

**Automatisierte Erkennung von
tiefgreifenden gravitativen Hangdeformationen
mittels geomorphometrischer Analyse von
digitalen Geländemodellen**

Masterarbeit - GEO511

Am Geographischen Institut
der Universität Zürich

27.01.2017

Autor:

Andreas Ludwig (05-706-619)

Betreuer:

Prof. Dr. Ross Purves
(Abteilung Geocomputation)

Fakultätsvertretung:

Prof. Dr. Ross Purves

Zusammenfassung

Tiefgreifende gravitative Hangdeformationen (auch als «Sackungen» bezeichnet) stellen einen spezifischen Hanginstabilitätstyp dar, der durch eine grosse räumliche Ausdehnung und niedrige Deformationsraten (mm bis cm/Jahr) über lange Zeiträume (Jahrhunderte bis Jahrtausende) gekennzeichnet ist. In Gebirgsregionen wie den Alpen stellen sie einen verbreiteten Prozess dar, der häufig ganze Talflanken bis tief in den Felsuntergrund erfasst. Als Massenbewegungsprozess - mit internen und randlichen Deformationserscheinungen - hinterlassen tiefgreifende gravitative Hangdeformationen ihre Spuren in der alpinen Landschaft: «Abflachung von Talflanken»; kupiertes Gelände; grosse Morphostrukturen wie Anrissnischen oder talparallele «Nackentäler». Neben der Bedeutung für die Landschaftsentwicklung sind praktische Aspekte von Interesse (Infrastrukturschäden infolge von Deformationen, Gefährdung durch sekundäre, überlagernde Prozesse wie Felsstürze). Aus diesen Gründen werden «tiefgreifende gravitative Hangdeformationen» - wo erkannt - als Teil von geologischen Karten oder Naturgefahrenkarten erfasst.

In Anlehnung an verwandte Studien für andere Hanginstabilitätstypen untersucht die vorliegende Arbeit, inwiefern die Erkennung des Prozesses durch quantitative (geomorphometrische) Analysen von digitalen Geländemodellen und Methoden des maschinellen Lernens automatisiert werden kann.

Als Grundlage dienen die digitalen Geländemodelle 'DHM25' (25m Rasterauflösung) und 'swissALTI3D' (2m Rasterauflösung). Das Untersuchungsgebiet deckt die Kartenblätter 1214 (Illanz) und 1215 (Thusis) der Landeskarte 1:25'000 ab und kann als geologisch homogenes Gebiet («Bündnerschiefer» und ähnliche Formationen) aufgefasst werden, welches durch mehrere bekannte «tiefgreifende gravitative Hangdeformationen» gekennzeichnet ist (Lugnez / Val Lumnezia, Safiental, Heinzenberg).

Methodisch wird ein objekt-basierter Ansatz mit folgenden Schritten verfolgt: i) Berechnung von pixel-basierten geomorphometrischen Parametern (Hangneigung, «Rauigkeit mittels Eigenwert-Methode»); ii) Segmentierung des Geländes aufgrund geomorphometrischer Eigenschaften; iii) Berechnung von Segment-Deskriptoren / segment-basierte geomorphometrische Parameter; iv) Kalibrierung und Parametervalidierung des Klassifikationsmodells 'Random Forest'; v) Evaluation des Klassifikationsmodells in einem Testgebiet.

Dabei werden auch «prozessspezifische» geomorphometrische Parameter («richtungsabhängige Rauigkeit», «Nackental-Index»), die zur Erkennung von talparallelen Morphostrukturen beitragen sollen, konzeptionell hergeleitet und implementiert. Die Klassifikation erfolgt für verschiedene

Kombinationen von geomorphometrischen Parametern, Analysemassstäben und Segmentierungsparametern, um deren Eignung und gegenseitige Abhängigkeiten zu untersuchen.

Mit diesem Ansatz wird eine maximale Gesamtgenauigkeit (korrekt klassierte Flächen inner- und ausserhalb von tiefgreifenden gravitativen Hangdeformationen) von 82 % erreicht. Die Nutzer-genauigkeiten liegen in diesem Fall bei 77% für «tiefgreifende gravitative Hangdeformationen» und bei 83% für das «übrige Terrain». In quantitativer Hinsicht werden damit ähnliche Klassifikationsgenauigkeiten erzielt wie bei verwandten Studien mit anderen Hanginstabilitätstypen. Das Klassifikationsmodell «übersieht» tiefgreifende gravitative Hangdeformationen im Bereich von überlagernden fluvialen Einschnitten im Innern oder am Rand der Hanginstabilität. Ebenso werden kleinere «tiefgreifende gravitative Hangdeformationen» schlechter erkannt. In beiden Fällen sind erhöhte Neigungs- und Rauigkeitswerte die Ursache.

Die Hangneigung und die Rauigkeit anhand der «Eigenwert-Methode» erweisen sich als geeignete geomorphometrische Parameter für die Erkennung von tiefgreifenden gravitativen Hangdeformationen. Insbesondere werden erhöhte Klassifikationsgenauigkeiten bei gleichzeitiger Berücksichtigung beider Parameter festgestellt. Damit können einerseits grossräumige Abflachungs- und Glättungseffekte berücksichtigt werden, die aus früheren Untersuchungen zu grossräumigen Hanginstabilitäten bekannt sind. Andererseits können kleinräumigere Rauigkeitsmuster im Zusammenhang mit internen Deformationserscheinungen erfasst werden. Erhöhte Klassifikationsgenauigkeiten werden entsprechend festgestellt, wenn gleichzeitig mehrere Betrachtungsmassstäbe berücksichtigt werden. Die hier eingeführten Parameter «richtungsabhängige Rauigkeit» und «Nackental-Index» ergeben keine Verbesserung der Klassifikation.

Im Gegensatz zu anderen Studien, die sich mit kleineren Hanginstabilitätstypen befassen, werden im vorliegenden Fall tendenziell bessere Ergebnisse mit einer Rasterauflösung von 25m als mit 2m gemacht. Dies kann mit der grossen räumlichen Ausdehnung des Prozesses erklärt werden.

Wie bei verwandten Studien kann das Klassifikationsergebnis nicht als Endergebnis einer Hanginstabilitätskartierung betrachtet werden. Aufgrund grösserer zusammenhängender Flächen mit richtiger Klassifikation, kann aber eine Verwendung als Grundlage bei der manuellen Kartierung in Betracht gezogen werden. Die Interpretation wird dabei durch kombinierte Betrachtung mit dem schattierten Relief unterstützt. Ebenso ist eine Verwendung zu Verifikationszwecken bestehender Kartengrundlagen / Inventare vorstellbar. Der Bedarf für Letzteres ist für das Untersuchungsgebiet durch entsprechende Abweichungen verschiedener

Datengrundlagen angezeigt (geologische Karten, wissenschaftliche Publikationen, Deformationsmessungen mit SAR-Interferometrie).

Künftige Untersuchungen könnten den Ansatz vor allem in Bezug auf eine optimierte Wahl von Grössen- und Formparametern bei der Segmentierung verbessern. Die vorliegende Arbeit schneidet dieses Thema nur grob an. Dabei zeigt sich, dass sich die Klassifikationsergebnisse verbessern, wenn eine ausreichende Anpassung der Segmentumrisse an die topographischen Gegebenheiten ermöglicht wird.

Weitere Schritte können die Übertragung auf andere geologische Gebiete oder die Berücksichtigung zusätzlicher Parameter (hydrologische Eigenschaften, evtl. Ergebnisse der SAR-Interferometrie) umfassen.

Abstract

Deep-seated gravitational slope deformations represent a specific type of landslide, characterized by large spatial extent and low velocity (mm to cm/year) over long time scales (10^2 to 10^3 years). They are a widespread process in mountainous regions such as the Alps, often affecting entire valley slopes. As a mass wasting process with features of deformation within the unstable rock mass and at its boundaries, they leave a distinct signature in the alpine landscape: «flattening» and «smoothing» of valley slopes ; hummocky topography ; large morphostructures such as scarps and « counterscarps ». Besides their implications for landscape evolution, they are also of practical concern (damaged infrastructure due to deformation ; geological hazards due to secondary, superimposing slope instabilities such as rockslides). For these reasons, deep-seated gravitational slope deformations are integrated in geological and hazard maps.

In relation to previous studies dealing with different landslide types, the present study investigates, how far the recognition of this process can be automated by quantitative (geomorphometric) analysis of digital terrain models and machine learning algorithms.

Two digital terrain models with grid size of 25m ('DHM25') and 2m ('swissALTI3D') are used. The study area covers the two map tiles 1214 (Ilanz) and 1215 (Thusis) by the Swiss topographic map 1:25'000. This represents an area of relatively homogenous geological conditions ('Bundner schists' and similar geological units), which covers several well-known areas with deep-seated gravitational slope deformations (Val Lumnezia, Safiental, Heinzenberg).

Methodologically, an object-based approach is selected, including the following steps : i) calculation of pixel-based geomorphometric parameters (slope and 'roughness with eigenvalue-method') ; ii) terrain segmentation based on geomorphometric properties ; iii) calculation of segment-descriptors and segment-based geomorphometric parameters; iv) training and parameter validation of the 'Random Forest' classification algorithm; v) evaluation of classification results in a test area.

Additionally, specific geomorphometric parameters («direction-dependent roughness», «counterscarp index»), that should account for morphostructures, are conceptually derived and implemented. The classification is run for different combinations of geomorphometric parameters, analysis scales and segmentation parameters, in order to analyze their contribution to the classification result as well as interdependencies between these components.

Using this approach, a maximum overall accuracy (correctly classified area of both « deep-seated gravitational slope deformations » and « other areas ») of 82% is observed. User accuracies in

this case amount to 77% for deep-seated gravitational slope deformations and 83% for « other areas ». Quantitatively, the approach achieves similar results as other studies dealing with different landslide types. The classification model fails to recognize deep-seated gravitational slope deformations, where fluvial incision affects surface morphology within or at the boundaries of the landslide. Likewise, smaller « deep-seated gravitational slope deformations » are badly recognized. In both cases, this is caused by high values of slope gradient and roughness.

In general, slope gradient and roughness (based on 'eigenvalue-method') turn out to be appropriate geomorphometric parameters to recognize deep-seated gravitational slope deformations. Specifically, high classification accuracies are observed, if both parameters are considered simultaneously. In this case, large-scale effects of flattening and smoothing can be accounted for, as suggested by previous studies. Additionally, small-scale roughness patterns associated with deformation features are also represented. Accordingly, high classification accuracies are observed, if multiple analysis scales are considered simultaneously. The additional geomorphometric parameters « direction-dependent roughness » and « counterscarp index » on the other hand, do not contribute to a better classification.

In contrast to other studies, which deal with smaller landslide types, the results of the present study suggest better performance with a grid size of 25m of the digital terrain model, instead of 2m. This can be attributed to the large process-scale of deep-seated gravitational slope deformations.

As with previous studies, the classification result can not be considered as a final result of landslide mapping. The large contiguous areas that are correctly classified, however suggest further use as part of manual mapping. Interpretation is supported by combined display with the shaded relief of the digital terrain model. Furthermore, using the classification result to verify existing maps or inventories can be considered. This could be of interest, as comparisons of different data sources from the study area reveal deviations with respect to the mapped slope instabilities (geological maps, scientific articles, deformation measurements by SAR-interferometry).

Future investigations may improve the approach with respect to an optimized selection of segmentation-parameters (size and shape). This topic is only briefly covered by this study. However, the findings suggests that an optimized adaption to topographic features increases the classification accuracy.

Further steps may include the transfer to other geological regions or consideration of further parameters (e.g. hydrological parameters, results of SAR-interferometry).

Dank

Bedanken möchte ich mich vor allem bei meinem Betreuer Ross Purves für seine stetige Unterstützung mit Besprechungen und hilfreichen Feedbacks sowie für die Möglichkeit ein eigenes Forschungsthema bearbeiten zu können.

Weiter bedanke ich mich bei Flurina Wartmann und Ali Soleymany für ihre Stellungnahmen zum Forschungskonzept sowie bei der Forschungsgruppe «Multimodal Remote Sensing» für eine interessante Einführung ins Thema «Machine Learning».

Inhalt

1. Einleitung	1
1.1. Kontext und Motivation	1
1.2. Zielsetzung und Fragestellung	3
1.3. Gliederung	3
2. Hintergrund	5
2.1. Tiefgreifende gravitative Hangdeformationen	5
2.2. Klassifikationssystem von Hanginstabilitäten.....	8
2.3. Kartierung von Hanginstabilitäten.....	11
2.3.1. Methoden und Hilfsmittel bei der manuellen Kartierung.....	11
2.3.2. Automatisierte Ansätze mit Fernerkundungsdaten	13
2.4. Verwandte bisherige Studien.....	15
2.4.1. Konzeptionelle Grundlagen	15
2.4.2. Quantitative (geomorphometrische) Analyse grossräumiger Hanginstabilitäten ...	16
2.4.3. Geomorphometrische Analyse räumlich hochaufgelöster digitaler Geländemodelle zur automatisierten Erkennung von Hanginstabilitäten	19
2.5. Forschungslücken und Erkenntnisse aufgrund bisheriger Untersuchungen.....	26
2.5.1. Berücksichtigung von Hanginstabilitätstyp, Umgebung und Geologie	26
2.5.2. Wahl der geomorphometrischen Parameter	29
2.5.3. Analysemassstab	31
2.5.4. Segmentierung und Klassifikation	33
2.5.5. Objekt-Aggregation	33
3. Untersuchungsgebiet und Daten	34
3.1. Beschreibung des Untersuchungsgebiets	34
3.2. 'Ground Truth' (GeoCover).....	37
3.3. Digitale Geländemodelle	39
3.4. Hydrologische Datengrundlagen	40

4. Methodik	41
4.1. Übersicht.....	41
4.2. Pixel-basierte Berechnung geomorphometrischer Parameter.....	42
4.2.1. Hangneigung.....	42
4.2.2. Exposition	42
4.2.3. Normalvektoren auf Geländeoberfläche	43
4.2.4. Rauigkeitsberechnung - Eigenwertverhältnisse der Normalvektoren	43
4.2.5. Variation der Analysemasstäbe	44
4.3. Segmentierung.....	45
4.3.1. SLIC.....	45
4.3.2. Wahl der Segmentierungsparameter	46
4.4. Segment-Deskriptoren / segment-basierte geomorphometrische Parameter.....	48
4.4.1. Statistische Verteilungsmasse.....	48
4.4.2. Segment-basierte geomorphometrische Parameter	48
4.5. Klassifikation	51
4.5.1. 'Random Forest' Algorithmus	51
4.5.2. Anwendung	53
4.6. Evaluation	55
5. Resultate und Interpretation.....	57
5.1. Pixel-basierte geomorphometrische Parameter.....	57
5.1.1. Hangneigung.....	57
5.1.2. Normalvektoren.....	61
5.1.3. Rauigkeitsberechnung - Eigenwertverhältnisse der Normalvektoren	61
5.2. Segmentierung.....	67
5.3. Segment-Deskriptoren / segment-basierte geomorphometrische Parameter.....	71
5.3.1. Hangneigung.....	71
5.3.2. Rauigkeit.....	72

5.4.	Klassifikation und Evaluation.....	81
5.4.1.	Unterschiedliche geomorphometrische Parameter	81
5.4.2.	Unterschiedliche Analysemasstäbe und Segmentierungsparameter	85
5.4.3.	Synthese	87
5.4.4.	Übersichtstabellen mit Genauigkeitsbestimmung verschiedener Klassifikationen.	89
6.	Diskussion	95
6.1.	Wirksamkeit des Ansatzes	95
6.1.1.	Quantitative Betrachtung.....	95
6.1.2.	Qualitative Betrachtung.....	97
6.2.	Einflussfaktoren.....	101
6.2.1.	Eignung (und Masstabsabhängigkeit) der geomorphometrischen Parameter ...	101
6.2.2.	Rasterauflösung und Segmentierung	105
6.3.	Weitere Aspekte.....	106
6.3.1.	'Ground Truth'	106
6.3.2.	Übertragbarkeit auf andere geologische Gebiete	109
7.	Schlussfolgerungen.....	111
7.1.	Erreichtes.....	111
7.2.	Erkenntnisse	112
7.3.	Ausblick.....	114
	Quellenverzeichnis	116

Abbildungsverzeichnis

Abb. 1: Inventar von tiefgreifenden gravitativen Hangdeformationen in den Alpen	2
Abb. 2: Längsschnitt durch eine tiefgreifende gravitative Hangdeformation	6
Abb. 3: Charakteristische Oberflächenformen (sogenannte «Morphostrukturen») von..... tiefgreifenden gravitativen Hangdeformationen	6
Abb. 4: Fotos charakteristischer Oberflächenformen von tiefgreifenden gravitativen..... Hangdeformationen.....	7
Abb. 5: Fotos mit Beispielen verschiedener Massenbewegungsprozesse	9
Abb. 6: Beispiel eines LiDAR-basierten schattierten Reliefs	12
Abb. 7: Gravitative Hangdeformation an der südlichen Talflanke des Aletschgletschers	13
Abb. 8: Berechnung eines geomorphometrischen Parameters mittels Nachbarschafts-..... beziehungen innerhalb eines quadratischen Berechnungsfensters	16
Abb. 9: Veränderungen des Talquerschnitts infolge einer tiefgreifenden Hanginstabilität und..... Beziehung zwischen lokaler Neigung und Einzugsgebietsfläche	18
Abb. 10: Beispiele von schattierten Reliefs zur Illustration unterschiedlicher Oberflächenrauigkeit.. inner- und ausserhalb von Hanginstabilitäten	22
Abb. 11: Faktoren, welche die «geometrische Signatur» und folglich deren Analyse im Hinblick... auf eine automatisierte Erkennung von tiefgreifenden gravitativen Hangdeformationen... beeinflussen.	27
Abb. 12: Geografische/topographische und geologische Übersichtskarte des..... Untersuchungsgebiets.....	34
Abb. 13: Ausschnitte der Landeskarte 1:100'000 für das Untersuchungsgebiet.....	36
Abb. 14: Fotos aus dem Untersuchungsgebiet.	37
Abb. 15: Herleitung der 'Ground Truth' aus dem Datensatz 'GeoCover'	38
Abb. 16: Übersicht des methodischen Ansatzes mit stufenweisem Vorgehen.	41
Abb. 17: Quadratisches Berechnungsfenster von 3 x 3 Rasterzellen für die pixel-basierte..... Berechnung von Hangneigung und Exposition	42
Abb. 18: Rauigkeitsbestimmung mit Methode der Eigenwert-Verhältnisse.	44
Abb. 19: Transformation in segmentspezifisches Koordinatensystem.	49
Abb. 20: Ermittlung der «richtungsabhängigen Rauigkeit» und des «Nackental-Index».....	50
Abb. 21: Funktionsweise von Entscheidungsbäumen zur Klassifikation mit Random Forest	52
Abb. 22: Aufteilung des Kartenblatts 1214 in ein Gebiet für die Kalibrierung und für die..... Parametervalidierung des 'Random Forest' Klassifikationsmodells..	54
Abb. 23: Histogramme der pixel-basierten Hangneigungswerte.	58

Abb. 24: Pixel-basierte Hangneigung für Kartenblatt 1214, bei 2m Rasterauflösung	59
Abb. 25: Pixel-basierte Hangneigung für Kartenblatt 1214, bei 25m Rasterauflösung.	60
Abb. 26: Ergebnis der Normalvektorberechnung je Rasterzelle für Kartenblatt 1214 bei 2m.....	
Rasterauflösung.	61
Abb. 27: Geländeprofile zur Gegenüberstellung von topographischen Phänomenen und.....	
Analysemasstäben bei der Rauigkeitsberechnung mit der «Eigenwert-Methode».	62
Abb. 28: Pixel-basierte Rauigkeit für Kartenblatt 1214 aufgrund des Eigenwertverhältnisses....	
$\ln(S1/S2)$, bei einem Analysemasstab von 25 x 25 Rasterzellen und 2m Rasterauflösung	63
Abb. 29: Pixel-basierte Rauigkeit für Kartenblatt 1214 aufgrund des Eigenwertverhältnisses....	
$\ln(S2/S3)$, bei einem Analysemasstab von 25 x 25 Rasterzellen und 2m Rasterauflösung.	64
Abb. 30: Massstabeffekte bei der pixel-basierten Rauigkeitsberechnung.....	66
Abb. 31: Schattiertes Relief mit dem Segmentierungsergebnis für das Kartenblatt 1214 bei 2m....	
Rasterauflösung	67
Abb. 32: Einfluss verschiedener Parametereinstellungen auf das Segmentierungsergebnis.	69
Abb. 33: Segmentierungsergebnis in Abhängigkeit des Formparameters 'regularizer' und der.....	
Rasterauflösung	70
Abb. 34: Hangneigung je Segment (Kartenblatt 1214) mit Vergleich verschiedener.....	
Berechnungsmethoden.	72
Abb. 35: Rauigkeitsindikatoren je Segment (Kartenblatt 1214) mit Vergleich verschiedener.....	
Berechnungsmethoden und Datengrundlagen	73
Abb. 36: Rauigkeit aufgrund der Eigenwertverhältnisse je Segment (Kartenblatt 1214), mit.....	
Vergleich verschiedener Analysemasstäbe und Datengrundlagen.....	75
Abb. 37: Rauigkeit aufgrund der Eigenwertverhältnisse je Segment (Kartenblatt 1214), mit.....	
Vergleich verschiedener Analysemasstäbe und Datengrundlagen.....	76
Abb. 38: Detailbetrachtung ausgewählter Rauigkeitsmasse anhand des Geländemodells.....	
swissALTI3D (2m Rasterauflösung)	78
Abb. 39: Detailbetrachtung ausgewählter Rauigkeitsmasse anhand des Geländemodells.....	
swissALTI3D (2m Rasterauflösung).	79
Abb. 40: Ausgewählte Segment-Werte für Kartenblatt 1215, mit Angabe der Analysemasstäbe... und Datengrundlagen.....	80
Abb. 41: Einfluss von geomorphometrischen Parametern auf die Klassifikation von Kartenblatt... 1215 anhand des Geländemodells DHM25	83
Abb. 42: Einfluss von geomorphometrischen Parametern auf die Klassifikation von Kartenblatt... 1215 anhand des Geländemodells swissALTI3D.....	84

Abb. 43: Einfluss des Segmentierungsparameters 'regularizer' auf die Klassifikation von.....	
Kartenblatt 1215 in Abhängigkeit der Rasterauflösung	86
Abb. 44: Einfluss des Analysemasstabs bei der Rauigkeitsberechnung (Eigenwertverhältnis.....	
$\ln(S1/S2)$) in Kombination mit der Hangneigung auf die Klassifikation von Kartenblatt 1215.	88
Abb. 45: Ansatz zur Objekt-Aggregation auf Basis hydrologischer Teileinzugsgebiete.	100
Abb. 46: Vergleich der 'Ground Truth' mit Ergebnissen der SAR-Interferometrie.....	107
Abb. 47: Segmentierungs- und Klassifikationsergebnisse für Teilausschnitt des Kartenblatts.....	
1213.....	110

Tabellenverzeichnis

Tab. 1: Klassifikationssystem von Hanginstabilitäten nach Hungr et al. (2014).....	10
Tab. 2: Untersuchte Hanginstabilitäten bisheriger Studien.	21
Tab. 3: Methodische Ansätze bisheriger Untersuchungen.....	24
Tab. 4: Analysemassstäbe bei Rauigkeits- und Krümmungsberechnungen.....	32
Tab. 5: Eigenschaften der digitalen Geländemodelle 'swissALTI3D' und 'DHM25'.	40
Tab. 6: Analysemassstäbe für die Berechnung der Rauigkeit anhand der Eigenwertverhältnisse.. der Normalvektoren.....	45
Tab. 7: Variation der Funktionsparameter 'regionSize' und 'regularizer' zwecks qualitativer..... Untersuchung der Segmentierungsergebnisse.....	47
Tab. 8: Genauigkeit der Klassifikationsergebnisse K25-1 bis K25-16.....	89
Tab. 9: Genauigkeit der Klassifikationsergebnisse K25-17 bis K25-35.....	90
Tab. 10: Genauigkeit der Klassifikationsergebnisse K25-36 bis K25-41.....	91
Tab. 11: Genauigkeit der Klassifikationsergebnisse K2-42 bis K2-56.....	92
Tab. 12: Genauigkeit der Klassifikationsergebnisse K2-57 bis K2-73.....	93
Tab. 13 Genauigkeit der Klassifikationsergebnisse K2-74 bis K2-78.....	94

1. Einleitung

1.1. Kontext und Motivation

Tiefgreifende gravitative Hangdeformationen – auf Deutsch auch als «Sackungen» bezeichnet - stellen einen weit verbreiteten Massenbewegungsprozess in Gebirgsregionen dar. Konkret handelt es sich um einen spezifischen Hanginstabilitätstyp¹, der durch eine grosse räumliche Ausdehnung (oftmals ganze Talflanken, Deformationen bis tief in den Felsuntergrund) sowie langsame Deformationsraten (typischerweise mm/Jahr bis cm/Jahr) über lange Zeiträume (Jahrhunderte bis Jahrtausende) gekennzeichnet ist. An der Oberfläche führt dieses Bewegungsverhalten zu charakteristischen Geländeformen.

Aufgrund verschiedener Gefährdungsbilder für Mensch und Infrastruktur sowie ihrer Bedeutung für die Landschaftsentwicklung werden tiefgreifende gravitative Hangdeformationen - wo erkannt - untersucht und zum Beispiel in geologischen Karten räumlich erfasst. Neuere Bestrebungen zielen darauf ab grossräumige Inventare dieser Hanginstabilitäten zu erstellen. *Crosta et al. (2013)* haben dazu eine Pionierarbeit am Beispiel der Alpen vorgelegt. Die Zusammenstellung erfolgt dabei manuell anhand einer Vielzahl von Grundlagen und gestützt auf die Arbeit verschiedener Autoren (geologische Karten, Fallstudien, regionale Inventare, visuelle Interpretation von i) Luft- und Satellitenbildern, ii) topographischen Karten, und iii) schattierten Reliefs von räumlich hochaufgelösten digitalen Geländemodellen). Die laufende Erweiterung dieses Inventars (Abb. 1) zeigt auf, dass die Erstellung arbeitsintensiv ist und in einem iterativen Prozess erfolgt, bei welchem immer wieder neue Gebiete mit tiefgreifenden gravitativen Hangdeformationen «entdeckt» werden.

Dies lässt die Frage aufkommen, inwiefern die Inventarisierung durch objektive, automatisierte Verfahren unterstützt oder verbessert werden kann. Flächendeckende Deformationsmessungen mit SAR-Interferometrie (**S**ynthetic **A**perture **R**ADAR) bieten eine Möglichkeit, aktive Hanginstabilitäten durch Vergleich zeitlich gestaffelter Aufnahmen zu detektieren. Für die Schweiz wird ein entsprechendes Monitoring durch das *Bundesamt für Umwelt BAFU (2014)* durchgeführt. Bei günstigen Verhältnissen werden damit bereits geringe Deformationen von wenigen Millimetern registriert, sodass aktive Hanginstabilitäten erkannt werden können. Jedoch ergeben sich Einschränkungen für die Verwertbarkeit der Daten, zum Beispiel in bewaldeten Gebieten. Das

¹ «Hanginstabilität» wird in dieser Arbeit dem in der englischen Sprache allgemein verwendeten Begriff «landslide» gleichgesetzt.

Bundesamt für Umwelt BAFU (2015) weist auch darauf hin, dass die Daten «nur in Kombination mit geomorphologischen Angaben sinnvoll nutzbar» sind.

Ein alternativer Ansatz zur automatisierten Erkennung von Hanginstabilitäten besteht darin, digitale Geländemodelle quantitativ (geomorphometrisch²) zu analysieren. Dabei werden betroffene Gebiete aufgrund ihrer Topographie («geometrische Signatur») identifiziert. Die flächendeckenden digitalen Geländemodelle 'DHM25' und 'swissALTI3D' (Bundesamt für Landestopografie swisstopo, 2005, 2016) liefern für die Schweiz entsprechende topographische Grundlagen mit Rasterauflösungen von 25m respektive 2m.

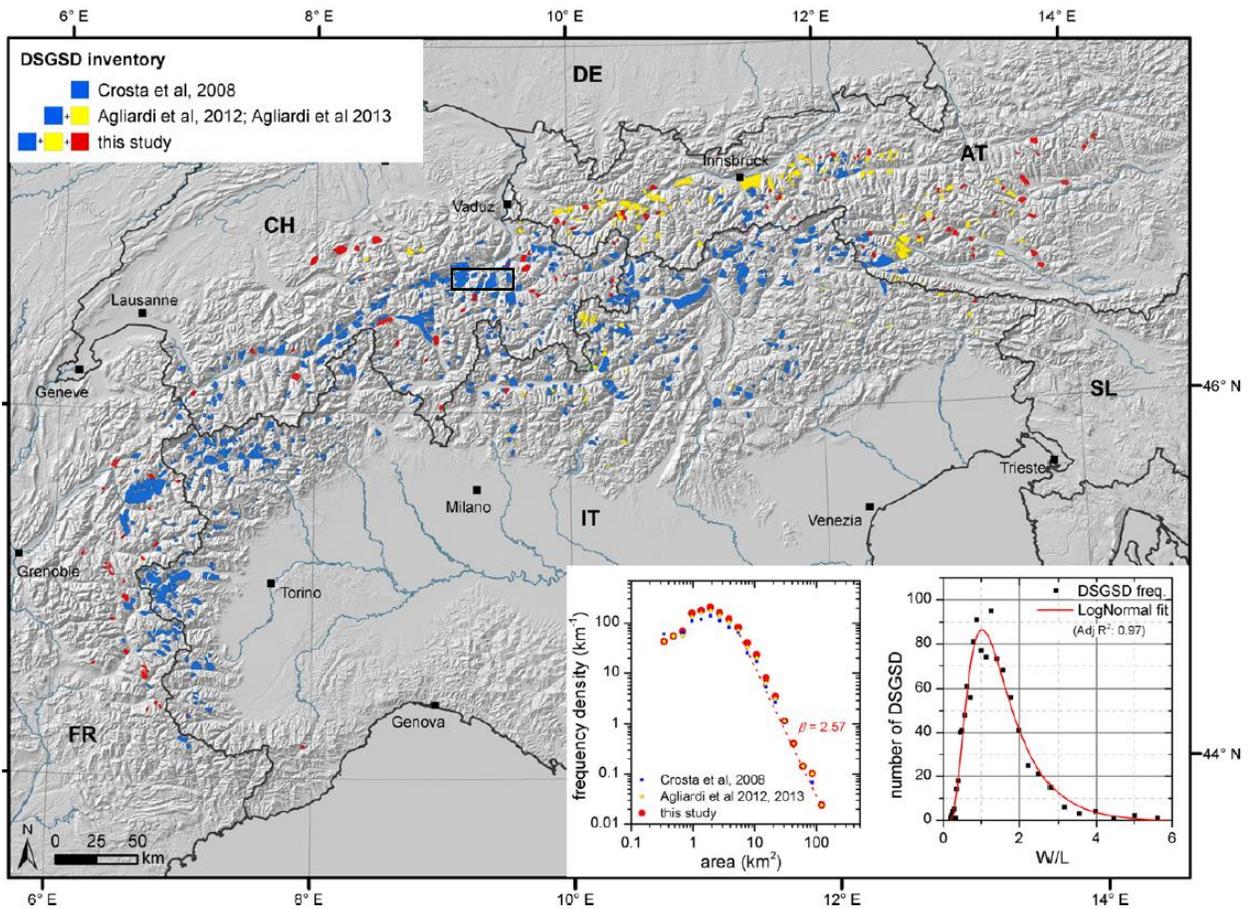


Abb. 1: Inventar von tiefgreifenden gravitativen Hangdeformationen ('deep-seated gravitational slope deformations' DSGSD) in den Alpen gemäss Crosta et al. (2013). Die Einfärbung der Gebiete (blau = Stand 2008, gelb = Stand 2012, rot = Stand 2013) widerspiegelt die laufende Erweiterung des Inventars. Die Diagramme unten rechts zeigen statistische Auswertungen der räumlichen Ausdehnung von tiefgreifenden gravitativen Hangdeformationen (vgl. entsprechende Publikation für Details). Das kleine schwarze Rechteck im Kartenausschnitt markiert das Hauptuntersuchungsgebiet der vorliegenden Arbeit (vgl. Kap. 3).

² «Geomorphometrie ist die Wissenschaft der topographischen Quantifizierung: der operationelle Fokus liegt auf der Extraktion von Parametern und Objekten der Geländeoberfläche aus digitalen Höhenmodellen» (Pike et al., 2008: p. 4).

1.2. Zielsetzung und Fragestellung

Das Ziel dieser Arbeit besteht darin, einen Ansatz zur automatisierten, geomorphometrischen Erkennung von tiefgreifenden gravitativen Hangdeformationen in einem alpinen Untersuchungsgebiet zu entwickeln. Das Verfahren stützt sich auf:

- Zwei flächendeckende digitale Geländemodelle mit Rasterauflösungen von 2m bzw. 25m: 'swissALTI3D' und 'DHM25' (Bundesamt für Landestopografie swisstopo, 2005, 2016).
- Die Quantifizierung topographischer Eigenschaften («geometrische Signatur») durch eine Kombination geeigneter geomorphometrischer Parameter und Analysemasstäbe.
- Die Segmentierung und Klassifikation des Geländes aufgrund der geometrischen Signatur mit Algorithmen des maschinellen Lernens.

Methodisch wird dabei an verwandte Studien angeknüpft, welche sich mit der geomorphometrischen Analyse digitaler Geländemodelle zur Charakterisierung und/oder automatisierten Kartierung verschiedener Hanginstabilitätstypen befassen.

Die zentralen **Forschungsfragen**, die dabei adressiert werden, lauten:

- 1) Inwieweit ist eine automatisierte Erkennung von tiefgreifenden gravitativen Hangdeformationen in alpinem Gelände mittels geomorphometrischer Analyse digitaler Geländemodelle und Algorithmen des maschinellen Lernens möglich?
- 2) Welche Rolle spielen i) die Wahl der geomorphometrischen Parameter, ii) die Analysemasstäbe und iii) die Berücksichtigung des räumlichen Kontexts?

Bei der ersten Frage geht es um die erzielbaren Klassifikationsgenauigkeiten auf der einen und qualitative Aspekte des Ansatzes auf der anderen Seite. Die Herleitung der zweiten Frage beruht insbesondere auf der Analyse bisheriger Studien gemäss Kap. 2.4 und 2.5.

1.3. Gliederung

Kap. 2 beschreibt zunächst die Charakteristik «tiefgreifender gravitativer Hangdeformationen» (**Kap. 2.1**) und zeigt deren Stellung im Unterschied zu anderen Hanginstabilitätstypen (**Kap. 2.2**). Es folgt ein allgemeiner Überblick zu Methoden manueller und automatisierter Erkennung von Hanginstabilitäten (**Kap. 2.3**). Mit diesen Schritten soll insbesondere aufgezeigt werden:

- Welche topographischen Prozessmerkmale im Hinblick auf eine automatisierte geomorphometrische Erkennung relevant sind.
- Weshalb die geomorphometrische Analyse digitaler Geländemodelle gerade bei der Kartierung dieses Hanginstabilitätstyps in Betracht gezogen wird.

Anhand verwandter bisheriger Studien (**Kap. 2.4**) werden anschliessend Forschungslücken und Erkenntnisse in Bezug auf die Fragestellung und das Vorgehen der vorliegenden Arbeit diskutiert (**Kap. 2.5**).

Kap. 3 stellt das Untersuchungsgebiet und die verwendeten Datengrundlagen (Geländemodelle, geogische / hydrologische Datensätze) vor.

Eine Übersicht zum methodischen Ansatz wird in **Kap. 4.1** gezeigt. Die anschliessenden Unterkapitel beschreiben die einzelnen methodischen Schritte: i) Berechnung von pixel-basierten geomorphometrischen Parameter (**Kap. 4.2**), ii) Segmentierung (**Kap. 4.3**), iii) Berechnung segment-basierter geomorphometrischer Parameter (**Kap. 4.4**), iv) Klassifikation mit 'Random Forest' (**Kap. 4.5**), v) Evaluation (**Kap. 4.6**).

In der Reihenfolge dieser methodischen Schritte werden in **Kap. 5** die Zwischen- und Endergebnisse in separaten Unterkapiteln präsentiert. Dabei werden vor allem kartographische Darstellungen verwendet und im Hinblick auf die Fragestellung ausgewertet und interpretiert.

Kap. 6 diskutiert die Inhalte aus Kap. 5, beantwortet die Forschungsfragen und nimmt dabei Bezug zu anderen Forschungsarbeiten. Anhand der Ergebnisse werden teilweise Verbesserungs- und Erweiterungsmöglichkeiten des methodischen Ansatzes angesprochen. **Kap. 6.3** geht auf zusätzliche Aspekte ein, die im Rahmen dieser Arbeit nicht detailliert untersucht wurden, bei der Diskussion der Ergebnisse aber ebenfalls zu berücksichtigen sind (Qualität der 'Ground Truth', Übertragbarkeit auf andere geologische Gebiete).

Die Schlussfolgerungen in **Kap. 7** fassen zusammen, was mit der vorliegenden Arbeit untersucht und erreicht wurde, welche Erkenntnisse übernommen werden und welche Aspekte für künftige Untersuchungen interessant sind.

2. Hintergrund

2.1. Tiefgreifende gravitative Hangdeformationen

Tiefgreifende gravitative Hangdeformationen (auf Englisch «deep-seated gravitational slope deformations») stellen einen spezifischen Hanginstabilitätstyp dar, der in den Alpen sowie vielen weiteren Gebirgsregionen weltweit verbreitet ist (Crosta et al., 2013). Im deutschen Sprachraum ist für die Prozessbeschreibung auch die Bezeichnung «Sackung» geläufig (Agliardi et al., 2013).

Wesentliche Eigenschaften, welche eine Abgrenzung gegenüber anderen Hanginstabilitätstypen ermöglichen (vgl. Kap. 2.2), sind:

- **Grosse räumliche Ausdehnung**, wobei ganze Talflanken erfasst sein können (Agliardi et al., 2001) und die Deformation bis tief in den Felsuntergrund reicht (mehrere Zehner bis Hunderte von Metern³). Abb. 1 (S. 2) und Abb. 2 vermitteln einen Eindruck.
- Entwicklung über **lange Zeiträume** von Jahrhunderten bis Jahrtausenden (Pánek & Klimeš, 2016).
- **Niedrige Deformationsraten**, typischerweise in der Grössenordnung von mm/Jahr bis mehreren cm/Jahr (Schwab et al., 2009; Crosta et al., 2013). Phasenweise kann auch ein Stillstand oder eine Beschleunigung stattfinden (Hungar et al., 2014).

Die komplexen Deformationen, welche sich dabei im Innern und am Rand der Hanginstabilität abspielen, hinterlassen charakteristische Formen an der Geländeoberfläche (Agliardi et al., 2001; Crosta et al., 2013; Jaboyedoff et al., 2013). Dies kommt beispielsweise durch kupiertes Terrain (Kuppen und Senken) oder markante Anrissnischen zum Ausdruck (Abb. 2 bis Abb. 4). Als «**Morphostrukturen**» bezeichnete Deformationserscheinungen gemäss Abb. 3 weisen oftmals beachtliche räumliche Dimensionen mit Vertikalversätzen von mehreren Metern bis Zehnern von Metern (Agliardi et al., 2013) und horizontalen Ausdehnungen von Hunderten von Metern und mehr auf (Crosta et al., 2013). Abb. 4 vermittelt einen Eindruck der Grössenordnungen anhand entsprechender Fotobeispiele.

Die Entwicklung solcher Morphostrukturen ist je nach geologischen Gegebenheiten unterschiedlich ausgeprägt. Faktoren diesbezüglich umfassen: Gesteinstyp (Lithologie), Tektonik, Orientierung von Trennflächen (Schichtung, Schieferung, Störungen), überlagernde geomorphologische Prozesse (Agliardi et al., 2001; Crosta et al., 2013).

³ Der genaue Verlauf der basalen Scherfläche ist häufig unbekannt (Crosta et al., 2013).

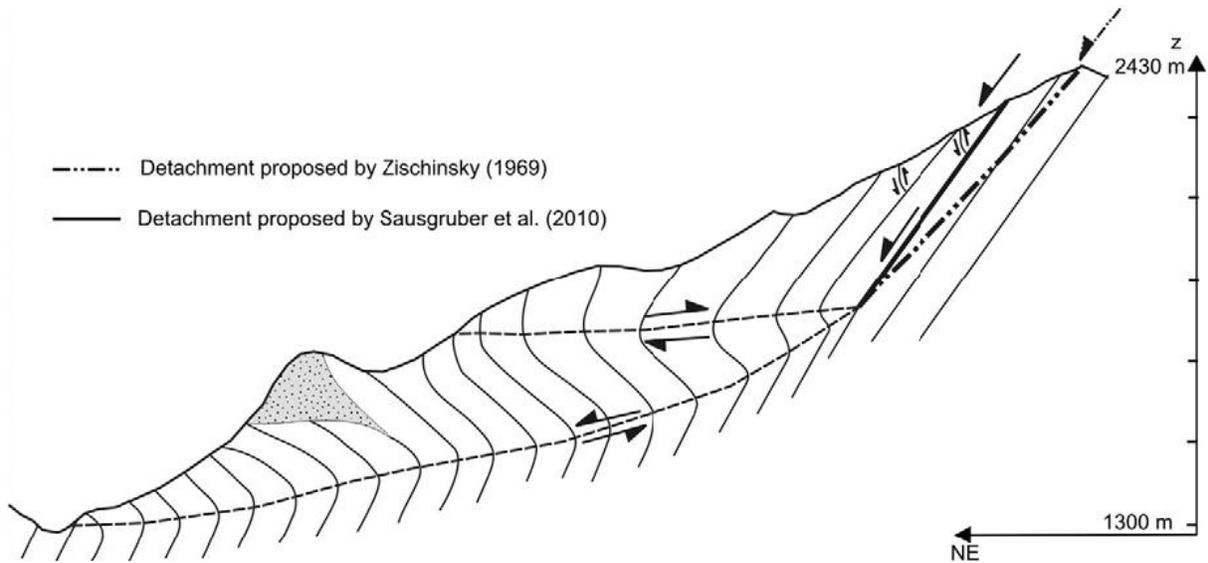


Abb. 2: Längsschnitt durch eine tiefgreifende gravitative Hangdeformation mit typischer kupierter Geländeoberfläche und Bewegungen (schwarze Pfeile) entlang von internen und basalen Scherflächen (Jaboyedoff et al., 2013).

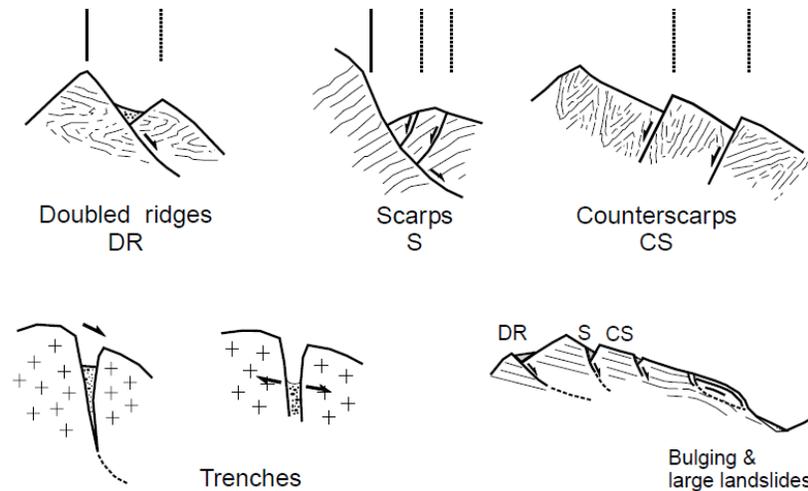


Abb. 3: Charakteristische Oberflächenformen (sogenannte «Morphostrukturen») von tiefgreifenden gravitativen Hangdeformationen (Agliardi et al., 2001). Von oben links nach unten rechts: Doppelkreten ('doubled ridges'), Anrissnischen ('scarps'), Nackentäler ('counterscarps'), Graben/Zerrspalten ('trenches'), grosse Hanginstabilität mit Stauchung des Hangfusses ('bulging & large landslides').

Schätzungen gehen davon aus, dass im Alpenraum mehr als 5% der Talflanken von tiefgreifenden gravitativen Hangdeformationen betroffen sind (Jaboyedoff et al., 2013). Je nach geologischen Verhältnissen kann dieser Anteil regional aber deutlich höher oder niedriger sein (Agliardi et al., 2013; vgl. auch Abb. 1, S. 2). Als Massenbewegung ist der Prozess von Bedeutung für die Landschaftsentwicklung in Gebirgsregionen (Roering et al., 2005; Korup, 2006; Korup & Schlunegger, 2009; Crosta et al., 2013). Aus praktischer Sicht besteht ein Interesse, weil durch die Deformationen häufig Schäden an ober- und unterirdischen Bauwerken verursacht werden

(z.B. *Frattini et al., 2013*). Zudem kann die tiefgreifende Hangdeformation den oberflächlichen Felsverbund destabilisieren, was je nach geologischer Situation zu gefährlichen Rutsch- oder Sturzprozessen führt (*Agliardi et al., 2001; Pánek & Klimeš, 2016*).

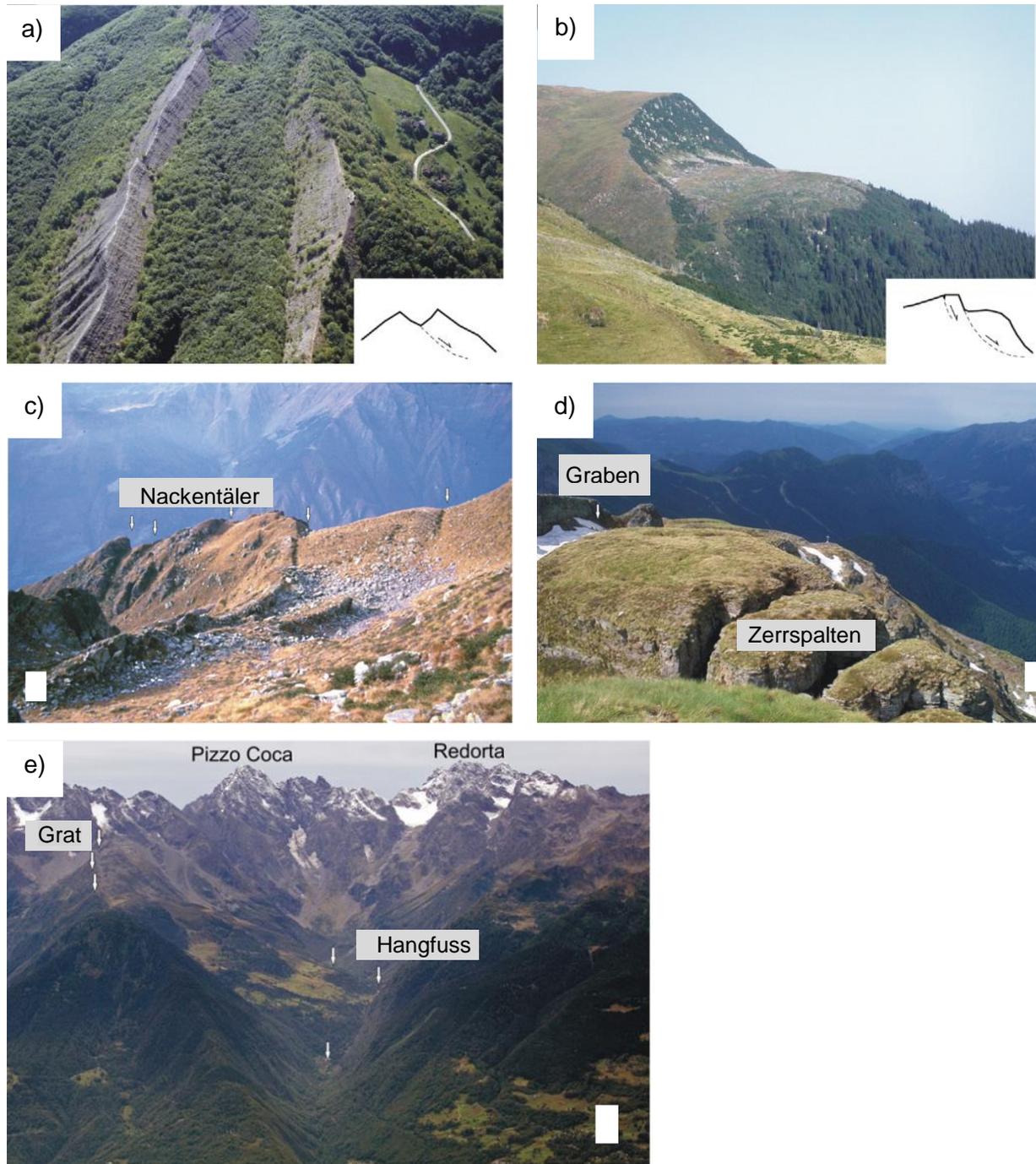


Abb. 4: Fotos charakteristischer Oberflächenformen von tiefgreifenden gravitativen Hangdeformationen (analog zu Abb. 3): a) Doppelkrete; b) bergseitige Anrissnische; c) Nackentäler; d) Graben/Zerrspalten; e) grosse Hanginstabilität (Grat bis Hangfuss, vergleichbare Situation wie in Abb. 2) und Stauchung am Hangfuss. (a und b nach *Pánek & Klimeš (2016)*; c, d und e modifiziert nach *Crosta et al. (2013)*).

2.2. Klassifikationssystem von Hanginstabilitäten

Um die Stellung von tiefgreifenden gravitativen Hangdeformationen im Vergleich zu anderen Hanginstabilitätstypen aufzuzeigen, wird in Tab. 1 das Klassifikationssystem von *Hungr et al. (2014)* vorgestellt. Dieses entspricht einer Aktualisierung des verbreiteten Systems von *Varnes (1978)* zur Klassifikation von Hanginstabilitäten ('landslides') und unterscheidet diese aufgrund des Bewegungstyps sowie des mobilisierten Materials (Fest- vs. Lockergestein).

Bei der Beschreibung der einzelnen Hanginstabilitätstypen werden folgende Prozessgeschwindigkeiten unterschieden (die Angaben in Klammern geben die Grössenordnung entsprechender Deformationsraten an (*Hungr et al., 2014*)):

- «extrem schnell» (5 m/Sekunde)
- «sehr schnell» (3 m/Minute)
- «schnell» (1.8 m/Stunde)
- «mässig schnell» (13 m/Monat)
- «langsam» (1.6 m/Jahr)
- «sehr langsam» (16 mm/Jahr)
- «extrem langsam» (Deformationsrate nicht messbar)

Tiefgreifende gravitative Hangdeformationen gemäss Kap. 2.1 sind darin als «**mountain slope deformation**» (Typ 28) aufgeführt. *Hungr et al. (2014: p. 188)* umschreibt diese als «grossräumige, gravitative Deformation von steilen, hohen Berghängen» im Festgestein, welche durch Oberflächenformen wie «Anrissnischen», «Zerrspalten», «Gräben» und «Stauchungen» gekennzeichnet sind. Die Prozessgeschwindigkeit wird als «langsam» bis «nicht messbar» angegeben. Typ 29 («rock slope deformation») weist ein ähnliches Bewegungsverhalten wie Typ 28 auf, beschränkt sich aber auf kleinere Hangbereiche in weichen Ton- und Mergelgesteinen.

Im Verlauf dieser Arbeit werden noch einige **weitere** deutschsprachige Bezeichnungen für **häufig beschriebene Massenbewegungsprozesse** verwendet. Diese können den Hanginstabilitätstypen nach *Hungr et al. (2014; Tab. 1)* wie folgt zugeordnet werden:

- **Felssturz** (Foto in Abb. 5a): Abgleiten bzw. Abstürzen von Felsmaterial (10^2 bis 10^6 Kubikmeter (*Bundesamt für Umwelt BAFU, 2016*)) mit «extrem hoher Geschwindigkeit». Ursache ist das «Kippen» (Typ 3) oder «Gleiten» eines Felspakets entlang «ebener» (7), «keilförmiger» (8) oder «unregelmässiger» (10) Gleitflächen. Entlang der Sturzbahn kann sich daraus eine «Steinlawine» (Typ 18) entwickeln.

- **Bergsturz** (Abb. 5a): analog zum Felssturz, jedoch mit grösserem Felsvolumen ($>10^6$ Kubikmeter, *Bundesamt für Umwelt BAFU (2016)*).
- **Flachgründiger Erdrutsch** (Abb. 5b): «Abgleiten» einer (grobkörnigen) Lockergesteinsschicht mit teils «extrem schneller Geschwindigkeit» auf einer untiefen (wenige Meter tiefen) Rutschfläche (Typ 13).
- **Erdstrom** (Abb. 5c): langsame bis schnelle, «fliessähnliche Bewegung» von «plastischem (tonhaltigem) Material», welche häufig längliche Zungenformen erzeugt (Typ 26).

Abb. 5d zeigt zum Vergleich eine Talflanke mit tiefgreifender gravitativer Hangdeformation («mountain slope deformation», Typ 28).

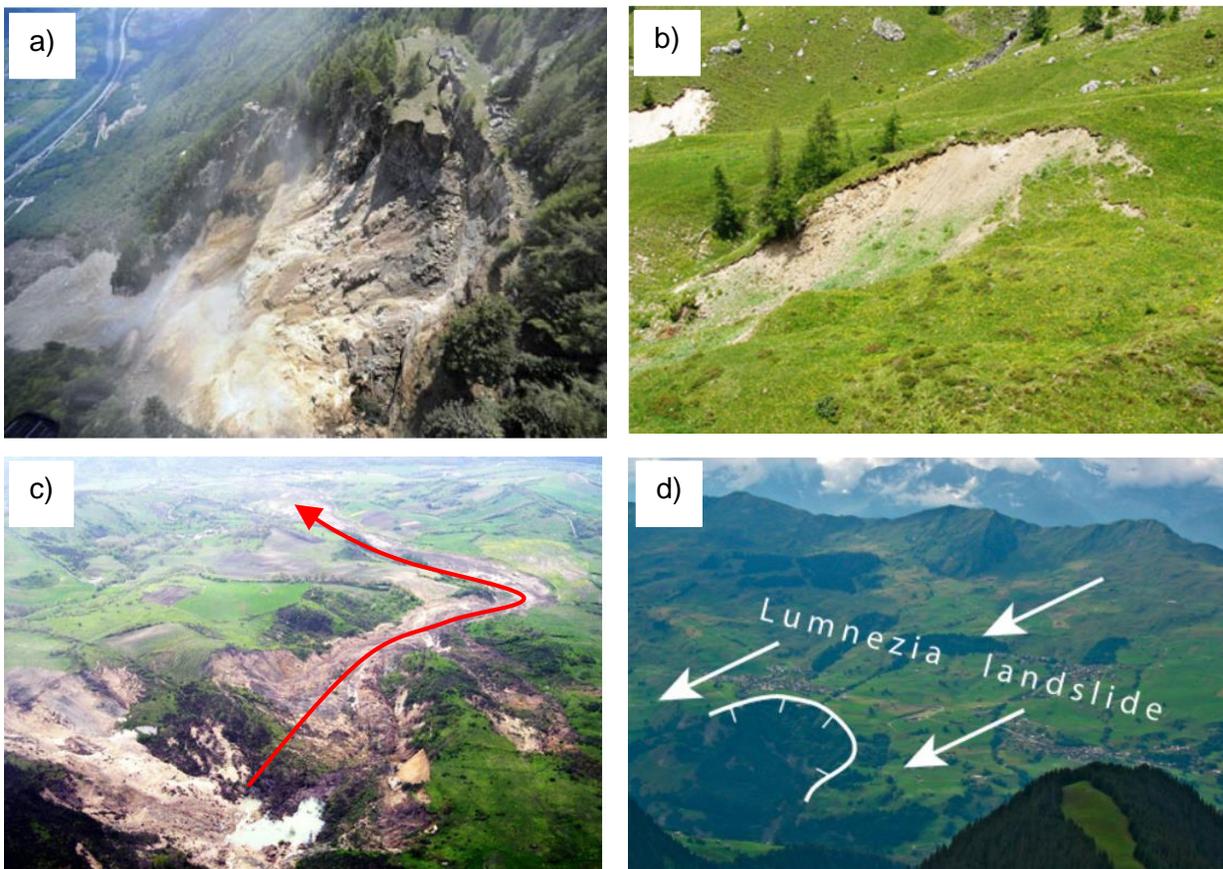


Abb. 5: Fotos mit Beispielen verschiedener Massenbewegungsprozesse (gemäss Auflistung im Text). a) Fels-/Bergsturz (Hungre et al., 2014). b) Flachgründiger Erdrutsch (Tarolli et al., 2012). c) Erdstrom (Hungre et al., 2014), modifiziert mit Angabe der Fliessrichtung (roter Pfeil). Die Länge des Erdstroms beträgt ca. 3 km. d) Tiefgreifende gravitative Hangdeformation der westlichen Talseite des Lugnez / Val Lumnezia. Die weissen Pfeile geben die Bewegungsrichtung an. Die weisse sichelförmige Signatur deutet eine Anrissnische innerhalb der tiefgreifenden gravitativen Hangdeformation an (Schwab et al., 2009).

Tab. 1: Klassifikationssystem von Hanginstabilitäten nach Hungr et al. (2014) (Hungretal.,É, teilweise modifiziert mit deutscher Übersetzung (Begriffe in Klammern). Die Position von «tiefgreifenden gravitativen Hangdeformationen» gemäss Kap. 2.1 wird durch die graue Einfärbung angezeigt (Typ 28). Weitere Hanginstabilitätstypen, auf welche im Text dieser Arbeit Bezug genommen wird, sind unterstrichen. Bei den kursiven Wörtern handelt es sich um Platzhalter für verschiedene Korngrössen von Lockergesteinskomponenten ('boulder' = Blöcke; 'gravel' = Kies; 'sand' = Sand; 'silt' = Silt; 'clay' = Ton; 'debris' = Schutt) oder für die Unterscheidung von Fels ('rock') und Eis ('ice').

Type of movement (Bewegungstyp)	Rock (Fels / Festgestein)	Soil (Boden / Lockergestein)
Fall (Fallen)	1. <i>Rock/ice</i> fall (Stein-/Eisschlag)	2. <i>Boulder/debris/silt</i> fall
Topple (Kippen)	<u>3. Rock block topple</u>	5. <i>Gravel/sand/silt</i> topple
	4. Rock flexural topple	
Slide (Gleiten)	6. Rock rotational slide	11. <i>Clay/silt</i> rotational slide
	<u>7. Rock planar slide</u>	12. <i>Clay/silt</i> planar slide
	<u>8. Rock wedge slide</u>	<u>13. <i>Gravel/sand/debris</i> slide</u>
	9. Rock compound slide	14. <i>Clay/silt</i> compound slide
	<u>10. Rock irregular slide</u>	
Spread (Spreizen)	15. Rock slope spread	16. <i>Sand/silt</i> liquefaction spread
		17. Sensitive clay spread
Flow (Fliesen)	<u>18. <i>Rock/ice</i> avalanche</u> (Stein-/Eislawine)	19. <i>Sand/silt/debris</i> dry flow
		20. <i>Sand/silt/debris</i> flowslide
		21. Sensitive clay flowslide
		22. Debris flow (Murgang)
		23. Mud flow
		24. Debris flood
		25. Debris avalanche
		<u>26. Earthflow (Erdstrom)</u>
		27. Peat flow
Slope deformation (Hangdeformation)	<u>28. Mountain slope deformation</u> (tiefgreifende gravitative Hangdeformation)	30. Soil slope deformation
	29. Rock slope deformation	31. Soil Creep
		32. Solifluction

2.3. Kartierung von Hanginstabilitäten

2.3.1. Methoden und Hilfsmittel bei der manuellen Kartierung

Wegen ihrer Bedeutung werden tiefgreifende gravitative Hangdeformationen – zusammen mit anderen Hanginstabilitätstypen - als Bestandteil von Naturgefahrenkarten und geologischen Karten erfasst. Die konventionelle Kartierung von Hanginstabilitäten erfolgt manuell (*Guzzetti et al., 2012*). Dies geschieht durch Erkennung spezifischer Formen im Gelände sowie durch die visuelle Interpretation von topographischen Karten, Deformationsmessungen und Fernerkundungsdaten. Neben der traditionellen Verwendung von (stereoskopischen) Luftbildern (*Guzzetti et al., 2012*) haben dabei in den letzten Jahren und Jahrzehnten modernere Fernerkundungsmethoden an Bedeutung gewonnen. Zu diesen zählen optische Sensoren (Luft- und Satellitenbilder), LiDAR ('Light Detecting and Ranging') und SAR (**S**ynthetic **A**perture **R**ADAR) (*Joyce et al., 2014*). Diese Fernerkundungsmittel sind für Kartierungszwecke je nach Hanginstabilitätstyp unterschiedlich geeignet.

LiDAR-basierte digitale Geländemodelle:

Besonders breite Anwendung bei der Untersuchung von Hanginstabilitäten finden räumlich hoch aufgelöste, LiDAR-basierte digitale Geländemodelle (*Jaboyedoff et al., 2012*). Das Potenzial bei der manuellen Kartierung von Hanginstabilitäten wurde bereits im Rahmen der ersten geomorphologischen Anwendungen von LiDAR erkannt (*Carter et al., 2001*) und mit späteren Beispielen bestätigt (*Schulz, 2007; van den Eeckhaut et al., 2007*).

Dargestellt als schattierte Reliefs ('hillshades') visualisieren LiDAR-Geländemodelle die Geländeoberfläche mit hoher Genauigkeit (Abb. 6), auch in bewaldeten Gebieten (*Haneberg et al., 2009; Joyce et al., 2014*). Damit helfen sie dem/der BetrachterIn bei der qualitativen Erkennung von geomorphologischen Formen und Prozessen (*Derron & Jaboyedoff, 2010; Roering et al., 2013*). *Guzzetti et al. (2012: p. 50)* hält entsprechend fest, dass die «Verfügbarkeit landesweiter LiDAR-Aufnahmen wie in der Schweiz, Österreich oder Taiwan nie dagewesene Möglichkeiten für die Kartierung von Hanginstabilitäten eröffnet».

Optische Sensoren:

Luft- und Satellitenbilder erlauben ebenfalls eine visuelle Erkennung verschiedener Phänomene, die im Zusammenhang mit Hanginstabilitäten auftreten. So werden darin frische Anriss- und Ablagerungsflächen von rasch ablaufenden, abrupten Massenbewegungen wie flachgründige Erdbeben oder Fels-/Bergstürze sichtbar. Andererseits sind auch grössere Morphostrukturen im Zusammenhang mit gravitativen Hangdeformationen optisch erkennbar. Ein Beispiel dafür zeigt

das Luftbild in Abb. 7c, welches lineare, von Südwesten nach Nordosten verlaufende Morphostrukturen (vgl. Abb. 7a) an der südlichen Talflanke des Aletschgletschers andeutet.

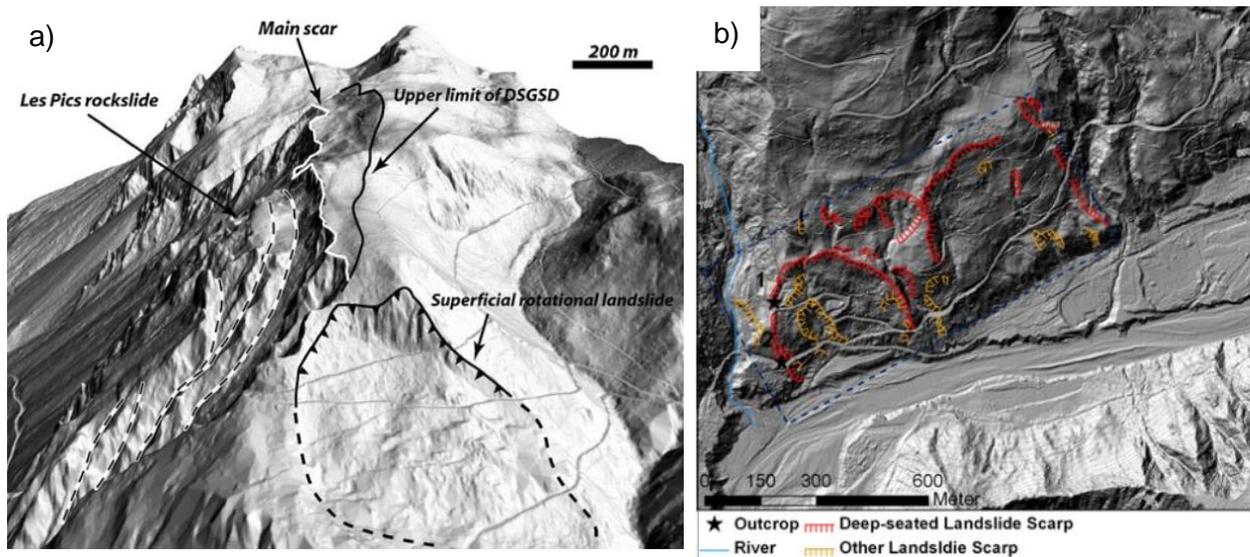


Abb. 6: a) Beispiel eines LiDAR-basierten schattierten Reliefs (pseudo-dreidimensional) zur Erkennung verschiedener Oberflächenmerkmale von Hanginstabilitäten (Jaboyedoff et al., 2012): Felssturzgebiet ('rockslide'); Hauptanrissnische ('main scar'); bergseitige Begrenzung einer tiefgreifenden gravitativen Hangdeformation ('upper limit of DSGSD'); oberflächliche Rotationsrutschung ('superficial rotational landslide'). b) Zweidimensionale kartographische Darstellung eines LiDAR-basierten schattierten Reliefs mit Anrissnischen von tiefgreifenden Hanginstabilitäten (rot) und flachgründigen Rutschungen (orange) (Lin et al., 2013).

SAR-Interferometrie (Synthetic Aperture RADAR):

SAR-Interferometrie ermöglicht die Messung der Geschwindigkeit und räumlichen Ausdehnung von langsamen Geländebewegungen (Joyce et al., 2014) und wird somit - wie in Abb. 7b gezeigt - unter anderem für die Erkennung und Überwachung von gravitativen Hangdeformationen eingesetzt (Rott & Nagler, 2006; Strozzi et al., 2010; Frattini et al., 2013). Eigentlich ist diese Methode eher bei den Verfahren zur automatisierten Kartierung (Kap. 2.3.2) anzusiedeln. Jedoch werden die Ergebnisse der SAR-Interferometrie kombiniert mit geomorphologischen und geologischen Betrachtungen auch für die manuelle Kartierung verwendet (Strozzi et al., 2013). Einerseits kann die Karte auf diese Weise mit Angaben zu Deformationsraten ergänzt werden. Andererseits sind die Ergebnisse der SAR-Interferometrie auch mit Unsicherheiten behaftet und erfordern deshalb für eine zuverlässige Interpretation die Kenntnis des geomorphologischen Kontexts (Bundesamt für Umwelt BAFU, 2015).

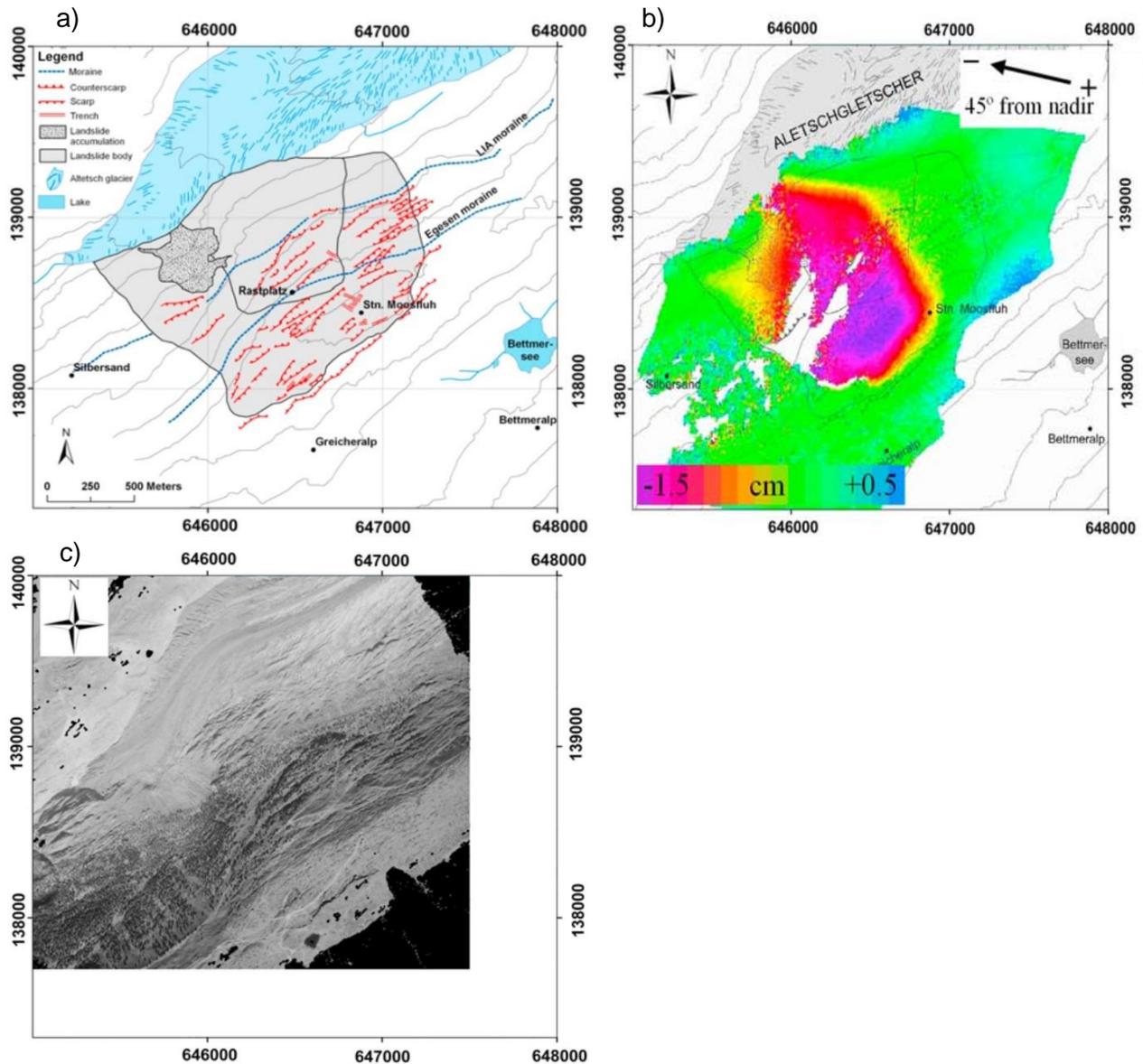


Abb. 7: Gravitative Hangdeformation an der südlichen Talflanke des Aletschgletschers (Strozzi et al., 2010). a) Kartierter Umriss der Hanginstabilität (graue Fläche) und kartierte Morphostrukturen (rote Linien-signaturen: Nackentäler, Anrissnischen, Gräben). b) Gleicher Ausschnitt: Deformationsraten gemäss SAR-Interferometrie (eingefärbt) in Aufnahme-richtung des Satelliten für den Zeitraum August bis September 2008. c) Gleicher Ausschnitt: Luftbild aus dem Jahr 2006.

2.3.2. Automatisierte Ansätze mit Fernerkundungsdaten

Auf das Potenzial der **SAR-Interferometrie** für die automatisierte Erkennung von Hanginstabilitäten wurde im vorangehenden Kapitel hingewiesen. Bei Hanginstabilitäten mit genügend grossen Deformationsraten ist eine ähnliche Bestimmung auch mittels **Differenzanalyse von zeitlich gestaffelten LiDAR-Geländeaufnahmen** möglich (Baldo et al., 2009; Prokop & Panholzer, 2009; Daehne & Corsini, 2013). Beide Methoden setzen offensichtlich voraus, dass das betroffene Gebiet im Beobachtungszeitraum aktiv ist. Tiefgreifende gravitative Hang-

deformationen weisen jedoch ein komplexes zeitliches Bewegungsmuster auf (*Bonzanigo et al., 2007*), welches inaktive Phasen und Reaktivierungen miteinschliesst (*Agliardi et al., 2001*).

Zu Gebieten ohne anhaltende Aktivität zählen auch Anriss- und Ablagerungsflächen von ehemaligen rasch ablaufenden, abrupten Massenbewegungen wie flachgründige Erdrutsche oder Fels-/ Bergstürze. Eine Möglichkeit zur automatisierten Kartierung solcher Prozesse besteht in der **quantitativen Analyse von multispektralen Luft- und Satellitenbildern** (*Joyce et al., 2014*). Topographische Informationen (z.B. Hangneigung) aus digitalen Geländemodellen werden dabei zum Teil als ergänzende Klassifikationskriterien berücksichtigt (*Barlow et al., 2003; Martha et al., 2011; Stumpf & Kerle, 2011*). Dieser Ansatz setzt voraus, dass durch die Hanginstabilität sichtbare Erosions- und Ablagerungsflächen entstehen, welche einen optischen Kontrast zum umliegenden, oft vegetationsbedeckten Terrain bilden (vgl. Abb. 5a bis c). Gebiete mit tiefgreifenden gravitativen Hangdeformationen können lokal zwar durch solche raschen Massenbewegungsprozesse überlagert sein (*Agliardi et al., 2001*). Sie weisen grundsätzlich aber zu wenige Indizien und optische Kontraste auf (vgl. Abb. 5d), welche eine zuverlässige automatisierte Erkennung mit multispektralen Luft- und Satellitenbildern ermöglichen würden.

Ähnlich wie bei den Verfahren mit multispektralen Luft- und Satellitenbildern werden **geomorphometrische Analysen von digitalen Geländemodellen** durchgeführt, um topographische Klassifikationskriterien für eine automatisierte Erkennung von Hanginstabilitäten abzuleiten. Dieser Ansatz hat nicht zuletzt durch das Aufkommen von räumlich hochaufgelösten, LiDAR-basierten Geländemodellen einen Aufschwung erlebt. Übersichten zu entsprechenden Beispielen liefern *Guzzetti et al. (2012)*, *Jaboyedoff et al. (2012)* und *Tarolli (2014)* sowie Kap. 2.4 dieser Arbeit.

Charakteristische Oberflächenformen von tiefgreifenden gravitativen Hangdeformationen (Kap. 2.1) sind insbesondere in räumlich hochaufgelösten, je nach Grösse aber auch in gröberen digitalen Geländemodellen erkennbar. Daraus wird gefolgert, dass:

- 1) der Ansatz der geomorphometrischen Analyse von digitalen Geländemodellen zur automatisierten Erkennung tiefgreifender gravitativer Hangdeformationen in Frage kommt,
- 2) und – gerade auch im Hinblick auf temporär inaktive Gebiete - eine sinnvolle Ergänzung zur SAR-Interferometrie darstellt.

Das nachfolgende Kapitel 2.4 zeigt auf, welche bisherigen Studien in diesem Zusammenhang berücksichtigt werden können.

2.4. Verwandte bisherige Studien

2.4.1. Konzeptionelle Grundlagen

Das Konzept, Gebiete mit Hanginstabilitäten mittels geomorphometrischer Analyse von Geländemodellen in einem automatisierten Verfahren zu identifizieren, kann bereits auf die Zeit vor Einführung hochaufgelöster LiDAR-Geländemodelle zurückgeführt werden.

Pike (1988) lieferte wichtige konzeptionelle Grundlagen für dieses Vorgehen. Er nahm an, dass es grundsätzlich möglich sein sollte, «die visuelle Wahrnehmung topographischer Form» durch Verwendung «numerischer Methoden und digitaler Höhenangaben» zu «simulieren» (*Pike, 1988: p. 492*). Dies sollte es schliesslich erlauben, «Landschaften zu unterscheiden», die «durch unterschiedliche Prozesse geformt wurden». Weiter nahm er an, dass solche «Simulationen so ausgelegt werden können», dass sie «eine schnelle und automatisierte Manipulation, Kartierung und Korrelation topographischer Form über grosse Gebiete» ermöglichen.

Als Schlüssel diente ihm das Konzept der «**geometrischen Signatur**» (englisch: «geometric signature»). Diese wird umschrieben als «ein Set von Messwerten, welches die topographische Form gut genug beschreibt um geomorphologisch ungleiche Landschaften zu unterscheiden» (*Pike, 1988: p. 494*). Es werden verschiedene Grundsätze aufgelistet, welche für das Konzept der «geometrischen Signatur» von zentraler Bedeutung sind (*Pike, 1988: p. 495*):

- 1) Die «Wahrnehmung von topographischer Form» bei der geomorphologischen Feldarbeit erfolgt «synthetisch», das heisst durch Integration vieler verschiedener Geländemerkmale und auf unterschiedlichen Massstabsebenen.
- 2) Die «parametrisierte Repräsentation der Topographie anhand digitaler oder anderer Daten» erfolgt entsprechend «*multivariat*», das heisst nicht nur aufgrund einer «einzelnen 'magischen Zahl', wie z.B. der mittleren Hangneigung».
- 3) Statistische Methoden sind erforderlich, um diese «synthetische und multivariate» Charakterisierung zu repräsentieren.

Als Beispiel untersuchte er die topographischen Eigenschaften von Gebieten mit flachgründigen Erdrutschen anhand eines Geländemodells mit einer Rasterauflösung von 30 Metern. Die geometrische Signatur wurde dabei für jede Rasterzelle mittels Nachbarschaftsstatistiken innerhalb eines darauf zentrierten, quadratischen Berechnungsfensters mit vorgegebener Grösse (630m x 630m) berechnet. Dieses Grundprinzip, welches auch in vielen der neueren Untersuchungen zur Anwendung kommt, ist in Abb. 8 stellvertretend illustriert.

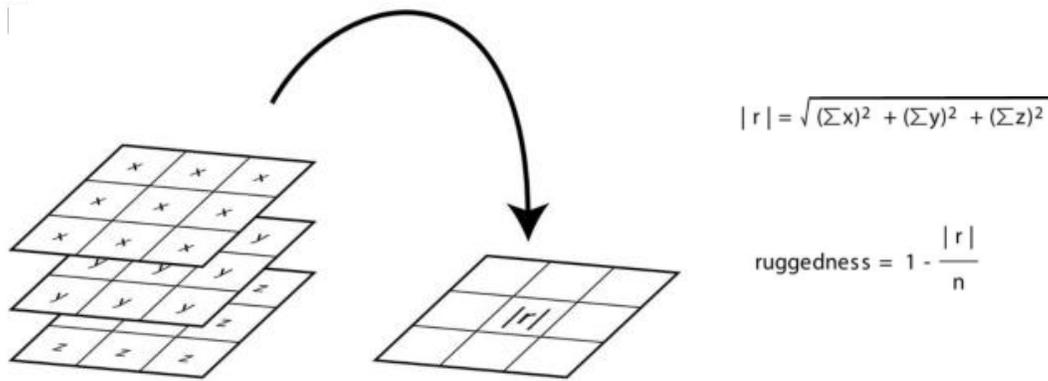


Abb. 8: Berechnung eines geomorphometrischen Parameters mittels Nachbarschaftsbeziehungen innerhalb eines quadratischen Berechnungsfensters, stellvertretend illustriert am Beispiel des 'vector ruggedness index' (Sappington et al., 2007). Die Formel in diesem Fall berechnet ein topographisches Rauigkeitsmass für die zentrale Rasterzelle aufgrund der Variabilität von Hangneigung und Exposition innerhalb eines quadratischen Berechnungsfensters (hier 3 x 3 Rasterzellen).

Berücksichtigt wurden bei Pike (1988) verschiedene statistische Verteilungsmasse von Höhenwerten, Hangneigung sowie der Profilkürmung. Ansatzweise gelang es, aufgrund dieser geometrischen Signatur Gebiete mit verschiedenen dominierenden Hanginstabilitätstypen zu unterscheiden. Dennoch war das Ergebnis nicht ganz zufriedenstellend, was mitunter auf die verwendeten geomorphometrischen Parameter zurückgeführt wurde. Aus der heutigen Optik kann aber auch die grobe räumliche Auflösung des Geländemodells eine Rolle spielen.

Vergleichbare Arbeiten zu Pike (1988) mit grob aufgelösten digitalen Geländemodellen (Breite der Rasterzellen von 20 bis 30m) wurden unter anderem von Gritzner et al. (2001) und Guzzetti et al. (2005) durchgeführt. In den genannten Beispielen steht die räumliche Gefährdungsabschätzung ('susceptibility mapping') für künftige Hanginstabilitäten (z.B. flachgründige Erdbeben, keine tiefgreifenden gravitativen Hangdeformationen) im Vordergrund. Neben topographischen Daten werden dabei auch thematische Informationen wie Geologie, Niederschlag oder Landnutzung mitberücksichtigt.

2.4.2. Quantitative (geomorphometrische) Analyse grossräumiger Hanginstabilitäten

Roering et al. (2005) und Korup (2006) haben geomorphometrische Eigenschaften von grossen tiefgreifenden Hanginstabilitäten anhand grob aufgelöster digitaler Geländemodelle (Rasterauflösung 26.5 m bzw. 25 m) für Gebirgsregionen in Nordamerika respektive Neuseeland untersucht. Dabei werden sowohl rasch ablaufende Prozesse (Bergstürze; s. Kap. 2.2) als auch tiefgreifende gravitative Hangdeformationen betrachtet.

Als geomorphometrische Parameter dienen *Roering et al. (2005)* die Hangneigung und Oberflächenkrümmung⁴ innerhalb eines Betrachtungsausschnitts von 3 x 3 Rasterzellen (79.5 m x 79.5 m). *Korup (2006)* betrachtet die statistische Verteilung von Höhenwerten und Hangneigung (bezogen auf einen 75 m x 75 m Ausschnitt) innerhalb kreisförmiger Berechnungsfenster mit variablen Radien (125 bis 1000 m). Zudem verwendet er Parameter zur Charakterisierung hydrologischer Einzugsgebiete ('steepness index', 'concavity index', 'stream power index'), welche Funktionen der Neigung entlang des Fliessweges und der Fläche des Einzugsgebiets an der untersuchten Stelle repräsentieren. Im Vergleich zum übrigen Terrain - in welchem fluviale Prozesse (z.B. tiefe Geländeeinschnitte infolge fluvialer Erosion) dominieren - weisen die untersuchten Gebiete mit tiefgreifender Hanginstabilität folgende Merkmale auf:

- **Abflachung** der Topographie: geringere lokale Höhenunterschiede ('relief'), geringere Hangneigung.
- **Glättung** der Topographie (geringere Krümmung, geringere Variabilität der Hangneigung).
- Veränderte Beziehung von lokaler Neigung und Einzugsgebietsgrösse entlang des Entwässerungsnetzes (siehe nachfolgende Erläuterungen).

Abb. 9a illustriert schematisch, wie die talwärts gerichtete Materialverlagerung bei einer tiefgreifenden Hanginstabilität (hier Bergsturz) zu einer «Abflachung» der Talflanke führt. Die dadurch veränderte Beziehung von lokaler Neigung und Einzugsgebietsgrösse entlang des Entwässerungsnetzes ist bei *Korup (2006)* als Abnahme des 'steepness index' («Steilheit») und 'concavity index' («Konkavität») im Vergleich zu Gebieten ohne tiefgreifende Hanginstabilitäten messbar.

Booth et al. (2013) untersucht diese Beziehung speziell für langsame, tiefgreifende Hanginstabilitäten. Seine Untersuchung zeigt ebenfalls, dass sich die Beziehung zwischen lokaler Neigung und Einzugsgebietsfläche im Vergleich zu Gebieten ohne Hanginstabilität verschiebt. Konkret wird beobachtet, dass bei langsamen tiefgreifenden Hanginstabilitäten grössere Neigungswerte auch noch bei grösseren Einzugsgebietsgrössen auftreten (Abb. 9b). Dies ist intuitiv anhand der Beispiele in Abb. 9a und Abb. 2 (S. 6) nachvollziehbar, wonach die talwärts gerichtete Materialverschiebung einen steilen, konvexen Hangfuss bildet. Dadurch treten steilere Hangneigungen auch noch mit zunehmendem Abstand zur Wasserscheide und entsprechend grösserer Einzugsgebietsfläche in Erscheinung.

⁴ Berechnet mit Laplace-Operator als zweidimensionale topographische Krümmung nach *Zevenbergen & Thorne (1987)*.

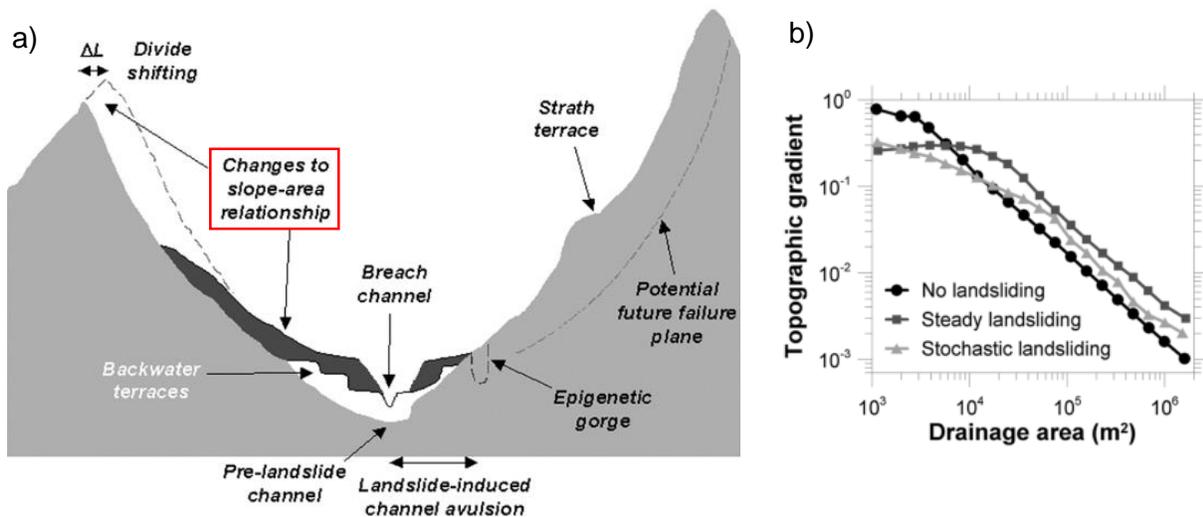


Abb. 9: a) Schematische Darstellung mit Veränderungen des Talquerschnitts infolge einer tiefgreifenden Hanginstabilität (dunkelgraue Fläche). Das rote Kästchen weist auf veränderte Beziehungen von lokaler Neigung und Einzugsgebietsgrösse entlang des Entwässerungsnetzes hin (Korup et al., 2010). b) Beziehung zwischen lokaler Neigung (vertikale Achse) und Einzugsgebietsfläche (horizontale Achse) entlang des Entwässerungsnetzes für Gebiete ohne Hanginstabilität ('no landsliding'), mit langsamen tiefgreifenden Hanginstabilitäten ('steady landsliding') und episodischen, abrupten Hanginstabilitäten ('stochastic landsliding') (Booth et al., 2013).

Ähnliche Untersuchungen wie die oben erwähnten Studien haben *Crosta et al. (2013)* bzw. *Agliardi et al. (2013)* explizit für tiefgreifende gravitative Hangdeformation in den europäischen Alpen durchgeführt. Das dabei verwendete Geländemodell ist mit einer Rasterauflösung von 90m noch grobmaschiger. Die Ergebnisse bestätigen die beobachtete «Abflachung» und «Glättung» durch tiefgreifende Hanginstabilitäten beim entsprechenden (groben) Analysemasstab.

Crosta et al. (2013) verwendet noch weitere topographische, geologische und klimatische Parameter um verschiedene Einflussfaktoren in Bezug auf die räumliche Verbreitung tiefgreifender gravitativer Hangdeformationen zu untersuchen. Dabei wird mitunter eine positive Korrelation zwischen Vorkommen von tiefgreifenden gravitativen Hangdeformationen und der Entwässerungsdichte⁵ ('drainage density') festgestellt.

⁵ «Entwässerungsdichte», berechnet als Funktion der summierten Länge aller Fliesswege (Bäche, Flüsse) eines Gebiets im Verhältnis zu dessen Fläche. Die Entwässerungsdichte bezieht sich im genannten Beispiel auf Entwässerungsnetze mit einem minimalen Einzugsgebiet von 1km² sowie 10km².

2.4.3. Geomorphometrische Analyse räumlich hochaufgelöster digitaler Geländemodelle zur automatisierten Erkennung von Hanginstabilitäten

Beginnend mit der Arbeit von *McKean & Roering (2004)* wurden in den vergangenen Jahren rund ein Dutzend Arbeiten vorgestellt, die eine geomorphometrische Analyse von LiDAR-Geländemodellen zur Charakterisierung und/oder automatisierten Erkennung von Hanginstabilitäten vornehmen. Dabei werden verschiedene Aspekte aus der Arbeit von *Pike (1988)* implizit oder explizit aufgegriffen und mit teils neuen Methoden und Parametern erweitert.

Die einzelnen Studien weisen Unterschiede in Bezug auf die untersuchten Hanginstabilitätstypen (Tab. 2, S. 21) und methodischen Ansätze auf (Tab. 3, S. 24). **Nachfolgend werden wesentliche Merkmale dieser Untersuchungen zusammengefasst.** Wichtige Erkenntnisse in Bezug auf die vorliegende Arbeit werden anschliessend in Kap. 2.5 dargestellt.

Überblick Untersuchungsgebiete:

Die bisherigen Untersuchungen decken Hanginstabilitäten in verschiedenen geologischen und klimatischen Gebieten in Neuseeland, den USA, Japan, China, Taiwan, Belgien, Italien und im Schweizer Jura (*Kalbermatten et al., 2012*) ab. Dabei ist zwischen Fallstudien zur Charakterisierung von Einzelobjekten (z.B. *McKean & Roering, 2004*) einerseits und grossräumigen Analysen zwecks regionaler Kartierung von Hanginstabilitäten (z.B. *Booth et al., 2009*) andererseits zu unterscheiden (siehe Tab. 2).

Untersuchte Hanginstabilitätstypen:

Die untersuchten Hanginstabilitäten umfassen ein breites Spektrum bezüglich des Bewegungstyps, der räumlichen Ausdehnung (Fläche, Mächtigkeit der instabilen Masse, maximaler Höhenunterschied) und der Prozessgeschwindigkeit. Tab. 2 gibt eine entsprechende Übersicht.

Eine eindeutige Zuweisung von Hanginstabilitätstypen nach *Hungr et al. (2014)* (Kap. 2.2) ist nicht in allen Fällen möglich, da die Beschreibungen keiner einheitlichen Klassifikation folgen und unterschiedlich detailliert sind. Zum Beispiel ist von «tiefgründigen» Hanginstabilitäten ('deep-seated landslides / earthslides') die Rede, wobei eine Mächtigkeit von maximal nur 10 Metern (*van den Eeckhaut et al., 2012*) oder maximal 80 Metern (*Lin et al., 2013*) gemeint sein kann. In anderen Fällen werden gar keine Angaben zur Mächtigkeit gemacht. Teilweise fehlen zudem Hinweise zur Geschwindigkeit oder Aktivität des Prozesses.

Tab. 2 unterscheidet deshalb zwischen Fällen in denen die Zuweisung des Hanginstabilitätstyps aufgrund der Informationen entweder «eindeutig/wahrscheinlich» ist oder nur «möglich» erscheint. Insbesondere bei Untersuchungen mit regionalem Fokus (z.B. *Booth et al., 2009*) trifft

meist Letzteres zu, da in diesen Fällen auf eine detaillierte Beschreibung der involvierten Prozesse verzichtet wird und wahrscheinlich mehrere Hanginstabilitätstypen involviert sind.

Gestützt auf Tab. 2 können im Wesentlichen folgende drei Gruppen untersuchter Hanginstabilitätstypen unterschieden werden:

- **Gleiten im Locker- oder Festgestein auf einer definierten basalen Gleitfläche:** z.B. Typ 9 'rock compound slide' (Glenn et al., 2006) oder Typ 13 'gravel/sand/debris slide' (Tarolli et al., 2012). Dabei handelt es sich meist um eher kleinräumige (< 1ha bis < 1km²) Hanginstabilitäten. Die Prozessgeschwindigkeiten reichen je nach Beispiel von einigen dm/Jahr bis zu mehreren m/s. Als Oberflächenmerkmale weisen diese Hanginstabilitäten häufig bergseitige Anrissnischen und auf gewissen Betrachtungsmassstäben zum Teil erhöhte Oberflächenrauigkeiten auf.
- **Erdstromartige Hanginstabilitäten** (Typ 26 'earthflow'): Diese sind mittelgross (0.5 bis 3 km²). Die Geschwindigkeiten liegen im Normalfall in der Grössenordnung von mehreren m/Jahr und während Beschleunigungsphasen bei mehreren m/Tag (McKean & Roering, 2004; Ventura et al., 2011; Kalbermatten et al., 2012; Berti et al., 2013). Morphologische Merkmale sind eine langgezogene Zungenform und erhöhte Oberflächenrauigkeiten auf gewissen Betrachtungsmassstäben durch interne Deformationen (Abb. 10a).
- **Gravitative Hangdeformationen im Festgestein** (Typ 29 'rock slope deformation'): Bei einigen der regionalen Untersuchungen (Booth et al., 2009; Kasai et al., 2009; van den Eeckhaut et al., 2012; Chen et al., 2014; Li et al., 2015) deuten die räumliche Ausdehnung, die Mächtigkeitsangaben oder topographische Merkmale von Hanginstabilitäten darauf hin, dass auch gravitative Hangdeformationen im Festgestein involviert sein können. Diese Bezeichnung wird jedoch in keiner der genannten Untersuchungen verwendet und es fehlen jeweils vollständige Angaben (z.B. Prozessgeschwindigkeit). Am ehesten ist eine eindeutige Zuweisung zu gravitativen Hangdeformationen bei Lin et al. (2013) möglich. Es handelt sich in den dargestellten Fällen eher um kleinere Hanginstabilitäten an Talflanken mit maximalen Höhenunterschieden von einigen Hundert Metern (Tab. 2 und Beispiel in Abb. 6b, S. 12). Diese werden in Anlehnung an Hungr et al. (2014) dem Typ 29 ('rock slope deformation') zugewiesen.

Untersuchungen, welche sich spezifisch mit (grossen) tiefgreifenden gravitativen Hangdeformationen (Typ 28, 'mountain slope deformation') gemäss Kap. 2.1 befassen, liegen demzufolge nicht vor.

Tab. 2: Untersuchte Hanginstabilitäten bisheriger Studien. Die Zuweisung der Hanginstabilitätstypen stützt sich - sofern vorhanden - auf die Angaben in den Untersuchungen oder andernfalls auf die Interpretation der schattierten Reliefs. Farbcodierung: grün = Festgestein; braun = Lockergestein; dunkelgrau = Zuweisung «eindeutig/wahrscheinlich»; hellgrau = Zuweisung «möglich». Buchstabencodierung: E = Einzelobjekt(e); R = regionale Untersuchung; N/A = keine Angaben; y = Jahr; d = Tag.

		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Einzelobjekt/Region		E	E	R	R	E	R	E	E	R	E	R	R
Max. Fläche [km ²]		0.5	0.85	~0.1	~20	0.5	~1.0	0.03	0.01	~3.0	0.36	~2.0	~2.0
Max. Höhendiff. [m]		250	150	710	<400	425	140	<60	40	900	<500	730	730
Max. Mächtigkeit [m]		N/A	N/A	30	>10	20	10	N/A	<10	40	83	N/A	N/A
Max. Geschwindigkeit		2 m/y	dm/y	N/A	N/A	60 m/y	N/A	N/A	m/s	20 m/d	N/A	N/A	N/A
Hanginstabilitätstypen nach Hungr et al. (2014), vgl. Kap. 2.2	1	Fallen											
	2												
	3	Kippen											
	4												
	5												
	6	Gleiten											
	7												
	8												
	9												
	10												
	11												
	12												
	13												
	14												
	15	Spreizen											
	16												
	17												
	18	Fließen											
	19												
	26												
	27												
	28	Hang-deformation											
	29												
	30												
	31												
	32												

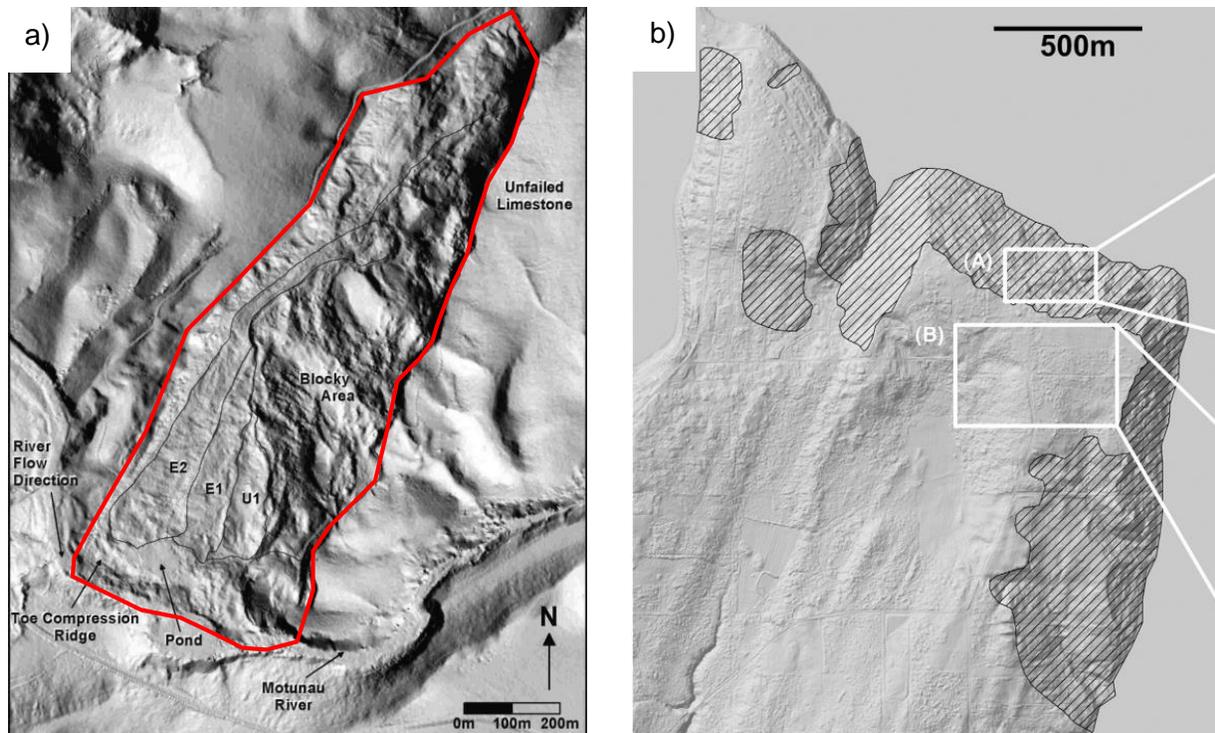


Abb. 10: Beispiele von schattierten Reliefs zur Illustration unterschiedlicher Oberflächenrauigkeit inner- und ausserhalb von Hanginstabilitäten. a) Beispiel aus McKean & Roering (2004), Hanginstabilität rot umrandet. b) Beispiel aus Booth et al. (2009), Hanginstabilitäten (entlang Küste) schraffiert.

Berechnung der «geometrischen Signatur»:

Die methodischen Ansätze der bisherigen Untersuchungen sind in Tab. 3 zusammengefasst. In den meisten Fällen werden dabei zunächst - in Analogie zu 2.4.1 - für jede Rasterzelle geomorphometrische Parameter mittels Nachbarschaftsbeziehungen oder Statistik innerhalb eines darauf zentrierten **quadratischen⁶ Berechnungsfensters** ermittelt. Der Einfluss des Betrachtungsmassstabes wird zum Teil durch Anpassung der Rasterauflösung oder der Anzahl Rasterzellen innerhalb des Berechnungsfensters untersucht (McKean & Roering, 2004; Kasai et al., 2009; Tarolli et al., 2012; Berti et al., 2013).

Als häufigste Komponente der geometrischen Signatur wird dabei die topographische **Rauigkeit** berücksichtigt. Dies basiert auf der Annahme, dass die Geländeoberfläche innerhalb oder am Rand einer Hanginstabilität durch die Deformationen gestört wird (Abb. 10). Dadurch wird die topographische Rauigkeit auf bestimmten (kleinräumigen) Betrachtungsmassstäben gegenüber dem ungestörten Zustand verändert. Dies kann für die gesamte Fläche der Hanginstabilität oder Bereiche davon gelten (z.B. Anrissnischen (Lin et al., 2013)).

⁶ McKean & Roering (2004) verwenden für ihre Rauigkeitsberechnungen auch kreisförmige Berechnungsfenster, mit dem Ergebnis, dass die Resultate keine nennenswerten Abweichungen zum quadratischen Berechnungsfenster aufweisen.

Die Methoden der Rauigkeitsberechnung unterscheiden sich je nach Studie (vgl. auch Tab. 3). In Anlehnung an *Berti et al. (2013)* können folgende Gruppen von häufig verwendeten Rauigkeitsmassen unterschieden werden:

- **Statistische Streuung von Höhenwerten** (z.B. 'root mean square height')
- **Statistische Streuung von Neigungswerten** (z.B. Standardabweichung der Neigung)
- **Statistische Streuung von Normalvektoren auf der Geländeoberfläche** (z.B. «Eigenwert-Methode» nach *Woodcock (1977)*, siehe Kap. 4.2.4)
- Verhältnis zwischen der effektiven Geländeoberfläche und der planaren (auf Horizontale projizierte) Grundfläche.

In einigen Untersuchungen gemäss Tab. 3 wird diese Komponente der geometrischen Signatur auch durch Krümmungsmasse⁷ berücksichtigt. Studien, welche die Effizienz unterschiedlicher Methoden der Rauigkeitsberechnung in Bezug auf die Erkennung von (erdstromartigen) Hanginstabilitäten untersuchen, sind jene von *McKean & Roering (2004)* sowie *Berti et al. (2013)*.

Als weiterer Parameter der geometrischen Signatur, der mittels Nachbarschaftsbeziehungen innerhalb eines quadratischen Berechnungsfensters ermittelt wird, wird oftmals die **Hangneigung** berücksichtigt. Dies trifft insbesondere in den Fällen zu, wo die geometrische Signatur für eine anschliessende Segmentierung und objekt-basierte Klassifikation zur automatisierten Kartierung von Hanginstabilitäten genutzt wird (siehe Ausführungen weiter unten).

Einen alternativen Ansatz zur Bestimmung der geometrischen Signatur (siehe Tab. 3) bieten **Spektral-Analysen**, welche charakteristische räumliche Frequenzen der Geländeoberfläche extrahieren. Dies wurde erstmalig von *McKean & Roering (2004)* für eine (erdstromartige) Hanginstabilität getestet und ergibt ein indirektes Mass für die Rauigkeit im Bereich der entsprechenden räumlichen Längenskalen. *Booth et al. (2009)* übernimmt den Ansatz für eine automatisierte, regionale Kartierung von Hanginstabilitäten verschiedener räumlicher Ausdehnung und vergleicht dabei zwei Methoden (zweidimensionale diskrete Fourier-Transformation und zweidimensionale kontinuierliche Wavelet-Transformation). Bei *Ventura et al. (2011)* und *Kalbermatten et al. (2012)* kommen Spektral-Analysen ebenfalls bei der Charakterisierung von erdstromartigen Hanginstabilitäten zum Einsatz. *Berti et al. (2013)* vergleicht quantitativ die Wirksamkeit von Spektral-Analysen mit anderen Rauigkeitsberechnungen im Hinblick auf die automatisierte Erkennung desselben Hanginstabilitätstyps.

⁷ Berechnet als zweidimensionale topographische Krümmung mit Laplace-Operator (*McKean & Roering, 2004*), Horizontalkrümmung (*van den Eeckhaut et al., 2012*) oder «maximale Krümmung» (*Tarolli et al., 2012; Lin et al., 2013*).

Tab. 3: Methodische Ansätze bisheriger Untersuchungen. Buchstabencodierung: H = Höhenwert; S = Neigung ('slope'); V = Normalvektor auf Geländeoberfläche; A = Fläche; Ex = Exposition; F = Fliessrichtung; Δ = Platzhalter für diverse Masse der Abweichung oder statistischen Streuung; μ = Mittelwert; σ = Standardabweichung; RF = Klassierungsalgorithmus 'Random Forest'; SVM = Klassierungsalgorithmus 'Support Vector Machine'; top. = topologisch (automatisiert); man. = manuell; N/A = keine Angaben.

Bisherige Untersuchungen: 1 (McKean & Roering, 2004); 2 (Glenn et al., 2006); 3 (Kasai et al., 2009); 4 (Booth et al., 2009); 5 (Ventura et al., 2011); 6 (van den Eeckhaut et al., 2012); 7 (Kalbermatten et al., 2012); 8 (Tarolli et al., 2012); 9 (Berti et al., 2013); 10 (Lin et al., 2013); 11 (Chen et al., 2014); 12 (Li et al., 2015)											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11 / 12
LiDAR Geländemodell											
Punktabstand [m]	2.6	~1.0	~1.0	1.8 / 0.9	~0.5	2.0	N/A	~0.5	~0.5	1.0	~0.5
Rasterauflösung [m], (min. – max.)	0.5 - 5.0	Kein Raster	1.0 - 20	1.8 / 0.9	1.0	2.0	1.0	0.5	1.0 - 25	1.0	3.0
Geomorphometrische Parameterberechnung mittels Nachbarschaftsbeziehungen innerhalb quadratischer Berechnungsfenster											
Fenstergrösse [Anzahl Rasterzellen], min. – max.	3 - 11	(5m)	3		3	3		3 - 33	3 - 31	15	3
Rauigkeit	ΔS ΔV	ΔH	ΔV		ΔH f(A)	ΔH			ΔH ΔS ΔV		ΔH ΔS ΔEx (!)
Krümmung											
Neigung											
Orientierung						F					Ex
Alternative oder zusätzliche Ansätze / Parameter											
Spektralanalysen der Höhenwerte											
Semivarianzanalyse der Höhenwerte											
'Openness' und 'Sky-View Factor'											
Texturanalysen in 5 Richtungen (N/S/E/W und Exposition)											H S Ex
Pixel-basierte Klassifikation											
Klassifikation mit Schwellenwert / RF											RF
Objekt-basierte Segmentierung und Klassifikation											
Segmentierung (Kriterien)						(ΔH , S...)					(H)
Deskriptoren je Segment						μ , σ					μ , σ Min. Max
Klassifikation						SVM					SVM RF
Objekt-Aggregation						top.					man.

Weiter wurden Semivarianzanalysen von Höhenwerten (*Glenn et al., 2006; Berti et al., 2013*) sowie Texturanalysen von Höhenwerten, Neigung und Exposition aus dem Gebiet der Bildanalyse eingesetzt (*Chen et al., 2014; Li et al., 2015*), welche ebenfalls Hinweise zur Rauigkeit liefern.

Klassifikation von Hanginstabilitäten aufgrund der geometrischen Signatur:

Im einfachsten Fall wird die ermittelte geometrische Signatur rein visuell anhand der kartographischen Darstellung ausgewertet, um eine **qualitative Beurteilung** der Aussagekraft der verwendeten Parameter vorzunehmen (*Kasai et al., 2009*). Dabei werden auch Rückschlüsse auf das Bewegungsverhalten (Kinematik) oder die Aktivität verschiedener Teilbereiche innerhalb einer Hanginstabilität gezogen (*McKean & Roering, 2004; Glenn et al., 2006; Ventura et al., 2011; Kalbermatten et al., 2012*).

Durch Vergleich mit referenzierten Flächen (Karten / Inventare von Hanginstabilitäten) kann andererseits ein optimierter Schwellenwert für einen Parameter der geometrischen Signatur (meist Rauigkeit) abgeleitet und dadurch eine automatisierte, **pixel-basierte Klassifikation** durchgeführt werden. Diese nimmt aufgrund des Schwellenwertes eine binäre Unterscheidung von Rasterzellen mit oder ohne Hanginstabilität respektive Merkmalen davon (z.B. Anrissnischen) vor. Beispiele für dieses Vorgehen sind *Booth et al. (2009)*, *Tarolli et al. (2012)*, *Berti et al. (2013)* und *Lin et al. (2013)*.

Einige der neueren Studien (*van den Eeckhaut et al., 2012; Li et al., 2015*) erweitern das Verfahren der automatisierten Kartierung mit **objekt-basierten Ansätzen** aus dem Gebiet der Bildsegmentierung und Bildklassifikation. Dabei kommen folgende Prinzipien zur Anwendung:

- **Segmentierung:** i) Zusammenfassen von Rasterzellen in möglichst homogene Segmente (hier: Geländebereiche), basierend auf ausgewählten Bildkomponenten (hier: geomorphometrische Parameter). ii) Berechnung segmentbezogener Deskriptoren (z.B. Standardabweichung der pixel-basierten Hangneigungswerte innerhalb des Segments).
- **Klassifikation:** Klassifikation von Segmenten (oder Pixeln, *Chen et al. (2014)*) basierend auf einer Auswahl von Bildkomponenten (hier: geomorphometrische Parameter). Der Algorithmus nimmt eine Kalibrierung der Klassifikationskriterien anhand von Referenzflächen ('Ground Truth') vor und wendet diese anschliessend auf das zu klassierende Gebiet an (Zuweisung der Klassen «Hanginstabilität» / «übriges Terrain»).

Van den Eeckhaut et al. (2012) verwendet dabei den Klassifikationsalgorithmus 'Support Vector Machine'. Die geomorphometrischen Parameter (u.a. Hangneigung, Rauigkeit, Horizontalkrümmung) werden dabei zunächst auch nach dem pixel-basierten Ansatz berechnet und anschliessend für die Segmentierung und Klassifikation verwendet. Zusätzlich werden

topologische Kriterien berücksichtigt. Konkret werden dabei in einem ersten Schritt bergseitige Anrissnischen extrahiert, welche ein Identifikationsmerkmal für die im untersuchten Gebiet vorhandenen Hanginstabilitäten sind. Anschliessend werden Segmente talseitig der Anrissnische je nach geometrischer Signatur (inkl. Rauigkeit) zur Hanginstabilität «hinzugefügt».

Chen et al. (2014) verwendet den Algorithmus 'Random Forest' für eine pixel-basierte Klassifikation aufgrund von Höhenwerten, Exposition, Neigung sowie daraus abgeleiteten statistischen Messgrössen. Dieselbe Studie wird bei *Li et al. (2015)* mit einem Segmentierungsverfahren erweitert. Dabei wird auch die Wirksamkeit verschiedener Klassifikationsalgorithmen ('Random Forest' und 'Support Vector Machine') verglichen.

2.5. Forschungslücken und Erkenntnisse aufgrund bisheriger Untersuchungen

Wie in Kap. 2.4 dargelegt, kann die vorliegende Arbeit an verschiedene Schwerpunkte früherer Studien anknüpfen:

- 1) Quantitative (geomorphometrische) Analyse von grossräumigen Hanginstabilitäten mit grob aufgelösten digitalen Geländemodellen (Kap. 2.4.2)
- 2) Geomorphometrische Analyse diverser Hanginstabilitätstypen mit räumlich hoch-aufgelösten digitalen Geländemodellen (Kap. 2.4.3)
- 3) Verfahren des maschinellen Lernens (Segmentierung und Klassifikation) zur automatisierten geomorphometrischen Kartierung von Hanginstabilitäten (Kap. 2.4.3)

Es befindet sich darunter jedoch keine Untersuchung, die diese drei Komponenten vereint und gezielt auf die automatisierte Kartierung von tiefgreifenden gravitativen Hangdeformationen («mountain slope deformation») anwendet. Diese Forschungslücke wird durch die vorliegende Arbeit adressiert.

Die nachfolgenden Abschnitte legen dar, welche Aspekte aus Sicht der bisherigen Untersuchungen zu berücksichtigen sind und welche Schlüsse daraus für die vorliegende Arbeit gezogen werden. Abb. 11 illustriert Faktoren und Zusammenhänge, die dabei relevant sind.

2.5.1. Berücksichtigung von Hanginstabilitätstyp, Umgebung und Geologie

Hanginstabilitätstyp:

In Kap. 2.4.3 wurde darauf hingewiesen, dass die Definition des untersuchten Hanginstabilitätstyps vor allem bei Untersuchungen mit regionalem Fokus eher unscharf ist. Dies bietet je nach Absicht den Vorteil, dass die Methode flexibler, respektive auf ein breiteres Spektrum von Hanginstabilitätstypen anwendbar ist. Andererseits ermöglicht der spezifische Fokus auf einen

einzelnen Hanginstabilitätstyp aber, dessen geomorphologische Eigenheiten (Kap. 2.1) sowie Unterscheidungsmerkmale zu anderen Hanginstabilitätstypen (Kap. 2.2) bei der Methodik gezielter zu berücksichtigen. Ein Beispiel ist die Studie von *Tarolli et al. (2012)*, bei welcher die Methodik (Berücksichtigung von Krümmung und Neigung, kleinräumiger Analysemasstab) gezielt auf die Erkennung von Anrissnischen kleiner, flachgründiger Hangrutschungen ausgerichtet ist. In eine ähnliche Richtung geht die Arbeit von *van den Eeckhaut et al. (2012)* (vgl. entsprechende Ausführungen am Ende von Kap. 2.4.3). In anderen Fällen wird der Bezug der Methodik zum Hanginstabilitätstyp weniger reflektiert (*Li et al., 2015*).

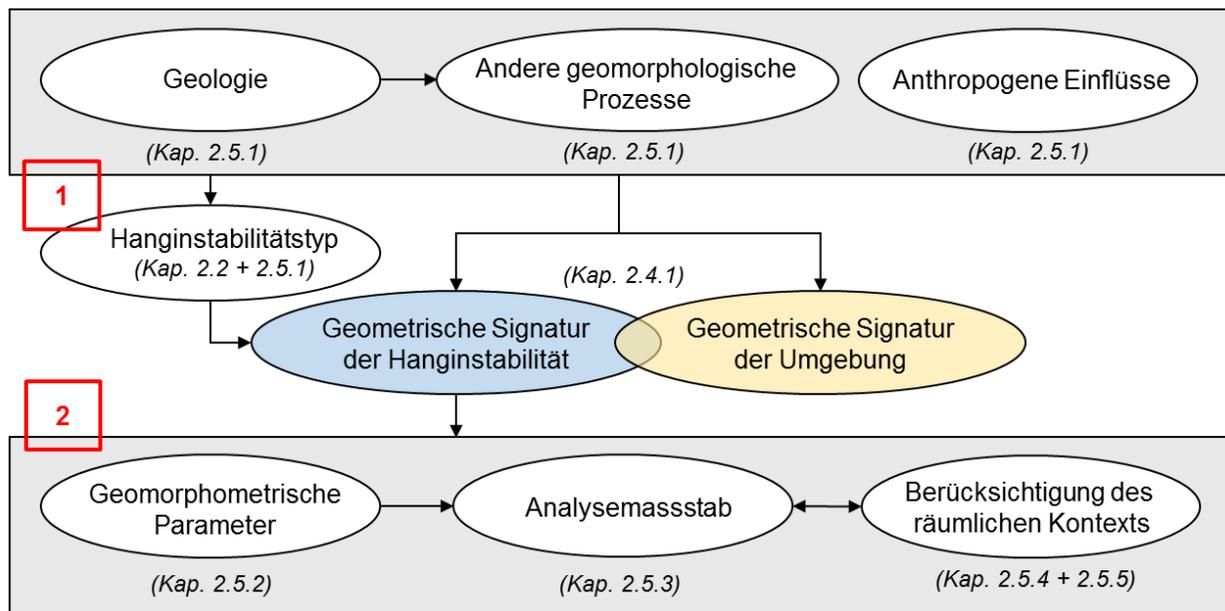


Abb. 11: Faktoren [1], welche die «geometrische Signatur» und folglich deren Analyse [2] im Hinblick auf eine automatisierte Erkennung von tiefgreifenden gravitativen Hangdeformationen beeinflussen.

Umgebung:

Je nach topographischem Kontrast wird eine gute geomorphometrische Unterscheidung von Gebieten inner- und ausserhalb der Hanginstabilität bereits mit einem einzigen Parameter (z.B. Rauigkeit) erzielt (*McKean & Roering (2004)*; Bsp. Abb. 10a, S. 22). Gewisse Probleme bei der Abgrenzung von Geländeoberflächen inner- und ausserhalb von Hanginstabilitäten werden aber bei allen bisherigen Untersuchungen festgestellt:

- 1) **Anthropogene Einflüsse** wie Strassen oder Terrassen in Siedlungsgebieten können teils ähnliche Rauigkeitseffekte wie Hanginstabilitäten erzeugen (*Booth et al., 2009*; *van den Eeckhaut et al., 2012*; *Berti et al., 2013*).
- 2) Gleiches gilt für **Felsaufschlüsse**, insbesondere in Gebirgsregionen mit komplexerer Topographie. Diese werden zum Beispiel mit Anrissnischen verwechselt (*Li et al., 2015*).

- 3) **Unterschiedliche geomorphologische Prozesse** können inner- und ausserhalb von Hanginstabilitäten zu ähnlichen «geometrischen Signaturen» führen. *Roering et al. (2005)* stellt anhand von Neigung und topographischer Krümmung Verwechslungen von grossräumigen Hanginstabilitäten und grossen Gleithängen mäandrierender Flussläufe fest. In anderen Fällen werden vergleichbare (erhöhte) Rauigkeitswerte entlang von Gerinnen oder infolge von Hanginstabilitäten beobachtet (*McKean & Roering, 2004; Booth et al., 2009; Berti et al., 2013*).
- 4) Die geometrische Signatur von Hanginstabilitäten wird teilweise durch **überlagernde geomorphologische Prozesse** modifiziert (*Booth et al., 2009*). Dies ist insbesondere auch bei tiefgreifenden gravitativen Hangdeformationen der Fall. Diese können ganze Talflanken erfassen und entsprechend ein Entwässerungsnetz mit fluvialen Einschnitten aufweisen. Ebenso sind Modifikationen durch sekundäre, überlagernde Hanginstabilitäten möglich (*Crosta et al., 2013*).

Geologie:

Die geologischen Verhältnisse (Tektonik, Lithologie etc.) beeinflussen die oberflächliche Gestalt von Umgebung und Hanginstabilität (*Glenn et al. (2006)*). *McKean & Roering (2004)* geben entsprechend zu bedenken, dass je nach geologischen Verhältnissen unterschiedliche Rauigkeitsmasse besser oder schlechter geeignet sein können. Die bestehenden Studien beziehen sich jeweils auf spezifische geologische Untersuchungsgebiete, sodass die Wirksamkeit der methodischen Ansätze bei anderen Verhältnissen nicht vorausgesetzt werden kann.

Für die vorliegende Arbeit werden daraus folgende Grundsätze abgeleitet:

- 1) **Hanginstabilitätstyp:** spezifische Eigenschaften von tiefgreifenden gravitativen Hangdeformationen wie talparallele Morphostrukturen (Kap. 2.1) oder die grossräumige Glättung/Abflachung von Talflanken (Kap. 2.4.2) sollen durch **geeignete geomorphometrische Parameter** und **Analysemassstäbe** berücksichtigt werden.
- 2) **Umgebung:** die oben genannten Faktoren, die zu Verwechslungen von Gebieten inner- und ausserhalb von Hanginstabilitäten führen, sind bei tiefgreifenden gravitativen Hangdeformationen in alpinem Gelände alle relevant. In Analogie zu *Pike (1988)* und anderen Studien aus Kap. 2.4 soll hier ein **multivariater Ansatz** mit **mehreren geomorphometrischen Parametern** und **verschiedenen Analysemassstäben** helfen.

Ein Beispiel: Strassenböschungen oder kleinere Anrissnischen können bei kleinräumigem Betrachtungsmassstab zu ähnlichen Rauigkeitswerten führen (*van den Eeckhout et al., 2012*). Die Berücksichtigung des grossräumigen Kontexts (Neigung, Rauigkeit) liefert in

diesem Fall ein zusätzliches Entscheidungskriterium, wodurch die Chance auf eine korrekte Klassifikation tendenziell erhöht wird.

- 3) **Geologie:** das Verfahren soll hier für Gebiete mit relativ **homogenen geologischen Verhältnissen** getestet werden. Die Methodik soll aber so ausgelegt sein, dass in einem weiteren Schritt eine Anpassung an andere geologische Verhältnisse ermöglicht wird (z.B. mit alternativen geomorphometrischen Parameter).

Die nachfolgenden Abschnitte erläutern, wie diese Grundsätze im Detail umgesetzt werden sollen.

2.5.2. Wahl der geomorphometrischen Parameter

Bei der Wahl der geomorphometrischen Parameter werden einerseits die Erfahrungen aus den bisherigen Studien berücksichtigt. Andererseits sind auch alternative Parameter in Betracht zu ziehen, die aufgrund der morphologischen Eigenschaften von tiefgreifenden gravitativen Hangdeformation geeignet erscheinen.

Hangneigung:

In Kap. 2.4.2 wurde auf die «abflachende» Wirkung hingewiesen, welche grossräumige Hanginstabilitäten auf ganze Talflanken ausüben können. Weiter trägt die Berücksichtigung der Hangneigung zur Unterscheidung von Hängen und Talböden bei. Die Hangneigung ist somit als wichtiger geomorphometrischer Parameter zu berücksichtigen und kann gleichzeitig für die Berechnung von Rauigkeitsmassen weiterverwendet werden (nachfolgender Abschnitt).

Rauigkeit:

Der Nutzen topographischer Rauigkeits- oder Krümmungsmasse bei der geomorphometrischen Erkennung von Hanginstabilitäten wird durch die breite Verwendung und die Ergebnisse in den bisherigen Studien bestätigt. Aufgrund der Existenz von **Morphostrukturen und kupiertem Gelände** gemäss Kap. 2.1 sowie der **grossräumigen «Glättung»** gemäss Kap. 2.4.2 ist die Rauigkeit auch für tiefgreifende gravitative Hangdeformationen als wichtiger Parameter der geometrischen Signatur einzustufen.

Bisherige Studien gemäss Kap. 2.4.3 liefern bezüglich Eignung und Eigenschaften verschiedener Rauigkeitsmasse folgende Anhaltspunkte:

- Bei Vergleichsanalysen (*McKean & Roering, 2004; Berti et al., 2013*) führen verschiedene Rauigkeitsmasse zu befriedigenden und mehr oder weniger vergleichbaren Ergebnissen. *Berti et al. (2013)* berücksichtigt dabei insgesamt zehn unterschiedliche Berechnungsmethoden, die die meisten Rauigkeitsmasse sowie Spektral- und Semivarianz-Analysen gemäss Kap. 2.4.3 abdecken.

- Gewisse Rauigkeitsmasse können - ohne vorgängige Trendentfernung der grossräumigen Topographie - eine erhöhte Korrelation mit der Hangneigung aufweisen (*Berti et al., 2013*). Rauigkeitsmasse, die auf der Streuung von Normalvektoren auf der Geländeoberfläche basieren, sind diesbezüglich unabhängiger (*Sappington et al., 2007; Berti et al., 2013*).

Eine Reduktion der Korrelation von Rauigkeitsmass und Hangneigung ist im Sinne einer «multivariaten Beschreibung» der geometrischen Signatur (siehe oben) anzustreben.

Aus diesen Gründen wird hier für die Rauigkeitsbestimmung die «**Eigenwert-Methode**» vorgesehen, welche auf der Streuung von Normalvektoren beruht (vgl. Kap. 4.2.4). Positive Aspekte dieser Methode sind gemäss *McKean & Roering (2004)* die **gleichzeitige Berücksichtigung der Variation von Hangneigung und Exposition** sowie die Aussagekraft für steileres und flacheres Gelände. Die Methode hat erfolgsversprechende Ergebnisse bei der geomorphometrischen Erkennung von Hanginstabilitäten geliefert (*McKean & Roering, 2004*) und schneidet auch bei vergleichenden Studien gut ab (*Berti et al., 2013*).

Als zusätzliches Rauigkeitsmass, welches auch in früheren Studien zur Anwendung kommt (z.B. *Berti et al. (2013), Crosta et al. (2013)*), wird die Standardabweichung der Hangneigung verwendet.

«**Richtungsabhängige Rauigkeit**»:

Die «Eigenwert-Methode» und die Standardabweichung der Hangneigung untersuchen die Rauigkeit ohne Berücksichtigung der Hangexpositionsrichtung. In Bezug auf tiefgreifende gravitative Hangdeformationen sind solche richtungsabhängigen Rauigkeitsmasse aber von zusätzlichem Interesse, um den **Einfluss talparalleler Morphostrukturen** (Anrissnischen, Gräben, Nackentäler) gezielter zu erfassen. Texturanalysen der Neigung in Richtung der Hangexposition wie bei *Li et al. (2015)* könnten diese richtungsabhängige Rauigkeit möglicherweise abbilden. In der vorliegenden Arbeit werden jedoch eigene geomorphometrische Parameter vorgeschlagen, die auf der Streuung der Normalvektoren basieren (Kap. 4.4.2)

Hydrologische Parameter:

Als weitere Parameter zur Charakterisierung von tiefgreifenden gravitativen Hangdeformationen wurden in Kap. 2.4.2 hydrologische Parameter (z.B. Entwässerungsdichte) genannt. Diese sind nicht Bestandteil des methodischen Ansatzes dieser Arbeit, können aber als Erweiterungsmöglichkeit betrachtet werden. Dabei ist zu beachten, dass hydrologische Erscheinungen teilweise auch implizit durch die oben berücksichtigten geomorphometrischen Parameter abgebildet werden (z.B. erhöhte topographische Rauigkeit infolge fluvialer Einschnitte). Hydrologische Aspekte werden zudem im Kontext der Objekt-Aggregation (Kap. 2.5.5) betrachtet.

Sonstige Parameter:

Die bei *Chen et al. (2014)* und *Li et al. (2015)* berücksichtigten Expositions- und Höhenwerte können innerhalb eines Untersuchungsgebiets zwar mit der Verteilung von Hanginstabilitäten korrelieren. Sie werden aber nicht die als eigentliche Komponenten der geometrischen Signatur bewertet. Die Exposition wird in der vorliegenden Arbeit nur indirekt für die Berechnung der Normalvektoren auf der Geländeoberfläche und daraus abgeleitete Parameter verwendet.

2.5.3. Analysemasstab

Bei der Untersuchung und Wahl des Analysemasstabs zeigen die bisherigen Studien mehrere Ansätze:

- 1) Ermittlung charakteristischer topographischer Wellenlängen mit Spektral-Analysen (*Booth et al., 2009; Kalbermatten et al., 2012*).
- 2) **Variation der Fenstergrösse** bei der Berechnung von pixel-basierten geomorphometrischen Parametern durch Anpassung der Rasterauflösung und/oder der Anzahl Rasterzellen (Tab. 4). Anschliessend **quantitative Auswertung der Klassifikationsgenauigkeiten** oder qualitative Beurteilung der Ergebnisse.
- 3) Berechnung pixel-basierter geomorphometrischer Parameter mit einer fixen Grösse des Berechnungsfensters; anschliessend Optimierung der Segmentgrössen aufgrund geomorphometrischer Homogenitätskriterien, aber ohne Untersuchung des Einflusses auf das Klassifikationsergebnis (*van den Eeckhaut et al., 2012*).
- 4) **Wahl des Skalenfaktors für die Segmentierung mittels qualitativem Vergleich** der Segmentumrisse mit dem schattiertem Relief und den Umrissen der Hanginstabilitäten (*Li et al., 2015*).

In der vorliegenden Arbeit werden Punkt 2) und Punkt 4) kombiniert. Die Variation der Fenstergrösse bei der Berechnung pixel-basierter geomorphometrischer Parameter ist technisch einfach zu implementieren. Damit kann ein geomorphometrischer Parameter bei der anschliessenden Klassifikation (Kap. 2.5.4) auch gleichzeitig auf mehreren Betrachtungsmassstäben berücksichtigt werden. Dies entspricht dem oben genannten multivariaten Ansatz. Erweiterungsmöglichkeiten gemäss Punkt 1) und 3) werden jedoch im Rahmen der Diskussion und Schlussfolgerung dieser Arbeit angesprochen (Kap. 6/7).

Bei den Untersuchungen gemäss Tab. 4 liefern Analysemasstäbe mit Fensterbreiten von maximal 15 Metern die besten Ergebnisse. Dabei handelt es sich aber um eher kleinräumige (*Kasai et al., 2009; Tarolli et al., 2012*) und erdstromartige Hanginstabilitäten (*McKean & Roering, 2004; Berti et al., 2013*). Diese führen tendenziell zu kleineren Oberflächenformen als tief-

greifende gravitative Hangdeformationen. Für die vorliegende Untersuchung dürften diese Analysemasstäbe daher am unteren Ende der relevanten Betrachtungsmasstäbe liegen.

Tab. 4: Analysemasstäbe bei Rauigkeits- und Krümmungsberechnungen mittels Nachbarschaftsbeziehungen innerhalb eines quadratischen Berechnungsfensters.

Bisherige Untersuchungen: 1 (McKean & Roering, 2004); 2 (Glenn et al., 2006); 3 (Kasai et al., 2009); 4 (Booth et al., 2009); 5 (Ventura et al., 2011); 6 (van den Eeckhaut et al., 2012); 7 (Kalbermatten et al., 2012); 8 (Tarolli et al., 2012); 9 (Berti et al., 2013); 10 (Lin et al., 2013); 11 (Chen et al., 2014); 12 (Li et al., 2015)											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11 / 12
Festlegung ohne Variation der Fenstergrösse											
Fensterbreite [m] (Rasterauflösung [m])					3.0 (1.0)	6.0 (2.0)				9.0 (3.0)	9.0 (3.0)
Festlegung mit Variation der Fenstergrösse											
Bandbreite der untersuchten Analysemasstäbe; Fensterbreite [m] (Rasterauflösung [m])	1.5 (0.5)		3.0 (1.0)					1.5 (0.5)	3.0 (1.0)		
Optimaler Analyse-Massstab aufgrund der Ergebnisse; Fensterbreite [m] (Rasterauflösung [m])	9.0 (3.0)		6.0 (2.0)					10.5 (0.5)	3.0 (1.0)		

Spektral-Analysen für eher grossräumigere Hanginstabilitäten unterstützen diese Annahme (Booth et al., 2009). Im entsprechenden Beispiel liegt die Bandbreite charakteristischer räumlicher Wellenlängen der Geländeoberfläche für den Grossteil der Untersuchungsgebiete innerhalb von 11 und 50m. Bei weniger aktiven Gebieten sind aber auch geringere Frequenzen mit dominanten Wellenlängen von bis zu 230m festzustellen. Die Untersuchungen gemäss Kap. 2.4.2 (Roering et al., 2005; Korup, 2006) deuten ebenfalls an, dass die geometrische Signatur grossräumiger, tiefgreifender Hanginstabilitäten teilweise auf gröberen Analysemasstäben abgebildet wird. Neben der Rauigkeit/Krümmung gilt dies auch für die Neigung.

Insgesamt wird für die vorliegende Arbeit gefolgert:

- Aufgrund der Charakteristik von tiefgreifenden gravitativen Hangdeformationen sind mehrere und - im Vergleich zu anderen Hanginstabilitätstypen - **auch größere Betrachtungsmasstäbe** (Rasterauflösung, Fenstergrösse) zu berücksichtigen.
- **Je nach geomorphometrischem Parameter** können **unterschiedliche Analysemasstäbe** geeignet sein.
- Der **Einfluss soll** anhand der Klassifikationsergebnisse **quantifiziert werden**.

2.5.4. Segmentierung und Klassifikation

Bei den in Kap. 2.4 vorgestellten Studien sind rein pixel-basierte Klassifikationen - gestützt auf den Schwellenwert eines einzelnen geomorphometrischen Parameters (meist Rauigkeit) - zwar der häufigere Fall. Dennoch sprechen einige Vorzüge für den **objekt-basierten Ansatz**:

- Die Segmentierung verbessert die **Berücksichtigung des räumlichen Kontexts** durch Zusammenfassen von benachbarten, topographisch «zusammengehörigen» Rasterzellen und deren geomorphometrischen Eigenschaften (*Li et al., 2015*).
- **Klassifikationsalgorithmen** ermöglichen die gleichzeitige Berücksichtigung mehrerer geomorphometrischer Parameter und Analysemasstäbe. Dies unterstützt die multivariate Klassifikation gemäss dem Konzept von *Pike (1988)*.

Segmentierung und Klassifikation werden entsprechend als erfolgsversprechende Techniken für die Kartierung von Hanginstabilitäten betrachtet (*Guzzetti et al., 2012*) und sollen auch in der vorliegenden Arbeit zur Anwendung kommen. *Li et al. (2015)* beobachtet vor allem in Bezug auf die **Interpretierbarkeit der Klassifikationsergebnisse** (mehr zusammenhängende Flächen) eine Verbesserung im Vergleich zum rein pixel-basierten Ansatz von. Beim Vergleich der Klassifikationsalgorithmen stellt dieselbe Studie ausserdem ein leicht besseres Abschneiden von **'Random Forest'** im Vergleich zu 'Support Vector Machine' fest.

2.5.5. Objekt-Aggregation

Im Anschluss an die Klassifikation bietet die Objekt-Aggregation (Zusammenführen benachbarter, einheitlich klassierter Segmente) **weitere Möglichkeiten zur Berücksichtigung des räumlichen Kontexts**. Dabei können topologische oder prozessspezifische räumliche Beziehungen berücksichtigt werden. Bei *Li et al. (2015)* erfolgt dieser Schritt manuell. *Van den Eeckhaut et al. (2012)* verwendet automatisierte Verfahren zur Objekt-Aggregation, um Segmente unterhalb von bergseitigen Anrissnischen unter Berücksichtigung der Fliessrichtung zur Hanginstabilität hinzuzufügen (vgl. Kap. 2.4.3).

Einheitliche Ansatzpunkte für die Objekt-Aggregation - wie bei *van den Eeckhaut et al. (2012)* - fehlen bei tiefgreifenden gravitativen Hangdeformationen im alpinen Gelände. Jedoch erfassen diese oftmals Abschnitte ganzer Talflanken. Deshalb wird hier ein Ansatz getestet, der die **Objekt-Aggregation auf Basis hydrologischer Teileinzugsgebiete** und daraus abgeleiteten Hangflanken vornimmt. Die dabei verwendeten Daten sind in Kap. 3.4 beschrieben. Da dieser Ansatz mehr als Idee für weitere Schritte gedacht und vereinfacht umgesetzt ist, werden Resultat und Verfahren direkt im Diskussionsteil dieser Arbeit zusammengefasst (Kap. 6.1.2, S. 100).

3. Untersuchungsgebiet und Daten

3.1. Beschreibung des Untersuchungsgebiets

Geografischer / geologischer Überblick:

Die Untersuchung erfolgt grösstenteils anhand der Kartenblätter 1214 (Ilanz) und 1215 (Thusis) der Landeskarte 1:25'000:

- Kartenblatt 1214: **Kalibrierung** und **Validierung** des Klassifikationsmodells (s. Kap. 4.5)
- Kartenblatt 1215: **Evaluation** des Klassifikationsmodells (s. Kap. 4.6)

Ein kleiner Ausschnitt westlich von Kartenblatt 1214 wird zudem bei der Diskussion in Kap. 6.3.2 verwendet. Dabei geht es um die Frage der Übertragbarkeit des Klassifikationsmodells auf andere geologische Gebiete.

Die geografische Lage mit Bezug zur Topographie und Geologie ist in Abb. 12 ersichtlich. Eine vergrösserte Aufnahme der geografischen/topographischen Verhältnisse zeigt Abb. 13.

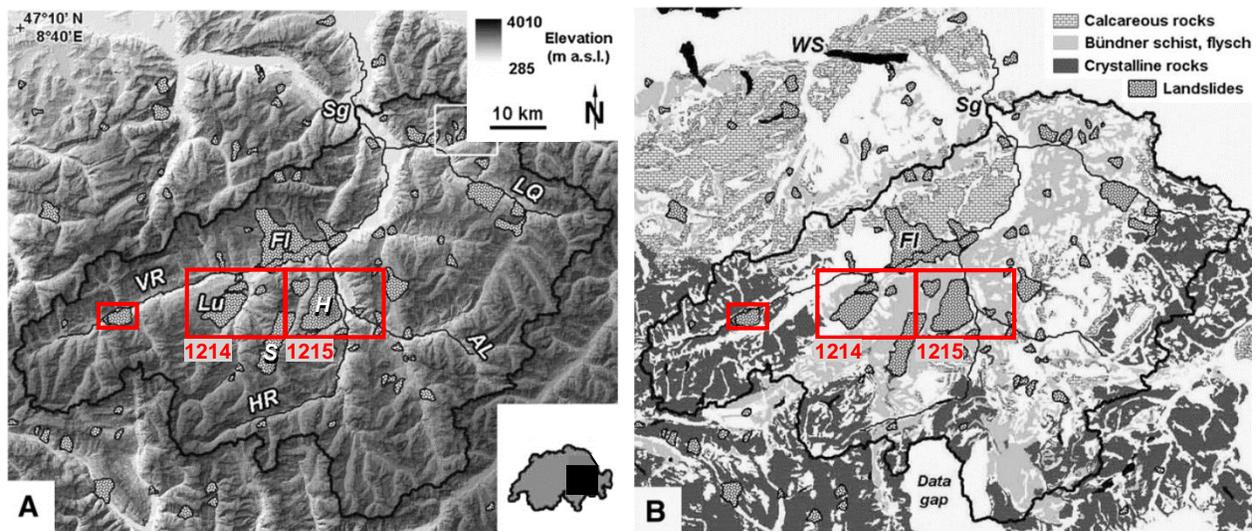


Abb. 12: Geografische/topographische (links) und geologische (rechts) Übersichtskarte des Untersuchungsgebiets. Darstellungen aus Korup & Schlunegger (2009), modifiziert und ergänzt mit der Lage der hier untersuchten Kartenblätter 1214, 1215 (rote Rechtecke). Zusätzlich ist ein kleiner Ausschnitt aus Kartenblatt 1213 markiert, der in Kap. 6.3.2 (Abb. 47) betrachtet wird. Tiefgreifende gravitative Hangdeformationen sind zusammengefasst mit Bergstürzen als grössere Hanginstabilitäten ('Landslides') kartiert. Als geologische Einheiten werden Kalkformationen ('Calcareous rocks'), Bündnerschiefer und Flysch ('Bündner schist, flysch') sowie kristalline Gesteinsformationen ('Crystalline rocks') unterschieden. Die Abkürzungen stehen für: AL = Albula (Fluss), FL = Flims (Flimser Bergsturz), H = Heinzenberg, HR = Hinterrhein, LQ = Landquart (Fluss), LU = Lugnez / Val Lumnezia, S = Safiental, SG = Sargans, VR = Vorderrhein, WS = Walensee.

Das Gebiet erstreckt sich von Westen nach Osten über die Talschaften Lugnez/Val Lumnezia, nördliches Safiental, Heinzenberg/Domleschg bis zur westlichen Talseite der Lenzerheide. Dieses

Untersuchungsgebiet kann weitgehend als **geologisch homogenes Gebiet** aufgefasst werden (Korup & Schlunegger, 2009), in welchem die Gesteine der «Bünderschiefer» und ähnlicher Formationen vorherrschen (Abb. 12b). Dabei handelt es sich vor allem um Kalk- und Tonschiefer, die ein eher weiches Gestein bilden.

Tiefgreifende gravitative Hangdeformationen:

Das Untersuchungsgebiet ist durch einen relativ hohen Flächenanteil von tiefgreifenden gravitativen Hangdeformationen gekennzeichnet. Beide Kartenblätter decken (im zentralen Kartenbereich) je eine grosse tiefgreifende gravitative Hangdeformation ab (Abb. 13):

- die **westliche Talseite des Lugnez / Val Lumnezia** in Kartenblatt 1214 mit knapp 30 km²
- das **Gebiet Heinzenberg** in Kartenblatt 1215 mit knapp 50 km²

Zudem sind jeweils weitere kleinere tiefgreifende gravitative Hangdeformationen oder Teilgebiete (Safiental: vgl. Abb. 12a, Kürzel «S») vorhanden.

Vor allem diese grösseren tiefgreifenden gravitativen Hangdeformationen wurden im Rahmen früherer geotechnischer und geomorphologischer Forschungsarbeiten beschrieben und untersucht (Huder, 1976; Korup & Schlunegger, 2009; Schwab et al., 2009). Entsprechend ist deren räumliche Ausdehnung relativ gut bekannt. Bei der Erfassung kleinerer Gebiete bestehen hingegen Unterschiede zwischen verschiedenen Kartengrundlagen (Korup & Schlunegger, 2009; Schwab et al., 2009; Bundesamt für Landestopografie swisstopo, 2013; Crosta et al., 2013). Dies Gründe dafür können Unterschiede der Erfassungsmethode, der Interpretationen von Geländemerkmale bei der Kartierung oder auch unterschiedliche Prozessabgrenzungen sein (vgl. Kap. 6). Die Wahl der hier verwendeten Referenzflächen ('Ground Truth' gemäss Abb. 13) wird im nachfolgenden Kap. 3.2 erläutert.

Oberflächenmorphologie:

Die tiefgreifenden gravitativen Hangdeformationen im Untersuchungsgebiet weisen typische Geländemerkmale gemäss Kap. 2.1 wie Morphostrukturen oder kupiertes Terrain auf. Entsprechende Eindrücke vermitteln die Fotos in Abb. 14 (Standorte gemäss Abb. 13). Relativ häufig sind **Anrissnischen** (Schwab et al., 2009). **Nackentäler** verschiedener Grössenordnungen werden ebenfalls beobachtet.

Das übrige Terrain wird durch diverse, im alpinen Raum übliche geomorphologische Prozesse geprägt. Insbesondere werden tiefe **fluviale Einschnitte**, z.B. für die östliche Talseite des Lugnez / Val Lumnezia beschrieben (Schwab et al. (2009), vgl. auch Abb. 14).

Ground Truth Tiefgreifende gravitative Hangdeformation

0 1 2 km

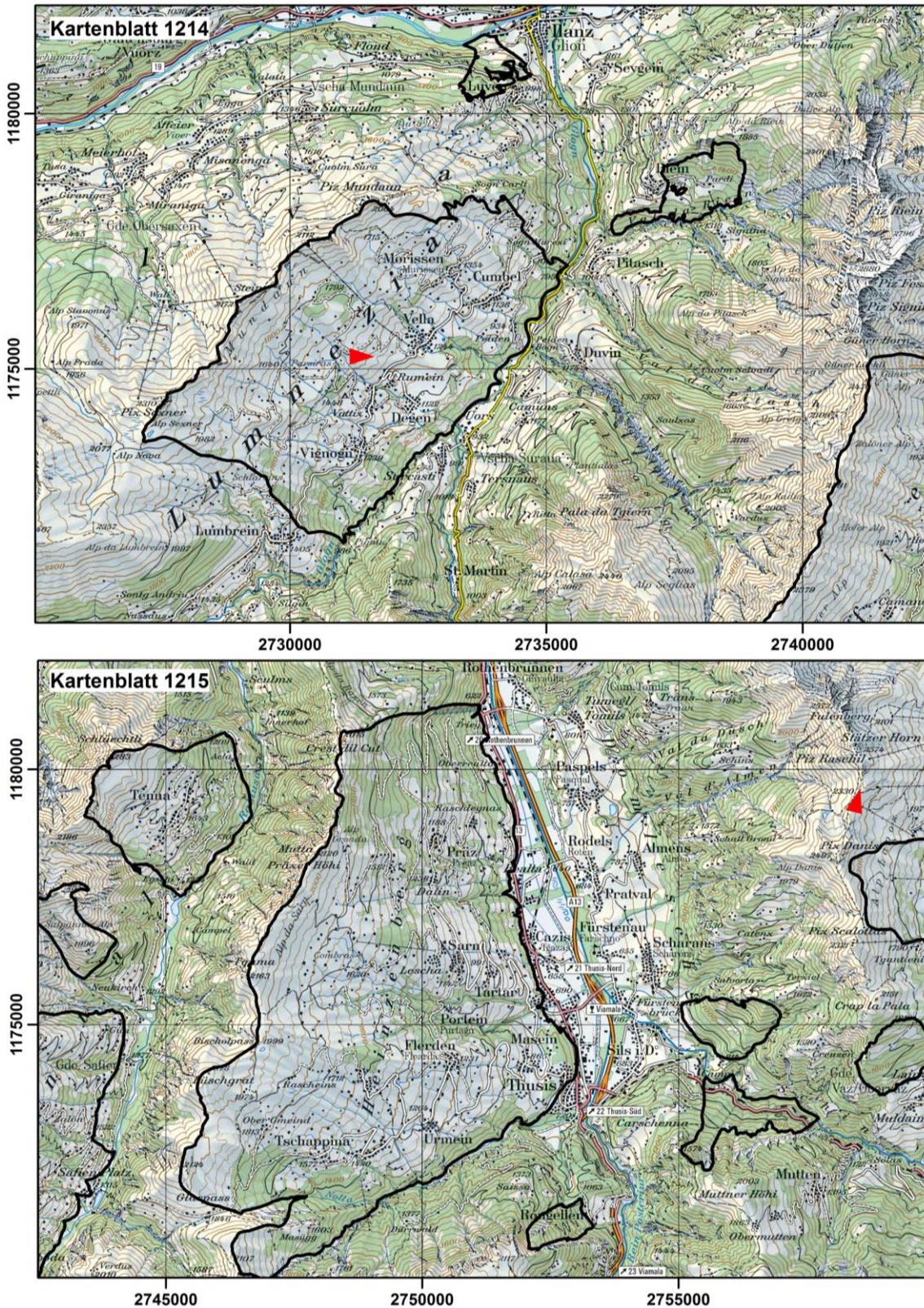


Abb. 13: Ausschnitte der Landeskarte 1:100'000 (Bundesamt für Landestopografie swisstopo, 2011) für das Untersuchungsgebiet (verkleinerte Darstellung (!)). Die roten Pfeile zeigen Standort und Aufnahmerichtung der Fotos in Abb. 14.



Abb. 14: Fotos aus dem Untersuchungsgebiet (eigene Aufnahmen). Die genauen Standorte sind in Abb. 13 ersichtlich. Oben: Aufnahme im Lugnez / Val Lumnezia (Kartenblatt 1214) mit Blick von der westlichen Talflanke (untere Bildhälfte; mit tiefgreifender gravitativer Hangdeformation) auf die östliche Talflanke (obere Bildhälfte; ohne tiefgreifende gravitative Hangdeformation). Gekennzeichnet sind verschiedene Oberflächenmerkmale ((*): Anrissnische gemäss Schwab et al. (2009)). Unten: Grosses Nackental oder Doppelkrete (mit Skipiste(!)) auf der westlichen Talflanke der Lenzerheide (Kartenblatt 1215), Blick Richtung Norden.

3.2. 'Ground Truth' (GeoCover)

Die Referenzflächen für tiefgreifende gravitative Hangdeformationen ('Ground Truth', «Bodenwahrheit») werden in der vorliegenden Arbeit aus dem Datensatz 'GeoCover' extrahiert. Dabei handelt es sich um einen vom *Bundesamt für Landestopografie swisstopo* (2013) veröffentlichten Vektordatensatz, der auf Basis des geologischen Atlas der Schweiz im Massstab 1:25'000 sowie weiteren geologischen Kartengrundlagen erstellt wird.

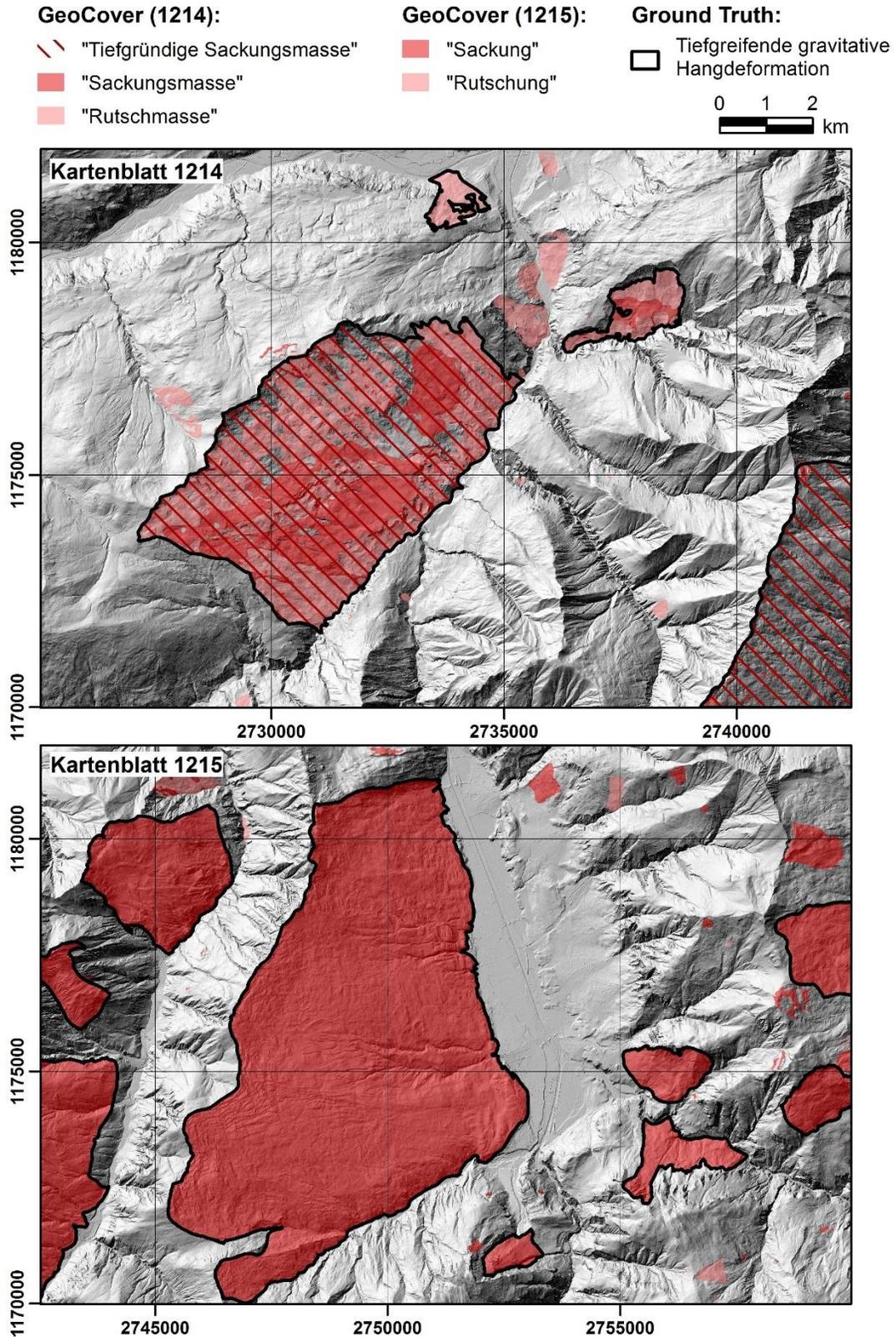


Abb. 15: Herleitung der 'Ground Truth' aus dem Datensatz 'GeoCover' (Bundesamt für Landestopografie swisstopo, 2013). Die Legende zeigt unterschiedliche Prozessbezeichnungen, die darin für die beiden Kartenblätter 1214 und 1215 verwendet werden. Im Hintergrund ist das schattierte Relief des Geländemodells swissALTI3D dargestellt (Bundesamt für Landestopografie swisstopo, 2016).

Abb. 15 illustriert, wie die Referenzflächen ('Ground Truth') für die Kartenblätter 1214 und 1215 konkret abgeleitet werden. Die beiden Kartenblätter verwenden teilweise unterschiedliche Prozessbezeichnungen. Insbesondere sind kleinere Hanginstabilitäten bei Kartenblatt 1215 eher als «Sackung» (andere Bezeichnung für «tiefgreifende gravitative Hangdeformation», vgl. Kap. 2.1) und in Kartenblatt 1214 eher als «Rutschmasse» bezeichnet.

Zur Vereinheitlichung der 'Ground Truth' für beide Kartenblätter werden daher folgende Kriterien angewandt:

- 1) Im Datensatz 'GeoCover' sind einzelne Hanginstabilitäten zum Teil aus mehreren benachbarten Polygonen mit unterschiedlicher Prozessbezeichnung zusammengesetzt (z.B. «Rutschmasse» und «Sackungsmasse» in Kartenblatt 1214). Die einzelnen Polygone können dabei auch sehr klein und in Abb. 15 kaum erkennbar sein. Als Kriterium wird vorausgesetzt, dass zumindest einzelne **Teilpolygone** einer Hanginstabilität mit der Prozessbezeichnung **«(tiefgründige) Sackungsmasse»** oder **«Sackung»** erfasst sind.
- 2) Bei Kartenblatt 1215 sind wie erwähnt auch sehr kleine Hanginstabilitäten zum Teil als «Sackung» kartiert. Zwecks Angleichung an Kartenblatt 1214 und in Anlehnung an *Hungr et al. (2014)* werden daher zusätzliche **Grössenkriterien** angewandt: eine Gesamtfläche von $> \sim 1 \text{ km}^2$ oder eine interne Höhendifferenz von mehr als 750m.

Die Betrachtung von Abb. 12 ermöglicht eine grobe Überprüfung der hier verwendeten 'Ground Truth' im Vergleich mit einer anderen Kartengrundlage (*Korup & Schlunegger, 2009*). Dabei kann eine gute Übereinstimmung in Bezug auf grössere und einige kleinere Gebiete mit tiefgreifenden gravitativen Hangdeformationen festgestellt werden.

3.3. Digitale Geländemodelle

In Analogie zu den Untersuchungen in Kap. 2.4.2 und 2.4.3 werden hier zwei verschiedene digitale Geländemodelle mit hoher und niedrigerer räumlicher Auflösung verwendet:

- 'swissALTI3D' (Bundesamt für Landestopografie swisstopo, 2016)
- 'DHM25' (Bundesamt für Landestopografie swisstopo, 2005)

Tab. 5 liefert vergleichende Angaben zu deren räumlichen Auflösung, den Erstellungsgrundlagen sowie der vertikalen Genauigkeit. Stellvertretend ist in Abb. 15 das schattierte Relief des Geländemodells 'swissALTI3D' für die zwei Kartenblätter des Untersuchungsgebiets dargestellt.

Tab. 5: Eigenschaften der digitalen Geländemodelle 'swissALTI3D' und 'DHM25'. (Bundesamt für Landestopografie swisstopo (2016) und Bundesamt für Landestopografie swisstopo (2005))

	swissALTI3D	DHM25
Rasterauflösung (= Breite der Rasterzellen)	2m	25m
Grundlage	1) LiDAR (< 2'000 m ü.M.) 2) Stereokorrelation mit Luftbildern (> 2'000 m ü.M.)	Höheninformationen der topografischen Landeskarte 1:25'000
Vertikale Genauigkeit in den Alpen	1) Standardabweichung von 0.5m 2) Mittlere Abweichung von 1 – 3m	Mittlere Abweichung von 3m, maximal 8m

Der Grossteil des Untersuchungsgebiets liegt unter einer Meereshöhe von 2'000m (vgl. Abb. 13) und wird im Geländemodell 'swissALTI3D' durch eine entsprechend hohe vertikale Genauigkeit abgebildet (Tab. 5). Relativ zur Rasterauflösung liegen die Höhengenaugkeiten der beiden Geländemodelle in einer ähnlichen Grössenordnung (swissALTI3D: 0.5m : 2m; DHM25: 3m : 25m). Bei der Berechnung pixel-basierter geomorphometrischer Parameter in quadratischen Berechnungsfenstern (z.B. Neigung) ergeben sich somit ähnliche Unsicherheiten.

3.4. Hydrologische Datengrundlagen

Hydrologische Datengrundlagen werden bei der Resultatinterpretation sowie bei der Objekt-Aggregation auf Basis hydrologischer Teileinzugsgebiete verwendet. Dabei handelt es sich um folgende Datensätze:

- 1) «Einzugsgebietgliederung Schweiz» (Bundesamt für Umwelt BAFU, 2012)
- 2) Gewässernetz: Datensatz VECTOR25 (Bundesamt für Landestopografie swisstopo, 2008)
- 3) Gewässernetz: Datensatz VECTOR200 (Bundesamt für Landestopografie swisstopo, 2014)

Die «Einzugsgebietgliederung Schweiz» beinhaltet den Datensatz «Basisgeometrie». Dieser stellt für die ganze Schweiz ein Netz hydrologischer Teileinzugsgebiete «mit einer durchschnittlichen Fläche von knapp 2 km²» zur Verfügung (Bundesamt für Umwelt BAFU, 2012: p. 2), woraus grössere Einzugsgebiete aggregiert werden können.

Die Datensätze VECTOR25 und VECTOR200 bilden das Gewässernetz der Schweiz auf zwei unterschiedlichen Massstabsebenen ab. VECTOR25 basiert auf einem Kartenmassstab von 1:25'000. VECTOR200 weist eine höhere Generalisierung auf und repräsentiert das Gewässernetz auf einem Massstab von 1:200'000.

4. Methodik

4.1. Übersicht

Der methodische Ansatz erfolgt stufenweise gemäss Abb. 16. In groben Zügen entspricht dies dem Ansatz nach *van den Eeckhaut et al. (2012)* und *Li et al. (2015)* (vgl. Tab. 3, S. 24) und widerspiegelt die Überlegungen in Kap. 2.5: i) Berechnung **pixel-basierter geomorphometrischer Parameter**, ii) **Segmentierung** des Geländes anhand topographischer / geomorphometrischer Eigenschaften, iii) **Klassifikation** der Segmente mit Algorithmen des maschinellen Lernens.

Die **Algorithmen** zur Berechnung der pixel-basierten geomorphometrischen Parameter (Kap. 4.2) wurden mit **Java** implementiert. Die Segmentierung, die Berechnung der Segment-Deskriptoren / segment-basierten geomorphometrischen Parameter sowie die Klassifikation (Kap. 4.3 bis 4.5) erfolgen in **MATLAB**. Der MATLAB-Code baut auf Übungscode der Lehrveranstaltung *GEO448 (2016)* auf. Die Darstellung und Evaluation der Klassifikationsergebnisse (Kap. 4.6) erfolgt in **ArcGIS**.

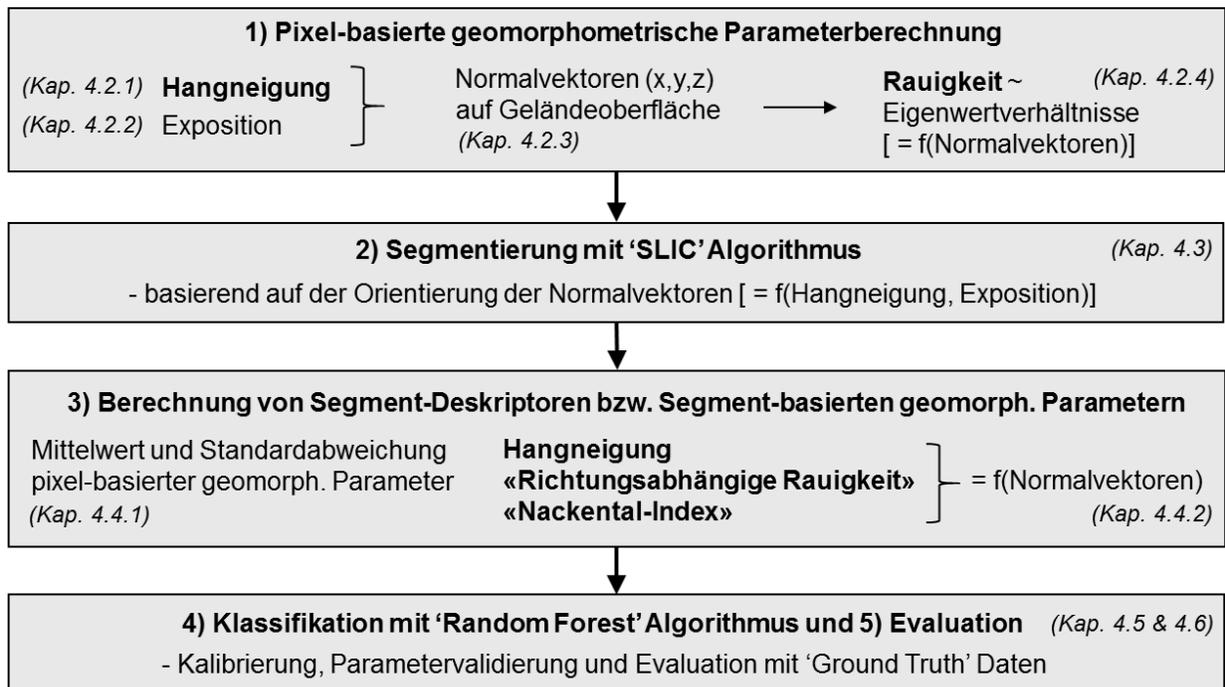


Abb. 16: Übersicht des methodischen Ansatzes mit stufenweisem Vorgehen und Verweisen auf die entsprechenden Kapitel.

4.2. Pixel-basierte Berechnung geomorphometrischer Parameter

Nachfolgend werden die mathematischen Grundlagen für die Berechnung der pixel-basierten geomorphometrischen Parameter aufgezeigt. Kap. 4.2.5 fasst zusammen, wie die Analysemasstäbe dabei variiert werden.

4.2.1. Hangneigung

Für die Berechnung der Hangneigung wird die Methode von *Horn (1981)* verwendet. Diese ist Bestandteil von diversen herkömmlichen GIS-Programmen und liefert bei Vergleichsstudien mit anderen Algorithmen gute Ergebnisse (*Burrough et al., 2015*). Die Methode berücksichtigt die acht benachbarten Höhenwerte innerhalb eines quadratischen Berechnungsfensters von 3 x 3 Rasterzellen (Abb. 17).

a	b	c
d	e	f
g	h	i

Abb. 17: Quadratisches Berechnungsfenster von 3 x 3 Rasterzellen für die pixel-basierte Berechnung von Hangneigung und Exposition einer Rasterzelle 'e'. Die Berücksichtigung der benachbarten Zellwerte gemäss Gl. 2 und Gl. 3 wird durch die Buchstaben indiziert.

Der Neigungswert für die zentrale Rasterzelle 'e' berechnet sich dabei als Funktion der Höhenunterschiede in x- und y-Richtung wie folgt:

$$\text{Gl. 1.} \quad \text{Hangneigung} = \arctan(\sqrt{[dz/dx]^2 + [dz/dy]^2})$$

Die Ermittlung der Höhenunterschiede erfolgt unter Berücksichtigung der benachbarten Höhenwerte - indiziert mit Buchstaben gemäss Abb. 17:

$$\text{Gl. 2.} \quad [dz/dx] = ((c + 2f + i) - (a + 2d + g)) / (8 * \text{Zellbreite})$$

$$\text{Gl. 3.} \quad [dz/dy] = ((g + 2h + i) - (a + 2b + c)) / (8 * \text{Zellbreite})$$

4.2.2. Exposition

Zur Berechnung der Expositionsrichtung werden ebenfalls die Höhenunterschiede in x- und y-Richtung gemäss Gl. 2 und Gl. 3 verwendet und in folgender Gleichung zusammengeführt:

$$\text{Gl. 4.} \quad \text{Exposition} = \arctan2([dz/dy] - [dz/dx])$$

Diese Gleichung ist identisch mit der in ArcGIS 10.4 (*ESRI, 2016*) implementierten Berechnung der Hangexposition.

4.2.3. Normalvektoren auf Geländeoberfläche

Im Hinblick auf die Berechnung weiterer geomorphometrischer Parameter (Kap. 4.2.4 und 4.4.2) wird für jede Rasterzelle ein Normalvektor berechnet (lotrecht auf Geländeoberfläche). Dieser weist je eine x- (Ost), y- (Nord) und z- (Höhe) Koordinate auf. Die Herleitung erfolgt mittels trigonometrischer Umrechnung aus dem lokalen Neigungs- und Expositionswert (gemäss Kap. 4.2.1 und 4.2.2) und berücksichtigt eine einheitliche Vektorlänge von 1 (Einheitsvektor).

4.2.4. Rauigkeitsberechnung - Eigenwertverhältnisse der Normalvektoren

Die hier verwendete «Eigenwert-Methode» ('eigenvalue method') für die Berechnung topographischer Rauigkeit wurde durch *Woodcock (1977)* beschrieben. Dabei wird die Streuung aller Normalvektoren (Einheitsvektoren) auf der Geländeoberfläche innerhalb eines definierten räumlichen Ausschnitts ermittelt (Abb. 18a). In der vorliegenden Arbeit entspricht dieser Ausschnitt einem quadratischen Berechnungsfenster mit definierter Grösse ($n \times n$ Rasterzellen). Die Berechnung kommt folgendermassen zu Stande (*McKean & Roering, 2004*):

1. Ermittlung der Orientierungsmatrix **T** der $n \times n$ Normalvektoren (Abb. 18b). Diese wird gebildet, indem für jeden Normalvektor i die Kreuzprodukte der kartesischen Koordinaten (x, y, z) berechnet und diese von sämtlichen ($n \times n$) Normalvektoren aufsummiert werden.
2. Man berechnet die Eigenwerte der Orientierungsmatrix **T**. In Java wurde für die Eigenwert-Berechnung das Paket *Jama (2016)* verwendet.
3. Man bildet den natürlichen Logarithmus dieser Eigenwert-Verhältnisse, $\ln(S1/S2)$ und $\ln(S2/S3)$ (Abb. 18c).

Das Ergebnis charakterisiert das Orientierungsmuster der Geländeoberfläche. Die Darstellung gemäss Abb. 18c dient der Interpretation (*McKean & Roering, 2004*):

- Hohes Verhältnis $\ln(S1/S2)$, d.h. $S1 > S2 \approx S3$: die Vektoren zeigen mehr oder weniger alle in die gleiche Richtung (glatte Oberfläche). Anders formuliert, «bestimmt» eine Komponente (x) der Normalvektoren grösstenteils den Wert der anderen beiden Komponenten (y, z).
- Niedriges Verhältnis $\ln(S1/S2)$ und $\ln(S2/S3)$, d.h. $S1 \approx S2 \approx S3$: die Vektoren zeigen in die verschiedensten Richtungen (grobe Oberfläche).
- Niedriges Verhältnis $\ln(S1/S2)$ und hohes Verhältnis $\ln(S2/S3)$, d.h. $S1 \approx S2 > S3$: Dies ist der Fall bei einer sich «wiederholenden topographischen Form» (*McKean & Roering, 2004: p. 345*). Beispiele dafür sind lineare Elemente wie Strassen, Berggräte oder Kanäle oder eine Abfolge von Geländerippen/ Geländeeneinschnitten.

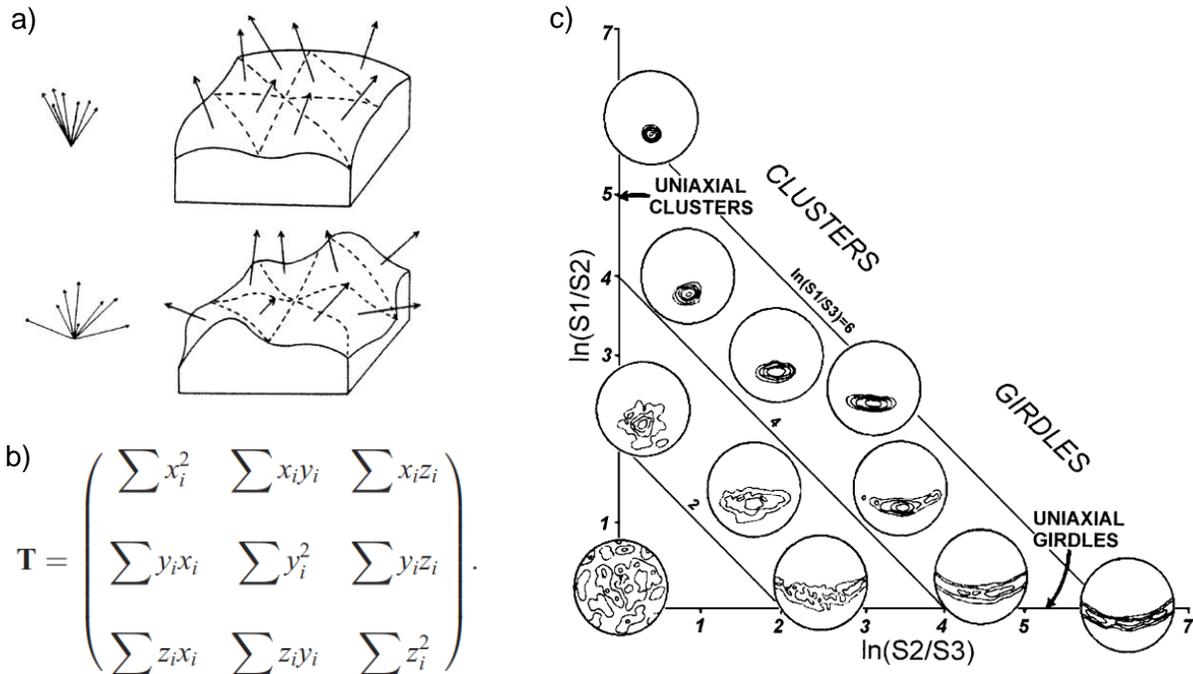


Abb. 18: Rauigkeitsbestimmung mit Methode der Eigenwert-Verhältnisse (Darstellungen aus McKean & Roering (2004)). a) Normalvektoren auf Geländeoberfläche und deren Streuung innerhalb eines definierten räumlichen Ausschnittes. b) Berechnung der Orientierungsmatrix T aller Vektoren i innerhalb des Ausschnittes, woraus die Eigenwerte (S1, S2, S3) berechnet werden. c) Eigenwertverhältnisse (logarithmisch dargestellt) und schematische Darstellung zugehöriger Streuungsmuster.

4.2.5. Variation der Analysemasstäbe

Hangneigung, Exposition, Normalvektoren auf Geländeoberfläche:

Bei der Berechnung der Hangneigung und Exposition gemäss Kap. 4.2.1 und 4.2.2 ist die Anzahl Rasterzellen vorgegeben (3 x 3 Rasterzellen). Die Variation des Analysemasstabs erfolgt in diesem Fall durch Veränderung der Rasterzellgrösse. Im vorliegenden Fall sind dies Rasterauflösungen von 25m und 2m, entsprechend den Geländemodellen 'DHM25' und 'swissALTI3D' (Bundesamt für Landestopografie swisstopo, 2005, 2016).

Das Gleiche gilt für die daraus abgeleiteten Normalvektoren auf der Geländeoberfläche.

Rauigkeit anhand der Eigenwertverhältnisse der Normalvektoren:

Einerseits wird der Analysemasstab in diesem Fall ebenfalls durch die Rasterauflösung des Geländemodells (25m und 2m) variiert. Andererseits wird die Grösse des quadratischen Berechnungsfensters (vgl. Kap. 4.2.4) und somit die Anzahl berücksichtigter Rasterzellen verändert. Tab. 6 gibt eine Übersicht zu den verwendeten Analysemasstäben für die Berechnung der Eigenwertverhältnisse. Überlegungen zur Wahl und Bandbreite der Analysemasstäbe sind dem Kap. 2.5.3 zu entnehmen.

Tab. 6: Analysemassstäbe für die Berechnung der Rauigkeit anhand der Eigenwertverhältnisse der Normalvektoren. Die Angaben erfolgen für die jeweiligen Geländemodelle (swissALTI3D und DHM25) unter Angabe der Rasterauflösung, der Anzahl Rasterzellen des quadratischen Berechnungsfensters und der daraus resultierenden Fenstergrösse in m². Für das Eigenwertverhältnis $\ln(S1/S2)$ wurden sämtliche Analysemassstäbe verwendet, für das Eigenwertverhältnis $\ln(S2/S3)$ die mit (*) gekennzeichneten.

swissALTI3D: 2m Rasterauflösung		DHM25: 25m Rasterauflösung	
Anzahl Rasterzellen	Fenstergrösse [m ²]	Anzahl Rasterzellen	Fenstergrösse [m ²]
9 x 9 (*)	18 x 18 m ²	3 x 3 (*)	75 x 75 m ²
17 x 17	34 x 34 m ²	5 x 5 (*)	125 x 125 m ²
25 x 25 (*)	50 x 50 m ²	7 x 7 (*)	175 x 175 m ²
31 x 31	62 x 62 m ²	9 x 9 (*)	225 x 225 m ²
39 x 39 (*)	78 x 78 m ²	11 x 11 (*)	275 x 275 m ²
45 x 45	90 x 90 m ²	13 x 13	325 x 325 m ²
55 x 55 (*)	110 x 110 m ²	15 x 15	375 x 375 m ²
65 x 65	130 x 130 m ²	17 x 17	425 x 425 m ²

4.3. Segmentierung

4.3.1. SLIC

Für Segmentierung wird die Funktion SLIC ('simple linear iterative clustering') in MATLAB verwendet. Dabei handelt es sich um einen vorgefertigten Algorithmus der 'VLFeat' Open Source Bibliothek, welches auf der Programmiersprache C beruht und über ein Interface für MATLAB verfügt (VLFeat, 2015). Zum besseren Verständnis werden nachfolgend wesentliche Prinzipien des Algorithmus erläutert.

Der Algorithmus nimmt eine Unterteilung in Segmente vor, welche bezüglich der berücksichtigten Merkmale (hier ausgewählte geomorphometrische Parameter) eine möglichst hohe interne Homogenität aufweisen. Der Grad dieser Homogenität hängt ab von der Segmentgrösse und der Regulierung der Segmentform, welche durch die Funktionsparameter '**regionSize**' und '**regularizer**' variiert werden können.

Die Segmentierung verwendet eine angepasste Version des 'k-Means Clustering' Verfahren, die neben dem Wert der Rasterzelle auch deren räumliche Position berücksichtigt (repräsentiert durch Zeile/Spalte innerhalb des Rasters). Dabei wird jede Rasterzelle (Pixel) als Punkt in einem dreidimensionalen Raum mit folgenden Koordinatenachsen betrachtet:

- $\lambda * x$, x = räumliche Position in Ost-West Richtung (**Spaltennummer**)
- $\lambda * y$, y = räumliche Position in Nord-Süd Richtung (**Reihenummer**)

- $I(x, y)$, = Zellenwert an der Position x/y als Funktion der berücksichtigten «Bildkanäle»
(hier: Komponenten der Normalvektoren auf der Geländeoberfläche, siehe unten)

Der **Faktor λ** skaliert die Werte in x - und y -Richtung und ist wie folgt definiert:

$$\text{Gl. 5.} \quad \lambda = \text{regularizer} / \text{regionSize}$$

Das bedeutet, wenn der 'regularizer'-Wert im Verhältnis zur Segmentgröße ('regionSize') klein ist, wird die räumliche Position (x, y) im Vergleich zum Zellenwert $(I(x, y))$ schwächer gewichtet. Das Ergebnis sind Segmente mit tendenziell unregelmässigeren Umrissen, dafür aber erhöhter Homogenität der Zellenwerte. Im vorliegenden Fall hat dies mitunter eine stärkere Anpassung der Segmentränder an natürliche topographische «Grenzen» (Geländekanten etc.) zur Folge.

Der Algorithmus läuft in folgenden Schritten ab:

- 1) Initiale Unterteilung des Gesamtbilds in quadratische Segmente (Seitenlänge = 'regionSize' * Rasterauflösung).
- 2) Das Zentrum jedes Segmentes wird als ein Cluster-Zentrum definiert (bei n Segmenten ergibt dies $k = n$ Cluster-Zentren).
- 3) Berechnung der Cluster-Zugehörigkeit für jede Rasterzelle (kürzeste Distanz zu einem Cluster-Zentrum im $x/y/I(x,y)$ -Raum) und daraus abgeleitete Bestimmung der neuen Segmente. Eine Rasterzelle kann nur zu den Cluster-Zentren des bisherigen oder der direkt angrenzenden Segmente zugeordnet werden.

Die Schritte 2 und 3 erfolgen iterativ bis ein Konvergenzkriterium erreicht ist. Segmente mit einer Fläche unter einem definierten Schwellenwert ('minRegionSize' = $(1/6 * \text{'regionSize'})^2$) werden nach Abschluss des Clustering-Verfahrens bei benachbarten grösseren Segmenten angegliedert.

4.3.2. Wahl der Segmentierungsparameter

Geomorphometrische Parameter:

Die Segmentierung erfolgt hier anhand der **Komponenten der Normalvektoren** auf der Geländeoberfläche (vgl. Kap. 4.2.3). Damit wird sowohl die Hangexpositionsrichtung (x -, y -Komponente) als auch die Hangneigung (z -Komponente) der einzelnen Rasterzellen berücksichtigt. Damit wird beabsichtigt, dass die Segmentumrisse möglichst den Verlauf natürlicher topographischer «Grenzen» abbilden. Für tiefgreifende gravitative Hangdeformationen wird dies als sinnvoll erachtet, da sich diese in der Regel auf eine Talflanke beschränken (vgl. Kap. 2.1) und häufig von solchen topographischen Grenzen (Berggrat, bergseitige Anrissnischen, seitliche Flanken, Flussläufe, Grenze Hangfuss/Talboden) umrandet sind.

Grössen- und Formparameter:

Neben den berücksichtigten topographischen Parametern sind die Grössen- und Formparameter festzulegen. Einzelne Segmente sollen einerseits gross genug sein, um einen hohen räumlichen Informationsgehalt zu beinhalten (Anders et al., 2011). Andererseits sollen sie nicht grösser als das zu klassierende Objekt sein, also im vorliegenden Fall nicht über den Rand einer tiefgreifenden gravitativen Hangdeformation hinausreichen. Van den Eeckhaut et al. (2012) weist zudem darauf hin, dass Hanginstabilitäten häufig aus mehreren Teilbereichen mit unterschiedlichen geomorphometrischen Eigenschaften zusammengesetzt sind (z.B. Anrissnische vs. talseitig davon liegende Bereiche). In diesem Fall kann es von Vorteil sein, eine Hanginstabilität durch mehrere kleinere Segmente abzubilden und diese nach der Klassifikation zu «aggregieren» (vgl. auch Li et al. (2015)).

Um den Einfluss der Grössen- und Formparameter zu untersuchen (vgl. auch Kap. 2.5.3) werden hier folgende Schritte durchgeführt:

- 1) Variation der Grössen- und Formparameter und anschliessend **qualitativer Vergleich mit dem schattierten Relief und den Hanginstabilitätsumrissen** (gemäss Li et al. (2015)).
- 2) Wahl bevorzugter Parametereinstellungen aufgrund von Schritt 1) und Verwendung für die Klassifikation.
- 3) **Quantitative Untersuchung des Einflusses des Formparameters** ('regularizer') auf die Klassifikationsgenauigkeit. Dabei wird auch das Zusammenspiel des Formparameters mit der Rasterauflösung (2m vs. 25m) betrachtet.

Bei Schritt 1) werden für das digitale Geländemodell 'swissALTI3D' die Parametereinstellungen gemäss Tab. 7 untersucht.

Tab. 7: Variation der Funktionsparameter 'regionSize' und 'regularizer' zwecks qualitativer Untersuchung der Segmentierungsergebnisse für das digitale Geländemodell swissALTI3D (Bundesamt für Landestopografie swisstopo, 2016).

	$\lambda = 0.01$	$\lambda = 0.005$	$\lambda = 0.002$
'regionSize' = 500	'regularizer' = 5.0	'regularizer' = 2.5	'regularizer' = 1.0
'regionSize' = 200	'regularizer' = 2.0	'regularizer' = 1.0	'regularizer' = 0.4
'regionSize' = 100	'regularizer' = 1.0	'regularizer' = 0.5	'regularizer' = 0.2

Der grösste Wert für den Parameter 'regionSize' (500) ist so gewählt, dass die maximale Segmentgrösse (500 Rasterzellen x 500 Rasterzellen x 4m²/Rasterzelle) der minimalen Grösse der hier untersuchten tiefgreifenden gravitativen Hangdeformationen (1 km²) entspricht (vgl. Kap. 3.2). Gemäss den oben gemachten Überlegungen werden zusätzlich kleinere Segmentgrössen betrachtet ('regionSize' 200 und 100). Der Parameter 'regularizer' ist jeweils so gewählt, dass

entsprechend Gl. 5 pro Variation der 'regionSize' (500, 200, 100) jeweils dieselben Gewichtungsfaktoren λ (0.01, 0.005, 0.002, siehe Tab. 7) betrachtet werden.

Im Falle des Geländemodells DHM25 wird der Grössenparameter 'regionSize' umgekehrt proportional zum Verhältnis der Rasterauflösungen (25m : 2m) skaliert, um flächenmässig vergleichbare Segmentgrössen wie beim Geländemodell swissALTI3D zu erhalten (z.B. 'regionSize' = 16 anstelle von 200).

Der Einfluss des Formparameters auf die Klassifikationsgenauigkeit im Zusammenspiel mit der Rasterauflösung wird wie folgt untersucht (vgl. Schritt 3) oben):

- Ergebnisvergleich bei identischem Faktor λ für die beiden Rasterauflösungen.
- Ergebnisvergleich bei identischem Formparameter 'regularizer' für die beiden Rasterauflösungen.

4.4. Segment-Deskriptoren / segment-basierte geomorphometrische Parameter

4.4.1. Statistische Verteilungsmasse

Wie bei *van den Eeckhaut et al. (2012)* und *Li et al. (2015)* werden die **Mittelwerte** und **Standardabweichungen der pixel-basierten geomorphometrischen Parameter** aller Rasterzellen eines Segments berechnet. Daraus ergeben sich:

- Mittelwert und Standardabweichung der (pixel-basierten) **Hangneigung**
- Mittelwert und Standardabweichung der Rauigkeit, **Eigenwertverhältnis $\ln(S1/S2)$**
- Mittelwert und Standardabweichung der Rauigkeit, **Eigenwertverhältnis $\ln(S2/S3)$**

Nicht berücksichtigt werden dabei Rasterzellen in Randspalten und Randzeilen des Geländemodells, für welche keine pixel-basierten Parameter berechnet werden. Die Anzahl betroffener Zeilen/Spalten ergibt sich aus der Grösse des verwendeten Berechnungsfensters. Bei der Hangneigung sind es jeweils die erste sowie letzte Zeile und Spalte (Berechnungsfenster von 3 x 3 Rasterzellen, vgl. Abb. 17, S. 42). Bei der Rauigkeit anhand der Eigenwertverhältnisse sind es bei einer Fenstergrösse von 9 x 9 Rasterzellen zum Beispiel je 4 Zeilen und Spalten am Anfang und Ende des Rasters ($[9 - 1] / 2 = 4$).

4.4.2. Segment-basierte geomorphometrische Parameter

Mit den Segmenten und den pixel-basierten Normalvektoren auf der Geländeoberfläche (Kap. 4.2.3) werden zusätzliche, «segment-basierte» geomorphometrische Parameter berechnet. Damit wird auch ein weiterer Analysemasstab (Segmentebene) berücksichtigt.

Hangneigung aufgrund mittlerer Orientierung aller Normalvektoren innerhalb des Segments:

Dabei wird zunächst eine Vektoraddition aller Normalvektoren innerhalb des Segments durchgeführt, wodurch deren mittlere Orientierung angezeigt wird (Vektor v , Abb. 19a). Dieser resultierende Vektor zeigt die Expositionsrichtung des Segments an und bildet gegenüber der Hangneigung einen 90° -Winkel. Entsprechend kann die Hangneigung aus der Orientierung des Vektors v abgeleitet werden (Winkel β in Abb. 19b).

«Richtungsabhängige Rauigkeit» und «Nackental-Index»:

Pro Segment kann auch die Streuung der pixel-basierten Normalvektoren in Bezug auf die mittlere Orientierung (Expositionsrichtung und Hangneigung) des Segments ermittelt werden. Das Ziel dieses Vorgehens besteht darin, anisotrope Rauigkeitseffekte zu quantifizieren, welche durch hangparallele Morphostrukturen gemäss Kap. 2.1 (z.B. Anrissnischen, Nackentäler) erzeugt werden.

Dazu müssen zunächst die Vektorkoordinaten in ein segmentspezifisches Koordinatennetz (x'' , y'' , z'') transformiert werden. Abb. 19 illustriert diese Transformation.

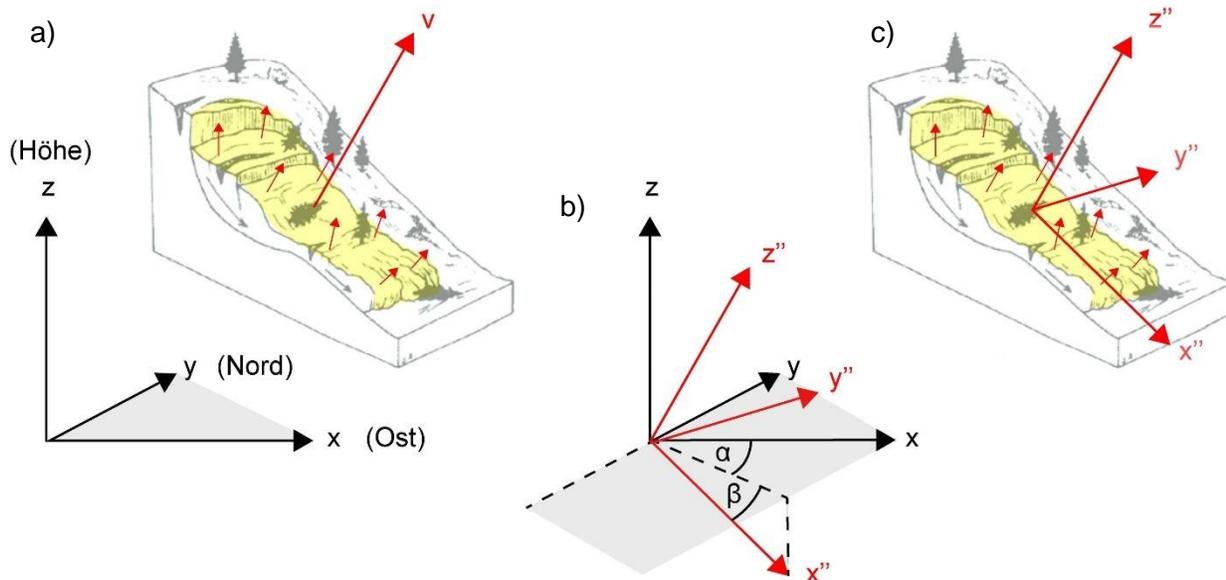


Abb. 19: Transformation in segmentspezifisches Koordinatensystem: a) ursprüngliches Koordinatensystem. Die graue Ebene entspricht der Horizontalen. Im Blockbild ist schematisch eine Hanginstabilität dargestellt (Blockbild: California Department of Conservation, 2013), welche als ein Segment (gelbe Fläche) zusammengefasst ist. Der Vektor v widerspiegelt die mittlere Orientierung aller Normalvektoren (kleine rote Pfeile) innerhalb dieses Segmentes und wird durch Vektoraddition dieser Normalvektoren gebildet. b) Beziehung zwischen ursprünglichem Koordinatensystem (x , y , z) und segmentspezifischem Koordinatensystem (x'' , y'' , z''): der Winkel α ist eine Funktion der Exposition des Segments und beschreibt die Rotation um die z -Achse; der Winkel β entspricht der Hangneigung und beschreibt die Rotation um die y'' -Achse. c) Segmentspezifisches Koordinatensystem (x'' , y'' , z''). z'' entspricht der Orientierung des Normalvektors v gemäss Abb. a). x'' verläuft in Richtung der mittleren Exposition und Hangneigung des Segments.

Das ursprüngliche Koordinatensystem (x, y, z) wird mit dem Winkel α (Exposition) um die z-Achse rotiert. Dadurch resultiert zunächst ein Koordinatensystem (x', y', z), welches die mittlere Exposition des Segments, jedoch noch nicht dessen Hangneigung berücksichtigt.

Anschliessend erfolgt die Rotation mit dem Winkel β (Hangneigung) um die y'-Achse rotiert (Abb. 19b), wodurch die Transformation ins segmentspezifische Koordinatensystem (x'', y'', z'') abgeschlossen wird. Die neuen Koordinatenachsen (Abb. 19c) haben folgende Eigenschaften:

- x'': Falllinie des Hanges (// Expositionsrichtung, // Hangneigung)
- y'': Parallel zum Hang (\perp Expositionsrichtung, horizontal)
- z'': Normalvektor (// Expositionsrichtung, \perp Hangneigung)

Die im segmentspezifischen Koordinatensystem berechneten geomorphometrischen Parameter sind in Abb. 20 illustriert (inklusive Gleichungen für die Berechnung):

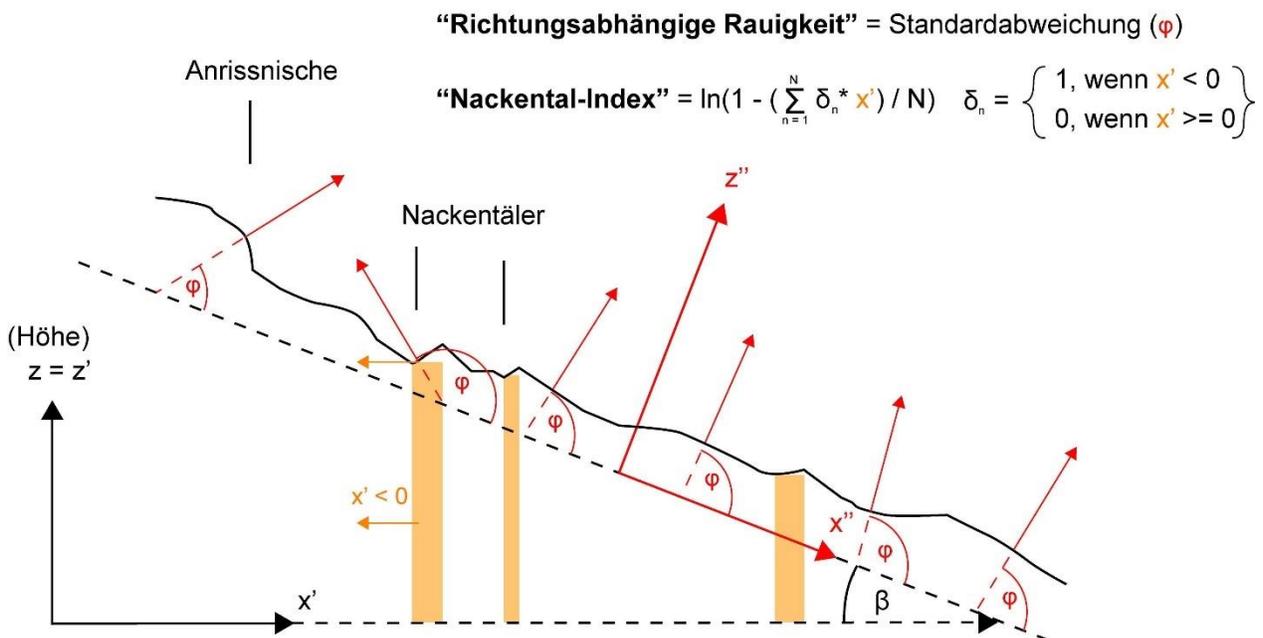


Abb. 20: Ermittlung der «richtungsabhängigen Rauigkeit» und des «Nackental-Index» im segmentspezifischen Koordinatennetz. Die feinen roten Pfeile repräsentieren pixel-basierte Normalvektoren auf der Geländeoberfläche (schematisch), projiziert in die x''-z''-Ebene. Die orange eingefärbten Bereiche repräsentieren Geländeabschnitte mit negativer x'-Komponente des Normalvektors, welche im dargestellten Fall auf Nackentäler hinweisen. N ist die Anzahl der Rasterzellen innerhalb eines Segments.

- **«Richtungsabhängige Rauigkeit»** in Richtung der Falllinie des Hanges (x''): diese wird ermittelt als Standardabweichung von φ (Winkel des projizierten Normalvektors gegenüber x''). Dadurch können Rauigkeitseffekte erfasst werden, welche durch hangparallele Morphostrukturen wie Anrissnischen, Nackentäler, Gräben erzeugt werden.

- **«Nackental-Index»:** dieser ist eine Funktion der Summe aller negativen x' -Komponenten (vor Rotation um y' -Achse) von Normalvektoren auf der Geländeoberfläche. Dadurch sollen Gegensteigungen zur Richtung der Hangexposition quantifiziert werden, die Hinweise für (talparallele) Nackentäler darstellen.

Die Summe wird dividiert durch die Anzahl Rasterzellen (M) des Segments, um die Vergleichbarkeit zwischen Segmenten verschiedener Größe zu gewährleisten. Der natürliche Logarithmus wird gebildet, da einzelne Segmente deutlich höhere Beträge an negativen x' -Komponenten aufweisen.

4.5. Klassifikation

4.5.1. 'Random Forest' Algorithmus

Die Klassifikation der Segmente erfolgt mit dem Algorithmus 'Random Forest' (*Breiman, 2001*). Dieser stellt einen häufig verwendeten Klassifikationsalgorithmus in der Fernerkundung dar (*Belgiu & Drăguț, 2016*) und wurde von *Li et al. (2015)* auch schon für die Erkennung von Hanginstabilitäten eingesetzt. Die weiteren Ausführungen zu 'Random Forest' in diesem Kapitel beziehen sich – wo nicht anders angegeben - auf *James et al. (2013)*.

Allgemeine Funktionsweise:

'Random Forest' nimmt eine Klassifikation von Daten (hier Segmente) aufgrund einer Vielzahl von Entscheidungsbäumen vor. Im Endergebnis werden die Daten entsprechend der häufigsten Klassifikation aller Entscheidungsbäume klassiert ('majority vote').

Jeder dieser Entscheidungsbäume wird mit einer anderen **Zufallsauswahl der Daten** kalibriert. Die Zufallsauswahl erfolgt mit dem sogenannten 'Bootstrapping' Verfahren, bei dem aus der Gesamtdatenmenge (bestehend aus n Werten) n Ziehungen mit «Zurücklegen» durchgeführt werden. Dies führt dazu, dass pro Zufallsauswahl jeweils rund zwei Drittel der Gesamtdatenmenge berücksichtigt sind.

Bei jeder Verzweigung ('split') im Entscheidungsbaum wird die Datenmenge anhand eines **Datenmerkmals** ('predictor': hier geomorphometrischer Parameter resp. Segment-Deskriptor) aufgeteilt. Dieses Prinzip wird in Abb. 21 veranschaulicht. Das Beispiel zeigt einen vereinfachten Fall mit nur zwei Datenmerkmalen («Neigung» und «Rauigkeit»). Meist wird aber ein n -dimensionaler Raum mit viel mehr Datenmerkmalen betrachtet (*Boulesteix et al., 2012*).

Für die **Datenaufteilung** kommt **pro Verzweigung** nur eine **zufällige Auswahl der berücksichtigten Datenmerkmale** in Frage. Davon wird jenes gewählt, das bei optimalem Schwellenwert die beste Aufteilung ermöglicht, sodass die aufgeteilten Daten möglichst «rein»

sind. Diese «Reinheit» in Bezug auf die Zusammensetzung der Klassen nach der Aufteilung wird mit verschiedenen Bestimmungsmassen ermittelt (z.B. 'Gini Index').

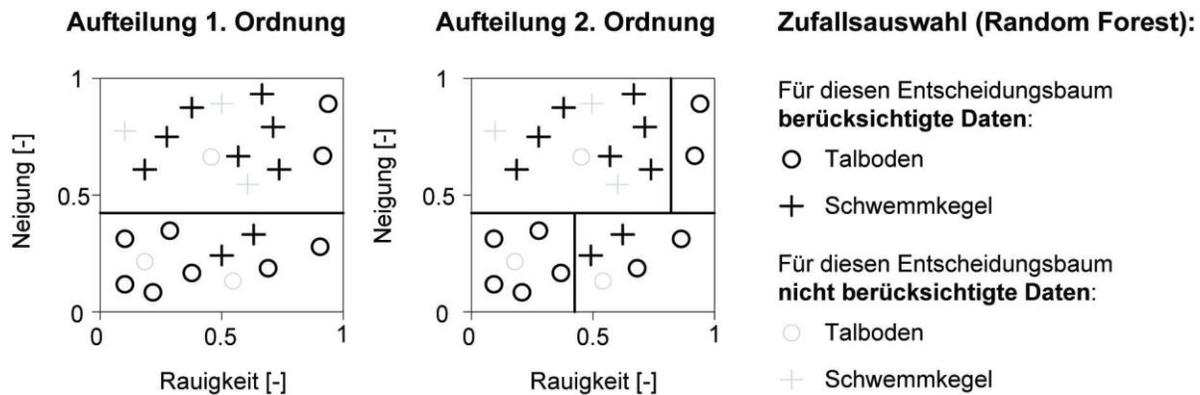


Abb. 21: Funktionsweise von Entscheidungsbäumen zur Klassifikation mit Random Forest (sinngemäss zu James et al. (2013)). Dargestellt wird ein vereinfachtes, fiktives Klassifikationsbeispiel, bei dem Segmente von Talböden und Schwemmkegeln anhand geomorphometrischer Datenmerkmale (0 = niedriger Wert, 1 = hoher Wert) unterschieden werden. Die Segmente der Talböden weisen dabei teils erhöhte Rauigkeits- und Neigungswerte infolge anthropogener Merkmale auf, z.B. durch Dammschüttungen. Mit zunehmender Anzahl Verzweigungen des Entscheidungsbaumes nimmt die «Reinheit» des Klassifikationsergebnisses zu («Aufteilung 1. Ordnung» > «Aufteilung 2. Ordnung»).

Parameter, die bei 'Random Forest' festgelegt werden müssen, sind (Boulesteix et al., 2012):

- Anzahl Entscheidungsbäume.
- Anzahl in Frage kommender Datenmerkmale je Aufteilung.
- Grösse der Bäume: typischerweise definiert durch Angabe der minimal erlaubten Anzahl Datenpunkte ('MinLeafSize') in einem einzelnen Ast des Entscheidungsbaums. Im Beispiel von Abb. 21 wäre 'MinLeafSize' = 2 (Rechteck/Region oben rechts).

Positive Eigenschaften:

- Durch die Kombination vieler, jeweils «zufällig aufgebauter» Entscheidungsbäume wird die Vorhersage robuster. Die Zufallsauswahl der Daten entschärft das Risiko der Überanpassung an die Kalibrierungsdaten. Durch die zufällige Auswahl in Frage kommender Datenmerkmale bei jeder Verzweigung werden die einzelnen Entscheidungsbäume «dekorreliert» (James et al., 2013: p. 325).
- Entscheidungsbäume sind geeignet bei «nicht-linearen, komplexen Beziehungen zwischen Datenmerkmalen» und der Klassenzugehörigkeit (James et al., 2013: p. 329). Die Datenpunkte des «Talbodens» mit hohen Neigungs- und Rauigkeitswerten in Abb. 21 werden so beispielsweise richtig klassiert.
- Auch nominale Daten können bei der Klassifikation verwendet werden (in der vorliegenden Arbeit nicht der Fall; könnte aber erweitert werden, z.B. lithologische Einheiten).

4.5.2. Anwendung

Die Klassifikation von «tiefgreifenden gravitativen Hangdeformationen» und des «übrigen Terrains» mit 'Random Forest' wird hier sinngemäss zu Abb. 21 vorgenommen. Um den **Einfluss der geomorphometrischen Parameter und Analysemasstäbe auf das Klassifikationsergebnis** zu untersuchen, erfolgt die Klassifikation mit verschiedenen Kombinationen und Anzahlen von Datenmerkmalen (z.B. nur Mittelwert und Standardabweichung der pixel-basierten Hangneigung oder kombiniert mit jenen der Rauigkeit anhand der «Eigenwert-Methode»). Insgesamt werden die Resultate von 78 verschiedenen Kombinationen vorgestellt (Übersicht in Kap. 5.4.4). Die Kalibrierung und Validierung erfolgt anhand von Kartenblatt 1214 (siehe nachfolgender Abschnitt), die Evaluation anhand des Kartenblatts 1215 (Kap. 4.6).

MATLAB

In MATLAB wird die 'Random Forest' Klassifikation mit der Funktion 'TreeBagger' (*MathWorks, 2016*) durchgeführt. Jedes Segment ist wie bei Abb. 21 beschrieben durch:

- Geomorphometrische Eigenschaften / Segment-Deskriptoren (Kap. 4.4)
- Klassenzugehörigkeit: «tiefgreifende gravitative Hangdeformation» vs. «übriges Terrain», gemäss 'Ground Truth' (Kap. 3.2).

Die Referenzflächen der 'Ground Truth' sind pixel-basiert. Bei Segmenten, die sowohl Rasterzellen mit «tiefgreifender gravitativer Hangdeformation» als auch des «übrigen Terrains» aufweisen, erfolgt die Zuweisung der Klassenzugehörigkeit aufgrund des dominierenden Anteils.

Um eine geeignete **Wahl der Anzahl und Grösse der Entscheidungsbäume** zu treffen (vgl. Kap. 4.5.1), wird eine **Parametervalidierung** durchgeführt (aus Übungscode *GEO448 (2016)*):

- Modelldurchlauf für verschiedene Kombinationen der Parameter 'NumTrees' (Anzahl der Bäume) und 'MinLeafSize' (minimal erlaubte Anzahl Datenpunkte nach einer Aufteilung) in einem **Kalibrierungsgebiet**.
- Quantitativer Vergleich dieser Modelldurchläufe anhand der erzielten Klassifikationsgenauigkeit in einem **Validierungsgebiet**. Die Klassifikationsgenauigkeit wird in diesem Fall durch den Anteil der richtig klassierten Segmente im Validierungsgebiet ermittelt.

Die Unterteilung in Kalibrierungs- und Validierungsgebiet für Kartenblatt 1214 zeigt Abb. 22. Diese Flächen sind fix festgelegt um die Vergleichbarkeit zwischen den verschiedenen Klassifikationsergebnissen zu gewährleisten. In Analogie zu anderen Studien gemäss Kap. 2.4.3 werden die Kalibrierungsflächen manuell gewählt und sind kleiner als die Validierungsflächen (*Booth et al., 2009; van den Eeckhaut et al., 2012*). Die Flächen sind so verteilt, dass sowohl bei den

Kalibrierungs- als auch Validierungsflächen verschiedene morphologische Ausprägungen der jeweiligen Klassen vertreten sind.

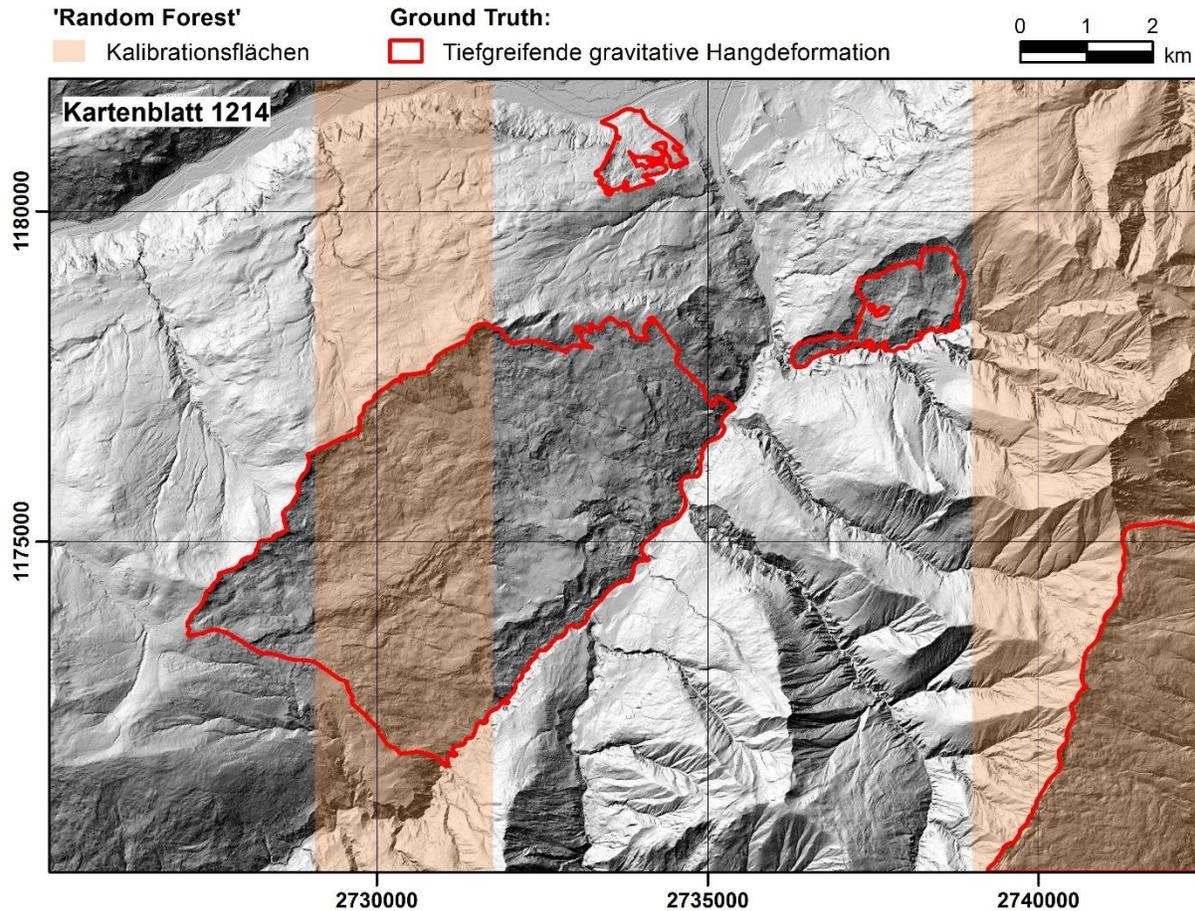


Abb. 22: Aufteilung des Kartenblatts 1214 in ein Gebiet für die Kalibrierung (braun eingefärbt) und für die Parametervalidierung (restliche Fläche) des 'Random Forest' Klassifikationsmodells. Das schattierte Relief im Hintergrund basiert auf dem digitalen Geländemodell swissALTI3D (Bundesamt für Landestopografie swisstopo, 2016).

Die Anzahl von Entscheidungsbäumen wurde aufgrund dieser Parametervalidierung wie folgt festgelegt:

- 100 Bäume bei gesamthafter Berücksichtigung von nur 2 Datenmerkmalen
- 200 Bäume bei gesamthafter Berücksichtigung von 4 Datenmerkmalen
- 300 Bäume bei gesamthafter Berücksichtigung von 6 und mehr Datenmerkmalen

Das Kriterium dabei ist, dass bei weiterer Erhöhung der Anzahl Bäume jeweils keine Verbesserung der Ergebnisse mehr beobachtet wird. Je mehr Datenmerkmale berücksichtigt werden, umso mehr Bäume sind für die robuste Klassifikation erforderlich (Boulesteix et al., 2012). Insgesamt sind die Anzahl Datenmerkmale - und daher auch die erforderliche Anzahl Bäume - im vorliegenden Fall im Vergleich zu anderen Anwendungen aber gering.

Für den Parameter '**MinLeafSize**' wurde mit dem oben genannten Verfahren ein geeigneter Wert von **3** festgestellt (unabhängig von der Anzahl berücksichtigter Datenmerkmale).

Betreffend **Zufallsauswahl der Datenmerkmale**, die pro Verzweigung innerhalb des Entscheidungsbaums in Frage kommen, wird die Standardeinstellung der 'TreeBagger' Funktion verwendet (Quadratwurzel der Gesamtanzahl von Datenmerkmalen: also z.B. 2 Datenmerkmale bei gesamthaft 4 berücksichtigten Datenmerkmalen).

4.6. Evaluation

Um die Leistung des Klassifikationsmodells zu bewerten, wird dieses nach der Kalibrierung und Validierung anhand des Kartenblattes 1214 auf das Kartenblatt 1215 angewandt. Die dabei resultierenden Klassifikationsergebnisse werden mit verschiedenen **Genauigkeitsmassen** evaluiert. Diese sollen ermöglichen:

- Quantifizierung der im besten Fall erzielten Klassifikationsgenauigkeit.
- Quantifizierung der **Ergebnissensitivität** in Abhängigkeit der berücksichtigten geomorphometrischen Parameter, Analysemassstäbe und Segmentierungsparameter.
- Quantitativer Vergleich mit Ergebnissen anderer Studien (Kap. 2.4.3).

Dies unterstützt die Beantwortung der Forschungsfragen gemäss Kap. 1.2. Die nachfolgenden Gleichungen definieren Genauigkeitsmasse, die bei der Überprüfung von Klassifikationsergebnissen in der Fernerkundung häufig verwendet werden (*Liu et al., 2007; GEO123, 2012*):

$$\text{Gl. 6.} \quad \begin{array}{l} \textbf{Gesamtgenauigkeit} \\ \text{('Overall Accuracy')} \end{array} = \frac{\textit{richtig klassierte Rasterzellen aller Klassen}}{\textit{alle Rasterzellen}}$$

$$\text{Gl. 7.} \quad \begin{array}{l} \textbf{Erstellergenauigkeit} \\ \text{('Producer Accuracy')} \end{array} = \frac{\textit{richtig klassierte Rasterzellen der Klasse X}}{\textit{Rasterzellen der Klasse X gemäss 'Ground Truth'}}$$

$$\text{Gl. 8.} \quad \begin{array}{l} \textbf{Nutzergenauigkeit} \\ \text{('User Accuracy')} \end{array} = \frac{\textit{richtig klassierte Rasterzellen der Klasse X}}{\textit{Rasterzellen der Klasse X gemäss Klassifikation}}$$

$$\text{Gl. 9.} \quad \begin{array}{l} \textbf{Durchschnittliche} \\ \textbf{Genauigkeit} \\ \text{('Average Accuracy')} \end{array} = \frac{\textit{Summe der Nutzergenauigkeiten aller Klassen}}{\textit{Anzahl Klassen}}$$

Die Ersteller- und Nutzergenauigkeit werden jeweils für jede Klasse einzeln bestimmt (d.h. hier je separat für «tiefgreifende gravitative Hangdeformationen» und «übriges Terrain»). Somit wird

nicht nur dargestellt, wie gross die richtig klassierte Fläche im ganzen Gebiet ist (Gesamtgenauigkeit), sondern auch wie gut die Klassifikation für die einzelnen Klassen funktioniert.

Die Gesamtgenauigkeit wird auch bei anderen Untersuchungen zur automatischen Erkennung von Hanginstabilitäten gemäss Kap. 2.4.3 angegeben (*Booth et al., 2009; Li et al., 2015*). Die nachfolgende Gleichung zeigt ein weiteres Genauigkeits- respektive Fehlermass, das in diesem Zusammenhang verwendet wird (*Booth et al., 2009; van den Eeckhaut et al., 2012*):

$$\text{Gl. 10.} \quad \begin{array}{l} \text{Gesamtfehler-Index} \\ \text{('Overall Error Index',} \\ \text{'Positional Mismatch')} \end{array} = \frac{(A_{GT} \cup A_{KL}) - (A_{GT} \cap A_{KL})}{(A_{GT} \cup A_{KL})}$$

A_{GT} entspricht dabei den Flächen mit Hanginstabilität gemäss 'Ground Truth', A_{KL} jenen des Klassifikationsergebnisses. Ein Gesamtfehler-Index von 0% entspricht einer kompletten Übereinstimmung des Klassifikationsergebnisses mit der 'Ground Truth'. Bei einem Gesamtfehler-Index von 100% haben die Hanginstabilitätsflächen der Klassifikation und der 'Ground Truth' gar keine Übereinstimmung.

5. Resultate und Interpretation

Bei der Präsentation der Resultate werden die Zwischen- und Endergebnisse der einzelnen Arbeitsschritte stufenweise vorgestellt und interpretiert:

- Pixel-basierte geomorphometrische Parameter (Kap. 5.1)
- Segmentierung (Kap. 5.2)
- Segment-Deskriptoren / segment-basierte geomorphometrische Parameter (Kap. 5.3)
- Klassifikationsergebnisse und Evaluation (Kap. 5.4)

Bei der Ergebnisinterpretation stehen Beobachtungen im Vordergrund, die in Bezug auf die automatisierte Erkennung von tiefgreifenden gravitativen Hangdeformationen relevant sind.

5.1. Pixel-basierte geomorphometrische Parameter

5.1.1. Hangneigung

Die Ergebnisse der pixel-basierten Hangneigungsberechnung werden anhand einer statistischen Auswertung der beiden Kartenblätter betrachtet (Abb. 23). Zudem werden für Kartenblatt 1214 die kartographischen Darstellungen bei einer Rasterauflösung von 2m (Abb. 24) und 25m (Abb. 25) gezeigt. Zu Interpretations- und Orientierungszwecken ist dabei auch das Gewässernetz des Datensatzes VECTOR200 dargestellt (Bundesamt für Landestopografie swisstopo, 2014).

Anhand dieser Darstellungen werden folgende Beobachtungen gemacht:

- **Tiefgreifende gravitative Hangdeformationen** weisen für beide Kartenblätter ähnliche Verteilungen der pixel-basierten Hangneigungswerte auf (Abb. 23): Knapp zwei Drittel der Werte liegen zwischen 10 und 30°. Niedrigere Werte (<10°) können innerhalb tiefgreifender gravitativer Hangdeformationen zum Teil mit grösseren **Geländeterrassen** assoziiert sein (vgl. dazu auch Foto in Abb. 14, S. 37). Steilere Werte (>30°) sind hingegen eher das Ergebnis von Morphostrukturen (Anrissnischen, Nackentäler). Daneben führen auf Talflanken mit tiefgreifender gravitativer Hangdeformation auch fluviale Einschnitte zu erhöhten Neigungswerten (siehe südöstlicher Rand von Abb. 24).
- Im Vergleich zum «übrigen Terrain» resultiert für tiefgreifende gravitative Hangdeformationen ein **geringerer Mittelwert** sowie eine **geringere Standardabweichung** der pixel-basierten Hangneigungswerte (Abb. 23).
- Der höhere Mittelwert der Hangneigung für das «**übrige Terrain**» ist insbesondere durch steile Geländeflanken entlang tiefer fluvialer Einschnitte begründet (Abb. 24, vor allem rechte Bildhälfte). Die grössere Standardabweichung ist durch die Vielzahl geomorpho-

logischer Prozessbereiche erklärbar, die unter dem Begriff «übriges Terrain» zusammengefasst sind (u.a. flache Talböden, steile Felsklippen).

- Je nach Anteil dieser Prozessbereiche innerhalb eines Kartenblatts unterscheidet sich die statistische Verteilung der Hangneigungswerte im «übrigen Terrain» (Abb. 23). Kartenblatt 1215 weist aufgrund einer grösseren Talsohle (vgl. Abb. 13 und Abb. 15 in Kap. 3) zum Beispiel einen höheren Anteil von Rasterzellen mit sehr niedriger Hangneigung (0 - 5°) auf. Hingegen zeigt Kartenblatt 1214 beim übrigen Terrain einen grösseren Flächenanteil mit einer Hangneigung zwischen 10 und 30°. In diesem Fall wird die Unterscheidung von tiefgreifenden gravitativen Hangdeformationen erschwert. So zeigt die grosse instabile Fläche der westlichen Talseite des Lugnez/Val Lumnezia (Abb. 24, Bildmitte) ein ähnliches Hangneigungsmuster wie die nordwestlich angrenzenden «ungestörten» Gebiete.

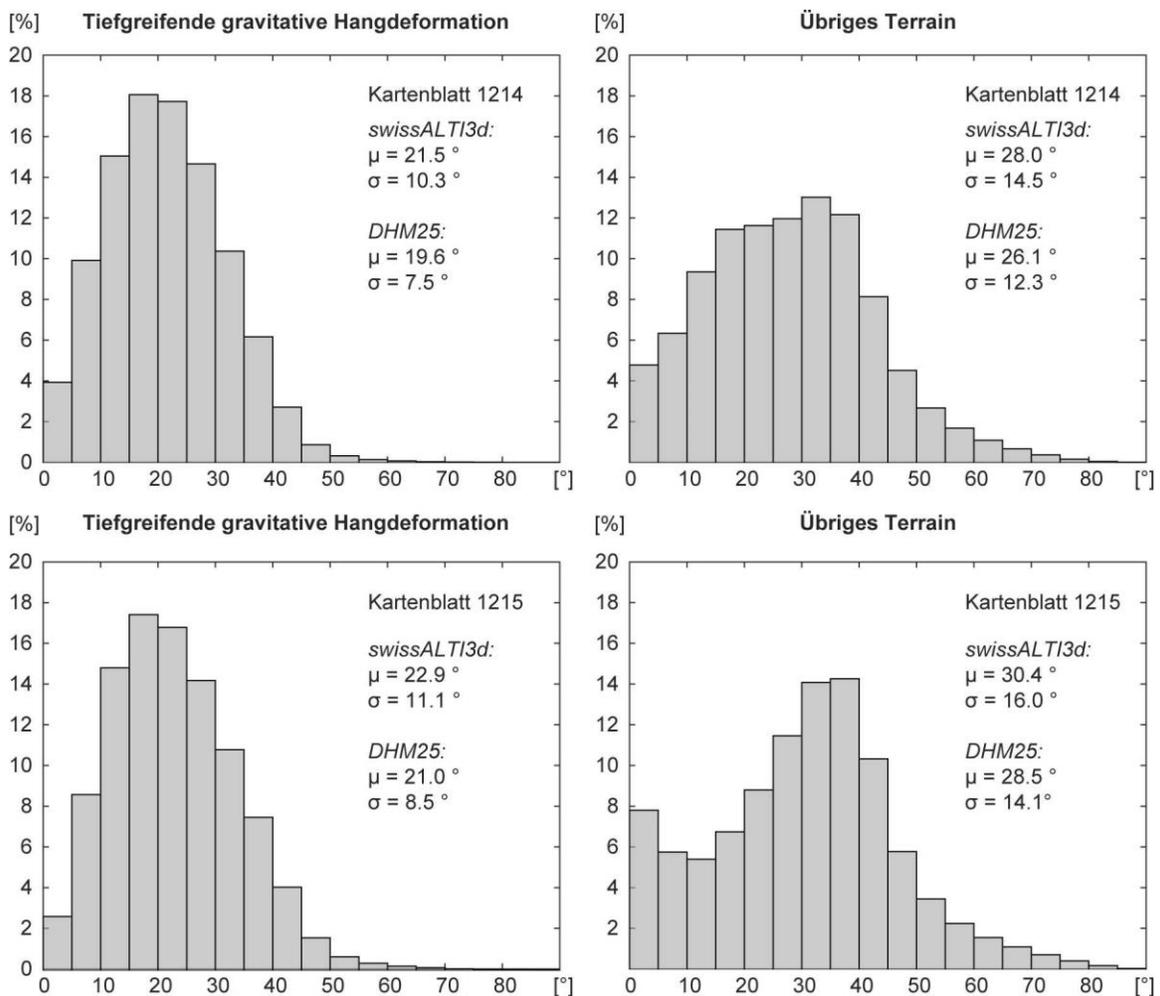


Abb. 23: Histogramme der pixel-basierten Hangneigungswerte bei 2m Rasterauflösung (swissALTI3D) für die Kartenblätter 1214 und 1215. Unterschieden werden Gebiete mit «tiefgreifender gravitativer Hangdeformation» links und dem «übrigen Terrain» rechts (gemäss 'Ground Truth' in Kap. 3.2). Die Histogramme sind jeweils ergänzt mit dem Mittelwert μ und der Standardabweichung σ der dargestellten Verteilung. Zum Vergleich sind μ und σ auch für die Berechnung mit 25m Rasterauflösung (DHM25) angegeben.

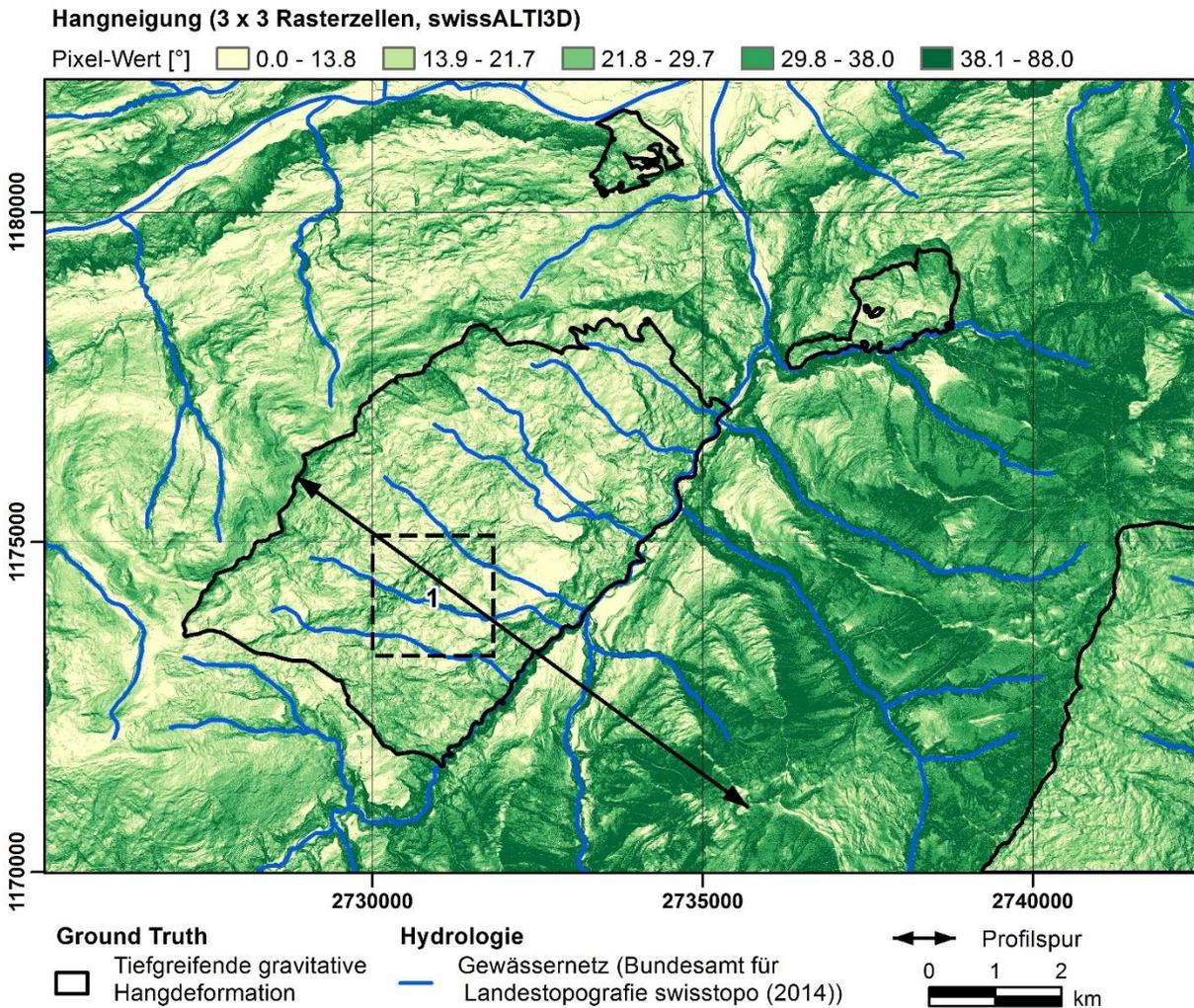


Abb. 24: Pixel-basierte Hangneigung für Kartenblatt 1214, bei 2m Rasterauflösung (Geländemodell swissALTI3D, Bundesamt für Landestopografie swisstopo (2016)). Die Farbabstufung repräsentiert die 20%-Quantile der Pixel-Werte des Kartenblatts. Die dargestellte Profilspur zeigt den Verlauf des Gelände-profils in Abb. 27a. Die schwarz gestrichelte Box (1) zeigt die Lage des Kartenausschnitts von Abb. 30.

Betreffend **Einfluss des Analysemasstabs** werden ebenfalls Abb. 23 bis Abb. 25 betrachtet:

- In groben Zügen wird für eine Rasterauflösung von 2m und 25m ein **ähnliches räumliches Muster** der Hangneigungswerte festgestellt (Abb. 24, Abb. 25). Auch die Histogramme der Hangneigungswerte ergeben bei einer Rasterauflösung von 25m (hier nicht dargestellt) ein ähnliches Bild wie bei 2m Rasterauflösung (Abb. 23).
- Bei Verwendung der **25m Rasterauflösung** kann im Allgemeinen eine «**Glättung**» der Geländeoberfläche im Vergleich zur 2m Rasterauflösung beobachtet werden. Bei den Diagrammen von Abb. 23 wird dies durch eine Abnahme des Mittelwerts und der Standardabweichung bei 25m Rasterauflösung belegt. Dies trifft in ähnlichem Masse für Gebiete inner- und ausserhalb von tiefgreifenden gravitativen Hangdeformationen zu.

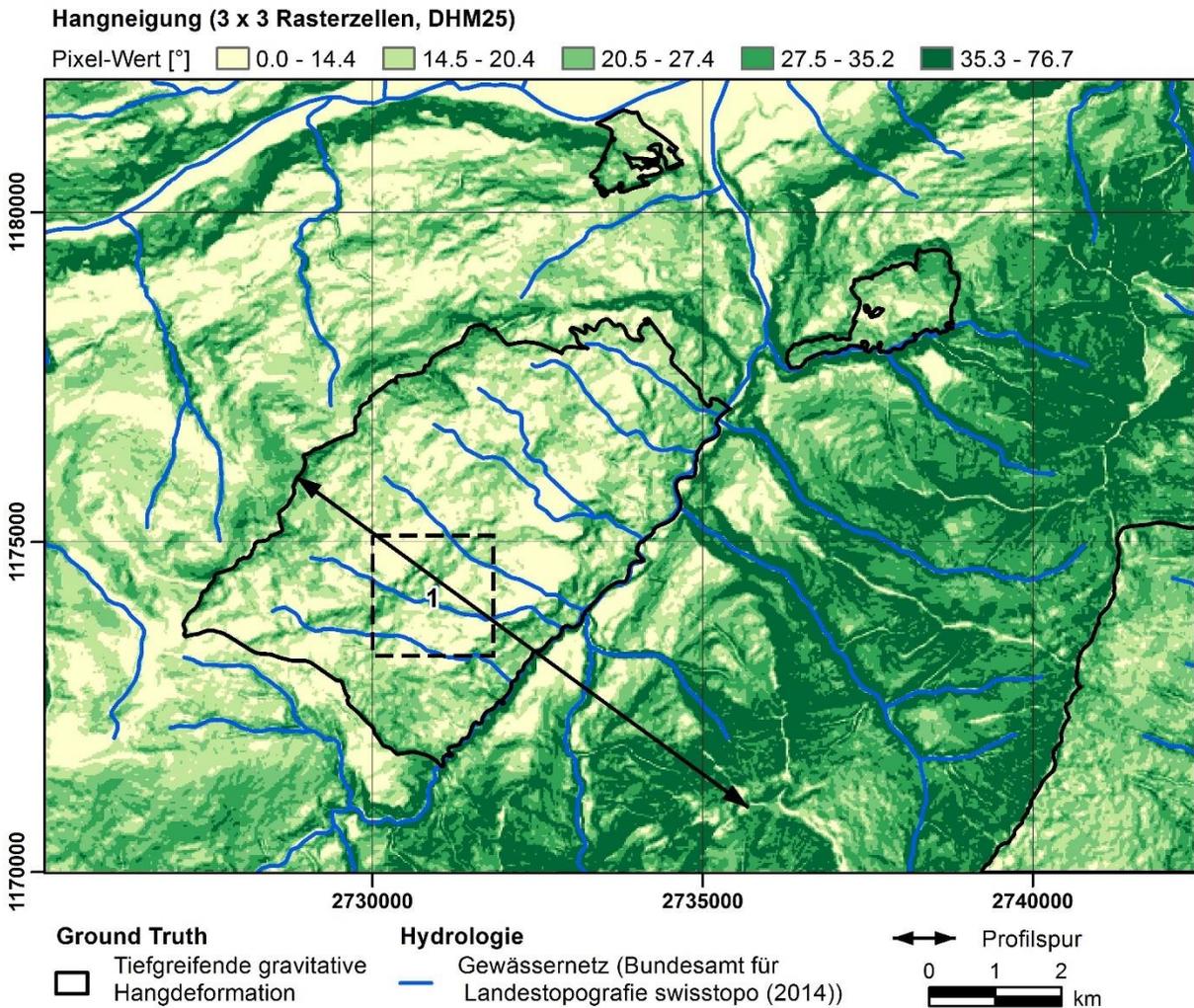


Abb. 25: Pixel-basierte Hangneigung für Kartenblatt 1214, bei 25m Rasterauflösung (Geländemodell DHM25, Bundesamt für Landestopografie swisstopo (2005)). Die Farbabstufung repräsentiert die 20%-Quantile der Pixel-Werte des Kartenblatts. Die dargestellte Profilspur zeigt den Verlauf des Geländeprofiles in Abb. 27a. Die schwarz gestrichelte Box (1) zeigt die Lage des Kartenausschnitts von Abb. 30.

Verschiedene Beobachtungen dieses Kapitels können auch anhand der **Geländeschnitte** in Abb. 27 (S. 62) nachvollzogen werden. Die grossräumige Hangneigung ist dort flacher für die linke Talflanke (tiefgreifende gravitative Hangdeformation) und steiler für die rechte Talflanke (übriges Terrain) (Abb. 27a). Ebenso kann in Abb. 27c der «Glättungseffekt» bei 25m im Vergleich zu 2m Rasterauflösung festgestellt werden. Lokal erhöhte Neigungswerte, die im Geländemodell 'swissALTI3D' abgebildet und zum Beispiel auf kleinere Nackentäler zurückführbar sind, sind bei der Profillinie des Geländemodells DHM25 nicht mehr erkennbar. Entsprechend nehmen Mittelwert und Standardabweichung der Hangneigung bei der gröberen Rasterauflösung ab (siehe Abb. 23).

5.1.2. Normalvektoren

Das Ergebnis der Normalvektorenberechnung ist stellvertretend für Kartenblatt 1214 getrennt für die x-, y- und z-Komponente dargestellt (Abb. 26). Für die x- und y-Komponente entspricht das Bild einem schattierten Relief, das aus Osten respektive Norden beleuchtet wird. Die z-Komponente korreliert mit der Hangneigung und zeigt somit ein ähnliches Bild wie Abb. 24.

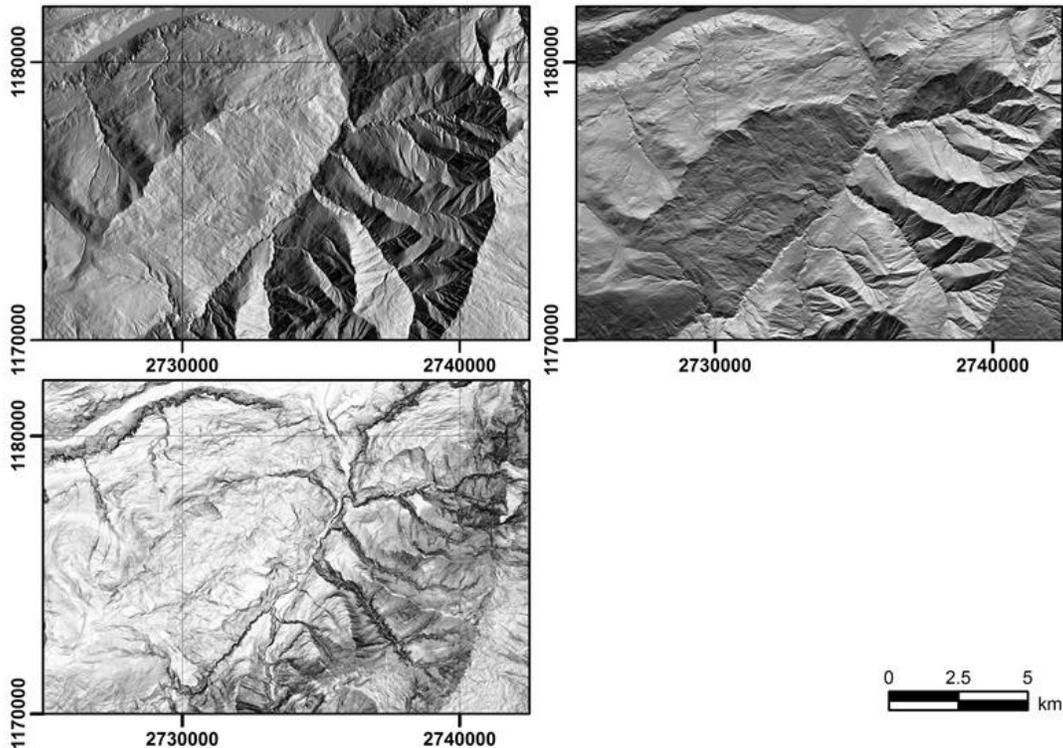


Abb. 26: Ergebnis der Normalvektorberechnung je Rasterzelle für Kartenblatt 1214 bei 2m Rasterauflösung (swissALTI3D, Bundesamt für Landestopografie swisstopo (2016)). Oben links: x-Komponente. Oben rechts: y-Komponente. Unten links: z-Komponente. Hellere Werte liegen näher bei 1, dunklere Werte näher bei -1 (bzw. bei 0 im Fall der z-Komponente).

5.1.3. Rauigkeitsberechnung - Eigenwertverhältnisse der Normalvektoren

Die Ergebnisse der pixel-basierten Rauigkeitsberechnung mittels «Eigenwert-Methode» werden anhand der folgenden Darstellungen betrachtet:

- **Geländeschnitte** zur Gegenüberstellung von topographischen Phänomenen und Analysemassstäben bei der Rauigkeitsberechnung (Abb. 27).
- Eigenwertverhältnisse $\ln(S1/S2)$ und $\ln(S2/S3)$ für Kartenblatt 1214, stellvertretend dargestellt für ein Berechnungsfenster von 25 x 25 Rasterzellen und 2m Rasterauflösung (Abb. 28 und Abb. 29).
- **Detailkartenausschnitt zur Veranschaulichung von Massstabseffekten** auf das Ergebnis des Eigenwertverhältnisses $\ln(S1/S2)$ (Abb. 30).

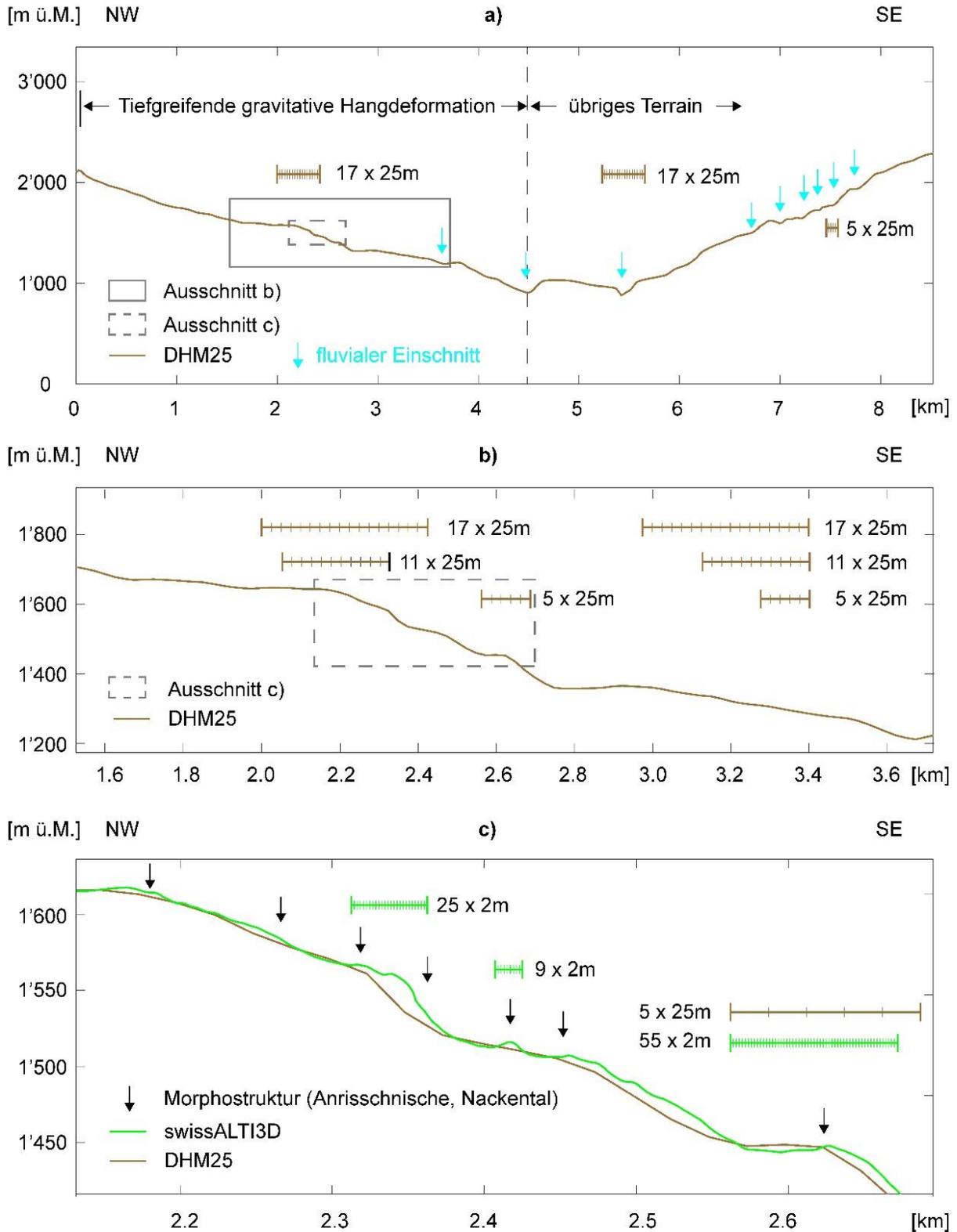


Abb. 27: Geländeprofile zur Gegenüberstellung von topographischen Phänomenen und Analysemasstäben bei der Rauigkeitsberechnung mit der «Eigenwert-Methode». a) Talquerschnitt gemäss Profilspur in Abb. 28. b) und c) Vergrößerungsausschnitte gemäss dargestellten grauen Kästchen. Die Lage der markierten Morphostrukturen beruht teilweise auf der Kartierung von Schwab et al. (2009) und teilweise auf der eigenen Interpretation des schattierten Reliefs (vgl. Abb. 30).

Anhand dieser Darstellungen werden folgende Beobachtungen gemacht:

- Der visuelle Vergleich des **Eigenwertverhältnisses $\ln(S1/S2)$** (Abb. 28) mit der Hangneigungskarte (Abb. 24) zeigt eine gewisse **Korrelation** zwischen den beiden geomorphometrischen Parametern. Eine hohe Rauigkeit (= niedriger Wert von $\ln(S1/S2)$) tritt zum Beispiel entlang und seitlich von tiefen fluvialen Einschnitten auf, wo die Erosion auch erhöhte Neigungswerte erzeugt. Dies ist intuitiv anhand der markierten «fluvialen Einschnitte» im Geländeprofil von Abb. 27a nachzuvollziehen. Flache Talböden (Abb. 28, Mitte des nördlichen Kartenrands) weisen umgekehrt eine geringe Streuung der Normalvektoren und somit eine geringere Rauigkeit auf (hohes Eigenwertverhältnis $\ln(S1/S2)$).

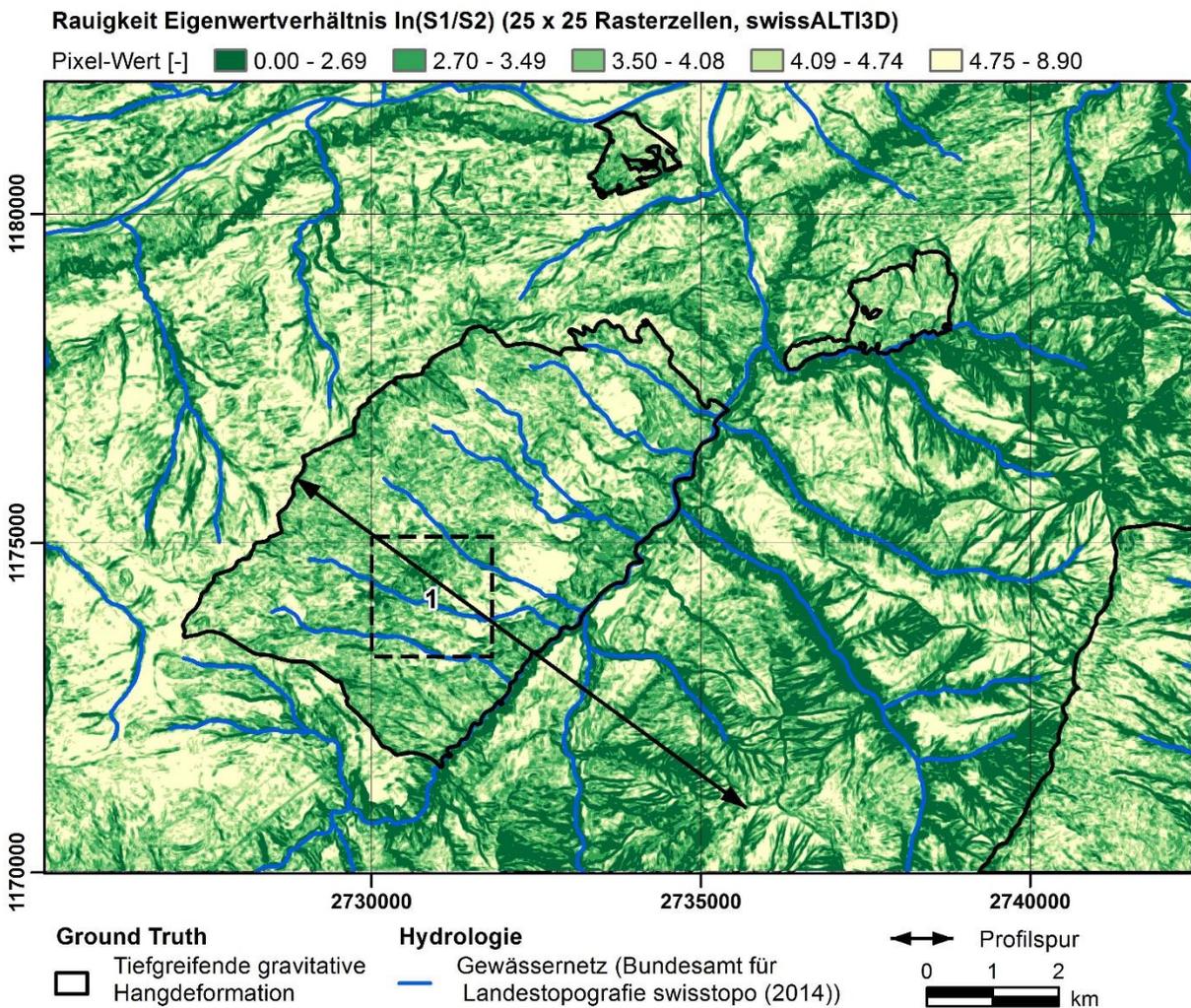


Abb. 28: Pixel-basierte Rauigkeit für Kartenblatt 1214 aufgrund des Eigenwertverhältnisses $\ln(S1/S2)$, bei einem Analysemasstab von 25 x 25 Rasterzellen und 2m Rasterauflösung (swissALTI3D, Bundesamt für Landestopografie swisstopo (2016)). Die Farbabstufung repräsentiert die 20%-Quantile der Pixel-Werte des Kartenblatts. Niedrige Werte entsprechen einer höheren Rauigkeit (!). Die dargestellte Profilspur zeigt den Verlauf des Geländeprofiles in Abb. 27a. Die schwarz gestrichelte Box (1) zeigt die Lage des Kartenausschnitts von Abb. 30.

- Ähnliches trifft für Gebiete mit **tiefgreifender gravitativer Hangdeformation** zu: Eine hohe Rauigkeit (niedriges Eigenwertverhältnis $\ln(S1/S2)$) tritt dort - bei entsprechender räumlicher Auflösung des Geländemodells - als Ergebnis von **Morphostrukturen oder überlagernder fluvialer Einschnitte** auf, welche auch erhöhte Neigungswerte aufweisen. Dieser Zusammenhang von Morphostrukturen und fluvialen Einschnitten mit der Rauigkeit ist in Abb. 27c und Abb. 30 angedeutet.
- **Geländeterrassen** auf Talflanken mit tiefgreifenden gravitativen Hangdeformationen führen andererseits zu flacheren und glatteren Geländeabschnitten (vgl. Abb. 27a und Bereich östlich von Box [1] in Abb. 28).

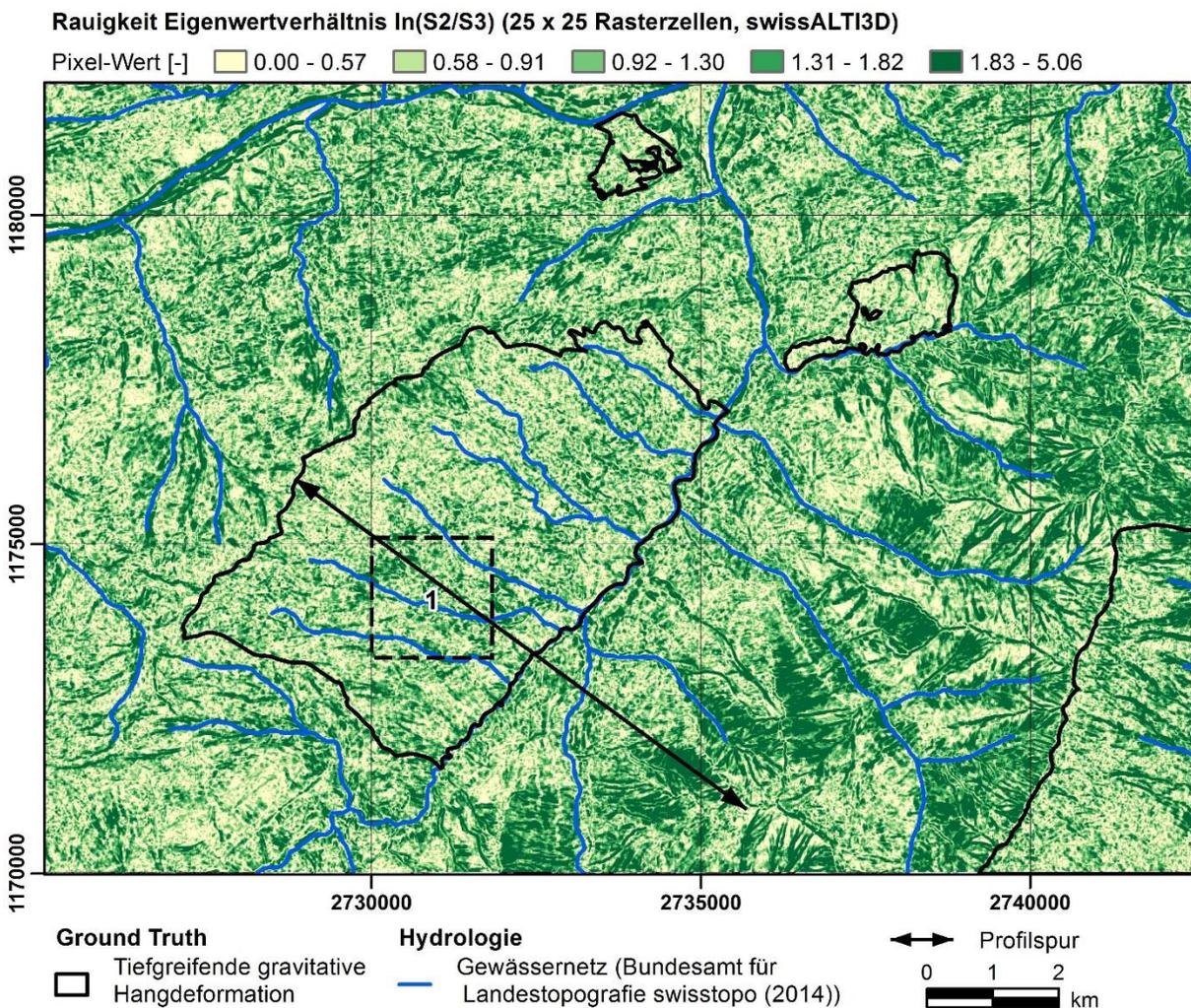


Abb. 29: Pixel-basierte Rauigkeit für Kartenblatt 1214 aufgrund des Eigenwertverhältnisses $\ln(S2/S3)$, bei einem Analysemasstab von 25 x 25 Rasterzellen und 2m Rasterauflösung (swissALTI3D, Bundesamt für Landestopografie swisstopo (2016)). Die Farbabstufung repräsentiert die 20%-Quantile der Pixel-Werte des Kartenblatts. Die dargestellte Profilsspur zeigt den Verlauf des Geländeprofils in Abb. 27a. Die schwarz gestrichelte Box (1) zeigt die Lage des Kartenausschnitts von Abb. 30.

- Insgesamt lässt sich daraus folgern, dass innerhalb wie ausserhalb von tiefgreifenden gravitativen Hangdeformationen ein relativ **breites und sich überlagerndes Spektrum an Rauigkeitswerten** (Eigenwertverhältnis $\ln(S1/S2)$) vorhanden ist.

Die Betrachtung von Abb. 29 zeigt bezüglich des **Eigenwertverhältnisses $\ln(S2/S3)$** Folgendes:

- Hohe und niedrige Werte sind über das gesamte Kartenblatt relativ gleichmässig verteilt. Erhöhte Werte treten im Zusammenhang mit linearen Strukturen auf (s. Kap. 5.3.2). Dabei handelt es sich um fluviale Einschnitte, Berggräte, anthropogene Erscheinungen (Strasseneinschnitte, Bahndämme, Kanäle) sowie teilweise auch um Morphostrukturen.

Der **Einfluss des Analysemasstabs auf die Rauigkeitsberechnung** anhand des Eigenwertverhältnisses $\ln(S1/S2)$ wird mit Abb. 30 gezeigt:

- Variationen der Rasterauflösung (2m bzw. 25m) oder der Anzahl Rasterzellen des Berechnungsfensters führen zu teils deutlichen Ergebnisunterschieden.
- Die absoluten Pixel-Werte verschieben sich zu geringeren Werten (= höhere Rauigkeit), wenn ein grösseres Berechnungsfenster berücksichtigt wird (39 x 39 anstatt 9 x 9 Rasterzellen). Das ist nachzuvollziehen, da in diesem Fall die Anzahl Normalvektoren und der betrachtete räumliche Ausschnitt vergrössert wird.
- Bei allen betrachteten Analysemasstäben kommen **fluviale Einschnitte** entlang des Gewässernetzes mit relativ hoher Rauigkeit (= niedrige Pixel-Werte) zur Geltung. Bei kleineren Bachläufen wird dieser Effekt bei Verwendung des Geländemodells DHM25 jedoch abgeschwächt.
- Der Einfluss von **Morphostrukturen** auf die (Erhöhung der) Rauigkeit ist eher bei Verwendung des feinmaschigeren Geländemodells swissALTI3D bemerkbar. Dies dürfte mit dem Glättungseffekt des DHM25 zusammenhängen, welcher in Abb. 27c erkennbar ist. Kleinere Morphostrukturen werden im DHM25 sozusagen «ausgeblendet» und tragen dann in der Berechnung nicht zu einer erhöhten Rauigkeit bei.
- Bei Verwendung des Geländemodells swissALTI3D nimmt der Einfluss von kleinräumigen **anthropogenen Merkmalen** auf die Rauigkeit zu. Dies wird vor allem bei einem kleinen Berechnungsfenster (9 x 9 Rasterzellen) ersichtlich. Vergleichbare (erhöhte) Rauigkeitswerte treten in diesem Fall sowohl im Zusammenhang mit kleineren Morphostrukturen als auch z.B. entlang von Strassen in Erscheinung.

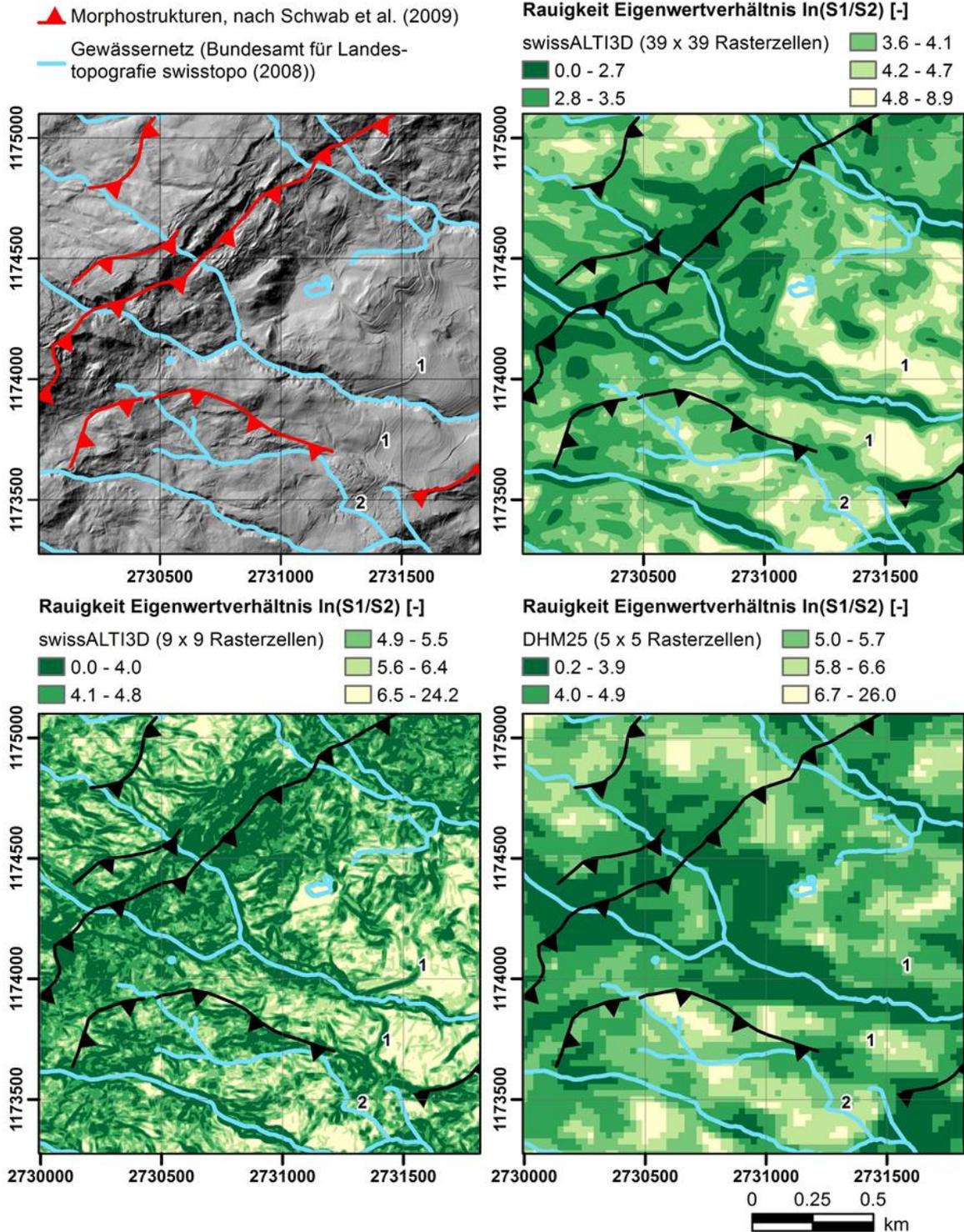


Abb. 30: Massstabeffekte bei der pixel-basierten Rauigkeitsberechnung, Eigenwertverhältnis $\ln(S1/S2)$. Die Farbabstufung repräsentiert die 20%-Quantile der jeweiligen Pixel-Werte für Kartenblatt 1214. Niedrige Werte entsprechen einer höheren Rauigkeit (!). Der Analysemasstab ist durch das Höhenmodell (swissALTI3D = 2m bzw. DHM25 = 25m Rasterauflösung) sowie die Anzahl Rasterzellen des Berechnungsfensters angegeben. Die Lage des Kartenausschnitts zeigt Abb. 28. Für die Interpretation sind oben links das schattierte Relief (swissALTI3D, Bundesamt für Landestopografie swisstopo (2016)), das Gewässernetz und der Verlauf von Morphostrukturen (Anrissnischen, Nackentäler) dargestellt (Zacken zeigen talwärts). Einzelne anthropogene Merkmale sind mit Nummern referenziert (1 = Strasse, 2 = Dorf).

5.2. Segmentierung

Qualitativer Ansatz:

Abb. 31 zeigt das Segmentierungsergebnis für Kartenblatt 1214 am Beispiel des digitalen Geländemodells swissALTI3D (2m Rasterauflösung) und ausgewählter Parametereinstellungen ('regionSize 200', 'regularizer' = 1, $\lambda = 0.005$; vgl. Tab. 7, S. 47).

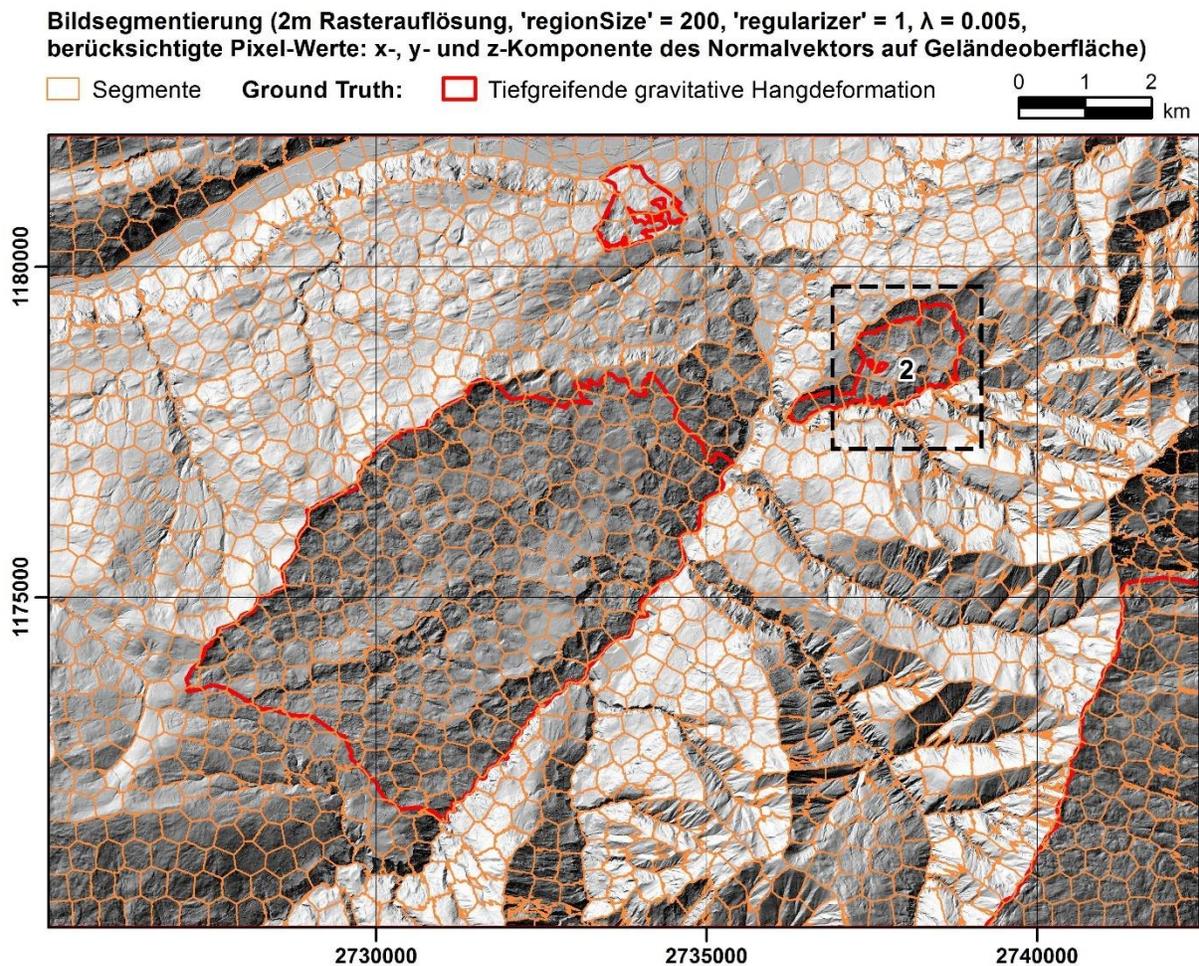


Abb. 31: Schattiertes Relief mit dem Segmentierungsergebnis für das Kartenblatt 1214 bei 2m Rasterauflösung (swissALTI3D, Bundesamt für Landestopografie swisstopo (2016)) und den angegebenen Funktionsparametern. Dargestellt sind tiefgreifende gravitative Hangdeformationen gemäss Kap. 3.2. Die schwarz gestrichelte Box (2) markiert den Darstellungsbereich von Abb. 32.

Die Darstellung (Abb. 31) lässt erkennen, dass bei diesem Ergebnis relevante **topographische Grenzen** wie der Übergang Talsohle/Hang, Berggräte oder markante fluviale Einschnitte durch die Segmentgrenzen meist korrekt repräsentiert werden. Betreffend Segmentgrenzen und den dargestellten Rändern der tiefgreifenden gravitativen Hangdeformationen gibt es jedoch Abweichungen. Dies wird durch die Nahaufnahme in Abb. 32 ebenfalls verdeutlicht. Dafür können mehrere Gründe verantwortlich sein:

- Funktionsparameter **'regionSize'** und **'regularizer'**: bei zu grossen Segmentgrössen oder zu starker Regulierung der Segmentform (hoher Wert für 'regularizer') lassen sich die einzelnen Segmente nicht an die natürlichen topographischen «Grenzen» anpassen. In Abb. 32 wird das durch die Beispiele mit 'regionSize' = 500 (teilweise auch 'regionSize' = 200) veranschaulicht, wo die Segmentgrenzen weder mit dem kartierten Rand der tiefgreifenden gravitativen Hangdeformation noch mit einigen optisch erkennbaren, natürlichen topografischen «Grenzen» übereinstimmen (z.B. bergseitige Geländekante am oberen Bildrand).
- Der **Rand einer tiefgreifenden gravitativen Hangdeformation** kann bereichsweise zu wenig markant ausgebildet sein, um bei der auf topographischen Kriterien beruhenden Segmentierung erkannt zu werden. Tendenziell ist eine bessere Übereinstimmung entlang der berg- und talseitigen Begrenzung (Berggrat, Hangfuss) und eine schlechtere Übereinstimmung an den seitlichen Flanken festzustellen (Abb. 31).
- **'Ground Truth'**: letztlich kann auch die Genauigkeit bzw. die Methode der Erfassung tiefgreifender gravitativer Hangdeformationen eine Rolle spielen (Kap. 6.3.1).

Für die weiteren Schritte (Berechnung von Segment-Deskriptoren / segment-basierte geomorphometrischen Parameter, Klassifikation) werden im Falle des Geländemodells swissALTI3D die Parametereinstellungen **'regionSize' = 200** und **'regularizer' = 1 ($\lambda = 0.005$)** entsprechend dem Ergebnis in Abb. 31 gewählt. Dies stellt einen Kompromiss mit folgenden Überlegungen dar (vgl. Kap. 4.3):

- Bessere Berücksichtigung natürlicher topographischer Grenzen im Vergleich zur Segmentierung mit 'regionSize' = 500 sowie 'regionSize' = 200 und $\lambda = 0.01$.
- Höherer räumlicher Informationsgehalt innerhalb des Segments als bei kleineren Segmentgrössen mit 'regionSize' = 100.

Quantitativer Ansatz:

Zur Untersuchung des **Einflusses des Formparameters** ('regularizer') und der **Rasterauflösung** auf die **Klassifikationsgenauigkeit** werden zusätzlich die Parametereinstellungen gemäss Segmentierung in Abb. 33 verwendet. Diese Segmentierungsergebnisse weisen folgende Eigenschaften auf:

- Die Segmentumrisse werden bei beiden Rasterauflösungen mit geringerem 'regularizer'-Wert (0.08) komplexer (stärkere Anpassung an lokale topographische Gegebenheiten).
- Der Effekt tritt bei einer Rasterauflösung von 2m ausgeprägter in Erscheinung als bei 25m Rasterauflösung.

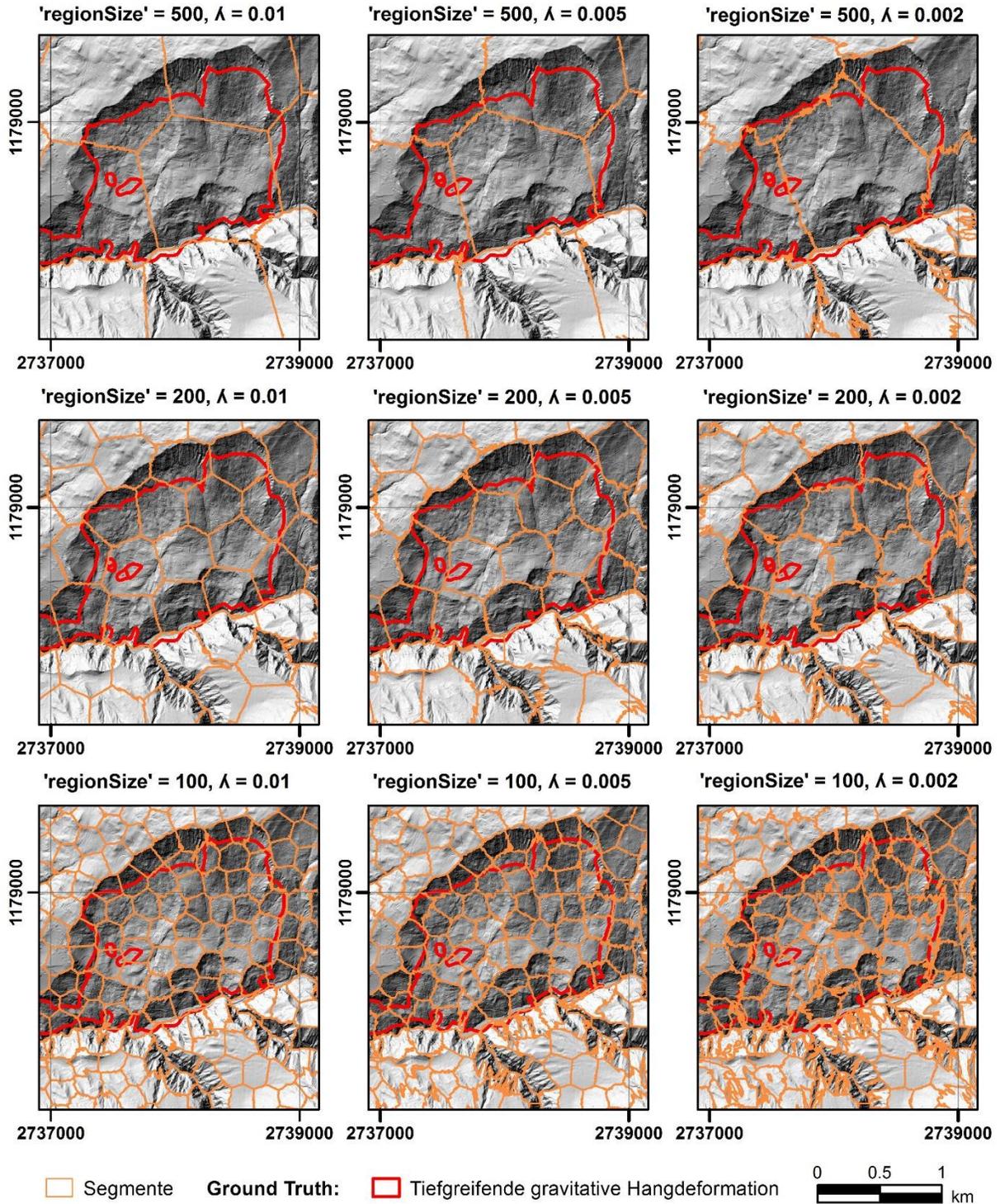


Abb. 32: Einfluss verschiedener Parametereinstellungen ('regionSize', λ = 'regularizer'/'regionSize') auf das Segmentierungsergebnis. Die berücksichtigten Pixel-Werte sind die x-, y- und z-Komponenten von Normalvektoren auf der Geländeoberfläche, basierend auf einer 2m Rasterauflösung. Die Lage des Kartenausschnitts in Kartenblatt 1214 ist ersichtlich in Abb. 31. Zu Vergleichszwecken ist der Umriss der tiefgreifenden gravitativen Hangdeformation gemäss 'Ground Truth' in Kap. 3.2 und das schattierte Relief des Geländemodells swissALTI3D (Bundesamt für Landestopografie swisstopo, 2016)) dargestellt.

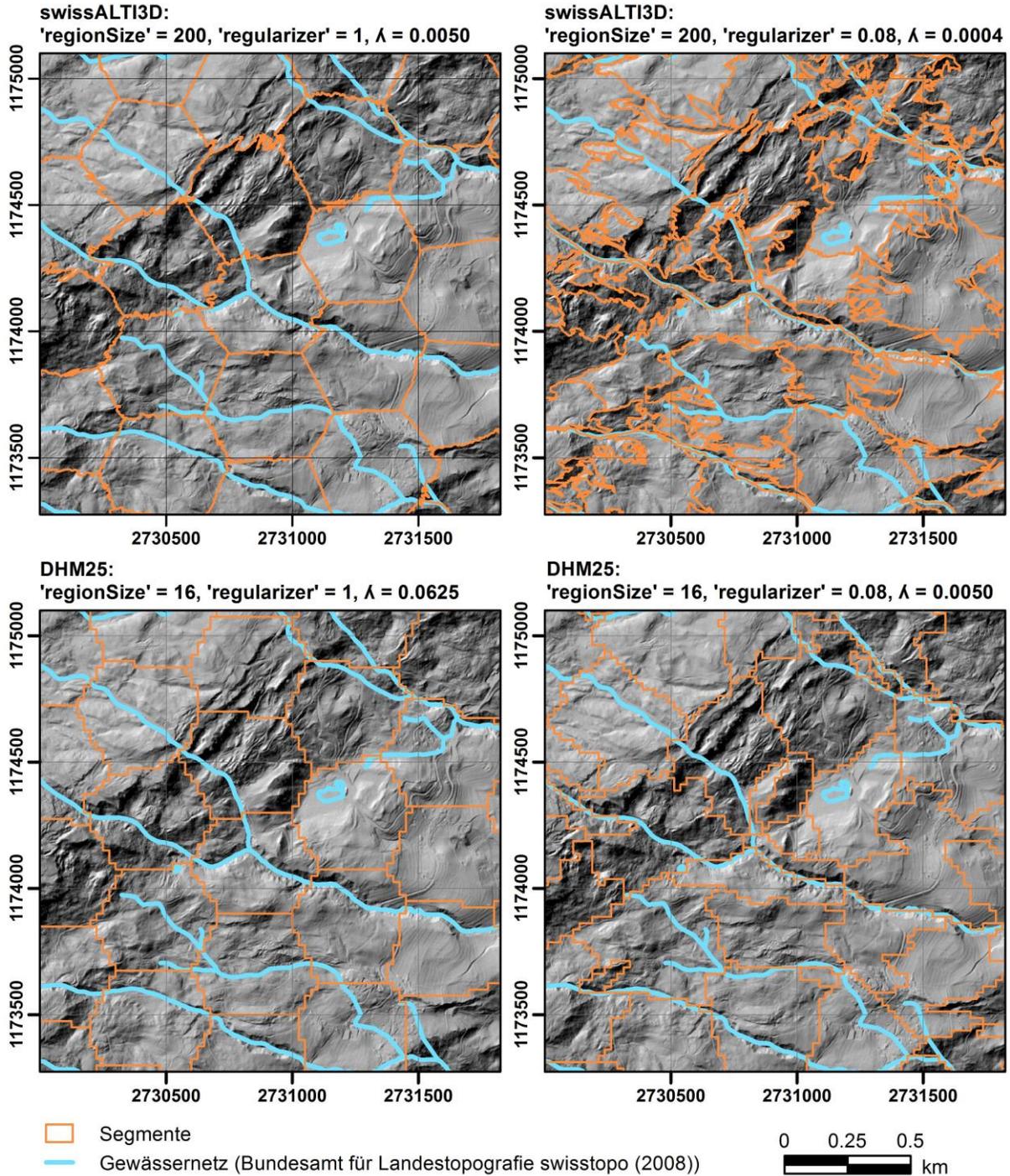


Abb. 33: Segmentierungsergebnis in Abhängigkeit des Formparameters 'regularizer' und der Rasterauflösung (2m (swissALTI3D) vs. 25m (DHM25)). Das schattierte Relief im Hintergrund basiert auf dem Geländemodell swissALTI3D (Bundesamt für Landestopografie swisstopo, 2016). Die Lage des Kartenausschnittes kann Abb. 29 (S. 64) entnommen werden.

5.3. Segment-Deskriptoren / segment-basierte geomorphometrische Parameter

Die hier dargestellten Ergebnisse kombinieren Resultate der pixel-basierten geomorphometrischen Parameter (Kap. 5.1) mit jenen des vorangehenden Kapitels. Die Darstellung und Interpretation erfolgt systematisch anhand des Kartenblatts 1214. Auszugsweise werden am Ende des Kapitels Ergebnisse für Kartenblatt 1215 präsentiert (Abb. 40, S. 80).

Die Segment-Deskriptoren, die auf dem Geländemodell **swissALTI3D** (2m Rasterauflösung) basieren, verwenden die Segmentierung gemäss Abb. 31 (S. 67) (s. Kap. 5.2). Für das Geländemodell **DHM25** (25m Rasterauflösung) werden die Ergebnisse mit den Parameter-einstellungen '**regionSize**' = 16, '**regularizer**' = 0.08 ($\lambda = 0.005$) gezeigt (vgl. Abb. 33).

5.3.1. Hangneigung

Die Mittelwerte der Hangneigung je Segment sind für Kartenblatt 1214 in Abb. 34 für je zwei verschiedene Berechnungsmethoden und Rasterauflösungen dargestellt. Verschiedene Aspekte (z.B. tendenziell höhere Neigungswerte bei feinerer Rasterauflösung, Verteilung von Neigungswerten inner- und ausserhalb von tiefgreifenden gravitativen Hangdeformationen) leiten sich aus den Ergebnissen für die pixel-basierten Berechnungen gemäss Kap. 5.1 ab und werden hier nicht erneut aufgegriffen. Zusätzlich zu Kap. 5.1 lässt sich Folgendes festhalten:

- Die **verschiedenen Berechnungsmethoden** («Mittelwert der pixel-basierten Neigungswerte je Segment» (Kap. 4.4.1) vs. «Funktion der mittleren Orientierung aller Normalvektoren des Segments» (Kap. 4.4.2)) führen bei identischer Rasterauflösung zu ähnlichen Ergebnissen. Die absoluten Werte (siehe Legenden) sind bei der zweiten Methode erwartungsgemäss etwas tiefer (Erklärung: lokale Unregelmässigkeiten innerhalb eines Segments - z.B. durch eine Abfolge von Gegensteigungen in einem Hang - gleichen sich bei der zweiten Methode aus).
- Das Gesamtbild für die Berechnungen mit den zwei verschiedenen Geländemodellen sieht ähnlich aus. Lokale räumliche Muster kommen bei den dargestellten Ergebnissen des DHM25 teilweise etwas akzentuierter zum Vorschein, da die entsprechende **Segmentierung** eine erhöhte Anpassung der Segmentumrisse an die topographischen Gegebenheiten zulässt (vgl. Abb. 33).

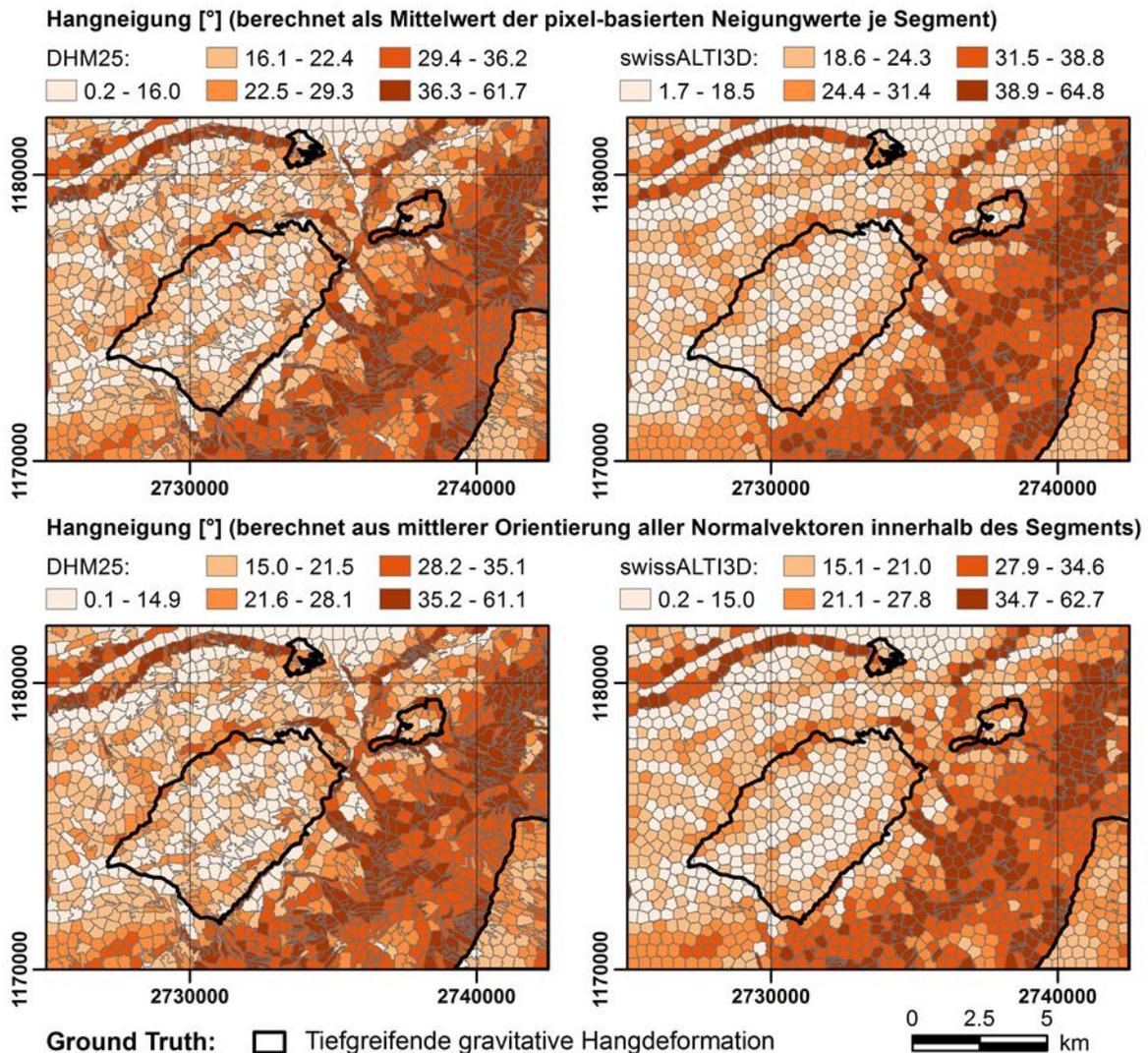


Abb. 34: Hangneigung je Segment (Kartenblatt 1214) mit Vergleich verschiedener Berechnungsmethoden (Kap. 4.4) und Datengrundlagen (DHM25 bzw. swissALTI3D). Die Farbabstufung repräsentiert die 20%-Quantile der jeweiligen Deskriptoren-Werte für Kartenblatt 1214 und 1215.

5.3.2. Rauigkeit

Abb. 35 vergleicht verschiedene **Rauigkeitsindikatoren**. Die Ergebnisunterschiede zwischen den beiden Geländemodellen sind in diesem Fall ausgeprägter als bei der Hangneigung. Aus der Betrachtung dieser Ergebnisse wird abgeleitet:

- Die «**richtungsabhängige Rauigkeit**» (Kap. 4.4.2) ergibt grob ein ähnliches Bild wie die Standardabweichung der pixel-basierten Hangneigung innerhalb des Segments.
- Der «**Nackental-Index**» anhand des Geländemodells **DHM25** ergibt viele Nullwerte. Dies deckt sich mit der Betrachtung des Geländeschnitts von Abb. 27c (S. 62), bei dem topographische Unregelmässigkeiten wie Nackentäler bei einer Rasterauflösung von 25m eher «ausgeblendet» werden.

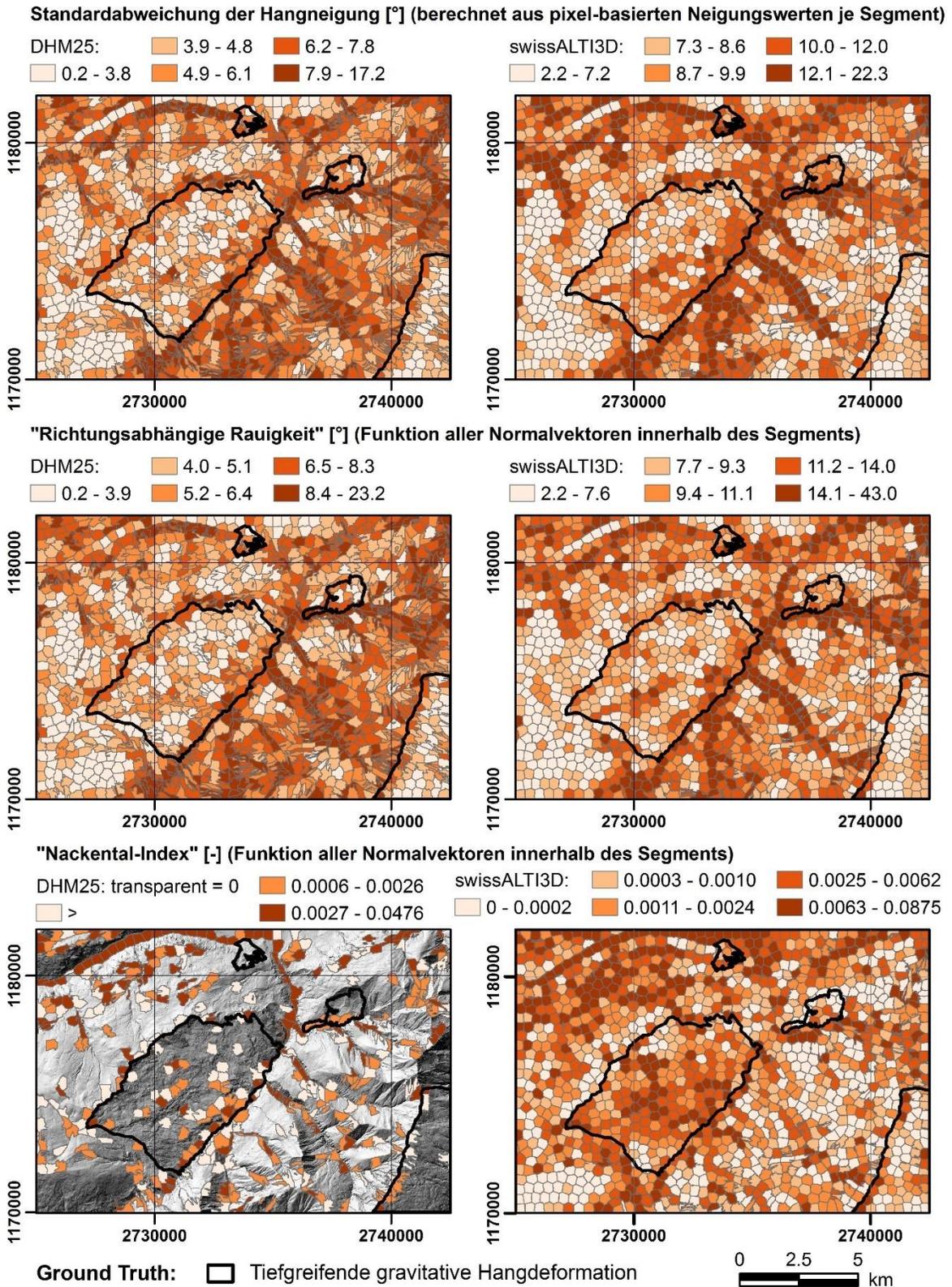


Abb. 35: Rauigkeitsindikatoren je Segment (Kartenblatt 1214) mit Vergleich verschiedener Berechnungsmethoden und Datengrundlagen (DHM25 bzw. swissALTI3D). Die Farbabstufung repräsentiert die 20%-Quantile der jeweiligen Segment-Werte für Kartenblatt 1214 und 1215. Beim «Nackental-Index» mit 25m Rasterauflösung (DHM25) fehlt die Berechnung der 20%-Quantile aufgrund vieler resultierender Nullwerte (dargestellt als transparente Flächen auf schattiertem Relief (swissALTI3D)).

- Mit dem Geländemodell **swissALTI3D** hingegen können für den «**Nackental-Index**» teils erhöhte Werte innerhalb von tiefgreifenden gravitativen Hangdeformationen beobachtet werden. Allerdings trifft dies auch für Segmente des «übrigen Terrains» zu. Im **Abschnitt «Detailbetrachtungen»** weiter unten wird dies näher analysiert.

Eigenwertverhältnisse der Normalvektoren:

Die Segment-Deskriptoren, welche die topographische Rauigkeit aufgrund der «Eigenwert-Methode» wiedergeben, erhalten eine separate Betrachtung in Abb. 36 und Abb. 37. Dabei wird eine Auswahl von Ergebnissen mit unterschiedlichen Analysemassstäben gezeigt. Diese lassen folgende Beobachtungen zu:

- **Einflüsse des Analysemassstabs** auf den Mittelwert und die Standardabweichung der Eigenwertverhältnisse $\ln(S1/S2)$ und $\ln(S2/S3)$ werden durch die Darstellung der Segment-Deskriptoren bestätigt. Verschiedene Gründe diesbezüglich wurden bei den pixel-basierten Ergebnissen im Zusammenhang mit Abb. 30 (S. 66) erläutert.
- Zu erwähnen ist ein relativ hoher Anteil von Segmenten mit **niedriger Standardabweichung** der Eigenwertverhältnisse $\ln(S1/S2)$ und $\ln(S2/S3)$ innerhalb von **tiefgreifenden gravitativen Hangdeformationen**. Dies kommt vor allem bei den Beispielen mit 2m Rasterauflösung (swissALTI3d) zum Ausdruck. Dabei handelt es sich um Geländepartien, die zwar eine gewisse topographische Rauigkeit aufweisen (siehe entsprechende Mittelwert-Darstellungen), jedoch mit einer relativ gleichmässigen räumlichen Verteilung.
- Gleichzeitig sind innerhalb von tiefgreifenden gravitativen Hangdeformationen aber auch Segmente mit **grossen Standardabweichungen** zu beobachten. Dies trifft zum Beispiel dort zu, wo mehrheitlich «glatte» Geländeterrassen durch **fluviale Einschnitte** durchtrennt werden (vgl. auch Abb. 30, S. 66). Gleiches gilt auch für Talböden des übrigen Terrains (Abb. 36, Mitte des nördlichen Bildrandes), welche zwar mehrheitlich flach und glatt sind, lokal aber Anomalien aufweisen (Uferböschungen, anthropogene Merkmale).

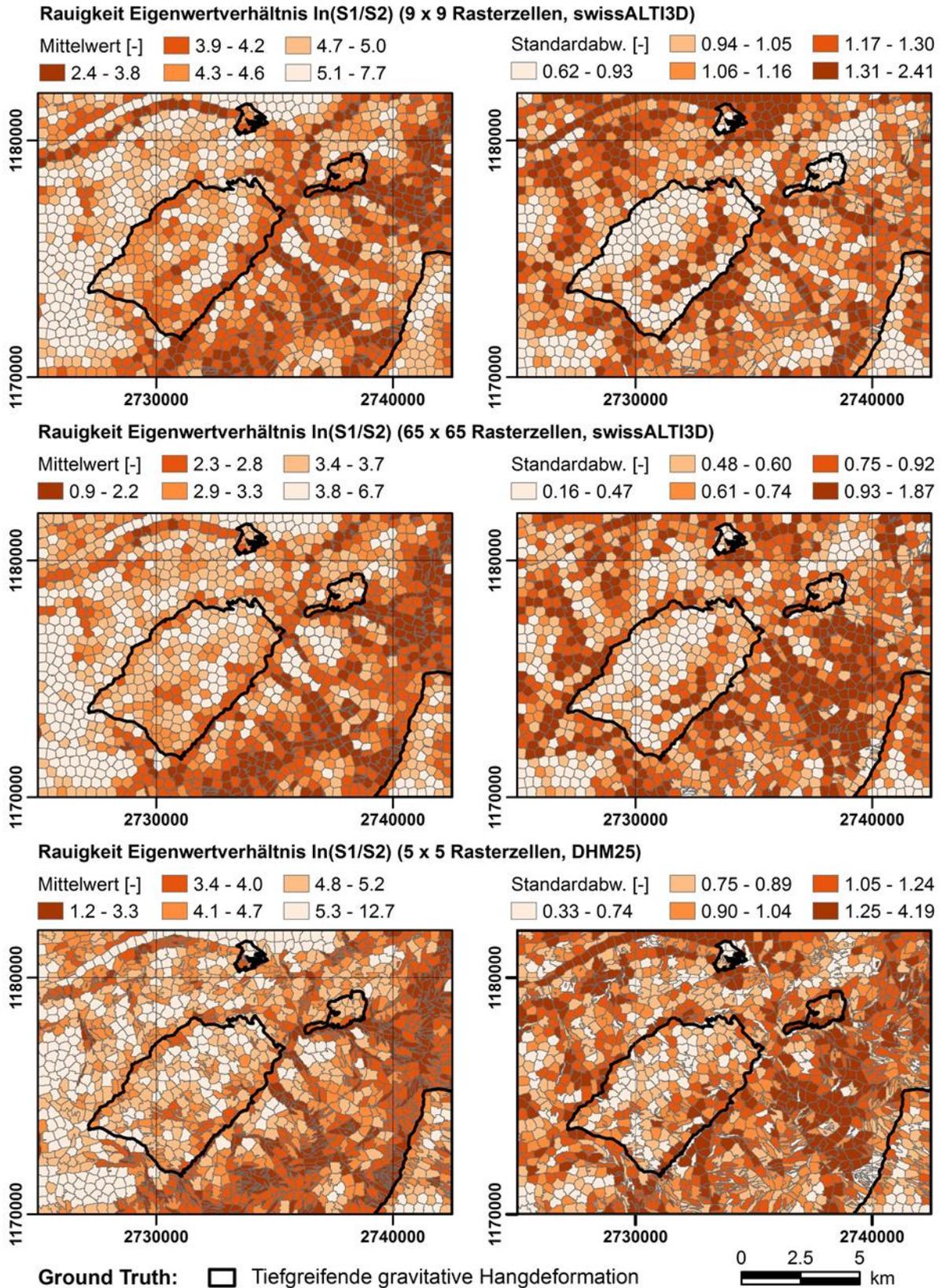


Abb. 36: Rauigkeit aufgrund der Eigenwertverhältnisse je Segment (Kartenblatt 1214), mit Vergleich verschiedener Analysemasstäbe und Datengrundlagen (DHM25 bzw. swissALTI3D). Die Farbabstufung repräsentiert die 20%-Quantile der jeweiligen Segment-Werte für Kartenblatt 1214 und 1215.

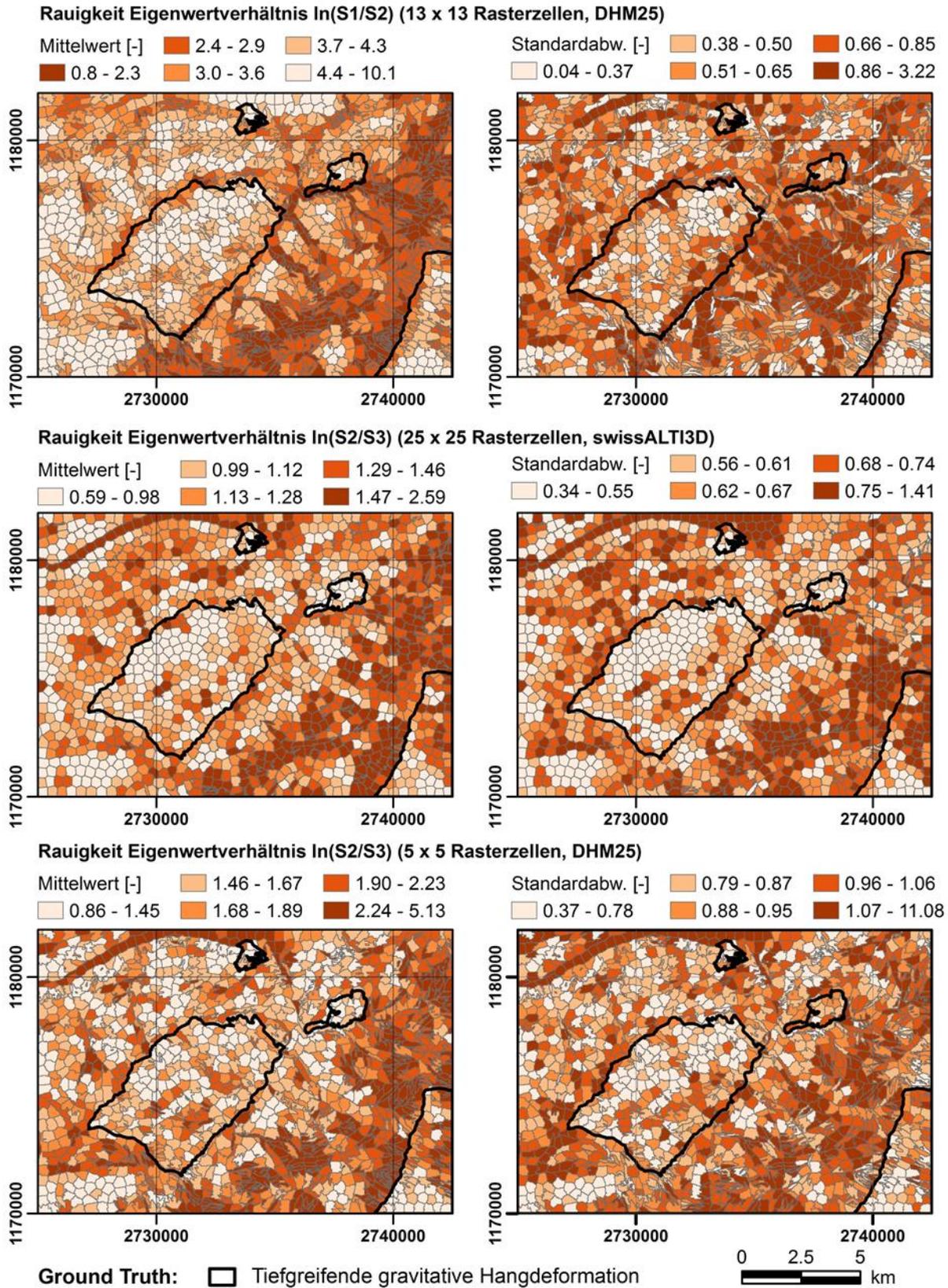


Abb. 37: Rauigkeit aufgrund der Eigenwertverhältnisse je Segment (Kartenblatt 1214), mit Vergleich verschiedener Analysemasstäbe und Datengrundlagen (DHM25 bzw. swissALTI3D). Die Farbabstufung repräsentiert die 20%-Quantile der jeweiligen Segment-Werte für Kartenblatt 1214 und 1215.

Detailbetrachtungen:

Lokale Abhängigkeiten und Unterschiede einiger Rauigkeitsmasse werden nachfolgend anhand von Detailbetrachtungen noch vertiefter analysiert. Die Ergebnisse beziehen sich auf Berechnungen anhand des Geländemodells swissALTI3D (2m Rasterauflösung). Abb. 38 zeigt dabei denselben Ausschnitt wie Abb. 30 (S. 66) als Beispiel für ein Gebiet mit tiefgreifender gravitativer Hangdeformation. Abb. 39 zeigt analog dazu einen Ausschnitt aus Kartenblatt 1215, welcher mehrheitlich den breiten Talboden und somit vor allem Segmente des «übrigen Terrains» abdeckt. Die Detailbetrachtungen von Abb. 38 und Abb. 39 führen zu folgender Interpretation:

- **Standardabweichung der pixel-basierten Hangneigungswerte** (jeweils Darstellung oben links): im Bereich der Talflanke mit tiefgreifender gravitativer Hangdeformation (Abb. 38) tragen sowohl das rauere Terrain im Bereich talparalleler Morphostrukturen als auch fluviale Einschnitte (meist senkrecht dazu verlaufend) zu erhöhten Segment-Mittelwerten bei. Auf dem Talboden (Abb. 39) sind die Werte tendenziell niedrig.
- **Mittelwert des Eigenwert-Verhältnisses $\ln(S2/S3)$** (jeweils Darstellung oben rechts): erhöhte Werte treten vor allem in Verbindung mit markanten und persistenten linearen Strukturen in Erscheinung. Im Bereich des Talbodens (Abb. 39) führen insbesondere der Kanal des Hinterrheins sowie Dämme/Böschungen entlang von Strassen (erkennbar anhand des schattierten Reliefs im Hintergrund) zu erhöhten Werten. Im Ausschnitt der tiefgreifenden gravitativen Hangdeformation (Abb. 38) scheinen fluviale Einschnitte eher zu höheren Werten zu führen als die talparallelen Morphostrukturen.
- **«Richtungsabhängige Rauigkeit»** (jeweils Darstellungen unten links): dieses Rauigkeitsmass scheint den Einfluss talparalleler Morphostrukturen (Anrissnischen, Nackentäler) auf die Rauigkeit in Abb. 38 am stärksten abzubilden. Segmente mit markanten fluvialen Einschnitten, welche bei den beiden zuvor analysierten Deskriptoren erhöhte Werte aufweisen, zeigen hier teils niedrigere Werte. Bei der Betrachtung des Talbodens (Abb. 39) sind ebenfalls niedrige Werte festzustellen.
- **«Nackental-Index»** (jeweils Darstellungen unten rechts): Wie bereits bezüglich Abb. 35 erwähnt, werden bei einer Rasterauflösung von 2m innerhalb von tiefgreifenden gravitativen Hangdeformationen häufig erhöhte Werte des «Nackental-Index» ermittelt. Dies wird durch Abb. 38 bestätigt. Abb. 39 zeigt jedoch, dass ein hoher «Nackental-Index» auch im Bereich des Talbodens resultiert. Grund dafür sind in diesem Fall vor allem anthropogene Erscheinungen (Böschungen, Dämme; erkennbar anhand des schattierten Reliefs im Hintergrund) aber auch natürliche Uferböschungen, welche zum Teil quer zur mittleren Hangexpositionsrichtung des Segments verlaufen.

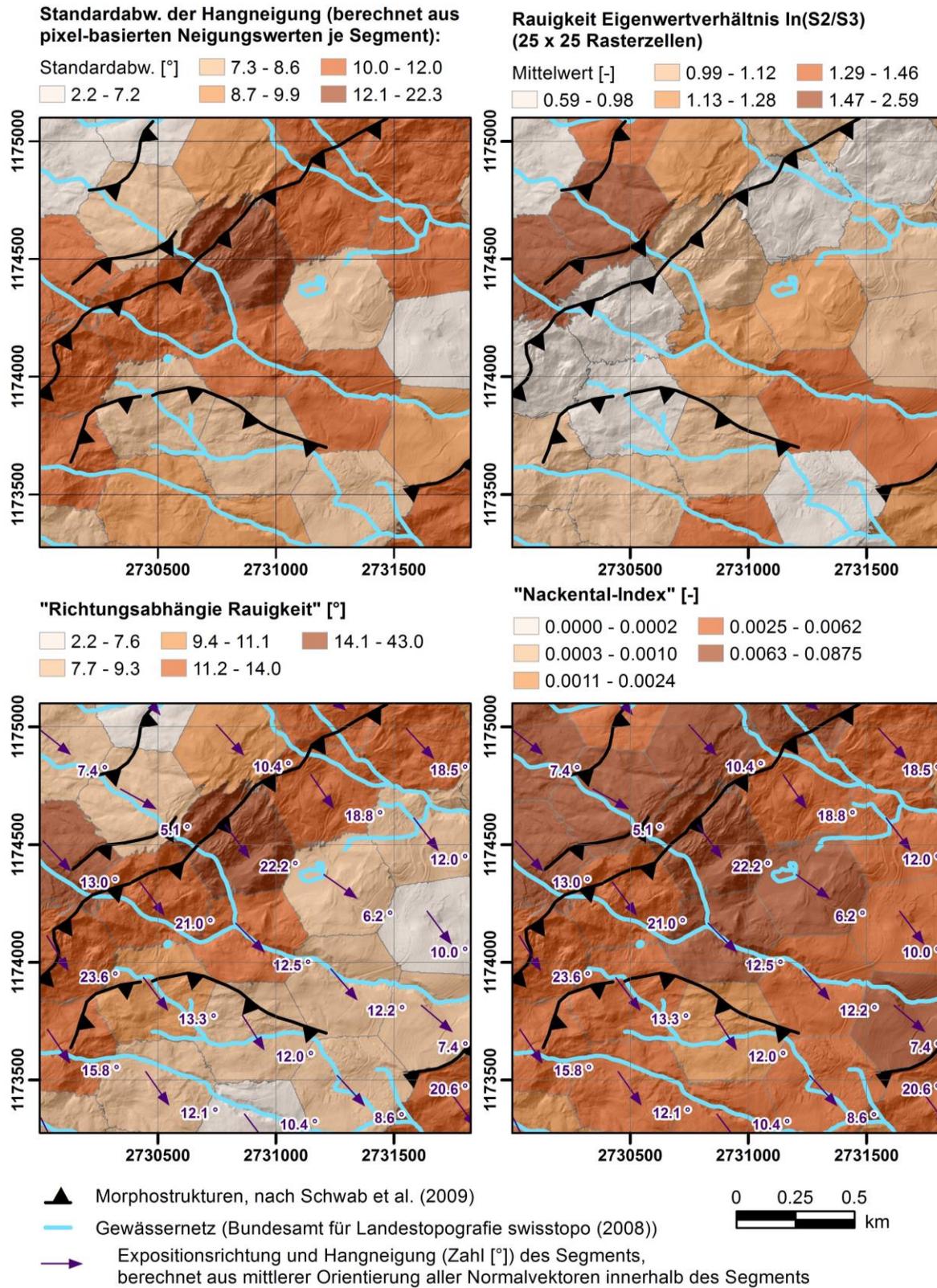


Abb. 38: Detailbetrachtung ausgewählter Rauigkeitsmasse anhand des Geländemodells swissALTI3D (2m Rasterauflösung). Zu Interpretationszwecken sind das schattierte Relief (Bundesamt für Landestopografie swisstopo, 2016) sowie der Verlauf von Morphostrukturen und des Gewässernetzes dargestellt. Die Lage des Kartenausschnittes in Kartenblatt 1214 kann Abb. 29 (S. 64) entnommen werden.

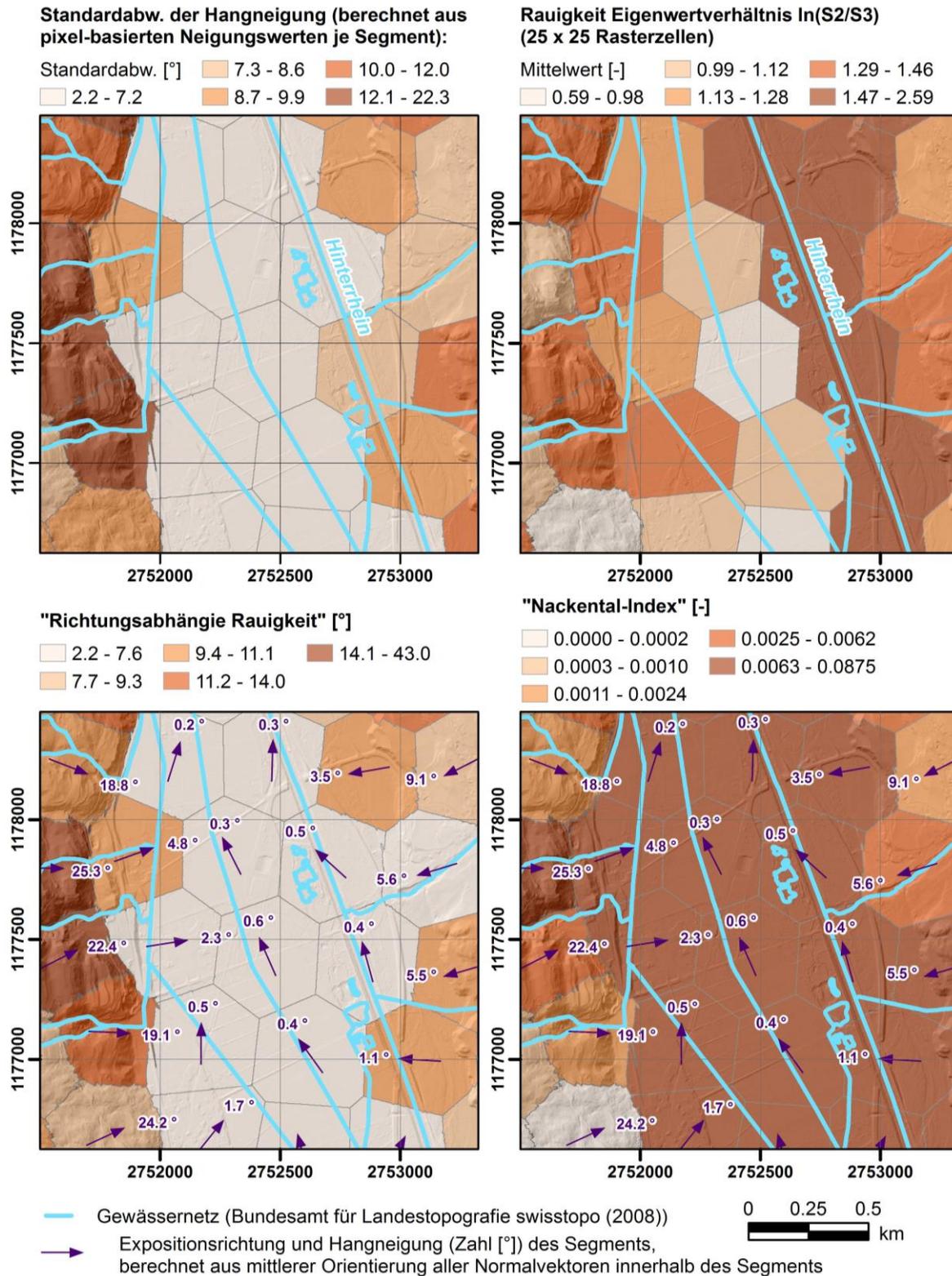


Abb. 39: Detailbetrachtung ausgewählter Rauigkeitsmasse anhand des Geländemodells swissALTI3D (2m Rasterauflösung). Zu Interpretationszwecken sind das schattierte Relief (Bundesamt für Landestopografie swisstopo, 2016) sowie der Verlauf des Gewässernetzes dargestellt. Die Lage des Kartenausschnittes in Kartenblatt 1215 ist in Abb. 40 ersichtlich.

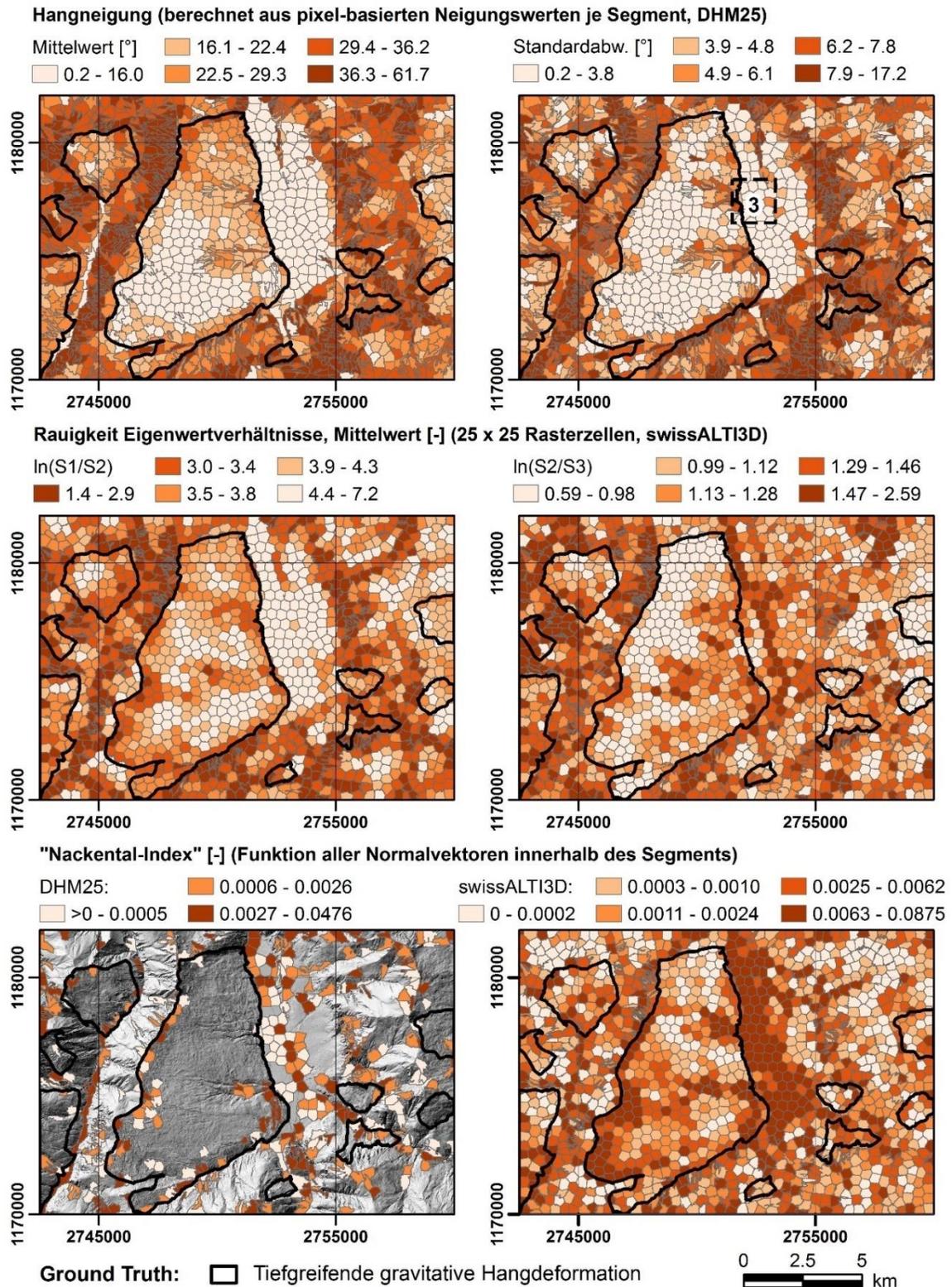


Abb. 40: Ausgewählte Segment-Werte für Kartenblatt 1215, mit Angabe der Analysemasstäbe und Datengrundlagen (DHM25 bzw. swissALTI3D). Die Farbabstufung repräsentiert die 20%-Quantile der jeweiligen Segment-Werte für Kartenblatt 1214 und 1215. Beim «Nackental-Index» mit 25m Rasterauflösung (DHM25) fehlt die Berechnung der 20%-Quantile aufgrund vieler resultierender Nullwerte, dargestellt als transparente Flächen auf dem schattiertem Relief (Bundesamt für Landestopografie swisstopo, 2016). Die schwarz gestrichelte Box (3) in der Darstellung oben rechts markiert den Bereich der Detailaufnahme in Abb. 39.

5.4. Klassifikation und Evaluation

Die Klassifikationsergebnisse für das **Kartenblatt 1215** werden hier folgendermassen präsentiert:

- **Ergebnistabellen** mit Klassifikationsgenauigkeiten (Genauigkeitsbestimmung gemäss Kap. 4.6) in Abhängigkeit der verschiedenen Einflussfaktoren:
Berücksichtigte geomorphometrische Parameter, Analysemasstäbe (Rasterauflösung, Fenstergrössen) und Segmentierungsparameter. Zur besseren Übersichtlichkeit sind diese Tabellen (Tab. 8 bis **Tab. 13**) separat am Ende des Kapitels aufgeführt (**Kap. 5.4.4**).
- Kartographische Abbildungen (Kartenblatt 1215) für ausgewählte Ergebnisse dieser Tabellen (Abb. 41 bis Abb. 44).

Die Klassifikationsergebnisse sind jeweils mit «**K25-...**» (bei Rasterauflösung von 25m) oder «**K2-...**» (bei Rasterauflösung von 2m) **nummeriert**. Die angehängten Nummern geben die Position in Tab. 8 bis Tab. 13 in steigender Reihenfolge an (Bsp.: «K25-1» = erstes Klassifikationsergebnis, Tab. 8; «K2-78» = letztes Klassifikationsergebnis, Tab. 13).

In den nachfolgenden Unterkapiteln werden die Klassifikationsergebnisse im Hinblick auf die Diskussion in Kap. 6.2 jeweils mit Bezug zu den einzelnen Einflussfaktoren dargestellt. Soweit nötig werden auch Querbezüge zu den anderen Einflussfaktoren hergestellt.

Beim Vergleich von mehreren Klassifikationsergebnissen ist zu beachten, dass meist nicht ein Ergebnis in Bezug auf alle Genauigkeitsmasse am besten abschneidet. Stattdessen kann z.B. die «Gesamtgenauigkeit» und die «durchschnittliche Genauigkeit» besser, die «Erstellergenauigkeit» für «tiefgreifende gravitative Hangdeformationen» aber gleichzeitig schlechter sein als bei einem anderen Ergebnis. Nachfolgend beziehen sich **vergleichende Aussagen** auf eine summarische Betrachtung der Genauigkeitsmasse «Gesamtgenauigkeit», «durchschnittliche Genauigkeit» und «Gesamtfehler-Index». Dadurch wird sowohl die Leistung in Bezug auf die Klassifikation von «tiefgreifenden gravitativen Hangdeformationen» als auch des «übrigen Terrains» berücksichtigt.

5.4.1. Unterschiedliche geomorphometrische Parameter

Zur Nachvollziehbarkeit der folgenden Erläuterungen dienen Abb. 41 und Abb. 42.

Verwendung von einzelnen pixel-basierten geomorphometrischen Parametern:

Die Ergebnisse **K25-1 bis K25-14** (Tab. 8) sowie **K2-42 bis K2-56** (Tab. 11) verwenden jeweils nur den Mittelwert und die Standardabweichung eines einzelnen pixel-basierten geomorphometrischen Parameters (Hangneigung oder Rauigkeit anhand des Eigenwertverhältnisses $\ln(S1/S2)$ oder $\ln(S2/S3)$). Tendenziell resultieren die höchsten Klassifikationsgenauigkeiten in

diesen Fällen bei Berücksichtigung der pixel-basierten Hangneigung (K25-1 und K2-42), je nach Analysemasstab (K25-5 bis K25-7) aber auch mit der Rauigkeit anhand des Eigenwertverhältnisses $\ln(S1/S2)$ (vgl. Diskussion in Kap. 6.2.1). Die niedrigsten Klassifikationsgenauigkeiten resultieren mit der Rauigkeit anhand des Eigenwertverhältnisses $\ln(S2/S3)$.

Kombination von mehreren pixel-basierten geomorphometrischen Parametern:

Gemäss den Ergebnissen **K25-17 bis K25-24** (Tab. 9) und **K2-57 bis K2-64** (Tab. 12) verbessert sich die Genauigkeit im Vergleich zu den oben genannten «Einzelbetrachtungen», wenn Mittelwerte und Standardabweichungen der pixel-basierten Hangneigung mit jenen der Rauigkeit anhand des Eigenwertverhältnisses $\ln(S1/S2)$ kombiniert werden (vgl. auch Darstellung **K25-18** in Abb. 41 und Darstellung **K2-57** in Abb. 42). Gleiches gilt für die Kombination von Hangneigung und Eigenwertverhältnis $\ln(S2/S3)$.

Eine Kombination von Hangneigung, Eigenwertverhältnis $\ln(S1/S2)$ und Eigenwertverhältnis $\ln(S2/S3)$ ergibt nur bei einer Rasterauflösung von 25m (**K25-30 bis K25-34**, in Tab. 9) nochmals leicht höhere Genauigkeiten als ohne Eigenwertverhältnis $\ln(S2/S3)$.

«Richtungsabhängige Rauigkeit», «Nackental-Index» und Hangneigung als Funktion der mittleren Orientierung aller Normalvektoren des Segments:

Als Vergleich zu den Ergebnissen K25-1 und K2-42 (Mittelwert und Standardabweichung der pixel-basierten Hangneigung) zeigen **K25-15** (Tab. 8) und **K2-55** (Tab. 11) die entsprechenden Ergebnisse bei Berücksichtigung der Hangneigung als Funktion der mittleren Orientierung aller Normalvektoren des Segments und der «richtungsabhängigen Rauigkeit» (Kap. 4.4.2). Diese Variante führt nur bei einer Rasterauflösung von 25m zu leicht höheren Genauigkeiten (**K25-15 > K25-1**). Bei einer Rasterauflösung von 2m nimmt die Genauigkeit hingegen ab (**K2-55 < K2-42**).

Wenn zusätzlich noch der «Nackental-Index» berücksichtigt wird, nimmt die Genauigkeit bei einer Rasterauflösung von 25m ab (**K25-16 < K25-15**; Tab. 8). Dies kann durch die Beobachtungen in Kap. 5.3.2 erklärt werden. Demnach resultieren für den «Nackental-Index» bei dieser groben Rasterauflösung sowohl inner- als auch ausserhalb tiefgreifender gravitativer Hangdeformationen viele Nullwerte, was die Klassifikation beeinträchtigt. Bei einer Rasterauflösung von 2m bleibt die Genauigkeit etwa gleich (**K2-56 ~ K2-55**; Tab. 11).

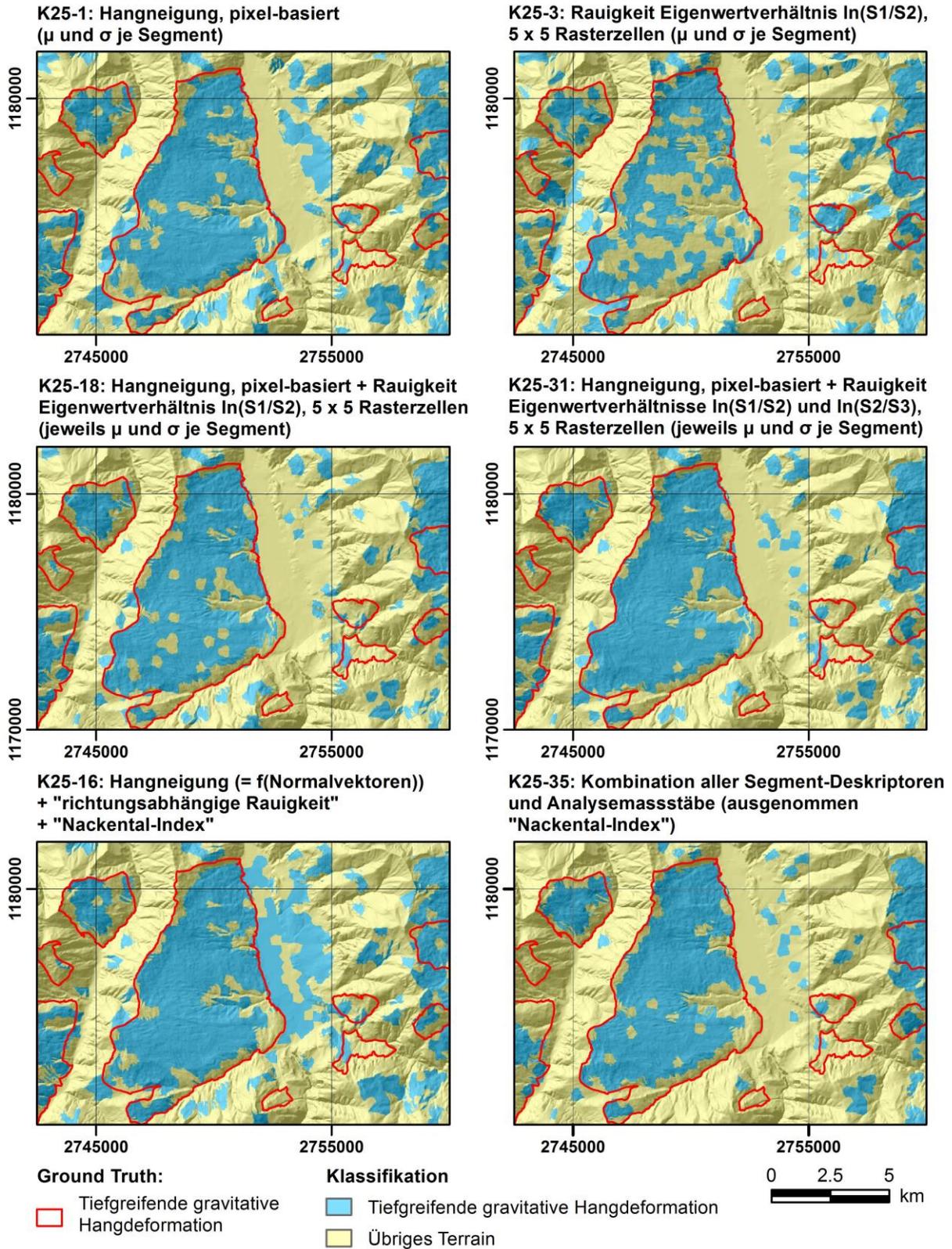


Abb. 41: Einfluss von geomorphometrischen Parametern auf die Klassifikation von Kartenblatt 1215 anhand des Geländemodells DHM25 (Nummerierungen gemäss Tab. 8 und Tab. 9). μ = Mittelwert, σ = Standardabweichung. Zu Interpretationszwecken ist im Hintergrund das schattierte Relief (Bundesamt für Landestopografie swisstopo, 2005) dargestellt.

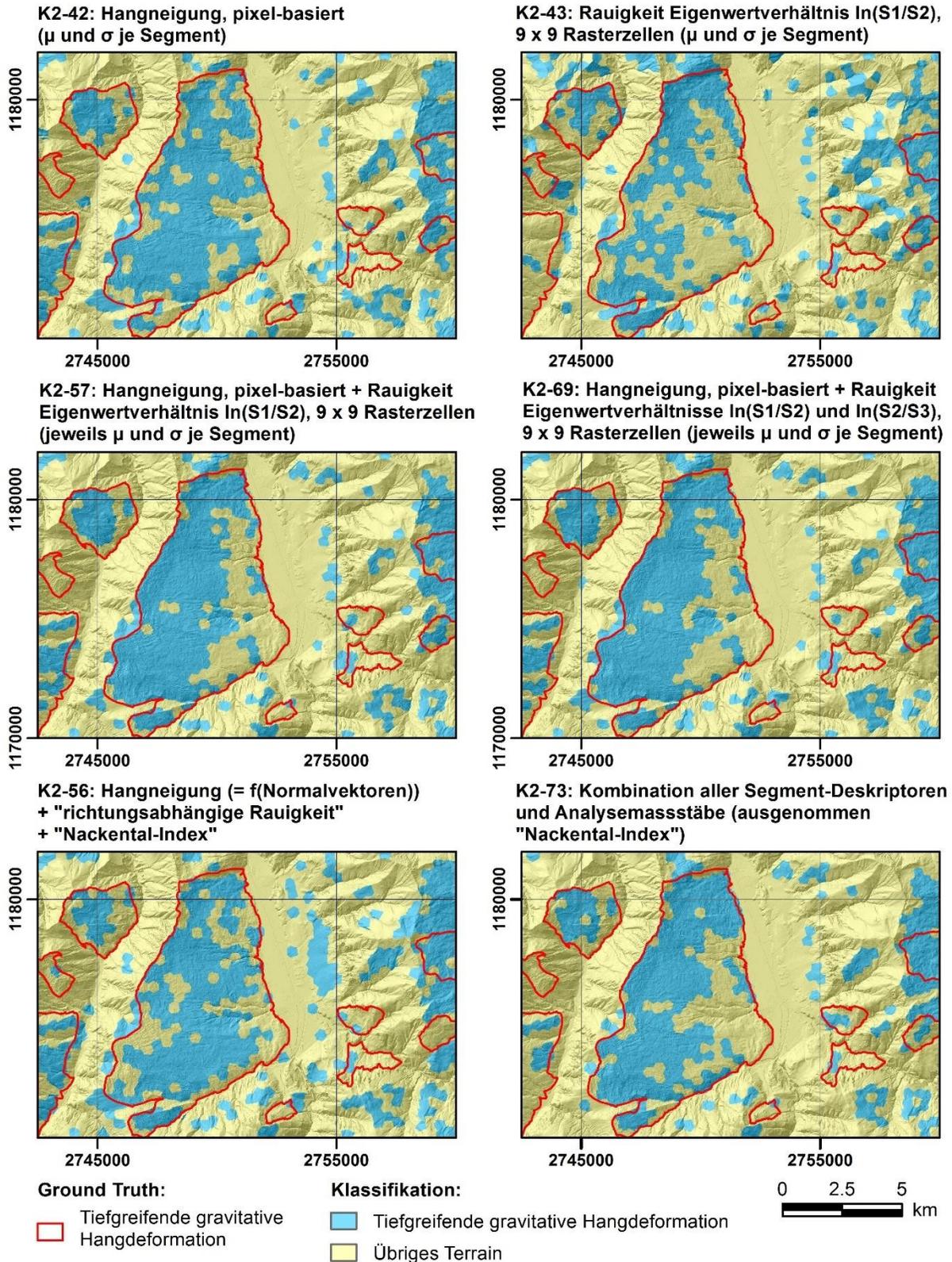


Abb. 42: Einfluss von geomorphometrischen Parametern auf die Klassifikation von Kartenblatt 1215 anhand des Geländemodells swissALTI3D (Nummerierungen gemäss Tab. 11 und Tab. 12). μ = Mittelwert, σ = Standardabweichung. Zu Interpretationszwecken ist im Hintergrund das schattierte Relief (Bundesamt für Landestopografie swisstopo, 2016) dargestellt.

Bei genauer Betrachtung fällt weiter auf, dass viele Segmente mit einem hohen «Nackental-Index» (vgl. Abb. 40, S. 80) als «übriges Terrain» klassiert werden. Dies gilt gleichermassen für die Rasterauflösung von 25m (**K25-16** in Abb. 41) und 2m (**K2-56** in Abb. 42). Als Grund können wiederum die Feststellungen in Kap. 5.3.2 angegeben werden: ein hoher «Nackental-Index» kommt einerseits im Bereich tiefgreifender gravitativer Hangdeformationen vor, andererseits aber auch ausserhalb davon (z.B. durch anthropogene Erscheinungen auf Talböden). Dies erschwert die entsprechende Unterscheidung bei der Klassifikation.

5.4.2. Unterschiedliche Analysemasstäbe und Segmentierungsparameter

Rasterauflösung und Segmentierungsparameter:

Zunächst ist festzustellen, dass die Ergebnisse mit einer Rasterauflösung von 25m (Tab. 8 bis Tab. 10) in den meisten untersuchten Fällen höhere Genauigkeiten erzielen als die jene mit 2m Rasterauflösung (Tab. 11 und Tab. 13). Eine Ausnahme bilden dabei Klassifikationen, die allein auf dem Mittelwert und der Standardabweichung der Rauigkeit anhand des Eigenwertverhältnisses $\ln(S2/S3)$ beruhen (**K2-52 – K2-54**, Tab. 11). Vor allem die Erstellergenauigkeit für «tiefgreifende gravitative Hangdeformationen» ist bei der Rasterauflösung von 25m meist höher. Das wird durch den grösseren Anteil blauer Flächen innerhalb der (roten) Umriss der 'Ground Truth' von Abb. 41 im Vergleich zu Abb. 42 ersichtlich. Dieser Unterschied ist im unteren Hangbereich der grossen tiefgreifenden gravitativen Hangdeformation (Bildmitte) am markantesten. Die Erstellergenauigkeit für das «übrige Terrain» hingegen liegt bei beiden Rasterauflösungen meist in einem ähnlichen Bereich.

Dabei gilt es aber zu beachten, dass ein Teil der «besseren» Ergebnisse bei 25m Rasterauflösung mit der **Segmentierung** zusammenhängt. Werden Ergebnisse mit identischem Wert für den Formparameter 'regularizer' (vgl. dazu auch Abb. 33, S. 70) verglichen, verringert sich tendenziell die Differenz der Klassifikationsgenauigkeiten zwischen den beiden Rasterauflösungen:

- 'regularizer' = 0.08 **K25-30 bis K25-35** (Tab. 9) sowie **K2-74 bis K2-78** (Tab. 13)
- 'regularizer' = 1 **K25-36 bis K25-41** (Tab. 10) sowie **K2-69 bis K2-73** (Tab. 12)

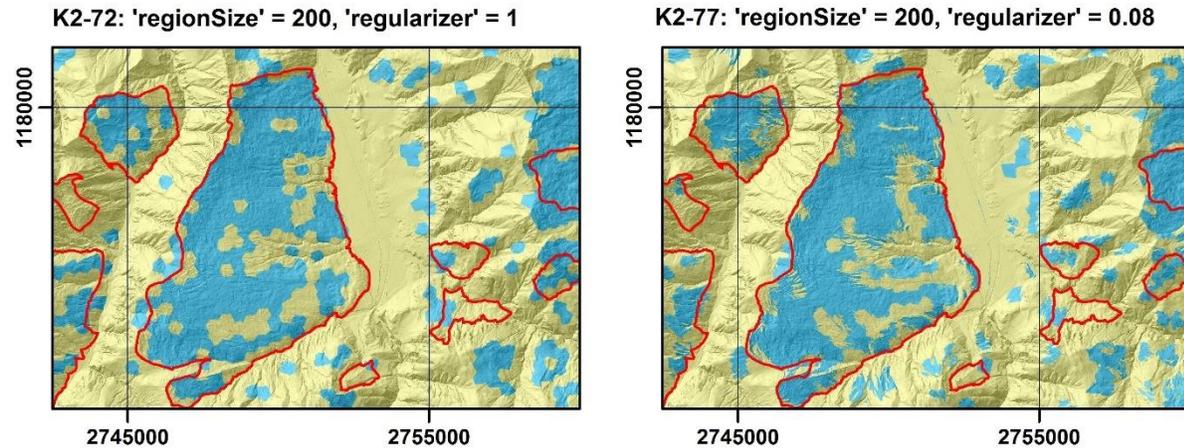
Die Effekte des Zusammenspiels von Rasterauflösung und Formparameter auf die Klassifikation werden exemplarisch an den Beispielen in Abb. 43 angedeutet:

- Mit beiden Einstellungen des Formparameters ('regularizer' 1 bzw. 0.08) resultieren bei 25m Rasterauflösung leicht höhere Genauigkeiten als mit 2m Rasterauflösung (**K25-37 > K2-72** und **K25-31 > K2-77**).

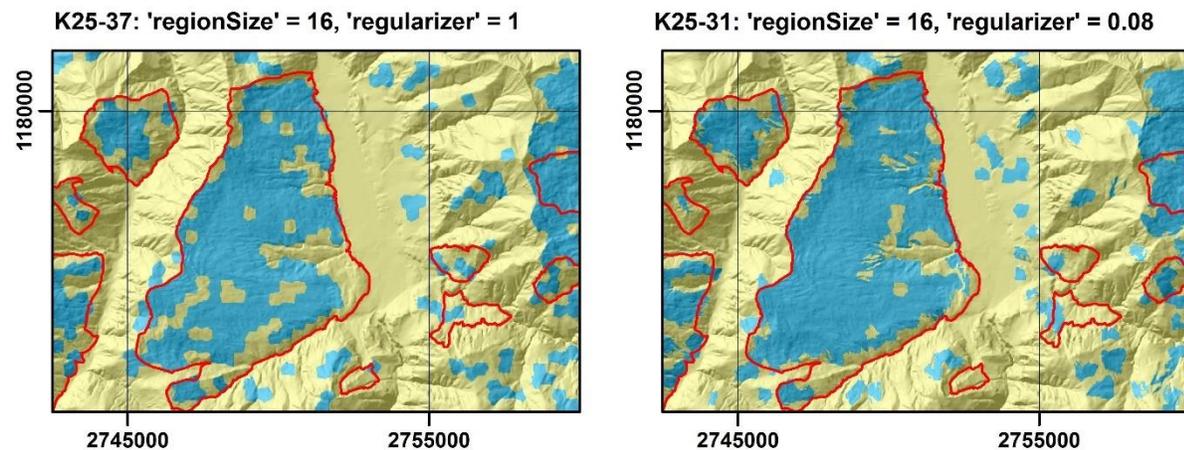
- Gleichzeitig werden mit beiden Rasterauflösungen tendenziell höhere Genauigkeiten mit einem 'regularizer' = 0.08 (K25-37, K2-77) anstatt 'regularizer' = 1 (K25-31, K2-72) erzielt.

Dies führt zur Interpretation, dass die erhöhte Anpassung der Segmentgeometrie an die Topographie mit dem niedrigeren 'regularizer'-Wert tendenziell höhere Genauigkeiten ermöglicht. Der Effekt tritt bei einer Rasterauflösung von 25m etwas stärker in Erscheinung.

Hangneigung (pixel-basiert) + Rauigkeit Eigenwertverhältnisse $\ln(S1/S2)$ und $\ln(S2/S3)$ anhand von 55 x 55 Rasterzellen, swissALTI3D (jeweils μ und σ je Segment):



Hangneigung (pixel-basiert) + Rauigkeit Eigenwertverhältnisse $\ln(S1/S2)$ und $\ln(S2/S3)$ anhand von 5 x 5 Rasterzellen, DHM25 (jeweils μ und σ je Segment):



Ground Truth:

Tiefgreifende gravitative Hangdeformation

Klassifikation:

Tiefgreifende gravitative Hangdeformation
 Übriges Terrain

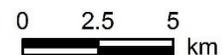


Abb. 43: Einfluss des Segmentierungsparameters 'regularizer' auf die Klassifikation von Kartenblatt 1215 in Abhängigkeit der Rasterauflösung (Nummerierungen gemäss Tab. 9, Tab. 10, Tab. 12 und Tab. 13). μ = Mittelwert, σ = Standardabweichung. Zu Interpretationszwecken ist im Hintergrund das schattierte Relief der jeweiligen Rasterauflösung (Bundesamt für Landestopografie swisstopo, 2005, 2016) dargestellt. Die zu Grunde liegenden Segmentierungsergebnisse sind analog zu Abb. 33 (S. 70).

Grösse des quadratischen Berechnungsfensters bei der Rauigkeitsberechnung anhand der Eigenwertverhältnisse $\ln(S1/S2)$ und $\ln(S2/S3)$:

Der Einfluss der Fenstergrösse auf die Klassifikationsgenauigkeit ist unterschiedlich je nach dem, ob der Mittelwert und die Standardabweichung des Eigenwertverhältnisses $\ln(S1/S2)$ einzeln oder in Kombination mit jenen der pixel-basierten Hangneigung verwendet werden. Ohne Hangneigung werden bei einer Rasterauflösung von 25m die höchsten Genauigkeiten mit 11 x 11 oder 13 x 13 Rasterzellen erzielt (Fenstergrösse von rund 300m x 300m; **K25-6** und **K25-7**, Tab. 8). Mit der Hangneigung verschiebt sich der optimale Massstab zu kleineren Fenstergrössen von 3 x 3 bis 9 x 9 Rasterzellen (75m x 75m bis 225m x 225m; **K25-17** bis **K25-20** in Tab. 9). Dies gilt auch, wenn zusätzlich das Eigenwertverhältnis $\ln(S2/S3)$ berücksichtigt wird (**K25-30** bis **K25-34**, Tab. 9).

Abb. 44 veranschaulicht diesen Massstabeffekt. Mit Erweiterung der Fenstergrösse werden Segmente des «übrigen Terrains» zunehmend als «tiefgreifende gravitative Hangdeformation» klassiert. Dabei handelt es sich vor allem um Gebiete in flacherem Gelände. Bei 15 x 15 Rasterzellen (**K25-23**, Tab. 9) verschlechtert sich das Klassifikationsergebnis «sprungartig», indem sich die meisten Segmente des Talbodens (östlich der grossen tiefgreifenden gravitativen Hangdeformation) blau einfärben. Das wird mit dem Überschreiten eines «kritischen Schwellenwerts» des Analysemassstabs interpretiert. Dabei werden kleinräumigere Rauigkeitsmuster von tiefgreifenden gravitativen Hangdeformationen, die in Kombination mit der Hangneigung zur besseren Klassifikation beitragen, durch den groben Betrachtungsmassstab ausgeblendet. Bei einer Rasterauflösung von 2m (Tab. 11 bis Tab. 13) sind die Klassifikationsgenauigkeiten bezüglich Variation der Fenstergrösse robuster.

Dieses Zusammenspiel von Hangneigung und Rauigkeit aufgrund der Eigenwertverhältnisse wird in Kap. 6.2.1 noch ausführlicher analysiert und interpretiert.

5.4.3. Synthese

Positive Einflüsse auf die Klassifikation gemäss Kap. 5.4.1 und 5.4.2 werden bei den Ergebnissen **K25-35** (Abb. 41, S. 83) und **K2-78** (Tab. 13) gewissermassen kombiniert. Diese weisen gemäss Tabellen in Kap. 5.4.4 - mit Ausnahme der «Erstellergenauigkeit» für «tiefgreifende gravitative Hangdeformationen» - die höchsten Genauigkeiten für 25m respektive 2m Rasterauflösung auf und beruhen auf folgenden Faktoren:

- 1) Gleichzeitige **Berücksichtigung sämtlicher geomorphometrischer Parameter** (ausser «Nackental-Index»)
- 2) Segmentierung mit erhöhter **Anpassungsfähigkeit an die Topographie** (Formparameter 'regularizer' = 0.08 anstatt 'regularizer' = 1)

3) Gleichzeitige **Berücksichtigung sämtlicher Fenstergrößen bei der Rauigkeitsberechnung** anhand der Eigenwertverhältnisse $\ln(S1/S2)$ und $\ln(S2/S3)$.

Der dritte Aspekt - betreffend Kombination mehrerer Analysemasstäbe der Rauigkeit - ist dabei im Vergleich zu den vorangehenden Unterkapiteln neu. Bestätigt wird auch in diesem Fall die Tendenz höherer Genauigkeiten bei 25m als bei 2m Rasterauflösung (**K25-35 > K2-78**).

Weitere Analysen der hier gemachten Feststellungen erfolgen anhand der Diskussion in Kap. 6.2.

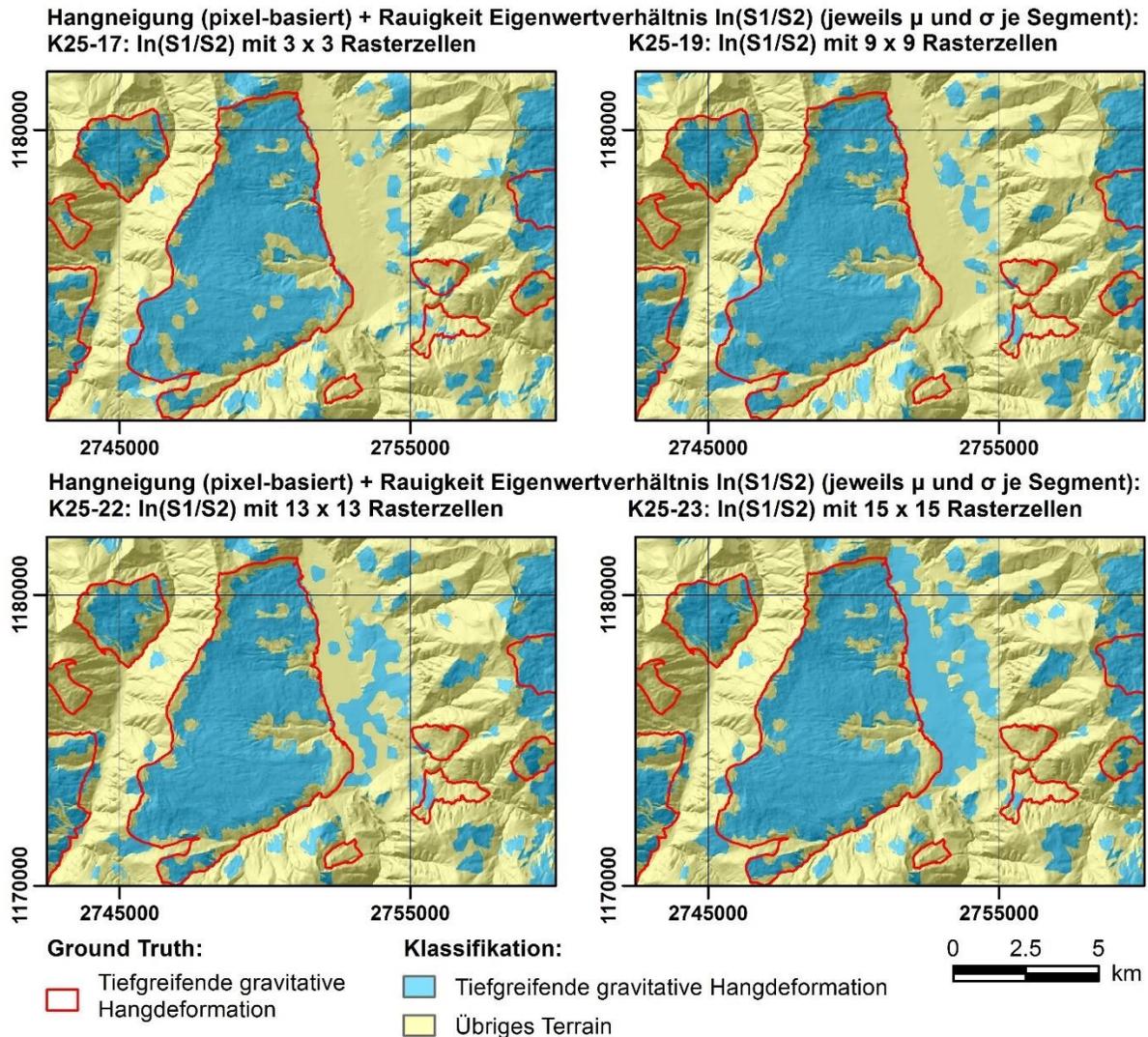


Abb. 44: Einfluss des Analysemasstabs bei der Rauigkeitsberechnung (Eigenwertverhältnis $\ln(S1/S2)$) in Kombination mit der Hangneigung auf die Klassifikation von Kartenblatt 1215 anhand des Geländemodells DHM25 (Nummerierungen gemäss Tab. 9). μ = Mittelwert, σ = Standardabweichung. Zu Interpretationszwecken ist im Hintergrund das schattierte Relief (Bundesamt für Landestopografie swisstopo, 2005) dargestellt.

5.4.4. Übersichtstabellen mit Genauigkeitsbestimmung verschiedener Klassifikationen

Das System der Nummerierung der Ergebnisse in den nachfolgenden Tabellen (Tab. 8 bis Tab. 13) ist eingangs zu Kap. 5.4 (S. 81) erläutert. Die Tabellen gliedern sich nach **Rasterauflösung** und **Segmentierungsparametern** (siehe jeweilige Beschriftungen oberhalb der Tabellen).

Tab. 8: Genauigkeit der Klassifikationsergebnisse K25-1 bis K25-16 für Kartenblatt 1215, basierend auf dem Geländemodell DHM25 (25m Rasterauflösung) und den Segmentierungsparametern 'regionSize' = 16, 'regularizer' = 0.08. Verglichen werden die verschiedenen Modellberechnungen unter Angabe der berücksichtigten Segment-Deskriptoren / geomorphometrischen Parametern und Analysemassstäbe. Fett gedruckte Zahlen geben das beste Ergebnis des jeweiligen Genauigkeits-/Fehlermasses der Tabelle an. Ergebnisse mit kursiver Nummerierung (Spalte ganz links) sind in Abb. 41 kartographisch dargestellt.

	Analyse- mass- stab	Nutzergenauigkeit		Erstellergenauigkeit		Gesamt- genauig- keit	Durch- schnittliche Genauigkeit	Gesamt- fehler- Index
		<i>User Accuracy</i>		<i>Producer Accuracy</i>		<i>Overall Accuracy</i>	<i>Average Accuracy</i>	<i>Overall Error Index</i>
Nr.	Anzahl Raster- zellen	Tiefgreif. gravitative Hangdef.	Übriges Terrain	Tiefgreif. gravitative Hangdef.	Übriges Terrain			
		Hangneigung: Mittelwert und Standardabweichung je Segment						
K25-1	3 x 3	62%	81%	63%	80%	75%	72%	54%
		Rauigkeit Eigenwertverhältnis In(S1/S2): Mittelwert und Standardabweichung je Segment						
K25-2	3 x 3	58%	80%	61%	78%	72%	69%	58%
K25-3	5 x 5	57%	77%	51%	81%	71%	67%	63%
K25-4	7 x 7	63%	79%	56%	83%	74%	71%	58%
K25-5	9 x 9	65%	81%	59%	84%	76%	73%	55%
K25-6	11 x 11	65%	82%	64%	83%	76%	74%	53%
K25-7	13 x 13	65%	83%	66%	83%	77%	74%	51%
K25-8	15 x 15	59%	79%	59%	79%	72%	69%	58%
K25-9	17 x 17	58%	80%	61%	78%	72%	69%	57%
		Rauigkeit Eigenwertverhältnis In(S2/S3): Mittelwert und Standardabweichung je Segment						
K25-10	3 x 3	52%	75%	50%	76%	68%	63%	66%
K25-11	5 x 5	53%	75%	46%	79%	68%	64%	67%
K25-12	7 x 7	51%	74%	47%	77%	67%	63%	68%
K25-13	9 x 9	49%	73%	43%	77%	66%	61%	70%
K25-14	11 x 11	50%	73%	42%	79%	67%	62%	70%
		Hangneigung + "richtungsabhängige Rauigkeit": (*) Funktion aller Normalvektoren innerhalb des Segments, siehe Kap. 4.4.2						
K25-15		63%	83%	66%	81%	76%	73%	52%
		Hangneigung + "richtungsabhängige Rauigkeit" + "Nackental-Index": (*) Funktion aller Normalvektoren innerhalb des Segments, siehe Kap. 4.4.2						
K25-16		58%	82%	68%	75%	73%	70%	55%

Tab. 9: Genauigkeit der Klassifikationsergebnisse K25-17 bis K25-35 für Kartenblatt 1215, basierend auf dem Geländemodell DHM25 (25m Rasterauflösung) und den Segmentierungsparametern 'regionSize' = 16, 'regularizer' = 0.08. Verglichen werden die verschiedenen Modellberechnungen unter Angabe der berücksichtigten Segment-Deskriptoren / geomorphometrischen Parametern und Analysemasstäbe. Fett gedruckte Zahlen geben das beste Ergebnis des jeweiligen Genauigkeits-/Fehlermasses der Tabelle an. Ergebnisse mit kursiver Nummerierung (Spalte ganz links) sind in Abb. 41, Abb. 43 oder Abb. 44 kartographisch dargestellt.

	Analyse- mass- stab	Nutzergenauigkeit		Erstellergenauigkeit		Gesamt- genauig- keit	Durch- schnittliche Genauigkeit	Gesamt- fehler- Index
		User Accuracy		Producer Accuracy		Overall Accuracy	Average Accuracy	Overall Error Index
Nr.	Anzahl Raster- zellen	Tiefgreif. gravitative Hangdef.	Übriges Terrain	Tiefgreif. gravitative Hangdef.	Übriges Terrain			
		Hangneigung + Rauigkeit Eigenwertverhältnis In(S1/S2): Mittelwert und Standardabweichung der pixel-basierten Werte je Segment						
<i>K25-17</i>	3 x 3	71%	84%	67%	86%	80%	77%	48%
<i>K25-18</i>	5 x 5	71%	83%	64%	87%	79%	77%	49%
<i>K25-19</i>	7 x 7	70%	83%	66%	86%	79%	77%	49%
<i>K25-20</i>	9 x 9	69%	83%	66%	85%	79%	76%	49%
<i>K25-21</i>	11 x 11	69%	82%	63%	86%	78%	75%	51%
<i>K25-22</i>	13 x 13	65%	83%	66%	83%	77%	74%	51%
<i>K25-23</i>	15 x 15	60%	82%	66%	78%	74%	71%	54%
<i>K25-24</i>	17 x 17	60%	83%	68%	77%	74%	71%	53%
		Hangneigung + Rauigkeit Eigenwertverhältnis In(S2/S3): Mittelwert und Standardabweichung der pixel-basierten Werte je Segment						
<i>K25-25</i>	3 x 3	64%	83%	68%	81%	77%	74%	51%
<i>K25-26</i>	5 x 5	67%	83%	65%	84%	78%	75%	51%
<i>K25-27</i>	7 x 7	66%	82%	64%	84%	77%	74%	52%
<i>K25-28</i>	9 x 9	66%	81%	60%	84%	76%	73%	54%
<i>K25-29</i>	11 x 11	66%	81%	62%	84%	77%	74%	53%
		Hangneigung + Rauigkeit Eigenwertverhältnisse In(S1/S2) und In(S2/S3): Mittelwert und Standardabweichung der pixel-basierten Werte je Segment						
<i>K25-30</i>	3 x 3	71%	85%	68%	86%	80%	78%	46%
<i>K25-31</i>	5 x 5	73%	84%	68%	87%	81%	79%	46%
<i>K25-32</i>	7 x 7	72%	83%	65%	87%	80%	77%	48%
<i>K25-33</i>	9 x 9	73%	82%	60%	89%	79%	77%	51%
<i>K25-34</i>	11 x 11	71%	82%	61%	88%	79%	76%	51%
		Alle Segment-Deskriptoren aus K1-K34 kombiniert (ausgenommen "Nackental-Index")						
<i>K25-35</i>	variabel	77%	83%	64%	91%	82%	80%	46%

Tab. 10: Genauigkeit der Klassifikationsergebnisse K25-36 bis K25-41 für Kartenblatt 1215, basierend auf dem Geländemodell DHM25 (25m Rasterauflösung) und den Segmentierungsparametern 'regionSize' = 16, 'regularizer' = 1. Verglichen werden die verschiedenen Modellberechnungen unter Angabe der berücksichtigten Segment-Deskriptoren / geomorphometrischen Parametern und Analysemassstäbe. Fett gedruckte Zahlen geben das beste Ergebnis des jeweiligen Genauigkeits-/Fehlermasses der Tabelle an. Das Ergebnis mit kursiver Nummerierung (Spalte ganz links) ist in Abb. 43 kartographisch dargestellt.

	Analyse- mass- stab	Nutzergenauigkeit		Erstellergenauigkeit		Gesamt- genauig- keit	Durch- schnittliche Genauigkeit	Gesamt- fehler- Index
		<i>User Accuracy</i>		<i>Producer Accuracy</i>		<i>Overall Accuracy</i>	<i>Average Accuracy</i>	<i>Overall Error Index</i>
Nr.	Anzahl Raster- zellen	Tiefgreif. gravitative Hangdef.	Übriges Terrain	Tiefgreif. gravitative Hangdef.	Übriges Terrain			
		Hangneigung + Rauigkeit Eigenwertverhältnisse ln(S1/S2) und ln(S2/S3): Mittelwert und Standardabweichung der pixel-basierten Werte je Segment						
K25-36	3 x 3	69%	83%	64%	86%	78%	76%	50%
<i>K25-37</i>	5 x 5	69%	82%	62%	86%	78%	76%	51%
K25-38	7 x 7	71%	82%	61%	87%	79%	76%	51%
K25-39	9 x 9	71%	82%	63%	87%	79%	77%	50%
K25-40	11 x 11	72%	83%	63%	87%	79%	77%	49%
		Alle Segment-Deskriptoren entsprechend K1-K34 kombiniert (ausgenommen "Nackental-Index")						
K25-41	variabel	75%	83%	65%	89%	81%	79%	47%

Tab. 11: Genauigkeit der Klassifikationsergebnisse K2-42 bis K2-56 für Kartenblatt 1215, basierend auf dem Geländemodell swissALTI3D (2m Rasterauflösung) und den Segmentierungsparametern 'regionSize' = 200, 'regularizer' = 1. Verglichen werden die verschiedenen Modellberechnungen unter Angabe der berücksichtigten Segment-Deskriptoren / geomorphometrischen Parametern und Analysemasstäbe. Fett gedruckte Zahlen geben das beste Ergebnis des jeweiligen Genauigkeits-/Fehlermasses der Tabelle an. Die Ergebnisse mit kursiver Nummerierung (Spalte ganz links) sind in Abb. 42 kartographisch dargestellt.

	Analyse- mass- stab	Nutzergenauigkeit		Erstellergenauigkeit		Gesamt- genauigkeit	Durch- schnittliche Genauigkeit	Gesamt- fehler- Index
		<i>User Accuracy</i>		<i>Producer Accuracy</i>		<i>Overall Accuracy</i>	<i>Average Accuracy</i>	<i>Overall Error Index</i>
Nr.	Anzahl Raster- zellen	Tiefgreif. gravitative Hangdef.	Übriges Terrain	Tiefgreif. gravitative Hangdef.	Übriges Terrain			
		Hangneigung: Mittelwert und Standardabweichung der pixel-basierten Neigungswerte je Segment						
K2-42	3 x 3	63%	80%	57%	83%	75%	71%	57%
		Rauigkeit Eigenwertverhältnis In(S1/S2): Mittelwert und Standardabweichung der pixel-basierten Rauigkeitswerte je Segment						
K2-43	9 x 9	53%	74%	43%	81%	68%	64%	69%
K2-44	17 x 17	59%	77%	51%	82%	72%	68%	62%
K2-45	25 x 25	59%	77%	50%	82%	72%	68%	63%
K2-46	31 x 31	59%	78%	54%	81%	72%	69%	60%
K2-47	39 x 39	59%	78%	53%	82%	72%	69%	61%
K2-48	45 x 45	59%	77%	51%	82%	72%	68%	62%
K2-49	55 x 55	60%	77%	50%	83%	72%	68%	63%
K2-50	65 x 65	55%	77%	54%	78%	70%	66%	62%
		Rauigkeit Eigenwertverhältnis In(S2/S3): Mittelwert und Standardabweichung der pixel-basierten Rauigkeitswerte je Segment						
K2-51	9 x 9	51%	73%	41%	80%	67%	62%	70%
K2-52	25 x 25	56%	76%	51%	80%	70%	66%	64%
K2-53	39 x 39	52%	76%	51%	77%	68%	64%	65%
K2-54	55 x 55	52%	76%	52%	77%	68%	64%	65%
		Hangneigung + "richtungsabhängige Rauigkeit": (* Funktion aller Normalvektoren innerhalb des Segments, siehe Kap. 4.4.2						
K2-55	(*)	58%	79%	58%	79%	72%	69%	59%
		Hangneigung + "richtungsabhängige Rauigkeit" + "Nackental-Index": (* Funktion aller Normalvektoren innerhalb des Segments, siehe Kap. 4.4.2						
K2-56	(*)	58%	78%	56%	80%	72%	68%	60%

Tab. 12: Genauigkeit der Klassifikationsergebnisse K2-57 bis K2-73 für Kartenblatt 1215, basierend auf dem Geländemodell swissALTI3D (2m Rasterauflösung) und den Segmentierungsparametern 'regionSize' = 200, 'regularizer' = 1. Verglichen werden die verschiedenen Modellberechnungen unter Angabe der berücksichtigten Segment-Deskriptoren / geomorphometrischen Parametern und Analysenmassstäbe. Fett gedruckte Zahlen geben das beste Ergebnis des jeweiligen Genauigkeits-/Fehlermasses der Tabelle an. Die Ergebnisse mit kursiver Nummerierung (Spalte ganz links) sind in Abb. 42 oder Abb. 43 kartographisch dargestellt.

	Analyse- mass- stab	Nutzergenauigkeit		Erstellergenauigkeit		Gesamt- genauigkeit	Durch- schnittliche Genauigkeit	Gesamt- fehler- Index
		<i>User Accuracy</i>		<i>Producer Accuracy</i>		<i>Overall Accuracy</i>	<i>Average Accuracy</i>	<i>Overall Error Index</i>
Nr.	Anzahl Raster- zellen	Tiefgreif. gravitative Hangdef.	Übriges Terrain	Tiefgreif. gravitative Hangdef.	Übriges Terrain			
		Hangneigung + Rauigkeit Eigenwertverhältnis In(S1/S2): Mittelwert und Standardabweichung der pixel-basierten Werte je Segment						
<i>K2-57</i>	9 x 9	69%	82%	61%	86%	78%	76%	52%
K2-58	17 x 17	68%	81%	58%	86%	77%	74%	54%
K2-59	25 x 25	68%	81%	58%	86%	77%	74%	54%
K2-60	31 x 31	69%	81%	60%	86%	78%	75%	53%
K2-61	39 x 39	69%	81%	60%	86%	78%	75%	53%
K2-62	45 x 45	68%	80%	57%	87%	77%	74%	55%
K2-63	55 x 55	67%	80%	58%	86%	76%	74%	55%
K2-64	65 x 65	67%	81%	60%	85%	77%	74%	54%
		Hangneigung + Rauigkeit Eigenwertverhältnis In(S2/S3): Mittelwert und Standardabweichung der pixel-basierten Werte je Segment						
K2-65	9 x 9	65%	79%	54%	86%	75%	72%	58%
K2-66	25 x 25	63%	79%	56%	84%	74%	71%	58%
K2-67	39 x 39	61%	79%	56%	82%	74%	70%	59%
K2-68	55 x 55	60%	79%	57%	81%	73%	70%	58%
		Hangneigung + Rauigkeit Eigenwertverhältnisse In(S1/S2) und In(S2/S3): Mittelwert und Standardabweichung der pixel-basierten Werte je Segment						
<i>K2-69</i>	9 x 9	68%	81%	60%	86%	77%	75%	53%
K2-70	25 x 25	68%	80%	57%	86%	76%	74%	55%
K2-71	39 x 39	69%	80%	57%	87%	77%	75%	54%
<i>K2-72</i>	55 x 55	67%	81%	59%	85%	77%	74%	54%
		Alle Segment-Deskriptoren aus K42-K72 kombiniert (ausgenommen "Nackental-Index")						
<i>K2-73</i>	variabel	71%	80%	57%	88%	78%	75%	54%

Tab. 13 Genauigkeit der Klassifikationsergebnisse K2-74 bis K2-78 für Kartenblatt 1215, basierend auf dem Geländemodell swissALTI3D (2m Rasterauflösung) und den Segmentierungsparametern 'regionSize' = 200, 'regularizer' = 0.08. Verglichen werden die verschiedenen Modellberechnungen unter Angabe der berücksichtigten Segment-Deskriptoren / geomorphometrischen Parametern und Analysemassstäbe. Fett gedruckte Zahlen geben das beste Ergebnis des jeweiligen Genauigkeits-/Fehlermasses der Tabelle an. Das Ergebnis mit kursiver Nummerierung (Spalte ganz links) ist in Abb. 43 kartographisch dargestellt.

	Analyse- mass- stab	Nutzergenauigkeit		Erstellergenauigkeit		Gesamt- genauigkeit	Durch- schnittliche Genauigkeit	Gesamt- fehler- Index
		<i>User Accuracy</i>		<i>Producer Accuracy</i>		<i>Overall Accuracy</i>	<i>Average Accuracy</i>	<i>Overall Error Index</i>
Nr.	Anzahl Raster- zellen	Tiefgreif. gravitative Hangdef.	Übriges Terrain	Tiefgreif. gravitative Hangdef.	Übriges Terrain			
		Hangneigung + Rauigkeit Eigenwertverhältnisse In(S1/S2) und In(S2/S3): Mittelwert und Standardabweichung der pixel-basierten Werte je Segment						
K2-74	9 x 9	70%	80%	56%	88%	77%	75%	55%
K2-75	25 x 25	70%	80%	55%	88%	77%	75%	55%
K2-76	39 x 39	70%	82%	61%	87%	78%	76%	52%
<i>K2-77</i>	55 x 55	69%	82%	61%	87%	78%	76%	52%
		Alle Segment-Deskriptoren entsprechend K42-K72 kombiniert (ausgenommen "Nackental-Index")						
K2-78	variabel	73%	82%	61%	89%	79%	77%	51%

6. Diskussion

Gestützt auf die Ergebnisse und Interpretationen von Kap. 5 werden hier die Forschungsfragen gemäss Kap. 1.2 beantwortet. Dabei werden Verbindungen zu bisherigen Untersuchungen aus Kap. 2 hergestellt und Optimierungsmöglichkeiten des Verfahrens angesprochen.

Forschungsfrage 1:

- Inwieweit ist eine automatisierte Erkennung von tiefgreifenden gravitativen Hangdeformationen in alpinem Gelände mittels geomorphometrischer Analyse digitaler Geländemodelle und Algorithmen des maschinellen Lernens möglich?

Bei der Beantwortung dieser Frage (**Kap. 6.1**) stehen folgende Themen im Vordergrund:

- Wirksamkeit des Ansatzes in **quantitativer Hinsicht** (Klassifikationsgenauigkeiten)
- Wirksamkeit des Ansatzes in **qualitativer Hinsicht**: bei welchen topographischen Verhältnissen funktioniert der Ansatz besser, wo schlechter? Wie steht es bezüglich der Interpretierbarkeit und Weiterverwendbarkeit der klassierten Flächen für den/die NutzerIn?

Forschungsfrage 2:

- Welche Rolle spielen i) die Wahl der geomorphometrischen Parameter, ii) die Analysemasstäbe und iii) die Berücksichtigung des räumlichen Kontexts?

Bei der zweiten Frage werden die jeweiligen Faktoren analysiert und Abhängigkeiten zwischen diesen aufgezeigt (**Kap. 6.2**).

Das abschliessende **Unterkapitel 6.3** befasst sich mit weiteren Aspekten, die mit der vorliegenden Arbeit nicht detailliert untersucht wurden, im Rahmen der Diskussion jedoch auch zu beachten sind (Qualität der 'Ground Truth', Übertragbarkeit auf andere geologische Gebiete).

6.1. Wirksamkeit des Ansatzes

6.1.1. Quantitative Betrachtung

Als massgebliches Resultat für die Wirksamkeit des Ansatzes in quantitativer Hinsicht wird jenes mit den höchsten Klassifikationsgenauigkeiten betrachtet (**K25-35**; Tab. 9, S. 90 und Abb. 41, S. 83):

- Gesamtgenauigkeit: 82 %
- Durchschnittliche Genauigkeit: 80 % (Mittelwert der Nutzergenauigkeiten)
- Gesamtfehler-Index: 46 %

Gemäss dem Ergebnis der Gesamtgenauigkeit werden 82% der Flächen von Kartenblatt 1215 (inner- und ausserhalb von tiefgreifenden gravitativen Hangdeformationen) richtig klassiert. Die **Nutzergenauigkeiten** für Gebiete inner- und ausserhalb von tiefgreifenden gravitativen Hangdeformationen liegen dabei relativ nahe beisammen:

- 77% der als «tiefgreifende gravitative Hangdeformation» klassierten Rasterzellen sind in der 'Ground Truth' tatsächlich als solche kartiert,
- 83% der als «übriges Terrain» klassierten Rasterzellen sind in der 'Ground Truth' als solche kartiert.

Betreffend **Erstellergenauigkeit** werden folgende Ergebnisse erzielt:

- 64% der gemäss 'Ground Truth' als «tiefgreifende gravitative Hangdeformation» erfassten Rasterzellen werden als solche erkannt.
- 91% der als «übriges Terrain» geltenden Rasterzellen werden als solche erkannt.

Ursachen diesbezüglich werden in Kap. 6.1.2 noch diskutiert.

Vergleichswerte aus anderen Studien gemäss Kap. 2.4.3 liegen für die Genauigkeitsmasse «Gesamtgenauigkeit» und «Gesamtfehler-Index» vor. Diese Untersuchungen befassen sich zwar mit anderen Hanginstabilitätstypen (Tab. 2, S. 21), geben aber zumindest grobe Anhaltspunkte für die Einordnung der vorliegenden Ergebnisse:

- *Booth et al. (2009)* erzielt bei der regionalen Kartierung von Hanginstabilitäten basierend auf Spektral-Analysen ebenfalls eine Gesamtgenauigkeit von 82 % (Mittelwert aus fünf Untersuchungsgebieten mit Werten von 68 bis 89%). Bezüglich Gesamtfehler-Index werden je nach Untersuchungsgebiet meist ähnliche oder schlechtere Werte festgestellt (39 bis 86%). In einem Untersuchungsgebiet ist der Gesamtfehler-Index deutlich besser (14%). In diesem Fall sind jedoch 80% der Gebietsfläche durch Hanginstabilitäten bedeckt, was die Genauigkeitsbestimmung anhand des Gesamtfehler-Index begünstigt (vgl. Berechnung gemäss Kap. 4.6).
- *van den Eeckhaut et al. (2012)* erzielt je nach berücksichtigter Hanginstabilitätstypen einen schlechteren Gesamtfehler-Index zwischen 57 und 66 %. Dabei handelt es sich aber um kleinere, dafür zahlreichere Hanginstabilitäten, welche tendenziell schwieriger zu detektieren sind als einzelne grosse Hanginstabilitäten. Letzteres wird bestätigt durch Vergleiche verschiedener Experten-basierter (manueller) Kartierungen desselben Untersuchungsgebiets sowie teilweise durch die Ergebnisse der vorliegenden Arbeit (siehe nachfolgendes Unterkapitel).

- Bei *Li et al. (2015)* wird mittels Segmentierung und 'Random Forest' Klassifikation eine Gesamtgenauigkeit von 89% und ein Gesamtfehler-Index von nur gerade 9% rapportiert. Dabei werden für die Kalibrierung jedoch 50% derselben Daten verwendet, welche anschliessend klassiert werden, was das Ergebnis begünstigt. Die Bestimmung des Gesamtfehler-Index erfolgt in diesem Fall nach manueller Bearbeitung des Klassifikationsergebnisses (Änderung der Klassifikation einzelner isolierter Segmente), wodurch das Ergebnis ebenfalls aufgewertet wird.

Die Vergleichbarkeit ist somit nur bedingt gegeben. Dennoch kann gefolgert werden, dass in groben Zügen ähnliche Klassifikationsgenauigkeiten wie für andere Hanginstabilitätstypen und andere Ansätze der automatisierten, geomorphometrischen Erkennung (Spektral-Analysen von *Booth et al. (2009)*) erzielt werden.

Das Beispiel von *Strozzi et al. (2010)* (Abb. 7, S. 13) deutet zudem an, dass bei Auswertungen der SAR-Interferometrie relative Abweichungen zwischen automatisierter Erkennung und tatsächlicher Ausdehnung der Hanginstabilität in einer ähnlichen Grössenordnung möglich sind.

6.1.2. Qualitative Betrachtung

Erkennung von tiefgreifenden gravitativen Hangdeformationen:

Bei genauerer Betrachtung der kartographischen Darstellung des Ergebnisses **K25-35** (Abb. 41, S. 83) und anderen Ergebnissen aus Kap. 5.4 wird festgestellt:

- 1) Vor allem die grosse tiefgreifende gravitative Hangdeformation in der Bildmitte von Kartenblatt 1215 und die zwei nächstgrösseren Gebiete westlich davon weisen eine relativ hohe Übereinstimmung zwischen 'Ground Truth' und Klassifikationsergebnis auf.
- 2) Viele kleinere Gebiete (rote Umrisse) werden hingegen schlechter oder gar nicht detektiert.

Bei Betrachtung der **Kalibrierungsflächen** für 'Random Forest' (Abb. 22, S. 54) ist ersichtlich, dass «kleine» tiefgreifende gravitative Hangdeformationen damit nicht abgedeckt werden. Dies kann einen gewissen Einfluss auf das Problem haben und könnte im Rahmen weiterer Untersuchungen allenfalls abgeklärt werden. Bei den Kalibrierungsflächen sind jedoch auch Bereiche von grossen «tiefgreifenden gravitativen Hangdeformationen» berücksichtigt, die ähnliche geomorphometrische Eigenschaften (Neigung, Rauigkeit) wie diese kleineren Gebiete aufweisen (vgl. diverse Abbildungen von Kartenblatt 1214 in Kap. 5.1 und 5.3).

Als wesentlichere Ursache wird ein Problem der **Prozessabgrenzung** vermutet. Demnach wären diese kleineren Gebiete eher dem Hanginstabilitätstyp 29 ('rock slope deformation') nach *Hungr*

et al. (2014) (Kap. 2.2) zuzuordnen und damit mit einer anderen geometrischen Signatur «versehen». Für Kartenblatt 1215 (Abb. 40, S. 80) wird diese Hypothese durch erhöhte Neigungs- und Rauigkeitswerte (niedrigerer(!) Mittelwert des Eigenwertverhältnisses $\ln(S_1/S_2)$) für Segmente innerhalb solcher «kleinen» Gebiete unterstützt. Das wiederum lässt die Interpretation zu, dass diese kleineren «tiefgreifenden gravitativen Hangdeformationen» eine zu geringe räumliche Ausdehnung haben, um die von *Crosta et al. (2013)* beschriebenen Effekte der grossräumigen Glättung und Abflachung zu erzeugen (Kap. 2.4.2).

Das Problem der **Prozessabgrenzung** wird auch durch die Handhabung verschiedener Prozessbezeichnungen bei verschiedenen Kartenblättern des Datensatzes 'GeoCover' angedeutet (*Bundesamt für Landestopografie swisstopo (2013)*, Kap. 3.2).

Bei den grösseren Gebieten mit tiefgreifender gravitativer Hangdeformation werden meist grössere zusammenhängende Flächen richtig klassiert. Segmente, die fälschlicherweise nicht als tiefgreifende gravitative Hangdeformation erkannt werden, können grösstenteils ebenfalls auf erhöhte Neigungs- und Rauigkeitswerte (Eigenwertverhältnis $\ln(S_1/S_2)$) zurückgeführt werden (Abb. 40, S. 80). Diese werden vor allem in folgenden Fällen beobachtet (Beispiele in Abb. 45):

- 1) Entlang von fluvialen Einschnitten im Innern und am Rand von tiefgreifenden gravitativen Hangdeformationen.
- 2) Teilweise entlang von Berggräten: dies ist eher ein Problem des methodischen Ansatzes, welcher die Rauigkeitsberechnung (Eigenwertverhältnisse) anhand quadratischer Berechnungsfenster vornimmt. Bei grosser Fenstergrösse im Verhältnis zur Segmentgrösse (z.B. 13 x 13 Rasterzellen bei DHM25) reicht das Fenster zunehmend über den Segmentrand (in diesem Fall Berggrat) hinaus, was zu erhöhten Rauigkeitswerten führt.

Probleme im Zusammenhang mit fluvialen Einschnitten sind auch aus früheren Untersuchungen bekannt (vgl. Kap. 2.5.1). Diese wirken sich hier jedoch anders aus: Gebiete mit tiefgreifender gravitativer Hangdeformation werden aufgrund erhöhter Rauigkeit und Neigung entlang von fluvialen Einschnitten fälschlicherweise als «übriges Terrain» klassiert. Bei den früheren Beispielen (*McKean & Roering, 2004; Booth et al., 2009*) mit anderen Hanginstabilitätstypen hingegen besteht das umgekehrte Problem, dass Bereiche des «übrigen Terrains» aufgrund der erhöhten Rauigkeit entlang von Fliesswegen als Hanginstabilität klassiert werden.

Dem Problem des methodischen Ansatzes (Punkt 3) wird auch bei anderen Ansätzen nicht Rechnung getragen (z.B. *Booth et al. (2009)*: Spektral-Analysen mit fixen Berechnungsfenstern). Bei kleiner Grösse des quadratischen Berechnungsfensters im Verhältnis zur Segmentgrösse (*van den Eeckhaut et al. (2012), Li et al. (2015)*), teilweise diese Untersuchung) fällt dies allerdings

auch weniger ins Gewicht. Ein alternativer Ansatz könnte darin bestehen, die Rauigkeit anhand der Eigenwert-Methode nicht innerhalb quadratischer Berechnungsfenster, sondern innerhalb kleiner Segmente mit vergleichbarer Grösse zu berechnen. Anschliessend müssten diese als grössere Segmente aggregiert werden (ähnlich den hier verwendeten Segmentgrössen), um Deskriptoren wie Mittelwert und Standardabweichung berechnen zu können.

Erkennung des «übrigen Terrains»:

Die Gebiete ausserhalb von tiefgreifenden gravitativen Hangdeformationen werden mit einer Erstlergenauigkeit von bis zu 91% relativ zuverlässig erkannt. Falschklassifikationen werden jedoch folgt beobachtet (vgl. Abb. 45):

- 1) Kleinere Ansammlungen falsch klassierter Segmente (meist 1 bis 3 zusammenhängende Segmente), verteilt über das ganze Kartenblatt 1215. Diese betreffen vor allem Bereiche von Talflanken mit Moränenbedeckung oder Bachschuttkegel mit ähnlichen Neigungs- und Rauigkeitswerten (*GeoCover, Bundesamt für Landestopografie swisstopo (2013)*).
- 2) Grössere zusammenhängende Flächen «falsch» klassierter Segmente, vor allem im östlichen Bereich von Kartenblatt 1215: Diese decken sich mit Gebieten, welche gemäss SAR-Interferometrie (*GeoCover Kanton Graubünden, 2017*) in Bewegung sind oder sein könnten (vgl. Bemerkungen zur 'Ground Truth' in Kap. 6.3.1).

Interpretierbarkeit bzw. Weiterverwendbarkeit:

Bei einer Erstlergenauigkeit von 64% und einer Nutzergenauigkeit von 77% können die als «tiefgreifende gravitative Hangdeformation» klassierten Flächen nicht als Endergebnis einer Hanginstabilitätskartierung betrachtet werden. Dies deckt sich mit Erkenntnissen aus anderen Untersuchungen (z.B. *Booth et al. (2009), Lin et al. (2013)*). Ähnlich wie bei der SAR-Interferometrie (*Bundesamt für Umwelt BAFU (2015)*, vgl. Kap. 1.1) bleibt eine kombinierte Interpretation der Ergebnisse mit geomorphologischem Kontext erforderlich. Die teils grossen zusammenhängenden Gebiete mit einheitlicher und korrekter Klassifikation ergeben aber eine Grundlage für die Weiterverwendung, z.B. in Kombination mit dem schattierten Relief.

Der von *Li et al. (2015)* in Bezug auf die Interpretierbarkeit festgestellte Nutzen von **objekt-basierten** gegenüber pixel-basierten Klassifikationsergebnissen kann anhand der vorliegenden Ergebnisse tendenziell bestätigt werden. Eine weitere Verbesserung kann darin bestehen, die Klassifikation kleinerer Ansammlungen (1 bis 3) falschklassierter Segmente nachträglich zu ändern. Dies kann manuell (*Li et al., 2015*), allenfalls aber auch automatisiert erfolgen.

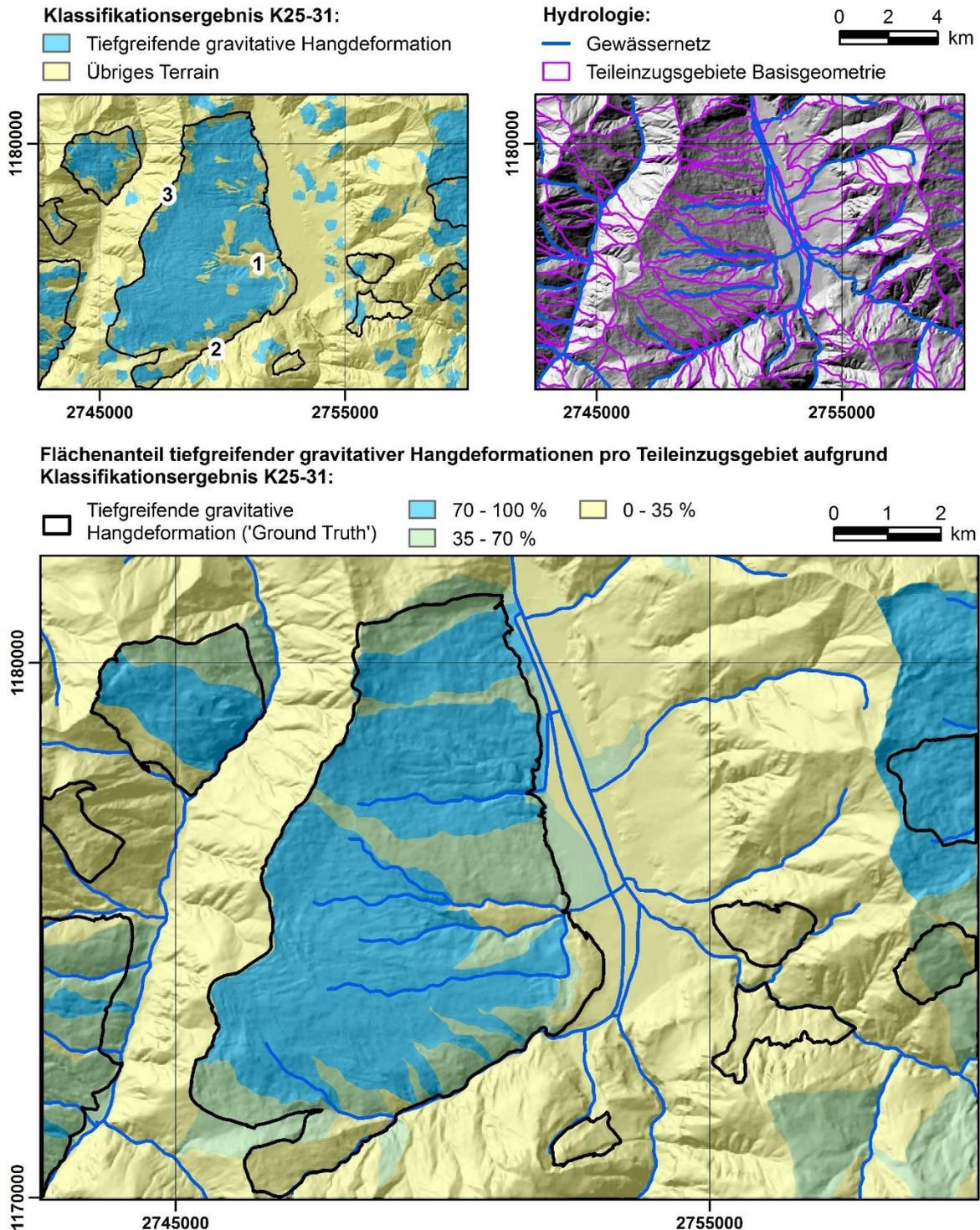


Abb. 45: Ansatz zur Objekt-Aggregation auf Basis hydrologischer Teileinzugsgebiete. Diese werden durch Verschneiden der Basisgeometrie «Einzugsgebietgliederung Schweiz» (Bundesamt für Umwelt BAFU, 2012) und dem Gewässernetz des Datensatzes VECTOR200 (Bundesamt für Landestopografie swisstopo, 2014) hergeleitet (oben rechts). Die Flächenanteile sind mit zentraler Statistik anhand der Teileinzugsgebiete und des Klassifikationsergebnisses K25-31 berechnet. Die Nummern oben links kennzeichnen zusätzlich im Text beschriebene Situationen, bei denen «tiefgreifende gravitative Hangdeformationen» weniger gut erkannt werden: fluviale Einschnitte innerhalb (1) und am Rand (2) von tiefgreifenden gravitativen Hangdeformationen. 3) Berggrat. Im Hintergrund ist jeweils das schattierte Relief des Geländemodells DHM25 dargestellt (Bundesamt für Landestopografie swisstopo, 2005).

Objekt-Aggregation auf Basis hydrologischer Teileinzugsgebiete:

Im Kontext der Weiterverwendbarkeit der Klassifikationsergebnisse zeigt Abb. 45 den in Kap. 2.5.5 erwähnten Ansatz zur Objekt-Aggregation auf Basis hydrologischer Teileinzugsgebiete. Diese werden durch Verschneiden der Basisgeometrie «Einzugsgebietsgliederung Schweiz» (Bundesamt für Umwelt BAFU, 2012) und dem Gewässernetz des Datensatzes VECTOR200 (Bundesamt für Landestopografie swisstopo, 2014) hergeleitet (Datenbeschreibung gemäss Kap. 3.4). Durch die Berücksichtigung des Gewässernetzes sollen gegenüberliegende Hangflanken innerhalb eines Teileinzugsgebiets separiert werden. Mittels zonaler Statistik wird anschliessend pro Teileinzugsgebiet der prozentuale Flächenanteil von Rasterzellen ermittelt, die zu einem Segment gehören, das als «tiefgreifende gravitative Hangdeformation» klassiert ist. Die Einfärbung erfolgt danach aufgrund manuell gewählter Schwellenwerte.

Der Ansatz bildet die Umriss von tiefgreifenden gravitativen Hangdeformationen abschnittsweise richtig ab (z.B. entlang von Berggräten) und lässt einige falschklassierte blaue Segmente «verschwinden». Die Interpretation - auch in Bezug auf die Abstufung der Flächenanteile - bleibt aber weiterhin erforderlich.

6.2. Einflussfaktoren

Bei der nachfolgenden Diskussion zur Eignung der geomorphometrischen Parameter (Kap. 6.2.1) werden Abhängigkeiten vom Analysemasstab - soweit erforderlich - bereits aufgezeigt. Kap. 6.2.2 befasst sich mit weiteren Aspekten des Analysemasstabs in Bezug auf die Rasterauflösung und deren Zusammenspiel mit der Segmentierung.

6.2.1. Eignung (und Masstabsabhängigkeit) der geomorphometrischen Parameter

Hangneigung:

Mit dem Mittelwert und der Standardabweichung der Hangneigung werden viele Geländebereiche bereits richtig klassiert (vgl. **K25-1**, Abb. 41, S. 83: Gesamtgenauigkeit 75%, durchschnittliche Genauigkeit 72%). Dabei ist zu beachten, dass die Standardabweichung der Hangneigung ebenfalls als Rauigkeitsmass aufzufassen ist (*Berti et al., 2013*). Somit wird auch ein Teil der geometrischen Signatur berücksichtigt, der bei der Rauigkeit anhand der Eigenwertverhältnisse $\ln(S1/S2)$ bzw. $\ln(S2/S3)$ abgedeckt wird. Jedoch fehlt die Rauigkeitskomponente, welche durch Variationen der Hangexpositionsrichtung bedingt ist (*McKean & Roering, 2004*).

Das relativ gute Ergebnis kann mit den Feststellungen früherer Untersuchungen (*Roering et al., 2005; Korup, 2006; Crosta et al., 2013*) gemäss Kap. 2.4.2 interpretiert werden, wonach tiefgreifende Hanginstabilitäten zu einer Abflachung und Glättung von Talflanken bei grossräumiger

Betrachtung führen. Diese Beobachtung wird durch die statistische Auswertung der pixelbasierten Hangneigungswerte in Abb. 23 (S. 58) unterstützt.

Rauigkeit anhand des Eigenwertverhältnisses $\ln(S1/S2)$:

Im Vergleich mit der Hangneigung (Mittelwert und Standardabweichung) liefern Segment-Deskriptoren anhand des Eigenwertverhältnisses $\ln(S1/S2)$ je nach Analysemasstab etwas höhere oder niedrigere Genauigkeiten. Das beste Ergebnis (**K25-7**, Tab. 8: bei 13 x 13 Rasterzellen, 25m Rasterauflösung) ergibt eine Gesamtgenauigkeit von 77% und eine durchschnittliche Genauigkeit von 74%. Das Ergebnis ist zwar kartographisch nicht dargestellt, ist aber ähnlich wie Klassifikationsergebnis **K25-22** (Abb. 44, S. 88).

Vergleichswerte anhand derselben Genauigkeitsmasse liegen für die Rauigkeit anhand der «Eigenwert-Methode» aus anderen Studien nicht vor. Unabhängig davon lässt das Ergebnis aber die Beurteilung zu, dass diese Methode auch in Bezug auf die Erkennung tiefgreifender gravitativer Hangdeformationen und in Kombination mit objekt-basiertem Ansatz ansprechende Ergebnisse liefert. Dadurch wird der Nutzen dieses geomorphometrischen Parameters, wie er für pixel-basierte Analysen von erdstromartigen Hanginstabilitäten festgestellt wurde (*McKean & Roering, 2004; Berti et al., 2013*), grundsätzlich bestätigt. Ein wesentlicher Unterschied besteht aber im Analysemasstab: die optimale Fensterbreite von 325m liegt in einer anderen Größenordnung als die optimalen Analysemasstäbe bei *McKean & Roering (2004)* und *Berti et al. (2013)*, die zwischen 3 und 15m liegen (Tab. 4, S. 32). Dies wird wie folgt interpretiert:

- Bei den Analysen der kleineren, erdstromartigen Hanginstabilitäten basiert der «Erfolg» der Eigenwert-Methode vor allem auf der erhöhten kleinräumigen Rauigkeit der Hanginstabilität im Vergleich zur Umgebung (vgl. schattiertes Relief in Abb. 10, S. 22).
- Bei tiefgreifenden gravitativen Hangdeformation kommt eher der Effekt der grossräumigen «Glättung» zum tragen (vgl. vorangehender Abschnitt «Hangneigung» und Kap. 2.4.2), sodass ein größerer Betrachtungsmasstab wirksamer ist.

Dies liefert einen Erklärungsansatz für die weniger guten Klassifikationsergebnisse **K2-43** bis **K2-50** (Tab. 11, S. 92 und Abb. 42, S. 84), welche nur das Eigenwertverhältnis $\ln(S1/S2)$ bei einer Rasterauflösung von 2m berücksichtigen (Fensterbreiten von 18 bis 130m).

Kombination von Hangneigung und Rauigkeit anhand der Eigenwertverhältnisse $\ln(S1/S2)$ und $\ln(S2/S3)$:

Diese Feststellungen lassen in Bezug auf die kombinierte Verwendung von Hangneigung und Eigenwertverhältnissen weitere Interpretationen zu.

Kombiniert man die Segment-Deskriptoren des Eigenwertverhältnisses $\ln(S1/S2)$ gemäss oben erwähntem, optimalem Analysemasstab (13 x 13 Rasterzellen, 25m Rasterauflösung) mit jenen der Hangneigung (Mittelwert und Standardabweichung) bleiben die Klassierungsgenauigkeiten im Vergleich zum Ergebnis ohne Hangneigung praktisch unverändert (**K25-22 ~ K25-7**; Tab. 9 bzw. Tab. 8). Dies könnte ein Indiz dafür sein, dass mit der Hangneigung bzw. dem Eigenwertverhältnis auf grobem Betrachtungsmasstab tendenziell derselbe Effekt der grossräumigen Abflachung und Glättung (gemäss Ausführungen oben) berücksichtigt wird.

Bei kleineren Berechnungsfenstern für die Eigenwert-Methode führt die zusätzliche Berücksichtigung der Hangneigung hingegen zu teils deutlichen Verbesserungen im Vergleich zu den jeweiligen «Einzelbetrachtungen»:

- **K25-17 bis K25-19** im Vergleich zu **K25-2 bis K25-4** (Tab. 9 bzw. Tab. 8).
(Berechnungsfenster von 3 x 3 bis 7 x 7 Rasterzellen, 25m Rasterauflösung)
- **K2-57 bis K2-64** im Vergleich zu **K2-43 bis K2-50** (Tab. 11 bzw. Tab. 12)
(Berechnungsfenster von 9 x 9 bis 65 x 65 Rasterzellen, 2m Rasterauflösung)

Diese Angaben entsprechen Fensterbreiten zwischen 18 und 175m. Die Verbesserungen liegen in diesen Fällen bezüglich Gesamtgenauigkeit und durchschnittlicher Genauigkeit im Bereich von 5 bis 10%, beim Gesamtfehler-Index teilweise auch bei über 10%. Das beste Ergebnis wird erzielt bei zusätzlicher Berücksichtigung des Eigenwertverhältnisses $\ln(S2/S3)$ und einem Betrachtungs-
masstab von 5 x 5 Rasterzellen und 25m Rasterauflösung (**K25-31**, Tab. 9: Gesamtgenauigkeit 81%, durchschnittliche Genauigkeit 79%).

Umgekehrt sind die Ergebnisse (**K25-17 bis K25-19** bzw. **K2-57 bis K2-64**) in Bezug auf diese Genauigkeitsmasse auch um bis zu 5% besser, als wenn nur die Segment-Deskriptoren aufgrund der Hangneigung berücksichtigt werden (**K25-1**, Tab. 8 bzw. **K2-42**, Tab. 11).

Dies führt zu folgenden **Schlussfolgerungen** in Bezug auf die (kombinierte) Verwendung der Hangneigung und der Rauigkeit anhand der Eigenwert-Methode:

- 1) Durch die Berücksichtigung der Hangneigung (oder Eigenwertverhältnis $\ln(S1/S2)$ auf grobem Betrachtungsmasstab) wird vor allem dem Effekt der grossräumigen Abflachung (und Glättung) durch tiefgreifende gravitative Hangdeformationen Rechnung getragen.
- 2) Durch Berücksichtigung der Eigenwertverhältnisse (insbesondere $\ln(S1/S2)$) auf eher kleinräumigeren Analysemasstäben (Fensterbreite von einigen Zehnern bis weniger als 200m) wird zusätzlich der Effekt kleinräumigerer Rauigkeitsmuster erfasst. Diese können z.B. das Ergebnis von Morphostrukturen oder kupiertem Terrain (vgl. Kap. 2.1) sein.

- 3) Durch Kombination beider Faktoren wird die geometrische Signatur von tiefgreifenden gravitativen Hangdeformationen umfassender repräsentiert, was zu erhöhter Klassifikationsgenauigkeit führt.

Die Ergebnisse **K25-35** und **K2-78**, welche gemäss Kap. 5.4.3 die höchsten Klassifikationsgenauigkeiten für die jeweilige Rasterauflösung (25m und 2m) erzielen, bestätigen tendenziell diese Interpretation. In diesen Fällen werden gleichzeitig Mittelwert und Standardabweichung der Hangneigung sowie der Eigenwertverhältnisse auf allen untersuchten Betrachtungsmassstäben berücksichtigt.

Entsprechende Effekte von tiefgreifenden gravitativen Hangdeformationen auf verschiedenen Massstabsebenen sind in den **Geländequerschnitten** in Abb. 27 (S. 62) angedeutet. Parallelen dazu finden sich auch bei *Kalbermatten et al. (2012)*, der gestützt auf Spektral-Analysen verschiedene Prozessskalen für eine kleinere, erdstromartige Hanginstabilität beschreibt.

Eine Kombination von Neigung und Rauigkeitsmassen kommt auch bei den objekt-basierten Ansätzen von *van den Eeckhaut et al. (2012)* und *Li et al. (2015)* zur Anwendung. Jedoch werden dort keine Angaben zu Ergebnisabhängigkeiten aufgrund der jeweiligen geomorphometrischen Parameter und Analysemasstäbe gemacht.

«Richtungsabhängige Rauigkeit» und «Nackental-Index»:

Die hier neu eingeführten Parameter «Nackental-Index» und «richtungsabhängige Rauigkeit» bilden gewisse Elemente der geometrischen Signatur von tiefgreifenden gravitativen Hangdeformationen zutreffend ab. Insbesondere ist zu beobachten, dass Segmente im Bereich von talparallelen Morphostrukturen erhöhte Werte für beide Parameter aufweisen (Abb. 38, S. 78 sowie weitere Abbildungen in Kap. 5.3.2). Dies entspricht der ursprünglichen Idee gemäss Kap. 4.4.2.

Die «**richtungsabhängige Rauigkeit**» ermöglicht in Kombination mit der Hangneigung (als Funktion der mittleren Orientierung aller Normalvektoren innerhalb des Segments, Kap. 4.4.2) ähnliche Klassifikationsgenauigkeiten wie der Mittelwert und die Standardabweichung der pixel-basierten Hangneigung (**K25-1**, **K25-15** Tab. 8; **K2-42**, **K2-55**, Tab. 11). Eine effektive Verbesserung wird aber nicht erzielt.

Der «**Nackental-Index**» wird bei einer Rasterauflösung von 2m vor allem dadurch beeinträchtigt, dass anthropogene Merkmale (z.B. Dammschüttungen) im Bereich des Talbodens zu ähnlich hohen Werten wie im Zusammenhang mit Nackentälern führen (vgl. Kap. 5.3.2). Bei 25m ist die Rasterauflösung tendenziell zu grob um Nackentäler des Untersuchungsgebiets überhaupt zu

erkennen. Diese Nachteile führen dazu, dass die Klassifikation mit dem «Nackental-Index» nicht verbessert respektive bei einer Rasterauflösung von 25m sogar verschlechtert wird (Kap. 5.4.1).

6.2.2. Rasterauflösung und Segmentierung

Rasterauflösung:

Sowohl mit einer Rasterauflösung von 25m als auch mit 2m werden in den besten Fällen (**K25-35**, Tab. 9 resp. **K2-78**, Tab. 13) ansprechende Ergebnisse erzielt. Dennoch werden leicht höhere maximale Klassifikationsgenauigkeiten für eine Rasterauflösung von 25m (**K25-35**) im Vergleich zu 2m (**K2-78**) festgestellt. Diese Unterschiede betragen rund 3% für die Gesamtgenauigkeit und die durchschnittliche Genauigkeit sowie 5% für den Gesamtfehler-Index. Verschiedene Aspekte können dabei eine Rolle spielen:

- Kleinere absolute Bandbreite der berücksichtigten Betrachtungsmassstäbe für die Rauigkeitsberechnung anhand der Eigenwert-Methode bei 2m Rasterauflösung (**K2-78**: Fensterbreite 18m bis 130m) gegenüber 25m Rasterauflösung (**K25-35**: Fensterbreite 75 bis 425m)
- «Störfaktoren» bei höherer Auflösung des Geländemodells: zum Beispiel anthropogene Effekte, welche bei kleinräumiger Betrachtung zu ähnlichen Rauigkeiten führen wie kleinere Oberflächenerscheinungen von tiefgreifenden gravitativen Hangdeformationen (vgl. Abb. 30, S. 66). Entsprechende Effekte sind für die Untersuchung anderer Hanginstabilitätstypen ebenfalls bekannt (Kap. 2.5.1, z.B. *Booth et al. (2009)*).
- Zusammenspiel von Rasterauflösung und Segmentierungsergebnis (siehe nachfolgender Abschnitt)

Unabhängig vom Beitrag dieser Faktoren, deutet das Ergebnis darauf hin, dass der Vorteil von räumlich hochaufgelösten digitalen Geländemodellen, welcher bei der geomorphometrischen Analyse vieler kleinerer Hanginstabilitätstypen festgestellt wird (*Kasai et al. (2009)*, *Berti et al. (2013)*), bei grossräumigen, tiefgreifenden gravitativen Hangdeformationen weniger zum Tragen kommt. Verschiedene Einflüsse des Prozesses auf die geometrische Signatur (vgl. Kap. 2.4.2) werden auch mit der gröberen Rasterauflösung von 25m ausreichend erfasst.

Segmentierung:

Der quantitative Einfluss der Segmentierung auf die Klassifikationsergebnisse wird in der vorliegenden Arbeit nur angeschnitten. Dennoch liefert Kap. 5.4.2 gewisse Anhaltspunkte anhand des Zusammenspiels des Formparameters 'regularizer' und der Rasterauflösung (bei vergleichbarer Segmentgrösse).

Die besten Ergebnisse werden dabei mit tieferem 'regularizer' Wert (0.08) und einer Rasterauflösung von 25m erzielt. Dies entspricht dem Segmentierungsergebnis in Abb. 33 (S. 70), welches im Vergleich zur Segmentierung mit 'regularizer' = 1 eine flexiblere Anpassung an die Topographie zeigt, gegenüber dem entsprechenden Ergebnis mit Rasterauflösung 2m ('regularizer' = 0.08) aber einfachere Umrisse erzeugt.

Die vereinfachte Analyse deutet an, dass der Einfluss der Segmentierung auf die Klassifikationsergebnisse im Rahmen einer Weiterentwicklung des hier vorgestellten Ansatzes intensiver untersucht werden müsste. Allenfalls kommen dabei auch andere Segmentierungsalgorithmen in Frage. Neben dem Formparameter ('regularizer') ist auch der Einfluss des Grösßenparameters ('regionSize') zu analysieren. Entsprechende Untersuchungen des Klassifikationsergebnisses in Abhängigkeit der Segmentierung fehlen auch bei den anderen geomorphometrischen Untersuchungen mit objekt-basiertem Ansatz (*van den Eeckhaut et al., 2012; Li et al., 2015*).

Li et al. (2015) verwendet für die Klassifikation nur eine (manuell gewählte) Einstellung von Form- und Grösßenparametern (vgl. Kap. 2.4.3). Bei *van den Eeckhaut et al. (2012)* wird ein objektiveres Verfahren zur Bestimmung optimaler Segmentgrößen angewandt, welches jedoch nicht den Einfluss auf das Klassifikationsergebnis ermittelt. Das Verfahren strebt eine möglichst grosse Homogenität geomorphometrischer Eigenschaften (u.a. Rauigkeit, Neigung) innerhalb der einzelnen Segmente bei einer möglichst grossen Differenzierung gegenüber benachbarten Segmenten an. Der optimale Skalierungsfaktor ist gemäss dieser (geomorphometrischen) Untersuchung weniger eindeutig als bei entsprechenden Analysen mit optischen Sensoren (*Martha et al. (2011)*; Kap. 2.3.2).

6.3. Weitere Aspekte

6.3.1. 'Ground Truth'

In Kap. 3.1 wurde bereits erwähnt, dass vor allem bei der Erfassung von kleineren Gebieten mit «tiefgreifender gravitativer Hangdeformation» Abweichungen zwischen verschiedenen Datengrundlagen bestehen. In Kap. 6.1.2 wurde auch darauf hingewiesen, dass teilweise grössere zusammenhängende Flächen als «tiefgreifende gravitative Hangdeformationen» klassiert werden, die gemäss «Ground Truth» zum «übrigen Terrain» gehören. Abb. 46 zeigt in diesem Zusammenhang die Ergebnisse der SAR-Interferometrie (GeoCover Kanton Graubünden, 2017) des Untersuchungsgebiets zusammen mit der 'Ground Truth' gemäss Kap. 3.2.

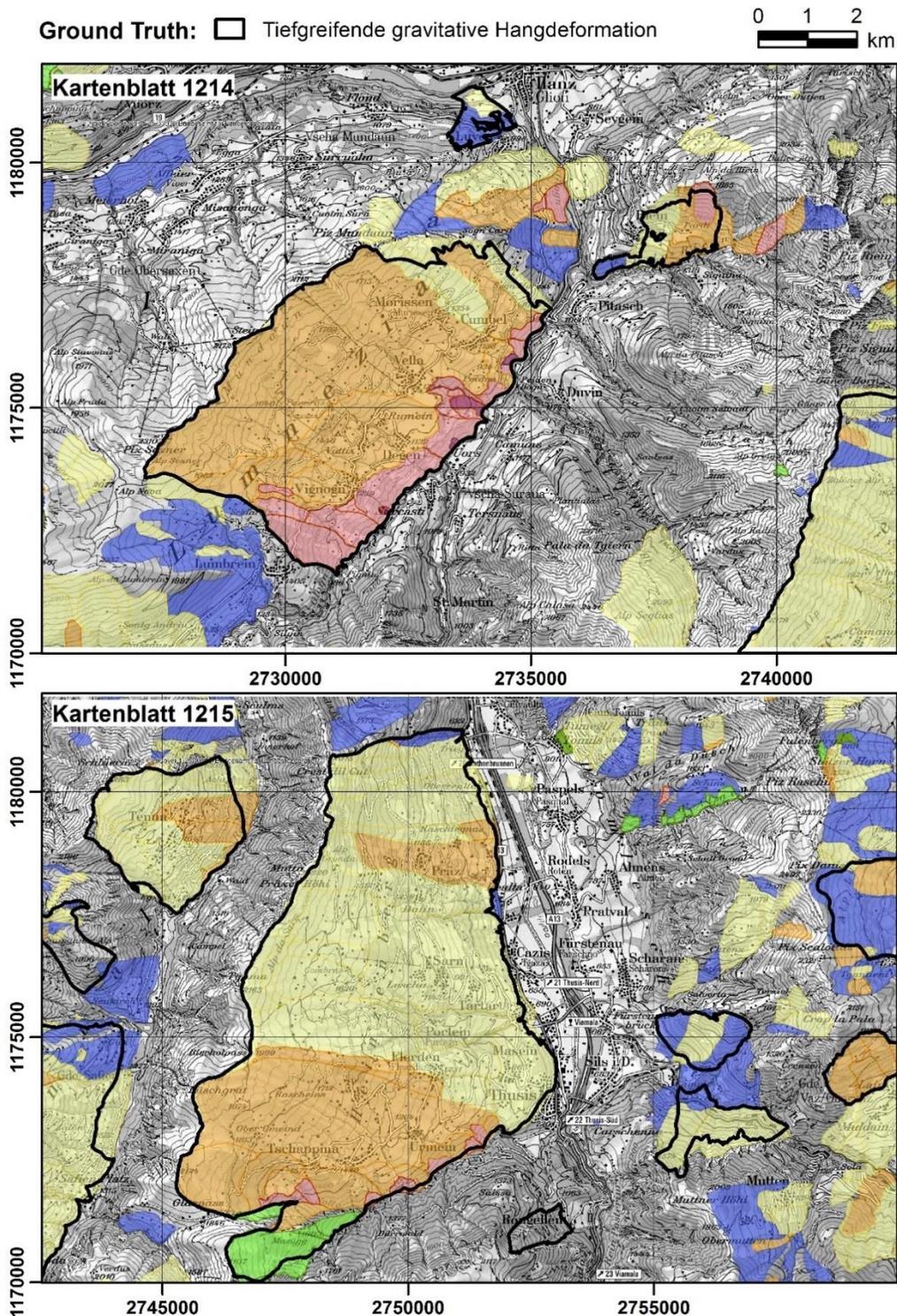


Abb. 46: Vergleich der 'Ground Truth' mit Ergebnissen der SAR-Interferometrie (GeoCover Kanton Graubünden, 2017). Jährliche Deformationsrate: gelb = 0-2 cm; orange = 2-10 cm; rot = 10-50 cm; dunkelrot > 50 cm; grün = aktiv, Deformationsrate nicht bestimmt; dunkelgrün = inaktiv; blau = Aktivität unsicher.

Dabei sind jährliche Deformationsraten angegeben. Teilweise ist unklar, ob oder wie aktiv ein Gebiet ist (blaue und grüne Flächen). Die Prozesse respektive Hanginstabilitätstypen, die sich

hinter den eingefärbten Flächen verbergen, sind nicht angegeben. Der Vergleich lässt aber erkennen, dass es sich bei vielen dieser Gebiete um «tiefgreifende gravitative Hangdeformationen» der 'Ground Truth' handelt.

Weiter zeigt sich, dass bei beiden Kartenblättern zusätzliche eingefärbte Flächen vorhanden sind, bei denen es sich - je nach räumlicher Ausdehnung - auch um «tiefgreifende gravitative Hangdeformationen» handeln kann. Die «bunte» Fläche im nordöstlichen Bereich des Kartenblatts 1215 ist - bei entsprechender Nahaufnahme - beispielsweise auch im Inventar von *Crosta et al. (2013)* kartiert (Abb. 1, S. 2). Der Vergleich mit Abb. 45 (S. 100) - sowie Abb. 41 bis Abb. 44 in Kap. 5.4 - ergibt, dass diese und weitere Flächen von Kartenblatt 1215 mit «Falschklassifikationen» dieser Arbeit übereinstimmen.

Diese Betrachtungen deuten an, dass neben der Wahl geeigneter geomorphometrischer Parameter, Analysemasstäbe und Segmentierungsparameter (Kap. 6.2) vor allem auch die **Qualität der 'Ground Truth'** einen wesentlichen Einfluss auf die «Wirksamkeit des Ansatzes» (Kap. 6.1) hat. Auswirkungen können sich bei verschiedenen Schritten des methodischen Ansatzes (vgl. Abb. 16, S. 41) bemerkbar machen:

- **Segmentierung:** grundsätzlich wird eine hohe geometrische Übereinstimmung von Segmenträndern und tatsächlichen Umrissen der Hanginstabilität angestrebt. Je genauer diese erfasst sind, umso besser können die Segmentierungsparameter kalibriert werden (vgl. Kap. 5.2). Dies ist auch im Hinblick auf allfällige automatisierte Verfahren wichtig.
- Die Genauigkeit der 'Ground Truth' beeinflusst die **Kalibrierung und Parametervalidierung** des Klassifikationsmodells (Kap. 4.5.2).
- Die Genauigkeit der 'Ground Truth' beeinflusst die Ergebnisse der **Evaluation und Sensitivitätsanalyse**. Zum Beispiel würde sich die «quantitative Wirksamkeit» (Kap. 6.1.1) verbessern, wenn die Fläche im nordöstlichen Bereich von Kartenblatt 1215 - wie bei *Crosta et al. (2013)* - als «tiefgreifende gravitative Hangdeformation» erfasst wäre.

Diese Abweichungen in den Datengrundlagen widerspiegeln unterschiedliche Erfassungsmethoden und Prozessabgrenzungen (vgl. Kap. 6.1.2). Eine «perfekte» 'Ground Truth' könnte die Klassifikationsergebnisse verbessern. Der Datensatz 'GeoCover' (Bundesamt für Landestopografie swisstopo, 2013) stellt hier aber die einzige Grundlage für das ganze Untersuchungsgebiet dar, welche i) den Hanginstabilitäten eine Prozessbezeichnung zuweist und ii) in einem ausreichend grossen Masstab und digital frei verfügbar ist. Ersteres fehlt bei der

SAR-Interferometrie (Abb. 46) sowie bei *Korup & Schlunegger (2009)*⁸. Letzteres fehlt bei *Crosta et al. (2013)*. Durch Kombination all dieser Datengrundlagen könnte die 'Ground Truth' im Untersuchungsgebiet potentiell verbessert und allenfalls auch das Inventar von *Crosta et al. (2013)* verfeinert werden. Der hier vorgestellte (geomorphometrische) Ansatz könnte dabei der Verifikation dienen.

6.3.2. Übertragbarkeit auf andere geologische Gebiete

Limitierungen der Übertragbarkeit geomorphometrischer Ansätze auf andere geologische Gebiete und Umgebungen wurden in früheren Studien (*van den Eeckhaut et al., 2012; Berti et al., 2013; Li et al., 2015*) sowie Kap. 2.5.1 angesprochen.

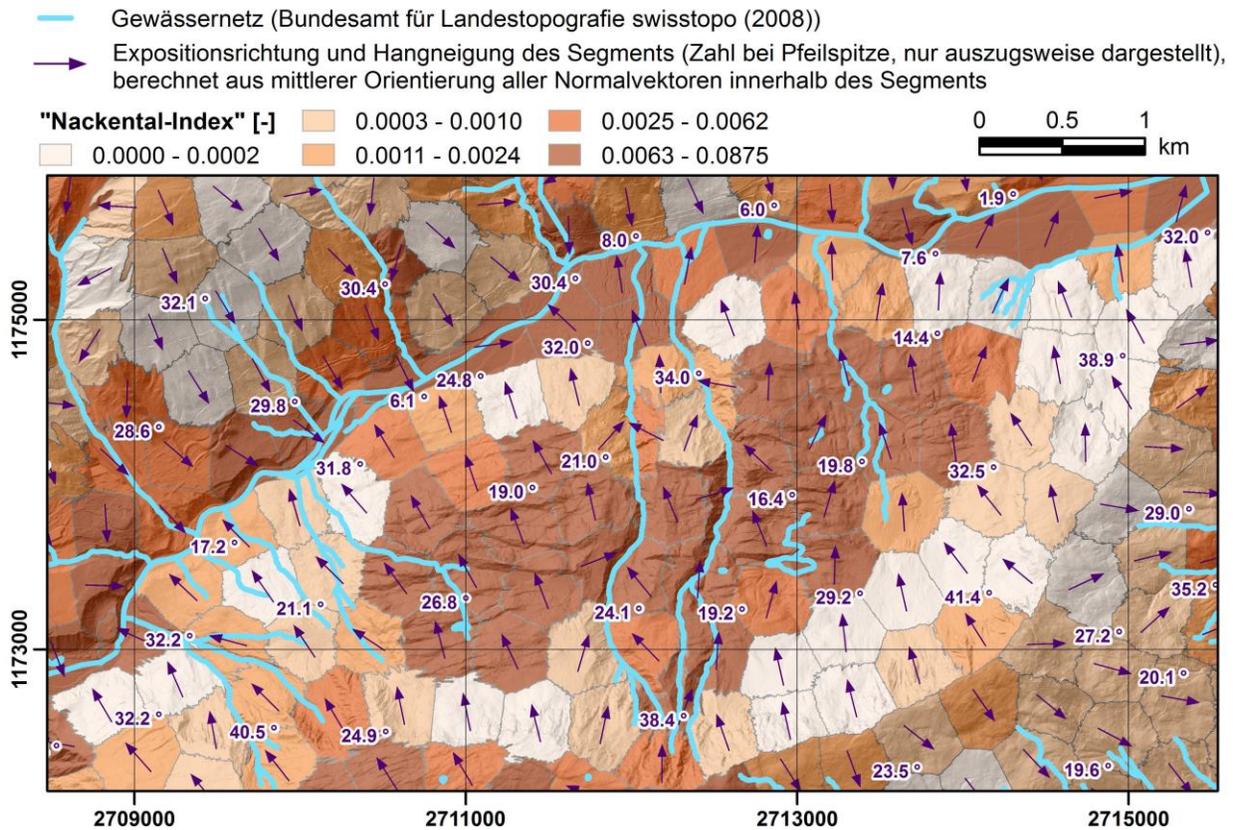
Abb. 46 zeigt in diesem Zusammenhang exemplarisch das Klassifikationsergebnis in einem Gebiet mit anderen, vorwiegend kristallinen Gesteinsformationen. Dabei handelt es sich um eine tiefgreifende gravitative Hangdeformation westlich des Hauptuntersuchungsgebiets (vgl. Kap. Abb. 12, S. 34).

Um den Umriss der Hanginstabilität anzudeuten, wird im unteren Bildausschnitt das Ergebnis der SAR-Interferometrie (GeoCover Kanton Graubünden, 2017) dargestellt (zusammenhängende gelbe, orange und grüne Fläche in der Bildmitte). Die als «tiefgreifende gravitative Hangdeformation» klassierten Segmente sind dabei mit schwarzem Umriss erkennbar. Die Klassifikation ergibt für den östlichen Bereich ansprechende Ergebnisse. Gegen Westen wird die «tiefgreifende gravitative Hangdeformation» aber praktisch nicht erkannt. Der gesamte Kernbereich der Hanginstabilität wird durch eine Abfolge Ost-West verlaufender Nackentäler dominiert (vgl. Darstellung des «Nackental-Index» im oberen Bildausschnitt), welche gegen Westen besonders markant sind (angedeutet im schattierten Relief). Diese Morphologie kommt in den Kartenblättern 1214 und 1215 zwar ebenfalls vor, ist aber weniger typisch und führt tendenziell zu erhöhten Rauigkeitswerten.

Dies kann erklären, weshalb das anhand von Kartenblatt 1214 kalibrierte Klassifikationsmodell K25-37 (Parameter gemäss Tab. 10, S. 91) diese Geländebereiche nicht richtig erkennt.

Daraus wird im Hinblick auf allfällige Erweiterungen des Ansatzes gefolgert, dass bei Klassifikationen in verschiedenen geologischen Gebieten auch entsprechend verschiedene **Kalibrierungs-/Validierungsgebiete** zu berücksichtigen sind.

⁸ Gemeinsame Betrachtung von tiefgreifenden gravitativen Hangdeformationen und Bergstürzen.



Klassifikationsergebnis Kartenblatt 1213 mit Modell K25-37: Tiefgreifende gravitative Hangdeformation

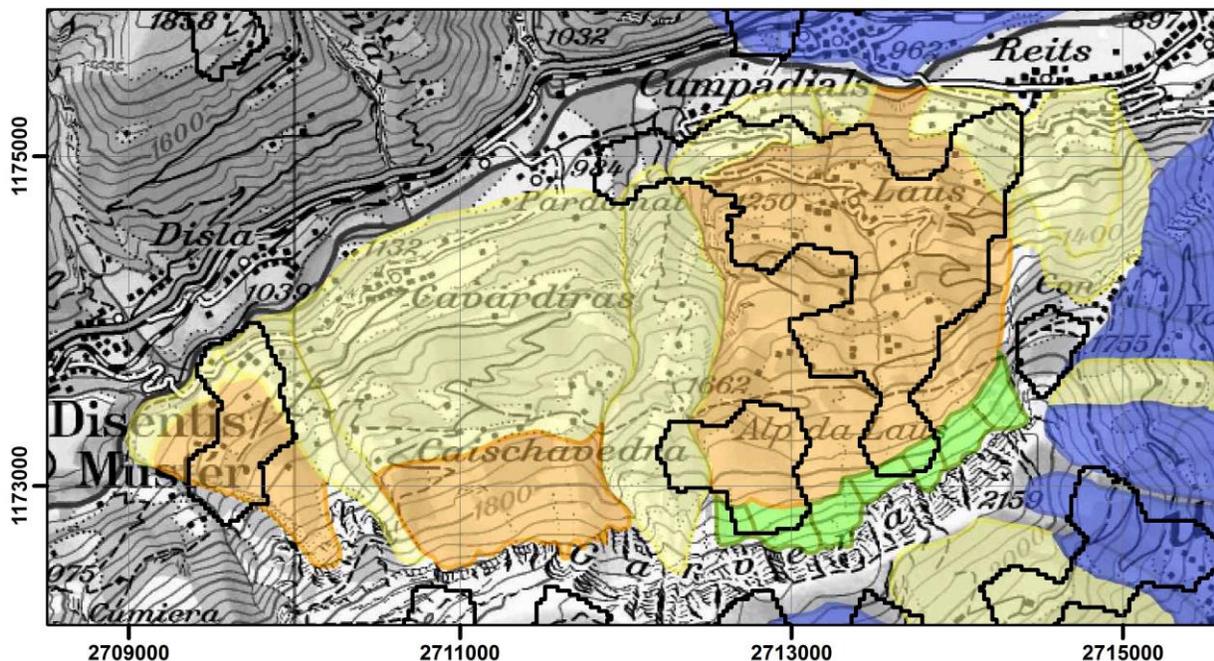


Abb. 47: Segmentierungs- und Klassifikationsergebnisse für Teilausschnitt des Kartenblatts 1213 (vgl. Abb. 12, S. 34). Oben: Segment-basierte geomorphometrischer Parameter anhand des Geländemodells swissALTI3D ('regionSize' = 200, 'regularizer' = 1), im Hintergrund das dazugehörige schattierte Relief. Unten: Vergleich des Klassifikationsergebnisses gemäss Kalibrierung K25-37 (vgl. Tab. 10, S. 91) mit jährlichen Deformationsbeträgen gemäss SAR-Interferometrie (GeoCover Kanton Graubünden, 2017): gelb = 0-2 cm; orange = 2-10 cm; grün = aktiv, Deformationsrate nicht bestimmt; blau = Aktivität unsicher.

7. Schlussfolgerungen

Als verbreiteter und langfristig wirksamer geomorphologischer Prozess hinterlassen tiefgreifende gravitative Hangdeformationen ihre Spuren im alpinen Landschaftsbild. Der Prozess sowie assoziierte Geländeformen werden im Rahmen aktueller geologischer Forschung untersucht. Das verbesserte Prozessverständnis wird in Kombination mit Fernerkundungsmitteln genutzt, um betroffene Gebiete zu erkennen und möglichst vollständig zu inventarisieren (*Crosta et al., 2013*). In diesem Kontext wurde hier untersucht, inwiefern eine solche Erkennung mittels geomorphometrischer Analyse von digitalen Geländemodellen und Algorithmen des maschinellen Lernens unterstützt werden kann. Ähnliche Ansätze wurden in früheren Studien für andere Hanginstabilitätstypen präsentiert. Nachfolgend wird zusammengefasst, was im Rahmen dieses Vorhabens erreicht wurde (Kap. 7.1), welche Erkenntnisse daraus resultieren (Kap. 7.2) und welche Aspekte für künftige Forschungsarbeiten interessant sein können (Kap. 7.3).

7.1. Erreichtes

- 1) Eine Übersicht zu bisherigen, verwandten methodischen Untersuchungen wurde erstellt und daraus ein Ansatz für die vorliegende Arbeit abgeleitet (geomorphometrische Parameter, Berücksichtigung verschiedener Analysemasstäbe, objekt-basierter Ansatz).
- 2) Algorithmen zur Extraktion **pixel-basierter geomorphometrischer Parameter** aus digitalen Geländemodellen (Rasterdaten) wurden mit Java implementiert (Hangneigung, Normalvektoren auf der Geländeoberfläche, Rauigkeit anhand der «Eigenwert-Methode» nach *Woodcock (1977)* für verschiedene Grössen von Betrachtungsfenstern).
- 3) Mit bestehenden MATLAB-Funktionen und aufbauend auf Übungscode des Kurses *GEO448 (2016)* wurden die weiteren Schritte des **maschinellen Lernens** implementiert:
 - i) (geomorphometrische) **Segmentierung** des Geländes
 - ii) Berechnung von Segment-Deskriptoren,
 - iii) Kalibrierung und Parametervalidierung des Klassifikationsalgorithmus 'Random Forest'
 - iv) **Klassifikation** («tiefgreifende gravitative Hangdeformation» vs. «übriges Terrain») in einem Testgebiet.
- 4) Zusätzliche segment-basierte geomorphometrische Parameter («richtungsabhängige Rauigkeit», «Nackental-Index»), die die Präsenz prozessspezifischer «Morphostrukturen» erfassen sollen, wurden konzeptionell hergeleitet und in MATLAB implementiert.
- 5) Die Klassifikationsergebnisse wurden anhand von Referenzflächen **evaluiert**. Dabei wurden verschiedene Genauigkeitsmasse ermittelt. Im besten Fall resultierte für die klassierten Flächen eine Gesamtgenauigkeit von 82% und Nutzergenauigkeiten von 77%

(«tiefgreifende gravitative Hangdeformationen») bzw. 83% («übriges Terrain»). Dabei ist zu berücksichtigen, dass es sich um ein Untersuchungsgebiet mit relativ homogenen geologischen Verhältnissen handelt.

- 6) Die **Sensitivität der Klassifikationsergebnisse** wurde in Bezug auf verschiedene geomorphometrische Parameter, verschiedene Analysemasstäbe (Rasterauflösung, Grösse von Berechnungsfenstern) und Segmentierungsergebnisse untersucht.
- 7) Die Ergebnisse wurden unter Berücksichtigung von geomorphologischen Eigenschaften der tiefgreifenden gravitativen Hangdeformationen und deren Umgebung interpretiert.
- 8) Ein Ansatz der Objekt-Aggregation auf Basis hydrologischer Teileinzugsgebiete wurde eingeführt.

Die Verwendung von Segmentierungs- und Klassifikationsalgorithmen ist im Zusammenhang mit der automatisierten geomorphometrischen Erkennung von Hanginstabilitäten noch relativ neu und ausbaufähig (*van den Eeckhaut et al., 2012; Li et al., 2015*). In dieser Hinsicht können folgende Beiträge dieser Arbeit genannt werden:

- Anwendung auf einen weiteren Hanginstabilitätstyp, in einer alpinen Umgebung,
- Auswirkungen der Rasterauflösung und des Analysemasstabs bei der Berechnung geomorphometrischer Parameter auf die Klassifikationsgenauigkeit.
- Verwendung weiterer, teils prozessspezifischer geomorphometrischer Parameter («richtungsabhängige Rauigkeit», «Nackental-Index»),
- Grobe Untersuchung des Zusammenspiels von Rasterauflösung und Segmentierung und deren Einfluss auf die Klassifikationsgenauigkeit.

7.2. Erkenntnisse

Potenzial des Ansatzes:

Das Ziel, tiefgreifende gravitative Hangdeformationen in einem automatisierten geomorphometrischen Verfahren zu erkennen, wurde in einem ähnlichen Umfang erreicht wie bei früheren Studien für andere Hanginstabilitätstypen. Viele grössere, zusammenhängende Gebiete werden richtig klassiert. Falschklassifikationen resultieren unter anderem aus überlagernden geomorphologischen Prozessen, insbesondere fluviale Einschnitte im Innern und am Rand von tiefgreifenden gravitativen Hangdeformationen. Daneben scheint die Frage der «Prozessabgrenzung» eine wichtige Rolle zu spielen: je nach Grösse einer «tiefgreifenden gravitativen Hangdeformation» kann sich eine andere «geometrische Signatur» (Neigung, Rauigkeit) entwickeln. Kleinere, lokale Gebiete wurden hier schlechter erkannt, als wenn ganze Talflanken erfasst sind.

Gebiete des «übrigen Terrains» werden relativ zuverlässig erkannt. Bei Geländebereichen, welche fälschlicherweise als «tiefgreifende gravitative Hangdeformationen» klassiert werden, handelt es sich oftmals um kleinere, isolierte Flächen (1 bis 3 Segmente), welche in Kombination mit dem geomorphologischen Kontext meist «enttarnt» werden können.

Die Klassifikationsergebnisse können nicht als Endergebnis einer Hanginstabilitätskartierung bewertet werden. Jedoch ist die Verwendung des Ansatzes wie folgt in Betracht zu ziehen:

- 1) Als **Grundlage für eine anschliessende manuelle Kartierung** von tiefgreifenden gravitativen Hangdeformationen (z.B. in Kombination mit schattiertem Gelände relief).
- 2) Verwendung zur **Verifikation oder Interpretation von bestehenden Karten/Inventaren**.

Der Bedarf für Letzteres wird auch durch hier diskutierte Unterschiede zwischen verschiedenen Datengrundlagen angedeutet (Datensatz GeoCover (Bundesamt für Landestopografie swisstopo, 2013), wissenschaftliche Publikationen, Auswertungen der SAR-Interferometrie).

Geomorphometrische Parameter und Massstabeffekte:

Die geomorphometrischen Parameter Hangneigung und Rauigkeit anhand der «Eigenwert-Methode» haben sich als nützlich erwiesen. Die Klassifikationsergebnisse werden insbesondere verbessert, wenn beide Parameter kombiniert berücksichtigt werden. Dabei spielen die Analysemasstäbe für die Berechnung der Parameter eine Rolle.

- Mit der Hangneigung und/oder der Rauigkeit auf größerem Betrachtungs massstab (Fensterbreiten von rund 300 bis 400m) scheinen vor allem grossräumige Abflachungs- und Glättungseffekte des Prozesses erfasst zu werden.
- Mit der Rauigkeit auf kleinräumigeren Betrachtungs massstäben (Fensterbreiten von einigen 10^1 bis weniger 200m) scheinen eher kleinräumigere Rauigkeitsmuster (z.B. im Zusammenhang mit Morphostrukturen) abgebildet zu werden.

Diese Interpretation wird durch frühere Untersuchungsergebnisse unterstützt (Crosta et al., 2013).

Aufgrund der grossen räumlichen Ausdehnung des Prozesses werden mit grober Auflösung (25m) vergleichbare bis bessere Ergebnisse erzielt als mit hoher Auflösung des Geländemodells (2m). Dies steht im Widerspruch zu früheren Untersuchungen mit kleineren Hanginstabilitätstypen und unterstreicht, dass prozessspezifische Eigenschaften beim methodischen Ansatz entsprechend zu reflektieren sind. Die in diesem Zusammenhang eingeführten geomorphometrischen Parameter haben jedoch keine Verbesserung der Klassifikationsergebnisse gebracht. Dies trifft insbesondere auf den «Nackental-Index» zu, der bei grober Rasterauflösung zu wenig sensitiv und bei feiner Rasterauflösung zu anfällig auf Verwechslungen mit anthropogenen Merkmalen ist.

Generelles Fazit zur Methodik:

Die Kombination des geomorphometrischen Ansatzes mit Methoden des **maschinellen Lernens** wird als insgesamt positiv beurteilt:

- Vorteile des objekt-basierten Ansatzes sind intuitiv nachvollziehbar (erhöhter räumlicher Kontext) und hier auch bei der Interpretierbarkeit der Klassifikationsergebnisse (viele zusammenhängende Flächen) bemerkbar.
- Das Konzept von *Pike (1988)*, wonach die geometrische Signatur «multivariat» ist (Hangneigung, Rauigkeit usw.) und sich auf mehreren Massstabsebenen abbildet, wird durch die vorliegenden Ergebnisse bestätigt. Der Klassifikationsalgorithmus 'Random Forest' liefert ein passendes Instrument, um diese verschiedenen Variablen zu berücksichtigen.

7.3. Ausblick

Der objekt-basierte Ansatz hat bei der geomorphometrischen Erkennung von Hanginstabilitäten schon gute Ansätze gezeigt (*van den Eeckhaut et al. (2012)*, *Li et al. (2015)*, teilweise diese Arbeit). Eine Weiterentwicklung kann daher als sinnvoll erachtet werden.

Ein Verbesserungspotenzial ist vor allem in Bezug auf die Wahl der **Segmentierungsparameter** (Grösse, Form) auszumachen (*van den Eeckhaut et al., 2012; Li et al., 2015*). Im Zusammenhang mit der geomorphometrischen Erkennung von Hanginstabilitäten liefert bisher nur *van den Eeckhaut et al. (2012)* einen Ansatz zur objektiveren Bestimmung des Grössenparameters⁹ (Kap. 6.2.2). Aus Sicht der vorliegenden Arbeit müsste dieser Ansatz aber so erweitert werden, dass die Kalibrierung der Segmentierungsparameter (auch) anhand der Klassifikationsergebnisse erfolgt. Beim Ansatz von *van den Eeckhaut et al. (2012)* stellt sich die Frage, ob die Homogenitäts- bzw. Differenzierungskriterien (anhand geomorphometrischer Parameter) zwangsläufig zum besten Ergebnis führen. Und wenn ja: Wie werden die geomorphometrischen Parameter bestimmt, die dabei zu berücksichtigen sind?

Weiter wäre als Erweiterung der vorliegenden Arbeit zu analysieren, inwiefern die Berechnung geomorphometrischer Parameter mit quadratischen Berechnungsfenstern in Kombination mit der Segmentierung Sinn macht, respektive welche Alternativen sich bieten. Ein Ansatz hier wäre die Berechnung innerhalb von «Kleinsegmenten» und anschliessende Aggregation zu grösseren

⁹ ~ Quantifizierung der «internen Homogenität» und «externen Differenzierung» der Segmente aufgrund geomorphometrischer Parameter (u.a. Hangneigung, Rauigkeit) in Abhängigkeit des Grössenparameters.

Segmenten (Kap. 6.1.2). Auch hier stellt sich die Frage, wie die optimalen Segmentierungsparameter gewählt werden.

Interessant wäre weiter die Untersuchung, wie sich die Wahl der **Kalibrierungsflächen** des Klassifikationsmodells auf die Klassifikationsgenauigkeiten auswirkt. Gerade auch im Hinblick darauf wäre im Fall des vorliegenden Untersuchungsgebiets eine Optimierung der 'Ground Truth' sinnvoll (Kap. 6.3.1).

Weitere **geomorphometrische Parameter** könnten im 'Random Forest' Modell berücksichtigt werden. Dafür sprechen nicht zuletzt die tendenziell verbesserten Klassifikationsgenauigkeiten bei grösserer Anzahl berücksichtigter Parameter in dieser Arbeit. Optionen dabei sind:

- Hydrologische Parameter (vgl. Kap. 2.4.2).
- Charakteristische topographische Wellenlängen gemäss Spektral-Analysen (*Booth et al., 2009; Kalbermatten et al., 2012*).

Im Sinne einer «Aufweichung des geomorphometrischen Ansatzes» wäre bei tiefgreifenden gravitativen Hangdeformationen auch eine Kombination mit Ergebnissen der SAR-Interferometrie interessant.

Weiter könnte der Ansatz der **Objekt-Aggregation** auf Basis hydrologischer Teileinzugsgebiete (Abb. 45, S. 100) oder alternative Ansätze diesbezüglich weiterverfolgt werden.

Eine Übertragung des Klassifikationsmodells auf **andere geologische Gebiete** ist prüfenswert. Aufgrund von Kap. 6.3.2 sind dafür aber separate Kalibrierungs-/Parametervalidierungsflächen im entsprechenden geologischen Gebiet vorzusehen. Bei einem Ausbau des Verfahrens würde der Klassifikationsalgorithmus 'Random Forest' die Möglichkeit bieten, die geologische Gebietszugehörigkeit durch ein nominales Merkmal zu berücksichtigen (Kap. 4.5.1).

Quellenverzeichnis

- Agliardi, F., Crosta, G., & Zanchi, A. (2001). Structural constraints on deep-seated slope deformation kinematics. *Engineering Geology*, 59 (1-2), 83–102.
- Agliardi, F., Crosta, G. B., Frattini, P., & Malusà, M. G. (2013). Giant non-catastrophic landslides and the long-term exhumation of the European Alps. *Earth and Planetary Science Letters*, 365, 263–274.
- Anders, N. S., Seijmonsbergen, A. C., & Bouten, W. (2011). Segmentation optimization and stratified object-based analysis for semi-automated geomorphological mapping. *Remote Sensing of Environment*, 115 (12), 2976–2985.
- Baldo, M., Biccocchi, C., Chiocchini, U., Giordan, D., & Lollino, G. (2009). LIDAR monitoring of mass wasting processes: The Radicofani landslide, Province of Siena, Central Italy. *Geomorphology*, 105 (3-4), 193–201.
- Barlow, J., Martin, Y., & Franklin, S. E. (2003). Detecting translational landslide scars using segmentation of Landsat ETM+ and DEM data in the northern Cascade Mountains, British Columbia. *Canadian Journal of Remote Sensing*, 29 (4), 510–517.
- Belgiu, M., & Drăguț, L. (2016). Random forest in remote sensing: A review of applications and future directions. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 114, 24–31.
- Berti, M., Corsini, A., & Daehne, A. (2013). Comparative analysis of surface roughness algorithms for the identification of active landslides. *Geomorphology*, 182, 1–18.
- Bonzanigo, L., Eberhardt, E., & Loew, S. (2007). Long-term investigation of a deep-seated creeping landslide in crystalline rock. Part I. Geological and hydromechanical factors controlling the Campo Vallemaggia landslide. *Canadian Geotechnical Journal*, 44 (10), 1157–1180.
- Booth, A. M., Roering, J. J., & Perron, J. T. (2009). Automated landslide mapping using spectral analysis and high-resolution topographic data: Puget Sound lowlands, Washington, and Portland Hills, Oregon. *Geomorphology*, 109 (3-4), 132–147.
- Booth, A. M., Roering, J. J., & Rempel, A. W. (2013). Topographic signatures and a general transport law for deep-seated landslides in a landscape evolution model. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 118 (2), 603–624.
- Boulesteix, A.-L., Janitza, S., Kruppa, J., & König, I. R. (2012). Overview of random forest methodology and practical guidance with emphasis on computational biology and bioinformatics. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Data Mining and Knowledge Discovery*, 2 (6), 493–507.

- Breiman, L. (2001). Random Forests. *Machine learning*, 45 (1), 5–32.
- Bundesamt für Landestopografie swisstopo. (2005). DHM25 - Das digitale Höhenmodell der Schweiz. Produktinformation. https://www.swisstopo.admin.ch/content/swisstopo-internet/de/home/products/height/dhm25/_jcr_content/contentPar/tabs/items/dokumente/tabPar/downloadlist/downloadItems/868_1464696772548.download/dhm25infode.pdf, zuletzt geprüft am: 22.01.2017.
- Bundesamt für Landestopografie swisstopo. (2008). VECTOR25 - Topografisches Landschaftsmodell TLM, Releasebericht 2008.
- Bundesamt für Landestopografie swisstopo. (2011). Topografische Landeskarte 1:100'000, digitale Pixelkarte, Blatt 38 Panixerpass.
- Bundesamt für Landestopografie swisstopo. (2013). GeoCover Vektordatensatz. Produktbeschreibung. https://www.swisstopo.admin.ch/content/swisstopo-internet/de/topics/geology/geolocial-data/atlas.download/swisstopo-internet/de/publications/lg-publications/GeoCover_2013_Flyer_A3.pdf, zuletzt geprüft am: 19.01.2017.
- Bundesamt für Landestopografie swisstopo. (2014). VECTOR200 - Topografisches Landschaftsmodell TLM, Bericht Ausgabe 2014.
- Bundesamt für Landestopografie swisstopo. (2016). swissALTI3D - Das hochaufgelöste Terrainmodell der Schweiz. Produktinformation. https://www.swisstopo.admin.ch/content/swisstopo-internet/de/home/products/height/alti3d/_jcr_content/contentPar/tabs/items/dokumente/tabPar/downloadlist/downloadItems/846_1464690554132.download/swissalti3ddetaillierteproduktinfobarrierefrei20160316de.pdf, zuletzt geprüft am: 27.10.2016.
- Bundesamt für Umwelt BAFU. (2012). EZGG-CH Einzugsgebietgliederung Schweiz. Produktdokumentation, Ausgabe 2012.
- Bundesamt für Umwelt BAFU. (2014). "Massenbewegungen: Radarwellen erkennen Unsichtbares". <http://www.bafu.admin.ch/naturgefahren/14144/14145/14150/>, letzte Aktualisierung: 12.02.2014.
- Bundesamt für Umwelt BAFU. (2015). Überwachung von Rutschungen. <http://www.bafu.admin.ch/naturgefahren/14188/15763/15765/>, letzte Aktualisierung: 12.06.2015.
- Bundesamt für Umwelt BAFU. (2016). Schutz vor Massenbewegungsgefahren. Vollzugshilfe für das Gefahrenmanagement von Rutschungen, Steinschlag und Hangmuren. Umwelt-Vollzug Nr. 1608.

- Burrough, P. A., McDonnell, R. A., & Lloyd, C. D. (2015). *Principles of Geographical Information Systems*. 3. Auflage. Oxford University Press, Oxford.
- California Department of Conservation. (2013). *Factors Affecting Landslides in Forested Terrain*. (Note 50).
- Carter, W., Shrestha, R., Tuell, G., Bloomquist, D., & Sartori, M. (2001). Airborne laser swath mapping shines new light on Earth's topography. *Eos, Transactions American Geophysical Union*, 82 (46), 549.
- Chen, W., Li, X., Wang, Y., Chen, G., & Liu, S. (2014). Forested landslide detection using LiDAR data and the random forest algorithm: A case study of the Three Gorges, China. *Remote Sensing of Environment*, 152, 291–301.
- Crosta, G. B., Frattini, P., & Agliardi, F. (2013). Deep seated gravitational slope deformations in the European Alps. *Tectonophysics*, 605, 13–33.
- Daehne, A., & Corsini, A. (2013). Kinematics of active earthflows revealed by digital image correlation and DEM subtraction techniques applied to multi-temporal LiDAR data. *Earth Surface Processes and Landforms*, 38 (6), 640–654.
- Derron, M.-H., & Jaboyedoff, M. (2010). Preface "LIDAR and DEM techniques for landslides monitoring and characterization". *Natural Hazards and Earth System Science*, 10 (9), 1877–1879.
- ESRI. (2016). *ArcGIS Desktop: Release 10.4. Help Library: "How Aspect works"*. Redlands, CA: Environmental Systems Research Institute.
- Frattini, P., Crosta, G., & Allievi, J. (2013). Damage to Buildings in Large Slope Rock Instabilities Monitored with the PSInSAR™ Technique. *Remote Sensing*, 5 (10), 4753–4773.
- GEO123. (2012). *Grundlagen Fernerkundung, Vorlesungsunterlagen zur Lehrveranstaltung am Geographischen Institut der Universität Zürich*, Zürich.
- GEO448. (2016). *Machine Learning for Geosciences. Übungen zur Lehrveranstaltung am Geographischen Institut der Universität Zürich*, Zürich.
- GeoCover Kanton Graubünden. (2017). *Kantonale Verwaltung Graubünden, GIS-Kompetenzzentrum (Hrsg.). Zusatzinformationen Massenbewegungen (INSAR)*. http://map.geo.gr.ch/gr_webmaps/wsgi/theme/GeoCover, zuletzt geprüft am: 13.01.2017.
- Glenn, N. F., Streutker, D. R., Chadwick, D. J., Thackray, G. D., & Dorsch, S. J. (2006). Analysis of LiDAR-derived topographic information for characterizing and differentiating landslide morphology and activity. *Geomorphology*, 73 (1-2), 131–148.

- Gritzner, M., Marcus, W., Aspinall, R., & Custer, S. G. (2001). Assessing landslide potential using GIS, soil wetness modeling and topographic attributes, Payette River, Idaho. *Geomorphology*, 37 (1-2), 149–165.
- Guzzetti, F., Mondini, A. C., Cardinali, M., Fiorucci, F., Santangelo, M., & Chang, K.-T. (2012). Landslide inventory maps: New tools for an old problem. *Earth-Science Reviews*, 112 (1-2), 42–66.
- Guzzetti, F., Reichenbach, P., Cardinali, M., Galli, M., & Ardizzone, F. (2005). Probabilistic landslide hazard assessment at the basin scale. *Geomorphology*, 72 (1-4), 272–299.
- Haneberg, W. C., Cole, W. F., & Kasali, G. (2009). High-resolution lidar-based landslide hazard mapping and modeling, UCSF Parnassus Campus, San Francisco, USA. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 68 (2), 263–276.
- Horn, B. (1981). Hill shading and the reflectance map. *Proceedings of the IEEE*, 69 (1), 14–47.
- Huder, J. (1976). Creep in Bundner Schist In: Janbu, N., Jorstad, F., Kjaernsli, B. (Hrsg.). Laurits Bjerrum Memorial Volume. Norwegian Geotechnical Institute, Oslo, pp. 125–153.
- Hungr, O., Leroueil, S., & Picarelli, L. (2014). The Varnes classification of landslide types, an update. *Landslides*, 11 (2), 167–194.
- Jaboyedoff, M., Penna, I., Pedrazzini, A., Baron, I., & Crosta, G. B. (2013). An introductory review on gravitational-deformation induced structures, fabrics and modeling. *Tectonophysics*, 1–12.
- Jaboyedoff, M., Oppikofer, T., Abellán, A., Derron, M.-H., Loye, A., Metzger, R., & Pedrazzini, A. (2012). Use of LIDAR in landslide investigations: A review. *Natural Hazards*, 61 (1), 5–28.
- Jama. (2016). Java-Programmpaket 'Jama'. <http://math.nist.gov/javanumerics/jama/doc/>, zuletzt geprüft am: 24.01.2017.
- James, G., Witten, D., Hastie, T., & Tibshirani, R. (2013). *An Introduction to Statistical Learning with Applications in R*. Springer, New York.
- Joyce, K. E., Samsonov, S. V., Levick, S. R., Engelbrecht, J., & Belliss, S. (2014). Mapping and monitoring geological hazards using optical, LiDAR, and synthetic aperture RADAR image data. *Natural Hazards*, 73 (2), 137–163.
- Kalbermatten, M., van de Ville, D., Turberg, P., Tuia, D., & Joost, S. (2012). Multiscale analysis of geomorphological and geological features in high resolution digital elevation models using the wavelet transform. *Geomorphology*, 138 (1), 352–363.
- Kasai, M., Ikeda, M., Asahina, T., & Fujisawa, K. (2009). LiDAR-derived DEM evaluation of deep-seated landslides in a steep and rocky region of Japan. *Geomorphology*, 113 (1-2), 57–69.

- Korup, O. (2006). Effects of large deep-seated landslides on hillslope morphology, western Southern Alps, New Zealand. *Journal of Geophysical Research*, 111 (F1).
- Korup, O., Densmore, A. L., & Schlunegger, F. (2010). The role of landslides in mountain range evolution. *Geomorphology*, 120 (1-2), 77–90.
- Korup, O., & Schlunegger, F. (2009). Rock-type control on erosion-induced uplift, eastern Swiss Alps. *Earth and Planetary Science Letters*, 278 (3-4), 278–285.
- Li, X., Cheng, X., Chen, W., Chen, G., & Liu, S. (2015). Identification of Forested Landslides Using LiDar Data, Object-based Image Analysis, and Machine Learning Algorithms. *Remote Sensing*, 7 (8), 9705–9726.
- Lin, C.-W., Tseng, C.-M., Tseng, Y.-H., Fei, L.-Y., Hsieh, Y.-C., & Tarolli, P. (2013). Recognition of large scale deep-seated landslides in forest areas of Taiwan using high resolution topography. *Journal of Asian Earth Sciences*, 62, 389–400.
- Liu, C., Frazier, P., & Kumar, L. (2007). Comparative assessment of the measures of thematic classification accuracy. *Remote Sensing of Environment*, 107 (4), 606–616.
- Martha, T. R., Kerle, N., van Westen, C. J., Jetten, V., & Kumar, K. V. (2011). Segment Optimization and Data-Driven Thresholding for Knowledge-Based Landslide Detection by Object-Based Image Analysis. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 49 (12), 4928–4943.
- MathWorks. (2016). Documentation 'TreeBagger. Create bag of decision trees'. <https://ch.mathworks.com/help/stats/treebagger.html>, zuletzt geprüft am: 18.01.2017.
- McKean, J., & Roering, J. (2004). Objective landslide detection and surface morphology mapping using high-resolution airborne laser altimetry. *Geomorphology*, 57 (3-4), 331–351.
- Pánek, T., & Klimeš, J. (2016). Temporal behavior of deep-seated gravitational slope deformations: A review. *Earth-Science Reviews*, 156, 14–38.
- Pike, R. J. (1988). The geometric signature: Quantifying landslide-terrain types from digital elevation models. *Mathematical Geology*, 20 (5), 491–511.
- Pike, R. J., Evans, I. S., & Hengl, T. (2008). Geomorphometry: A Brief Guide In: Hengl, T., & Reuter, H. I. (Hrsg.). *Geomorphometry Concepts, Software, Applications*. Developments in Soil Science, 33, pp. 3–30.
- Prokop, A., & Panholzer, H. (2009). Assessing the capability of terrestrial laser scanning for monitoring slow moving landslides. *Natural Hazards and Earth System Science*, 9 (6), 1921–1928.

- Roering, J. J., Kirchner, J. W., & Dietrich, W. E. (2005). Characterizing structural and lithologic controls on deep-seated landsliding: Implications for topographic relief and landscape evolution in the Oregon Coast Range, USA.
- Roering, J. J., Mackey, B. H., Marshall, J. A., Sweeney, K. E., Deligne, N. I., Booth, A. M., Handwerger, A. L., & Cerovski-Darriau, C. (2013). 'You are HERE': Connecting the dots with airborne lidar for geomorphic fieldwork. *Geomorphology*, 200, 172–183.
- Rott, H., & Nagler, T. (2006). The contribution of radar interferometry to the assessment of landslide hazards. *Advances in Space Research*, 37 (4), 710–719.
- Sappington, J. M., Longshore, K., & Thompson, D. B. (2007). Quantifying Landscape Ruggedness for Animal Habitat Analysis: A Case Study Using Bighorn Sheep in the Mojave Desert. *Journal of Wildlife Management*, 71 (5), 1419–1426.
- Schulz, W. H. (2007). Landslide susceptibility revealed by LIDAR imagery and historical records, Seattle, Washington. *Engineering Geology*, 89 (1-2), 67–87.
- Schwab, M., Schlunegger, F., Schneider, H., Stöckli, G., & Rieke-Zapp, D. (2009). Contrasting sediment flux in Val Lumnezia (Graubünden, Eastern Swiss Alps), and implications for landscape development. *Swiss Journal of Geosciences*, 102 (2), 211–222.
- Strozzi, T., Ambrosi, C., & Raetzo, H. (2013). Interpretation of Aerial Photographs and Satellite SAR Interferometry for the Inventory of Landslides. *Remote Sensing*, 5 (5), 2554–2570.
- Strozzi, T., Delaloye, R., Kääh, A., Ambrosi, C., Perruchoud, E., & Wegmüller, U. (2010). Combined observations of rock mass movements using satellite SAR interferometry, differential GPS, airborne digital photogrammetry, and airborne photography interpretation. *Journal of Geophysical Research*, 115 (F1).
- Stumpf, A., & Kerle, N. (2011). Object-oriented mapping of landslides using Random Forests. *Remote Sensing of Environment*, 115 (10), 2564–2577.
- Tarolli, P. (2014). High-resolution topography for understanding Earth surface processes: Opportunities and challenges. *Geomorphology*, 216, 295–312.
- Tarolli, P., Sofia, G., & Dalla Fontana, G. (2012). Geomorphic features extraction from high-resolution topography: Landslide crowns and bank erosion. *Natural Hazards*, 61 (1), 65–83.
- van den Eeckhaut, M., Poesen, J., Verstraeten, G., Vanacker, V., Nyssen, J., Moeyersons, J., van Beek, L. P. H., & Vandekerckhove, L. (2007). Use of LIDAR-derived images for mapping old landslides under forest. *Earth Surface Processes and Landforms*, 32 (5), 754–769.

- van den Eeckhaut, M., Kerle, N., Poesen, J., & Hervás, J. (2012). Object-oriented identification of forested landslides with derivatives of single pulse LiDAR data. *Geomorphology*, 173-174, 30–42.
- Varnes, D. J. (1978). Slope movement types and processes. In: Schuster, R. L., & Krizek, R. J. (Hrsg.). *Landslides: Analysis and Control*. Special Report 176, Transportation Research Board, Commission on Sociotechnical Systems, National Research Council. National Academy of Sciences, Washington D.C., pp. 11–33.
- Ventura, G., Vilaro, G., Terranova, C., & Sessa, E. B. (2011). Tracking and evolution of complex active landslides by multi-temporal airborne LiDAR data: The Montaguto landslide (Southern Italy). *Remote Sensing of Environment*, 115 (12), 3237–3248.
- VLFeat. (2015). MATLAB toolbox, SLIC superpixels (Simple Linear Iterative Clustering). <http://www.vlfeat.org/api/slic.html>., zuletzt geprüft am: 17.11.2016.
- Woodcock, N. H. (1977). Specification of fabric shapes using an eigenvalue method. *Geological Society of America Bulletin*, 88 (9), 1231.
- Zevenbergen, L. W., & Thorne, C. R. (1987). Quantitative analysis of land surface topography. *Earth Surface Processes and Landforms*, 12 (1), 47–56.

Persönliche Erklärung

Ich erkläre hiermit, dass ich die vorliegende Arbeit selbständig verfasst und die den verwendeten Quellen wörtlich oder inhaltlich entnommenen Stellen als solche kenntlich gemacht habe.

Zürich, 27.01.2017

Andreas Ludwig