



Master Thesis

im Rahmen des

Universitätslehrganges „Geographical Information Science & Systems“
(UNIGIS MSc) am Interfakultären Fachbereich für GeoInformatik (Z_GIS)
der Paris Lodron-Universität Salzburg

zum Thema

Messung von Bodenverschiebungen durch Fernerkundung: Eine Anwendung am Öraefajökull-Vulkan mit multi- temporaler Bildkorrelation von Sentinel-2-Daten

vorgelegt von

BSc. Cédric Reymond

104872, UNIGIS MSc Jahrgang 2017

Betreuer:

Dr. Dirk Tiede

Mag. Daniel Hölbling

Zur Erlangung des Grades

„Master of Science (Geographical Information Science & Systems) – MSc(GIS)“

Adliswil, 30. November 2019

Eidesstattliche Erklärung

Hiermit versichere ich, diese Master Thesis ohne fremde Hilfe und ohne Verwendung anderer als der angeführten Quellen angefertigt zu haben, und dass die Arbeit in gleicher oder ähnlicher Form noch keiner anderen Prüfungsbehörde vorgelegen hat. Alle Ausführungen der Arbeit, die wörtlich oder sinngemäss übernommen wurden, sind entsprechend mit der Urheberschaft gekennzeichnet.

A handwritten signature in black ink that reads "C. Reymond". The signature is written in a cursive style with a large initial "C" and a long, sweeping underline.

Adliswil, 30.11.2019

Danksagung

Ich möchte mich an dieser Stelle ganz herzlich bei allen bedanken, die mich während meines Studiums und dieser Master Thesis unterstützt haben.

Vor allem bedanke ich mich bei meinen beiden Betreuern Herrn Dr. Dirk Tiede und Herrn Daniel Hölbling. Sie haben mir die Möglichkeit gegeben, das Thema der Master Thesis durchzuführen und haben mich stets mit hilfreichen Feedbacks und Anregungen unterstützt und motiviert. Mein Dank gilt zusätzlich Professor Dr. Andreas Kääb, welcher mir bereitwillig Auskunft und Ratschläge zur Verwendung der Software CIAS gegeben hat. Florian Hediger danke ich herzlich für das Korrekturlesen dieser Arbeit.

Vielen lieben Dank auch an das ganze UNIGIS-Team für die kompetente Betreuung meines berufsbegleitenden Studiums.

Letztlich möchte ich meiner Familie und Freunden für die Geduld, Hilfsbereitschaft und Unterstützung danken, die sie mir im Verlaufe des dreijährigen Studiums entgegengebracht haben.

Zusammenfassung

Gravitative Massenbewegungen stellen ein bedeutendes Naturrisiko dar, welches durch den aktuellen Klimawandel weiter zunehmen wird. Das Monitoring dieser Naturgefahren ist daher wichtiger Bestandteil eines Risikomanagements. Gegenwärtig müssen Feldmessungen an oft schwer zugänglichen Orten durchgeführt werden. Die Fernerkundung kann dabei als alternative Methodik dienen, die grosses Potential birgt.

In dieser Masterarbeit wurden multi-temporale Bildkorrelationen von Sentinel-2-Daten über den Zeitraum von 2016 bis 2018 in drei grossflächigen Untersuchungsgebieten rund um den isländischen Vulkan Öräfajökull durchgeführt, um die dort vorkommenden Massenbewegungen mittels Fernerkundung zu detektieren. Der dafür entwickelte Workflow wurde so konzipiert, dass er wiederholt und auf andere Gebiete übertragen werden kann. Er besteht aus der Datenvorbereitung, dem Image-Matching durch eine normierte Kreuzkorrelation, der Datennachbearbeitung und der Visualisierung der Ergebnisse. CIAS hat sich gegenüber COSI-Corr und MicMac im Rahmen einer Evaluation als die geeignetste Anwendung zur Berechnung der normierten Kreuzkorrelation erwiesen.

Die erhaltenen Ergebnisse sind in Bezug auf die Lokalität der gemessenen Bodenverschiebungen sehr interessant: Bodenveränderungen entlang von mäandrierenden Fließgewässern werden sichtbar. Fließrichtungen von Gletschern zum Tal lassen sich erkennen und gar innerhalb von Gletschern Abschnitte mit besonders grossen Fließbewegungen aufzeigen. Der Geröll-Transport vor einer Gletscherzunge und auf dem Rücken eines anderen Gletschers werden erkannt. Zudem werden ganz allgemein grössere Bodenverschiebungen an Steilhängen und Seitenmoränen detektiert. Jedoch sind über alle Untersuchungsgebiete und über alle verschiedenen Zeitabschnitte die ermittelten Verschiebungen unrealistisch hoch. Hier braucht es weitere Untersuchungen, wie diese entstehen und wie sie zu beheben sind. Die räumliche und zeitliche Auflösung von Satellitendaten wird zukünftig weiter stark zunehmen, was beste Möglichkeiten bietet, um mittels automatisierter Fernerkundung grossflächig Dauerbeobachtungen durchzuführen.

Schlagwörter:

Massenbewegungen – Bodenverschiebungen – Fernerkundung – Öräfajökull – Sentinel-2 – Image-Matching – Normierte Kreuzkorrelation – CIAS

Abstract

Gravitational mass movements represent a significant natural risk, which will continue to increase as a result of the current climate change. Monitoring these natural hazards is therefore an important part of a risk management. At present, field measurements have to be made in places that are often difficult to reach. Remote sensing can serve as an alternative methodology that holds great potential.

In this master thesis, multi-temporal image correlations of Sentinel-2 data were performed over the period of 2016 through 2018 in three large study areas around the Icelandic volcano Öräfajökull in order to detect the mass movements by remote sensing. The workflow developed for this has been designed so that it can be repeated and transferred to other areas. It consists of data preparation, image matching through normalized cross-correlation, data post-processing and visualization of the results. CIAS has proved to be the most suitable application for the calculation of normalized cross-correlation in comparison to COSI-Corr and MicMac.

The results obtained are very interesting in relation to the location of the measured ground displacements: Soil changes along meandering watercourses become visible. Flow directions from glacier to valley can be recognized and even within glaciers sections with particularly large movements can be identified. The rubble transport in front of a glacier tongue and on the back of another glacier are detected. In addition, larger soil displacements on steep slopes and lateral moraines are generally detected. However, over all study areas and over all different time periods, the displacements determined are unrealistically high. Here it needs further investigations, how these arise and how these are to be remedied. The spatial and temporal resolution of satellite data will continue to increase strongly, which offers the best opportunities to carry out long-term observations using automated remote sensing.

Keywords:

mass movements – ground displacements – remote sensing – Öräfajökull – Sentinel-2 – image matching – normalized cross-correlation – CIAS

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	9
1.1	Ausgangslage	9
1.2	Forschungsziel	10
2	Material & Methoden	12
2.1	Geodynamik und Klima in Island	12
2.2	Untersuchungsgebiet	13
2.3	Multi-temporale Bildkorrelation	17
2.4	Sentinel-2-Daten	22
2.5	Workflow in CIAS	29
2.6	Nachbearbeitung des CIAS-Outputs	33
2.7	Visualisierung	35
3	Ergebnisse	37
3.1	Parameter-Testing im Untersuchungsgebiet A	37
3.2	Untersuchungsgebiet A: Statistische Masse des CIAS-Outputs	43
3.3	Untersuchungsgebiet A: Filterung nach Korrelationskoeffizient	49
3.4	Untersuchungsgebiet A: Visualisierung mit Verschiebungsvektoren.....	55
3.5	Untersuchungsgebiet B: Statistische Masse des CIAS-Outputs	57
3.6	Untersuchungsgebiet B: Filterung nach Korrelationskoeffizient	62
3.7	Untersuchungsgebiet B: Visualisierung mit Verschiebungsvektoren.....	68
3.8	Untersuchungsgebiet C: Statistische Masse des CIAS-Outputs	70
3.9	Untersuchungsgebiet C: Filterung nach Korrelationskoeffizient.....	75
3.10	Untersuchungsgebiet C: Visualisierung mit Verschiebungsvektoren	81
4	Diskussion.....	84
4.1	Beurteilung des Anwendungsdesigns.....	84
4.2	Beurteilung der Resultate	89

5	Fazit und Ausblick	95
6	Literaturverzeichnis	97

Abkürzungsverzeichnis

ASCII *American Standard Code for Information Interchange*
CIAS *Correlation Image Analysis Software*
COSI-Corr *Co-registration of Optically Sensed Images and Correlation Software*
CSV *Comma-separated Values*
ENVI *Environment for Visualizing Images*
EPSG *European Petroleum Survey Group*
ESA *European Space Agency (Europäische Weltraumorganisation)*
GNSS *Globales Navigationssatellitensystem*
IDL *Interactive Data Language*
InSAR *Interferometric Synthetic Aperture Radar (Radarinterferometrie)*
KML *Keyhole Markup Language*
MicMac *Multi Images Correspondances par Méthodes Automatique de Corrélation*
MSI *Multispectral Imaging (Multispektrales Aufnahmegerät)*
NASA *National Aeronautics and Space Administration*
NCC *Normalized Cross-Correlation (Normierte Kreuzkorrelation)*
NCC-O *Orientation Correlation*
NDVI *Normalized Difference Vegetation Index (Normierter Differenzierter Vegetationsindex)*
NIR *Near Infrared (Nahes Infrarot)*
SNR *Signal-to-Noise-Ratio (Signal-Rausch-Verhältnis)*
SPOT *Satellite Pour l'Observation de la Terre*
SQL *Structured Query Language*
SWIR *Short Wavelength Infrared (Kurzwelliges Infrarot)*
TIFF *Tagged Image File Format*
Vega *Vettore Europeo di Generazione Avanzata*
XML *Extensible Markup Language*

1 Einleitung

1.1 Ausgangslage

Gravitative Massenbewegungen stellen in Bergregionen ein bedeutendes Naturrisiko für Personen, Siedlungsgebiete und Infrastrukturanlagen dar. Der aktuelle Klimawandel bewirkt steigende Temperaturen sowie veränderte Niederschlagsverhältnisse, was zu Verschiebungen der geomorphodynamischen Gleichgewichte führt, die häufigere und intensivere Massenbewegungsprozesse zur Folge haben (Stoffel et al., 2014; Stoffel und Huggel, 2012; Rebetz et al., 1997). Zusätzlich nimmt das Risikopotential durch den steigenden Siedlungsdruck in den Bergregionen zu. Das Monitoring dieser Naturgefahren, mit einer akkuraten räumlichen und zeitlichen Auflösung, ist daher wichtiger Bestandteil eines Risikomanagements (Le Bivic et al., 2017).

Gegenwärtig werden die meisten Techniken zur Überwachung von Bodenverschiebungen von terrestrischen Referenzstationen abgeleitet. Dabei sind die konventionelle Geodäsie durch Triangulation- und Tachymetrie-Messungen oder Extensometrie-Techniken, zusammen mit Untersuchungen mithilfe von globalen Navigationssatellitensystemen (GNSS), die am häufigsten verwendeten (Delacourt et al., 2009; Leprince et al., 2007). Feldmessungen sind aufgrund der oft schwer zugänglichen Lage beschwerlich oder sogar gefährlich. Zudem sind grossflächige und komplexe Bruchgrenzen im Gelände nicht einfach zu erkennen und können oft nur an einer begrenzten Anzahl an Standorten gemessen werden (Le Bivic et al., 2017; Rosu et al., 2015).

Die Fernerkundung kann dabei als weitere Methodik dienen, welche die zuvor erwähnten Methoden ergänzen oder in Zukunft substituieren könnte. Die zunehmende Anzahl an (frei) verfügbaren Sammlungen von multi-temporalen und hochauflösenden weltraumgestützten, luftgetragenen oder terrestrischen Bildern und die Verbesserung der Fernerkundung und Bildverarbeitung im Allgemeinen haben ein grosses Potential (Stumpf et al., 2017; Debella-Gilo und Kääb, 2011; Delacourt et al., 2009). Die Fernerkundung liefert eine synoptische Ansicht eines Erdbebens, welches in unterschiedlichen Zeitintervallen wiederholt und auf unterschiedlichen Skalen (von der individuellen Erdbeben- bis zu regionalen Massstabsbeobachtung) angewendet werden kann (Le Bivic et al., 2017; Delacourt et al., 2009).

Hauptsächlich wird zwischen Aufnahmemethoden mit aktiven oder passiven Sensoren, nämlich der differentiellen SAR-Interferometrie (Interferometric Synthetic Aperture Radar bzw. InSAR) oder der digitalen Bildkorrelation von optischen Bilddaten unterschieden. Beide Fernerkundungsmethoden können grossflächige Gebiete abdecken. Verglichen mit passiven Sensoren kann die InSAR-Technik bei allen Wetterbedingungen und auch in der Nacht

angewandt werden. Sie hat sich als geeignete Methode beim Monitoring von sehr langsamen Bodenverschiebungen (weniger als 1 Meter pro Jahr) erwiesen (Stumpf et al., 2017). Jedoch ist diese Technik bei rascher fortschreitenden Massenbewegungen nicht in der Lage Verschiebungsrichtungen im radiometrischen Nahfeld – also bei der Eruptionsquelle – festzustellen, da die grossen Amplituden der in diesem Bereich vorhandenen Verschiebungen eine Dekorrelation der interferometrischen Phase verursachen und so in diesem Bereich Ergebnisse mit niedriger Auflösung resultieren (Rosu et al., 2015). Optische Fernerkundungsmethoden können aufgrund der passiven Sensoren auch die Verschiebungen an der Eruptionsquelle erfassen (Rosu et al., 2015). In den letzten Jahren ist die Anzahl an verfügbaren hochauflösenden Satellitenbildern (z.B. Landsat 8, SPOT-6 und -7, Pléiades, Sentinel-2) stark gewachsen und decken heute nahezu jeden Erdteil mit einer hohen zeitlichen Auflösung ab (Stumpf et al., 2017; Le Bivic et al., 2017).

Bei der digitalen Bildkorrelation werden zwischen zwei zu unterschiedlichen Zeitpunkten aufgenommenen und orthorektifizierten Bildern die Verschiebungsfehler gemessen. Die Empfindlichkeit des Verschiebungsfehlers kann durch die Korrelation von Subpixeln zusätzlich erhöht werden (Le Bivic et al., 2017). Delacourt et al. (2004) konnten aufzeigen, dass zur Bildkorrelation auch Satellitenbilder mit terrestrischen Aufnahmen kombiniert werden können, sofern die Orthorektifizierung eine genügend hohe Genauigkeit aufweist. Die Qualität des Ergebnisses hängt laut Stumpf et al. (2014) neben der räumlichen Auflösung des Bildes stark von der Genauigkeit der Orthorektifizierung ab, die ein digitales Höhenmodell mit einer ähnlichen räumlichen Auflösung wie die zu korrelierenden Bilder erfordert. Orthorektifizierte Satellitendaten können heutzutage sehr einfach, günstig und manchmal auch kostenfrei bezogen werden. Zudem ist es der wissenschaftlichen Gemeinschaft zu verdanken, dass inzwischen verschiedene Open-Source Bildverarbeitungsprogramme mit Korrelationsfunktionen zur Verfügung stehen (Le Bivic et al., 2017).

1.2 Forschungsziel

Das Forschungsziel dieser Masterarbeit ist die Messung von Bodenverschiebungen durch Fernerkundung mit frei verfügbaren Satellitendaten. Dafür wird eine multi-temporale Bildkorrelation von Sentinel-2-Daten über den Zeitraum von 2016 bis 2018 um den Vulkan Öräfajökull durchgeführt, sowie die erhaltenen Ergebnisse untersucht und diskutiert.

Um das Forschungsziel zu erreichen, werden folgende operative Teilziele verfolgt:

- Suchen und Sammeln von brauchbaren Sentinel-2-Zeitreihen über den Zeitraum 2016–2018.
- Evaluation der für den Anwendungszweck geeignetsten Open-Source Bildverarbeitungssoftware aus CIAS, COSI-Corr und MicMac.

- Durchführung einer digitalen Subpixel-Bildkorrelation nach Stumpf et al. (2017) mit dem gewählten Bildverarbeitungsprogramm.
- Bewertung der Plausibilität der Ergebnisse durch eine «Image Control Points»-Analyse nach Le Bivic et al. (2017).
- Diskussion der Ergebnisse und Vergleich mit wissenschaftlicher Literatur zu ähnlichen Arbeiten.

2 Material & Methoden

2.1 Geodynamik und Klima in Island

Island ist aus geologischer Sicht ein äusserst interessantes Gebiet, da auf der Insel in einzigartiger Weise gleich mehrere geologische Prozesse gleichzeitig stattfinden und sich gegenseitig beeinflussen (Hannesdóttir et al., 2010). Durch die Lage auf dem Reykijanesrücken, welcher den nordöstlichen Teil des Mittelatlantischen Rückens bildet, liegt Island sowohl auf der Nordamerikanischen als auch auf der Eurasischen Platte. Die Plattengrenze durchquert die Insel in etwa diagonal und die Platten entfernen sich jährlich ca. 2 cm voneinander weg. Jedoch sorgt Vulkanismus für ständigen Nachschub von geschmolzenem Gesteinsmaterial aus dem Erdinneren, weshalb sich die Insel jährlich um ca. 2 cm pro Jahr in Ost-West-Richtung ausdehnt. Island bildet mit einem Alter von ca. 17 bis 20 Millionen Jahren aus geologischer Sicht daher auch eine sehr junge Erdmasse.

Island ist eine der aktivsten terrestrischen Vulkanregionen der Erde mit einer Ausbruchshäufigkeit von durchschnittlich über 20 Ereignissen pro Jahrhundert (Hannesdóttir et al., 2010). Die aktiven Vulkane in Island sind etwa 30 Vulkansystemen zugeordnet und konzentrieren sich entlang des Verlaufes der Plattengrenzen, beziehungsweise der Zentralspalte des Mittelatlantischen Rückens, da hier frisches Magma aufquillt. Die letzten Vulkaneruptionen fanden in den Jahren 2000 (Hekla), 2004 (Grimsvötn), 2010 (Eyjafjallajökull), 2011 (Grimsvötn) und 2014 (Baroarbunga) statt.

Erdbeben kommen aufgrund des stetigen Wachstums der Insel und dadurch entstehender Spannungen sehr häufig vor. Während kleinere, sogenannte Mikroerdbeben, bis zu zwei Dutzend Mal täglich auftreten, sind starke Erdbeben weitaus seltener. Das stärkste bisher gemessene Beben auf Island ereignete sich am 14. August 1784 im Südwesten der Insel und hatte eine Stärke von 8.0 auf der Richter-Skala, wodurch ganze Berghänge ins Rutschen gerieten.

Durch die Lage Islands nördlich des Polarkreises vergletscherte die Insel in den Eiszeiten fast vollständig. Es gab aber auch Wärmeperioden, in denen die Insel fast vollständig gletscherfrei war. Heute bedecken Gletscher je nach Quellen ca. 8–12 % der Landesoberfläche. Nahezu jeder Gletschertyp ist in Island zu finden – von zirkularen Gletschern bis zu grossen Eiskappen (z.B. Vatnajökull) – einschliesslich der vom Öräfajökull abfliessenden Alpengletschern und eisbedeckten Vulkanen wie Grimsvötn (Hannesdóttir et al., 2010). Der Gletscher mit der grössten zusammenhängenden Fläche ausserhalb der Polarregionen und mit Europas grösstem Eisvolumen ist der Vatnajökull mit einer Grösse von schätzungsweise 8'100 km² und einer fast bis zu 1'000 m dicken Eiskappe (Hannesdóttir et al., 2010). Durch die stetigen Gletscherbewegungen wird unablässig Gesteinsmaterial abgetragen und andernorts wieder

aufgetragen, wodurch Berge erodieren und Täler und Landschaften geformt werden. Die Gletscher schrumpfen aufgrund der Klimaerwärmung. Zum Beispiel verlor der Vatnajökull in den letzten 100 Jahren mehr als 10 % seiner Eismasse. Die Gletscher in Island sind alle gemässigt, was bedeutet, dass sie sich ihre Temperatur nahe am Schmelzpunkt befindet (Hannesdóttir et al., 2010). Nach Grönland stammt der höchste Anteil an Gletscherschmelzwasser, welcher in den Nordatlantik fliesst, von isländischen Gletschern (Björnsson et al., 2013).

Das Klima Islands ist ozeanisch kühl, geprägt durch die Lage im Atlantik nördlich des Polarkreises. Jedoch ist es aufgrund des Golfstroms allgemein milder als in anderen Regionen dieser Breitengrade. Zwei Meeresströmungen, nämlich der vom Golfstrom abzweigende relativ warme Irmingerstrom an der Südküste und der kalte Grönlandstrom an der Nordost- und Südwestküste, prägen das Klima und führen regional zu Temperaturunterschieden. Die durchschnittlichen Tagestemperaturen in den Niederungen sind im jahreszeitlichen Verlauf relativ ausgeglichen und betragen etwa 0 °C im Winter und etwa 11 °C im Sommer (Hannesdóttir et al., 2015), wobei es im Landesinneren teils deutlich kühler sein kann. Die Niederschläge betragen bis zu 2'000 mm pro Jahr in den Niederungen und bis zu 4'000 mm auf dem Vatnajökull. Die Süd-Südost-Flanke des Vatnajökull zählt im Allgemeinen zu den niederschlagsreichsten Regionen Islands, da sich dort die vom Westwind herangetragene Tiefdruckzyklone entladen. Ein Grossteil des Niederschlags auf dem Gletschergebiet fällt in Form von Schnee (Hannesdóttir et al., 2015). Hingegen zählt die Ost-Flanke des Massivs zu den Trockengebieten (Hannesdóttir et al., 2010).

2.2 Untersuchungsgebiet

Der Vatnajökull-Nationalpark wurde offiziell im Jahre 2008 eröffnet. Er ist der grösste Nationalpark in Europa und nimmt mit einer Grösse von rund 13'500 km² etwa 13 % der Oberfläche von Island ein. Vergangene – aber auch immer noch andauernde – Wechselwirkungen zwischen Feuer und Eis haben die Landschaft stark geprägt (Hannesdóttir et al., 2010).

Die Südgrenze des Nationalparks Vatnajökull bietet einige der schönsten Aussichten und markantesten Landschaften Islands: Alpengletscher, schwarze Strände, Gletscherseen, uralte Meeresklippen, Felsstürze und Erdrutsche. Die kultivierten Niederungen sind sandige Ebenen, die aus den Sedimentablagerungen der Gletscherabflüsse gebildet wurden. Alpengletscher und steile Täler dominieren die Flanken des Öræfajökull-Vulkanmassivs. Aus einigen Tälern sind die Gletscher verschwunden, während andere noch immer arbeiten (Hannesdóttir et al., 2010).

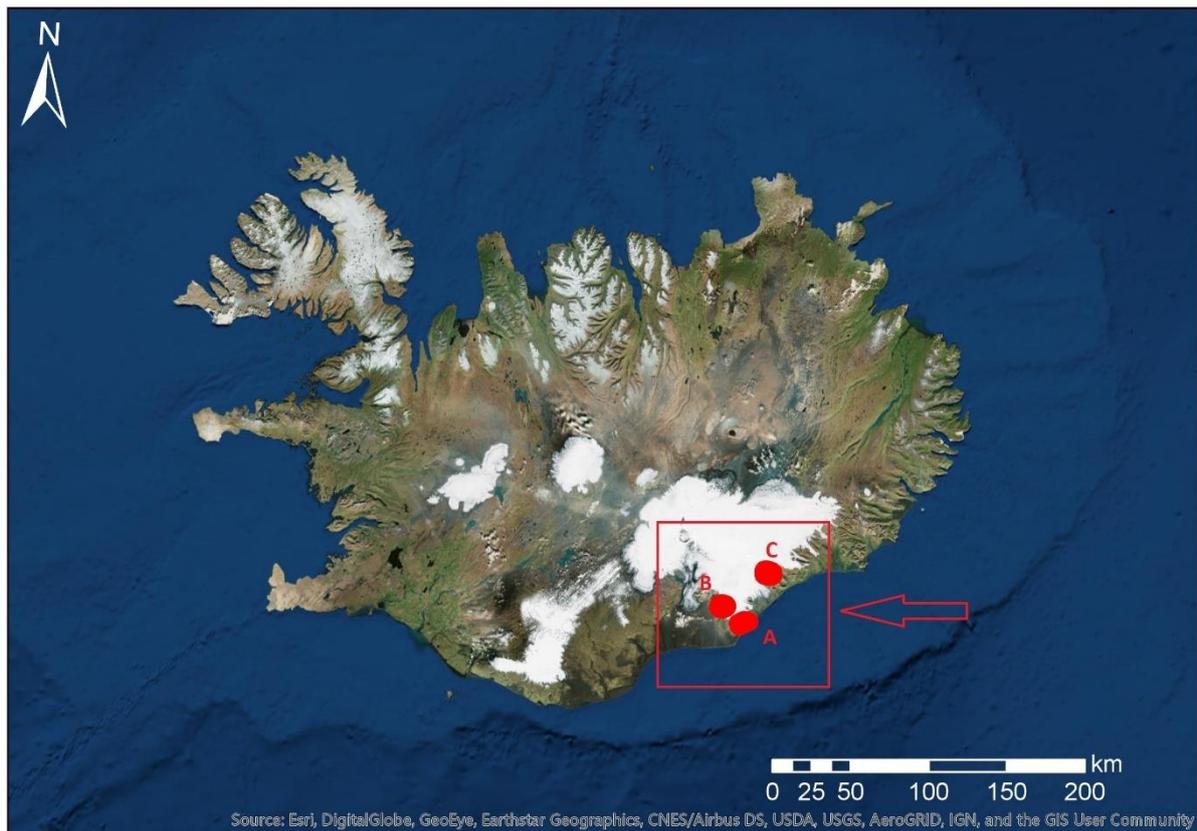


Abbildung 1: Lage der Untersuchungsgebiete am südöstlichen Rand von Island (Basemap: Esri Imagery).

Der Öräfajökull ist ein isländisches Vulkanmassiv im südlichen Teil des Vatnajökull-Nationalparks. Der im Massiv gelegene Berg Hvannadalshnúkur ist mit 2'110 m die höchste Erhebung Islands. Das dünn besiedelte Gebiet liegt in der 6'280 km² grossen Gemeinde Hornafjörður, welche 2'187 Einwohner zählt. Der Hauptort Höfn, mit 1'633 Einwohnern die grösste und einzige Stadt der Gemeinde, ist der Hauptort und befindet sich auf einer Landzunge zwischen den Fjorden Hornafjörður und Skarðsfjörður. Durch die Gemeinde führt die Ringstrasse (Hringvegur), welche als Nationalstrasse die ganze Insel in Küstennähe umrundet. Die Entfernung zu Reykjavik beträgt 459 km.

In diesem grossen Gebiet rund um das Vulkanmassiv Öräfajökull wurden drei verschiedene Untersuchungsgebiete ausgewählt, um die im Rahmen dieser Arbeit gestellten Fragestellungen zu beantworten. Die Untersuchungsgebiete sind Teil einer Gletscherzunge oder liegen am Rand von einer deren Seitenmoränen. Die drei Untersuchungsgebiete tragen den Namen des jeweils prägenden Hauptgletschers Kvíárjökull, Svínafellsjökull und Svöludalsjökull sowie zur klaren Abgrenzung die Buchstaben A, B und C als Kürzel. In allen Gebieten sind instabile Hänge vorhanden, wo potentiell Bewegungen stattfinden können oder kürzlich Bergstürze stattgefunden haben.

2.2.1 Untersuchungsgebiet A: Kvíárjökull

Das Untersuchungsgebiet A liegt am südöstlichen Rand des Öräfajökull-Vulkans und südwestlich des Kvíárjökull-Gletschers, nahe am Atlantik (Abbildung 1). Das Gebiet erstreckt sich über eine Fläche von rund 14.7 km². Innerhalb des Untersuchungsgebietes befindet sich eine ausgedehnte Gletschermoräne namens Tófusteinn. Der Perimeter ist nur im südwestlichen Teil besiedelt, wo sich ein kleiner Weiler befindet. Durch das Gebiet führt die Ringstrasse, welche in diesem Zwischenabschnitt die Ortschaften Hof und Höfn verbindet. Entlang der Strasse und zum Meer hin ist das Gebiet flach und liegt nur knapp über dem Meeresspiegel. Im nördlichen Bereich Richtung Bergmassiv steigt das Relief dagegen stark an und es ist hier mit instabilen Hängen und potentiellen Massenbewegungen zu rechnen. Zwei grössere mäandrierende Schmelzwasserflüsse namens Hólá und Stiglá durchqueren zudem das Gebiet (Abbildung 2).

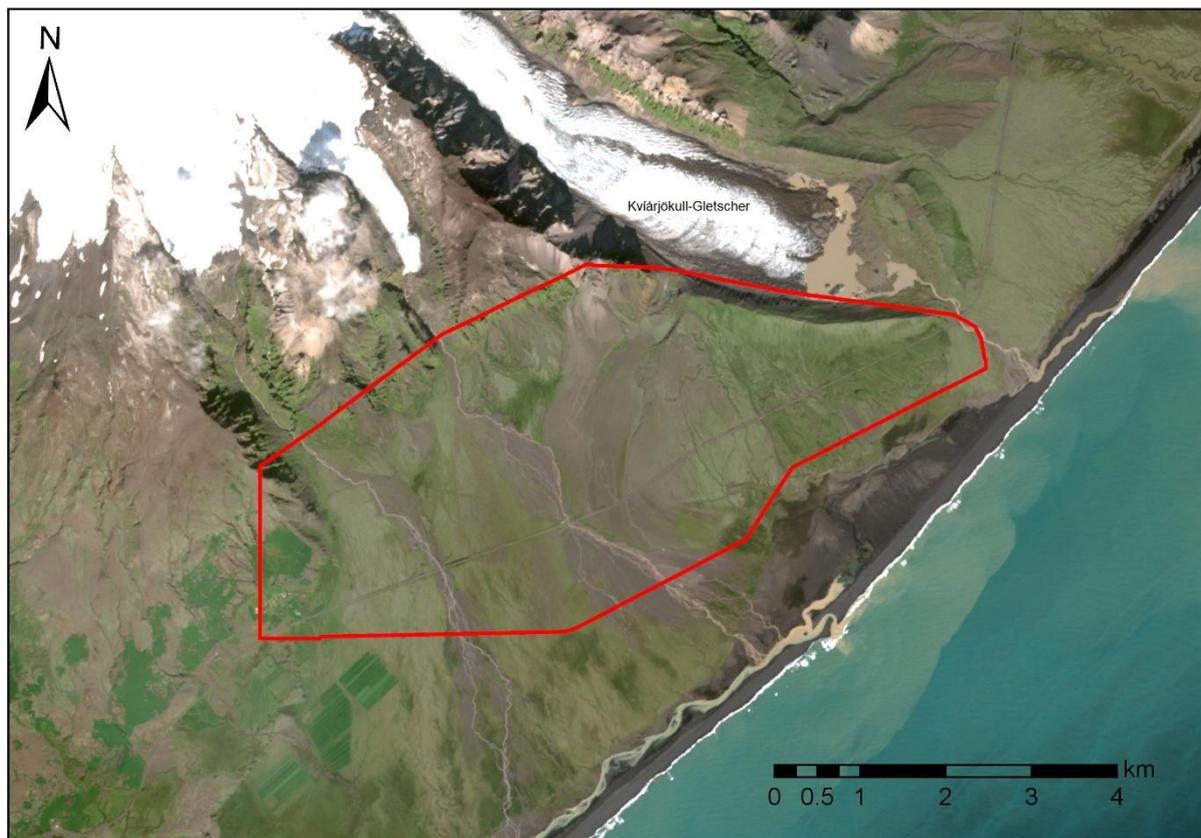


Abbildung 2: Untersuchungsgebiet A am südöstlichen Rand des Öräfajökull-Massivs (Basemap: ESA Sentinel-2).

2.2.2 Untersuchungsgebiet B: Svínafellsjökull

Das Untersuchungsgebiet B liegt am westlichen Rand des Öräfajökull-Vulkans und hat eine Fläche von rund 18.3 km² (Abbildung 1). In der Mitte durchfließt der alpine Gletscher Svínafellsjökull den Perimeter, welcher vom Öräfajökull-Vulkan in südwestlicher Richtung zu den Niederungen ragt. Zudem befinden sich nördlich und südlich des Svínafellsjökull-

Gletschers Steilhänge. Markant ist zudem die grosse Geröllfläche auf dem Gletscher am Rande des südlichen Steilhangs, welcher vor einigen Jahren durch einen Bergsturz entstanden ist. Das Gebiet ist nicht besiedelt. In Abbildung 3 ist der Perimeter auf einem Luftbild abgebildet.

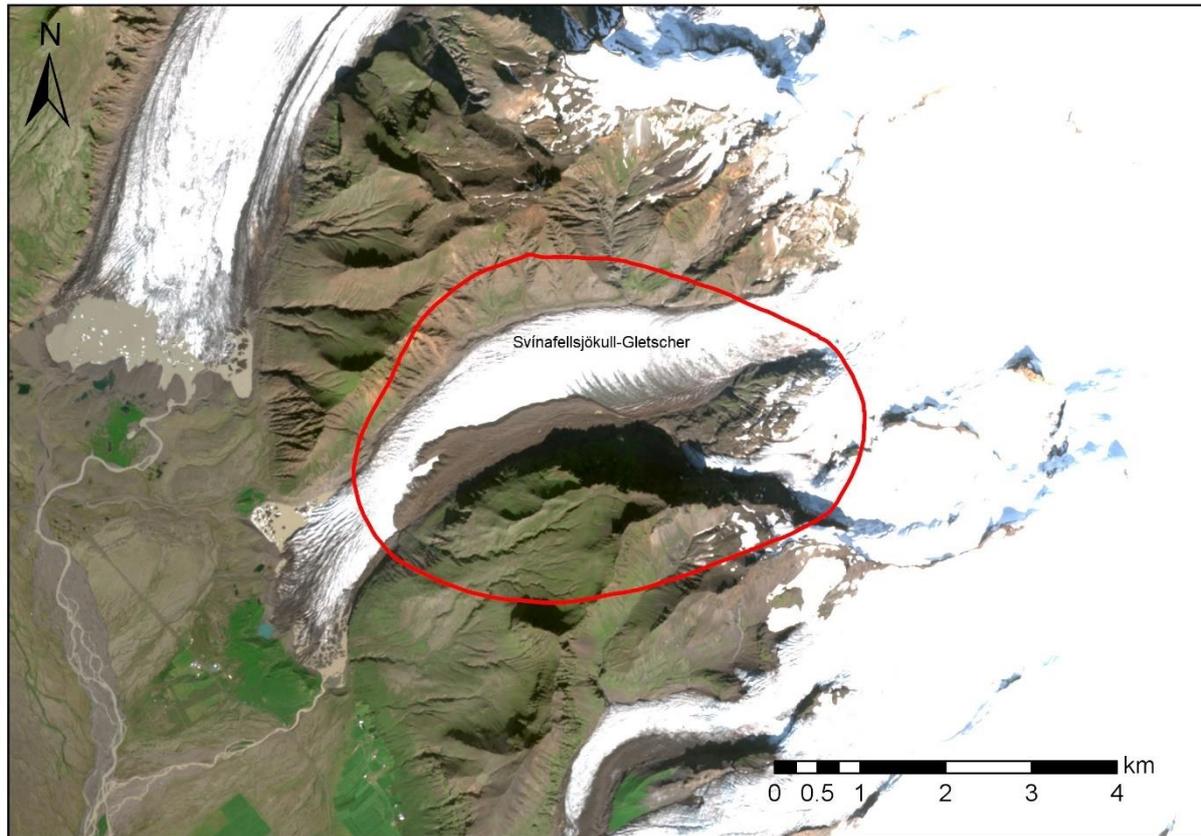


Abbildung 3: Untersuchungsgebiet B am westlichen Rand des Öräfajökull-Massivs (Basemap: ESA Sentinel-2).

2.2.3 Untersuchungsgebiet C: Svöludalsjökull

Das Untersuchungsgebiet C liegt nordöstlich des Öräfajökull (Abbildung 1). Das Gebiet erstreckt sich über eine Fläche von rund 18.2 km². Innerhalb des Untersuchungsgebietes befindet sich der Gletscher Svöludalsjökull, welcher von einem Bergmassiv zum grossen Gletscher Breiðamerkurjökull hinunterfliesst. Das Gebiet ist unbesiedelt. Gut erkennbar auf dem Luftbild in Abbildung 4 ist das Geröll, welches der Gletscher Svöludalsjökull an dessen Fusse vor sich hinschiebt.

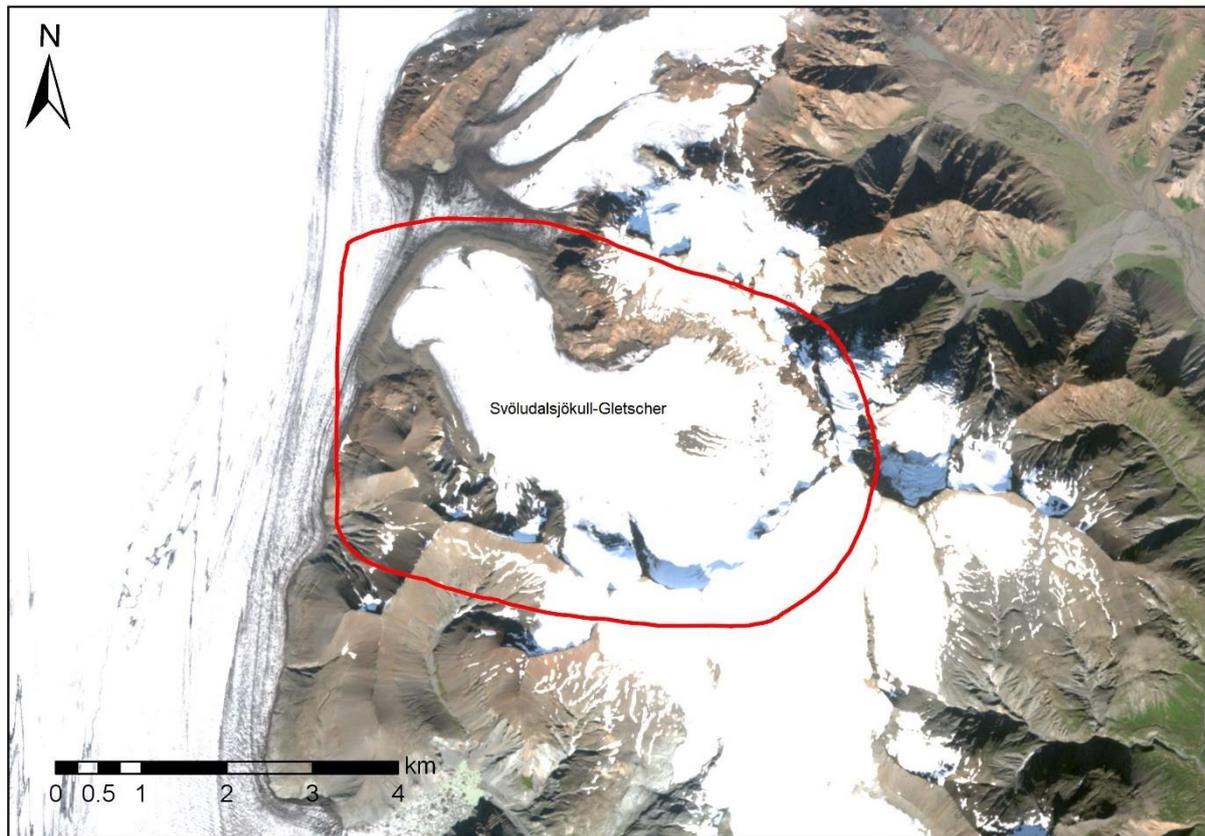


Abbildung 4: Untersuchungsgebiet C am nordöstlichen Rand des Öræfajökull-Massivs (Basemap: ESA Sentinel-2).

2.3 Multi-temporale Bildkorrelation

2.3.1 Image-Matching und normierte Kreuzkorrelation

Image-Matching oder auch Bildvergleich bezeichnet eine Gruppe von Techniken, mit denen nach entsprechenden Merkmalen oder Mustern in Bildaufnahmen gesucht werden kann. Dies kann aus zwei oder mehr Bildern aus dem gleichen Perimeter mit unterschiedlichen Betrachtungspositionen, zu unterschiedlichen Zeiten und/oder mit unterschiedlichen Sensoren erreicht werden. Konkrete Anwendungen des Image-Matching von Bildern mit Raumbezug sind beispielsweise die Co-Registration von Bildern, die Generierung digitaler Oberflächenmodelle und eben auch die Verschiebungsmessungen im Relief (Kumari et al., 2014)

Die normierte Kreuzkorrelation (NCC) ist aufgrund ihrer Robust- und Einfachheit die am häufigsten verwendete Bildkorrelationsmethodik (Kumari et al., 2014). Der Algorithmus der NCC ist eine Ähnlichkeitsmessung, die beim Image-Matching verwendet wird, um die Ähnlichkeit zwischen übereinstimmenden Entitäten in einem Bild und ihren entsprechenden Entitäten in anderen Bildern zu messen. Der Algorithmus basiert auf der Kreuzkorrelation

optischer, zueinander registrierter Eingangsdaten und einer zusätzlichen Normalisierung, um Unterschiede in Helligkeit und Kontrast auszugleichen. Aus dem berechneten maximalen Korrelationskoeffizienten lässt sich die entsprechende Verschiebung bestimmen und in Bezug zum Untersuchungszeitraum die durchschnittliche Verschiebungsgeschwindigkeit des betrachteten Objekts ableiten (Kröhnert et al., 2014). Die NCC ist sehr empfindlich gegenüber verrauschten Bildern, die durch einen signifikanten Unterschied in Massstab, Drehung oder Scherung zwischen den zu korrelierenden Bildern entstehen können (Kumari et al., 2014). Für zuverlässige Messungen sollte der Verschiebungsgrad grösser als der Verrauschungsgrad sein, welcher aus den oben genannten Fehlerquellen resultieren kann. Um dies zu erreichen, muss eine (Sub-)Pixelauflösung verwendet werden, die für die Art des zu untersuchenden Prozesses geeignet ist. Eine Verbesserung der NCC-Präzision bedeutet immer auch eine Verbesserung der Genauigkeit der Verschiebungsmessung (Kumari et al., 2014).

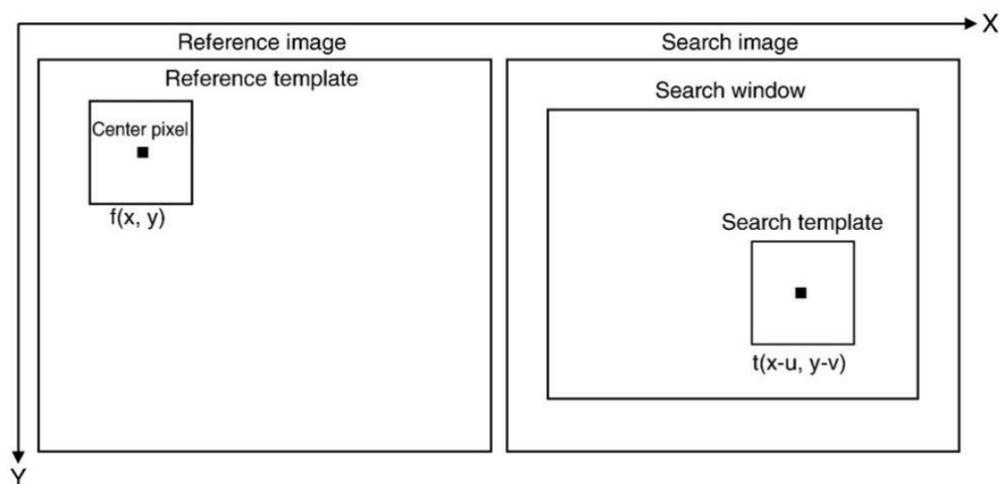


Abbildung 5: Schema der Bildpaare mit der Referenzvorlage, dem zentralen Pixel, der Suchvorlage und dem Suchfenster (Debella-Gilo und Kääb, 2011).

Ein Bild I1 («reference image») im Untersuchungsgebiet wird zum Zeitpunkt T1 und ein weiteres Bild I2 («search image») über demselben Gebiet zur Zeit T2 aufgenommen (Abbildung 5). Der Ausdruck $f(x, y)$ steht für die Intensitätswerte einer quadratischen Fläche, die eine Teilmenge von I1 darstellt. $t(x-u, y-v)$ steht für die Intensitätswerte in einem quadratischen Bereich in I2 der gleichen Grösse wie $f(x, y)$, wobei u und v ganzzahlige Pixeloffsets in x- bzw. y-Richtung sind. $f(x, y)$ wird ferner Referenzvorlage («reference template») genannt und $t(x-u, y-v)$ wird Suchvorlage («search template») genannt. Die Grösse der Schablone wird so gewählt, dass sie gross genug ist, um das Signal-Rausch-Verhältnis (SNR) zu maximieren, und klein genug, um Geschwindigkeitsgradienten zu minimieren (Debella-Gilo und Kääb, 2011). Um das entsprechende Quadrat zu $f(x, y)$ in I2 zu finden, wird

die NCC (ρ) zwischen $f(x, y)$ und dem entsprechenden Fenster in I_2 , $t(x-u, y-v)$ berechnet. Die Herleitung der NCC ρ ist in der Formel 1 aufgeführt. Die NCC ist dabei auf das zentrale Pixel des Templates bezogen und wird für jedes Pixel oder gar Subpixel im Untersuchungsgebiet durchgeführt.

$$\rho(x, y) = \frac{\sum_{x,y} (f(x, y) - \bar{f})(t(x-u, y-v) - \bar{t})}{(\sum_{x,y} (f(x, y) - \bar{f})^2 \sum_{x,y} (t(x-u, y-v) - \bar{t})^2)^{1/2}} \quad (1)$$

Die Berechnung wird fortgesetzt, indem t in jeder Iteration um einen (Sub-)Pixel verschoben wird, bis das gesamte Suchfenster abgedeckt ist. Nach Beendigung der Berechnung wird das (Sub-)Pixel (x_0, y_0) in dem Suchfenster mit dem höchsten Korrelationskoeffizienten als die wahrscheinlich beste Übereinstimmung für das zentrale Pixel der Referenzvorlage angesehen. Der euklidische Abstand zwischen den Koordinaten des Referenzpunkts $[x, y]$ und dem übereinstimmenden Punkt $[x_0, y_0]$ ergibt dann die horizontale Verschiebung.

2.3.2 CIAS

Die Software «Correlation Image Analysis Software» (CIAS) ist eine ursprünglich von Kääb und Vollmer (2000) geschriebene und dann von Kääb (2002) sowie Heid und Kääb (2012) weiterentwickelte und frei verfügbare Software, die speziell für die Bildkorrelation von Orthofotos gedacht ist. Es handelt sich um keine Open-Source-Software, da der Code kompiliert ist. Die Methodik der Bildkorrelation basiert auf den oben vorgestellten Grundsätzen der Kreuzkorrelation. Weitere Korrelationsalgorithmen unterstützt die Software nicht. Als Inputdaten werden zwei zu unterschiedlichen Zeitpunkten aufgenommene und orthorektifizierte Satelliten- oder Luftbilder im gleichen Perimeter verwendet. Wie bei jedem Image-Matching-Algorithmus müssen beide Bilder exakt die gleiche räumliche Auflösung aufweisen und aus dem gleichen Graustufen-Band bestehen. Detektoren für die Messung der Verschiebung sind Helligkeit und Kontrast. Ein grosser Vorteil der Software ist die integrierte Subpixel-Auswertung, die automatisch in der zweiten Iteration durchgeführt wird. Im ersten Durchlauf wird das Image-Matching und die NCC mit der originalen räumlichen Auflösung des Eingaberasters durchgeführt. Bei der zweiten Iteration kann die räumliche Auflösung durch ein sogenanntes Subpixel-Rendering nochmals markant erhöht werden. Die räumliche Auflösung der Pixel des Eingaberasters wird dabei durch eine mathematische Interpolation um 1/8 verfeinert. Dieser maximal mögliche Wert zur theoretischen Erhöhung der räumlichen Auflösung wurde in Debella-Gilo und Kääb (2011) durch verschiedene Tests erhoben. Dieser Vorgang ist sehr rechenintensiv, was die benötigte Zeit für die Berechnung massgeblich

erhöht. Nur so können aber auch kleinere Massenbewegungen mit Satellitendaten detektiert werden. Die Ausgangsdaten müssen noch keine Co-Registrierung aufweisen, da es in der Software die Option einer Co-Registration durch eine Helmert-Transformation gibt. Die Gesamtverschiebungen werden standardmässig in Meter gemessen, wobei dies natürlich von der räumlichen Auflösung der Pixel des Eingaberasters abhängig ist. In den Einstellungen kann ein anderes Referenzsystem gewählt werden. Ein sehr wichtiger Output-Datensatz ist die Verschiebungsrichtung, gemessen in Grad, und die korrespondierenden Korrelationsparameter, wie der durchschnittliche und der maximale Korrelationskoeffizient. Die Output-Vektorfelder werden im ASCII-Format ausgegeben. Für die Ausführung des Programms wird die «Interactive Data Language» (IDL) benötigt. IDL ist eine Software zur Analyse und Visualisierung von Daten, welche von «Exelis VIS» entwickelt wurde und heute der Firma «Harris Geospatial Solutions» gehört. Während der Ausführung führt im Programm eine Hilfe durch die Wahl passender Parameter und Einstellungen, welche dann in einem Log-File gespeichert werden.

2.3.3 COSI-Corr

Die Anwendung «Co-registration of Optically Sensed Images and Correlation Software» (COSI-Corr) wurde vom «California Institute of Technology», der «Moore Foundation» und dem «Keck Institute for Space Studies» entwickelt. Es ist grösstenteils eine Implementation der Verfahren und Methoden, die in Leprince et al. (2007) und Ayoub et al. (2009) beschrieben werden und aus deren Erkenntnissen die Software entwickelt wurde. Die Hauptfunktionalität von COSI-Corr ist die präzise Orthorektifizierung, Co-Registration und Korrelation von Bildern. Während die Orthorektifizierung und Co-Registrierung auf Fernerkundungsdaten beschränkt ist, kann die Bildkorrelation prinzipiell für alle digitalen Rasterdaten verwendet werden. Im Gegensatz zu den anderen beiden hier vorgestellten Softwareprodukten, verwendet COSI-Corr zur Bildkorrelation nicht die NCC, sondern eine frequenzbasierte Korrelationsmethodik. Die Software wurde mit IDL entwickelt und in die Applikation «Environment for Visualizing Images» (ENVI) vom Hersteller «Harris Geospatial Solutions» integriert. COSI-Corr ist im Prinzip frei downloadbar, durch die Integration in das lizenzpflichtige Produkt ENVI fallen jedoch indirekt Kosten an. Mithilfe einer graphischen Benutzeroberfläche können die gewünschten Parameter eingegeben werden. Im Vergleich zu den anderen beiden hier vorgestellten Produkten können nur sehr wenige Parameter eingegeben werden. Als Output-Format für die Vektorfelder kann zwischen einer ENVI-Datei oder einer ASCII-Datei gewählt werden.

2.3.4 MicMac

Das Produkt «Multi Images Correspondances par Méthodes Automatique de Corrélacion», kurz MicMac, ist eine kostenfreie Open-Source-Software. Sie wurde am «French National Geographic Institute» entwickelt. MicMac ist ein Allrounder-Tool im Bereich der Photogrammetrie und der zwei- sowie dreidimensionalen Bildverarbeitung und hauptsächlich an akademische Nutzer aus den Bereichen der Archäologie, Architektur, Geologie und Umwelt gerichtet. Die Anwendungen und Werkzeuge im Bereich der zweidimensionalen Bildkorrelation zur Messung von Bodenverschiebungen wurden hauptsächlich von Rosu et al. (2015) entwickelt. Als Methodik für die Bildkorrelation wird wiederum der oben beschriebene Algorithmus der NCC verwendet. Wegen der breiten Ausrichtung an Themengebieten und der Flexibilität der Software, benötigt das System relativ viele Eingabeparameter für die Bearbeitung. Mehrheitlich werden diese über eine Kommandozeile eingegeben, als Befehle in der «Extensible Markup Language» (XML) eingelesen oder können vereinzelt über eigens für gewisse Anwendungen und Pakete entwickelte Eingabefenster erfasst werden.

2.3.5 Evaluation der Bildkorrelationssoftware

Tabelle 1: Gegenüberstellung der drei untersuchten Bildverarbeitungsprogramme.

COSI-Corr	MicMac	CIAS
Allrounder-Tool	Allrounder-Tool	Spezial-Tool
Leichte Bedienung	Komplexe Bedienung	Leichte Bedienung
Sehr wenige Eingabeparameter	Viele Eingabeparameter	Wenige Eingabeparameter
Kostenpflichtig	Open-Source	Kostenfrei (kompiliert)

In Tabelle 1 sind die drei untersuchten Bildverarbeitungsprogramme bezüglich ihrer Eignung für den Anwendungszweck gegenübergestellt. Im Gegensatz zu CIAS und MicMac können in COSI-Corr nur relativ wenige Parameter für die Bildkorrelation konfiguriert werden. Dies kann zum einen als Vorteil angesehen werden, da die Software sehr einfach zu bedienen ist, zum anderen aber auch als Nachteil, da somit dem Nutzer nur sehr wenige Optionen gegeben sind, um die für den Anwendungsfall geeignetste Parametrisierung einzustellen – insbesondere bei schwierigen Anwendungsfällen (Rosu et al., 2015). Da COSI-Corr zudem nur verwendet werden kann, wenn das lizenzpflichtige Produkt ENVI zur Verfügung steht, wird dieses

Softwareprodukt im Rahmen dieser Arbeit nicht verwendet. Der Vorteil von MicMac ist die breite Anwendbarkeit der Software in unterschiedlichsten Bereichen der digitalen Bildverarbeitung. MicMac bietet eine Vielzahl an Parametern für die Messung von Verschiebungen, die relativ kompliziert über eine Windows-Kommandozeile eingegeben oder über XML-Files eingelesen werden müssen, was das Potential zur Automatisierung erhöht, jedoch auch die Benutzerfreundlichkeit verringert. Ein Vorteil von MicMac sind die, gegenüber anderen Korrelationsprogrammen, sehr guten Resultate bei kleinen Referenzvorlagen für die Korrelation (Rosu et al., 2015). MicMac hat sich bei Untersuchungen von Rosu et al. (2015) zudem im Vergleich als relativ unempfindlich gegenüber Rauschen erwiesen und kann besser mit räumlichen Inhomogenitäten aufgrund grosser zeitlicher Differenzen bei den Eingabedaten umgehen. Gegenüber der Eingabe über Kommandozeilen in MicMac, weist CIAS eine graphische Benutzeroberfläche auf, was die Arbeit mit dem Werkzeug deutlich vereinfacht. Zudem ist CIAS ein rein für die Bildkorrelation entwickeltes Programm, wogegen MicMac als Allrounder-Tool angesehen werden kann. Ein weiterer für diese Arbeit sehr wichtiger Aspekt ist das in CIAS integrierte Subpixel-Rendering zur theoretischen Erhöhung der räumlichen Auflösung um bis zu 1/8 gegenüber des Eingaberasters. Aufgrund dieser Voraussetzungen wird für diese Arbeit die Software CIAS verwendet.

2.4 Sentinel-2-Daten

2.4.1 Grundlagen

Die Raumfahrtmission Sentinel-2 setzt sich aus den beiden optischen Erdbeobachtungssatelliten Sentinel-2A und Sentinel-2B zusammen. Sie bilden mit den Raumfahrtmissionen Sentinel-1 und Sentinel-3 das «Copernicus-Programm» der «Europäischen Weltraumorganisation» bzw. der «European Space Agency» (ESA). Am 23. Juni 2015 startete der Satellit Sentinel-2A vom Raumfahrtzentrum der ESA in Französisch-Guayana und am 7. März 2017 folgte Sentinel-2B. Die Satelliten wurden mit der Trägerrakete Vega («Vettore Europeo di Generazione Avanzata») in die Satellitenumlaufbahn gebracht. Das Missionsziel stellt die globale Aufnahme von multispektralen Erdbeobachtungsdaten mit einer hohen räumlichen und zeitlichen Auflösung dar, welche für den Klimaschutz, zur Landüberwachung sowie zum Katastrophen- und Krisenmanagement eingesetzt werden.

Jeder der beiden Satelliten wiegt ungefähr 1.2 t. Die Betriebsdauer wurde auf rund 7 Jahre kalkuliert, inbegriffen ist dabei eine dreimonatige Phase der «In-Orbit»-Inbetriebnahme. Die gesamte Lebensdauer wurde auf 15 Jahre angesetzt, inklusive der Manöver für das «De-Orbiting» in der Endphase. Das polarumlaufende Satellitenpaar umkreist die Erde um 180 Grad versetzt, in einer sonnensynchronen Umlaufbahn, in einer Höhe von 786 km. Zusammen mit der Schwadbreite von 290 km ermöglicht das eine relativ hohe temporale Abdeckung der

Erdoberfläche. Der gesamte Planet, ausser der Arktis, wird in einer Periodizität von 5 Tagen umflogen. Die Position des Satelliten wird über einen GNSS-Empfänger mit zwei Frequenzen gemessen. Die Orbitalgenauigkeit wird durch ein spezielles Antriebssystem aufrechterhalten.

Das multispektrale Aufnahmegerät (MSI) von Sentinel-2 nutzt das Prinzip einer digitalen Zeilenkamera, welches ebenfalls beim SPOT-Programm («Satellite Pour l'Observation de la Terre») eingesetzt wird und beim Start im Jahr 2015 das leistungsfähigste Aufnahmegerät dieser Klasse war. Das MSI arbeitet passiv, indem es das von der Erde reflektierte Sonnenlicht mit einem Drei-Spiegel-Teleskop sammelt. Der ankommende Lichtstrahl wird an einem Filter aufgespalten und auf zwei separate Brennebenen-Anordnungen innerhalb des Instruments fokussiert; eines für elektromagnetische Strahlung im Bereich des sichtbaren Lichts und des nahen Infrarotspektrums, sowie eines für das kurzwellige Infrarotspektrum. Das Licht wird mithilfe eines dichroitischen Strahlen-Diffuser in 13 Spektralkanäle aufgespalten (Tabelle 2).

Tabelle 2: Die 13 Spektralbänder des Sentinel-2-Satelliten mit Angaben zur Wellenlänge, Bandbreite, räumlicher Auflösung und bevorzugtem Verwendungszweck.

Bandnummer	Bandname	Wellenlänge (nm)	Bandbreite (nm)	Räumliche Auflösung (m)	Verwendung
B01	Coastal aerosol (Küsten-/Aerosolband)	443	20	60	Aerosole
B02	Blue (Blau)	490	65	10	Aerosole, Landnutzung, Vegetation
B03	Green (Grün)	560	35	10	Landnutzung, Vegetation
B04	Red (Rot)	665	30	10	Landnutzung, Vegetation
B05	Vegetation Red Edge 1 (Randbereich von Rot zur Vegetationsdetektion)	705	15	20	Landnutzung, Vegetation
B06	Vegetation Red Edge 2	740	15	20	Landnutzung, Vegetation
B07	Vegetation Red Edge 3	783	20	20	Landnutzung, Vegetation

B08	NIR – Near Infrared (Nahes Infrarot)	842	115	10	Wasserdampf, Landnutzung, Vegetation
B08A	Narrow NIR (Schmales NIR-Band)	865	20	20	Wasserdampf, Landnutzung, Vegetation
B09	Water vapour (Wasserdampf)	945	20	60	Wasserdampf
B10	SWIR Short wave infrared- Cirrus	1380	30	60	Cirruswolken
B11	SWIR – Short wave infrared (kurzwelliges Infrarot)	1610	90	20	Landnutzung, Vegetation
B12	SWIR	2190	180	20	Aerosole, Landnutzung, Vegetation

Im nachfolgenden Abschnitt werden die Anwendungszecke der 13 Spektralbänder des Sentinel-2-Satelliten im Detail beschrieben.

B01 erkennt tiefes Blau. Blaues Licht kann nur schwer aus dem Weltraum gesammelt werden, da es leicht durch winzige Staubpartikel und Wasser in der Luft und sogar durch Luftmoleküle selbst gestreut wird. Dies ist ein Grund, warum sehr weit entfernte Objekte – wie Berge am Horizont – bläulich erscheinen und der Himmel blau ist. Es ist schwierig, diesen Teil des Spektrums mit genügender Empfindlichkeit zu erfassen, wodurch B01 eine grosse Wichtigkeit erlangt. Das Band wird auch als Küsten- oder Aerosolband bezeichnet, nach den zwei Hauptanwendungen: Detektion von Flachwasser und Aufspüren feiner Partikel wie Staub und Rauch – sogenannter Aerosole.

B02, welches sich ebenfalls im blauen Spektralbereich befindet, ist nützlich für die Unterscheidung von Boden und Vegetation, die Kartierung von Waldtypen und das Erkennen von anthropologischen Merkmalen im Gelände. Durch die Atmosphäre gestreut, beleuchtet Licht in diesem Spektralbereich Gegenstände im Schatten besser als langwelliges Licht und dringt auch in klares Wasser besser ein als andere Farben. Dieser Spektralbereich wird vom Chlorophyll aufgenommen, was zu dunkleren Pflanzen führt.

B03 befindet sich im grünen Spektralbereich und bietet einen hervorragenden Kontrast zwischen klarem und trübem, schlammigem, Wasser. Das Licht in diesem Spektralbereich dringt gut in klares Wasser ein. Es wird beispielsweise verwendet, um Öl auf der

Wasseroberfläche und der Vegetation zu finden. B03 reflektiert mehr grünes Licht als jede andere Bandnummer.

B04 befindet sich im roten Spektralbereich und spiegelt gut abgestorbenes Laub wider und ist nützlich, um Vegetationstypen, Böden und anthropologische Merkmale wie Dörfer und Städte zu erkennen. Das Licht in diesem Spektralbereich hat eine begrenzte Wasserdurchdringung und spiegelt lebendes Blattwerk mit Chlorophyll nicht gut wider.

Die Bänder B05, B06, B07 und B08A decken verschiedene Spektralbereiche im Rot- und Infrarot-Bereich ab und sind für die Vegetationsklassifikation geeignet.

B08 liegt im Spektralbereich des nahen Infrarots (NIR). Dieses Band eignet sich für die Kartierung von Küstenlinien und Biomasse sowie für die Erfassung und Analyse von Vegetation.

B09 wird für die Detektion von Wasserdampf verwendet. Mithilfe von B10 können Cirrus-Wolken identifiziert werden. Die Bänder B11 und B12 liegen im Bereich des kurzwelligen Infrarots (SWIR) und eignen sich für die Messung der Feuchtigkeit von Boden und Vegetation und bieten einen guten Kontrast zwischen verschiedenen Vegetationstypen. Einerseits helfen diese Bänder zwischen Schnee und Wolken zu unterscheiden, andererseits ist die Durchdringung von Wolken begrenzt.

Die Sentinel-2-Daten sind für den Nutzer in den zwei verschiedenen Produktformen Sentinel-2 L1C und L2A erhältlich. Bei den L2A-Satellitenbildern handelt es sich um ein Produkt, welches vom L1C abgeleitet wird. Im Gegensatz zum L1C handelt es sich bei L2A um eine Bottom-of-Atmosphäre-Reflektion und nicht um eine Top-of-Atmosphäre-Reflektion. Das Produkt wird durch eine Nachbearbeitung der L1C-Daten erreicht, wobei Störungen beziehungsweise Rauschen aus den Satellitenbildern herausgefiltert werden und dadurch die Qualität der Bodenaufnahmen erhöht wird. Die Sentinel-2-L2A-Produkte werden noch nicht sehr lange angeboten. Für die Untersuchungsgebiete sind erst seit Frühling 2017 Bilder erhältlich.

Die Daten können über das WebGIS des «Copernicus Open Access Hub» der ESA bezogen werden. Dafür ist vorgängig eine kostenfreie Registrierung nötig. Nach erfolgreicher Registrierung können Daten aus dem kompletten Archiv der Satelliten Sentinel-1, Sentinel-2 und Sentinel-3 bezogen werden. Die Satellitenaufnahmen werden in kleinere, bei Sentinel-2 beispielsweise in 100 km auf 100 km grosse Kacheln, verkleinert. Mithilfe einer räumlichen Auswahl eines Gebietes, z.B. über Einlesen von Koordinaten, wird die grosse Datenmenge des Archivs auf das Untersuchungsgebiet begrenzt. Zudem können die Daten über eine zeitliche Auswahl und weitere Eigenschaften, wie den Sensortyp oder den erlaubten Wolkenanteil in Prozent, weiter eingeschränkt werden. Die zur Suchanfrage passenden Daten

werden als Suchergebnisse aufgelistet und können direkt heruntergeladen werden. Mit rund 450 MB pro Sentinel-2-Kachel, handelt es sich um sehr speicherintensive Rasterdaten.

Eine weitere sehr gute Möglichkeit, um an die Satellitendaten zu gelangen, bietet der «EO Browser» des «SENTINEL Hub» von der Firma SINERGISE. Im Browser können neben dem kompletten Archiv von Sentinel-1, Sentinel-2 und Sentinel-3 Daten auch Daten des 2013 gestarteten Erdbeobachtungssatelliten Landsat 8 der US-amerikanischen Luft und Raumfahrtbehörde (NASA) gesucht und über eine Schnittstelle direkt bezogen werden. Im «EO Browser» können relativ einfach einzelne Bänder oder auch direkt Produkte von kombinierten Multispektralbändern wie beispielsweise «True color», «False color», «Normalized Difference Vegetation Index» (NDVI), «Moisture Index» oder «SWIR» bezogen werden. Eine weitere sehr interessante Funktionalität bietet der Filter zur Wolkenbedeckung, welcher im Gegensatz zum WebGIS des «Copernicus Open Access Hub» auf das Untersuchungsgebiet eingegrenzt werden kann. So lässt sich bedeutend einfacher im umfangreichen Archiv nach brauchbaren Daten suchen.

2.4.2 Verwendete Daten

Die Präzision der Verschiebungsmessung hängt von der Quantität und Qualität der Korrelation zwischen den Bildpaaren ab. Qualitätsmerkmale sind beispielsweise eine geringe Wolkenbedeckung und eine gute Ausleuchtung durch die Sonneneinstrahlung mit nur geringer Schattenbedeckung, die aber bedingt durch die Topographie im Untersuchungsgebiet teils unvermeidbar ist. Grosse topographische Veränderungen zwischen den Bildpaaren können bei der normierten Korrelationsanalyse zu starken Ausreißern in der Verschiebungsmessung führen. Das Zeitfenster zwischen dem Aufnahmedatum von den beiden Bildern sollte daher nicht mehr als zwei Jahre auseinander liegen (Kumari et al., 2014). Zudem ist es sehr wichtig, dass bei Korrelationsmessungen von Satellitenbildern die Aufnahmen aus dem gleichen Orbit aufgenommen wurden, da ansonsten Verzerrungen entstehen können, die Geländeverschiebungen ähneln (Altena und Käab, 2017). Ein weiterer Aspekt, den es zu beachten gilt, ist die Schneemenge im Gebiet, weil dies die Übereinstimmung der Bilder erschwert (Kumari et al., 2014).

Zur Ermittlung der Bodenverschiebungen in den Untersuchungsgebieten werden beim Untersuchungsgebiet A und beim Untersuchungsgebiet B um möglichst genau ein Jahr versetzte Satellitenbildpaare verwendet. Beim Untersuchungsgebiet C wird ein anderer Ansatz verfolgt. Hier sollen Bilder für das Image-Matching verwendet werden, die nur wenige Wochen/Monate auseinanderliegen. Um qualitativ hochwertige Satellitenbilder zu erhalten, wird im WebGIS des «Copernicus Open Access Hub» und im «EO Browser» des «SINERGISE SENTINEL Hub» ein Suchparameter gewählt, um Bilder mit einer Wolkenbedeckung von

weniger als 5 % zu erhalten. Für die Prozessierung in CIAS wird ein einbändiges Raster benötigt. Dafür wird das Band B02 (Blau) verwendet. Diese Entscheidung wird getroffen, (1) weil es eines der Bänder mit der maximalen räumlichen Auflösung von 10 m ist, (2) weil sich in diesem Spektralbereich Boden, Vegetation und anthropologische Merkmale im Gelände gut unterscheiden lassen und (3) weil es durch die kurzen Wellenlängen besser in schattige Bereiche eindringt. Es wären aber auch andere Bänder mit der maximalen räumlichen Auflösung für diesen Anwendungszeck denkbar. Stumpf et al. (2018) verwenden in ihrer Arbeit beispielsweise das Band B04 (Rot) für das Image-Matching. Damit eine möglichst geringe Verschiebung des Aufnahmewinkels zwischen zwei Satellitenbildern besteht, werden die Bilder bestenfalls im gleichen Orbit aufgenommen. Leider ist dies beim Untersuchungsgebiet A für das Jahr 2018 nicht möglich, da kein Bild aus Orbit R138 vorhanden ist, welches den oben definierten Qualitätskriterien entspricht. Darum wird für dieses Jahr ein Bild aus dem Satellitenorbit R095 verwendet. Gleiches gilt beim Untersuchungsgebiet C, bei dem das Bild 1 aus Orbit R138 stammt und die Bilder 2 und 3 aus R095. Eine vollständige Auflistung der verwendeten Bilder für den Untersuchungszeitraum in den Jahren 2016, 2017 und 2018 ist für das Untersuchungsgebiet A (Kvíaárjökull) in Tabelle 3, für das Untersuchungsgebiet B (Svínafellsjökull) in Tabelle 4, und für das spezielle Anwendungsbeispiel mit Bildern aus dem Jahr 2017 für das Untersuchungsgebiet C (Svöludalsjökull) in Tabelle 5 aufgeführt. Alle verwendeten Satellitenbilder sind vom Produkttyp Sentinel-2-L1C, da die qualitativ besseren Bilder vom Typ L2A erst seit Frühling 2017 erhältlich sind.

Sämtliche Geodaten werden pro Untersuchungsgebiet in jeweils einem Koordinatensystem bearbeitet und dargestellt. Als Ziel-Koordinatensystem für die Enddaten wird das projizierte Koordinatensystem «WGS 1984 UTM Zone 28N» mit dem EPSG-Code 32628 der «European Petroleum Survey Group» verwendet. Für das Untersuchungsgebiet A werden die Ausgangsdaten vor der Korrelationsanalyse vom Ausgangs-Koordinatensystem «WGS 1984 Web Mercator Auxiliary Sphere» in das Ziel-Koordinatensystem «WGS 1984 UTM Zone 28N» überführt. In den Untersuchungsgebieten B und C wird aufgrund der im Laufe dieser Arbeit gesammelten Erfahrungen zuerst die Korrelationsanalyse im Ausgangs-Koordinatensystem «WGS 1984 Web Mercator Auxiliary Sphere» durchgeführt und erst danach die aus der Berechnung erhaltenen Resultate in das Ziel-Koordinatensystem «WGS 1984 UTM Zone 28N» transformiert.

Für die Projektionstransformation wird das Geoprocessing-Tool *Project Raster* von ArcGIS Desktop verwendet und als *Resampling Technique* eine bilineare Interpolation (Option *Bilinear*) ausgeführt. Die Option *Nearest*, die ein Nächster-Nachbar-Resampling durchführt, ist die schnellste Interpolationsmethode und die Bearbeitungszeit zur Projizierung ist mit dieser Option am kürzesten. Sie wird hauptsächlich für klassifizierte Daten wie beispielsweise Landnutzungsklassen verwendet, da die Zellenwerte nicht verändert werden. Für

kontinuierliche Daten, wie beispielsweise in Oberflächenmodellen, wird der Einsatz dieser Option jedoch nicht empfohlen. Mit der Option *Bilinear* werden neue Zellenwerte durch einen gewichteten Entfernungsdurchschnitt von Zellen in der Umgebung festgelegt. Mit der Option *Cubic* werden neue Zellenwerte errechnet, indem eine geglättete Kurve durch umliegende Zellwerte gepasst wird. Diese beiden Methoden eignen sich gut für kontinuierliche Daten wie beispielsweise Bodenverschiebungen, bewirken jedoch eine Glättung und die Zellwerte können von den Eingabedaten abweichen, was bei klassifizierten Daten unerwünscht ist.

Tabelle 3: Satellitenbilddaten für das Untersuchungsgebiet A (Kvíárjökull).

	Bild 1	Bild 2	Bild 3
Aufnahmedatum	2016-10-01	2017-08-30	2018-08-22
Satellit	Sentinel-2A	Sentinel-2A	Sentinel-2A
Sensorsystem	MSI	MSI	MSI
Produkt	L1C	L1C	L1C
Bandnummer	B02	B02	B02
Auflösung (m)	10	10	10
Orbit	R138	R138	R095
Bildreihe	T28/VDR	T28/VDR	T28/VDR

Tabelle 4: Satellitenbilddaten für das Untersuchungsgebiet B (Svínafellsjökull).

	Bild 1	Bild 2	Bild 3
Aufnahmedatum	2016-10-01	2017-08-30	2018-10-04
Satellit	Sentinel-2A	Sentinel-2A	Sentinel-2A
Sensorsystem	MSI	MSI	MSI
Produkt	L1C	L1C	L1C
Bandnummer	B02	B02	B02
Auflösung (m)	10	10	10
Orbit	R138	R138	R0138
Bildreihe	T28/VDR	T28/VDR	T28/VDR

Tabelle 5: Satellitenbilddaten für das Untersuchungsgebiet C (Svöludalsjökull).

	Bild 1	Bild 2	Bild 3
Aufnahmedatum	2017-07-26	2017-08-12	2017-08-30
Satellit	Sentinel-2A	Sentinel-2A	Sentinel-2A
Sensorsystem	MSI	MSI	MSI

Produkt	L1C	L1C	L1C
Bandnummer	B02	B02	B02
Auflösung (m)	10	10	10
Orbit	R138	R095	R095
Bildreihe	T28/WDS	T28/WDS	T28/WDS

2.5 Workflow in CIAS

CIAS erlaubt eine einfache und organisierte Eingabe der Input-Daten und der Verarbeitungsparameter zur Durchführung der NCC. Es sind im Vergleich zu MicMac relativ wenige Parameter anzugeben, was die Bearbeitung vereinfacht, dafür aber die wenigen Eingaben umso wichtiger macht. Der Workflow ist in Abbildung 6 schematisch dargestellt. In CIAS kann das Image-Matching und die NCC pro Durchlauf jeweils nur mit einem Bildpaar durchgeführt werden. Die Berechnung einer multi-temporalen Zeitreihe über mehrere Jahre wird daher in mehreren Einzelschritten durchgeführt.

Als Eingaberaster werden orthorektifizierte Bilder im «Tagged Image File Format» (TIFF) benötigt. Konkret können Bilder im Format *GeoTIFF* und *TIFF World* eingelesen werden. Die durch die Suche im «Copernicus Open Access Hub» gefundenen und in Tabelle 3 im Detail beschriebenen Sentinel-2-Satellitendaten liegen im *JPEG2000*-Format vor. In ArcGIS Pro werden diese grob zugeschnitten, damit die Berechnungen aus Effizienzgründen nur für das Untersuchungsgebiet und die angrenzenden Gebiete durchgeführt werden und dann in ein *GeoTIFF-Format* überführt.

Bei der Korrelationsberechnung für die Untersuchungsgebiete B und C, welche als Eingabedatensätze im Koordinatensystem «WGS 1984 Web Mercator Auxiliary Sphere» vorliegen, gibt es bei der Eingabe in CIAS ein zusätzliches Hindernis. CIAS erlaubt keine Berechnungen von Punkten, die auf der X- oder Y-Achse im negativen Bereich vorliegen. Jedoch liegen die Werte der X-Koordinate in diesem Koordinatensystem im Minusbereich, da sich Island westlich des definierten Nullmeridians von der Londoner Sternwarte Greenwich befindet. Um dieses softwaretechnische Problem zu umgehen wird mithilfe des Geoprocessing-Tools *Raster Shift* die X-Achse um 2'000'000 m nach Osten verschoben, sodass diese für die Berechnung im positiven Bereich liegt. Nach der Korrelationsanalyse wird dann mit dem gleichen Geoprocessing-Tool die Lage wieder korrigiert.

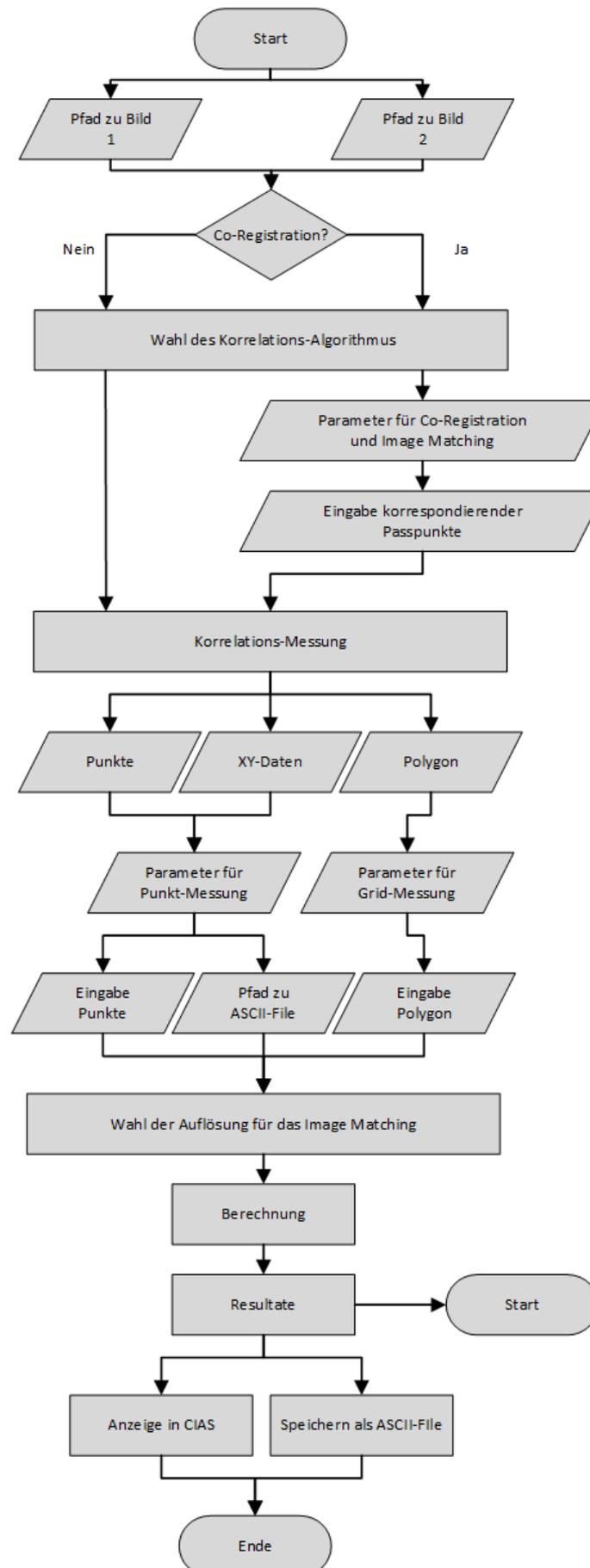


Abbildung 6: Auswahl- und Eingabeparameter in CIAS als Flussdiagramm (verändert nach Kumari et al. (2014)).

Ein Vergleich ohne und mit Co-Registration im Parameter-Testing im Untersuchungsgebiet A (Kapitel 3.1) hat gezeigt, dass mit einer vorgängigen Co-Registration deutlich realistischere Ergebnisse generiert werden, obwohl die Raster des Sentinel-2-Datensatzes bereits orthorektifiziert vorliegen. Für die Co-Registration wird die durch das Untersuchungsgebiet A verlaufende Strasse genutzt, bei der angenommen wird, dass sie sich im Zeitverlauf nicht verändert hat. Entlang der von Südwest nach Nordost durch den Perimeter verlaufenden Strasse werden insgesamt 19 Passpunkte in ArcGIS Pro generiert und in CIAS eingelesen, damit diese für die Co-Registration verwendet werden können (Abbildung 7). Als Parameter für die Co-Registration werden die angegebenen Default-Werte für «reference block size» und «search area size (pixels)» mit 15 respektive 60 Pixel übernommen. Die Koordinaten der Passpunkte werden als ASCII-Textfile in CIAS eingelesen. Die Koordinaten der Passpunkte sind in Anhang 1 zu finden. Für das Image-Matching der Bilder von den Untersuchungsgebieten B und C wurde keine vorgängige Co-Registration durchgeführt, da hier keine entsprechenden Infrastrukturbauten als Referenzen verwendet werden können. Zudem haben die Bilder bereits einen räumlichen Bezug und können deswegen als quasi-co-registriert angesehen werden (Kumari et al., 2014)

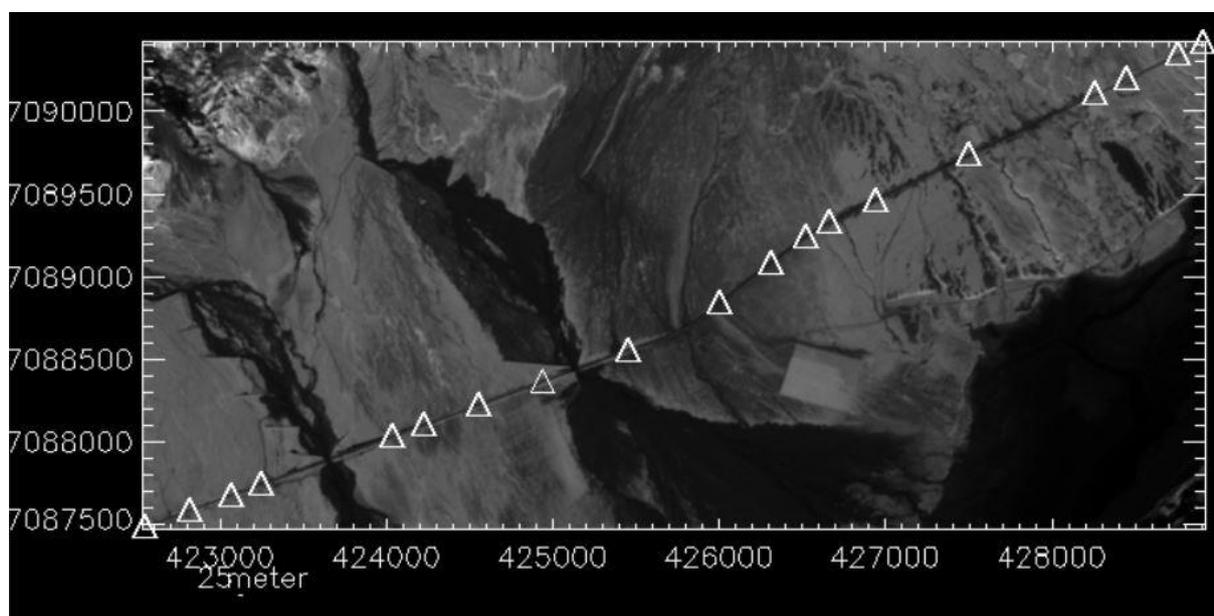


Abbildung 7: Lage der Passpunkte im Untersuchungsgebiet A (Kvíárjökull) zur Co-Registrierung in CIAS.

CIAS fragt darauf, ob eine «Normalized Cross Correlation» (NCC) oder eine «Orientation Correlation» (NCC-O) als Korrelations-Algorithmus angewendet werden soll. Für diese Arbeit wird der in Kapitel 2.3.1 beschriebene Algorithmus der NCC verwendet. Auch mit dem Algorithmus NCC-O wurden im Rahmen eines Testings Auswertungen mit den gleichen Parametereinstellungen durchgeführt. Jedoch haben sich im Vergleich zur NCC durchwegs

unrealistischere Resultate bei der durchschnittlichen Länge der Verschiebungen und bei den Ausreissern gezeigt. Auch die statistischen Werte vom maximalen und durchschnittlichen Korrelationskoeffizienten ergaben im Vergleich signifikant tiefere Werte.

Nachdem in CIAS der Pfad zu den abgespeicherten Bildern eingegeben wird, fragt die Software nach gewissen Eingabeparametern für die Berechnung. Diese Parameter sind die «reference block size (pixels)», «search area size (pixels)» und «grid distance (m)»:

Die «reference block size» sollte 10-20 Pixel betragen und bei sehr viel Rauschen in den Bildern weiter erhöht werden (Kumari et al., 2014). In dieser Arbeit werden Referenzblockgrößen von 10, 15 und 20 Pixel geprüft um die beste Kombination der Eingabeparameter zu prüfen. Da die Berechnung über das ganze Untersuchungsgebiet sehr viel Zeit in Anspruch nimmt, wird dies über einen verkleinerten Perimeter mit 16'051 Messpunkten mit einer Auflösung von 10 m durchgeführt. Dies dauert je nach Referenzblockgröße 10-20 Minuten. Da zum Zeitpunkt des Testings noch kein Satellitenbild aus dem Sommer 2018 vorliegt, wird die Überprüfung mit den Satellitenbildern 1 und 2 aus Tabelle 3 durchgeführt. Aufgrund der Erkenntnisse aus dieser Auswertung, welche in Kapitel 3.1 detailliert ausgeführt werden, wird der Wert für die Referenzblockgröße schliesslich auf 15 Pixel festgelegt.

Die optimale «search area size» muss mindestens das Doppelte der erwarteten maximalen Bodenverschiebung betragen (Kumari et al., 2014), soll jedoch unter Berücksichtigung bildtypischer Eigenschaften (beispielsweise Pixelgröße und Bildrauschen) sowie physikalischer Eigenschaften (beispielsweise saisonale Einflüsse auf die Bewegungsraten), an das Untersuchungsgebiet angepasst werden und zeigt mit einer um mindestens Faktor vier grösser gewählten Suchgröße die besten Ergebnisse (Kröhnert et al., 2014). In dieser Arbeit wurden wiederum drei verschiedene Suchgrößen getestet, um ein möglichst gutes Resultat zu erhalten. Als Wert wurde schliesslich der Standard von 100 Pixel übernommen.

Die «grid distance» bzw. Rasterauflösung entspricht der gewünschten räumlichen Auflösung. Dabei wird die Auflösung der Eingaberaster von 10 m übernommen.

Nachdem alle Parameter in CIAS eingegeben worden sind, wird das Image-Matching und die NCC durch die Software durchgeführt. Aufgrund der hohen Auflösung der Rasterdaten und der feinen Parametereinstellungen dauert diese Berechnung etwa 3-4 Stunden für das Untersuchungsgebiet A und etwa 10-12 Stunden für die Untersuchungsgebiete B und C. Der Output-Datensatz wird als ASCII-Textfile ausgegeben. Dieses wird mithilfe von Microsoft Excel in ein *Comma-separated Values*-Format (CSV) umgewandelt, damit es für die Weiterverarbeitung in ArcGIS Pro verwendet werden kann. Neben den XY-Koordinaten vom Ausgangspunkt als Spalten für «x» und «y», werden die ermittelten Distanzen als «dx» und

«dy» sowie die euklidische Distanz als «length» ausgegeben. Die Spalte «direction» gibt zudem die Richtung der Verschiebung in Grad an. Darüber hinaus sind im Ausgangsdatensatz der maximale Korrelationskoeffizient «max_corrcoeff» und der durchschnittliche Korrelationskoeffizient «avg_corrcoeff» enthalten, welche für eine Aussage zur Güte des Ergebnisses und für die Eliminierung von Ausreißern weiterverwendet werden können. Da es sich bei den jeweiligen Output-Datensätzen für die durchgeführten Korrelationsmessungen um ASCII-Textfiles mit einer sehr grossen Anzahl an Zeilen für die Messpunktenetze handelt, werden diese nicht separat im Anhang aufgeführt.

2.6 Nachbearbeitung des CIAS-Outputs

In ArcGIS Pro wird der CIAS-Output, welcher im CSV-Format vorliegt, über das Geoprocessing-Werkzeug *XY Table To Point* eingelesen. Neben den Angaben der Spalten für die X- und Y-Koordinaten ist die Angabe des räumlichen Bezugssystems wichtig. Mit dem projizierten Koordinatensystem «WGS 1984 UTM Zone 28N» für das Untersuchungsgebiet A und «WGS 1984 Web Mercator Auxiliary Sphere» für die Untersuchungsgebiete B und C wird dasselbe System angegeben, in welchem die Ausgangsraster-Datensätze vorliegen. Nach der Ausführung des Geoprocessing-Werkzeuges liegt ein Punkt-Vektordatensatz vor.

Die gemessenen Verschiebungen lassen sich nun visuell über Vektorpfeile oder über eine Umwandlung in ein Raster mit der gemessenen Länge als Rasterwert darstellen. Die Darstellung von Vektorpfeilen kann im Punkte-Vektordatensatz über die Symbologie-Einstellungen erreicht werden. Die Länge des Vektorpfeiles nimmt Bezug auf die euklidische Distanz, welche im Datensatz in der Spalte «length» ausgegeben wird. Die Ausrichtung des Vektorpfeiles kann über die Funktion *Rotation* erreicht werden und nimmt im Datensatz Bezug auf die Spalte «direction», welche die Richtung der Verschiebung in Grad angibt.

Eine darauffolgende umfangreiche Fehleranalyse der ermittelten Ergebnisse ist notwendig, um die Qualität der Korrelationsmessung und der daraus abgeleiteten Bewegungsraten beurteilen zu können (Kröhnert et al., 2014). Durch eine Ausreisser-Analyse werden potentielle Fehlzuordnungen eliminiert sowie Bewegungsanomalien bezüglich der Hauptbewegungsrichtung detektiert (Scherler et al., 2008). Neben dem maximalen und dem durchschnittlichen Korrelationskoeffizienten kann das Signal-Rausch-Verhältnis, beziehungsweise das Signal-to-Noise-Ratio (SNR), für die Beurteilung der Güte der Messung und für das Eliminieren von Ausreißern oder fehlerhaften Messungen herangezogen werden. Das SNR wird in ArcGIS Pro über die Funktion *Calculate Field* aus dem Verhältnis zwischen dem maximalen und dem durchschnittlichen Korrelationskoeffizienten, wie in der Formel 2 beschrieben, berechnet:

$$SNR = \frac{\text{maximaler Korrelationskoeffizient}}{\text{durchschnittlicher Korrelationskoeffizient}} \quad (2)$$

Dabei gilt in diesem Zusammenhang, je tiefer der resultierende Wert, desto geringer ist das Verhältnis zwischen maximalem und durchschnittlichem Korrelationskoeffizienten. Das Rauschen ist somit bei tiefen SNR-Werten geringer und bei hohen Werten, beziehungsweise hohen Differenzen zwischen den beiden Koeffizienten, entsprechend höher.

Gemäss Kröhnert et al. (2014) weist ein Grenzwert für den maximalen Korrelationskoeffizienten und ein Grenzwert für Ausreisser in den Bewegungsraten die geeignetste Kombination für die Fehlerbereinigung auf. Bewegungsanomalien können über einen ermittelten Grenzwert im Rahmen einer Clusteranalyse vom Geschwindigkeitsfeld ermittelt und entfernt werden (Kröhnert et al., 2014). Ausreiser liegen ausserhalb der Interquartilspanne und können dadurch herausgefiltert werden. Verbleibende Fehler zeigen sich oft durch Heterogenität beziehungsweise ein Rauschen in der Bewegungsmessung (Leprince et al., 2007).

Aufgrund der statistischen Analysen, welche in den Ergebnissen in Kapitel 3.2 «Untersuchungsgebiet A: Statistische Masse des CIAS-Outputs», Kapitel 3.5 «Untersuchungsgebiet B: Statistische Masse des CIAS-Outputs» und Kapitel 3.8 «Untersuchungsgebiet C: Statistische Masse des CIAS-Outputs» aufgeführt sind, werden die aus CIAS stammenden Rohdaten einem Filtering unterzogen. Einerseits mit dem Ziel, möglichst nur Werte mit einem relativ hohen Korrelationskoeffizienten zu berücksichtigen, andererseits, um statistische Ausreisser bei der Länge der Verschiebungsmessung zu eliminieren. Um dieses Ziel zu erreichen, werden alle Messpunkte unterhalb eines bestimmten Schwellwertes von 0.6, 0.8 und 0.9 des maximalen Korrelationskoeffizienten eliminiert. Zusätzlich werden zur Beseitigung von statistischen Ausreissern die Messpunkte mit einer Länge der Bodenverschiebung ausserhalb des oberen Whiskers ebenfalls nicht mitberücksichtigt. Der Schwellwert des oberen Whiskers liegt dabei beim 97.5 %-Quantil, was einer Standarddefinition für die Festlegung des Schwellwertes von Boxplot-Diagrammen entspricht. Wolken- und Schneeflächen im Untersuchungsgebiet werden in dieser Arbeit nicht speziell entfernt.

Folgende SQL-Statements werden dafür in ArcGIS Pro in die *Definition Query* eingegeben:

Für das Untersuchungsgebiet A:

```
length < 435 And max_corrcoeff >= 0.6  
length < 435 And max_corrcoeff >= 0.8
```

```
length < 435 And max_corrcoeff >= 0.9
```

Für das Untersuchungsgebiet B:

```
length < 545 And max_corrcoeff >= 0.6
```

```
length < 545 And max_corrcoeff >= 0.8
```

```
length < 545 And max_corrcoeff >= 0.9
```

Für das Untersuchungsgebiet C:

```
length < 513 And max_corrcoeff >= 0.6
```

```
length < 513 And max_corrcoeff >= 0.8
```

```
length < 513 And max_corrcoeff >= 0.9
```

2.7 Visualisierung

Da die Darstellung von dynamischen Prozessen wie Bodenverschiebungen aufgrund der nötigen Visualisierung raum- und zeitbezogener Prozesse herausfordernd ist (Kääb et al., 2003), erweist sich der kombinierte Einsatz von Vektoren und Flächenfärbungen als geeignete Methode zur Darstellung dieser gerichteten und auch horizontalen Bewegungen (Kröhnert et al., 2014). Diese Kombination von Polygon- und Punkt-Features ist in vielen anderen Studien zu diesem Thema zu finden. Zur Darstellung grosser Differenzen in den Verschiebungsraten eignet sich laut Kröhnert et al. (2014) die Flächenkartogramm-Methode und bei geringen Differenzen eher der stetige Farbverlauf. Die Richtung der Fließbewegungen wird gut durch den Einsatz von gestuften und gerichteten Vektorpfeilen wiedergegeben (Kumari et al., 2014).

Über das Geoprocessing-Tool *Point to Raster* in ArcGIS Pro werden die gefilterten Messpunkte in ein Raster überführt. Als Wert für die einzelnen Rasterzellen wird der Wert «length» aus dem CIAS-Output übernommen. Die Zellgrösse wird auf 25 m vergrössert und über *most frequent* beim *Cell assignment type* zusammengeführt. Aufgrund der L-förmigen Datenverteilung der Verschiebungslängen in allen Messungen (Abbildung 15, Abbildung 16, Abbildung 30, Abbildung 31, Abbildung 45 und Abbildung 46) – wird für die Klassifikationsmethode eine geometrische Progression angewendet. In ArcGIS Pro wird diese Methode *Geometric Interval* genannt. Mit dieser Klassifikationsmethode wird die ungleichmässige Verteilung der Datenmenge am besten abgebildet, weil die Abstände zwischen den Klassen mit zunehmender Verschiebungslänge exponentiell zunehmen. Kleine Verschiebungslängen werden somit differenzierter dargestellt als grosse Verschiebungen.

Die Darstellung von gestuften und gerichteten Vektorpfeilen wird in ArcGIS Pro über die Symbologie-Einstellungen erreicht. Dort wird mit der Klassifizierung einer geeigneten Anzahl an Klassen in Form von Pfeilen in verschiedenen Grössen und dem Attribut «length» die Verschiebungslänge dargestellt. Es wird wie bei der Darstellung in Form von Rasterzellen eine geometrische Progression zur Einteilung der Klassen angewendet. Damit gerundete Klassengrenzen entstehen, werden diese in einem zweiten Schritt manuell bearbeitet. Die Darstellung der Richtung wird in den Symbologie-Einstellungen unter *Rotation* eingestellt. Die Werte für die Ausrichtung werden aus dem Attributfeld «direction» übernommen. Als *Rotation Style* wird die Methode *Geographic* gewählt. Da aufgrund der hohen Anzahl an Messwerten im Untersuchungsgebiet die Darstellung aller Vektorpfeile sehr unübersichtlich wäre, werden diese für die Visualisierung manuell reduziert. Dies wird in ArcGIS Pro über eine SQL-Definitionsabfrage (*Definition Query*) mit einer Modulo-Funktion erreicht, die nur jeden fünfzigsten bzw. zweihundertsten Messwert darstellt. Die Definitionsabfrage zur Reduzierung der Anzahl dargestellter Vektorpfeile für die Visualisierung wird folgendermassen ausgeführt:

Untersuchungsgebiet A:

$$\text{mod}(\text{OBJECTID}, 50) = 0$$

Untersuchungsgebiet B:

$$\text{mod}(\text{OBJECTID}, 200) = 0$$

Untersuchungsgebiet C:

$$\text{mod}(\text{OBJECTID}, 200) = 0$$

3 Ergebnisse

3.1 Parameter-Testing im Untersuchungsgebiet A

```
> summary(testNCC_10_100)
      X                Y                dx                dy
Min.   :422362   Min.   :7087052   Min.   : -467.637   Min.   : -467.637
1st Qu.:422772   1st Qu.:7087632   1st Qu.: -10.003   1st Qu.:  -1.250
Median :423202   Median :7087872   Median :  -8.753   Median :   0.000
Mean   :423309   Mean   :7087827   Mean   : -25.985   Mean   :   7.253
3rd Qu.:423752   3rd Qu.:7088062   3rd Qu.:  -7.502   3rd Qu.:   2.501
Max.   :425082   Max.   :7088222   Max.   : 461.385   Max.   : 467.637

      length          direction    max_corrcoeff    avg_corrcoeff
Min.   : 0.000   Min.   : 0.0   Min.   :0.4051   Min.   :0.0421
1st Qu.: 7.908   1st Qu.:256.0   1st Qu.:0.7919   1st Qu.:0.0909
Median : 9.103   Median :270.0   Median :0.8887   Median :0.1140
Mean   : 92.489   Mean   :254.8   Mean   :0.8596   Mean   :0.1205
3rd Qu.: 67.427   3rd Qu.:279.5   3rd Qu.:0.9559   3rd Qu.:0.1452
Max.   :655.155   Max.   :359.8   Max.   :0.9962   Max.   :0.2370

> summary(testNCC_15_100)
      X                Y                dx                dy
Min.   :422362   Min.   :7087052   Min.   : -442.630   Min.   : -446.381
1st Qu.:422772   1st Qu.:7087632   1st Qu.: -10.003   1st Qu.:  -1.250
Median :423202   Median :7087872   Median :  -8.753   Median :   0.000
Mean   :423309   Mean   :7087827   Mean   : -20.440   Mean   :   3.332
3rd Qu.:423752   3rd Qu.:7088062   3rd Qu.:  -7.502   3rd Qu.:   1.250
Max.   :425082   Max.   :7088222   Max.   : 438.878   Max.   : 443.880

      length          direction    max_corrcoeff    avg_corrcoeff
Min.   : 1.250   Min.   : 0.0   Min.   :0.3537   Min.   :0.0362
1st Qu.: 7.606   1st Qu.:260.5   1st Qu.:0.7802   1st Qu.:0.0769
Median : 8.841   Median :270.0   Median :0.8883   Median :0.1017
Mean   : 63.247   Mean   :258.6   Mean   :0.8527   Mean   :0.1102
3rd Qu.: 11.322   3rd Qu.:278.1   3rd Qu.:0.9593   3rd Qu.:0.1365
Max.   :613.758   Max.   :359.8   Max.   :0.9959   Max.   :0.2493

> summary(testNCC_20_100)
      X                Y                dx                dy
Min.   :422362   Min.   :7087052   Min.   : -410.120   Min.   : -413.871
1st Qu.:422772   1st Qu.:7087632   1st Qu.: -10.003   1st Qu.:  -1.250
Median :423202   Median :7087872   Median :  -8.753   Median :   0.000
Mean   :423309   Mean   :7087827   Mean   : -17.735   Mean   :   4.575
3rd Qu.:423752   3rd Qu.:7088062   3rd Qu.:  -7.502   3rd Qu.:   1.250
Max.   :425082   Max.   :7088222   Max.   : 406.369   Max.   : 415.122

      length          direction    max_corrcoeff    avg_corrcoeff
Min.   : 2.796   Min.   : 0.2025   Min.   :0.2721   Min.   :0.0300
1st Qu.: 7.606   1st Qu.:261.8699   1st Qu.:0.7722   1st Qu.:0.0702
Median : 8.753   Median :270.0000   Median :0.8846   Median :0.0956
Mean   : 45.605   Mean   :262.3280   Mean   :0.8531   Mean   :0.1080
3rd Qu.: 10.081   3rd Qu.:277.1250   3rd Qu.:0.9626   3rd Qu.:0.1374
Max.   :567.895   Max.   :354.2894   Max.   :0.9952   Max.   :0.2639
```

Abbildung 8: Deskriptive statistische Werte nach dem Image-Matching und der NCC bei einer Referenzblockgröße von 10, 15 oder 20 Pixel und ohne Co-Registrierung.

```

> summary(testNCC_CoRegr_10_100)
      X                Y                dx                dy
Min.   :422362   Min.   :7087052   Min.   : -459.3812   Min.   : -467.1973
1st Qu.:422772   1st Qu.:7087632   1st Qu.:  -1.9006   1st Qu.:  -0.8276
Median :423202   Median :7087872   Median :  -0.5515   Median :   0.4617
Mean   :423309   Mean   :7087827   Mean   : -17.7759   Mean   :   7.7027
3rd Qu.:423752   3rd Qu.:7088062   3rd Qu.:   0.7353   3rd Qu.:   2.9032
Max.   :425082   Max.   :7088222   Max.   : 469.5414   Max.   : 468.0763

      length          direction          max_corrcoeff          avg_corrcoeff
Min.   : 0.6398   Min.   : 0.1051   Min.   :0.4051   Min.   :0.0421
1st Qu.: 1.7856   1st Qu.:112.1838   1st Qu.:0.7919   1st Qu.:0.0909
Median : 2.8951   Median :223.7559   Median :0.8887   Median :0.1140
Mean   : 87.4691   Mean   :209.4611   Mean   :0.8596   Mean   :0.1205
3rd Qu.: 67.4595   3rd Qu.:309.7434   3rd Qu.:0.9559   3rd Qu.:0.1452
Max.   :649.5859   Max.   :359.9297   Max.   :0.9962   Max.   :0.2370

> summary(testNCC_CoRegr_15_100)
      X                Y                dx                dy
Min.   :422362   Min.   :7087052   Min.   : -434.3221   Min.   : -445.9572
1st Qu.:422772   1st Qu.:7087632   1st Qu.:  -1.7967   1st Qu.:  -0.7984
Median :423202   Median :7087872   Median :  -0.5428   Median :   0.4588
Mean   :423309   Mean   :7087827   Mean   : -12.2304   Mean   :   3.7823
3rd Qu.:423752   3rd Qu.:7088062   3rd Qu.:   0.7136   3rd Qu.:   1.7186
Max.   :425082   Max.   :7088222   Max.   : 447.1048   Max.   : 444.2943

      length          direction          max_corrcoeff          avg_corrcoeff
Min.   : 0.6401   Min.   : 0.1073   Min.   :0.3537   Min.   :0.0362
1st Qu.: 0.9658   1st Qu.: 86.9480   1st Qu.:0.7802   1st Qu.:0.0769
Median : 1.9950   Median :221.4181   Median :0.8883   Median :0.1017
Mean   : 57.5803   Mean   :207.0535   Mean   :0.8527   Mean   :0.1102
3rd Qu.: 4.3002   3rd Qu.:309.2966   3rd Qu.:0.9593   3rd Qu.:0.1365
Max.   :608.3853   Max.   :359.9289   Max.   :0.9959   Max.   :0.2493

> summary(testNCC_CoRegr_20_100)
      X                Y                dx                dy
Min.   :422362   Min.   :7087052   Min.   : -401.8235   Min.   : -413.4093
1st Qu.:422772   1st Qu.:7087632   1st Qu.:  -1.7532   1st Qu.:  -0.7899
Median :423202   Median :7087872   Median :  -0.5351   Median :   0.4540
Mean   :423309   Mean   :7087827   Mean   :  -9.5256   Mean   :   5.0253
3rd Qu.:423752   3rd Qu.:7088062   3rd Qu.:   0.7045   3rd Qu.:   1.6925
Max.   :425082   Max.   :7088222   Max.   : 414.5607   Max.   : 415.5648

      length          direction          max_corrcoeff          avg_corrcoeff
Min.   : 0.6400   Min.   : 1.535   Min.   :0.2721   Min.   :0.0300
1st Qu.: 0.8585   1st Qu.: 82.189   1st Qu.:0.7722   1st Qu.:0.0702
Median : 1.8270   Median :220.225   Median :0.8846   Median :0.0956
Mean   : 39.4523   Mean   :207.048   Mean   :0.8531   Mean   :0.1080
3rd Qu.: 3.0482   3rd Qu.:309.338   3rd Qu.:0.9626   3rd Qu.:0.1374
Max.   :561.9140   Max.   :356.976   Max.   :0.9952   Max.   :0.2639

```

Abbildung 9: Deskriptive statistische Werte nach dem Image-Matching und der NCC bei einer Referenzblockgröße von 10, 15 oder 20 Pixel und mit Co-Registrierung.

Die in Abbildung 8 und Abbildung 9 aufgeführten deskriptiven statistischen Werte sind das Ergebnis eines ersten Testings. Dieses wurde aufgrund des hohen Rechenaufwandes in einem kleineren Test-Perimeter mit 16'051 Messpunkten, jedoch mit der gleichen räumlichen Auflösung von 10 m, im Untersuchungsgebiet A durchgeführt. Getestet wurde jeweils die NCC

ohne Co-Registrierung (Abbildung 8) und mit Co-Registrierung anhand der in Kapitel 2.5 «Workflow in CIAS» beschriebenen 19 Passpunkten (Abbildung 9).

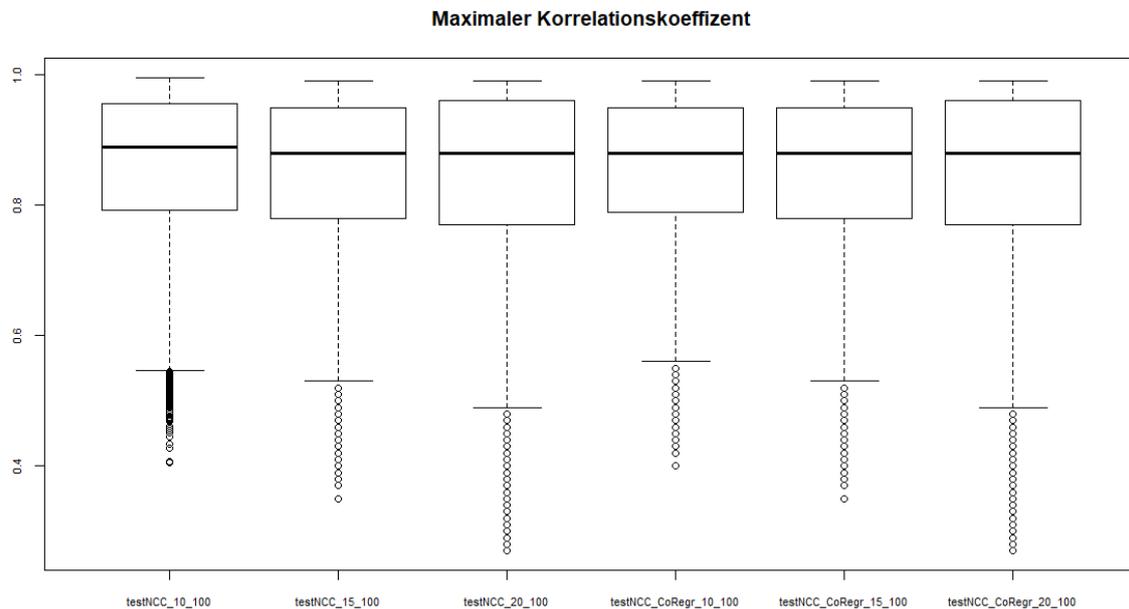


Abbildung 10: Vergleich des maximalen Korrelationskoeffizienten der NCC bei Referenzblockgrösse 10, 15 oder 20 Pixel, sowie ohne und mit Co-Registrierung.

Die Abbildung 10 stellt die Unterschiede zwischen den maximalen Korrelationskoeffizienten im Testing des Stichprobensets dar. Es zeigt sich, dass eine Co-Registrierung keinen Einfluss auf den maximalen Korrelationskoeffizienten hat. Sowohl das arithmetische Mittel, wie auch der Median oder die 25 %- bzw. 75 %-Quantile weisen bei gleicher Referenzblockgrösse mit und ohne Co-Registrierung exakt die gleichen Werte auf. Leichte Unterschiede gibt es jedoch zwischen den Referenzblockgrössen. Der höchste Korrelationskoeffizient wird mit 0.860 für das arithmetische Mittel und 0.889 für den Median bei einer Referenzblockgrösse von 10 Pixel erreicht. Bei einer Referenzblockgrösse von 15 Pixel ist der Wert nur leicht tiefer bei 0.853 für das arithmetische Mittel und 0.888 für den Median. Am tiefsten ist der Korrelationskoeffizient sowohl in Bezug auf das arithmetische Mittel, wie auch auf den Median, bei einer Blockgrösse von 20 Pixel mit 0.853 respektive 0.885. Der obere Whisker ist bei allen sechs getesteten Parametern recht ähnlich und liegt bei rund 0.95 bis 0.96. Der untere Whisker ist hingegen wiederum von der Referenzblockgrösse abhängig und die Streuung nimmt mit zunehmender Referenzblockgrösse zu. Eine Co-Registrierung hat wiederum keinen Einfluss auf den unteren Whisker. Die Ausreisser nehmen mit zunehmender Referenzblockgrösse gegen unten ebenfalls zu. Beim Test mit 10 Pixel liegt der tiefste gemessene maximale

Korrelationskoeffizient bei 0.405. Bei 15 Pixel ist der tiefste gemessene Wert bei 0.354 und bei 20 Pixel bei 0.272.

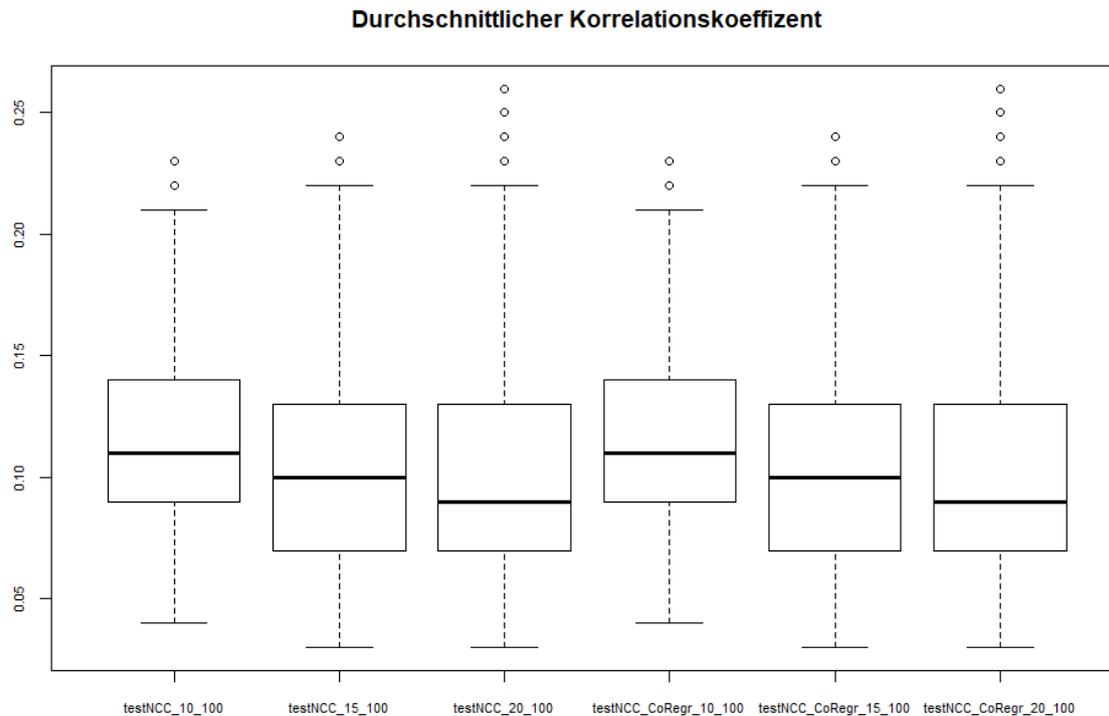


Abbildung 11: Vergleich des durchschnittlichen Korrelationskoeffizienten der NCC bei Referenzblockgröße 10, 15 oder 20 Pixel, sowie ohne und mit Co-Registrierung.

Die Abbildung 11 stellt die Unterschiede des durchschnittlichen Korrelationskoeffizienten im Testing des Stichprobensets dar. Wie beim maximalen Korrelationskoeffizienten zeigt sich auch hier, dass eine Co-Registrierung keinen Einfluss auf den durchschnittlichen Korrelationskoeffizienten hat. Sowohl die arithmetischen Mittelwerte, wie auch der Median oder die 25 %- bzw. 75 %-Quantile weisen bei gleicher Referenzblockgröße mit und ohne Co-Registrierung exakt die gleichen Werte auf. Leichte Unterschiede gibt es jedoch zwischen den Referenzblockgrößen. Der höchste Korrelationskoeffizient wird mit 0.121 für das arithmetische Mittel und 0.114 für den Median bei einer Referenzblockgröße von 10 Pixel erreicht. Bei einer Referenzblockgröße von 15 Pixel ist der Wert nur leicht tiefer bei 0.110 für das arithmetische Mittel und 0.102 für den Median. Am tiefsten ist der Korrelationskoeffizient sowohl in Bezug auf das arithmetische Mittel, wie auch auf den Median, bei einer Blockgröße von 20 Pixel mit 0.108 respektive 0.096. Eine Co-Registrierung hat auch auf den durchschnittlichen Korrelationskoeffizienten in Bezug auf die Whisker und die Ausreisser keinen Einfluss. Die oberen und unteren Whisker wie auch die Ausreisser nehmen mit

zunehmender Referenzblockgrösse zu. Der Maximalwert bei einer Referenzblockgrösse von 10 Pixel liegt bei 0.237 und der Minimalwert bei 0.042. Bei einer Referenzblockgrösse von 15 Pixel wird die Streuung erhöht und auch der Maximalwert und der Minimalwert liegen höher respektive tiefer bei 0.249 und 0.036. Bei einer Referenzblockgrösse von 20 Pixel liegt der Maximalwert bei 0.264 und der Minimalwert beim durchschnittlichen Korrelationskoeffizienten befindet sich bei 0.030.

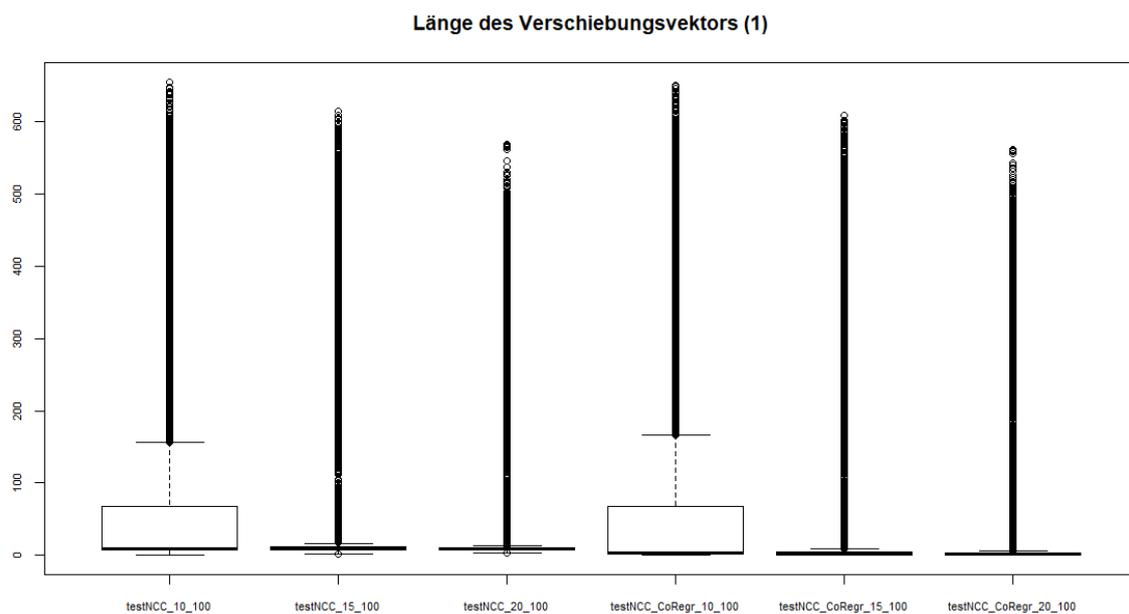


Abbildung 12: Vergleich der Länge des resultierenden Verschiebungsvektors (m) bei Referenzblockgrösse 10, 15 oder 20 Pixel, sowie ohne und mit Co-Registrierung in der gesamten Streubreite.

In der Abbildung 12 sind die getesteten Parameter zur Referenzblockgrösse in Bezug auf die Länge pro Stichprobenpunkt dargestellt. Auffallend ist hier die in allen Referenzblockgrössen relativ grosse Streuung. Es werden Verschiebungen zwischen maximal 649.59 m und minimal 0.64 m gemessen. Bei einer Referenzblockgrösse von 10 Pixel ist die Differenz zwischen Maximal- und Minimalwert am höchsten. Auch im Vergleich der Quartilsgrenzen zeigt sich dieses Bild: Die 75 %-Quartilsgrenze liegt bei 67.46 m und die 25 %-Quartilsgrenze bei 1.79 m. Somit liegen bei einer Referenzblockgrösse von 10 Pixel 50 % der gemessenen Vektoren innerhalb dieses Bereiches. Bei den Testresultaten mit 15 und 20 Pixel als Referenzblockgrösse zeigt sich eine ähnlich hohe Streuung zwischen Maximal- und Minimalwert. Jedoch ist deutlich zu erkennen, dass dies von den Ausreissern herrührt und der Bereich zwischen den Whiskern bei der dargestellten Y-Achse sehr schmal ist und Differenzen, zumindest zwischen der Referenzblockgrösse 15 und 20 Pixel, kaum zu erkennen sind.

Da der Unterschied zwischen Minimal- und Maximalwert der angegebenen Vektorlänge derart gross ist und auf dem Boxplot-Diagramm in Abbildung 12 der Wert zwischen den Whiskern nicht zu erkennen ist, wurde in Abbildung 13 die Skala der Y-Achse auf einen Wert zwischen 0 und 20 m reduziert. Es zeigt sich ein sehr spannendes Bild in den Testresultaten. Das Boxplot-Diagramm zeigt deutlich auf, dass eine Co-Registrierung bei einer Referenzblockgrösse von 15 m und 20 m Pixel markante Auswirkungen auf die resultierenden Längen hat.

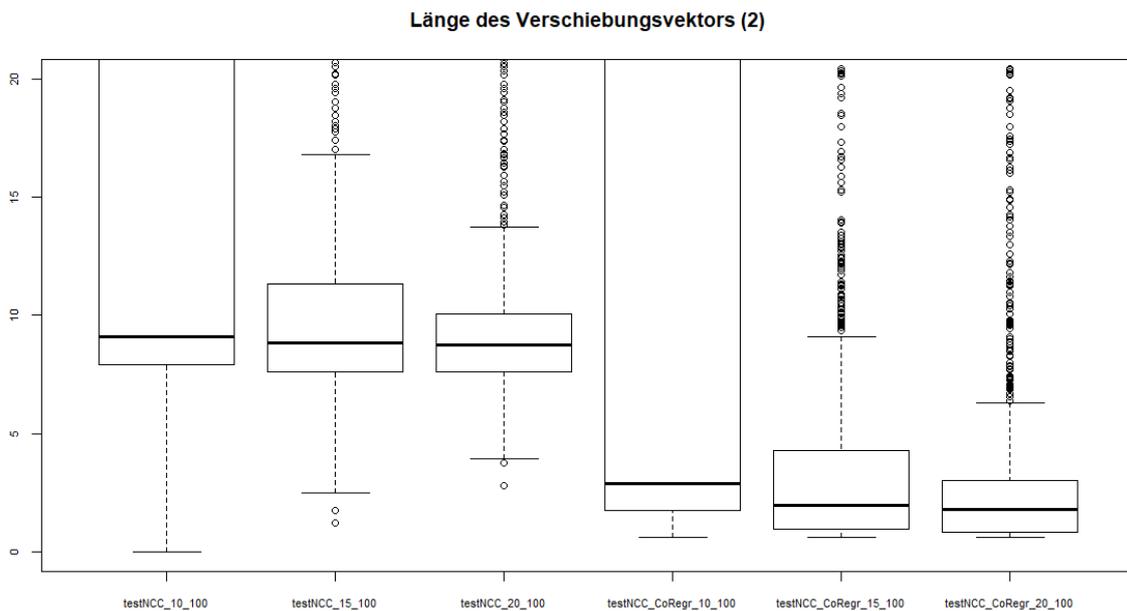


Abbildung 13: Vergleich der Länge des resultierenden Verschiebungsvektors (m) bei Referenzblockgrösse 10, 15 oder 20 Pixel, sowie ohne und mit Co-Registrierung zwischen 0 und 20 m.

In Abbildung 13 ist zu erkennen, dass sich ohne Co-Registrierung bei einer Referenzblockgrösse von 10 Pixel der Interquartilsabstand zwischen 7.91 m und 92.49 m (ausserhalb des sichtbaren Bereichs der Y-Achse) befindet. Ohne Co-Registrierung und bei einer Referenzblockgrösse von 15 und 20 Pixel ist der deutlich geringere Interquartilsabstand gut sichtbar. Bei einem Testwert von 15 Pixel liegt der Abstand bei 7.61 m und 11.32 m und bei 20 Pixel bei 7.61 m und 10.08 m. Werden nun diese statistischen Werte mit jenen mit Co-Registrierung verglichen, sieht man im Boxplot-Diagramm deutlich die signifikant geringeren Vektorlängen im Bereich des Interquartilsabstands bei der Co-Registrierung. Mit einer Co-Registrierung und einer Referenzblockgrösse von 10 Pixel ist der Interquartilsabstand noch recht gross. Er liegt zwischen 1.79 m und 67.46 m. Bei einer Referenzblockgrösse von 15 oder 20 Pixel ist der Interquartilsabstand im Vergleich ähnlich gross wie jener ohne Co-Registration, die Länge der Vektoren ist jedoch signifikant kürzer. Bei 15 Pixel liegt sie zwischen 0.97 m und

4.30 m und bei 20 Pixel zwischen 0.86 m und 3.05 m. Interessant am Testergebnis ist auch, dass sich bei diesem Verfahren, mit oder ohne Co-Registrierung und über alle getesteten Parameter, scheinbar keine Werte mit 0 m Vektorlänge erreichen lassen. Die Erkenntnisse aus dieser statistischen Auswertung sind schlussendlich in die Auswahl der geeignetsten Parametereinstellungen eingeflossen und sind bei den Angaben zur Methodik in Kapitel 2.5 «Workflow in CIAS» auf Seite 29 beschrieben.

3.2 Untersuchungsgebiet A: Statistische Masse des CIAS-Outputs

```
> summary(NCC_2016_2017_15_100)
      X                Y                dx                dy
Min.   :421550      Min.   :7087080      Min.   : -439.8238      Min.   : -447.2899
1st Qu.:423670      1st Qu.:7088360      1st Qu.:  -0.8390      1st Qu.:  -1.9719
Median :425180      Median :7089330      Median :   0.2566      Median :   0.4073
Mean   :425243      Mean   :7089277      Mean   :   2.7953      Mean   :   2.3226
3rd Qu.:426700      3rd Qu.:7090220      3rd Qu.:   1.8094      3rd Qu.:   1.6810
Max.   :429990      Max.   :7091450      Max.   :  455.3941      Max.   :  448.1941

      length          direction          max_corrcoeff          avg_corrcoeff
Min.   :  0.5598      Min.   :  0.0453      Min.   :0.2929      Min.   :0.0290
1st Qu.:  1.0912      1st Qu.:111.3311      1st Qu.:0.8705      1st Qu.:0.0846
Median :  2.1007      Median :175.1233      Median :0.9362      Median :0.1098
Mean   : 35.6906      Mean   :190.0854      Mean   :0.9005      Mean   :0.1211
3rd Qu.:  4.8854      3rd Qu.:302.5811      3rd Qu.:0.9670      3rd Qu.:0.1495
Max.   :627.5958      Max.   :359.9289      Max.   :0.9966      Max.   :0.3119

> summary(NCC_2017_2018_15_100)
      X                Y                dx                dy
Min.   :420790      Min.   :7086920      Min.   : -461.581      Min.   : -450.9430
1st Qu.:423040      1st Qu.:7088200      1st Qu.:  -3.529      1st Qu.:  -3.7626
Median :425270      Median :7089330      Median :   1.795      Median :  -0.7971
Mean   :425289      Mean   :7089308      Mean   :  -3.733      Mean   :   0.1589
3rd Qu.:427500      3rd Qu.:7090450      3rd Qu.:   7.296      3rd Qu.:   1.8422
Max.   :430140      Max.   :7091550      Max.   :  443.072      Max.   :  454.2147

      length          direction          max_corrcoeff          avg_corrcoeff
Min.   :  0.0057      Min.   :  0.0018      Min.   :0.1948      Min.   :0.0100
1st Qu.:  3.5251      1st Qu.:  99.5448      1st Qu.:0.7664      1st Qu.:0.0850
Median :  6.7637      Median :143.7956      Median :0.9027      Median :0.1145
Mean   :105.1072      Mean   :171.0924      Mean   :0.8501      Mean   :0.1286
3rd Qu.:195.0198      3rd Qu.:260.1399      3rd Qu.:0.9594      3rd Qu.:0.1593
Max.   :638.3916      Max.   :359.9970      Max.   :0.9984      Max.   :0.4796
```

Abbildung 14: Deskriptive statistische Masse nach dem Image-Matching und der NCC zwischen den Jahren 2016 und 2017 (oben) sowie 2017 und 2018 (unten) über das gesamte Untersuchungsgebiet A.

Die Abbildung 14 zeigt die Gesamtübersicht über die deskriptiven statistischen Masse aller im CIAS-Output vorhandenen Ausgabespalten. In der Auswertung sind alle 233'579 Messpunkte für die Berechnung zwischen den Jahren 2016 und 2017 sowie alle 235'672 Messpunkte für die Berechnung zwischen den Jahren 2017 und 2018 enthalten. Diese lassen sich mit den statistischen Massen der 16'051 Stichprobenpunkte des Testings mit einer Referenzblockgrösse von 15 Pixel und Co-Registrierung vergleichen, welche in Abbildung 9

zusammengefasst sind. Der Vergleich zeigt, dass bei dieser Erweiterung um das rund 15-fache an Messpunkten, die Varianz bei der Länge der Verschiebungsvektoren verstärkt wird und sich die Güte des maximalen und durchschnittlichen Korrelationskoeffizienten senkt.

Bei der Länge des Verschiebungsvektors werden beim Testing ein Minimalwert von 0.64 m, beim 25 %-Quartil 0.97 m, beim Median einen Wert von 2.00 m, beim arithmetischen Mittel einen Wert von 57.58 m, beim 75 %-Quartil 4.30 m und ein Maximalwert von 608.39 m gemessen. Die Berechnung über das gesamte Untersuchungsgebiet zwischen den Jahren 2016 und 2017 ergibt ein Minimalwert von 0.56 m, eine 25 %-Quartilsgrenze bei 1.09 m, ein Median von 2.10 m, ein arithmetisches Mittel von 38.69 m, eine 75 %-Quartilsgrenze bei 4.89 m und ein Maximalwert von 627.60 m. Die Berechnung über das gesamte Untersuchungsgebiet zwischen den Jahren 2017 und 2018 ergibt ein Minimalwert von 0.01 m, eine 25 %-Quartilsgrenze bei 3.53 m, ein Median von 6.76 m, ein arithmetisches Mittel von 105.11 m, eine 75 %-Quartilsgrenze bei 195.02 m und ein Maximalwert von 638.39 m.

Beim maximalen Korrelationskoeffizienten werden beim Testing ein Minimalwert von 0.354, beim 25 %-Quartil 0.780, beim Median einen Wert von 0.888, beim arithmetischen Mittel einen Wert von 0.853, beim 75 %-Quartil 0.959 und ein Maximalwert von 0.996 gemessen. Die Berechnung über das gesamte Untersuchungsgebiet zwischen den Jahren 2016 und 2017 ergibt einen Minimalwert von 0.293, eine 25 %-Quartilsgrenze bei 0.871, einen Median von 0.936, ein arithmetisches Mittel von 0.901, eine 75 %-Quartilsgrenze bei 0.967 und ein Maximalwert von 0.997. Die Berechnung über das gesamte Untersuchungsgebiet zwischen den Jahren 2017 und 2018 ergibt ein Minimalwert von 0.195, eine 25 %-Quartilsgrenze bei 0.766, ein Median von 0.903, ein arithmetisches Mittel von 0.850, eine 75 %-Quartilsgrenze bei 0.959 und ein Maximalwert von 0.998.

Beim durchschnittlichen Korrelationskoeffizienten werden beim Testing ein Minimalwert von 0.030, beim 25 %-Quartil 0.070, beim Median einen Wert von 0.096, beim arithmetischen Mittel einen Wert von 0.108, beim 75 %-Quartil 0.137 und ein Maximalwert von 0.264 gemessen. Die Berechnung über das gesamte Untersuchungsgebiet zwischen den Jahren 2016 und 2017 ergibt ein Minimalwert von 0.029, eine 25 %-Quartilsgrenze bei 0.085, ein Median von 0.110, ein arithmetisches Mittel von 0.121, eine 75 %-Quartilsgrenze bei 0.150 und ein Maximalwert von 0.312. Die Berechnung über das gesamte Untersuchungsgebiet zwischen den Jahren 2017 und 2018 ergibt ein Minimalwert von 0.010, eine 25 %-Quartilsgrenze bei 0.085, ein Median von 0.115, ein arithmetisches Mittel von 0.129, eine 75 %-Quartilsgrenze bei 0.159 und ein Maximalwert von 0.480.

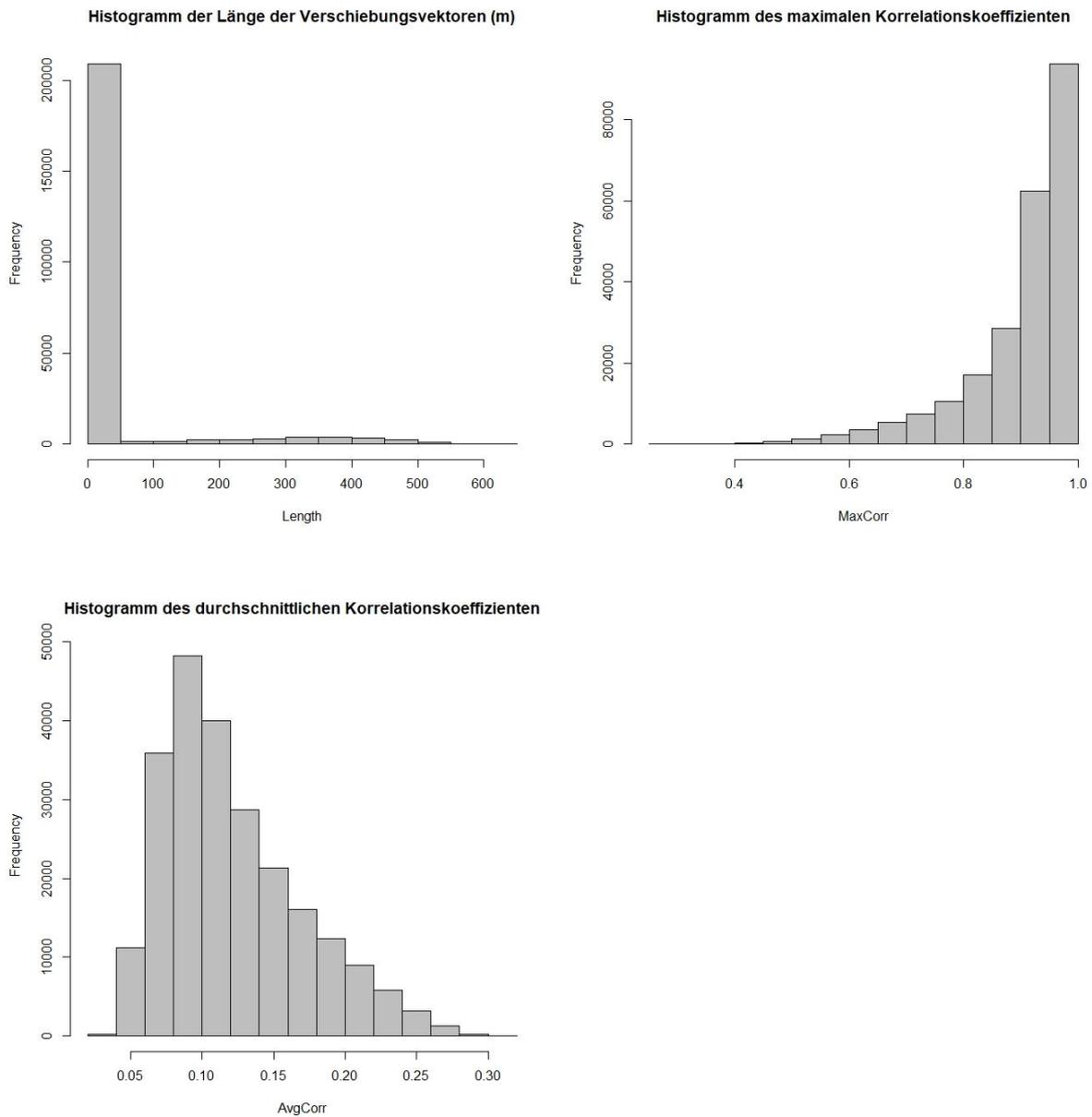
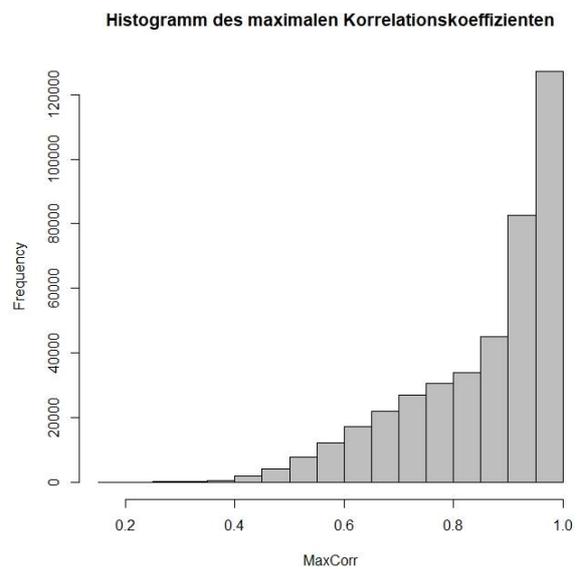
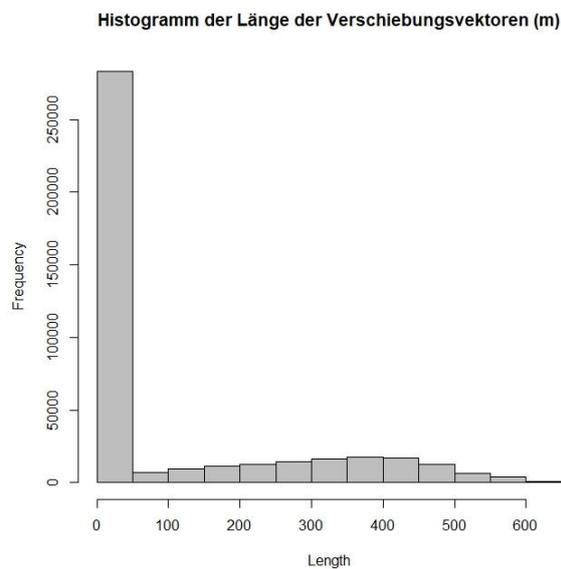


Abbildung 15: Histogramme für die Länge der Verschiebungsvektoren (m) und für den maximalen sowie durchschnittlichen Korrelationskoeffizienten der Messpunkte zwischen den Jahren 2016 und 2017 über das gesamte Untersuchungsgebiet A.

Die Histogramme in Abbildung 15 zeigen die Verteilung in Bezug auf die Länge der gemessenen Verschiebungsvektoren und die Güte der Messungen in Bezug auf den maximalen sowie durchschnittlichen Korrelationskoeffizienten für alle 233'579 Messpunkte für die Auswertung des Image-Matching zwischen den Jahren 2016 und 2017. Bei der Verteilung der Länge der Verschiebungsvektoren fällt die deutliche Rechtsschiefe auf (Schiefe = 3.223). Auch intuitiv lässt sich sagen, dass mit Ausnahme von Ausreißern praktisch alle Messpunkte einen Wert von weniger als 50 m aufweisen. Vergleiche hierzu auch die zuvor beschriebenen deskriptiven statistischen Masse und hier der Wert bei der 75 %-Quartilsgrenze von 4.890 m.

Dies bedeutet, dass zwei Drittel aller Messfelder eine Verschiebungsmessung von unter 4.890 m aufweisen. Die Wölbung des Histogramms, beziehungsweise die Kurtosis, hat einen Wert von 12.344. Dies weist zusätzlich auf eine relativ hohe Dichte hin. Das Histogramm des maximalen Korrelationskoeffizienten weist umgekehrt eine Linksschiefe auf mit einem Wert von -1.897, wenn auch nicht so ausgeprägt. Gemäss den oben gezeigten Quartilsgrenzen befinden sich 75 % der Messpunkte in einem Bereich zwischen 0.871 und 0.967. Die Kurtosis hat einen Wert von 6.815, was im Vergleich auf eine nicht besonders ausgeprägte Dichte hindeutet. Die Verteilung der Messpunkte des durchschnittlichen Korrelationskoeffizienten weist im Vergleich am ehesten eine Normalverteilung auf, wenn auch mit einer Rechtsschiefe (0.855). Die gemessene Dichte des Messpunktnetzes wird hier mit einer Kurtosis von 3.183 ausgegeben, was gegenüber den anderen Attributen die geringste Dichte bedeutet.



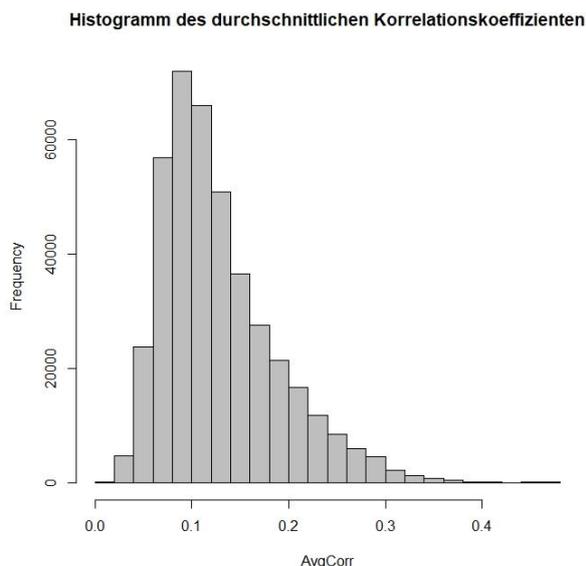


Abbildung 16: Histogramme für die Länge der Verschiebungsvektoren (m) und für den maximalen sowie durchschnittlichen Korrelationskoeffizienten der Messpunkte zwischen den Jahren 2017 und 2018 über das gesamte Untersuchungsgebiet A.

Die Histogramme in Abbildung 16 zeigen die Verteilung in Bezug auf die Länge der gemessenen Verschiebungsvektoren und die Güte der Messungen in Bezug auf den maximalen sowie durchschnittlichen Korrelationskoeffizienten für alle 235'672 Messpunkte der Auswertung von den Jahren 2017 und 2018. Bei der Verteilung der Länge der Verschiebungsvektoren fällt auch hier die Rechtsschiefe auf (Schiefe = 1.360), welche jedoch deutlich weniger ausgeprägt ist, wie beim Image-Matching zwischen 2016 und 2017. Wiederum lässt sich feststellen, dass mit Ausnahme von Ausreißern, praktisch alle Messpunkte einen Wert von weniger als 50 m aufweisen. Werden hierzu aber auch die zuvor beschriebenen deskriptiven statistischen Masse und hier insbesondere den Wert bei der 75 %-Quartilsgrenze von 195.020 m verglichen, ist ein deutlicher Unterschied (4.885 m) zur Auswertung von den Jahren 2016 und 2017 festzustellen. Der Median liegt jedoch bei 6.764 m, was bedeutet, dass 50 % aller Messfelder eine Verschiebungsmessung von unter 6.764 m ausweisen. Die Kurtosis hat einen Wert von 3.366. Dies weist zusätzlich auf eine eher hohe Dichte hin, wenngleich nicht so ausgeprägt wie bei der Auswertung von den Jahren 2016 und 2017. Das Histogramm des maximalen Korrelationskoeffizienten weist umgekehrt eine Linksschiefe auf mit einem Wert von -1.143. Gemäss den oben gezeigten Quartilsgrenzen, befinden sich 50 % der Messpunkte in einem Bereich zwischen 0.766 und 0.959. Die Kurtosis hat einen Wert von 3.672, was im Vergleich auf eine etwa gleich grosse Dichte der Werte wie bei den ermittelten Verschiebungslängen hindeutet. Die Verteilung der Werte des durchschnittlichen Korrelationskoeffizienten weist im Vergleich am ehesten eine Normalverteilung auf, wenn auch mit einer Rechtsschiefe (1.168). Die gemessene Dichte des

Messpunktnetzes wird hier mit einer Kurtosis von 4.652 ausgegeben, was gegenüber den anderen Attributen die geringste Dichte bedeutet.

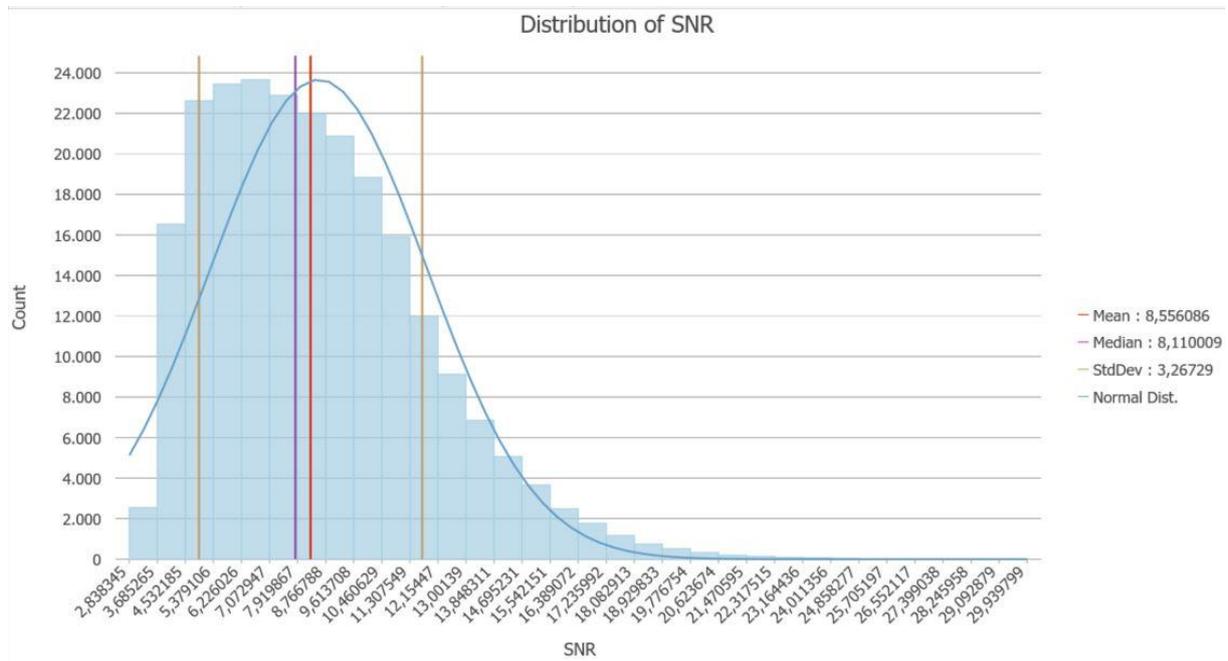


Abbildung 17: Histogramm der Messpunkte zwischen den Jahren 2016 und 2017 zum SNR über das gesamte Untersuchungsgebiet A.

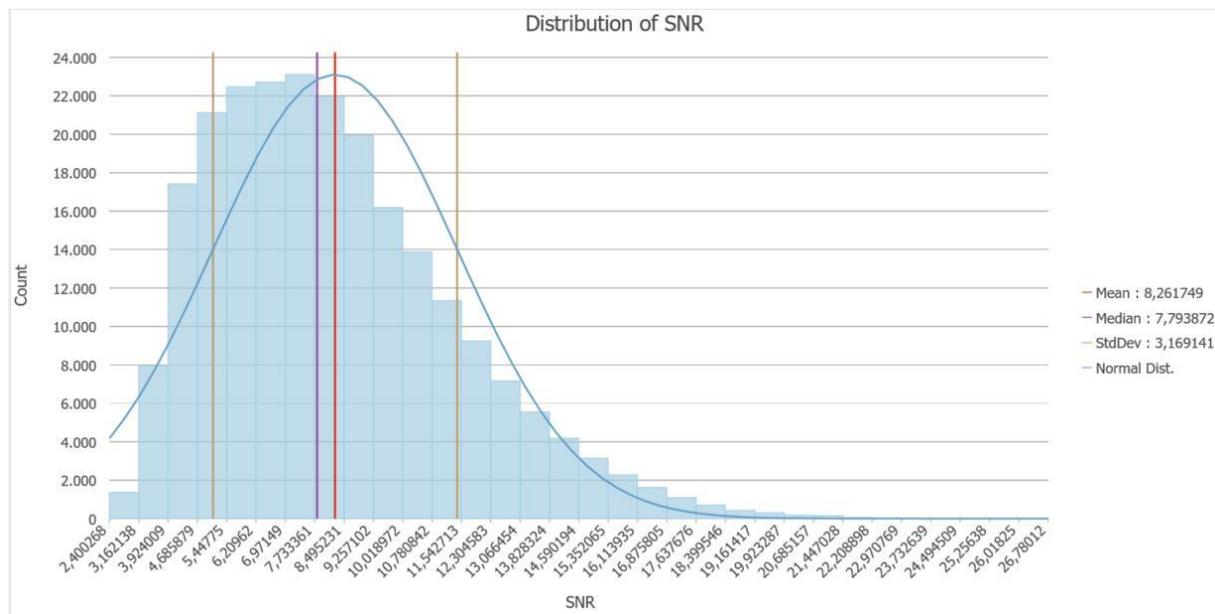


Abbildung 18: Histogramm der Messpunkte zwischen den Jahren 2017 und 2018 zum SNR über das gesamte Untersuchungsgebiet A.

Das SNR bietet eine weitere Möglichkeit, um die Güte des Ergebnisses zu interpretieren. Es bildet das Verhältnis zwischen dem maximalen und dem durchschnittlichen

Korrelationskoeffizienten. In Abbildung 17 ist dies für die Messung zwischen den Jahren 2016 und 2017 dargestellt. Der Median dieses Verhältnisses über alle 233'579 Messpunkte liegt bei 8.110, das arithmetische Mittel bei 8.556 und die Standardabweichung zum arithmetischen Mittel bei 3.267. In Abbildung 18 ist das Histogramm zum SNR für die Jahre 2017 und 2018 abgebildet. Der Median über alle 235'672 Messpunkte liegt dabei bei 7.794, das arithmetische Mittel bei 8.262 und die Standardabweichung zum arithmetischen Mittel bei 3.169.

3.3 Untersuchungsgebiet A: Filterung nach Korrelationskoeffizient

In Tabelle 6 werden die Ergebnisse der ausgeführten Filter, welche in Kapitel 2.6 «Nachbearbeitung des CIAS-Outputs» ausgeführt wurden, dargestellt. Bei der Variante 1 wird kein Filter angewendet und alle 223'579 Messpunkte fließen in das Ergebnis ein. Bei allen anderen Varianten ist einer der Filterparameter so gewählt, dass gemessene Vektorverschiebungen von über 435 m nicht berücksichtigt werden. Bei der Variante 2 werden zudem nur alle Messergebnisse mit einem maximalen Korrelationskoeffizienten von grösser oder gleich 0.6 berücksichtigt. Damit werden nur noch 224'876 bzw. 96 % aller Messpunkte einbezogen. Bei der Variante 3 werden nur Messpunkte mit einem maximalen Korrelationskoeffizienten von grösser oder gleich 0.8 berücksichtigt, wodurch die Anzahl passender Messpunkte auf 200'498 bzw. 86 % aller Messpunkte reduziert wird. Bei der Variante 4 ist neben dem Filter für die Vektorlänge der maximale Korrelationskoeffizient bei grösser oder gleich 0.9, wodurch nur noch 156'371 bzw. 66 % aller Messpunkte berücksichtigt werden. Bei der Variante 5 wird ebenfalls kein Filter angewendet und alle 235'672 Messpunkte fließen in das Ergebnis ein. Bei der Variante 6 werden Vektorverschiebungen von unter 435 m und Messergebnisse mit einem maximalen Korrelationskoeffizienten von grösser oder gleich 0.6 berücksichtigt. Damit werden nur noch 225'504 bzw. 96 % aller Messpunkte berücksichtigt. Bei der Variante 7 werden nur Messpunkte mit einem maximalen Korrelationskoeffizienten von grösser oder gleich 0.8 mit einkalkuliert, wodurch die Anzahl passender Messpunkte auf 197'083 bzw. 84 % aller Messpunkte reduziert wird. Bei der Variante 8, mit einem maximalen Korrelationskoeffizienten von 0.9, entsprechen dagegen nur noch 155'043 Messpunkte dem Kriterium, was 6 % der gesamten Anzahl entspricht.

Tabelle 6: Aufstellung der unterschiedlichen Filterparameter mit unterschiedlichem Korrelationskoeffizient und Verschiebungslänge und der Anzahl passender Messpunkte für die Messung zwischen den Jahren 2016 und 2017 sowie 2017 und 2018 für das Untersuchungsgebiet A.

Variante	Filter	Anzahl Messpunkte (absolut)	Anzahl Messpunkte (prozentual)
1	Ohne Filter	233579	100%

2	length < 435 And max_corrcoeff >= 0.6	224876	96.3%
3	length < 435 And max_corrcoeff >= 0.8	200498	85.8%
4	length < 435 And max_corrcoeff >= 0.9	156371	66.3%
5	Ohne Filter	235672	100%
6	length < 435 And max_corrcoeff >= 0.6	225504	95.7%
7	length < 435 And max_corrcoeff >= 0.8	197083	83.6%
8	length < 435 And max_corrcoeff >= 0.9	155043	65.8%

Eine erste Visualisierung der Ergebnisse ist in den Karten der Abbildung 19, Abbildung 20, Abbildung 21 und Abbildung 22 für die Messung zwischen den Jahren 2016 und 2017 und in Abbildung 23, Abbildung 24, Abbildung 25 und Abbildung 26 für die Messung zwischen den Jahren 2017 und 2018 dargestellt. Sichtbar sind die ermittelten Bodenverschiebungen in Meter bei einer verdichteten räumlichen Auflösung von 25 m, wobei sich der dargestellte Inhalt aufgrund der ausgewählten Filterparameter aus der Tabelle 6 unterscheidet. In den Varianten 1 und 5, bei welchen keine Filterung angewendet wurde, wird das gesamte Untersuchungsgebiet abgedeckt. Bei den Varianten 2, 3 und 4 sowie 6, 7 und 8 wird neben einem gleichbleibenden Filter für die Länge des Verschiebungsvektors der zulässige maximale Korrelationskoeffizient zunehmend erhöht. Es ist gut ersichtlich, dass aufgrund dessen, genau in denjenigen Bereichen mit den höchsten gemessenen Verschiebungen die Messwerte nicht mehr angezeigt werden.

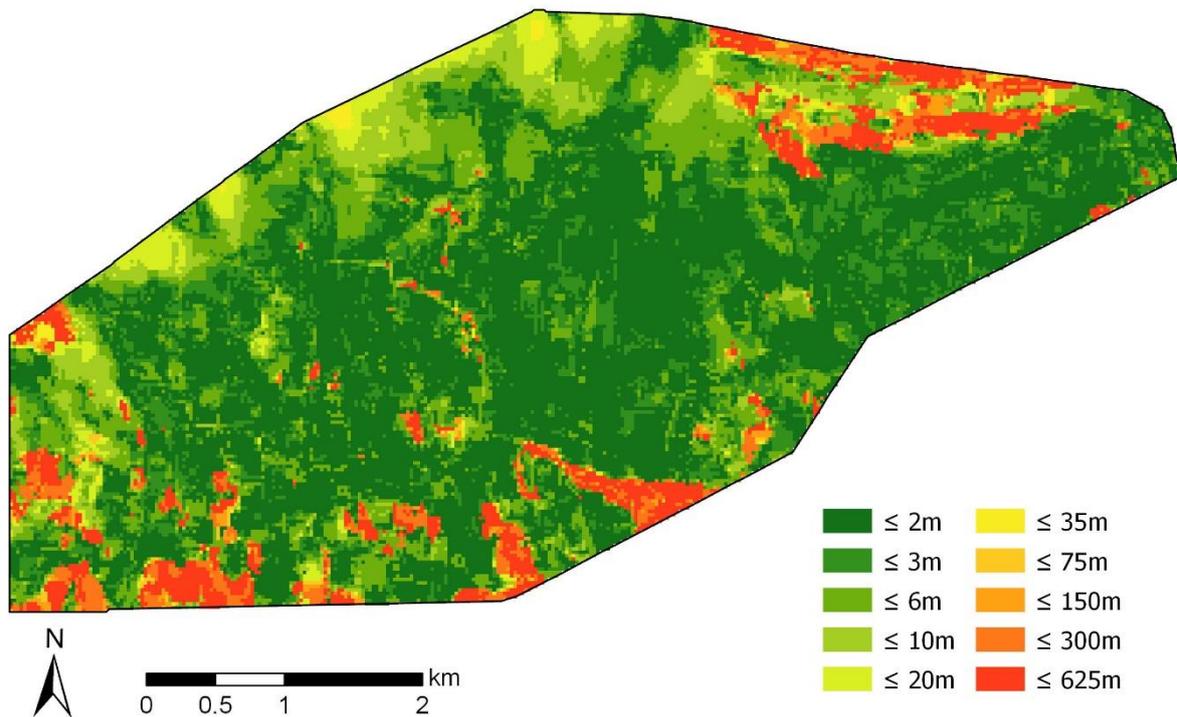
Variante 1: kein Filter

Abbildung 19: Gemessene Verschiebungen zwischen den Jahren 2016 und 2017 im Untersuchungsgebiet A ohne Filterparameter (Variante 1).

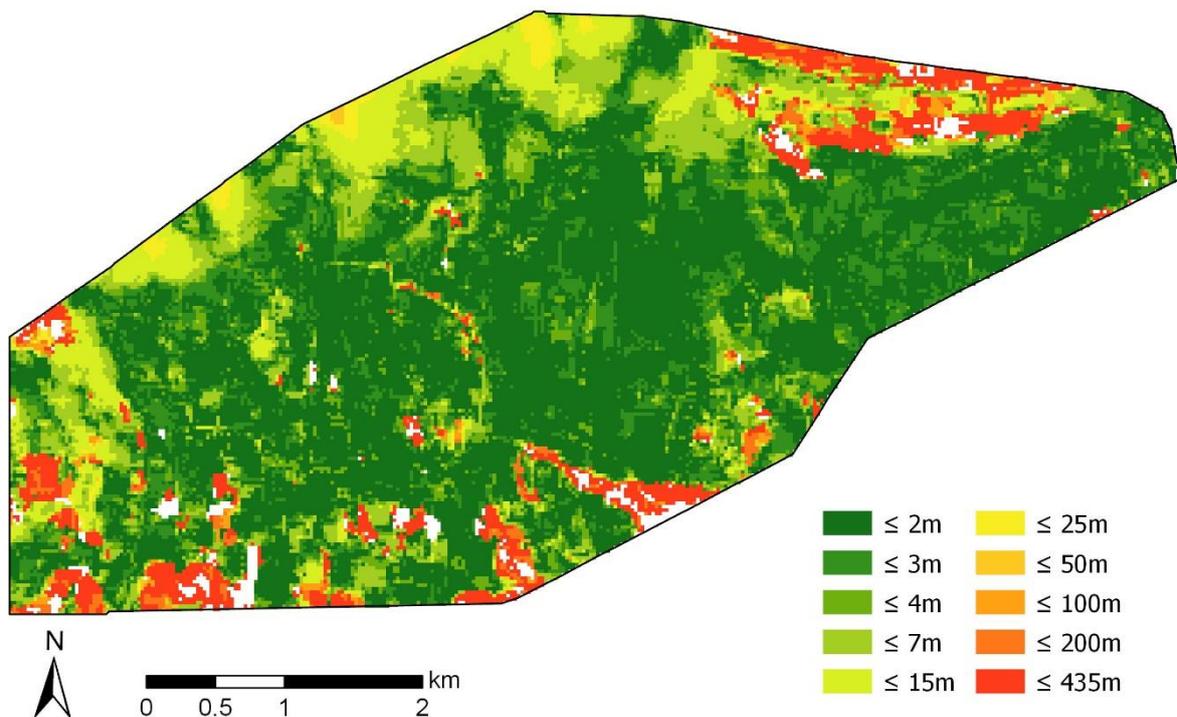
Variante 2: max. Länge 435m und max. Korrelationskoeffizient >0.6

Abbildung 20: Gemessene Verschiebungen zwischen den Jahren 2016 und 2017 im Untersuchungsgebiet A mit Filterparameter der Variante 2.

Variante 3: max. Länge 435m und max. Korrelationskoeffizient >0.8

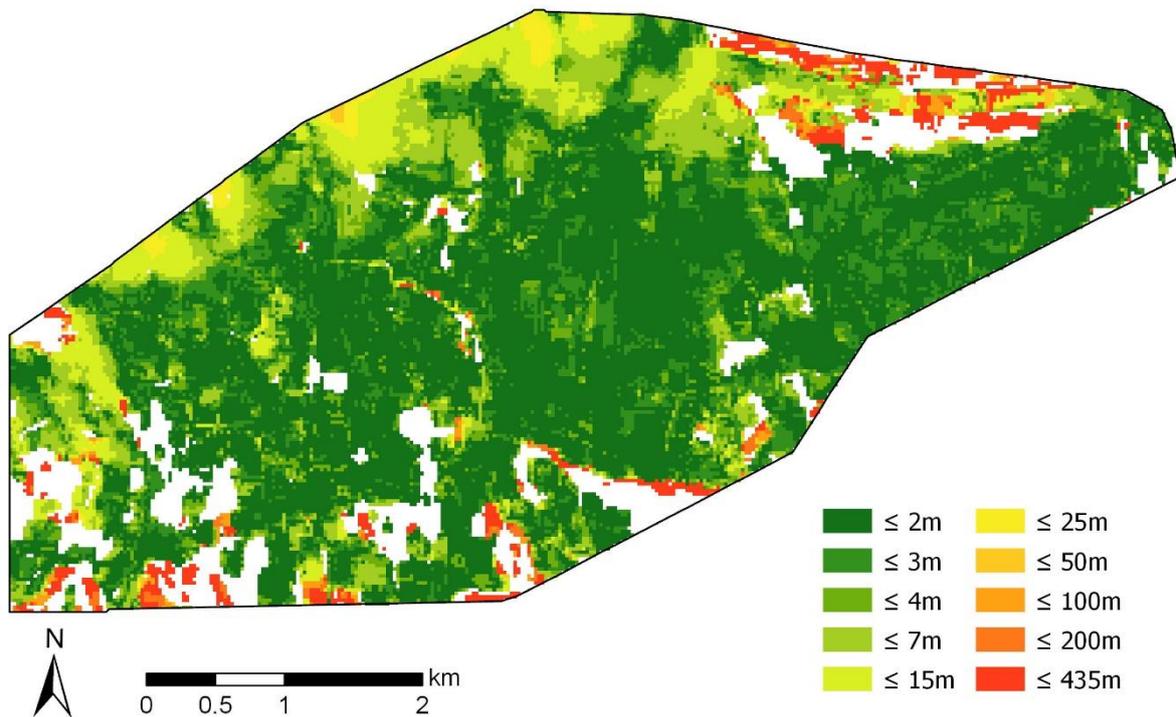


Abbildung 21: Gemessene Verschiebungen zwischen den Jahren 2016 und 2017 im Untersuchungsgebiet A mit Filterparameter der Variante 3.

Variante 4: max. Länge 435m und max. Korrelationskoeffizient >0.9

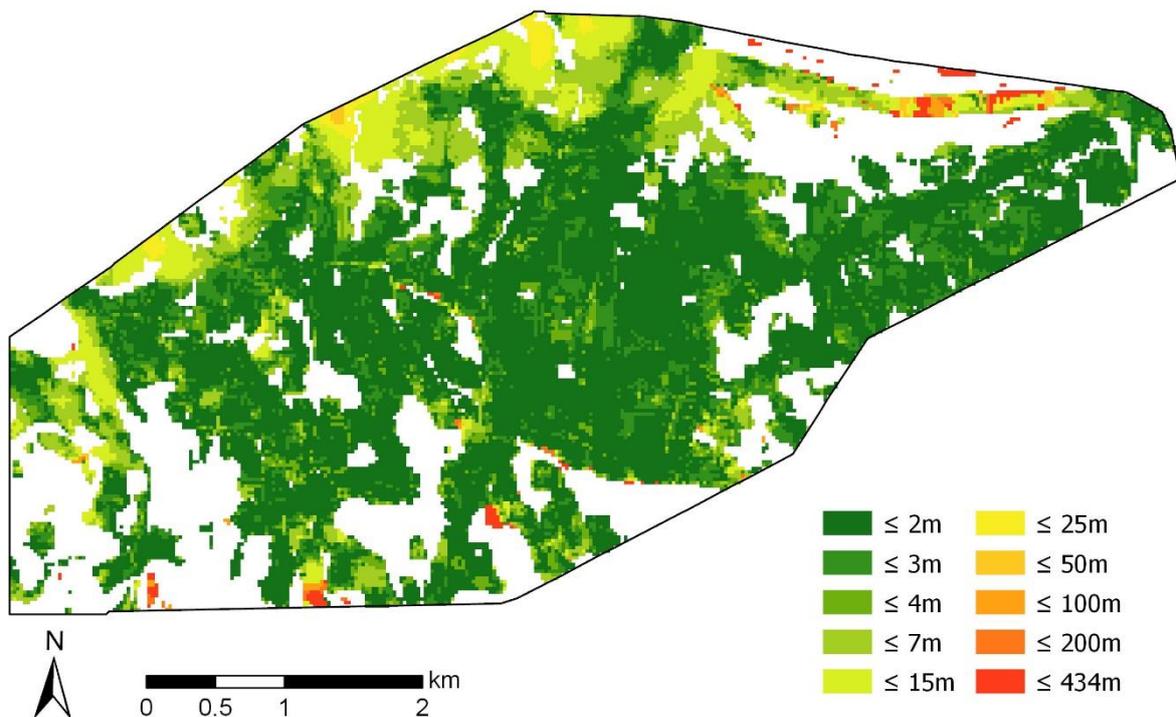


Abbildung 22: Gemessene Verschiebungen zwischen den Jahren 2016 und 2017 im Untersuchungsgebiet A mit Filterparameter der Variante 4.

Variante 5: kein Filter

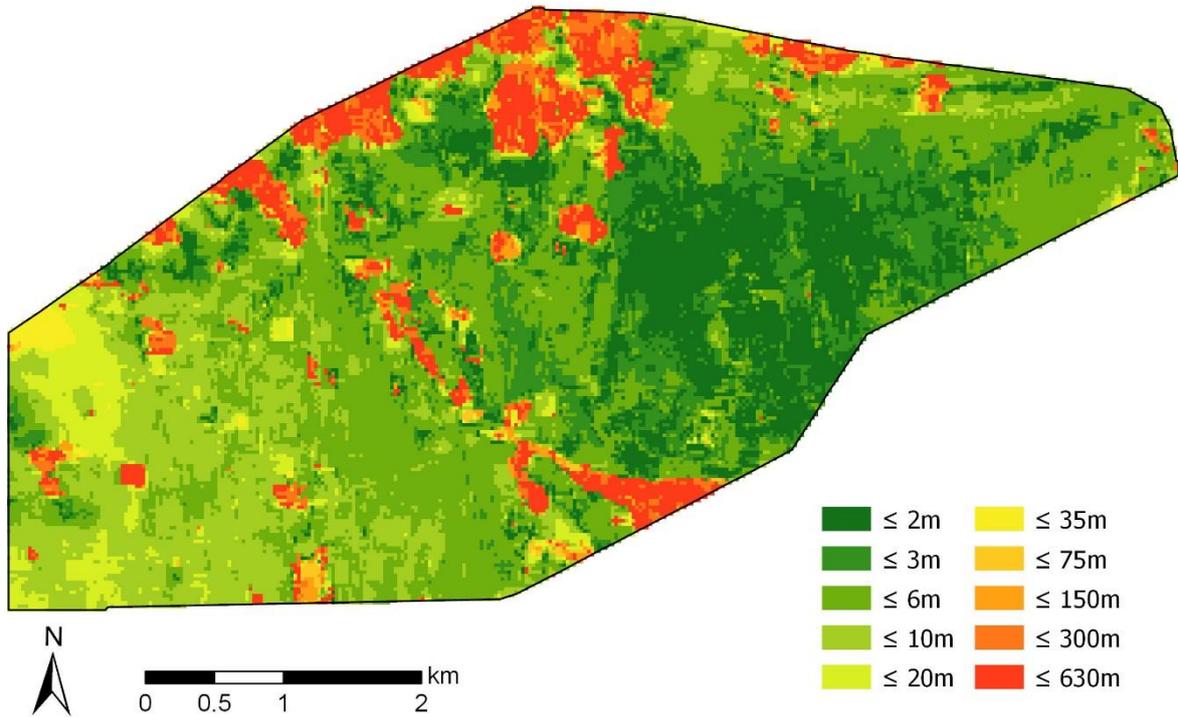


Abbildung 23: Gemessene Verschiebungen zwischen den Jahren 2017 und 2018 im Untersuchungsgebiet A ohne Filterparameter (Variante 5).

Variante 6: max. Länge 435m und max. Korrelationskoeffizient >0.6

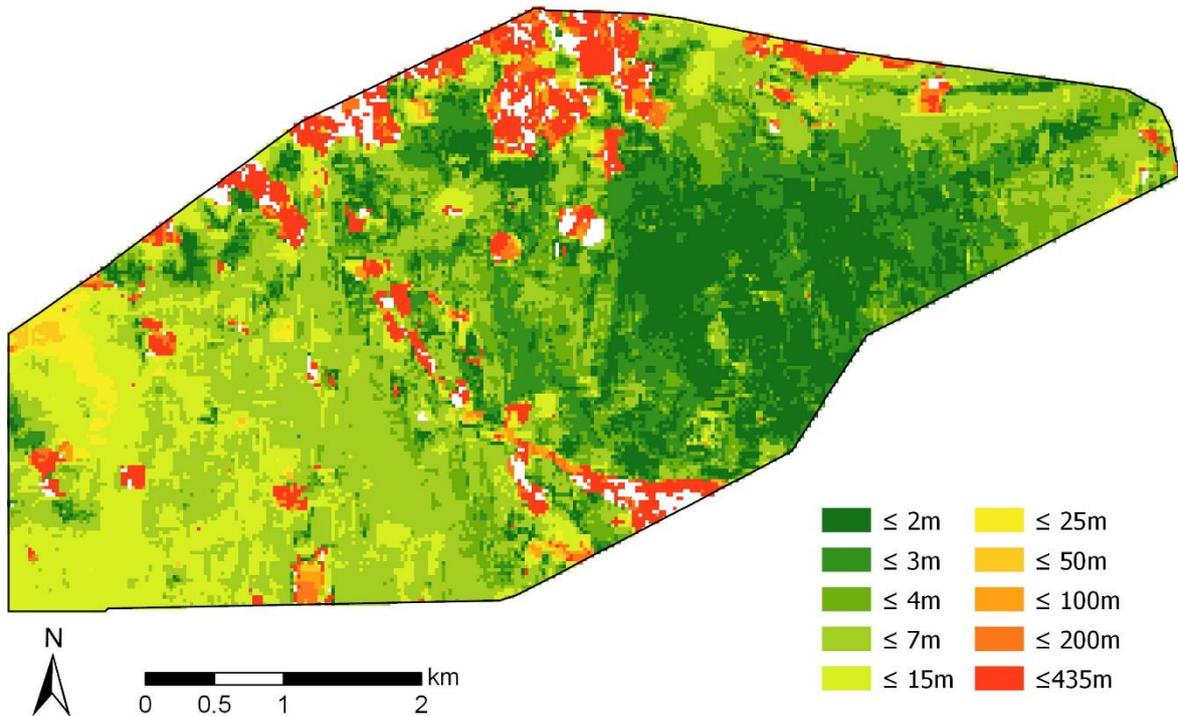


Abbildung 24: Gemessene Verschiebungen zwischen den Jahren 2017 und 2018 im Untersuchungsgebiet A mit Filterparameter der Variante 6.

Variante 7: max. Länge 435m und max. Korrelationskoeffizient >0.8

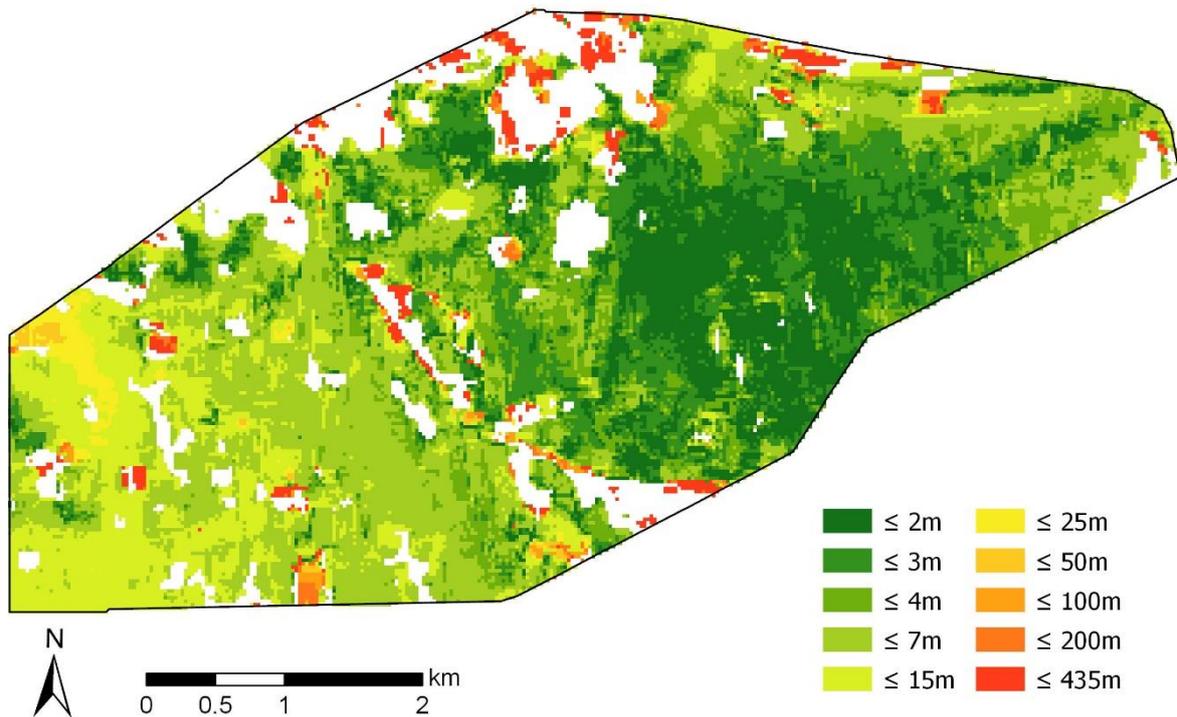


Abbildung 25: Gemessene Verschiebungen zwischen den Jahren 2017 und 2018 im Untersuchungsgebiet A mit Filterparameter der Variante 7.

Variante 8: max. Länge 435m und max. Korrelationskoeffizient >0.9

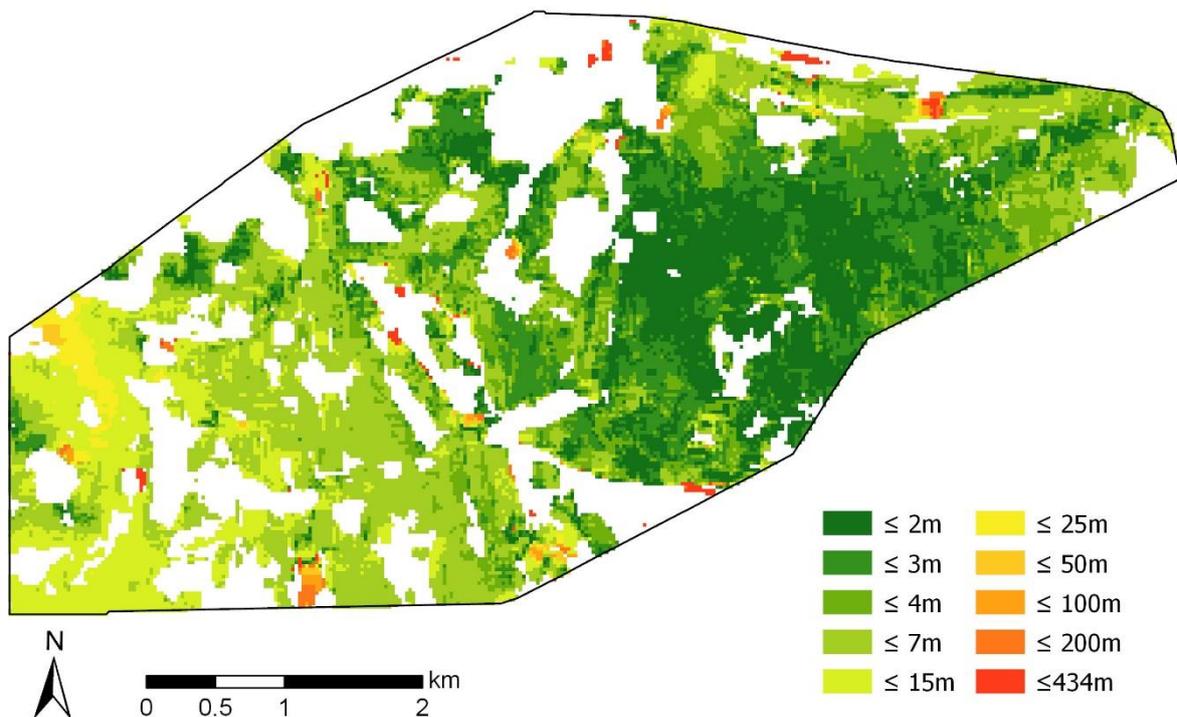


Abbildung 26: Gemessene Verschiebungen zwischen den Jahren 2017 und 2018 im Untersuchungsgebiet A mit Filterparameter der Variante 8.

3.4 Untersuchungsgebiet A: Visualisierung mit Verschiebungsvektoren

In Abbildung 27 und Abbildung 28 sind wiederum die ermittelten Bodenverschiebungen zwischen den Jahren 2016 und 2017 sowie 2017 und 2018 dargestellt. Dabei sind die ermittelten Längen der Bodenverschiebungen wieder als Rasterzellen mit abgestufter Farbgebung ersichtlich. Zudem wurden ergänzend Vektorpfeile hinzugefügt, welche abgestuft nach Grösse, ebenfalls die Länge anzeigen und zusätzlich auch die ermittelte Verschiebungsrichtung aufzeigen. Aufgrund der hohen Anzahl an Messpunkten werden nicht alle Vektorpfeile abgebildet, da dies zu einer sehr unübersichtlichen Karte führen würde. Es wird, wegen der in Kapitel 2.7 auf Seite 35 beschriebenen Modulo-Funktion, nur jeder fünfzigste Messwert angezeigt. Die Rasterzellen werden leicht transparent geschaltet (*Layer Transparency = 20*). Um die Vektorpfeile besser erkennen zu können, sind die Visualisierungen mit Verschiebungsvektoren zusätzlich in Anhang 2 als Karten im Format A4 aufgeführt.

Ermittelte Bodenverschiebungen zwischen 2016 und 2017

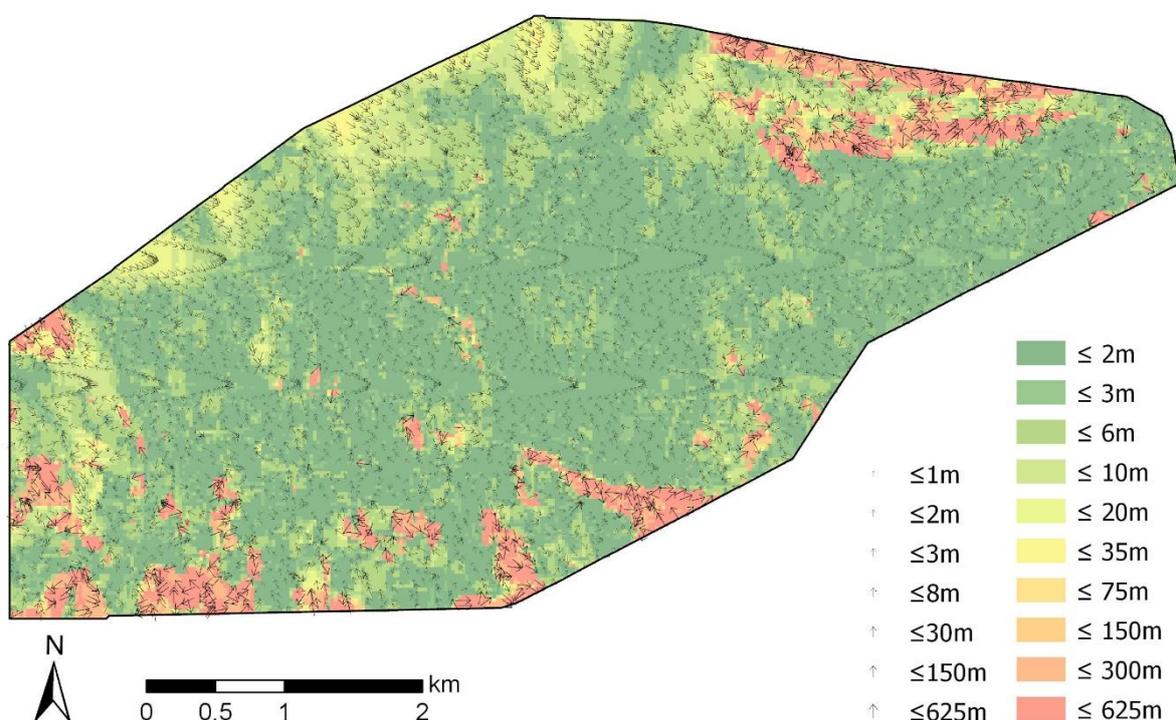


Abbildung 27: Rasterzellen für die Verschiebungslänge und Vektorpfeile für die Verschiebungslänge und -richtung, ohne Korrelationsfilter im Untersuchungsgebiet A zwischen 2016 und 2017.

Ermittelte Bodenverschiebungen zwischen 2017 und 2018

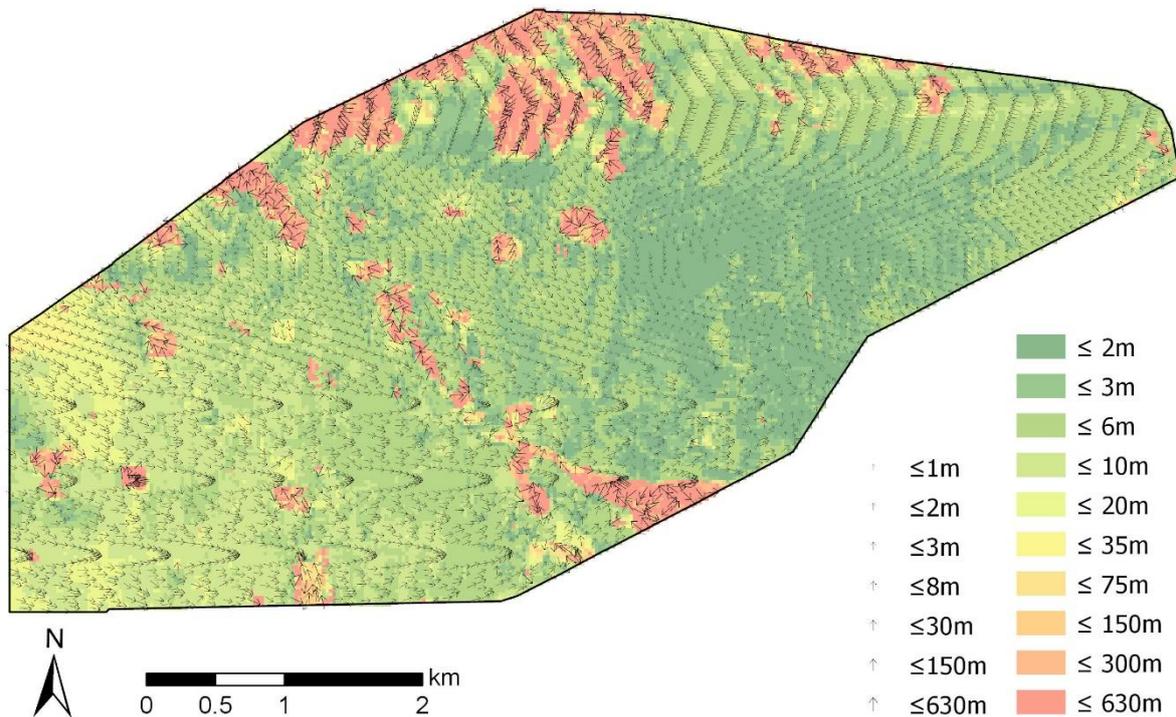


Abbildung 28: Rasterzellen für die Verschiebungslänge und Vektorpfeile für die Verschiebungslänge und -richtung, ohne Korrelationsfilter im Untersuchungsgebiet A zwischen 2017 und 2018.

Aufgrund der Modulo-Funktion wird in den beiden Abbildungen nicht die bereits erwähnte volle Anzahl an Messpunkten (Tabelle 6) als Verschiebungsvektoren abgebildet, sondern für die Ergebnisse in Abbildung 27 4'671 Messpunkte bzw. Vektorpfeile und für die Ergebnisse in Abbildung 28 4'702 Messpunkte bzw. Vektorpfeile, was jedem fünfzigsten Messwert oder 2 % der Gesamtanzahl entspricht.

3.5 Untersuchungsgebiet B: Statistische Masse des CIAS-Outputs

```
> summary(B_NCC_2016_2017_15_100)
  OBJECTID      X              Y              dx
Min.   :   382  Min.   :-1876770  Min.   :9349340  Min.   :-447.680
1st Qu.: 357507 1st Qu.:-1873060 1st Qu.:9352010 1st Qu.:-200.081
Median : 600757 Median :-1870440 Median :9353830 Median :  -8.754
Mean   : 605202 Mean   :-1870302 Mean   :9353860 Mean   : -21.587
3rd Qu.: 852614 3rd Qu.:-1867630 3rd Qu.:9355710 3rd Qu.: 110.044
Max.   :1220674 Max.   :-1863410 Max.   :9358470 Max.   : 447.680

  dy      length      direction      max_corrcoeff      avg_corrcoeff
Min.   :-447.68  Min.   : 0.00  Min.   : 0.0  Min.   :0.3095  Min.   :0.0156
1st Qu.:-142.56 1st Qu.: 62.64 1st Qu.:115.0 1st Qu.:0.7460 1st Qu.:0.1079
Median : -10.00 Median :257.85 Median :204.6  Median :0.8435 Median :0.1475
Mean   : -24.13 Mean   :245.69 Mean   :186.1  Mean   :0.8193 Mean   :0.1614
3rd Qu.: 65.03 3rd Qu.:388.31 3rd Qu.:255.8 3rd Qu.:0.9145 3rd Qu.:0.2028
Max.   : 447.68 Max.   :632.23 Max.   :359.8  Max.   :1.0000 Max.   :0.5453

> summary(B_NCC_2017_2018_15_100)
  OBJECTID      X              Y              dx              dy
Min.   :   631  Min.   :-1876800  Min.   :9349310  Min.   :-447.680  Min.   :-447.680
1st Qu.: 363312 1st Qu.:-1873050 1st Qu.:9352010 1st Qu.:-213.836 1st Qu.:-125.050
Median : 608234 Median :-1870440 Median :9353830 Median :  5.002  Median : -13.755
Mean   : 612711 Mean   :-1870301 Mean   :9353863 Mean   : -30.177  Mean   : -5.428
3rd Qu.: 861590 3rd Qu.:-1867630 3rd Qu.:9355710 3rd Qu.: 93.788 3rd Qu.: 110.044
Max.   :1239884 Max.   :-1863360 Max.   :9358530 Max.   : 447.680 Max.   : 447.680

  length      direction      max_corrco      avg_corrco
Min.   : 0.00  Min.   : 0.0  Min.   :0.2883  Min.   :0.0062
1st Qu.: 88.61 1st Qu.:107.4 1st Qu.:0.7293 1st Qu.:0.1018
Median :269.83 Median :167.5  Median :0.8278  Median :0.1441
Mean   :254.55 Mean   :176.3  Mean   :0.8102  Mean   :0.1591
3rd Qu.:388.30 3rd Qu.:250.6 3rd Qu.:0.9079 3rd Qu.:0.2012
Max.   :632.23 Max.   :359.8  Max.   :1.0000  Max.   :0.5153
```

Abbildung 29: Deskriptive statistische Masse nach dem Image-Matching und der NCC zwischen den Jahren 2016 und 2017 (oben) sowie 2017 und 2018 (unten) über das gesamte Untersuchungsgebiet B.

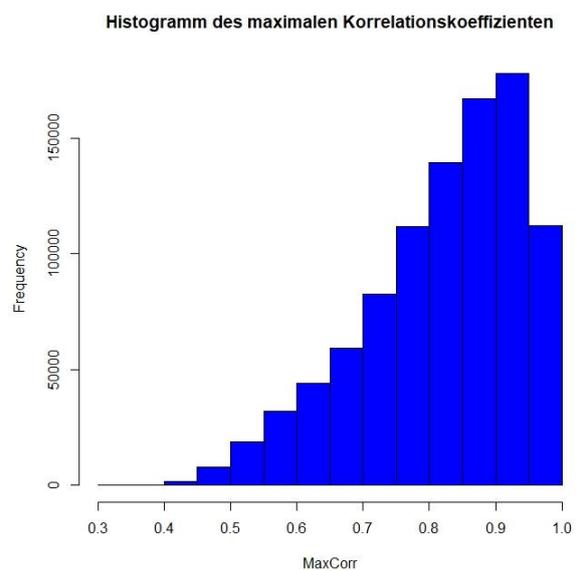
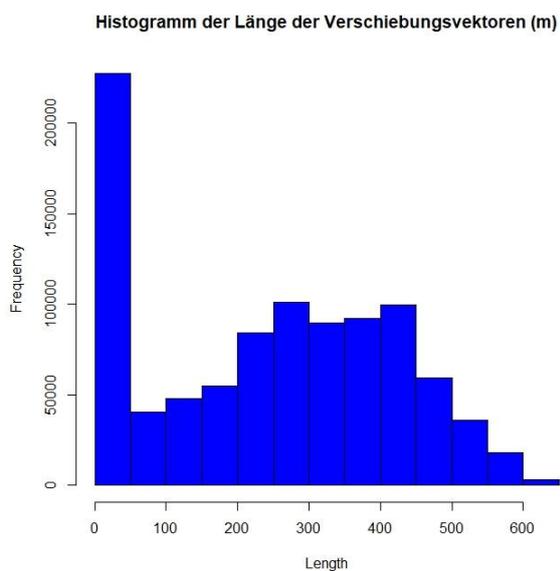
Die Abbildung 29 zeigt wiederum die Gesamtübersicht über die deskriptiven statistischen Masse aller im CIAS-Output vorhandenen Ausgabespalten. In der Auswertung sind alle 959'868 Messpunkte für die Berechnung zwischen den Jahren 2016 und 2017 sowie alle 956'557 Messpunkte für die Berechnung zwischen den Jahren 2017 und 2018 des Untersuchungsgebietes B (Svínafellsjökull) enthalten.

Bei der Länge des Verschiebungsvektors zwischen den Jahren 2016 und 2017 wird ein Minimalwert von 0.00 m, eine 25 %-Quartilsgrenze bei 62.64 m, ein Median von 257.85 m, ein arithmetisches Mittel von 245.69 m, eine 75 %-Quartilsgrenze bei 388.31 m und ein Maximalwert von 632.23 m gemessen. Die Berechnung über das gesamte Untersuchungsgebiet zwischen den Jahren 2017 und 2018 ergibt ein Minimalwert von 0.00 m, eine 25 %-Quartilsgrenze bei 88.61 m, ein Median von 269.83 m, ein arithmetisches Mittel von 254.55 m, eine 75 %-Quartilsgrenze bei 388.30 m und ein Maximalwert von 632.23 m.

Die Berechnung des maximalen Korrelationskoeffizienten zwischen den Jahren 2016 und 2017 ergibt ein Minimalwert von 0.310, eine 25 %-Quartilsgrenze bei 0.746, ein Median von 0.844, ein arithmetisches Mittel von 0.819, eine 75 %-Quartilsgrenze bei 0.915 und ein

Maximalwert von 1.000. Die Berechnung für die Jahre 2017 und 2018 ergibt ein Minimalwert von 0.288, eine 25 %-Quartilsgrenze bei 0.729, ein Median von 0.828, ein arithmetisches Mittel von 0.810, eine 75 %-Quartilsgrenze bei 0.908 und ein Maximalwert von 1.000.

Beim durchschnittlichen Korrelationskoeffizienten werden zwischen den Jahren 2016 und 2017 ein Minimalwert von 0.016, eine 25 %-Quartilsgrenze bei 0.108, ein Median von 0.148, ein arithmetisches Mittel von 0.161, eine 75 %-Quartilsgrenze bei 0.203 und ein Maximalwert von 0.545 gemessen. Die Berechnung zwischen den Jahren 2017 und 2018 ergibt ein Minimalwert von 0.006, eine 25 %-Quartilsgrenze bei 0.102, ein Median von 0.144, ein arithmetisches Mittel von 0.159, eine 75 %-Quartilsgrenze bei 0.201 und ein Maximalwert von 0.515.



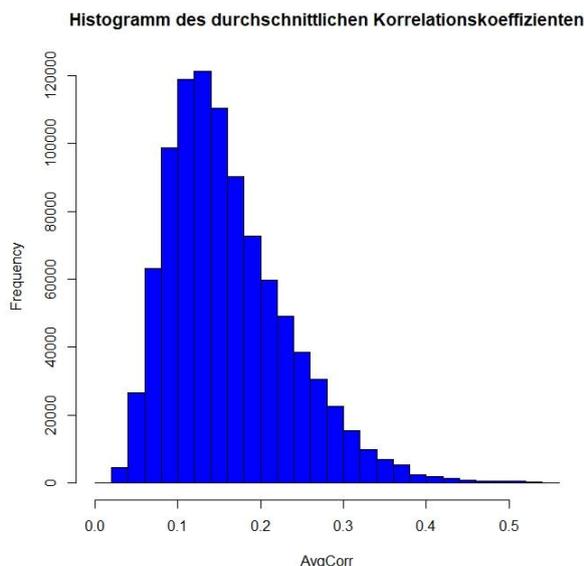


Abbildung 30: Histogramme für die Länge der Verschiebungsvektoren (m) und für den maximalen sowie durchschnittlichen Korrelationskoeffizienten der Messpunkte zwischen den Jahren 2016 und 2017 über das gesamte Untersuchungsgebiet B.

Die Histogramme in Abbildung 30 zeigen die Verteilung in Bezug auf die Länge der gemessenen Verschiebungsvektoren und die Güte der Messungen in Bezug auf den maximalen sowie durchschnittlichen Korrelationskoeffizienten für alle 959'868 Messpunkte des Untersuchungsgebietes B für die Auswertung des Image-Matching zwischen den Jahren 2016 und 2017. Bei der Verteilung der Länge der Verschiebungsvektoren fällt die deutlich weniger stark ausgeprägte Rechtsschiefe (Schiefe = 0.002) gegenüber den Messpunkten des Untersuchungsgebietes A auf. Der Grossteil der Messpunkte hat weiterhin einen Wert von unter 50 m, jedoch sind Messwerte über 50 m und Extremwerte bis 600 m deutlich häufiger vorhanden. Vergleichend hierzu auch die zuvor beschriebenen deskriptiven statistischen Masse und hier der Wert bei der 75 %-Quartilsgrenze von 388.31 m. Dies bedeutet, dass zwei Drittel aller Messfelder eine Verschiebungsmessung von unter 388.31 m aufweisen. Die Kurtosis hat einen Wert von 1.780. Dies weist zusätzlich auf eine im Vergleich deutlich weniger hohe Dichte hin. Das Histogramm des maximalen Korrelationskoeffizienten weist umgekehrt eine Linksschiefe auf mit einem Wert von -0.774, wenn auch nicht gleich stark ausgeprägt. Gemäss den oben gezeigten Quartilsgrenzen befinden sich 50 % der Messpunkte in einem Bereich zwischen 0.746 und 0.915. Die Kurtosis hat einen Wert von 2.968, was im Vergleich auf eine nicht besonders ausgeprägte Dichte hindeutet. Die Verteilung der Messpunkte aufgrund der Werte des durchschnittlichen Korrelationskoeffizienten weist im Vergleich am ehesten eine Normalverteilung auf, wenn auch mit einer Rechtsschiefe (0.977). Die gemessene Dichte des Messpunktnetzes wird hier mit einer Kurtosis von 4.191 ausgegeben.

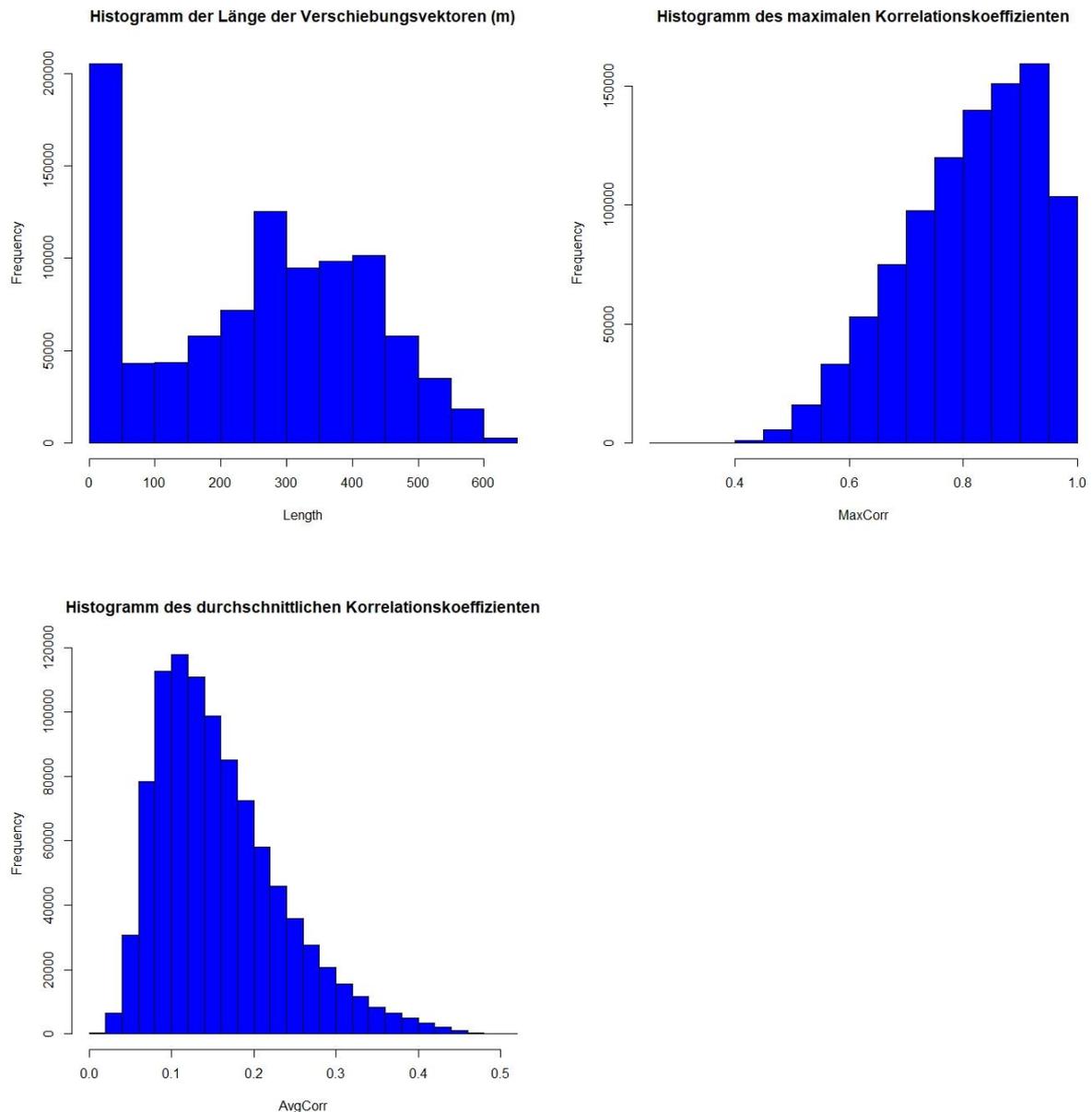


Abbildung 31: Histogramme für die Länge der Verschiebungsvektoren (m) und für den maximalen sowie durchschnittlichen Korrelationskoeffizienten der Messpunkte zwischen den Jahren 2017 und 2018 über das gesamte Untersuchungsgebiet B.

Die Histogramme in der Abbildung 31 zeigen die Verteilung in Bezug auf die Länge der gemessenen Verschiebungsvektoren und die Güte der Messungen in Bezug auf den maximalen sowie durchschnittlichen Korrelationskoeffizienten für alle 956'557 Messpunkte der Auswertung der Jahre 2017 und 2018. Bei der Verteilung der Länge der Verschiebungsvektoren liegt eine ganz gering ausgeprägte Linksschiefe vor (Schiefe = -0.036). Die Kurtosis des Histogramms hat einen Wert von 1.859. Die Dichte der Messpunkte ist somit vergleichbar bzw. leicht höher als bei der Auswertung der Jahre 2016 und 2017. Das Histogramm des maximalen Korrelationskoeffizienten weist ebenfalls eine Linksschiefe auf mit

einem Wert von -0.580 . Die Kurtosis hat einen Wert von 2.646 , was im Vergleich auf eine etwas höhere Dichte der Werte als bei den ermittelten Verschiebungslängen hindeutet. Die Verteilung der Messpunkte aufgrund der Werte des durchschnittlichen Korrelationskoeffizienten weist im Vergleich am ehesten eine Normalverteilung auf, wenn auch mit einer Rechtsschiefe (0.976). Die gemessene Dichte des Messpunktnetzes wird hier mit einer Kurtosis von 3.859 ausgegeben.

Wiederum wird das SNR genutzt, um die Güte des Ergebnisses interpretieren zu können. In Abbildung 32 ist das SNR für die Messung zwischen den Jahren 2016 und 2017 dargestellt. Der Median dieses Verhältnisses über alle $959'868$ Messpunkte liegt bei 5.585 , das arithmetische Mittel bei 5.980 und die Standardabweichung zum arithmetischen Mittel bei 2.448 . In Abbildung 33 ist das Histogramm zum SNR für die Jahre 2017 und 2018 abgebildet. Der Median über alle $956'557$ Messpunkte liegt dabei bei 5.648 , das arithmetische Mittel bei 6.147 und die Standardabweichung zum arithmetischen Mittel bei 2.784 .

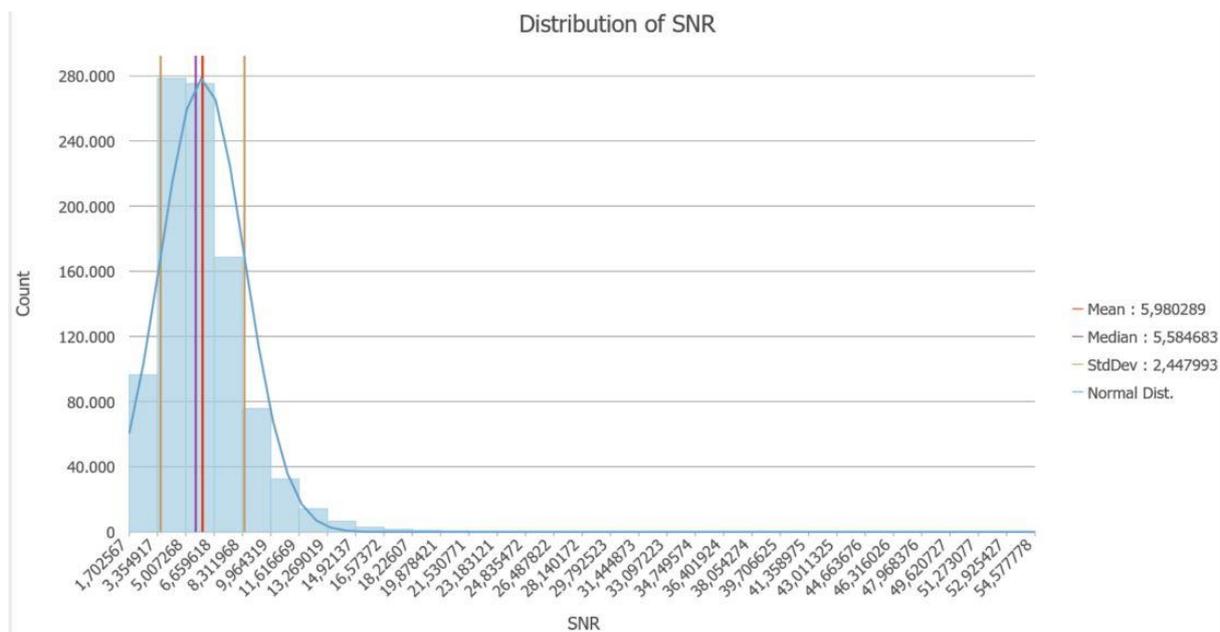


Abbildung 32: Histogramm der Messpunkte zwischen den Jahren 2016 und 2017 zum SNR über das gesamte Untersuchungsgebiet B.

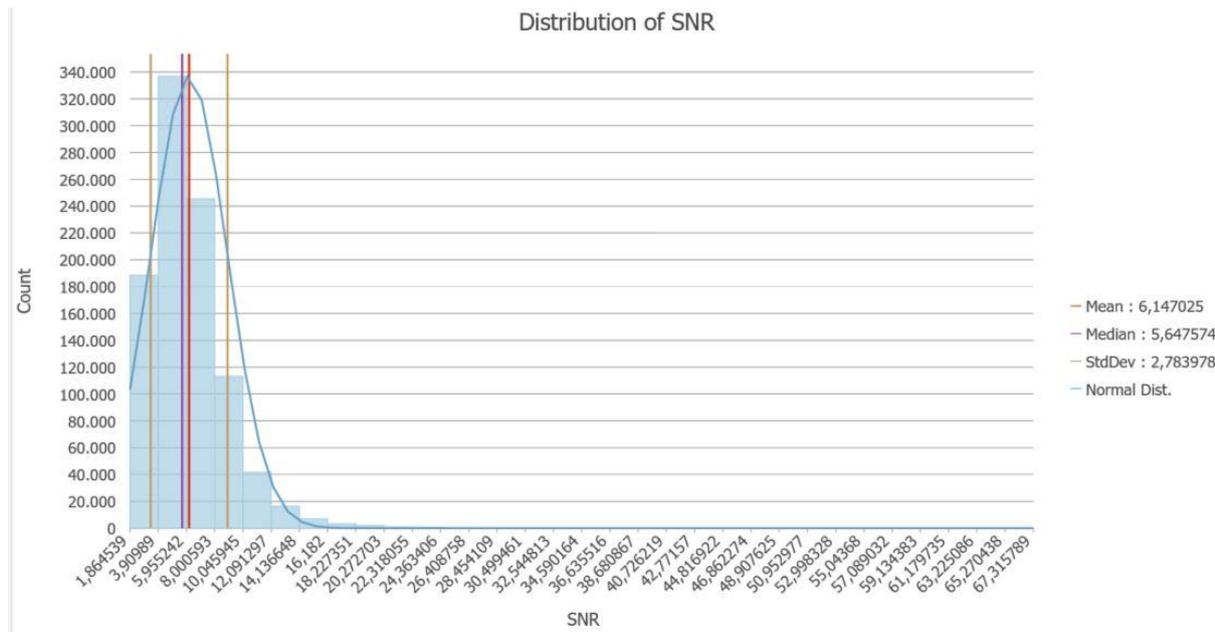


Abbildung 33: Histogramm der Messpunkte zwischen den Jahren 2017 und 2018 zum SNR über das gesamte Untersuchungsgebiet B.

3.6 Untersuchungsgebiet B: Filterung nach Korrelationskoeffizient

In Tabelle 7 werden die Ergebnisse der ausgeführten Filter, welche in Kapitel 2.6 «Nachbearbeitung des CIAS-Outputs» ausgeführt wurden, dargestellt. Bei der Variante 1 wird kein Filter angewendet und alle 959'868 Messpunkte fließen in das Ergebnis ein. Bei allen anderen Varianten ist ein Filterparameter so eingestellt, dass gemessene Vektorverschiebungen von über 545 m nicht berücksichtigt werden. Bei der Variante 2 werden zudem nur alle Messergebnisse mit einem maximalen Korrelationskoeffizienten von grösser oder gleich 0.6 berücksichtigt. Damit werden nur noch 871'858 bzw. 91 % aller Messpunkte miteinbezogen. Bei der Variante 3 werden nur Messpunkte mit einem maximalen Korrelationskoeffizienten von grösser oder gleich 0.8 berücksichtigt, wodurch die Anzahl passender Messpunkte auf 584'828 bzw. 61 % aller Messpunkte reduziert wird. Bei der Variante 4 ist neben dem Filter für die Vektorlänge, der maximale Korrelationskoeffizient bei grösser oder gleich 0.9, wodurch nur noch 287'595 bzw. 30 % aller Messpunkte enthalten sind. Bei der Variante 5 wird ebenfalls kein Filter angewendet und alle 956'557 Messpunkte fließen in das Ergebnis ein. Bei der Variante 6 werden Vektorverschiebungen von unter 545 m und Messergebnisse mit einem maximalen Korrelationskoeffizienten von grösser oder gleich 0.6 berücksichtigt. Damit werden nur noch 878'458 bzw. 92 % aller Messpunkte mit einkalkuliert. Bei der Variante 7 werden nur Messpunkte mit einem maximalen Korrelationskoeffizienten von grösser oder gleich 0.8 berücksichtigt, wodurch die Anzahl passender Messpunkte auf 544'993 bzw. 57 % aller Messpunkte reduziert wird. Bei der Variante 8, mit einem maximalen

Korrelationskoeffizienten von 0.9, entsprechen dagegen nur noch 261'301 Messpunkte dem Kriterium, was 27 % der gesamten Anzahl entspricht.

Tabelle 7: Aufstellung der unterschiedlichen Filterparameter mit unterschiedlichem Korrelationskoeffizient und Verschiebungslänge und der Anzahl passender Messpunkte für die Messung zwischen den Jahren 2016 und 2017 sowie 2017 und 2018 für das Untersuchungsgebiet B.

Variante	Filter	Anzahl Messpunkte (absolut)	Anzahl Messpunkte (prozentual)
1	Ohne Filter	959868	100%
2	length < 545 And max_corrcoeff >= 0.6	871858	90.8%
3	length < 545 And max_corrcoeff >= 0.8	584828	60.9%
4	length < 545 And max_corrcoeff >= 0.9	287595	29.7%
5	Ohne Filter	956557	100%
6	length < 545 And max_corrcoeff >= 0.6	878458	91.8%
7	length < 545 And max_corrcoeff >= 0.8	544993	57.0%
8	length < 545 And max_corrcoeff >= 0.9	261301	27.3%

Eine erste Visualisierung der Ergebnisse ist in den Karten der Abbildung 34, Abbildung 35, Abbildung 36 und Abbildung 37 für die Messung zwischen den Jahren 2016 und 2017 und in Abbildung 38, Abbildung 39, Abbildung 40 und Abbildung 41 für die Messung zwischen den Jahren 2017 und 2018 dargestellt. Sichtbar sind die ermittelten Bodenverschiebungen in Meter

bei einer verdichteten räumlichen Auflösung von 25 m, wobei sich der dargestellte Inhalt aufgrund der ausgewählten Filterparameter aus der Tabelle 7 unterscheidet. In der Variante 1 und Variante 5, bei welchen keine Filterung angewendet wurde, wird das gesamte Untersuchungsgebiet abgedeckt. Bei den Varianten 2, 3 und 4 sowie 6, 7 und 8 wird neben einem gleichbleibenden Filter für die Länge des Verschiebungsvektors, der erlaubte maximale Korrelationskoeffizient zunehmend erhöht. Gebiete innerhalb des Perimeters mit einem hohen Korrelationskoeffizienten befinden sich im nördlichen bzw. nordwestlichen Bereich, wo nur relativ wenig Verschiebungen gemessen werden und interessanterweise im Bereich des Gletschers, wo Bereiche auf dem Rücken der Gletscherzunge eine hohe Fließbewegung anzeigen.

Variante 1: kein Filter

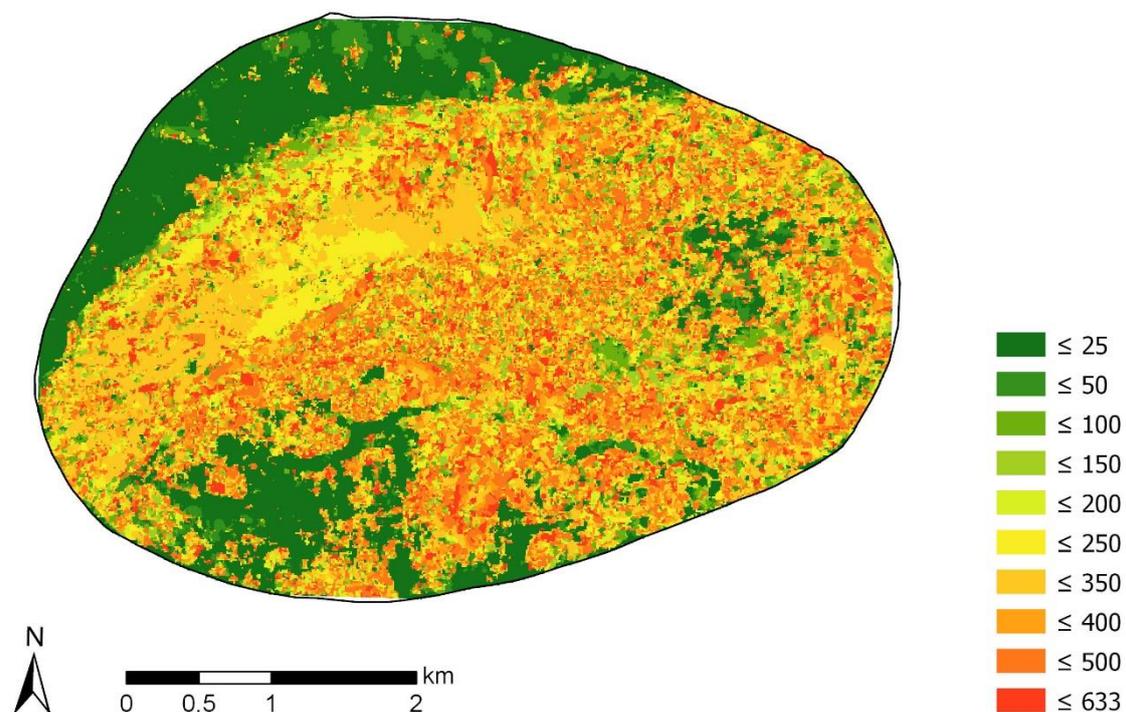


Abbildung 34: Gemessene Verschiebungen zwischen den Jahren 2016 und 2017 im Untersuchungsgebiet B ohne Filterparameter (Variante 1).

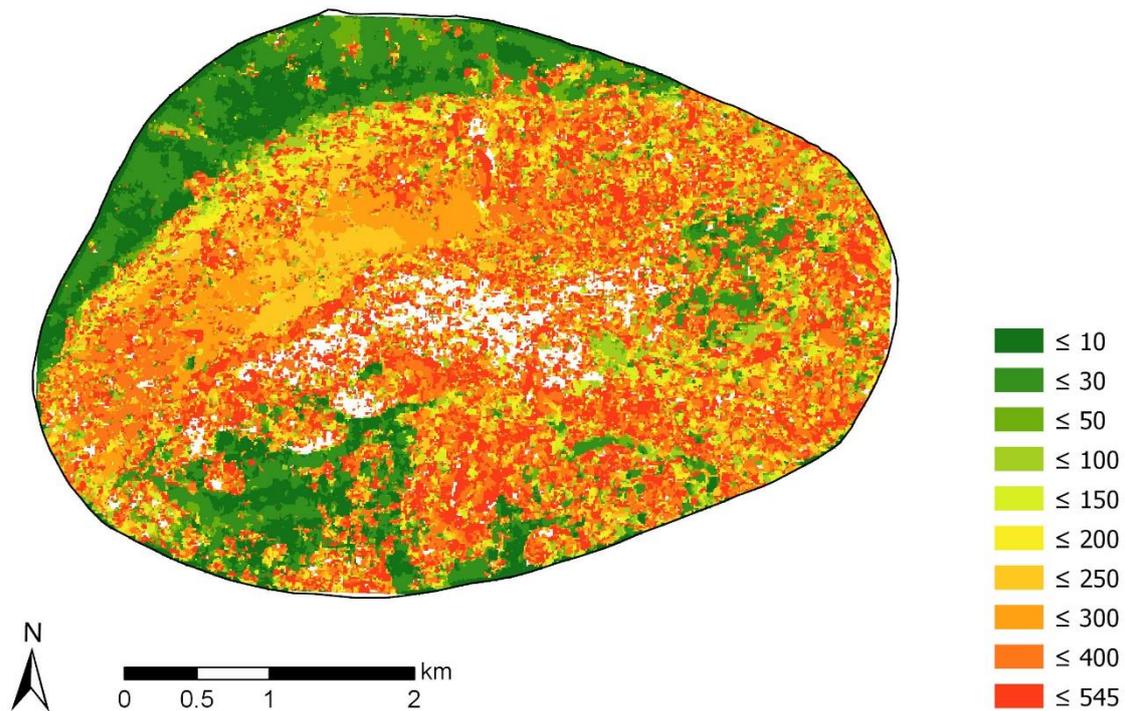
Variante 2: max. Länge 545m und max. Korrelationskoeffizient >0.6

Abbildung 35: Gemessene Verschiebungen zwischen den Jahren 2016 und 2017 im Untersuchungsgebiet B mit Filterparameter der Variante 2.

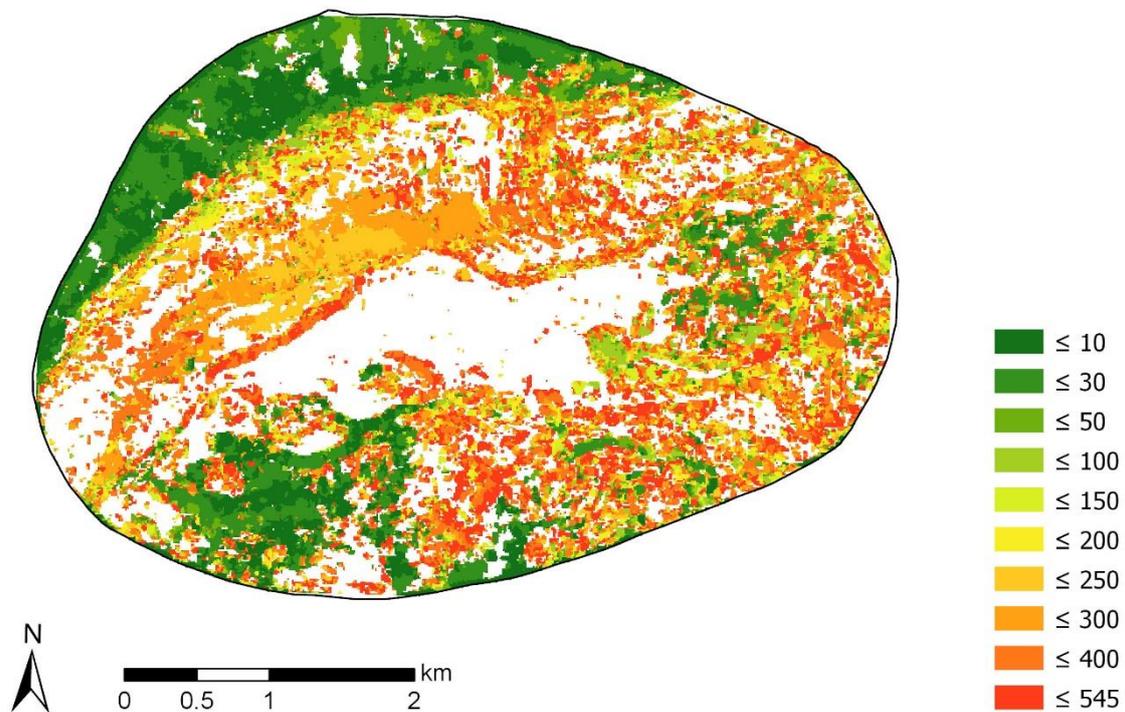
Variante 3: max. Länge 545m und max. Korrelationskoeffizient >0.8

Abbildung 36: Gemessene Verschiebungen zwischen den Jahren 2016 und 2017 im Untersuchungsgebiet B mit Filterparameter der Variante 3.

Variante 4: max. Länge 545m und max. Korrelationskoeffizient >0.9

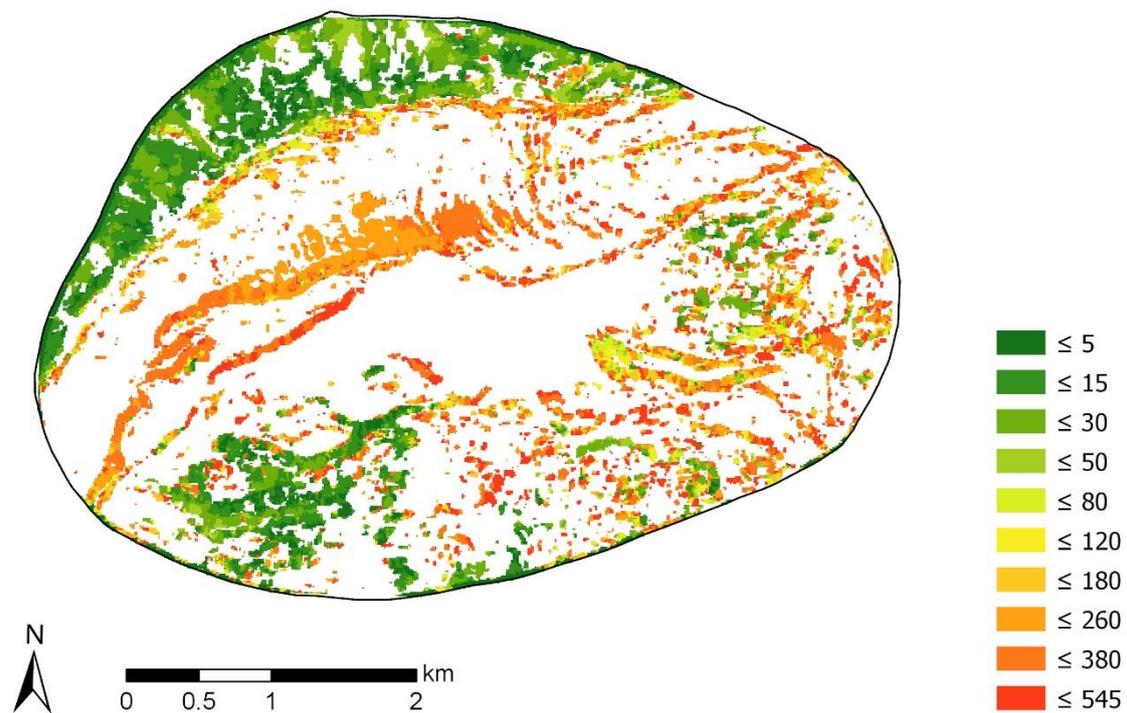


Abbildung 37: Gemessene Verschiebungen zwischen den Jahren 2016 und 2017 im Untersuchungsgebiet B mit Filterparameter der Variante 4.

Variante 5: kein Filter

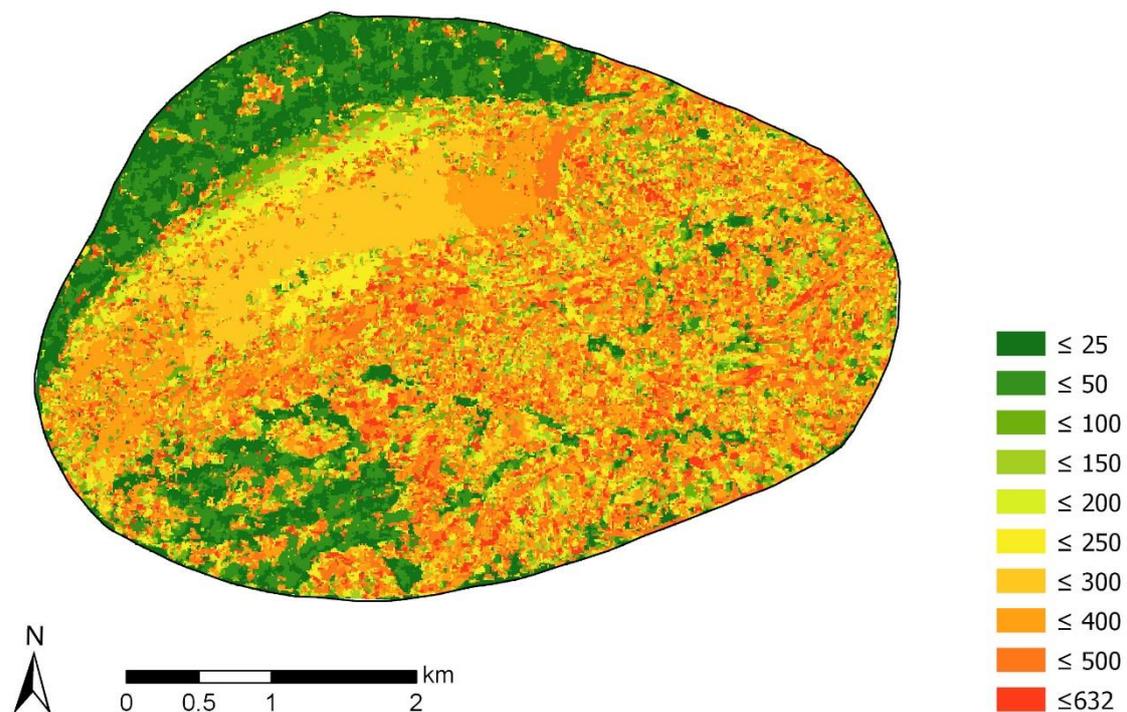


Abbildung 38: Gemessene Verschiebungen zwischen den Jahren 2017 und 2018 im Untersuchungsgebiet B ohne Filterparameter (Variante 5).

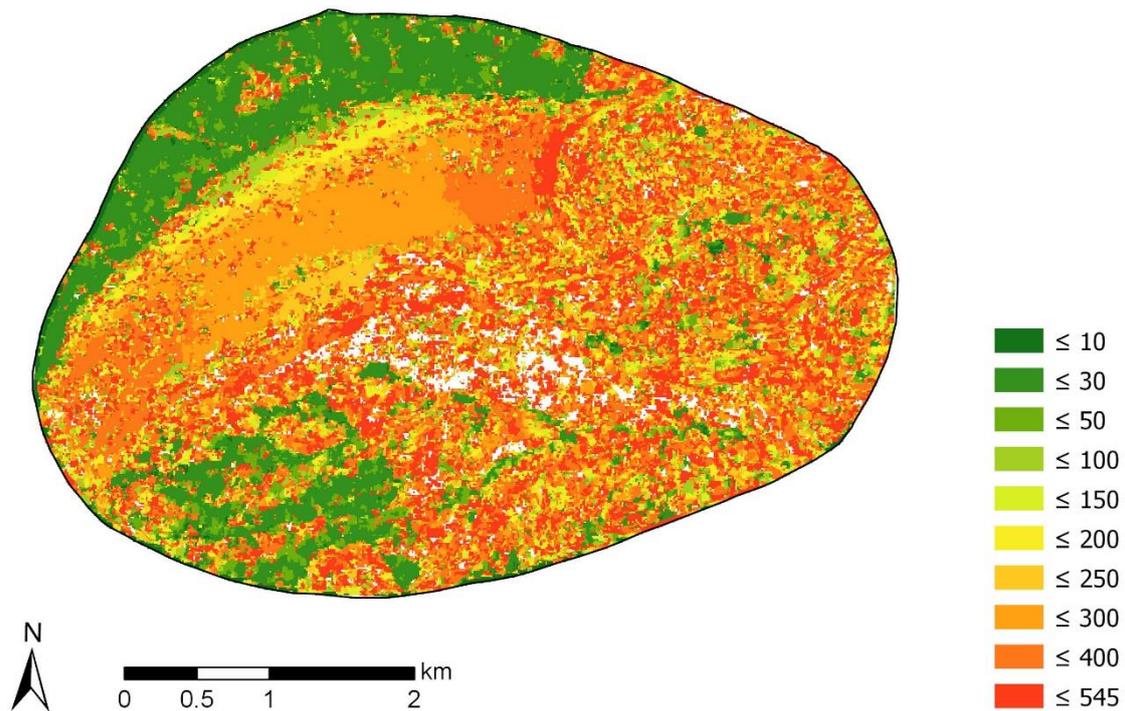
Variante 6: max. Länge 545m und max. Korrelationskoeffizient >0.6

Abbildung 39: Gemessene Verschiebungen zwischen den Jahren 2017 und 2018 im Untersuchungsgebiet B mit Filterparameter der Variante 6.

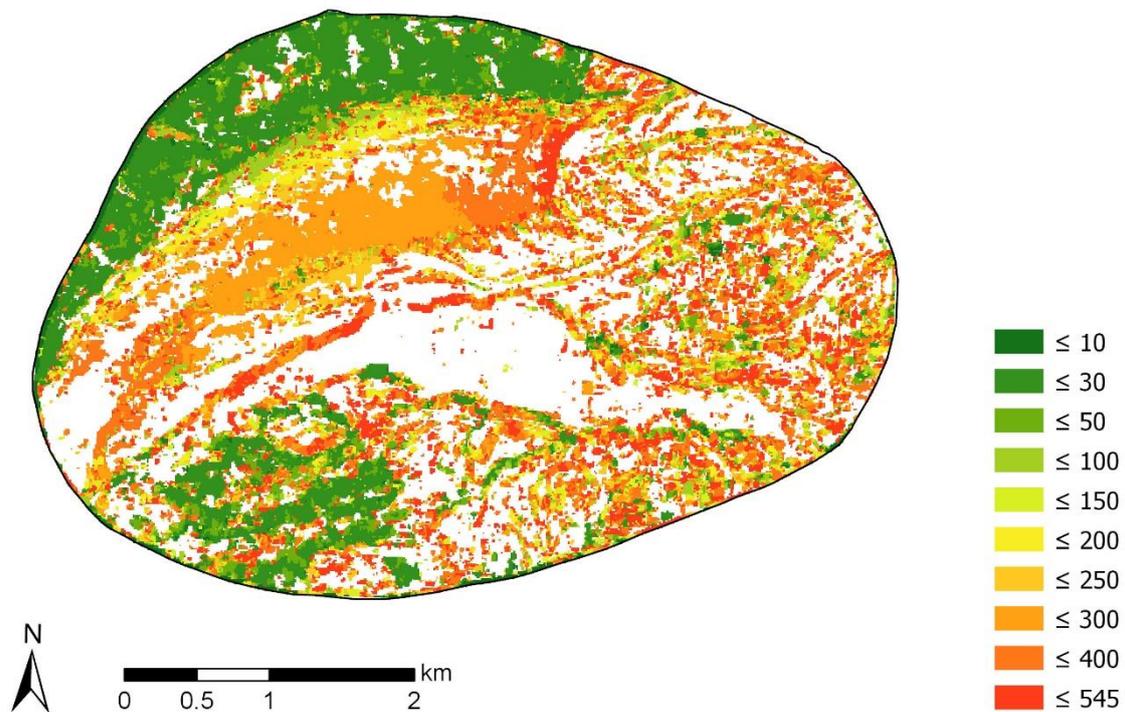
Variante 7: max. Länge 545m und max. Korrelationskoeffizient >0.8

Abbildung 40: Gemessene Verschiebungen zwischen den Jahren 2017 und 2018 im Untersuchungsgebiet B mit Filterparameter der Variante 7.

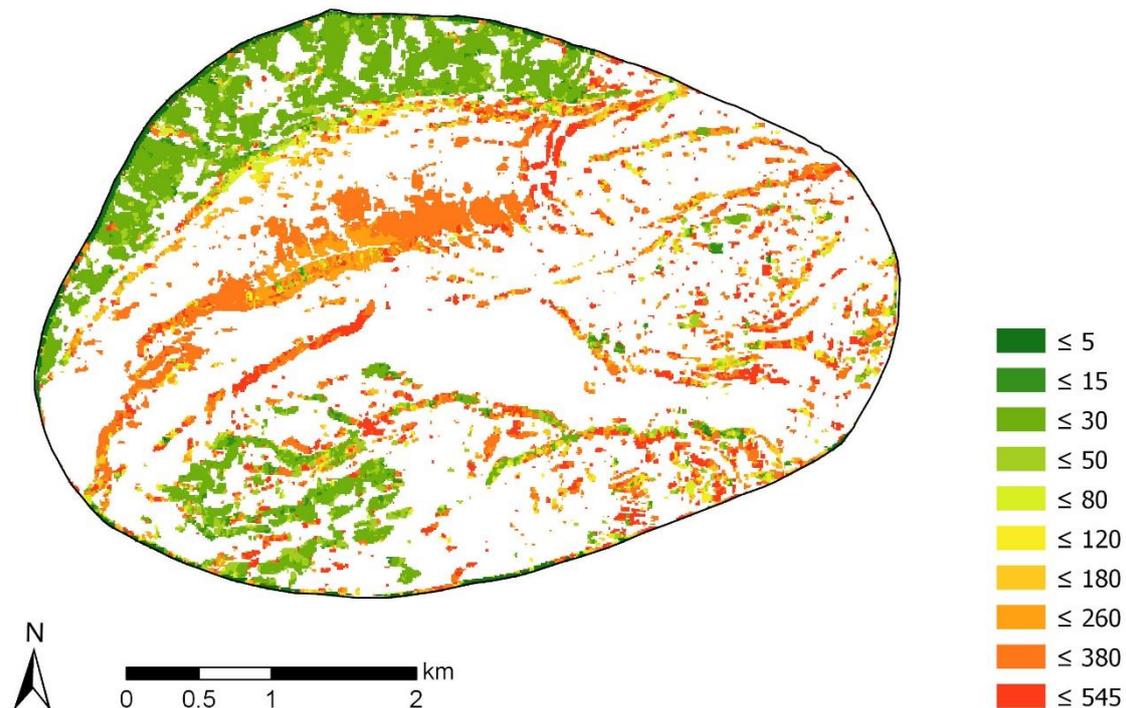
Variante 8: max. Länge 545m und max. Korrelationskoeffizient >0.9

Abbildung 41: Gemessene Verschiebungen zwischen den Jahren 2017 und 2018 im Untersuchungsgebiet B mit Filterparameter der Variante 8.

3.7 Untersuchungsgebiet B: Visualisierung mit Verschiebungsvektoren

In Abbildung 42 und Abbildung 43 sind wiederum die ermittelten Bodenverschiebungen zwischen den Jahren 2016 und 2017 sowie 2017 und 2018 dargestellt. Dabei sind die ermittelten Längen der Bodenverschiebungen wie vorhergehend als Rasterzellen mit abgestufter Farbgebung ersichtlich. Zudem sind ergänzend Vektorpfeile aufgeführt, welche abgestuft nach Grösse, ebenfalls die Längen anzeigen und daneben auch die ermittelte Verschiebungsrichtung aufzeigen. Aufgrund der hohen Anzahl an Messpunkten werden nicht alle Vektorpfeile abgebildet, da dies zu einer sehr unübersichtlichen Karte führen würde. Es wird, wie in Kapitel 2.7 auf Seite 35 beschrieben, mithilfe einer Modulo-Funktion nur jeder zweihundertste Messwert angezeigt. Die Rasterzellen werden leicht transparent dargestellt (*Layer Transparency = 30*). Um die Vektorpfeile besser erkennen zu können, sind die Visualisierungen mit Verschiebungsvektoren zusätzlich in Anhang 2 als Karten im Format A4 aufgeführt.

Ermittelte Bodenverschiebungen zwischen 2016 und 2017

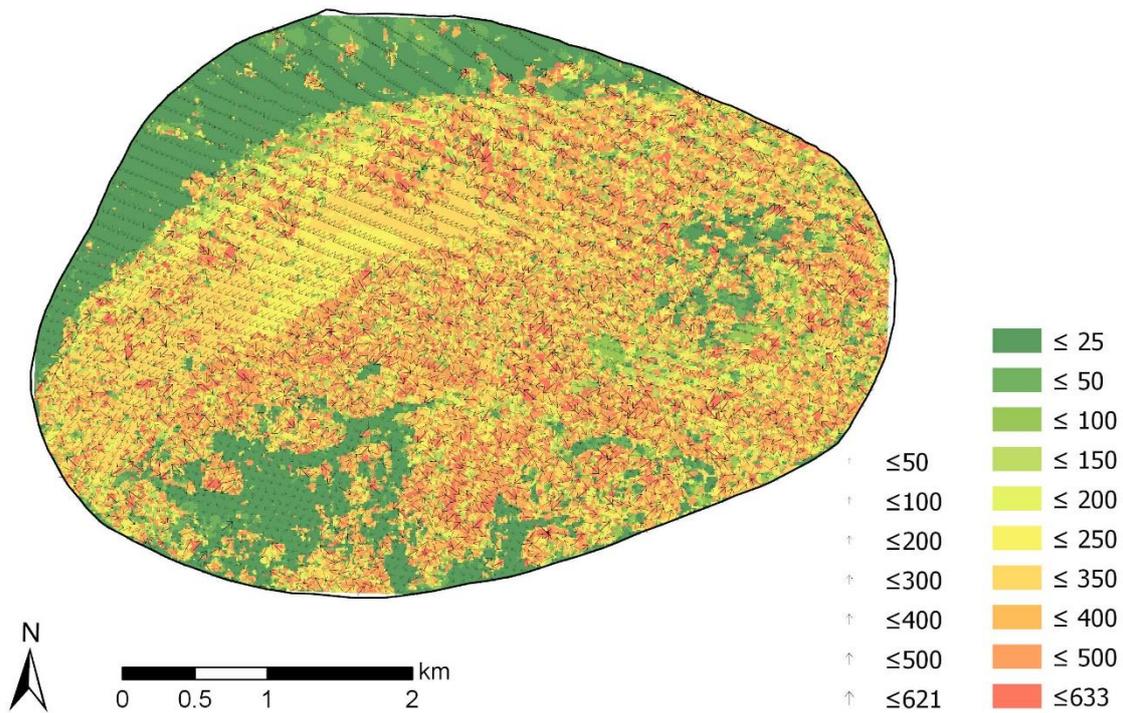


Abbildung 42: Rasterzellen für die Verschiebungslänge und Vektorpfeile für die Verschiebungslänge und -richtung, ohne Korrelationsfilter im Untersuchungsgebiet B zwischen 2016 und 2017.

Ermittelte Bodenverschiebungen zwischen 2017 und 2018

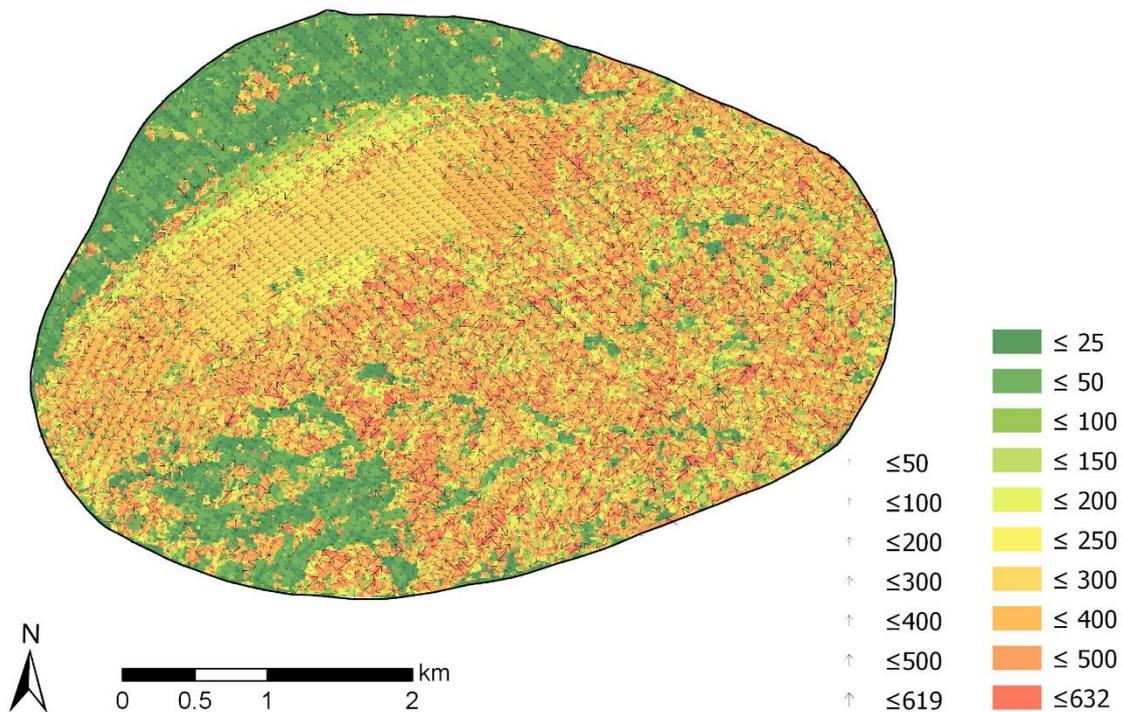


Abbildung 43: Rasterzellen für die Verschiebungslänge und Vektorpfeile für die Verschiebungslänge und -richtung, ohne Korrelationsfilter im Untersuchungsgebiet B zwischen 2017 und 2018.

Aufgrund der Modulo-Funktion wird in den beiden Abbildungen nicht die bereits erwähnte volle Anzahl an Messpunkten (Tabelle 7) als Verschiebungsvektoren abgebildet, sondern für die Ergebnisse in Abbildung 42 4'772 Messpunkte bzw. Vektorpfeile und für die Ergebnisse in Abbildung 43 4'781 Messpunkte bzw. Vektorpfeile, was jedem zweihundertsten Messwert oder 0.5 % der Gesamtanzahl entspricht.

3.8 Untersuchungsgebiet C: Statistische Masse des CIAS-Outputs

```
> summary(C_NCC_1_2_15_100)
  OBJECTID      X              Y              dx              dy
Min.   : 183003  Min.   :-1811140  Min.   :9399000  Min.   :-447.412  Min.   :-447.41
1st Qu.: 686231  1st Qu.:-1807580  1st Qu.:9401980  1st Qu.: -6.249   1st Qu.: -41.24
Median :1073204  Median :-1804430  Median :9404260  Median : 34.993   Median : -28.74
Mean   :1070604  Mean   :-1804322  Mean   :9404303  Mean   : 25.554   Mean   : -18.74
3rd Qu.:1460574  3rd Qu.:-1801110  3rd Qu.:9406590  3rd Qu.: 53.739   3rd Qu.: -1.25
Max.   :1917462  Max.   :-1796600  Max.   :9409890  Max.   : 447.412  Max.   : 447.41

  length      direction      max_corrco      avg_corrco
Min.   : 0.00  Min.   : 0.0  Min.   :0.3021  Min.   :0.0067
1st Qu.: 41.54 1st Qu.:124.5 1st Qu.:0.8335 1st Qu.:0.1183
Median : 63.25  Median :132.3  Median :0.9103  Median :0.1610
Mean   :158.00  Mean   :159.4  Mean   :0.8825  Mean   :0.1914
3rd Qu.:287.44 3rd Qu.:198.9 3rd Qu.:0.9553 3rd Qu.:0.2325
Max.   :630.97  Max.   :359.8  Max.   :0.9991  Max.   :0.7430

> summary(C_NCC_2_3_15_100)
  OBJECTID      X              Y              dx              dy
Min.   : 171632  Min.   :-1811140  Min.   :9399000  Min.   :-447.41  Min.   :-447.41
1st Qu.: 668619  1st Qu.:-1807580  1st Qu.:9401980  1st Qu.: -49.99  1st Qu.: 21.25
Median :1053570  Median :-1804430  Median :9404260  Median : -37.49  Median : 43.74
Mean   :1049882  Mean   :-1804322  Mean   :9404303  Mean   : -19.50  Mean   : 32.82
3rd Qu.:1436738  3rd Qu.:-1801110  3rd Qu.:9406590  3rd Qu.:  1.25  3rd Qu.: 51.24
Max.   :1889039  Max.   :-1796600  Max.   :9409890  Max.   : 447.41  Max.   : 447.41

  length      direction      max_corrco      avg_corrco
Min.   : 0.00  Min.   : 0.0  Min.   :0.3590  Min.   :0.0103
1st Qu.: 48.53 1st Qu.:162.8 1st Qu.:0.8641 1st Qu.:0.1198
Median : 68.05  Median :314.3  Median :0.9257  Median :0.1610
Mean   :135.10  Mean   :247.6  Mean   :0.8997  Mean   :0.1891
3rd Qu.:180.40 3rd Qu.:319.7 3rd Qu.:0.9609 3rd Qu.:0.2280
Max.   :630.97  Max.   :359.8  Max.   :0.9998  Max.   :0.7670
```

Abbildung 44: Deskriptive statistische Masse nach dem Image-Matching und der NCC zwischen 26.07.2017 und 12.08.2017 (oben) sowie zwischen 12.08.2017 und 30.08.2017 (unten) über das gesamte Untersuchungsgebiet C.

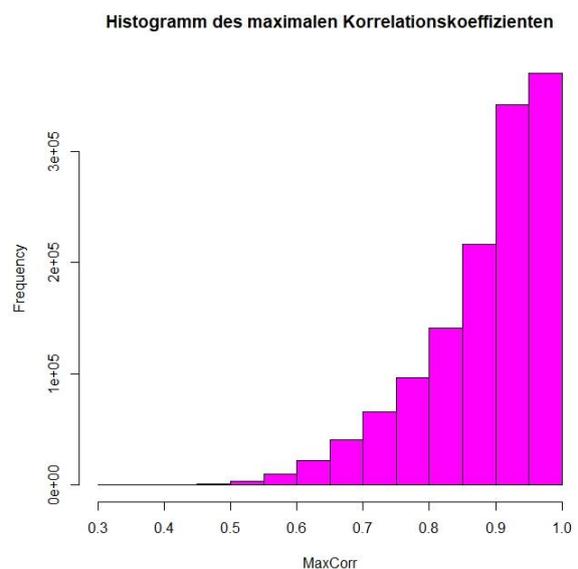
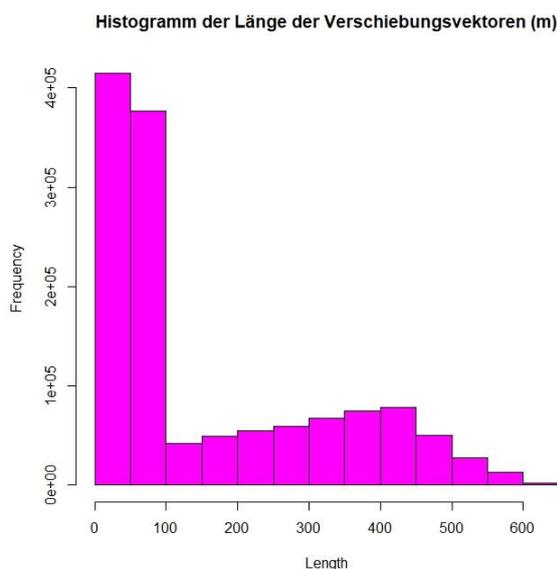
Die Abbildung 44 zeigt auch wieder die Gesamtübersicht über die deskriptiven statistischen Masse aller im CIAS-Output vorhandenen Ausgabespalten. In der Auswertung sind alle 1'309'096 Messpunkte für die Berechnung zwischen den zwei Bildern vom 26.07.2017 und 12.08.2017 sowie die gleiche Anzahl an Messpunkten für die Berechnung zwischen den zwei Bildern vom 12.08.2017 und 30.08.2017 des Untersuchungsgebietes C (Svöludalsjökull) enthalten.

Bei der Länge des Verschiebungsvektors zwischen den Bildern vom 26.07.2017 und 12.08.2017 wird ein Minimalwert von 0.00 m, eine 25 %-Quartilsgrenze bei 41.54 m, ein

Median von 63.25 m, ein arithmetisches Mittel von 158.00 m, eine 75 %-Quartilsgrenze bei 287.44 m und ein Maximalwert von 630.97 m gemessen. Die Berechnung über das gesamte Untersuchungsgebiet zwischen den Bildern vom 12.08.2017 und 30.08.2017 ergibt ein Minimalwert von 0.00 m, eine 25 %-Quartilsgrenze bei 48.53 m, ein Median von 68.05 m, ein arithmetisches Mittel von 135.10 m, eine 75 %-Quartilsgrenze bei 180.40 m und ein Maximalwert von 630.97 m.

Die Berechnung des maximalen Korrelationskoeffizienten zwischen den Bildern vom 26.07.2017 und 12.08.2017 ergibt ein Minimalwert von 0.302, eine 25 %-Quartilsgrenze bei 0.834, ein Median von 0.910, ein arithmetisches Mittel von 0.883, eine 75 %-Quartilsgrenze bei 0.955 und ein Maximalwert von 0.999. Die Berechnung zwischen den Bildern vom 12.08.2017 und 30.08.2017 ergibt ein Minimalwert von 0.359, eine 25 %-Quartilsgrenze bei 0.864, ein Median von 0.926, ein arithmetisches Mittel von 0.900, eine 75 %-Quartilsgrenze bei 0.961 und ein Maximalwert von 1.000.

Beim durchschnittlichen Korrelationskoeffizienten werden zwischen den Bildern vom 26.07.2017 und 12.08.2017 ein Minimalwert von 0.007, eine 25 %-Quartilsgrenze bei 0.118, ein Median von 0.161, ein arithmetisches Mittel von 0.191, eine 75 %-Quartilsgrenze bei 0.233 und ein Maximalwert von 0.743 gemessen. Die Berechnung zwischen den Bildern vom 12.08.2017 und 30.08.2017 ergibt ein Minimalwert von 0.010, eine 25 %-Quartilsgrenze bei 0.120, ein Median von 0.161, ein arithmetisches Mittel von 0.189, eine 75 %-Quartilsgrenze bei 0.228 und ein Maximalwert von 0.767.



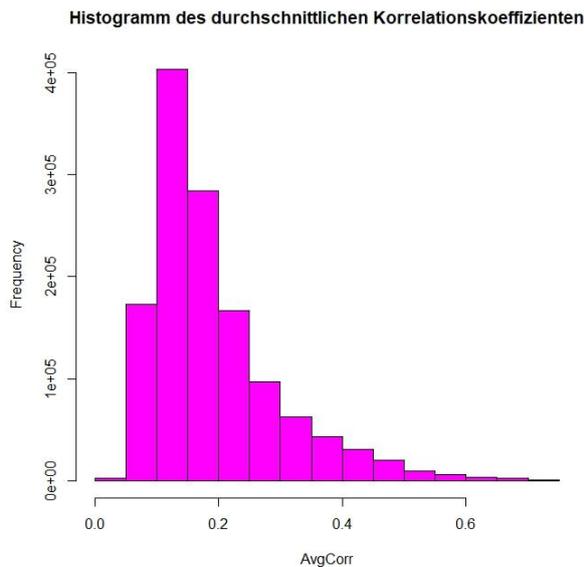


Abbildung 45: Histogramme für die Länge der Verschiebungsvektoren (m) und für den maximalen sowie durchschnittlichen Korrelationskoeffizienten der Messpunkte zwischen 26.07.2017 und 12.08.2017 über das gesamte Untersuchungsgebiet C.

Die Histogramme in Abbildung 45 zeigen die Verteilung in Bezug auf die Länge der gemessenen Verschiebungsvektoren und die Güte der Messungen in Bezug auf den maximalen sowie durchschnittlichen Korrelationskoeffizienten für alle 1'309'096 Messpunkte für die Auswertung des Image-Matching zwischen 26.07.2017-12.08.2017 über das gesamte Untersuchungsgebiet C. Bei der Verteilung der Länge der Verschiebungsvektoren fällt die ausgeprägte Rechtsschiefe auf (Schiefe = 0.986). Die Kurtosis hat einen Wert von 2.543. Das Histogramm des maximalen Korrelationskoeffizienten weist umgekehrt mit einem Wert von -1.215 eine ausgeprägte Linksschiefe auf. Die Kurtosis hat einen Wert von 4.184, was im Vergleich auf relativ ausgeprägte Dichte hindeutet. Die Verteilung der Messpunkte aufgrund der Werte des durchschnittlichen Korrelationskoeffizienten weist mit einem Wert von 1.569 eine ausgeprägte Rechtsschiefe auf. Die gemessene Dichte des Messpunktnetzes wird hier mit einer Kurtosis von 5.771 ausgegeben.

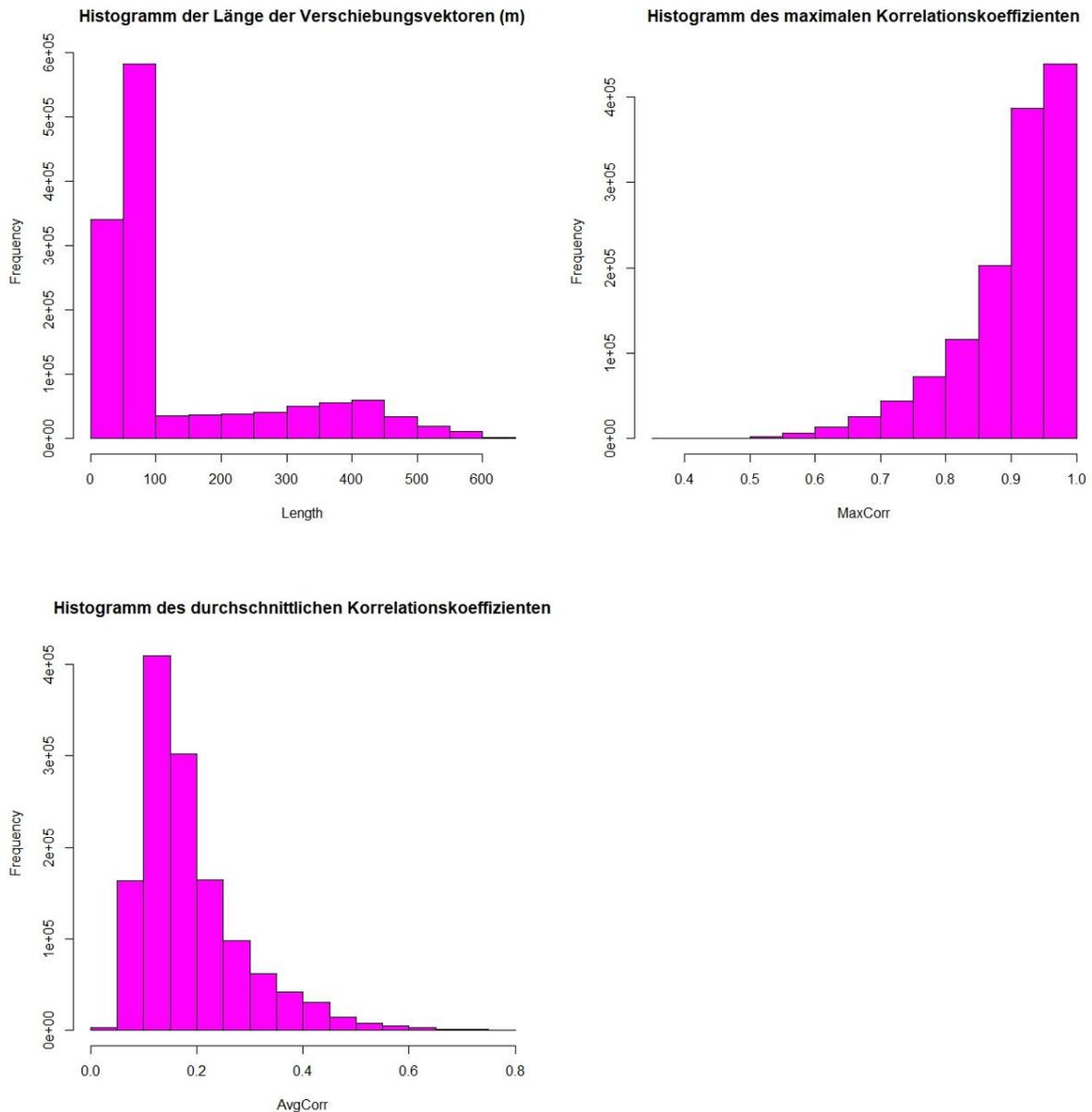


Abbildung 46: Histogramme für die Länge der Verschiebungsvektoren (m) und für den maximalen sowie durchschnittlichen Korrelationskoeffizienten der Messpunkte zwischen 12.08.2017 und 30.08.2017 über das gesamte Untersuchungsgebiet C.

Die Histogramme in Abbildung 46 zeigen die Verteilung in Bezug auf die Länge der gemessenen Verschiebungsvektoren und die Güte der Messungen in Bezug auf den maximalen sowie durchschnittlichen Korrelationskoeffizienten für alle 1'309'096 Messpunkte der Auswertung zwischen den Bildern vom 12.08.2017 und 30.08.2017. Bei der Verteilung der Länge der Verschiebungsvektoren ist die Rechtsschiefe augenscheinlich und hat einen Wert von 1.460. Die Kurtosis des Histogramms hat einen Wert von 3.797. Die Dichte der Messpunkte ist somit vergleichbar bzw. leicht höher als bei der Auswertung zwischen den Bildern vom 26.07.2017 und 12.08.2017. Das Histogramm des maximalen

Korrelationskoeffizienten weist umgekehrt eine Linksschiefe mit einem Wert von -1.533 auf. Die Kurtosis hat einen Wert von 5.490, was im Vergleich auf eine etwas höhere Dichte der Werte als bei den ermittelten Verschiebungslängen hindeutet. Die Verteilung der Messpunkte aufgrund der Werte des durchschnittlichen Korrelationskoeffizienten weist eine Rechtsschiefe auf, mit einem Wert von 1.614. Die gemessene Dichte des Messpunktnetzes wird hier mit einer Kurtosis von 5.490 ausgegeben.

Auch beim Untersuchungsgebiet C wird das SNR als Möglichkeit genutzt, um die Güte des Ergebnisses zu interpretieren. In Abbildung 47 ist das SNR für die Messung zwischen den Bildern vom 26.07.2017 und 12.08.2018 dargestellt. Der Median dieses Verhältnisses über alle 1'309'096 Messpunkte liegt bei 5.438, das arithmetische Mittel bei 5.705 und die Standardabweichung zum arithmetischen Mittel bei 2.454. In Abbildung 48 ist das Histogramm zum SNR für die Messung zwischen dem 12.08.2017 und dem 30.08.2017 abgebildet. Der Median über alle 1'309'096 Messpunkte liegt dabei bei 5.548, das arithmetische Mittel bei 5.849 und die Standardabweichung zum arithmetischen Mittel bei 2.521.

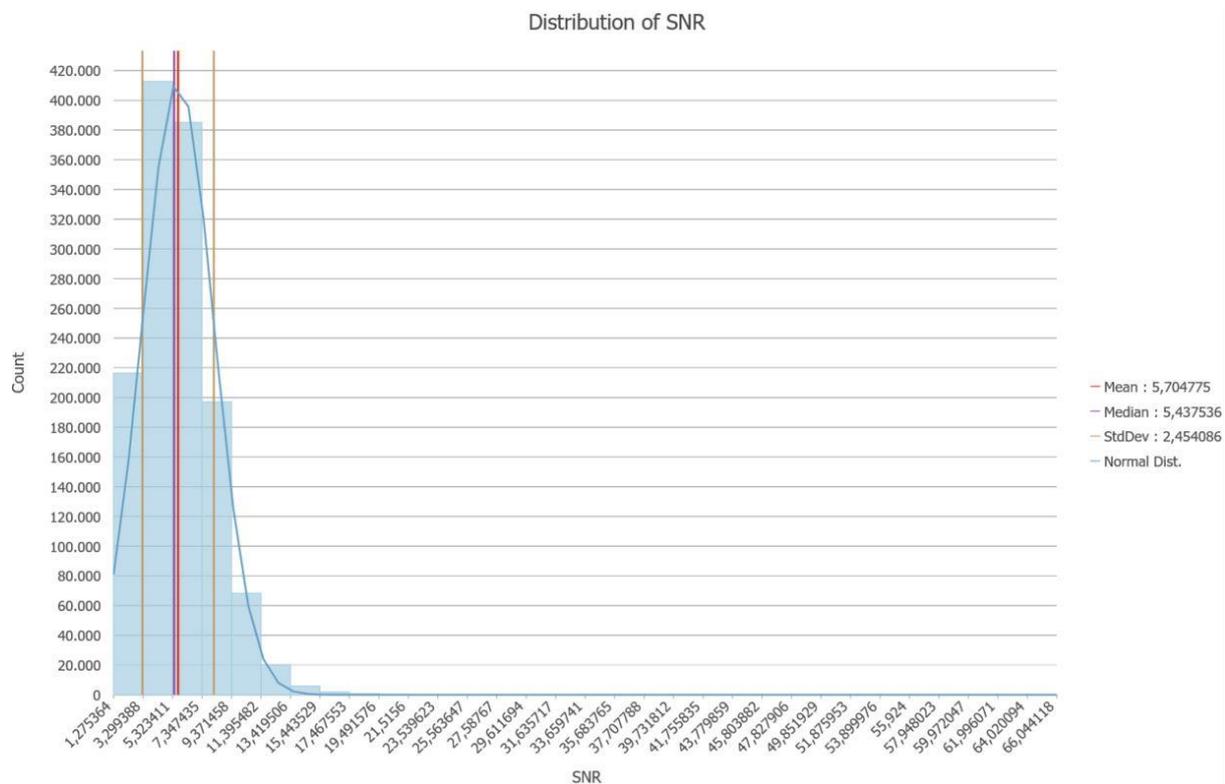


Abbildung 47: Histogramm der Messpunkte zwischen 26.07.2017 und 12.08.2017 zum SNR über das gesamte Untersuchungsgebiet C.

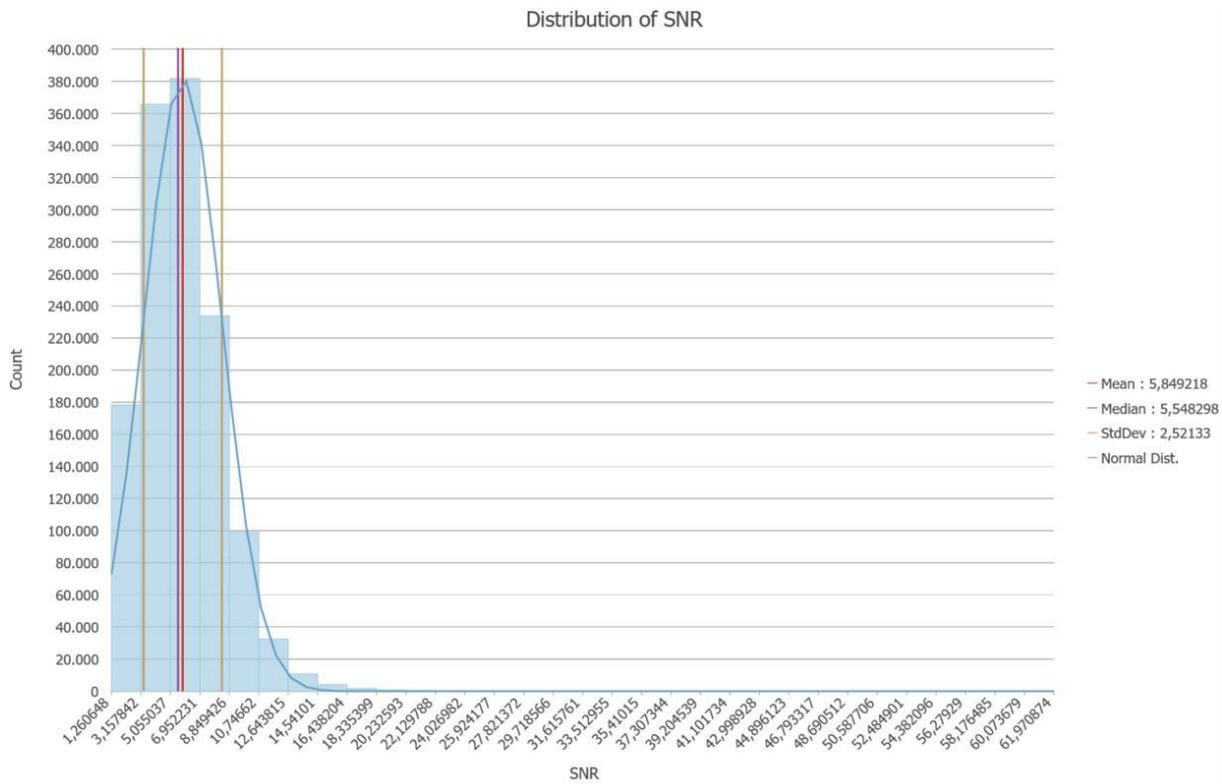


Abbildung 48: Histogramm der Messpunkte zwischen 12.08.2017 und 30.08.2017 zum SNR über das gesamte Untersuchungsgebiet C.

3.9 Untersuchungsgebiet C: Filterung nach Korrelationskoeffizient

In Tabelle 8 werden die Ergebnisse der ausgeführten Filter, welche in Kapitel 2.6 «Nachbearbeitung des CIAS-Outputs» ausgeführt wurden, dargestellt. Bei der Variante 1 wird kein Filter angewendet und alle 1'309'096 Messpunkte fliessen in das Ergebnis ein. Bei allen anderen Varianten ist ein Filterparameter, dass gemessene Vektorverschiebungen von über 513 m nicht berücksichtigt werden. Bei der Variante 2 werden zudem nur alle Messergebnisse mit einem maximalen Korrelationskoeffizienten von grösser oder gleich 0.6 berücksichtigt. Damit werden nur noch 1'261'747 (96 %) aller Messpunkte miteinbezogen. Bei der Variante 3 werden nur Messpunkte mit einem maximalen Korrelationskoeffizienten von grösser oder gleich 0.8 berücksichtigt, wodurch die Anzahl passender Messpunkte auf 1'049'291 (80 %) aller Messpunkte reduziert wird. Bei der Variante 4 ist neben dem Filter für die Vektorlänge der maximale Korrelationskoeffizient bei grösser oder gleich 0.9, wodurch nur noch 705'130 (54 %) der Messpunkte berücksichtigt werden. Bei der Variante 5 wird ebenfalls kein Filter angewendet und wiederum alle 1'309'096 Messpunkte fliessen in das Ergebnis ein. Bei der Variante 6 werden wieder Vektorverschiebungen von unter 513 m und Messergebnisse mit einem maximalen Korrelationskoeffizienten von grösser oder gleich 0.6 berücksichtigt. Damit werden nur noch 1'273'277 (97 %) aller Messpunkte mit einkalkuliert. Bei der Variante 7 werden nur Messpunkte mit einem maximalen Korrelationskoeffizienten von grösser oder

gleich 0.8 berücksichtigt, wodurch die Anzahl passender Messpunkte auf 1'126'605 (86 %) reduziert wird. Bei der Variante 8, mit einem maximalen Korrelationskoeffizienten von 0.9 entsprechen nur noch 821'080 (63 %) aller Messpunkte dem Kriterium.

Tabelle 8: Aufstellung der unterschiedlichen Filterparameter mit unterschiedlichem Korrelationskoeffizient und Verschiebungslänge und der Anzahl passender Messpunkte für die Messung zwischen 26.07.2017 und 12.08.2017 sowie zwischen 12.08.2017 und 30.08.2017 für das Untersuchungsgebiet C.

Variante	Filter	Anzahl Messpunkte (absolut)	Anzahl Messpunkte (prozentual)
1	Ohne Filter	1309096	100%
2	length < 513 And max_corrcoeff >= 0.6	1261747	96.4%
3	length < 513 And max_corrcoeff >= 0.8	1049291	80.1%
4	length < 513 And max_corrcoeff >= 0.9	705130	53.9%
5	Ohne Filter	1309096	100%
6	length < 513 And max_corrcoeff >= 0.6	1273277	97.3%
7	length < 513 And max_corrcoeff >= 0.8	1126605	86.1%
8	length < 545 And max_corrcoeff >= 0.9	821080	62.7%

Eine erste Visualisierung der Ergebnisse ist in den Karten der Abbildung 49, Abbildung 50, Abbildung 51 und Abbildung 52 für die Messung zwischen dem 26.07.2017 und dem 12.08.2017 sowie in Abbildung 53, Abbildung 54, Abbildung 55 und Abbildung 56 für die

Messung zwischen dem 12.08.2017 und dem 30.08.2017 dargestellt. Sichtbar sind die ermittelten Bodenverschiebungen in Meter bei einer verdichteten räumlichen Auflösung von 25 m, wobei sich der dargestellte Inhalt aufgrund der ausgewählten Filterparameter aus der Tabelle 7 unterscheidet. In Variante 1 und Variante 5, bei welchen keine Filterung angewendet wurde, wird das gesamte Untersuchungsgebiet abgedeckt. Bei der Variante 2, 3 und 4 sowie 6, 7 und 8 wird neben einem gleichbleibenden Filter für die Länge des Verschiebungsvektors, der erlaubte maximale Korrelationskoeffizient zunehmend erhöht. Im Gegensatz zu den anderen beiden Untersuchungsgebieten, bei welchen die Unterschiede zwischen Jahren gemessen wurden, sind in diesem Untersuchungsgebiet mit einer Messung im Verlauf eines Sommers weniger klare Verschiebungstendenzen zu erkennen. Lediglich im Randbereich des Gletschers wird in der Messung zwischen 26.07.2017 und 12.08.2017 eine höhere Verschiebungsbewegung angezeigt, die nicht zufällig erscheint, sondern wahrscheinlich aus der Dynamik des Gletschers resultiert.

Variante 1: kein Filter

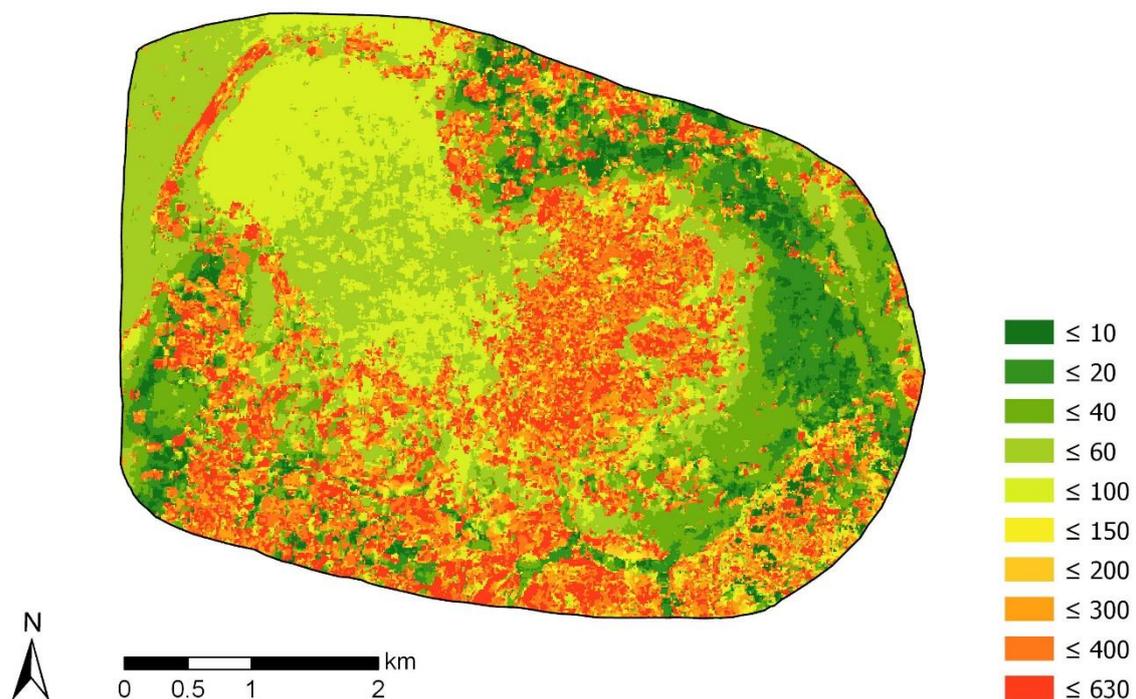


Abbildung 49: Gemessene Verschiebungen zwischen 26.07.2017 und 12.08.2017 im Untersuchungsgebiet C ohne Filterparameter (Variante 1).

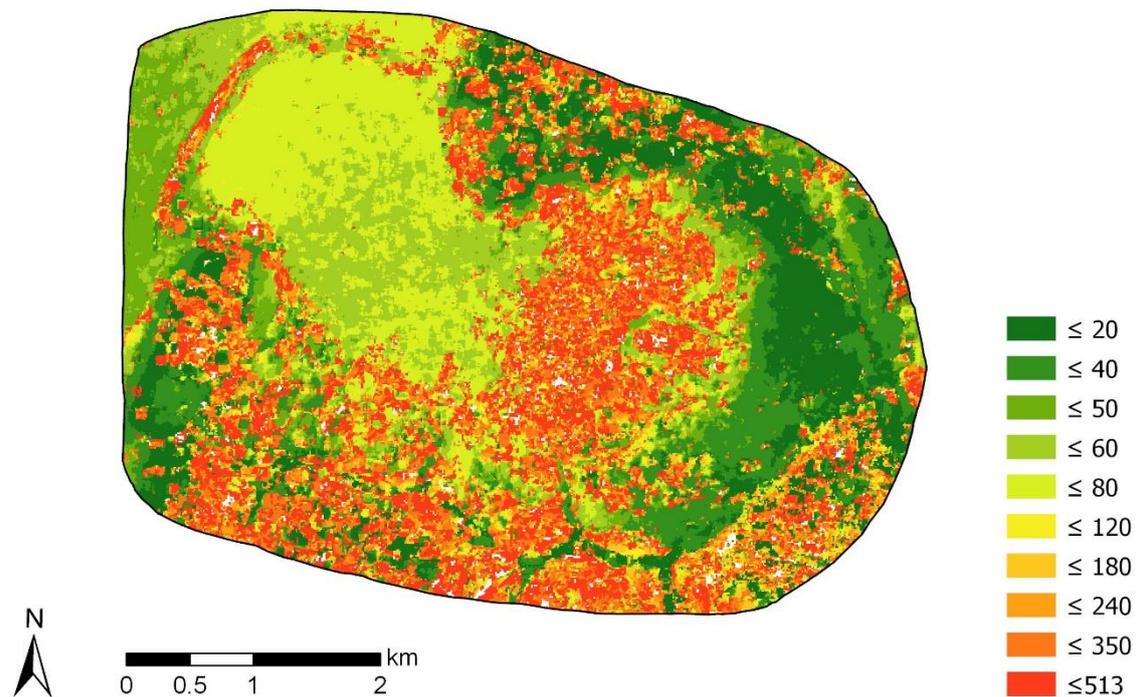
Variante 2: max. Länge 513m und max. Korrelationskoeffizient >0.6

Abbildung 50: Gemessene Verschiebungen zwischen 26.07.2017 und 12.08.2017 im Untersuchungsgebiet C mit Filterparameter der Variante 2.

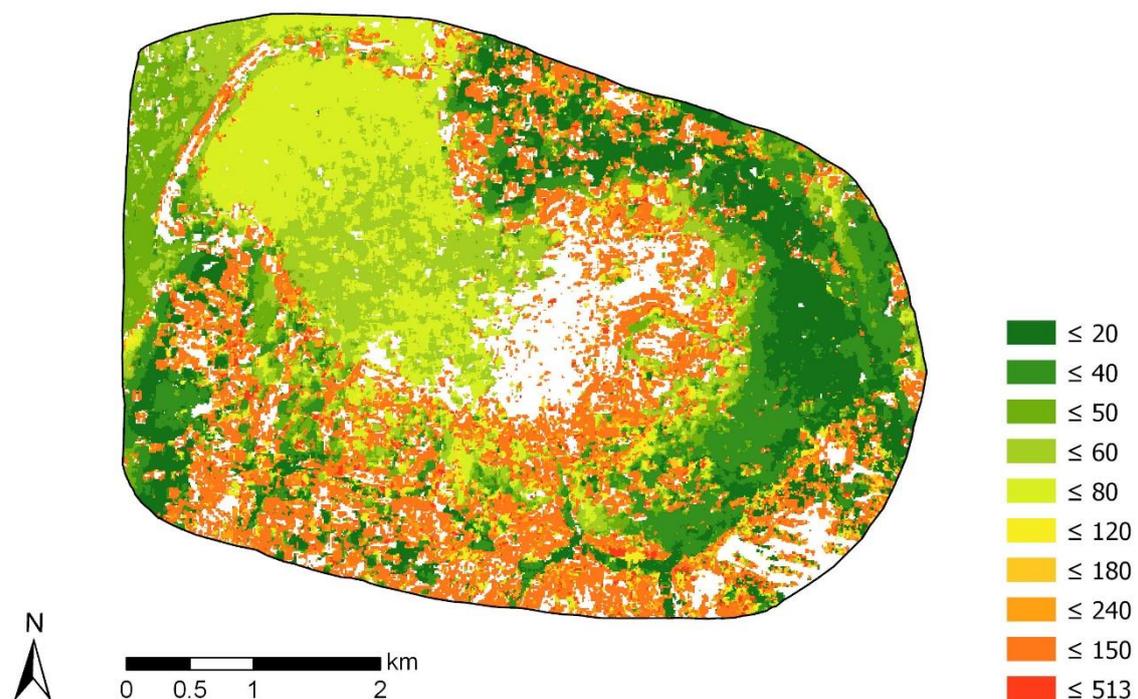
Variante 3: max. Länge 513m und max. Korrelationskoeffizient >0.8

Abbildung 51: Gemessene Verschiebungen zwischen 26.07.2017 und 12.08.2017 im Untersuchungsgebiet C mit Filterparameter der Variante 3.

Variante 4: max. Länge 513m und max. Korrelationskoeffizient >0.9

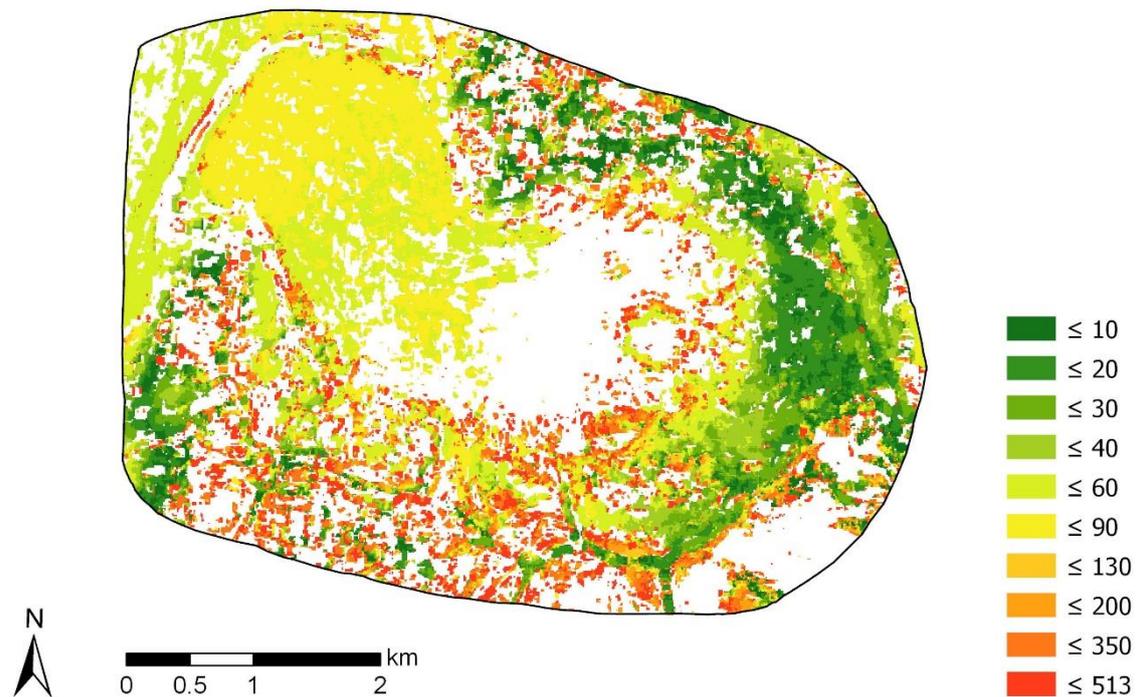


Abbildung 52: Gemessene Verschiebungen zwischen 26.07.2017 und 12.08.2017 im Untersuchungsgebiet C mit Filterparameter der Variante 4.

Variante 5: kein Filter

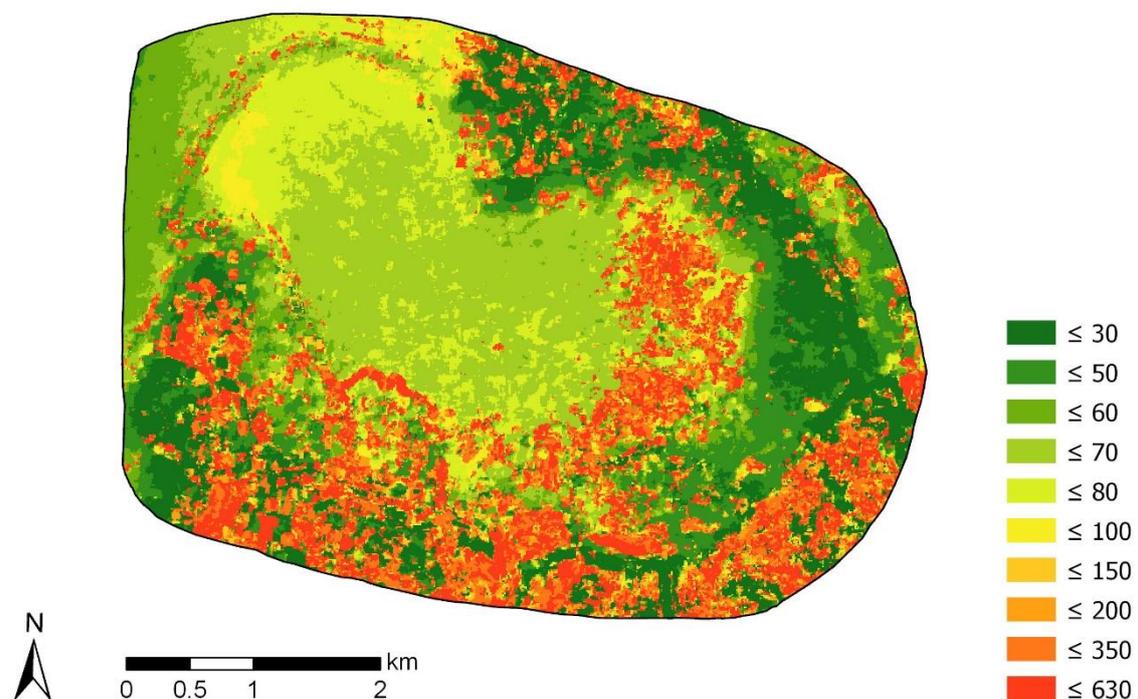


Abbildung 53: Gemessene Verschiebungen zwischen 12.08.2017 und 30.08.2017 im Untersuchungsgebiet C ohne Filterparameter (Variante 5).

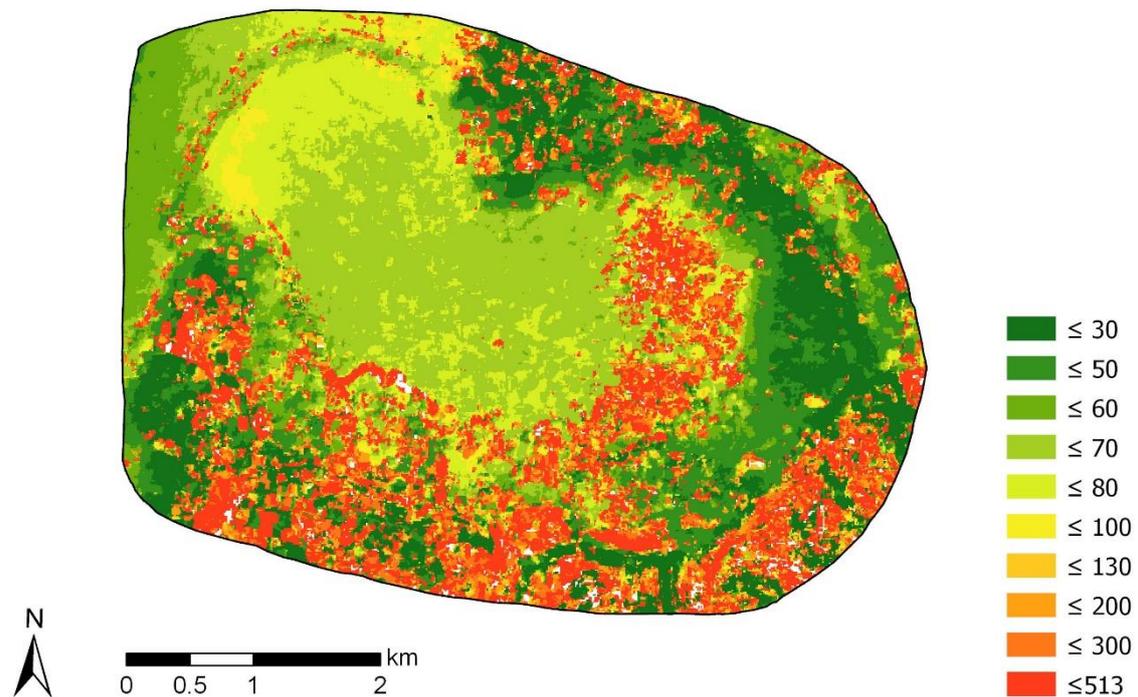
Variante 6: max. Länge 513 und max. Korrelationskoeffizient >0.6

Abbildung 54: Gemessene Verschiebungen zwischen 12.08.2017 und 30.08.2017 im Untersuchungsgebiet C mit Filterparameter der Variante 6.

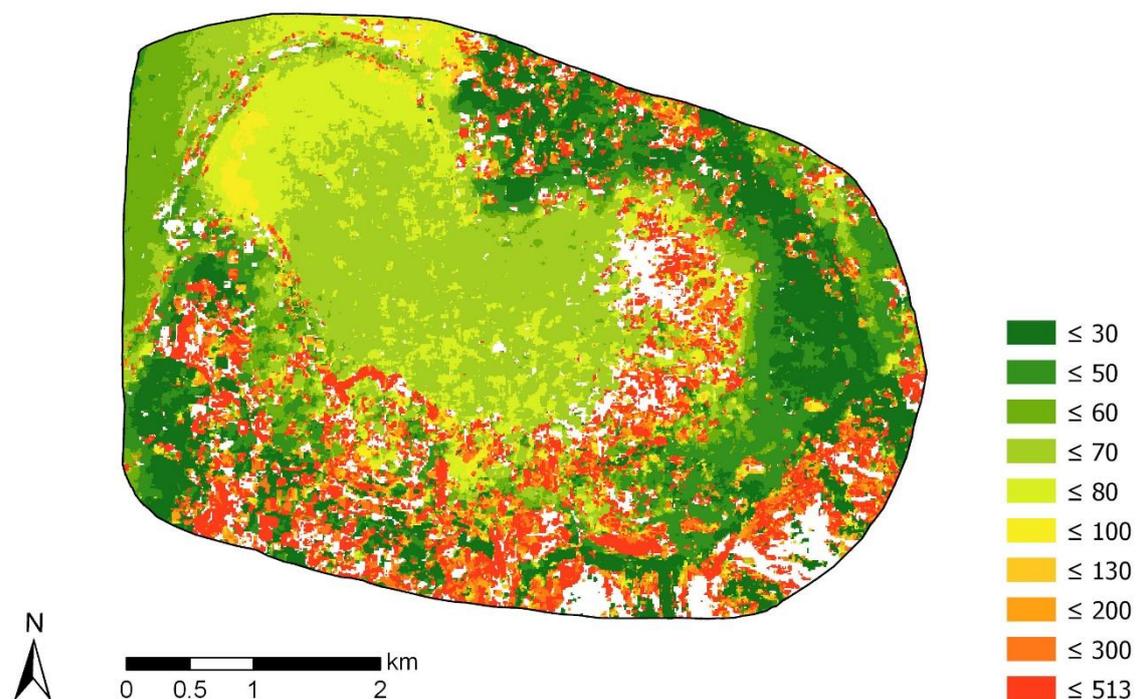
Variante 7: max. Länge 513 und max. Korrelationskoeffizient >0.8

Abbildung 55: Gemessene Verschiebungen zwischen 12.08.2017 und 30.08.2017 im Untersuchungsgebiet B mit Filterparameter der Variante 7.

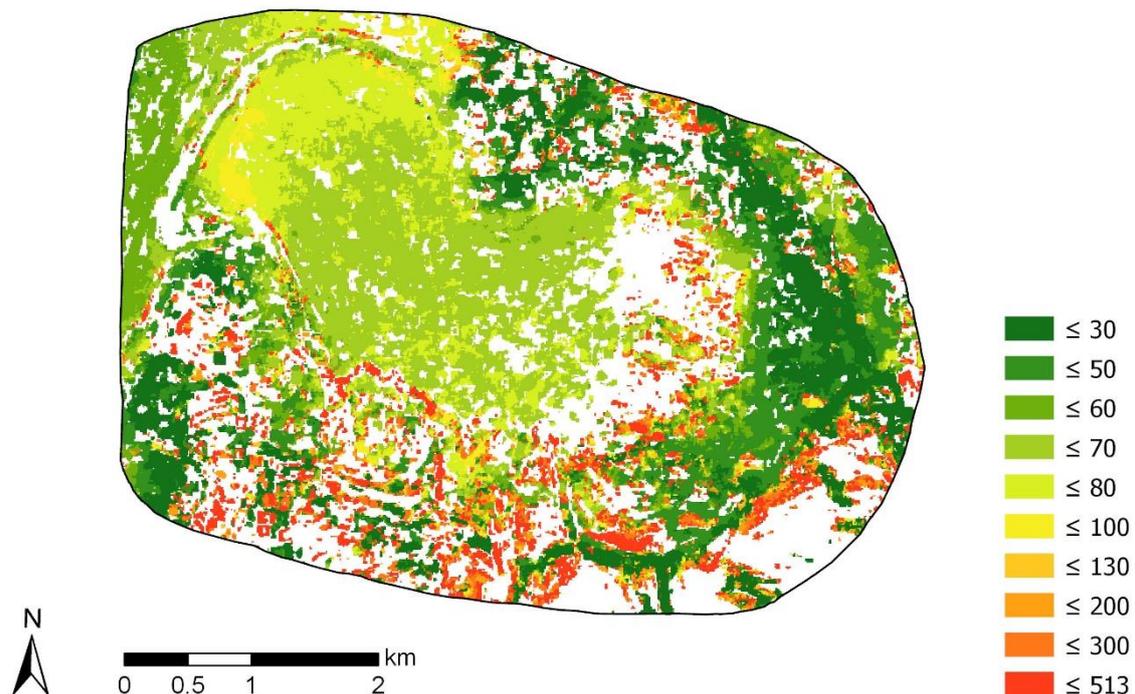
Variante 8: max. Länge 513 und max. Korrelationskoeffizient >0.9

Abbildung 56: Gemessene Verschiebungen zwischen 12.08.2017 und 30.08.2017 im Untersuchungsgebiet C mit Filterparameter der Variante 8.

3.10 Untersuchungsgebiet C: Visualisierung mit Verschiebungsvektoren

In Abbildung 57 und Abbildung 58 sind wiederum die ermittelten Bodenverschiebungen dargestellt. Dieses Mal wurde das Image-Matching innerhalb eines Jahres zwischen 26.07.2017-12.08.2017 und 12.08.2017-30.08.2017 durchgeführt. Dabei sind die ermittelten Längen der Bodenverschiebungen wie bei vorhergehenden Untersuchungen als Rasterzellen mit abgestufter Farbgebung ersichtlich. Zudem wurden ergänzend Vektorpfeile hinzugefügt, welche abgestuft nach Grösse, ebenfalls die Längen anzeigen und daneben auch die ermittelte Verschiebungsrichtung aufzeigen. Aufgrund der hohen Anzahl an Messpunkten werden nicht alle Vektorpfeile abgebildet, da dies zu einer sehr unübersichtlichen Karte führen würde. Es werden, wie in Kapitel 2.7 auf Seite 35 beschrieben, durch eine Modulo-Funktion nur jeder zweihundertste Messwert angezeigt. Die Rasterzellen werden leicht transparent geschaltet (*Layer Transparency = 30*). Um die Vektorpfeile besser erkennen zu können, sind die Visualisierungen mit Verschiebungsvektoren zusätzlich in Anhang 2 als Karten im Format A4 aufgeführt.

Ermittelte Bodenverschiebungen zwischen 26.07.2017-12.08.2017

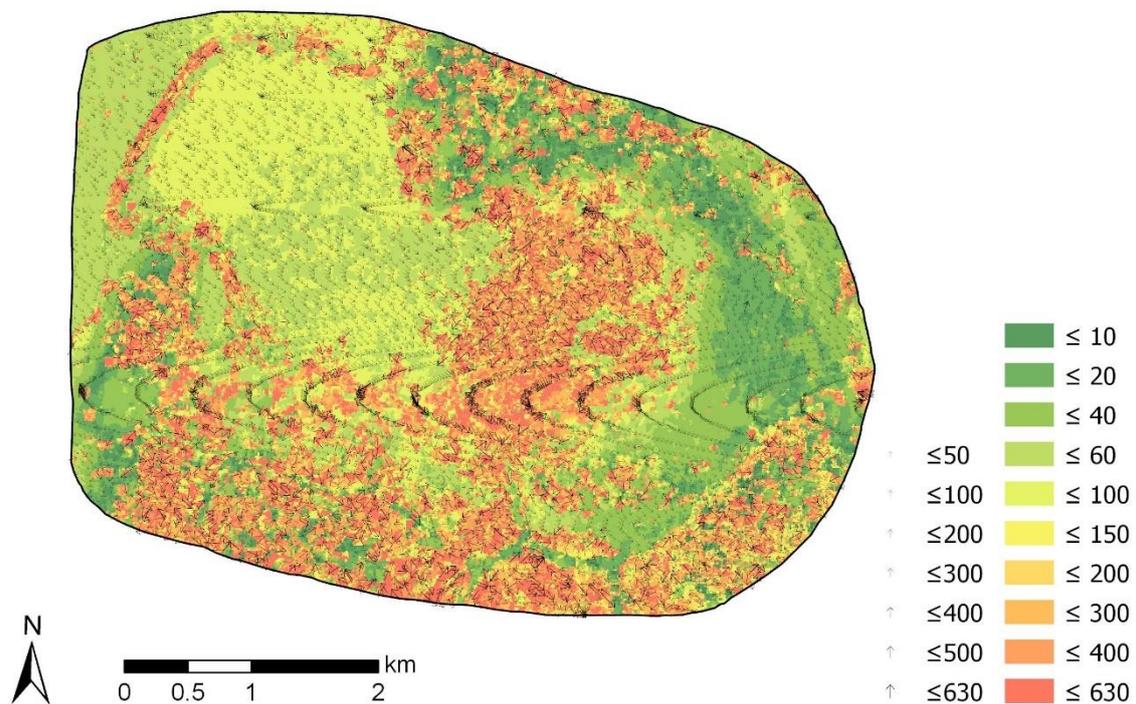


Abbildung 57: Rasterzellen für die Verschiebungslänge und Vektorpfeile für die Verschiebungslänge und -richtung, ohne Korrelationsfilter im Untersuchungsgebiet C zwischen 26.07.2017 und 12.08.2017.

Ermittelte Bodenverschiebungen zwischen 12.08.2017-30.08.2017

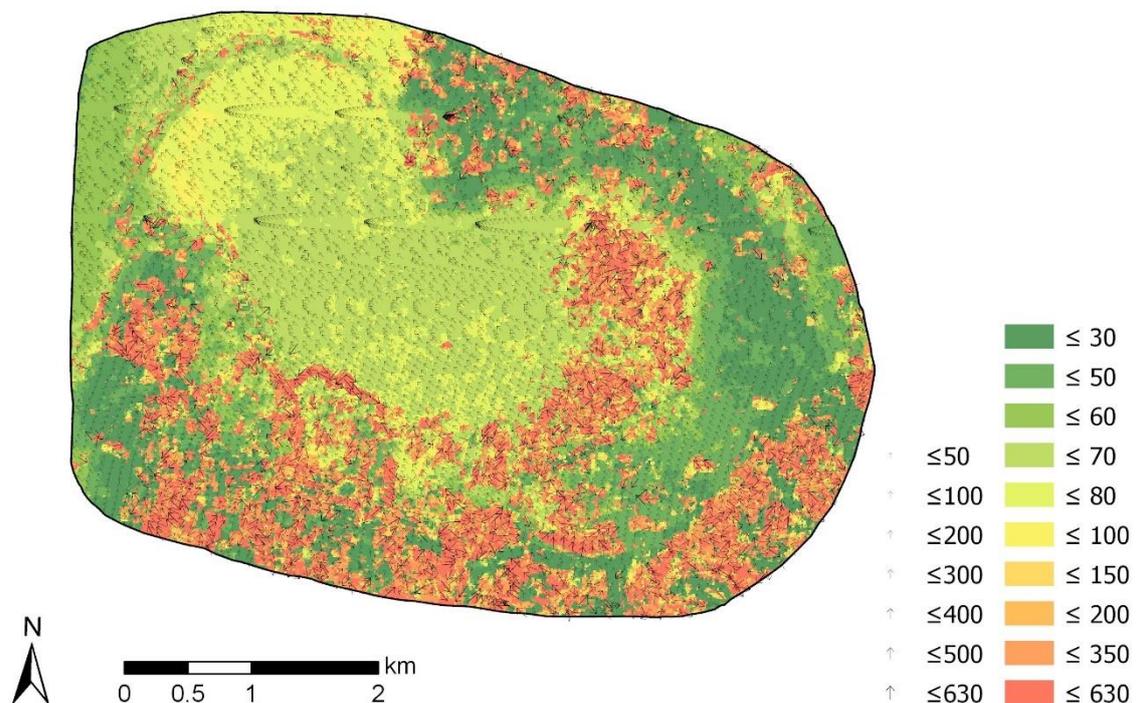


Abbildung 58: Rasterzellen für die Verschiebungslänge und Vektorpfeile für die Verschiebungslänge und -richtung, ohne Korrelationsfilter im Untersuchungsgebiet C zwischen 12.08.2017 und 30.08.2017.

Aufgrund der Modulo-Funktion wird in den beiden Abbildungen nicht die bereits erwähnte volle Anzahl an Messpunkten (Tabelle 8) als Verschiebungsvektoren abgebildet, sondern für die Ergebnisse in Abbildung 57 1'049'291 Messpunkte bzw. Vektorpfeile und für die Ergebnisse in Abbildung 58 1'126'605 Messpunkte bzw. Vektorpfeile, was jedem zweihundertsten Messwert oder 0.5 % der Gesamtanzahl entspricht.

4 Diskussion

4.1 Beurteilung des Anwendungsdesigns

In dieser Arbeit wird ein allgemeingültiger Workflow konzipiert, der sich für die Prozessierung von optischen Fernerkundungsdaten zur Messung von gravitativen Massenbewegungen, wie Boden- oder Gletscherverschiebungen, eignet und ortsunabhängig angewendet werden kann. Der Workflow besteht aus der Datenvorbereitung (Preprocessing), der Berechnung durch Korrelationsanalyse – also dem eigentlichen Image-Matching, der Datennachbearbeitung (Postprocessing) und der Visualisierung von den resultierenden Ergebnissen. Sowohl die Daten, wie auch das Tool zur Berechnung der Korrelationsanalyse, greifen dabei auf frei verfügbare Ressourcen zurück. Für die Korrelationsanalyse wird auf die ursprünglich durch Kääb und Vollmer (2000) entwickelte Stand-Alone-Anwendung CIAS gesetzt. Als Grundlagedaten werden die frei verfügbaren Satellitenbilder von Sentinel-2 verwendet.

4.1.1 Auswahl der Untersuchungsgebiete

Die Versuche zur Ermittlung von gravitativen Massenbewegungen werden in drei Testgebieten rund um das grosse isländische Vulkanmassiv Öräfajökull durchgeführt. Island wird bewusst als Testgebiet gewählt, da es für die vielfältigen geologischen Aktivitäten bekannt ist, welche in weltweit einzigartiger Weise gleichzeitig auftreten und sich gegenseitig beeinflussen können (Hannesdóttir et al., 2010). In den drei Untersuchungsgebieten Kvíárjökull (A), Svínafellsjökull (B) und Svöludalsjökull (C) sind instabile Hänge vorhanden, wo Bewegungen stattgefunden haben oder erwartet werden.

4.1.2 Selektion der Satellitenbilder

Das Suchen und Sammeln von brauchbaren Sentinel-2-Zeitreihen im Zeitraum von 2016 bis 2018 hat sich als relativ schwieriges Unterfangen erwiesen, da im Bereich des Untersuchungsgebietes relativ oft eine dichte Wolkenbedeckung vorherrscht. Zudem sind grosse Bereiche während einer längeren Zeitperiode oder gar ganzjährig von Schnee und Eis bedeckt, wodurch in den bedeckten Bereichen, wie auch in angrenzenden, nicht mit Schnee bedeckten Bereichen, Fehlermessungen resultieren können (Kumari et al., 2014). Als ein Kriterium für die Eignung von Satellitenbildern wurde im Rahmen dieser Arbeit eine maximal erlaubte Wolkenbedeckung von 5 % festgelegt. Bei einer höheren Wolkenbedeckung ist die Anzahl an Referenzpunkten für die Bildkorrelation zu gering. Bei einem noch geringeren Wert stünden nicht genügend Satellitenbilder zur Verfügung. Ein weiteres wichtiges Kriterium für die Wahl geeigneter Satellitenbildpaare ist, dass die Bilder aus dem gleichen Satellitenorbit aufgenommen werden, da ansonsten Fehler bei der Korrelationsberechnung auftreten

können. Dies ist beim Untersuchungsgebiet A für das Jahr 2018 nicht möglich, da im Orbit R138 kein Bild vorhanden ist, welches den oben definierten Qualitätskriterien entspricht. Deshalb wird für dieses Jahr im Untersuchungsgebiet A ein Bild aus dem Satellitenorbit R095 verwendet. Gleiches gilt beim Untersuchungsgebiet C, bei dem Bild 1 aus der Orbit-Laufbahn R138 stammt, Bild 2 und 3 aus R095. Bei der Suche nach geeigneten Zeitreihen hat sich die Internetplattform «EO Browser» des «SINERGISE SENTINEL Hub» bewährt, da hier das Untersuchungsgebiet als KML-Datei direkt eingelesen und der erlaubte Wolkenbedeckungsgrad eingestellt werden kann. Die Anwendung zeigt dann nur jene Bilder aus dem Archiv an, die den voreingestellten Kriterien entsprechen. Bei den Testgebieten A und B werden jeweils zwei Bildpaare mit einer zeitlichen Versetzung von einem Jahr zwischen 2016 und 2018 untersucht. Beim Testgebiet C wurde ein anderes Vorgehen angewendet. Hier beträgt die zeitliche Verschiebung zwischen den beiden Bildpaaren nur etwa zwei Wochen zwischen Ende Juli und Ende August im Jahr 2017.

Ein Sentinel-2-Datensatz besteht aus 13 Spektralbändern, welche sich für unterschiedliche Anwendungszwecke eignen. Für diese Arbeit wird das Band 2 (B02) im blauen Spektralbereich verwendet, (1) weil es eines jener Bänder mit einer maximalen räumlichen Auflösung von 10 m ist, (2) weil sich im blauen Spektralbereich Boden, Vegetation und anthropologische Merkmale im Gelände gut unterscheiden lassen und (3) weil schattige Bereiche wegen der kurzen Wellenlängen besser erfassbar sind. Es wären aber durchaus auch andere Bänder mit der maximalen räumlichen Auflösung denkbar. Stumpf et al. (2018) verwenden in ihrer Arbeit beispielsweise ein Band aus dem roten Spektralbereich (B04) für das Image-Matching.

Die Sentinel-2-Satellitendaten werden als unterschiedliche Produkte angeboten. Hervorzuheben sind die Produkte L1C und L2A, wobei L2A eine Nachbearbeitung des L1C Datensatzes ist und etwa 48-60 Stunden nach den L2A-Daten publiziert wird. Im Unterschied zu L1C-Satellitendaten, wo lediglich radiometrische und geometrische Korrekturen vor der Publikation durchgeführt werden, durchlaufen die L2A-Daten zusätzlich ein Postprocessing, welches eine atmosphärische Korrektur durchführt und somit gewisse Rauscheffekte eliminiert. Im Rahmen dieser Arbeit sind ausschliesslich L1C-Satellitendaten verwendet worden, um einheitliche und somit vergleichbare Bildqualitäten zu gewährleisten, da L2A-Daten erst seit Frühling 2017 publiziert werden.

4.1.3 Image-Matching durch normierte Kreuzkorrelation

Image-Matching bezeichnet eine Gruppe von Techniken, um nach Mustern in zueinander in räumlich und zeitlich in Verbindung stehenden Bildaufnahmen zu suchen. Dabei wird in dieser Arbeit auf die Methodik der NCC zurückgegriffen. Die NCC wird anhand orthorektifizierten Satellitenbildern aus zwei unterschiedlichen Aufnahmezeitpunkten realisiert. Das Prinzip der

Kreuzkorrelation basiert auf der Übereinstimmung eines Suchfensters zwischen einer Master-Aufnahme (meist der früheste Beobachtungszeitpunkt einer Untersuchungszeitreihe) und einer Referenz-Aufnahme von einem späteren Zeitpunkt (Kröhnert et al., 2014). Aus dem maximalen Korrelationskoeffizienten lässt sich die entsprechende Verschiebung bestimmen und im Verhältnis zum Untersuchungszeitraum die durchschnittliche Bewegungsrate des betrachteten Objekts ableiten (Kröhnert et al., 2014). Gemäss Kröhnert et al. (2014) wird die optimale Grösse des Suchfensters aus dem doppelten zu erwarteten Offset bestimmt, jedoch in Anbetracht bildtypischer (z.B. Pixelgrösse und Bildrauschen) sowie physikalischer Eigenschaften (z.B. saisonale Einflüsse auf die Feature-Bewegung) an die Beobachtungssituation angepasst und zeigt zuverlässige Ergebnisse mit einer mindestens um den Faktor vier grösser gewählten Suchweite. Die NCC ist eine erprobte Methodik, welche in vielen vergleichbaren Arbeiten zur Ermittlung von gravitativen Massenbewegungen zur Anwendung kommt, wie die nachfolgende Literaturzusammenstellung zeigt: Die meisten Forschungsarbeiten wenden die Berechnungsmethodik zur Ermittlung von Gletscherfliessgeschwindigkeiten oder Veränderungen der Gletscherform und -grösse in lokalen und seltener in globalen Massstäben an. (Bhutiyan und Mahto, 2018; Kumari et al., 2014; Heid und Käab, 2012; Scherler et al., 2008). Zudem findet die Methodik auch in der nachträglichen Untersuchung von Felsstürzen und Murgängen Anwendung (Bhutiyan und Mahto, 2018; Stumpf et al., 2014; Stoffel und Huggel, 2012; Käab und Vollmer, 2000). Ferner wird sie auch bei der Detektion von sehr langsamen und kleinen Massenbewegungen (sogenannter slow moving landslides) angewendet (Stumpf et al., 2017; Sun et al., 2017; Béjar-Pizarro et al., 2017).

4.1.4 Evaluation der Bildkorrelationssoftware

Durch eine Literatur- und Internetrecherche wird nach einem Bildverarbeitungsprogramm gesucht, welches sich für den Anwendungszweck am besten eignet. Getestet werden die Programme CIAS, COSI-Corr und MicMac. Da COSI-Corr nur sehr wenige Einstellungen zur Parametrisierung zur Verfügung stellt und das Programm zudem nur in Verbindung mit dem kostenpflichtigen Produkt ENVI verwendet werden kann, wird dieses Tool im Rahmen dieser Arbeit nicht verwendet. Gegensätzlich verhält es sich mit dem Programm MicMac. Hier wird eine Überzahl an verschiedenen Parametern für die Messung von Verschiebungen bereitgestellt, was die Wahl der geeignetsten Parametereinstellung sehr schwierig macht. Zudem müssen Parameter relativ kompliziert und wenig benutzerfreundlich über eine Windows-Kommandozeile eingegeben oder über XML-Files eingelesen werden. Im Gegensatz zur Eingabe über Kommandozeilen in MicMac, weist CIAS eine graphische Benutzeroberfläche auf, was die Arbeit mit dem Werkzeug deutlich vereinfacht. Zudem ist CIAS ein rein für die Bildkorrelation entwickeltes Programm, wohingegen MicMac als

Allrounder-Tool angesehen werden kann. Ein weiterer sehr wichtiger Aspekt ist das in CIAS integrierte Subpixel-Rendering, mit dem die räumliche Auflösung um bis zu 1/8 gegenüber dem Eingaberaster erhöht werden kann. Aufgrund dieser Voraussetzungen fällt die Wahl der im Rahmen dieser Arbeit geeignetsten Anwendung auf das Programm CIAS.

4.1.5 Konzeption und Durchführung des Workflows

Die von Stumpf et al. (2017) erfolgreich in den französischen Alpen durchgeführte Methodik einer Subpixel-Bildkorrelation wird auf das Untersuchungsgebiet des isländischen Vulkans Öraefajökull übertragen. Im Gegensatz zu Stumpf et al. (2017) werden nicht Pléiades sondern Sentinel-2-Satellitendaten verwendet. Diese weisen zwar eine deutlich geringere räumliche Auflösung auf, sind dafür jedoch über das Copernicus-Programm frei erhältlich. Das multispektrale Aufnahmegesetz des Pléiades-Satelliten hat eine räumliche Auflösung von 2 m und die panchromatischen Satellitendaten sogar eine räumliche Auflösung von 0.5 m, wogegen die in dieser Arbeit verwendeten Rasterdaten des Sentinel-2-Satelliten nur eine maximale Auflösung von 10 m aufweisen. Ein weiterer wesentlicher Unterschied des hier gewählten Vorgehens im Vergleich zu Stumpf et al. (2017) liegt in der Wahl von CIAS statt MicMac als Tool zur Korrelationsberechnung. In beiden Arbeiten wird ein sogenanntes Subpixel-Rendering durchgeführt. Dies wird bei CIAS automatisch auf der Basis einer Nachbarschaftsanalyse der Pixel durchgeführt, wodurch eine theoretische Auflösung von 1/8 des Eingaberasters erreicht werden kann. Dies führt zu einer neuen praktischen Auflösung von ca. 1.25 m in dieser Arbeit, was jedoch immer noch eine deutlich geringere Auflösung gegenüber Stumpf et al. (2017) bedeutet. Neben dem festgelegten operativen Teilziel, sich für die Messung von Bodenverschiebungen an der Arbeit von Stumpf et al. (2017) zu orientieren, wurden auch die Methodiken von Kröhnert et al. (2014) und insbesondere Kumari et al. (2014) integriert und übernommen. Dabei wird ein standardisierter Workflow beschrieben, welcher in anderen Arbeiten wiederholt und in weitere Untersuchungsgebiete übertragen werden kann. Der beschriebene Workflow besteht aus der Datenvorbereitung (Preprocessing), der eigentlichen Berechnung der Bildkorrelation von Subpixeln, der Datennachbearbeitung (Postprocessing) und der Visualisierung der resultierenden Ergebnisse.

Das Preprocessing beginnt nach dem Suchen und Sammeln von geeigneten Sentinel-2-Zeitreihen über den zu untersuchenden Zeitraum für das Untersuchungsgebiet mit der Orthorektifizierung und Transformation in das verwendete Koordinatensystem «WGS 1984 UTM Zone 28N» und der Überführung in das für den Input in CIAS benötigte Datenformat *GeoTIFF*. Für das Untersuchungsgebiet A werden die Ausgangsdaten vor der Korrelationsanalyse vom Ausgangs-Koordinatensystem «WGS 1984 Web Mercator Auxiliary Sphere» in das Ziel-Koordinatensystem «WGS 1984 UTM Zone 28N» überführt. Bei den Untersuchungsgebieten B und C wird aufgrund der im Laufe dieser Arbeit gesammelten

Erfahrungen zuerst die Korrelationsanalyse im Ausgangs-Koordinatensystem «WGS 1984 Web Mercator Auxiliary Sphere» durchgeführt und erst danach die aus der Berechnung erhaltenen Resultate in das Ziel-Koordinatensystem «WGS 1984 UTM Zone 28N» transformiert, da somit ausgeschlossen werden kann, dass durch die Transformation über ArcGIS eine unbemerkte Generalisierung der Pixel bzw. Glättung der Helligkeitsstufen entsteht. Was vermutlich bei der ersten Messung im Untersuchungsgebiet A durch die vorgängige Transformation passiert ist.

Die Durchführung des Image-Matching mithilfe von CIAS orientiert sich in dieser Arbeit an den Empfehlungen von Kröhnert et al. (2014) und richtet sich nach dem Vorgehen von Kumari et al. (2014), das in veränderter Form in Abbildung 6 als Flussdiagramm aufgeführt ist. Die eigentliche Berechnung ist relativ simpel, da die Bedienbarkeit von CIAS anwenderfreundlich ist und nur wenige Parametereinstellungen vorgenommen werden müssen. Jedoch ist aufgrund der mit 14.7 km² (Untersuchungsgebiet A), 18.3 km² (Untersuchungsgebiet B) und 18.2 km² (Untersuchungsgebiet C) relativ grossen Perimeter und der feinen Parametereinstellungen der Berechnungsaufwand für CIAS sehr gross, was zu langen Berechnungsdauern führt. So dauerte die komplette Berechnung 3-4 Stunden für das Untersuchungsgebiet A und 10-12 Stunden für die Untersuchungsgebiete B und C. Aus diesem Grund wurde entschieden, für die Ermittlung der geeignetsten Parametereinstellungen vorgängig ein Testing in einem deutlich kleineren Bereich des Untersuchungsgebietes A durchzuführen, bei welchem die Berechnungsdauer etwa 20 Minuten betrug. Ein Vergleich ohne und mit Co-Registration in diesem Testing im Untersuchungsgebiet A hat gezeigt, dass mit einer vorgängigen Co-Registration deutlich realistischere Ergebnisse bei der durchschnittlichen Länge der detektieren Verschiebungen generiert werden, obwohl die Raster des Sentinel-2-Datensatzes bereits orthorektifiziert vorliegen. Für das Image-Matching der Bilder der Untersuchungsgebiete B und C wurde keine vorgängige Co-Registration durchgeführt, da hier keine entsprechenden Infrastrukturbauten als Referenzen verwendet werden können. Eigentlich sollte dies auch nicht nötig sein, da die Bilder bereits einen räumlichen Bezug haben und so gemäss Kumari et al. (2014) als quasi co-registriert angesehen werden können. In CIAS kann entweder eine Berechnung als NCC oder alternativ als NCC-O durchgeführt werden. Im Rahmen des Testings wurden beide Möglichkeiten ausprobiert. Das Ergebnis war, dass bei Verwendung des NCC aus subjektiver Betrachtung heraus durchwegs realistischere Resultate in der durchschnittlichen Länge der Verschiebungen und bei den Ausreissern resultierten. Auch die statistischen Werte des maximalen und durchschnittlichen Korrelationskoeffizienten ergaben im Vergleich signifikant höhere Werte bei der Berechnung mit NCC gegenüber NCC-O. Aufgrund dieser Erkenntnis wurde für die nachgelagerten vollständigen Berechnungen über die gesamten Untersuchungsgebiete nur noch die Methodik der NCC verwendet.

Das Postprocessing wird in ArcGIS Pro ausgeführt und besteht aus einer Fehleranalyse und der Visualisierung von den Resultaten. Die Fehleranalyse lehnt sich an Kröhnert et al. (2014) an und umfasst eine Analyse der Verteilung der Höhe des maximalen Korrelationskoeffizienten, die Eliminierung von Ausreißern durch einen Grenzwert der maximalen Verschiebungslänge und dem Aufzeigen des Signal-Rausch-Verhältnisses. Die Grenze zum Herausfiltern der Ausreißer wird beim oberen Whisker beim 97.5 %-Quantil festgelegt, was einer Standarddefinition für die Festlegung des Schwellwertes von Boxplot-Diagrammen entspricht. Der Minimalwert für den maximalen Korrelationskoeffizienten wird in verschiedenen Ergebnissen bei 0.6, 0.8 und 0.9 angesetzt. Es ist gut sichtbar, wie mit zunehmend höherem Schwellwert immer weniger Bereiche in den Untersuchungsgebieten Bodenverschiebungen aufweisen. Das SNR ist das Verhältnis des maximalen Korrelationskoeffizienten und des durchschnittlichen Korrelationskoeffizienten. Die Verteilung pro Untersuchungsgebiet wird zur Interpretation als Histogramm dargestellt. Hohe SNR-Werte deuten auf entsprechend hohes Rauschen in den Ergebnissen hin, was auf zufällig verteilte Pixel mit Fehlwerten hindeutet. Wolken- und Schneeflächen in den Untersuchungsgebieten werden in dieser Arbeit nicht speziell entfernt.

Die Darstellung von dynamischen Prozessen der Bodenverschiebungen ist aufgrund der nötigen Visualisierung von raum- und zeitbezogener Prozesse herausfordernd (Kääb et al., 2003). Zur Visualisierung wird dazu der in Kröhnert et al. (2014) empfohlene kombinierte Einsatz von Vektorpfeilen zur Darstellung der Verschiebungsrichtungen und Flächenfärbungen zum Anzeigen von Verschiebungslängen eingesetzt. Dieser kombinierte Einsatz von Flächen und Punkt-Features zur Darstellung von Bewegungslänge und -richtung ist in vielen anderen Studien zu diesem Thema zu finden (Caporossi et al., 2018; Jawak et al., 2018; Stumpf et al., 2017; Stumpf et al., 2018). Da aufgrund der hohen Anzahl an Messwerten in den Untersuchungsgebieten die Darstellung aller Vektorpfeile sehr unübersichtlich wäre, werden diese für die Visualisierung manuell reduziert. Dies wird über eine Modulo-Funktion erreicht, die nur jeden fünfzigsten Messwert darstellt. Die Vektorpfeile in den Karten im Format A5 in Kapitel 3 «Ergebnisse» sind trotzdem nur schwer zu erkennen und werden deshalb zusätzlich in Anhang A2 als Karten im Format A4 bereitgestellt.

4.2 Beurteilung der Resultate

Im folgenden Kapitel werden die erhaltenen Resultate diskutiert und mit wissenschaftlicher Literatur zu ähnlichen Themen verglichen. Zusammenfassend lässt sich sagen, dass die erhaltenen Ergebnisse in Bezug auf die Standorte der gemessenen Bodenverschiebungen sehr interessant erscheinen und teils recht plausibel sind. Die Länge der gemessenen Verschiebungen ist dagegen unrealistisch hoch.

In Abbildung 59, Abbildung 61 und Abbildung 63 sind interessante Gebiete in den Untersuchungsgebieten selektiert, die in Bezug auf detektierte Verschiebungen besonders plausibel oder interessant erscheinen.

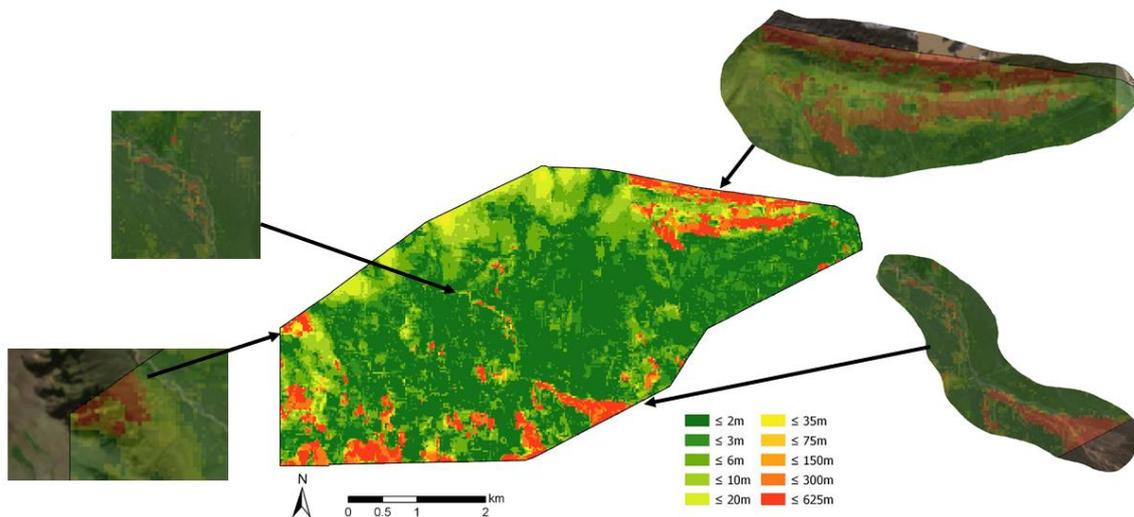


Abbildung 59: Auswahl an interessanten Gebieten im Untersuchungsgebiet A.

In Abbildung 59 sind diese Gegenden für das Untersuchungsgebiet A selektiert. Hier zeigt sich, dass im Bereich von steilen Hanglagen, an den Flanken einer Seitenmoräne und im Bereich eines mäandrierenden Fließgewässers stärkere Bodenverschiebungen detektiert werden. In flachen Bereichen werden hingegen deutlich geringere, wenn auch immer noch sehr grosse, Verschiebungen gemessen. Ein Foto der Westflanke der Seitenmoräne und des Gletschers konnte durch Daniel Hölbling direkt in Island aufgenommen werden und ist in Abbildung 60 dargestellt.



Abbildung 60: Aufnahme der Seitenmoräne (links) innerhalb des Untersuchungsgebiets A und des Kviárjökull-Gletschers (© Daniel Hölbling, 2019).

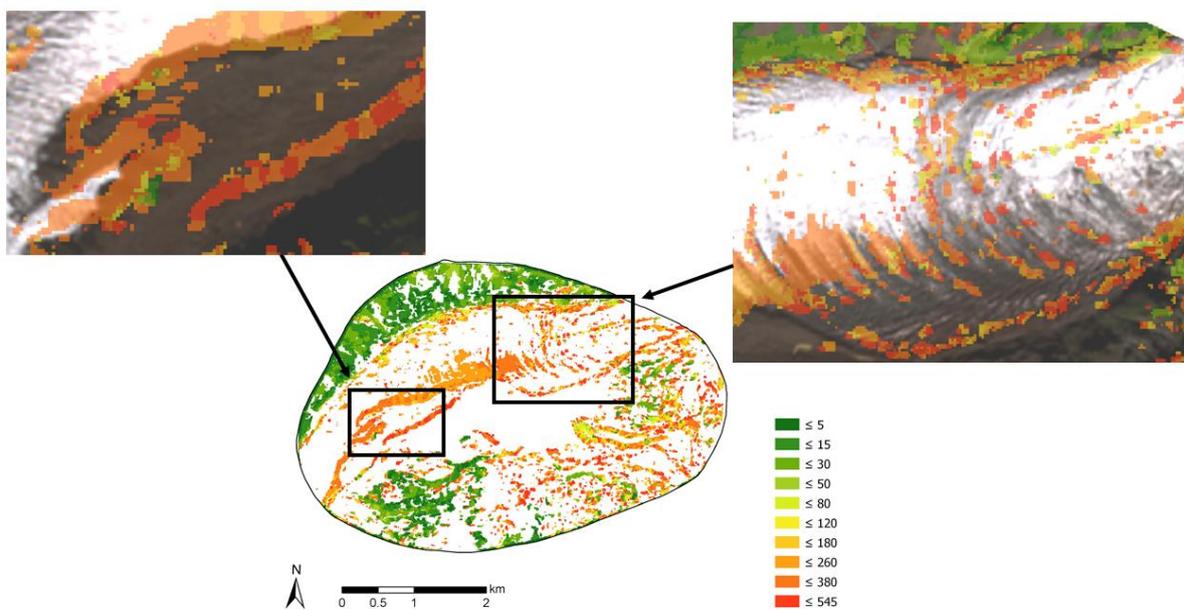


Abbildung 61: Auswahl an interessanten Gebieten im Untersuchungsgebiet B.

In Abbildung 61 sind die interessanten Gegenden des Untersuchungsgebiets B mit einem Rahmen markiert. Hier liefern insbesondere die Oberfläche des Gletschers und ein Südhang am Rand des Gletschers sehr interessante Gebiete in Bezug auf die detektierten Bodenverschiebungen und wurden deshalb selektiert. Der Südhang des Gletschers ist interessant, da hier kürzlich ein Felssturz stattgefunden hat, welcher ebenfalls in der Auswertung im Rahmen dieser Arbeit detektiert wurde (Abbildung 62).



Abbildung 62: Aufnahme des Svínafellsjökull-Gletschers des südlichen Steilhanges, wo kürzlich ein Felssturz stattgefunden hat (© Daniel Hölbling, 2019).

Für das Untersuchungsgebiet C sind die interessanten Gebiete in Abbildung 63 hervorgehoben. Hier ist insbesondere das Areal am Rand der Gletscherzunge des Svöludalsjökull-Gletschers erwähnenswert, wo deutlich grössere Verschiebungslängen gemessen wurden. Auch interessant ist das Gebiet am oberen Rand des Gletschers. An einer Grenze – möglicherweise eine Flanke, wo sich die Hangneigung ändert – werden im oberen Teil deutlich stärkere Bewegungen detektiert. Zudem ist ein Ausschnitt selektiert, welcher gut sichtbar den Rücken eines Gebirges zeigt, an dessen Flanken stärkere Verschiebungen detektiert werden.

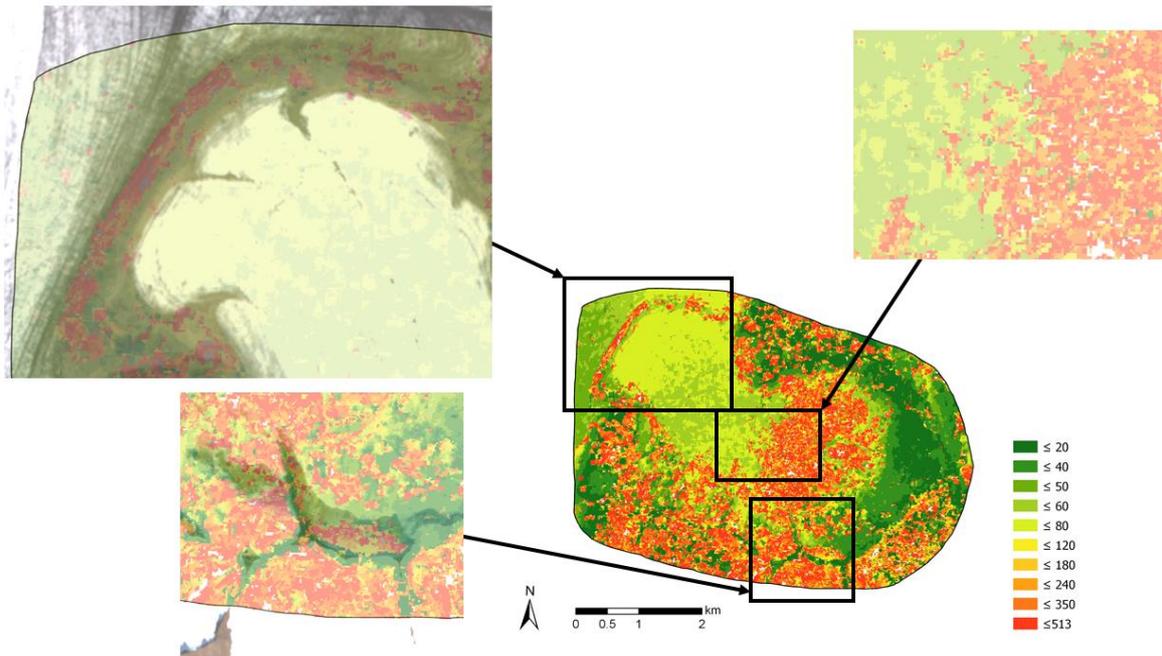


Abbildung 63: Auswahl an interessanten Gebieten im Untersuchungsgebiet C.

Bezüglich der grossen Verschiebungslängen wurde im Rahmen dieser Arbeit auch mit Dr. Andreas Kääb, dem Entwickler von CIAS, Kontakt aufgenommen. Aus Sicht von Herrn Kääb können die hohen Verschiebungsbeträge diverse Gründe haben. Diese seien hauptsächlich:

- Korrelationsfehler: Maximale Korrelationskoeffizienten von kleiner 0.5-0.7 sind Hinweise auf Muster, die ähnlich sind, aber nicht wirklich dieselben. Deshalb wurde auch versucht, die Ergebnisse visuell mit unterschiedlich hohen maximalen Korrelationskoeffizienten abzubilden, um die verschiedenen Ausprägungen darzustellen (siehe Tabelle 6, Tabelle 7 und Tabelle 8).
- Bildpaare mit Bildaufnahmen aus unterschiedlichen Orbits: Dies könnte eine mögliche Fehlerquelle bedeuten, da bei einzelnen Messungen tatsächlich Bildpaare mit Aufnahmen aus unterschiedlichen Orbits verwendet werden mussten, da ansonsten nicht genügend geeignete Satellitenaufnahmen zur Verfügung gestanden hätten. Da aber die grossen Verschiebungslängen über alle Untersuchungsgebiete und über alle Bildpaare auftreten und nicht nur dort, wo tatsächlich Bildpaare aus unterschiedlichen Orbits verwendet wurden, lässt sich dies als Hauptgrund ausschliessen.

Was in dieser Arbeit nicht gemacht wurde, ist eine objektive statistische Beurteilung der erhaltenen Verschiebungsmessungen mit bekannten Punkten vor Ort. Eine gute Methode, um die Qualität der Ergebnisse abzuschätzen und die Verschiebungen zu korrigieren besteht darin, eine genügende Anzahl an Punkten im Feld festzulegen, die sowohl auf stabilen als auch auf labilen Oberflächen über das gesamte Gebiet verteilt sind (Le Bivic et al., 2017).

Folgendes gilt es laut Le Bivic et al. (2017) bei dieser sogenannten «Image Control Points»-Analyse zu beachten: Bei stabilen Regionen sollten keine Verschiebungen detektiert werden. Die Kontrollpunkte werden dabei visuell inspiziert, um falsche Punkte zu korrigieren oder zu entfernen. Als erstes werden die Verschiebungswerte verwendet, um die Gültigkeit der Korrelation zu bewerten. Wenn die an Punkten ausserhalb und innerhalb der versetzten Fläche gemessene Verschiebung nicht unterschieden werden kann, führt die Korrelationsmessung zu nicht signifikanten Ergebnissen. Wenn die zwei Kategorien von Punkten unterschieden werden können, kann dann der durchschnittliche Verschiebungswert der stabilen Punkte verwendet werden, um die Verschiebungswerte der verschobenen Bereiche zu korrigieren und ihre Verschiebung abzuschätzen.

Die Grundvoraussetzungen für die gewählten Untersuchungsgebiete können als gut betrachtet werden, da diese mit den in der Arbeit von Le Bivic et al. (2017) getroffenen Aussagen übereinstimmen. Gemäss Le Bivic et al. (2017) ergibt sich die Komplexität des Untersuchungsgebiets aus mindestens vier Hauptbedingungen, welche – mit einer Ausnahme – grösstenteils für diese Arbeit zutreffen oder nur geringen Einfluss haben: (1) Das Gebiet ist aufgrund des hochalpinen, fast wüstenähnlichen Charakters nur spärlich von natürlicher und kultivierter Vegetation bedeckt, die sich im zeitlichen Verlauf der Bildaufnahmen entwickeln und wachsen könnte. (2) Anthropologische Merkmale wie Strassen und Gebäude könnten auf aufeinanderfolgenden Bildern erscheinen und wieder verschwinden, was in den gewählten Untersuchungsgebieten ebenfalls nicht der Fall ist. (3) Die dritte Schwierigkeit betrifft das hohe Relief des Bereichs, das planimetrische Fehler in den Orthobildern hervorruft, wenn die Satellitenbilder nicht genau unter demselben Einfallswinkel aufgenommen werden. Deshalb wurde im Rahmen dieser Arbeit als Kriterium berücksichtigt, dass die verwendeten Satellitenbilder aus dem gleichen Orbit stammen. Dies konnte aber aufgrund des Mangels an geeigneten Bildern in einer Korrelationsmessung im Untersuchungsgebiet A sowie C nicht gewährleistet werden, was dort eine mögliche Fehlerquelle darstellt. (4) Die letzte Schwierigkeit besteht darin, dass die Verschiebung in der gleichen Grössenordnung wie die Grösse des Pixels liegt. Dieser Aspekt wurde durch ein umfassendes Testing berücksichtigt.

5 Fazit und Ausblick

Diese Arbeit zeigt eine Möglichkeit, mithilfe von Fernerkundung durch frei verfügbare Bilder gravitative Massenbewegungen, wie Bodenverschiebungen, Felsstürze und Gletscherbewegungen im Gelände zu erkennen und deren Bewegungsrate sowie -richtung abzuschätzen. Um die Bewegungsinformationen zu erhalten, wird eine Methodik des Image-Matching angewendet, die eine NCC aus zwei optischen Bildpaaren durchführt.

Rund um das isländische Vulkanmassiv Öräfajökull wurden drei verschiedene Untersuchungsgebiete ausgewählt, die einen Gletscher enthalten oder am Rand einer Seitenmoräne liegen und wo messbare Massenbewegungen erwartet werden oder bekanntermassen stattgefunden haben.

Die NCC wurde mit der Software CIAS ausgeführt. Durch eine Evaluation der drei Bildverarbeitungsprogramme CIAS, COSI-Corr und MicMac wurde dieses als geeignetstes Tool ausgewählt, da es speziell für diesen Anwendungszweck entwickelt worden ist, gratis zur Verfügung steht, das geeignetste Mass an verschiedenen Parametereinstellungen erlaubt, aufgrund der graphischen Benutzeroberfläche die Bedienbarkeit relativ einfach ist und mit einem Subpixel-Rendering die räumliche Auflösung der Bilder automatisch verbessern kann.

Die Untersuchungen wurden im Zeitraum von 2016 bis 2018 durchgeführt. Das Finden von Sentinel-2-Zeitreihen, die im Zeitraum liegen, weniger als 5 %-Wolkenbedeckung haben und aus dem gleichen Orbit stammen, hat sich als relativ schwieriges Unterfangen erwiesen. Bei zwei Korrelationsmessungen mussten Bildpaare verwendet werden, welche aus unterschiedlichen Aufnahmewinkeln aufgenommen wurden.

Im Rahmen dieser Arbeit wurde ein Workflow konzipiert und angewendet, welcher aus den Teilschritten Preprocessing, der Berechnung der NCC, und einem Postprocessing mit Visualisierung besteht. Dieser wurde so konzipiert, dass er die Möglichkeit bietet, sich auch einfach auf andere Untersuchungsgebiete und -zeiträume übertragen zu lassen.

Die erhaltenen Ergebnisse sind in Bezug auf die Standorte der gemessenen Bodenverschiebungen sehr interessant: So werden beispielsweise im zeitlichen Verlauf Bodenveränderungen entlang von mäandrierenden Fließgewässern sichtbar. Fließrichtungen von Gletschern zum Tal lassen sich erkennen und innerhalb eines Gletschers Abschnitte mit besonders grossen Fließbewegungen, meist in den steileren Bereichen, aufzeigen. Der Geröll-Transport vor der Gletscherzunge des Svöludalsjökull-Gletschers und auf dem Rücken des Svínafellsjökull-Gletschers, wo kürzlich durch einen Felssturz grosse Mengen an Geröll hingelangt sind, werden erkannt. Zudem werden ganz allgemein grössere Bodenverschiebungen an Steilhängen und Seitenmoränen detektiert, als im flachen Gelände, was logisch erscheint. Alle diese erhaltenen Resultate sprechen für eine hohe Eignung der

angewendeten Methodik. Jedoch sind über alle Untersuchungsgebiete und über alle verschiedenen Zeitabschnitte hinweg, die ermittelten Fließbewegungen unrealistisch hoch. Ein Grund, der ausgeschlossen werden kann, ist die Verwendung von Bildpaaren aus verschiedenen Aufnahmewinkeln, da die Fehler auch bei der Verwendung von Bildpaaren aus demselben Orbit auftreten. Hier braucht es sicherlich noch genauere Untersuchungen, wodurch diese Fehler entstehen und wie sie zu beheben sind. Mögliche Herangehensweisen für weitere Arbeiten wären beispielsweise, Satellitenbilder mit einer noch feineren räumlichen Auflösung zu verwenden oder das Subpixel-Rendering weiter zu erhöhen, die Orthorektifizierung mit einer Einmessung von Passpunkten vor Ort genauer auszuführen oder die oben erwähnte Image-Control-Points-Analyse nach Le Bivic et al. (2017) anzuwenden (eine Messung vor Ort wäre hier ebenfalls Voraussetzung) und anhand der durchschnittlichen Abweichung die Resultate zu korrigieren.

In naher Zukunft wird die heute schon hohe räumliche und zeitliche Auflösung von Satellitendaten, die für jeden frei im Internet zur Verfügung stehen, weiter stark zunehmen. Dies wird beste Möglichkeiten bieten, um kontinuierlich grossflächige Gebiete überwachen und untersuchen zu können. Deshalb birgt die automatisierte Berechnung und Auswertung von Bodenverschiebungen durch Fernerkundung erhebliches Potential, welches im Rahmen künftiger Arbeiten weiter zu verfolgen wäre.

6 Literaturverzeichnis

- Altena, B. & Kääb, A. 2017. Elevation Change and Improved Velocity Retrieval Using Orthorectified Optical Satellite Data from Different Orbits. *Remote Sensing*, 9, 300.
- Ayoub, F., Leprince, S. & Avouac, J.-P. 2009. Co-registration and correlation of aerial photographs for ground deformation measurements. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 64, 551-560.
- Béjar-Pizarro, M., Notti, D., Mateos, R.M., Ezquerro, P., Centolanza, G., Herrera, G., Bru, G., Sanabria, M., Solari, L., Duro, J. & Fernández, J. 2017. Mapping Vulnerable Urban Areas Affected by Slow-Moving Landslides Using Sentinel-1 InSAR Data. *Remote Sensing*, 9, 876.
- Bhutiyani, M.R. & Mahto, R. 2018. Remote-sensing-based study of impact of a rock avalanche on North Terong Glacier in Karakorum Himalaya. *International Journal of Remote Sensing*, 39, 8076-8091.
- Björnsson, H., Pálsson, F., Gudmundsson, S., Magnússon, E., Adalgeirsdóttir, G., Jóhannesson, T., Berthier, E., Sigurdsson, O. & Thorsteinsson, T. 2013. Contribution of Icelandic ice caps to sea level rise: Trends and variability since the Little Ice Age. *Geophysical Research Letters*, 40, 1546-1550.
- Caporossi, P., Mazzanti, P. & Bozzano, F. 2018. Digital Image Correlation (DIC) Analysis of the 3 December 2013 Montescaglioso Landslide (Basilicata, Southern Italy): Results from a Multi-Dataset Investigation. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 7, 372.
- Debella-Gilo, M. & Kääb, A. 2011. Sub-pixel precision image matching for measuring surface displacements on mass movements using normalized cross-correlation. *Remote Sensing of Environment*, 115, 130-142.
- Delacourt, C., Allemand, P., Casson, B. & Vadon, H. 2004. Velocity field of the "La Clapière" landslide measured by the correlation of aerial and QuickBird satellite images. *Geophysical Research Letters*, 31, L15619 1-5.
- Delacourt, C., Raucoules, D., Le Mouélic, S., Carnec, C., Feurer, D., Allemand, P. & Cruchet, M. 2009. Observation of a Large Landslide on La Reunion Island Using Differential Sar Interferometry (JERS and Radarsat) and Correlation of Optical (Spot5 and Aerial) Images. *Sensors*, 9, 616.
- Hannesdóttir, D., Zöhrer, A., Davids, H., Sigurgeirsdóttir, S.I., Skírnisdóttir, H. & Árnason, P. 2010. Vatnajökull National Park: Geology and Geodynamics. *Northern Environmental Education Development*.
- Hannesdóttir, H., Björnsson, H., Pálsson, F., Adalgeirsdóttir, G. & Guðmundsson, S. 2015. Changes in the southeast Vatnajökull ice cap, Iceland, between~ 1890 and 2010. *The Cryosphere*, 9, 565-585.
- Heid, T. & Kääb, A. 2012. Evaluation of existing image matching methods for deriving glacier surface displacements globally from optical satellite imagery. *Remote Sensing of Environment*, 118, 339-355.
- Jawak, S., Kumar, S., Luis, A., Bartanwala, M., Tummala, S. & Pandey, A. 2018. *Evaluation of Geospatial Tools for Generating Accurate Glacier Velocity Maps from Optical Remote Sensing Data*.
- Kääb, A. 2002. Monitoring high-mountain terrain deformation from repeated air- and spaceborne optical data: examples using digital aerial imagery and ASTER data. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 57, 39-52.

- Kääb, A., Isakowski, Y., Winter, R., Paul, F. & Neumann, A. 2003. Glaziale und periglaziale Prozesse: Von der statischen zur dynamischen Visualisierung. *Kartographische Nachrichten*, 53, 206-212.
- Kääb, A. & Vollmer, M. 2000. Surface Geometry, Thickness Changes and Flow Fields on Creeping Mountain Permafrost: Automatic Extraction by Digital Image Analysis. *Permafrost and Periglacial Processes*, 11, 315-326.
- Kröhnert, M., Pieczonka, T., Bolch, T. & Buchroithner, M. 2014. Untersuchung und Visualisierung von Gletschergeschwindigkeiten im Zentralen Tien Shan auf Basis von optischen Satelliten-Fernerkundungsdaten. *Publikationen der Deutschen Gesellschaft für Photogrammetrie, Fernerkundung und Geoinformation (DGPF) e.V.*, 23, 1-8.
- Kumari, S., Ghosh, S.K. & Buchroithner, M.F. 2014. Measurement of glacier velocity at Pik Lenin, Tajikistan, by feature tracking. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences - Internationales Archiv fuer Photogrammetrie, Fernerkundung und Raumbezogene Informationswissenschaften - Archives Internationales des Sciences de la Photogrammetrie, de la Teledetection et de l'Information Spatiale, 2014, Vol.XL-8, pp.531-536*, 531.
- Le Bivic, R., Allemand, P., Quiquerez, A. & Delacourt, C. 2017. Potential and Limitation of SPOT-5 Ortho-Image Correlation to Investigate the Cinematics of Landslides: The Example of "Mare à Poule d'Eau" (Réunion, France). *Remote Sensing*, 9, 106.
- Leprince, S., Barbot, S., Ayoub, F. & Avouac, J.P. 2007. Automatic and precise orthorectification, coregistration, and subpixel correlation of satellite images, application to ground deformation measurements. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 45, 1529-1558.
- Rebetez, M., Lugon, R. & Baeriswyl, P.-A. 1997. Climatic change and debris flows in high mountain regions: The case study of the Ritigraben Torrent (Swiss Alps). *Climatic Change*, 36, 371-389.
- Rosu, A.M., Pierrot-Deseilligny, M., Delorme, A., Binet, R. & Klinger, Y. 2015. Measurement of ground displacement from optical satellite image correlation using the free open-source software MicMac. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 100, 48-59.
- Scherler, D., Leprince, S. & Strecker, M.R. 2008. Glacier-surface velocities in alpine terrain from optical satellite imagery—Accuracy improvement and quality assessment. *Remote Sensing of Environment*, 112, 3806-3819.
- Stoffel, M. & Huggel, C. 2012. Effects of climate change on mass movements in mountain environments. *Progress in Physical Geography: Earth and Environment*, 36, 421-439.
- Stoffel, M., Tiranti, D. & Huggel, C. 2014. Climate change impacts on mass movements—case studies from the European Alps. *Science of the Total Environment*, 493, 1255-1266.
- Stumpf, A., Malet, J.P., Allemand, P. & Ulrich, P. 2014. Surface reconstruction and landslide displacement measurements with Pléiades satellite images. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 95, 1-12.
- Stumpf, A., Malet, J.P. & Delacourt, C. 2017. Correlation of satellite image time-series for the detection and monitoring of slow-moving landslides. *Remote Sensing of Environment*, 189, 40-55.
- Stumpf, A., Michéa, D. & Malet, J.-P. 2018. Improved Co-Registration of Sentinel-2 and Landsat-8 Imagery for Earth Surface Motion Measurements. *Remote Sensing*, 10, 160.

Sun, L., Muller, J.-P. & Chen, J. 2017. Time Series Analysis of Very Slow Landslides in the Three Gorges Region through Small Baseline SAR Offset Tracking. *Remote Sensing*, 9, 1314.

Anhang

A1 Koordinaten der Referenzpunkte zur Co-Registrierung

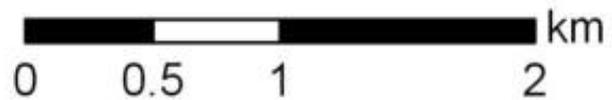
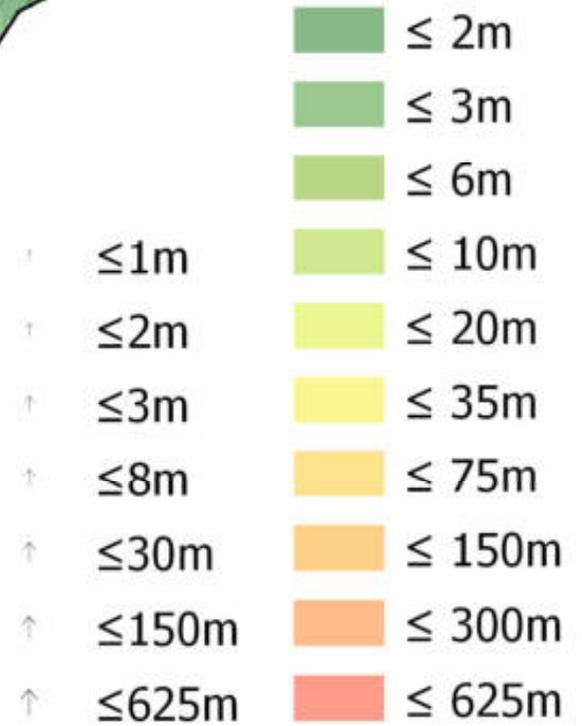
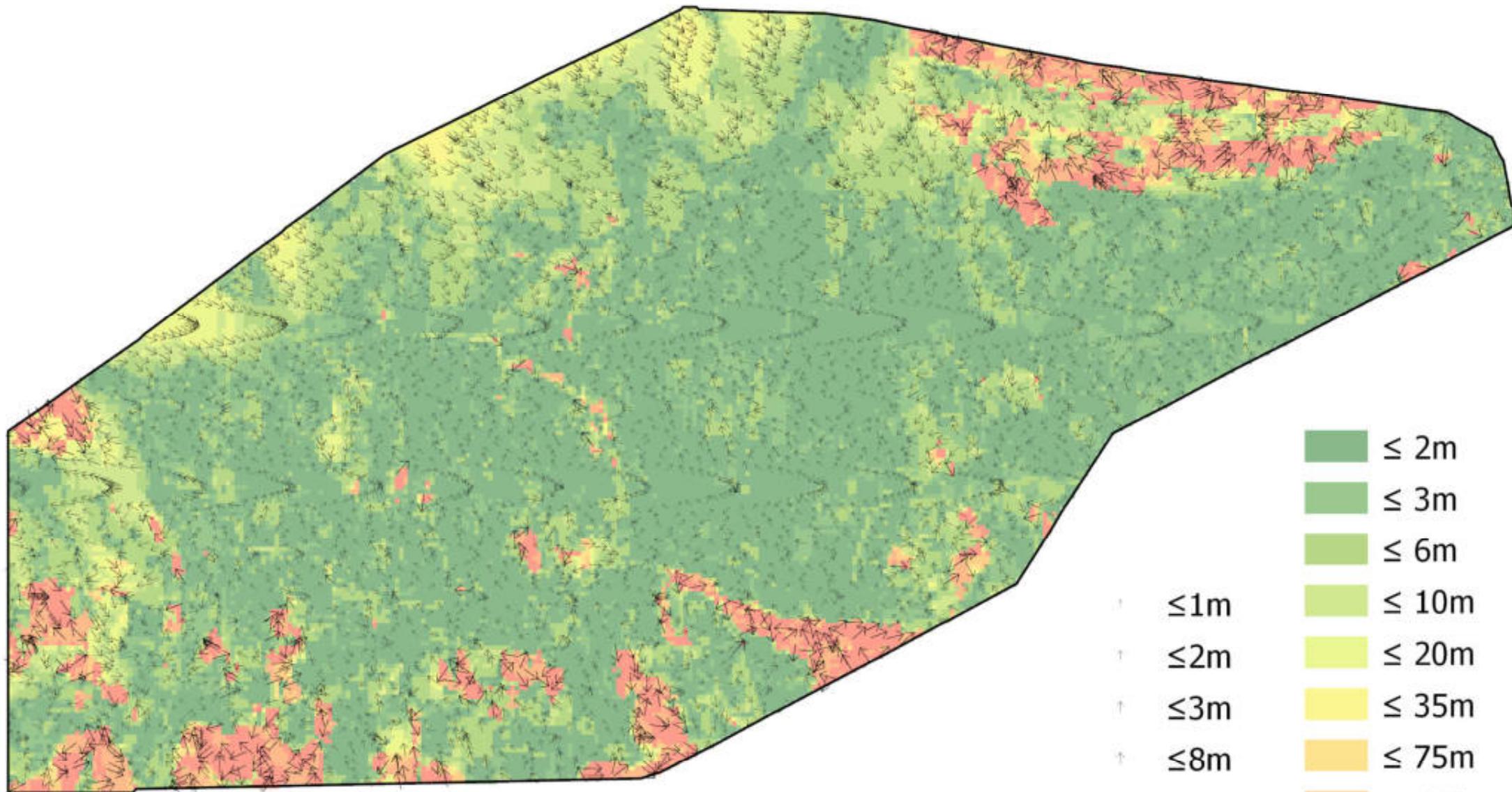
A2 Karten mit Verschiebungsvektoren

A3 Themenvorschlag für die UNIGIS MSc Master Thesis

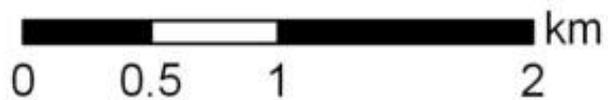
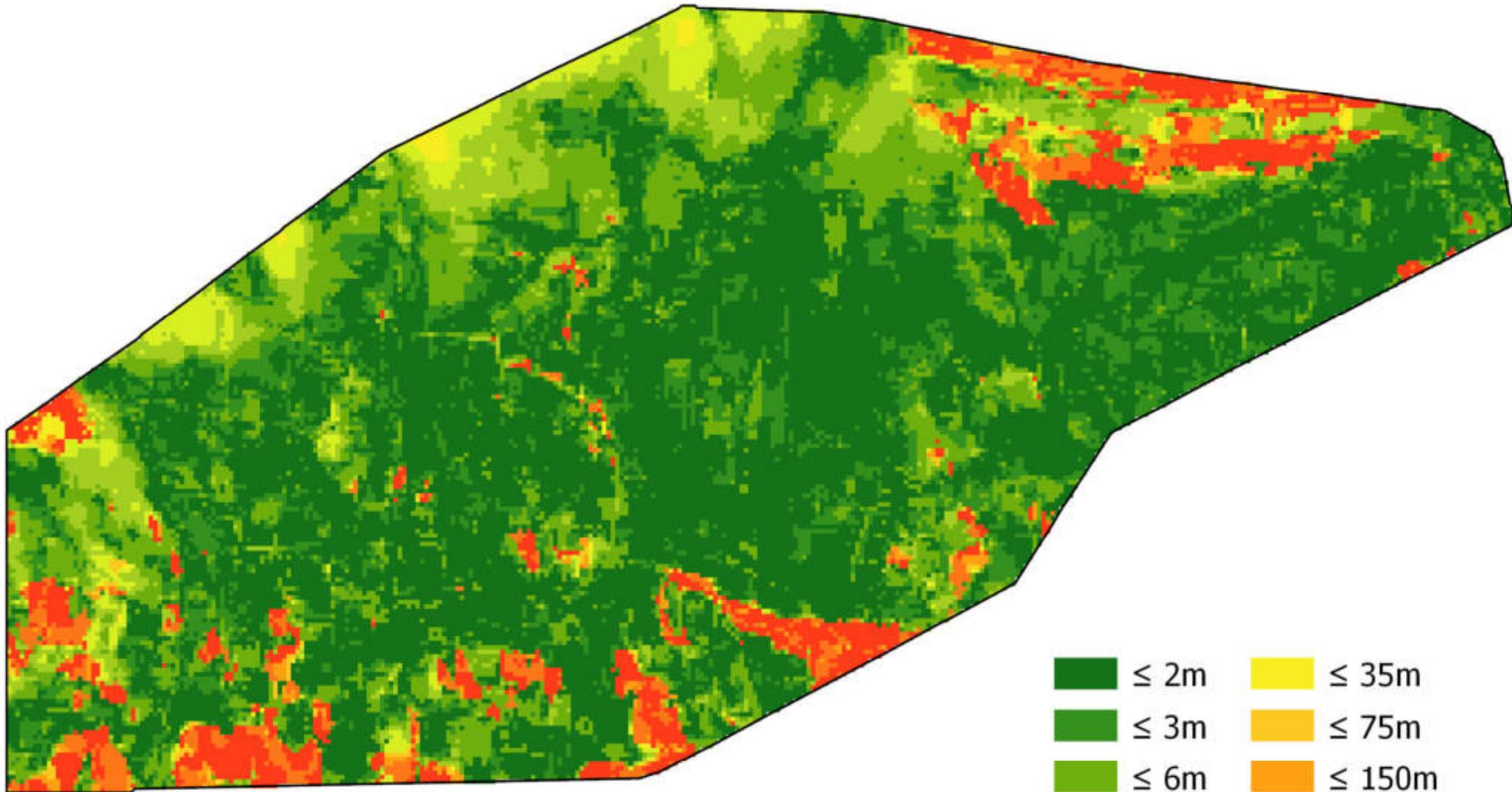
A1 Koordinaten der Referenzpunkte zur Co-Registrierung

POINT_X	POINT_Y
422551.0022	7087491.766
422821.5194	7087591.872
423070.6186	7087682.199
423252.205	7087751.574
424041.4072	7088041.647
424232.3057	7088112.419
424561.4892	7088231.614
424941.8893	7088372.227
425452.5035	7088561.02
426002.3269	7088851.093
426312.7826	7089091.701
426521.9701	7089250.826
426662.5727	7089331.307
426942.431	7089470.443
427502.3502	7089740.718
428263.0298	7090110.938
428453.4903	7090200.197
428763.5839	7090350.588
428913.0435	7090419.963

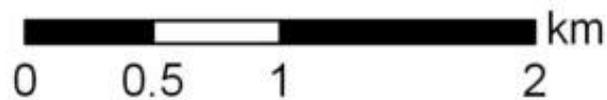
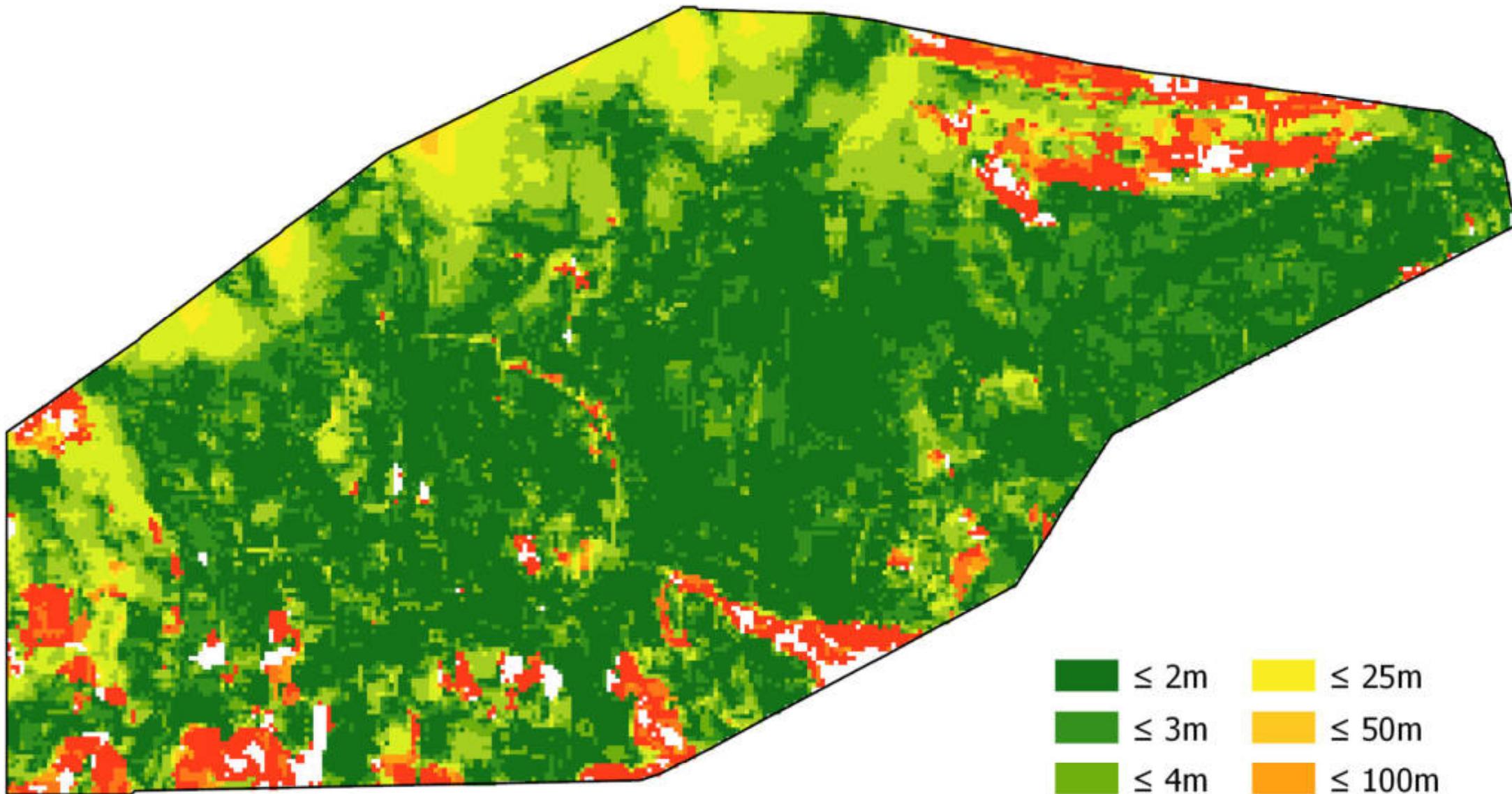
Ermittelte Bodenverschiebungen zwischen 2016 und 2017



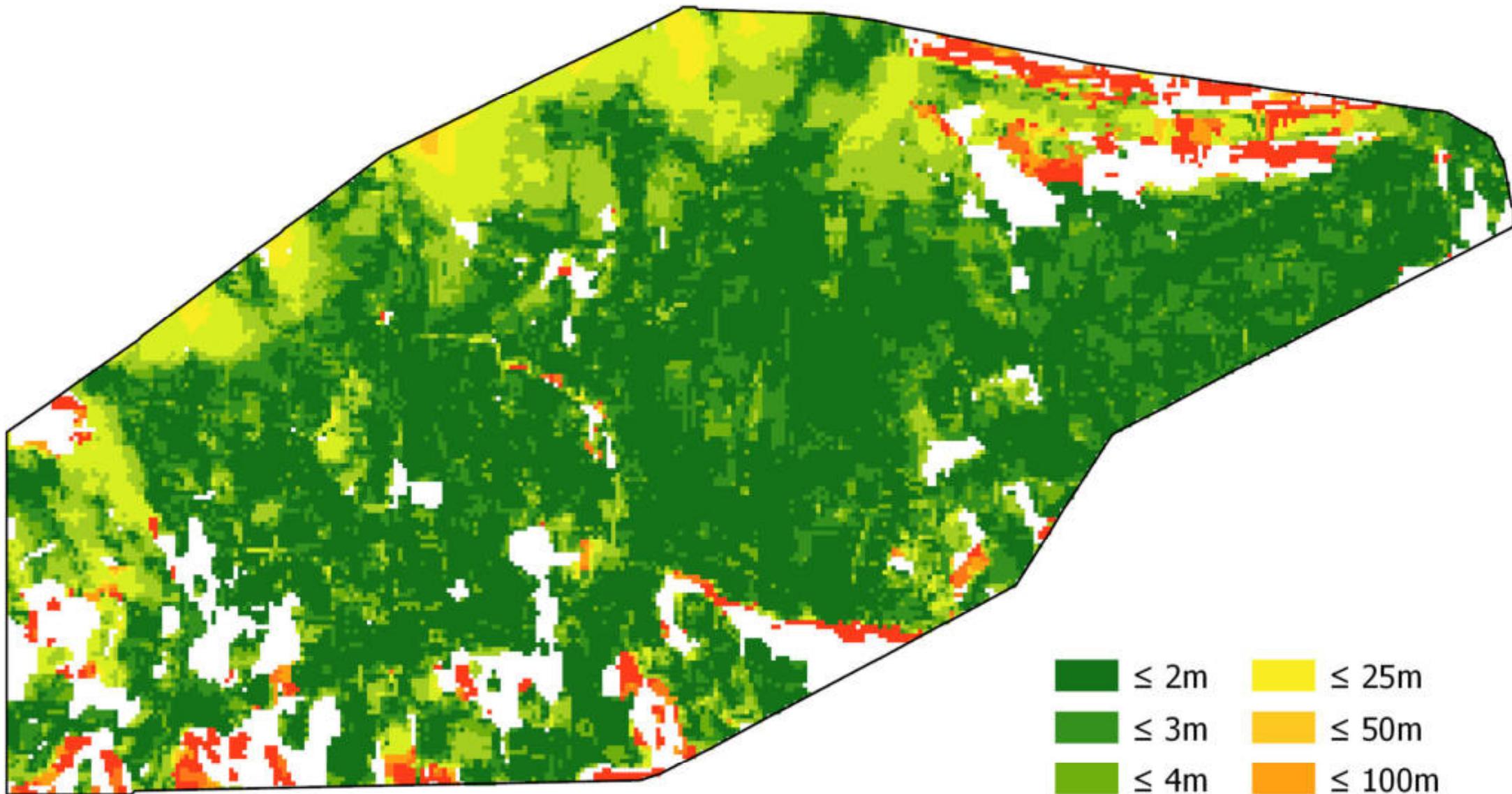
Variante 1: kein Filter



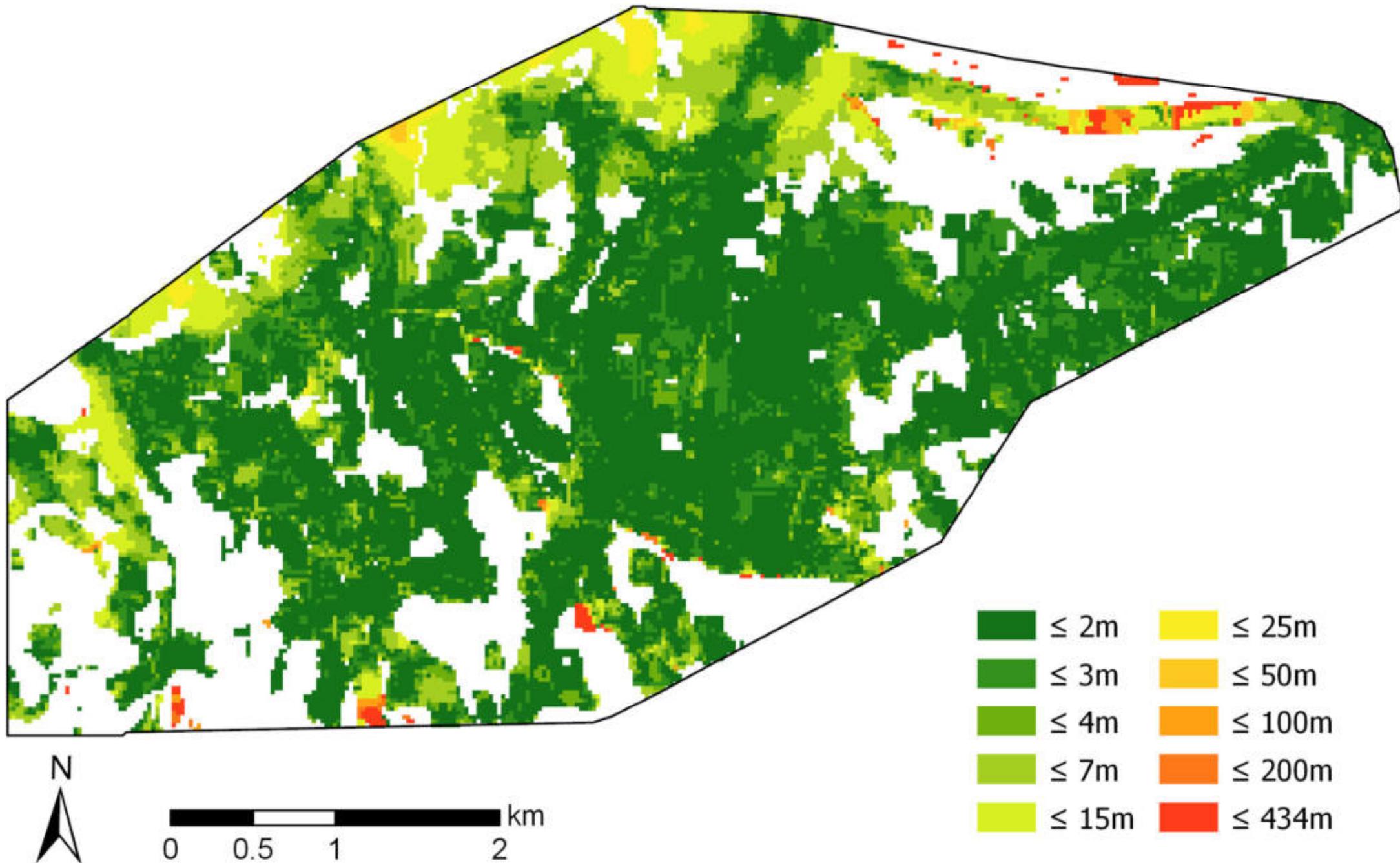
Variante 2: max. Länge 435m und max. Korrelationskoeffizient >0.6



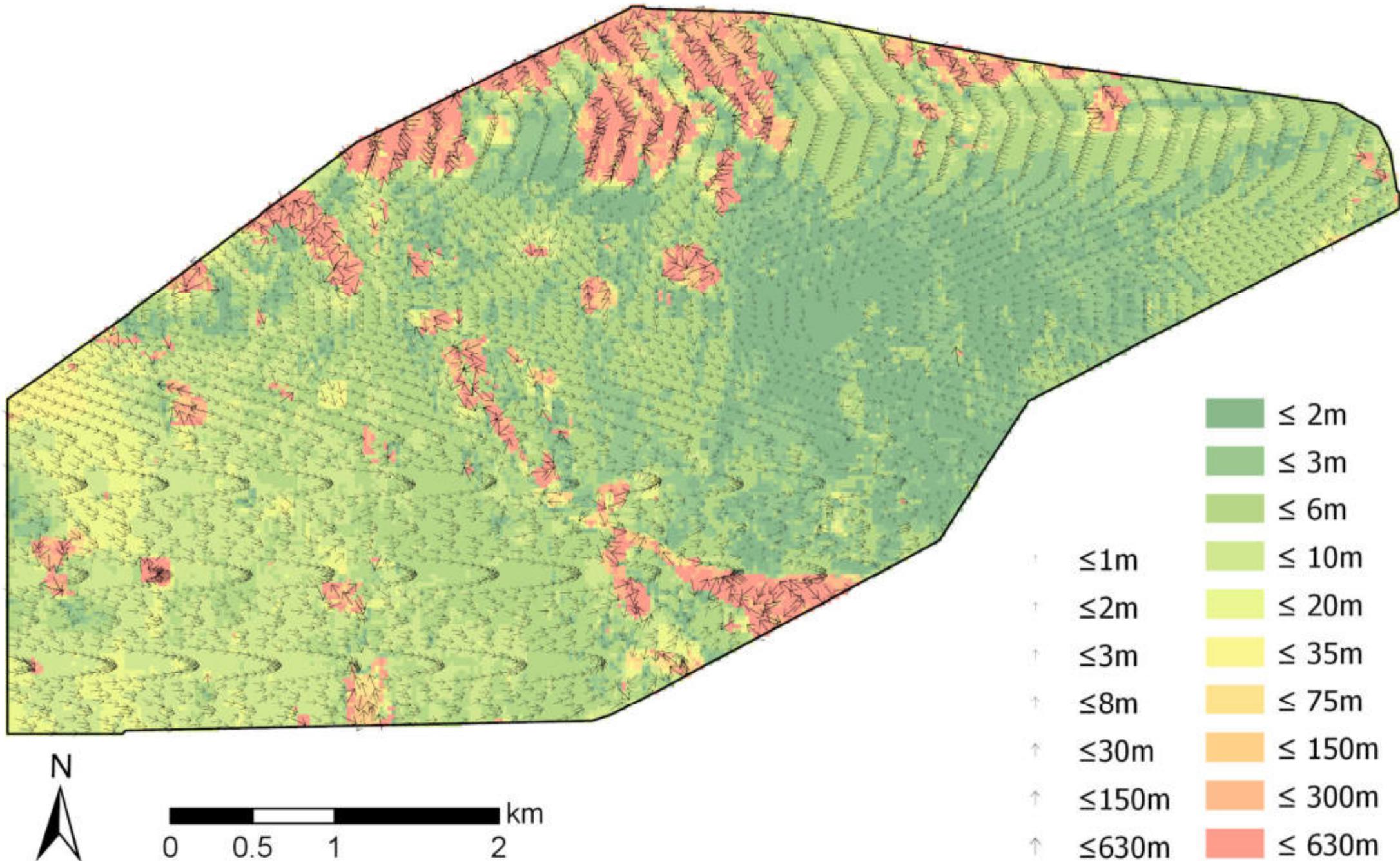
Variante 3: max. Länge 435m und max. Korrelationskoeffizient >0.8



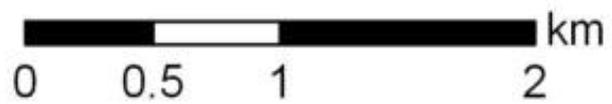
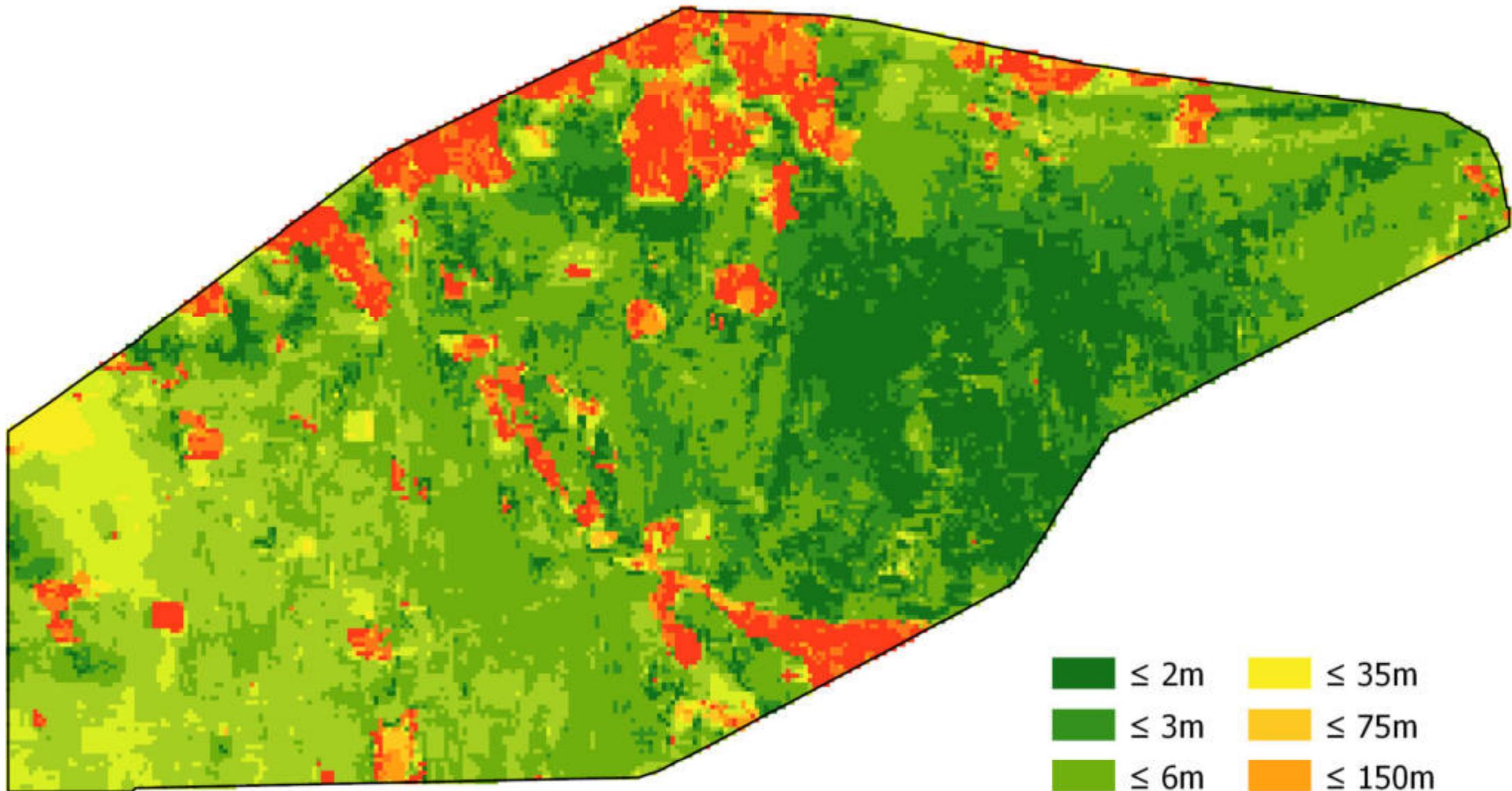
Variante 4: max. Länge 435m und max. Korrelationskoeffizient >0.9



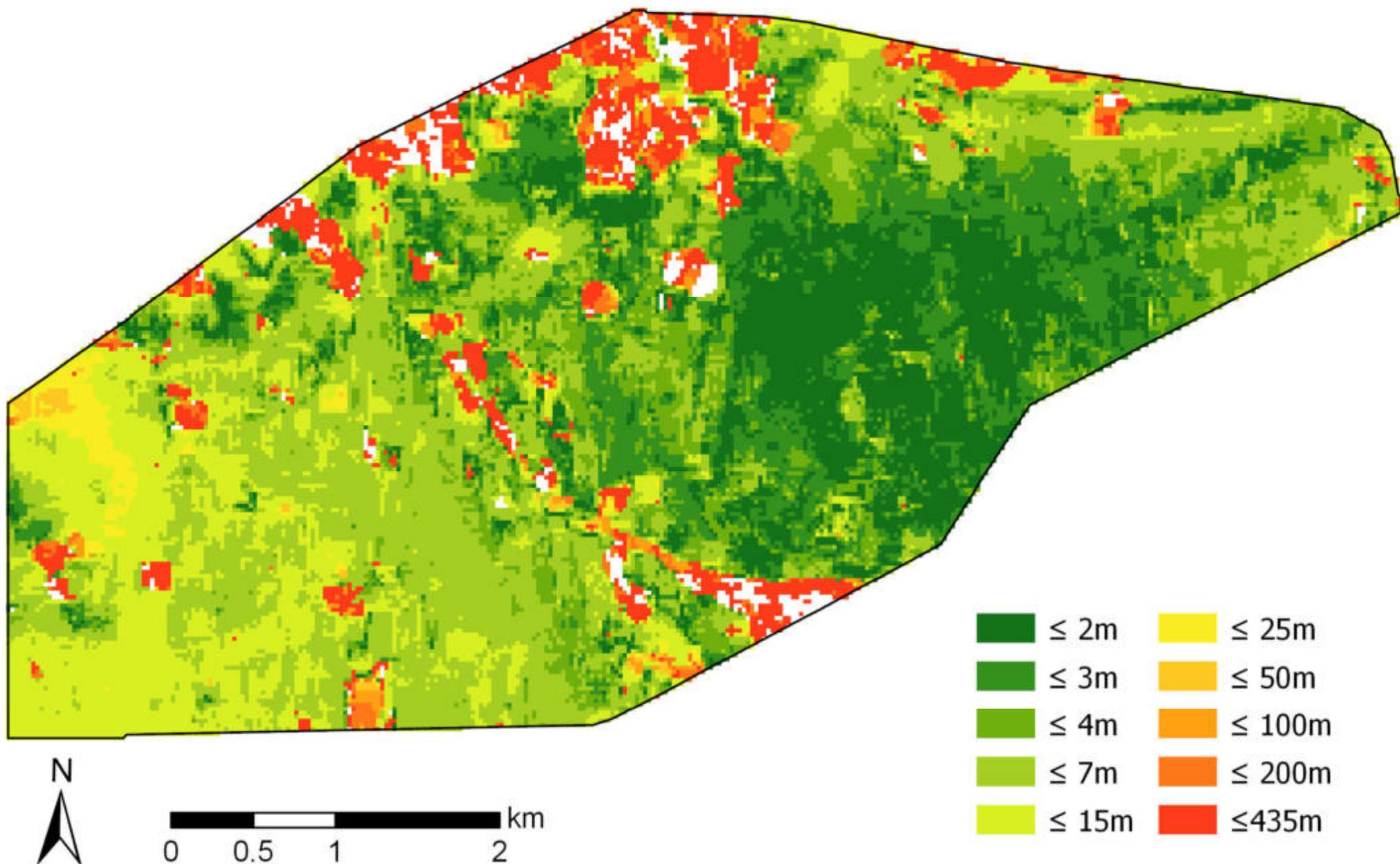
Ermittelte Bodenverschiebungen zwischen 2017 und 2018



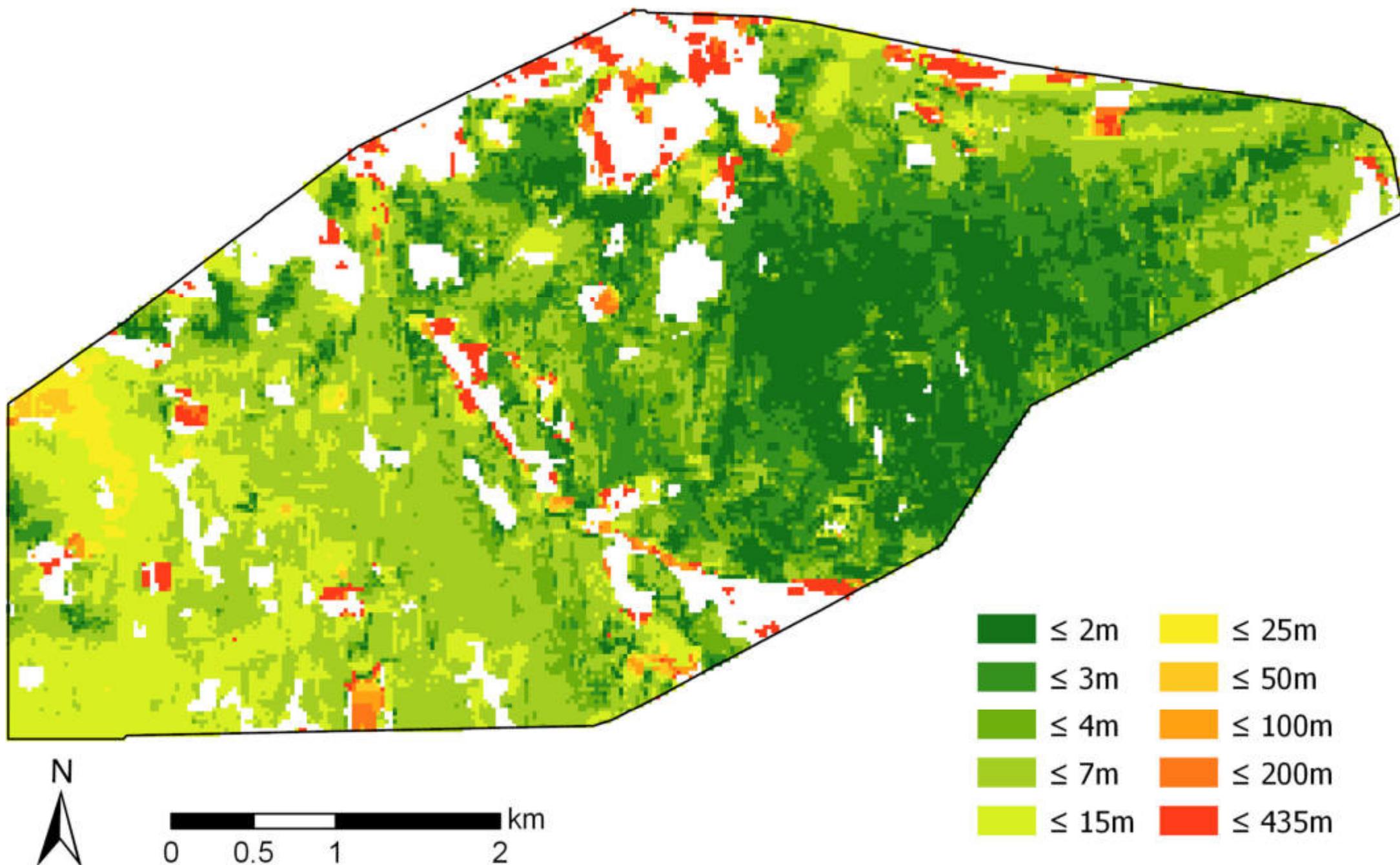
Variante 5: kein Filter



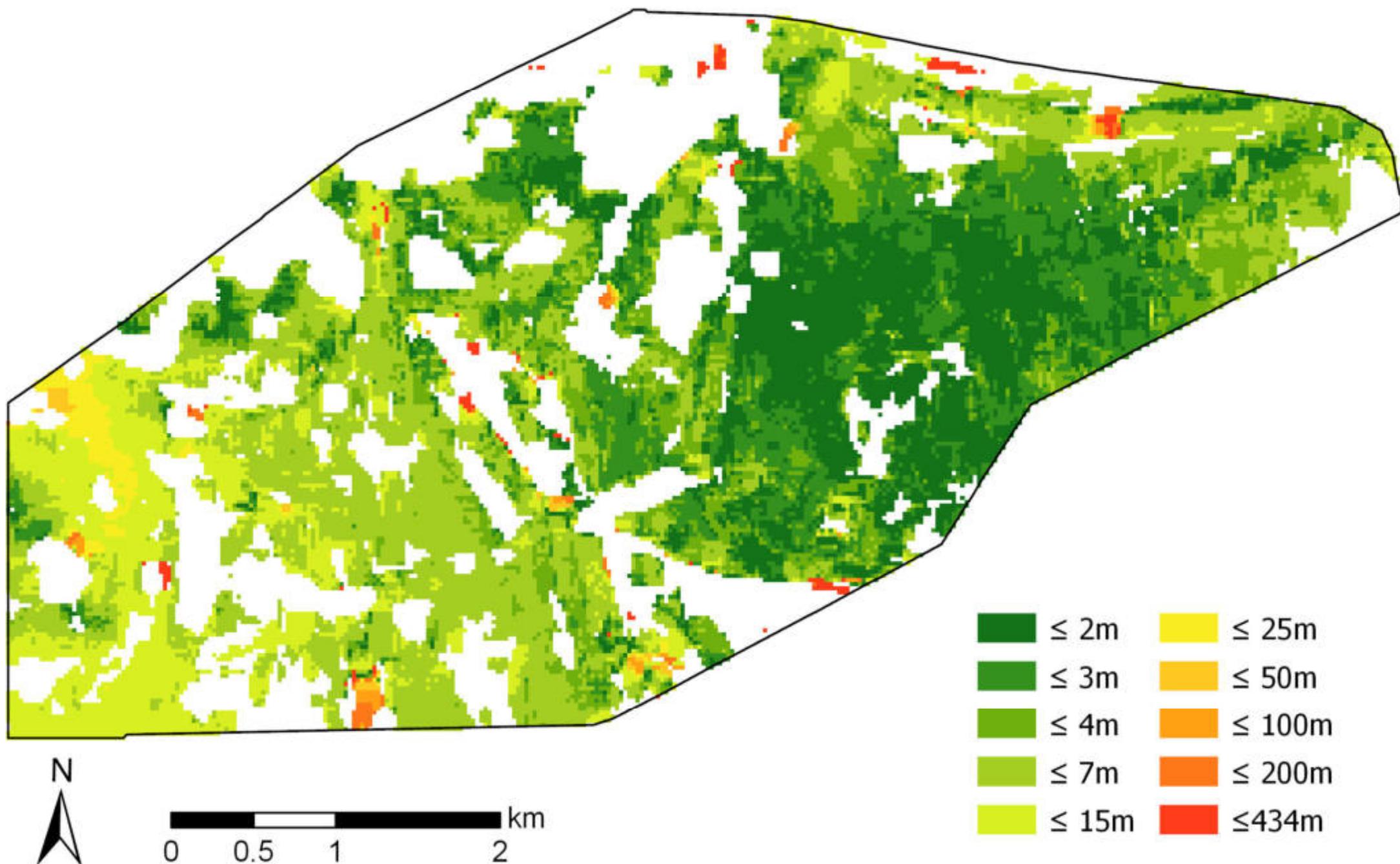
Variante 6: max. Länge 435m und max. Korrelationskoeffizient >0.6



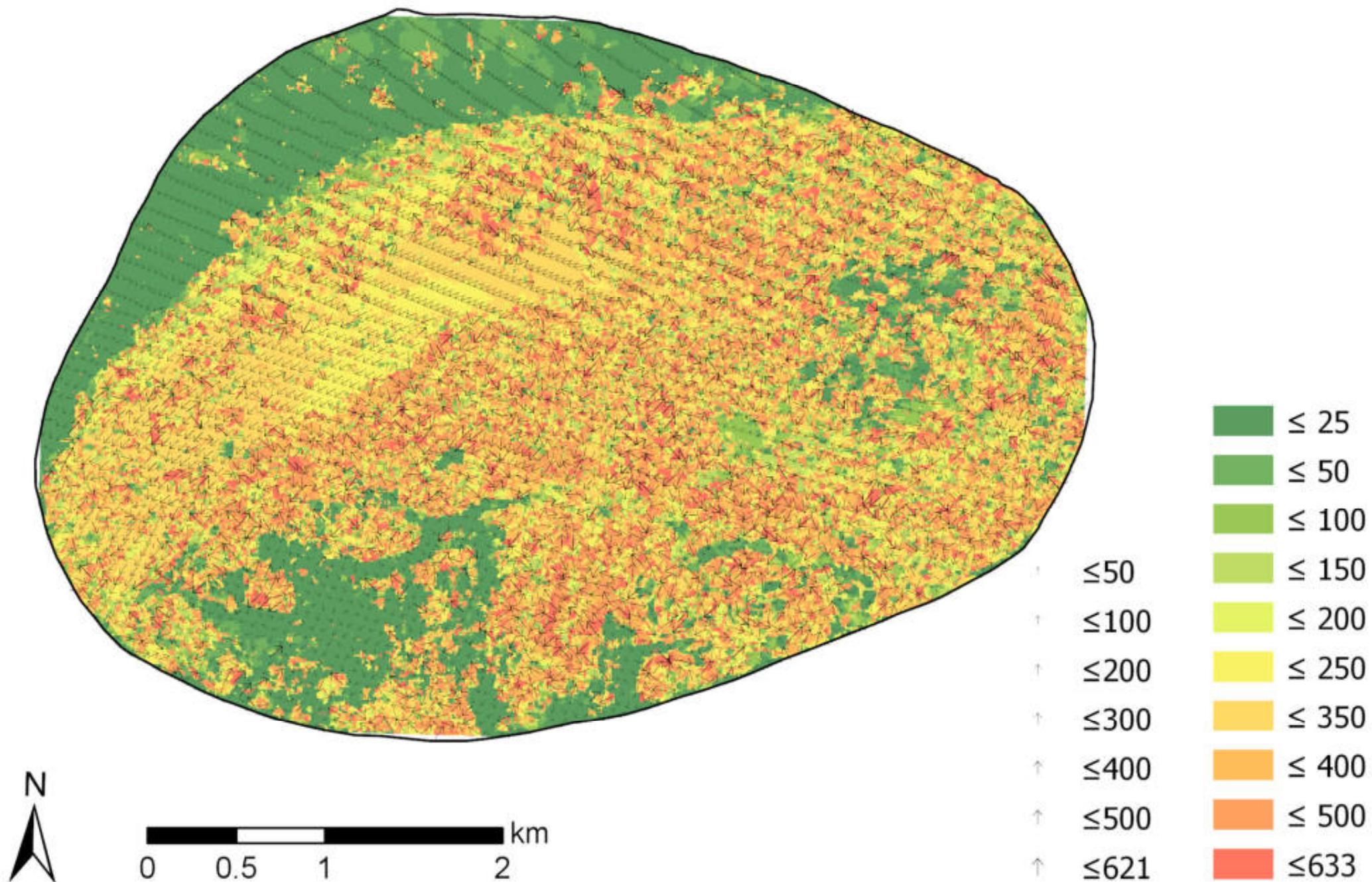
Variante 7: max. Länge 435m und max. Korrelationskoeffizient >0.8



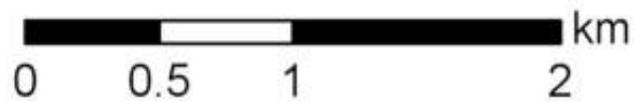
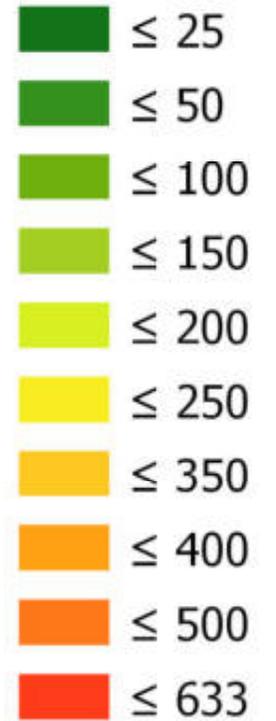
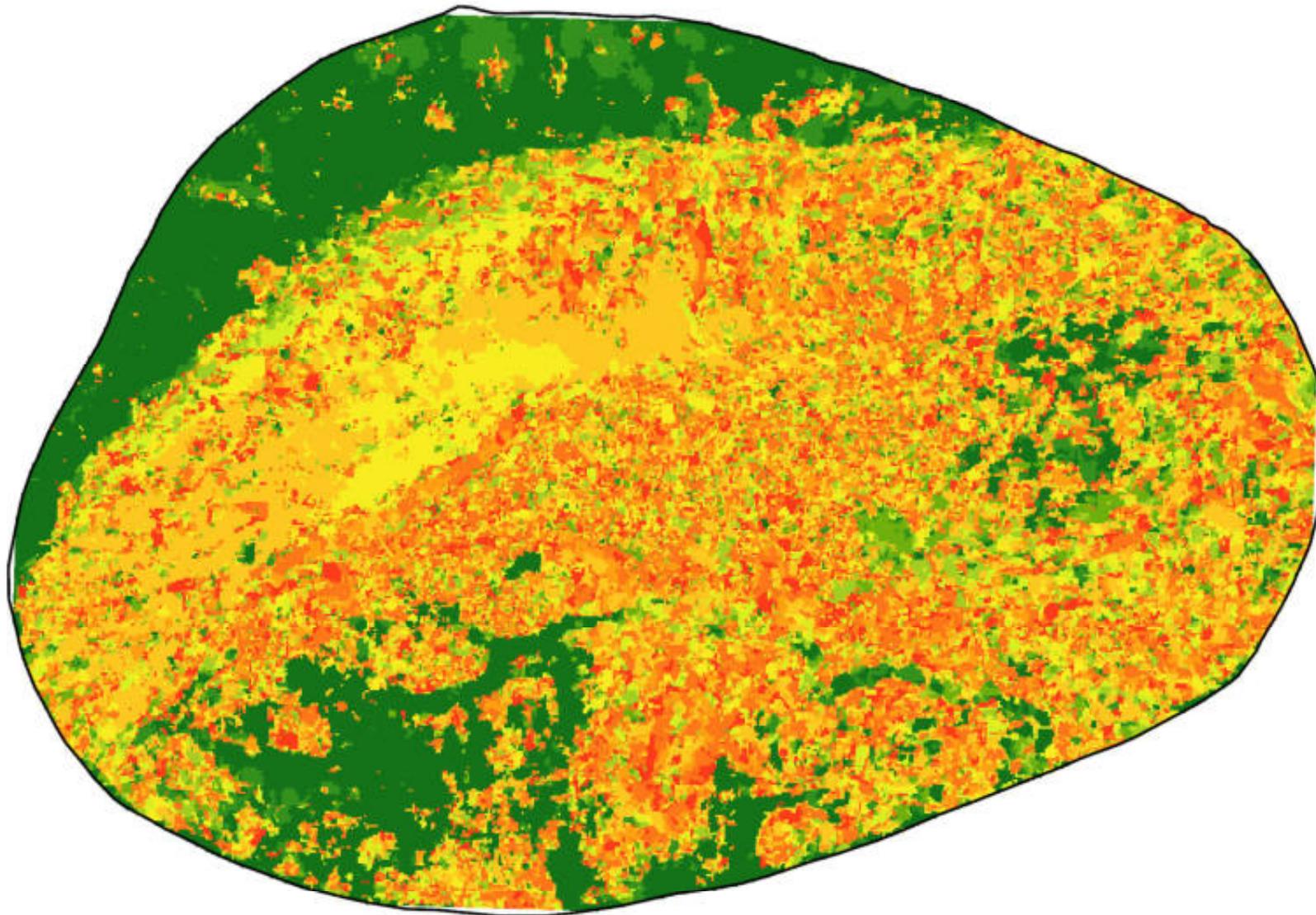
Variante 8: max. Länge 435m und max. Korrelationskoeffizient >0.9



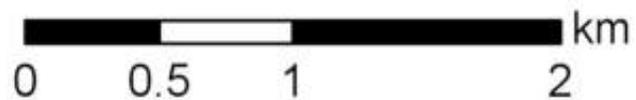
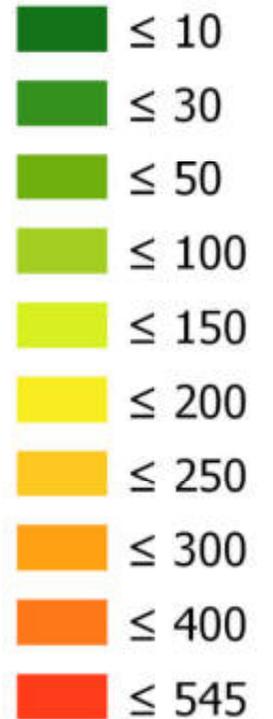
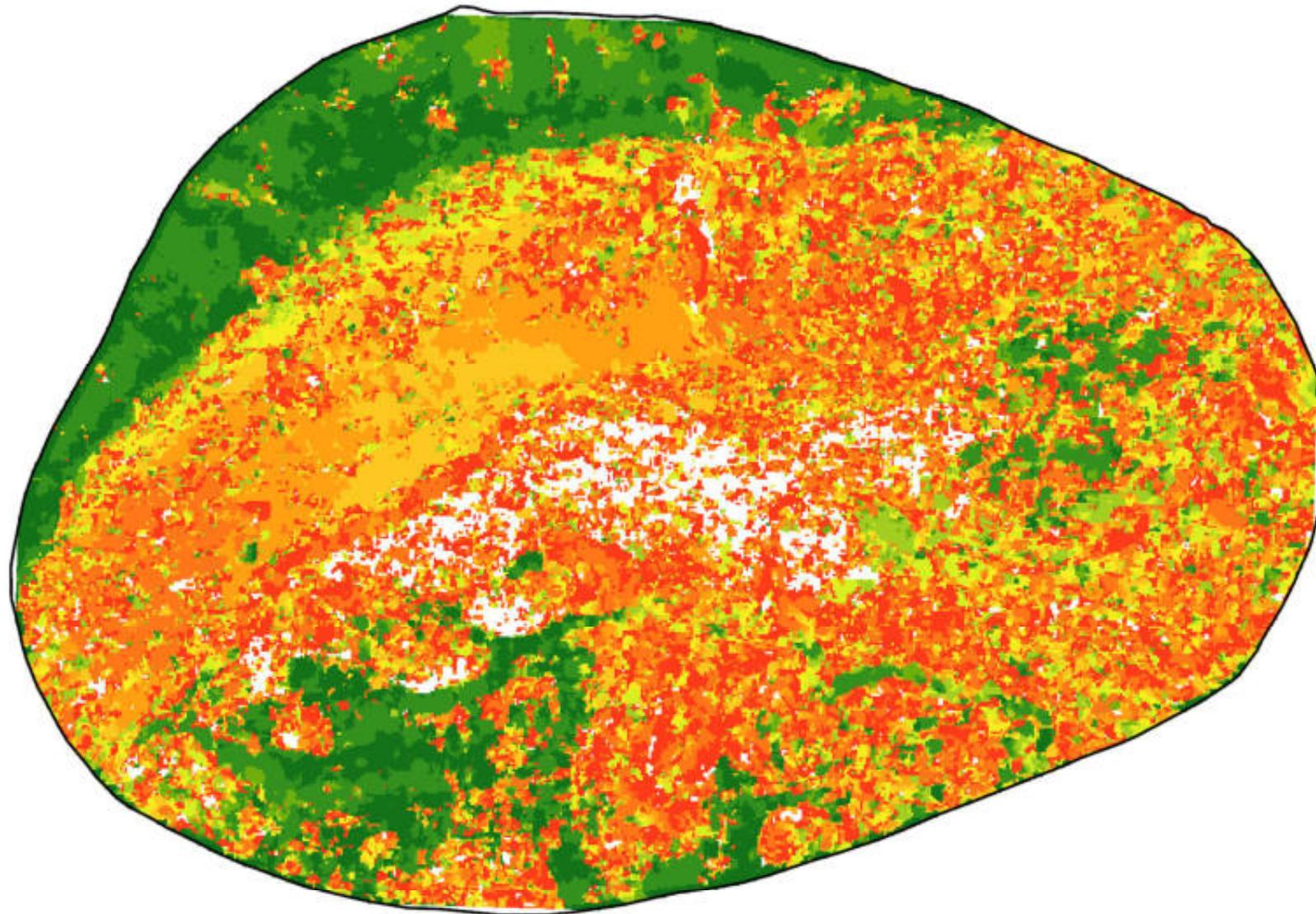
Ermittelte Bodenverschiebungen zwischen 2016 und 2017



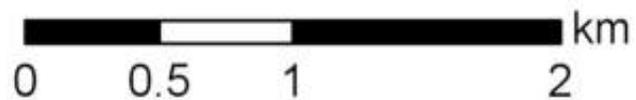
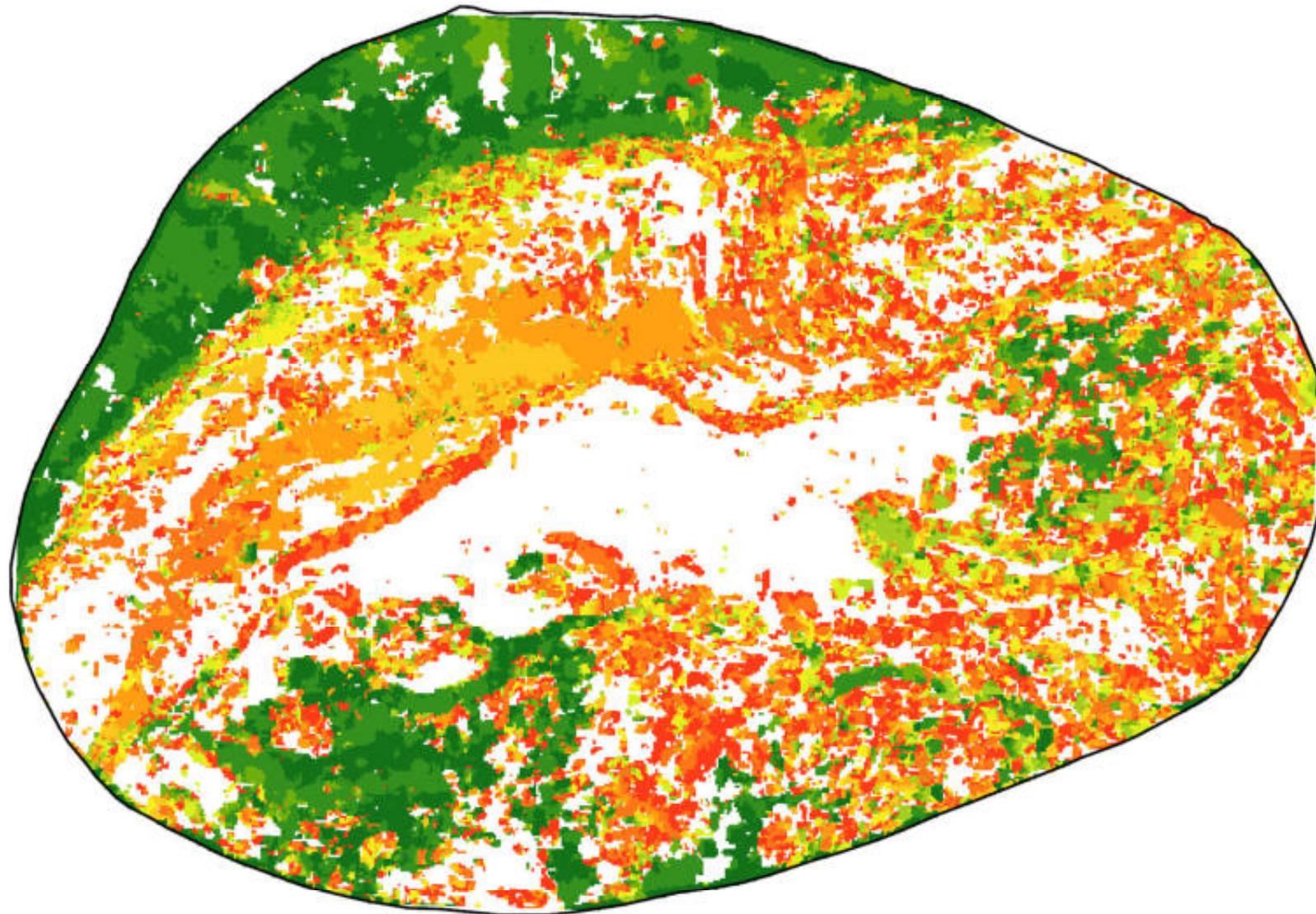
Variante 1: kein Filter



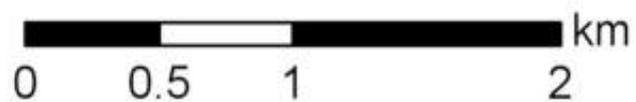
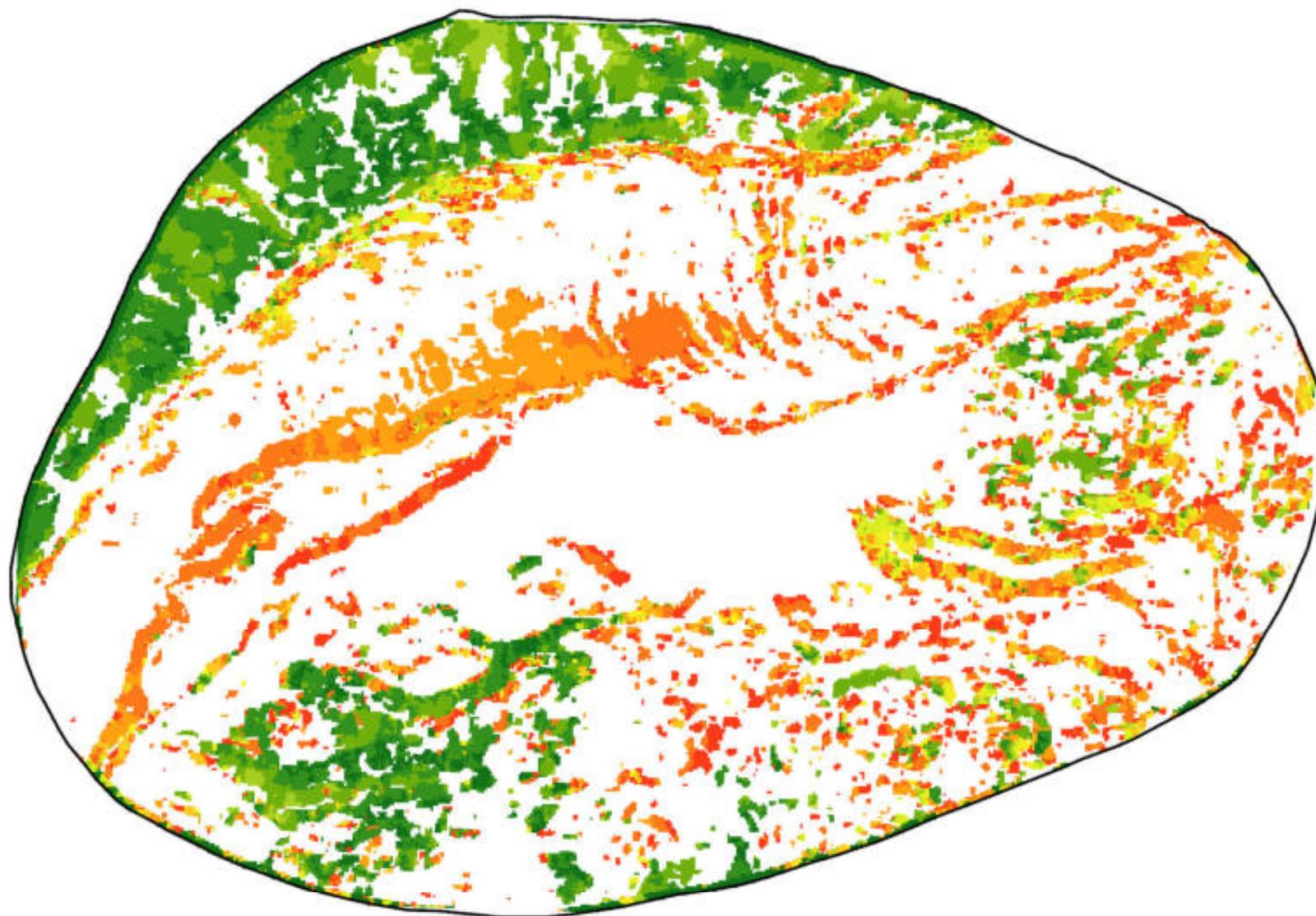
Variante 2: max. Länge 545m und max. Korrelationskoeffizient >0.6



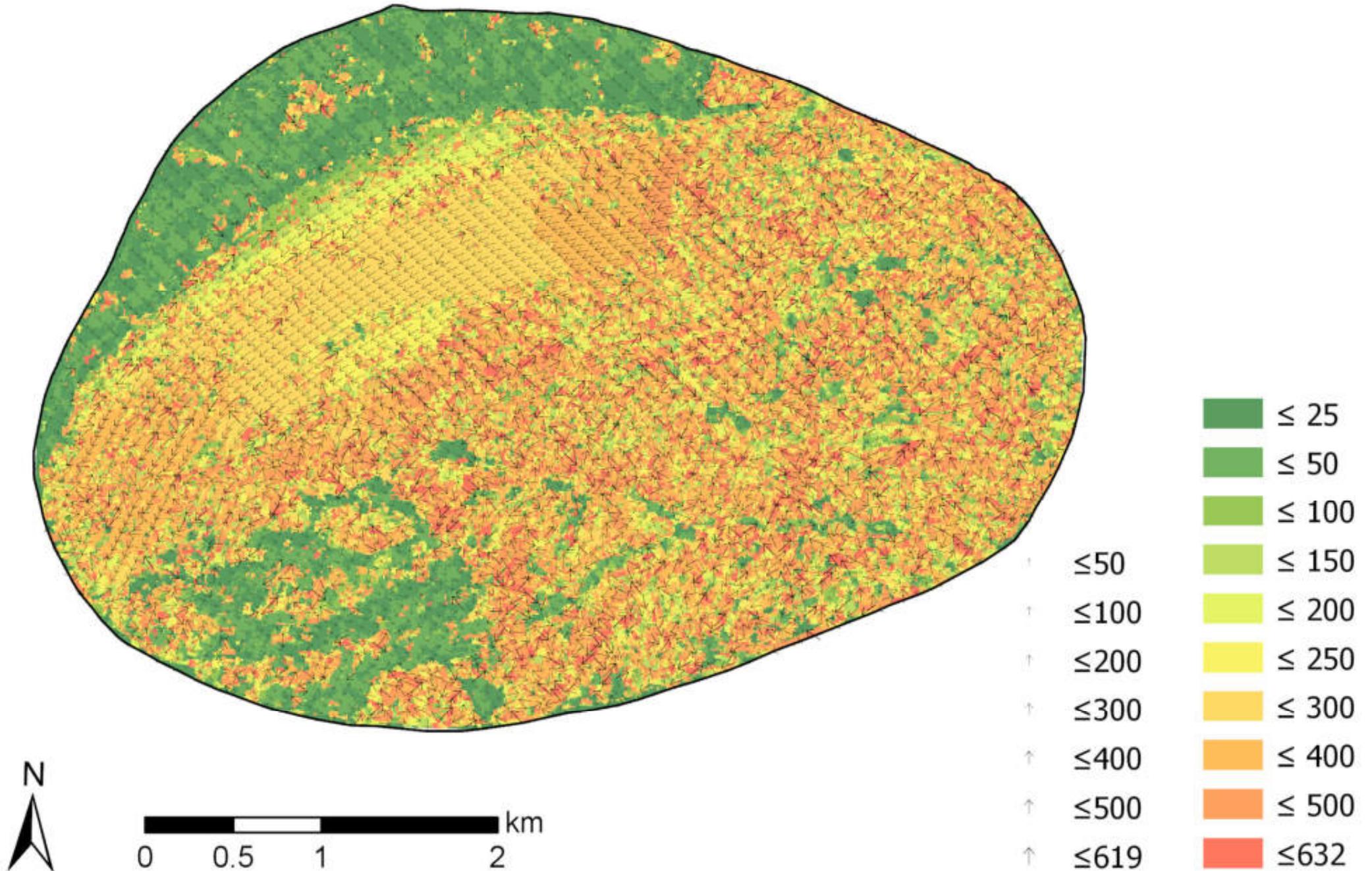
Variante 3: max. Länge 545m und max. Korrelationskoeffizient >0.8



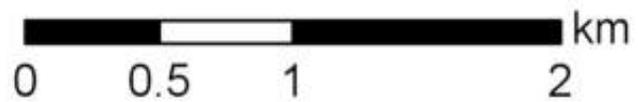
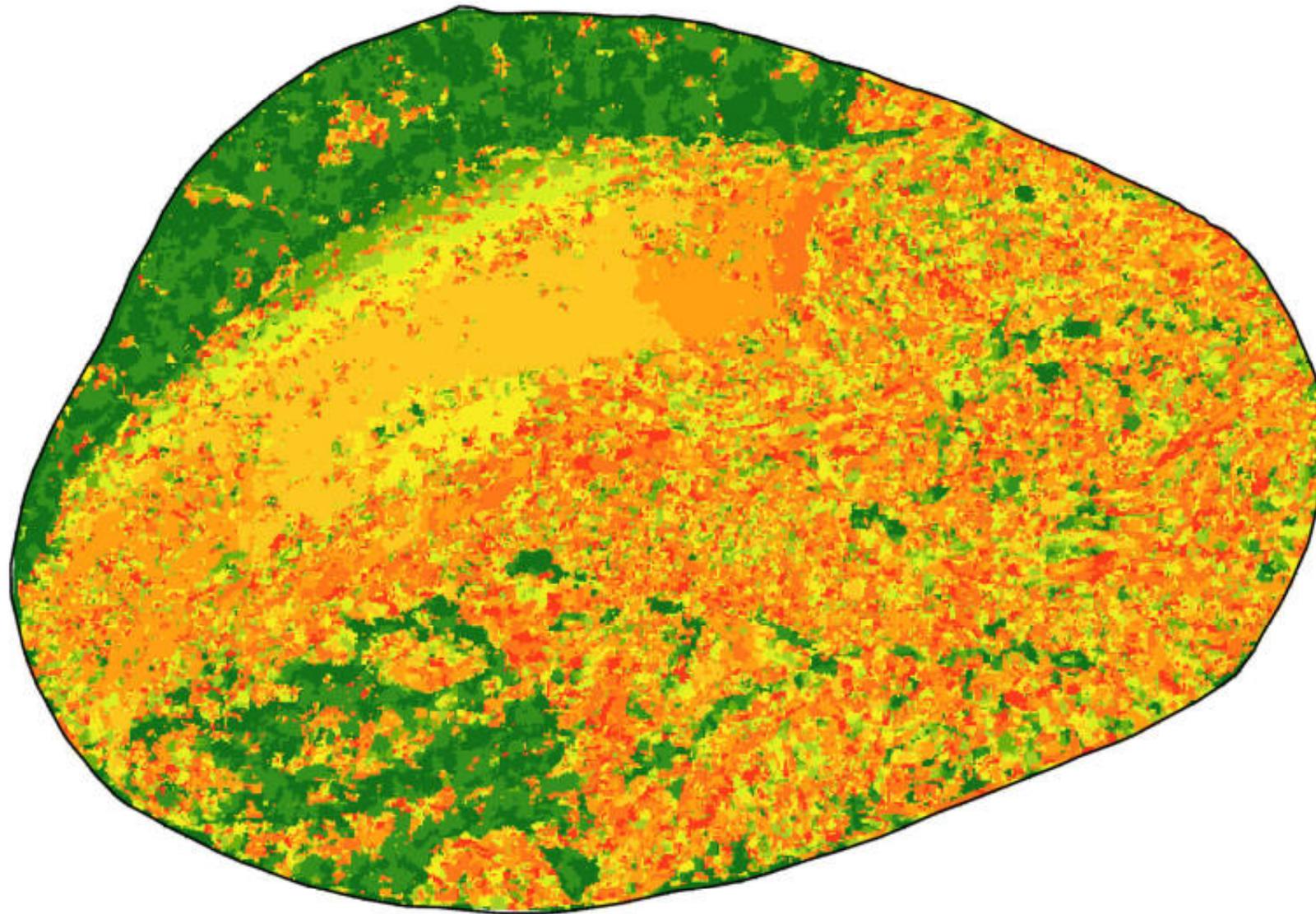
Variante 4: max. Länge 545m und max. Korrelationskoeffizient >0.9



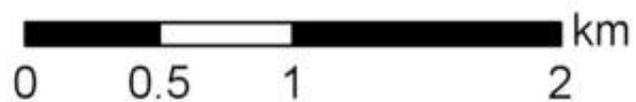
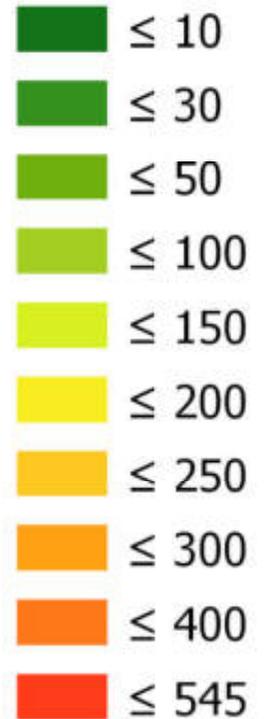
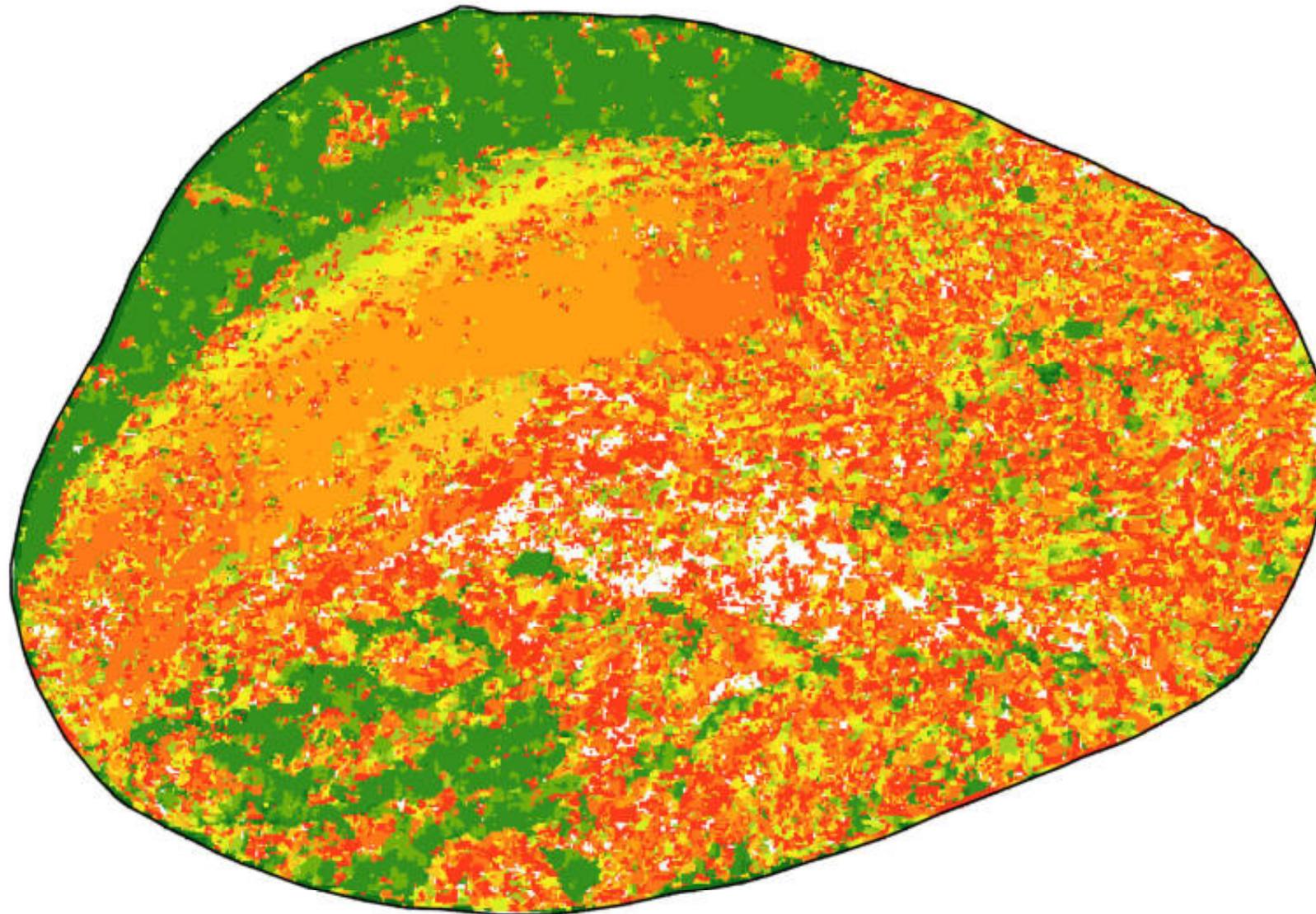
Ermittelte Bodenverschiebungen zwischen 2017 und 2018



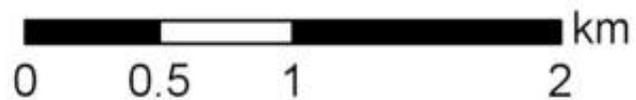
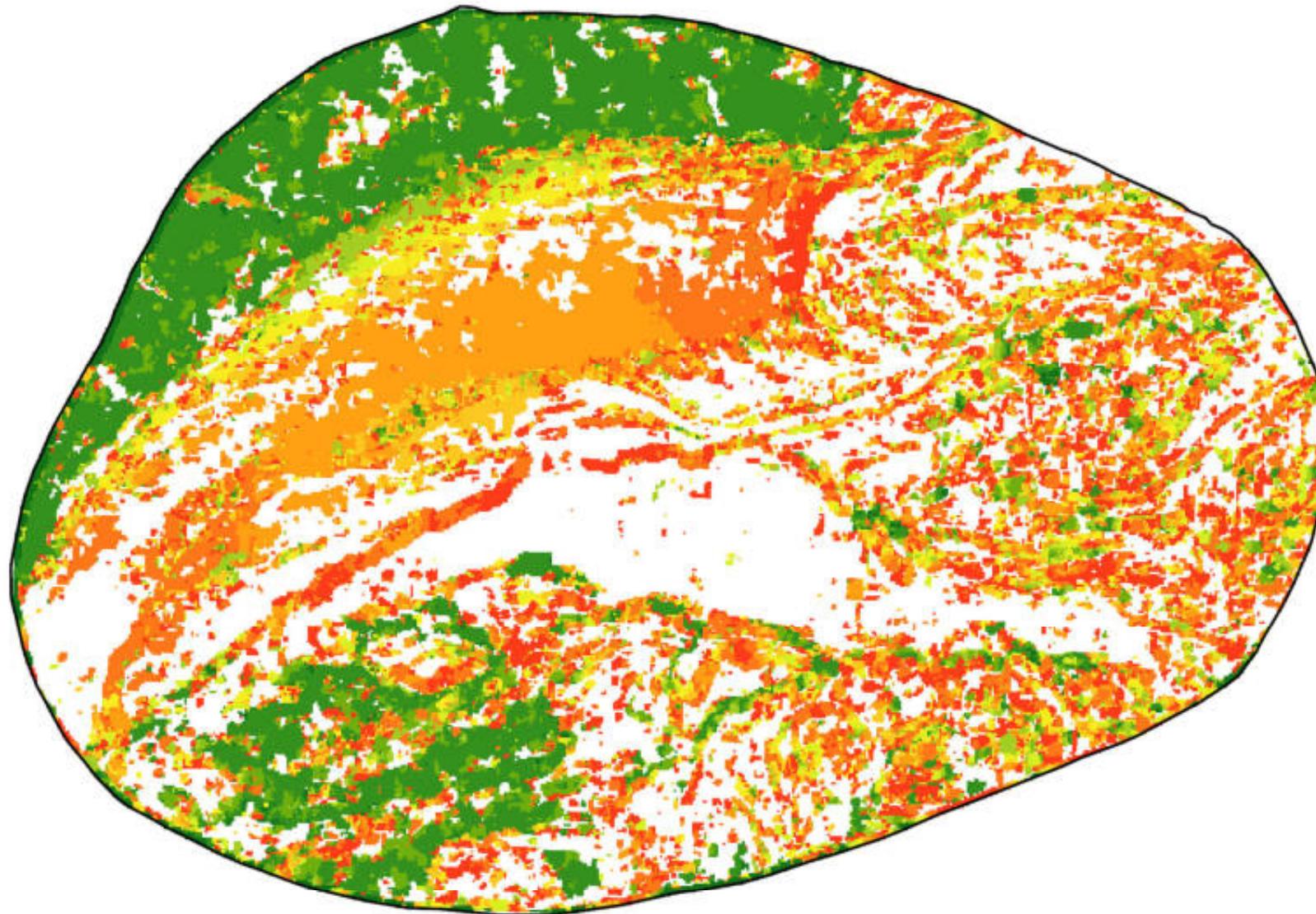
Variante 5: kein Filter



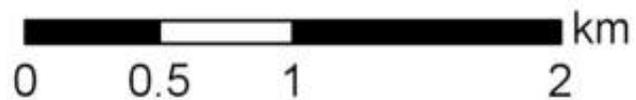
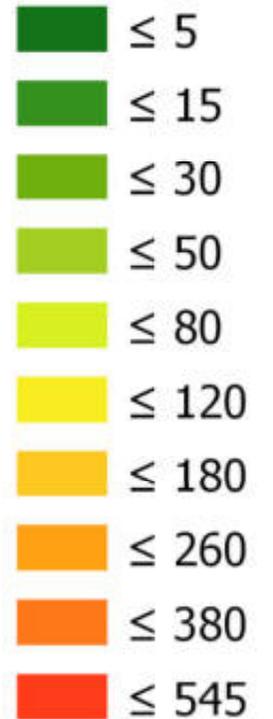
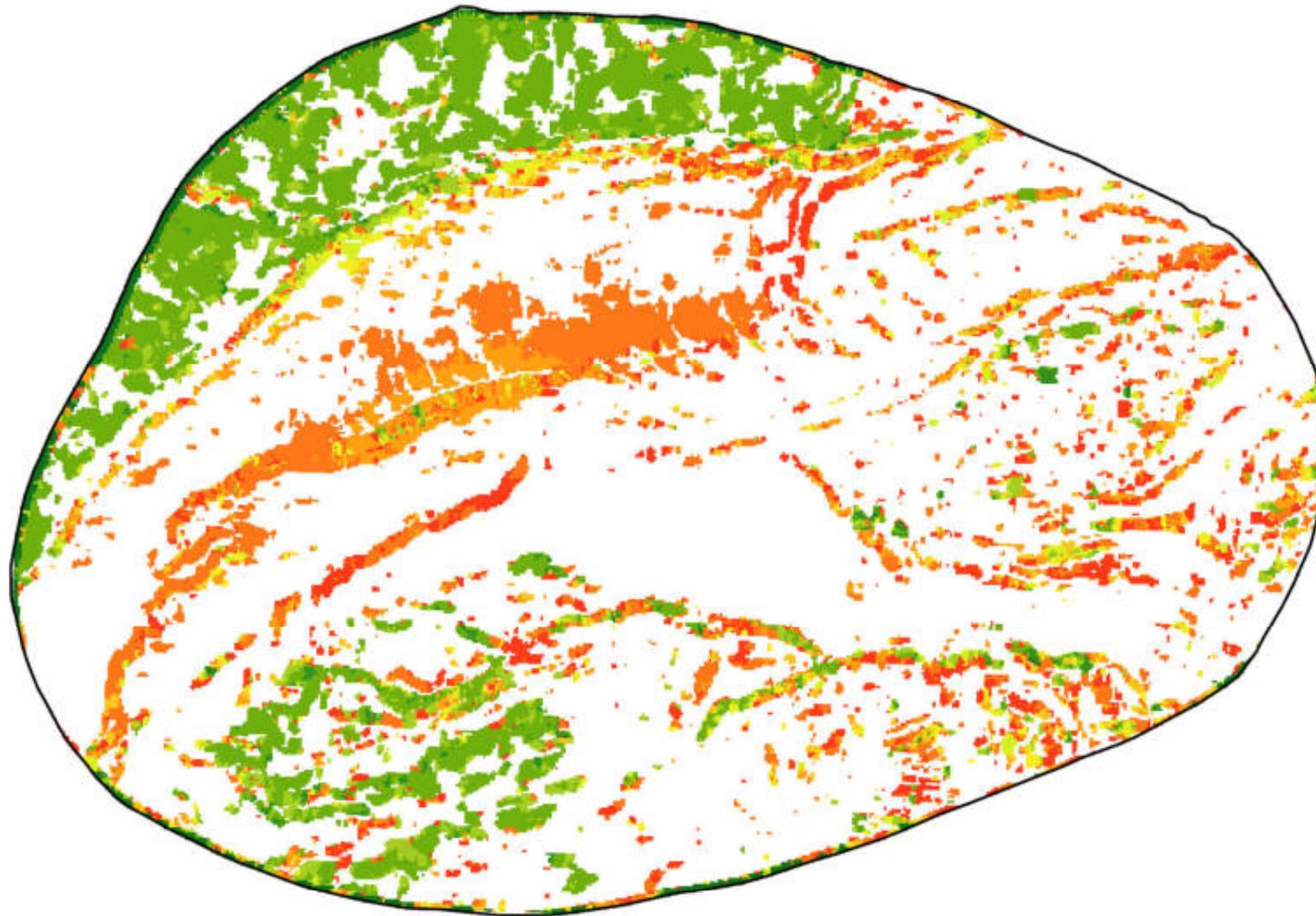
Variante 6: max. Länge 545m und max. Korrelationskoeffizient >0.6



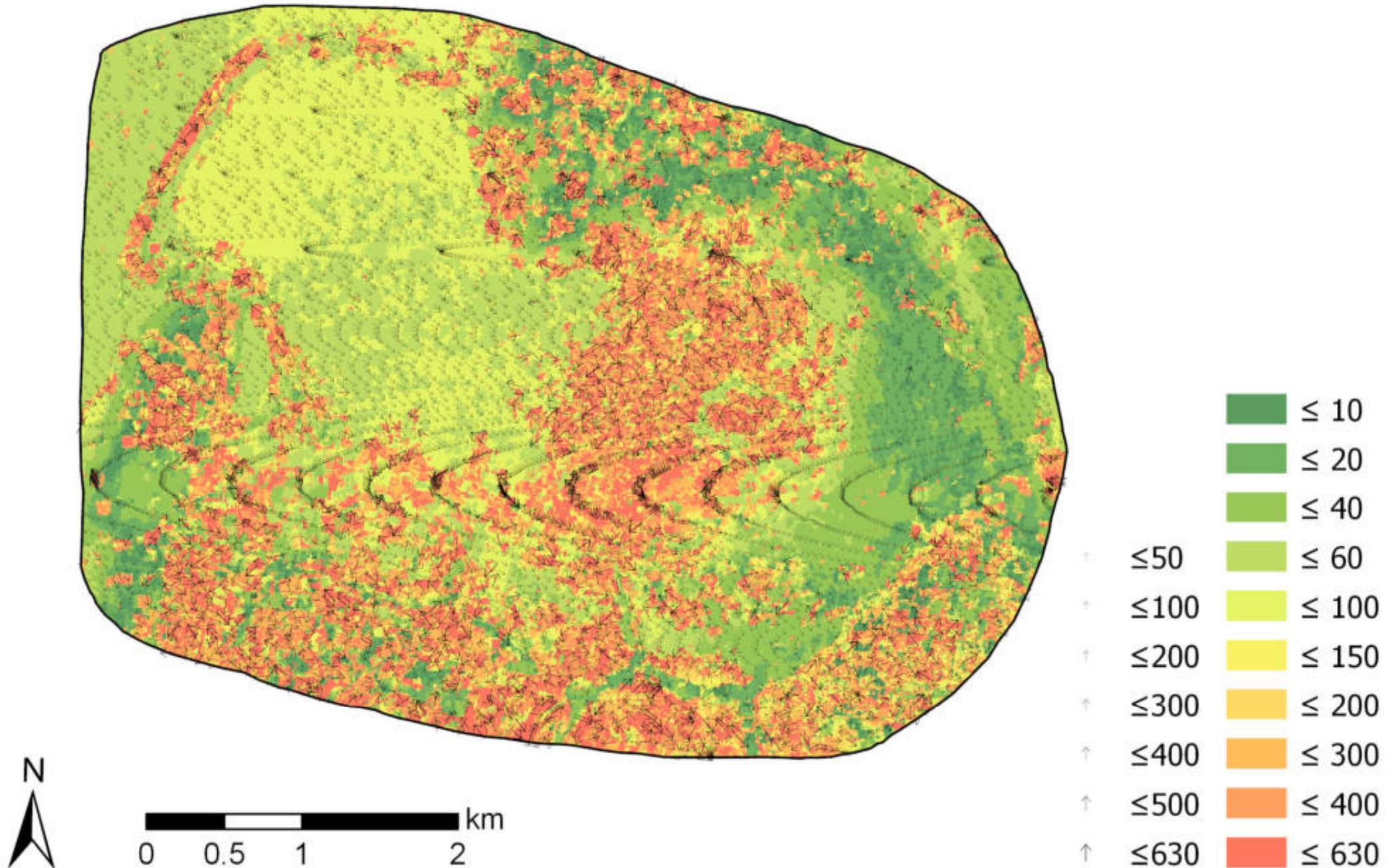
Variante 7: max. Länge 545m und max. Korrelationskoeffizient >0.8



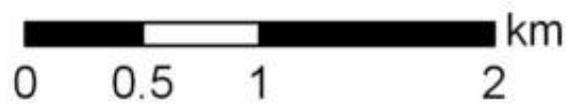
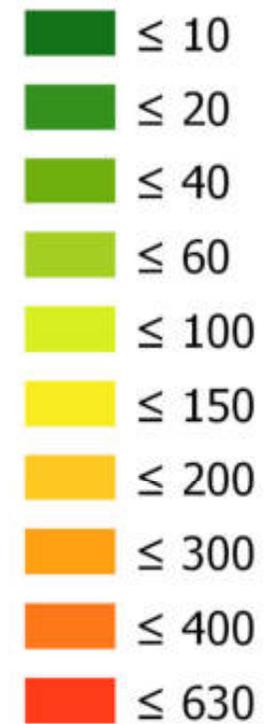
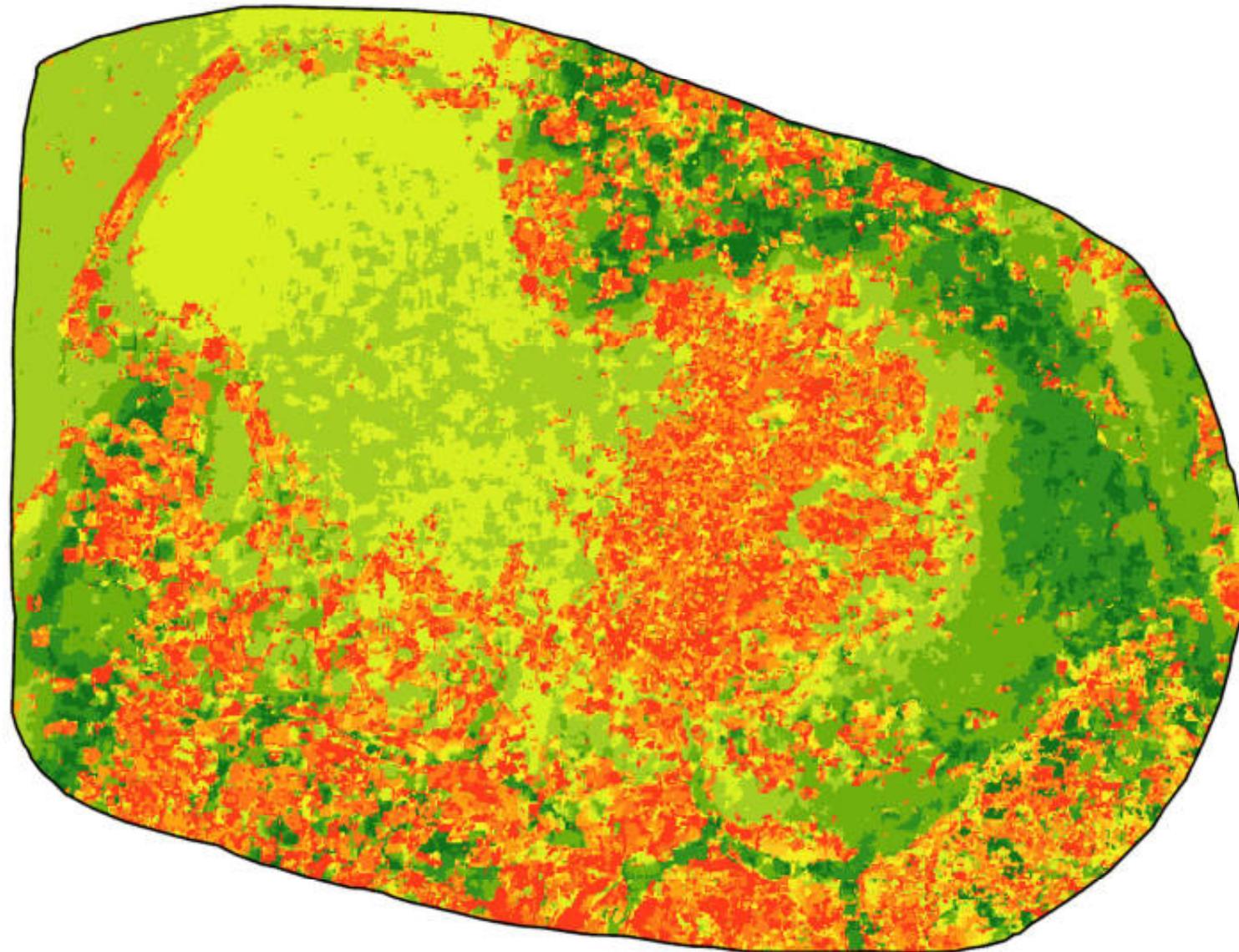
Variante 8: max. Länge 545m und max. Korrelationskoeffizient >0.9



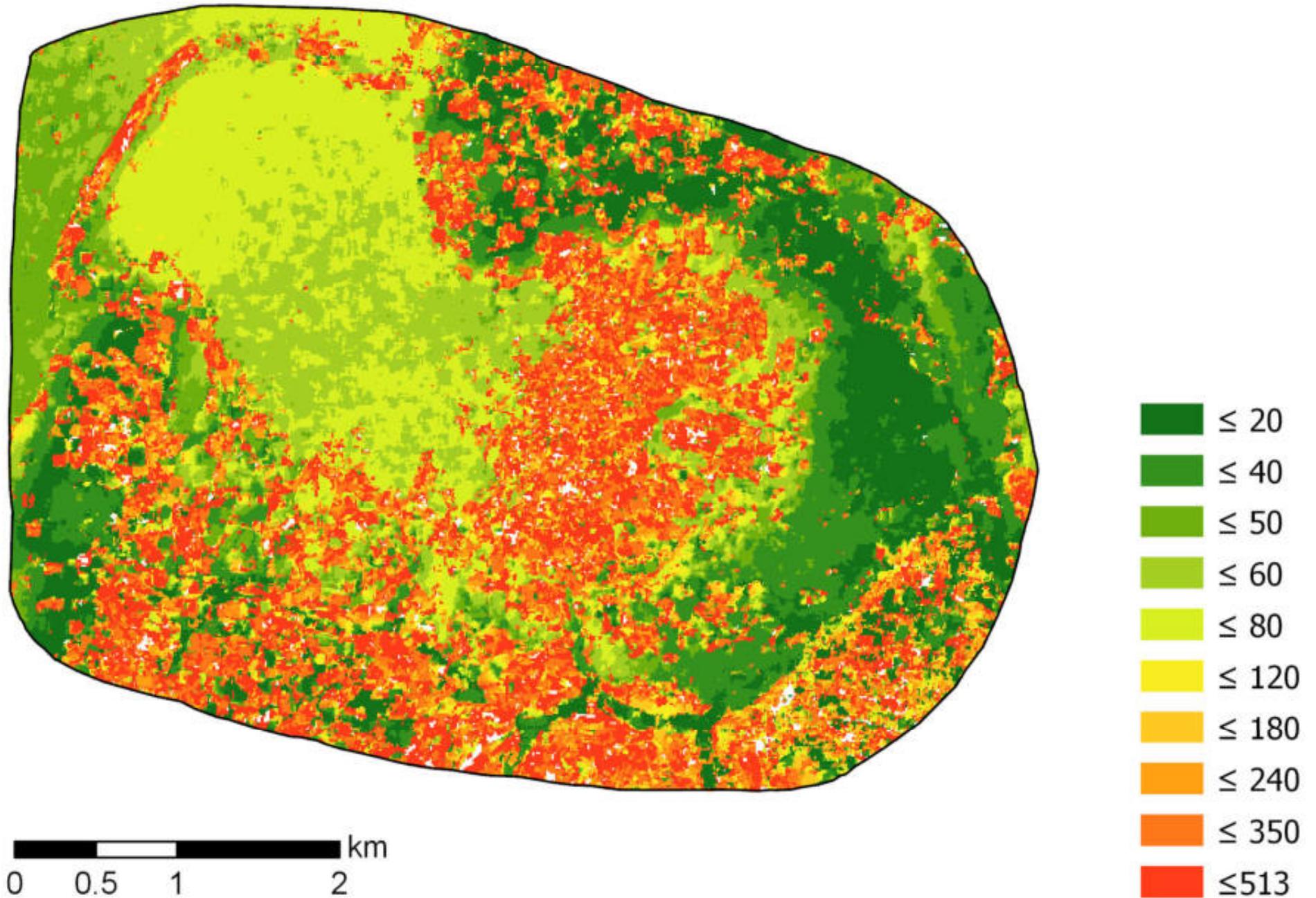
Ermittelte Bodenverschiebungen zwischen 26.07.2017-12.08.2017



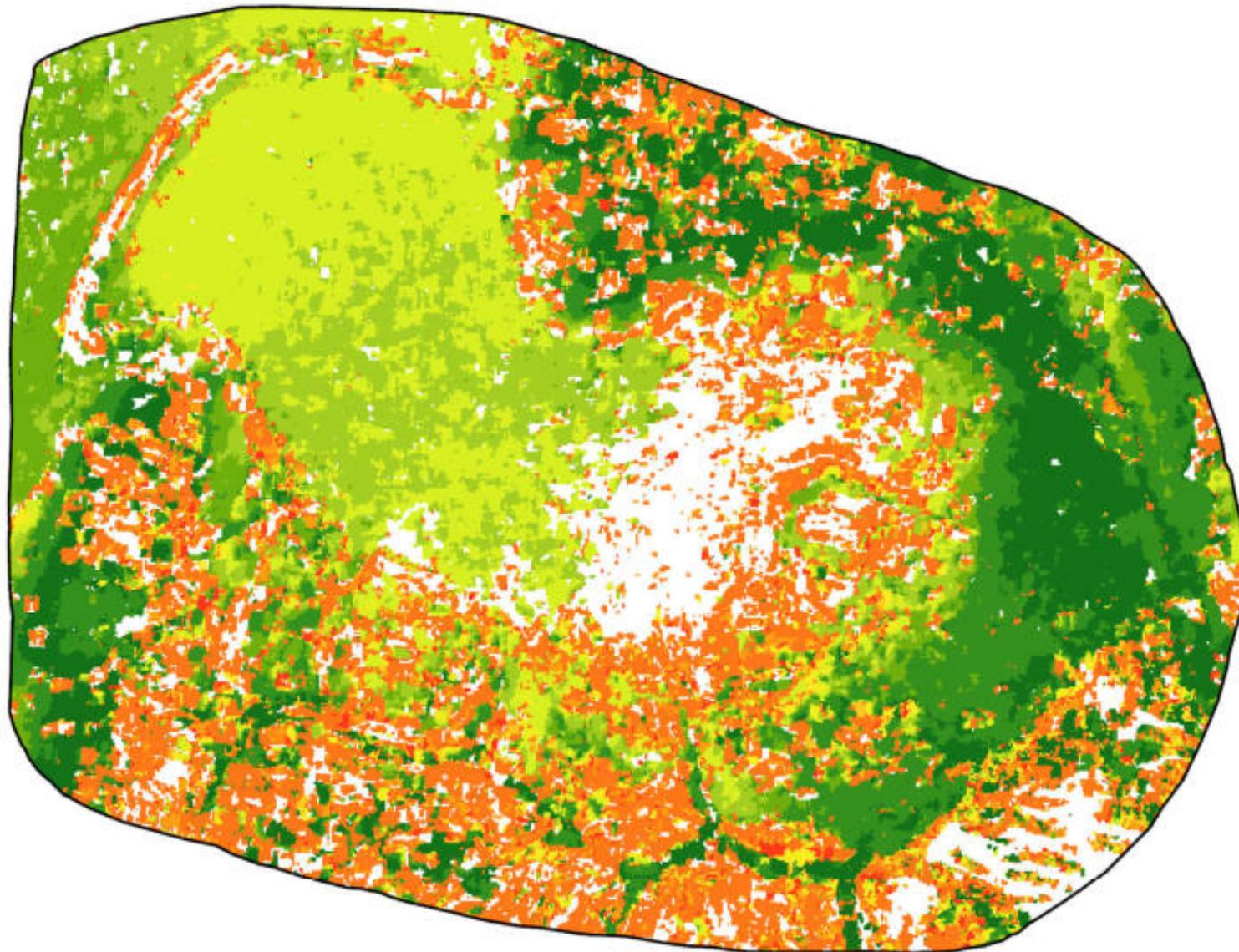
Variante 1: kein Filter



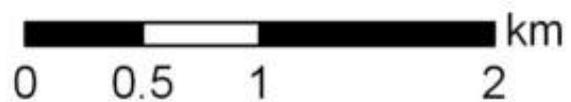
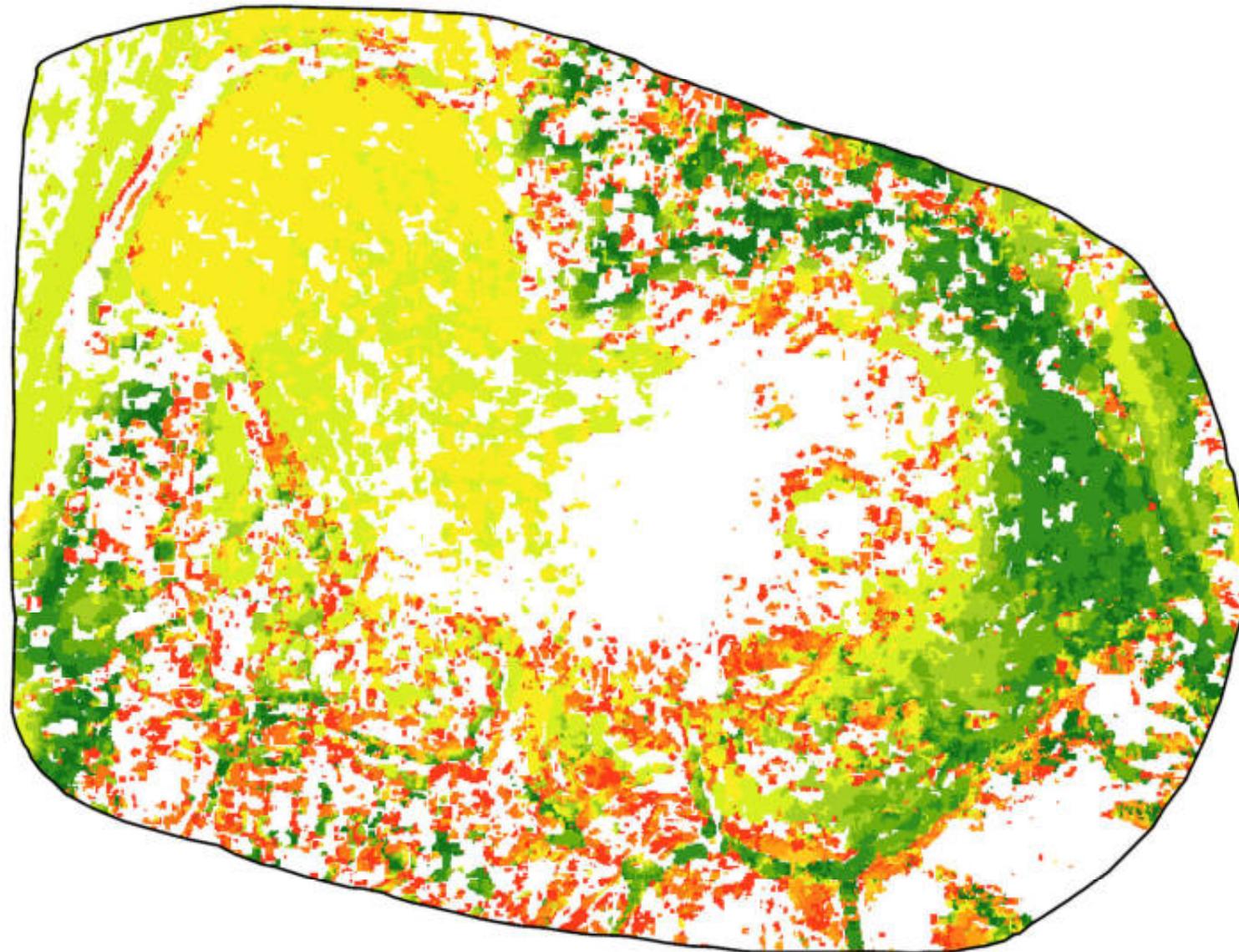
Variante 2: max. Länge 513m und max. Korrelationskoeffizient >0.6



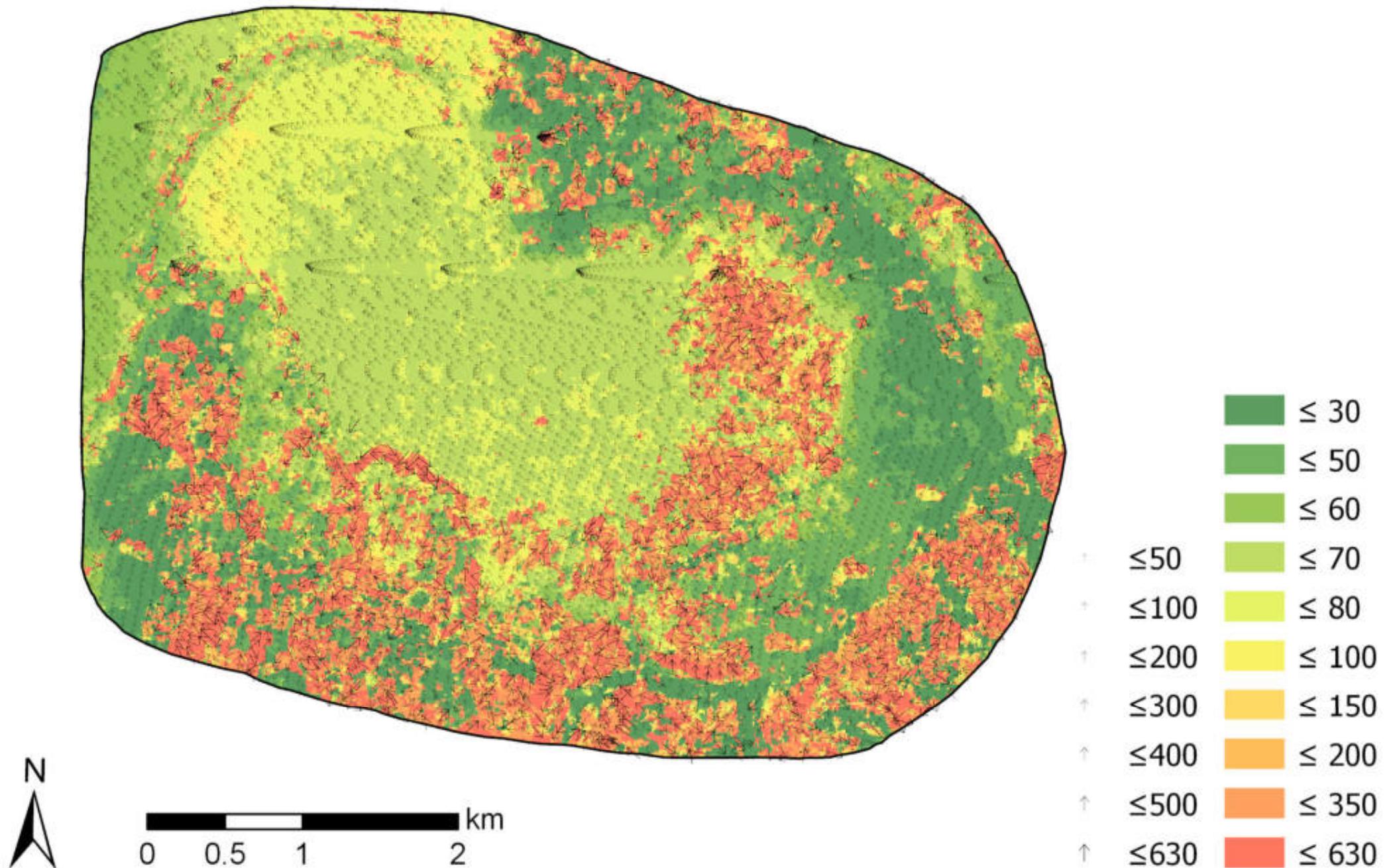
Variante 3: max. Länge 513m und max. Korrelationskoeffizient >0.8



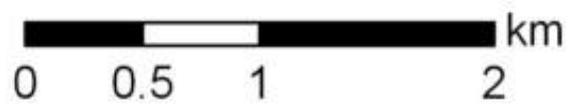
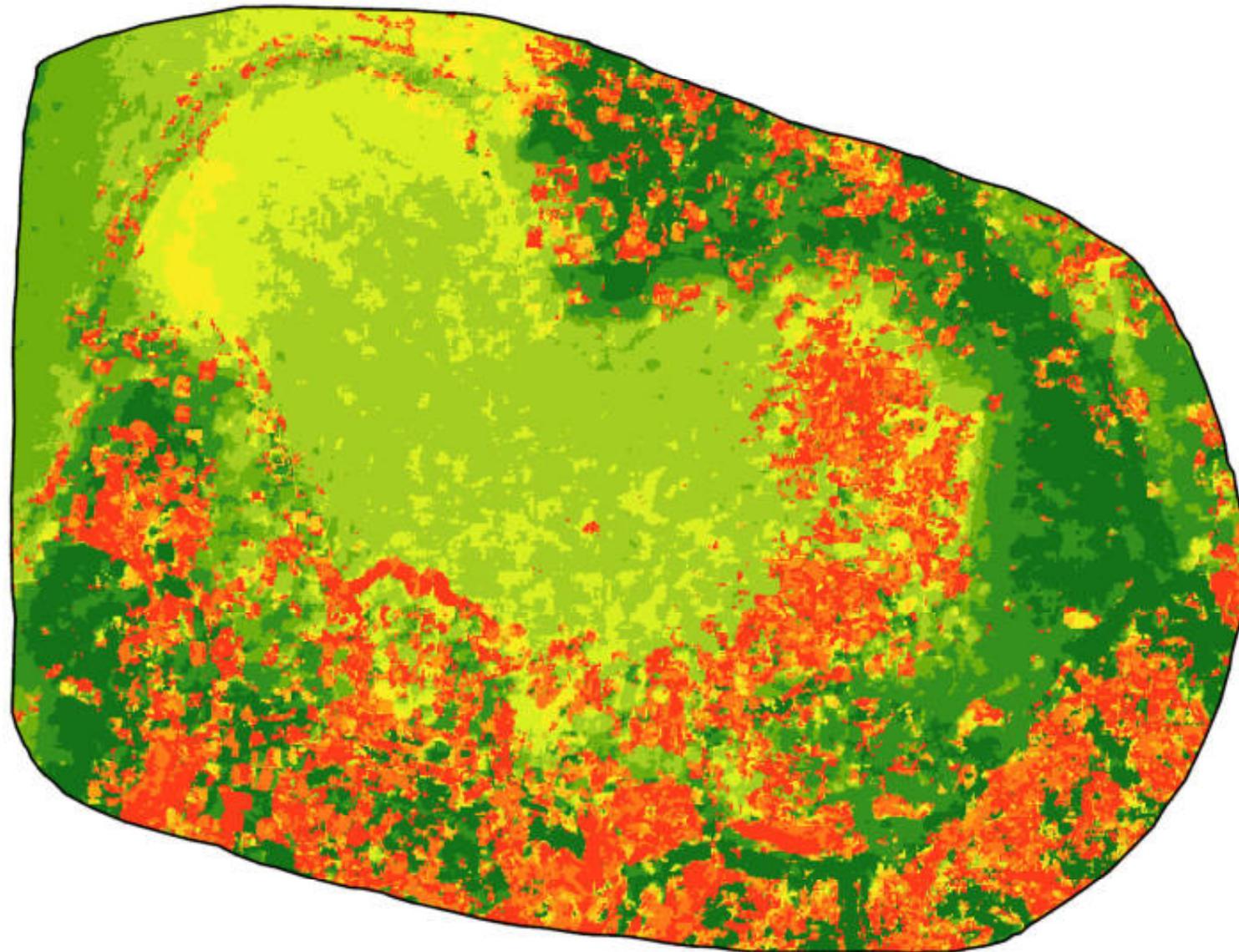
Variante 4: max. Länge 513m und max. Korrelationskoeffizient >0.9



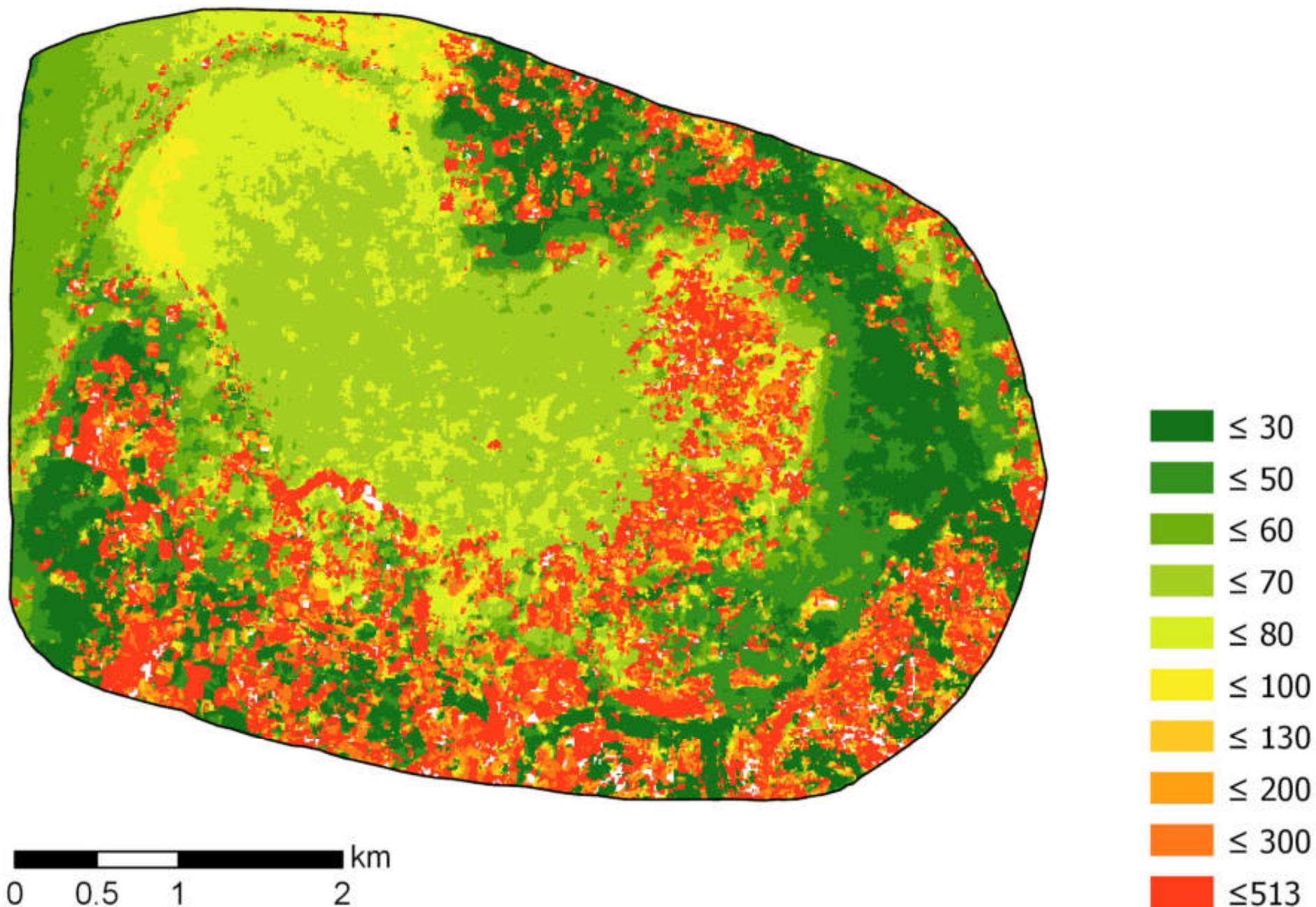
Ermittelte Bodenverschiebungen zwischen 12.08.2017-30.08.2017



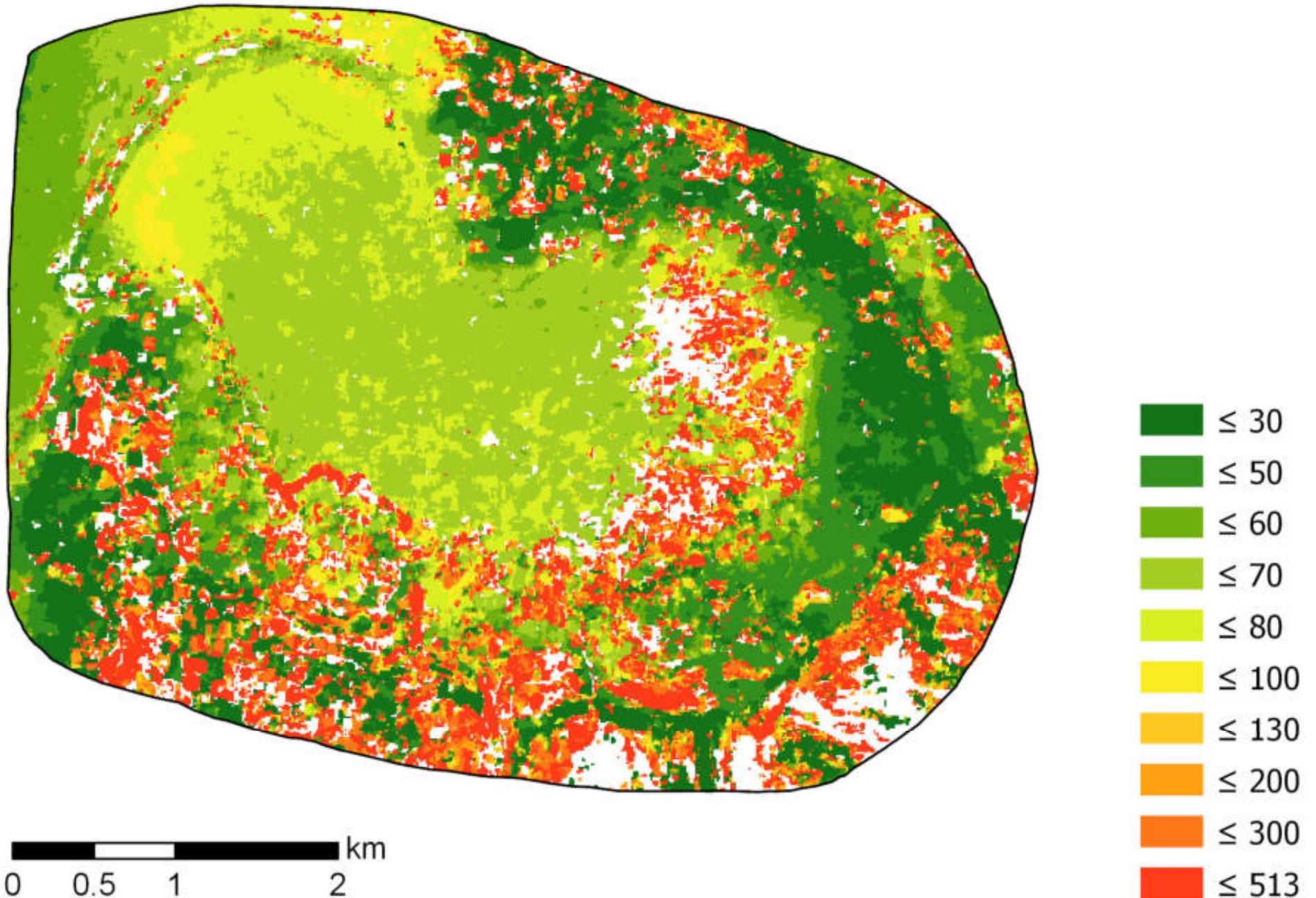
Variante 5: kein Filter



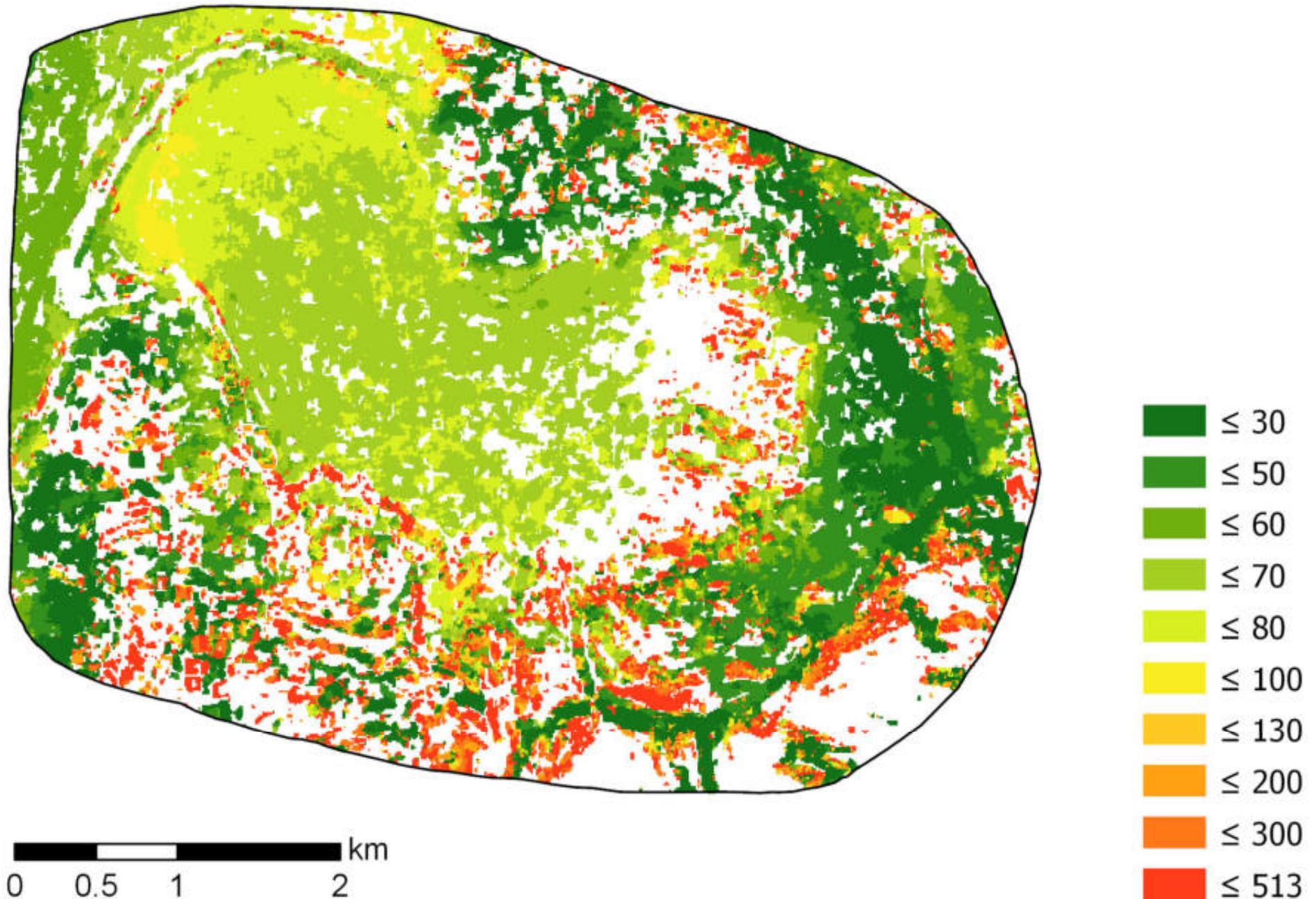
Variante 6: max. Länge 513 und max. Korrelationskoeffizient >0.6



Variante 7: max. Länge 513 und max. Korrelationskoeffizient >0.8



Variante 8: max. Länge 513 und max. Korrelationskoeffizient >0.9



Themenvorschlag für die UNIGIS MSc Master Thesis

Name: Cédric Reymond

TeilnehmerID: 104872

Arbeitstitel	
	Messung von Bodenverschiebungen durch Fernerkundung: Eine Anwendung am Öraefajökul-Vulkan mit multi-temporalen Bildkorrelation von Sentinel-2-Daten
Themenfeld / Relevanz / Literaturüberblick	
	<p>Gravitative Massenbewegungen stellen in Bergregionen ein bedeutendes Naturrisiko für Personen, Siedlungsgebiete und Infrastrukturanlagen dar. Der aktuelle Klimawandel bewirkt steigende Temperaturen sowie veränderte Niederschlagsverhältnisse, was zu Verschiebungen der geomorphodynamischen Gleichgewichte führt, die häufigere und intensivere Massenbewegungsprozesse zur Folge haben (Rebetez et al., 1997). Zusätzlich nimmt das Risikopotential durch den steigenden Siedlungsdruck in den Bergregionen zu. Das Monitoring dieser Naturgefahren, mit einer akkuraten räumlichen und zeitlichen Auflösung, ist daher wichtiger Bestandteil eines Risikomanagements (Le Bivic et al., 2017).</p> <p>Gegenwärtig werden die meisten Techniken zum Überwachen von Bodenverschiebungen von terrestrischen Referenzstationen abgeleitet. Dabei sind die konventionelle Geodäsie durch Triangulation- und Tachymetrie-Messungen oder Extensometrie-Techniken, zusammen mit GPS-Untersuchungen, die am häufigsten verwendeten (Delacourt et al., 2009; Leprince et al., 2007). Feldmessungen sind aufgrund der oft schwer zugänglichen Lage mühsam oder gar gefährlich. Zudem sind grossflächige und komplexe Bruchgrenzen im Gelände nicht einfach zu erkennen und können oft nur an einer begrenzten Anzahl an Standorten gemessen werden (Le Bivic et al., 2017; Rosu et al., 2015).</p> <p>Die Fernerkundung kann dabei als weitere Methodik dienen, die die zuvor erwähnten Methoden ergänzen oder in Zukunft substituieren könnte. Die zunehmende Anzahl an (frei) verfügbaren Sammlungen von multi-temporalen und hochauflösenden weltraumgestützten, luftgetragenen oder terrestrischen Bildern und die Verbesserung der Fernerkundung und Bildverarbeitung im</p>

Allgemein haben sie ein grosses Potential (Stumpf et al., 2017; Debella-Gilo und Käab, 2011; Delacourt et al., 2009). Die Fernerkundung liefert eine synoptische Ansicht eines Erdbebens, das in unterschiedlichen Zeitintervallen wiederholt und auf unterschiedlichen Skalen (von der individuellen Erdbeben- bis zu regionalen Massstabsbeobachtung) angewendet werden kann (Le Bivic et al., 2017; Delacourt et al., 2009).

Hauptsächlich wird zwischen Aufnahmemethoden mit aktiven oder passiven Sensoren, nämlich der differentiellen SAR-Interferometrie (InSAR) oder der digitalen Bildkorrelation unterschieden. Beide Fernerkundungsmethoden können grossflächige Gebiete abdecken. Verglichen mit passiven Sensoren, kann die InSAR-Technik bei allen Wetterbedingungen und auch in der Nacht verwendet werden. Sie hat sich als geeignete Methode beim Monitoring von sehr langsamen Bodenverschiebungen (weniger als 1 Meter pro Jahr) erwiesen (Stumpf et al., 2017). Jedoch ist diese Technik bei rascher fortschreitenden Massenbewegungen nicht in der Lage, Verschiebungsrichtungen im radiometrischen Nahfeld - also bei der Eruptionsquelle - festzustellen, da die grossen Amplituden der in diesem Bereich vorhandenen Verschiebungen eine Dekorrelation der interferometrischen Phase verursachen und so in diesem Bereich Ergebnisse mit niedriger Auflösung resultieren (Rosu et al., 2015). Optische Fernerkundungsmethoden können, aufgrund der passiven Sensoren, auch die Verschiebungen an der Eruptionsquelle erfassen (Rosu et al., 2015). In den letzten Jahren ist die Anzahl an verfügbaren hochauflösenden Satellitenbildern (z.B. Landsat 8, SPOT-6 und -7, Pléiades, Sentinel-2) exponentiell gewachsen und decken heute nahezu jeden Erdteil mit einer hohen zeitlichen Auflösung ab (Stumpf et al., 2017; Le Bivic et al., 2017).

Bei der digitalen Bildkorrelation werden auf zwei an unterschiedlichen Zeitpunkten aufgenommenen und orthorektifizierten Bildern die Verschiebungsfehler gemessen. Die Empfindlichkeit des Verschiebungsfehlers kann durch die Korrelation von Subpixeln zusätzlich erhöht werden (Le Bivic et al., 2017). Delacourt et al. (2004) konnte aufzeigen, dass zur Bildkorrelation auch Satellitenbilder und terrestrische Aufnahmen kombiniert werden können, sofern die Orthorektifizierung eine genügend hohe Genauigkeit aufweist. Die Qualität des Ergebnisses hängt laut Stumpf et al. (2014) neben der räumlichen Auflösung des Bildes, stark von der Genauigkeit der Orthorektifizierung ab, die ein digitales Höhenmodell mit einer ähnlichen räumlichen Auflösung, wie die zu korrelierenden Bildern erfordert. Orthorektifizierte Satellitendaten können heutzutage sehr einfach, günstig und manchmal auch kostenfrei bezogen werden. Zudem ist es der wissenschaftlichen Gemeinschaft zu verdanken, dass inzwischen verschiedene Open-Source Bildverarbeitungsprogramme mit Korrelationsfunktionen zu Verfügung stehen (Le Bivic et al., 2017).

Forschungsleitziel und operative Teilschritte

Das Forschungsziel dieser Masterarbeit ist die Messung von Bodenverschiebungen durch Fernerkundung mit frei verfügbaren Satellitendaten. Dafür wird eine multi-temporale Bildkorrelation von Sentinel-2-Daten über den Zeitraum von 2015-2017 um den Vulkan Öraefajökul durchgeführt, sowie die erhaltenen Ergebnisse untersucht und diskutiert.

Um das Forschungsziel zu erreichen, werden folgende operative Teilziele verfolgt:

- Suchen und Sammeln von brauchbaren Sentinel-2-Zeitreihen über den Zeitraum 2015-2017.
- Evaluatation der für den Anwendungszweck geeignetsten Open-Source Bildverarbeitungssoftware aus CIAS, COSI-corr und MicMac.
- Durchführung einer digitalen Subpixel-Bildkorrelation nach Stumpf et al. (2017) mit dem gewählten Bildverarbeitungsprogramm.
- Bewertung der Plausibilität der Ergebnisse durch eine „*Image Control Points*“-Analyse nach Le Bivic et al. (2017).
- Diskussion der Ergebnisse und Vergleich mit wissenschaftlicher Literatur zu ähnlichen Arbeiten.

Methodischer Ansatz / Techniken / Werkzeuge / Daten

Die von Stumpf et al. (2017) erfolgreich in den französischen Alpen durchgeführte Methodik einer Subpixel-Bildkorrelation wird auf das Untersuchungsgebiet des isländischen Vulkans Öraefajökul übertragen. Im Gegensatz zu Stumpf et al. (2017) werden nicht Pléiades sondern Sentinel-2 Satellitendaten verwendet. Diese weisen zwar eine geringere räumliche Auflösung auf, sind dafür jedoch über das Copernicus-Programm frei erhältlich.

Die Bildkorrelation wird mit einer Open-Source-Software ausgeführt. Da Stumpf et al. (2017) in ihrer Arbeit diesbezüglich keine Empfehlungen abgeben, werden die drei Softwareprodukte CIAS, COSI-corr und MicMac mithilfe erhältlicher Literatur und einem ersten Testing ausgewertet und das für den Anwendungszweck geeignetste Produkt evaluiert.

Allenfalls ist für die Orthorektifizierung der Rasterdaten ein digitales Höhenmodell (ArcticDEM) nötig. Dieses sollte als Web-Download erhältlich sein. Kann aber auch bei Herrn Hölbling bezogen werden.

Feldarbeiten vor Ort sind nicht vorgesehen. Stattdessen wird für die Validierung der Ergebnisse eine „*Image Control Points*“-Analyse nach Le Bivic et al. (2017) durchgeführt.

Neben den im Rahmen des Studiums von der UNIGIS-Studiengangsleitung frei zur Verfügung gestellten lizenzpflichtigen Produkten wie ArcGIS, EndNote und MS Office, werden keine zusätzlichen kostenpflichtigen Softwareprodukte oder Daten benötigt.

Literaturliste

- Debella-Gilo, M. & Kääh, A. 2011. Sub-pixel precision image matching for measuring surface displacements on mass movements using normalized cross-correlation. *Remote Sensing of Environment*, 115, 130-142.
- Delacourt, C., Allemand, P., Casson, B. & Vadon, H. 2004. Velocity field of the "La Clapière" landslide measured by the correlation of aerial and QuickBird satellite images. *Geophysical Research Letters*, 31, L15619 1-5.
- Delacourt, C., Raucoules, D., Le Mouélic, S., Carnec, C., Feurer, D., Allemand, P. & Cruchet, M. 2009. Observation of a Large Landslide on La Reunion Island Using Differential Sar Interferometry (JERS and Radarsat) and Correlation of Optical (Spot5 and Aerial) Images. *Sensors*, 9, 616.
- Le Bivic, R., Allemand, P., Quiquerez, A. & Delacourt, C. 2017. Potential and Limitation of SPOT-5 Ortho-Image Correlation to Investigate the Cinematics of Landslides: The Example of "Mare à Poule d'Eau" (Réunion, France). *Remote Sensing*, 9, 106.
- Leprince, S., Barbot, S., Ayoub, F. & Avouac, J.P. 2007. Automatic and precise orthorectification, coregistration, and subpixel correlation of satellite images, application to ground deformation measurements. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 45, 1529-1558.
- Rebetez, M., Lugon, R. & Baeriswyl, P.-A. 1997. Climatic change and debris flows in high mountain regions: The case study of the Ritigraben Torrent (Swiss Alps). *Climatic Change*, 36, 371-389.
- Rosu, A.M., Pierrot-Deseilligny, M., Delorme, A., Binet, R. & Klinger, Y. 2015. Measurement of ground displacement from optical satellite image correlation using the free open-source software MicMac. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 100, 48-59.
- Stumpf, A., Malet, J.P., Allemand, P. & Ulrich, P. 2014. Surface reconstruction and landslide displacement measurements with Pléiades satellite images. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 95, 1-12.
- Stumpf, A., Malet, J.P. & Delacourt, C. 2017. Correlation of satellite image time-series for the detection and monitoring of slow-moving landslides. *Remote Sensing of Environment*, 189, 40-55.

Partner / Anwendung

Die offizielle Betreuung der Arbeit wird durch Herrn Dr. Dirk Tiede (dirk.tiede@sbg.ac.at) übernommen. Für die Co-Betreuung und als inhaltliche Ansprechperson hat sich Herr Daniel Hölbling (daniel.hoelbling@sbg.ac.at) zur Verfügung gestellt.

Das Thema wurde von Herrn Hölbling und Herrn Tiede auf <https://zgis-theses.blogspot.ch> vorgestellt und ist im Rahmen des laufenden Forschungsprojekts MORPH (Mapping, Monitoring and Modelling the Spatio-Temporal Dynamics of Land Surface Morphology) entstanden (<http://morph.zgis.at/>). Projektdauer: 11/2016 – 10/2019.

Rahmenbedingungen / Risiken

Das grösste Risiko besteht aus meiner Sicht darin, dass neben den verbleibenden Pflichtmodulen, Wahlpflichtfächern und natürlich dem Beruf genügend Zeit bleibt, um sich ausreichend mit der Masterarbeit auseinanderzusetzen, damit bereits am Master Thesis Workshop erste Ergebnisse präsentiert werden können. → Als Massnahme wird bis zum Workshop ein zusätzlicher wöchentlicher Jourfix für die Masterarbeit eingerichtet.

Zeitplan

- Forschungsfrage 4/2018
- **Themenvorschlag eingereicht 1.05.2018**
- Methodik festlegen und Datenbeschaffung 6/2018
- Empirische Arbeit 9/2018
- **Workshop zur Master Thesis durchgeführt 27.09.2018**
- Ergebnisse diskutieren 11/2018
- Manuskript/Darstellung/Verzeichnisse 02/2019
- Extended Abstract 03/2019
- Powerpoint-Präsentation 04/2019
- **Master Thesis eingereicht 01.07.2019**

Dieses Thema gilt auf Grundlage der vorliegenden Beschreibung als akzeptiert und an Sie vergeben sobald eine zustimmende Rückmeldung durch die Lehrgangslleitung bzw. Studienleitung erfolgt. Auf Ihren Vorschlag kann eine externe (Mit-)Betreuung der Arbeit vereinbart werden, bleiben Sie aber in jedem Fall auch laufend mit dem Lehrgangsteam in Kontakt. Die Bearbeitungsdauer der Master Thesis muss im Rahmen der Lehrgangsdauer liegen.

Datum und Unterschrift

22.04.2018,

