

Zwischenbericht Umwelt 4.0

- Cluster I -

Nutzung digitaler Geländemodelle und Copernicus-Daten

Prof. Dr.-Ing. Dorota Iwaszczuk¹, Prof. Dr. Andreas Henk², Dr. Benjamin Homuth³, Dr. Michael Rudolf², Dr.-Ing. Torben Treffeisen² & Katrin Krzepek¹
31. Dezember 2022

¹Technische Universität Darmstadt, Fachgebiet Fernerkundung und Bildanalyse

²Technische Universität Darmstadt, Fachgebiet Ingenieurgeologie

³Hessisches Landesamt für Naturschutz, Umwelt und Geologie



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DARMSTADT



Für eine lebenswerte Zukunft



digitales.hessen

WO ZUKUNFT ZUHAUSE IST

Inhaltsverzeichnis

1 Kurze Darstellung	4
1.1 Aufgabenstellung	4
1.2 Planung und Ablauf des Vorhabens	5
1.2.1 AP 1: Datenzusammenstellung und Lieferung	5
1.2.2 AP 2: Datenaufbereitung	6
1.2.3 AP 3: Identifikation von Bewegungsgebieten	7
1.2.4 AP 4: Test der Zusammenführung der Datensätze (in Pilotregionen)	8
1.2.5 AP 5: Plausibilitätsprüfungen und Verwendbarkeit weiterer Daten	9
1.2.6 AP 6: Berichterstellung und Datenabgabe	10
2 Eingehende Darstellung	11
2.1 Verwendung der Zuwendung und erzielte Ergebnisse	11
2.1.1 AP 1: Datenzusammenstellung und Lieferung	11
2.1.2 AP 2: Datenaufbereitung	12
2.1.3 AP 3: Identifikation von Bewegungsgebieten	16
2.1.4 AP 4: Test der Zusammenführung der Datensätze (in Pilotregionen)	35
2.1.5 AP 5: Plausibilitätsprüfungen und Verwendbarkeit weiterer Daten	36
2.1.6 AP 6: Berichterstellung und Datenabgabe	41
2.2 Erfolgte oder geplante Veröffentlichung der Ergebnisse	41
3 Zusammenfassung und Ausblick	42

Zusammenfassung

Großflächige Setzungen und Hebungen stellen eine erhebliche Gefährdung für Gebäude dar. Diese werden vor allem durch sich ändernde Grundwasserstände und Bergbautätigkeiten hervorgerufen. Während die Absenkung des Grundwassers oder Bodens durch Bergbau, Industrie oder Baumaßnahmen regional leicht eingrenzbar ist, können klimawandelbedingte Veränderungen nur schlecht vorhergesagt werden. Bereits heute können Schäden an Gebäuden in Kassel, Offenbach und Wiesbaden beobachtet werden, die sich vermutlich auf solche Bodenbewegungen zurückführen lassen. Satellitenbeobachtungen über einen längeren Zeitraum liefern präzise Bewegungsdaten von Bauwerken und Strukturen im Abstand von wenigen Tagen. Aus regelmäßigen Befliegungen mit flugzeuggestützten Laserscannern können hochaufgelöste digitale Gelände- und Oberflächenmodelle erstellt werden. Diese Daten werden in diesem Projekt zusammengeführt und mit weiteren Datenquellen, wie z.B. geologischen Karten, bekannten setzungsempfindlichen Schichten, hydrogeologischen und klimatischen Daten verknüpft. So können auftretende Bodenbewegungen und sogar Massenbewegungen bereits früh erkannt werden und ggf. Maßnahmen eingeleitet werden. Anhand dieser Ergebnisse können zukünftige Entscheidungen zu Vorschriften oder auch Informationen für die breite Öffentlichkeit zu Risikogebieten erstellt werden.

Betrachtet man die Datensätze unabhängig voneinander, kann man Bodenbewegungen gut detektieren. So konnte für die InSAR Daten ein Tool entwickelt werden, welches automatisch Regionen mit starker Bewegung detektiert (Ground Motion Analyzer). Vorteile der LiDAR Daten sind die hohe räumliche Auflösung und die Möglichkeit auch kleinräumige Bewegungen ($<5 \times 5$ m) unterhalb von Vegetationsbedeckung zu erkennen, beispielsweise das erneute Spüren von Waldwegen oder die Anlage von Rückegassen. Nachteilig ist die geringe zeitliche Auflösung von mehreren Jahren zwischen den Befliegungen. Im Gegensatz dazu zeigen die InSAR Messungen eine sehr hohe zeitliche Auflösung von ca. 6 Tagen zwischen den Datenpunkten. Es können sogar jahreszeitliche Schwankungen gut erkannt und gemessen werden. Allerdings ist die räumliche Verteilung der Punkte zufällig und stark heterogen, so ist in Städten die Punktdichte extrem hoch und in unbebauten Regionen quasi nicht vorhanden. Ein weiteres Problem sind starke Schwankungen sowohl innerhalb einer Zeitreihe eines Persistent Scatterer (PS) als auch zwischen benachbarten PS.

Es kann gezeigt werden, dass die Datengrundlage zwar das Untersuchungsgebiet weitestgehend abdeckt, allerdings einzelne Datensätze weiter prozessiert oder gänzlich Neuberechnet werden müssen. Vorallem die Differenzenpläne basieren auf ungenau referenzierten Höhenmodellen, welches zu vielen Anomalien und Ungenauigkeiten führt. So werden Gebäude und Vegetation entfernt, dies erzeugt bei ersten häufig starke Interpolationseffekte und bei letzteren verbleiben oft Artefakte im Modell. Daher müssen vor allem die bebauten Regionen, wie Straßen und Städte, aus den Differenzenplänen entfernt werden. Dies hat aber zur Folge, dass nun kaum noch ein Vergleich mit den InSAR Daten möglich ist, da in genau diesen Regionen die meisten PS auftreten. Trotz der Unzulänglichkeiten konnte eine Klassifikation von Bodenbewegungen in den ausgewiesenen Pilotregionen erfolgen. Eine abschließende Beurteilung von einzelnen Hebungen und Senkungen war durch die Verknüpfung mit weiteren Datenquellen möglich, wenngleich in den meisten Fällen die Bewegung aus obigen Gründen nur in einem der beiden Datensätzen erkennbar war.

1 Kurze Darstellung

1.1 Aufgabenstellung

Das Projekt unterteilt sich in mehrere Arbeitspakete welche die unterschiedlichen Aspekte des Projekts beleuchten. Hauptaufgabe ist die Zusammenstellung und Verknüpfung von satelliten- und lasergestützten Bodenbewegungsinformationen mit ingenieurgeologischen Informationen. Im Folgenden werden die einzelnen Arbeitspakete (AP) kurz zusammengefasst:

AP 1: Sammlung der Daten und Akquise weiterer notwendiger Datenquellen, diese werden den Projektpartnern zur Verfügung gestellt. Hierfür werden punkthafte InSAR Daten, flächenhafte Laserscandaten und weitere, gemischte geowissenschaftliche Daten in einem GIS-kompatiblen Format geliefert.

AP 2: Aufbereitung der Daten und Visualisierung von Punktdaten in einem aussagekräftigen, flächenhaften Format. Zunächst soll dies in Pilotregionen getestet werden und im Anschluss auf ganz Hessen ausgeweitet werden.

AP 3: In den Pilotregionen sollen nun Senkungs- und Hebungsgebiete identifiziert werden und möglichst auf ihre Plausibilität und Ursache untersucht werden. Ein weiteres Ziel ist ein Kriterienkatalog anhand dessen die Art einer Bodenbewegung klassifiziert werden kann sowie ein Bodenbewegungsatlas in dem die erkannten Bewegungen kartiert werden.

AP 4: Die Daten sollen nun in den Pilotregionen zusammengeführt werden, sodass zum einen die Vergleichbarkeit der beiden Methoden (InSAR und Lidar) geprüft werden kann und zum anderen eine bessere Abdeckung von Bodenbewegungen in den jeweiligen Regionen erzielt werden kann. Die unterschiedliche räumliche Abdeckung, InSAR in Siedlungen ↔ Lidar in unbebauten Regionen, soll hierbei zu einem insgesamt besseren Bild der Bodenbewegungen führen.

AP 5: Anhand von einzelnen Beispielen aus den vorhergehenden Untersuchungen soll eine tiefere Analyse der Ursachen mit weiteren Informationen (Wetter, andere geodätische Quellen, etc...) zeigen welche zusätzlichen Datenquellen mit den vorhandenen Daten verknüpft werden sollten.

AP 6: Abschließend sollen die Ergebnisse in einem Endbericht zusammengefasst werden und zusammen mit den prozessierten Daten dem HLNUG übergeben werden.

1.2 Planung und Ablauf des Vorhabens

1.2.1 AP 1: Datenzusammenstellung und Lieferung

Im AP 1 sollen durch das HLNUG alle zur Bearbeitung des Projektes notwendigen Daten (Sentinel-1-BBD-Daten, DGM, Differenzenpläne, Informationen zu Massenbewegungen und setzungsempfindlichen Schichten, bekannten Setzungsschäden, weitere geologische Fachdaten) gesammelt und den Projektpartnern zur weiteren Bearbeitung bereitgestellt werden. Eine detaillierte Auflistung der für das Projekt notwendigen Daten wird in Abstimmung mit der TU Darmstadt durch das HLNUG erstellt. Im Anschluss schließen die Partner eine entsprechende Datenüberlassungsvereinbarung. Diese Aufgaben werden vom HLNUG übernommen.

Einzelschritte und Zeitplanung:

- Datensammlung und Datenbereitstellung für Gesamthessen
- Abschluss einer Datenüberlassungsvereinbarung

Zeitaufwand insgesamt: 1 Monat

Partner: HLNUG

Zielerreichung Die Daten wurden gesammelt und den Projektpartnern auf einer Festplatte zur Verfügung gestellt. Die Daten umfassen digitale Gelände- und Höhenmodelle, sowie Differenzenpläne und verschiedene (ingenieur-)geologische Geodatenbanken, die den veröffentlichten Daten im Geologieviewer des HLNUG entsprechen.

1.2.2 AP 2: Datenaufbereitung

In AP 2 sollen die gelieferten Daten des Bodenbewegungsdienstes (BBD) nach den Vorgaben des Arbeitskreises 6 des Direktorenkreises der Staatlichen Geologischen Dienste aufbereitet werden und in einem GIS-Projekt dargestellt werden. In einem zweiten Schritt soll darauf aufbauend ein Workflow erstellt werden, wie eine flächige Darstellung der Daten (z.B. Kachelansicht) für Hessen ermöglicht werden kann. Die Daten sollen dann nach diesem neuen Workflow aufbereitet werden. Dies erfolgt zunächst anhand vom HLNUG definierten Pilotregionen. Diese Arbeiten werden vom HLNUG in Kooperation mit dem Fachgebiet Fernerkundung und Bildanalyse der TU Darmstadt durchgeführt.

Einzelschritte und Zeitplanung:

- Darstellung des neuen BBD-Datensatzes nach Vorgaben des AK 6 des Direktorenkreises der Staatlichen Geologischen Dienste (Zeitaufwand: 1 Woche)
- Erstellen eines Workflows für die flächige Darstellung der Copernicus-Daten und Bereitstellung für Anwendung am HLNUG (Zeitaufwand: 3 Wochen)
- Aufbereitung der Daten des BBD nach neuem Workflow hin zu einer flächigen Aussagekraft z.B. durch Kachelansicht (Ziel: für Gesamthessen; in 2022: Probe anhand von Pilotregionen) (Zeitaufwand: 3 Monate)

Zeitaufwand insgesamt: 4 Monate

Partner: HLNUG, Fachgebiet Fernerkundung und Bildanalyse TU Darmstadt

Zielerreichung Die BBD Daten wurden nach den Vorgaben des AK 6 in einem ArcGIS Pro Projekt dargestellt. Für die flächige Darstellung wurde der Workflow "Kacheldarstellung" entwickelt. Mittels diesen Workflows wurden die BBD Daten für ganz Hessen flächenhaft dargestellt.

1.2.3 AP 3: Identifikation von Bewegungsgebieten

Aus den gelieferten Daten sollen in AP 3 Senkungs- und Hebungsgebiete in Hessen identifiziert werden. Dies erfolgt parallel in Zusammenarbeit mit den Fachgebieten Ingenieurgeologie und Fernerkundung und Bildanalyse der TU Darmstadt und dem HLNUG.

Einzelschritte und Zeitplanung:

- Identifikation von Senkungs-/Hebungsgebieten in Hessen aus Laserscan-Daten (DGM und Differenzpläne) - Fachgebiet Ingenieurgeologie, HLNUG (Ziel: für Gesamthessen; Probe anhand von Pilotregionen) (Zeitaufwand: 2 Monate)
- Identifikation von Senkungs-/Hebungsgebieten in Hessen aus Copernicus-Daten (Sentinel-1-BBD) - Fachgebiet Fernerkundung und Bildanalyse, HLNUG (Ziel: für Gesamthessen; Probe anhand von Pilotregionen) (Zeitaufwand: 2 Monate)

Zeitaufwand insgesamt: 2 Monate

Partner: HLNUG, Fachgebiet Ingenieurgeologie und Fachgebiet Fernerkundung und Bildanalyse TU Darmstadt

Zielerreichung Es wurde ein einheitlicher Workflow für die Klassifikation von Senkungs- und Hebungsgebieten erstellt. Diese liegen als Jupyter-Notebooks in ArcGIS vor. Verschiedene Objekte wie beispielsweise Gebäude, Straßen und Gewässer werden hierbei nochmals mit einem Puffer versehen und aus den Höhenmodellen und Differenzplänen ausgeschnitten. Im Anschluss erfolgt eine manuelle Klassifikation der vorhandenen Hebungen und Senkungen anhand einfacher Kriterien. Da die Datengrundlage nicht in ausreichender Qualität vorlag, wurde keine Klassifikation für ganz Hessen vorgenommen.

1.2.4 AP 4: Test der Zusammenführung der Datensätze (in Pilotregionen)

AP 4 sieht die testweise Zusammenführung der unterschiedlichen Datensätze (Verschnitt aus Sentinel-Daten und aus DGM-Daten) vor. Wie dies genau durchgeführt werden kann, muss zuerst innerhalb des Projektes erforscht werden und anhand von Pilotregionen getestet werden. Um die Datensätze miteinander vergleichen und eventuell verschneiden zu können, müssen die Zeitscheiben aus den DGM-Differenzenplänen und den Sentinel-Daten angepasst werden. Diese Arbeiten werden in Zusammenarbeit mit den Fachgebieten Ingenieurgeologie und Fernerkundung und Bildanalyse der TU Darmstadt und dem HLNUG durchgeführt.

Einzelschritte und Zeitplanung:

- Zusammenführung der Datensätze (Verschnitt aus Sentinel-Daten und aus DGM-Daten, Zeitscheibenerstellung) - Fachgebiet Fernerkundung und Bildanalyse, Fachgebiet Ingenieurgeologie, HLNUG (Ziel: für Gesamthessen; Probe anhand von Pilotregionen)

Zeitaufwand insgesamt: 2 Monate

Partner: HLNUG, Fachgebiet Ingenieurgeologie und Fachgebiet Fernerkundung und Bildanalyse TU Darmstadt

Zielerreichung Die Zusammenführung der Datensätze konnte bisher nicht durchgeführt werden, da die Höhenmodelle und Differenzenpläne nicht ausreichend geodätisch korrigiert waren. Weitere Probleme bereitet die unterschiedliche räumliche Abdeckung, die erfassten Zeiträume sowie die vertikale Genauigkeit der Daten.

1.2.5 AP 5: Plausibilitätsprüfungen und Verwendbarkeit weiterer Daten

In AP 5 sollen die Messdaten in den Pilotregionen auf Plausibilität und mögliche geologische Ursachen für vorgefundene Bodenbewegungen geprüft werden. Des Weiteren soll überprüft werden, ob weitere Datenquellen nützliche Zusatzinformationen liefern können und ob diese mit den Satelliten- und Laserscandaten sinnvoll verknüpft werden können. Dies erfolgt parallel in Zusammenarbeit mit den Fachgebieten Ingenieurgeologie und Fernerkundung und Bildanalyse der TU Darmstadt und dem HLNUG.

Einzelschritte und Zeitplanung:

- Plausibilitätsprüfungen einzelner engräumiger Senkungsgebiete (oder sogar einzelner PSI) auf geologische Ursachen - Fachgebiet Ingenieurgeologie (Ziel: für Gesamthessen; Probe anhand von Pilotregionen) (Zeitaufwand: 2 Monate)
- Prüfung weiterer Datenquellen (TerraSar-X, GPS, Nivellementmessungen, Inklinometermessungen, ...) auf Anwendbarkeit in Hessen und Verknüpfung mit den Satelliten- und Laserscandaten - Fachgebiet Fernerkundung und Bildanalyse, HLNUG (Ziel: für Gesamthessen; Probe anhand von Pilotregionen) (Zeitaufwand: 1 Monat)

Zeitaufwand insgesamt: 2 Monate

Partner: HLNUG, Fachgebiet Ingenieurgeologie und Fachgebiet Fernerkundung und Bildanalyse TU Darmstadt

Zielerreichung Es konnten anhand der Bodenbewegungsdienstdaten mehrere Regionen innerhalb der Pilotregionen mit Hebungen und Senkungen identifiziert werden. Im Rahmen einer Detailstudie wurden Hebungsbewegungen und starke jahreszeitliche Schwankungen im Raum Crumstadt untersucht (Abschnitt 2.1.5.1). In dieser Detailstudie wurden weitere Datenquellen, wie beispielsweise Wetterdaten und geologische Informationen, zusätzlich mit den bisherigen Informationen verschnitten. Ebenfalls konnten die PSI-Daten mit GNSS Messungen aus Südhessen verglichen werden. Weiteres Ergebnis dieses APs ist ein Pythonmodul zur einfachen und schnellen Zeitreihenanalyse von einzelnen PSI-Punkten oder über größere Regionen.

1.2.6 AP 6: Berichterstellung und Datenabgabe

Im abschließenden AP 6 soll der Endbericht ausgearbeitet und die erstellten Ergebnisse zwischen den Partnern ausgetauscht und soweit möglich öffentlich zur Verfügung gestellt werden. Diese Arbeiten werden in Zusammenarbeit mit den Fachgebieten Ingenieurgeologie und Fernerkundung und Bildanalyse der TU Darmstadt und dem HLNUG durchgeführt.

Einzelschritte und Zeitplanung:

- Berichterstellung und Zurverfügungstellung entsprechender GIS-Projekte zur Einbindung in den Geologie Viewer des HLNUG zur Veröffentlichung

Zeitaufwand insgesamt: 1 Monat

Partner: HLNUG, Fachgebiet Ingenieurgeologie und Fachgebiet Fernerkundung und Bildanalyse TU Darmstadt

Zielerreichung Im Dezember 2022 wurde dieser Zwischenbericht erstellt und die prozessierten Daten zwischen den Projektpartnern ausgetauscht.

2 Eingehende Darstellung

2.1 Verwendung der Zuwendung und erzielte Ergebnisse

2.1.1 AP 1: Datenzusammenstellung und Lieferung

Die Daten wurden gesammelt und den Projektpartnern auf einer Festplatte zur Verfügung gestellt. Die Daten umfassten:

- BBD 2021 PSI
- DGM1 2014
- DGM1 2019
- DGM1 2021
- DGM-Differenzenplan 2014-2019
- DGM-Differenzenplan 2019-2021
- Polygone der Pilotregionen
- Informationen und Datenbanken zu (entsprechend der veröffentlichten Daten im Geologieviewer des HLNUG):
 - Erdfällen
 - Karstgefährdungen
 - Rutschungen
 - Setzungen
 - Steinschlägen
 - Gebäudeschäden
 - Gravitative Massenverlagerungen
 - Karsterscheinungen
 - Setzungsempfindliche Schichten

2.1.2 AP 2: Datenaufbereitung

Im Zuge des Arbeitspakets 2 wurde der BBD-Datensatz nach Vorgabe des AK 6 der Staatlichen Geologischen Dienste in einem ArcGIS Pro Projekt dargestellt. Die kommerzielle Software ArcGIS Pro verfügt im Gegensatz zur freien Software QGIS nicht über die Möglichkeit, Layerdarstellungen als Stil speichern zu können (siehe Abbildung 1).

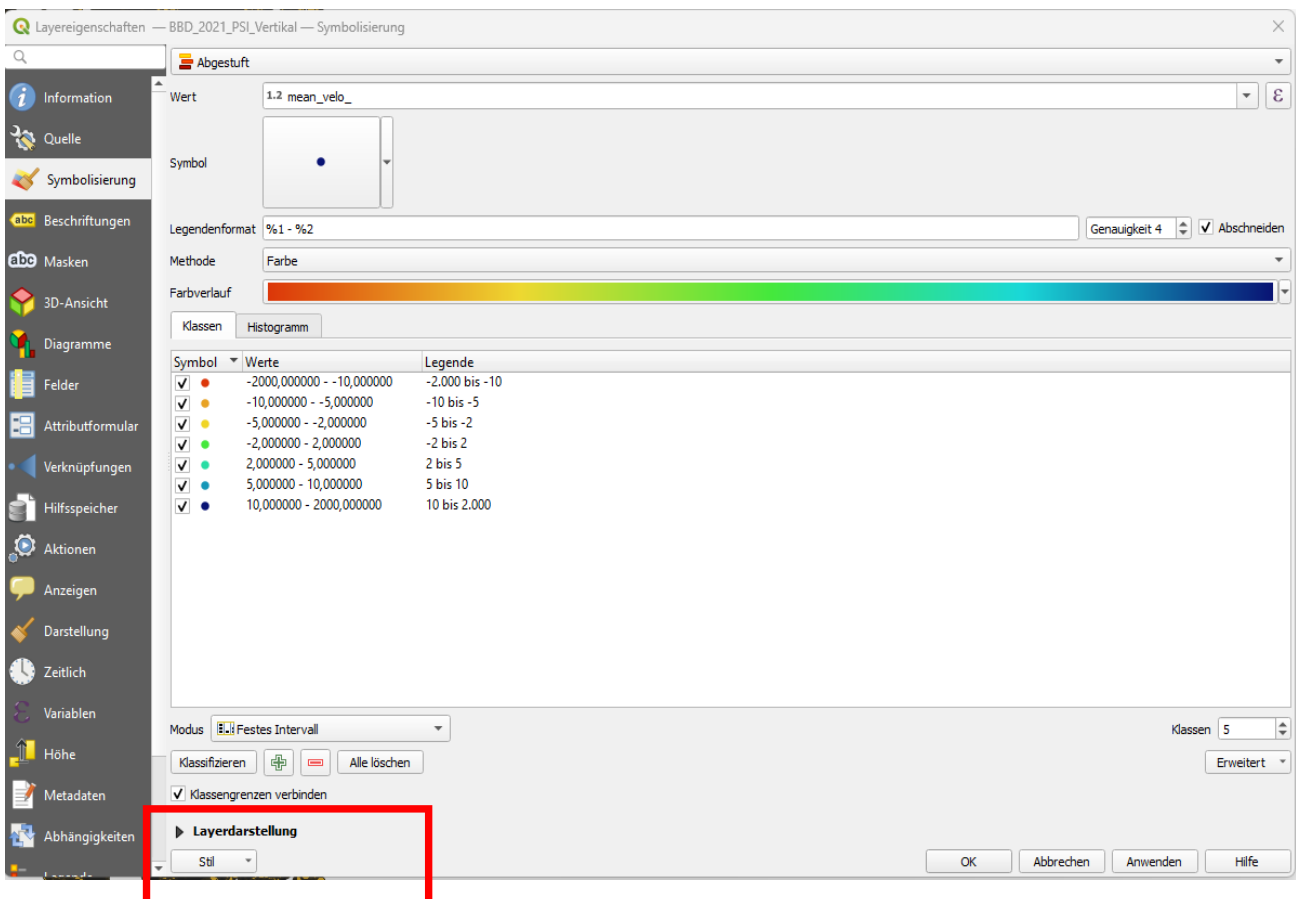


Abbildung 1: Die Festlegung der Symbolisierung mit freier Wahl der Grenzwerte ist in QGIS möglich. Die Symbolisierung eines Layers kann als .qml Datei gespeichert und auf alle folgenden Layer übertragen werden.

In ArcGIS Pro werden die Maximalwerte der Symbolisierung automatisch aus dem Datensatz entnommen und können nicht erweitert werden (Abbildung 2A). Es kann mittels des Tools „Apply Symbology From Layer“ (Abbildung 2B) die Symbologie eines Layers auf einen anderen Layer übertragen werden. Hier muss neben den Layern auch das Feld auf das sich die Darstellung bezieht ausgewählt werden. In Bezug auf die Bodenbewegung ist dies die mittlere Geschwindigkeit. Da die mittlere Geschwindigkeit je nach Datensatz einen leicht unterschiedlichen Namen erhalten hat z.B. „mean_velo_east“ für die mittlere Geschwindigkeit in Ost-West Richtung und „mean_velo_“ für die mittlere Geschwindigkeit in vertikaler Richtung, ist hier eine Automatisierung schwer umsetzbar. Zudem ist darauf zu achten, dass im Feld „Update Symbology by Data“ die Option

„Update ranges“ ausgewählt ist, da sonst Daten, die außerhalb des Wertebereichs des ersten Layers liegen, nicht dargestellt werden. Abbildung 2C zeigt, dass die Grenzwerte des ersten Layers übernommen wurden. Es ist ratsam, in der Statistik der Layer zu kontrollieren, dass das Minimum und das Maximum innerhalb der Darstellung liegen.

Bezogen auf die flächenhafte Darstellung der BBD Daten wurden Tests mit verschiedenen geostatistischen Methoden (Kriging-Verfahren, TIN-Modell, IDW) durchgeführt, bevor sich für die Kacheldarstellung entschieden wurde. Es wurde mittels der Funktion „Point to Raster“ ein Workflow erarbeitet zur flächenhaften Darstellung der PSI-Daten in vertikaler und Ost-West Richtung (siehe Abbildung 3). Im ersten Schritt wurden die Daten nach einer Varianz kleiner eins gefiltert. Die Histogramme der Datensätze zeigen, dass ein Großteil der Daten unter dieser Varianz liegen. Durch diese Filterung wird ein gleichmäßigeres Erscheinungsbild mit weniger Ausreißern erreicht. Für die Kacheldarstellung wurden im „Point to Raster“ Tool folgende Parameter gesetzt:

- Value field: mean_velo_ bzw. mean_velo_east
- Cell assignment type: mean
- Priority field: NONE
- Cellsize: snapraster.tif

Innerhalb des GIS-Tools kann die Rastergröße der resultierenden Kacheldarstellung beliebig eingestellt werden (Abbildung 4). Als sinnvoll beurteilt wurde eine Rastergröße von 250 m in Anlehnung an den »Bodenbewegungskataster NRW«. Die Kachelgröße von 250 m eignet sich als guter Kompromiss zwischen der detaillierten Darstellung und der Wahrung des Datenschutzes. Zur Visualisierung wurden die selben Wertebereiche wie zuvor bei der Punktdarstellung gewählt (siehe Abbildung 4). Die Transparenz des Layers wurde auf 50 % gesetzt.

Symbology - BBD_2021_PSI_Ost_West

Primary symbology

Graduated Colors

Field: mean_velo_east

Normalization: <None>

Method: Manual Interval

Classes: 7

Color scheme: [Color gradient]

Classes Histogram Scales

Symbol	Upper value	Label
•	≤ -10	-292,600006 - -10,000000
•	≤ -5	-9,999999 - -5,000000
•	≤ -2	-4,999999 - -2,000000
•	≤ 2	-1,999999 - 2,000000
•	≤ 5	2,000001 - 5,000000
•	≤ 10	5,000001 - 10,000000
•	≤ 161,5	10,000001 - 161,500000
•	< out of range >	< out of range >

Geoprocessing

Apply Symbology From Layer

Parameters Environments

Input Layer: BBD_2021_PSI_Vertikal

Symbology Layer: BBD_2021_PSI_Ost_West

Symbology Fields

Type: Value field

Source Field: mean_velo_east

Target Field: mean_velo_

Update Symbology Ranges by Data: Update ranges

Symbology - BBD_2021_PSI_Vertikal

Primary symbology

Graduated Colors

Field: mean_velo_

Normalization: <None>

Method: Manual Interval

Classes: 7

Color scheme: [Color gradient]

Classes Histogram Scales

Symbol	Upper value	Label
•	≤ -10	-292,600006 - -10,000000
•	≤ -5	-9,999999 - -5,000000
•	≤ -2	-4,999999 - -2,000000
•	≤ 2	-1,999999 - 2,000000
•	≤ 5	2,000001 - 5,000000
•	≤ 10	5,000001 - 10,000000
•	≤ 161,5	10,000001 - 161,500000
•	< out of range >	< out of range >

Statistics

Count	435504
Minimum	-160,00
Maximum	129,00
Mean	-0,38
Standard deviation	1,70

Abbildung 2: Festlegung der Symbolisierung in ArcGIS Pro (A), Übertragung der Symbolisierung auf andere Layer. Zu beachten ist die Auswahl von Source Field und Target Field, sowie die Anpassung der Symbolisierung auf den veränderten Wertebereich (B). Nach dem Übertragen auf einen neuen Datensatz empfiehlt es sich, die Maximal- und Minimalwerte zu überprüfen, um sicherzugehen, dass alle Daten korrekt dargestellt werden (C).

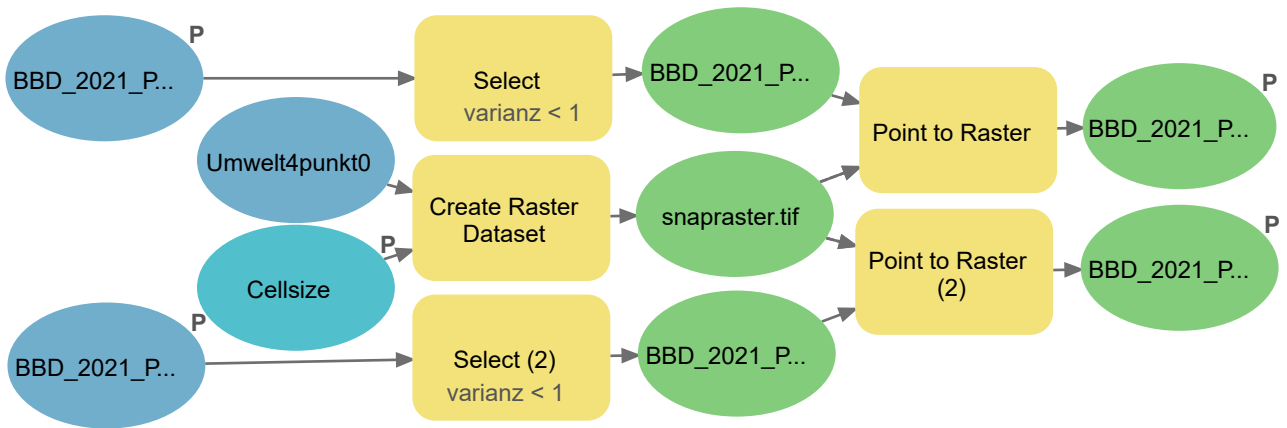


Abbildung 3: Workflow Kacheldarstellung: Filterung der Daten nach Varianz kleiner 1, Darstellung mittels "Point to Raster" mit anpassbarer Kachelgröße

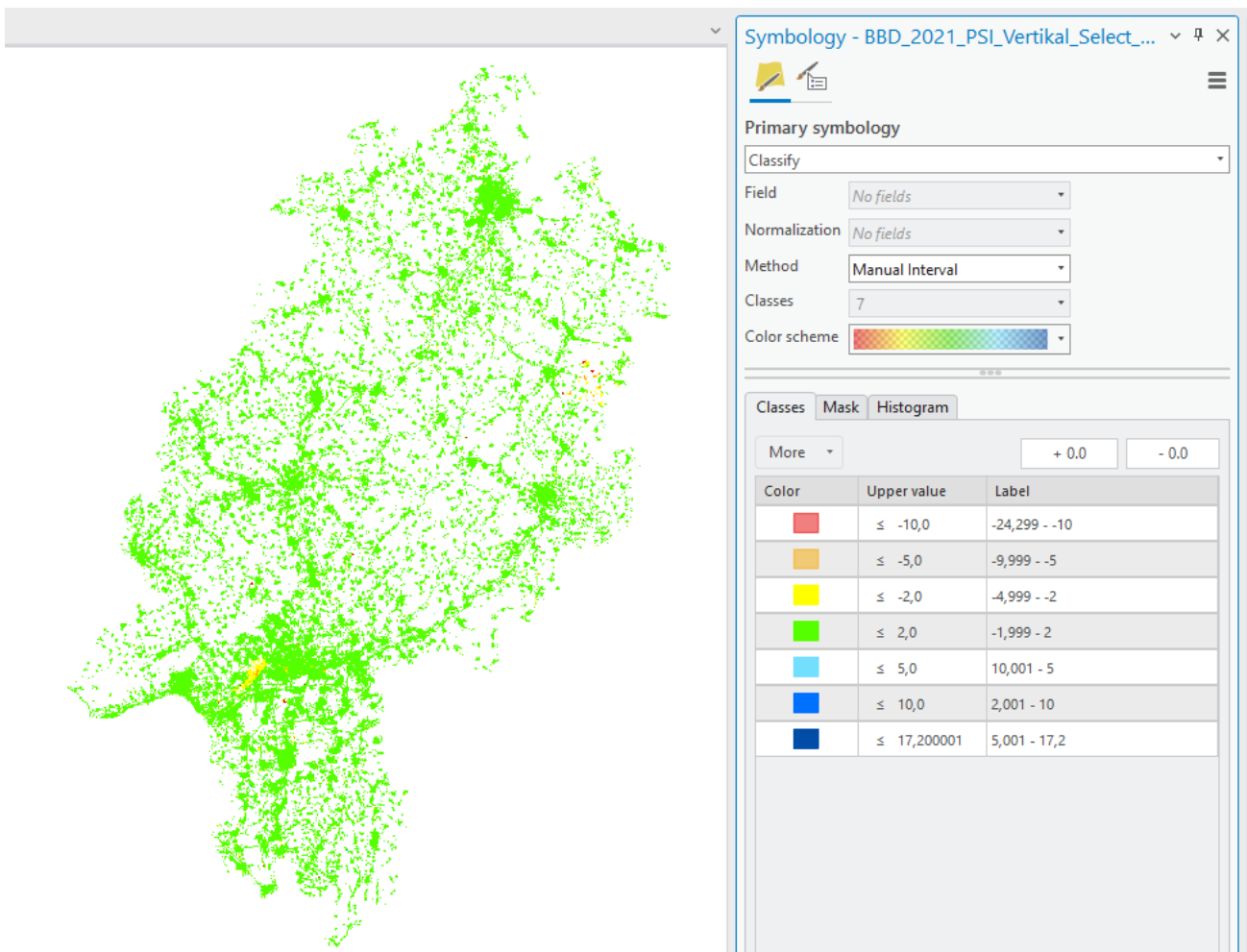


Abbildung 4: Ergebnis der Kacheldarstellung der vertikalen mittleren Geschwindigkeit für ganz Hessen. Die Darstellung entspricht der Farbgebung der Punktdaten

2.1.3 AP 3: Identifikation von Bewegungsgebieten

Im Laufe von AP 3 und der Identifikation von Senkungs-/Hebungsgebieten in Hessen aus Laserscan-Daten (DGM und Differenzenpläne) zeigten sich Herausforderungen in Bezug auf die Inputdaten, insbesondere im Hinblick auf die angenommene Genauigkeit und den Fehler innerhalb der Differenzenpläne. Die Differenzenpläne wurden aus Digitalen Geländemodellen (DGMs) der Jahre 2014, 2019 und 2021, bereitgestellt durch die Hessische Verwaltung für Bodenmanagement und Geoinformation (HVBG), vom Hessischen Landesamt für Naturschutz, Umwelt und Geologie (HLNUG) berechnet und anschließend der TU Darmstadt übergeben. Erste Ergebnisse an ausgewählten Pilotregionen (Kassel Stadt, Hoher Meißner, Werra-Kali und Rhein-Main, siehe Abbildung 5) zeigten Phänomene, die weder mit einem anthropogenen noch einem natürlichen Ursprung erklärt werden konnten.

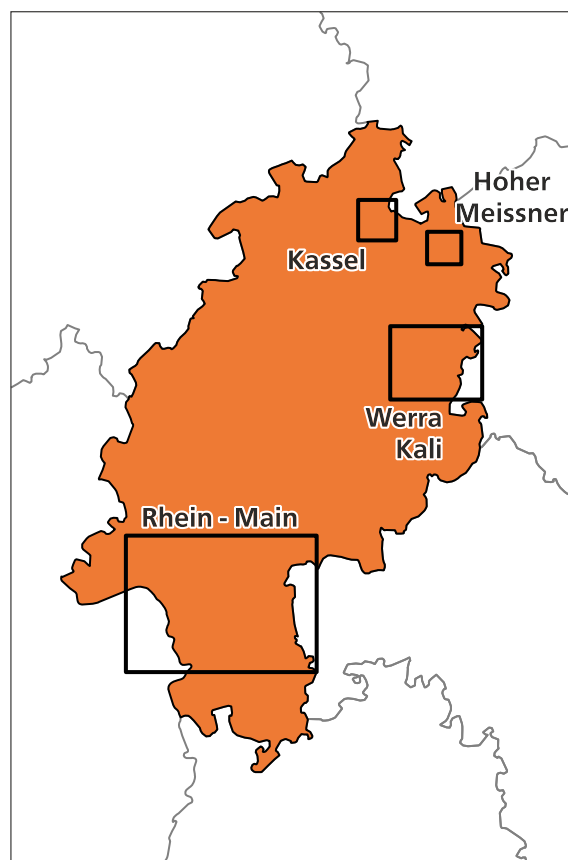


Abbildung 5: Überblick über die Pilotregionen die zum Test des entwickelten Python-Skripts verwendet wurden.

Zu den ausgewählten Phänomenen zählten:

- a) Interpolationseffekte im Bereich von Gebäuden, Straßen, Schienen und Gewässern (2.1.3.1)
- b) Vermehrtes Erscheinen von besonders negativen aber auch positiven Bodenbewegungsbeträgen im Bereich von Vegetation (Wäldern, Buschwerk) (2.1.3.2)

-
- c) Hohe Differenzbeträge mit negativen und positiven Bodenbewegungen im Meterbereich in nebeneinander liegenden Pixeln (2.1.3.3)

Diese Effekte wurden teilweise mithilfe eines eigens entwickelten Python-Skripts (siehe 2.) bereinigt (a) oder bei einem gemeinsamen Meeting der Projektbeteiligten mit dem HVBG geklärt. Auch wurde in diesem Zusammenhang die Genauigkeit (1.4) der Digitalen Geländemodelle und damit der daraus entstandenen Differenzenplänen genauer geklärt. Im folgenden werden kurz die aufgetretenen Phänomene erläutert und mögliche Lösungsansätze vorgestellt.

2.1.3.1 Interpolationseffekte

Im Bereich von Gebäuden, Straßen und Gewässern treten verschwommene Muster mit Extremwerten im positiven und negativen Bereich in den Differenzenplänen auf (Abbildung 6 A-C). Diese konnten mit der Datenprozessierung der ausgehenden LiDAR-Messungen zu Digitalen Geländemodellen (DGM) erklärt werden. Hierbei werden Bereiche mit Bebauung sowie Gewässer bewusst aus den Rohdaten herausgeschnitten, um mögliche Fehler zu vermeiden. Da zwischen den Randpunkten an diesen ausgeschnittenen Flächen durch verschiedene Algorithmen interpoliert wird, entstehen die beobachteten Muster und Effekte.

Aus diesem Grund müssen diese Bereiche bei der Beurteilung der DGMs und der darauf aufbauenden Differenzenpläne ausgeschlossen werden. Um dies zu gewährleisten wurde ein Python-Skript entwickelt, das die Vektor-Daten von Gebäuden, Straßen, Schienen und Gewässern, erhältlich von OpenStreetMap, nutzt, um diese Bereiche aus den Differenzenplänen zu entfernen. Die genaue Funktionsweise des Skripts wird in 2.1.3.8 vorgestellt. Da die OpenStreetMap Shapefiles oder die ihnen hinzugefügten Buffer (10 Meter um das jeweilige Polygon) jedoch nicht alle Interpolationseffekte in Gänze ausschließen, müssen die wenigen Reste bei der visuellen Klassifikation gefunden und entsprechend markiert werden (Abbildung 6 D).

Um trotz dieser Interpolationseffekte bei Bebauung in den Digitalen Geländemodellen die LiDAR-Daten im Projekt - gerade auch mit den PSI-Daten verknüpft - zu verwenden, wurde die Verwendung von Digitalen Oberflächenmodellen (DOMs) und daraus berechneten eigenen Differenzenplänen für die urbanen Gebiete diskutiert. Prinzipiell wurde dies als Möglichkeit vom HVBG bestätigt, jedoch aufgrund der unterschiedlichen Punktdichte zwischen zwei Befliegungen als ungenau und fehlerbehaftet erklärt. Ein besserer Lösungsansatz könnte die Verwendung von Freiflächen zur Kalibrierung wie z.B. Parkplätzen im Industriepark Höchst sein.

2.1.3.2 Bodenbewegungen Vegetation

Für die vom HLNUG bereitgestellten Differenzenpläne wurde ein Fehlerbereich von $\pm 0,4$ m berechnet. Daher enthalten die reklassifizierten Differenzenpläne keine Werte zwischen $-0,4$ m und $0,4$ m. Das primäre Ziel dieses APs ist die Detektion von natürlichen Bodenbewegungen. Deshalb wurden auch Werte über 10 m Absenkung bzw. Auffüllung entfernt, da für solche großen Beträge in Hessen ein natürlicher Ursprung praktisch auszuschließen ist. Für die visuelle Klassifikation der mit dem Python-Skript reklassifizierten Differenzenpläne wurden diese beispielsweise über Satellitenbilder gelegt. Besonders auffällig ist hier das vermehrte Auftreten von Absenkungen im Bereich von Wäldern und Buschwerken (siehe Abbildung 7). Für diese Bereiche mit hoher Vegetation wurde im Gespräch mit dem HVBG festgehalten, dass eine Nutzung der LiDAR-Daten nur bedingt möglich ist. Die vom Laserscanner ausgesendeten Signale können durch beispielsweise

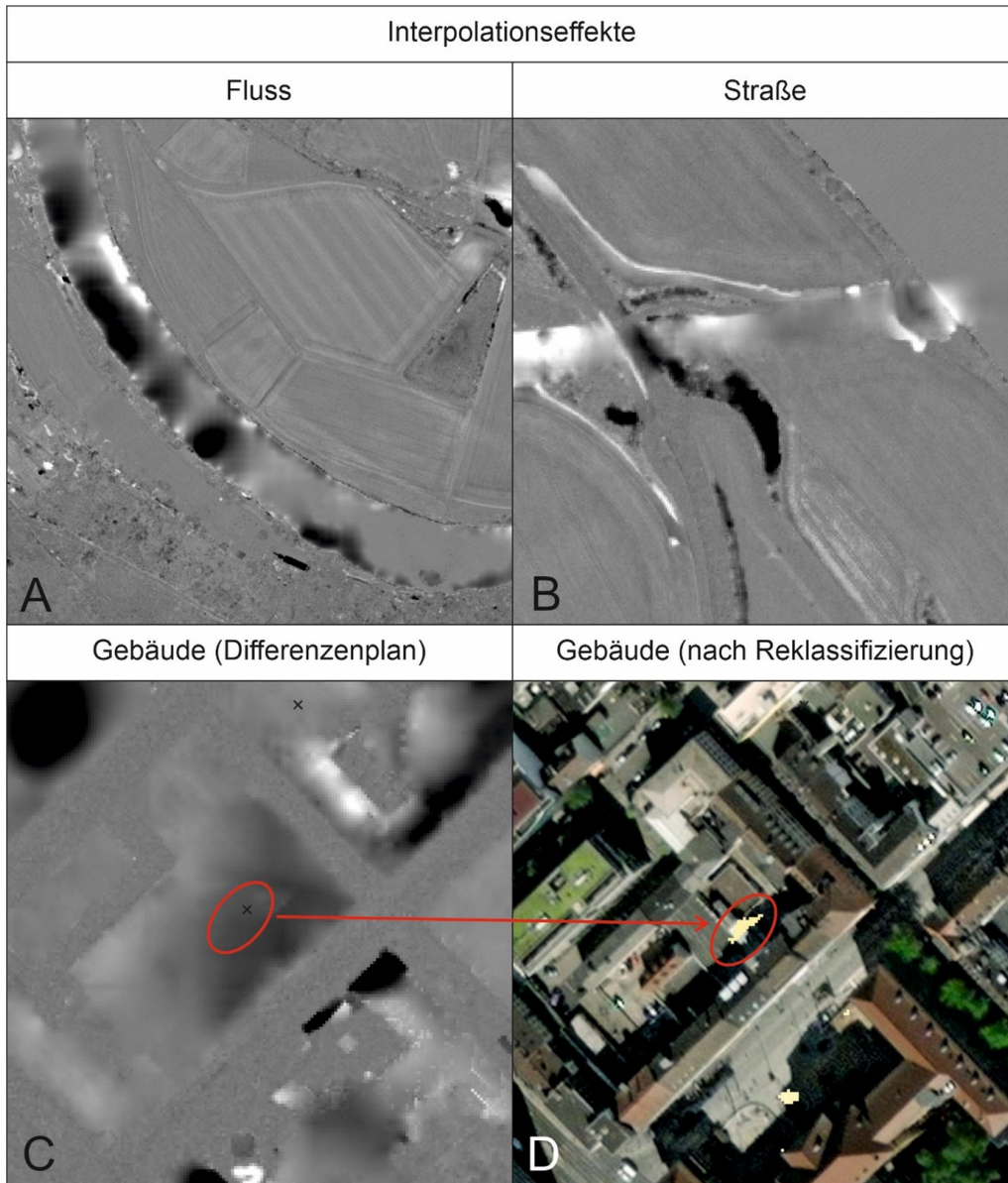


Abbildung 6: Beispiele für verschiedene Interpolationseffekte, die in den Differenzenplänen an Flüssen (A), Straßen (B) oder Gebäuden (C) auftreten können. Nach der Reklassifizierung überbleibende Reste der Interpolationseffekte werden entsprechend markiert (D).



Abbildung 7: Beispiele für verstärktes Auftreten von scheinbarer Absenkung / Subsidenz im Bereich von Vegetation während umliegende Acker- und Grasflächen keinerlei Bodenbewegungen aufweisen.

Totholz oder auch unterschiedliche Höhen der Vegetation zur jeweiligen Zeit der unterschiedlichen Befliegungen zu unterschiedlichen Ergebnissen führen, ohne dass Bodenbewegungen dafür verantwortlich sind. Eine gute Durchdringung der Vegetation findet zumeist mittels Winterbefliegungen bei gut bewirtschafteten Laubwäldern statt. Aufgrund der vielen Unsicherheitsfaktoren sollten die LiDAR-Messungen und damit die Differenzpläne über Vegetation nur sehr eingeschränkt und gut begründet verwendet werden.

Hier könnte eine Erweiterung der mit dem bereits existierenden Python-Skripts herausgeschnittenen Bereiche möglicherweise helfen. Dazu müsste zunächst überprüft werden, ob mittels der Vektordaten von OSM in den „Landuse“-Daten eigene Polygone für z.B. Waldflächen existieren. Diese könnten dann analog zu den Steinbrüchen aus diesen Vektordaten extrahiert und anschließend von den Differenzplänen entfernt werden.

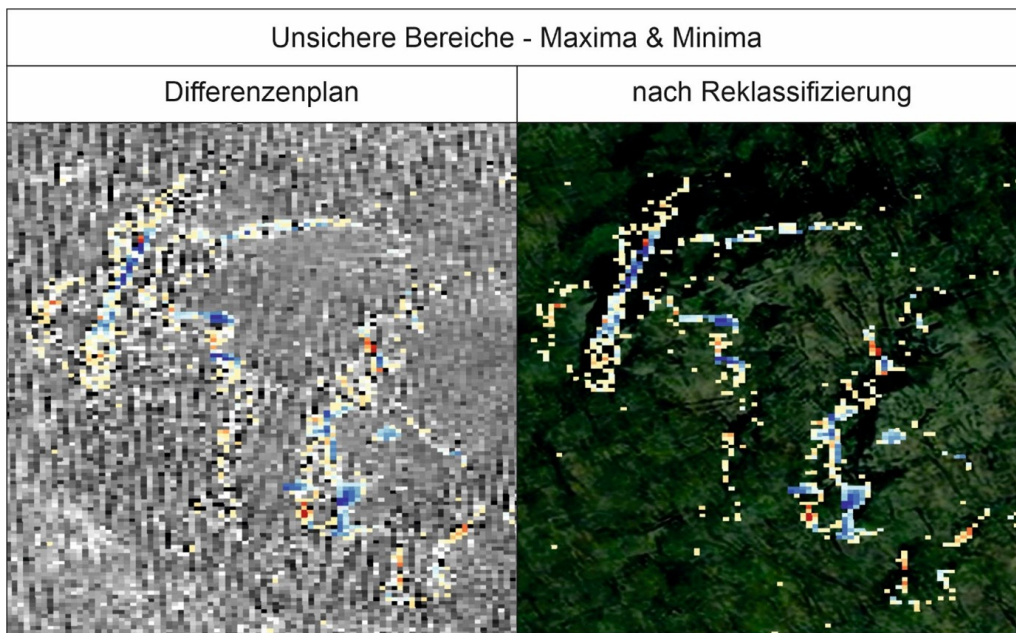


Abbildung 8: Beispielhafte unsichere Bereiche, die bei der optischen Klassifikation entdeckt wurden und vermutlich auf technischen Fehlern bei der Erstellung der Digitalen Geländemodellen und der daraus berechneten Differenzenplänen entstehen. Blau ist Auffüllung, Rot ist Absenkung.

2.1.3.3 Extreme Differenzen nebeneinanderliegender Pixel

In verschiedenen, kleineren Bereichen (<1% der Gesamtfläche) treten als besonderes Phänomen Muster auf, bei denen hoch negative und positive Bodenbewegungen in nebeneinanderliegenden Pixeln erscheinen. Dies wurde zum Beispiel besonders im Bereich um die hessische Gemeinde Eppstein nordwestlich von Frankfurt beobachtet. Geologisch finden sich dort mit dem Eppsteiner Schiefer Metasedimente aus dem Silur, die morphologisch steile Klippen bilden. Die auf den reklassifizierten Differenzenplänen klar erkennbaren Pixel (siehe Abbildung 8) weisen hier Negativwerte bis -6 m und Positivwerte bis 10 m in direkt aneinandergrenzenden Pixeln oder zumindest nur wenige Pixel entfernten Pixeln auf. Erklärt werden können diese mit unterschiedlichen Flugrouten und damit abweichenden Winkeln mit denen die Laserscan-Signale auf die Klippen treffen sowie numerischen Methoden wie beispielsweise Glättungen die auf diese im Postprocessing angewendet werden.

2.1.3.4 Genauigkeit der Digitalen Geländemodelle & Differenzenpläne

Die maximal mögliche Genauigkeit der Digitalen Geländemodelle liegt nach Angaben des HVBG bei ± 15 cm. Um dies zu erreichen, darf in dem Bereich der DGMs jedoch keine Bebauung oder Vegetation vorliegen und das Gelände muss flach sein. Für die Ungenauigkeiten sind zum einen technische Fehler, zum anderen globale Fehler verantwortlich. Insgesamt liegt der maximale Fehler in 95% der Digitalen Geländemodellen bei ± 35 cm. Zum technischen Fehler zählt beispielsweise die Umstellung des Höhensystems durch das HVBG im Jahre 2018. Durch diese Umstellung ist ein Fehler von ± 4 bis 5 cm zwischen den DGMs von 2014 und 2019 bzw. 2021 entstanden, der vor der Weiterbearbeitung zu Differenzenplänen korrigiert werden muss.

Die einzelnen DGM-Datensätze müssen also als Zeitscheiben, die in keinem Bezug stehen, betrachtet werden. Datumsübergänge durch Transformation (Parameter sind dem HVBG bekannt) können diese Fehler eliminieren. Weitere technische Fehler, die größere Abweichungen verursachen, sind Georeferenzierungsprobleme, welche bereits bei der Datengenerierung entstehen können. Diese können durch unbewegliche Referenzflächen bereinigt werden.

Um die verschiedenen Fehlerquellen möglichst zu eliminieren ist außerdem eine Unterteilung in kleinräumige Kacheln für das gesamte Gebiet des Bundeslandes Hessen nötig. Für diese einzelnen Kacheln müssen anschließend der Datumsübergang sowie die Georeferenzierungsfehler jeweils herausgerechnet werden. Nach solch einer Bereinigung sollten die DGMs und daraus berechnete Differenzenpläne zumindest für flache Gebiete mit niedriger Vegetation gut zu verwenden sein. Problematisch bleiben steile Hänge und starker Bewuchs. Für bebauten Gebiete und Gewässer sind die LiDAR-Daten generell ungeeignet.

2.1.3.5 Erkenntnisse - Baumaßnahmen

Klar erkennbare Typbeispiele anthropogenen Ursprungs sind Baumaßnahmen unterschiedlichster Art. Beidseitige Abtragung und Auffüllung bei der vermutlichen Verbreiterung von Waldwegen (z.B. Abbildung 9 A & B) sind im ersten Moment durch untergelegte Satellitenbilder meist schwierig zu erkennen (z.B. Abbildung 9 A). Jedoch mit Hilfe der ursprünglichen Differenzenplänen vor der Reklassifizierung lassen sich klar Linienstrukturen innerhalb der Vegetation von Wäldern erkennen (z.B. Abbildung 9 B) und diese folglich meist als Wege klassifizieren. Genauere topographische Karten z.B. Wanderkarten, die auch unbefestigte Waldwege beinhalten, könnten für eine noch genauere Klassifikation herangezogen werden.

Ein weiteres Beispiel sind Abtragung und Auffüllung, die direkt nebeneinanderliegende und auf den ersten Blick „natürlich“ erscheinende Muster bilden. Diese kommen häufig an Hanglagen vor (z.B. Abbildung 9 C). Sie erscheinen auf den Differenzenplänen zumeist erst natürlich. Durch Unterlegen von Satellitenbildern wird der anthropogene Ursprung jedoch in der Regel sofort sichtbar. Auch größere Baumaßnahmen wie z.B. Bahntunnel und Unterführungen können nach der erfolgreichen Reklassifizierung durch das entwickelte Python-Skript erkannt werden (siehe Abbildung 9 D).

2.1.3.6 Erkenntnisse - Steinbrüche, Halden & Deponien

Besonders gut detektieren lassen sich anthropogene Auffüllung oder Abtragung im Zusammenhang von Steinbrüchen, Halden und Deponien. Diese liegen in den allermeisten Fällen bereits außerhalb des Fehlerbereichs von $\pm 0,4$ m. Vielfach sind hier in den Differenzenplänen, die die Entwicklung über mehrere Jahre abbilden, Beträge von mehreren Zehnermetern zu beobachten. Diese können analog zu den natürlichen Bodenbewegungen mit Hilfe des entwickelten Python-Skripts reklassifiziert werden (siehe Abbildung 10), wobei eine andere Reklassifizierungs-Skala gewählt werden muss und Werte über +10 m oder unter -10 m nicht ausgeschlossen werden dürfen. Für Steinbrüche besteht außerdem die Möglichkeit dies direkt aus dem OSM-Landuse-Datensatz zu extrahieren. Nach dieser Reklassifizierung bietet ArcPy verschiedene Tools an, mit denen die Flächen und Volumen der reklassifizierten Bereiche automatisiert berechnet werden können. Darüber kann zukünftig z.B. eine automatisierte Überwachung von Steinbrüchen, Halden und Deponien entwickelt werden.

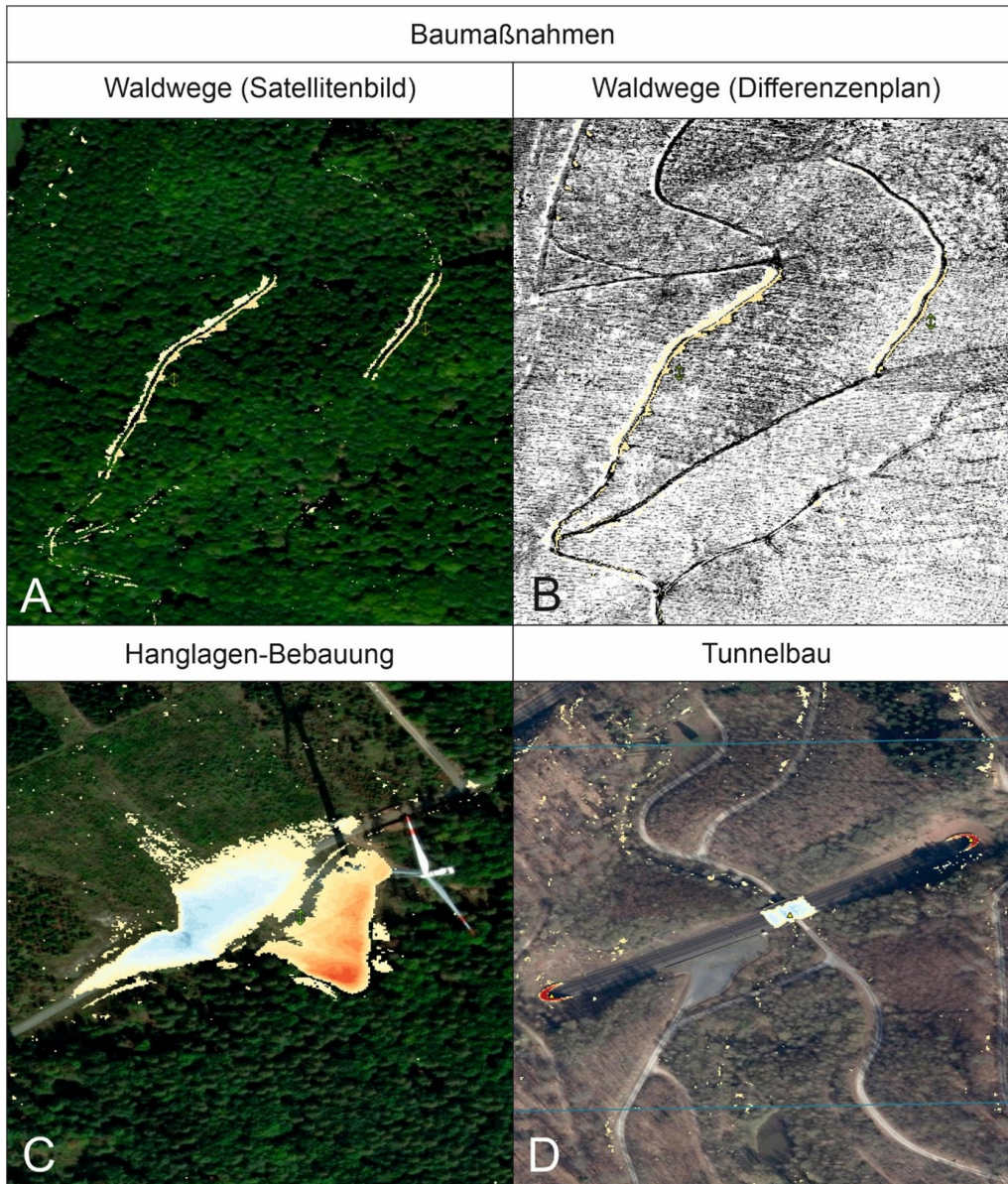


Abbildung 9: Verschiedene Beispiele von Baumaßnahmen die in den Differenzenplänen sichtbar werden. Beidseitige Auffüllung und Abtragung an Waldwegen sind auf den Satellitenbildern häufig schwer zu erkennen (A), lassen sich jedoch gut mit untergelegten Differenzenplänen identifizieren (B). Bebauung von Hanglagen (C) oder z.B. Tunnelbau (D) lassen sich dagegen sehr gut aus den Differenzenplänen herauslesen. Blau ist Auffüllung, Rot ist Absenkung.

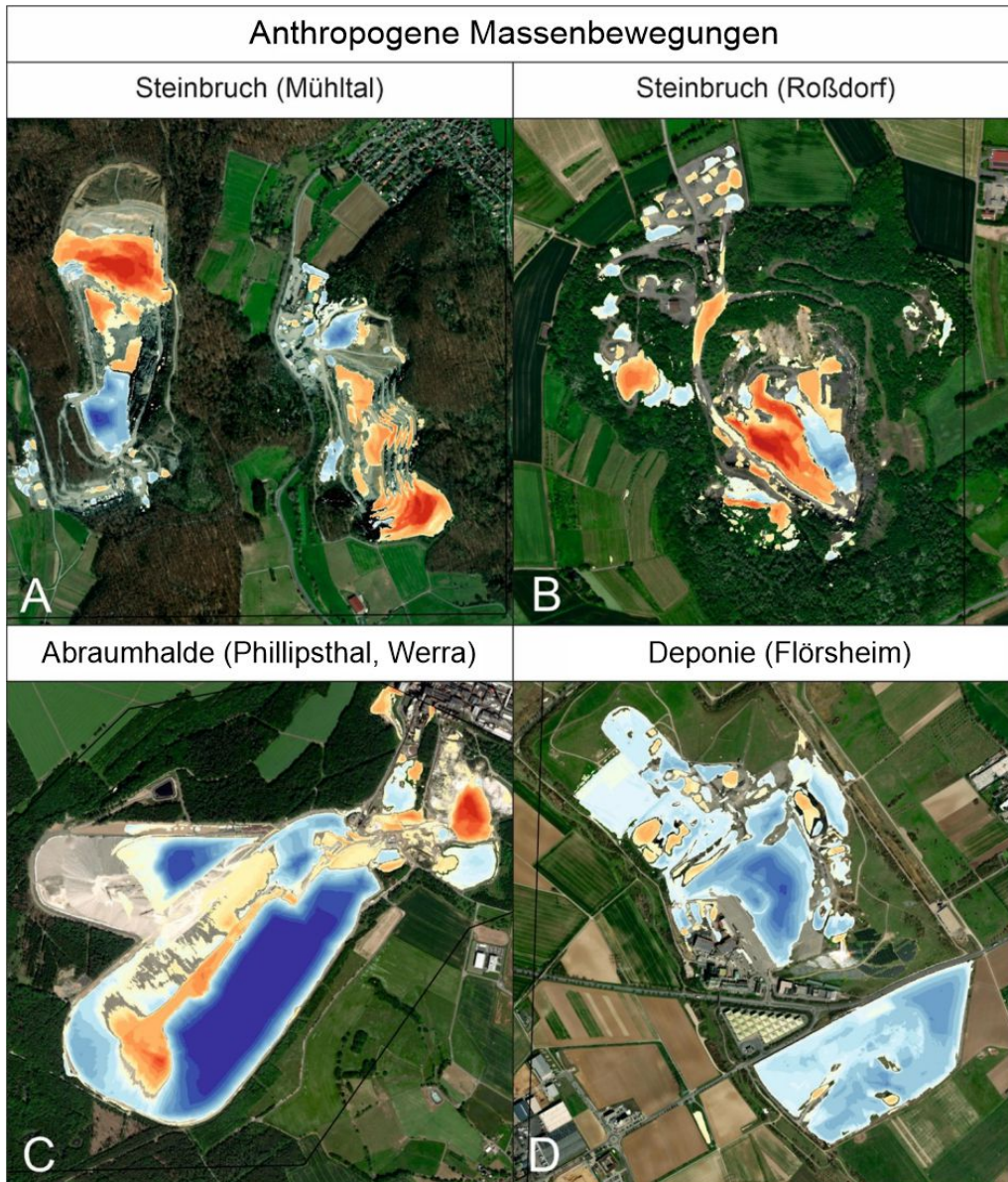


Abbildung 10: Anthropogene Massenbewegungen, die auf den Differenzenplänen im Bereich von Steinbrüchen (A,B), Halden (C) und Deponien (D) sichtbar werden. Blau ist Auffüllung, Rot ist Absenkung.

2.1.3.7 Dokumentation Skript - Überblick über den Workflow

Um die bereitgestellten Raster-Daten sinnvoll nutzen zu können, wurden zunächst Gebäude, Wasserwege (Flüsse, Seen, etc.), Steinbrüche, Straßen und Schienenwege aus den Differenzenplänen herausgeschnitten. Verwendet wurden dafür die freizugänglichen Daten von Open Street Map in folgenden Formaten:

- Gebäude - Polygon-Shapefile
- Wasserwege - Polygon-Shapefile
- Steinbrüche - extrahiert von Landuse-Polygone-Shapefile
- Straßen - Line-Shapefile
- Schienenwege - Line-Shapefile

An den vom HLNUG bereitgestellten Testregionen „Kassel-Stadt“ und „Hoher Meisner“ wurde zunächst im folgenden skizzierter Workflow ausgearbeitet und getestet. Alle Methoden sind mit der ArcGIS Pro / ArcPy online Documentation verlinkt:

1. Ausschneiden der OSM- und LIDAR-Daten zur gewünschten Area of Interest (AOI):

- Methode zum Ausschneiden der Vektordaten:
`arcpy.analysis.Clip(...)`
- Methode zum Ausschneiden der Rasterdaten:
`arcpy.management.Clip(...)`

2. Extrahieren der Steinbrüche / Hauptstraßen aus den Landuse- / Roads-Vektor-Daten:

- Anlegen einer Kopie der Vektor-Daten:
`arcpy.management.CopyFeatures(...)`
- Schreiben/Verändern einer Attribute-Tabelle:
`arcpy.da.UpdateCursor(...)`
- Mit for-Loop durchgehen der Kopie und alle Polygone löschen die keinem Steinbruch / Hauptstraße zugeordnet sind (Beispiel Steinbrüche):

```
with arcpy.da.UpdateCursor(only_quarry, [field_name]) as cursor:
    for row in cursor:
        if row[0] == 'quarry':
            continue
        else:
            cursor.deleteRow()
```

3. Buffer um alle Shapefiles legen und danach diese in ein Polygone-Shapefile überführen:

- Methode zum Anlegen der Buffer:
`arcpy.analysis.Buffer(...)`

– Buffer standardisiert mit 10 m um Straßen (Line-Features) und z.B. Vorgärten zu berücksichtigen.

- Alle Buffer-Shapefiles in ein einziges Shapefile zusammenführen:
`arcpy.management.Merge([buffer1, buffer2, ...], buffer_complete)`
- Einzelne Polygone/Features in Buffer-File vereinigen:
`arcpy.management.Dissolve(...)`

4. Subtrahieren des Buffer-Shapefile vom AOI-Shapefile:

- Nötig, da die `ExtractByMask`-Methode, die zum Extrahieren der Raster-Daten ohne Bebauung verwendet wird, nur Bereiche, die nicht von der Polygon-Maske bedeckt werden, aus dem Raster entfernt.
- Methode zum Subtrahieren:
`arcpy.analysis.Erase(...)`

5. Extrahieren der Raster-Daten durch Polygon-Maske:

- Methode zum Extrahieren:
`arcpy.sa.ExtractByMask(...)`
- Speichern des Rasters:
`new_raster.save(filepath+name)`

6. Reklassifizieren des neuen Rasters:

- Abrufen des Minimum/Maximum:
`new_raster.minimum/new_raster.maximum`
- Erstellen & Definieren der Werte/Intervalle für reklassifiziertes Raster:

```
RemapRange(  
    [  
        [stats_min, val1, "NODATA"],  
        [val1, val2, new_value],  
        [...],  
        ...  
    ]  
)
```

– Auch möglich sehr hohen Wert wie $\pm 10^9$ anstatt `stats_max/stats_min` zu verwenden um Fehler zu vermeiden

- Anwenden der Reklassifizierungs-Methode:
`Reclassify(...)`

- Speichern des Rasters:
`reclass_raster.save(filepath+name)`

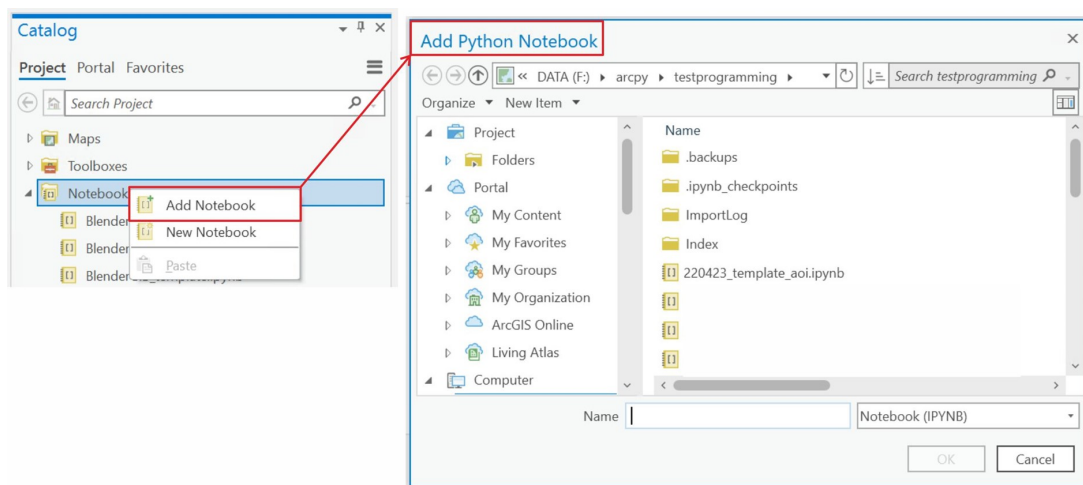
Nach erfolgreichem Testen des Workflows an den Gebieten „Kassel Stadt“, „Hoher Meißner“, „Werra Kali“ und „Rhein-Main“ wurde das Script erfolgreich für das gesamte Bundesland Hessen angewandt. Da die Rechenzeit bei circa einer Woche für ein derart großes Gebiet sehr hoch ist, wird eine Überarbeitung empfohlen. Bei dieser sollten die bereitgestellten Datensätze zunächst in kleinere Teilbereiche - sozusagen mehrere Areas of Interest - geteilt werden. An diesen kann dann systematisch der beschriebene Workflow bzw. das Skript angewendet werden. Abschließend können die berechneten Raster wieder zu einem Gesamtmodell zusammengefügt werden.

2.1.3.8 Dokumentation Skript - Benutzung des Jupyter-Notebooks und Input-Parameter

Im Folgenden wird Schritt-für-Schritt erklärt, wie das Jupyter-Notebook in ArcGIS Pro geladen und angepasst sowie danach für jede beliebige AOI genutzt werden kann:

1. Importieren eines Jupyter-Notebooks in ArcGIS Pro:

- Im Catalog-Panel per Rechtsklick auf Notebooks und „Add Notebook“ die Dialogbox „Add Python Notebook“ öffnen. Hier zum Speicherort des zu ladenden Notebooks navigieren. Nach Auswahl der Datei mit OK bestätigen.



- Anschließend ist das Notebook im Catalog-Panel unter Notebooks sichtbar und kann per Doppelklick geöffnet werden.

2. Definieren der Input-Daten innerhalb des Jupyter-Notebooks:

- Unter dem Abschnitt „2. Definieren der Input-Daten“ können alle Änderungen durchgeführt werden um das Skript auf eine andere AOI anzupassen.
- Von oben nach unten sind die zu ändernden Variablen (nur roten Text in `r" . . . zuändernderText . . . "` ändern!):

2. Definieren der Input-Daten

- Pfad an dem der Umwelt 4.0 Ordner abgelegt ist
- Pfad an dem die OSM-Vektordateien abgelegt sind
- Shapefile mit Dateipfad, dass die AOI definiert
- Pfad andem die vom Skript berechneten Dateien gespeichert werden
- Kürzel das für die jeweilige AOI verwendet wird
- Optional: Verändern der Buffer um die jeweiligen O...

```
In [7]: # Input - Folder Paths
path_umwelt_4_0 = r"F:"
path_osm = r"F:\newData\hesse_shp"

# Area of Interest - Shapefile
aoi_poly = r"F:\newData\Kassel\ka_shp\aoi_ka.shp"

# Output - Folder Paths
folder_of = r"F:\newData\Kassel_test_1"
short_name = r"ka"

# Buffer-Values
buff_dist_build = "10 Meters"
buff_dist_quarry = "10 Meters"
buff_dist_water = "10 Meters"
buff_dist_roads = "10 Meters"
buff_dist_railw = "10 Meters"
```

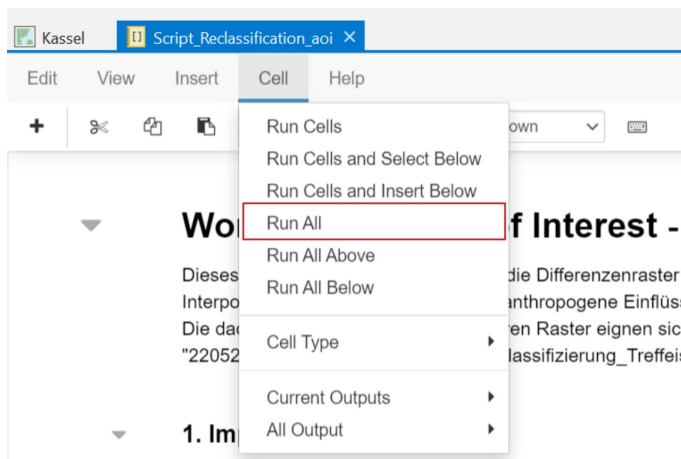
The screenshot shows a file explorer view with the following structure:

- Umwelt 4.0
 - DGM1_2014
 - DGM1_2019
 - DGM1_2021
 - DGM-Differenzenplan_2014-2019
 - DGM-Differenzenplan_2019-2021
- Kassel_test_1
 - ka_rast
 - ka_shp

- `path_umwelt_4_0`: Angeben des Systempfads der Umwelt 4.0 Datenbank. Zum Laufen des Skripts müssen hier die Differenzenpläne (und ihre Pfade) richtig benannt sein.
- `path_osm`: Angeben des Systempfads zu den OSM-Dateien. Diese müssen von der Seite Geofabrik gedownloadet sein und das Namensformat `gis_osm_*_a_free_1.shp` haben.
- `aoi_poly`: Systempfads zum die Area of Interest definierenden Shapefile.
- `folder_of`: Systempfad zu dem Ordner in dem die Outputs des Skriptes gespeichert werden sollen. Wichtig: Dieser Ordner muss vor Laufen des Skriptes schon mit den Unterordnern `*_rast` und `*_shp` angelegt sein.
- `short_name`: Kürzel, dass in den Unterordnern, sowie in den meisten Output-Dateinamen verwendet wird.
- `buffer_dist_*`: Hier können - wenn gewünscht - die Buffer für Gebäude (`*build`), Steinbrüche (`*quarry`), Gewässer (`*water`), Hauptstraßen (`*roads`) und Schienen (`*railw`) angepasst werden.

3. Durchlaufen lassen des Python-Skripts / Jupyter-Notebooks:

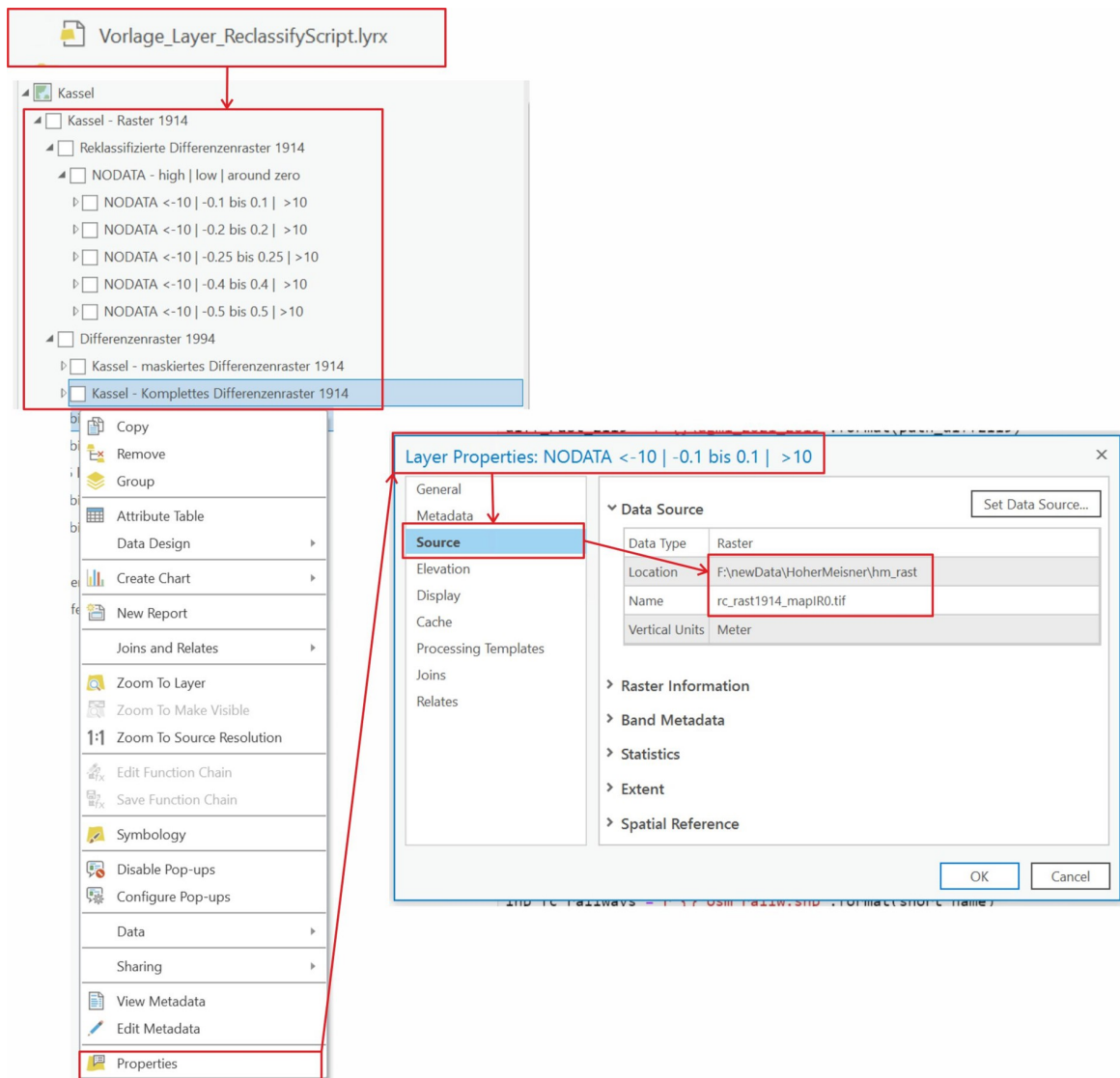
- Das Skript wird über Anklicken von Cell und anschließend Run All klicken gestartet:



- Der Durchlauf ist abhängig von der Größe der AOI und der Rechenleistung des Computers. An dem PC, an dem das Skript entwickelt wurde, waren dies von 5-15 Minuten (Testregion „Kassel“, „Hoher Meisner“), bis zu einer Stunde (Testregion „Rhein-Main“), bis zu 6-7 Tage (gesamt Hessen).

4. Laden der vorgefertigten Layer mit entsprechender Reklassifizierungs-Legende:

- Für die im Skript vordefinierten Reklassifizierungen existiert eine .lyrx-Datei sodass die passenden Legenden direkt mitgeladen werden können.
- Nach Einladen der Layer-Datei müssen hier für alle 7 darin vorhandenen Layer (die mit dem Skript auch ausgegeben werden) die Dateipfade geändert werden. Dafür werden nach Rechtsklick auf das Layer und Klick auf Properties die Layer Properties geöffnet. Hier wird unter Source → Location der Dateipfad und der Dateiname angegeben.



- Die Pfade und Dateinamen können entweder im *rast-Output-Folder nachgeschaut werden oder setzen sich wie folgt aus dem in (2.) definierten Output-Pfaden/Namen (folder_of, short_name) und den Jahreszahlen (2119 oder 1914) zusammen:

- NODATA <-10 -0.1 bis 0.1 >10
Location:folder_of\short_name_rast
Name:rc_rast2119_mapIR0.tif
- NODATA <-10 -0.2 bis 0.2 >10
Location:folder_of\short_name_rast
Name:rc_rast2119_mapIR1.tif
- NODATA <-10 -0.25 bis 0.25 / >10
Location:folder_of\short_name_rast

Name:rc_rast2119_mapIR2.tif
– NODATA <-10 -0.4 bis 0.4 >10
Location:folder_of\short_name_rast
Name:rc_rast2119_mapIR3.tif
– NODATA <-10 -0.5 bis 0.5 >10
Location:folder_of\short_name_rast
Name:rc_rast2119_mapIR4.tif
– Kassel - maskiertes Differenzenraster 2119
Location:folder_of\short_name_rast
Name:short_name_maskrast_2119.tif
– Kassel - komplettes Differenzenraster 2119
Location:folder_of\short_name_rast
Name:short_name_diffrast_2119.tif

- Dieser Ablauf muss zweimal (für jedes Differenzenraster (1914 und 2119)) einzeln durchgeführt werden. Weitere Änderungen (z.B. „Kassel“ durch jeweilige AOI ersetzen) können die Styling-Layers weiter anpassen.

5. Beispiel - Finaler Output :

- Jedes reklassifizierte Raster liefert, wenn mit den richtigen Layern verbunden, eine in Rot-Gelb-Blau gehaltene Legende und kann z.B. kombiniert mit einem Satellitenbild schnell möglicherweise interessante Bereiche für Bodenbewegungen anzeigen.

2.1.3.9 Visuelle Klassifizierung - Workflow

Die visuelle Klassifikation wurde nach der Nutzung des Python-Skripts verwendet, um die auffälligen Bereiche möglicher Bodenbewegungen besser einzuordnen. An jeweils auffälligen Stellen wurden Punkt-Vektoren gesetzt. Im Falle größerer Flächen von z.B. Absenkungserscheinungen des Bodens wurden meist auch mehrere Punkte gesetzt, um diese auch im Kartenbild klar erkennbar zu machen (siehe Abbildung 11). Insgesamt wurden die drei Pilotregionen Kassel (605 Daten-Punkte), Hoher Meißner (349) und Werra Kali (4699) vollständig klassifiziert. Die Pilotregion Rhein-Main, die etwa das Vier - bis Fünffache der Fläche von Werra-Kali, ausmacht, wurde bei ca. 20.000 Datenpunkten abgebrochen, nachdem durch die gefundenen Phänomene (siehe 2.1.3.1 bis 2.1.3.4) sowie dem Gespräch mit dem HVBG klar wurde, dass die Differenzenpläne nochmals neu gerechnet werden müssen.

Wichtig ist zu erwähnen, dass die aktuelle Klassifikation aufgrund der in 2.1.3.4 erklärten Herausforderungen und der damit nötigen Neuberechnung der Differenzenpläne nicht aussagekräftig ist. Eine erneute visuelle Klassifizierung ist entsprechend mit den Neuberechneten Differenzenplänen nötig. Der verwendete

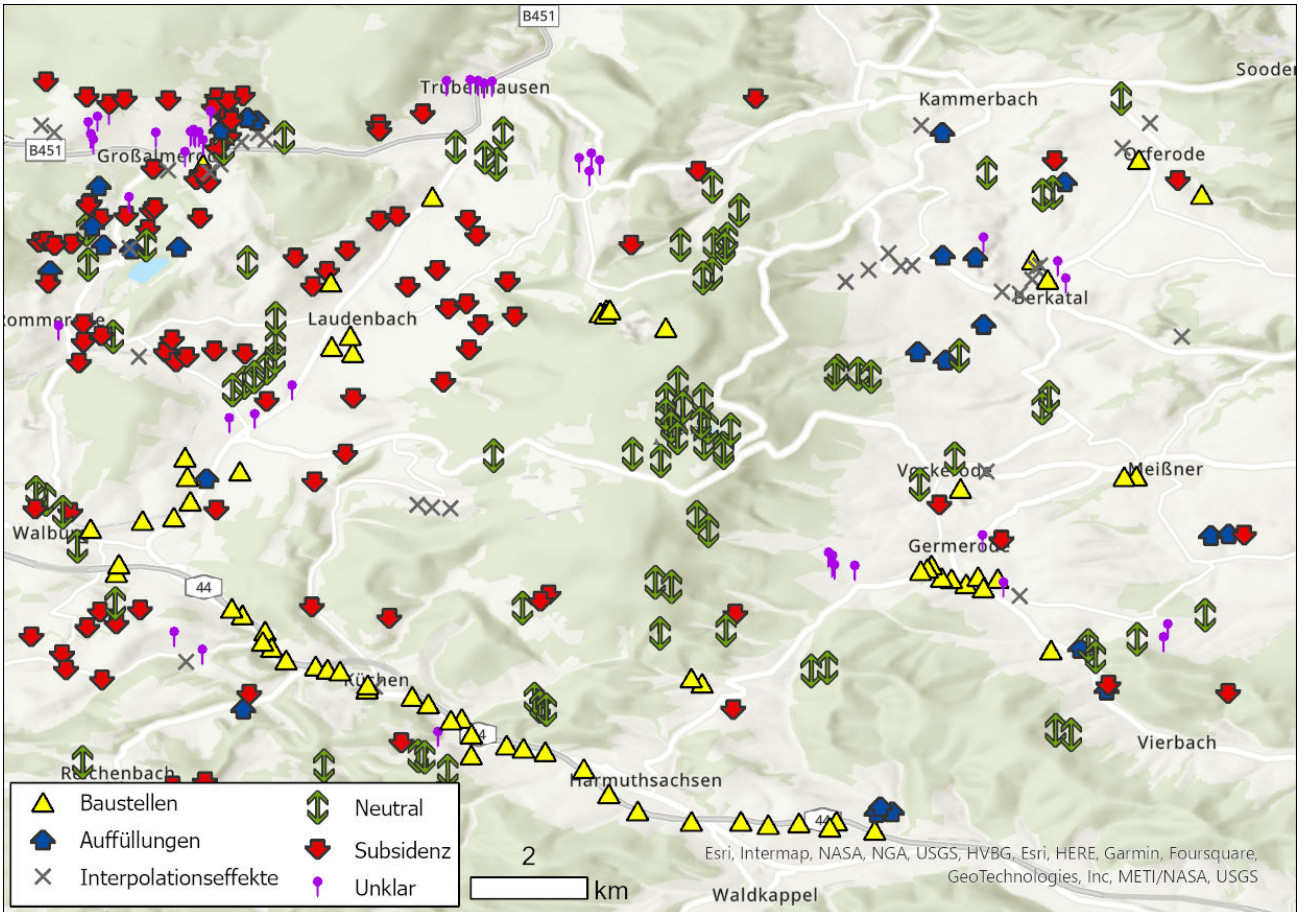


Abbildung 11: Beispiel einer Karte basierend auf visueller Klassifizierung mit deutlich erkennbaren Mustern z.B. im Nord-Westen auftretende Senkungen um die Ortschaft Großalmerode und der Neubau der Autobahn A44 im Süden. (Achtung! Klassifizierung basiert auf ungenauen Differenzplänen!)

Workflow - beginnend mit dem Daten-Preprocessing durch das Python-Skript - und der im folgenden weiteren visuellen Klassifikation ist jedoch direkt übertragbar.

Um das spätere Ziel, die natürlichen Bodenbewegungen auch interpretieren und damit z.B. auch eine Gefährdungsbeurteilung treffen zu können, zu erreichen, werden die in den reklassifizierten Differenzenplänen abgebildeten Bodenbewegungen zunächst nach ihrem Ursprung in natürliche und anthropogene eingeordnet. Bei den anthropogenen Bodenbewegungen kann zwischen offensichtlichen Baumaßnahmen, Auffüllungen und technischen Interpolationseffekten (siehe 2.1.3.1) unterschieden werden. Auffüllungen treten da vor allem in kleinräumigen Bereichen auf, in denen teils starke Zunahme der Böden stattgefunden hat. Auch wenn diese aufgrund der Kleinräumigkeit und der in der Regel hohen Volumen praktisch immer anthropogenen Eingriffen zugeordnet wurden, müsste bei großflächigen Aufwölbungen des Untergrunds auch eine natürliche Ursache wie z.B. quellfähige Gesteine betrachtet werden. Als natürlichen Ursprungs wurden Abtragungen oder direkt beieinander liegende Auffüllung/Abtragungen erachtet, die nicht klar Baumaßnahmen oder anderen anthropogenen Einflüssen zugeordnet werden konnten.

Die Unterscheidung in die beschriebenen Kategorien erfolgte visuell durch Überlagern und Hinzuschalten verschiedener Layer an Kartenmaterial. Die oberste Ebene waren dabei praktisch immer die reklassifizierten Differenzenpläne, sodass ihre Werte als rote (Absenkung) oder blaue (Auffüllung) Farbflächen auf den darunterliegenden Karten erschienen (siehe z.B. Abbildung 9). Als unterlagernde Fläche wurde zumeist zuerst das Satellitenbild verwendet. Dies hat den Vorteil, dass viele Baumaßnahmen schon sehr schnell herausgefiltert werden konnten (Beispiel siehe Abbildung 9 D). In seltenen Fällen konnte bei Unklarheiten noch der regionale Trend mit Hilfe der ursprünglichen Differenzenpläne bei der visuellen Klassifizierung helfen (Beispiel siehe Abbildung 9 B). Auch das Betrachten der Hillshades der verschiedenen Jahre, die in dem betrachteten Differenzplan verrechnet wurden, kann helfen z.B. natürliche Ursachen wie Rutschungen aufzuspüren. Dies war mit den bearbeiteten Daten jedoch nicht möglich, da die mitgelieferten DGMs und Hillshades beim nahen Heranzoomen Bildfehler produzierten. Hier ist vermutlich ein anderes Datenformat als die vom HLNUG gelieferten ESRI-Mosaic-Datasets zu präferieren.

Basierend auf diesen punktuellen Bewertungen und Einordnungen lassen sich dann auf einen größeren Maßstab erste Interpretationen treffen. Im Bereich um den Hohen Meißner wurde dies auch bereits gemeinsam diskutiert und passte mit der bekannten Geologie vor Ort zusammen. So kann man im nordwestlichen Bereich um die Ortschaften Großalmerode, Faulbach und Rommerode viele lokale Absenkungen sehen. Dies könnte mit bekannten Problemen in der Region verursacht durch Altbergbau zusammenpassen. Jedoch sei an dieser Stelle nochmals darauf hingewiesen, dass es sich hier nur um eine vorläufige Diskussion im Kollegenkreis im Sinne eines „educated guess“ mit den ungenauen und fehlerbehafteten Differenzenplänen als Ausgangsmaterial gehandelt hat und nicht von einer echten Interpretation gesprochen werden kann. Gleichwohl verdeutlicht dieses Beispiel wie die Kombination von Detailbeobachtungen und Zusammenbringen zum großflächigen Gesamtbild bei der geologischen Interpretation später sehr unterstützen kann.

Basierend auf der visuellen Klassifizierung und vektoriiellen Markierung einzelner Merkmale und Muster in den reklassifizierten Differenzenplänen innerhalb der Pilotregionen - in Kombination mit einer genauen Interpretation und darauf aufbauenden Zuordnung (Labeln) - ist später denkbar einen KI-Ansatz zu verwenden um mittels Bilderkennung (Mustererkennung) automatisiert die visuelle Klassifizierung für ganz Hessen

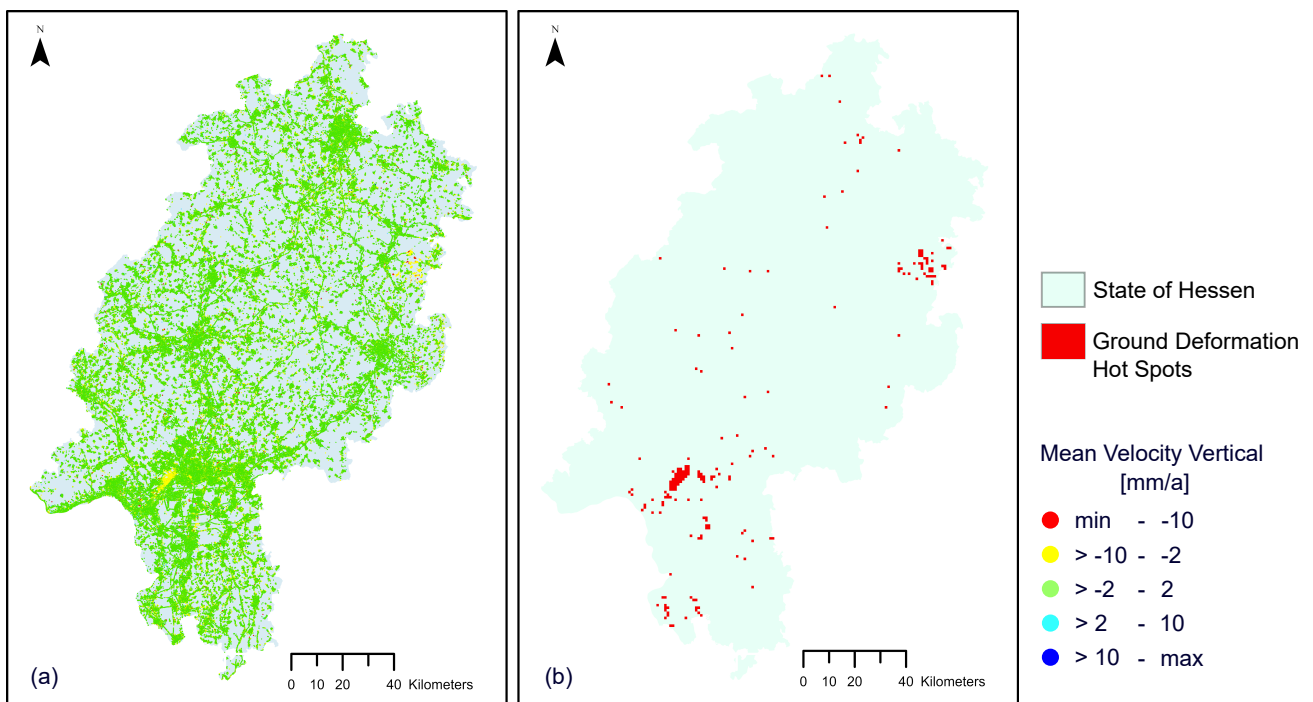


Abbildung 12: Ergebnisse des Ground Motion Analysers. Vergleich Kacheldarstellung (links) und Darstellung des GMA (rechts) mit einer Kachelgröße von 500 m.

durchzuführen. Auf daraus generierten Karten könnte wiederum, analog wie am Hohen Meißner geschehen, eine Interpretation der großflächigen Muster auf die unterliegende Geologie erfolgen.

2.1.3.10 Identifikation von Bewegungsgebieten aus den PSI Daten

Für die Identifikation der Bewegungsgebiete wurde im Arbeitspaket 3 ein GIS-Tool erstellt, der PSI "Ground Motion Analyser" (siehe Abbildung 13). Der PSI Ground Motion Analyser (GMA) erstellt ein Raster und berechnet für jede Rasterzelle die Anzahl der PS, die eine Hebung/Setzung angeben und die Summe der Hebungen/Setzungen innerhalb der Rasterzelle. Je mehr PS eine Hebung/Setzung anzeigen und je gravierender diese ist, desto höher ist der Wert der Zelle. Ausreißer wurden eliminiert, indem nur PS in die Berechnung einbezogen wurden, die eine geringe Varianz in den Bewegungswerten aufweisen. Es können innerhalb des Tools beliebige Rasterweiten eingestellt werden. Es wurde sich für eine Rastergröße von 500 m entschieden.

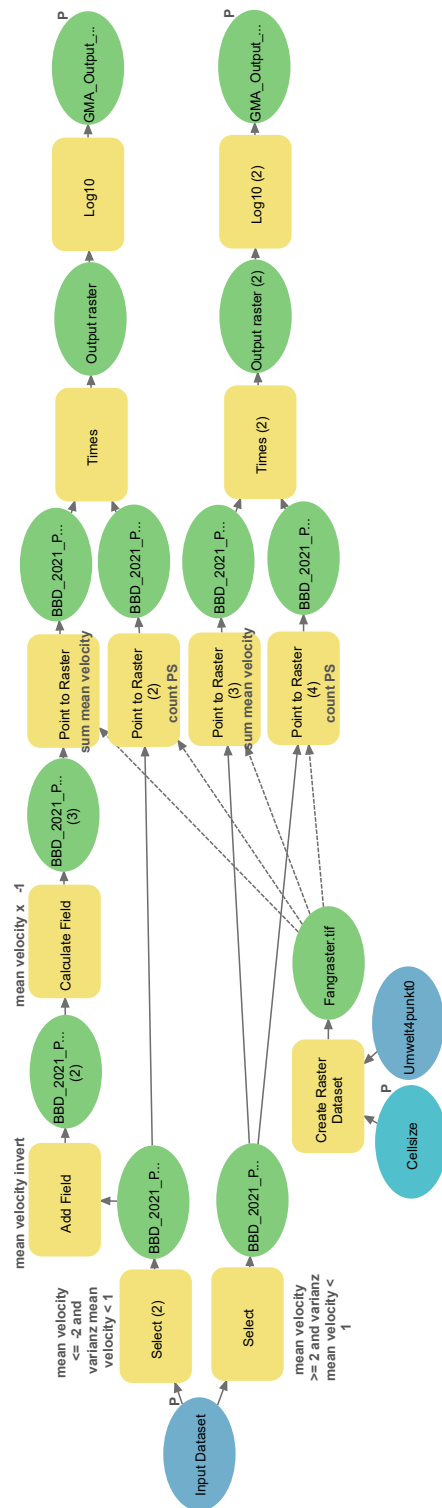


Abbildung 13: Workflow des Ground Motion Analysers: Selektion nach Hebungen/Setzungen (mittlere Geschwindigkeit $\leq -2 \frac{mm}{a}$ bzw. $\geq 2 \frac{mm}{a}$, Rastererstellung mit Summe der Hebungen bzw. Setzungen und Anzahl der relevanten Persistent Scatterer unter Verwendung eines einheitlichen Fang-Rasters, Verrechnung der jeweiligen Raster und Logarithmierung).

2.1.4 AP 4: Test der Zusammenführung der Datensätze (in Pilotregionen)

Die Zusammenführung der beiden Datensätze ist bisher nicht erfolgt, weil sich innerhalb des Projektjahres herausstellte, dass die DGMs und DOMs zuerst geodätisch korrigiert werden müssen (siehe Kapitel 2.1.3.4). Es wurden jedoch schon einige Herausforderungen bei der Zusammenführung erkannt:

Räumliche Abdeckung Die PSI Daten und die DGMs weisen eine sehr geringe räumliche Überlappung auf. Dies wird als Vorteil gesehen, da gerade durch die Kombination der beiden Datensätze räumliche Datenlücken gefüllt werden sollen. Allerdings führt dies auch dazu, dass nur an wenigen Stellen geprüft werden kann, ob die beiden Datenquellen Bodenbewegungen vergleichbar detektieren.

Bodenbewegungstyp Die PSI Daten eignen sich im Gegensatz zu den Differenzkarten nicht für größere plötzliche Bodenbewegungen, wie Hangrutschungen. Großflächige Bodenbewegungen mit geringer Ausprägung von wenigen Millimetern im Jahr hingegen können zwar durch die PS detektiert werden, fallen jedoch in den Fehlerbereich der Differenzpläne von einigen 10er Zentimeter (siehe Kapitel 2.1.3.4).

Wertebereich Anpassung der Wertebereiche: Die Maximalwerte in den PSI Daten liegen ca. im Bereich von -25 bis 14 cm. Der Fehlerbereich der Differenzkarten liegt im Bereich von ± 15 cm. Somit befinden sich nahezu alle PSI-Werte innerhalb des Fehlerbereichs der Differenzkarten. Der Wertebereich, der für das Fusionsprodukt gewählt werden muss, ist somit unklar.

2.1.5 AP 5: Plausibilitätsprüfungen und Verwendbarkeit weiterer Daten

Da die Genauigkeit der Differenzenpläne für weitere Untersuchungen nicht ausreichend ist, wurden in AP 5 lediglich die PSI Daten verwendet. Hierbei wurden einige Regionen identifiziert die durch besondere Charakteristika auffallen. Ein solches Beispiel ist der Ort Crumstadt, wo starke Hebungen und starke jahreszeitliche Schwankungen gemessen wurden. Diese wurden exemplarisch mit weiteren Datenquellen verknüpft und wird in 2.1.5.1 genauer vorgestellt. Weitere Regionen die durch starke Hebungs- und Senkungsbewegungen auffallen und deren mögliche Ursachen sind in Tabelle 1 zu finden.

Tabelle 1: Orte mit anomalen Bodenbewegungen laut PSI Daten.

Ort	Pilotregion	Typ	mögl. Ursache
Crumstadt	Rhein-Main	Hebung	Quellfähige Schichten, Grundwasser, Gasspeicher
Frankfurt-Mitte	Rhein-Main	Hebung & Senkung	Grundwasserentnahme aufgrund Bautätigkeit
Höchst	Rhein-Main	Senkung	Grundwasserentnahme
Messel	Rhein-Main	Senkung	Bau des Synchrotrons am GSI
Schenklengsfeld	Werra-Kali	Senkung	Bergbautätigkeit
Lohfelden	Kassel	Senkung	unklar

2.1.5.1 Hebungen in Crumstadt

Anhand einer lokal begrenzten Hebungsanomalie im südlichen Teil der Pilotregion Rhein-Main wurde die mögliche Integration weiterer Daten erprobt. Hierzu wurden die PSI Punkte im Stadtgebiet Crumstadt mit weiteren PSI Daten und zusätzlichen Informationen verschnitten und zeitlich analysiert. Crumstadt liegt wenige Kilometer südwestlich von Darmstadt und grenzt unmittelbar an das Gasfeld Riedstadt/Stockstadt, welches heute vor allem als Gasspeicher verwendet wird. Daher liegt ein Zusammenhang der Bodenbewegungen mit der Aktivität im Gasspeicher nahe. In der näheren Umgebung liegt der Ort Hahn, welcher in den 70er Jahren stark von Senkungen betroffen war, welche zu Gebäudeschäden führten (Abbildung 14a). Diese waren auf Grundwasserabsenkungen um wenige Meter durch Bauaktivität zurückzuführen, dies führte zu einer starken Schrumpfung quellfähiger Schichten im flachen Untergrund. Da diese Schichten ebenfalls im Untergrund von Crumstadt anzutreffen sind, könnte hier ebenfalls ein Zusammenhang bestehen.

In Crumstadt und der näheren Umgebung, vor allem in der Nähe des Gasfelds, können sehr starke Hebungen von punktuell über $5 \frac{mm}{a}$ festgestellt werden. Dies ist in der Region ungewöhnlich, da die meisten Ortschaften im Hessischen Ried über den Beobachtungszeitraum eher wenig Hebung oder Senkung zeigen. Des Weiteren können starke jahreszeitliche Schwankungen von bis zu $\pm 5 \text{ mm}$ gemessen werden, welche so ebenfalls nicht in der näheren Umgebung vorkommen. Die Schwankungen folgen grob einem jährlichen Trend mit Maxima im Spätherbst und Minima im Frühling (Abbildung 14b). Die Werte korrelieren ungefähr mit dem Temperaturverlauf über ein Jahr, allerdings mit einer Verschiebung um mehrere Monate (Abbildung 14e). Ebenfalls kann man eine schwache Korrelation mit Niederschlag und Rheinpegel feststellen (Abbil-

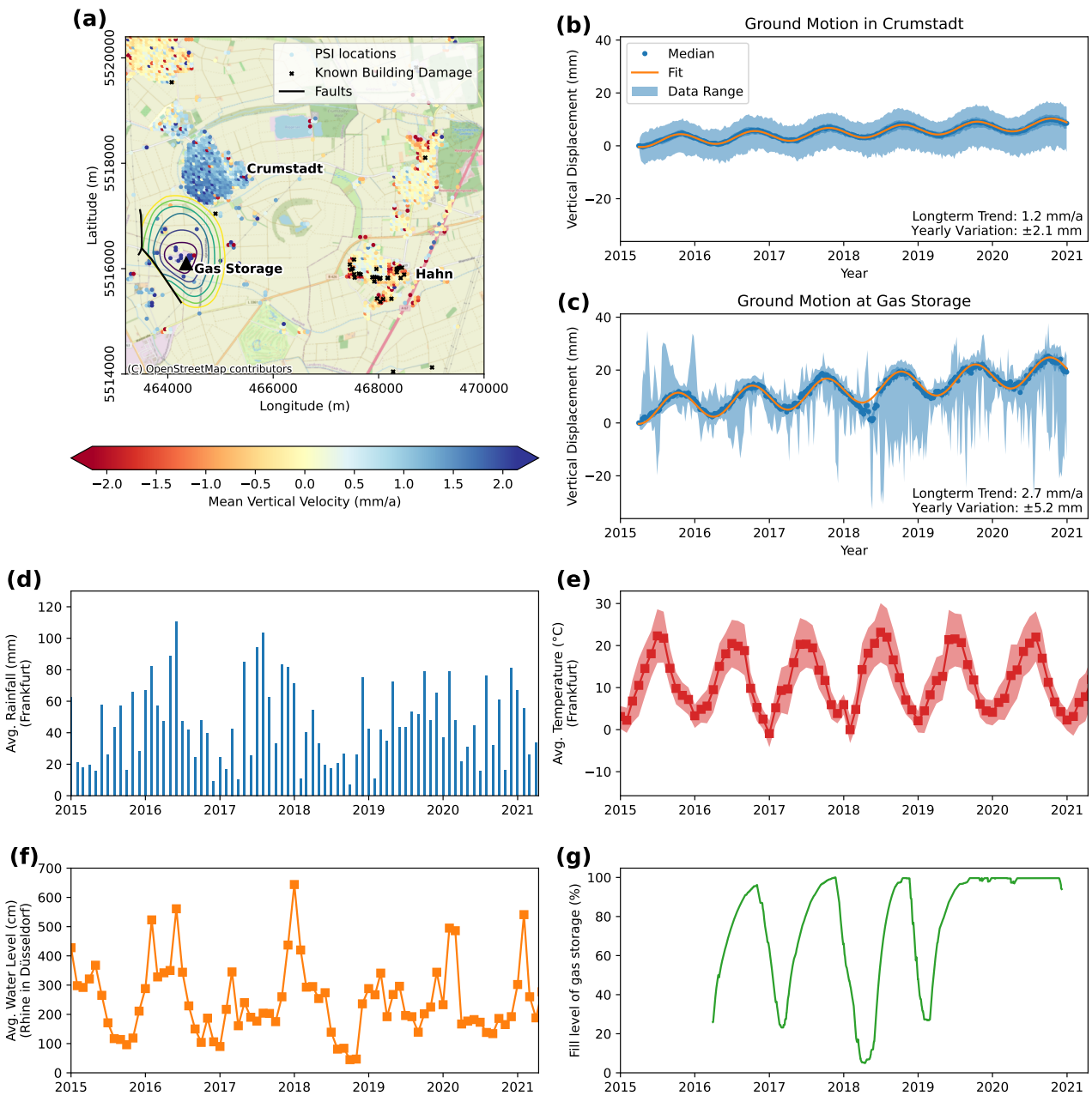


Abbildung 14: Genauere Analyse der Hebungen im Ort Crumstadt. a) Karte mit gemittelten Vertikalgeschwindigkeiten über den gesamten Beobachtungszeitraum, Tiefenlage des Gasreservoirs inkl. Störungen, sowie bekannte Gebäudeschäden in der Region. b) Zeitreihe aller PSI Punkte in Crumstadt über den Beobachtungszeitraum, die Trendlinie (Fit) beinhaltet sowohl lineare als auch saisonale Komponenten. c) Analog zu b) aber unmittelbar oberhalb des Gasspeichers. d) Niederschlag im Beobachtungszeitraum in FFM. e) Mittlere Monatstemperatur im Beobachtungszeitraum in FFM. f) Rheinpegel in Düsseldorf. g) Füllstand des Gasspeichers laut den Angaben der Betreibergesellschaft.

dung 14d&f). Generell scheint der Rheinpegel grob mit dem Niederschlag und Temperatur zu korrelieren und spiegelt so ebenfalls die generelle Witterung in einem Monat wieder.

Nimmt man einen Zusammenhang der Schwankungen mit jahreszeitlichem Quellen und Schrumpfen von quellfähigen Schichten an, so sollten diese grob mit dem Grundwasserspiegel in den oberen Bodenschichten korrelieren. In Crumstadt kommen hierfür vor allem Auenlehme und torfhaltige Böden der ehemaligen Neckararme in Frage. Bis dato waren leider keine zeitlich hochaufgelösten Grundwassermessdaten verfügbar, da aber der Grundwasserflurabstand in der Region sehr gering ist, teilweise wenige Dezimeter unter Geländerunterkante, und der Hauptgrundwasserleiter sowohl mit dem Rhein, als mit den alten Neckararmen eng hydraulisch verknüpft ist, wurde der Rheinpegel hier stellvertretend für die Grundwasserdaten angenommen. Allerdings konnten noch keine Rheinpegeldata einer Messstation in der Nähe (z.B. Mainz oder Mannheim) angefordert werden. Daher ist die Korrelation mit dem Rheinpegel in Düsseldorf die bislang einzige Option (Abbildung 14f).

Eine weitere Quelle von Oberflächenbewegungen in der Region könnte der jahreszeitliche Füllstand der Gaskavernenspeicher im ehemaligen Gasfeld Riedstadt/Stockstadt sein. In der Regel werden die Kavernenspeicher mit preislich günstigem Gas im Frühjahr und Sommer gefüllt und allmählich im Winter geleert. Hieraus kann sich durch Dynamiken im Reservoir und Bewegung entlang von Störungen eine Bewegung bis an die Oberfläche ergeben. Insbesondere die räumliche Nähe zu den Oberflächenanlagen des Gasspeichers und der Speicherformation im Untergrund lässt eine solche Schlussfolgerung zu (Abbildung 14c). Der Betreiber MND Energy Storage Germany GmbH gibt auf seiner Webseite die Möglichkeit die Füllstände ab 2016 abzurufen (Abbildung 14g). Es lassen sich hier die genannten Füllstandszyklen für die Jahre 2016 bis 2019 erkennen. Diese sind aber nicht regelmäßig und ähneln eher einer Sägezahnkurve als gleichmäßigen Schwankungen. Darüberhinaus, sind ab 2019 keine weiteren Zyklen erkennbar. Die jährlichen Schwankungen der vertikalen Bodenbewegung sind aber dennoch zu messen.

Die genaue Ursache für die Schwankungen im Bereich Crumstadt kann nicht abschließend geklärt werden. Ein Zusammenhang mit klimatischen Veränderungen im Jahresverlauf ist sehr wahrscheinlich. Dieser wird anscheinend noch durch die besondere Konstellation mit Boden und Grundwasser, sowie mit den Aktivitäten am Gasspeicher verstärkt, was zu einer größeren Schwankung und insgesamt einer Hebung in der Region führt. Für genauere Analysen einzelner Regionen können externe Zeitreihen gut verwendet werden, allerdings müssen diese teilweise aufwändig beschafft werden. Einige Daten, wie z.B. Wetterdaten können über öffentlich verfügbare Datenbanken oder APIs abgefragt werden. Eine einfache öffentliche Verfügbarmachung von Daten wie beispielsweise für die Rheinpegeldata ist zu befürworten. Diese konnten für die Stadt Düsseldorf, dank einer guten öffentlichen Datenbank ([↔Open Data Portal Düsseldorf](#)) einfach heruntergeladen werden.

2.1.5.2 Prüfung weiterer Datenquellen

Vorangegangene Satellitenmissionen Um die detektierten Bodenbewegungen mit Bewegungsursachen in Zusammenhang zu bringen, zeigen sich wie im oben beschriebenen Beispiel von Crumstadt Zeitreihen als sinnvoll. Liegt die Bewegungsursache jedoch vor 2015 kann diese nicht mit den Sentinel-1 Daten validiert

Tabelle 2: Pearson Korrelationskoeffizienten zwischen GNSS und PSI Daten.

Ort	Koeffizient	p-Wert
Bad Homburg	0.22	<0.05
Frankfurt a.M.	-0.29	<0.05
Kloppenheim/Frankfurt	-0.06	0.28

werden. Treten bei der Analyse der Bodenbewegungen Fälle auf, bei denen weiter in die Vergangenheit zurückgeschaut werden muss, könnten die Daten ehemaliger Satellitenmissionen, wie RADARSAT, ENVISAT und ALOS zu Hilfe genommen werden.

TerraSAR-X und Tandem-X Als InSAR Zoom-Produkte werden hochaufgelöste InSAR Produkte bezeichnet, die in Deutschland mittels der Satelliten TerraSAR-X und Tandem-X mit einer Genauigkeit von 0,25-3 m erzeugt werden können. Aufgrund der Datengröße und -verfügbarkeit werden diese Daten bisher nicht wie bei den Sentinel-PSI-Daten für ganz Deutschland erzeugt. Die Datenstapel der Zeitreihen werden aktuell nur für sogenannte „Fokus-“, „Risiko-“ oder „Gefährdungsgebiete“ erzeugt. Durch die hohe räumliche Auflösung können hier Bodenbewegungen auf Gebäudeebene erkannt und analysiert werden. Die Daten können kostenpflichtig beim DLR erworben werden. Werden im weiteren Verlauf des Projektes durch die Kombination von BBD- und Laserscanning-Daten Fokusgebiete in diesem Projekt ausgewiesen, kann die Beschaffung und PSI-Aufbereitung der TerraSAR-X Daten geplant werden.

SBAS Verfahren Unabhängig von der Datenquelle können für Bodenbewegungen aus Radardaten zwei unterschiedliche Verfahren genutzt werden – das Persistent Scatterer Interferometrie (PSI) Verfahren und das Small Baseline Subset (SBAS) Verfahren. Beim SBAS-Verfahren fungiert im Gegensatz zum PSI-Verfahren nicht ein Masterimage für die gesamte Zeitreihe, sondern es werden zeitlich kleine Basislinien gewählt.

GNSS Daten Die PSI Daten können mit Zeitreihen des Globalen Navigations-Satelliten Systems (GNSS) von fixen Messstationen verglichen werden. Hierzu wurden alle Scatterer im Umkreis von 250 m um eine GNSS Messtation gemittelt und mit der GNSS Zeitreihe verglichen. Da die GNSS Zeitreihen mit Tageswerten vorliegen, wurden diese auf die entsprechenden PSI Erfassungstage heruntergerechnet. Sowohl qualitativ (Abbildung 15) als auch quantitativ können beide Zeitreihen nur schlecht mit einander verglichen werden. Eine Pearson Korrelation zeigt zwar annähernd normalverteilte Datenpunkte für beide Zeitreihen, die Korrelationskoeffizienten und p-Werte zeigen allerdings lediglich eine schwache bis nicht vorhandene Korrelation (Tabelle 2).

2.1.5.3 Pythonmodul 'u4py'

Jupyter Notebooks, Skripte und weitere Funktionen zur Datenanalyse werden in einem Pythonmodul im [↔GitLab-Repository der TU-Darmstadt](#) (gehostet von der RWTH Aachen) gesammelt und am Ende in ihrer aktuellsten Version zur Verfügung gestellt. Eine Kurzdokumentation der einzelnen Bestandteile kann im Repository abgerufen werden.

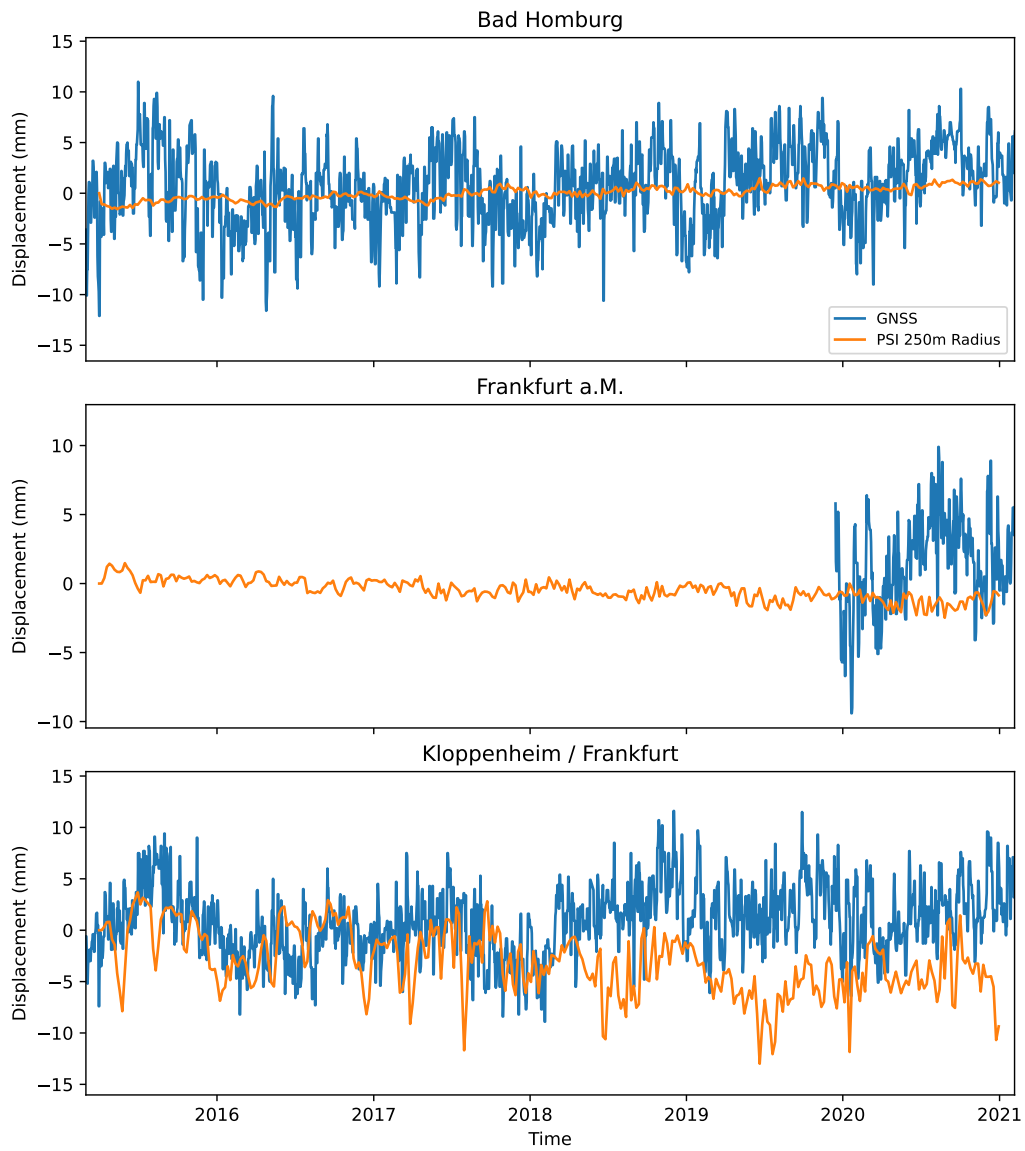


Abbildung 15: Vergleich von PSI und GNSS Zeitreihen an drei Standorten in Hessen. GNSS Daten vom [↔BKG GNSS Data Center](#).

2.1.6 AP 6: Berichterstellung und Datenabgabe

Abgegeben wird das ArcGIS Pro Projekt “Umwelt4punkt0“ mit folgendem Inhalt:

- Input BBD PSI Daten
- Toolboxes:
 - Kacheldarstellung
 - GroundMotionsAnalyser
- Layer Kacheldarstellungen:
 - BBD_2021_PSI_Ost_West_Select_PointToRaster
 - BBD_2021_PSI_Vertikal_Select_PointToRaster
- Layer Ground Motion Analyser:
 - GMA_Heb
 - GMA_Setz

Die nachbearbeiteten Raster sowie der Bewegungsatlas werden jeweils pro Pilotregion als einzelne GIS Projekte abgegeben. Zu jedem dieser Projekte existiert ein Ordner in dem einzelne Layerdateien, sowie die prozessierte Datengrundlage vorliegt. Genauere Informationen zu den einzelnen Daten sind in Abschnitt 2.1.3.7 und 2.1.3.8 gegeben.

Zusätzlich wird die Layerstildatei für die PSI Daten für QGIS (PSI_Layerstildatei_QGIS.qml) abgegeben. Die verwendeten Skripte und Notebooks werden ebenfalls als einzelne Dateien abgegeben.

2.2 Erfolgte oder geplante Veröffentlichung der Ergebnisse

- Teilnahme und Posterpräsentation beim BBD Workshop am 08.09.2022 in Hannover
- Einreichung eines Abstracts für die Jahrestagung der Deutschen Gesellschaft für Photogrammetrie, Fernerkundung und Geoinformation (DGPF) im März 2023
- Einreichung eines Papers für das Joint Urban Remote Sensing Event (JURSE) im Mai 2023 - Rückmeldung steht aktuell noch aus
- Einreichung eines Abstracts für die Jahrestagung der Deutschen Geophysikalischen Gesellschaft (DGG) im März 2023 - Rückmeldung steht aktuell noch aus
- Einreichung eines Abstracts für die European Geosciences Union (EGU) General Assembly 2023 im April 2023 - Rückmeldung steht aktuell noch aus

Die Skripte und Tools werden als Python-Quellcode in einem Git-Repository veröffentlicht (siehe Kapitel 2.1.5.3).

3 Zusammenfassung und Ausblick

Insgesamt konnte der überwiegende Teil der geplanten Vorhaben erfolgreich abgeschlossen werden. Insbesondere ein Workflow zur flächenhaften Darstellung und zur Detektion von kritischen Bewegungsregionen (Ground Motion Analyzer) konnte implementiert werden. Zu Beginn des Projektes zeigten sich einige Unzulänglichkeiten bei den Differenzenplänen, jedoch konnten frühzeitig neue Daten angefordert werden. Erste Verbesserungen der Datengrundlage liegen bereits vor. Eine Identifikation von Bewegungsdaten konnte exemplarisch stattfinden, wenngleich diese bislang noch auf ungenauen Daten beruht. Der Ablauf und Aufwand für weitere Arbeitsschritte und detailliertere Studien kann so besser abgeschätzt werden. Die erreichten Meilensteine sind unter anderem:

1. Zusammenfassung aller vorhandenen Datenquellen in einem GIS-Projekt mit einheitlicher Darstellung.
2. Flächige Darstellung der Bodenbewegungsdaten in einer Kacheldarstellung für ganz Hessen.
3. Einheitlicher Workflow zur Verarbeitung von Differenzenplänen und Höhenmodellen um Objekte die eine Auswertung erschweren (z.B. Artefakte, Gebäude) zu berücksichtigen.
4. Manuelle Klassifikation von Hebungen und Senkungen in den Pilotregionen, als Vorstufe einer (teil-) automatisierten Klassifikation mittels verschiedener Kriterien.
5. Identifizierung verschiedener Probleme die eine Integration von BBD-Daten, Höhenmodellen und Differenzenplänen verhindern.
6. Untersuchung spezieller, kleinräumiger Hebungen und Senkungen mit erweiterter Datenbasis (z.B. Klima, Hydrologie, Geologie) um die Plausibilität der Daten festzustellen.

Ausblick Die neue Datengrundlage, welche unter anderem besser referenzierte Geländemodelle und aktualisierte BBD-Daten beinhaltet, sollte nun als nächstes in den bestehenden Workflow integriert werden. Damit kann eine bessere, vollständigere Bearbeitung der Daten erfolgen. Artefakte die sich aus der Prozessierung der Höhenmodelle ergeben, könnten somit vermieden werden. Dies vereinfacht die Detektion und Klassifizierung von Hebungen und Senkungen. Es bietet sich an, die bereits manuell klassifizierten Bodenbewegungen einer genaueren statistischen Analyse zu unterziehen. Diese könnte Hinweise auf quantifizierbare Parameter ergeben mit welchen eine automatisierte Klassifikation von Bewegungsgebieten in einem größeren Raum möglich wäre (z.B. mittels Convolutional Neural Networks). Weitere Datenquellen können ebenfalls bei der Klassifikation und Korrelation integriert werden. Daher sollten baldmöglichst dementsprechende Daten bei den zuständigen Stellen erfragt werden. Unter anderem Grundwasserstände und -verläufe, Klimadaten, Pegelstände großer Flüsse und weitere geodätische Messdaten (Nivellment, GNSS, etc.) können einen wichtigen Zusatzbeitrag zur Klassifikation leisten und somit auch zum Prozessverständnis beitragen. Im weiteren Projektverlauf sollen insbesondere auch die zeitlichen Aspekte eine Rolle spielen, sowie eine konkrete Ursachenforschung für größere Regionen betrieben werden.