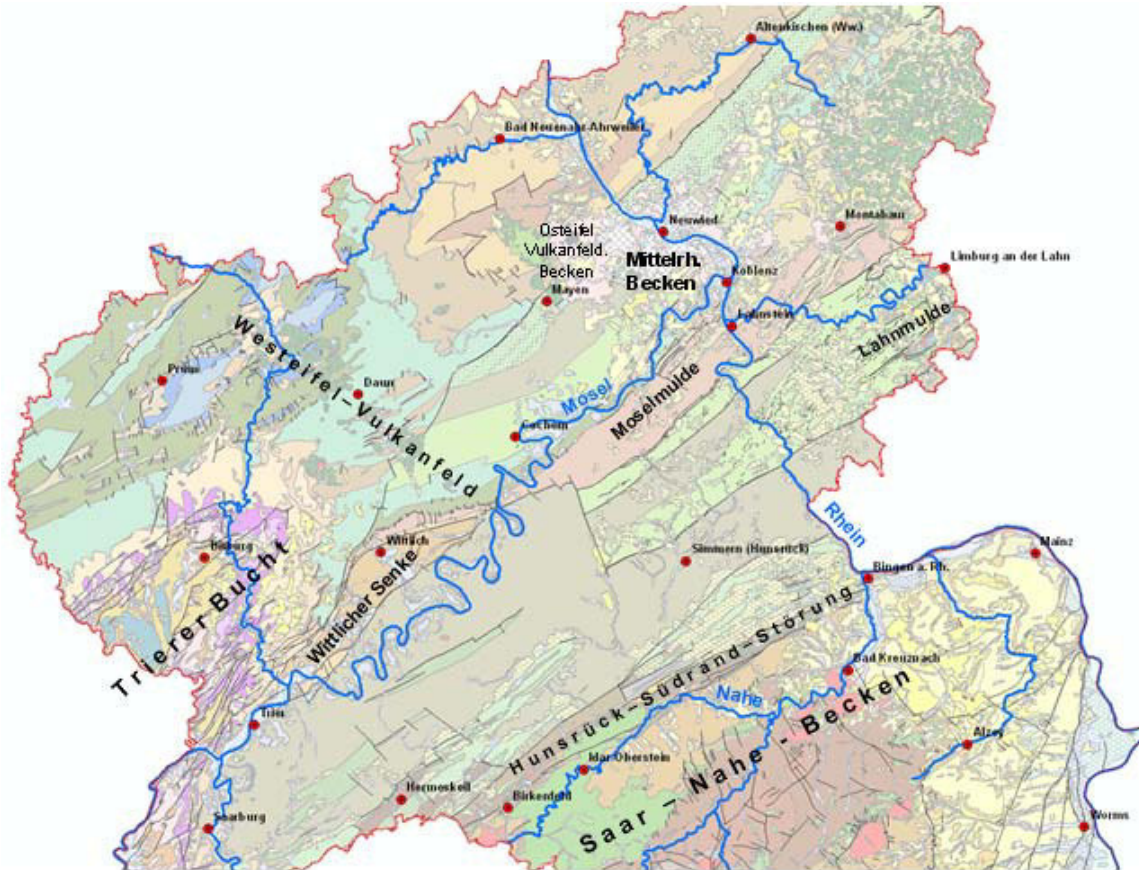
## 8. Regionale relative Bewegungsmuster

Das Projektgebiet liegt geologisch im Rheinischen Schiefergebirge. Dieses ist im Süden in Rheinland-Pfalz durch die Hunsrück-Südrand-Störung begrenzt, die als seismische Zone bekannt ist (vgl. Abb. 46).

Das Rheinische Schiefergebirge ist durch WSW-ENE streichende, durch Störungen begrenzte Sattel- und Mulden gegliedert. Im zentralen Bereich bei Koblenz befindet sich ein intramontaner Senkungsraum, das Mittelrheinische Becken. Unter dem Westrand des Beckens sind im Grenzbereich zum Osteifelvulkanfeld zahlreiche Erdbebenherde bekannt. (Abb. 46). Das Neuwieder Becken (Abb. 46 – NWB) ist der am tiefsten abgesunkene Teilbereich des Mittelrheinischen Beckens.

Im Südosten stellen die Trierer Bucht und die Wittlicher Senke ebenfalls tektonisch begrenzte Mulden bzw. Gräben dar (Abb. 46).

Im Kapitel zum Vergleich der Bewegungsraten von PSI und Nivellementpunkten wurden zwischen den unterschiedlichen PSI-Datensätzen unterschiedliche mittlere Abweichungen zu einer alle Datensätze querenden Gruppe von Nivellementlinien festgestellt. Die interne Genauigkeit beider Methoden zur Bewegungsbestimmung ist vergleichbar. Der Vorteil des Nivellementnetzes liegt lediglich darin, dass die Nivellementlinien in ein deutschlandweites Netz mit einem gemeinsamen Bezugspunkt bei Osnabrück eingebunden sind. Damit könnte das Nivellementnetz ein überregionales Bezugssystem für die PSI-Datensätze darstellen. Aufgrund des sehr begrenzten zeitlichen Projektvolumens von insgesamt nur 145 Stunden für alle Themenfelder, in dem der Vergleich zu den Nivellementvermessungen nur ein Themenfeld darstellt, wurde dieser Vergleich nur für drei gemeinsam alle PSI-Datensätze querende Linien angestellt. Sinnvoll, aber auch arbeitsaufwändiger wäre vermutlich alle mit der PSI-Datenabdeckung korrespondierenden Feinnivellementlinien erster Ordnung für eine solche Auswertung heranzuziehen. Auf die Probleme hinsichtlich der unterschiedlichen Beobachtungs/Periodenlängen von Satelliten- und Nivellementbeobachtung wurde bereits in vorangegangenen Kapiteln hingewiesen (vgl. Abb.8). Unterschiedliche Bewegungsregime während der ERS- (1992/95-2000) und der ASAR-Beobachtungsperiode (2003-2010) werden durch die Abstimmung auf die längere Nivellementbeobachtungsperiode (1980/85-2006/2012) nivelliert, wenn grundsätzliche Bewegungssinnänderungen zwischen der ERS- und der ASAR-Beo-



**Abbildung 46** Ausschnitt aus der Geologischen Übersichtskarte 1:300.000 von RLP [17] und Karte der Erdbebenherde seit dem Jahr 2000 (LGB RLP).

bachtungsperiode stattgefunden haben, hat die Nivellementanpassung lediglich einen Einfluß (Bias) auf die Bewegungsrate. Abbildung 8 zeigt ein bereits in Kap. 3 beschriebenes Beispiel dazu.

Für die Beobachtung regionaltektonischer Elemente stellen auf Grund obiger Erwägungen die Nivellement-angepaßten Daten, sofern vorhanden, die vermutlich bessere Datengrundlage dar, vor allem wenn Szenen in Teilgebieten prozessiert wurden und danach gemeinsam betrachtet werden müssen, um regionale Strukturen räumlich abzudecken. Für die Daten von ERS Track 65 bestand keine räumliche Überlappung zu den für die Nivellementanpassung genutzten Nivellementlinien. Eine Überlappung zwischen den PSI-Datensätzen des Track ERS337 und ERS65 bestand ebenso nicht, aber eine Überlappung zwischen dem *Descending Track* ERS65 und dem *Ascending Track* ERS487. Aus dem ERS65 Datensatz wurden über eine räumliche Schnittmengenbildung die PSI selektiert die am nächsten und maximal 15 Meter entfernt von einem PSI im ERS487 Datensatz lagen. Für die so gewonnenen 72000 Wertepaare aus beiden Tracks wurde die mittlere Bewegungsgeschwindigkeit in ERS65 und die mittlere Nivellement-angepaßte Bewegungsgeschwindigkeit in ERS487 berechnet. Es ergab sich eine Differenz zwischen dem Mittelwert der nivellementangepaßten Geschwindigkeit in ERS487 (0,94 mm/a,  $\sigma_s=0,92\text{mm/a}$ ) und der mittleren Bewegungsgeschwindigkeit im ERS65 Datensatz (0,29 mm/a,  $\sigma_s=1,15\text{ mm/a}$ ) von 0,65 mm/a. Mit diesem Betrag von 0,65 mm/a wurde eine indirekte Nivellementanpassung für jeden PSI im ERS65 Datensatz vorgenommen.

Die Abbildungsserie (Abb. 47-50) für die von TRIGIS prozessierten ERS-Datensätze der Tracks 337 und 65 vergleicht

- 1) die Datenaussage bei Verwendung des Gesamtdatensatzes,
- 2) bei Verwendung eines reduzierten Datensatzes mit einer Kohärenz  $\geq 0,6$  und
- 3) im nächsten Schritt bei einer weiteren Reduktion der PSI auf die Werte, die gleichzeitig eine Bewegungsrate größer als das 1,96-fachen (95%-Konfidenzlevel) der Standardabweichung des Mittelwertes haben.
- 4) Desweiteren zeigt die letzte Abbildung in der Serie den Einfluß der Reihenfolge (symbol level) des Plottens der Datenpunkte auf die Darstellung.



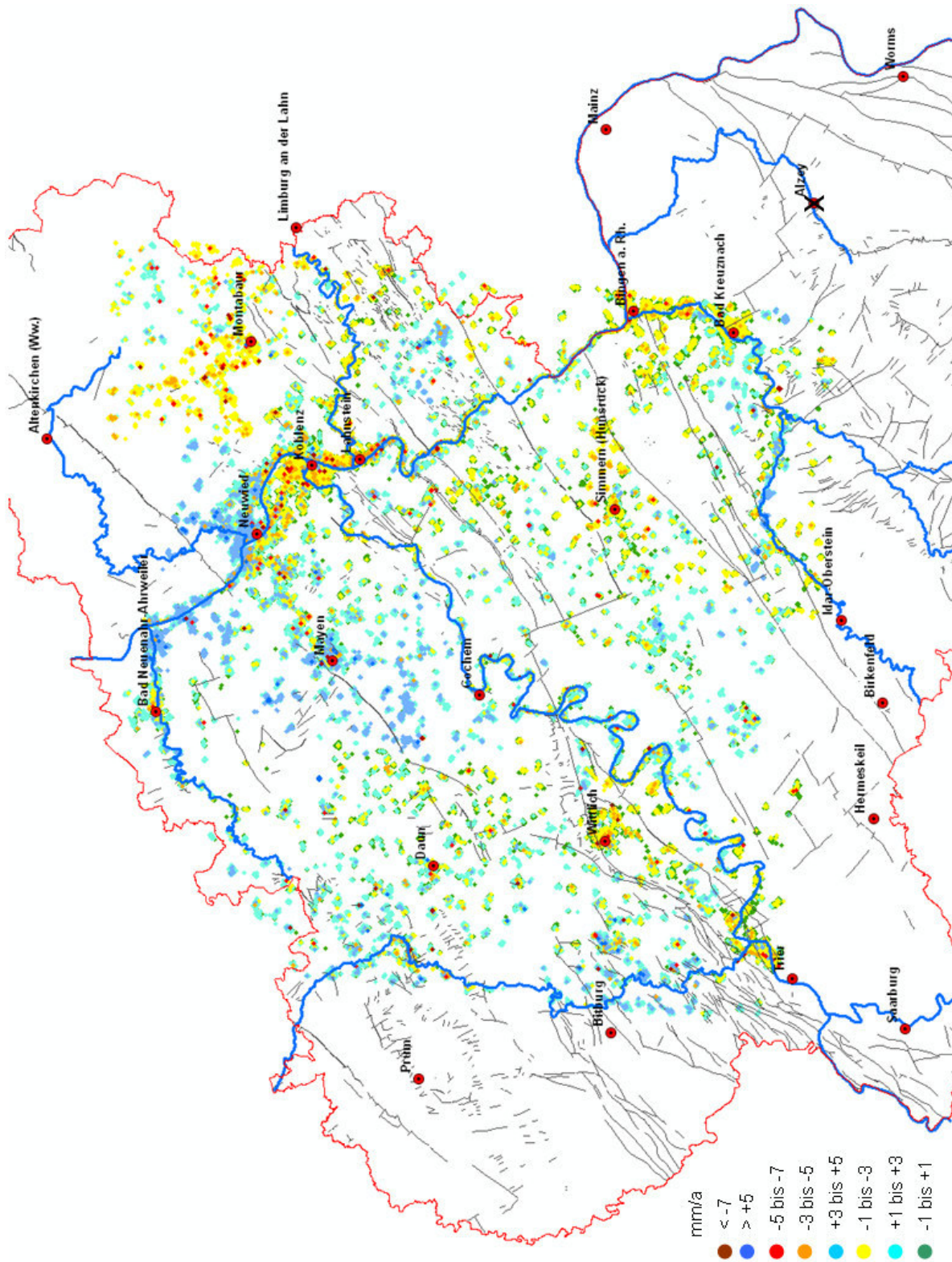


Abbildung 48 TRIGIS-ERS337 / 65, nur PSI mit Kohärenz  $\geq 0,6$ .

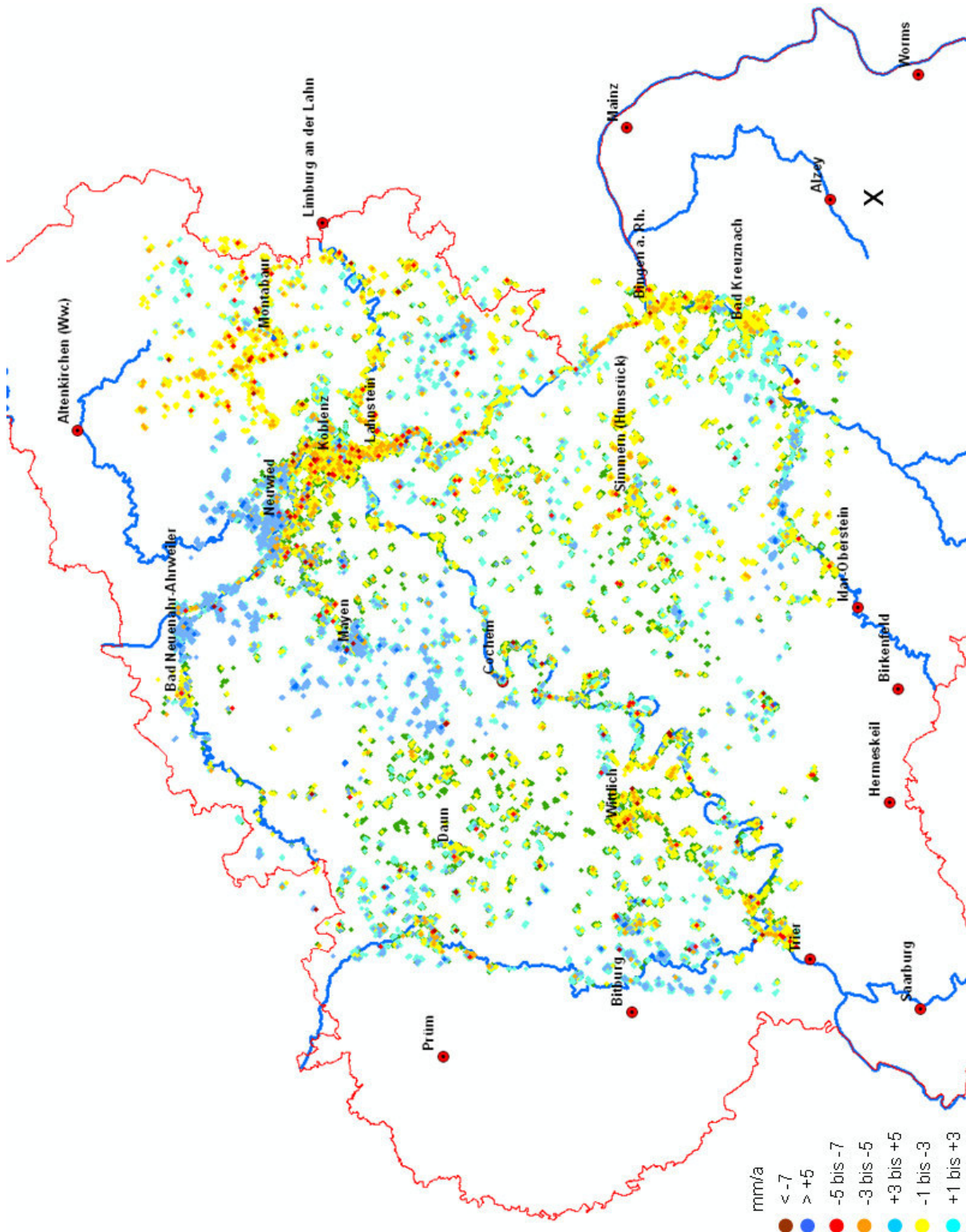


Abbildung 49 TRIGIS-ERS337 / 65, Kohärenz  $\geq 0,6$  und Betrag der Bewegungsrate größer dem 1,96-fachen der Standardabweichung.



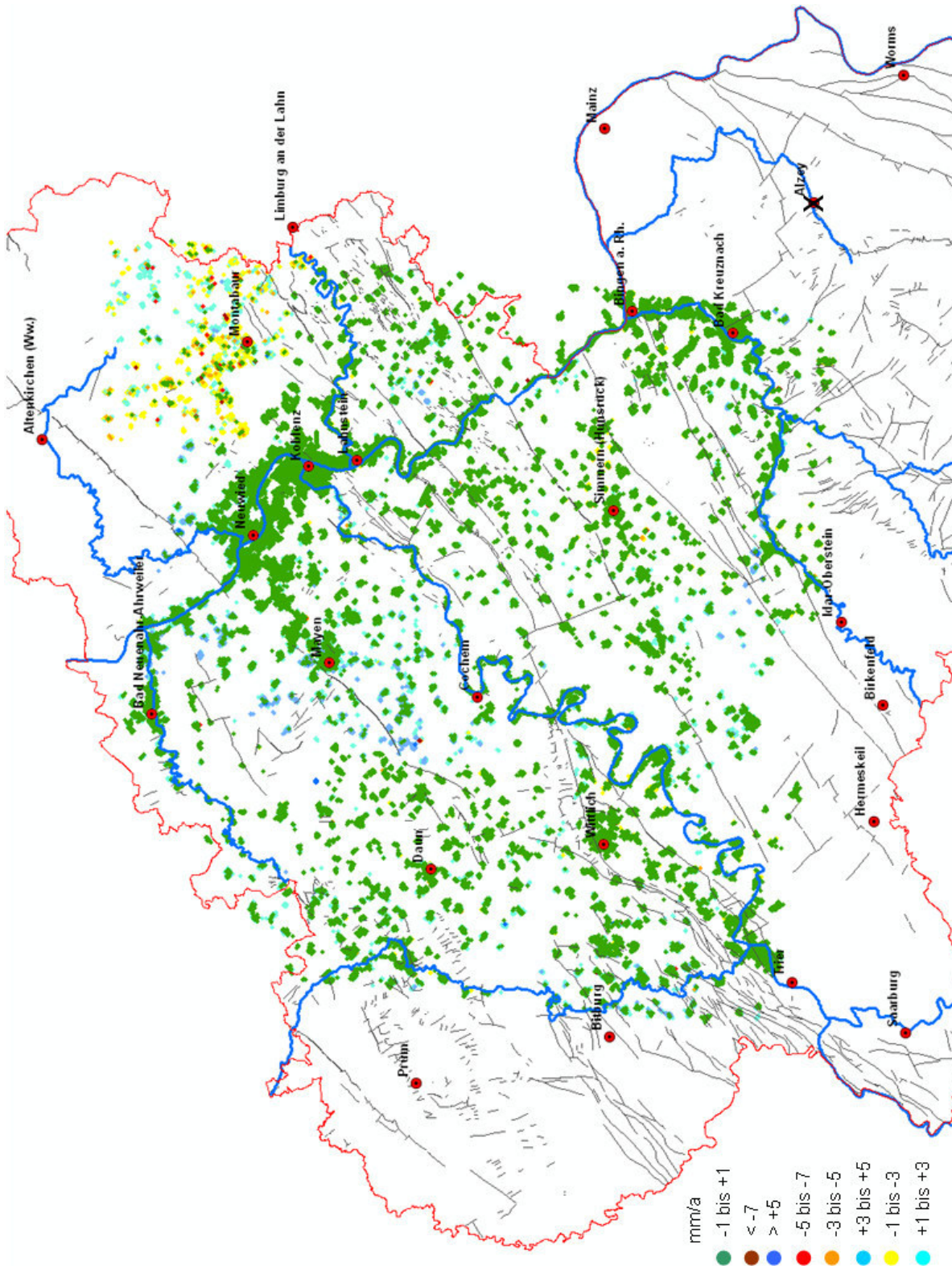


Abbildung 50 TRIGIS-ERS337 / 65, alle PSI, Bewegungsklasse -1 mm/a bis + 1mm/a als oberste Ebene angeordnet/geplottet.

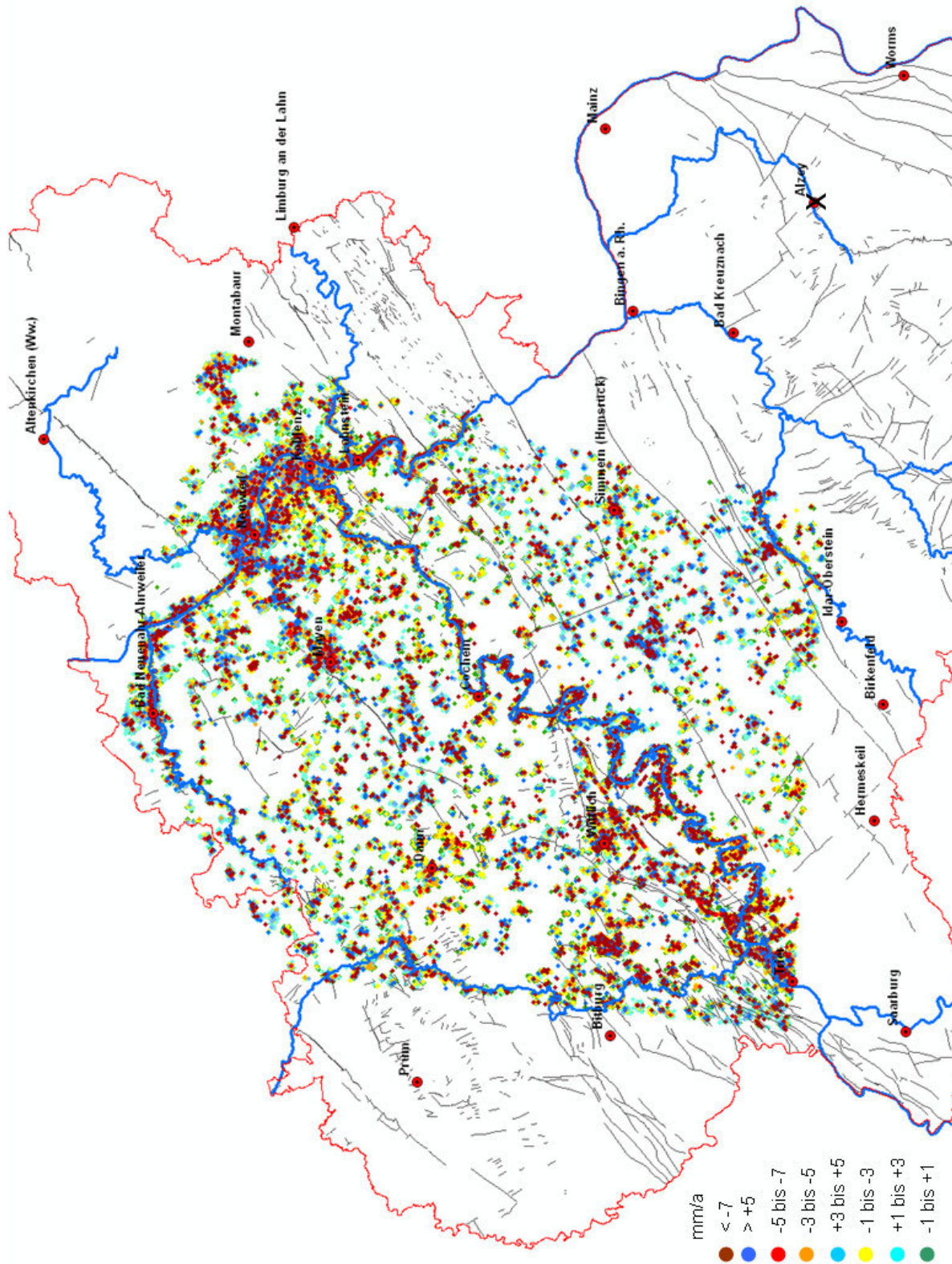


Abbildung 51 TRIGIS-ASAR337, alle PSI.

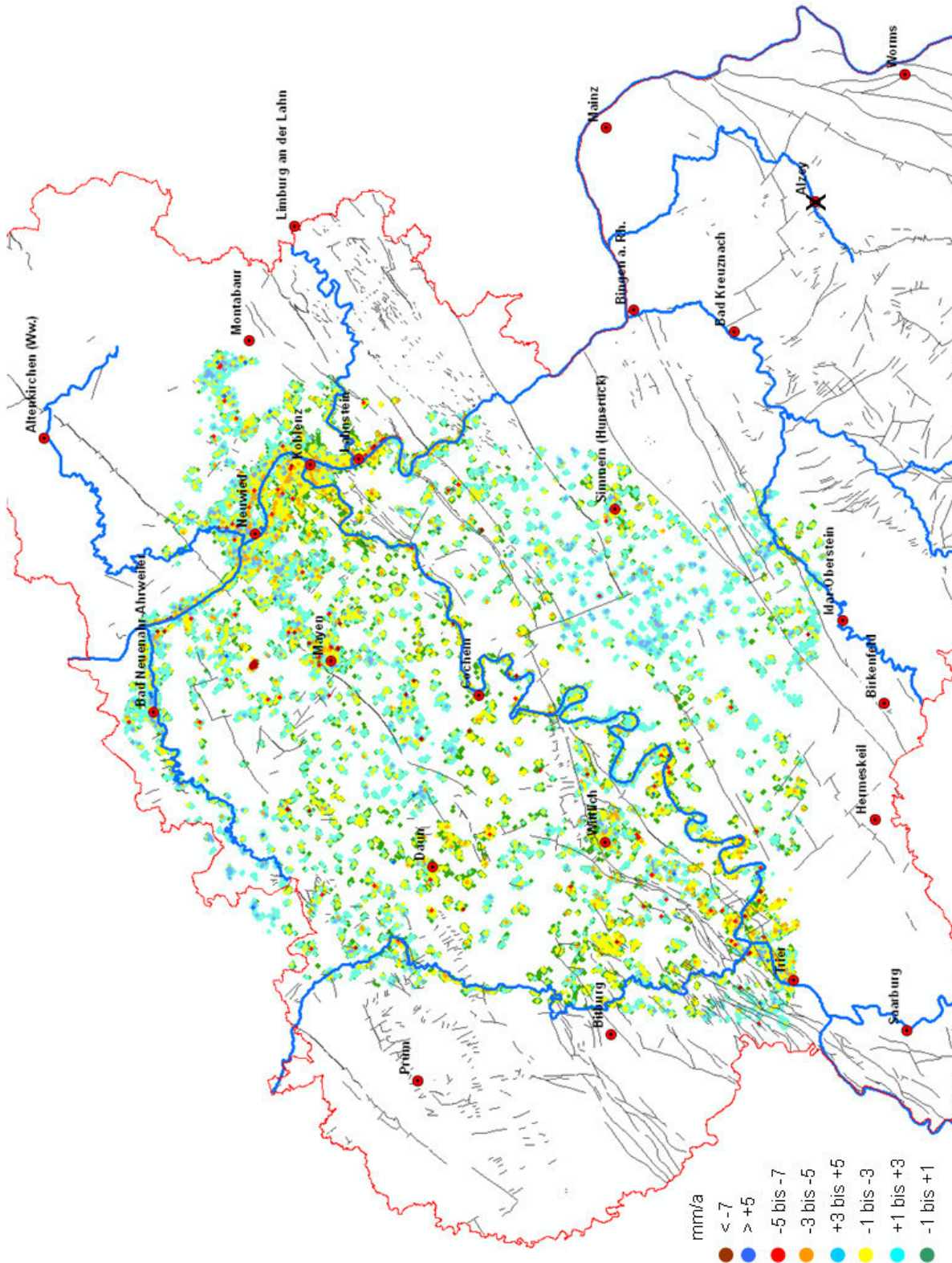
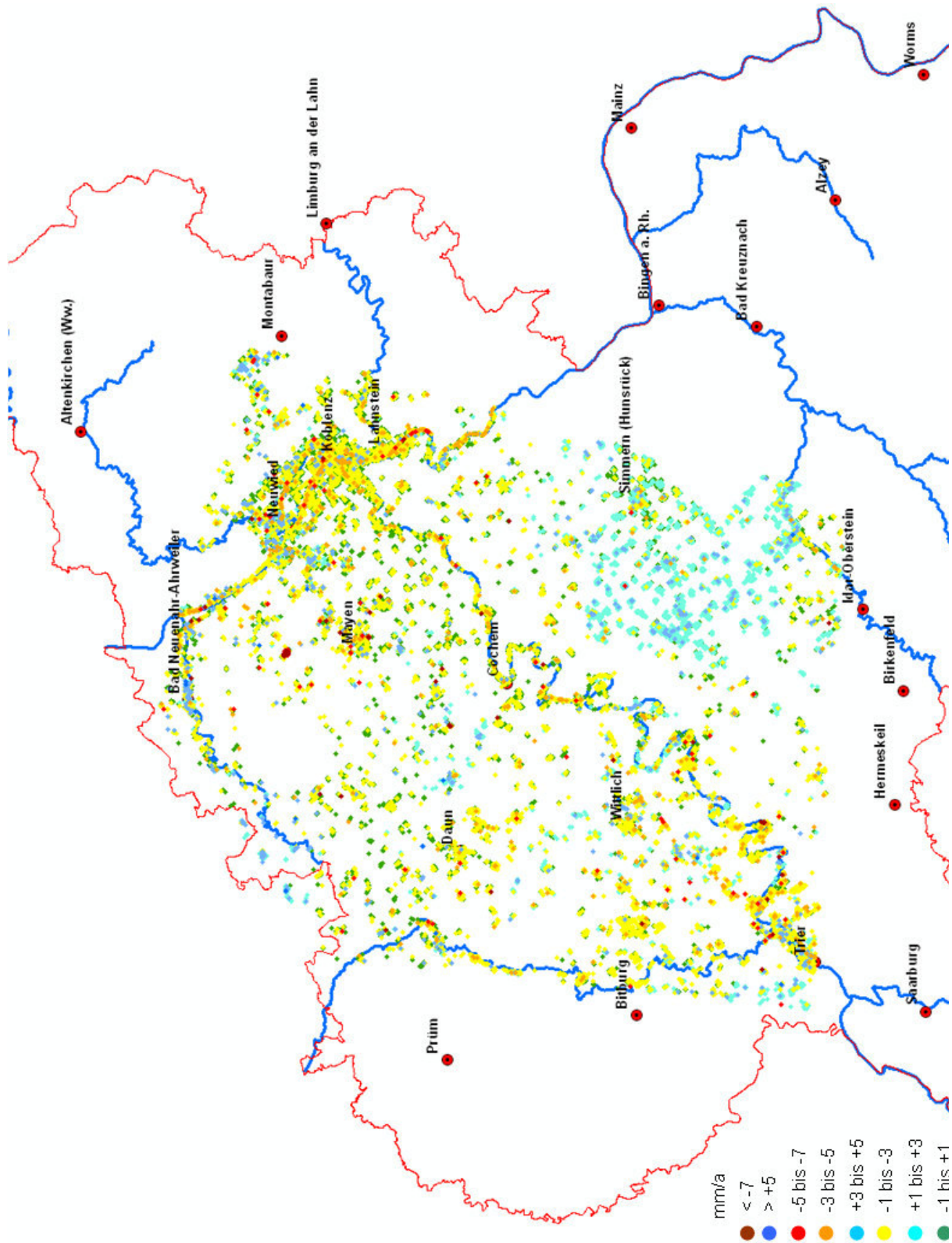


Abbildung 52 TRIGIS-ASAR337, nur PSI mit Kohärenz  $\geq 0,6$ .



**Abbildung 53 TRIGIS-ASAR337, Kohärenz  $\geq 0,6$  und Betrag der Bewegungsrate größer als das 1,96-fachen der Standardabweichung.**

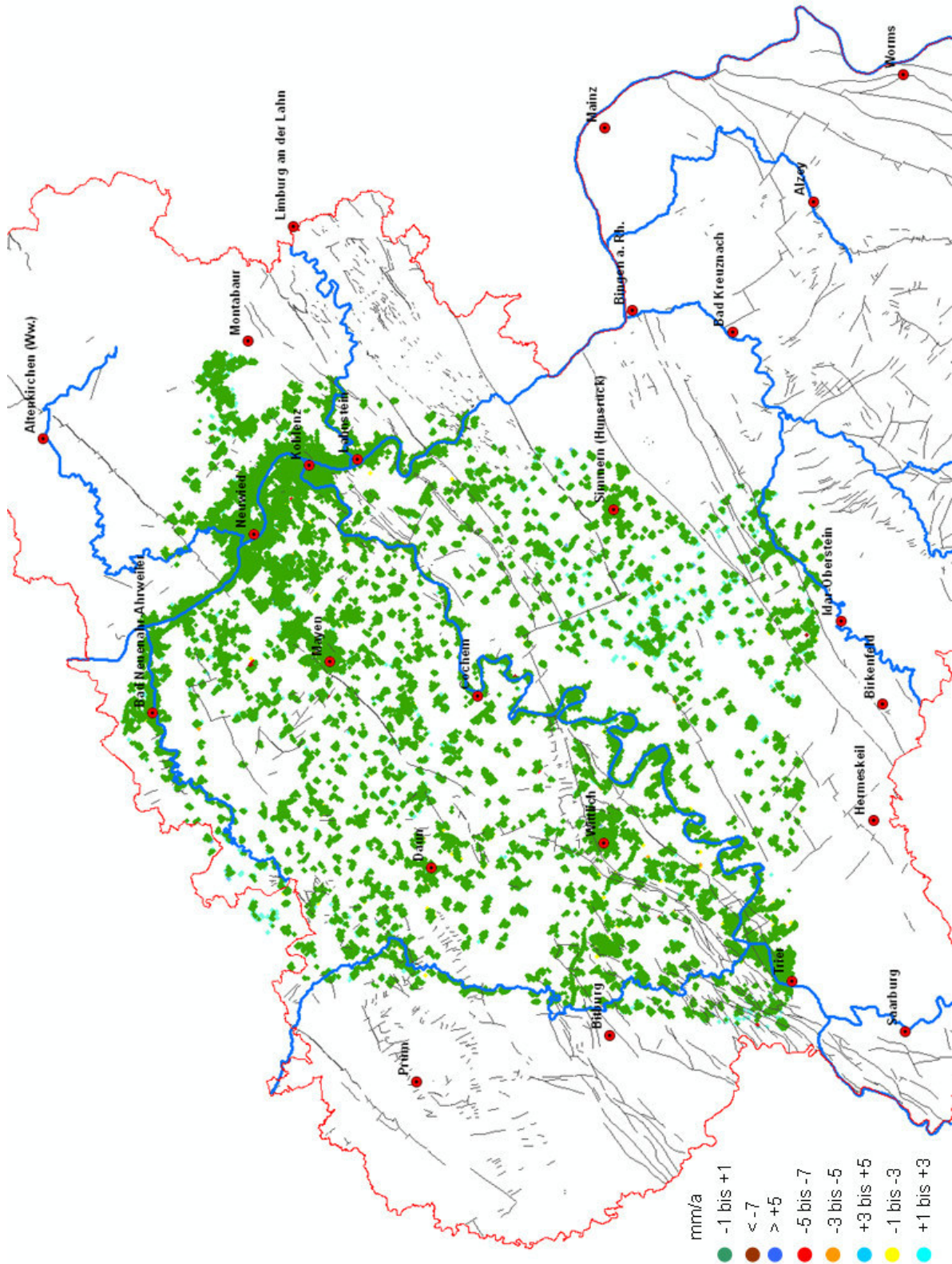


Abbildung 54 TRIGIS-ASAR337, alle PSI, Bewegungsklasse -1 mm/a bis + 1mm/a als oberste Ebene angeordnet/geplottet.

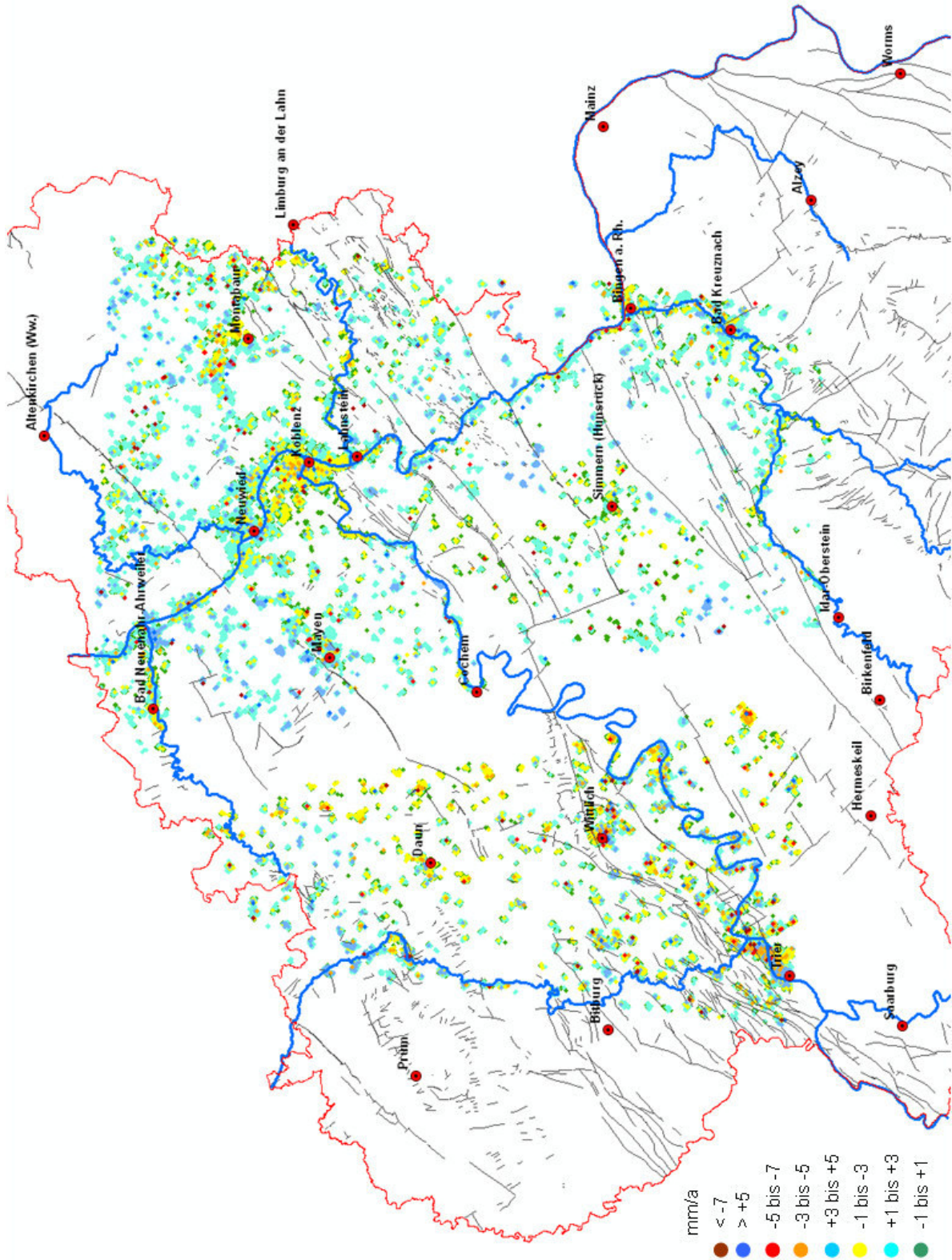


Abbildung 55 TRIGIS-ERS29/487, nur PSI mit Kohärenz  $\geq 0,6$ .

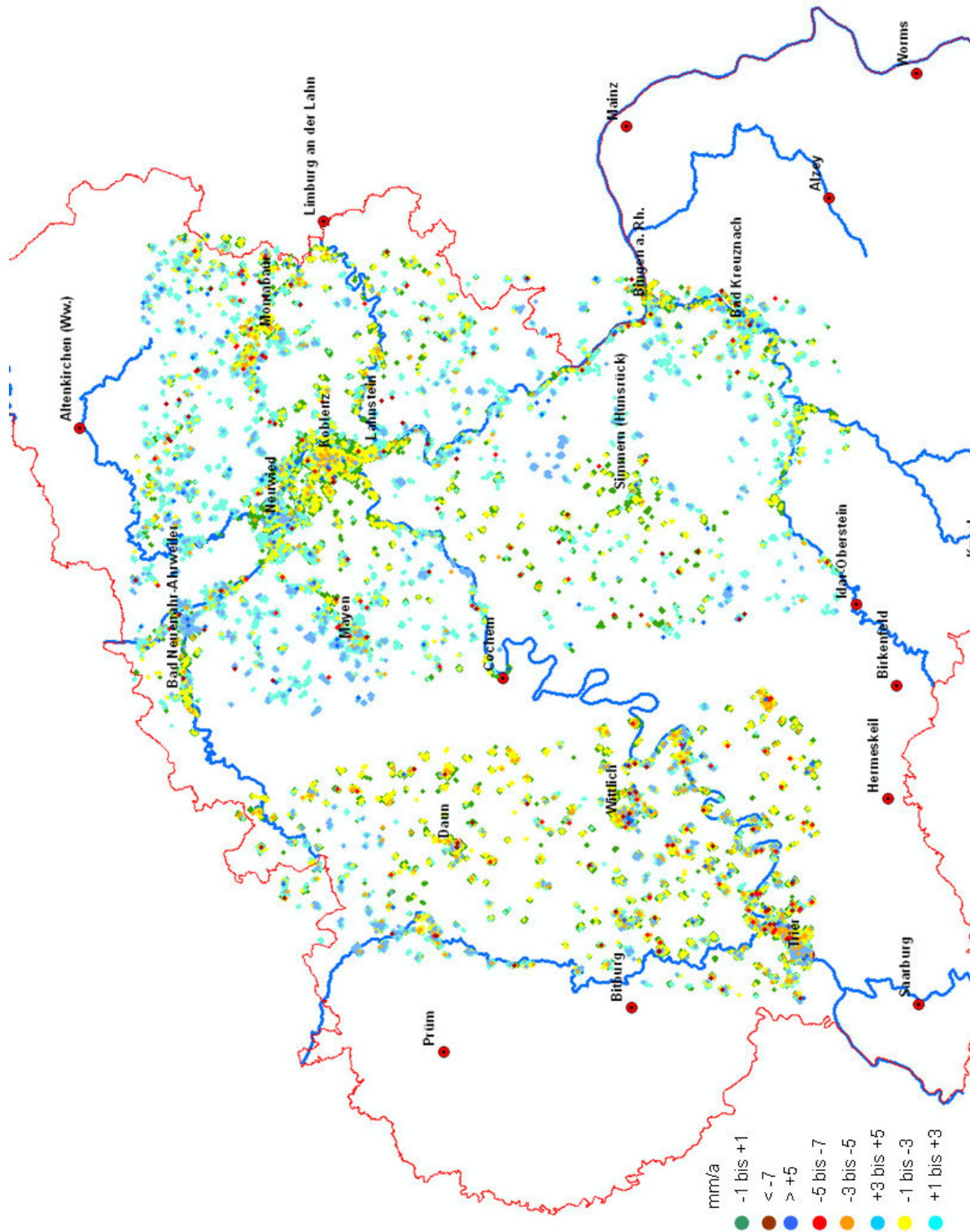


Abbildung 56 TRIGIS-ERS29/487, Kohärenz  $\geq 0,6$  und Betrag der Bewegungsrate größer als das 1,96-fache der Standardabweichung.

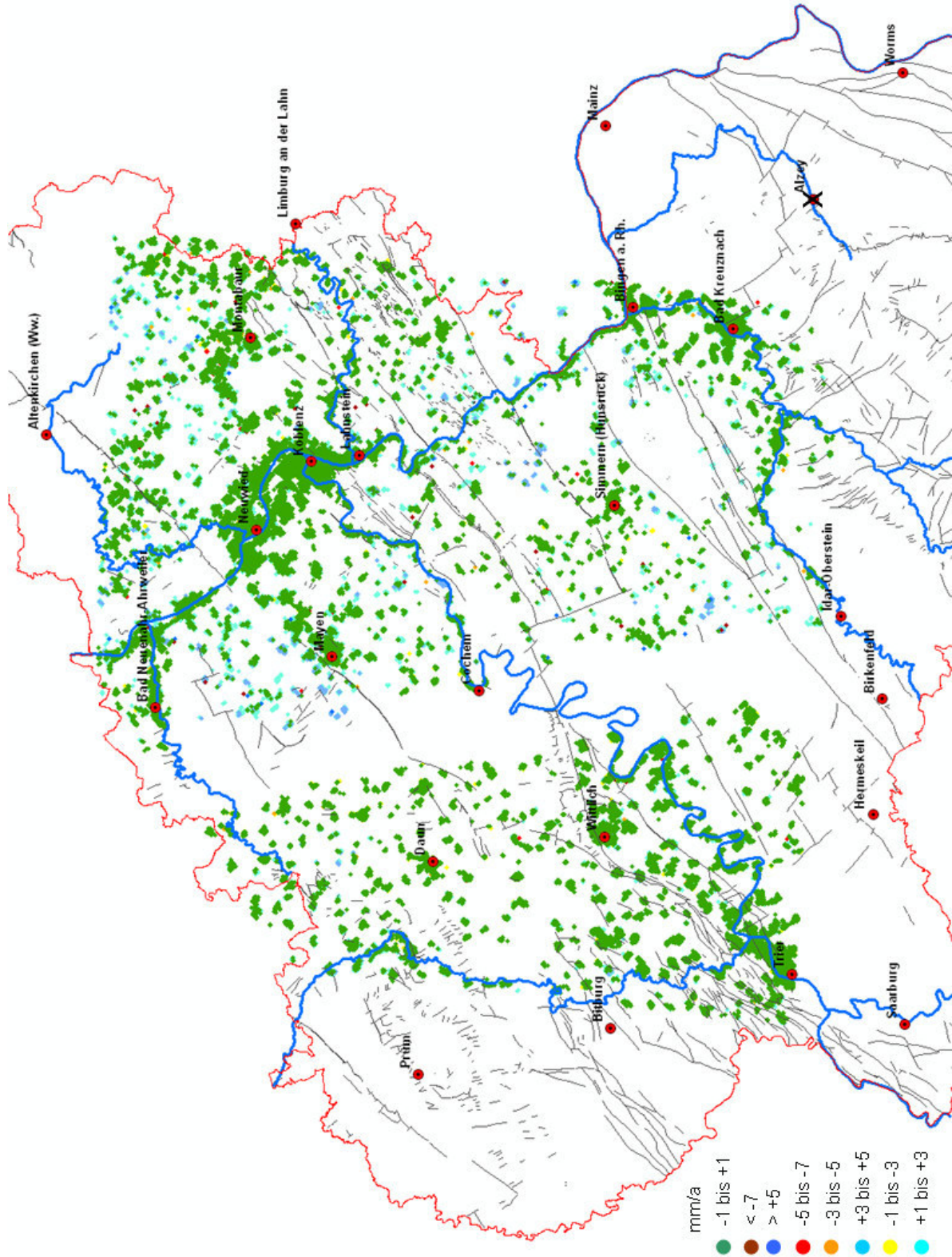


Abbildung 57 TRIGIS-ERS29/487, alle PSI, Bewegungsklasse -1 mm/a bis + 1mm/a als oberste Ebene angeordnet/geplottet.



Wird die niedrigste Bewegungsklasse im Gesamtdatensatz als oberste Ebene angeordnet, erscheint der überwiegende Teil der Fläche als ohne Bewegung.

Analog zur den Darstellungen für die ERS-Tracks 337 und 65 erfolgt in den Abbildungen 51-54 die Darstellung der Datensätze der TRIGIS-prozessierten ASAR-PSI.

Die letzte Serie (Abb. 55-57) besteht nur aus drei Abbildungen, weil alle PSI der ERS-Datensätze Track 487 und 29 (beide ascending) das Kriterium einer Kohärenz  $\geq 0,6$  erfüllen.

Im Folgenden sollen die Karten der Abbildungen 49, 53 und 56 hinsichtlich der Koinzidenz von Mustern in der PSI-Bewegung zu der Geologie und Tektonik betrachtet werden.

Sowohl die ERS-Daten der descending als auch ascending tracks zeigen eine ähnliche Verteilung von Gebieten mit präferentieller Hebung und Senkung. Lediglich zwischen Bad Kreuznach und Bingen und nördlich Montabaur sind Unterschiede feststellbar in dem Sinne, dass die negativen Bewegungen in den ERS-Daten der descending tracks stärker ausgeprägt sind als in den ascending tracks. Der Bereich der Osteifel mit dem Osteifelvulkanfeld und dem westlich angrenzenden tertiären Hocheifelvulkanfeld scheint sich zu heben. Während im Westeifelvulkanfeld und in der Wittlicher Senke bis Trier Absenkung dominiert. In der Trierer Bucht (Trier-Bitburger-Mulde) wiederum überwiegt Hebung. Ein lineares Band von Hebung zieht sich entlang der Nahe, auf einer vermuteten transversal durch das Saar-Nahe-Becken verlaufenden Störung. Dieses Band liegt wenige Kilometer südlich der auch für seine seismischen Ereignisse bekannten Hunsrück-Südrandstörung, einer von Lothringen bis weit nach Hessen reichenden Hauptstörungslinie, die sich in der Taunus-Südrandstörung fortsetzt. Die Störung mit listrischen Abschiebungen nach Süden verläuft in dem Senkungsfeld südlich Bingen.

Die meisten Erdbebenherde liegen im Westteil des Mittelrheinischen Becken, zwischen Kobern-Gondorf, Ochtendung und Laacher See. Dieser Bereich ist mit PSI relativ dünn belegt.

Prominente Hebungsbereich in der ERS-Zeitscheibe liegen

- in der Lahn-Mulde,
- koinzident zu einem Cluster an Erdbebenherden rund um Nastätten,

- nördlich des Neuwieder Beckens im Neuwieder-Vallendarer Beckenrand und
- entlang des Rheins bis nach Bad Neuenahr.

Im Vergleich zur ERS Beobachtungsperiode 1995-2000 vermitteln die ASAR-Daten von 2003-2010 einen gänzlich anderen Eindruck. Nördlich einer südlich und etwa parallel zur Mosel verlaufenden Linie überwiegt im nördlichen Hunsrück und in der Eifel Absenkung, während sich der zentrale Hunsrück scheinbar fast durchgängig hebt. Das Teilgebiet TRIGIS-ASAR-TG1-G4 (Abb. 2) ist wesentlich größer als dieser auffällige Bereich mit Hebung anzeigenden PSI im Hunsrück. Das TG1-G4 reicht bis in das Westeifel-Vulkanfeld in der zentralen Eifel und dokumentiert wie auch die anderen Teilgebiete dort und südlich der Mosel Absenkung. Die Hebungsanomalie kann somit nicht durch die Prozessierung erklärt werden.

## 9. Einsatzmöglichkeiten in der behördlichen Arbeit

Die Aufgabenstellung dieses Projektes war es zu prüfen, ob die aus Satellitendaten der ERS1/(2) und Envisat gewonnenen PSI-Bewegungsanalysen plausibel sind. Dies sollte an den Beispielen Altbergbau (Mendig), Rutschhängen der Mosel (Graach) und allgemein durch Vergleich mit Feinnivellement- oder vergleichbaren Daten erfolgen. Nach Überprüfung der Plausibilität sollte eine regionale Betrachtung hinsichtlich tektonischer Struktureinheiten erfolgen, mit einem Focus auf der Eifel, die vulkanologisch noch immer als aktiv gilt.

Der Vergleich mit den Bewegungsraten der Feinnivellementlinien 1. Ordnung zwischen Koblenz und Trier (Nivellementlinien 20-22), die das Projektgebiet im spitzen Winkel zur Line of Sight der Satellitenbeobachtung queren, ergab eine gute Übereinstimmung, der mit beiden Methoden ermittelten Bewegungsraten, innerhalb der internen Genauigkeit beider Verfahren der Bewegungsanalyse. Als Hauptproblemfeld des Vergleiches wurde die unterschiedliche zeitliche Auflösung der Beobachtungsperioden und der jeweils auf die Gesamtlänge bezogenen Bewegungsraten erkannt. Die in der Regel 20-30 Jahre dauernde Periodenlänge der Nivellementbeobachtung (letzte Periode 1980/85-2006/13) steht kürzeren Beobachtungsperioden von Satelliten gegenüber. Im vorliegenden Falle erfolgte die PSI-Auswertung für die Zeitscheiben 1992/95-2000 (ERS) und 2003-2010 (ASAR).

Um die PSI-Teildatensätze für unterschiedliche Regionen zu harmonisieren, erfolgte eine Angleichung der Bewegungsraten durch zuvor über NIVP-PSI ermittelte mittlere Differenzbeträge. In diesem Fall wurde das Nivellementnetz willkürlich als Bezugsnetz gewählt, da diese Daten in ein größeres räumliches Bezugssystem eingebunden sind. Aufgrund der vergleichbaren äußeren Fehler von Nivellementnetz und PSI-Daten, aufgrund der unterschiedlich langen betrachteten Zeitscheiben und aufgrund der unterschiedlichen Bezugspunkte kann aber keine Wertung vorgenommen werden welche Daten die Realität der Absolutbewegungen besser abbilden. Ändert sich innerhalb einer Feinnivellement-Periode der Bewegungssinn von Krustenteilen oder einzelnen Landschaftselementen, dann führt die Nivellementanpassung, der für kürzere Perioden gewonnenen PSI-Bewegungen, zu einem Verlust oder zur Unterdrückung dieser Information. Es konnte deshalb hier nicht geklärt werden, ob

sich der Bewegungssinn der Eifel möglicherweise nach 2000 von Hebung zu Senkung geändert hat.

An dem zuvor nicht vorgesehenen Testgebiet „Wehr“ wurden die durch Nivellementpunkte und PSI dokumentierten Absenkungen in der Ortslage Wehr untersucht. In diesem Beispiel ist die Nivellementperiode kürzer (1990-2012) als auf den zuvor für den regionalen Vergleich genutzten Nivellementlinien 20-22 (1982-2011).

Der Vergleich eines Nivellementpunktes mit extremer Absenkung (140 mm) und eines weiteren mit mäßiger Absenkung (45 mm) mit PSI-Bewegungsraten am gleichen oder benachbarten Gebäuden ergab vergleichbare Bewegungsraten und Gesamtabenkungen. Die PSI-Daten lieferten weitergehende flächige Informationen für die durch PSI dicht dokumentierte Ortslage, sodass auch das mangels NivP bisher nicht erkannte Senkungszentrum mit Absenkungen über 20 cm seit 1995 erkannt wurde. Auch der zeitliche Verlauf und eine Zunahme der Absenkungsgeschwindigkeit nach 2000 sind in den PSI erkennbar.

Aufgrund der angenommenen Absenkungsursache (im weiteren Sinne Sumpfung) haben die mehr oder weniger stetigen und weiträumigen Absenkungen zu keiner Einschränkung der Kohärenz und damit der zur Verfügung stehenden Anzahl von PSI geführt. Bei ausreichender PSI-Dichte in der interessierenden Fläche können Senkungen durch Fluidentnahme im Untergrund somit sehr gut quantifiziert und auch in der Fläche sehr differenziert analysiert werden.

Im nächsten untersuchten Testgebiet, einer Großrutschung in den Moselhängen bei Graach, sind die Rahmenbedingungen für eine Bewegungsanalyse jedoch schwieriger.

Grundsätzlich sind für Rutschungen nur in seltenen Fällen zeitlich lineare Bewegungsabläufe zu erwarten. Eine grundsätzliche Annahmen bei der Bewegungsabschätzung über PSI ist aber ein lineare Hebung oder Senkung. Dieser Testfall kollidiert somit mit einer methodischen Anforderung an die Güte von Bewegungsschätzungen durch PSI. In weiterer Hinsicht stellt die Großrutschung Graach eine Herausforderung an die Methode dar. Die Mehrzahl der potentiellen Point Scatterer ist mit der potentiellen Reflektionsfläche (z.B. Weinbergsmauern) mehr oder weniger parallel oder im spitzen Winkel zur Line of Sight angeordnet. Desweiteren ist die generelle Bewegungsrichtung in der Rutschung senkrecht zur Line of Sight. Die Satellitenbeobachtungsperioden sind mit 5-7 Jahren relativ lang, sodass innerhalb dieses

Zeitraumes durch die Rutschungen Reflektoren zerstört werden und bei Betrachtung des Gesamtzeitraumes nicht berücksichtigt werden, obwohl sie vielleicht mehrere Jahre bestanden haben. Andererseits werden nur Reflektoren berücksichtigt, die in der Masterszene identifiziert wurden. Nach dem Datum der Masterszene hinzugekommene Reflektoren (neue Mauern, Masten, Geländer etc.) werden bei der Auswertung nicht berücksichtigt.

Die geringe Ausbeute an Reflektoren liegt nicht nur in der Topografie begründet, sondern auch in der reduzierten Kohärenz vieler PSI. Diese ist weitgehend in nichtlinearen Bewegungen in der Rutschung (rutschungstypisch) und dem Beobachtungsabstand zeitlich aufeinander folgender Satellitenaufnahmen begründet.

Eine kürzeres und gleitendes Zeitfenster mit unterschiedlichen Masterszenen zur PSI-Extraktion und Analyse könnte möglicherweise zu einer Erhöhung der Anzahl an PSI-Punkten führen.

Obwohl die detektierten PSI-Bewegungen durchaus plausibel sind, ist mit der derzeitigen PSI-Auswertemethode der ERS- und ASAR-Daten (Betrachtung des Gesamtzeitraumes, singuläre Masterszene) in einem hochdynamischen Gelände mit un stetiger Bewegung keine ausreichende Datengrundlage für die flächendeckende Bewertung von Rutschhängen für die behördliche Risikobewertung erreicht.

Hier sind räumlich und zeitlich höher auflösende Satellitendaten bei entsprechend variabel wählbarer Masterszene und kürzeren Berechnungszeiträumen vielversprechende Ansatzpunkte für die Verbesserung der flächigen Analyse von Rutschungen.

In Mendig wurden durch flachen untertägigen Basaltabbau Hohlräume geschaffen, deren Lage nur z.T. bekannt ist. Ein Teil der Hohlräume ist bekanntermassen ein sturzgefährdet und es kommt auch regelmäßig zu Tagesbrüchen. Anders als der Testfall Wehr untersucht der Testfall Mendig somit nicht großflächige Absenkungen, sondern zielt auf die Prüfung der Eignung der aus ERS- und ASAR-Daten gewonnen PSI-Bewegungsraten für die Detektion von kleinräumigen Senkungen, die häufig nur die Größe der Fläche eines Grundstückes haben.

Die in Mendig detektierten PSI-Bewegungen sind durchaus plausibel, obwohl in den Karten der PSI-Punkte mit einem Kohärenzwert von mindestens 0,6 einige dieser plausiblen PSI verschwinden. Ursache dafür können, wie im Testgebiet Graach,

plötzliche (unstetige) Bewegungen sein, die im Falle eines Versagens oder Teilversagens der Standfestigkeit von Hohlräumen erwartbar sind. Diese Bewegungen müssen nicht einmal ganze Gebäude betreffen

Die Steifigkeit von Gebäuden, vor allem von großen Gebäuden oder Elemente auf Flächenversiegelungen mit Tragschichten (z.B. Netze zur Sicherung über überbauten Hohlräumen), können in der Fläche durchaus PSI erzeugen, die keine Bewegung anzeigen. Vereinzelte PSI mit Bewegung innerhalb von benachbarten, bewegungslosen PSI können u.U. den entscheidenden Hinweis auf ein mechanisches Versagen von nur Gebäudeteilen liefern, obwohl vielleicht bereits Teile der Überbauung Verbrücke überbrücken und nur auf Grund der Eigensteifigkeit noch keine Senkung in den PSI erkennbar ist. Auch ist im Falle eines oder wiederholten mechanischen Versagens an Gebäudeteilen oder im Untergrund eher nicht mit einer stetigen Bewegungsrate zu rechnen und entsprechend negativen Auswertung auf die Kohärenzwerte solcher PSI. Auch Hebung und Senkung innerhalb des gleichen Gebäudes kann ein Hinweis auf Torsionsbewegungen über unterschiedlich setzungsanfälligem Baugrund oder einseitiger Unterhöhlung sein.

Zumindest bei der Interpretation von PSI aus Daten von ERS und ASAR, deren Einzelszenen mit großem zeitlichen Abstand von etwa einem Monat zueinander aufgenommen wurden, sollte dies berücksichtigt und auch einzelnen Werten mit reduzierter Kohärenz Bedeutung zugemessen werden, bis deren Fehlerhaftigkeit belegt ist.

Für die behördliche Arbeit bedeuten die Bewegung anzeigenden PSI einen Gefahrenhinweis, aber umgekehrt können PSI die keine Bewegung im Beobachtungszeitraum anzeigen, nicht unbedingt als Indiz auf fehlende Bewegung unter dem Gebäude bzw. eine fehlende Einsturzgefährdung gewertet werden.

Die aus ERS- und ASAR-Daten prozessierten PSI liefern für den Bereich der unbebauten Bergbauflächen nur wenige PSI. Diese Anzahl ist weiter reduziert, wenn die Anforderungen an die Kohärenz der PSI erhöht wird. Bereits bei einem Grenzwert der Kohärenz von  $\geq 0,6$  bleiben außerhalb der Siedlungs- und Gewerbeflächen für eine flächige Beurteilung des Basalt-Altbergbaus keine Informationen in Form von PSI erhalten.

Auch im Bereich der untertägigen Schieferbergwerke sind bekannte Senkungen über

den südlichen Bergwerksteilen der Grube Glückauf mit mehr als 1 Meter Absenkung nicht durch PSI repräsentiert. Lediglich die 500 Meter weiter nordwestlich liegenden oberirdischen Gebäude von Bergwerk und Verarbeitungshallen und Verwaltung liefern PSI, die eine Setzung zumindest der Halde und darauf befindlicher Gebäude anzeigen. Gebäude außerhalb der Halde sind davon nicht betroffen.

Setzungen über Bergwerken sind deshalb in unbebautem Gelände und deshalb fehlender PSI mit dieser Methode nicht erkennbar. Flächendeckende Gefährdungskarten können mit dieser Methode für noch unbebautes Gelände somit nicht erstellt werden.

Für eine regionale Analyse von Hebungs- und Senkungsräumen, erscheint, sofern ein Gebiet das als Ganzes betrachtet werden soll, durch Teildatensätze repräsentiert ist, ein gemeinsames Bezugssystem sinnvoll. Dieses stellte in diesem Projekt das Nivellementnetz dar. Aus Gründen, die in Kapitel 3 und Kapitel 8 dargestellt wurden können sich dadurch jedoch bei Umkehr des Bewegungssinnes innerhalb der vergleichsweise langen Nivellementbeobachtungsperiode Fehlinterpretationen ergeben, sofern Absolutbewegungen interpretiert werden. Es wird hier vielmehr empfohlen auch in auf ein gemeinsames Bezugssystem bezogenen Datensätzen die Interpretation auf Relativbewegungen innerhalb der gleichen Zeitscheibe zu beziehen. Vor allem die ERS-Zeitscheibe liefert ein differenziertes Bild von Hebungs- und Senkungsräumen, das in Übereinstimmung zu geologischen/tektonischen Teilräumen gebracht werden kann. Prominent erscheint vor allem das Senkungszentrum des Neuwieder Beckens innerhalb des erweiterten Senkungsfeldes des Mittelrheinischen Beckens. Das östlich und nördlich daran anschließende Osteifelvulkanfeld und das tertiäre Vulkanfeld stellen dagegen einen Hebungsraum dar. Nach Westen im Westeifelvulkanfeld kehrt sich der Bewegungssinn wieder und erneut in der Trier-Bitburger-Mulde (Trierer Bucht).

In der folgenden (ASAR-)Zeitscheibe tritt die zuvor für die ERS-Zeitscheibe beschriebene an geologischen Räumen orientierte Ost-West-Differenzierung zurück. Stattdessen drängt sich als großräumiges Bild eine NW-SE-Differenzierung mit Hebung im zentralen Hunsrück auf.

## Fazit

Grundsätzlich sind Bodenbewegungen für sehr viele und auch sehr unterschiedliche Fragestellungen innerhalb einer geowissenschaftlichen Behörde von Interesse. Dies betrifft beispielsweise Fragestellungen der Landesaufnahme, der Bodenkunde, der Hydrogeologie und der Ingenieurgeologie.

Aus sachlicher Sicht sind grundsätzlich Bodenbewegungen, die aufgrund natürlicher Prozesse stattfinden, von künstlich verursachten zu unterscheiden.

Natürliche Bewegungen können sowohl in Verbindung mit sehr großräumigen, wie regionalen Bewegungen der Erdkruste, als auch beschränkt auf kleinere Flächen, wie Senkungen über Karst-Hohlräumen, auftreten. Natürliche Massenbewegungen können Flächen von wenigen m<sup>2</sup> bis zu mehreren km<sup>2</sup> einnehmen.

Die Ursachen für künstlich verursachte Bodenbewegungen können sehr vielfältig sind. Beispiele hierfür sind Senkungen infolge Fluid-Entnahmen, Senkungen über aktiven oder stillgelegten Bergbaugebieten (Tiefbau), durch anthropogenen Einfluss ausgelöste Massenbewegungen und Sackungen von aufgefüllten Flächen (Halden, Deponien u.a.).

Wie gezeigt werden konnte, können standardisierte Auswertungen, das heißt ohne Anpassung an die jeweiligen Bewegungstypen, -abläufe und -geschwindigkeiten sowie nur über begrenzte Zeitabschnitte vorhandene Geländepunkte, mit einem hohen Verlust an Datenpunkten verbunden sein. Entsprechendes gilt für das automatisierte Abschneiden von Extremwerten. Dies zeigt, dass Auswertungen flexibel und in Kooperation mit den Anwendern vorzunehmen sind.

## 10. Ausblick

Der vorliegende Bericht basiert auf der Auswertung von historischen ERS 1/2- und ASAR-Daten und daraus gewonnener „Permanent Scatterer (PSI)“-Bewegungen. Im Laufe des Projektes konnten sowohl der zweifelsfreie Nutzen als auch die Einschränkungen dieser Daten aufgezeigt werden. Zwischenzeitlich stehen neuere Satellitengenerationen sowie alternative Auswertungen, wie die SBAS-Prozessierung, zur Verfügung. Für die Zukunft sind weitere Erkundungs- und Auswertungssysteme zu erwarten. Es ist sicher, dass hierdurch auch eine zunehmende Verbesserung



im Hinblick auf die Einsatzmöglichkeiten bei der behördlichen Arbeit zu erwarten ist. Ein Ausblick hierzu hat der Copernicus-Workshop am 20.05.2015 in Hannover gegeben.

Abschließend ergeht der Hinweis, dass der tatsächliche Einsatz von satellitengestützten Fernerkundungsdaten letztlich von der effektiven Verfügbarkeit in den Behörden abhängt. Einschränkungen können sich sowohl aufgrund nicht ausreichender Mittel für Sachkosten als auch nicht ausreichendem und/oder nicht entsprechend qualifiziertem Personal ergeben.

## Referenzen

- [1] Riedmann, M. (Astrium Services – Infoterra GmbH, 2013): Satellitengestützte historische Bodenbewegungsmessungen in ehemaligen Bergbaugebieten und im Moseltal, Rheinland-Pfalz, Prozessierungsbericht, 23 S., unveröff..
- [2] Mares, M.(TRIGIS Geoservices GmbH, 2014): Prozessierungsbericht, PSInsar-Prozessierung für das Untersuchungsgebiet in der Rhein-Mosel-Region. Teilgebiet 1: Envisat – Track 337, 8 S., unveröff..
- [3] Mares, M.(TRIGIS Geoservices GmbH, 2014): Prozessierungsbericht, PSInsar-Prozessierung für das Untersuchungsgebiet in der Rhein-Mosel-Region. Teilgebiet 2: Envisat – Track 337, 6 S., unveröff..
- [4] Mares, M.(TRIGIS Geoservices GmbH, 2014): Prozessierungsbericht, PSInsar-Prozessierung für das Untersuchungsgebiet in der Rhein-Mosel-Region. ERS-1/ERS-2 – Track 29, 6 S., unveröff..
- [5] Mares, M.(TRIGIS Geoservices GmbH, 2014): Prozessierungsbericht, PSInsar-Prozessierung für das Untersuchungsgebiet in der Rhein-Mosel-Region. Teilgebiet 1: ERS-1/ERS-2 – Track 65, 7 S., unveröff..
- [6] Mares, M.(TRIGIS Geoservices GmbH, 2014): Prozessierungsbericht, PSInsar-Prozessierung für das Untersuchungsgebiet in der Rhein-Mosel-Region. Teilgebiet 2: ERS-1/ERS-2 – Track 65, 13 S., unveröff..
- [7] Mares, M.(TRIGIS Geoservices GmbH, 2014): Prozessierungsbericht, PSInsar-Prozessierung für das Untersuchungsgebiet in der Rhein-Mosel-Region. Teilgebiet 1: ERS-1/ERS-2 – Track 337, 6 S., unveröff..
- [8] Mares, M.(TRIGIS Geoservices GmbH, 2014): Prozessierungsbericht, PSInsar-Prozessierung für das Untersuchungsgebiet in der Rhein-Mosel-Region. Teilgebiet 2: ERS-1/ERS-2 – Track 337, 7 S., unveröff..
- [9] Mares, M.(TRIGIS Geoservices GmbH, 2014): Prozessierungsbericht, PSInsar-Prozessierung für das Untersuchungsgebiet in der Rhein-Mosel-Region. Teilgebiet 3: ERS-1/ERS-2 – Track 337, 6 S., unveröff..
- [10] Mares, M.(TRIGIS Geoservices GmbH, 2014): Prozessierungsbericht, PSInsar-Prozessierung für das Untersuchungsgebiet in der Rhein-Mosel-Region. ERS-1/ERS-2 – Track 487, 10 S., unveröff..
- [11] LVERMGEO Rheinland-Pfalz: Die im Bericht verwendeten Daten der Feinnivellementlinien Nr. 20-22 und Nr. 204 wurden vom LVERMGEO RLP

freundlicherweise mit freien Höhen versehen (Ursprung Koblenz) zur Verfügung gestellt.

Auch alle im Bericht verwendete Luftbilder und das Laser-Höhenmodell wurden dem LGB RLP vom LVERMGEO RLP zur Verfügung gestellt.

- [12] Oliver, M.A. (1990)\_ Kriging – A method of interpolation für Geographical Information Systems. Int. J. of Geogr. Inf. Systems, 4, 313-332.
- [13] Rogall, M. & Möbus, H.-M. (2005): Hangstabilitätskarte Mittelmosel 1 : 20.000 Bereich Bernkastel-Kues.- Karte mit Erläuterungen, Landesamt für Geologie und Bergbau Rheinland-Pfalz 2005.
- [14] Wehinger, A. (LGB RLP, 2012): B50 neu – Platten-Longkamp, Beweissicherung Graach/Graacher Schäferei – Geotechnische Stellungnahme, 13 S., unveröff..
- [15] Die GPS-Vermessung der Corner Reflektoren und Inclinometeransatzpunkte erfolgt durch den Landesbetrieb Mobilität RLP, Dienststelle Trier.
- [16] <http://www.moselschiefer-strasse.de/mayen/katzenberg/bergwerk.html>
- [17] LGB RLP (2003): Geologische Übersichtskarte von Rheinland-Pfalz im Maßstab 1:300,000 (GÜK 300),



