LANDESAMT FÜR UMWELT,
LANDWIRTSCHAFT
UND GEOLOGIE

Freistaat
SACHSEN

Gefahrenhinweiskarte Sachsen

Schriftenreihe, Heft 9/2025

Entwicklung einer Methodik zur Beurteilung der Gefährdung durch Massenbewegungen für den Freistaat Sachsen

M. Sc. Lena-Sophie Franz, Prof. Dr. Christoph Butscher
TU Bergakademie Freiberg Institut für Geotechnik, Lehrstuhl für Ingenieurgeologie und Umweltgeotechnik

Inhaltsverzeichnis

1 Ausgangslage 8

2 Literaturrecherche 10

2.1 Vorbemerkung 10

2.2 Definition GHK 10

2.3 Recherchevorgang 10

2.4 Methoden/Ansätze zur Erstellung einer GHK 12

2.5 GHK in Deutschland und anderen Ländern 15

3 Methodenauswahl für den Freistaat Sachsen 16

3.1 Vorbemerkung 16

3.2 Ausgangs- und Datengrundlage 16

3.3 Übertragung der Vorgehensweise anderer Bundesländer 17

3.4 Vorgehensweise für Sachsen 19

3.4.1 Rutschungen 19

3.4.2 Stein- und Blockschlag 20

3.4.3 Felssturz 21

3.4.4 Murgang 22

3.5 Abschluss Methodenauswahl 24

4 Pilotstudie 25

4.1 Vorbemerkung 25

4.2 Pilotgebiet 1: Kirnitzschtal 25

4.2.1 Ausgangssituation 25

4.2.2 Datengrundlage und Datenaufbereitung 26

4.2.3 Rutschungen 27

4.2.4 Stein- und Blockschläge 31

4.2.5 Felsstürze 36

4.2.6 Murgänge 39

4.3 Pilotgebiet 2: Müglitztal 42

4.3.1 Ausgangssituation 42

4.3.2 Datengrundlage und Datenaufbereitung 44

4.3.3 Rutschungen 45

4.3.4 Stein- und Blockschläge 48

4.3.5 Felsstürze 51

4.3.6 Murgänge 51

5 Generalisierung der Methodik 56

5.1 Vorbemerkung 56
5.2 Bewertung 56
5.2.1 Allgemein 56
5.2.2 Rutschungen 56
5.2.3 Stein- und Blockschläge 57
5.2.4 Felsstürze 63
5.2.5 Murgänge 64
5.3 Leitfaden/Handbuch 68
5.4 Übertragung der Methodik 68
6 Zusammenfassung 70
Literaturverzeichnis 72
Anhang 73
A 1 Literaturliste Recherche 73
A 2 Webauftritte der Geologischen Dienste 75

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Methoden zur Erstellung einer Gefahrenhinweiskarte 13
Abbildung 2: Vor- und Nachteile der methodischen Ansätze 14
Abbildung 3: Ereigniskataster für den Freistaat Sachsen 17
Abbildung 4: Arbeitsschema zur Beurteilung der Gefährdung durch Rutschungen 20
Abbildung 5: Arbeitsschema zur Beurteilung der Gefährdung durch Stein-/Blockschläge 21
Abbildung 6: Arbeitsschema zur Beurteilung der Gefährdung durch Felsstürze 22
Abbildung 7: Arbeitsschema zur Beurteilung der Gefährdung durch Murgänge 23
Abbildung 8: Pilotgebiet 1 – Kirnitzschtal und Umgebung im geographischen Überblick 25
Abbildung 9: Pilotgebiet 1 - Kirnitzschtal und Umgebung im geologischen Überblick 26
Abbildung 10: Rutschungen im Schattenbild - Pilotgebiet 1 28
Abbildung 11: Rutschstruktur aus Schattenbild im PG 1 29
Abbildung 12: PG 1 - Gefahrenhinweiskarte Rutschungen 30
Abbildung 13: Dispositionskarte Stein- und Blockschlag PG 1 33
Abbildung 14: Sturzweitenmodellierung Profillinie 14 in RocFall 34
Abbildung 15: Sturzweitenmodellierung Profillinie 14 in QGIS 34
Abbildung 16: Profillinien der Sturzweitenmodellierung im PG 1 35
Abbildung 17: Pauschalwinkelmodellierung Felssturz Nr. 367 37
Abbildung 18: Gefahrenhinweiskarte Stein-/Blockschlag/Felssturz PG 1 38
Abbildung 19: GIS-gestützte Identifizierung von Murgängen anhand verschiedener Merkmale im PG 1 40
Abbildung 20: Gefahrenhinweiskarte Murgang PG 1 41
Abbildung 21: Pilotgebiet 2 - Müglitztal und Umgebung im geographischen Überblick 43
Abbildung 22: Pilotgebiet 2 - Müglitztal und Umgebung im geologischen Überblick 44
Abbildung 23: Beispiele der manuellen Erfassung von Rutschungen im PG 2 46
Abbildung 24: Gefahrenhinweiskarte Rutschungen PG 2 47
Abbildung 25: Dispositionskarte Stein- und Blockschlag PG 2 - Methodenvergleich 49
Abbildung 26: Gefahrenhinweiskarte Stein- und Blockschlag PG 2 - Methodenvergleich 50
Abbildung 27: Beispiele der manuellen Erfassung von Muren im PG 2 53
Abbildung 28: Ausschnitt der halbautomatischen Erfassung von Muren im PG 2 54
Abbildung 29: Gefahrenhinweiskarte Murgang PG 2 - Methodenvergleich 55
Abbildung 30: Abgleich GHK Stein-/Blockschlag mit Ereigniskataster Sturzprozesse 59
Abbildung 31: Beispiele des Abgleichs von Kataster und GHK Stein-/Blockschlag im PG 1 60
Abbildung 32: Vergleich der GHK Stein-/Blockschlag nach zwei methodischen Ansätzen im PG 1 61
Abbildung 33: Beispiele des Abgleichs von Kataster und GHK Stein-/Blockschlag im PG 2 63

Abbildung 34: Abgleich von halbautomatischer GHK Murgang mit Ereigniskataster Fließprozesse 66
Abbildung 35: Beispiele des Abgleichs von Kataster und halbautomatischer GHK Murgang im PG 1 67
Abbildung 36: Übertragung der Methodik - Blattschnitte 69

Abkürzungsverzeichnis

3d	3-dimensional
AP	Arbeitspaket
BGR	Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe
BW	Baden-Württemberg
BY	Bayern
DGM	Digitales Geländemodell
DHHN	Deutsches Haupthöhennetz (Höhenreferenzsystem)
DOP	Digitale Orthofotos
DTK	Digitale Topographische Karte
GeoSN	Landesamt für Geobasisinformation Sachsen
GHK	Gefahrenhinweiskarte
GIS	Geoinformationssystem
GK	Geologische Karte
GPP	Gravitational Process Path (SAGA GIS Werkzeug)
KNN	Künstliche Neuronale Netzwerke
LfU	Bayerisches Landesamt für Umwelt
LfULG	Sächsisches Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie
LSC	Laserscandaten
MABEIS	Massenbewegungs-Informationssystem, Projekt Rheinland-Pfalz
MB	Massenbewegung
PG	Pilotgebiet
QGIS	Quantum GIS
SAGA	System for Automated Geoscientific Analyses
SGD	Staatlich Geologische Dienste
TK	Topographische Karte
TU	Technische Universität

1 Ausgangslage

Das Sächsische Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie (LfULG) hat den Lehrstuhl Ingenieurgeologie und Umweltgeotechnik des Instituts für Geotechnik der TU Bergakademie Freiberg beauftragt, das Forschungs- und Entwicklungsprojekt mit dem Kurztitel "Gefährdungsbeurteilung Massenbewegungen" zu bearbeiten.

Massenbewegungen (u. a. Steinschlag, Rutschungen) gefährden Sachwerte wie Infrastruktur, Bebauung sowie land- und forstwirtschaftlich genutzte Flächen, aber auch die Unversehrtheit von Personen. Insbesondere bei ausgeprägtem Relief, wie z. B. in eng eingeschnittenen Flusstälern der Mittelgebirge, treten immer wieder Schäden durch Massenbewegungen auf. Aufgrund des prognostizierten Klimawandels mit vermehrten und intensiveren Wetterereignissen als Auslöser von Massenbewegungen ist zukünftig mit einer Häufung von Schadensereignissen zu rechnen.

Das Sächsische Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie dokumentiert bekanntgewordene Ereignisse und stellt Expertise bei der Gefährdungsbeurteilung an auffällig gewordenen Stellen zur Verfügung. Gefahrenhinweiskarten können hingegen für große Gebiete eine Übersicht über die Gefährdung durch Massenbewegungen geben und damit eine wichtige fachliche Grundlage bei der Raum- und Flächennutzungsplanung bieten, um Schäden zu verhindert oder zumindest zu minimieren. Eine solche Übersicht in regionalem Maßstab existiert in Sachsen jedoch bislang nicht.

Eine einheitliche Methodik zur Erstellung von Gefahrenhinweiskarten ist nicht etabliert, jedoch haben die staatlichen geologischen Dienste in Deutschland Mindeststandards definiert (AD-HOC-ARBEITSGRUPPE GEOLOGIE, 2016). Die Vorgehensweise und Auswahl der Methodik hängt einerseits von einer vorhandenen oder zu erhebenden Datengrundlage ab, wobei ein Kosten-Nutzen-Verhältnis zu berücksichtigen ist. Andererseits sind Prozesse, die zu Massenbewegungen führen und ihre Häufigkeit sowie Ausmaß beeinflussen, stark von den regionalen geologischen, geomorphologischen und klimatischen Merkmalen einer Landschaft abhängig. Daher ist auch die Methodik zur Erstellung von Gefahrenhinweiskarten eng mit den regionalen Gegebenheiten verknüpft.

Das übergeordnete Ziel des Projekts ist deshalb, eine Vorgehensweise zur Beurteilung von Gefährdungen durch Massenbewegungen und zur großräumigen Darstellung der Gefährdung in Gefahrenhinweiskarten zu entwickeln, die optimal für den Freistaat Sachsen angepasst ist. Dieses übergeordnete Ziel soll in mehreren Teilschritten (Arbeitspakete) erreicht werden:

1. Recherche und Vergleich von existierenden Vorgehensweisen zur Erstellung von Gefahrenhinweiskarten.
2. Auswahl einer Methodik die, angepasst an die geologischen Verhältnisse und regionalen Besonderheiten in Sachsen, ein optimales Kosten-Nutzen-Verhältnis erwarten lässt. Gegebenenfalls Anpassung der Methodik an die Verhältnisse in Sachsen.
3. Überprüfung und Aufzeigen der Anwendbarkeit der gewählten/entwickelten Methodik in einem Pilotgebiet.
4. Detaillierte Dokumentation der Vorgehensweise und Aufzeigen der Übertragbarkeit auf andere Gebiete in Sachsen durch Bearbeitung eines zweiten Pilotgebietes.

Im Folgenden werden die Ergebnisse nach Abschluss der Projektbearbeitung vorgestellt.

2 Literaturrecherche

2.1 Vorbemerkung

Das Arbeitspaket 1 umfasst eine ausführliche Literaturrecherche zu Gefahrenhinweiskarten (GHK). Das Augenmerk liegt dabei auf den vorhandenen Methoden zur Ermittlung und Beurteilung von gefährdeten Bereichen für Massenbewegungen und zur Erstellung von Gefahrenhinweiskarten.

2.2 Definition GHK

In der Literatur wird synonym zur Gefahrenhinweiskarte gelegentlich der Begriff "Gefährdungskarte" verwendet. Im englischsprachigen Raum sind die Begriffe "landslide susceptibility map" und "landslide hazard map" geläufig.

Folgende Merkmale sind für die GHK charakteristisch:

- nach wissenschaftlichen Kriterien erstellt
- für jede Gefahrenart (jeden Bewegungsprozess) gesondert erstellt
- liefert eine Übersicht, ob Gefahr vorhanden oder nicht vorhanden ist
- liefert flächendeckenden Hinweis, wo mit welcher Gefahrenart zu rechnen ist
- die Gefahr wird weder analysiert noch bewertet
- stellt eine Vorstufe der Gefahrenkarte dar.

Im Gegensatz zur Gefahrenhinweiskarte/Gefährdungskarte ist eine Gefahrenkarte weitaus umfangreicher und gibt neben dem Wo und Welche Gefahrenart zudem Auskunft über die Intensität der Gefährdung. Die für das Projekt relevante Gefahrenhinweiskarte muss daher klar von der Gefahrenkarte abgegrenzt werden.

2.3 Recherchevorgang

Zur Recherche wurden verschiedene wissenschaftliche Datenbanken und Kataloge für nationale und internationale Fachzeitschriften und Monographien genutzt. Diese umfassen Scopus, GeoRef, Google Scholar sowie den Bibliothekskatalog der TU Freiberg und den der Sächsischen Landesbibliothek. Des Weiteren stellten die Internetauftritte der Geologischen Dienste der deutschen Bundesländer eine wichtige Informationsquelle bei der Recherche zu Gefahrenhinweiskarten dar.

Entsprechend der Datenbank/Kataloge erfolgte die Recherche mit deutschen oder englischen Suchbegriffen. Eine Auswahl der am Häufigsten verwendeten Begriffe ist nachfolgend gelistet:

- Gefährdungskarte, Gefahrenhinweiskarte – Methoden, Gefährdungs-/ Rutschungsmodellierung
- Landslide susceptibility maps –, landslide hazard maps – methods, – regional, – guidance, – overview, – mapping methods, – modelling

Die deutschsprachige Recherche in den zwei Bibliothekskatalogen lieferte meist dieselben Treffer. Ein Großteil davon behandelt Themen, welche für das Projekt nicht relevant sind, wie GHK für Hochwasser und Überschwemmungen. Zum Beispiel sind bei der Suche im Bibliothekskatalog der TU Freiberg unter dem Suchbegriff "Gefahrenhinweiskarte" insgesamt 11 Treffer erzielt worden, von denen lediglich 3 im relevanten Themenbereich liegen. Eine weitere Eingrenzung der Suche durch die Ergänzung um den Begriff "Methoden" lieferte nur noch 5 Treffer, welche alle als nicht relevant eingeordnet werden konnten.

Hingegen ist die Anzahl der Treffer bei englischen Begriffen sowie innerhalb der Suchmaschinen weitaus höher und macht damit eine Eingrenzung der Suche unverzichtbar. Als hilfreich erwiesen sich Filter, welche nach dem Fachbereich und der Sprache eingrenzen. Damit konnte die Trefferzahl um den 10er bis 100er Bereich reduziert werden. Zusätzlich wurde der Suchbegriff durch weitere Schlagworte ergänzt, wodurch die Recherche präzisiert werden konnte. Dies soll an folgendem Beispiel verdeutlicht werden: die Suche in der Fachdatenbank Scopus ergab für "landslide susceptibility maps" insgesamt 2.791 Treffer. Eine Ergänzung durch den Begriff "methods" lieferte nur noch 1.622 Treffer und konnte durch "regional" weiter auf 241 Treffer reduziert werden. Anschließend erfolgte die Auswahl zu lesender Fachartikel anhand des Titels sowie Abstract. Die meisten Fachartikel in Scopus zum Thema GHK sind von den Ländern China, Indien und Italien publiziert worden.

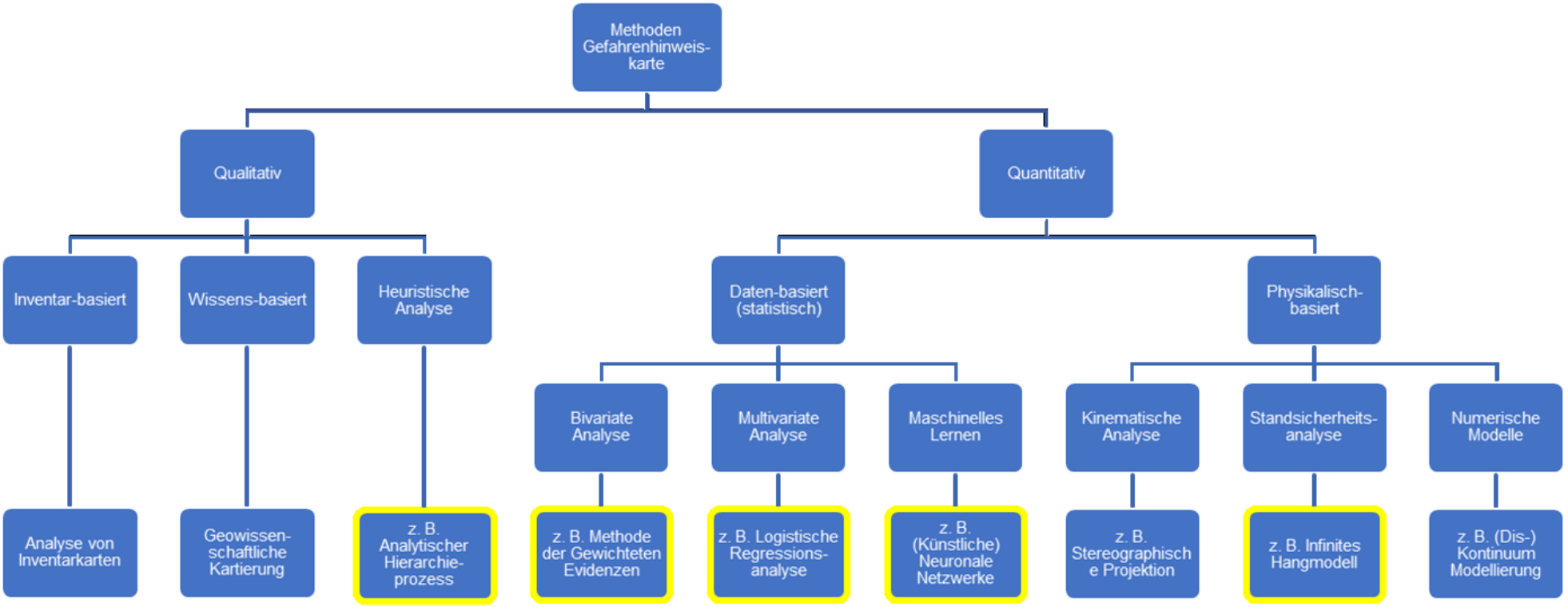
Die Recherche in Fachdatenbanken und Bibliothekskatalogen gibt einen ersten Überblick über die verschiedenen Methoden und Lösungsansätze zur Erstellung einer Gefahrenhinweiskarte. Jedoch sind wenig anwendungsbezogene Ergebnisse unter den Treffern, sodass sich die Internetauftritte der Geologischen Dienste Deutschlands sowie Beiträge zu GHK aus Österreich und der Schweiz am besten dazu eigneten eine Vorgehensweise zur Erstellung von GHK für Sachsen zu entwickeln. Die Literaturliste zur Recherche und eine Liste zu den Webauftritten der Geologischen Dienste mit Gefahrenhinweiskarten sind im Anhang 0 und A 2.

2.4 Methoden/Ansätze zur Erstellung einer GHK

Die Methoden zur Erstellung einer Gefahrenhinweiskarte werden unterteilt in qualitative und quantitative Methoden. Abbildung 1 verdeutlicht die einzelnen Kategorien der methodischen Ansätze.

Bei qualitativen Methoden wird die Wahrscheinlichkeit der Anfälligkeit für eine Gefährdung durch beschreibende (qualitative) Bedingungen ausgedrückt. Für die Einschätzung, ob und welche Gefährdung vorliegt, sind Erfahrungswerte und Expertenwissen notwendig. Nachteil dabei ist, dass qualitative Methoden überwiegend subjektiv sind. Es wird zwischen den Ansätzen inventar-basiert und wissensbasiert sowie der heuristischen Analysen unterschieden. Die heuristische Analyse stellt eine Kombination aus inventar- und wissensbasiertem Ansatz dar.

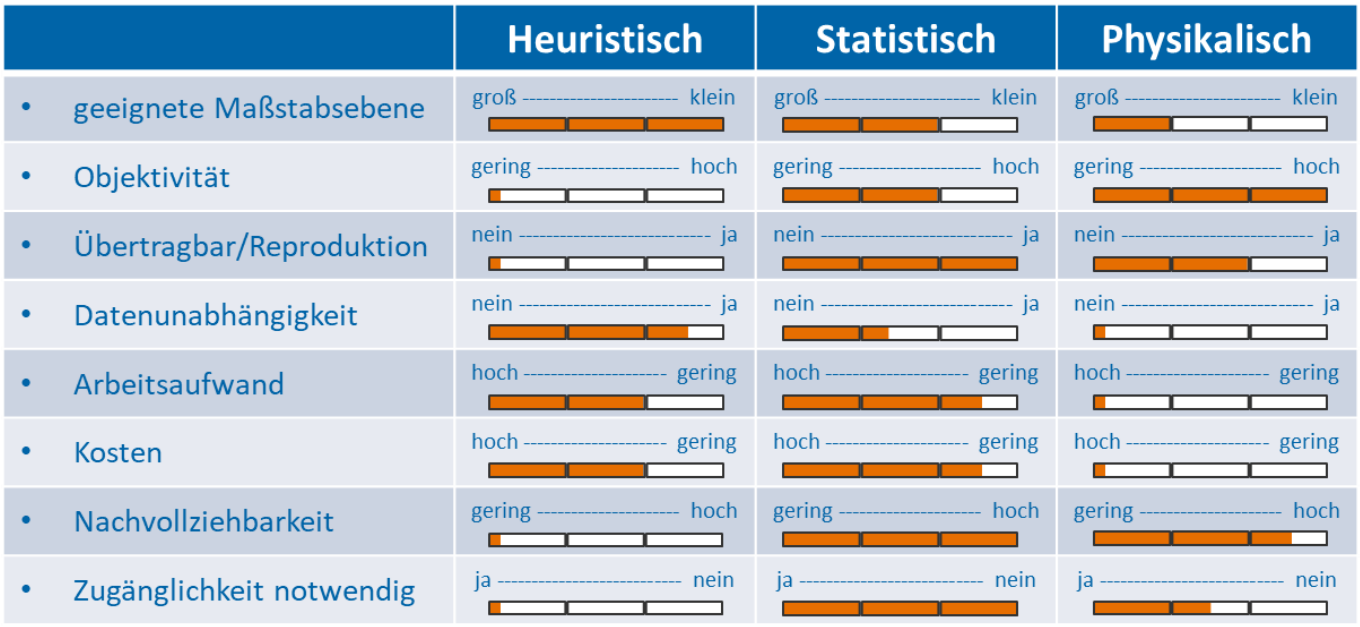
Bei quantitativen Methoden wird die Wahrscheinlichkeit der Anfälligkeit für eine Gefährdung durch eine Zahl ausgedrückt. Das Ergebnis der Untersuchung ist objektiv. Es wird zwischen einem daten-basierten (statistischen) und einem physikalisch-basierten Ansatz unterschieden. Im daten-basierten Ansatz wird das Wissen zu vergangenen Ereignissen genutzt, um zukünftige Ereignisse vorherzusagen. Der Massenbewegungsprozess wird dabei durch abhängige und unabhängige Variablen beschrieben. Die abhängige Variable ist das Auftreten bzw. das Nicht-Auftreten einer Massenbewegung. Unabhängige Variablen sind verschiedene Kontrollfaktoren, welche eine Massenbewegung auslösen oder ihr Auslösen beeinflussen (z. B. Niederschlag, Hangneigung). Alle Variablen werden durch mathematische Gleichungen miteinander in Beziehung gesetzt. Zu den daten-basierten Methoden zählt der Ansatz des Maschinellen Lernens (Künstliche Intelligenz), bei welchem die statistische Analyse mittels geeigneter Algorithmen durchgeführt wird. Im physikalisch-basierten Ansatz wird die Massenbewegung durch physikalische Prozesse beschrieben. Entscheidend für das Auslösen/Nichtauslösen einer Massenbewegung ist das Verhältnis von haltenden und treibenden Kräften. Zu dem physikalisch-basierten Ansatz zählt u. a. die Methode der Numerischen Modellierung.



Legende: Gelb umrandet sind die, laut Recherche, am meisten verwendeten methodischen Ansätze.

Abbildung 1: Methoden zur Erstellung einer Gefahrenhinweiskarte

Die wichtigsten Vor- und Nachteile von heuristischem, statistischem und physikalischem Ansatz sind in Abbildung 2 zusammengefasst.



Legende: Je mehr der Balken orange gefüllt ist, desto größer der Vorteil.

Abbildung 2: Vor- und Nachteile der methodischen Ansätze

Der statistisch-basierte Ansatz bietet die meisten Vorteile. Die Methode ist geeignet bei erschwerter Zugänglichkeit des Untersuchungsgebietes sowie bei begrenzten technischen, finanziellen, personellen und zeitlichen Kapazitäten. Außerdem ist der Ansatz überwiegend objektiv, reproduzierbar, transparent und nachvollziehbar. Der Nachteil ist, dass für die statistische Auswertung eine große Anzahl an dokumentierten Massenbewegungsereignissen (Kataster mit hoher Genauigkeit und Datendichte) vorliegen muss. Zudem werden Parameterkarten benötigt, welche das Auslösen von Massenbewegungen beeinflussen. Daher ist der statistische Ansatz mit einer hohen Datenabhängigkeit verbunden.

Der physikalisch-basierte Ansatz erfordert ebenfalls eine große Menge an Eingabedaten. Insbesondere müssen geotechnische Kennwerte bekannt sein, die oft erst im Gelände und Labor bestimmt werden müssen, z. B. durch Versuche an Bohrkernen. Zudem sind umfangreiche Berechnungen/Modellierungen durch Programme notwendig. Aus den genannten Gründen ist dieser methodische Ansatz nur im Einzelfall und mit hohem Aufwand für eine flächendeckende Erhebung anwendbar.

Der heuristische Ansatz ist aufgrund der Abhängigkeit von Expertenwissen und Erfahrungswerten überwiegend subjektiv und weniger transparent, bietet jedoch durch die Datenunabhängigkeit und den eher geringen Aufwand (Personal, Kosten, Zeit) einen sehr großen Vorteil.

Für alle Ansätze sollte (heuristisch) bzw. muss (statistisch, physikalisch) ein hochauflösendes digitales Geländemodell vorliegen. Die Verarbeitung der Informationen in einem Geoinformationssystem erleichtert die Nutzung durch den Anwender.

2.5 GHK in Deutschland und anderen Ländern

Mit Stand Oktober 2022 haben bislang 4 Bundesländer in Deutschland Gefahrenhinweiskarten erstellt. Für Bayern liegen v. a. für die risikoreichsten Regionen (Alpenraum, Mittelgebirge) bereits GHK vor. Für Baden-Württemberg wurde eine flächendeckende GHK ausgearbeitet. Hessen hat eine vorläufige GHK erstellt, welche jedoch nicht veröffentlicht ist. In Rheinland-Pfalz sind Hangstabilitätskarten für ausgewählte Gebiete herausgegeben. Weitere Arbeiten zu Gefahrenhinweiskarten wurden vereinzelt in Niedersachsen sowie in Mecklenburg-Vorpommern für die Insel Rügen durchgeführt.

In Abhängigkeit vom Bewegungsprozess sind die angewandten Methoden zur Erstellung der Gefahrenhinweiskarten der heuristische und der physikalische Ansatz. Für einige Forschungsvorhaben (MABEIS-Projekt Rheinland-Pfalz) wurden sowohl der statistische Ansatz durch Künstliche Neuronale Netzwerke (KNN) als auch aufwendige physikalische Modellierungen (Numerische Modelle) durchgeführt.

Bei der heuristischen Vorgehensweise wurden die Kartierung im Gelände, das Verschneiden von qualitativen Karten (z. B. Hangneigung und Geologie) und/oder eine fernerkundliche Auswertung verwendet – überwiegend für Rutschprozesse. Die physikalische Vorgehensweise wurde für Sturzprozesse eingesetzt und umfasst die Sturzbahnmodellierung mittels geeigneter Software. Murgänge sind in den einzelnen Bundesländern kaum bearbeitet worden. Rheinland-Pfalz hat in einem Forschungsvorhaben für Fließprozesse im lokalen Rahmen eine Kombination aus numerischer Modellierung und der Verschneidung qualitativer Karten getestet.

Offizielle Richtlinien zur Erstellung von Risikoanalysen für Massenbewegungen gibt es u. a. in den Länder Italien, Schweiz, Schweden und Frankreich. Dabei wird besonders mit einem rein heuristischen oder einer Kombination aus heuristischem und statistischem Ansatz gearbeitet. Weiterhin wurden für einige Regionen in Österreich GHK erstellt, welche online allgemein verfügbar sind. Oberösterreich hat mittels heuristischer Vorgehensweise ein Beurteilungs- und Kennzeichnungsschema für GHK definiert. Belgien hingegen setzt auf einen rein datenbasierten Ansatz. Zudem sind statistische sowie physikalische Methoden in zahlreichen Forschungsprojekten der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR) z. B. in den Ländern China, Pakistan und Indonesien angewandt worden.

3 Methodenauswahl für den Freistaat Sachsen

3.1 Vorbemerkung

Das Arbeitspaket 2 beinhaltet die Auswahl bzw. Weiter-/Neuentwicklung eines Konzepts zur Ausweisung und Beurteilung der Gefährdung durch Massenbewegungen sowie zur Erstellung einer GHK im Freistaat Sachsen. Es wurden die allgemeinen Rahmenbedingungen am LfULG hinsichtlich Datenverfügbarkeit und -qualität sowie Umsetzbarkeit der verschiedenen Methoden geprüft. Außerdem wurde das Konzept auf die speziellen geologischen und geomorphologischen Merkmale der Landschaft in Sachsen abgestimmt.

3.2 Ausgangs- und Datengrundlage

Aus der Literaturrecherche ergibt sich, dass in der Praxis überwiegend heuristische Ansätze angewandt werden. Bei ausreichender Datenverfügbarkeit sind auf regionaler Ebene auch statistische Methoden geläufig. Generell ist die Auswahl der Methode insbesondere abhängig von:

- der Art der Massenbewegung (Rutsch-, Sturz-, Fließprozess)
- der Größe des Untersuchungsgebietes (lokal, regional, global)
- der Datenverfügbarkeit und -qualität.

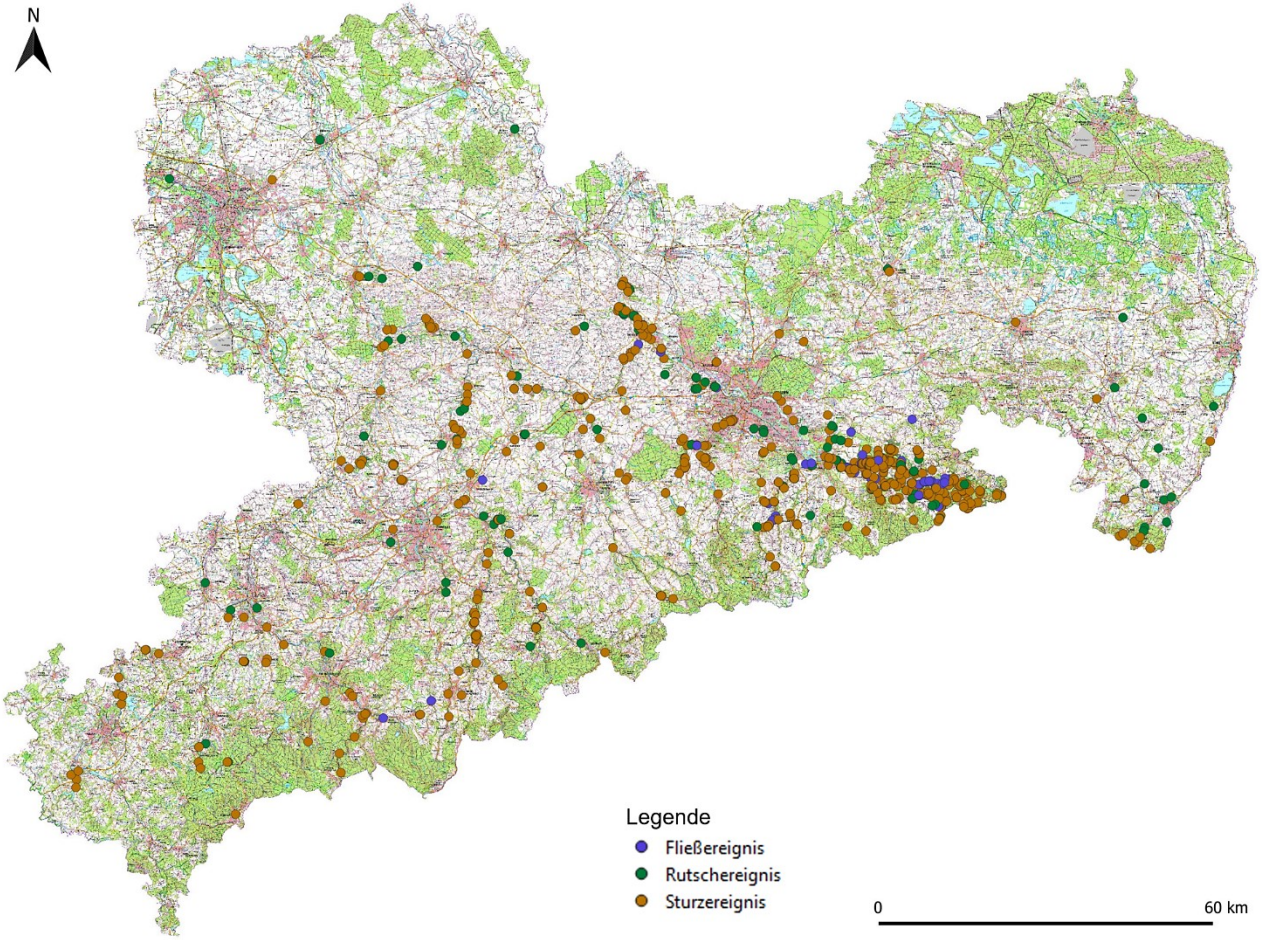
Für den Freistaat Sachsen werden GHK für die Bewegungsprozesse Rutschung, Stein-/Blockschlag, Felssturz und Murgänge erstellt und abschnittsweise für einzelne Regionen generiert, beginnend mit den risikoreichsten Gebieten. Die Methoden sollen regional übertragbar sein. Im Hinblick auf Personal, Zeit und Kosten ist für den Bearbeitungsaufwand ein möglichst günstiges Kosten-Nutzen-Verhältnis anzustreben.

Für Sachsen liegt ein Inventar mit dokumentierten Ereignissen als GIS-Datei im Shape-Format vor, welches an die Mindestanforderungen entsprechend dem Leitfaden der SGD angelehnt ist (AD-HOC-ARBEITSGRUPPE GEOLOGIE, 2016). Mit Stand November 2022 wurden 841 Ereignisse erfasst. Davon sind 63 Fließprozesse, 120 Rutschprozesse und 658 Sturzprozesse (Abbildung 3). Rutsch- und Sturzprozesse treten in ganz Sachsen auf, wobei eine Häufung entlang der Elbezone, insbesondere in der Sächsischen Schweiz, auszumachen ist. Fließprozesse sind vereinzelt in der Elbezone sowie im Raum Mittelsachsen und gehäuft im Raum Sächsische Schweiz-Osterzgebirge dokumentiert.

Neben dem Ereigniskataster können zur Erstellung der GHK weitere wichtige Datensätze durch das LfULG ausgegeben werden. Dazu zählt die Geologische Karte in verschiedenen Maßstäben (u. a.

1:25.000, 1:50.000), die Bodenkarte im Maßstab 1:50.000 sowie die Landnutzungs- und Bodenerosionskarte. Als Offene Geodaten sind in Sachsen folgende Datensätze online frei verfügbar:

- hochauflösendes Digitales Geländemodell (DGM Auflösung: 20 m, 1 m)
- digitale Orthofotos (DOP Auflösung: 20 cm)
- Laserscandaten (LSC als 2 km x 2 km Kacheln)
- Luft- und Satellitenbilder (als 2 km x 2 km Kacheln, ab 1995).



Legende: Ereigniskataster Stand: 11/2022

Abbildung 3: Ereigniskataster für den Freistaat Sachsen

3.3 Übertragung der Vorgehensweise anderer Bundesländer

Im Rahmen der Methodenauswahl zur Erstellung einer GHK wurde geprüft, inwiefern sich die Herangehensweise anderer Bundesländer auf Sachsen übertragen lässt. Dabei wurden insbesondere die Herangehensweisen von Bayern und Baden-Württemberg als gut übertragbar identifiziert. Deshalb erfolgten

Beratungsgespräche mit den zuständigen Landesämtern. Der Bearbeitungsaufwand in BW ist dabei als eher gering und der in BY, aufgrund von Modellierungen, als eher groß einzuordnen.

Für Baden-Württemberg gibt es seit 2014 eine flächendeckende GHK im Maßstab 1:50.000, welche aktuell nur für Behörden frei zugänglich ist. Nach einer kostenpflichtigen Registrierung ist der Zugriff auch für weitere Nutzer möglich. In der Karte werden die Prozesse Rutschung, Steinschlag/Felssturz, Verkarstung sowie Setzung/Hebung erfasst. Der Aufwand für die Erstellung der GHK für Rutschung, Steinschlag/Felssturz und Karst zusammen beläuft sich auf eine Bearbeitung im Zeitraum von 6 Jahren durch einen befristeten Mitarbeiter in Teilzeit (50 %) und begleitend nach dem "4-Augen-Prinzip" durch unbefristetes Personal (<< 50 %). Bei den angewandten Methoden handelt es sich ausschließlich um heuristische Ansätze. Die für Sachsen relevanten Prozesse (Rutschung, Steinschlag/Felssturz) sind überwiegend mittels Fernerkundung bearbeitet worden. Für Rutschungen erfolgte die händische Auswertung des hochauflösenden DGM sowie der Schummerungskarte, anhand denen alte Rutschungen unter der Annahme einer möglichen Reaktivierung flächendeckend digitalisiert wurden. Für Steinschlag/Felssturz wurden lediglich die Anbruchbereiche, jedoch nicht die Sturzreichweiten definiert. Die Anbrüche sind aus dem Verschnitt von Hangneigung und geologischer Basisdatenkarte ermittelt worden, wobei alle Neigungen ≥ 45° als potenzielle Abrisskanten gelten. Geländebegehungen sind in BW zur Erstellung der GHK kaum durchgeführt worden.

Die Bearbeitung in Bayern erfolgte durch verschiedene Projekte. Es wurde mit den risikoreichsten Regionen (Alpenraum, Mittelgebirge) begonnen. Aktuell steht noch keine flächendeckende GHK für Bayern zur Verfügung. Die Karte umfasst die Prozesse Rutschung, Stein-/Blockschlag, Felssturz sowie Subrosion/Erdfall. Der Bearbeitungsaufwand ist für die einzelnen Regionen unterschiedlich. Für den Jura der Mittelgebirge wurden 2 Projekte zu je 5 Jahren von jeweils 3 Mitarbeitern und einem Projektleiter bearbeitet. Die Projekte beinhalten eine aktive Öffentlichkeitsarbeit mit der Durchführung von "Risikodialogen" und Präsentationen der Arbeit in den einzelnen Landkreisen zu Projektbeginn und -ende. Weiterhin erfolgte eine intensive Geländebegehung, sodass die ermittelten Gefahren erst nach einer Prüfung im Gelände als solche in der GHK ausgewiesen wurden. In Bayern wurden Rutschungen heuristisch erfasst durch die Kombination aus Fernerkundung und geowissenschaftlicher Kartierung im Gelände. Im ersten Schritt sind DGM und Schattenbild mittels Fischnetzmethode nach Rutschungsstrukturen abgesucht worden. Das Schattenbild liefert durch eine Beleuchtung aus verschiedenen Winkeln eine 3d-ähnliche Darstellung der Geländeoberfläche. Bei der Fischnetzmethode wird die Rasterkarte in gleichgroße Kacheln (1 km x 1 km in BY) unterteilt, um diese schrittweise abzusuchen. Die erfassten Rutschungen wurden anschließend im Gelände verifiziert und evtl. in das bestehende Ereigniskataster ergänzt. Für die Gefährdung durch Stein-/Blockschlag wurden potenzielle Anbruchbereiche heuristisch und die Reichweiten des Sturzprozesses über einen physikalischen Ansatz ermittelt. Die Ausweisung

der Anbruchbereiche für alle Hangneigungen ≥ 45° erfolgte über das DGM. Durch die Verschneidung mit der Geologischen Karte konnten anthropogene Strukturen manuell herausgefiltert sowie gefährdete Lithologien ausgewiesen werden. Anschließend wurden für die Lithologien das Bemessungsereignis (z. B. Blockgröße) im Gelände bestimmt, welches für die Modellierung notwendig ist. Die Sturzbahnmodellierung benötigt eine entsprechende Software und ist extern an die Schweizer Firma GEOTEST vergeben worden. Die Gefährdung durch Felssturz wurde nur für bereits dokumentierte Ereignisse über die Pauschalwinkelmethode bestimmt. Bei der Methode handelt es sich um einen physikalischen Ansatz. Es wird über einen Pauschalwinkel die potenzielle Reichweite des Sturzes abgeschätzt. Die Modellierung erfolgt mittels GIS-Tool. Die Ergebnisse wurden anschließend im Gelände geprüft.

Es ist anzumerken, dass die Erstellung einer GHK nach der Herangehensweise von Bayern für die Umsetzung in Sachsen einen sehr hohen Aufwand hinsichtlich Zeit, Kosten und Personal bedeuten würde. Wohingegen die Vorgehensweise von Baden-Württemberg als gute Basis auf die Bedürfnisse in Sachsen erweitert werden kann. Die Vorgehensweise in Sachsen soll sich deshalb an den Methoden von Baden-Württemberg orientieren und durch ausgewählte Geländebegehungen ergänzt werden. Die Geländebegehungen sollen einerseits der Verifizierung des Ansatzes dienen, andererseits der Ermittlung repräsentativer Größen für die flächenhafte Abgrenzung gefährdeter Bereiche inkl. eines "Sicherheitssaums". Im Folgenden werden, nach einem Baukastensystem, mehrere Wege bzw. Möglichkeiten von unterschiedlichem Bearbeitungsaufwand zur Entwicklung einer GHK für Sachsen aufgezeigt: Aufwand gering (BW) → größer → sehr groß (BY).

3.4 Vorgehensweise für Sachsen

3.4.1 Rutschungen

In der Pilotstudie (AP 3) wurden die Arbeitsschritte auf der Rutschungsinventar-Seite der Abbildung 4 umgesetzt, unter der Annahme, dass eine Reaktivierung alter Rutschungen möglich ist. Zuerst erfolgte regionsweise eine flächendeckende Digitalisierung von Rutschungsstrukturen anhand von auffälliger Morphologie aus dem Digitalem Geländemodell und der Schummerungskarte. Ergänzend dazu wurde auf weitere Fernerkundungsdaten (u. a. DOP, Luftbilder) sowie das bereits existierende Ereignisinventar zurückgegriffen. Die Auswertung liefert eine GHK, welche mit relativ geringem Aufwand erstellt werden kann. Zusätzlich wurden ausgewählte Ereignisse durch eine Geländebegehung überprüft.

Mit einem größeren Arbeitsaufwand ist eine statistische Modellierung denkbar. Aktuell ist für eine Umsetzung der Datensatz im Ereigniskataster für Sachsen zu gering, sodass als erster Schritt die Digitalisierung alter Rutschungen unverzichtbar ist. Anschließend kann die statistische Modellierung mit dem Ereignisinventar und verschiedenen Faktorkarten (z. B. Landnutzung, Bodenklassen) genutzt werden, um Flächen mit potenziellen Rutschungen auszuweisen.

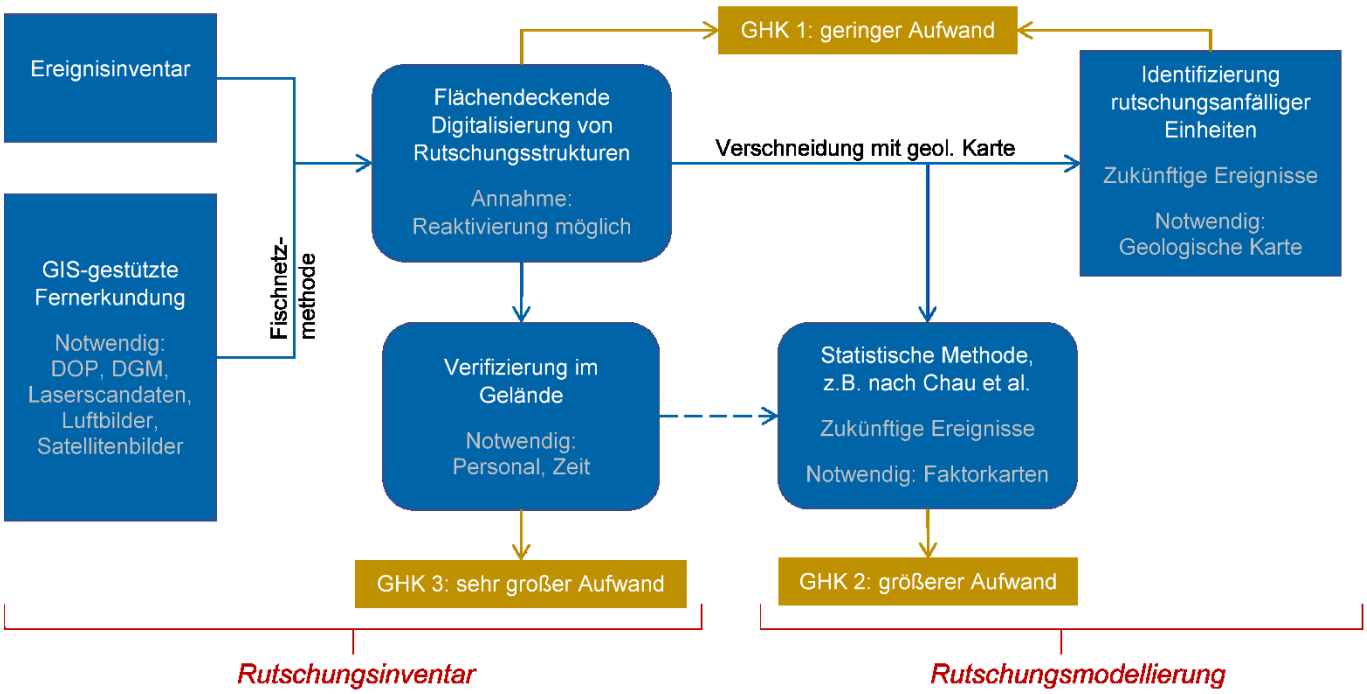


Abbildung 4: Arbeitsschema zur Beurteilung der Gefährdung durch Rutschungen

3.4.2 Stein- und Blockschlag

Stein- und Blockschlag umfassen laut LFULG (2012) Sturzprozesse bis zu einem Gesamtvolumen von < 10 m³. Im Laufe der Pilotstudien wurden mehrere Ansätze getestet, um die Gefährdung durch Stürze zu erfassen. Abbildung 5 verdeutlicht die Schritte zur Erstellung der Gefahrenhinweiskarte für Stein- und Blockschlag.

In der Pilotstudie 1 wurden die Schritte bis zur GHK 1 aus der Abbildung 5 durchgeführt. Aus dem DGM wurden Hangneigungen ≥ 35° (AD-HOC-ARBEITSGRUPPE GEOLOGIE, 2016) und ≥ 45° (LFU, 2020) als potenzielle Anbruchbereiche ausgewiesen. Durch die Verschneidung mit der Geologischen Karte konnten anthropogene Strukturen und nicht stimmige Bereiche herausgefiltert werden. Neben den Anbruchgebieten wurde zudem ein Sicherheitssaum definiert, welcher die potenzielle Reichweite der Sturzprozesse beschreibt. In der Pilotstudie 1 sollte dafür eine geeignete Herangehensweise getestet werden, z. B. Berechnung der Sturzweite für repräsentative Ereignisse mit der Software RocFall, einer Überprüfung repräsentativer Ereignisse im Gelände oder Definition anhand von Sturzweiten dokumentierter Ereignisse.

Eine flächendeckende Sturzbahnmodellierung ist unter größerem bis sehr großen Aufwand möglich. Dazu muss i. d. R. für jede lithologische Einheit bzw. jedes modellierte Gebiet das Bemessungsereignis aus Literaturwerten oder im Gelände bestimmt werden. Die Sturzbahnmodellierung wird mit Hilfe einer

meist kostenpflichtigen Software durchgeführt und wurde daher in der Pilotstudie 1 nicht flächendeckend umgesetzt.

Während der Pilotstudien wurde eine Anpassung und Erweiterung der methodischen Herangehensweise zur Erstellung der Gefahrenhinweiskarte Stein- und Blockschlag vorgenommen. Dadurch konnte in der Bearbeitung von Pilotgebiet 2 sowohl die Dispositionskarte erstellt, als auch eine flächendeckende Modellierung potenzieller Sturzbahnen durchgeführt werden. Die Anbruchgebiete sind zum einen nach der Hangneigungsmethode, zum anderen mit Hilfe des SIDX-Indexes ermittelt worden. Über den SIDX-Index werden potenzielle Anbrüche präzisiert, sodass ausschließlich offene Felsbereiche und Mauerwerk als Anbrüche ausgewiesen sind. Die abschließende Sturzbahnmodellierung erfolgte im GIS ohne Berücksichtigung des Bemessungsereignisses. Somit wurden die Arbeitsschritte aus Abbildung 5 bis zur GHK 2 umgesetzt.

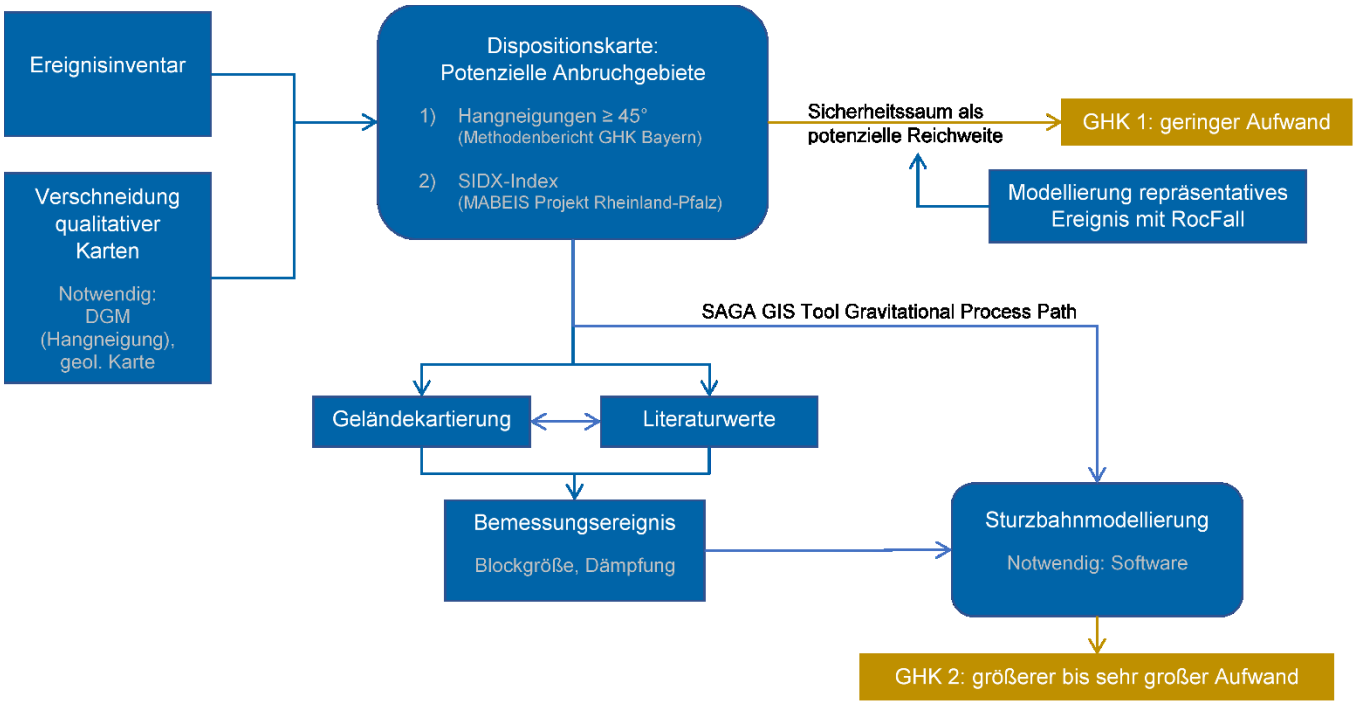


Abbildung 5: Arbeitsschema zur Beurteilung der Gefährdung durch Stein-/Blockschläge

3.4.3 Felssturz

Felssturzprozesse umfassen Gesamtvolumen von ≥ 10 m³ bis < 1.000.000 m³, bei größeren Sturzvolumen handelt es sich um einen Bergsturz (LFULG, 2012). In Sachsen sind Bergstürze angesichts der regionalen und geologischen Gegebenheiten unwahrscheinlich und werden daher in dieser Arbeit nicht betrachtet. Die Gefährdung durch Felssturz wird für Sachsen, entsprechend der Vorgehensweise in Bayern, über die GIS-gestützte Pauschalwinkelmodellierung ermittelt (vgl. Abbildung 6). Die Modellierung

erfolgt nur für bereits dokumentierte größere Felssturzereignisse mit einem Ausmaß von ≥ 10.000 m^3 (LFU, 2020). Kleinere Felsstürze sind aufgrund der geringeren Reichweite bereits durch Steinschlagereignisse abgedeckt.

Im ersten Arbeitsschritt werden Ansatzpunkte im Anbruchbereich festgelegt. Anschließend werden repräsentative Parameterwerte bestimmt, um einen Pauschalwinkelansatz anzuwenden. Eine Modellierung ist entsprechend dem geometrischen Gefälle (für kleine Wandstufen) oder dem Schattenwinkel (für hohe Wände) möglich. Die Pauschalwinkelmodellierung wird im GIS mit Hilfe einer Sichtbarkeitsanalyse (Viewshed-Tool) durchgeführt. Der Prozessraum muss abschließend manuell um den Anbruchbereich erweitert werden, weil das Viewshed-Tool nur den Ablagerungsbereich liefert.

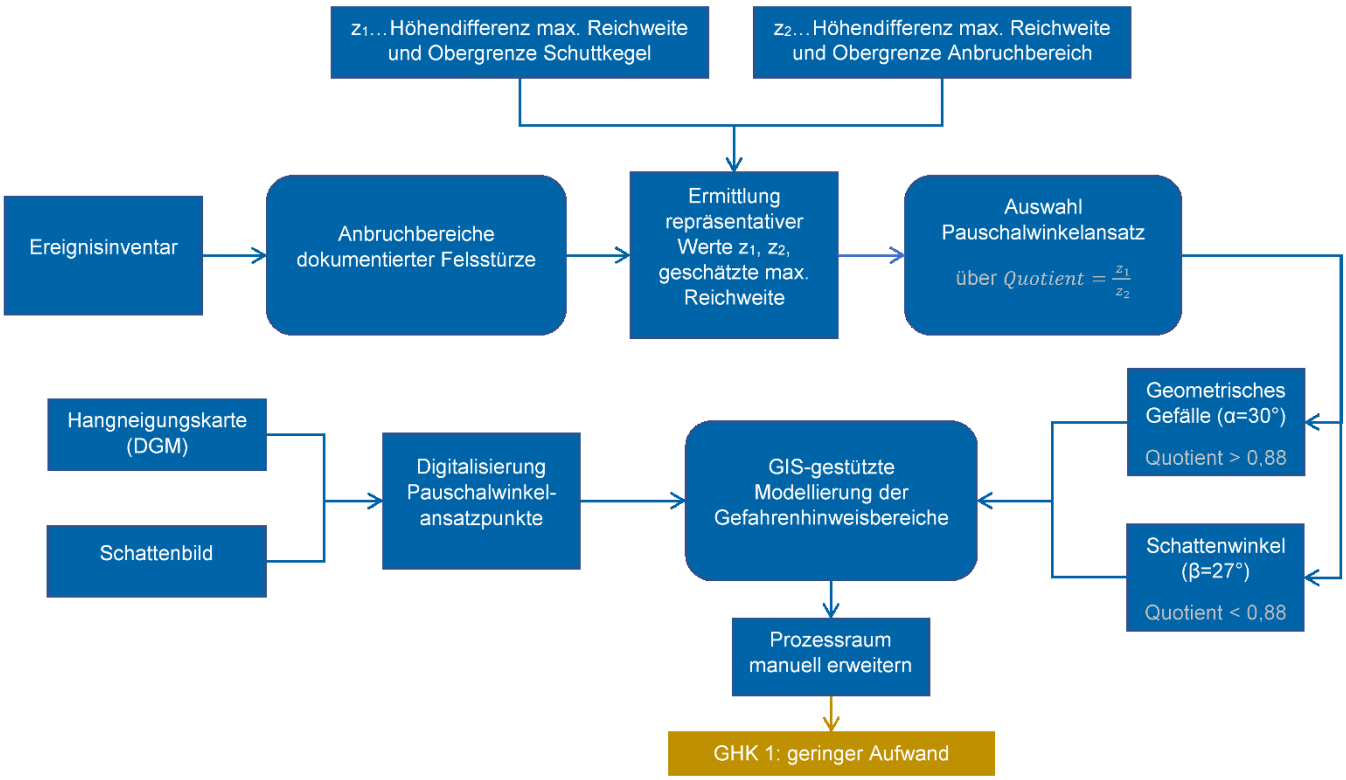


Abbildung 6: Arbeitsschema zur Beurteilung der Gefährdung durch Felsstürze

3.4.4 Murgang

Für die Gefährdung durch Murgänge wurden in der Pilotstudie zwei Herangehensweisen zur Erstellung einer GHK getestet (Abbildung 7). Zum einen der zeitaufwendigere, manuelle Ansatz zur Identifizierung von Fließrinnen über die GIS-gestützte Fernerkundung (vgl. Rutschprozesse). Zum anderen ein halbautomatischer Ansatz zur Darstellung der Murganggefährdung. Ausgewählte Ergebnisse der Murganggefährdung wurden im Gelände überprüft.

Im Pilotgebiet 1 ist die manuelle Herangehensweise durchgeführt worden. Dieser Ansatz wurde ebenso im Pilotgebiet 2 angewandt. Die manuelle Identifizierung von Fließrinnen ist zeitintensiv und bedeutete einen großen Aufwand. Mit dem Ziel der Optimierung des methodischen Vorgehens wurde im Pilotgebiet 2 zusätzlich ein halbautomatischer Ansatz getestet, sodass die Gefahrenhinweiskarte mit einem geringen Aufwand erstellt wurde.

In der Abbildung 7 ist die Vorgehensweise zur Beurteilung der Gefährdung durch Murgänge im Freistaat Sachsen als Arbeitsschema dargestellt. Das halbautomatische Vorgehen zur Erstellung der Gefahrenhinweiskarte Murgänge beinhaltet die Ermittlung von potenziellen Anrissen für Murgänge im Gerinne mit Hilfe eines Grenzgefälle-Ansatzes. Dieser beruht auf dem funktionalen Zusammenhang von kritischer Gerinneneigung (Grenzgefälle) und Einzugsgebietsgröße (RINDERER ET AL., 2023). Es gilt: je kleiner das Einzugsgebiet, desto steiler muss das Gerinne sein, damit Murgänge anreißen. Über die Einzugsgebietsgröße wird die kritische Gerinneneigung berechnet. Die potenziellen Anrisse ergeben sich aus einer Gegenüberstellung des Grenzgefälles mit der Gerinneneigung. Auf Grundlage der generierten Anrisse erfolgt eine flächendeckende Murgangmodellierung im GIS zur Bestimmung potenzieller Fließprozessräume.

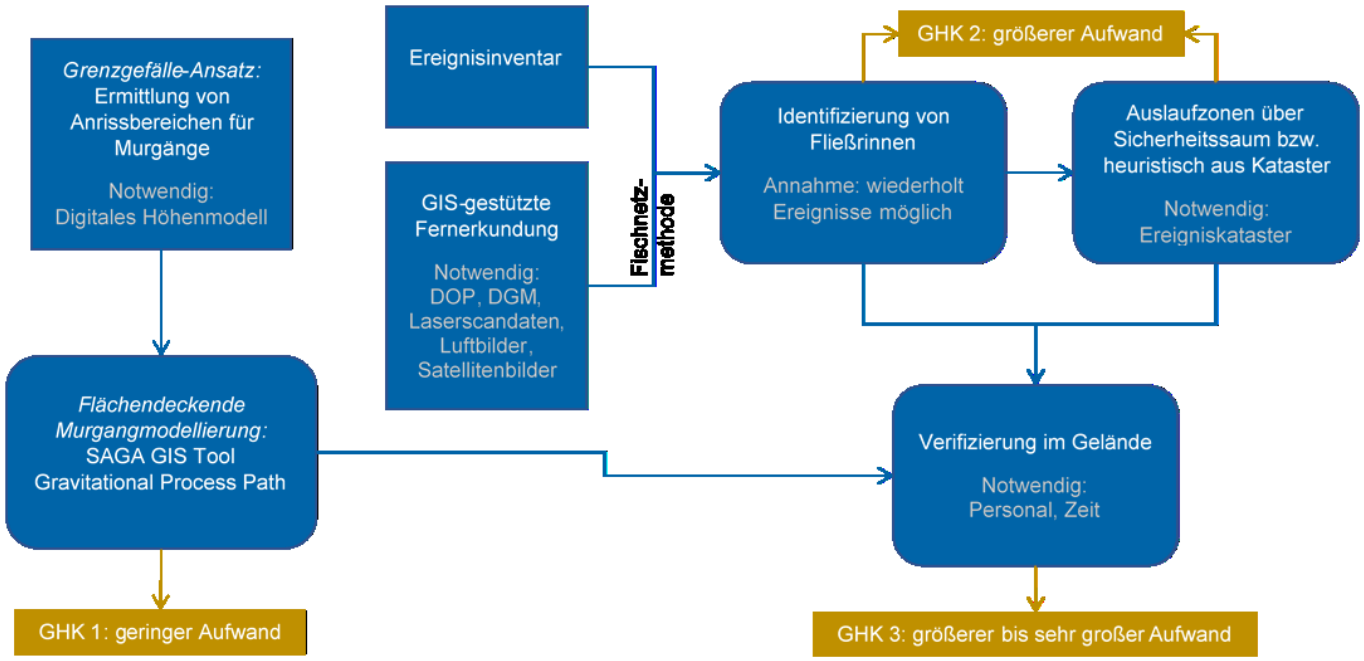


Abbildung 7: Arbeitsschema zur Beurteilung der Gefährdung durch Murgänge

3.5 Abschluss Methodenauswahl

Die Rahmenbedingungen am LfULG (Zeit, Kosten, Personal) sowie die vorhandenen Datensätze sprechen v. a. für den Einsatz von qualitativen Methoden, sodass überwiegend wissensbasierte und inventarbasierte Ansätze verwendet werden und auf eine GIS-gestützte Auswertung gesetzt wird. Die wichtigsten Datensätze sind dabei das Ereignisinventar und ein hochauflösendes digitales Geländemodell. Beides ist für Sachsen vorhanden, letzteres als "Offene Geodaten" online frei verfügbar.

Die Herangehensweise der Bundesländer Bayern und Baden-Württemberg bietet eine gute Grundlage für die Auswahl eines Konzepts zur Erstellung einer GHK für Sachsen. Der Bearbeitungsaufwand in Bayern ist aufgrund von Modellierungen und intensiven Geländebegehungen viel größer als in Baden-Württemberg und bedeutet im Fall der Übertragung einen hohen personellen und finanziellen Aufwand für Sachsen. Hingegen lässt sich die Vorgehensweise in Baden-Württemberg optimal auf die Anwendung in Sachsen übertragen und weiter ausbauen. Daher wurde für die Auswahl der Methodik zur Erstellung von Gefahrenhinweiskarten im Freistaat Sachsen als Basis die Vorgehensweise von Baden-Württemberg (Aufwand: "gering") herangezogen und durch einfach umsetzbare Zusätze (Aufwand: "+") wie z. B. ausgewählte Geländebegehungen erweitert. Die methodische Herangehensweise nach dem Aufwand "gering+" (bzw. "größer“) wurde in der Pilotphase in zwei Pilotgebieten getestet.

4 Pilotstudie

4.1 Vorbemerkung

In der Pilotstudie des Projektes (AP 3) wurde zur Erstellung von Gefahrenhinweiskarten die im Arbeitspaket 2 entwickelte methodische Herangehensweise in einem ausgewählten Modellgebiete angewandt und validiert. Die Erarbeitung der GHK im Maßstab 1:25.000 erfolgte GIS-basiert für die drei Hauptprozesstypen: Sturz-, Rutsch- und Fließprozesse. Durch die Bearbeitung eines zweiten Modellgebietes sollte die Übertragbarkeit der Methodik überprüft werden (AP 4). Die Pilotgebiete wurden entsprechend einem erhöhten Risikopotenzial durch Massenbewegungen in Übereinstimmung mit dem Ereigniskataster und unter Absprache mit Mitarbeitern des LfULG ausgewählt.

4.2 Pilotgebiet 1: Kirnitzschtal

4.2.1 Ausgangssituation

Das Pilotgebiet 1 liegt im Elbsandsteingebirge im südöstlichen Teil des Landkreises Sächsische Schweiz-Osterzgebirge und umfasst im Wesentlichen das Kirnitzschtal. Die bearbeitete Fläche von ca. 51 km^2 reicht vom Sebnitztal im Norden bis an die Postelwitzer Wände entlang der Elbe im Süden und von Bad Schandau im Westen bis Ottendorf im Osten. Abbildung 8 zeigt das PG 1 im geographischen Überblick. Aus dem geologischen Überblick von Abbildung 9 ist ersichtlich, dass vorrangig Sandsteine der Kreide sowie Granodiorit anstehend sind.

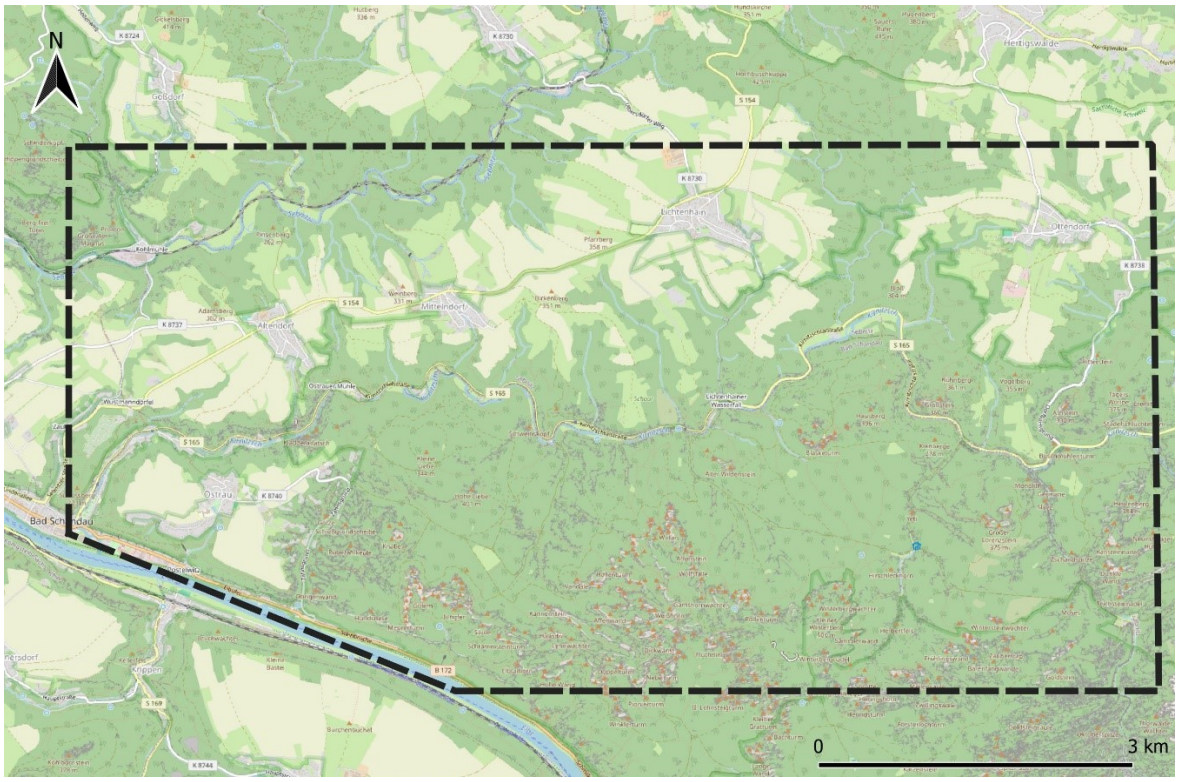


Abbildung 8: Pilotgebiet 1 – Kirnitzschtal und Umgebung im geographischen Überblick

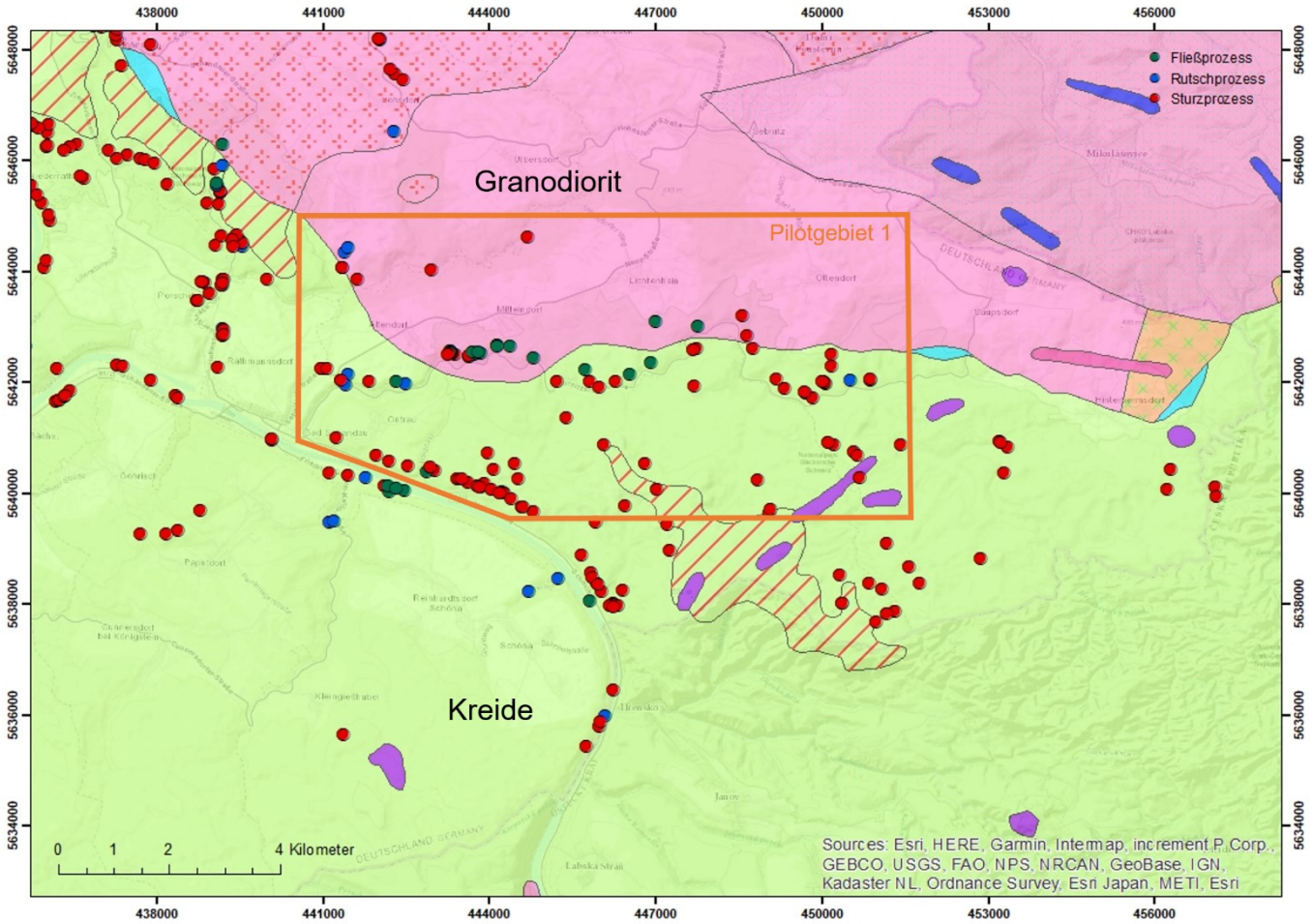


Abbildung 9: Pilotgebiet 1 - Kirnitzschtal und Umgebung im geologischen Überblick

4.2.2 Datengrundlage und Datenaufbereitung

Zur Bearbeitung des PG 1 wurden vom LfULG folgende Daten zur Verfügung gestellt:

- GK50 Pirna – Geologische Karte im Maßstab 1:50.000, Kartenblatt L5148_Pirna
- Ereigniskataster – Informationen zu erfassten MB-Ereignissen, Stand 11/2022

Im PG 1 sind insgesamt 107 MB-Ereignisse erfasst. Davon sind 7 Ereignisse Rutsch-, 20 Fließ- und 80 Sturzprozesse (vgl. Abbildung 9).

Weiterhin wurden verschiedene Datensätze zum Pilotgebiet 1 online vom Server der offenen Geodaten für Sachsen heruntergeladen. Diese umfassen folgende Daten:

- DTK25 – Topographische Karte im Maßstab 1:25.000
- DOP20 – Digitale Orthofotos mit einer Bodenauflösung von 20 cm
- DGM1 – Digitales Geländemodell mit einer Bodenauflösung von 1 m

Laut GeoSN (2024) wurden die Primärdaten der DGMs mittels Laserscann-Messaufnahmen mit einer Höhengenauigkeit der Gitterpunkte von +/- 0,15 m erfasst. Die Geländemodelle werden im Höhenreferenzsystem DHHN2016 bereitgestellt. Das PG 1 setzt sich aus je 23 Kacheln von DGM1 und DOP20 der Größe 2 km x 2 km zusammen. Die DOP20 Kacheln stehen als tiff-Bild zur Verfügung und die DGM1 Kacheln als xyz-Dateien, sodass für letztere zur Weiternutzung in einem GIS eine Umwandlung ins tiff-Format erfolgte. Aus dem DGM1 wurden im GIS weitere Karten und Informationen abgeleitet. Dazu zählen zwei Schattenbilder/Schummerungskarten mit einem Beleuchtungswinkel von 315° bzw. 45°, Höhenlinien- (1 m, 10 m, 20 m, 50 m), Hangneigungs- und Expositionskarten sowie mehrere Geländeschnitte.

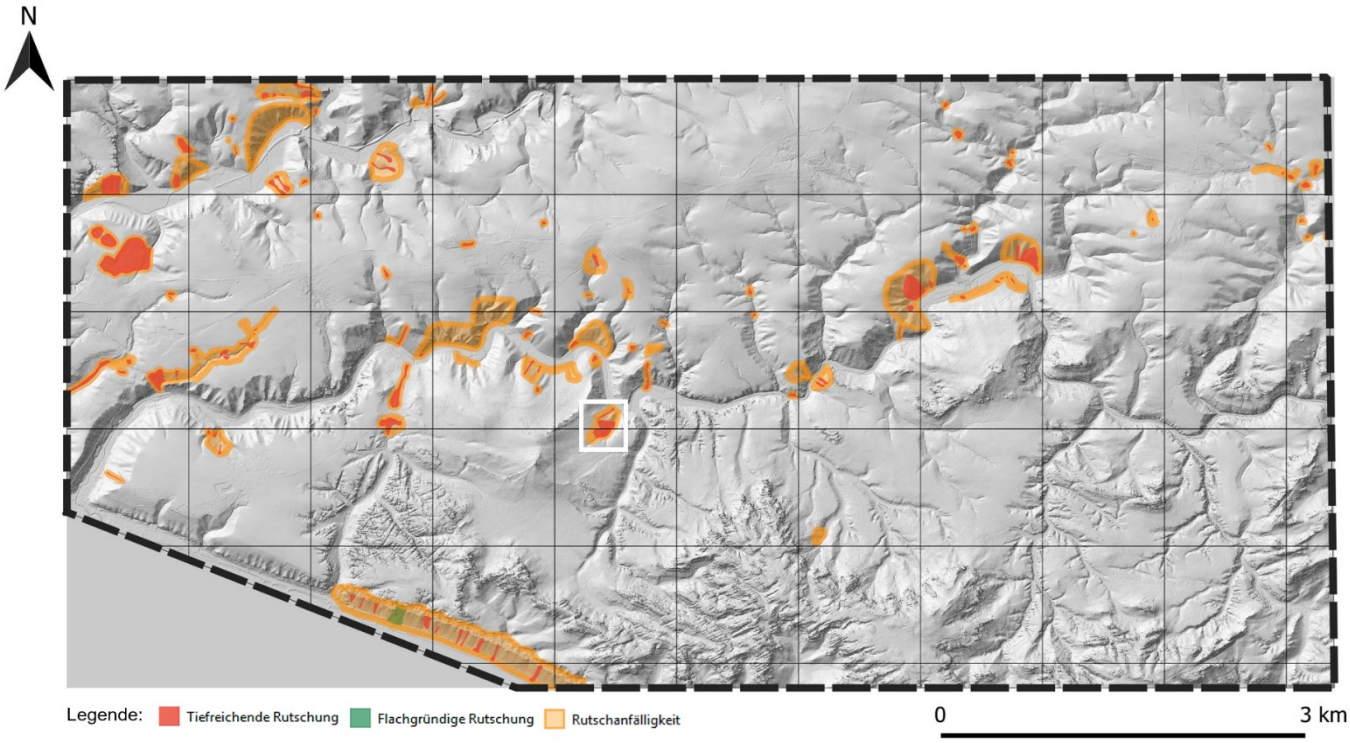
4.2.3 Rutschungen

Die flächendeckende Erfassung von Rutschungen im PG 1 erfolgte digital in einem GIS. Um die manuelle Ausweisung der Rutschstrukturen übersichtlich und einfach zu gestalten, wurde das Pilotgebiet entsprechend der Fischnetzmethode in 1 km x 1 km große Kacheln unterteilt (vgl. Abbildung 10). Der Fischnetz-Layer wird verschiedenen Karten überlagert, die systematisch Kachel für Kachel nach Rutschungen abgesucht werden.

Typische Rutschformen lassen sich vor allem mittels Schattenbilder und Höhenlinienkarte anhand der Geländemorphologie erkennen (vgl. Abbildung 11) und umfassen u. a. nischenförmige Abrisskanten, zungenförmige Ablagerungen, Schuttkegel am Rutschfuß, eine unruhige Morphologie, Abweichungen vom verbreiteten ungestörten Hangprofil sowie Verflachungen im Hang. Die Orthofotos und das Ereigniskataster wurden ergänzend zur Überprüfung und Ausweisung von Gefahrenhinweisflächen herangezogen. Im PG 1 erweisen sich die Orthofotos in den seltensten Fällen als hilfreich, da meist flächendeckender Bewuchs – insbesondere Wälder – die Geländeoberfläche verbergen. Zusätzlich zur digitalen Erfassung von Rutschungen erfolgte im Gelände eine Übersichtsbegehung im April 2023 im Kirnitzschtal und entlang der Postelwitzer Steinbrüchen. Dabei konnten stichprobenartig die mittels Fernerkundung ausgewiesenen Rutschungen überprüft und bestätigt werden.

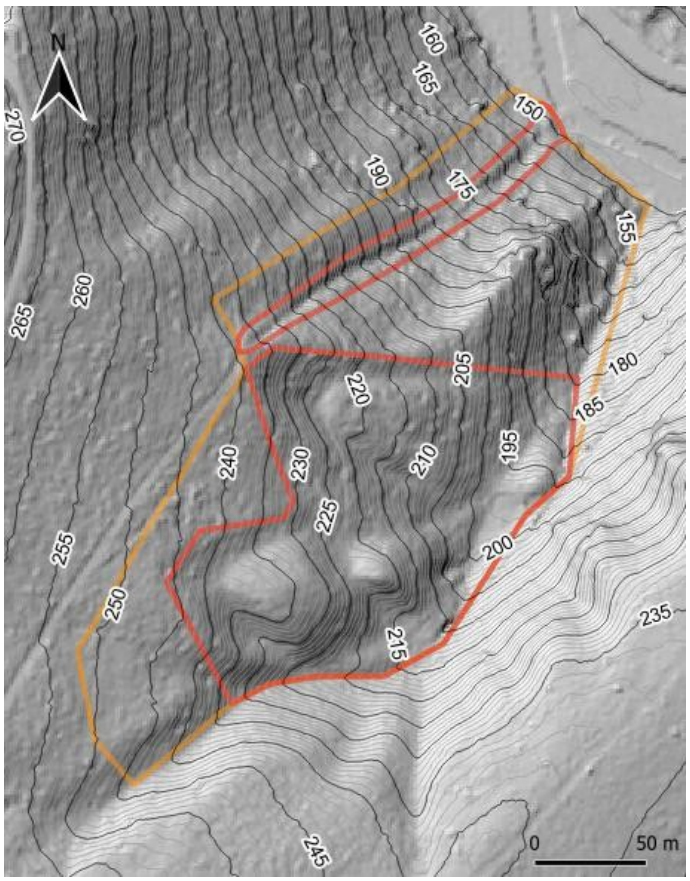
Die Rutschungsflächen wurden in der GHK entsprechend drei Kategorien ausgewiesen (vgl. Abbildung 10). Rote Flächen kennzeichnen tiefgründige und grüne Flächen flachgründige Rutschungen.

Beide werden in den orangen Flächen der rutschanfälligen Bereiche vollständig eingeschlossen. Flachgründige Rutschungen wurden anhand von Informationen aus dem Ereigniskataster und im Schattenbild aufgrund von oberflächlichen Auffälligkeiten der Geländemorphologie definiert.



Legende: GHK Stand 12/2023, weiß umrandeter Bereich vgl. Abbildung 11

Abbildung 10: Rutschungen im Schattenbild - Pilotgebiet 1



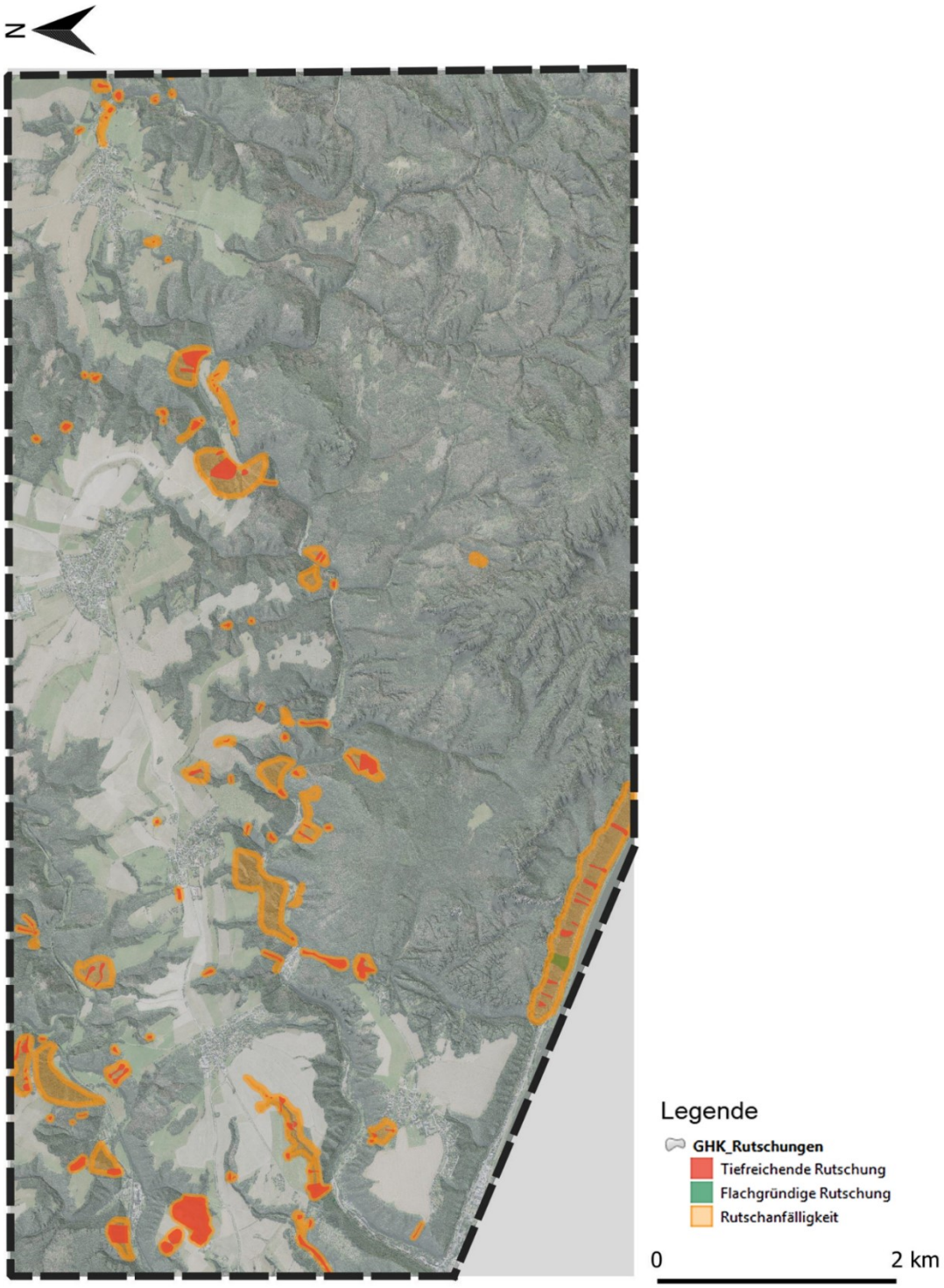
Legende: Rutschungen über Höhenlinien und Schattenbild mit 315°-Beleuchtung aufgenommen

Abbildung 11: Rutschstruktur aus Schattenbild im PG 1

Im PG 1 wurden insgesamt 187 Gefahrenhinweisflächen ausgewiesen. Davon sind 75 Flächen rutschanfällige Bereiche (außerdem 3 flachgründige und 109 tiefgründige Rutschungen). Diese nehmen eine Fläche von rund 1,74 km² ein, was einem prozentualen Anteil der rutschanfälligen Bereiche an der Gesamtfläche des PG 1 von etwa 3,4 % entspricht. Weitere Informationen zu den einzelnen Rutschungsflächen werden im Rutschungs-Layer bzw. im Begleitheft der GHK bereitgestellt. Abbildung 12 zeigt die Gefahrenhinweiskarte Rutschungen.

Der Aufwand für die Erstellung der GHK Rutschungen in einem GIS entsprechend der fernerkundlichen Methodik ist mäßig bis gering. Die Bearbeitung des rund 51 km² großen Pilotgebietes 1 erfolgte durch eine Mitarbeiterin bei 30 % Arbeitszeit in etwa zwei Monaten. Die Schwierigkeit besteht v. a. im Erkennen der Rutschungen anhand der Schattenbilder, Höhenlinien und Luftbilder. Manche sind eindeutig, andere weniger augenscheinlich zu identifizieren. Es ist einige Zeit notwendig, um ein Blick für die Rutschungsstrukturen zu bekommen. Besonders zu Beginn der Arbeiten ist nach der digitalen Erfassung von Gefahrenhinweisflächen eine Geländebegehungen zu empfehlen, um die Erscheinung von Rutschungen im Kartenbild mit den Begebenheiten im Gelände zu überprüfen. Die angewandte Methodik der Ausweisung von Gefahrenhinweisflächen für Rutschungen beruht auf der Annahme, dass eine Re-

aktivierung alter Rutschungen wahrscheinlich ist. Jedoch konnten für einige digital erfasste Rutschungen im Gelände nicht immer Anzeichen einer Reaktivierung nachgewiesen werden. Zur Ausweisung als tatsächliche Gefährdung sind der reinen Fernerkundung somit Grenzen gesetzt und es ist eine ausführliche Geländekartierung zur Bestätigung notwendig. Da während der Übersichtsbegehung keine Untersuchungen zur Aktivität bzw. Inaktivität erfolgten, wurden alle alten Rutschungen in die GHK ergänzt. Rutschungsflächen treten im PG 1 insbesondere in den Tälern von Kirnitzsch und Sebnitz auf.



Legende: GHK Stand 12/2023

Abbildung 12: PG 1 - Gefahrenhinweiskarte Rutschungen

4.2.4 Stein- und Blockschläge

Die Erstellung der Gefahrenhinweiskarte für Stein- und Blockschlag erfolgt in zwei Schritten. Zuerst werden im GIS potenzielle Anbruchbereiche für Sturzprozesse anhand der Hangneigungskarte ermittelt. Als potenzielle Anbrüche gelten laut AD-HOC-ARBEITSGRUPPE GEOLOGIE (2016) Hangneigungen ≥ 35°. Entsprechend des Methodenberichts vom LFU (2020) decken erfahrungsgemäß Hangneigungen ≥ 45° alle Bereiche mit potenziellen Sturzprozessen ab. Bei geringeren Neigungen überwiegt der Prozess des Rollens. Zu Vergleichszwecken wurden im PG 1 für beide Hangneigungen die potenziellen Anbrüche ermittelt. Dazu erfolgte eine Reklassifizierung der Hangneigungskarte, um Hangneigungen ≥ 35° bzw. ≥ 45° den Wert 1 und den entsprechend geringeren Neigungen den Wert 0 zuzuordnen. Der erzeugte Raster-Layer wird in einen Vektor-Layer konvertiert, sodass die potenziellen Anbruchbereiche zur besseren Weiterverarbeitung im GIS als Polygon-Layer vorliegen. Im PG 1 sind ca. 13,6 % der Gesamtfläche Bereiche mit Hangneigungen ≥ 35° und 5,6 % mit Hangneigungen ≥ 45°. Während der Geländebegehung im April 2023 wurden die ermittelten Anbruchbereiche stichprobenartig überprüft. Es konnte festgestellt werden, dass Hangneigungen < 45° üblicherweise kein Risiko für Sturzprozesse darstellen. Aus diesem Grund wird für die Erarbeitung der GHK Stein- und Blockschlag des PG 1 von potenziellen Anbruchbereichen bei Hangneigungen von ≥ 45° ausgegangen. Die ermittelten Anbruchbereiche wurden bereinigt, indem unplausible Abschnitte händisch entfernt worden sind. Dazu zählen insbesondere anthropogene Strukturen, wie z. B. Mauern und Wände von Bebauungen. Als hilfreich erweist sich hierbei der Verschnitt der Anbruchbereiche mit der geologischen Karte. Mittels fernerkundlicher Methode konnten nur wenige Abschnitte als Anbruch für Sturzprozesse ausgeschlossen werden, sodass nach der Bereinigung noch 5,5 % der Gesamtfläche potenzielle Anbrüche darstellen (vgl. Abbildung 13). Einzelne Blöcke im Hang von früheren Ereignissen wurden als Anbruchbereiche ebenfalls berücksichtigt unter der Annahme, dass eine erneute Bewegung durch Anstoß möglich ist.

Die Ausweisung der potenziellen Anbruchbereiche liefert die Dispositionskarte. Diese stellt eine vereinfachte Form der GHK dar, welche mit geringem Aufwand erstellt werden kann. Die Arbeiten in GIS sind unkompliziert und nehmen wenig Zeit in Anspruch. Der Aufwand der händischen Bereinigung ist etwas größer, sodass insgesamt für den ersten Schritt zur Erstellung der GHK Stein- und Blockschlag des PG 1 etwa 2-3 Tage benötigt wurden.

Im zweiten Schritt zur Erstellung der GHK Stein- und Blockschlag erfolgt die Erweiterung der generierten Anbruchbereiche um repräsentative Reichweiten von Sturzereignissen. Dafür wurden bestehende Arbeiten (siehe Diplomkartierung AL SANDOUK, 2009) sowie Informationen aus dem Ereigniskataster berücksichtigt. Lediglich für eine Handvoll Ereignisse sind Informationen zur Reichweite im Kataster hinterlegt. Deshalb wurden darüber hinaus 2D Modellierungen mithilfe der Software RocFall von

RocScience zur Reichweitenbestimmung durchgeführt. Die Auswahl der Profillinien im PG 1 für die Modellierungen erfolgte in Abhängigkeit der Hangmorphologie sowie der Geologie und in etwa gleichmäßig verteilt über die potenziellen Anbruchbereiche. Die Profillinien wurden über das QGIS Terrain Profile Plugin generiert und als dxf-File in RocFall2 importiert (vgl. Abbildung 14, Abbildung 15). Die Eingabedaten der Modellierungen zu den Oberflächeneigenschaften des Untergrundes entsprechen Referenzwerten aus der Software-Dokumentation. Die Eigenschaften der Sturzkörper wie Form, Masse und Größe wurden während der Geländebegehung im April 2023 sowie anhand des Ereigniskatasters bestimmt. Auf dem Datenträger zum Zwischenbericht vom Dezember 2023 sind der Simulationsreport und die Abbildungen der Modellierungen zu jeder Profillinie enthalten.

In der Annahme eines schlechten Waldzustandes im PG 1 aufgrund von Borkenkäfer und Waldbränden, wie zuletzt im August 2022, erfolgten die Simulationen der Reichweite von Sturzprozessen ohne die Berücksichtigung einer Walddämpfung. Insgesamt wurde anhand von 52 Profillinien im PG 1 Sturzweitenmodellierungen mit RocFall durchgeführt (siehe Abbildung 16). Die Ergebnisse der Simulationen sind im GIS bei der manuellen Erstellung von Reichweiten-Polygonen um die potenziellen Anbruchbereiche zu berücksichtigen (vgl. Abbildung 15).

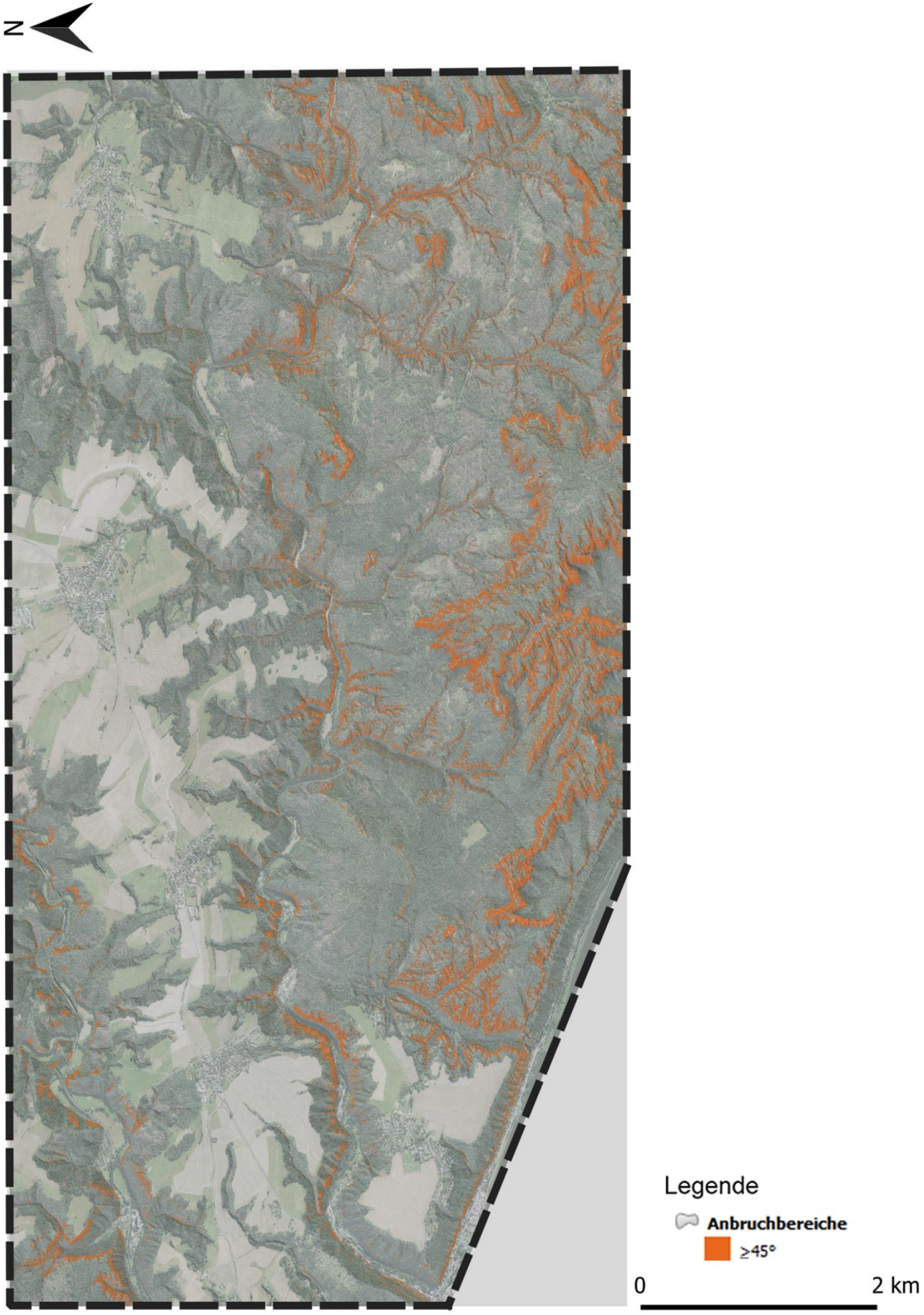


Abbildung 13: Dispositionskarte Stein- und Blockschlag PG 1

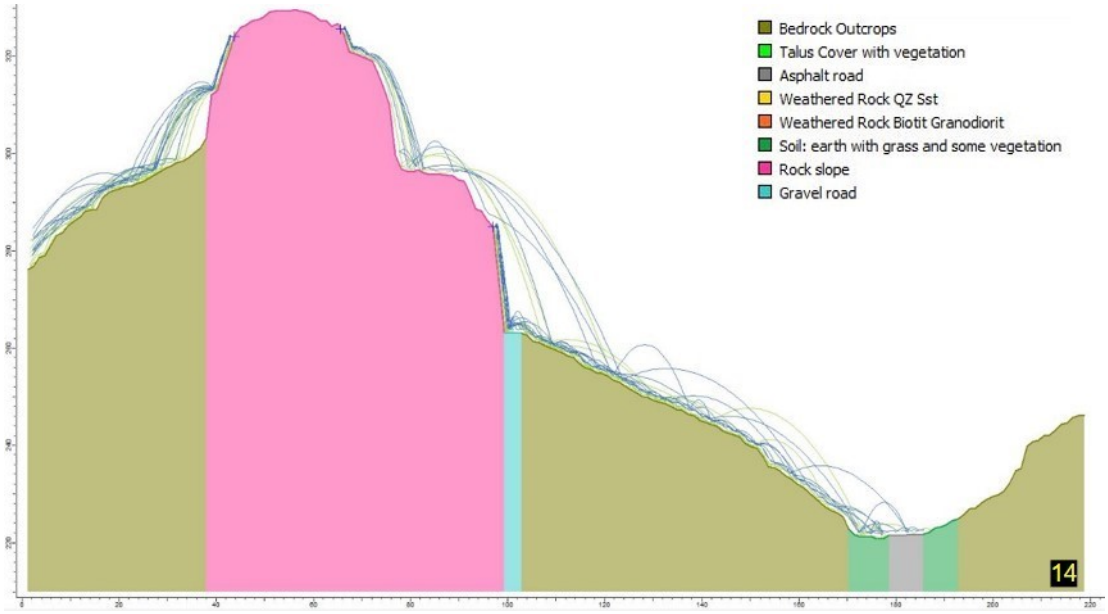
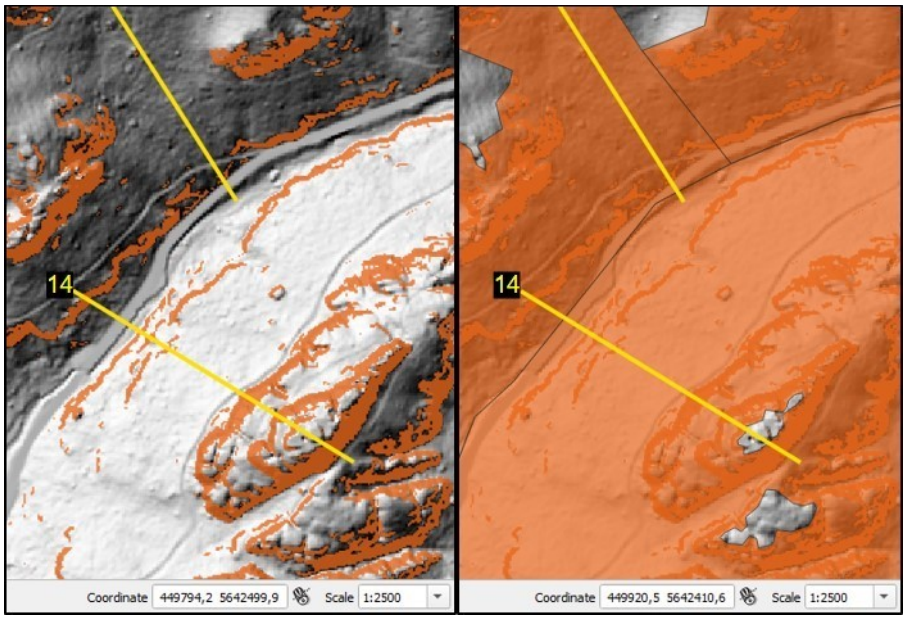


Abbildung 14: Sturzweitenmodellierung Profillinie 14 in RocFall



Legende: links - im Schattenbild, rechts - Schattenbild mit Polygon der Sturzweiten

Abbildung 15: Sturzweitenmodellierung Profillinie 14 in QGIS

Im Gegensatz zur überwiegend automatischen Generierung potenzieller Anbruchbereiche ist die manuelle Erweiterung der Gefahrenbereiche von Sturzprozessen auf die mögliche Sturzweite wesentlich aufwändiger und nimmt einige Zeit in Anspruch. Nach reichlich 3,5 Monaten Bearbeitung durch eine Mitarbeiterin in 30 %-Anstellung konnte für die Gesamtfläche des PG 1 die GHK Stein- und Blockschlag mit Reichweitenbestimmung erstellt werden.

Die GHK Stein- und Blockschlag wird nachfolgend um die Gefährdung durch Felsstürze ergänzt, sodass sich abschließend für das PG 1 zur Beurteilung der Gefährdung durch Sturzprozesse die Gefahrenhinweiskarte Stein-/Blockschlag/Felssturz ergibt (vgl. Kap. 4.2.5).

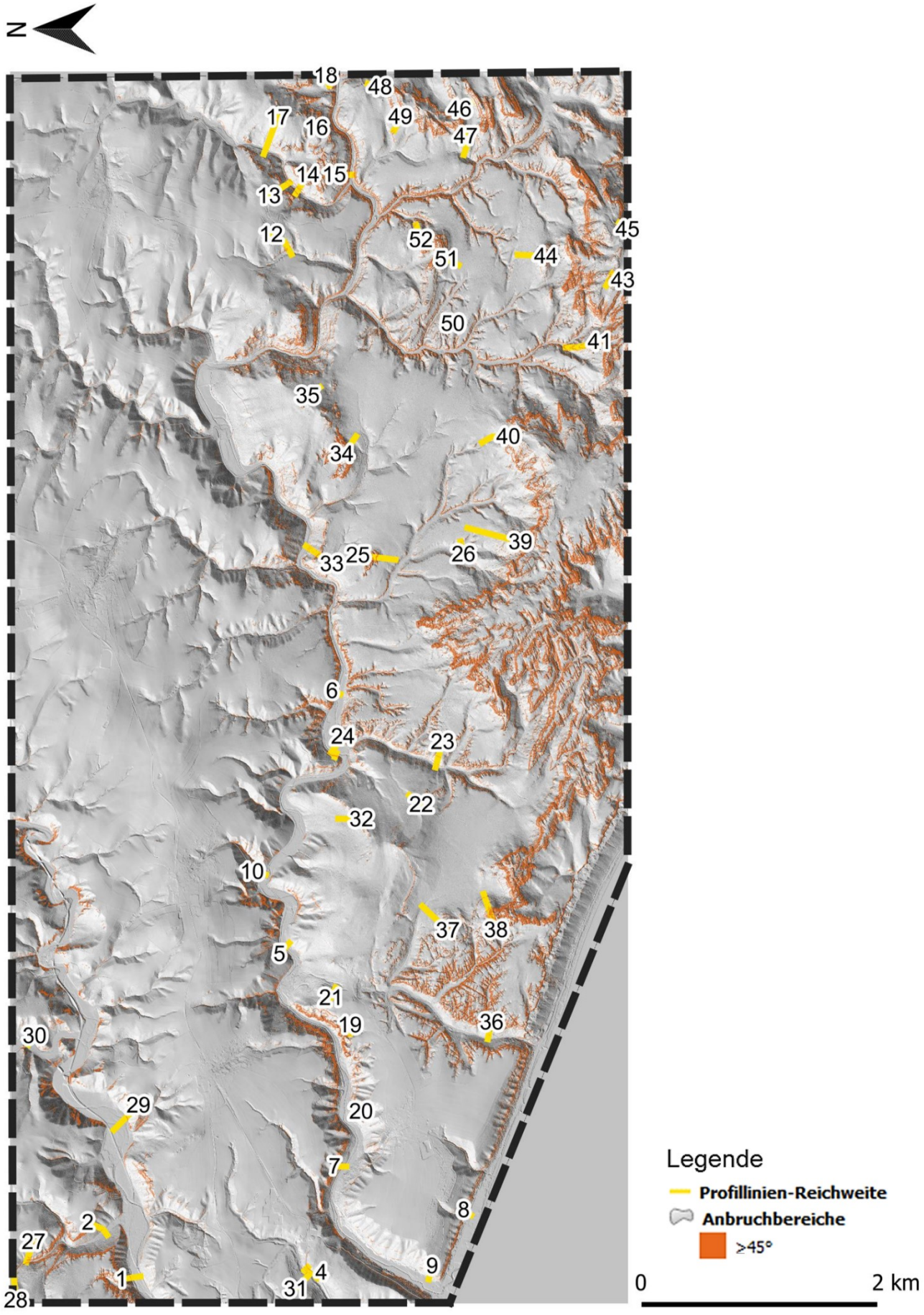


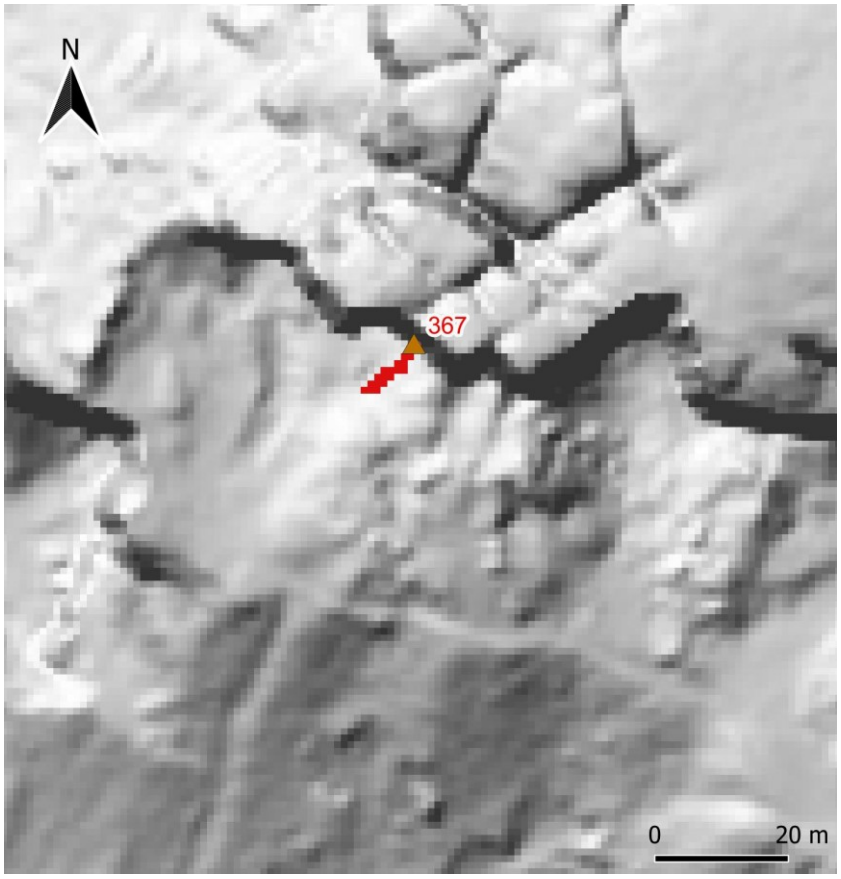
Abbildung 16: Profillinien der Sturzweitenmodellierung im PG 1

4.2.5 Felsstürze

Die Ermittlung der Gefahrenhinweisbereiche für größere Felsstürze mit einem Ausmaß von ≥ 10.000 m^3 erfolgt mittels GIS-gestützter Pauschalwinkelmodellierung ausschließlich für bereits dokumentierte Ereignisse. Simuliert wird die Sturzweite ganzer Felsbereiche. Im PG 1 sind mit Stand 11/2022 insgesamt 17 Felsstürze im Ereigniskataster hinterlegt, davon sind 2 Ereignisse Felsstürze größeren Ausmaßes.

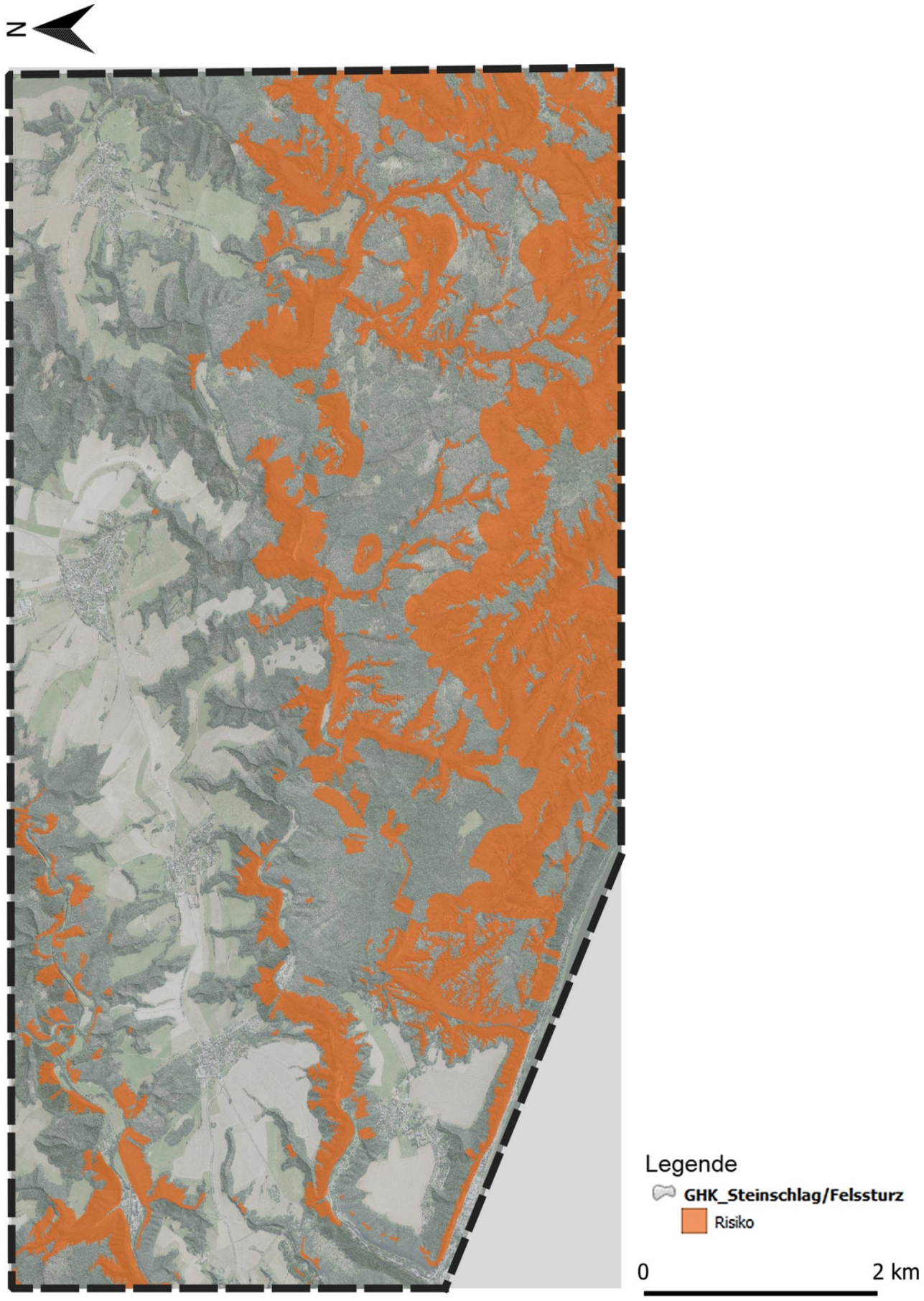
Die maximale Reichweite eines Felssturzes kann mit Hilfe eines Pauschalwinkels abgeschätzt werden. Der Ansatzpunkt im Anbruchbereich wird händisch anhand der Ereignisdokumentation sowie des Schattenbildes und der Höhenlinienkarte festgelegt und digitalisiert. Es folgt die Ermittlung repräsentativer Werte und der geschätzten maximalen Reichweite zur Auswahl des Pauschalwinkelansatzes (vgl. Kap. 3.4.3 Abbildung 6). Gemäß der Hanggeometrie wird für die hohen Wände im PG 1 bei der Pauschalwinkelmodellierung der größeren Felsstürze der Schattenwinkel angesetzt. Die Modellierung der Gefahrenhinweisbereiche wird in QGIS mit dem Viewshed-Tool der Sichtbarkeitsanalyse (Visibility Analysis) durchgeführt. Im Ergebnis werden Rasterzellen ausgewiesen, die, ausgehend vom Ansatzpunkt, im festgelegten Winkelsegment eingesehen werden können (Abbildung 17). Der Gefahrenhinweisbereich wird um den Anbruchbereich ergänzt.

Die Arbeiten und Modellierungen zur Felssturzgefährdung konnten an einem Tag realisiert werden. Aus der Zusammenführung der Gefahrenhinweisbereiche der größeren Felsstürze und der von Stein- und Blockschlag ergibt sich die GHK der Sturzprozesse. Abbildung 18 zeigt die Gefahrenhinweiskarte Stein-/Blockschlag/Felssturz. Im PG 1 sind rund 27 % der Gesamtfläche (13,8 km^2) durch Sturzprozesse gefährdet.



Legende: braunes Dreieck - Felssturzereignis, rotes Polygon - potenzielle Reichweite

Abbildung 17: Pauschalwinkelmodellierung Felssturz Nr. 367



Legende: GHK Stand 12/2023

Abbildung 18: Gefahrenhinweiskarte Stein-/Blockschlag/Felssturz PG 1

4.2.6 Murgänge

Die Erhebung der Gefahrenhinweisbereiche für Murgänge im PG 1 durch den halbautomatischen Ansatz der Kombination und Wichtung von Reliefparametern zur Extraktion von Murgangrinnen weist zwar allgemein einen geringen Aufwand auf, jedoch ungeachtet der Einarbeitungszeit in die Ermittlung und Erstellung aller erforderlichen Reliefparameter. Im Hinblick auf das zeitliche Fortschreiten des Projektes wurde daher als methodische Vorgehensweise auf die manuelle Identifikation von Murgangrinnen in einem GIS zurückgegriffen. Die Methode stützt sich auf die Annahme, dass für bekannte Murgangrinnen wiederholt Ereignisse möglich sind. Deshalb wurden als erstes Rinnen erfasst für die bereits dokumentierte Ereignisse im Kataster vorliegen. Für das PG 1 sind insgesamt 20 Fließprozesse in 13 verschiedenen Murgangrinnen eingetragen. Im Anschluss an die Auswertung des Ereigniskatasters erfolgte die flächendeckende Identifizierung von Murgangrinnen analog der Erfassung von Rutschungen (vgl. Kapitel 4.2.3) mit Hilfe der Fischnetz-Methode sowie des DGMs und Luftbildern.

Kriterien für das Auftreten von Murgängen ist ein Gefälle des Hanges bzw. Gerinnebettes von 20°-45°, das Vorhandensein eines Taleinschnittes oder einer Erosionsrinne und das Vorhandensein eines Fließgewässers oder Wegsamkeit für den Oberflächenabfluss. Weiterhin ist im Schattenbild und auf Luftbildern auf typische geomorphologische Strukturen der Murgänge zu achten. Dazu zählen u. a. Rutschungen/Stürze als Materiallieferant in der Anrisszone, seitlich abgelagerte Sedimentwälle (Levées) in der Transportzone und Schwemmfächer in der Ablagerungszone. Abbildung 19 zeigt einige Beispiele bei denen die gekennzeichneten Gefahrenhinweisbereiche für Muren alle drei Kriterien erfüllen. Außerdem ist im Schattenbild die Ablagerungszone der Murgangrinnen durch den Schwemmfächer gut zu erkennen. Grundsätzlich wurde der Gefährdungsbereich in der Ablagerungszone entsprechend den Informationen aus dem Ereigniskataster sowie anhand der geomorphologischen Merkmale ausgewiesen. Wie schon bei der fernerkundlichen Erfassung von Rutschungen sind die Luftbilder aufgrund der ausgeprägten Bewaldung im PG 1 selten hilfreich bei der Identifikation von Murgangrinnen. Zur Abgrenzung der Gefährdungsbereiche einiger Murgänge im Kirnitzschtal wurden bereits bestehende Arbeiten berücksichtigt (siehe Masterarbeit MÜLLER 2021).

Im PG 1 sind insgesamt 27 Murgangrinnen identifiziert worden. Die meisten liegen im Kirnitzschtal, aber auch im Sebnitz- und Elbtal sind Murgangrinnen erfasst. Rund 0,2 % der Gesamtfläche (0,10 km^2) im PG 1 sind durch Fließprozesse gefährdet. Abbildung 20 zeigt die Gefahrenhinweiskarte Murgänge.

Der Aufwand für die Erstellung der GHK Murgänge ist ähnlich dem der GHK Rutschungen (vgl. Kapitel 4.2.3). Es nimmt einige Zeit in Anspruch einen Blick für die geomorphologischen Strukturen und Merkmale von Muren zu bekommen. Weiterhin ist das flächendeckende systematische Absuchen des

Untersuchungsgebietes zeitaufwendig. Die Bearbeitung erfolgte durch eine Mitarbeiterin bei 30 % Arbeitszeit in ca. einem Monat.

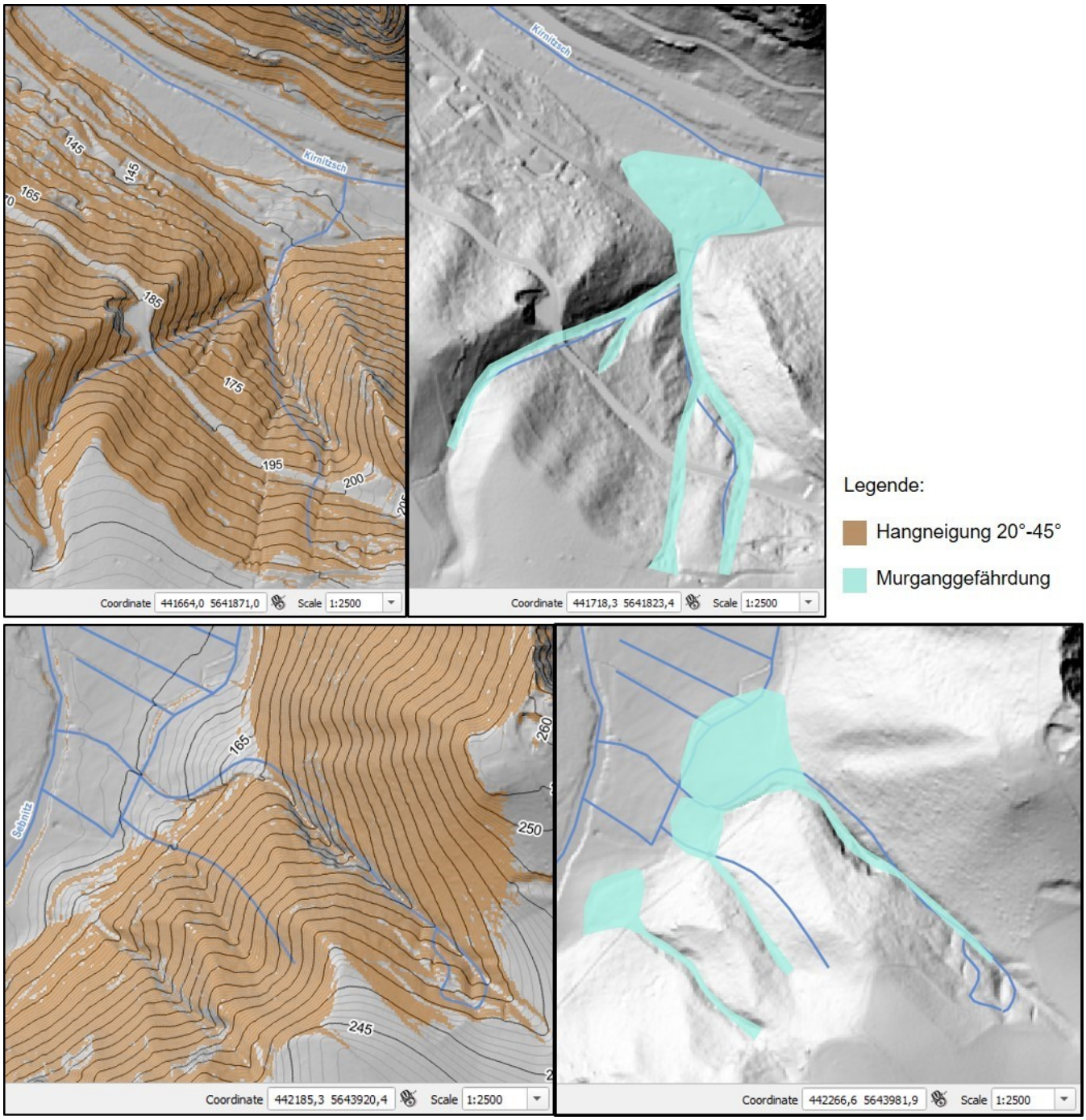
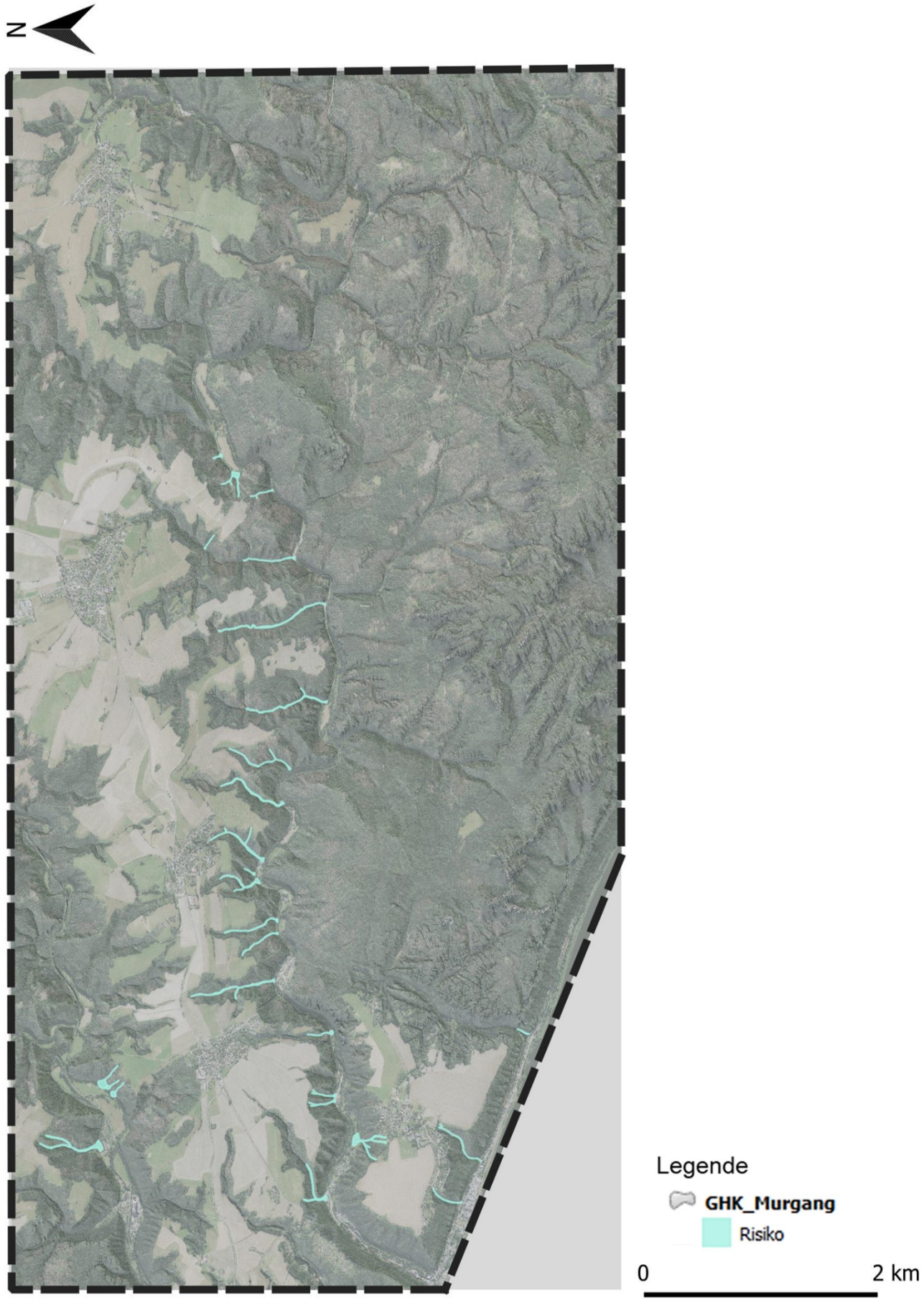


Abbildung 19: GIS-gestützte Identifizierung von Murgängen anhand verschiedener Merkmale im PG 1



Legende: GHK Stand 12/2023

Abbildung 20: Gefahrenhinweiskarte Murgang PG 1

4.3 Pilotgebiet 2: Müglitztal

4.3.1 Ausgangssituation

Das Pilotgebiet 2 umfasst das Müglitztal, welches südwestlich der Städte Pirna und Dresden liegt. Das Müglitztal ist Teil des Landkreises Sächsische Schweiz-Osterzgebirge und erstreckt sich in diesem vom Nordosten bis ins Zentrum. Die bearbeitete Fläche von ca. 69 km^2 reicht von Dohna im Nordosten bis nach Glashütte im Südwesten. Abbildung 21 zeigt das PG 2 im geographischen Überblick. Aus dem geologischen Überblick von Abbildung 22 ist ersichtlich, dass im PG 2 verschiedene lithologische Einheiten anstehen, wie Gneis, Tonschiefer, Sandstein und Rhyolith. Die Lockergesteinsbedeckung umfasst u. a. Auenlehm, Löss/Lösslehm und Schuttdecken. Hinsichtlich der geologischen Situation konnten die methodischen Ansätze somit in einem heterogenen Gebiet getestet werden, nachdem die Methodik im PG 1, mit der Dominanz von Kreidesandstein und Granodiorit, überwiegend für homogene Bedingungen angewandt wurde. Daraus ergibt sich eine Überprüfung der Übertragbarkeit bzw. Anwendbarkeit der ausgewählten Methodik auf andere Gebiete in Sachsen.

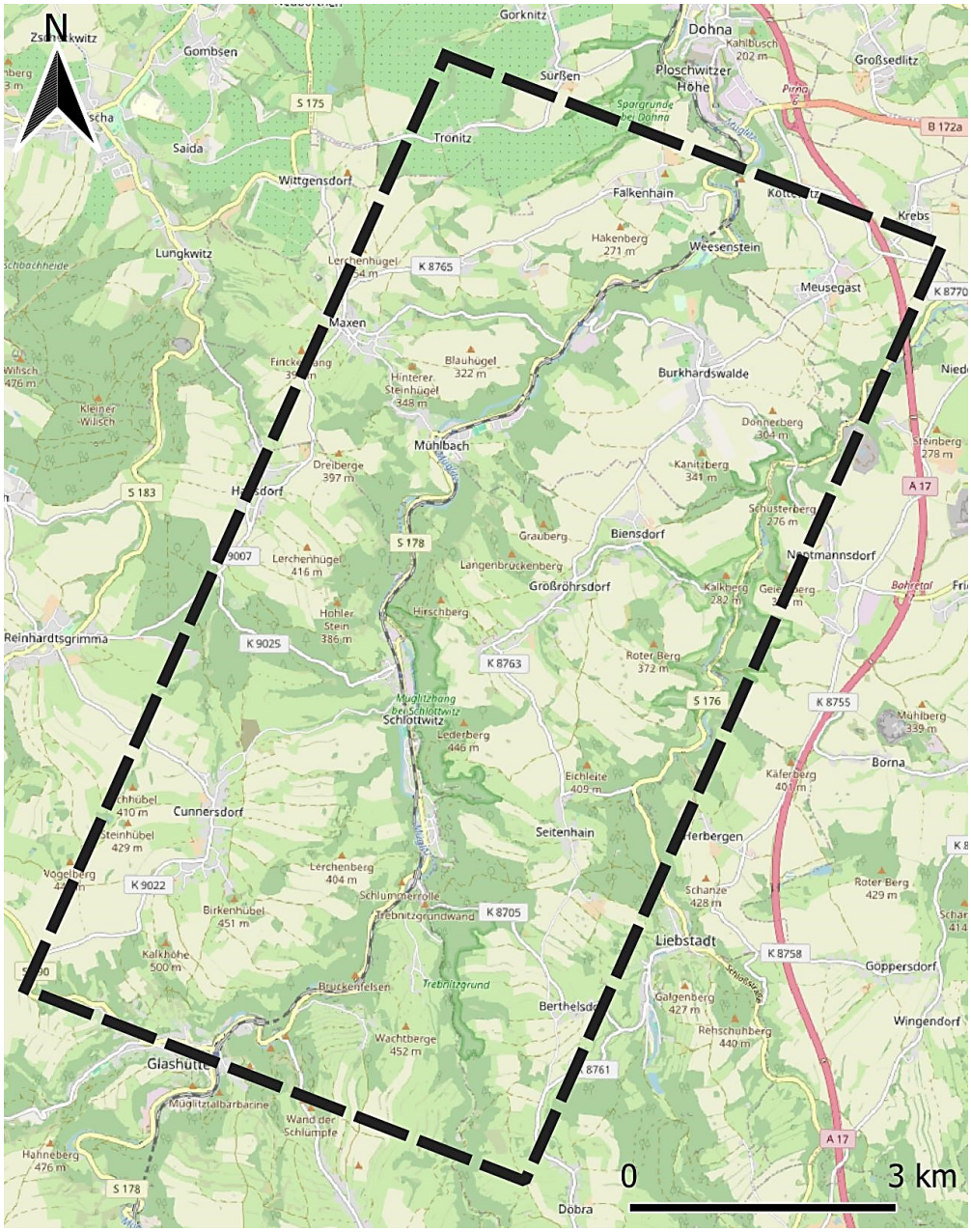


Abbildung 21: Pilotgebiet 2 - Müglitztal und Umgebung im geographischen Überblick

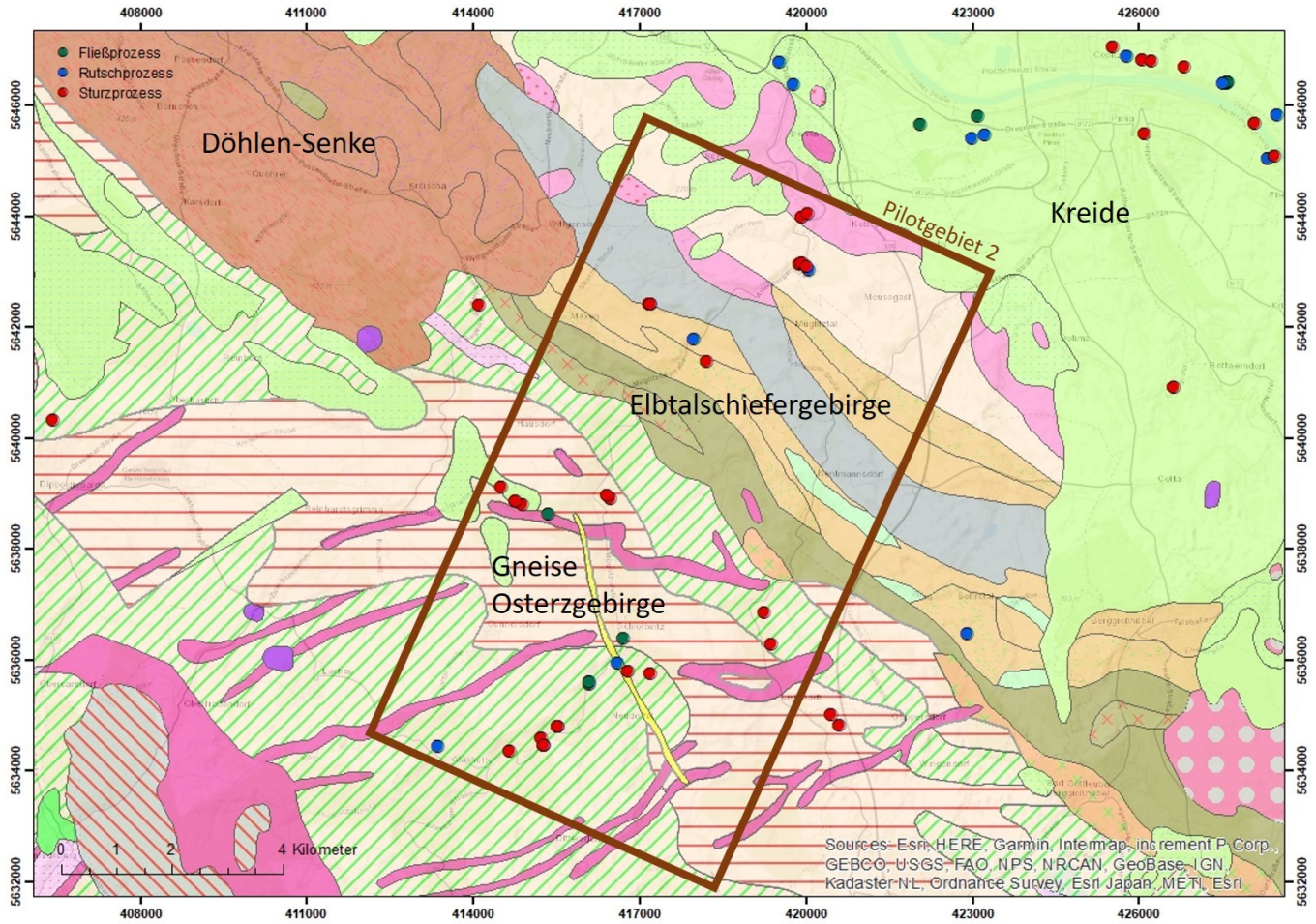


Abbildung 22: Pilotgebiet 2 - Müglitztal und Umgebung im geologischen Überblick

4.3.2 Datengrundlage und Datenaufbereitung

Die Datengrundlage zur Bearbeitung des PG 2 ähnelt der von PG 1 (vgl. Kapitel 4.2.2). Vom LfULG wurden folgende Daten zur Verfügung gestellt:

- GK50 Pirna – Geologische Karte im Maßstab 1:50.000, Kartenblatt L5148_Pirna
- Ereigniskataster – Informationen zu erfassten MB-Ereignissen, Stand 02/2024

Im PG 2 sind insgesamt 34 MB-Ereignisse erfasst. Davon sind 5 Ereignisse Rutsch-, 4 Fließ- und 25 Sturzprozesse (vgl. Abbildung 22).

Aus den offenen Geodaten für Sachsen wurden online vom Server die Datensätze zur DTK25, DOP20 und DGM1 (vgl. Kapitel 4.2.2) heruntergeladen. Das PG 2 setzt sich aus je 28 Kacheln von DGM1 und DOP20 der Größe 2 km x 2 km zusammen. Die DOP20 Kacheln stehen als tiff-Bild zur Verfügung und die DGM1 Kacheln als xyz-Dateien, sodass für letztere zur Weiternutzung in einem GIS eine Umwandlung ins tiff-Format erfolgte. Aus dem DGM1 wurden im GIS weitere Karten und Informationen abgeleitet.

Dazu zählen zwei Schattenbilder/Schummerungskarten mit einem Beleuchtungswinkel von 315° bzw. 45°, Höhenlinien- (1 m, 10 m), Hangneigungs- und Expositionskarten.

4.3.3 Rutschungen

Die Vorgehensweise zur Erstellung der Gefahrenhinweiskarte für Rutschungen im PG 2 entspricht dem Vorgehen wie im PG 1 (vgl. Kapitel 4.2.3), d. h. Rutschstrukturen wurden manuell über ein systematisches Absuchen digitaler Karten im GIS ermittelt. Dabei wurde ebenfalls die Fischnetzmethode angewandt und im Schattenbild nach typischen Rutschformen Ausschau gehalten, unter Zuhilfenahme weiterer digitaler Informationen (z. B. GK, Ereigniskataster). Auch im PG 2 ist der Informationsgehalt aus den Orthofotos aufgrund von flächendeckendem Bewuchs stark eingeschränkt. Eine Übersichtsbegehung im Gelände erfolgte im April 2024 zur stichprobenartigen Überprüfung der mittels Fernerkundung ausgewiesenen Rutschungen.

Wie im PG 1 wurden die Rutschungsflächen in der GHK von PG 2 in drei Kategorien unterteilt - flachgründige Rutschungen (grün), tiefgründige Rutschungen (rot) und rutschanfällige Bereiche (orange). Flachgründige Rutschungen lassen sich als oberflächennaher Prozess aus dem Schattenbild schwer ableiten und beruhen daher auf Angaben aus dem Ereigniskataster. In Abbildung 23 sind zwei Beispiele der Erfassung von Rutschungen im PG 2 aufgeführt.

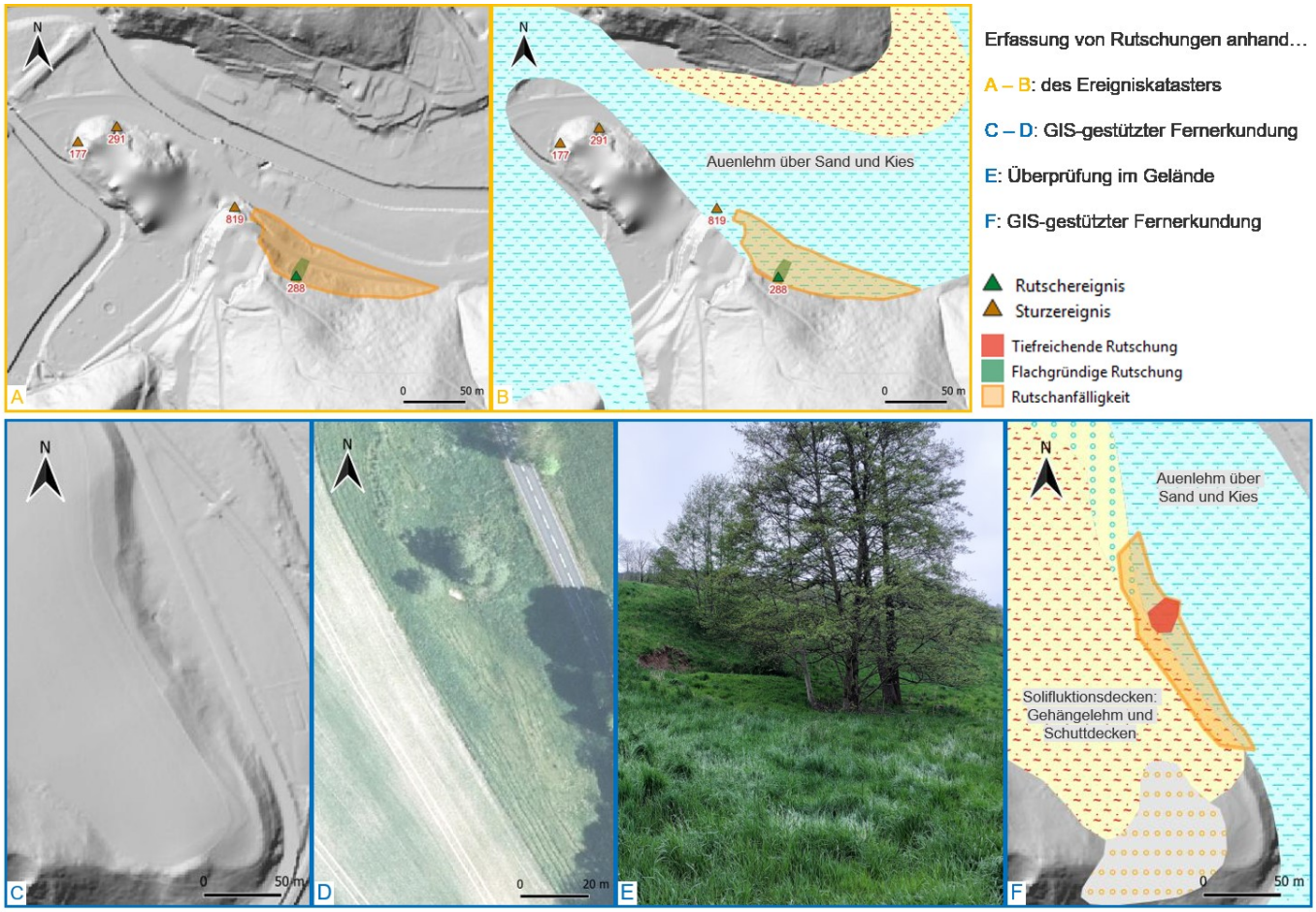
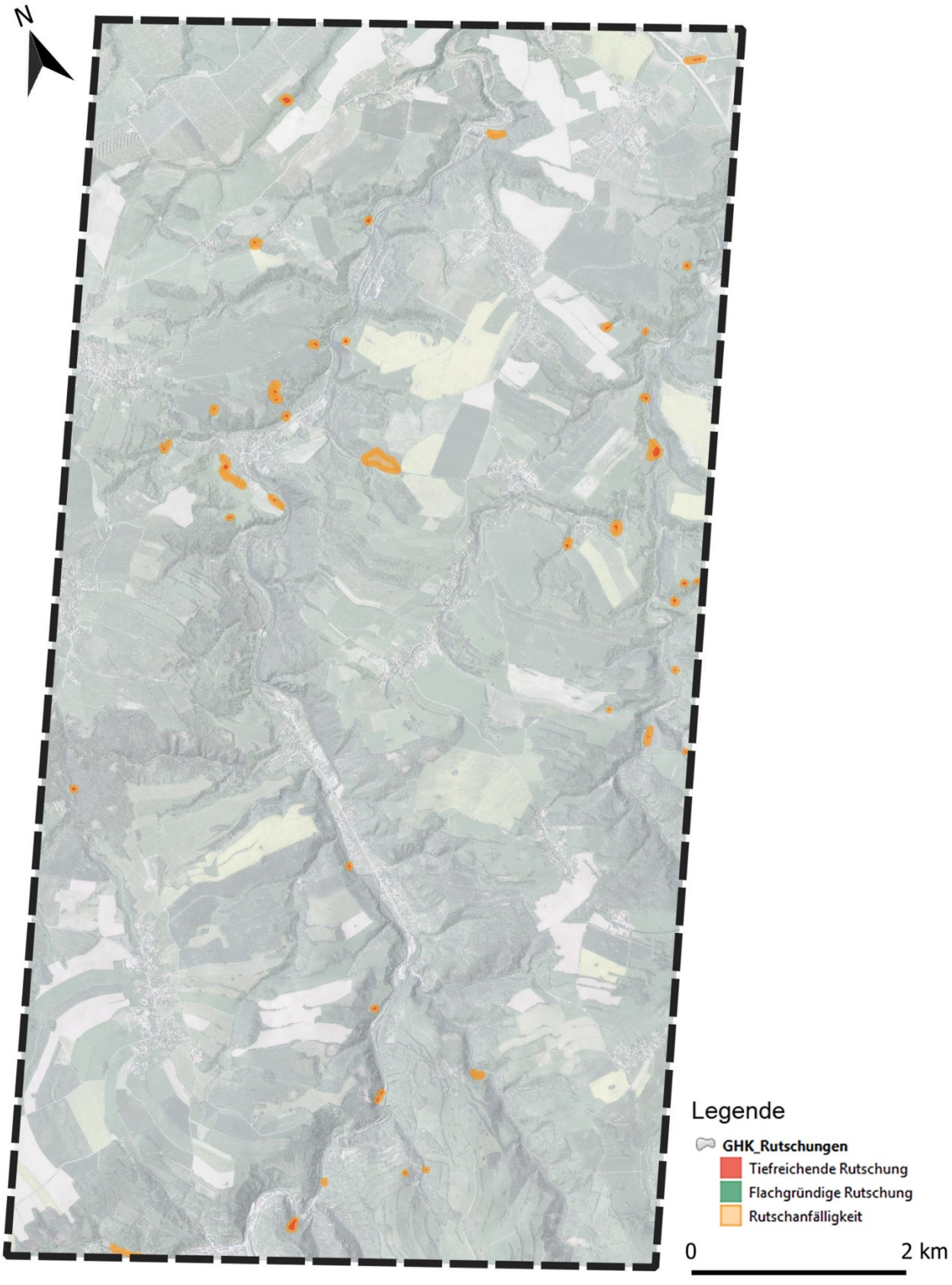


Abbildung 23: Beispiele der manuellen Erfassung von Rutschungen im PG 2

Im PG 2 wurden insgesamt 84 Gefahrenhinweisflächen ausgewiesen. Davon sind 39 Flächen rutschanfällige Bereiche, welche 4 flachgründige und 41 tiefgründige Rutschungen beinhalten. Die rutschanfälligen Bereiche nehmen eine Fläche von rund 0,12 km² ein, was einem prozentualen Anteil an der Gesamtfläche des PG 2 von etwa 0,18 % entspricht. Abbildung 24 zeigt die Gefahrenhinweiskarte Rutschungen.

Der Aufwand für die Erstellung der GHK Rutschungen von PG 2 ist äquivalent zu dem im PG 1, da die selbe Vorgehensweise unter den selben Bedingungen angewandt worden ist. Mit fortlaufender Bearbeitung ergibt sich eine gewisse Übung im Erkennen von Rutschstrukturen aus dem Schattenbild, was die Erfassung von Gefahrenhinweisbereichen im Laufe der Zeit erheblich verbessert und beschleunigt. Für nicht eindeutige Bereiche bzw. zur Bestätigung einer Gefährdung ist eine Überprüfung im Gelände anzuraten.



Legende: GHK Stand 04/2024

Abbildung 24: Gefahrenhinweiskarte Rutschungen PG 2

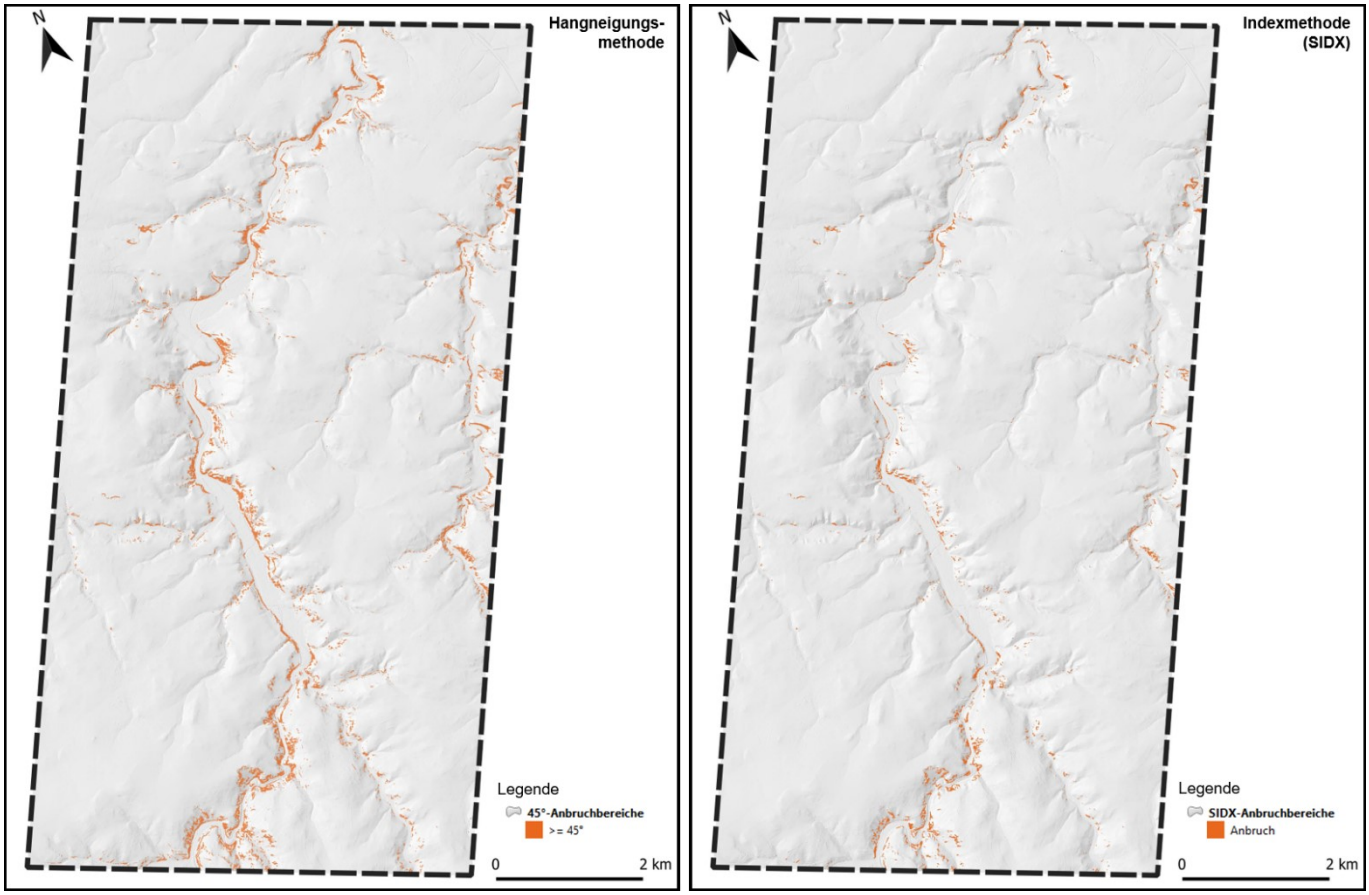
4.3.4 Stein- und Blockschläge

Im PG 2 erfolgte die Erstellung der Gefahrenhinweiskarte für Stein- und Blockschläge wie im PG 1 in zwei Schritten. Zuerst wurde die Dispositionskarte, d. h. die potenziellen Anbruchbereiche für Stürze ermittelt. Anschließend wurde der potenziell von Stürzen betroffene Prozessraum durch eine Trajektorienmodellierung auf Grundlage der Dispositionskarte generiert. Beide Schritte wurden im GIS ausgeführt.

Analog zur Bearbeitung von PG 1 ergibt sich die Ermittlung der Dispositionskarte anhand einer Hangneigung von ≥ 45° (LFU, 2020). Die Arbeitsschritte sind entsprechend in Kapitel 4.2.4 erläutert. Im PG 2 sind ca. 0,65 % (0,45 km²) der Gesamtfläche Bereiche mit Hangneigungen ≥ 45° und somit potenzielle Anbruchbereiche für Sturzprozesse.

Darüber hinaus ist im PG 2 eine weitere Methode zur Ermittlung potenzieller Anbrüche angewandt worden. Zur Darstellung geologischer Aufschlüsse wie Felswände und herausgewitterter Felsnasen kommt ein Index zum Einsatz, welcher im MABEIS-Projekt in Rheinland-Pfalz entwickelt worden ist (HAGGE-KUBAT ET AL., 2021). Der SIDX-Index dient der Präzisierung der Ausweisung von Steinschlagquellgebeiten. Auf Basis abgeleiteter Daten aus dem DGM berechnet sich der SIDX-Index als Quotient aus dem Logarithmus der realen Geländeoberfläche und dem der Hangneigung und unterteilt das Gelände damit in direkte Aufschlüsse inklusive geländestützendes Mauerwerk (SIDX > 0) und lediglich steiles bodenbedecktes Gelände (SIDX ≤ 0). Letzteres stellt kein Quellgebiet für Sturzprozesse dar und wird in der Dispositionskarte daher nicht berücksichtigt. Im PG 2 sind entsprechend dem Index 0,15 % (0,11 km²) der Gesamtfläche potenzielle Anbruchbereiche für Stürze.

Die Dispositionskarte stellt eine einfache Form der GHK ohne Berücksichtigung des Sturzprozessraumes dar und liefert erste flächendeckende Hinweise zu Anbruchbereichen von Stürzen. Der Aufwand für die Erstellung der Dispositionskarte nach der Hangneigungs- und nach der Indexmethode im GIS ist miteinander vergleichbar und eher gering (vgl. Kapitel 4.2.4). Abbildung 25 zeigt die Dispositionskarte für beide Methoden im Vergleich.



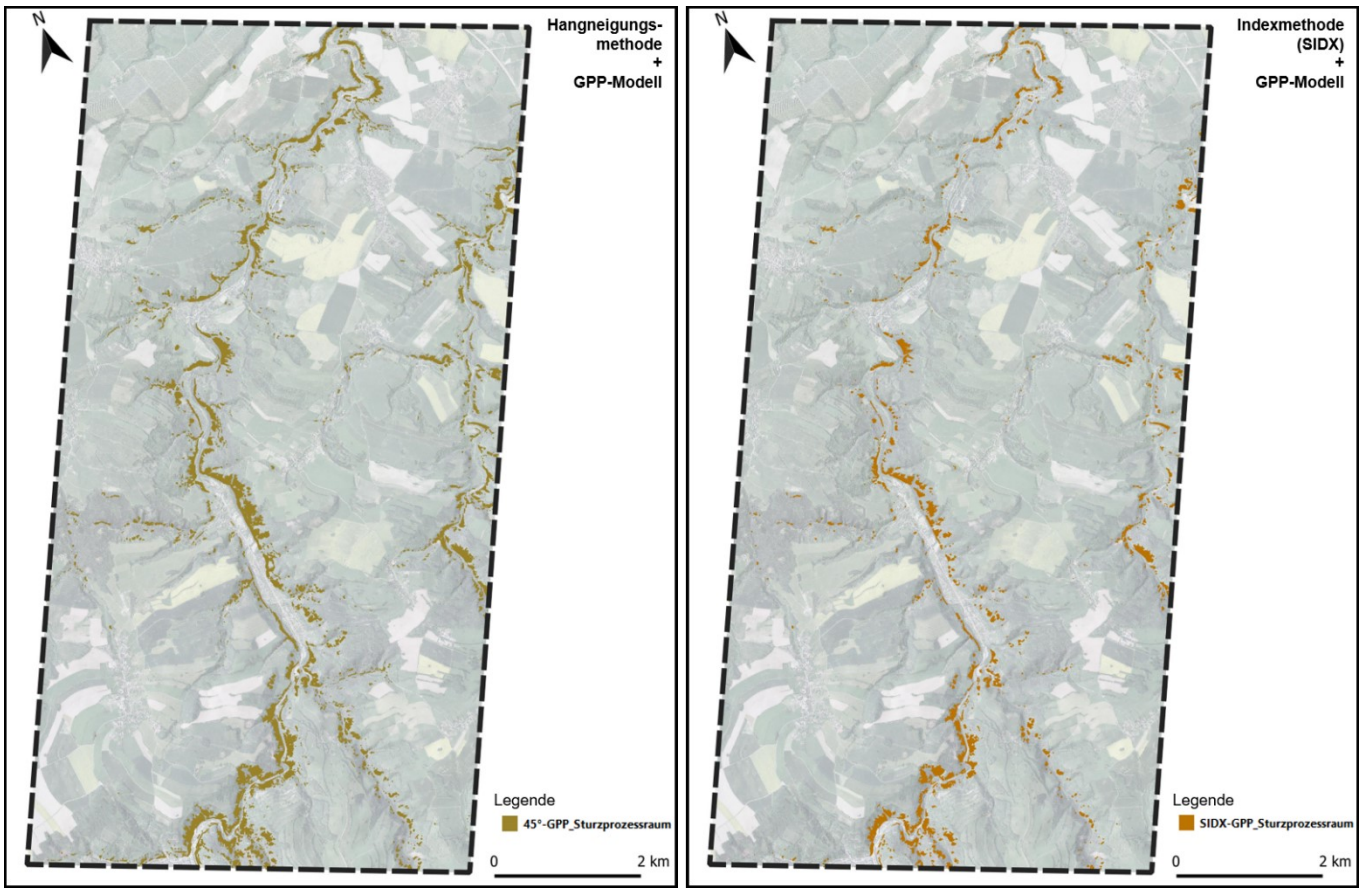
Legende: potenzielle Anbrüche für Sturzprozesse entsprechend der Hangneigung (links) sowie über den SIDX-Index (rechts)

Abbildung 25: Dispositionskarte Stein- und Blockschlag PG 2 - Methodenvergleich

Zur Ermittlung der potenziell von Sturzprozessen betroffenen Bereiche wurde eine flächendeckende Trajektorienmodellierung durchgeführt. Diese erfolgte durch das SAGA GIS Tool "Gravitational Process Path" (GPP). Das Tool steht als vorinstalliertes Plugin im GIS kostenfrei zur Verfügung und liefert im Ergebnis die potenziellen Sturzprozessräume auf Grundlage der generierten Anbruchgebiete und des DGMs. Die Modellansätze des Tools sind nicht rein physikalisch, sondern basieren auf validierten empirischen Prinzipien, sodass für die Modellierung nur wenige geotechnische Eingabeparameter notwendig sind. Die Eingabedaten der Modellierung wie Modellansatz und Parameterwerte sind der Arbeit von WICHMANN (2017) zur Software entnommen und im Handbuch "Gefahrenhinweiskarte" des Projektes aufgeführt. Die Ausgabedatei der Modellierung ist eine Rasterkarte. Diese gibt je Rasterzelle die absolute Anzahl der modellierten Trajektoriendurchläufe wieder. Die Sturzmodellierung im PG 2 erfolgte ohne Berücksichtigung der Vegetation in der Annahme eines schlechten Waldzustandes. Generell fließt die Vegetation in der Modellierung mit GPP über die Eingabe von Rauigkeitsparametern der Geländeoberfläche ein.

Im Vergleich zur manuellen Ausweisung der Sturzräume im PG 1 auf Basis der Modellierung repräsentativer Ereignisse mit RocScience liegt der Vorteil der Trajektorienmodellierung mit GPP im PG 2 in der

automatisch über die gesamte Fläche gerechneten Sturzsimulation. Daraus ergibt sich eine Zeitersparnis und eine präzisere Ausweisung der Sturzprozessräume. Zudem ist das GPP Tool als SAGA GIS Open Source Software eine kostenfreie Alternative zur Sturzweitenmodellierung mit der kostenpflichtigen Software RocScience. Die Trajektorienmodellierung in PG 2 erfolgte für die potenziellen Anbrüche zum einen entsprechend der Hangneigungsmethode und zum anderen entsprechend der Indexmethode, sodass zwei Gefahrenhinweiskarten zu Stein- und Blockschlag erstellt worden sind. Nach der Hangneigungsmethode und GPP-Modellierung ergibt sich ein sturzgefährdeter Bereich von 2,78 % (1,92 km²) an der Gesamtfläche von PG 2. Nach der Indexmethode und GPP-Modellierung ist der sturzgefährdete Bereich mit 1,26 % (0,87 km²) der Gesamtfläche geringer, da hier steile Hangbereiche ohne an der Oberfläche anstehendem Fels nicht berücksichtigt werden. Eine Gegenüberstellung der Gefahrenhinweiskarten zu Stein- und Blockschlag bietet die Abbildung 26.



Legende: mit GPP-Modell generierte Gefährdungsbereiche von Anbrüche entsprechend der Hangneigung (links) und des SIDX-Index (rechts)

Abbildung 26: Gefahrenhinweiskarte Stein- und Blockschlag PG 2 - Methodenvergleich

Verglichen mit der aufwendigen manuellen Generierung der Sturzprozessräume im PG 1 ist die automatische Herangehensweise im PG 2 mittels GPP zeitsparend und somit besser geeignet für eine flächendeckende Ermittlung sturzgefährdeter Bereiche. Die Aufbereitungsschritte nehmen etwas Zeit in Anspruch, sind aber allgemein überschaubar. Die Modellierung dauert je nach Größe des Gebietes und

Menge potenzieller Anbruchbereiche wenige bis mehrere Stunden. Aufgrund der großen Gesamtfläche ist eine Unterteilung des Untersuchungsgebietes in mehrere Abschnitte für die Trajektorienmodellierung sinnvoll. Dadurch lässt sich die anfallende Datenmenge in GIS schneller verarbeiten. Für die Gesamtfläche von PG 2 konnte die GHK Stein- und Blockschlag (Anbrüche und Sturzprozessräume) in etwa 1 $^1/_2$ Monaten durch eine Mitarbeiterin in 30 %-Anstellung bearbeitet werden.

4.3.5 Felsstürze

Die Ermittlung der Gefahrenhinweisbereiche für Felsstürze soll wie in PG 1 erfolgen (vgl. Kapitel 4.2.5), d. h. über eine GIS-gestützte Pauschalwinkelmodellierung für bereits dokumentierte Ereignisse größeren bis sehr großen Ausmaßes. Im PG 2 sind mit Stand 02/2024 insgesamt 2 Felsstürze im Ereigniskataster erfasst. Beide sind als sehr kleine Felsstürze (≥ 10 - 100 m^3) dokumentiert und daher bereits durch die GHK Stein- und Blockschlag abgedeckt. Aus diesem Grund war im PG 2 keine Pauschalwinkelmodellierung zur Bestimmung der Gefährdungsbereiche durch Felsstürze notwendig.

4.3.6 Murgänge

Im PG 2 wurden zwei Vorgehensweisen zur Ermittlung der Gefahrenhinweisbereiche für Murgänge umgesetzt. Der erste Ansatz ist die manuelle Erfassung von Murgangrinnen mittels Fernerkundung. Der zweite Ansatz ist eine halbautomatische Methode, bei der zuerst die potenziellen Anrissbereiche berechnet werden und anschließend eine Murgangmodellierung durchgeführt wird. Die Modellierung erfolgt mit dem SAGA GIS Werkzeug "Gravitational Process Path" (GPP). Beide Vorgehensweisen werden im GIS ausgeführt.

Die GIS-gestützte Fernerkundung zur Identifikation von Murgangrinnen im PG 2 erfolgte wie im PG 1 (vgl. Kapitel 4.2.6). Vorausgesetzt ist die Annahme, dass innerhalb bekannter Murgangrinnen wiederholt Ereignisse möglich sind. Informationen zu vergangenen Murenereignissen liefert u. a. das Ereigniskataster. Im PG 2 sind mit Stand 02/2024 insgesamt 4 Ereignisse mit Fließprozessen dokumentiert. Neben der Auswertung des Ereigniskatasters wurde das Untersuchungsgebiet im Schattenbild flächendeckend nach potenziellen Murgangrinnen und Murgangstrukturen manuell abgesucht. Das methodische Vorgehen ist angelehnt an die Erfassung von Rutschungen (vgl. Kapitel 4.3.3). Die Kriterien für das Auftreten von Murgängen sowie typische geomorphologische Strukturen sind in Kapitel 4.2.6 beschrieben. Beispiele für die manuelle Erfassung von Murgängen im PG 2 liefert die Abbildung 27.

Die halbautomatische Methode zur Identifikation von Gefährdungsbereichen für Gerinnemuren ist abgeleitet aus dem Bericht von RINDERER ET AL. (2023). Demnach werden die potenziellen Anrissbereiche von Muren im Gerinne empirisch ermittelt. Die Einzugsgebietsgröße und Neigung von Gerinnen wird genutzt, um mit Hilfe eines Grenzgefälle-Ansatzes im GIS Murenanrisspunkte zu berechnen. Im PG 2 wurden kleine Einzugsgebiete bis zu einer Untergrenze von 0,01 km^2 berücksichtigt. Es gilt: je kleiner

das Einzugsgebiet, desto größer muss die Gerinneneigung sein, damit Murgänge anreißen. Über die Einzugsgebietsgröße wird für jeden Gerinnepunkt das Grenzgefälle berechnet und anschließend der Gerinneneigung gegenübergestellt. Ist die Gerinneneigung größer als das Grenzgefälle besteht eine Murfähigkeit. Weitere Erläuterungen zum Ansatz sowie die Gleichung zur Berechnung sind im Handbuch "Gefahrenhinweiskarte" des Projektes enthalten.

Auf Grundlage der potenziellen Anrissbereiche und des DGMs wurde eine flächendeckende Murgangmodellierung durchgeführt. Diese wurde im GIS mittels SAGA GIS Tool "Gravitational Process Path" (GPP) umgesetzt (vgl. GPP im Kapitel 4.3.4). Die Modellansätze und Parameter sind entsprechend der Gefahrenart der Murgänge zu wählen und im Handbuch "Gefahrenhinweiskarte" des Projektes, in Anlehnung an die Arbeit von WICHMANN (2017), notiert. Die Modellierung liefert als Ausgabedatei eine Rasterkarte der potenziell von Gerinnemuren gefährdeten Bereiche. Wie bei der Sturzmodellierung im PG 2 erfolgte die Murgangmodellierung ohne Berücksichtigung der Vegetation in der Annahme eines schlechten Waldzustandes. Abbildung 28 zeigt einen Ausschnitt der halbautomatischen Erfassung von Muren im Umfeld eines dokumentierten Murgangereignisses. Der linke Ausschnitt stellt die berechneten potenziellen Anrisse und der rechte Ausschnitt den modellierten Murenprozessraum dar.

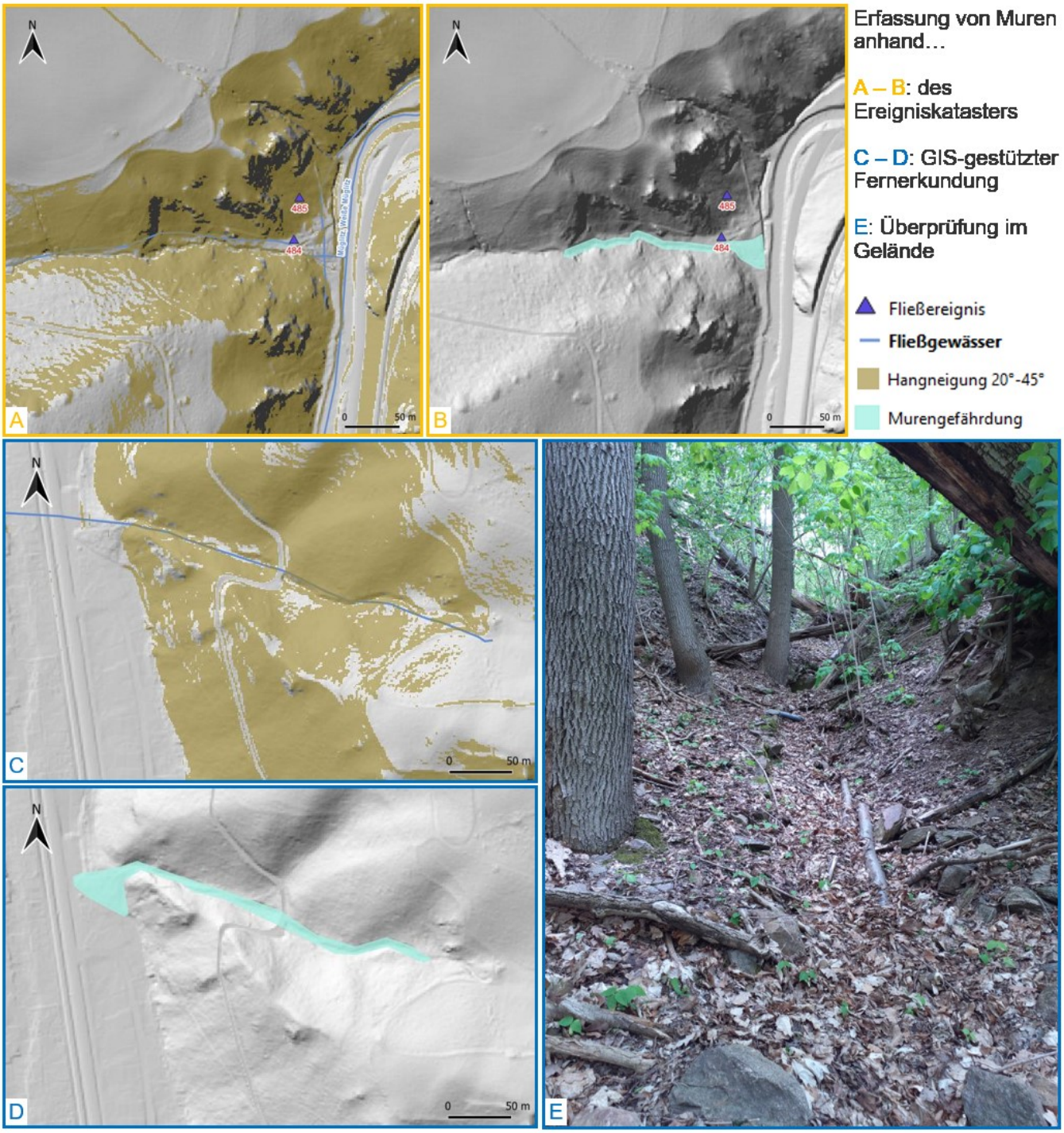
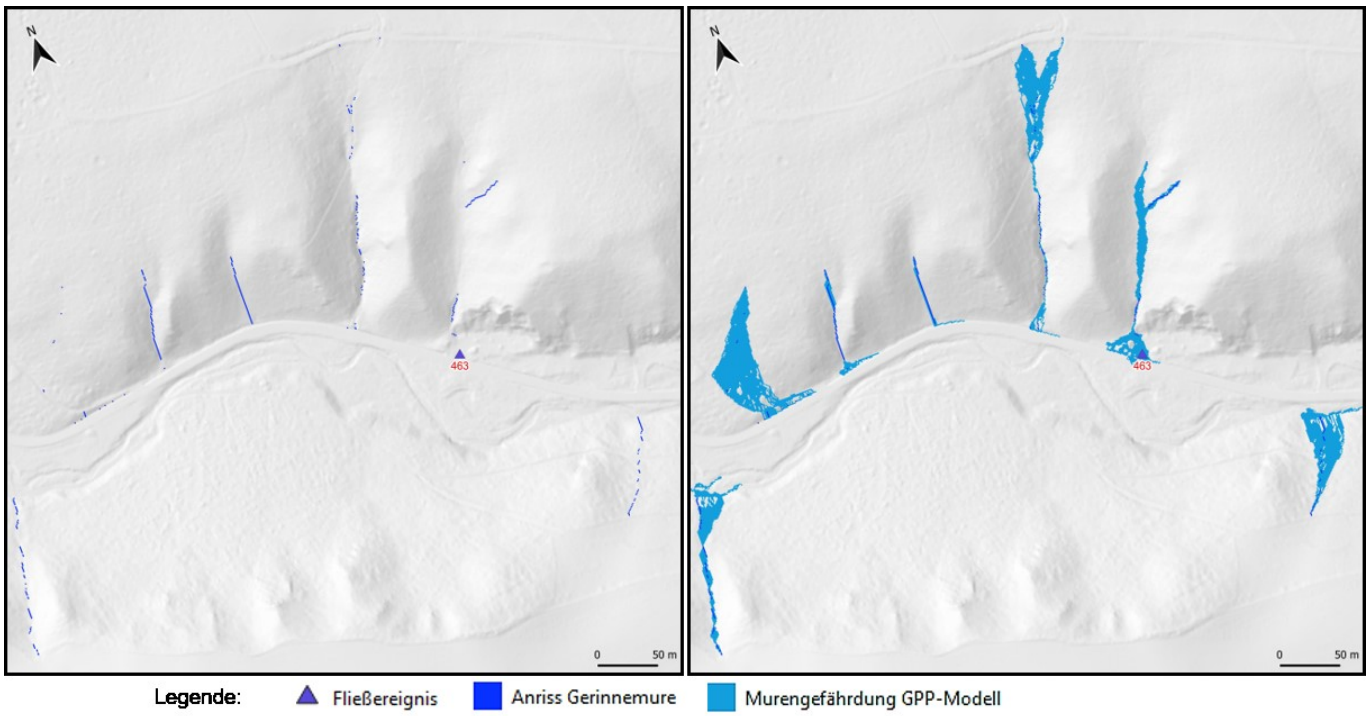


Abbildung 27: Beispiele der manuellen Erfassung von Muren im PG 2



Legende: links - aus Grenzgefälle-Ansatz berechnete potenzielle Anrisse, rechts - mit GPP modellierter Murenprozessraum

Abbildung 28: Ausschnitt der halbautomatischen Erfassung von Muren im PG 2

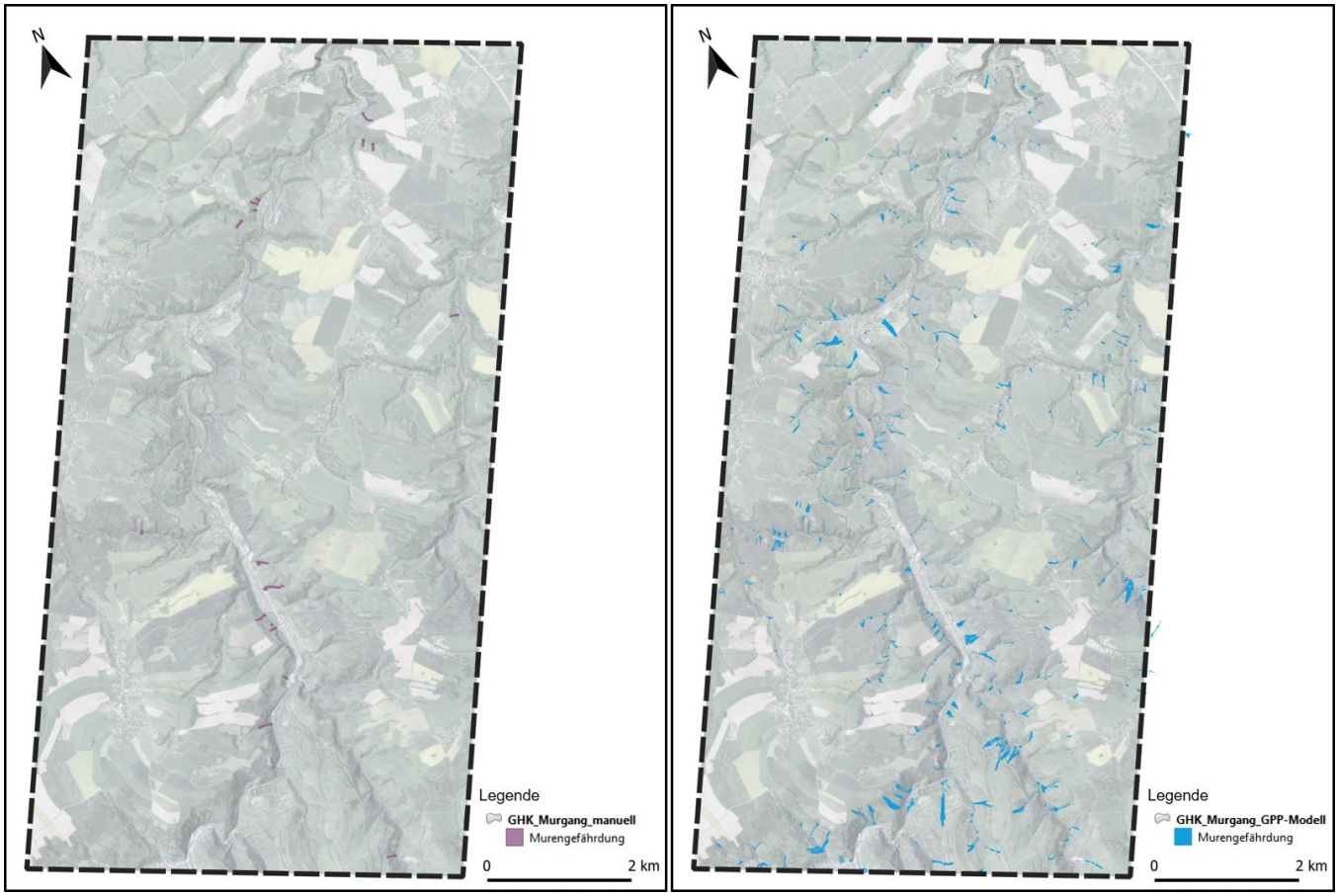
Die Gefahrenhinweiskarte der Murgänge entsprechend der manuellen und der halbautomatischen Vorgehensweise ist in Abbildung 29 in einem Methodenvergleich dargestellt. Daraus geht deutlich hervor, dass mit der halbautomatischen Methode mehr Bereiche als potenziell murganggefährdet identifiziert worden sind als mit der manuellen Methode.

Insgesamt sind 18 Murgangrinnen im PG 2 mittels manuellen Ansatzes erfasst worden. Diese sind vorrangig im Müglitztal und vereinzelt in den Seitentälern anzutreffen. Von der Gesamtfläche des Untersuchungsgebietes sind demnach rund 0,03 % (0,02 km^2) durch Gerinnemuren gefährdet. Aufgrund der geringen Anzahl dokumentierter Ereignisse im PG 2 sind Aussagen zur Gefährdung durch Murgänge begrenzt möglich. Entsprechend der halbautomatischen Methode sind 1,24 % (0,86 km^2) der Gesamtfläche im Untersuchungsgebiet von Gerinnemuren gefährdet. Die Anzahl an Gerinnen, in denen Murgänge möglich sind, ist wesentlich höher im Vergleich zur manuellen Erfassung und etwa gleichmäßig im Tal der Müglitz sowie den Seitentälern verteilt.

Für die Erstellung der GHK Murgänge entsprechend dem manuellen Ansatz ist der Aufwand ähnlich dem der GHK Rutschungen (vgl. Kapitel 4.3.3). Die geomorphologischen Strukturen und Merkmale von Muren lassen sich durch die Erfahrungen aus Pilotgebiet 1 (zeit-)effizienter identifizieren. Dennoch bleibt das manuelle, flächendeckende systematische Absuchen des Untersuchungsgebietes eine zeitaufwendige Methode zur Erfassung der Murganggefährdung. Im Vergleich dazu ist die halbautomatische

Vorgehensweise zeitsparender, indem die flächendeckende Generierung der Gefährdung durch Muren automatisiert abläuft. Die Berechnung der potenziellen Anrisse sowie die Aufbereitung und Ermittlung der benötigten Daten für die Modellierung nehmen einen Großteil der Zeit in Anspruch. Der zeitliche Aufwand der Modellierung ist abhängig von der Größe des Untersuchungsgebietes und der Anzahl potenzieller Anrissbereiche und dauert wenige bis mehrere Stunden. Es ist ratsam, ein großflächiges Untersuchungsgebiet für die Modellierung der Murganggefährdung in Abschnitte zu unterteilen, um eine schnelle und reibungslose Verarbeitung der anfallenden Datenmenge in GIS zu ermöglichen.

Die Gesamtfläche von PG 2 konnte für die Erstellung der GHK Murgänge (Anrisse und Murenprozessraum) in etwa 1 $^1/_2$ Monaten durch eine Mitarbeiterin in 30 %-Anstellung bearbeitet werden.



Legende: gefährdete Bereiche sind links - manuell ausgewiesen und rechts - halbautomatisch über den Grenzgefälle-Ansatz und mittels GPP

Abbildung 29: Gefahrenhinweiskarte Murgang PG 2 - Methodenvergleich

5 Generalisierung der Methodik

5.1 Vorbemerkung

Mit den Ergebnissen und Erfahrungen aus der Bearbeitung der Pilotgebiete wird im vorliegenden Abschnitt eine Generalisierung der Methodik (AP 4) vorgenommen. Durch eine detaillierte Analyse hinsichtlich der Anwendbarkeit, Repräsentativität, Aufwand-Nutzen-Verhältnis und Zuverlässigkeit erfolgt eine Bewertung des methodischen Vorgehens. Darüber hinaus sind die erarbeiteten Schritte zur Erstellung digitaler Gefahrenhinweiskarten im Freistaat Sachsen in einem Leitfaden zusammengefasst und auf weitere Gebiete in Sachsen übertragen worden.

5.2 Bewertung

5.2.1 Allgemein

Die ausgewählten Methoden zur Erstellung der Gefahrenhinweiskarten im Freistaat Sachsen ließen sich in beiden Pilotgebieten wirksam ausführen. Die Übertragung der Vorgehensweisen der Bundesländer Baden-Württemberg und Bayern auf Sachsen war mit Anpassungen problemlos möglich. Technische oder ortsspezifische Einschränkungen traten nicht auf. Alle Vorgehen konnten erfolgreich in einem GIS realisiert werden. Ebenso gut umsetzbar waren die Arbeitsschritte mit weiterer Software (Rocscience). Zudem konnten benötigte Datensätze einfach beschafft oder erstellt werden. Eine detaillierte Bewertung der angewandten Methodik, u. a. zur fachlichen Aussagekraft, wird entsprechend der Gefahrenart differenziert und ist in den nachfolgenden Kapiteln erläutert.

5.2.2 Rutschungen

Für Rutschungen gilt, dass sich die manuelle Erfassung überwiegend auf vergangene Ereignisse beschränkt. Gefährdete Bereiche, in denen noch kein Ereignis stattgefunden hat, werden i. d. R. nicht berücksichtigt. Jedoch wurden in der GHK Bereiche als rutschanfällig ausgewiesen, wenn die vorherrschende Geologie und Morphologie mit Bereichen übereinstimmt, in denen Rutschungen bereits aufgetreten sind. Generell ist die Ausweisung auf Basis optischer Kriterien anhand digitaler Karten ein subjektiver Ansatz und stark vom Ermessen des Bearbeiters abhängig. Allein aus den Karten lässt sich nicht immer eine zuverlässige Aussage zur Gefährdung treffen. Zur Überprüfung und Abklärung von Gefährdungsbereichen sollten unterstützend Feldbegehungen erfolgen. Dadurch kann die Gültigkeit der GHK verbessert werden. Des Weiteren ist das manuelle Absuchen des Arbeitsgebietes im GIS ein zeitaufwendiger Prozess, welcher aber mit zunehmender Erfahrung in der Bearbeitung optimiert werden kann.

Trotz der genannten Einschränkungen ist die manuelle Herangehensweise hinsichtlich der Datengrundlage und der Bedingungen im Freistaat Sachsen aktuell die beste Möglichkeit zur Erstellung der GHK Rutschungen. Mit diesem Ansatz werden historische Rutschereignisse, die bislang nicht im Ereigniskataster erfasst worden sind, identifiziert und als gefährdeter Bereich in die GHK aufgenommen. Die Zuverlässigkeit der Vorhersage ist im Wesentlichen auf die Annahme der Reaktivierung von Rutschungen begrenzt. Ob eine Reaktivierung tatsächlich möglich ist, wird im Einzelnen nicht überprüft. Gemessen am Ergebnis ist der zeitliche Aufwand für die Erstellung der GHK Rutschungen für den Freistaat Sachsen vertretbar. Zudem wurde ausschließlich lizenzfreie Software eingesetzt und die benötigten Daten konnten kostenfrei vom Geoportal Sachsen bzw. vom LfULG bezogen werden. Damit ist das Aufwand-Nutzen-Verhältnis als sehr gut zu bewerten.

Die Gefahrenhinweiskarte gibt einen ersten Überblick zur Gefährdung durch Rutschungen und liefert, entsprechend der angewandten Methode, vor allem historische Rutschbereiche mit einer hohen Zuverlässigkeit. Dabei konnte die GHK mit mäßigem Aufwand und einem mittleren zeitlichen Einsatz erstellt werden. Zukünftig denkbar ist eine Zeitersparnis durch ein automatisiertes Absuchen nach Rutschungen mittels Künstlicher Intelligenz. Die Entwicklung und das Antrainieren einer solchen Methodik konnte im zeitlichen Rahmen des Projektes nicht weiterverfolgt werden.

5.2.3 Stein- und Blockschläge

Zur Ermittlung der Gefährdung durch Stein-/Blockschläge wurde der methodische Ansatz im Laufe der Bearbeitung der Pilotgebiete optimiert und angepasst. Das Vorgehen in zwei Schritten liefert erst die Dispositionskarte, die einen Überblick zu potenziellen Anbruchbereichen gibt und eine einfache Form einer GHK darstellt. Auf Basis dieser wird eine erweiterte GHK generiert, indem zusätzlich die sturzgefährdeten Bereiche ermittelt werden.

Die Dispositionskarte ist zuerst aus der Hangneigung abgeleitet worden. Hierin zeigte sich bei der Geländebegehung und Bearbeitung von PG 1, dass allgemein von Hangneigungen ≥ 45° potenzielle Anbrüche ausgehen können. Dieser Ansatz differenziert nicht zwischen offenen Felsbereichen und steilem, aber bodenbedecktem Gelände. Da von Letzterem im Normalfall keine Stürze erfolgen, ist die Ausweisung einer Gefährdung an dieser Stelle überbewertet. Dennoch können Stürze aus steilem, bodenbedecktem Gelände in Abhängigkeit der Mächtigkeit der Bodenbedeckung und des auslösenden Ereignisses, wie z. B. der Hebelwirkung von Bäumen, nicht völlig ausgeschlossen werden. In Absprache mit den Projektbeteiligten sollen daher die potenziellen Anbrüche entsprechend der Hangneigung von ≥ 45° für den Freistaat Sachsen als Worst-Case-Szenario angesehen werden. Eine Präzisierung der Ausweisung erfolgte mit der Index-Methode, sodass lediglich offene Felsbereiche und geländestützendes Mauerwerk als potenzielle Anbrüche ermittelt werden. Im Gelände wurde die Methode im PG 2 stichprobenartig überprüft und als sehr gut aussagekräftig bewertet. Im Hinblick auf die genannten Punkte sind

beide Methoden fachlich berechtigt und für die Erstellung einer GHK geeignet. Eine Grenze der Anwendbarkeit zeigt sich darin, dass weder nach der Hangneigung noch nach dem Index natürliche und anthropogene Strukturen unterschieden werden können. Damit werden z. B. Brückenwiderlager und Stützmauern als potenzielle Anbrüche ausgewiesen. Eine manuelle Bereinigung anthropogener Strukturen ist unumgänglich und, angesichts des Ergebnisses, ein berechtigter Aufwand. Beide methodischen Ansätze wurden mit einem guten Aufwand-Nutzen-Verhältnis realisiert und sind ohne Einschränkungen für die Gegebenheiten in Sachsen anwendbar. Auf die Zuverlässigkeit und Repräsentativität der ermittelten potenziellen Anbrüche wird in Verbindung mit den generierten sturzgefährdeten Bereichen der finale Gefahrenhinweiskarte eingegangen.

Die Ermittlung der sturzgefährdeten Bereiche erfolgte für den ungünstigsten Fall, d. h. entsprechend der Hangneigung, sowie für den Normalfall entsprechend der Index-Methode. Der im PG 1 angewandte Ansatz einer 2-dimensionalen Reichweitenmodellierung repräsentativer Ereignisse mit der Software RocFall erwies sich in der Bearbeitung als zu aufwendig und zu ungenau. Zum einen sind für die Modellierung Eingabedaten wie die Form und Größe der Sturzkörper nötig. Diese müssen im Gelände oder anhand von Informationen aus dem Ereigniskataster erhoben werden, was einen erhöhten (Zeit-)Aufwand bedeutet. Zum anderen ist die Anwendbarkeit der Methodik durch die lizensierte Software von RocScience eingeschränkt. Die Zuverlässigkeit der Ausweisung sturzgefährdeter Bereiche ist von der subjektiven Auswahl und Anzahl repräsentativer Profile für die Modellierung sowie der manuellen Interpolation zur flächenhaften Darstellung der Gefährdung abhängig. Aufgrund dessen ist die Genauigkeit der Abgrenzung von Gefährdungsbereichen reduziert. Da sich der Ansatz größtenteils auf das Ereigniskataster stützt sowie Modellierungen entlang von Profillinien berücksichtigt, kann jedoch eine annehmbare und aussagekräftige GHK generiert werden. In Anbetracht der genannten Nachteile von Aufwand, Anwendbarkeit und Zuverlässigkeit wurde der methodische Ansatz zur Ermittlung sturzgefährdeter Bereiche im PG 2 angepasst. Folglich wird als Methodik eine flächendeckende Modellierung mit dem SAGA GIS Werkzeug GPP angewandt.

Die Modellierung mit GPP konnte ohne Probleme im GIS durchgeführt werden. Für die Anwendung sind nur wenige Eingabewerte notwendig, wodurch der Aufwand für die Beschaffung bzw. Ermittlung der Daten gering ist. Die benötigte Zeit der Modellierung ist abhängig von der Größe des Modellgebietes und der Menge potenzieller Anbrüche. Insgesamt kann die Modellierung mit GPP inklusive Vor- und Nachbearbeitung in einer angemessenen Zeit umgesetzt werden. Das Aufwand-Nutzen-Verhältnis ist für diesen methodischen Ansatz optimal.

Aus den potenziellen Anbrüchen und den sturzgefährdeten Bereichen ergibt sich die finale Gefahrenhinweiskarte. Zur Plausibilitätsprüfung der Ergebnisse ist die finale GHK, abgeleitet aus der Hangneigung sowie über den SIDX-Index, mit allen im Kataster dokumentierten Sturzereignissen abgeglichen

worden. Das Ergebnis dieses Vergleichs für PG 1 und PG 2 ist in Abbildung 30 dargestellt. Die Ereignisse werden nach ihrer Lage im, am oder außerhalb des generierten Gefahrenhinweisbereichs unterteilt. Ereignisse am Gefahrenhinweisbereich liegen in unmittelbarer Nähe zum modellierten Sturzprozessraum. In der Annahme einer allgemeinen Lageungenauigkeit bei der Dokumentation werden diese Ereignisse als übereinstimmend mit der GHK behandelt. Diese Annahme konnte teilweise durch Ereigniskorrekturen vom LfULG bestätigt werden.

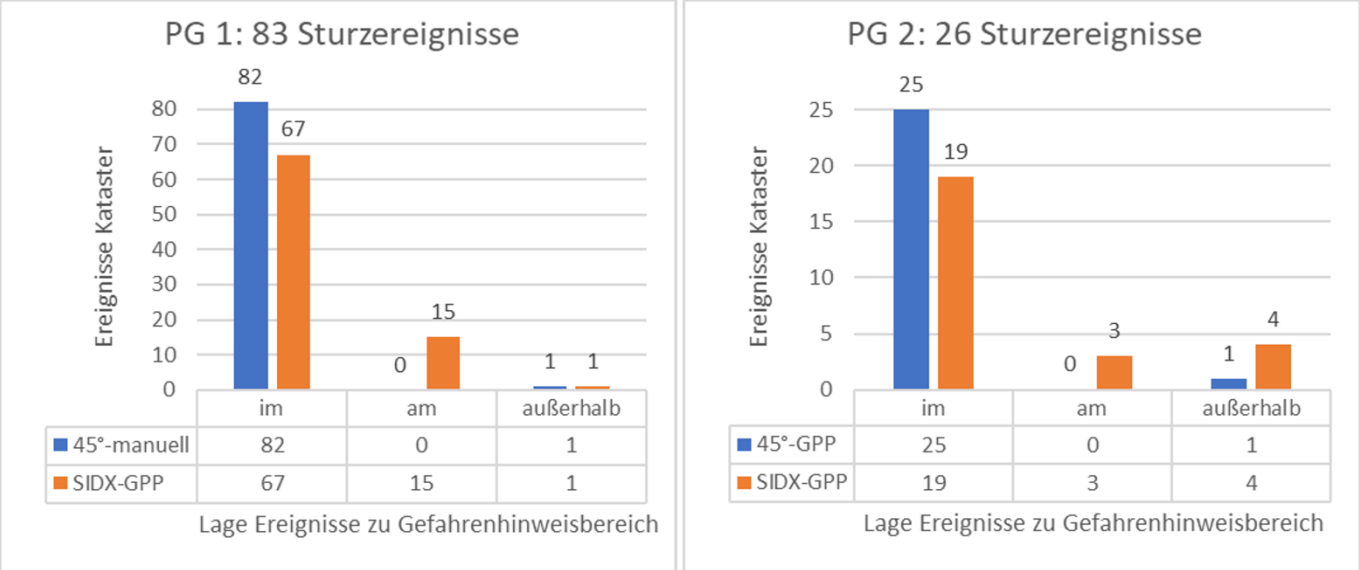


Abbildung 30: Abgleich GHK Stein-/Blockschlag mit Ereigniskataster Sturzprozesse

Im PG 1 besteht eine ~ 99 %-ige Übereinstimmung der GHK, abgeleitet aus 45°-Hangneigung und Modellierung repräsentativer Ereignisse, mit dem Ereigniskataster. Das ist nicht überraschend, da bei der Generierung der GHK nach diesem methodischen Ansatz unmittelbar auf das Ereigniskataster zurückgegriffen wurde. Für die GHK entsprechend der Index-Methode und flächendeckenden Sturzbahnmodellierung mit GPP ergibt sich, unter Berücksichtigung der Ereignisse unmittelbar am Gefahrenhinweisbereich, ebenfalls eine Übereinstimmung von ~ 99 %. Neben der Überprüfung der GHK eignet sich der Abgleich ebenso zur Prüfung des Ereigniskatasters. Es können Ereignisse ausgemacht werden, dessen Lage und/oder (Prozess-)Einordnung einer Korrektur bedürfen. Nach beiden Ansätzen liegt im PG 1 ein einziges Ereignis außerhalb des ausgewiesenen Gefährdungsbereichs. Hierbei handelt es sich um das Ereignis, das mit der Nr. 833 in Abbildung 31 dargestellt ist. Weder nach der Index- noch nach der Hangneigungsmethode konnte für dieses Ereignis ein potenzieller Anbruch ermittelt werden. Jedoch wurde der Eintrag im Kataster überprüft und als korrekt eingestuft. Weiterhin zeigt Abbildung 31 Beispiele von Ereignissen im PG 1, die nicht direkt im Index-Gefährdungsbereich liegen, aufgrund einer gewissen Lageungenauigkeit diesem jedoch zugeordnet werden und vom LfULG z. T. im Kataster korrigiert wurden. Abbildung 32 ist ein Vergleich der Gefahrenhinweiskarte Stein- und Blockschlag im PG 1 abgeleitet aus der Hangneigung und der Modellierung repräsentativer Ereignisse (45°-manuell) sowie

anhand des Index und der Modellierung mit GPP (SIDX-GPP). Daraus lässt sich erkennen, dass die letztere Methode eine präzisere Ausweisung von Gefährdungsbereichen ermöglicht.

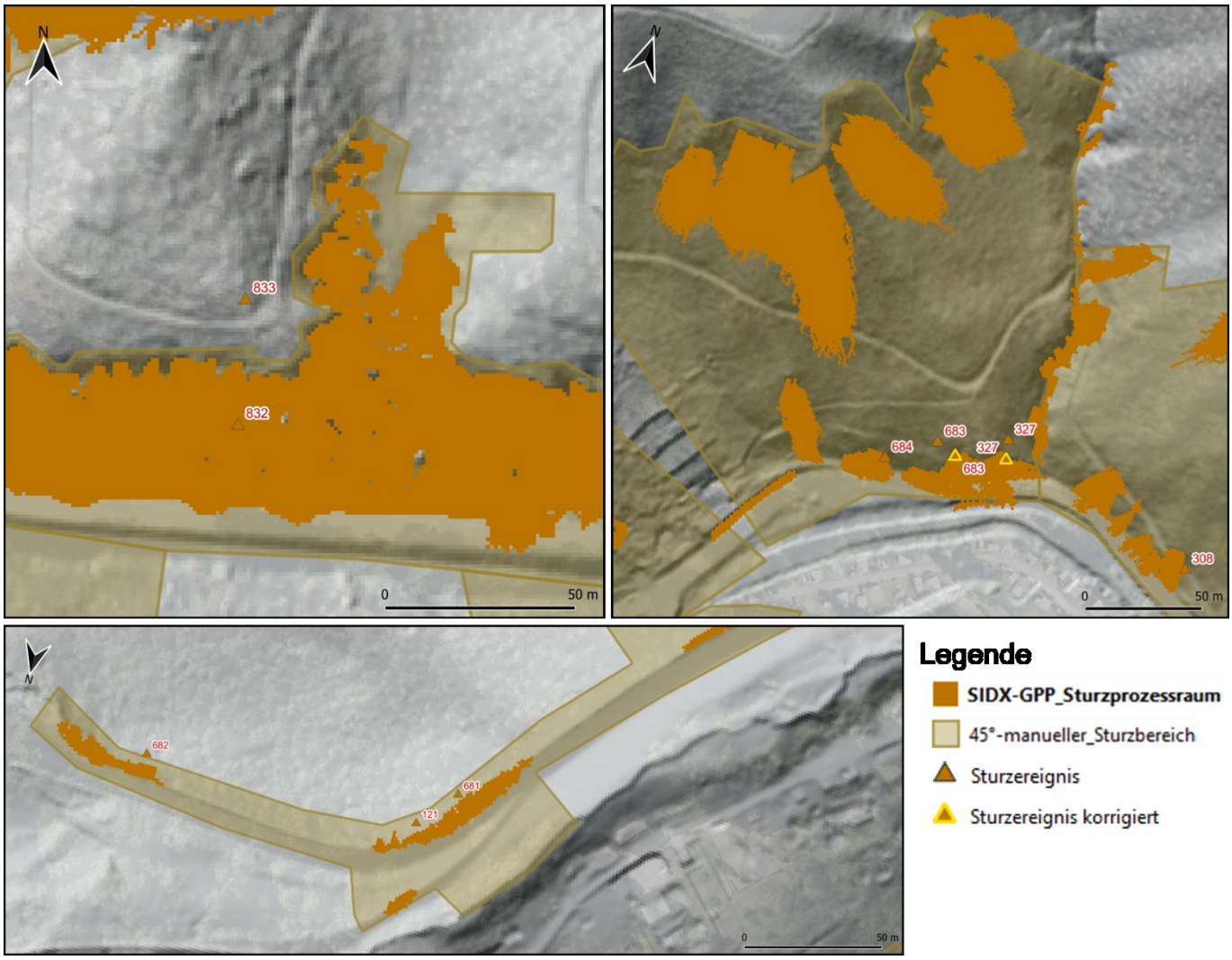


Abbildung 31: Beispiele des Abgleichs von Kataster und GHK Stein-/Blockschlag im PG 1

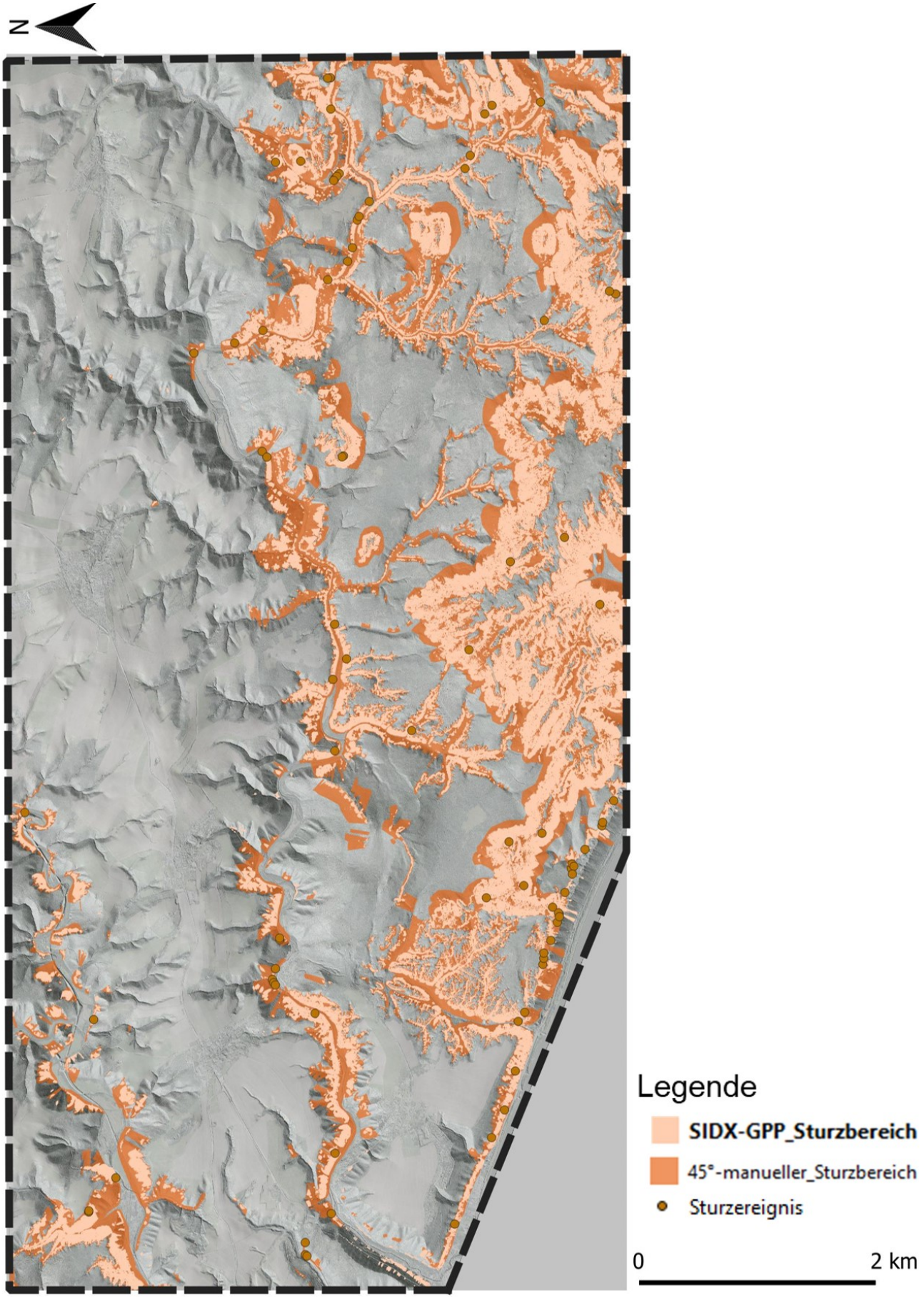


Abbildung 32: Vergleich der GHK Stein-/Blockschlag nach zwei methodischen Ansätzen im PG 1

Das Ergebnis des Abgleichs von GHK und Ereigniskataster im PG 2 ist in Abbildung 30 dargestellt. Es ergibt sich eine Übereinstimmung der dokumentierten Sturzereignisse mit den generierten Sturzbereichen von ~ 96 % entsprechend der Hangneigung und von ~ 85 % ("im" + "am") entsprechend des Index. Nach der Korrektur dokumentierter Ereignisse im PG 2 ergibt sich eine Übereinstimmung von 100 % entsprechend der Hangneigung und von ~ 92 % entsprechend des Index. Abbildung 33 zeigt Beispiele des Abgleichs von GHK und Ereigniskataster im PG 2. Dargestellt sind Ereignisse am bzw. außerhalb des generierten SIDX-Gefahrenhinweisbereiches und deren Lage nach erfolgter Korrektur seitens des LfULGs. Das Beispiel mit der Nr. 177 wird in der GHK gemäß der Hangneigungsmethode erfasst, jedoch nicht durch die Index-Methode. Eine Ereigniskorrektur konnte an dieser Stelle nachweislich ausgeschlossen werden. Das Beispiel verdeutlicht die Einschränkungen des methodischen Ansatzes. Nichtsdestotrotz kann die angewandte Methodik zur Erstellung der GHK Stein- und Blockschlag aufgrund der hohen Übereinstimmungsrate mit dem Ereigniskataster als repräsentativ und zuverlässig angesehen werden.

Zur Ermittlung der Gefährdung durch Stein- und Blockschläge können zwei methodische Ansätze als sehr gut geeignet zur Anwendung im Freistaat Sachsen angesehen werden. Zum einen ist das die Methodik, nach der potenzielle Anbrüche aus der Hangneigung ≥ 45° abgeleitet werden und anschließend zur flächendeckenden Modellierung des Sturzprozessraumes mit GPP dienen. Diese Methode dient als Worst-Case-Szenario. Zum anderen ist die Methodik, nach der potenzielle Anbrüche über den SIDX-Index ermittelt werden und daraus die flächendeckende Modellierung der Sturzprozessräume mit GPP erfolgt, zur präziseren Ausweisung von Gefährdungsbereichen zu bevorzugen. Das sehr gute Aufwand-Nutzen-Verhältnisses ist für beide Methoden ein klarer Vorteil gegenüber dem getesteten manuellen Ansatz.

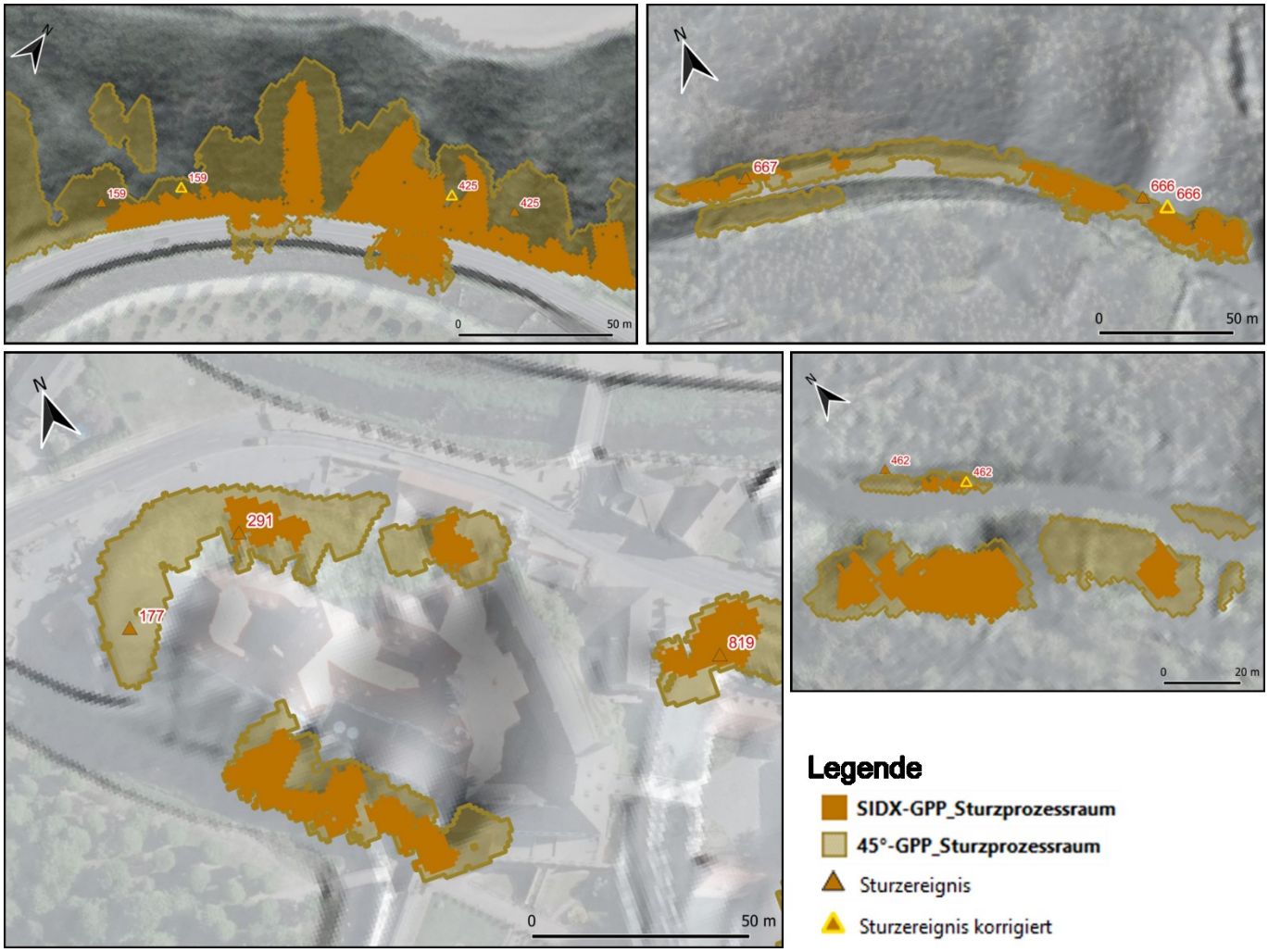


Abbildung 33: Beispiele des Abgleichs von Kataster und GHK Stein-/Blockschlag im PG 2

5.2.4 Felsstürze

Mehrere Felsstürze kleineren und mittleren Ausmaßes sind in Sachsen aktuell erfasst. Deren Gefährdungsbereiche werden durch die Gefahrenhinweiskarte Stein- und Blockschlag abgedeckt. Auf Grundlage des Ereigniskatasters kann davon ausgegangen werden, dass große und sehr große Felsstürze im Freistaat Sachsen eine untergeordnete Rolle spielen. Nur wenige solcher Ereignisse sind bislang dokumentiert.

Um die Gefährdung durch große und sehr große Felsstürze auszuweisen wird als methodischer Ansatz auf die Pauschalwinkelmodellierung zurückgegriffen. Die Pauschalwinkelmodellierung ist eine Sichtbarkeitsanalyse, welche potenzielle Gefährdungsbereiche anhand eines dokumentierten Felssturzes auf Grundlage der Geländemorphologie ermittelt. Mit diesem Ansatz werden ausschließlich die Gefährdungsbereiche modelliert. Potenzielle Anbruchbereiche für große und sehr große Felssturze müssen für die Modellierung bereits bekannt sein. Die Repräsentativität der Ergebnisse ist damit auf historische

Ereignisse beschränkt. Eine Vorhersage zukünftiger Gefährdungsbereiche in Gebieten, in denen noch kein Felssturz erfasst wurde, ist nicht möglich.

Die Pauschalwinkelmodellierung erfolgt im GIS und kann ohne Probleme durchgeführt werden. Vorarbeiten, wie z. B. die Ermittlung der Werte für die Auswahl des Pauschalwinkelmodells, nehmen etwas mehr Zeit in Anspruch. Allerdings können alle Eingabewerte unkompliziert aus dem DGM abgeleitet werden, wodurch die Anwendung erleichtert wird. Es empfiehlt sich, je Ereignis mehrere Ansatzbereiche für potenzielle Felsabbrüche festzulegen. Zwar verlängert das die Zeit der Modellierung ein wenig, jedoch wird die Repräsentativität eines größeren Felsabbruches dadurch erhöht. Davon abgesehen ist die Modellierung in Abhängigkeit der Anzahl an Ansatzpunkten in wenigen Minuten abgeschlossen. Allgemein ist der zeitliche Aufwand des methodischen Ansatzes überschaubar.

Die Ergebnisse der Pauschalwinkelmodellierung sind mit den Informationen im Ereigniskataster zu den jeweiligen Felsstürzen verglichen worden. In manchen Fällen ist die modellierte Reichweite um einiges geringer als entsprechende Angaben im Kataster vorgeben. Ein Grund dafür können Änderungen der morphologischen Gegebenheiten seit dem Zeitpunkt des Ereignisses sein, z. B. durch Erosionsprozesse oder anthropogene Eingriffe wie Tagebaubetrieb. Nichtsdestotrotz deutet eine mangelnde Übereinstimmung auf eine reduzierte Zuverlässigkeit der Ergebnisse hin. Bei einer Sichtbarkeitsanalyse ist die Zuverlässigkeit der Ausweisung von felssturzgefährdeten Bereichen abhängig von einem freien Sichtfeld. Größere Felsblöcke versperren das Sichtfeld, sodass im Modellierungsergebnis Artefakte auftreten. Diese müssen identifiziert und manuell angepasst werden, womit sich der Aufwand der Bearbeitung erhöht.

Generell ist das Aufwand-Nutzen-Verhältnis im Hinblick auf die eingeschränkte Aussagekraft der Ergebnisse vertretbar, jedoch nicht optimal. Die Anwendbarkeit der Pauschalwinkelmodellierung ist auf bereits dokumentierte Ereignisse entsprechenden Ausmaßes begrenzt. Die Zuverlässigkeit der Vorhersage gefährdeter Bereiche ist qualitativ nicht ideal. Sofern Ereignisse vorliegen, ist der methodische Ansatz zur Ermittlung der Gefahrenhinweiskarte für Felsstürze auf ganz Sachsen anwendbar. Gemessen an der Bedeutung größerer Felsstürze im Freistaat Sachsen kann die Pauschalwinkelmodellierung gut als methodischer Ansatz zur Generierung der GHK Felsstürze eingesetzt werden. Gemäß dem Ereigniskataster treten kleinere Felsstürze häufiger auf. Diese werden mit einem sehr guten Ergebnis in der GHK Stein- und Blockschlag berücksichtigt.

5.2.5 Murgänge

Wie bei den Sturzprozessen ist auch das methodische Vorgehen zur Erfassung der Gefährdung durch Murgänge während der Bearbeitung der Pilotgebiete angepasst und verbessert worden. Die ursprüng-

lich angesetzte Methodik der manuellen Ausweisung von Gerinnemuren im GIS erwies sich als zeitintensiv und unzureichend. Deshalb wurde der Ansatz optimiert, hin zu einer halbautomatischen Ausweisung der Anrisspunkte von Muren und der anschließenden Modellierung potenzieller Fließbahnen durch das SAGA GIS Werkzeug GPP.

Zu Beginn der Bearbeitung der Pilotgebiete ist die Gefährdung durch Murgänge manuell auf Grundlage von DGM und Ereigniskataster ausgewiesen worden. Hieraus ergeben sich dieselben Vor- und Nachteile wie bei der manuellen Erfassung von Rutschungen (vgl. Kapitel 5.2.2). Der methodische Ansatz ist uneingeschränkt im Freistaat Sachsen anwendbar und kann ohne Probleme im GIS umgesetzt werden. Es wird lizenzfreie Software verwendet und notwendige Daten können kostenfrei bezogen werden. Die Repräsentativität der Ergebnisse umfasst überwiegend historische Ereignisse. Zukünftige Murgänge werden unter der Annahme von wiederholten Ereignissen in bekannten Gerinnen erfasst. Darüber hinaus wird auf Expertenwissen zurückgegriffen, um mit Hilfe von Karten visuell und anhand von Kriterien Gerinne als potenziell murfähig auszuweisen, für die bislang kein Ereignis dokumentiert ist. Dieses methodische Vorgehen ist subjektiv und die Zuverlässigkeit der Ausweisung abhängig vom Bearbeiter. Die Auswertung der Karten mit Hilfe optischer Kriterien ist nicht immer eindeutig, u. a. bedingt durch die Qualität der Auflösung. Eine Überprüfung ausgewiesener Gefährdungsbereiche im Gelände unterstützt die Gültigkeit der GHK, erhöht jedoch den Aufwand der Bearbeitung. Bereits das manuell flächendeckende Absuchen digitaler Karten im GIS nach Murgängen bedeutet einen hohen zeitlichen Einsatz. Dieser kann minimal mit zunehmender Erfahrung verringert werden, um das Aufwand-Nutzen-Verhältnis zu optimieren. Allgemein ist der Aufwand mit Blick auf das Ergebnis vertretbar. Dennoch konnte das methodische Vorgehen zur Erstellung der GHK Murgänge im Laufe der Bearbeitung durch einen halbautomatischen Ansatz verbessert werden.

Die halbautomatische Ausweisung von Murganganrissen mit anschließender Modellierung der Fließprozessräume ist ein objektiver Ansatz, der uneingeschränkt auf ganz Sachsen anwendbar ist. Die Durchführung der Methodik erfolgt in GIS mit lizenzfreier Software. Notwendige Daten für die Bearbeitung können unkompliziert und kostenfrei bezogen werden. Die technische Umsetzung der Arbeiten ist ohne Probleme möglich. Fachlich ist die Methodik auf Murgänge im Gerinne begrenzt und nicht auf Hangmuren anwendbar, da sich die Prozesse in ihren Auslösemechanismen, Anrissbereichen und Prozessräumen wesentlich unterscheiden. Die Vorarbeiten zur Berechnung der Anrisse von Gerinnemuren im GIS sind der aufwendigste Teil des methodischen Ansatzes. Hingegen ist die Modellierung der Prozessräume mit wenig Aufwand umzusetzen. Der zeitliche Einsatz der Modellierung ist abhängig von der Größe des Untersuchungsgebietes und der Anzahl an Anrissen, und somit nicht zu pauschalisieren. Verglichen mit dem manuellen Vorgehen kann im selben Zeitraum durch den halbautomatischen Ansatz eine größere Fläche bearbeitet werden. Zudem ist die automatische Abgrenzung der Prozessräume auf

Basis des DGMs zuverlässiger als die händische Ausweisung. Die Ergebnisse sind repräsentativ für historische Murgänge und berücksichtigen ebenso Gefährdungsbereiche, in denen noch keine Ereignisse stattfanden bzw. dokumentiert sind. Die Zuverlässigkeit der Ergebnisse ist in den Pilotgebieten mit Hilfe des Ereigniskatasters überprüft worden und in Abbildung 34 dargestellt. Abbildung 35 liefert einige Beispiele aus dem Pilotgebiet 1 - Kirnitzschtal.

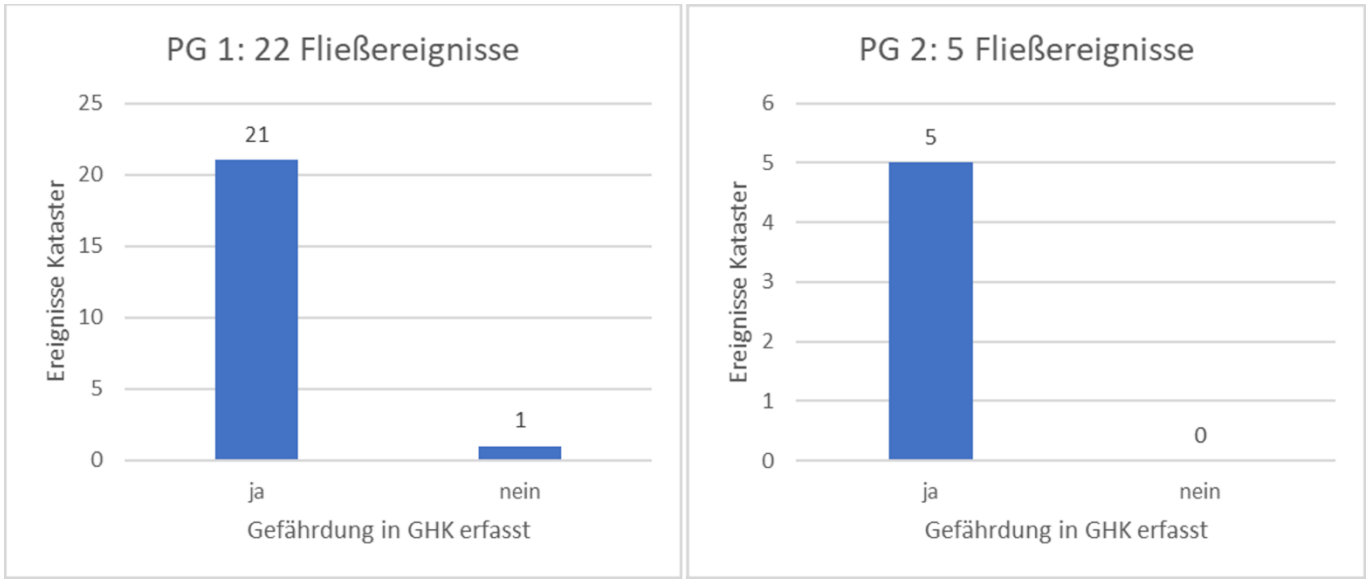


Abbildung 34: Abgleich von halbautomatischer GHK Murgang mit Ereigniskataster Fließprozesse

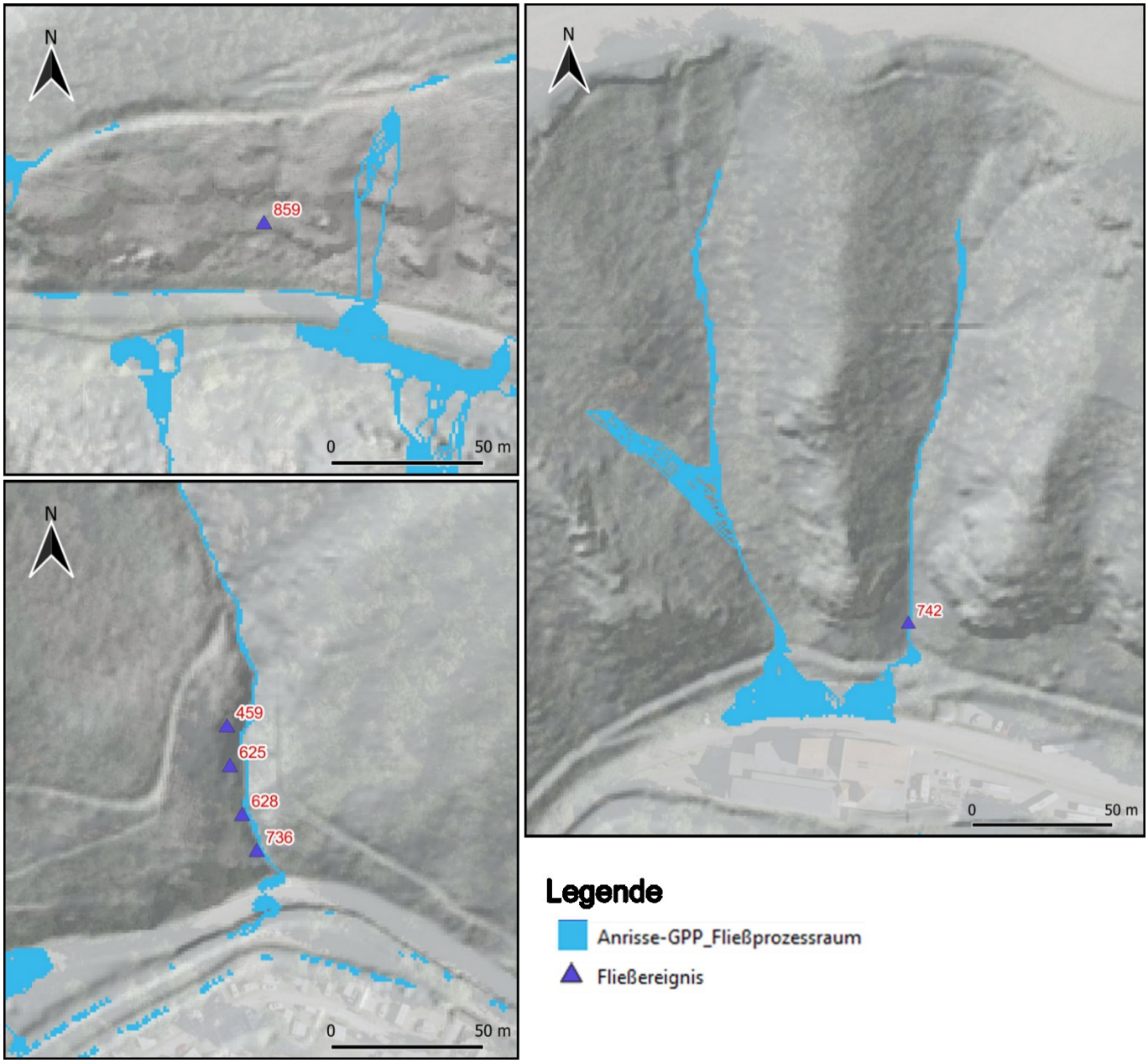


Abbildung 35: Beispiele des Abgleichs von Kataster und halbautomatischer GHK Murgang im PG 1

Aus dem Abgleich mit dem Ereigniskataster ergibt sich eine sehr gute Übereinstimmung der Gefahrenhinweiskarte mit den dokumentierten Fließereignissen. Der Vergleich dient der wechselseitigen Überprüfung von GHK und Kataster. Im PG 1 liegt von 22 Fließereignissen lediglich eins nicht im Gefahrenbereich der Hinweiskarte. Dieses Ereignis mit der Nr. 859 ist im Kataster weiter definiert als Hangmure und wird nicht durch die angewandte Methodik erfasst. Daher kann im PG 1 von einer Übereinstimmung der GHK mit den dokumentierten Murgängen von 100 % ausgegangen werden. Im PG 2 beträgt die Übereinstimmung, nach einer Lagekorrektur zweier Ereignisse durch das LfULG, ebenfalls 100 %. Die Auswertung im PG 2 ist wegen der geringen Anzahl dokumentierter Murgänge weniger repräsentativ als im PG 1.

Im Vergleich zur manuellen Ausweisung ist die flächendeckende automatisierte Modellierung zeitsparender und liefert dabei gute Ergebnisse. Aufgrund des besseren Aufwand-Nutzen-Verhältnisses ist die halbautomatische Methode dem manuellen Vorgehen für die Erstellung der Gefahrenhinweiskarte Murgänge im Freistaat Sachsen vorzuziehen.

5.3 Leitfaden/Handbuch

Das Handbuch "Gefahrenhinweiskarte" des Projektes liefert eine Schritt-für-Schritt Anleitung der Erstellung von Gefahrenhinweiskarten für die Gefährdung durch Rutschungen, Stein- und Blockschläge, Felsstürze und Murgänge im Freistaat Sachsen. Es ist das Ergebnis der Methodenentwicklung/-auswahl sowie der Anwendung und Überprüfung in den Pilotgebieten. Einzelne Arbeitsschritte und die verwendeten Werkzeuge sind im Handbuch dargestellt und werden durch Abbildungen verdeutlicht. Das Handbuch ist so gestaltet, dass es sich sowohl für Experten als auch für Fachfremde eignet. Die Berechtigungen für den Leitfaden liegen beim sächsischen LfULG.

5.4 Übertragung der Methodik

Nach einer ausführlichen Bewertung sind aus den Ergebnissen der Pilotstudie die methodischen Ansätze abgeleitet worden, die auf weitere Gebiete im Freistaat Sachsen übertragen werden können. In Absprache mit dem LfULG erfolgte eine Übertragung zuerst auf Regionen mit einer hohen Anfälligkeit für Massenbewegungen. Hinweise darauf liefert das Ereigniskataster. Eine Bearbeitung der Gebiete wurde blattschnittweise durchgeführt, bezogen auf die Topographische Karte im Maßstab 1:50.000 (TK50). Im Rahmen des Projektes konnten für die gelb umrandeten Gebiete in Abbildung 36 Gefahrenhinweiskarten erstellt werden. Für den Blattschnitt Sebnitz (L5150) und den westlichen Teil von Blattschnitt Neugersdorf (L5152) wurden die Gefahrenhinweiskarten Rutschungen, Murgänge und Stein-/Blockschlag/Felssturz generiert. Für den Blattschnitt Pirna (L5148) und den Blattschnitt Altenberg (L5348) steht mit Projektende die GHK Stein-/Blockschlag zur Verfügung.

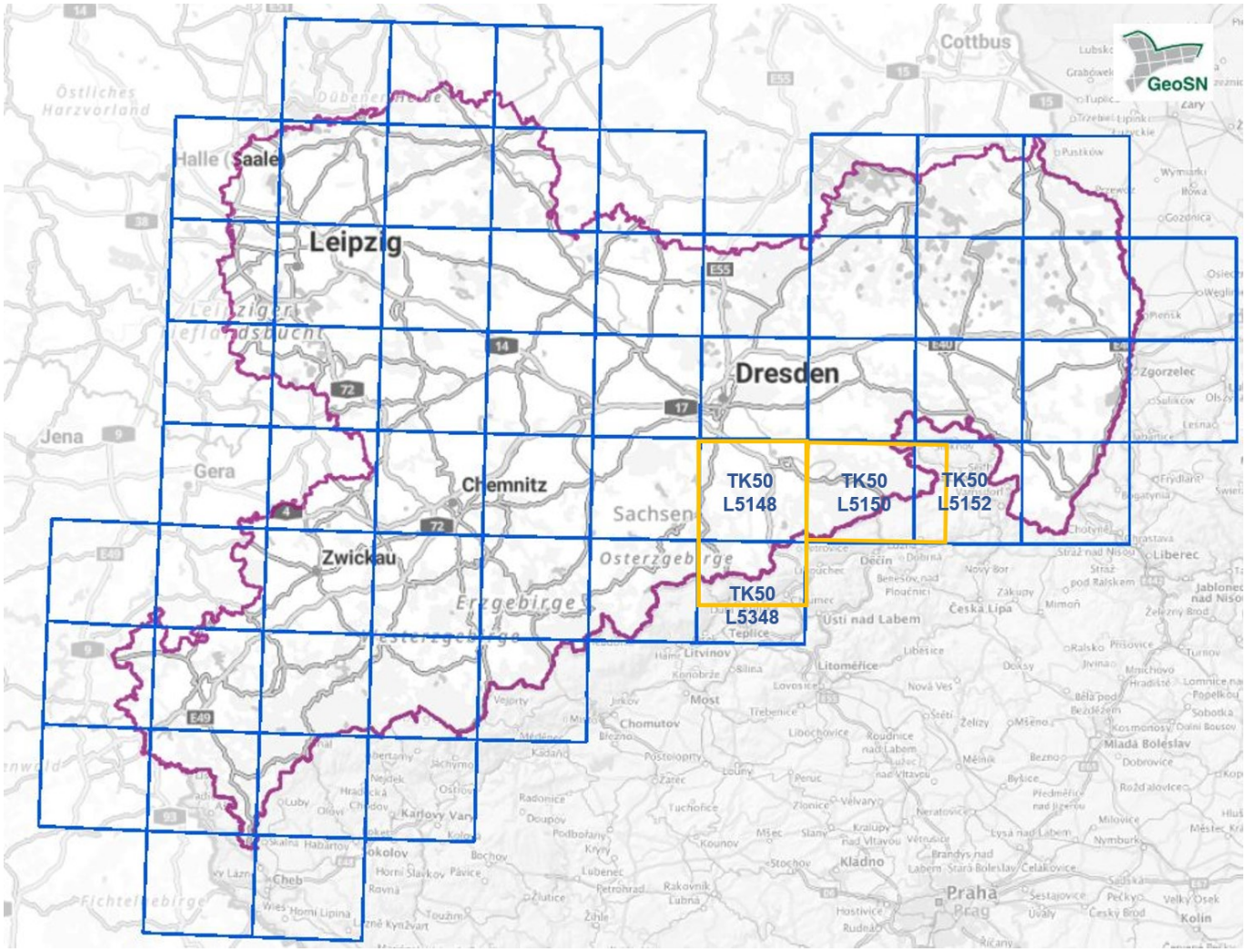


Abbildung 36: Übertragung der Methodik - Blattschnitte

6 Zusammenfassung

Das Forschungs- und Entwicklungsprojekt mit dem Kurztitel "Gefahrenhinweiskarte Sachsen" ist vom sächsischen LfULG in Auftrag gegeben worden, um ein methodisches Vorgehen zur Erstellung von Gefahrenhinweiskarten für Massenbewegungen im Freistaat Sachsen zu entwickeln. Es wurde die Gefährdung durch Rutschungen, Stein- und Blockschläge, Felsstürze sowie Murgänge betrachtet.

Das Projekt umfasst eine ausführliche Literaturrecherche zum Thema "Gefahrenhinweiskarte" und "Entwicklung einer Gefahrenhinweiskarte". Dazu wurden verschiedene Suchmaschinen, Bibliothekskataloge sowie die Webauftritte der Bundesländer in Deutschland und benachbarter Ländern genutzt. Es konnten verschiedene Methoden recherchiert und auf eine mögliche Übertragung bzw. Anwendung in Sachsen analysiert werden. Als sehr gut übertragbar erwiesen sich die methodischen Ansätze der Bundesländer Baden-Württemberg und Bayern. Auf dessen Grundlage erfolgte die Entwicklung eines methodischen Vorgehens zur Erstellung von Gefahrenhinweiskarten im Freistaat Sachsen.

Die entwickelte Methodik konnte in der Pilotstudie erfolgreich getestet und angepasst werden. Als Pilotgebiete wurde der Bereich Kirnitzschtal und der Bereich Müglitztal bearbeitet. Die Auswahl der Pilotgebiete basiert auf dem Ereigniskataster des LfULG. Regionen, in denen viele Ereignisse dokumentiert sind, wurden bevorzugt betrachtet. Für die zwei Pilotregionen sind die Gefahrenhinweiskarten Rutschungen, Stein-/Blockschläge und Felsstürze sowie Murgänge erstellt worden. Das methodische Vorgehen unterscheidet sich je nach Gefahrenart. Im Verlauf der Bearbeitung wurden für die Gefährdung durch Stein-/Blockschläge und die Gefährdung durch Murgänge mehrere methodische Ansätze getestet. Die vorab ausgewählte Methodik für die Gefährdung durch Rutschungen und die Gefährdung durch Felsstürze konnte in den Pilotgebieten ohne weitere Anpassungen realisiert werden.

Im Anschluss an die Pilotstudie erfolgte die Bewertung des methodischen Vorgehens. In Absprache mit dem LfULG sind die Ansätze festgelegt worden, die zur Erstellung von Gefahrenhinweiskarten auf weitere Gebiete in Sachsen übertragen werden sollen. Die Bearbeitung wird vollständig mit kostenfreier Software in einem GIS umgesetzt.

Der methodische Ansatz für Rutschungen umfasst ein manuelles Absuchen digitaler Karten nach historischen Rutschungen anhand typischer Rutschstrukturen. Die Gefährdung durch größere und sehr große Felsstürze wird mit Hilfe einer Pauschalwinkelmodellierung für bekannte Ereignisse ermittelt. Kleinere Felsstürze sind durch die Gefahrenhinweiskarte Stein-/Blockschläge abgedeckt. Für die Gefährdung durch Stein- und Blockschläge werden zuerst potenzielle Anbrüche ermittelt. Diese bilden die Ausgangspunkte für eine sich anschließende Sturzbahnmodellierung. Die Modellierung wird mit dem SAGA GIS Werkzeug "Gravitational Process Path" (GPP) durchgeführt. Es wird zwischen einem Worst-

Case-Szenario und dem Normalfall unterschieden. Das Worst-Case-Szenario ordnet allen Hangneigungen ≥ 45° potenzielle Anbrüche zu. Der Normalfall ist eine Präzisierung der Anbrüche mit Hilfe des SIDX-Index. Ein ähnliches Vorgehen erfolgt für die Ermittlung der Gefährdung durch Murgänge. Zuerst werden potenzielle Anrisse von Gerinnemuren halbautomatisch generiert. Ausgehend von den Anrissen werden über die Modellierung mit GPP die Fließprozessräume bestimmt.

Die einzelnen Schritte des Vorgehens zur Umsetzung im Freistaat Sachsen sind in einem Handbuch ausgearbeitet und veranschaulicht. Langfristig sollen Gefahrenhinweiskarten für den gesamten Freistaat erstellt werden. Im Rahmen des Projektes wurden unter Einbindung des Ereigniskatasters Regionen ausgewählt, für die aufgrund einer hohen Anfälligkeit für Massenbewegungen bevorzugt Gefahrenhinweiskarten zu erstellen sind. Eine Bearbeitung der Regionen wurde blattschnittweise anhand der Topographischen Karte 1:50.000 durchgeführt. Innerhalb der Projektlaufzeit konnten die Gefahrenhinweiskarten Rutschungen, Stein-/Blockschläge und Felsstürze sowie Murgänge für das Kartenblatt Sebnitz (L5150) und den West-Teil von Kartenblatt Neugersdorf (L5152) erstellt werden, ebenso wie die Gefahrenhinweiskarte Stein-/Blockschläge für die Kartenblätter Pirna (L5148) und Altenberg (L5348).

Literaturverzeichnis

AD-HOC-ARBEITSGRUPPE GEOLOGIE (2016): Gefahrenhinweiskarten geogener Naturgefahren in Deutschland - ein Leitfaden der Staatlichen Geologischen Dienste (SGD). Geologisches Jahrbuch, Reihe A, Heft 164, 88 S., Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe in Zusammenarbeit mit den Staatlichen Geologischen Diensten in der Bundesrepublik Deutschland, Stuttgart: E. Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung.

AL SANDOUK, N. A. (2009): Felssturzrisikokartierung und Klassifikation der Postelwitzer Steinbrüche (Sachsen). Diplomkartierung, Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen, Lehrstuhl für Ingenieurgeologie und Hydrogeologie, Aachen.

GEOSN (2024): Fachliche Details - Laserscandaten. Landesamt für Geobasisinformation Sachsen, https://www.landesvermessung.sachsen.de/fachliche-details-8645.html, 26.08.2024.

HAGGE-KUBAT, T., SÜßER, P., ENZMANN, F. & WEHINGER, A. (2021): Modellierung der Felssturzgefährdung am Mittelrhein- und Moseltal. In: Mainzer geowissenschaftliche Mitteilungen, Band 49, S. 197-220.

LFU (2020): Methoden-Bericht zur Gefahrenhinweiskarte Bayern - Vorgehen und technische Details. Bayrisches Landesamt für Umwelt (Hg), PDF-Dokument, Broschüre, 32 S., Augsburg.

LFULG (2012): Zusammenstellung der für das Ereigniskataster zu verwendenden Definitionen verschiedener Sturzprozessunterarten. Sächsisches Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie, PDF-Dokument, unveröffentlicht.

MÜLLER, E. (2021): GIS-gestützte, statistische Gefährdungsanalyse von Murgängen im Kirnitzschtal/Sächsische Schweiz. Masterarbeit, TU Bergakademie Freiberg, Institut für Geotechnik, unveröffentlicht.

RINDERER, M., BERGER, C., ZIMMERMANN, F., MERTIN, M. & JÄGER, S. (2023): Analysen zu schnellen wasserhaltigen Massenbewegungen - Bundesweite Untersuchungen zur Exposition des deutschen Schienennetzes und Modellierungen der räumlichen Ausbreitung. In: Berichte des Deutschen Zentrums für Schienenverkehrsforschung, Bericht 48 (2023), Projektnummer 2020-5-U-1202, 115 S., Deutsches Zentrum für Schienenverkehrsforschung beim Eisenbahn-Bundesamt (Hg.).

WICHMANN, V. (2017): The Gravitational Process Path (GPP) model (v1.0) - A GIS-based simulation framework for gravitational processes. Geoscientific Model Development, 10: 3309-3327.

Anhang

A 1 Literaturliste Recherche

AD-HOC-ARBEITSGRUPPE GEOLOGIE (2016): Gefahrenhinweiskarten geogener Naturgefahren in Deutschland - ein Leitfaden der Staatlichen Geologischen Dienste (SGD). Geologisches Jahrbuch, Reihe A, Heft 164, 88 S., Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe in Zusammenarbeit mit den Staatlichen Geologischen Diensten in der Bundesrepublik Deutschland, Stuttgart: E. Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung

AL SANDOUK, N. A. (2009): Felssturzrisikokartierung und Klassifikation der Postelwitzer Steinbrüche (Sachsen). Diplomkartierung, Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen, Lehrstuhl für Ingenieurgeologie und Hydrogeologie, Aachen

BALZER, D., DOMMASCHK, P., EHRET, D., FUCHS, M., GLASER, S., HENSCHEID, S., KUHN, D., STRAUß, R., TORIZIN, J. & WIEDENMANN, J. (2020): Massenbewegungen in Deutschland (MBiD) - Beiträge zur Modellierung der Hangrutschungsempfindlichkeit. Ein Kooperationsprojekt zwischen den Staatlichen Geologischen Diensten der Bundesländer Baden-Württemberg, Bayern, Nordrhein-Westfalen, Sachsen und der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe im Auftrag des Direktorenkreises der Staatlichen Geologischen Dienste in Deutschland. - Abschlussbericht: 269 Seiten, 90 Abbildungen, 75 Tabellen; Augsburg, Freiberg, Freiburg, Hannover und Krefeld

BELL, R., PETSCHKO, H., GLADE, T. (2013): Gefährdungsmodellierung bei gravitativen Massenbewegungen. In: Geologische Bundesanstalt (Hg.): Geogene Gefahren und Raumordnung. Berichte der Geologischen Bundesanstalt unter Mitarbeit von Harald Steininger, NÖ Geotage, Rabenstein an der Pielach, 19. und 20. September 2013, Geologische Bundesanstalt, Wien, S. 54–60

COROMINAS, J., ET AL. (2013): Recommendations for the quantitative analysis of landslide risk. In: Bulletin of Engineering Geology and the Environment, Hg. v. Springer, 2014, Volume 73, S. 209-263

FLEUCHAUS, P., BLUM, P., WILDE, M., TERHORST, B., BUTSCHER, C. (2021): Retrospective evaluation of landslide susceptibility maps and review of validation practice. In: Environmental Earth Sciences, Hg. v. Springer, 2021, Volume 80, Artikel 485, 15 Seiten

HORN, M. (2017): Modellierung der Veränderung des Risikos für gravitative Massenbewegungen in den Hochgebirgslagen der Alpen unter dem Einfluss des Klimawandels. Dissertation zur Erlangung des Doktorgrades an der Fakultät für Mathematik, Informatik und Naturwissenschaften Fachbereich: Geowissenschaften der Universität Hamburg, Hamburg, Institut für Geowissenschaften

KALLMEIER, E., KNOBLOCH, A., HERTWIG, T. (2019): Erstellung einer ingenieurgeologischen Gefahrenhinweiskarte zu Hang- und Böschungsrutschungen entlang des deutschen

Schienennetzes. EBA Forschungsbericht 2018-13, Projektnummer 2016-U-1-1210, Beak Consultants GmbH, Freiberg, Hg. v. Eisenbahn-Bundesamt, Bonn

LIMA, P., STEGER, S., GLADE, T., MURILLO-GARCIA, F. G. (2022): Literature review and bibliometric analysis on data-driven assessment of landslide susceptibility. In: Journal of Mountain Science, Hg. v. Springer, 2022, Volume 19, Issue 6 - Special Issue on Disaster Risk Reduction in Mountain Areas, S. 1670-1698

MAYER, K., PATULA, S., KRAPP, M., LEPPIG, B., THOM, P., VON POSCHINGER, A. (2010): Danger map for the Bavarian Alps. In: Zeitschrift der Deutschen Gesellschaft für Geowissenschaften, Band 161, Heft 2, S. 119–128

MÜLLER, E. (2021): GIS-gestützte, statistische Gefährdungsanalyse von Murgängen im Kirnitzschtal / Sächsische Schweiz. Masterarbeit, TU Bergakademie Freiberg, Institut für Geotechnik

PERSONENKREIS "GEOGEFAHREN" (2008): Geogene Naturgefahren in Deutschland - Empfehlungen der Staatlichen Geologischen Dienste (SGD) zur Erstellung von Gefahrenhinweiskarten (unpubl.). Freiburg

PETSCHKO, H. (2008): Räumliche Analyse von gravitativen Massenbewegungen mittels multivariater Statistik – Erstellung einer Gefahrenhinweiskarte am Beispiel der Region Gasen und Haslau (Oststeiermark). Diplomarbeit, Universität Wien, Theoretische und Angewandte Geographie

PETSCHKO, H., BELL, R., GLADE, T., GOETZ, J., HEISS, G., LEOPOLD, P. (2013): MoNOE-Modellierung der Rutschprozesse. In: Geologische Bundesanstalt (Hg.): Geogene Gefahren und Raumordnung. Berichte der Geologischen Bundesanstalt unter Mitarbeit von Harald Steininger, NÖ Geotage, Rabenstein an der Pielach, 19. und 20. September 2013, Geologische Bundesanstalt, Wien, S. 77–86

PROSKE, H., BAUER, C. (2013): MoNOE-Modellierung der Sturzprozesse. In: Geologische Bundesanstalt (Hg.): Geogene Gefahren und Raumordnung. Berichte der Geologischen Bundesanstalt unter Mitarbeit von Harald Steininger, NÖ Geotage, Rabenstein an der Pielach, 19. und 20. September 2013, Geologische Bundesanstalt, Wien, S. 87–92

REICHENBACH, P., ROSSI, M., MALAMUD, B. D., MIHIR, M., GUZZETTI, F. (2018): A review of statistically-based landslide susceptibility models. In: Earth-Science Reviews, Hg. v. Elsevier, 2018, Volume 180, S. 60-91

SCHNEIDER, A-K. (2016): Die Darstellung gravitativer Massenbewegungen in geogenen Gefahrenhinweiskarten -Der planungspraktische Umgang des Bundeslandes Niederösterreich mit Rutschungen und Steinschlägen unter Berücksichtigung des Projekts „MoNOE“. Diplomarbeit, TU Wien, Fakultät für Architektur und Raumplanung

TILCH, N., SCHWARZ, L. (2010): Erstellung von Dispositionskarten für Massenbewegungen (hier: spontane Massenbewegungen im Lockergestein) - Herausforderungen, Methoden, Chancen, Limitierungen.

Innsbrucker Hofburggespräche, Innsbruck, http://bfw.ac.at/050/pdf/IHG260510_Tilch_Schwarz.pdf, 26.05.2010

TILCH, N., SCHWARZ, L., WINKLER, E. (2013): Gefahren(hinweis)karten für gravitative Massenbewegungen (Hangrutschungen und Hangmuren) - Herausforderungen, Limitierung, Chancen. In: Geologische Bundesanstalt (Hg.): Geogene Gefahren und Raumordnung. Berichte der Geologischen Bundesanstalt unter Mitarbeit von Harald Steininger, NÖ Geotage, Rabenstein an der Pielach, 19. und 20. September 2013, Geologische Bundesanstalt, Wien, S. 47–53

A 2 Webauftritte der Geologischen Dienste

- Baden-Württemberg: LGRB – Landesamt für Geologie, Rohstoffe und Bergbau https://geogefahren.lgrb-bw.de/
- Bayern: LfU – Bayrisches Landesamt für Umwelt https://www.lfu.bayern.de/geologie/massenbewegungen_karten_daten/gefahrenhinweiskarten/index.htm
- BGR – Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe https://www.bgr.bund.de/DE/Themen/Erdbeben-Gefaehrdungsanalysen/Ingenieurgeologische_Gefaehrdungsanalysen/ingenieurgeologische_gefaehrdungsanalysen_node.html
- Hessen: HLNUG – Hessisches Landesamt für Naturschutz, Umwelt und Geologie https://www.hlnug.de/themen/geologie/georisiko-und-ingenieurgeologie
- Mecklenburg-Vorpommern: LUNG – Landesamt für Umwelt, Naturschutz und Geologie https://www.lung.mv-regierung.de/dateien/gefahrenhinweiskarte_jasmund.pdf
- Niedersachsen: LBEG – Landesamt für Bergbau, Energie und Geologie https://nibis.lbeg.de/cardomap3/?TH=1452

Herausgeber
Sächsisches Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie (LfULG)
Pillnitzer Platz 3, 01326 Dresden
Telefon: + 49 351 2612-0; Telefax: + 49 351 2612-1099
E- Mail: Poststelle.LfULG@smekul.sachsen.de
www.lfulg.sachsen.de

Autor
M.Sc. Lena-Sophie Franz
Technische Universität Bergakademie Freiberg
Institut für Geotechnik
Lehrstuhl für Ingenieurgeologie u. Umweltgeotechnik
Telefon: + 49 3731 393163
E-Mail: christoph.butscher@ifgt.tu-freiberg.de

Redaktion
Peter Dommaschk
LfULG, Abteilung Geologie/Referat Ingenieurgeologie
Halsbrücker Straße 31a, 09599 Freiberg
Telefon: + 49 3731 294-1301
E-Mail: peter.dommaschk@smekul.sachsen.de

Bildnachweis
M.Sc. Lena-Sophie Franz (Titelseite)

Redaktionsschluss
29.04.2025

ISSN
1867-2868

Bestellservice
Die Broschüre steht nicht als Printmedium zur Verfügung, kann aber als PDF-Datei heruntergeladen werden aus der Publikationsdatenbank des Freistaates Sachsen (https:/publikationen.sachsen.de).

Hinweis
Diese Publikation wird im Rahmen der Öffentlichkeitsarbeit vom LfULG (Geschäftsbereich des SMUL) kostenlos herausgegeben. Sie ist nicht zum Verkauf bestimmt und darf nicht zur Wahlwerbung politischer Parteien oder Gruppen eingesetzt werden.

Diese Maßnahme wird mitfinanziert durch Steuermittel auf der Grundlage des vom Sächsischen Landtag beschlossenen Haushaltes.

Täglich für ein gutes Leben.
www.lfulg.sachsen.de