



Eisenbahn-Bundesamt

EBA Forschungsbericht
2018-13

Erstellung einer ingenieurgeologischen Gefahrenhinweiskarte zu Hang- und Böschungrutschungen entlang des deutschen Schienennetzes



EBA Forschungsbericht 2018-13
Projektnummer 2016-U-1-1210

Erstellung einer ingenieurgeologischen Gefahrenhinweiskarte zu Hang- und Böschungsrutschungen entlang des deutschen Schienennetzes

von

Enrico Kallmeier, Andreas Knobloch, Dr. Thomas Hertwig
Beak Consultants GmbH, Freiberg

Im Auftrag des Eisenbahn-Bundesamtes

Impressum

HERAUSGEBER

Eisenbahn-Bundesamt

Heinemannstraße 6
53175 Bonn

www.eba.bund.de

DURCHFÜHRUNG DER STUDIE

Beak Consultants GmbH
Am St. Niclas Schacht 13
D-09599 Freiberg / Germany

ABSCHLUSS DER STUDIE

Juni 2017

REDAKTION

Referat 52
Markus Forbriger, Carina Herrmann

BILDNACHWEIS

siehe Abbildungsverzeichnis
Sebastian Kahnert / dpa / S 3

PUBLIKATION ALS PDF

<http://www.eba.bund.de/forschungsberichte>

ISSN 2627-9851

Bonn, Dezember 2019

Inhaltsverzeichnis

1	Zusammenfassung	7
2	Vorbemerkungen	9
2.1	Veranlassung	9
2.2	Ziele und Aufgaben.....	9
2.3	Einführung in die Prognose von Masseschwerebewegungen.....	13
2.3.1	Überblick.....	13
2.3.2	Multivariate Statistik/künstliche neuronale Netze.....	14
3	Bearbeitungsmethodik	18
3.1	Überblick.....	18
3.2	Beschreibung der übergebenen Ausgangsdaten.....	18
3.2.1	Gleislage	19
3.2.2	Geologische Übersichtskarte GÜK200.....	20
3.2.3	Digitales Landschaftsmodell DLM250.....	23
3.2.4	Digitales Geländemodell DGM10.....	25
3.2.5	Ereigniskataster	26
3.3	Datenvorbereitung.....	28
3.3.1	Gleislage	29
3.3.2	Geologische Übersichtskarte GÜK200.....	30
3.3.3	Digitales Landschaftsmodell DLM250.....	40
3.3.4	Digitales Geländemodell DGM10.....	50
3.3.5	Ereigniskataster	65
3.4	Berechnung der Gefährdungspotenziale.....	66
3.4.1	Überblick.....	66
3.4.2	Ansatz 1: Berechnung mittels Algorithmen/ Entscheidungsbäumen.....	67
3.4.3	Ansatz 2: Berechnung mittels multivariater Statistik/ künstlicher neuronaler Netze.....	73
3.5	Ermittlung der gefährdeten Gleisabschnitte	83
3.5.1	Überblick.....	83
3.5.2	Ansatz 1: Berechnung mittels Algorithmen/ Entscheidungsbäumen.....	86
3.5.3	Ansatz 2: Berechnung mittels multivariater Statistik/ künstlicher neuronaler Netze.....	88
4	Berechnungsergebnisse	90
4.1	Gefährdungspotenzial.....	90

4.1.1	Ansatz 1: Berechnung mittels Algorithmen/ Entscheidungsbäumen	90
4.1.2	Ansatz 2: Berechnung mittels multivariater Statistik/ künstlicher neuronaler Netze.....	92
4.1.3	Vergleich der Ergebnisse	93
4.2	Gefährdete Gleisabschnitte	97
4.2.1	Ansatz 1: Berechnung mittels Algorithmen/ Entscheidungsbäumen.....	97
4.2.2	Ansatz 2: Berechnung mittels multivariater Statistik/ künstlicher neuronaler Netze.....	101
4.2.3	Vergleich der Ergebnisse	102
5	Gefahrenhinweiskarten.....	106
5.1	Gefahrenhinweiskarte für Deutschland.....	106
5.2	Gefahrenhinweiskarte für Sachsen	108
6	Schlussfolgerungen.....	110
6.1	Zusammenfassung der Ergebnisse.....	110
6.2	Bewertung der Ergebnisse	111
7	Empfehlungen.....	113
7.1	Überblick	113
7.2	Einbeziehung weiterer naturräumlicher Regionen Deutschlands.....	113
7.3	Einbeziehung der GK25	113
7.4	Einbeziehung des 3D-Modell des Untergrundes	115
7.5	Kennzeichnung der höhenmäßig oberhalb/unterhalb der Bahnlinien verlaufenden Bereiche	116
7.6	Einbeziehung von Klimadaten.....	117
8	Abkürzungsverzeichnis	118
9	Abbildungsverzeichnis.....	119
10	Tabellenverzeichnis.....	124
11	Quellenverzeichnis.....	125
12	Anhänge.....	127

1 Zusammenfassung

Das Ziel des Projektes bestand in der Erstellung einer Gefahrenhinweiskarte für Massenschwerebewegungen entlang des deutschen Schienennetzes auf der Grundlage eines deutschlandweit geltenden ingenieur-geologischen Modells, in das rutschungsrelevante geologisch-morphologische und Flächennutzungsinformationen einfließen.

Die Wirkungsweise und das Zusammenwirken dieser Parameter sind meist komplex und stark von lokalen Gegebenheiten bestimmt. Um ein möglichst optimiertes Ergebnis zu erhalten, wurden zwei verschiedene Ansätze getestet. Zum einen konnte das Gefährdungspotenzial für Massenschwerebewegungen auf der Basis geotechnischen Expertenwissens (wissensbasierter Ansatz) im ersten Schritt mittels einer Kombination von Hangneigung und Gesteinsklassifikation abgebildet werden. Dieser Ansatz wurde durch die Einbeziehung weiterer abgeleiteter Daten, sogenannter „Modifikatoren“, wie etwa Bewuchs, Versiegelungsgrad, Verformungsempfindlichkeit, Klüftung und Trennflächen, optimiert. Die entwickelten Algorithmen wurden auf den Gesamtdatenbestand von Deutschland angewendet und entsprechende Rasterkarten gerechnet, welche eine Gefahrenklasse von 1 (nicht gefährdet) bis 15 (sehr stark gefährdet) darstellen. Diese wurden mit den Vektordaten der Bahntrassen verschnitten und eine Gefahrenklassifikation in gefährdete (Gefahrenklasse größer/gleich 10) und nicht/gering gefährdete Gleisabschnitte (Gefahrenklasse kleiner 10) vorgenommen. Dazu wurden zusätzlich verschiedene Puffer von 50 m, 100 m und 200 m um die ausgewiesenen Gefährdungsbereiche gelegt, um auch die Gefährdung im näheren Umfeld der Gleisabschnitte zu berücksichtigen.

Der zweite, datenbasierte Ansatz stützt sich auf die Einbeziehung selbstlernender künstlicher neuronaler Netze (KNN), die durch das „Training“ mit bekannten Massenschwerebewegungen die Zusammenhänge der Modelleingangsdaten selbstständig erkennen und nachfolgend auf das definierte Untersuchungsgebiet anwenden. Da im Rahmen der Projektlaufzeit nur Daten aus den Gefahrenkatastern der DB Netz AG und des Sächsischen Landesamtes für Landwirtschaft, Umwelt und Geologie des Freistaates Sachsen flächendeckend im Bereich des Gleisnetzes zur Verfügung standen, wurde in einer ersten Modellierung das Gefährdungspotenzial nur innerhalb von Sachsen mit dem zweiten Ansatz modelliert. Das Ergebnis der Klassifikation mittels KNN ist ein kontinuierlicher Wert zwischen 0 (kein Gefährdungspotenzial) und 1 (sehr hohes Gefährdungspotenzial), welcher für die graphische Ausgabe entsprechend klassifiziert wurde. Die Anteile der Einzelparameter an dem Gefährdungspotenzial konnten über die Gewichte der Neuronen im KNN quantifiziert werden. Dabei haben vor allem die horizontale und vertikale Wölbung der Oberfläche den größten Einfluss. Analog zum ersten Ansatz wurden die Rasterdaten mit den Vektordaten der Bahntrassen verschnitten und in gefährdete (Gefährdungspotenzial größer/gleich 0,75) und nicht gefährdete Gleisabschnitte (Gefährdungspotenzial kleiner 0,75) unterteilt. Entsprechend dem ersten Ansatz wurden auch beim zweiten Ansatz dazu die Gefährdungsbereiche mit 50 m, 100 m und 200 m gepuffert.

Anschließend wurden beide Modellergebnisse im Modellgebiet des Freistaates Sachsen miteinander verglichen. Dabei wurden die vorhandenen Daten der Gefahrenkataster zur Verifizierung verwendet. Eine deutlich bessere Vorhersage der Gefährdung an den bekannten Punkten aus den Gefahrenkatastern erfolgte dabei mit dem zweiten Ansatz.

Abschließend wurden die Ergebnisse zur Visualisierung kartographisch dargestellt. Dabei wurde eine deutschlandweite Karte für den ersten Ansatz entworfen, sowie eine sachsenweite Karte mit einem Vergleich der Ergebnisse des ersten und zweiten Ansatzes. Alle Daten wurden in einem GIS-Projekt im Koordinatensystem ETRS89 UTM 32N zusammengestellt und dem Auftraggeber übergeben. Dieses Informationssystem ermöglicht die Recherche aller Eingangsdaten und die Analyse und den Vergleich der Ergebnisdaten in jeglichem Maßstab. Alle Raster besitzen dabei eine Auflösung von 20 m und umfassen einen Bereich von 1000 m links und rechts entlang der Gleiskörper.

2 Vorbemerkungen

2.1 Veranlassung

Das Eisenbahn-Bundesamt vergab nach öffentlicher Ausschreibung das Forschungsvorhaben:

„Erstellung einer ingenieurgeologischen Gefahrenhinweiskarte zu Hang- und Böschungsrutschungen entlang des deutschen Schienennetzes“

an die Beak Consultants GmbH. Wir legen hiermit den Abschlussbericht mit einer Beschreibung der durchgeführten Arbeiten und einer Erörterung der Ergebnisse vor.

2.2 Ziele und Aufgaben

Das Ziel des Projektes bestand in der Erstellung einer Gefahrenhinweiskarte für Massenschwerebewegungen entlang des deutschen Schienennetzes auf der Grundlage eines deutschlandweit geltenden ingenieurgeologischen Modells, in das rutschungsrelevante geologisch-morphologische und Flächennutzungsinformationen einfließen sollten, wie z. B.:

- geotechnische Eigenschaften der Gesteine (rollig/bindig/gemischtkörnig, locker/fest, richtungslos klüftungsfreundlich/nicht richtungslos klüftungsfreundlich, verformungsempfindlich/nicht verformungsempfindlich, mit Trennflächen parallel zur Schichtung oder Schieferung/ohne derartige Trennflächen usw.),
- Hangeigenschaften (Neigungswinkel, horizontale und vertikale Wölbung),
- Charakteristik der Einzugsgebiete (Fließakkumulation),
- Flächennutzung (Bewuchs, Versiegelungsgrad).

Die Wirkungsweise und das Zusammenwirken dieser Parameter sind meist komplex und stark von lokalen Gegebenheiten bestimmt.

Für die Gefährdung der Bahntrassen kommen im Wesentlichen folgende **Prozesstypen** in Betracht:

1. Hangrutschungen im eigentlichen Sinn: d.h. mehr oder weniger flächenhafte Massenbewegungen, meist auf Gleitflächen im Untergrund, bedingt z.B.:
 - a. durch ungünstige Übereinstimmung von Einfallswinkel des Hanges und Richtung der Schieferung/Schichtung des Gesteins,
 - b. durch die plötzliche Instabilität größerer Massen von bindigem Lockergestein, z.B. nach intensiver Durchfeuchtung,
2. Massenbewegungen kanalisiert in lokalen Erosionsrinnen, d.h. Schlamm- oder Geröllströme, begünstigt z.B. durch Ausbau der Tiefenlinien, fehlende Vegetation usw. (z.B. siehe Abbildung 1),
3. Flächenhafter Massenabtrag der Erdoberfläche auf vergleichsweise flachen Hängen bei erosionsanfälligen Gesteinen, wie z.B. Löß,
4. Hochwässer und Schlammströme in Tälern mit größeren Einzugsgebieten.

Für das Projekt relevant waren die o.g. Prozesstypen 1, 2 und 3 bzw. deren Kombinationen.



Abbildung 1: Massenauftrag durch einen Schuttstrom entlang der Bahnlinie Bad-Schandau – Schöna am 24.05.2016 (Bildquelle: dpa/Sebastian Kahnert)

Die räumlich exakte Ausweisung von Gefährdungsbereichen ist aufgrund der großen Bedeutung des Kleinreliefs und der Wechselwirkung zwischen Gestein, Bodennutzung und Relief schwierig.

Für die Modellierung potenzieller Schadstellen kommen generell zwei Herangehensweisen in Betracht:

- Die **Nutzung bekannter geotechnischer Zusammenhänge und Erfahrungen** zur Ableitung mehr oder weniger fester Algorithmen und Entscheidungsbäume (z.B.: wenn Lockergestein und Hangneigung > 25° ist der kritische Böschungswinkel erreicht → d.h. der Hang ist gefährdet). Die Anwendbarkeit ist auf einfache, aber robuste Algorithmen beschränkt, welche die Unzulänglichkeiten der geologischen Datenbasis berücksichtigen müssen. Die Angabe verschiedener Gefahrenklassen ist möglich.

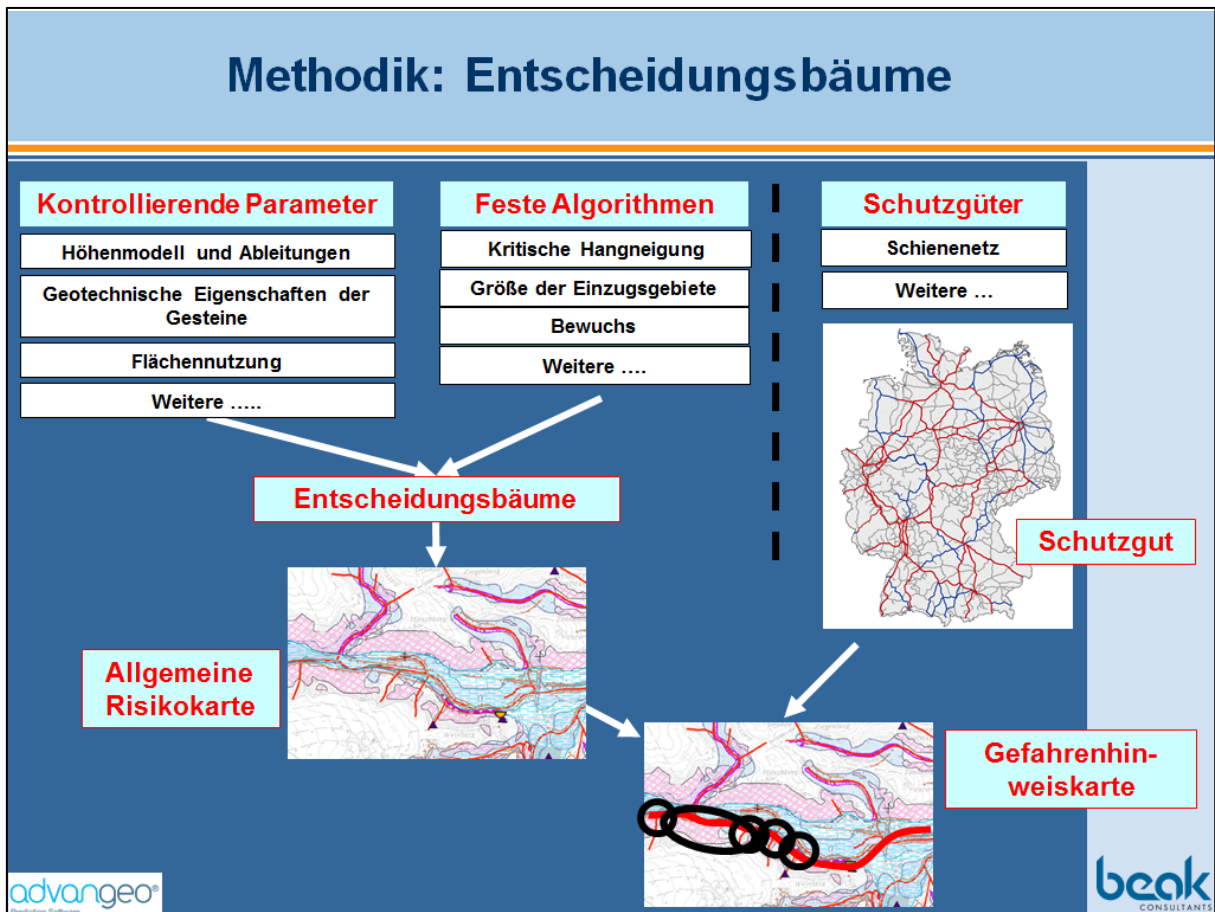


Abbildung 2: Methodik der Algorithmen/Entscheidungsbäume

- Die **Nutzung eines selbstlernenden Verfahrens zum automatischen Erkennen empirischer Zusammenhänge**. Das Verfahren (z.B. künstliche neuronale Netze (KNN), siehe Lit 1, Lit 2, Lit 4, Lit 5, Lit 13, Lit 14) lernt selbständig, welche Kombination von Parametern an welcher Stelle mit welchem Potenzial zu Gefährdungssituationen führt. Das Verfahren ist sehr robust und universell einsetzbar. Das Verfahren kann sehr gut zur Identifizierung kritischer Parameter bzw. deren Kombinationen genutzt werden. Für diese Vorgehensweise ist die Nutzung des Schadstellenkatasters unumgänglich.

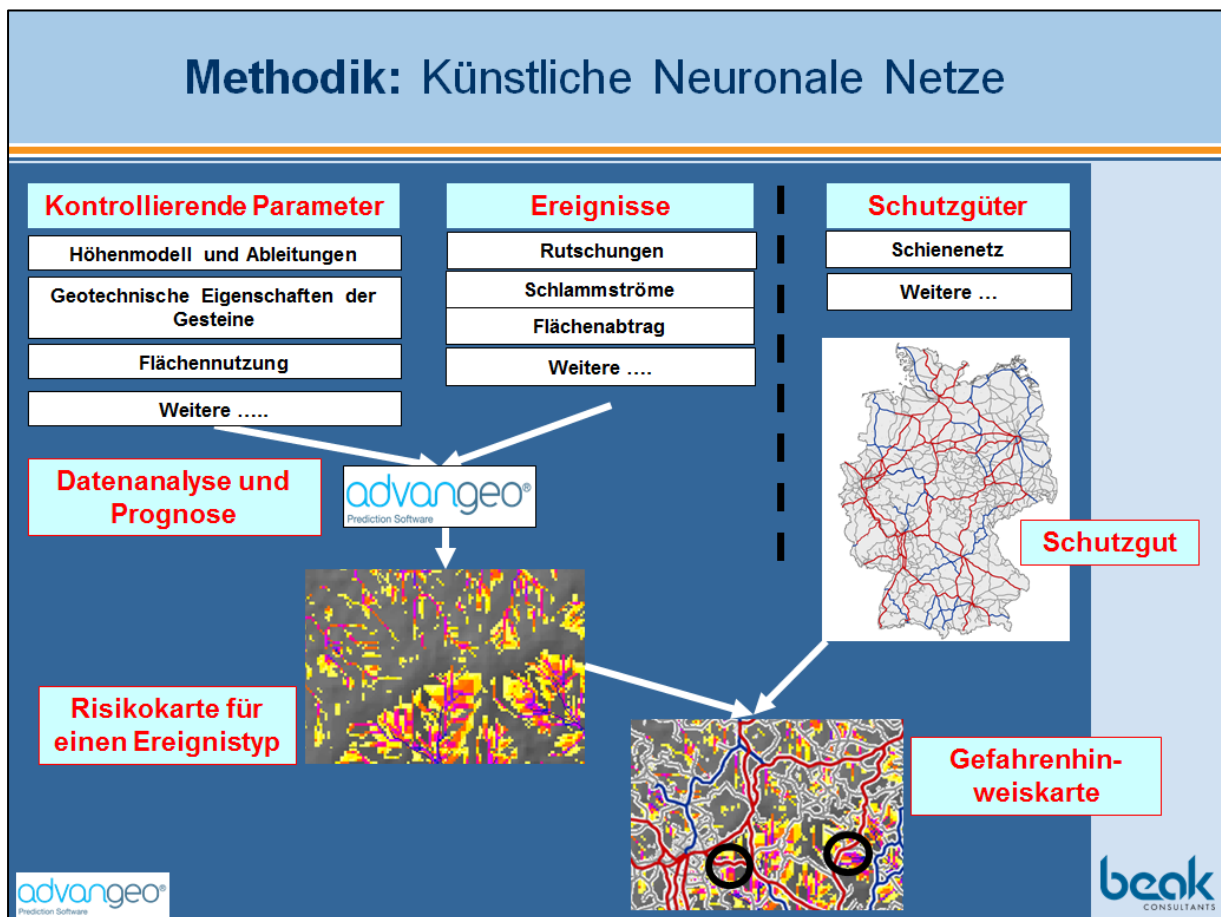


Abbildung 3: Methodik der multivariaten Statistik/künstlichen neuronalen Netze

Die Ergebnisse beider Herangehensweisen werden aber insofern Übersichtscharakter tragen, da die ganz lokalen Gegebenheiten der Geologie und der Flächennutzung aufgrund der Datenverfügbarkeit nicht berücksichtigt werden können.

2.3 Einführung in die Prognose von Masse-schwerebewegungen

2.3.1 Überblick

Prinzipiell kann die Modellierung/Prognose raumbezogener Sachverhalte über verschiedene Ansätze erfolgen:

1. Die detaillierte Untersuchung der physikalischen, chemischen oder sonstigen Zusammenhänge mit dem Ziel einer **exakten Modellierung** des Prozesses mittels **mathematisch-analytischer Verfahren** (z.B. Modellierung von Rutschungen mit dem Verfahren der finiten Elemente). Dabei wird die Ursache-Wirkungsbeziehung durch ein System exakter mathematischer Zusammenhänge beschrieben, welche das Ereignis und dessen Ursachen mittels mathematischer Gleichungssysteme nachbilden. Die Kalibrierung der Modelle erfolgt bei mathematisch exakt gefassten Sachverhalten u.a. über „Justierung“ mittels Konstanten anhand des Vergleichs der Modellierungsergebnisse mit realen Messwerten.
2. Die statistische Herangehensweise (hierzu zählen auch Verfahren der künstlichen Intelligenz) nutzt für ihre Analyse die Betrachtung unterschiedlichster potenzieller Einfluss- und Wirkungsfaktoren. Sie ermittelt mit Hilfe **multivariater statistischer Analyseverfahren** die Bedeutung und das Zusammenspiel der Wirkungsfaktoren für das Auftreten von Ereignissen bzw. Phänomenen auf der Basis statistischer Zusammenhänge mit dem Ziel einer optimierten Modellierung des Prozesses. Dabei wird das Zusammenwirken mehrerer unabhängiger Variablen (Einflussfaktoren) in Bezug auf eine abhängige Variable (z.B. Auftreten/Entstehen einer Hangrutschung) untersucht.

Die Kalibrierung mathematisch-analytischer Modelle ist mit zeit- und kostenintensiven Feld- und/oder Laboruntersuchungen verbunden. Ingenieurgeologische Sachverhalte lassen sich aufgrund ihrer Komplexität (kompliziertes Zusammenspiel geologischer, tektonischer, geomechanischer, zeitlicher und sonstiger Aspekte) und des ungenügenden Untersuchungsgrades mit mathematisch-analytischen Modellen derzeit nicht real beschreiben. In der Regel sind nur einzelne Sachverhalte bei sonstigen konstanten Rahmenbedingungen exakt modellierbar.

Der Einsatz von Verfahren der künstlichen Intelligenz bietet den Vorteil, mit deutlich weniger Aufwand hinsichtlich Datenbeschaffung und Kalibrierung auszukommen. Diese Verfahren bieten die Möglichkeit, komplexe nichtlineare Zusammenhänge mit multiplen Einflussfaktoren zu modellieren. Dabei ist u.U. nicht einmal die Kenntnis der qualitativen/quantitativen Zusammenhänge zwischen den Variablen und der abhängigen Komponente erforderlich. Die Zusammenhänge werden statistisch durch einen Lernprozess (Training des neuronalen Netzes) ermittelt, wobei eine Vielzahl von Variablen berücksichtigt werden kann. Dabei können auch Variablen unterschiedlicher Skalenniveaus verarbeitet werden.

2.3.2 Multivariate Statistik/künstliche neuronale Netze

Theoretischer Hintergrund

Das hohe Abstraktionsvermögen, die Lernfähigkeit des Menschen und seine Fähigkeit, Beziehungen zwischen einzelnen Elementen in komplexen Systemen herzustellen, bildeten die Motivation für die Verwendung künstlicher neuronaler Netze (KNN) für die Prognose von Massenbewegungen.

Das Prinzip der KNN orientiert sich an der Wirkungsweise des biologischen Nervensystems: Dieses besteht aus einer Vielzahl von Nervenzellen (Neuronen), die Eingangssignale anderer Neuronen aufnehmen und verarbeiten. Ab einem bestimmten Schwellenwert erfolgen die Aktivierung der Zelle und eine Reizweiterleitung. Lernprozesse resultieren aus der fortwährenden Anpassung der Verbindungen zwischen den Neuronen: Bei häufiger Benutzung wachsen Verbindungen, bei seltener Benutzung degenerieren sie.

Die Simulation dieser biochemischen Prozesse in einem KNN erfolgt durch künstliche Neuronen, die sogenannten Verarbeitungseinheiten des KNN. Die Verbindung zwischen den Neuronen wird durch gerichtete Gewichte w_{ij} realisiert.

Die Organisation der künstlichen Neuronen erfolgt in der Regel schichtweise:

- Eingabeschicht: Aufnahme der Eingabewerte (=Ausgangsinformationen, die als voneinander unabhängige Variablen und entscheidende Einflussfaktoren des betrachteten Ereignisses bzw. Phänomens definiert werden),
- Zwischenschicht(en): Zusammenfassen der Ausgabesignale der vorgelagerten Neuronen und Berechnung des Ausgabewertes durch Transformation mittels Aktivierungsfunktion,
- Ausgabeschicht: Erzeugung der abhängigen (zu prognostizierenden) Variable.

Die Netztopologie beschreibt die Art und Weise der Verbindung der Neuronen untereinander. Einerseits wird die Richtung der Informationsweiterleitung (vorwärtsgerichtet oder rückwärtsgerichtet) und andererseits der Grad und die Art der Verbindungen (z.B. vollständig verbunden, mit Shortcuts) definiert. Abbildung 4 zeigt das Schema eines vollständig verbundenen, vorwärtsgerichteten Netzes mit einer 4-3-1 Topologie. Auf der rechten Seite ist eine Verarbeitungseinheit (Neuron) mit der zugehörigen Ausgabefunktion dargestellt.

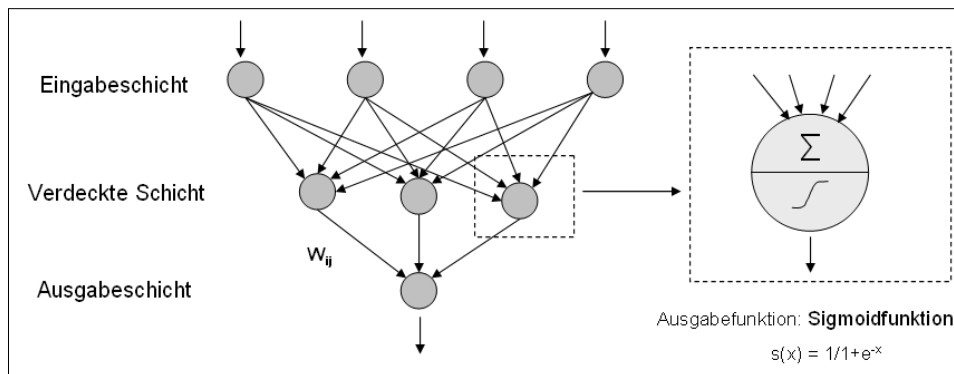


Abbildung 4: Schema eines vorwärtsgerichteten (feedforward) Netzes (Quelle: Lit 1)

Die Gewichte stärken oder schwächen das Eingangssignal und werden im Rahmen des Lernprozesses verändert. Durch die wiederholte Eingabe von Trainingsmustern wird die Stärke der Verbindungen zwischen den Neuronen modifiziert, wobei versucht wird, den Fehler zwischen erwarteter und tatsächlicher Ausgabe des Netzes zu minimieren.

Es existieren verschiedene Netzparadigmen, z.B. das Multi-Layer-Perceptron (MLP), Radiale Basisfunktionsnetze (RBF), Hopfieldnetze und Self-Organizing Maps (SOM). Ihr Einsatz ist vom Lernziel abhängig. Eine große Bedeutung für praktische Anwendungen überwachten Lernens besitzt das Multi-Layer-Perceptron (MLP), bei dem die Informationsverarbeitung vorwärtsgerichtet (feedforward) erfolgt. Es handelt sich bei diesem Netzparadigma um eine Weiterentwicklung des Perceptrons, das der Anforderung zur Modellierung komplexer Zusammenhänge Rechnung trägt. Das MLP besteht aus einer Eingabeschicht, mindestens einer Zwischenschicht und einer Ausgabeschicht.

Zu den gängigen Trainingsalgorithmen des MLP gehören der Backpropagation-Algorithmus und dessen Abwandlungen. „Backpropagation of Error“ (Fehlerrückleitung) ist ein Trainingsalgorithmus, der die Gewichte mit Hilfe des Fehlers des Ausgabesignals justiert mit dem Ziel, diesen Fehler zu minimieren. Dabei wird das Ausgangssignal des Netzes mit dem vorgegebenen Sollwert aus den Trainingsdaten verglichen. Der Fehler wird dann verwendet, um die Gewichte w_{ij} des neuronalen Netzwerks abzustimmen.

Ein weiterer wichtiger Parameter des Netzes ist die verwendete Aktivierungsfunktion, die den Ausgabestatus des Neurons berechnet. Dafür werden differenzierbare und nichtlineare Funktionen benötigt, in der Praxis kommen häufig Sigmoidfunktionen zum Einsatz.

Die Grundlagen der künstlichen neuronalen Netze sind im Detail in Lit 9 und Lit 10 beschrieben.

Beschreibung der advangeo® Prediction Software

Die bei Beak seit 2008 entwickelte advangeo® Prediction Software deckt mit der implementierten Fachschale Erosion den Arbeitsfluss der Ausführung von Prognoserechnungen für verschiedene Massenschwerebewegungen ab.

Mit Hilfe der **Technologie künstlicher neuronaler Netze** verknüpft die Software die Lage konkreter geotechnischer Ereignisse mit den potenziell verursachenden Parametern (Geländemorphologie, geotechnische Eigenschaften der Gesteine, Flächennutzung, Klimaparameter, etc.) und ermittelt den Grad der Zuverlässigkeit der Prognose.

Für die Berechnungen werden benötigt:

- Lernobjekte: das Schadstellenkataster (gegebenenfalls klassifiziert),
- Daten prozesskontrollierender Parameter: geologische Daten (Gesteinsarten, ihre Klüftungs- und Verformungsanfälligkeit, Ausprägung und Einfallen sowie Richtung von Schichtung und Klüftung), Deckgebirge (Lockergesteinsbedeckung), Höhenmodell und dessen Ableitungen, Bewuchs, Hydrogeologie, weitere Daten.

Advangeo® ist vollständig kompatibel mit Esri ArcGIS 10.2.2. und besteht aus drei Komponenten (siehe Abbildung 5):

- dem Daten- und Modellexplorer mit:
 - den Rechenkernen für KNN, WoE, FL,
 - Funktionen zur Datenvorbereitung (Rasterung, Datenextraktion, Mapping auf einheitliche Raster, Umcodierung, Normierung, usw.),
 - Funktionen zur Visualisierung der Metadaten der Berechnungen,
 - Funktionen zur Validierung der Rechenergebnisse,
 - Schnittstellen zur Kommunikation mit anderen Interpretationsprogrammen,
- dem GIS zur:
 - Prozessierung von Geometriedaten,
 - Visualisierung der Daten und Ergebnisse,
- der Datenbank zur:
 - Speicherung der Daten (Geometriedaten, Gewichte der Neuronen, Fuzzy Operatoren usw.),
 - Speicherung der Metadaten (z.B. Parameter der Berechnungen, Konfiguration der KNN, usw.).

Die Erweiterung advangeo® Erosion bietet umfangreiche Werkzeuge für die Vorprozessierung der Daten, was die Ausführung von realen Berechnungen außerordentlich beschleunigt.

Komfortable Schnittstellen machen die vorprozessierten Daten problemlos auch für Rechenverfahren mit externer Software verfügbar.

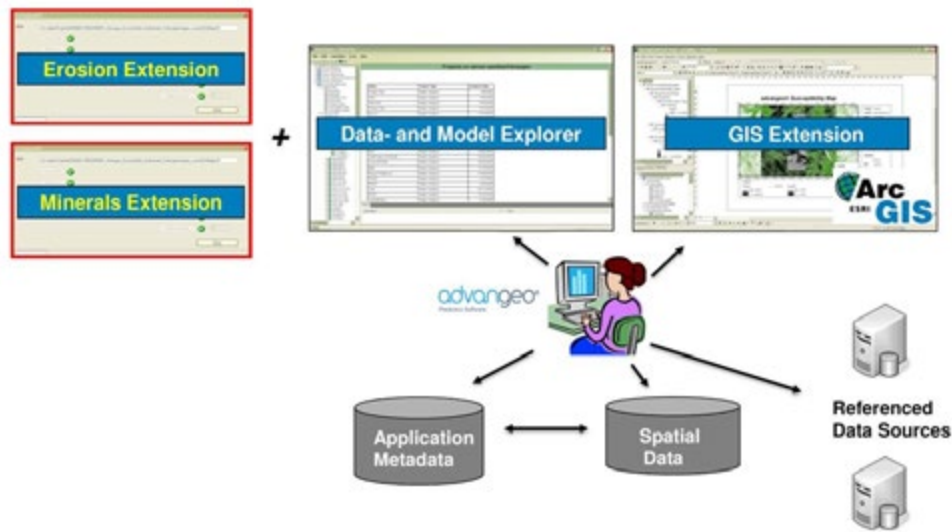


Abbildung 5: Prinzipielle Komponenten der advangeo® Prediction Software

Die von advangeo® bereitgestellten Funktionen zur Ergebnisbewertung bieten folgende Möglichkeiten:

- Fehlerkurve (Veränderung des Fehlers mit Anzahl der Recheniterationen),
- Vergleich Berechnungsergebnis \leftrightarrow Trainingsdaten mittels Histogrammen,
- Bewertung des Einflusses der Einzelparameter auf das jeweilige Rechenergebnis (Auswertung der Gewichte des trainierten neuronalen Netzes).

Die langjährigen Erfahrungen in der Nutzung Künstlicher Neuronaler Netze (KNN) gestatten folgende Schlussfolgerungen:

- das KNN erkennt sicher **vorhandene** Zusammenhänge,
- das KNN erkennt ebenfalls sicher **fehlende** Zusammenhänge,
- das KNN eignet sich hervorragend zur Bewertung der Höhe des Einflusses der einzelnen Parameter auf die abhängige Variable,
- das KNN kann in Abhängigkeit der verfügbaren Daten sowohl **qualitative** (z.B. Wahrscheinlichkeit des Auftretens) als auch **quantitative** (z.B. Mengen, Inhalte) Prognosen rechnen.

Damit ist advangeo® hervorragend geeignet, die Zuverlässigkeit der Prognosen zu bewerten. Weitere Informationen zu advangeo® können der Literatur (Lit 1, Lit 2, Lit 3, Lit 4, Lit 5, Lit 6, Lit 7, Lit 11, Lit 12, Lit 13, Lit 14) entnommen werden.

3 Bearbeitungsmethodik

3.1 Überblick

Die Berechnung des Gefährdungspotenzials erfolgte mittels der folgenden Bearbeitungsschritte:

- Beschaffung der Daten:
 - Digitales Geländemodell in der Auflösung 10 m,
 - Geologische Übersichtskarte im Maßstab 1:200.000,
 - Digitales Landschaftsmodell im Maßstab 1:250.000,
 - Schadstellenkataster:
 - DB Netz AG,
 - Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie von Sachsen,
- Aufbereitung der Daten:
 - Klassifikation der Gesteine nach ingenieurgeologischen Gesichtspunkten,
 - Klassifikation des Landschaftsmodells,
 - Aufbereitung des Höhenmodells,
- Prognose des Gefährdungspotenzials:
 - Erstellung und stufenweise Anwendung der Algorithmen für die Entscheidungsbäume (Ansatz 1),
 - Erstellung und Training eines künstlichen neuronalen Netzes (Ansatz 2),
- Auswertung des Gefährdungspotenzials:
 - Vergleich mit dem Schadstellenkataster,
 - Statistische Auswertung,
- Erzeugung der Gefahrenhinweiskarten,
- Empfehlung für die weitere Vorgehensweise.

3.2 Beschreibung der übergebenen Ausgangsdaten

Die folgenden Ausgangsdaten standen im Rahmen des Projektes zur Verfügung:

- Gleislage,
- geologische Übersichtskarte GÜK200,
- digitales Landschaftsmodell DLM250,
- digitales Geländemodell DGM 25 und DGM10,
- Daten aus den Ereigniskatastern.

Diese Datengrundlagen erfüllen lediglich hinsichtlich des Reliefs (Digitales Geländemodell mit 10 m Rasterweite) die in der Ausschreibung geforderten Anforderungen an die hohe Flächenschärfe. Die Datengrundlagen der Geologischen Karte 1:200.000 und des Digitalen Landschaftsmodells 1:250.000 sind zu ungenau für flächenscharfe Aussagen.

Alle Daten wurden in ein Esri ArcGIS-Projekt importiert, welches das folgende Koordinatensystem verwendet:

- Kurzbezeichnung: ESPG 25832
- Koordinatensystem: ETRS_1989_UTM_Zone_32N
- Projection: Transverse_Mercator
- False_Easting: 500000,00000000
- False_Northing: 0,00000000
- Central_Meridian: 9,00000000
- Scale_Factor: 0,99960000
- Latitude_Of_Origin: 0,00000000
- Linear Unit: Meter
- Geographic Coordinate System: GCS_ETRS_1989
- Datum: D_ETRS_1989
- Prime Meridian: Greenwich
- Angular Unit: Degree

In den folgenden Abschnitten werden die zur Verfügung gestellten Eingangsdaten kurz beschrieben.

3.2.1 Gleislage

Im Rahmen der Auftaktbesprechung wurden am 16.1.2017 bzw. 18.1.2017 die Daten zur „Gleislage 2D“ als Shapefile-Datei an den AN übergeben. Die Daten wurden dem Eisenbahn-Bundesamt von der DB Netz AG zur Verfügung gestellt. Die übergebene Datei (Abbildung 6) beinhaltet die durchgängigen Gleisstrecken von Deutschland und konnte für die weitere Bearbeitung verwendet werden.

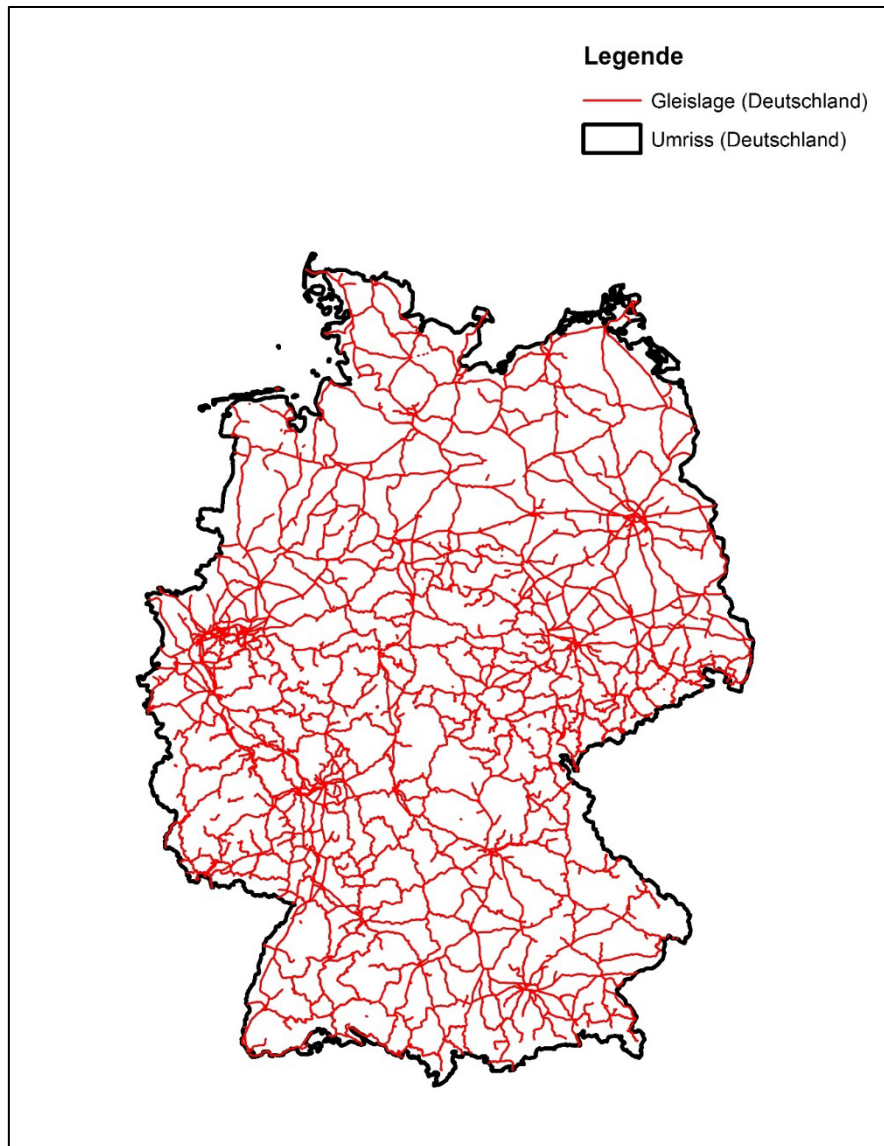


Abbildung 6: Überblick der Gleislage in Deutschland

3.2.2 Geologische Übersichtskarte GÜK200

Die frei zugängliche Geologische Übersichtskarte 1:200.000 (GÜK200) wurden am 09.01.2017 von den Servern des Geodatenzentrums der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (URL: <https://produktcenter.bgr.de/terraCatalog/DetailResult.do?fileIdentifizier=ABA9633F-E0BA-438D-918C-6B3BEB4D641C>) bezogen.

Dabei wurden die einzelnen 55 Kartenblätter zunächst als Shapefile-Datei heruntergeladen und anschließend in einer Shapefile-Datei zusammengeführt (Abbildung 7), so dass eine Datei mit insgesamt 270.288 einzelnen Flächen entstand. Dabei wurden die einzelnen Polygone der verschiedenen Kartenblätter über die Blattschnittgrenzen hinweg jedoch nicht vereinheitlicht.

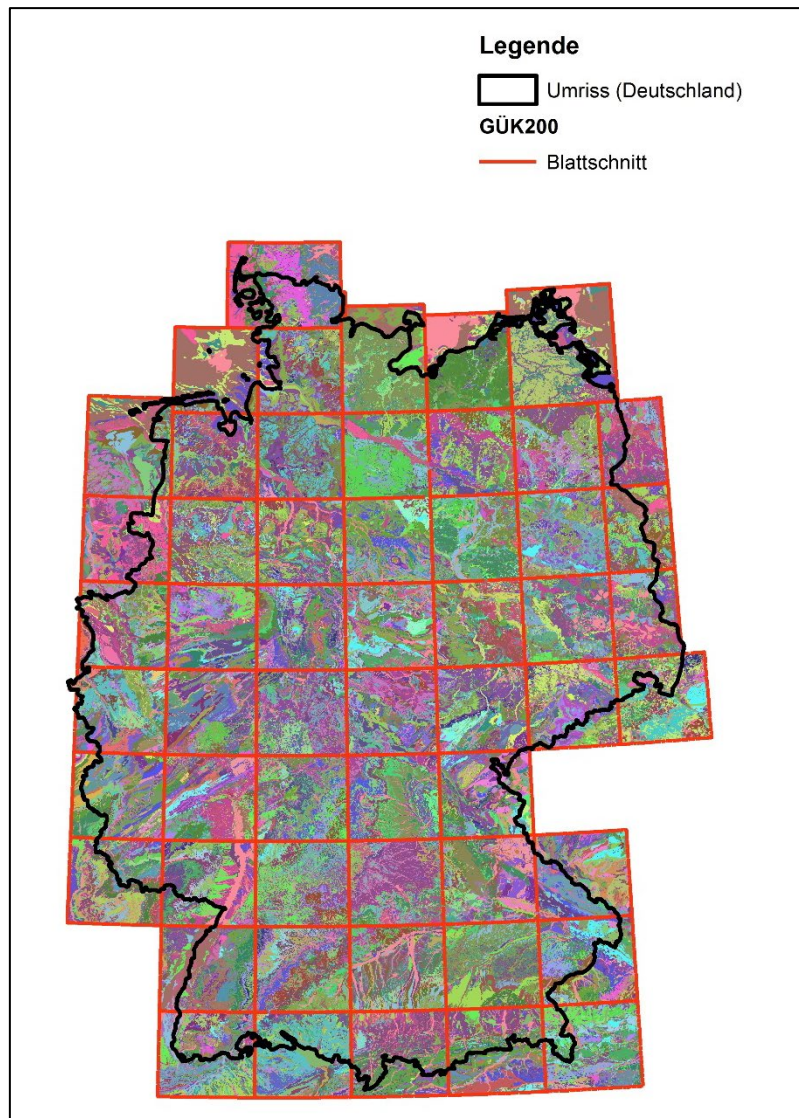


Abbildung 7: Überblick der GÜK200 von Deutschland mit Blattschnittgrenzen

Anschließend erfolgte die Prüfung auf mehrfach auftretende Einträge in der Legendenummer bzw. dem Kürzel. Da sich solche geologischen Einheiten lediglich in ihrer Lage unterschieden, aber gleiche Eigenschaften besitzen, konnten diese aufgrund dessen zusammengefasst werden. Diese Vorgehensweise war essentiell, um die Datenmenge zu reduzieren und eine sinnvolle Weiterverarbeitung zu ermöglichen. Die resultierenden Flächen wurden aus der Shapefile-Datei in eine Geodatabase-Datei überführt, welche nur noch 5.992 verschiedene Legendeneinträge enthält.

Die visuelle Begutachtung der Daten als auch eine GIS-gestützte Topologieprüfung der Daten ergab jedoch eine Vielzahl von geometrischen Fehlern in der GÜK200 (Abbildung 8).

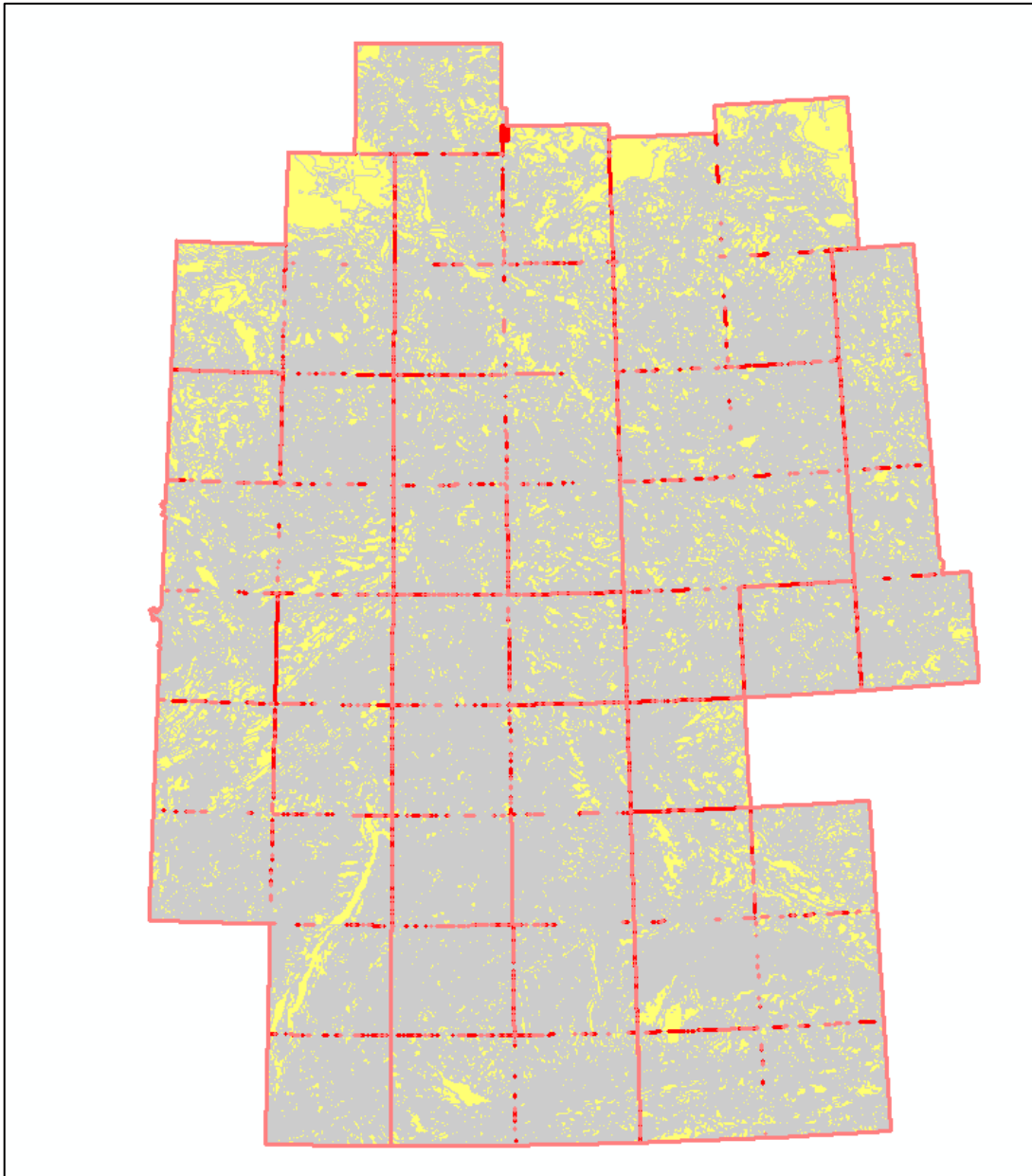


Abbildung 8: Überblick über Topologiefehler (Polygone in Gelb) in der deutschlandweit zusammengefassten GÜK200

Dabei ist zu unterscheiden zwischen Fehlern aufgrund von Überlappung („Overlap“) und Fehlern aufgrund von Lücken („Gap“) (siehe Abbildung 9).

Rule	Errors	Exceptions
Must Be Larger Than Cluster Tolerance	0	0
Must Not Have Gaps GÜK200_Polygone_ETRS	1082	0
Must Not Overlap GÜK200_Polygone_ETRS	4967	0
Total	6049	0

Abbildung 9: Anzahl der Topologiefehler „Gaps“ und „Overlap“ in der Shapefile-Datei der deutschlandweit zusammengefassten GÜK200

Da eine Vereinheitlichung und Überarbeitung der GÜK200 im Vektorformat aus Zeit- und Kostengründen im Projekt nicht möglich waren, wurden in der weiteren Bearbeitung nur noch aus den Vektordaten abgeleitete Rasterdaten verwendet.

Zur Verminderung der Datenmenge wurden die Vektordaten zudem mit Hilfe eines 1000-m-Puffers der Gleislage (siehe Abschnitt 3.3.1) verschnitten.

3.2.3 Digitales Landschaftsmodell DLM250

Das frei zugängliche Digitale Landschaftsmodell 1:250 000 (DLM250) wurde am 16.01.2017 von den Servern des Geodatenzentrums des Bundesamtes für Kartographie und Geodäsie (URL: http://www.geodatenzentrum.de/geodaten/gdz_rahmen.gdz_div?gdz_spr=deu&gdz_akt_zeile=5&gdz_anz_zeile=1&gdz_unt_zeile=1&gdz_user_id=0) bezogen.

Die Daten waren beim AN problemlos lesbar. Nach Sichtung der Daten musste jedoch festgestellt werden, dass die Daten leider unvollständig und stark generalisiert sind. Es gab Gebiete, die keine Polygone oder ähnliches aufwiesen und somit nicht zugeordnet werden konnten.

Daraufhin stellte der AG eine vollständige Version des Digitalen Landschaftsmodells 1:250.000 zur Verfügung, welche am 26.01.2017 erfolgreich heruntergeladen werden konnte.

Die Daten wurden erneut gesichtet und entsprachen beim zweiten Mal der erwünschten und benötigten Abdeckung über ganz Deutschland (siehe Abbildung 10), um die nachfolgenden Schritte der Klassifizierung durchzuführen.

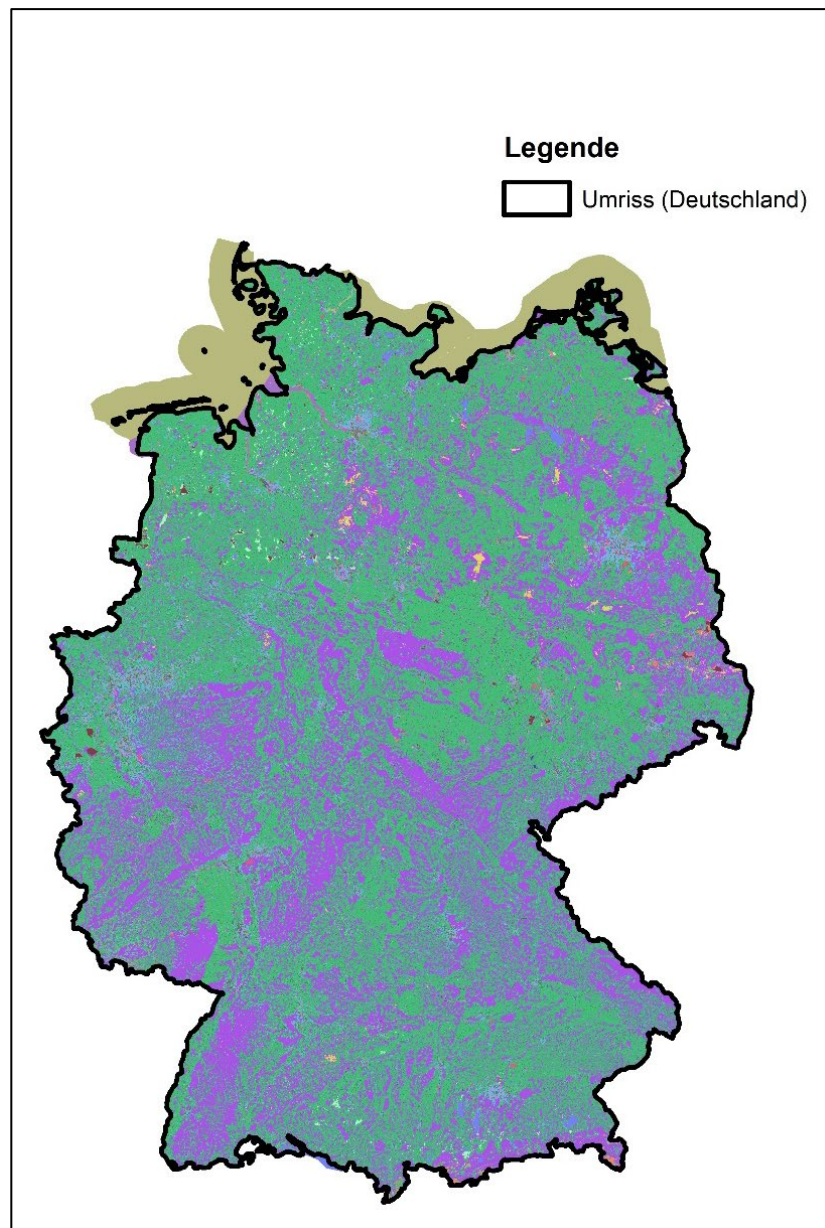


Abbildung 10: Überblick des DLM250 von Deutschland

Zunächst wurden die deutsche Staatsgrenze (siehe u.a. Abbildung 10) und die Landesgrenze des Freistaates Sachsen (siehe u.a. Abbildung 13) aus den DLM250-Daten exportiert und für die weitere Verwendung im Projekt als separate Polygon-Shapefile-Dateien abgelegt.

Zur Verminderung der Datenmenge wurden anschließend die Vektordaten des DLM250 mit Hilfe eines 1000-m-Puffers der Gleislage (siehe Abschnitt 3.3.1) verschnitten.

3.2.4 Digitales Geländemodell DGM10

Das digitale Geländemodell DGM10 mit einer Auflösung von 10 Metern wurde am 16.01.2017 über den Download-Server des EBA zur Verfügung gestellt und heruntergeladen. Die Originaldaten stammen vom Bundesamt für Geodäsie und Kartographie. Es handelte sich dabei um Textdateien mit XYZ-Koordinaten. Für die weitere Verwendung im Projekt hätten diese Daten zunächst zeitaufwendig in Rasterdaten umgerechnet werden müssen. Daher wurden die Daten vom AN erneut vom AG als fertige Rasterdaten angefragt. Per Datenlieferung vom 07.02.2017 konnten daraufhin die fertig gerechneten Rasterdaten des DGM10 und des DGM25 vom Downloadserver des EBA heruntergeladen werden.

Als Ausgangsdaten lagen 1027 Einzelkacheln (20 km x 20 km) des DGM10 vor, welche nach ihren jeweiligen Koordinaten der Eckpunkte benannt waren (Abbildung 11).

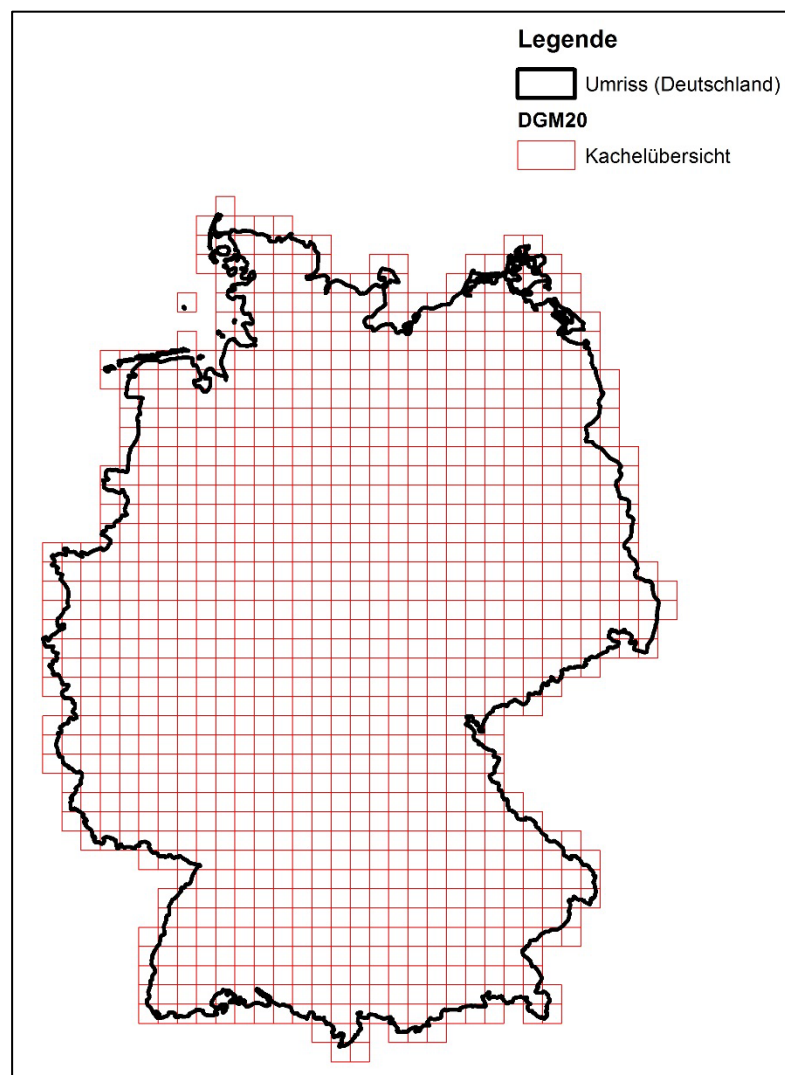


Abbildung 11: Überblick der verfügbaren Kacheln des DGM10 von Deutschland

3.2.5 Ereigniskataster

Es stand kein umfangreiches Kataster von dokumentierten Ereignissen von Massenbewegungen für die Bearbeitung des Projektes zur Verfügung. Durch den AG konnten lediglich zwei Datensätze zur Verfügung gestellt werden. Am 10.03.2017 stellte die DB Netz AG einen Datensatz als Excel-Tabelle mit insgesamt 247 Einträgen zur Verfügung. Nach Herausfilterung von Einträgen ohne Koordinaten bzw. mit unbekanntem Prozesstyp konnten insgesamt 231 Punktdaten ins GIS als Shapefile-Datei importiert werden.

Davon herausgefiltert wurden 38 nicht relevante Ereignisse: Böschungsbruch, Böschungsrutsch, Dammbruch, Fahrbahnabrutsch und Erdrutsch. Relevant für die weitere Bearbeitung im Rahmen des Projektes waren 193 Punkte mit den folgenden Ereignistypen (Abbildung 12):

- Sturzereignisse: Felssturz, Geröllabgang, Steinschlag,
- Rutschungsereignisse: Erdrutsch, Hangrutsch, Lawine, Murenabgang, Schlammlawine, Schlammrutsch, Schotterabgang.

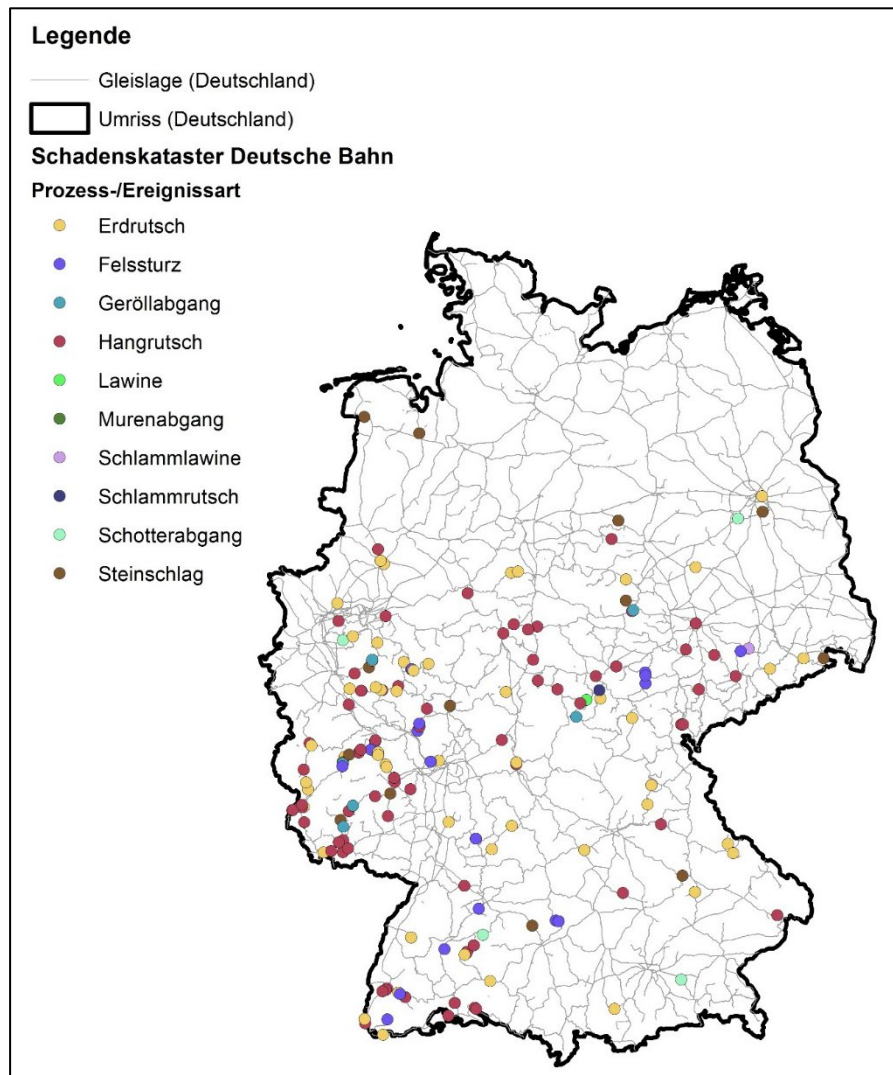


Abbildung 12: Überblick der relevanten Punkte aus dem Schadenskataster der DB Netz AG

Für eine deutschlandweite Prognosemodellierung war dieser Datensatz als nicht ausreichend einzustufen. Daher wurde entschieden, die Modellierung entsprechend dem 2. Ansatz, für welchen die Daten des Ereigniskatasters unmittelbar notwendige Eingangsdaten waren, nur in einem kleineren Modellierungsgebiet – in Sachsen – durchzuführen.

Diesbezüglich stellte das Sächsische Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie (LfULG) am 29.03.2017 einen Datensatz mit einem Auszug aus dem sächsischen Georisikokataster in einem 200-m-Puffer beidseitig um die Bahngleise zur Verfügung, welcher insgesamt 132 Punkte beinhaltete. Zusätzlich dazu konnten 11 Punkte aus dem Schadenskataster der DB Netz AG mit den Daten des LfULG für Sachsen zusammengefasst werden (Abbildung 13). Dazu wurden die Punkte in drei Hauptgruppen entsprechend des dokumentierten Prozesstyps klassifiziert: Sturz, Rutschung, unklar.

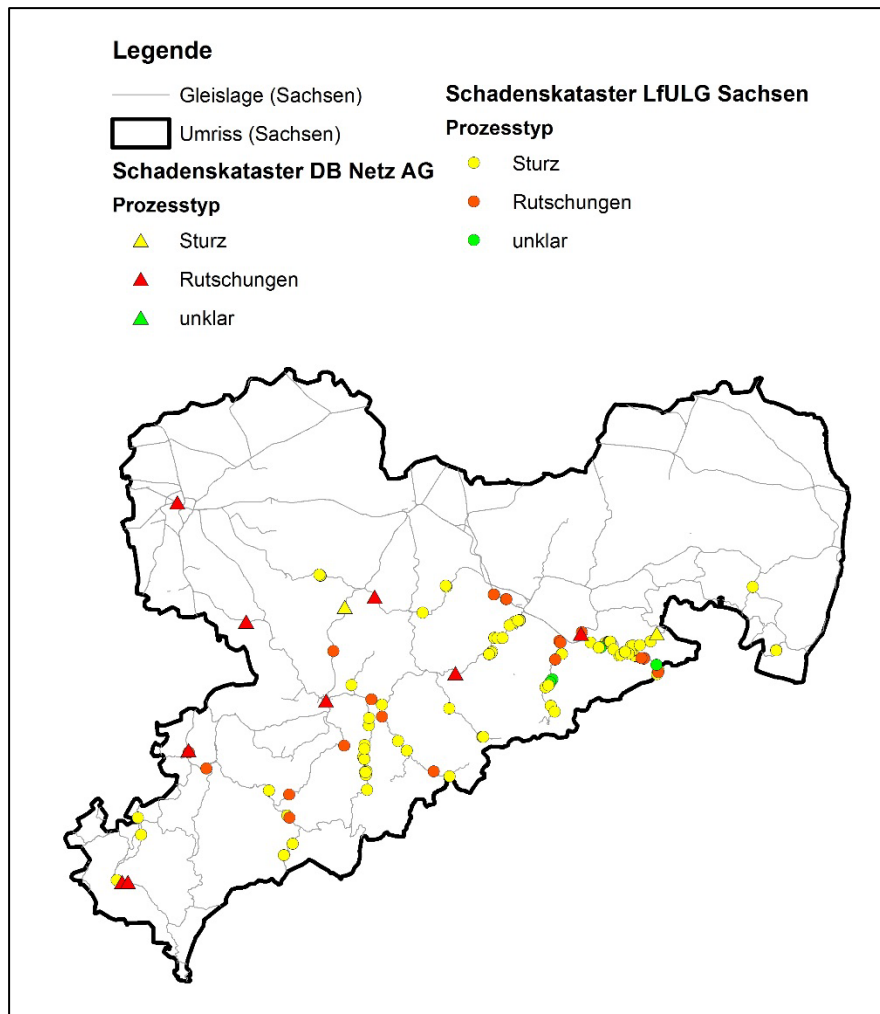


Abbildung 13: Überblick der relevanten Punkte für Sachsen aus dem Schadenskataster der DB Netz AG und des Sächsischen Landesamtes für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie und Lage der Detailkarte „Sächsische Schweiz/Elbsandsteingebirge“ (vgl. Abschnitt 3.2.2)

3.3 Datenvorbereitung

Wie zuvor erwähnt, wurden die übernommenen Ausgangsdaten zu einem deutschlandweiten Datensatz zusammengefügt und, wenn notwendig, in ein einheitliches Bezugssystem (ETRS89 UTM32N) umgerechnet.

Aus den Ausgangsdaten wurden die entsprechenden projektrelevanten Datensätze abgeleitet. Diese werden in den folgenden Abschnitten kurz erläutert.

3.3.1 Gleislage

Zur Verminderung der prinzipiellen Datenmenge bei der weiteren Bearbeitung und der Modellierung, insbesondere für die deutschlandweiten Rasterdaten, wurde in Abstimmung mit dem AG ein Puffer von 1000 m beidseitig der Gleise festlegt.

Aufgrund dessen wurde das vorhandene Gleisnetz im GIS gepuffert und dieser Gleispuffer zum Ausschneiden („Clip“) aller Raster- als auch Vektordaten verwendet. In der folgenden Abbildung 14 ist der erstellte Gleispuffer exemplarisch für das Modellgebiet in Sachsen dargestellt.

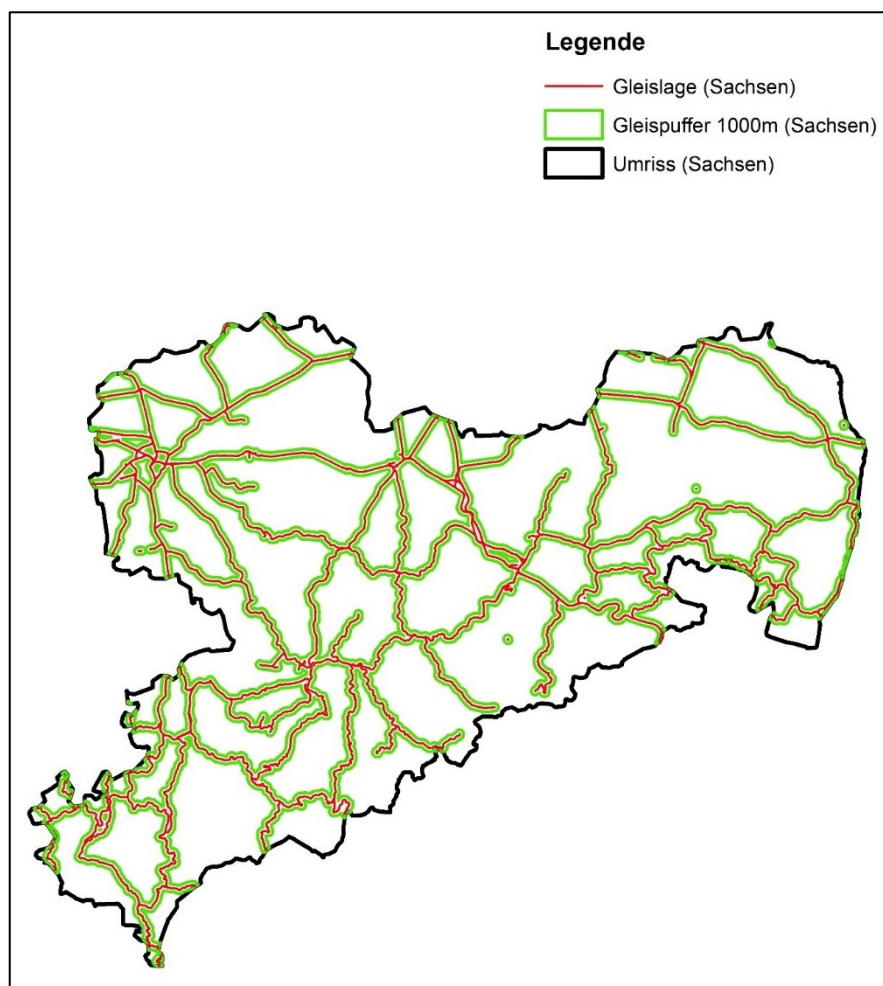


Abbildung 14: Überblick des Gleispuffers mit 1000 m beidseitig in Sachsen

3.3.2 Geologische Übersichtskarte GÜK200

Der prinzipielle Workflow zum Prozessieren und zur Klassifizierung der GÜK200-Daten und zur Erstellung der abgeleiteten Rasterdaten ist in Abbildung 15 dargestellt.

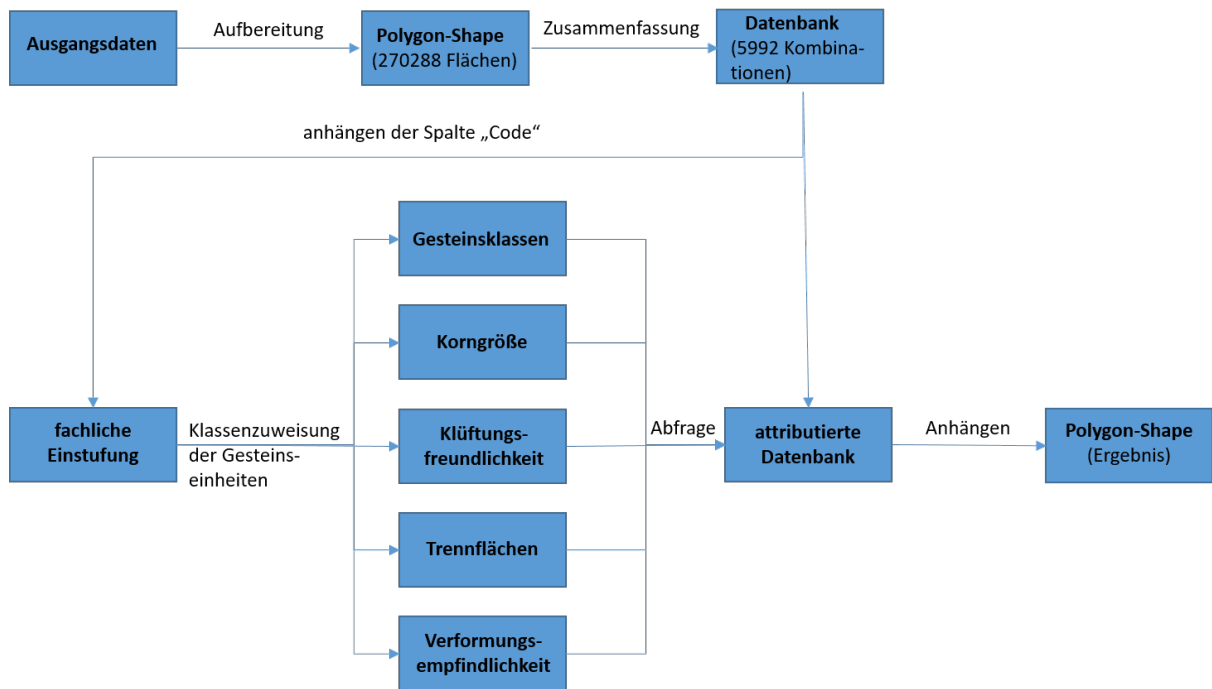


Abbildung 15: Workflow zum Prozessieren und zur Klassifizierung der GÜK200

Nach erfolgter Überführung der originalen Ausgangsdaten in eine Geodatabase-Datei mit 5.992 verschiedenen Einträgen erfolgte zunächst eine getrennte Klassifizierung der GÜK200 für ganz Deutschland. Dazu wurde den räumlichen Daten im GIS zunächst nur die Spalte „Code“ angehängt. Die Klassifizierung an sich erfolgte mit den Sachdaten in einer separaten Access-Datenbank, in welcher der „Code“ den jeweiligen zusätzlichen Attributfeldern zugeordnet wurde:

- Gesteinsklasse (Attributfeld „GK“):
 - Festgestein,
 - Lockergestein, bindig,
 - Lockergestein, gemischtkörnig,
 - Lockergestein, rollig,
 - Lockergestein, anthropogen,
 - geringmächtiges Lockergestein (bindig) über Festgestein,
 - geringmächtiges Lockergestein (gemischtkörnig) über Festgestein,
 - geringmächtiges Lockergestein (rollig) über Festgestein,
 - unbekannt,.
- Verformungsempfindlichkeit (Attributfeld „VE“) für Lockergesteine:
 - mäßig verformungsempfindlich,
 - ausgeprägt verformungsempfindlich,
 - unbekannt/unbestimmt,

- Korngröße (Attributfeld „KG“) für Lockergesteine:
 - fein,
 - mittel,
 - grob,
 - gemischt,
 - unbekannt,
- Klüftungsfreundlichkeit (Attributfeld „KL“) für Festgesteine:
 - nicht bzw. wenig klüftungsfreundlich,
 - klüftungsfreundlich,
 - unbekannt,
- Trennflächen (Attributfeld „TF“) für Festgesteine:
 - ohne Trennflächen,
 - mit Trennfläche (Schieferung, Schichtung...),
 - unbekannt.

Die Klassifizierung der GÜK200 nach zuvor genannten Parametern erfolgte beim AN durch einen erfahrenen Geologen. Grundlage für die Klassifizierung entsprechend Tabelle 1 bis Tabelle 5 war dabei vor allem die lithologische Beschreibung der Gesteinshorizonte im Attributfeld „LITH“ der GÜK200. Dabei sind in der Tabelle 2, Tabelle 4 und Tabelle 5 bereits die Modifikatoren für die Berechnung des Gefährdungspotenzials nach dem 1. Ansatz ausgehalten (siehe auch Abschnitt 3.4.2). Dementsprechend konnten anschließend an die Klassifikation nach Verformungsempfindlichkeit (Tabelle 2), Klüftungsfreundlichkeit (Tabelle 4) und Trennflächen (Tabelle 5) drei Rasterdateien erzeugt werden, welche mit „-1“ (Gefährdungsmindernd), „0“ (Gefährdungsneutral) und „+1“ (Gefährdungsstärkend) als Rasterwert belegt wurden.

Tabelle1: Klassifikationsschema der GÜK200 auf Grundlage der Gesteinsklasse

Attribut	Beschreibung
GK	Gesteinsklasse
1	Festgestein
2	Lockergestein, bindig
3	Lockergestein, gemischtkörnig
4	Lockergestein, rollig
5	Lockergestein, anthropogen
6	geringmächtiges Lockergestein (bindig) über Festgestein
7	geringmächtiges Lockergestein (gemischtkörnig) über Festgestein
8	geringmächtiges Lockergestein (rollig) über Festgestein
0	Unbekannt

Tabelle 2: Klassifikationsschema der GÜK200 auf Grundlage der Verformungsempfindlichkeit und verwendete Modifikatoren für die Berechnung der Gefährdungspotenziale nach Ansatz 1

Attribut	Beschreibung	Modifikator
VE	Verformungsempfindlichkeit (VE) - Lockergestein	
1	mäßig verformungsempfindlich	-1
2	ausgeprägt verformungsempfindlich	+1
0	unbekannt/unbestimmt	0

Tabelle 3: Klassifikationsschema der GÜK200 auf Grundlage der Korngröße

Attribut	Beschreibung
KG	Korngröße (KG) – Lockergestein
1	Fein

Attribut	Beschreibung
2	mittel
3	grob
4	gemischt
0	unbekannt

Tabelle 4: Klassifikationsschema der GÜK200 auf Grundlage der Klüftungsfreundlichkeit und verwendete Modifikatoren für die Berechnung der Gefährdungspotentiale nach Ansatz 1

Attribut	Beschreibung	Modifikator
KL	Klüftungsfreundlichkeit (KL) - Festgestein	
1	nicht bzw. wenig klüftungsfreundlich	-1
2	klüftungsfreundlich	+1
0	unbekannt	0

Tabelle 5: Klassifikationsschema der GÜK200 auf Grundlage des Vorhandenseins von Trennflächen und verwendete Modifikatoren für die Berechnung der Gefährdungspotentiale nach Ansatz 1

Attribut	Beschreibung	Modifikator
TF	Trennflächen (TF) - Festgestein	
1	ohne Trennflächen	-1
2	mit Trennfläche (Schieferung, Schichtung...)	+1
0	unbekannt	0

Über eine Abfrage wurden diese Attributierungen über das Feld „Code“ aus der Sachdatenbank im MS Access an die räumlichen Daten in der Geodatabase-Datei angehängen. Anschließend konnten mit diesen Attributen durch Vektor-Raster-Konvertierung 5 verschiedene Rasterdateien erstellt werden, welche als Rasterwert nur noch den oben aufgeführten Klassenwert als Integer-Wert besitzen. Dies ist beispielhaft in der folgenden Abbildung 16 bis Abbildung 19 schematisch für das Teilgebiet Sachsen dargestellt.

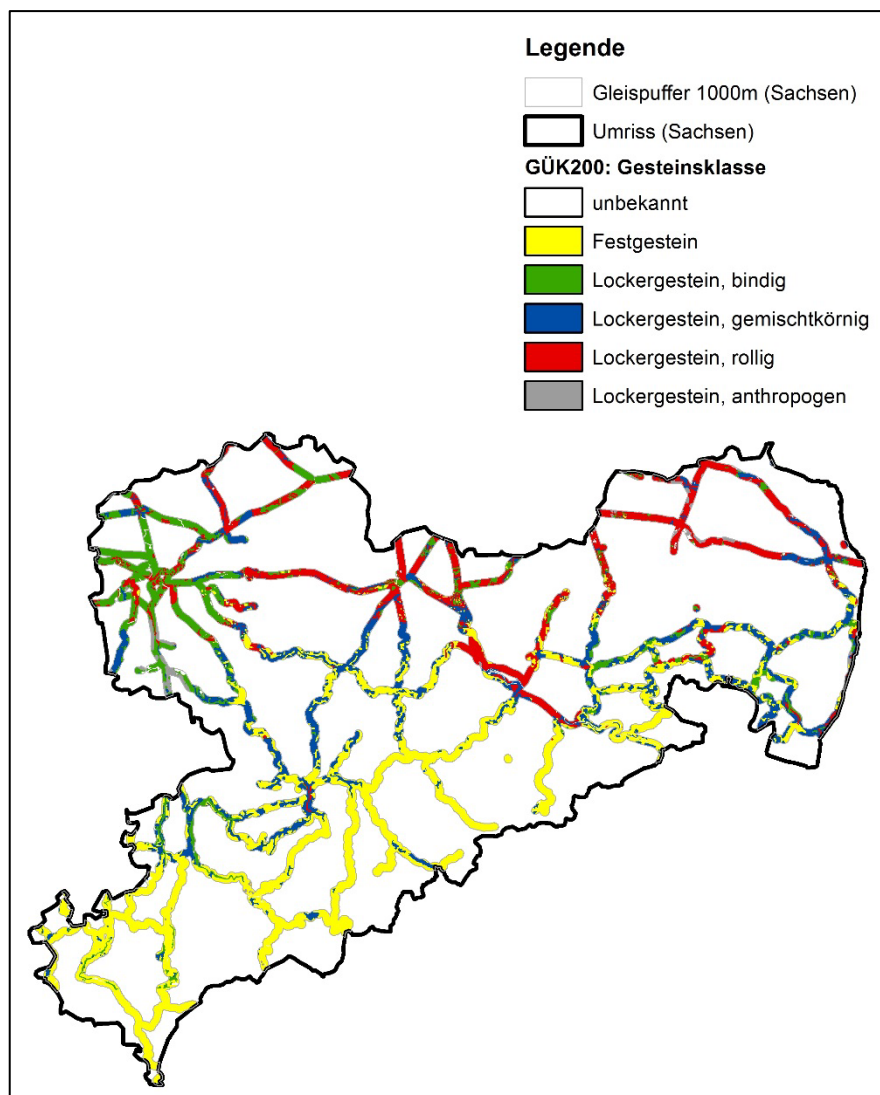


Abbildung 16: Abgeleitete Darstellung der Gesteinsklasse aus der GÜK200 für Sachsen im 1000-m-Pufferbereich um die Bahngleise

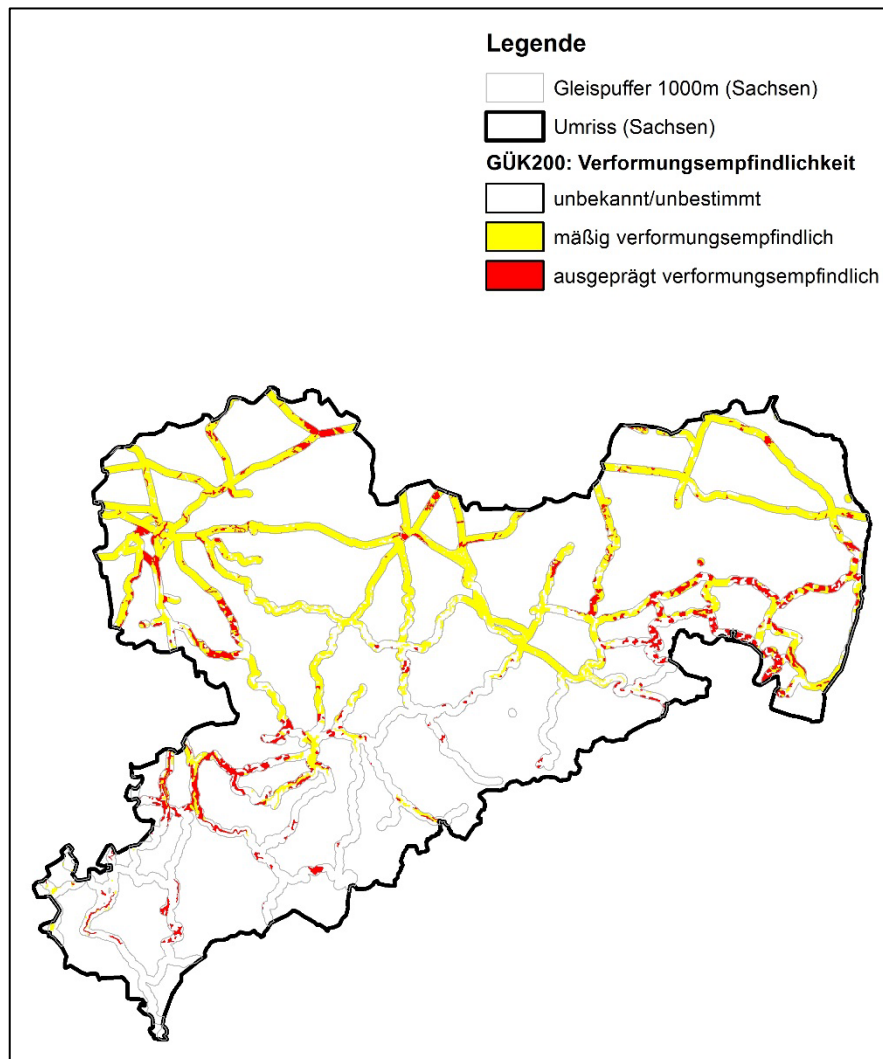


Abbildung 17: Abgeleitete Darstellung der Verformungsempfindlichkeit aus der GÜK200 für Sachsen im 1000-m-Pufferbereich um die Bahngleise

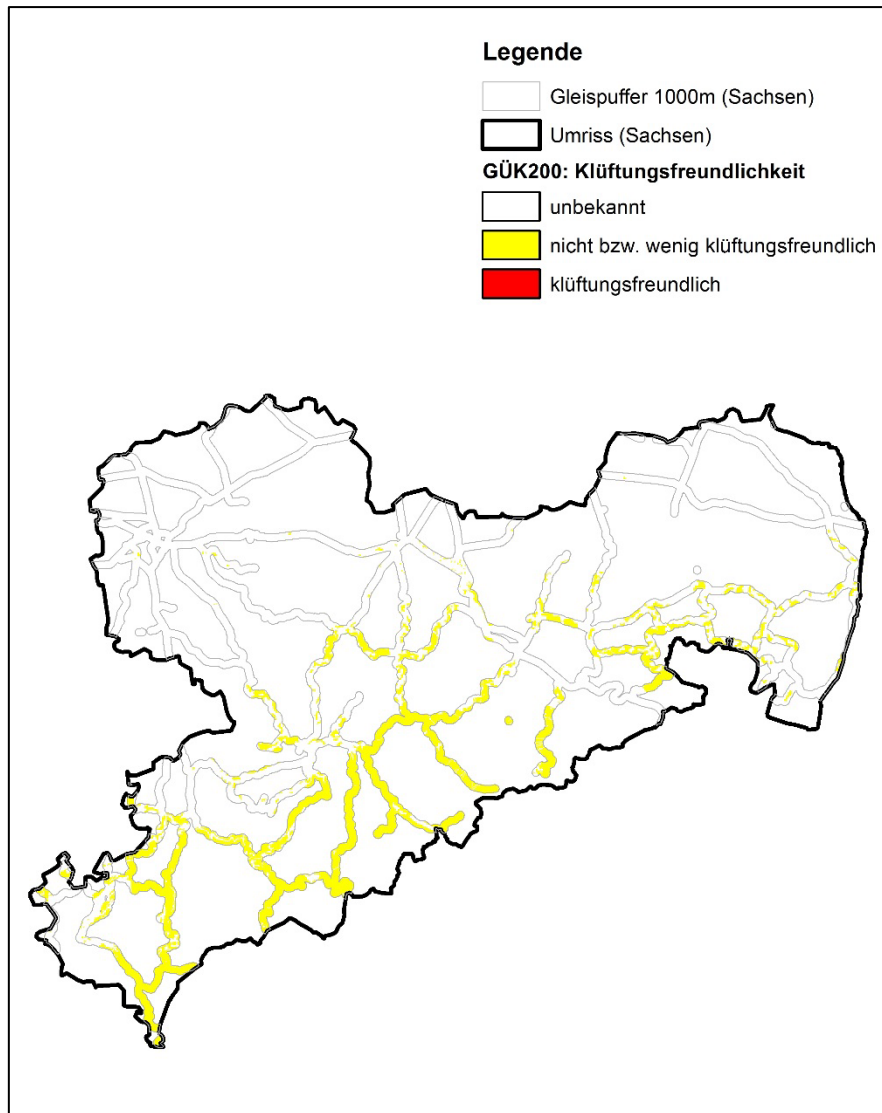


Abbildung 18: Abgeleitete Darstellung der Klüftungsfreundlichkeit aus der GÜK200 für Sachsen im 1000-m-Pufferbereich um die Bahngleise

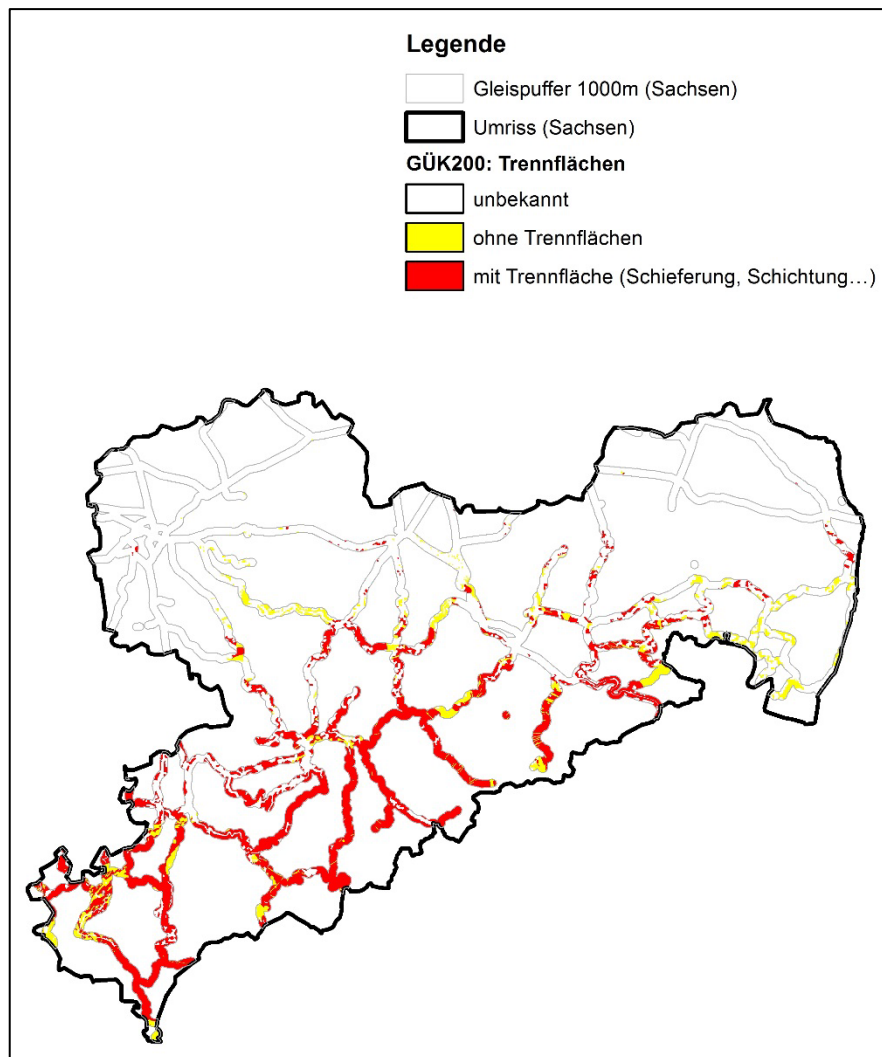


Abbildung 19: Abgeleitete Darstellung der Trennflächen im Festgestein aus der GÜK200 für Sachsen im 1000-m-Pufferbereich um die Bahngleise

Als Beispiel für die Daten an sich sind in der folgenden Abbildung 20 noch einmal die Gesteinsklassen der GÜK200 für ein kleineres Teilgebiet in Sachsen im Bereich der Sächsischen Schweiz/des Elbsandsteingebirges (räumliche Abgrenzung entsprechend Abbildung 13) dargestellt.

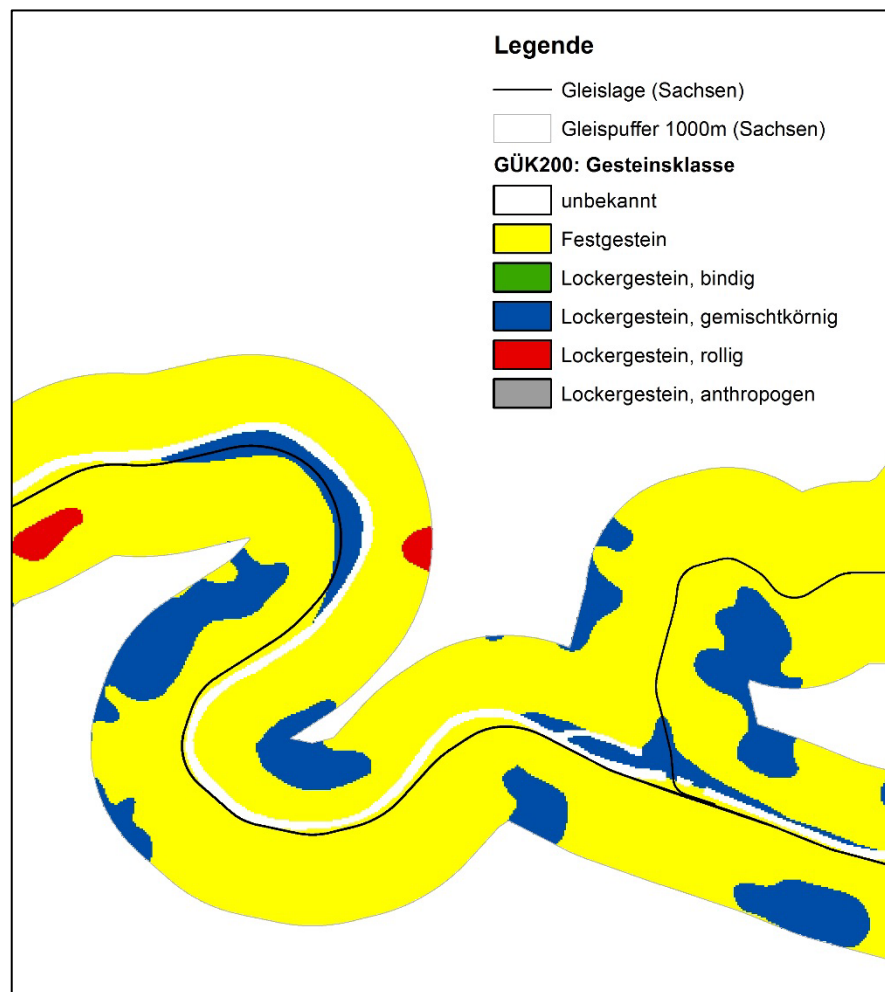


Abbildung 20: Abgeleitete Darstellung der Gesteinsklassen aus der GÜK200 für den Teilbereich der Sächsischen Schweiz/Elbsandsteingebirge in Sachsen im 1000-m-Pufferbereich um die Bahngleise

3.3.3 Digitales Landschaftsmodell DLM250

Nach Überführung der Ausgangsdaten in eine Geodatabase-Datei erfolgte eine Klassifizierung der Landnutzung in Prozent nach:

- Versiegelungsgrad,
- Bewuchs.

Die Einstufung in Prozent wurde durch einen erfahrenen Hydrogeologen beim AN durchgeführt, vor allem basierend auf analogen Klassifizierungen bei der Berechnung von Grundwasserneubildungsraten bzw. Verdunstung auf Grundlage der beschriebenen Vegetation.

Die Klassifizierung erfolgte auf Grundlage der Attributfelder „OBJART“, „VEG“ und „FKT“, wie der nachfolgenden Tabelle 1 zu entnehmen ist. An die Polygon-Feature-Datei wurden daraufhin die beiden Felder „Versieg“ und „Bewuchs“ angehängt und über einen „Join“ mit der Tabelle aus MS Access die Prozentgrade der Versiegelung und des Bewuchses in die Attributtabelle übertragen.

Tabelle 6: Klassifikationsschema des DLM250 und verwendete Modifikatoren für die Berechnung der Gefährdungspotenziale nach Ansatz 1

Thema	OBJART	OBJART_TXT	VEG		FKT		Versiegelungsgrad	Bewuchs	Modifikator
Vegetation	43001	AX_Landwirtschaft					0	80	0
			1010	Ackerland			0	80	0
			1011	Streuobstacker			5	30	0
			1012	Hopfen			5	30	0
			1020	Grünland			0	100	0
			1021	Streuobstwiese			0	100	0
			1030	Gartenland			5	80	0
			1031	Baumschule			10	50	0
			1040	Weingarten			5	90	0
			1050	Obstplantage			10	90	0
			43002	AX_Wald					0

Thema	OBJART	OBJART_TXT	VEG		FKT		Versie- gelungs- grad	Bewuchs	Modifika- tor
	43003	AX_Gehoelz					0	100	-1
	43004	AX_Heide					0	80	0
	43005	AX_Moor					0	60	+1
	43006	AX_Sumpf					0	60	+1
	43007	AX_UnlandVegetationsloseFlaeche					70	10	+1
1000					Vegetationslose Fläche	0	0	+1	
1100					Gewässerbegleitfläche	5	25	+1	
1200					Sukzessionsfläche	0	50	+1	
1300					Naturnahe Fläche	0	80	+1	
	43008	AX_FlaecheZurZeitUnbestimmbar					0	0	0
Verkehr	42001	AX_Strassenverkehr					100	5	-1
	42009	AX_Platz					90	5	-1
	42010	AX_Bahnverkehr					20	10	-1
	42015	AX_Flugverkehr					50	50	-1

Thema	OBJART	OBJART_TXT	VEG		FKT		Versie- gelungs- grad	Bewuchs	Modifika- tor
	42016	AX_Schiffsverkehr					0	0	-1
Siedlung	41001	AX_Wohnbaufläche					50	50	-1
	41002	AX_IndustrieUndGewerbeflaeche					60	40	-1
	41003	AX_Halde					0	70	+1
	41004	AX_Bergbaubetrieb					10	10	+1
	41005	AX_TagebauGrubeSteinbruch					10	20	+1
	41006	AX_FlaecheGemischterNutzung					30	20	-1
	41007	AX_FlaecheBesondererFunktionaler- Praegung					30	20	-1
	41008	AX_SportFreizeitErholungsflaeche					15	70	-1
	41009	AX_Friedhof					40	60	-1
Gewässer	44001	AX_Fliessgewaesser					0	0	+1
	44005	AX_Hafenbecken					0	0	+1
	44006	AX_Stehendes Gewaesser					0	0	+1
	44007	AX_Meer					0	0	+1

Anschließend konnten mit diesen Attributen durch Vektor-Raster-Konvertierung 2 verschiedene Rasterdateien erstellt werden, welche als Rasterwert nur noch den zuvor aufgeführten Wert des Versiegelungsgrades bzw. des Bewuchsgrades aufweisen. Dies ist beispielhaft in der folgenden Abbildung 21 und Abbildung 22 für das Teilgebiet Sachsen dargestellt.

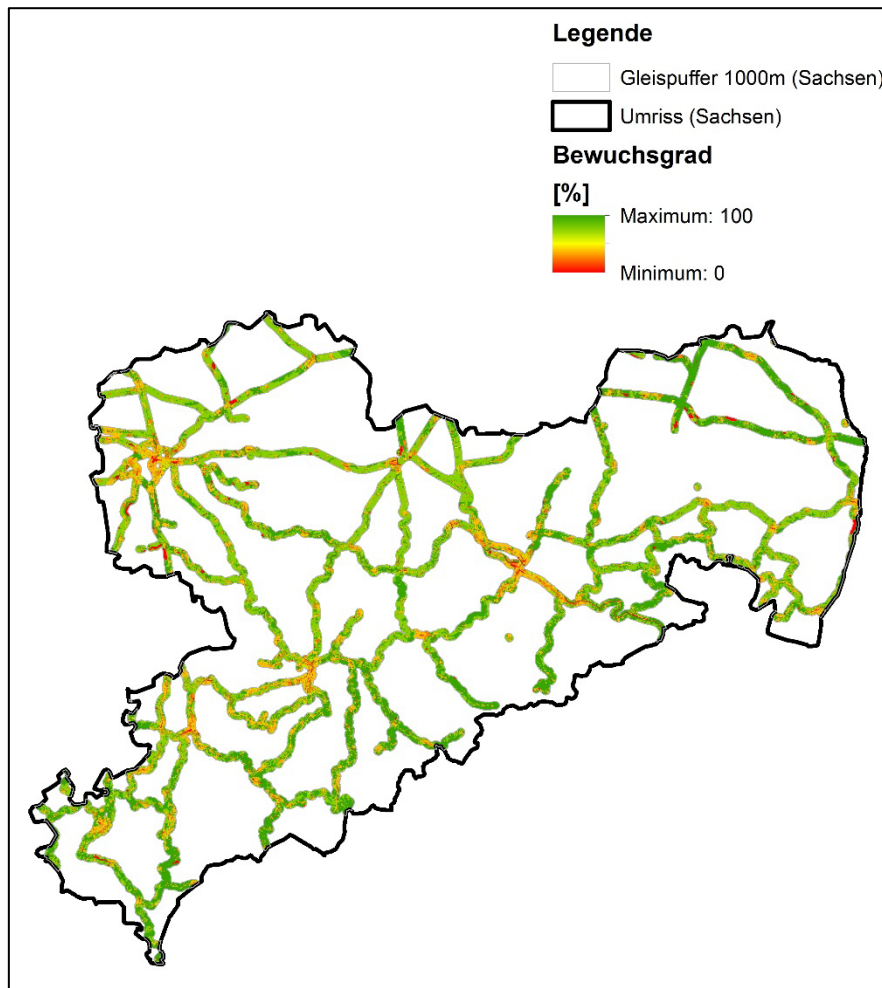


Abbildung 21: Abgeleitete Darstellung des Bewuchsgrades in Prozent aus dem DLM250 für Sachsen im 1000-m-Pufferbereich um die Bahngleise

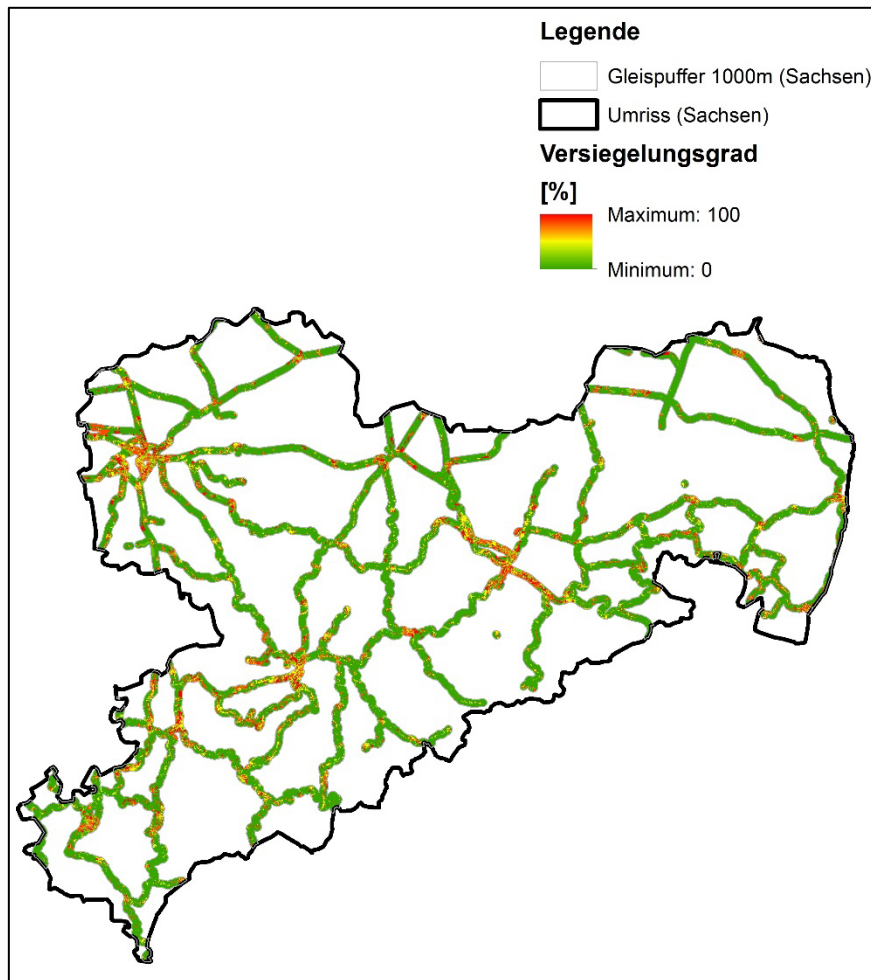


Abbildung 22: Abgeleitete Darstellung des Versiegelungsgrades in Prozent aus dem DLM250 für Sachsen im 1000-m-Pufferbereich um die Bahngleise

Als Beispiel für die Daten an sich sind in der folgenden Abbildung 23 und Abbildung 24 noch einmal der Bewuchsgrad und der Versiegelungsgrad für ein kleineres Teilgebiet in Sachsen im Bereich der Sächsischen Schweiz/des Elbsandsteingebirges dargestellt.



Abbildung 23: Abgeleitete Darstellung des Bewuchsgrades in Prozent aus dem DLM250 für den Teilbereich der Sächsischen Schweiz/Elbsandsteingebirge in Sachsen im 1000-m-Pufferbereich um die Bahngleise

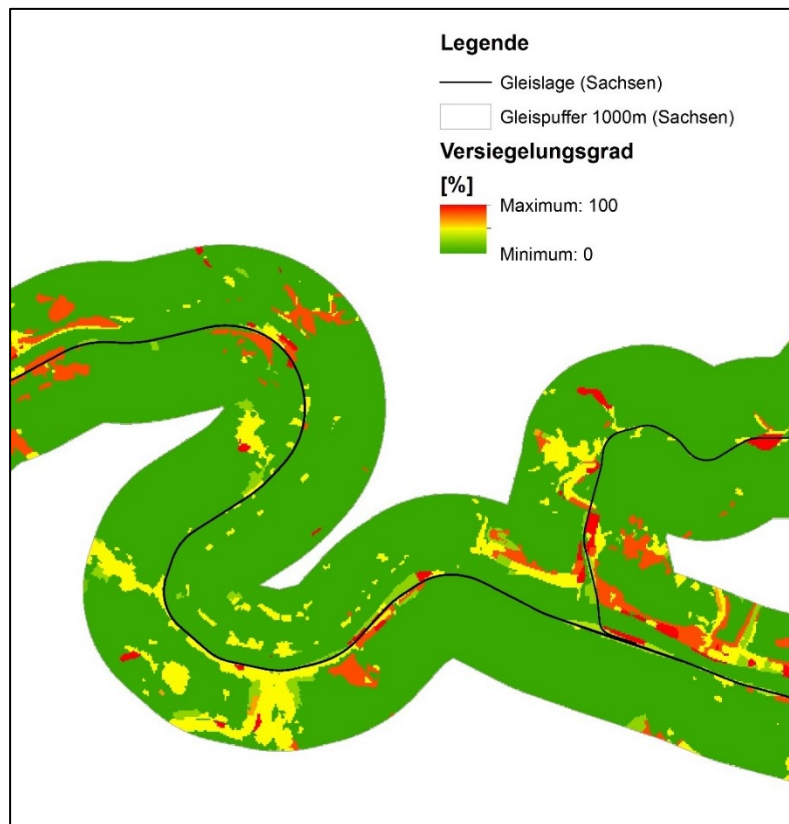


Abbildung 24: Abgeleitete Darstellung des Versiegelungsgrades in Prozent aus dem DLM250 für den Teilbereich der Sächsischen Schweiz/Elbsandsteingebirge in Sachsen im 1000-m-Pufferbereich um die Bahngleise

Für die Berechnung des Gefährdungspotenzials nach Ansatz 1 wurde zudem eine Vereinfachung der Klassifikation nach Versiegelungsgrad und Bewuchsgrad vorgenommen. Dazu wurde auf Grundlage der beiden Felder ein Modifikator festgelegt, welcher entsprechend Tabelle 6 mit „-1“ (Gefährdungsmin-dernd), „0“ (Gefährdungsneutral) und „+1“ (Gefährdungsstärkend) in einer separaten Rasterdatei abge-legt wurde (Abbildung 25).

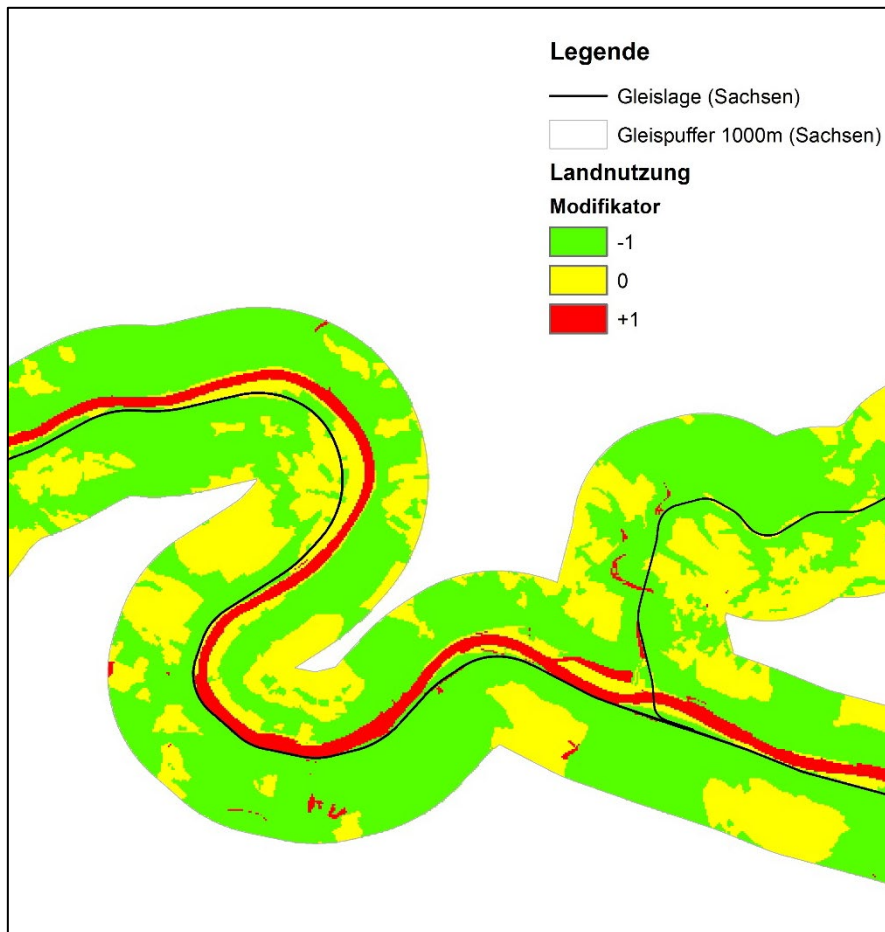


Abbildung 25: Abgeleitete Darstellung der Modifikatoren für die Landnutzung zur Verwendung im Ansatz 1, basierend auf dem DLM250 für den Teilbereich der Sächsischen Schweiz / Elbsandsteingebirge in Sachsen im Pufferbereich um die Bahngleise

3.3.4 Digitales Geländemodell DGM10

Der prinzipielle Workflow zum Prozessieren der DGM10-Daten und zur Erstellung der abgeleiteten Rasterdaten ist in Abbildung 26 dargestellt.

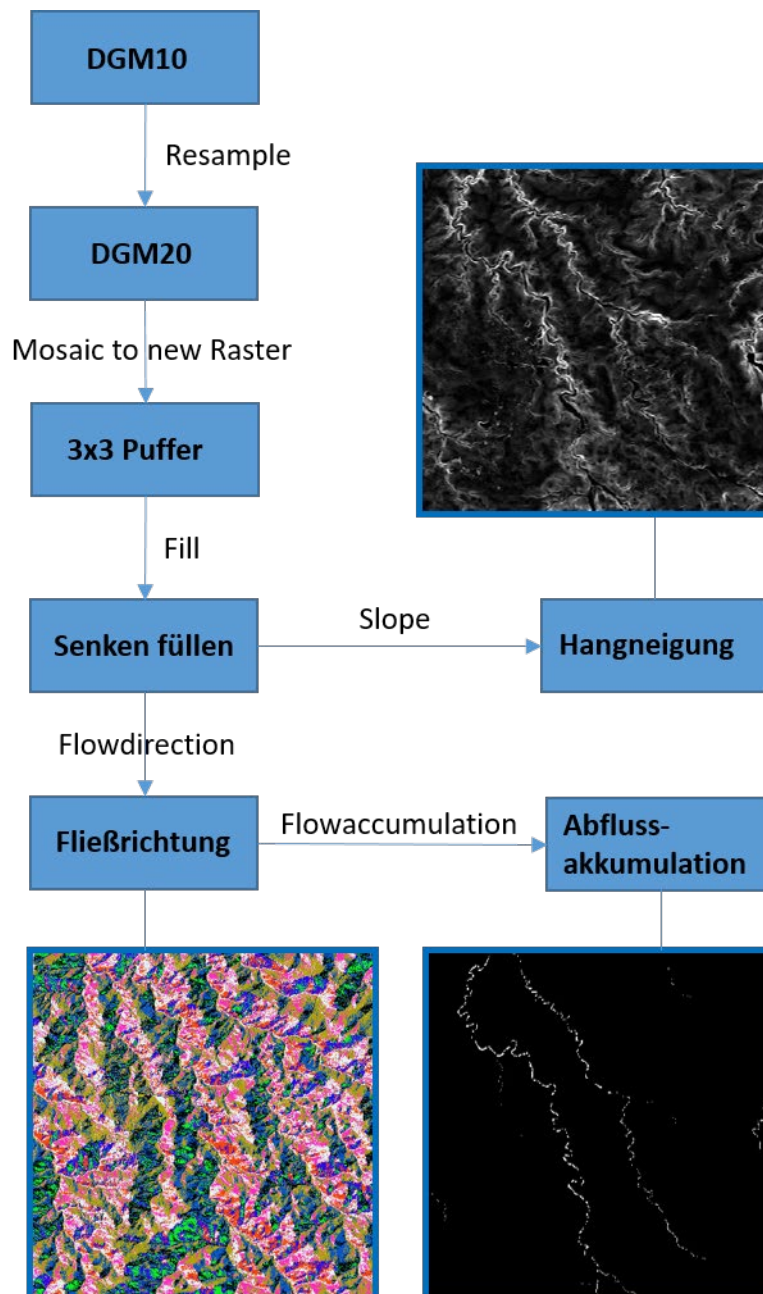


Abbildung 26: Workflow Prozessieren des DGM

Die DGM10-Raster wurden mit Hilfe des Tools „Resample“ in die zur Bearbeitung erforderlichen DGM20-Raster umgewandelt.

Um Randeffekte bei der Berechnung der Ableitungen zu vermeiden, insbesondere bei der Berechnung der Fließakkumulation, erfolgte die weitere Bearbeitung mit einem Puffer von 3x3-Kacheln um die jeweilige zu berechnende Kachel herum. Dies erfolgte jeweils mit dem Befehl „Mosaic to New Raster“.

Um ein korrektes Ergebnis zu erzielen, mussten kleinere Senken aus dem digitalen Geländemodell herausgerechnet werden, wozu das Tool „Fill“ genutzt wurde.

Aus diesem Geländemodell erfolgte die Berechnung der Ableitungen, wie Hangneigung („Slope“), Fließrichtung („Flowdirection“) und Abflussakkumulation („Flowaccumulation“).

Abschließend wurden die gepufferten Kacheln mit Hilfe des Tools „Clip“ auf ihre Ausgangsgröße von 20 km x 20 km und auf die erforderliche Größe für die weiteren Bearbeitungen auf den 1000-m-Puffer um die Gleislage beschnitten. Dies ist beispielhaft in der Abbildung 27 für das Teilgebiet von Sachsen dargestellt.

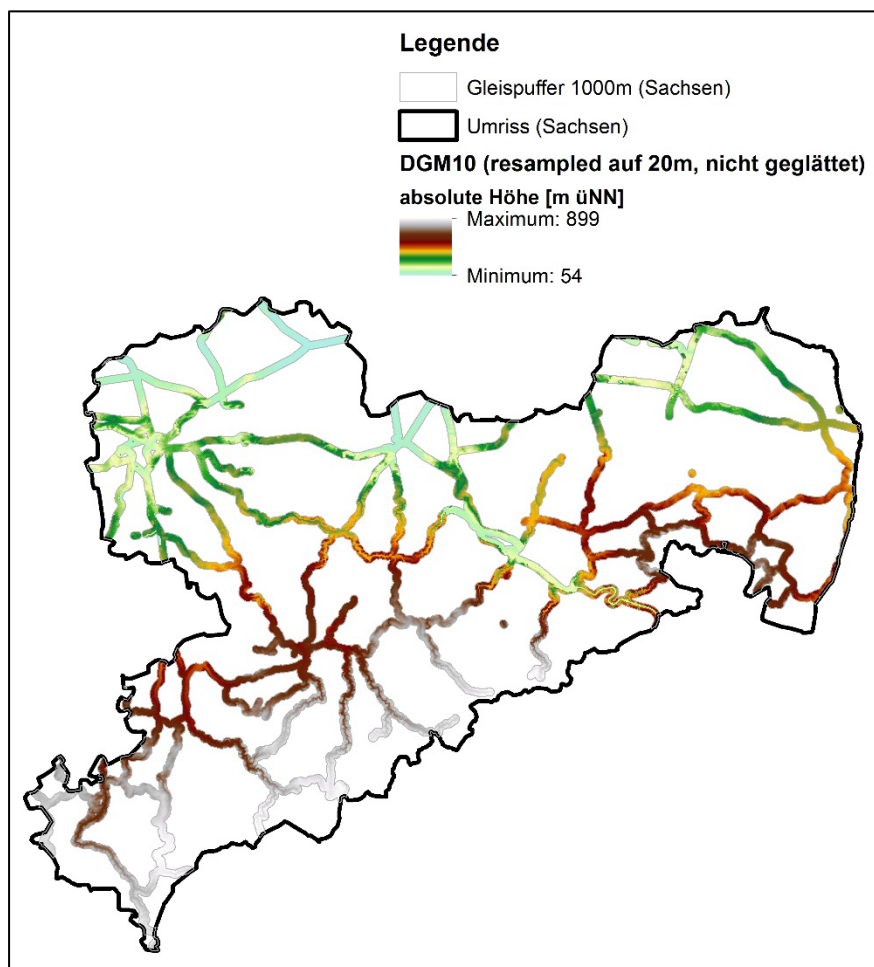


Abbildung 27: Abgeleitete Darstellung der absoluten Höhe aus dem ungeglätteten DGM10 für Sachsen im 1000-m-Pufferbereich um die Bahngleise

Der 1000-m-Puffer, beidseitig um die Gleise, wird als maximale Distanz für entscheidende Ereignisse von Hangrutschungen sowie Steinschläge angesehen. Ein weiterer Vorteil der Anwendung der Pufferung ist die Minimierung der resultierenden Datenmengen im GIS für die weiteren Berechnungsschritte.

Der Verschnitt der 1027 Kacheln des DGM erfolgte automatisiert über Skripte und ein Prozessierungsmodell im ArcGIS „Model Builder“ (siehe Abbildung 28).

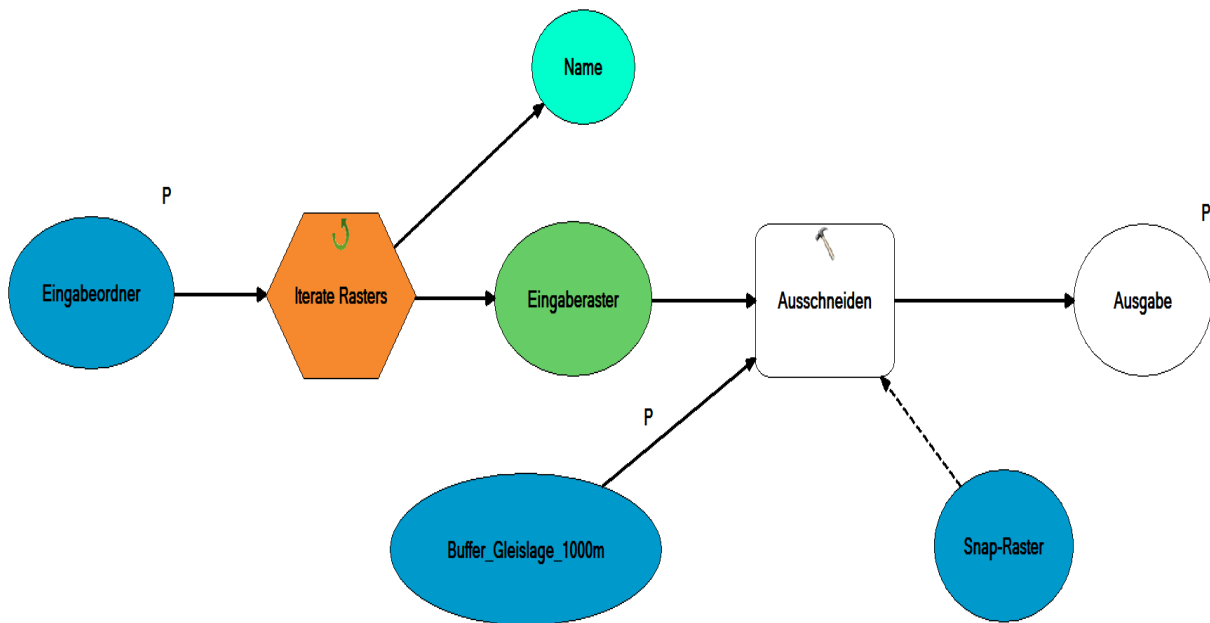


Abbildung 28: Modell zum Ausschneiden der Raster auf den 1000 m-Gleispuffer

Für das Modellgebiet Sachsen und den 2. Ansatz zur Berechnung des Gefährdungspotenzials mittels künstlicher neuronaler Netze wurde zudem die Ableitung der Wölbung aus dem digitalen Geländemodell verwendet. Bei unmittelbarer Verwendung der aus dem DGM10 berechneten DGM20 und anschließend der Berechnung der Wölbung sind jedoch die Artefakte aus der Interpolation der Originalraster zu erkennen. Daher wurde das DGM20 für den 2. Ansatz zusätzlich zum verwendeten DGM20 bei 1. Ansatz noch einmal geglättet. Dazu wurden zweimalig „Focal Statistics“ mit einem radialen Filter von 6 Pixeln über die Raster laufen gelassen.

In der folgenden Abbildung 29 und Abbildung 30 sind zur Veranschaulichung der Glättung jeweils das ungeglättete DGM20 und das geglättete DGM20 für das Teilgebiet der Sächsischen Schweiz/Elbsandsteingebirge im Südosten von Sachsen dargestellt.

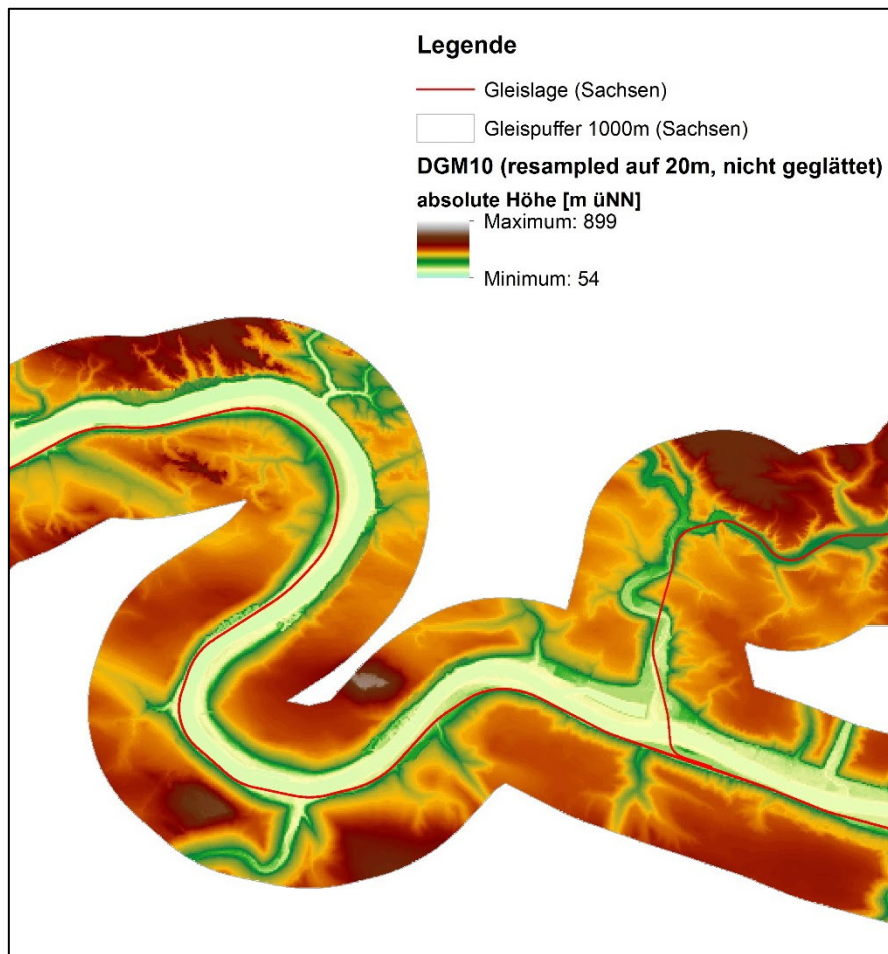


Abbildung 29: Abgeleitete Darstellung der absoluten Höhe aus dem ungeglätteten DGM20 für den Teilbereich der Sächsischen Schweiz/Elbsandsteingebirge in Sachsen im 1000-m-Pufferbereich um die Bahngleise

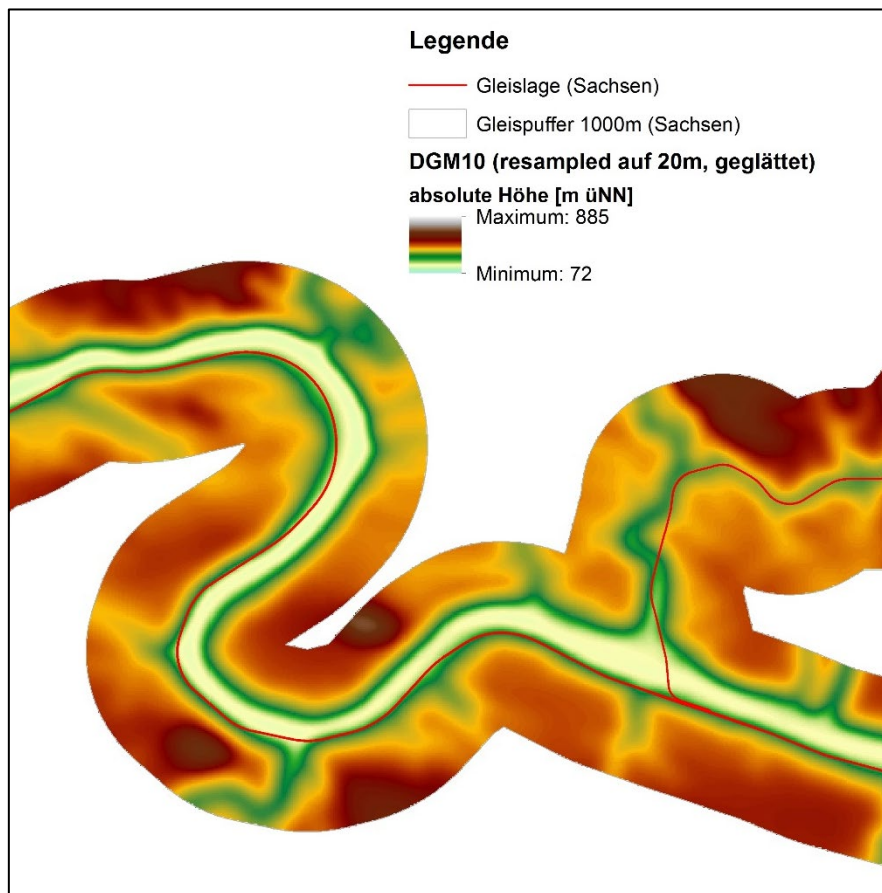


Abbildung 30: Abgeleitete Darstellung der absoluten Höhe aus dem geglätteten DGM20 für den Teilbereich der Sächsischen Schweiz/Elbsandsteingebirge in Sachsen im 1000-m-Pufferbereich um die Bahngleise

Zusätzlich dazu sind in der folgenden Abbildung 31 und Abbildung 32 die Hangneigung auf Grundlage des uneglätteten und des geglätteten DGM20 für das Teilgebiet der Sächsischen Schweiz/Elbsandsteingebirge im Südosten von Sachsen dargestellt. Dabei wird deutlicher, wie die Glättung zu einer Verringerung der Rauigkeit der Oberflächendaten geführt hat.

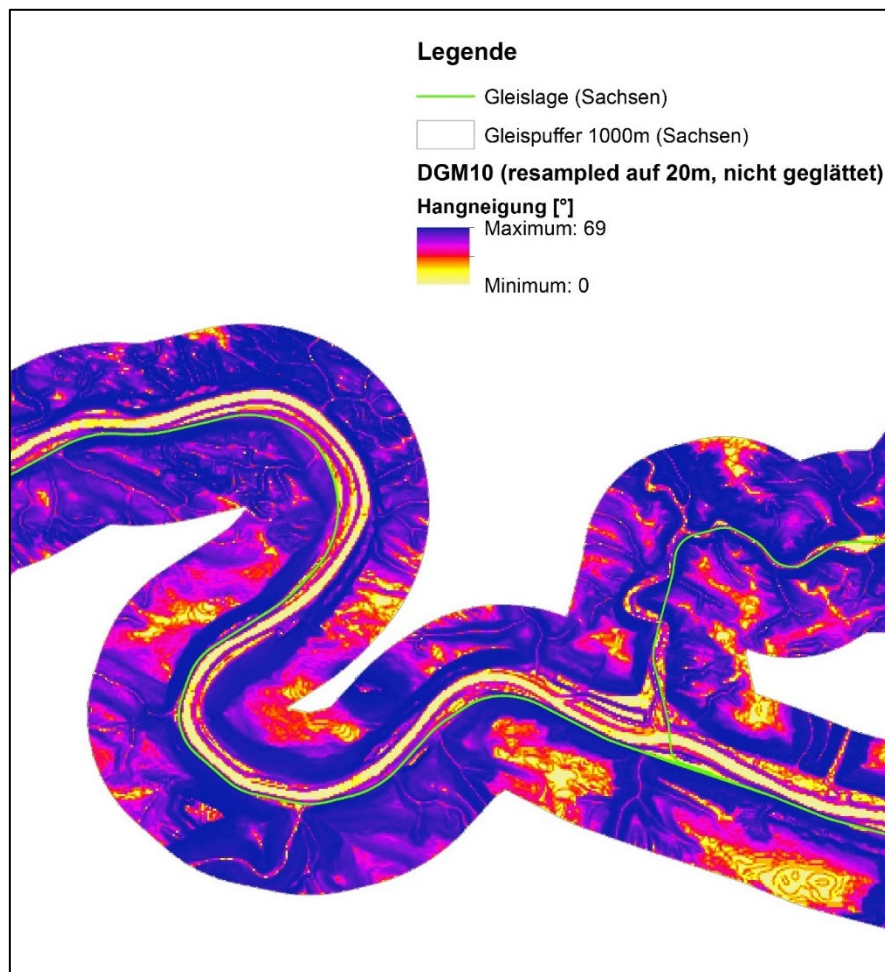


Abbildung 31: Abgeleitete Darstellung der Hangneigung aus dem ungeglätteten DGM20 für den Teilbereich der Sächsischen Schweiz/Elbsandsteingebirge in Sachsen im 1000-m-Pufferbereich um die Bahngleise

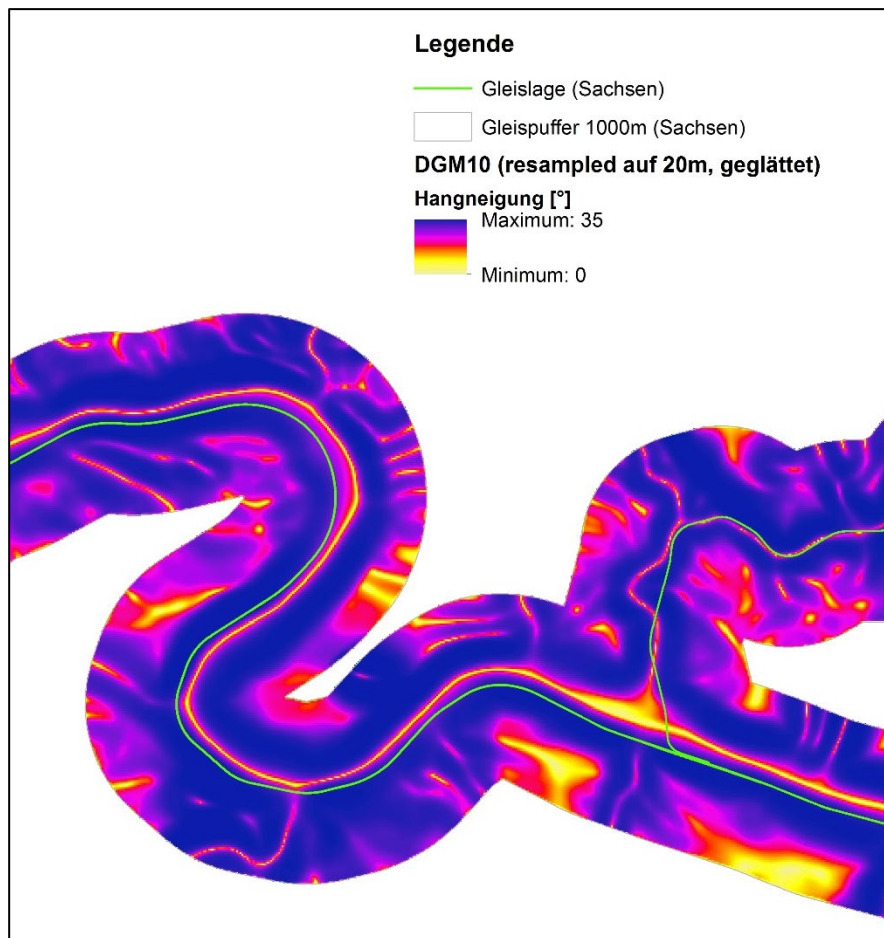


Abbildung 32: Abgeleitete Darstellung der Hangneigung aus dem geglätteten DGM20 für den Teilbereich der Sächsischen Schweiz/Elbsandsteingebirge in Sachsen im 1000-m-Pufferbereich um die Bahngleise

Wie bereits erwähnt, wurde zudem die Fließakkumulation aus dem DGM20 berechnet. Diese ist in Abbildung 33 beispielhaft für den Teilbereich der Sächsischen Schweiz/des Elbsandsteingebirges in Sachsen dargestellt. Die Fließakkumulation repräsentiert für jede Rasterzelle die Anzahl der Rasterzellen, aus denen Wasser in die Rasterzelle auf Grundlage der Oberfläche des DGM20 laufen würde. Sie gibt damit Auskunft über die Größe des Einzugsgebietes, welches hinter jeder Rasterzelle steht. Sehr deutlich zeichnen sich dabei Fließwege der Hauptflüsse und der Seitenarme in den Daten ab.

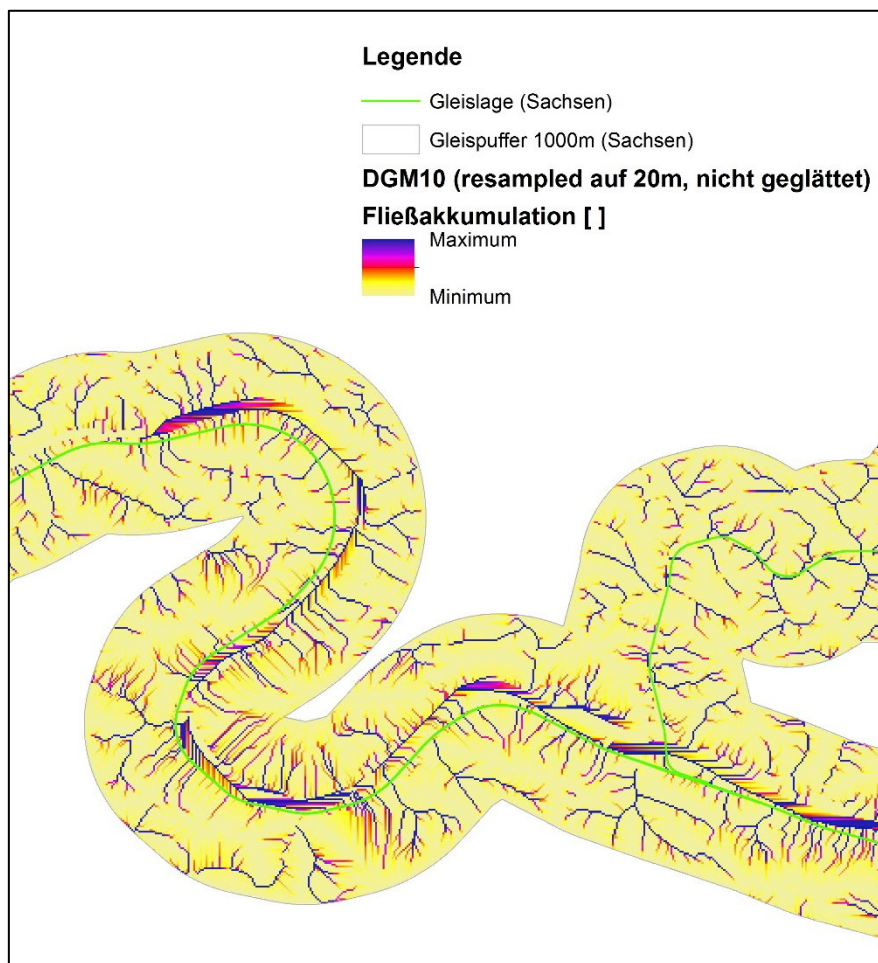


Abbildung 33: Abgeleitete Darstellung der Fließakkumulation aus dem geglätteten DGM20 für den Teilbereich der Sächsischen Schweiz/Elbsandsteingebirge in Sachsen im 1000-m-Pufferbereich um die Bahngleise

Für die bereits genannte Ableitung der Wölbung des DGM20 gibt es verschiedene Varianten und Teilkomponenten, die mittels GIS berechnet werden können. So unterscheidet man zwischen der Variante der horizontalen und der vertikalen Wölbung und der positiven und negativen Teilkomponente der Wölbung.

Die horizontale Wölbung kann dabei als die Wölbung der Konturlinie beschrieben werden, welche durch eine bestimmte Zelle verläuft. Die horizontale Wölbung ist für konvexe Konturlinien positiv und arbeitet somit Hangvorsprünge heraus, während die horizontale Wölbung für konkave Konturlinien negativ ist und Schluchten herausarbeitet (siehe Abbildung 34).

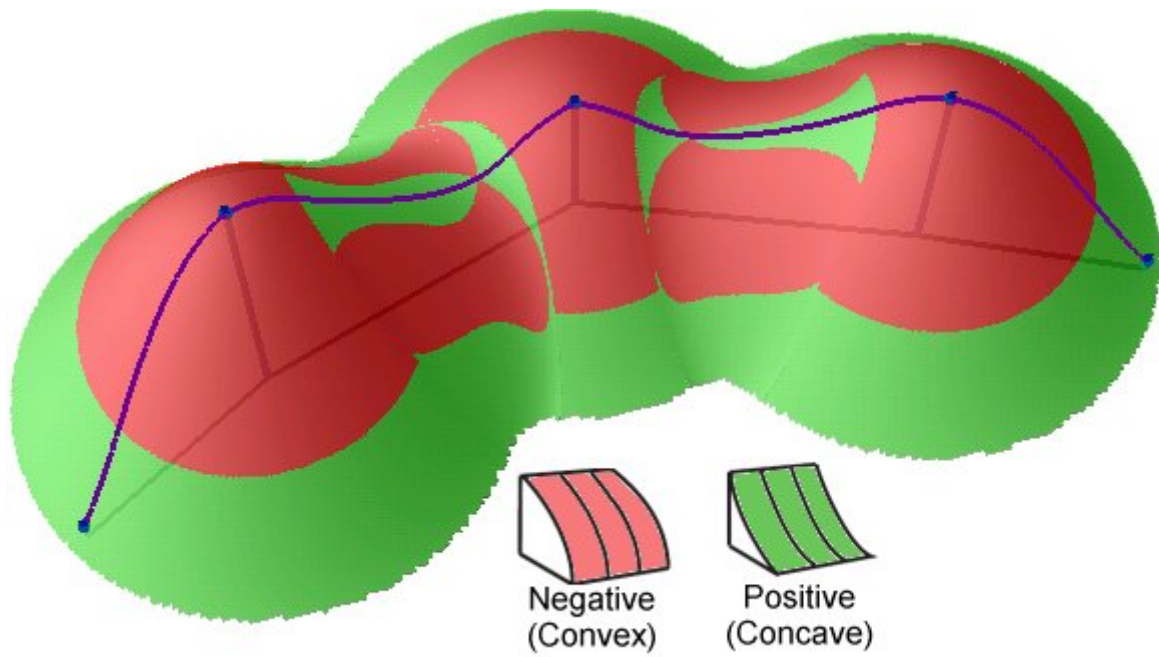


Abbildung 34: Schematische Darstellung der positiven (konvexen) und negativen (konkaven) Komponenten der horizontalen Wölbung (plan curvature). Aus: Lit 18.

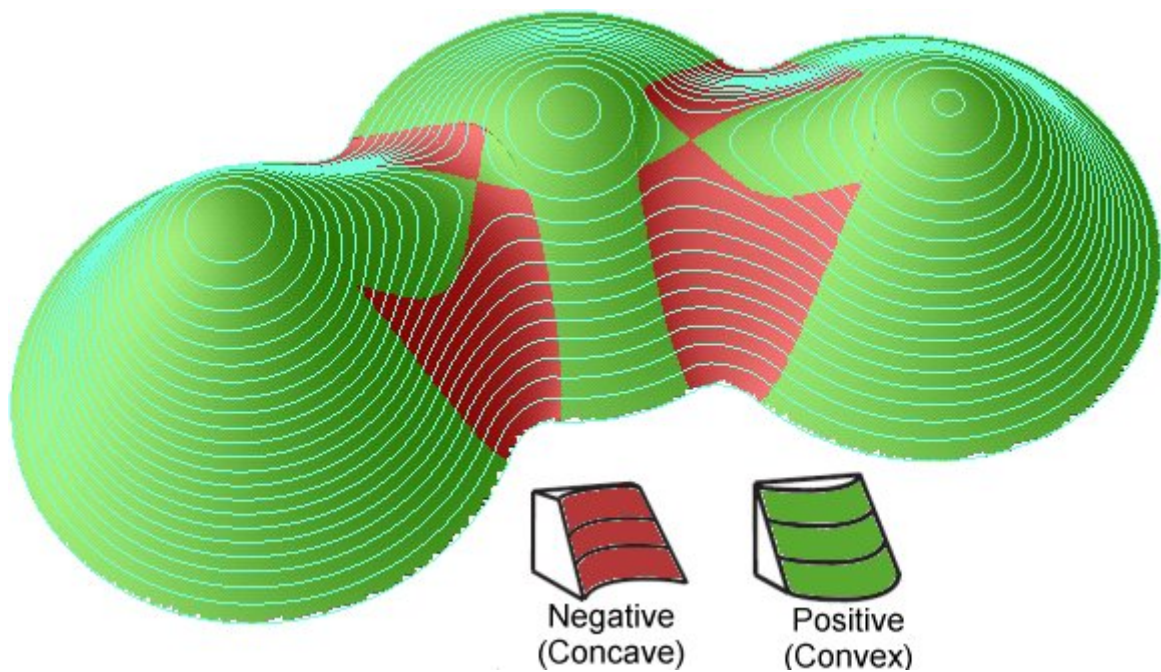


Abbildung 35: Schematische Darstellung der positiven (konvexen) und negativen (konkaven) Komponenten der vertikalen Wölbung (profile curvature). Aus: Lit 18.

Die vertikale Wölbung wird im Gegensatz dazu als die Wölbung der Fläche in Richtung des steilsten Gefälles einer jeden Rasterzelle angesehen. Die horizontale Wölbung beeinflusst dabei die Fließgeschwindigkeit des Wassers und damit die Erosion und die Akkumulation von Sediment. In Bereichen mit konvexer (negativer) vertikaler Wölbung überwiegt daher die Erosion, während in Gebieten mit konkaver (positiver) vertikaler Wölbung die Akkumulation überwiegt (siehe Abbildung 35).

In der folgenden Abbildung 36 und Abbildung 37 sind für das Teilgebiet der Sächsischen Schweiz/des Elbsandsteingebirges in Sachsen die beiden positiven und negativen Teilkomponenten der horizontalen Wölbung dargestellt.

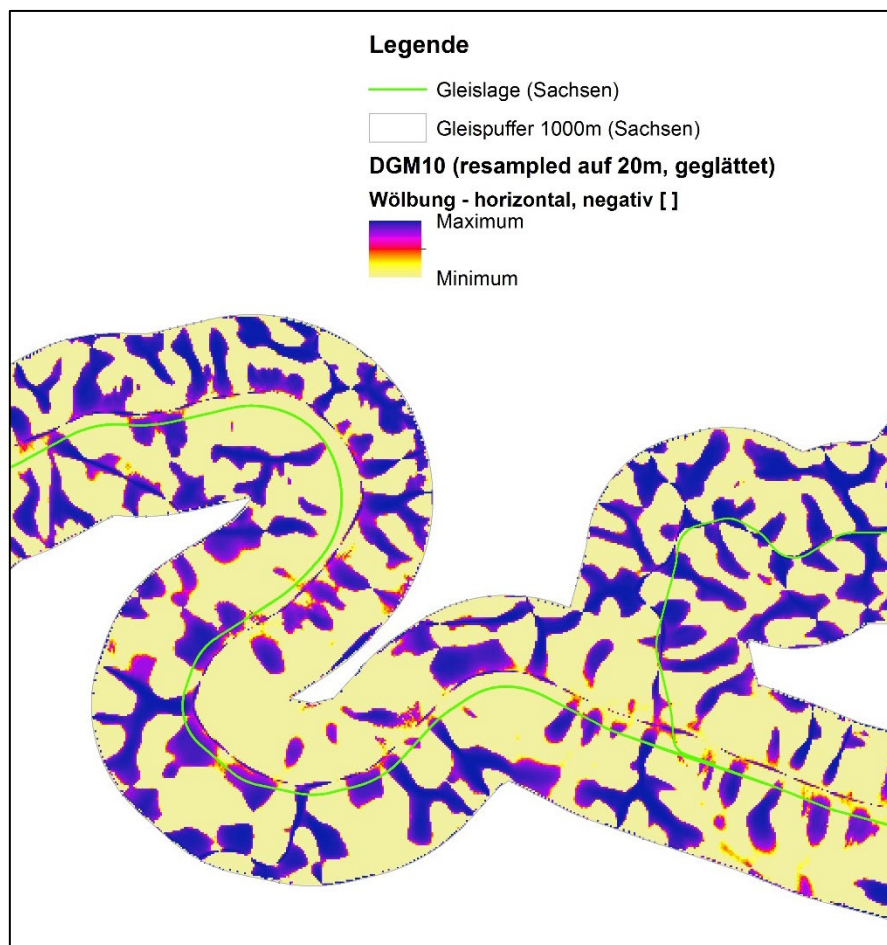


Abbildung 36: Abgeleitete Darstellung der negativen horizontalen Wölbung aus dem geglätteten DGM20 für den Teilbereich der Sächsischen Schweiz/Elbsandsteingebirge in Sachsen im 1000-m-Pufferbereich um die Bahngleise

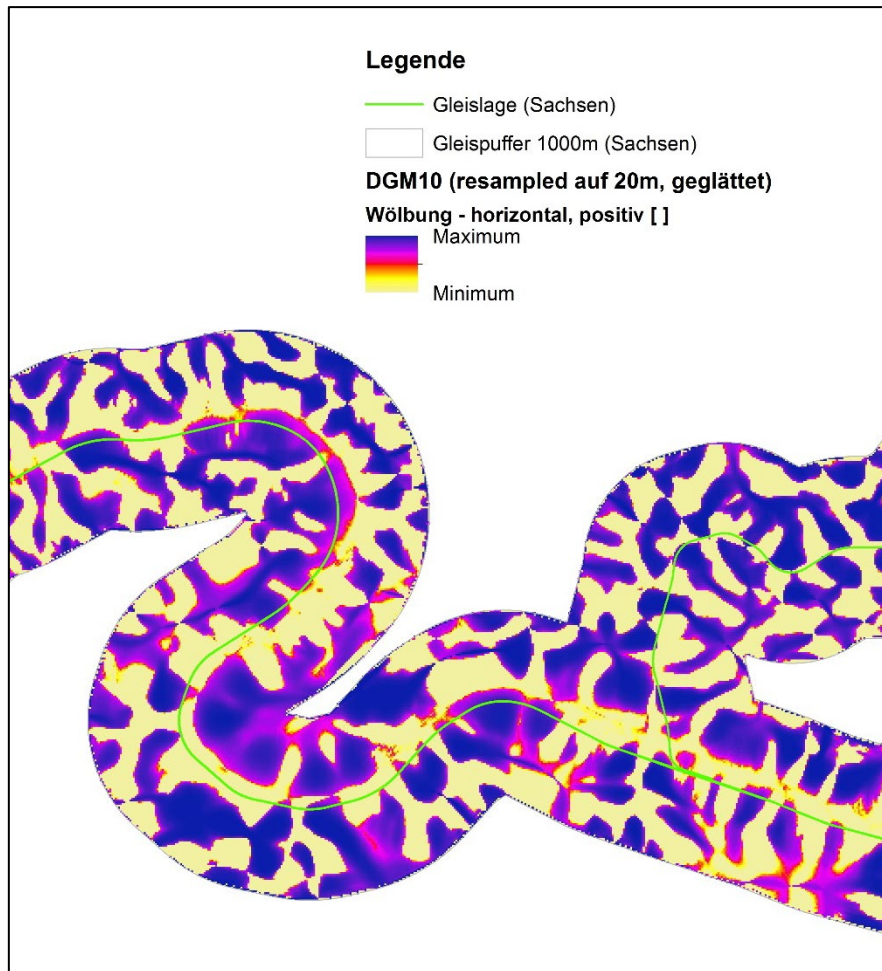


Abbildung 37: Abgeleitete Darstellung der positiven horizontalen Wölbung aus dem geglätteten DGM20 für den Teilbereich der Sächsischen Schweiz/Elbsandsteingebirge in Sachsen im 1000-m-Pufferbereich um die Bahngleise

Zusätzlich dazu sind in der folgenden Abbildung 38 und Abbildung 39 für das Teilgebiet der Sächsischen Schweiz/des Elbsandsteingebirges in Sachsen die beiden positiven und negativen Teilkomponenten der vertikalen Wölbung dargestellt.

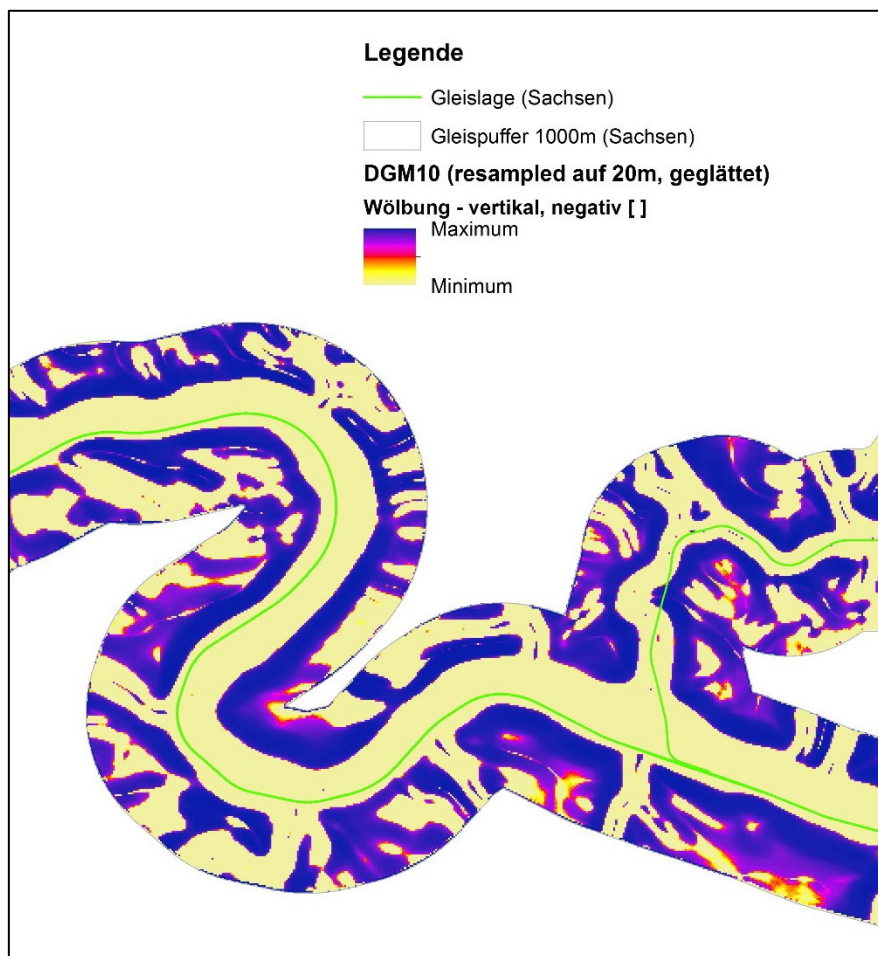


Abbildung 38: Abgeleitete Darstellung der negativen vertikalen Wölbung aus dem geglätteten DGM20 für den Teilbereich der Sächsischen Schweiz/Elbsandsteingebirge in Sachsen im 1000-m-Pufferbereich um die Bahngleise

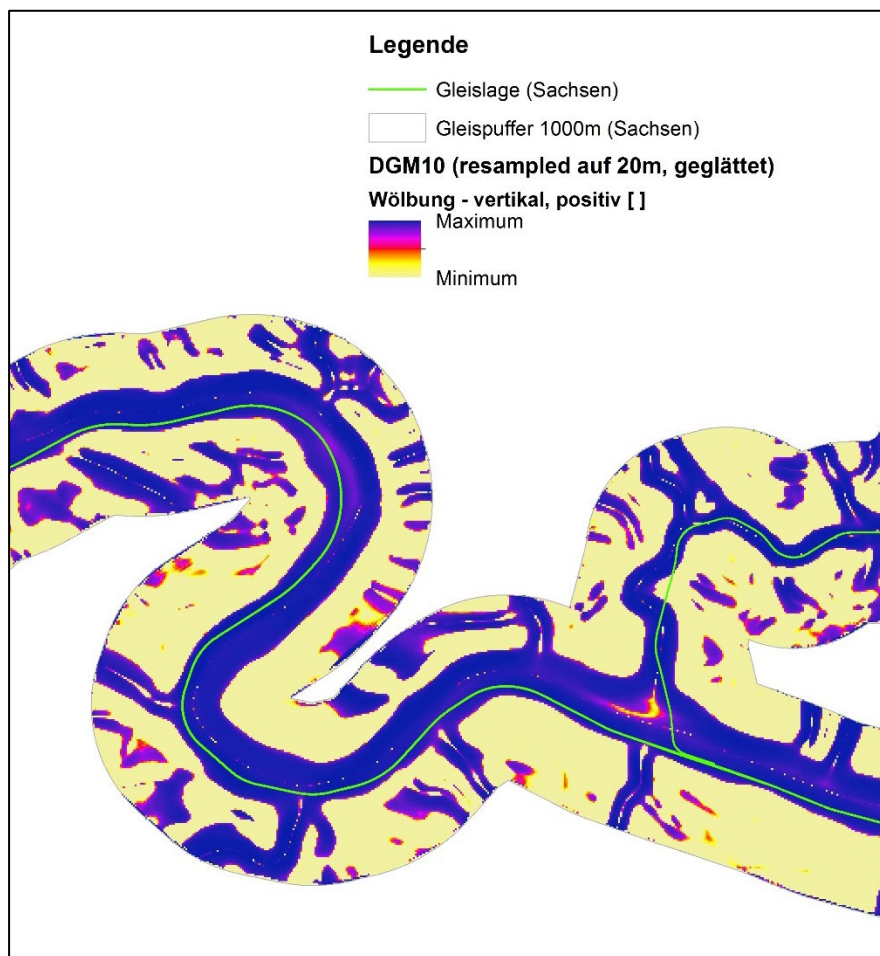


Abbildung 39: Abgeleitete Darstellung der positiven vertikalen Wölbung aus dem geglätteten DGM20 für den Teilbereich der Sächsischen Schweiz/Elbsandsteingebirge in Sachsen im 1000-m-Pufferbereich um die Bahngleise

Für die Berechnung des Gefährdungspotenzials nach dem 1. Ansatz wurde die Hangneigung zudem landesweit in die 8 Hangneigungsklassen entsprechend Tabelle 7 eingeteilt. Diese Klassifizierung baut auf die bei der Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt) bereits verwendeten Einstufungen.

Die resultierende klassifizierte Rasterdatei mit den Hangneigungsklassen ist beispielhaft für das Teilgebiet der Sächsischen Schweiz/des Elbsandsteingebirges in der Abbildung 40 dargestellt.

Tabelle 7: Klassifikationsschema des DGM20 auf Grundlage der Hangneigung

Hangneigung	
Winkel	Klassifikation
0 – 5	1
> 5 – 10	2
> 10 – 25	3
> 25 – 30	4
> 30 – 36	5

> 36 - 50	6
> 50 - 60	7
> 60	8

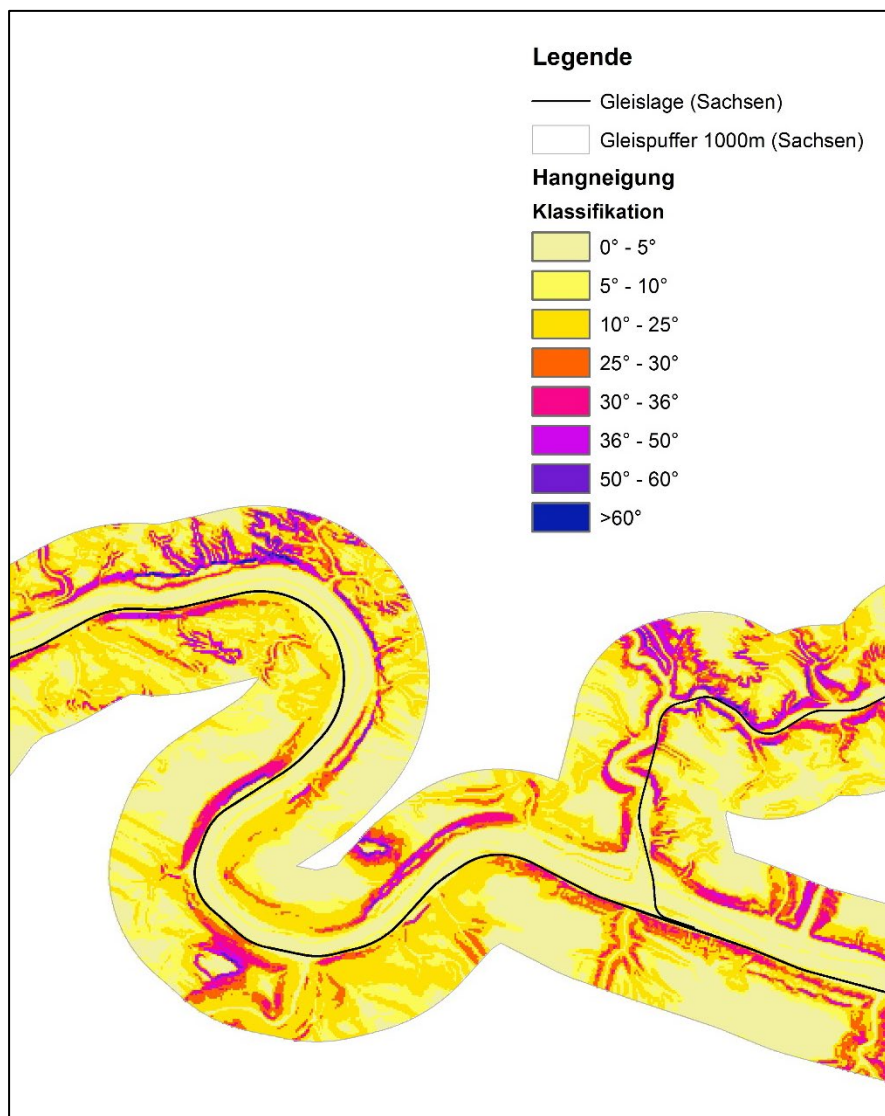


Abbildung 40: Abgeleitete Darstellung der Klassifikation der Hangneigung zur Verwendung im Ansatz 1, basierend auf dem ungeglätteten DGM20 für den Teilbereich der Sächsischen Schweiz/Elbsandsteingebirge in Sachsen im 1000-m-Pufferbereich um die Bahngleise

Zusätzlich zur Klassifikation der Hangneigung wurde auch die Fließakkumulation in 4 Klassen eingestuft (siehe Tabelle 8), um verschiedene Größen von Fließgewässern mit entsprechend unterschiedlich großen Einzugsgebieten auszuweisen. Aufbauend auf dieser Klassifikation wurden Modifikatoren für die Berechnung des Gefährdungspotenzials mit dem 1. Ansatz ausgewiesen. Entsprechend der Tabelle 8 werden dabei Rasterzellen mit einem Wert von 0 bei der Fließakkumulation mit einem Modifikator von „-1“ (Gefährdungsmindernd) ersetzt, da dies die unmittelbaren Berggrate beinhaltet, von denen das

Wasser zu fließen beginnt. Nachfolgend wurden Rasterzellen mit einer Fließakkumulation zwischen 0 und 600 mit einem Modifikator von „0“ (Gefährdungsneutral) belegt, da es sich dabei zunächst um die Hänge im Einzugsgebiet handelt. Mit einem Modifikator von „+1“ (Gefährdungsstärkend) bzw. „+2“ wurden im Anschluss daran die eigentlichen Abflussgerinne mit einer Fließakkumulation von 600 bis 6000 bzw. über 6000 Zellen reklassifiziert.

Die resultierende klassifizierte Rasterdatei mit den resultierenden Modifikatoren ist beispielhaft für das Teilgebiet der Sächsischen Schweiz/des Elbsandsteingebirges in der Abbildung 41 dargestellt.

Tabelle 8: Klassifikationsschema des DGM20 auf Grundlage der Fließakkumulation und verwendete Modifikatoren für die Berechnung der Gefährdungspotenziale nach Ansatz 1

Fließakkumulation		
Klassifikation	Wert	Modifikator
1	0	-1
2	< 600	0
3	600 - 6000	+1
4	> 6000	+2

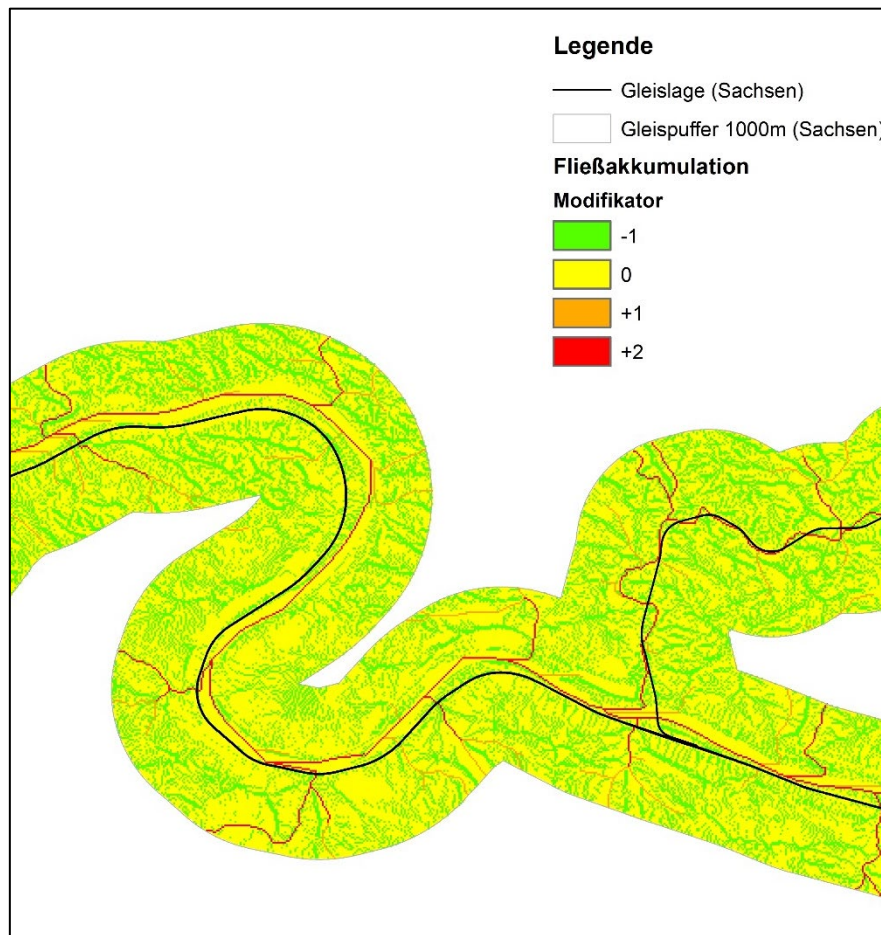


Abbildung 41: Abgeleitete Darstellung der Modifikatoren für die Fließakkumulation zur Verwendung im Ansatz 1, basierend auf dem ungeglätteten DGM20 für den Teilbereich der sächsischen Schweiz/ Elbsandsteingebirge in Sachsen im 1000-m-Pufferbereich um die Bahngleise

3.3.5 Ereigniskataster

Die Punkte des Ereigniskatasters waren direkte Modelleingangsdaten für den 2. Ansatz. Zur Verwendung bei der Modellierung mussten sie vorab prozessiert werden. Um die Menge an Trainingspunkten im Modellgebiet Sachsen zu erhöhen und um die eigentlichen Quellgebiete der Sturz- bzw. Hangrutschungsprozesse besser abzubilden, wurden hangaufwärtsgerichtet jeweils drei zusätzliche Punkte in der Auslösung des DGM20 in 20 m Abständen digitalisiert. Auf Grundlage dieser wurden Trainingspixel für die Verwendung im 2. Ansatz erzeugt. Die Trainingspixel an den Lokalitäten der Ereignispunkte aus dem Kataster des LfULG sowie die Pixel der zusätzlich digitalisierten Punkte wurden dabei mit einem Wert von 1 im Raster belegt (Abbildung 42). Dies entspricht einer apriori angenommenen Eintrittswahrscheinlichkeit von 100% für die Prognosemodellierung mit den künstlichen neuronalen Netzen im 2. Ansatz.

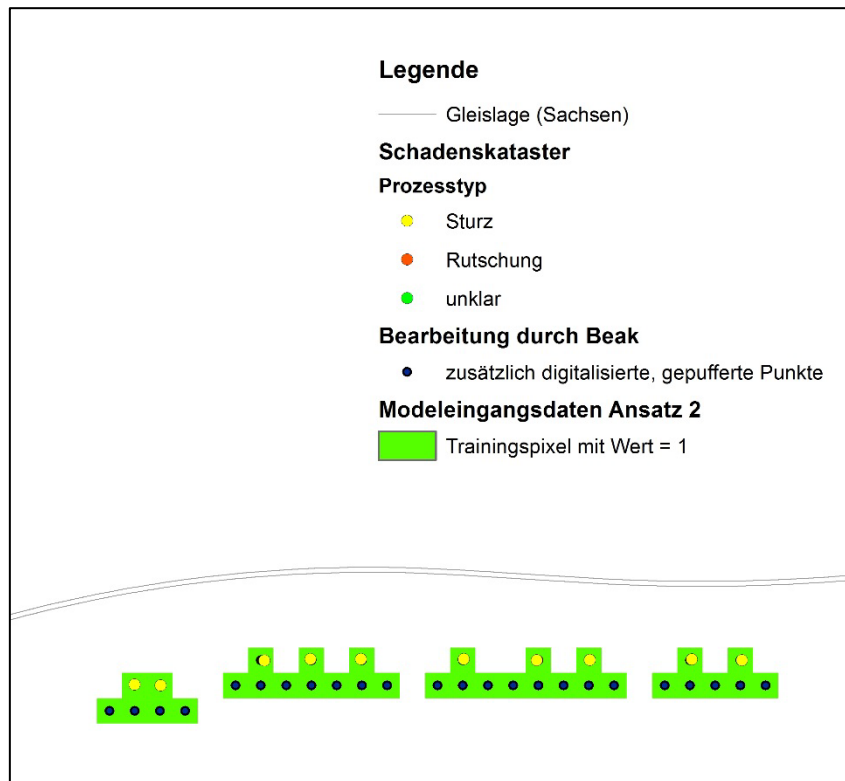


Abbildung 42: Detailkarte von Sachsen mit einem beispielhaften Überblick über die originalen Punkte aus dem Schadenskataster des Sächsischen Landesamtes für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie, den zusätzlich dazu digitalisierten, gepufferten Punkten durch Beak und den verwendeten Trainingspixeln für den Modellansatz 2

3.4 Berechnung der Gefährdungspotenziale

3.4.1 Überblick

Die Berechnung des Gefährdungspotenzials erfolgte prinzipiell in einem Pufferbereich von 1000 m beidseitig der Gleislage.

Methodisch wurden der 1. Ansatz mittels Algorithmen bzw. Entscheidungsbäumen für das gesamtdeutsche Untersuchungsgebiet angewandt (siehe Abschnitt 2.5.2). Dahingegen wurde der 2. Ansatz mittels multivariater Statistik bzw. künstlicher neuronaler Netze aufgrund der begrenzt verfügbaren Trainingsdaten nur für den Bereich des Freistaates Sachsen beispielhaft durchgeführt (siehe Abschnitt 2.5.3).

3.4.2 Ansatz 1: Berechnung mittels Algorithmen/ Entscheidungsbäumen

Das Gefährdungspotenzial für Massenschwerebewegungen kann auf der Basis geotechnischen Expertenwissens im ersten Schritt mittels einer Kombination von Hangneigung und Gesteinsklassifikation abgebildet werden. Teilweise auf Grundlage des bereits vorhandenen Klassifikationsschema der Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt), wurde durch dem AN ein umfassendes Klassifikationsschema (quasi ein Entscheidungsbaum) neu erstellt, wie in Tabelle 9 dargestellt.

Tabelle 9: Expertenwissensbasierte Klassifikation (Entscheidungsbaum) des Gefährdungspotentials durch Verschnitt der Gesteinsklasse auf Grundlage der GÜK200 und der Hangneigungsklasse auf Grundlage des DGM20

Gefahren- klasse	DGM20 Hangneigung Klassifikation	Lockergestein			Festgestein
		GÜK200 - Gesteinsklassifikation			
		GK = 3; 7; 5	GK = 4; 8	GK = 2; 6	GK = 1; 0
		gemischtkörnig	rollig	bindig	
15					
14	DGM = 5	> 36°		> 30°	> 60°
13					
12					
11	DGM = 4	> 30 - 36°	> 36°	> 25 - 30°	> 50 - 60°
10					
9					
8	DGM = 3	> 25 - 30°	> 30 - 36°	> 10 - 25°	> 30 - 50°
7					
6					
5	DGM = 2	> 10 - 25°	> 25 - 30°	0 - 10°	0 - 30°
4					
3					
2	DGM = 1	0 - 10°	0 - 25°		
1					

Dies beruht auf einer Klassifikation der GÜK200 in Gesteinsklassen entsprechend Tabelle 1 und dem Verschnitt mit der Klassifikation des DGM20 in Hangneigungsklassen entsprechend Tabelle 7. Entsprechend des Klassifikationsschemas werden alle Flächen zunächst in 5 prinzipielle Gefahrenklassen eingestuft:

- Gefahrenklasse 2: nicht gefährdet,
- Gefahrenklasse 5: gering gefährdet,
- Gefahrenklasse 8: gefährdet,
- Gefahrenklasse 11: stark gefährdet,
- Gefahrenklasse 14: sehr stark gefährdet.

Die folgenden Abbildung 43 und Abbildung 44 geben beispielhaft einen Überblick über das Berechnungsergebnis für das Teilgebiet von Sachsen bzw. den Teilbereich der Sächsischen Schweiz/des Elbsandsteingebirges in Sachsen.

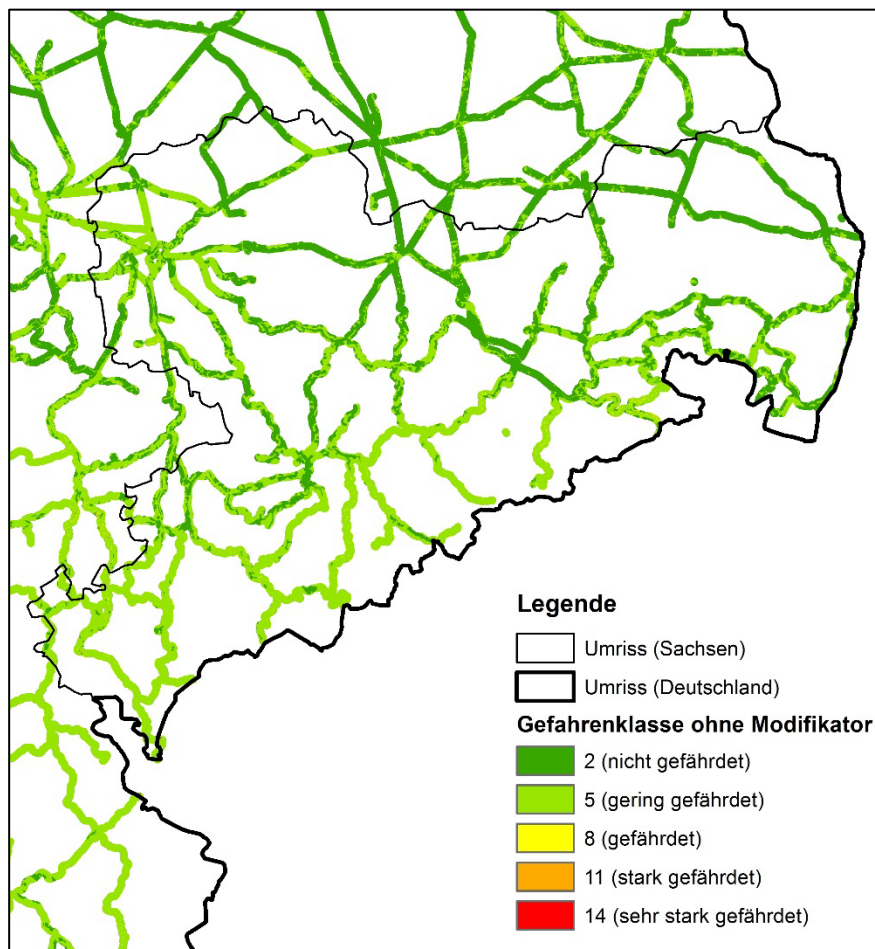


Abbildung 43: Berechnete Gefahrenklassen auf Grundlage der Kombination von Gesteinsklasse und der Hangneigungsklasse ohne Hinzunahme der zusätzliche Modifikatoren für Sachsen im 1000-m-Pufferbereich um die Bahngleise

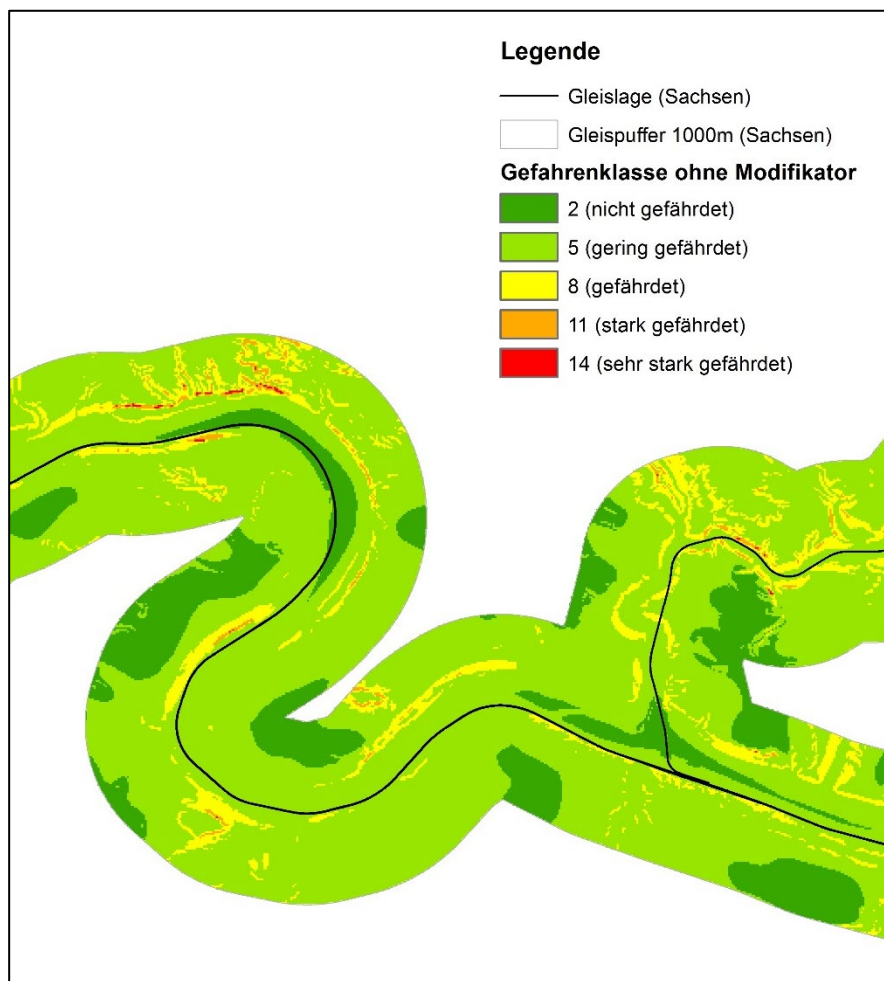


Abbildung 44: Berechnete Gefahrenklassen auf Grundlage der Kombination von Gesteinskategorie und der Hangneigungskategorie ohne Hinzunahme der zusätzlichen Modifikatoren für den Teilbereich der Sächsischen Schweiz/ Elbsandsteingebirge in Sachsen im 1000-m-Pufferbereich um die Bahngleise

Mittels der Einbeziehung weiterer Einflussfaktoren wurde dieses Ergebnis weiter verfeinert. Die Hauptmethodik war dabei, für die apriori ermittelten Gefahrenklassen 2, 5, 8, 11 und 14 eine in Summe aller zusätzlichen Einflussfaktoren berechneten Spezifizierung (Modifikatoren) um eine Gefahrenklasse nach unten (-1) oder nach oben (+1) zuzulassen. Zum Beispiel wäre bei in der Summe gefährdungsstärkenden Faktoren eine Modifikation der Gefahrenklasse 8 auf maximal 9 möglich. Sollten jedoch in Summe die gefährdungsmindernden Faktoren überwiegen, so wäre eine Modifikation von 8 auf 7 möglich. Damit wird verhindert, dass der Einfluss der zusätzlichen Faktoren zu stark ins Gewicht fällt bei der finalen Berechnung des Gefährdungspotenzials. Im Ergebnis entstanden somit Gefahrenklassen von minimal 1 (nicht gefährdet) bis maximal 15 (sehr stark gefährdet).

Zur Wertung der zusätzlichen Faktoren und der abschließender Berechnung der modifizierten Gefahrenklassen wurden der abgeleitete Modifikator der Landnutzung auf Basis des DLM250 (siehe Tabelle 6), abgeleitete Modifikatoren der Verformungsempfindlichkeit, der Klüftungsfreundlichkeit und dem Vorhandensein von Trennflächen auf Basis der GÜK200, sowie der abgeleitete Modifikator der Fließakkumulation des DGM20 mittels eines expertenbasierten Algorithmus miteinander kombiniert.

Wie in der Abbildung 45 dargestellt, wurden zunächst die Modifikatoren resultierend aus der Landnutzung (Tabelle 6) und der Verformungsempfindlichkeit (Tabelle 2) durch Aufsummierung miteinander kombiniert. Deren Summe kann entsprechend zwischen „+2“ und „-2“ betragen. Im Ergebnis wurde ein

kombinierter Modifikator aus dieser Summe durch Vereinfachung des Modifikators berechnet. Bei einer Summe von „+2“ oder „+1“ ergab sich ein kombinierter Modifikator von „+1“, bei einer Summe von „0“ ergab sich ein kombinierter Modifikator von „0“, und bei einer Summe von „-2“ oder „-1“ ergab sich ein kombinierter Modifikator von „-1“. Analog wurden ein kombinierter Modifikator resultierend aus der Klüftungsfreundlichkeit (Tabelle 4) und dem Vorhandensein von Trennflächen (Tabelle 5) berechnet und anschließend die Summe wieder auf die Werte „+1“, „0“ oder „-1“ vereinfacht. In einem letzten Berechnungsschritt wurden dann diese beiden kombinierten Modifikatoren mit dem Modifikator resultierend aus der Fließakkumulation (Tabelle 8) durch Aufsummierung kombiniert. Daraus resultierte wiederum ein kombinierter Modifikator, welcher zwischen „-3“ und „+4“ schwankt. Dieser wurde erneut auf „-1“ (bei einer Summe der kombinierten Modifikatoren zwischen „-3“ und „-1“), „0“ und „+1“ (bei einer Summe der kombinierten Modifikatoren zwischen „+1“ und „+4“) vereinfacht.

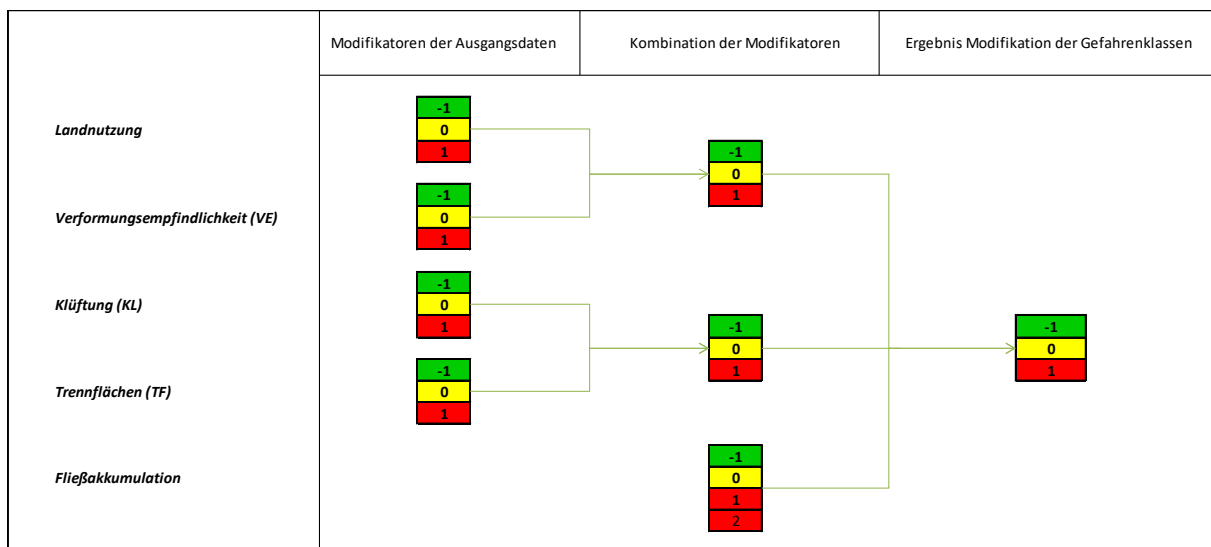


Abbildung 45: Fließschema (Algorithmus) zur Berechnung der resultierenden Modifikation (Spezifizierung) der Gefahrenklassen durch Kombination der Modifikatoren der unterschiedlichen Ausgangsdaten

Die folgende Abbildung 46 und die Abbildung 47 geben beispielhaft einen Überblick über das Berechnungsergebnis für den resultierenden Modifikator für das Teilgebiet von Sachsen bzw. den Teilbereich der Sächsischen Schweiz/des Elbsandsteingebirges in Sachsen.

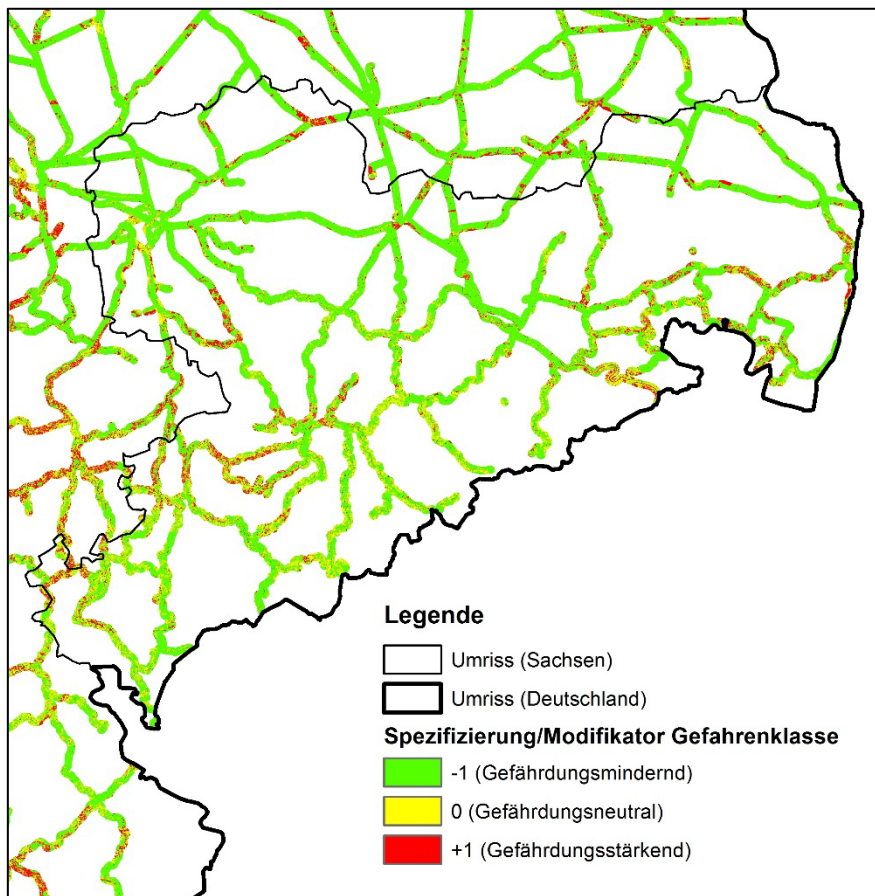


Abbildung 46: Berechneter resultierender Modifikator (Spezifizierung) der Gefahrenklassen durch Kombination der Modifikatoren der unterschiedlichen Ausgangsdaten für Sachsen im 1000-m-Pufferbereich um die Bahngleise

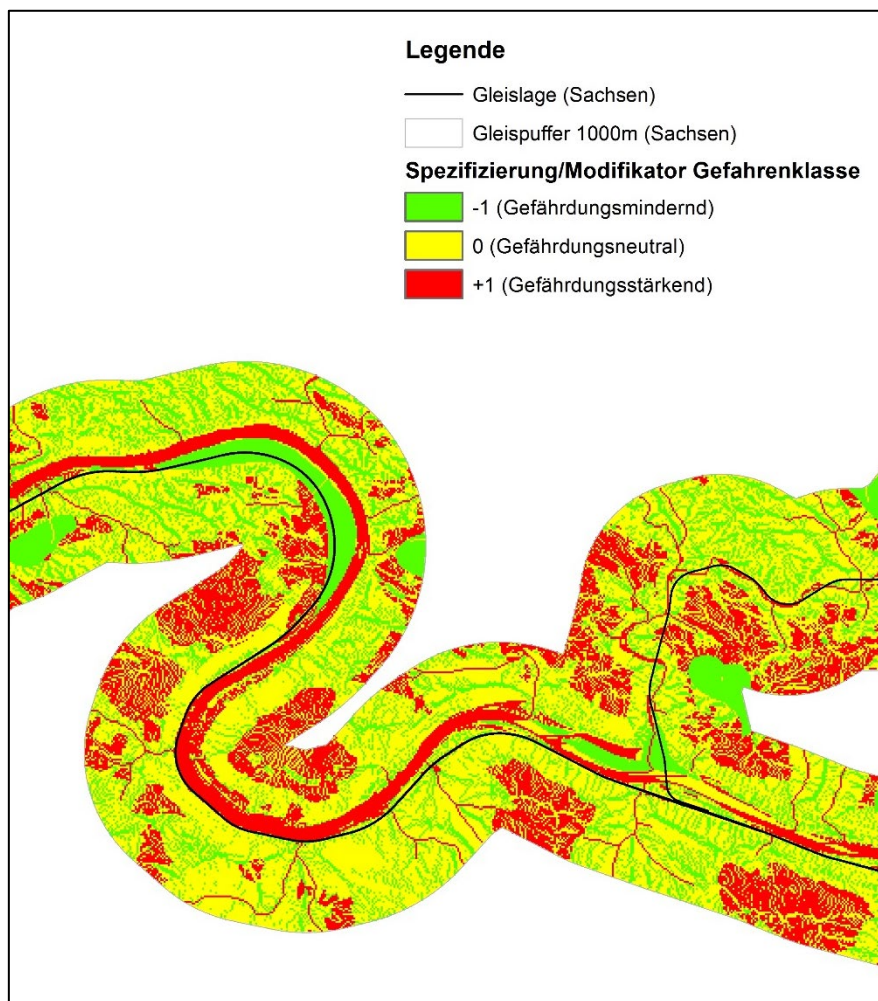


Abbildung 47: Berechneter resultierender Modifikator (Spezifizierung) der Gefahrenklassen durch Kombination der Modifikatoren der unterschiedlichen Ausgangsdaten für den Teilbereich der Sächsischen Schweiz/Elbsandsteingebirge in Sachsen im 1000-m-Pufferbereich um die Bahngleise

Im letzten Berechnungsschritt wurden anschließend die beiden Rasterdateien der apriori-Gefahrenklasse und des resultierenden Gesamtmodifikators durch Summenbildung miteinander kombiniert. Daraus resultieren bereits genannte finale Gefahrenklassen nach Ansatz 1, welche zwischen 1 und 15 liegen. Die finalen Ergebnisse werden in Abschnitt 3.1.1, insbesondere in der Abbildung 62 und Abbildung 63, sowie in der Anlage 1 und 2 präsentiert.

3.4.3 Ansatz 2: Berechnung mittels multivariater Statistik/ künstlicher neuronaler Netze

Das Gefährdungspotenzial für Massenschwerebewegungen wurde in einem zweiten Modell-ansatz mit Hilfe der advangeo® Prediction Software mit künstlichen neuronalen Netzen prognostiziert. Wie zuvor dargelegt (siehe Abschnitt 2.4.2) handelt es sich dabei um eine überwachte Klassifizierung, bei welcher die Software eine selbständige (vom Expertenwissen unabhängige) Gewichtung und Verknüpfung der verschiedenen Einflussfaktoren (Ausgangsdaten) durchführt und dabei durch Modifikation der Gewichtung den Vorhersagefehler an bekannten Trainingspunkten minimiert. Dieser Trainingsprozess ist iterativ.

Zunächst wurden in der advangeo® Prediction Software die sogenannten „**Base Data**“ erzeugt bzw. importiert. Dies sind als wichtigsten Datenquellen das „Base Raster“, die „Project Area“, und „Subareas“.

Dabei stellt das „Base Raster“ das Snap- als auch Clip-Raster für alle weiteren Rasterverarbeitungen innerhalb der advangeo® Prediction Software dar. Angegeben werden musste die maximale Ausdehnung der Rasterdaten (hier: maximal das Modellgebiet Sachsen umfassend), die Auflösung der Rasterdaten (hier: 20 m x 20 m Pixel), sowie das zu verwendende Koordinatensystem für alle räumlichen Daten (hier: ETRS89 UTM Zone 32N) (siehe Abbildung 48).

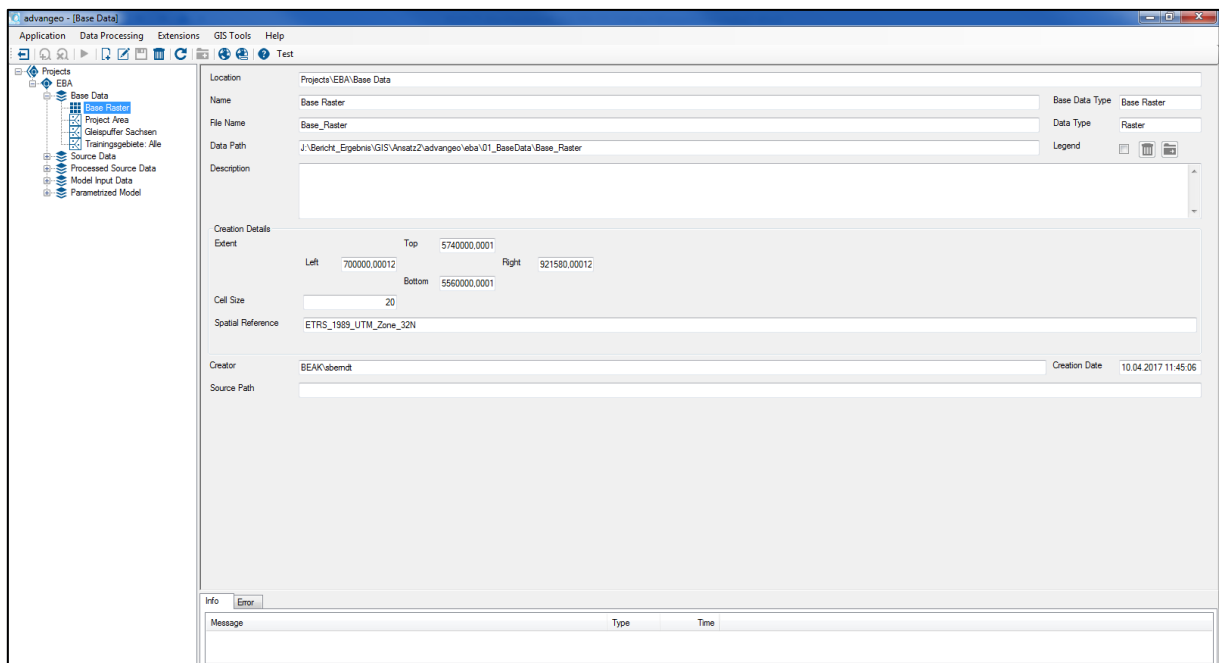


Abbildung 48: Erstellung des „Base Raster“ unter „Base Data“ innerhalb der advangeo® Prediction Software

Des Weiteren wurde der Umriss von Sachsen als „Project Area“ als Shapefile-Datei in das advangeo®-Projekt importiert. Das Polygon mit dem 1000-m-Puffer um die Gleislage von Sachsen wurde als „Sub-area“ in die „Base Data“ importiert. In diesem Bereich wurde die eigentliche Modellierung durchgeführt und dabei die Abgrenzungen des Polygons als Ausstechmaske für alle Eingangsdaten verwendet.

Im nächsten Schritt wurden die verschiedenen Ausgangsdaten in ihrer ursprünglichen Form in die advanceo® Prediction Software als „Source Data“ importiert: geglättetes DGM20 als Rasterdatei, DLM250 als Polygon-Shapefile-Datei, GÜK200 als Polygon-Shapefile-Datei, sowie die aufbereiteten und klassifizierten Daten des Ereigniskatasters als Punkt-Shapefile-Datei (siehe Abbildung 49).

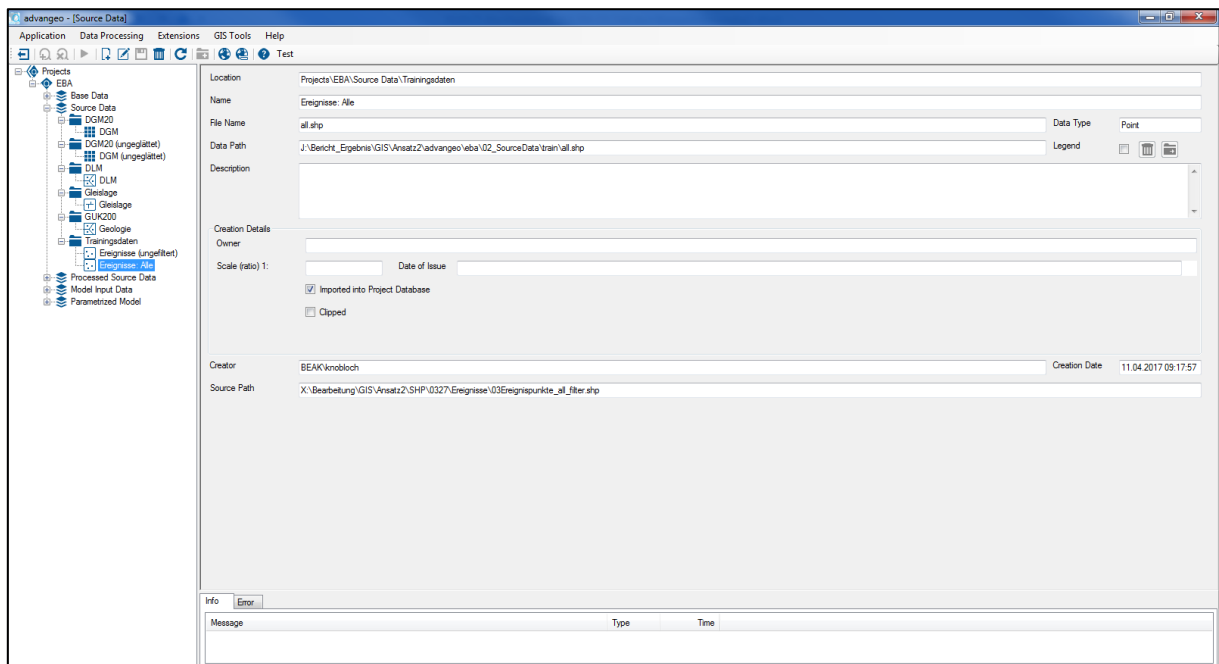


Abbildung 49: Import der originalen Punkte des Ereigniskatasters als Trainingsdaten unter „Source Data“ innerhalb der advanceo® Prediction Software

Anschließend wurden auf Grundlage der importierten Ausgangsdaten verschiedenste abgeleitete Daten („**Processed Source Data**“) innerhalb der advanceo® Prediction Software erstellt. Dazu wurden die beiden Erweiterungen („Extensions“) „Erosion“ und „Minerals“ und die darin verfügbaren Werkzeuge zur Datenverarbeitung (Resampling, Reclassification, Interpolation, etc.) verwendet (siehe Abbildung 50).

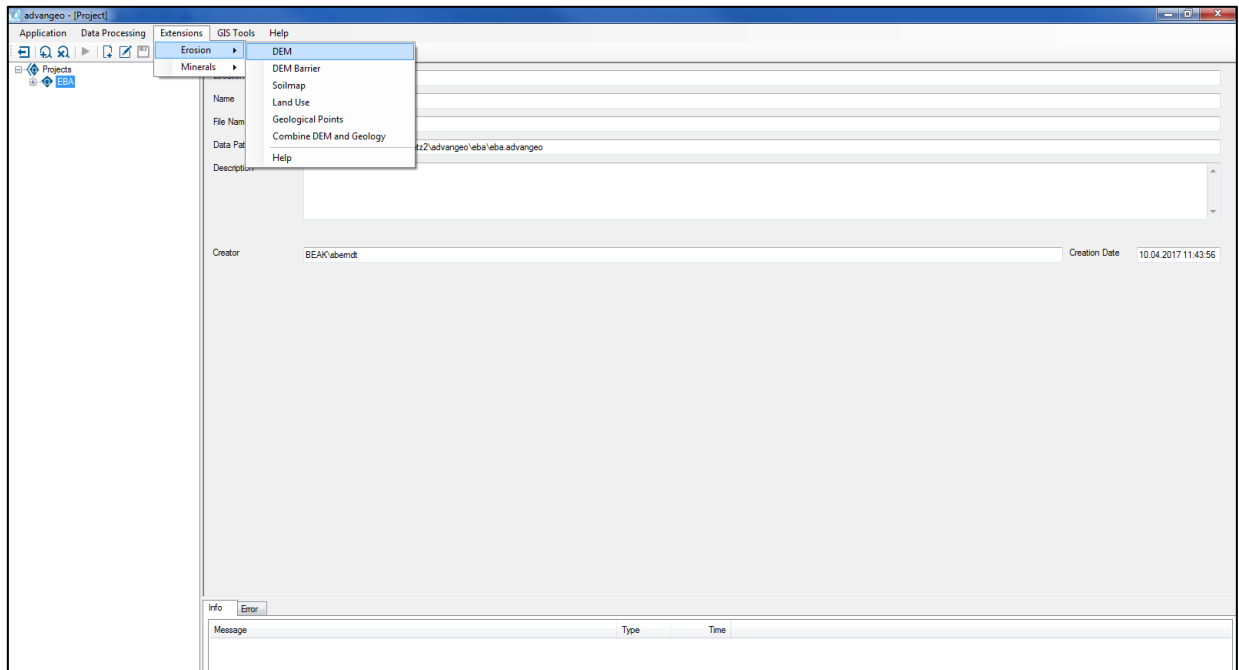


Abbildung 50: Erweiterung „Erosion“ innerhalb der advangeo® Prediction Software und darin verfügbare Werkzeuge zur Vorprozessierung von digitalen Geländemodellen, Landnutzungsdaten und geologischen Daten

Für das DGM20 wurden als „Processed Source Data“:

- die Hangneigung (Slope),
- die Fließakkumulation (Flow Accumulation),
- die Fließrichtung (Flow Direction) und
- die verschiedenen Komponenten der Wölbung (Curvature)

als Rasterdateien mit Fließzahlen berechnet.

Für das DLM250 wurden die beiden abgeleiteten Datensätze mit:

- dem Bewuchsgrad und
- dem Versiegelungsgrad

als Rasterdateien mit Fließzahlen berechnet.

Aus der GÜK200 wurden Rasterdateien mit binären Werten (0=nicht vorhanden/zutreffend; 1=vorhanden/zutreffend) erzeugt für:

- die 5 relevantesten Gesteinsklassen (GK1: Festgestein; GK2: Lockergestein, bindig; GK3: Lockergestein, gemischtkörnig; GK4: Lockergestein, rollig; GK5: Lockergestein, anthropogen),
- die beiden relevanten Klassen der Klüftungsfreundlichkeit (KL1: nicht bzw. wenig klüftungsfreundlich; KL2: klüftungsfreundlich),
- die beiden relevanten Klassen der Trennflächen (TF1: ohne Trennflächen; TF2: mit Trennflächen) sowie

- die beiden relevanten Klassen der Verformungsempfindlichkeit (VE1: mäßig verformungsempfindlich; VE2: ausgeprägt verformungsempfindlich).

Zudem wurden die Punkte des Ereigniskatasters von einer Punkt-Shapefile-Datei in eine Rasterdatei umgewandelt, mit einem Wert von 1 bei einem dokumentierten Ereignis (siehe Abbildung 51).

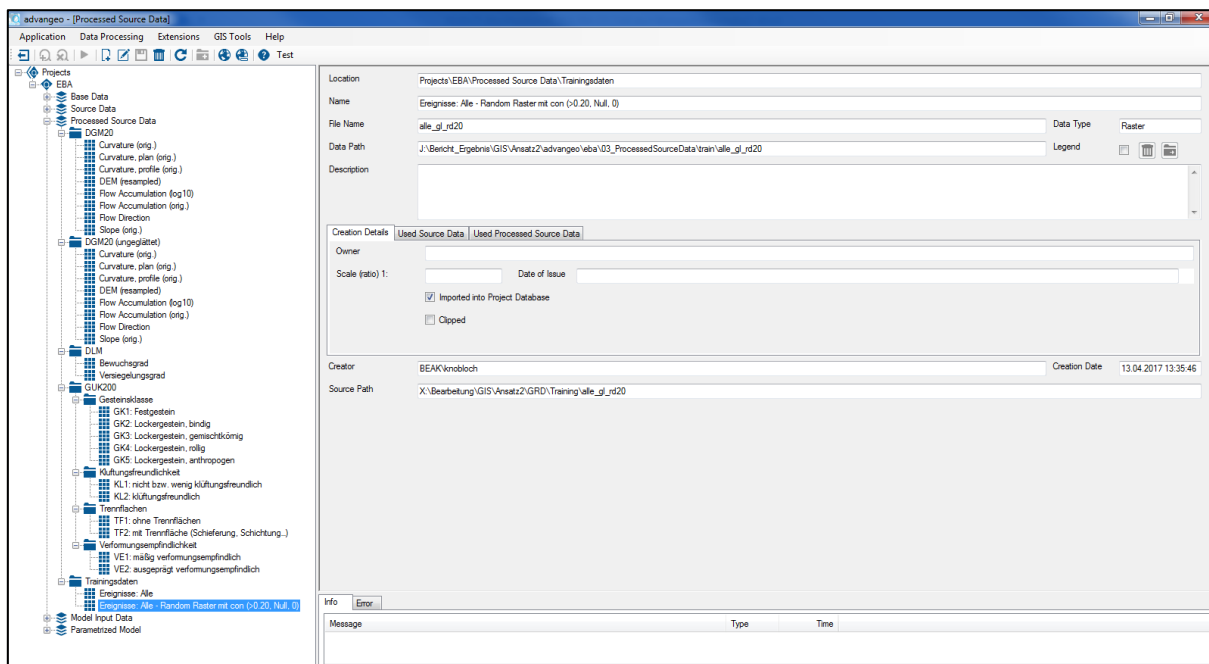


Abbildung 51: Prozessierung der originalen Punkte des Ereigniskatasters und Erzeugung von Rasterdaten als Trainingsdaten unter „Processed Source Data“ innerhalb der advangeo® Prediction Software

Anschließend wurde ein Trainings raster erzeugt, welches alle zuvor erstellte Trainingspixel mit dem Wert 1 erhält und zudem per Zufallsfunktion über das Modellgebiet mit einer Abdeckung von 20% der Pixel den Wert 0 (Abbildung 52).

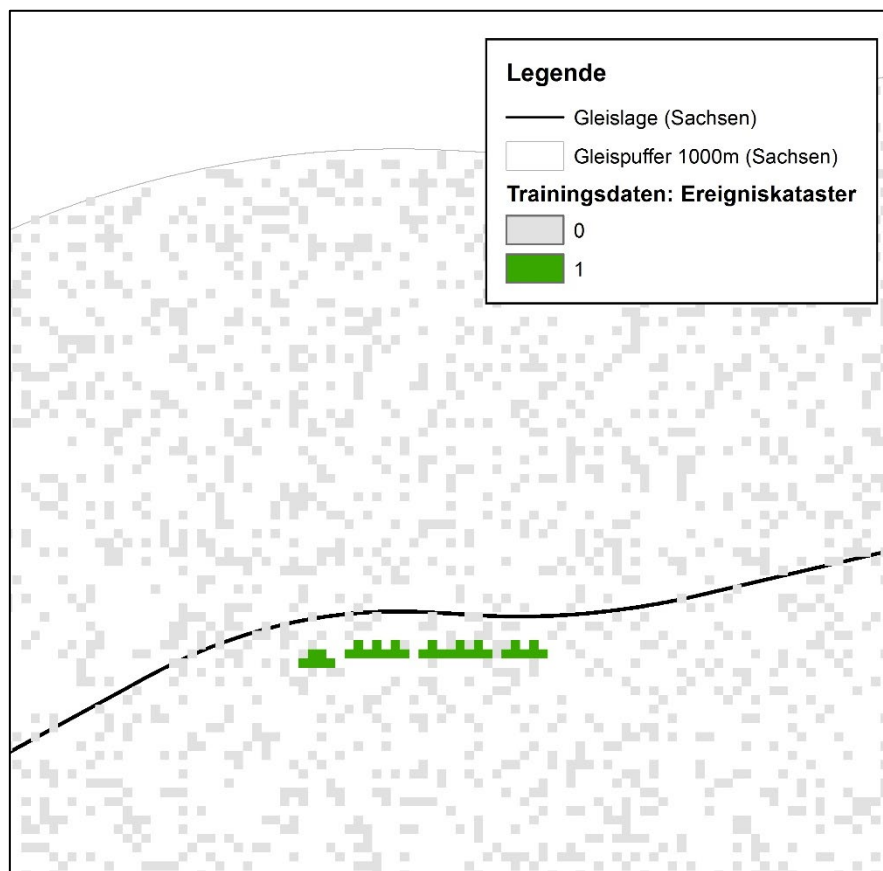


Abbildung 52: Rasterdatei mit Punkten des Ereignisrasters mit einem Zellwert von „0“ und zufällig verteilten zusätzlichen Pixeln mit 20% Modellgebietsabdeckung mit einem Zellwert von „1“ zur Verwendung als Trainingsdaten in der advangeo® Prediction Software

Im nächsten Schritt wurden aus den verschiedenen erzeugten „Processed Source Data“ die eigentlichen „**Model Input Data**“, i.e. die Modelleingangsdaten erzeugt. Für die Modellierung an sich müssen alle Daten als Raster vorliegen, bevorzugt skaliert zwischen 0 und 1 und mit der gleichen Auflösung und der gleichen Ausdehnung wie das zu Beginn erzeugte „Base Raster“. Daher wurden alle Daten der „Processed Source Data“ mit dem „Base Raster“ als Snap-raster geresampled, insofern noch nicht geschehen, und unter „Model Input Data“ in advangeo® abgelegt. Die Werte der zuvor erzeugten binären Raster blieben dabei unverändert, so auch die bereits erzeugten Trainingsdaten. Alle Raster mit Fließzahlen wurden dagegen zwischen ihrem minimalen und maximalen Wert auf Werte zwischen 0 und 1 linear umskaliert, wie zum Beispiel die aus dem DGM abgeleitete Hangneigung (siehe Abbildung 53).

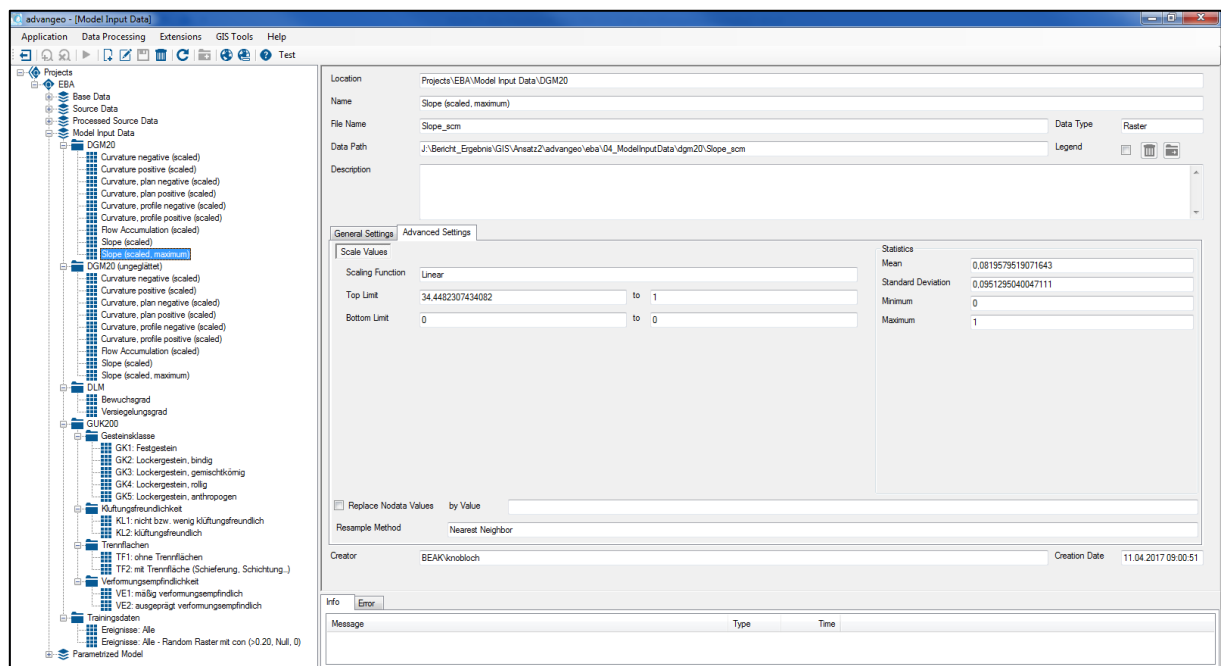


Abbildung 53: Umskalierung der Hangneigung des DGM20 aus den „Processed Source Data“ und Erzeugung von „Model Input Data“ in der advangeo® Prediction Software

Mit diesen vorbereiteten Modelleingangsdaten konnte letztendlich die eigentliche Modellierung durchgeführt werden. Dazu wurde in der advangeo® Prediction Software unter „**Parametrized Model**“ ein „Prediction“-Modell angelegt. Darin wurde zunächst ein **Trainings-Szenario** für das künstliche neuronale Netz gerechnet. Für dieses wurden die „Training Area“ (hier: Polygon-Shapefile-Dateien des 1000-m-Puffers um die Gleislage in Sachsen), die „Training Data“ (hier: gerasterte Punkte aus dem Ereigniskataster des LfULG und der DB Netz AG mit zusätzlichen zufällig verteilten Punkten ohne Ereignis) und die zu verwendenden „Model Input Data“ angegeben (siehe Abbildung 54).

Mit dieser Vorgehensweise wurden insgesamt knapp 100 verschiedene Modelle erstellt, trainiert und getestet, bis das endgültige Modell mit der besten Anpassung an die Trainingspunkte und dem geringsten Vorhersagefehler an den Trainingspunkten ermittelt und ausgewählt werden konnte.

Das finale Modell wurde mit folgenden 12 Modelleingangsdaten erstellt:

- DGM20 – negative horizontale Wölbung,
- DGM20 – positive horizontale Wölbung,
- DGM20 – negative vertikale Wölbung,
- DGM20 – positive vertikale Wölbung,
- DGM20 – Fließakkumulation,
- DGM20 – Hangneigung,
- DLM250 – Bewuchsgrad,
- DLM250 – Versiegelungsgrad,
- GÜK200 – Gesteinsklasse 1: Festgestein,
- GÜK200 – Klüftungsfreundlichkeitsklasse 2: klüftungsfreundlich,
- GÜK200 – Trennflächenklasse 2: mit Trennflächen,
- GÜK200 – Verformungsempfindlichkeitsklasse 2: ausgeprägt verformungsempfindlich.

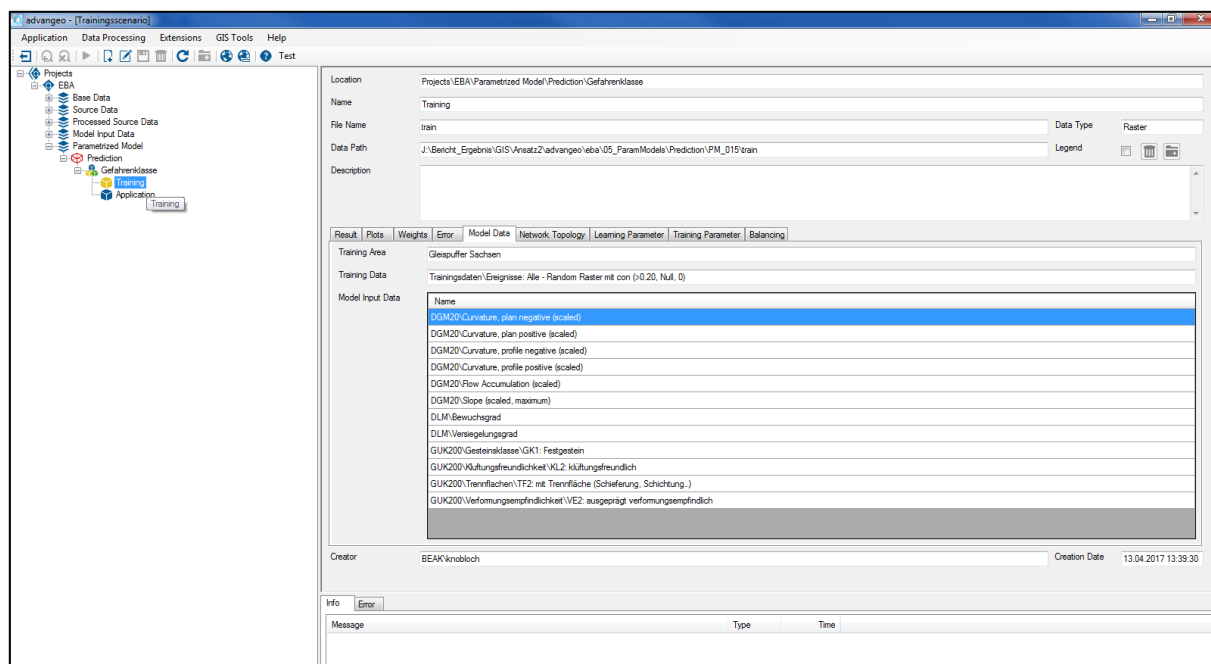


Abbildung 54: Erstellung eines Trainingszenarios für ein „Prediction“-Modell unter „Parametrized Models“ in der advangeo® Prediction Software und Auswahl des Trainingsgebietes, der Trainingsdaten und der Modelleingangsdaten

Das Ergebnis der Prognose mittels künstlichen neuronalen Netzen in advangeo® ist eine Raster-Datei mit einem kontinuierlichen Wert zwischen 0 (kein Gefährdungspotenzial) und 1 (sehr hohes Gefährdungspotenzial). Anhand der Fehlerkurve des iterativ durchgeführten überwachten Trainings kann die Güte eines Trainingszenarios begutachtet werden. Je geringer der Fehler dabei ist, desto besser ist das Modell. Der Fehler errechnet sich aus dem Unterschied des praktisch angenommenen Gefährdungspotenzials von 100% (umgerechnet zwischen 0 und 1 entspricht dies dem Wert 1) an den Trainingspunkten (hier: Rasterpunkte mit dokumentierten Ereignissen aus dem Georisikokataster des LfULG und der DB Netz AG) und dem vom Modell nach der Iteration x berechneten Gefährdungspotenzial an dieser Stelle. Der mittlere quadrierte Fehler (RMSE, root mean squared error) wird in der Trainingskurve für jede Trainingsiteration als Punkt dargestellt, welche miteinander verbunden werden (siehe Abbildung 55).

Für das benannte finale Prognosemodell des Gefährdungspotenzials entlang der Bahnlinien in Sachsen ergab sich nach 100 Trainingsiterationen ein mittlerer Fehler von 0,075 – dies entspricht 7,5%.

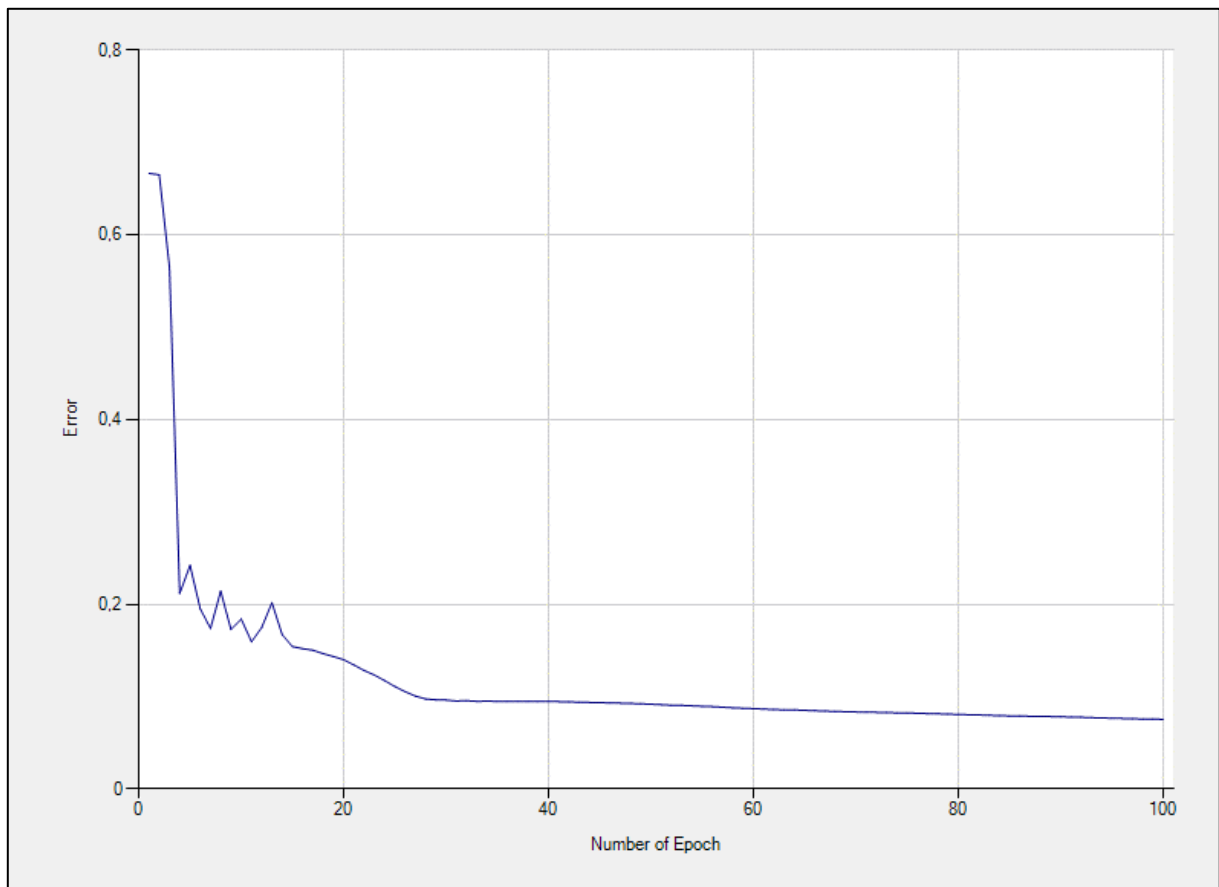


Abbildung 55: Kurve des gemittelten quadrierten Fehlers zwischen dokumentiertem und berechnetem Gefährdungspotenzial an den Trainingspunkten, welche die Veränderung des Fehlers über die 100 Trainingsiterationen verdeutlicht

Ein weiteres Maß für die Güte des Modells sind die Histogramme mit der Verteilung der prognostizierten Gefährdungspotenzialwerte für alle Punkte (Trainingspixel mit dem Wert 0 und 1, siehe Abbildung 56) und für nur die Punkte mit dokumentierten Georisiken (Trainingspixel mit dem Wert 1, siehe Abbildung 57).

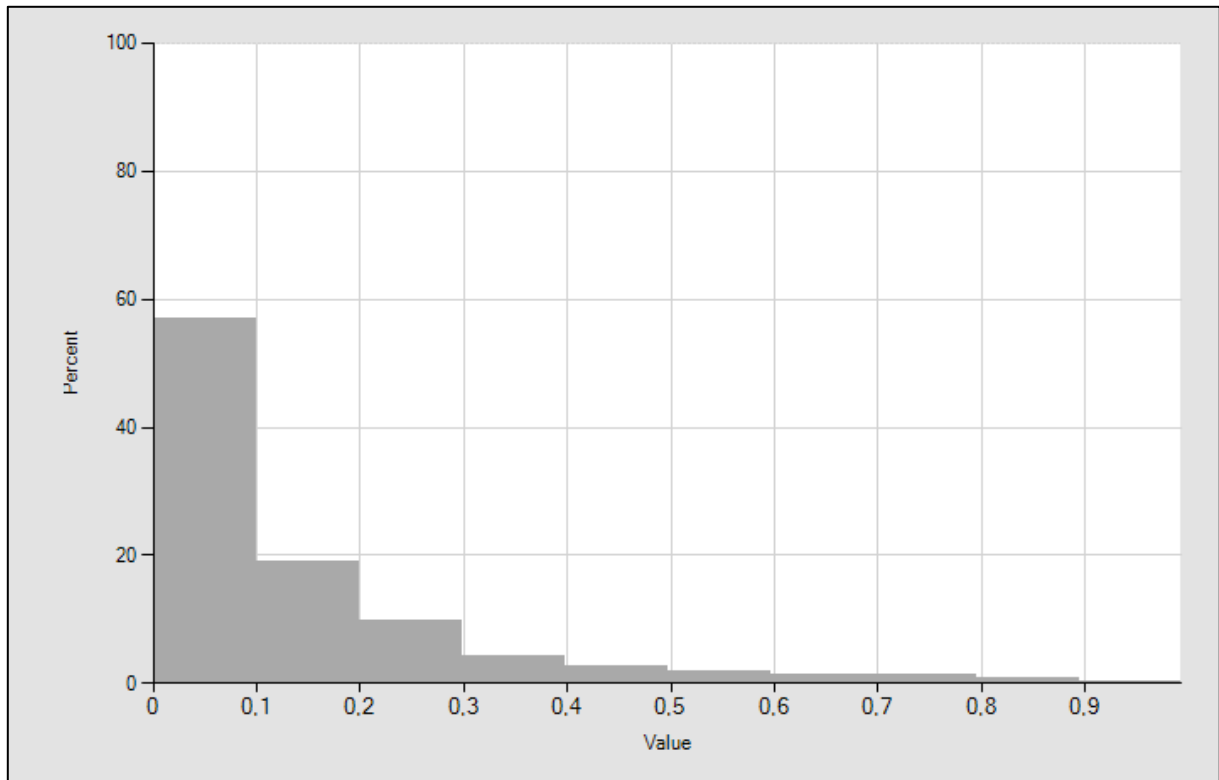


Abbildung 56: Histogramm aller beim Training verwendeten Pixel (Rasterpunkte) und prognostiziertes Gefährdungspotenzial zwischen 0 (kein Gefährdungspotenzial) und 1 (hohes Gefährdungspotenzial)

Das Histogramm aller verwendeten Pixel (Rasterzellen) beim Training ist idealerweise rechtsschief, d.h. der Hauptanteil der prognostizierten Werte hat ein geringes Gefährdungspotenzial mit Werten gegen 0 und nur wenige Punkte weisen ein hohes Gefährdungspotenzial auf. Dies trifft sehr gut auf das konkrete Histogramm (Abbildung 56) für das gerechnete Modell zu.

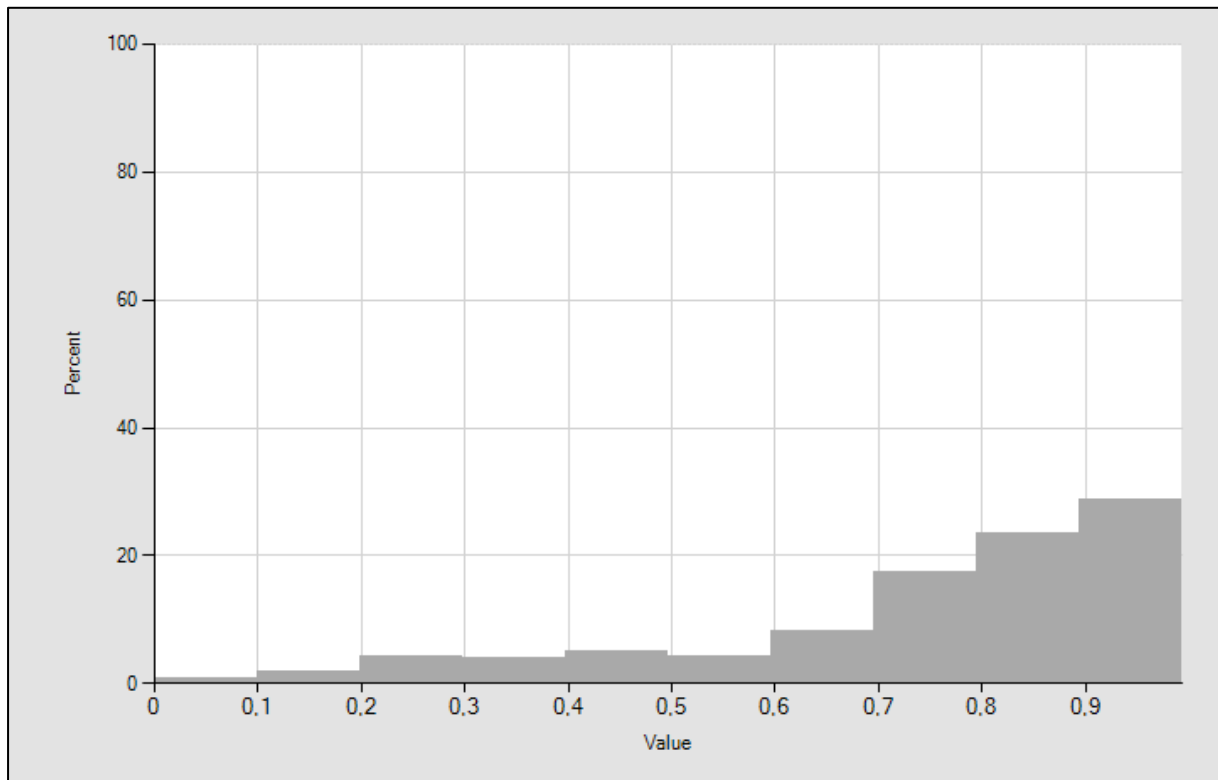


Abbildung 57: Histogramm der beim Training verwendeten Pixel (Rasterpunkte) mit dem Wert 1 und prognostiziertes Gefährdungspotenzial zwischen 0 (kein Gefährdungspotenzial) und 1 (hohes Gefährdungspotenzial)

Das Histogramm für die prognostizierten Werte an nur den Pixeln (Rasterzellen) mit einem angenommenen Wert von 1 in den Trainingsdaten ist im Gegensatz dazu idealerweise linksschief. Möglichst viele Pixel sollten mit einem hohen Gefährdungspotenzial gegen 1 prognostiziert werden. Auch dies ist auf das konkrete Histogramm (Abbildung 57) für das gerechnete Modell zutreffend.

Die folgende Tabelle 10 gibt Auskunft über den Anteil der einzelnen Faktoren an der Gesamtgewichtung des künstlichen neuronalen Netzes. Es lässt sich erkennen, welche Parameter den größten „Einfluss“ auf das Prognoseergebnis des Gefährdungspotenzials haben, d.h. welche Faktoren wichtig sind. Dazu wird zum einen die absolute Summe aller Gewichte berechnet, die von einem Ausgangsdatensatz im künstlichen neuronalen Netz ausgehen – die sogenannte „Connection Weight“. Zum anderen wird der relative Betrag der Summe der Gewichte berechnet, die von einem Ausgangsdatensatz ausgehen – die Gewichtung nach dem „Garson Algorithm“ (siehe Lit 15 und Lit 16).

Tabelle 10: Überblick über die verwendeten Modelleingangsdaten und ihrer Gesamtgewichtung im finalen Prognosemodell für das Gefährdungspotential - Methode 1: Summe der Gewichte als Connection Weights, Methode 2: Summe der Gesamtgewichte nach Garson's Algorithm

Modelleingangsdaten	Connection Weight	Garson's Algorithm
DGM20 – positive vertikale Wölbung	229,27	7,15
DGM20 – negative vertikale Wölbung	-1652,7	6,19
DGM20 – negative horizontale Wölbung	20,86	5,07
DGM20 – positive horizontale Wölbung	1486,96	3,73
DGM20 – Hangneigung	118,22	0,77
GÜK200 – Verformungsempfindlichkeitsklasse 2: ausgeprägt verformungsempfindlich	-21,56	0,73
DLM250 – Versiegelungsgrad	24,92	0,5
GÜK200 – Klüftungsfreundlichkeitsklasse 2: klüftungsfreundlich	-22,32	0,39
GÜK200 – Trennflächenklasse 2: mit Trennflächen	-20,23	0,21
GÜK200 – Gesteinsklasse 1: Festgestein	-4,93	0,14
DLM250 – Bewuchsgrad	-10,24	0,09
DGM20 – Fließakkumulation	-22,42	0,05

Dabei ist deutlich zu erkennen, dass vor allem die abgeleiteten Faktoren des DGM20 als wichtigste Parameter mit den größten Gewichten in das Modell eingehen: vertikale und horizontale Wölbung und Hangneigung. Den geringsten Einfluss der im Modell verwendeten Eingangsdaten hat die aus dem DGM20 abgeleitete Fließakkumulation.

Auf Grundlage des finalen Trainingsszenarios wurde das trainierte künstliche neuronale Netz für alle Pixel innerhalb des 1000-m-Gleispuffers in einem **Anwendungsszenario** angewendet und somit eine flächendeckende Prognose für das Modellierungsgebiet berechnet.

3.5 Ermittlung der gefährdeten Gleisabschnitte

3.5.1 Überblick

Die wie im Abschnitt 2.5.2 beschrieben berechneten Gefahrenklassen (nach Ansatz 1) bzw. das wie im Abschnitt 3.4.3 beschrieben berechnete Gefährdungspotenzial (nach Ansatz 2) geben prinzipiell nur an einer ganz bestimmte Lokalität (hier: Pixel mit 20 m x 20 m) Hinweise auf eine potenzielle Gefährdung. Prinzipiell sind für die zu ermittelnde Gefährdung der Bahngleise jedoch auch die im unmittelbaren, nahen Umfeld gelegenen Bereiche mit Gefährdung relevant.

Daher wurden im nächsten Bearbeitungsschritt die Bereiche mit den höchsten Gefahrenklassen (nach Ansatz 1) bzw. mit dem höchsten Gefährdungspotenzial (nach Ansatz 2) in verschiedenen Abständen gepuffert, um den Gefährdungsbereich im Umfeld der unmittelbar gefährdeten Lokalitäten auszuhalten.

Als Puffer- bzw. Einflussbereiche wurden 0 m (akute Gefährdung), 50 m, 100 m und 200 m gewählt. Mittels eines automatisierten Workflows (siehe Abbildung 58) mit dem „Model Builder“ im ArcGIS wurden alle Ergebnisraster automatisiert mit diesen Pufferwerten für bestimmte Schwellwerte im Ergebnisraster gepuffert. Für den Ansatz 1 wurde als Schwellwert die Gefahrenklasse 10 und größer für die stark und sehr stark gefährdeten Bereiche selektiert. Für den Ansatz 2 wurde als Schwellenwert ein berechnetes Gefährdungspotenzial von 0,75 und größer für potenziell gefährdete Bereiche selektiert. Im Ergebnis entstanden vier getrennte Polygon-Shapefile-Dateien, die den Pufferbereich von 0 m, 50 m, 100 m und 200 m umfassten.

Im Anschluss daran wurden diese Polygone mit dem Verlauf der Bahngleise verschnitten. Auch dies erfolgte automatisiert für das Modellgebiet über einen Workflow (siehe Abbildung 59) im „Model Builder“ von ArcGIS. Im Ergebnis dessen entstand eine Linien-Shapefile-Datei in welcher die Bahngleise entsprechend der Grenzen der Pufferpolygone verschnitten sind und der jeweilige Linienabschnitt den Wert des Puffers erhält.

Dabei ist jedoch insgesamt zu beachten, dass unberücksichtigt bleibt, ob sich die potenzielle Gefährdung hangaufwärts oder hangabwärts vom Bahngleis befindet, und ob somit eventuell gar keine Gefährdung vorliegen würde (für den Fall, dass die Gefährdung hangabwärts vom Bahngleis liegt). Zudem bleibt unberücksichtigt, ob sich eventuell Hindernisse oder andere Trennobjekte, wie zum Beispiel Straßen, Häuser, Mauern, Dämme oder auch Flussläufe, zwischen dem unmittelbaren gefährdeten Bereich und dem Bahngleis befinden. Auch für solche Fälle würde keine wirkliche Gefährdung der Bahngleise bestehen.

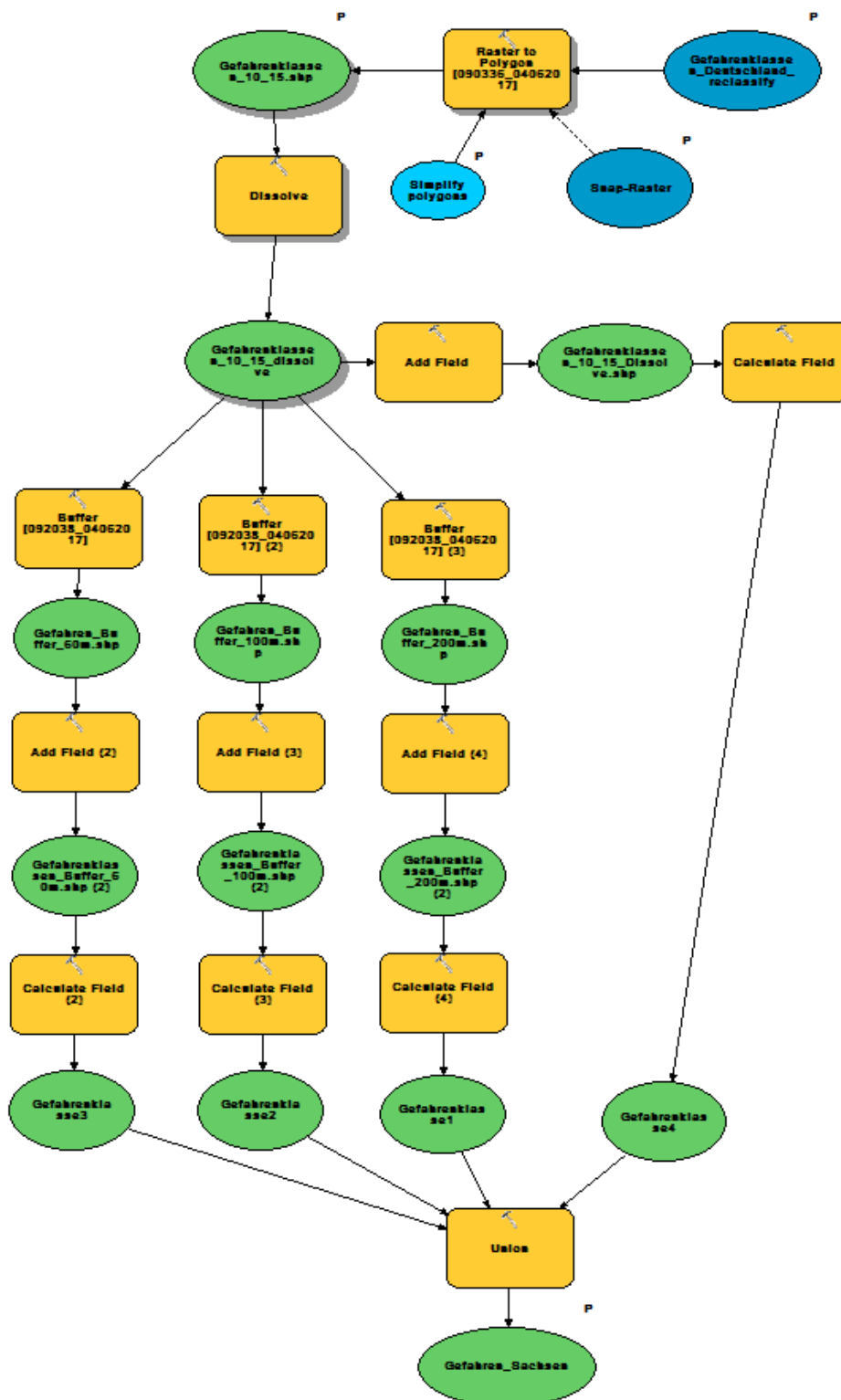


Abbildung 58: Workflow im „Model Builder“ von ArcGIS zur deutschlandweiten Erstellung von Pufferpolygone im 50 m, 100 m und 200 m Abstand um die Gefahrenklasse 10 und höher aus der Berechnung von Ansatz 1

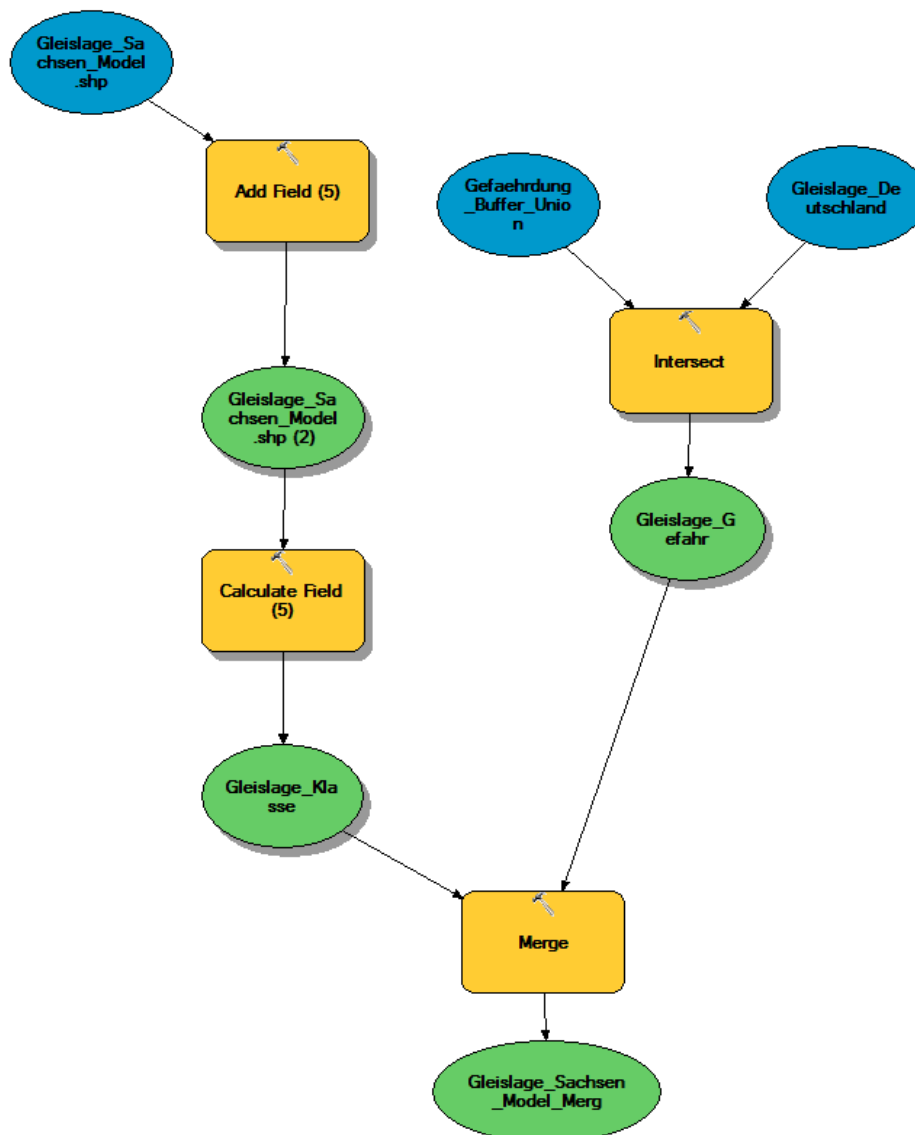


Abbildung 59: Workflow im „Model Builder“ von ArcGIS zum deutschlandweiten Verschnitt der Pufferpolygone im 50 m, 100 m und 200 m Abstand um die Gefahrenklasse 10 und höher aus der Berechnung von Ansatz 1 mit der deutschlandweiten Gleislage

3.5.2 Ansatz 1: Berechnung mittels Algorithmen/ Entscheidungsbäumen

Zur Darstellung der potenziell gefährdeten Gleisabschnitte auf Grundlage der Berechnung nach Ansatz 1 wurden die Pixel (Rasterzellen) mit einer Gefahrenklasse von größer bzw. gleich 10 mit 0 m, 50 m, 100 m und 200 m gepuffert. Die Gefahrenklassen 10 bis 15 stellen die beiden höchsten Klassenbereiche aus der ursprünglichen Gefahrenklassifizierung ohne Modifikatoren dar, welche mit 11 (stark gefährdet)

bzw. 14 (sehr stark gefährdet) eingestuft wurden. Durch Hinzunahme der Modifikatoren wäre maximal eine Abstufung auf 10 möglich – daher die Grenze bei 10.

Die folgende Abbildung 60 zeigt die erstellten Pufferbereiche beispielhaft für einen kleineren Gleisabschnitt im Teilbereich der Sächsischen Schweiz/dem Elbsandsteingebirge. Deutlich ist dabei zu erkennen, wie teilweise gepufferte Polygone die Gleislage schneiden, obwohl die Ursprungsgebiete mit einer Gefahrenklasse größer gleich 10 (in Rot, entspricht 0 m-Puffer) die Gleislage selbst nicht schneiden.



Abbildung 60: Erstellte Gefährdungsbereiche in 0 m, 50 m, 100 m und 200 m Abstand (Puffer) um die berechneten Bereiche mit einer Gefahrenklasse größer bzw. gleich 10 entsprechend Ansatz 1

3.5.3 Ansatz 2: Berechnung mittels multivariater Statistik/ künstlicher neuronaler Netze

Zur Darstellung der potenziell gefährdeten Gleisabschnitte auf Grundlage der Berechnung nach Ansatz 2 wurden die Pixel (Rasterzellen) mit einem Gefährdungspotenzial von größer bzw. gleich 0,75 (entspricht 75%) mit 0 m, 50 m, 100 m und 200 m gepuffert.

Die folgende Abbildung 60 zeigt die erstellten Pufferbereiche beispielhaft für einen kleineren Gleisabschnitt im Teilbereich der Sächsischen Schweiz/dem Elbsandsteingebirge. Im Vergleich zur Erstellung der Gefährdungsbereiche auf Grundlage der Berechnung nach Ansatz 1 ist deutlich zu erkennen, dass prinzipiell längere Gleisabschnitte als potenziell gefährdet eingestuft werden müssen, da sie im näheren Umfeld von Gebieten liegen, welche mit einem entsprechenden Gefährdungspotenzial prognostiziert wurden.



Abbildung 61: Erstellte Gefährdungsbereiche in 0m, 50 m, 100 m und 200 m Abstand (Puffer) um die berechneten Bereiche mit einem Gefährdungspotenzial von größer bzw. gleich 0,75 (75%) entsprechend Ansatz 2

4 Berechnungsergebnisse

4.1 Gefährdungspotenzial

4.1.1 Ansatz 1: Berechnung mittels Algorithmen/ Entscheidungsbäumen

In der folgenden Abbildung 62 bzw. Abbildung 63 ist das finale Berechnungsergebnis (Gefahrenklasse) nach dem 1. Ansatz beispielhaft für das Teilgebiet von Sachsen bzw. den Teilbereich der Sächsischen Schweiz/des Elbsandsteingebirges in Sachsen dargestellt.

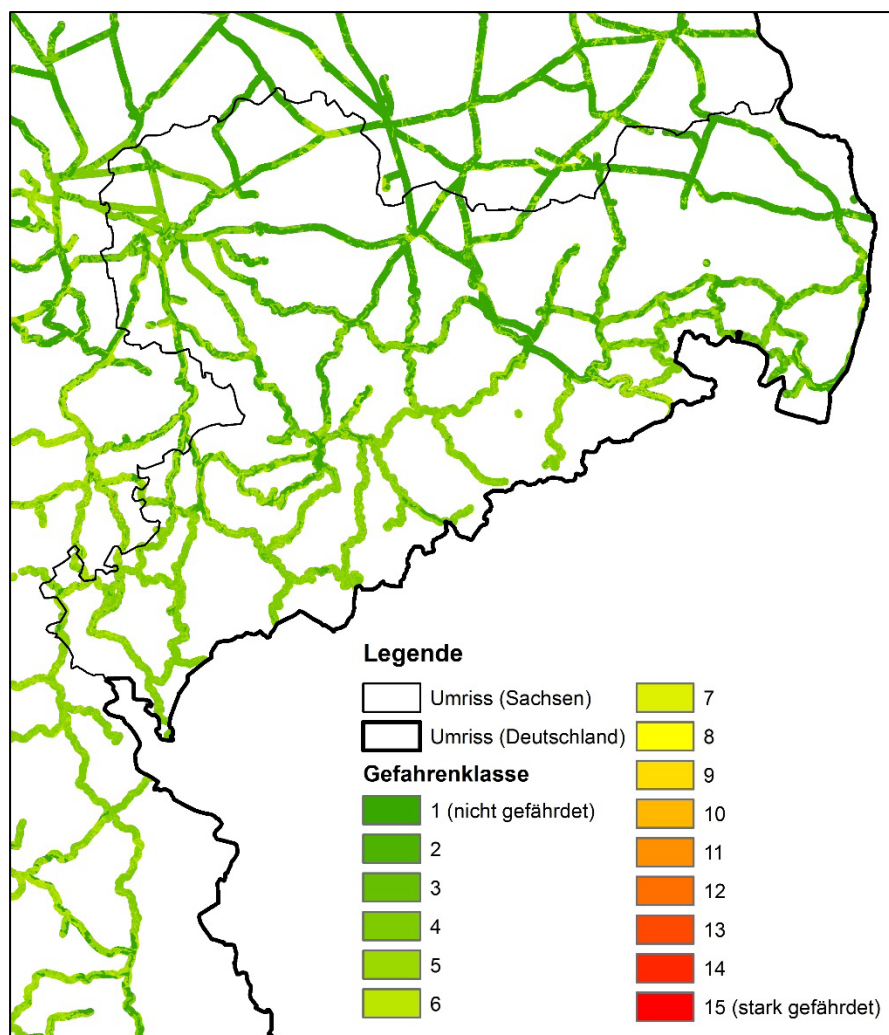


Abbildung 62: Berechnete finale Gefahrenklasse nach Ansatz 1 für Sachsen im 1000-m-Pufferbereich um die Bahngleise

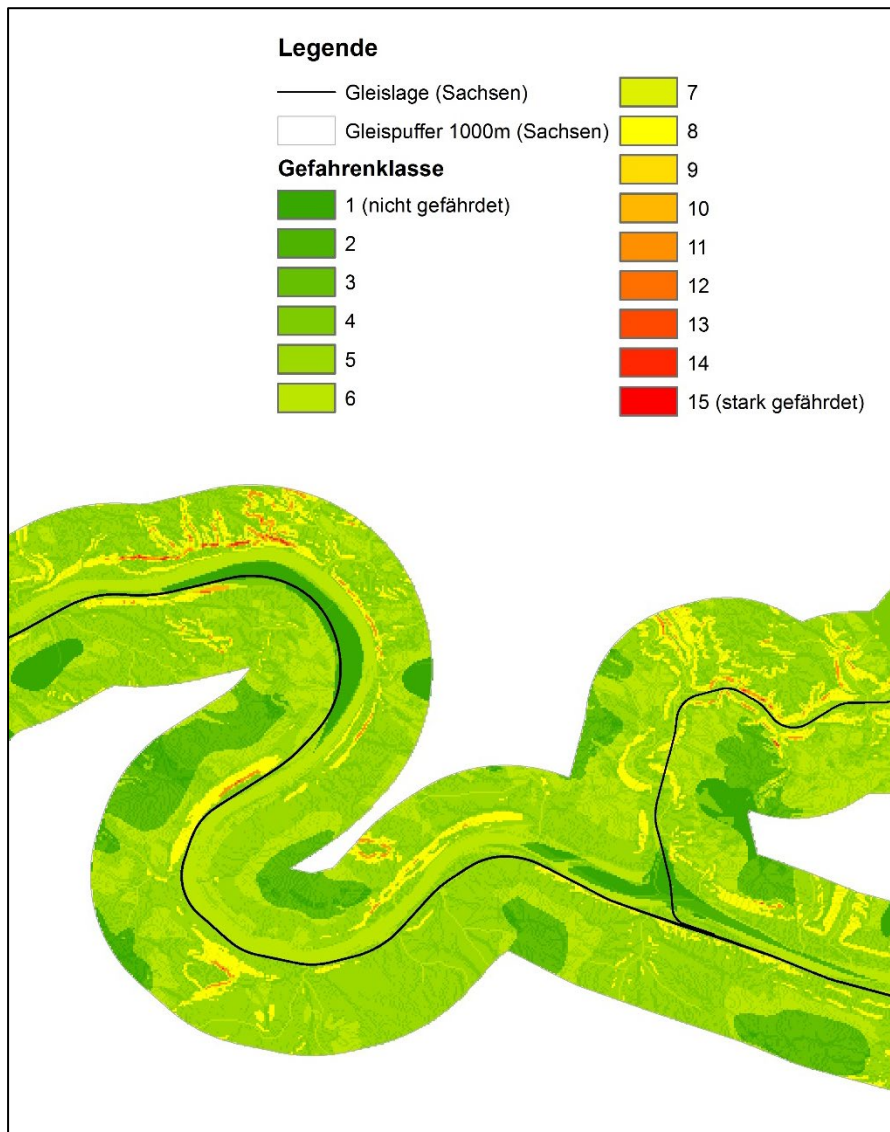


Abbildung 63: Berechnete finale Gefahrenklasse nach Ansatz 1 für den Teilbereich der Sächsischen Schweiz/Elbsandsteingebirge in Sachsen im 1000-m-Pufferbereich um die Bahngleise

4.1.2 Ansatz 2: Berechnung mittels multivariater Statistik/ künstlicher neuronaler Netze

In der folgenden Abbildung 64 und Abbildung 65 ist das finale Berechnungsergebnis (Gefährdungspotenzial) nach dem 2. Ansatz beispielhaft für das Teilgebiet von Sachsen bzw. den Teilbereich der Sächsischen Schweiz/des Elbsandsteingebirges in Sachsen dargestellt.

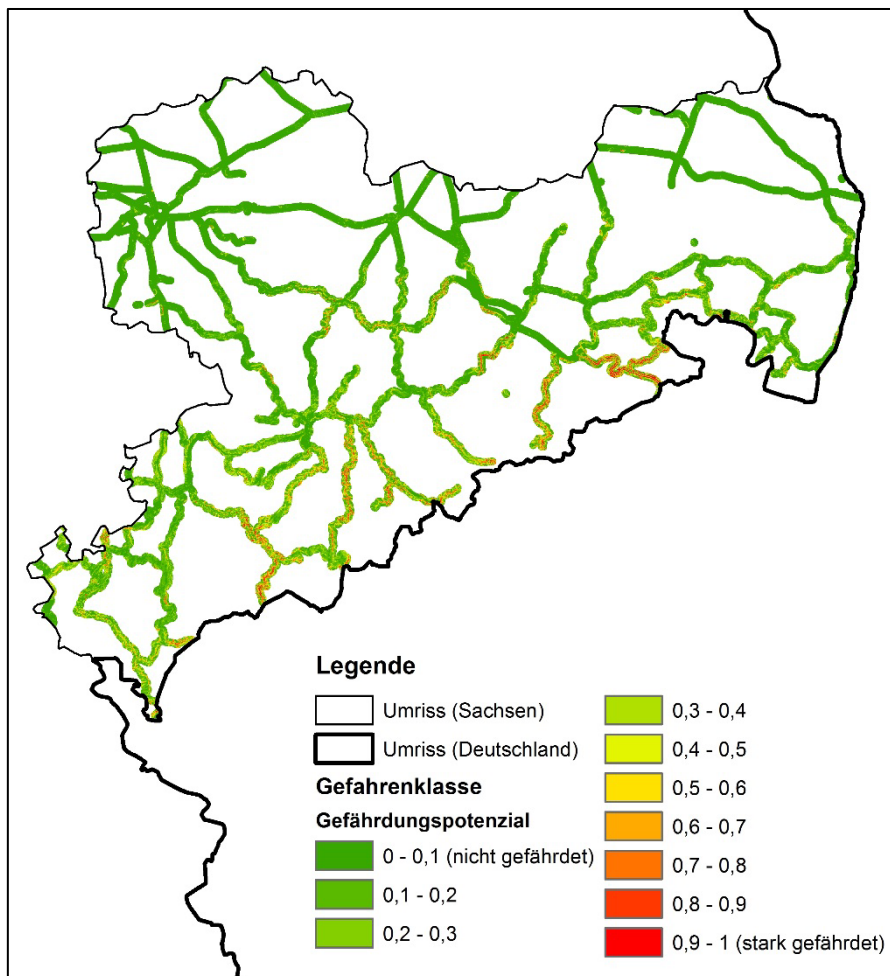


Abbildung 64: Berechnetes Gefährdungspotenzial nach Ansatz 2 für Sachsen im 1000-m-Pufferbereich um die Bahngleise

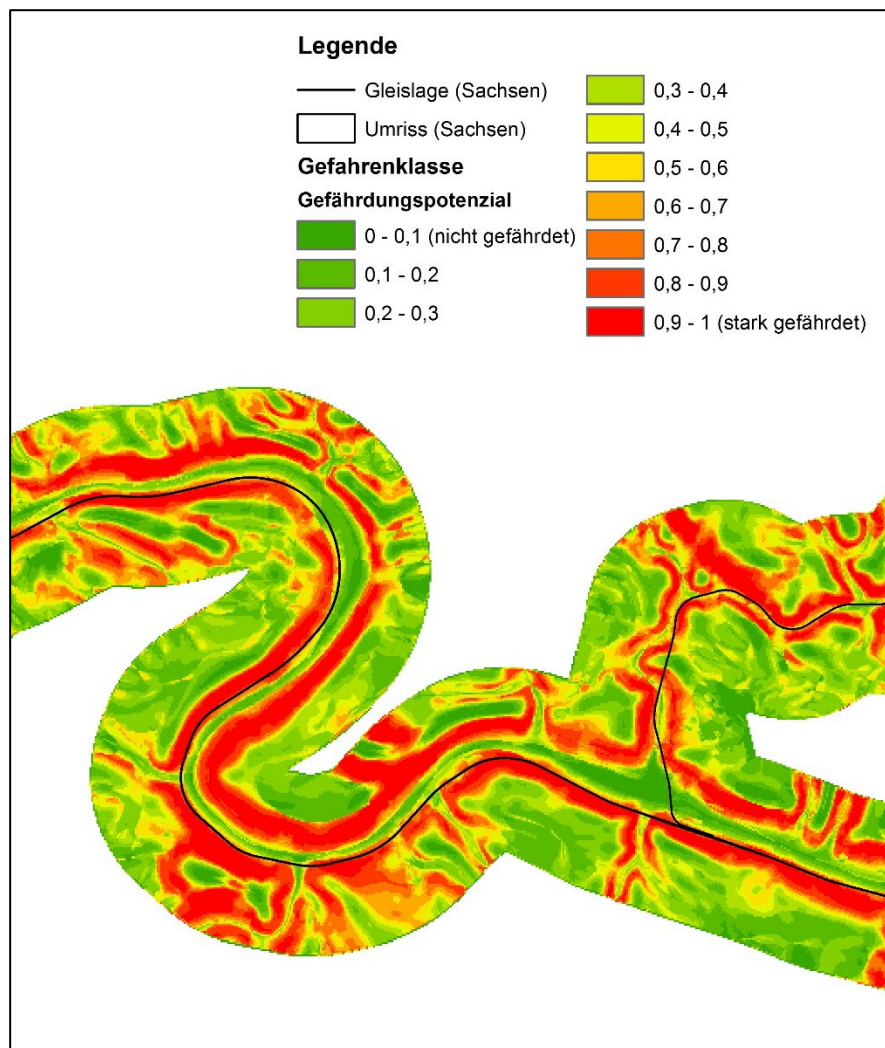


Abbildung 65: Berechnetes Gefährdungspotenzial nach Ansatz 2 für den Teilbereich der Sächsischen Schweiz/Elbsandsteingebirge in Sachsen im 1000-m-Pufferbereich um die Bahngleise

4.1.3 Vergleich der Ergebnisse

Prinzipiell ist im visuellen Vergleich der beiden Berechnungsergebnisse nach Ansatz 1 und Ansatz 2 auffällig, dass mit dem Ansatz 1 nur kleinere Hangbereiche mit hoher Gefahrenklasse ausgehalten werden. Das Verfahren nach Ansatz 2 stellt insgesamt größere Bereiche als potenziell gefährdet dar und schafft es dadurch besser, die generelle Gefährdung darzustellen, die von solchen Hängen für Massenschwerebewegungen immer ausgeht.

Um einen objektiven Vergleich der Berechnungsergebnisse durchzuführen, wurde an den bekannten selektierten Punkten aus dem Georiskokataster von Sachsen ermittelt, welche Gefahrenklasse nach Ansatz 1 bzw. welches Gefährdungspotenzial nach Ansatz 2 an diesen Lokalitäten jeweils berechnet wurde.

Die folgende Abbildung 66 gibt einen Überblick über die berechneten Gefahrenklassen 1 bis 15 an den Punkten (Lokalitäten) aus den beiden Georisikokatastern im Bereich von Sachsen. Idealerweise sollte hier die Verteilung linksschief sein, mit möglichst vielen Punkten in den Gefahrenklassen 10 bis 15. Der Hauptteil der Punkte ist jedoch in mittleren Gefahrenklassen von 4 bis 9 eingestuft worden. Dies kann mehrere Gründe haben: Zum ersten besteht die Möglichkeit, dass die dokumentierten Punkte aus dem Georisikokataster nicht selbst die Quelle der Gefährdung darstellen, sondern nur die Lokalität, an der die Gefahr eingewirkt hat. Diese könnte räumlich versetzt sein. Zum anderen wäre es möglich, dass bereits Gegenmaßnahmen an den Punkten aus dem Georisikokataster angewandt wurden und sich dies bereits in den veränderten Ausgangsdaten an diesen Stellen widerspiegelt, welche nicht mehr den Zustand des Parameters aufzeigen, bevor es zur dokumentierten Gefährdung an dieser Stelle kam. So könnten zum Beispiel Gegenmaßnahmen die Hangneigung verändert haben, was in einer veränderten Hangneigungsklassifizierung resultieren würde. Eine andere Gegenmaßnahme wäre die Veränderung des Bewuchses bzw. der Versiegelung, was auch in einer anderen Gefahrenklassifizierung resultieren würde.

Hauptgrund wird jedoch vermutlich die unzureichende Datengrundlage bei den verwendeten geologischen Daten (hier: GÜK200) sein. Diese bilden sehr oft kleinere Vorkommen von Lockergestein über Festgestein oder sonstiges nicht ab, welche aber an einer bestimmten Stelle eigentlich erst zum Schadensereignis geführt haben. Daher wird empfohlen, eine besser aufgelöste geologische Kartengrundlage (z.B. GK25) zu verwenden, welche zum einen die Geologie des Untergrundes detaillierter wiedergibt und zum anderen idealerweise auch Informationen zur Einfallrichtung der geologischen Schichten oder auch zur Schieferungsrichtung der geologischen Einheiten aufweist. Die Einfallrichtung der geologischen Einheiten und der Verschnitt mit der Einfallrichtung des Hanges ist ein wesentlicher Faktor für das Auftreten von Rutschungen, welcher bisher noch nicht in der Methodik von Ansatz 1 und auch nicht von Ansatz 2 beinhaltet ist (siehe auch Empfehlungen im Abschnitt 6.3). Ein weiterer Grund für die nicht optimale Vorhersage der Gefahrenklasse an den Punkten aus dem Georisikokataster wäre es auch, dass der Berechnungsalgorithmus an sich noch nicht optimal ist und entweder zusätzlich Daten notwendig sind, oder die Daten in anderer Form miteinander verknüpft werden müssen. Möglich wäre aber auch, dass die dokumentierten Ereignisse nicht hinreichend vorhergesagt werden können, weil ihnen andere Prozesse als die angenommenen Massenbewegungen (Hangrutschung bzw. Steinschlag) zugrunde liegen.

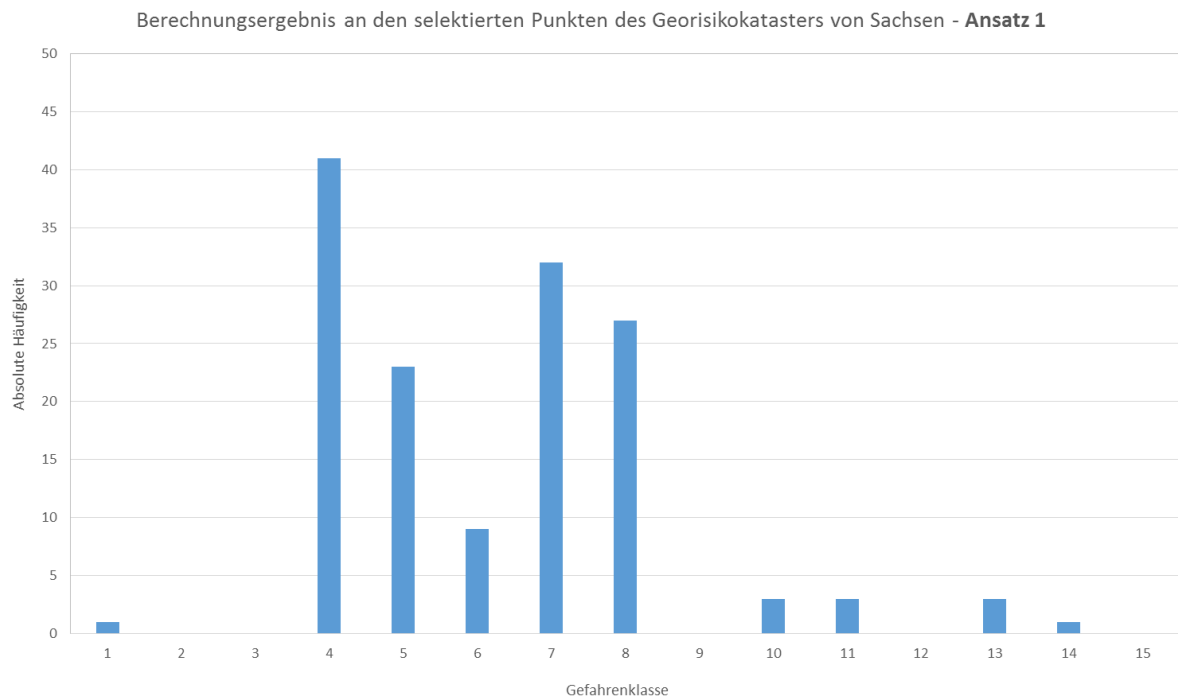


Abbildung 66: Histogramm mit der absoluten Häufigkeit der berechneten Gefahrenklasse an den selektierten Punkten des Georisikokatasters von Sachsen auf Grundlage des Ansatzes 1

Deutlich besser prognostiziert wird das Gefährdungspotenzial an den gegebenen, selektierten Punkten aus dem Georisikokataster von Sachsen mit dem Ansatz 2 und den künstlichen neuronalen Netzen. Die folgende Abbildung 65 gibt einen Überblick über die Verteilung des berechneten Gefährdungspotenzials an den Lokalitäten der Punkte aus dem Georisikokataster von Sachsen. Der Hauptanteil der Punkte wurde mit einem Gefährdungspotenzial von größer bzw. gleich 0,75 (i.e. 75%) berechnet.

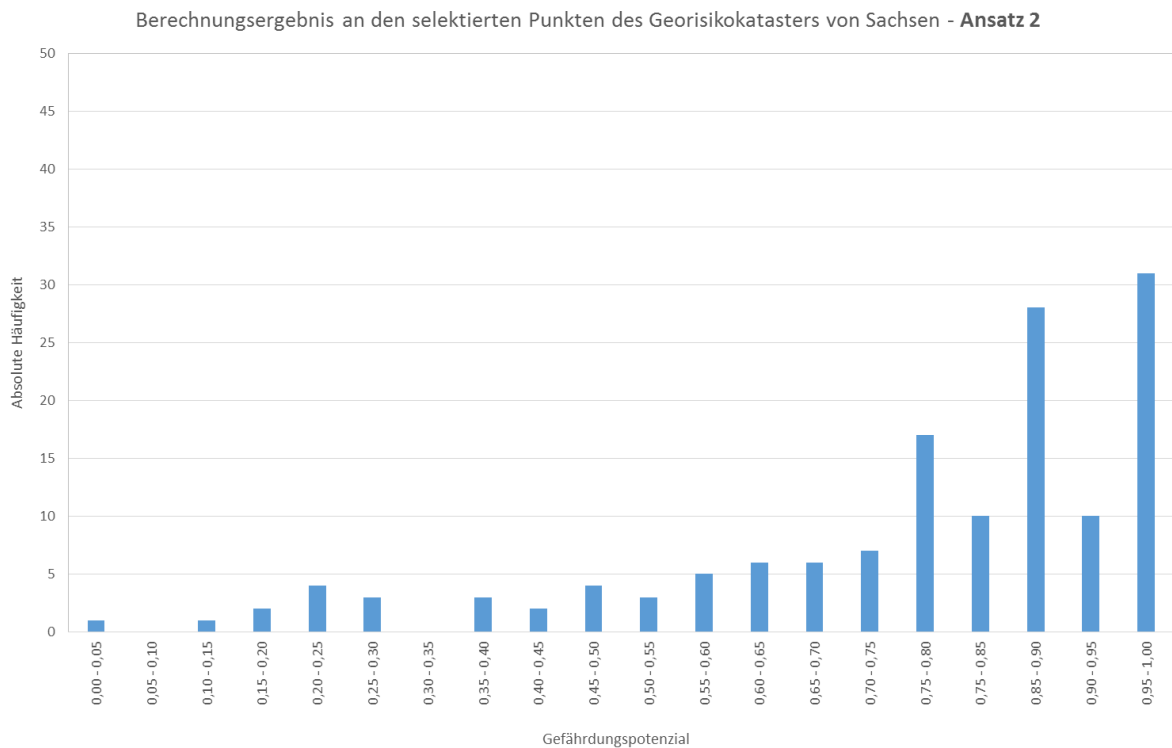


Abbildung 67: Histogramm mit der absoluten Häufigkeit des berechneten Gefährdungspotenzials an den selektierten Punkten des Georisikokatasters von Sachsen auf Grundlage des Ansatzes 2

Der Trennwert von 0,75 für die Unterscheidung von potenziell gering gefährdeten Bereichen (kleiner 0,75 Gefährdungspotenzial) und stark gefährdeten Bereichen (größer bzw. gleich 0,75 Gefährdungspotenzial) lässt sich auch anhand des kumulativen Histogramms in Abbildung 68 nachvollziehen. Bei der Histogramm-Klasse mit einem Gefährdungspotenzial zwischen 0,7 und 0,75 ist ein Knick in der Summenkurve zu erkennen. Somit kann 0,75 als „Cut-Off-Wert“ verwendet werden, um die beiden Bereiche voneinander zu trennen.

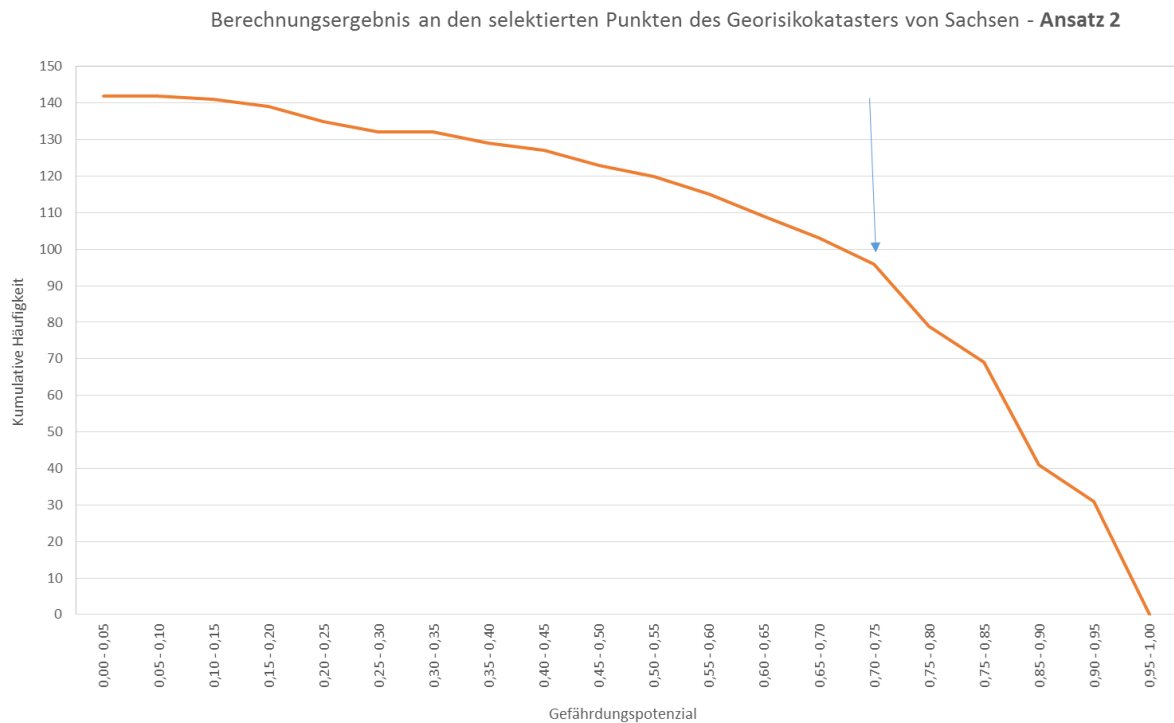


Abbildung 68: Histogramm mit der kumulativen Häufigkeit (von rechts nach links gerechnet) des berechneten Gefährdungspotenzials an den selektierten Punkten des Georisikokatasters von Sachsen auf Grundlage des Ansatzes 2

4.2 Gefährdete Gleisabschnitte

4.2.1 Ansatz 1: Berechnung mittels Algorithmen/ Entscheidungsbäumen

Wie bereits im Abschnitt 3.5.1 erläutert, wurden anschließend die erstellten Gefährdungsbereiche mit der Gleislage verschnitten, um einen Überblick über die Gleisabschnitte zu erhalten, welche direkt sowie in einem Umkreis von 50 m, 100 m oder 200 m um Bereiche mit einer Gefahrenklassen größer bzw. gleich 10 liegen. Eine deutschlandweite Karte der gefährdeten Gleisabschnitte ist in der Abbildung 69 zu finden.

Diese Gefährdungsbereiche sind zudem in der folgenden Abbildung 70 für das Teilgebiet Sachsen bzw. in der Abbildung 71 für den Teilbereich der Sächsischen Schweiz/dem Elbsandsteingebirge in Sachsen dargestellt.

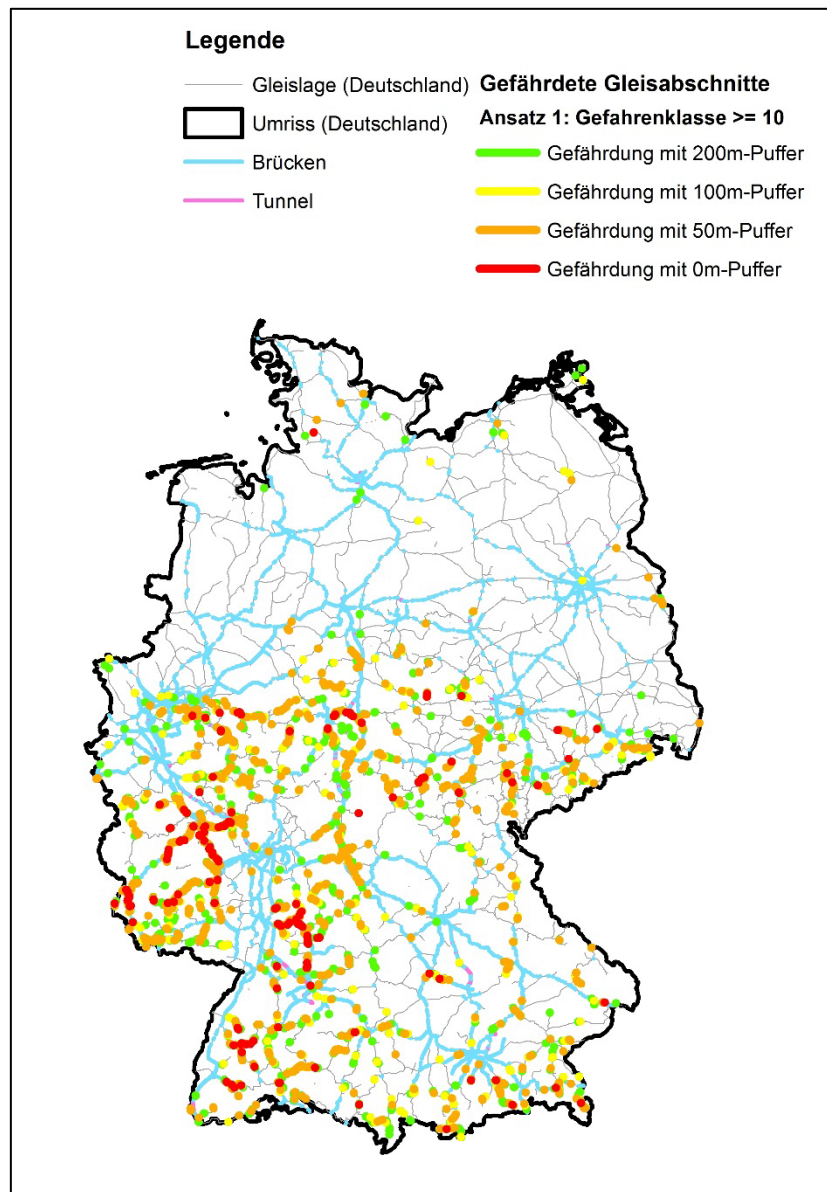


Abbildung 69: Deutschlandweite Darstellung der Gleisabschnitte, die direkt im Bereich der berechneten Gefahrenklassen größer bzw. gleich 10 liegen oder in einem Umkreis (Puffer) von 50, 100 oder 200 m davon entfernt nach Ansatz 1

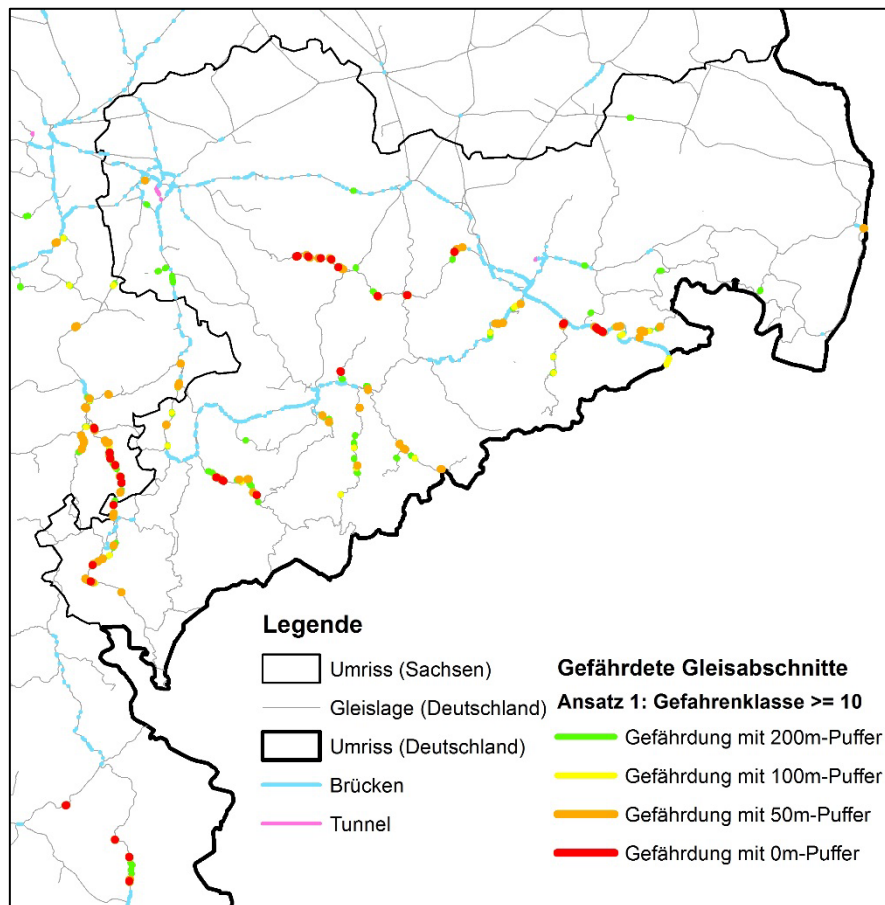


Abbildung 70: Darstellung der Gleisabschnitte, die direkt im Bereich der berechneten Gefahrenklassen größer bzw. gleich 10 liegen oder in einem Umkreis (Puffer) von 50, 100 oder 200 m davon entfernt für das Teilgebiet Sachsen nach Ansatz 1

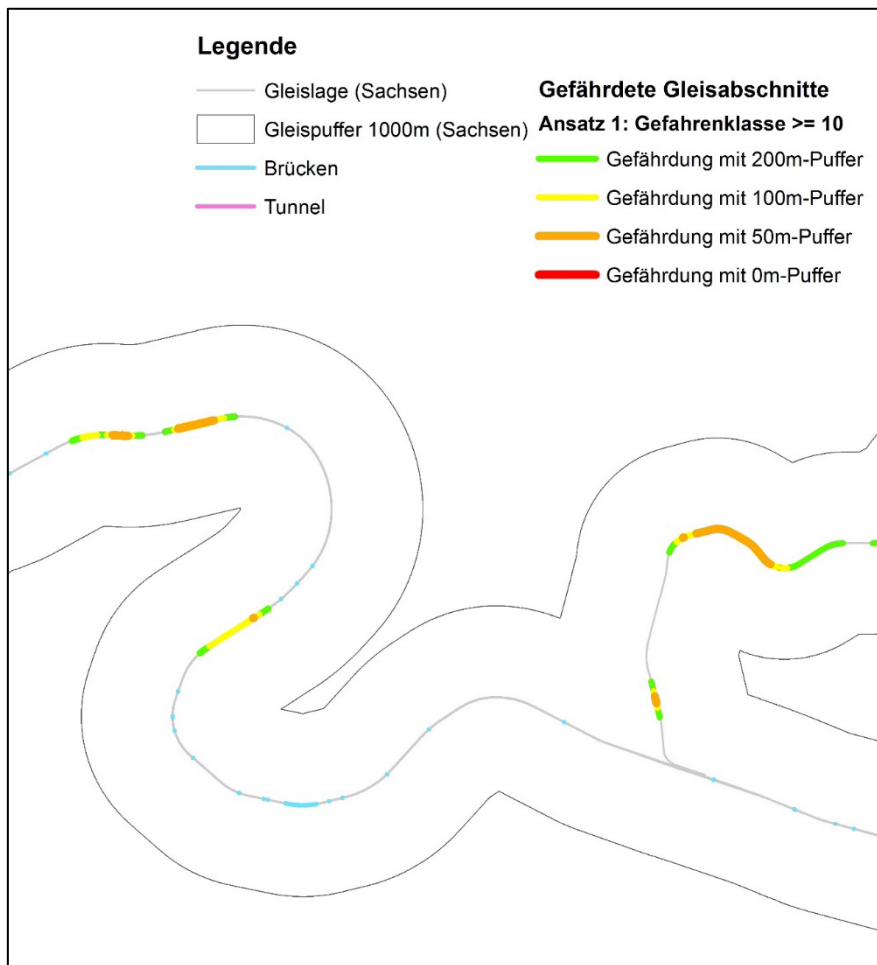


Abbildung 71: Darstellung der Gleisabschnitte, die direkt im Bereich der berechneten Gefahrenklassen größer bzw. gleich 10 liegen oder in einem Umkreis (Puffer) von 50, 100 oder 200 m davon entfernt für den Teilbereich der Sächsischen Schweiz/Elbsandsteingebirge in Sachsen nach Ansatz 2

4.2.2 Ansatz 2: Berechnung mittels multivariater Statistik/ künstlicher neuronaler Netze

Ähnlich wie für den Ansatz 1, wurden auch für den Ansatz 2 die Gefährdungsbereiche mit den Gleisabschnitten verschnitten, um besser einen Überblick über die gefährdeten Abschnitte der Gleise zu erhalten, welche direkt sowie in einem Umkreis von 50 m, 100 m und 200 m um Bereiche mit einem Gefahrenpotenzial von größer bzw. gleich 0,75 liegen.

Diese Gefährdungsbereiche sind in der folgenden Abbildung 72 für das Teilgebiet Sachsen bzw. in der Abbildung 73 für den Teilbereich der Sächsischen Schweiz/dem Elbsandsteingebirge in Sachsen dargestellt.

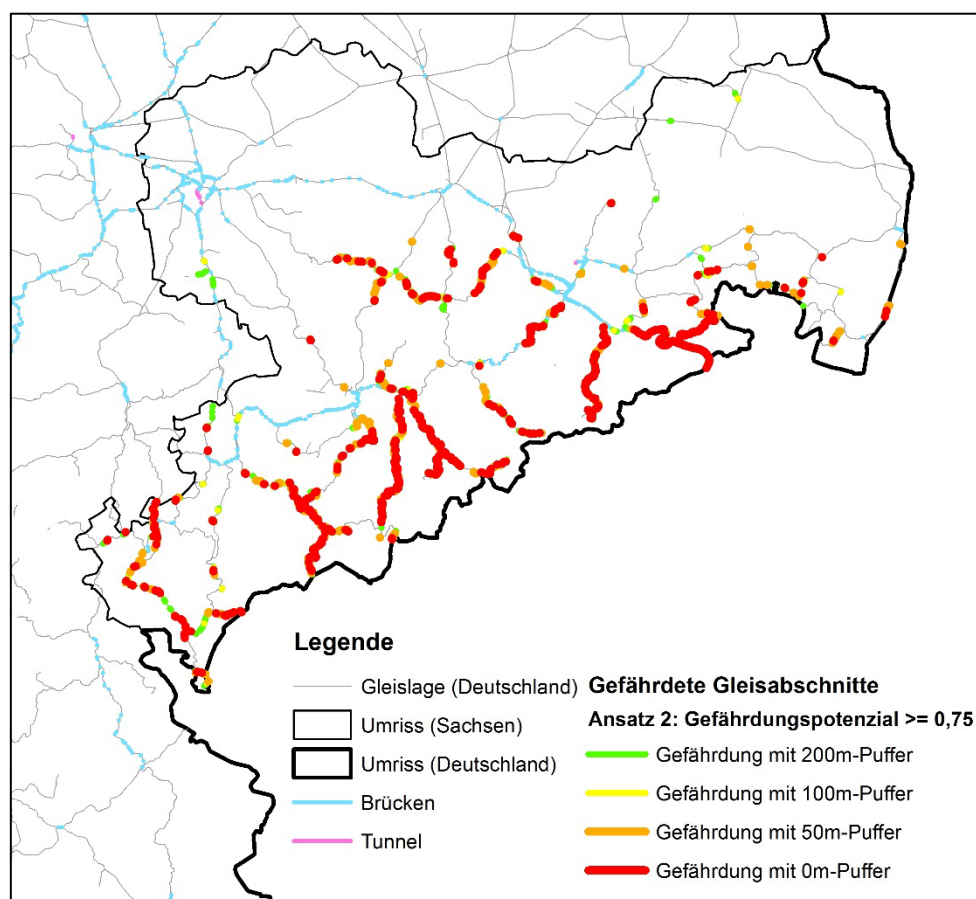


Abbildung 72: Darstellung der Gleisabschnitte die direkt im Bereich des berechneten Gefährdungspotenzials größer bzw. gleich 0,75 (75%) liegen oder in einem Umkreis (Puffer) von 50, 100 oder 200 m davon entfernt für das Teilgebiet Sachsen nach Ansatz 2

Im Vergleich zu Abbildung 70 wird dabei deutlich, dass vor allem die Gleisabschnitte im südlichen Sachsen mit generell steileren Hängen prinzipiell in Bereichen mit höherem Gefährdungspotenzial liegen, so dass längere Gleisabschnitte mit Hilfe des Ansatzes 2 als gefährdet klassifiziert wurden. Im nördlichen Sachsen, mit geringeren Hangneigungen, gibt es dahingegen nicht so viele Unterschiede zwischen den herausgearbeiteten gefährdeten Gleisabschnitten im Vergleich zwischen Ansatz 1 und Ansatz 2.

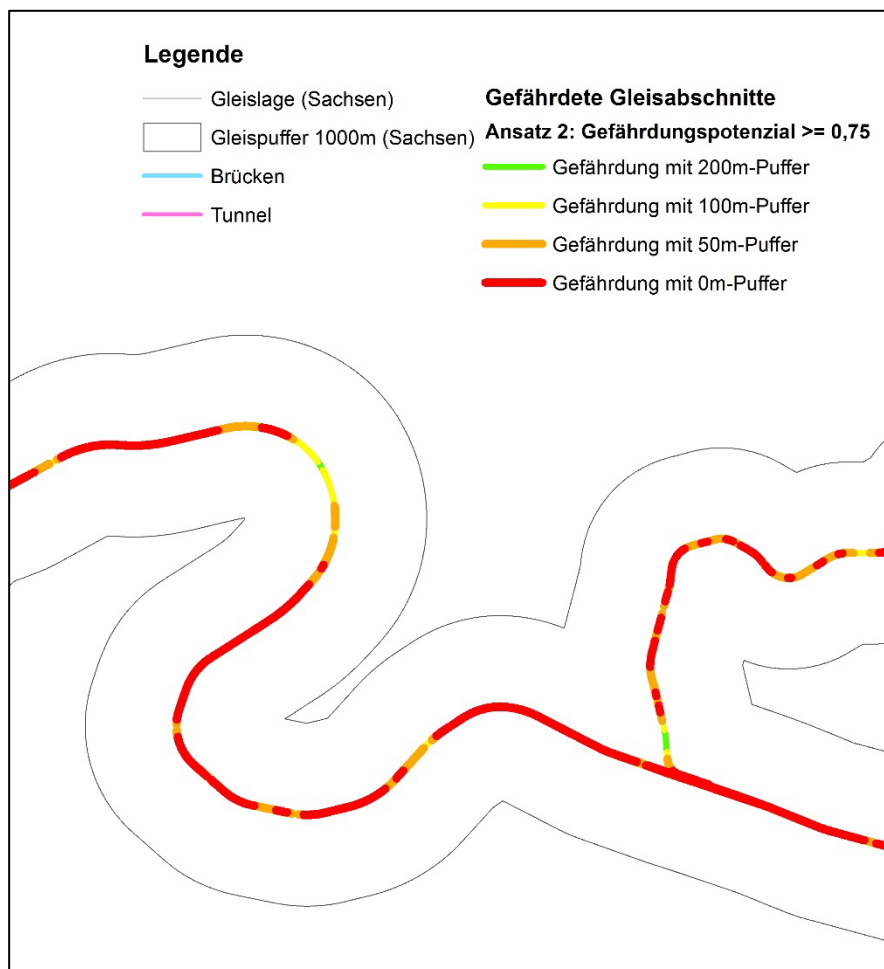


Abbildung 73: Darstellung der Gleisabschnitte, die direkt im Bereich des berechneten Gefährdungspotenzials größer bzw. gleich 0,75 (75%) liegen oder in einem Umkreis (Puffer) von 50, 100 oder 200 m davon entfernt für den Teilbereich der Sächsischen Schweiz/Elbsandsteingebirge in Sachsen nach Ansatz 2

4.2.3 Vergleich der Ergebnisse

Wie bereits erwähnt, fällt im visuellen Vergleich der Ausweisung der gefährdeten Gleisbereiche auf, dass deutlich mehr Gleisabschnitte auf Grundlage der erstellten Pufferbereiche des berechneten Gefährdungspotenzials von Ansatz 2 als gefährdet klassifiziert wurden als im Ansatz 1.

Um sich ein objektives Bild zu verschaffen, wurden Histogramme erstellt, welche die Summe der bekannten Ereignisse aus dem Georisikokataster darstellen, die in 0 m, 50 m, 100 m oder 200 m Abstand von Bereichen mit einer berechneten Gefahrenklasse von größer/gleich 10 (Ansatz 1, siehe Abbildung 74) bzw. von Bereichen mit einem prognostizierten Gefährdungspotenzial von größer/gleich 0,75 (i.e. 75%) (Ansatz 2, Abbildung 75) liegen.

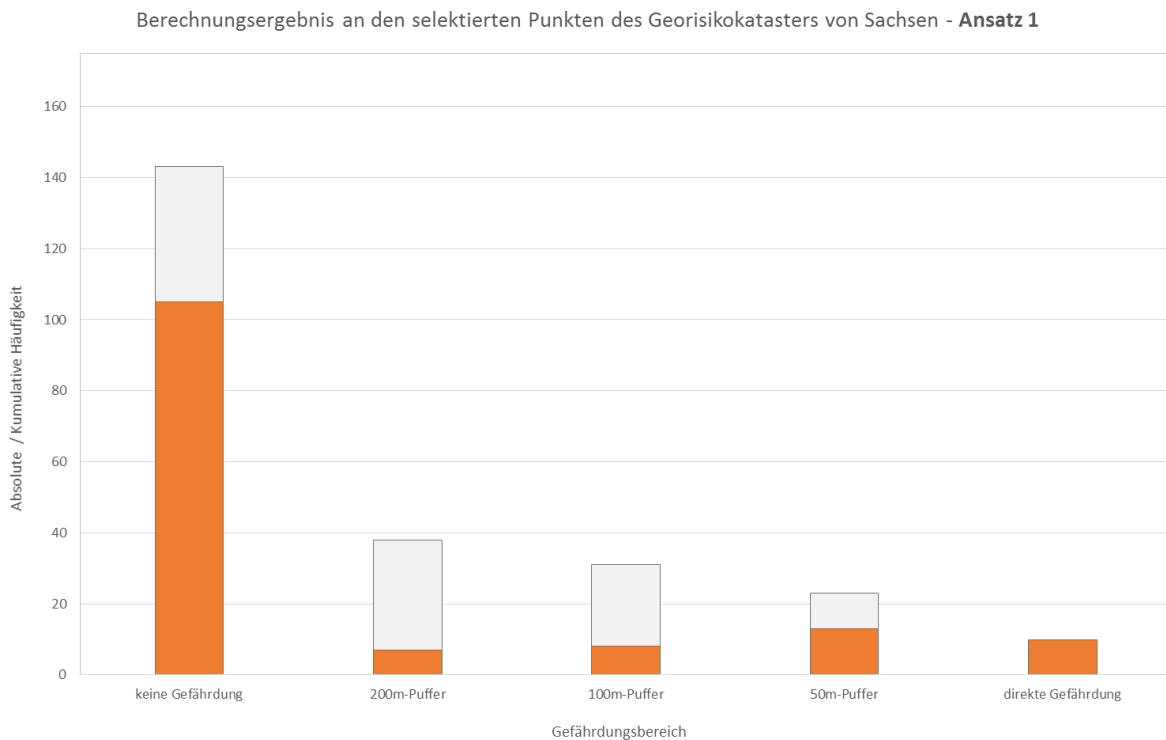


Abbildung 74: Histogramm mit der absoluten (in Orange) und kumulativen (in Grau, von rechts nach links gerechnet) Häufigkeit der selektierten Punkte des Georisikokatasters von Sachsen, mit welcher sich diese in eine der ermittelten Gefahrenzone (0 m, 50 m, 100 m, 200 m) um Bereiche mit einer berechneten Gefahrenklasse größer bzw. gleich 10 entsprechend Ansatz 1 befinden

Die Verteilung der Histogramme wäre im Idealfall erneut linksschief. Im Vergleich der Histogramme in Abbildung 74 und Abbildung 75 wird deutlich, dass mit Hilfe des Ansatzes 2 deutlich bessere Ergebnisse bei der Vorhersage bzw. bei der Klassifizierung der Gefährdungsbereiche erzielt wurden, da eine deutlich höhere Anzahl der bekannten Ereignisse aus dem Georisikokataster von Sachsen in einem als potenziell gefährdet prognostizierten Bereich liegt (direkt gefährdet).

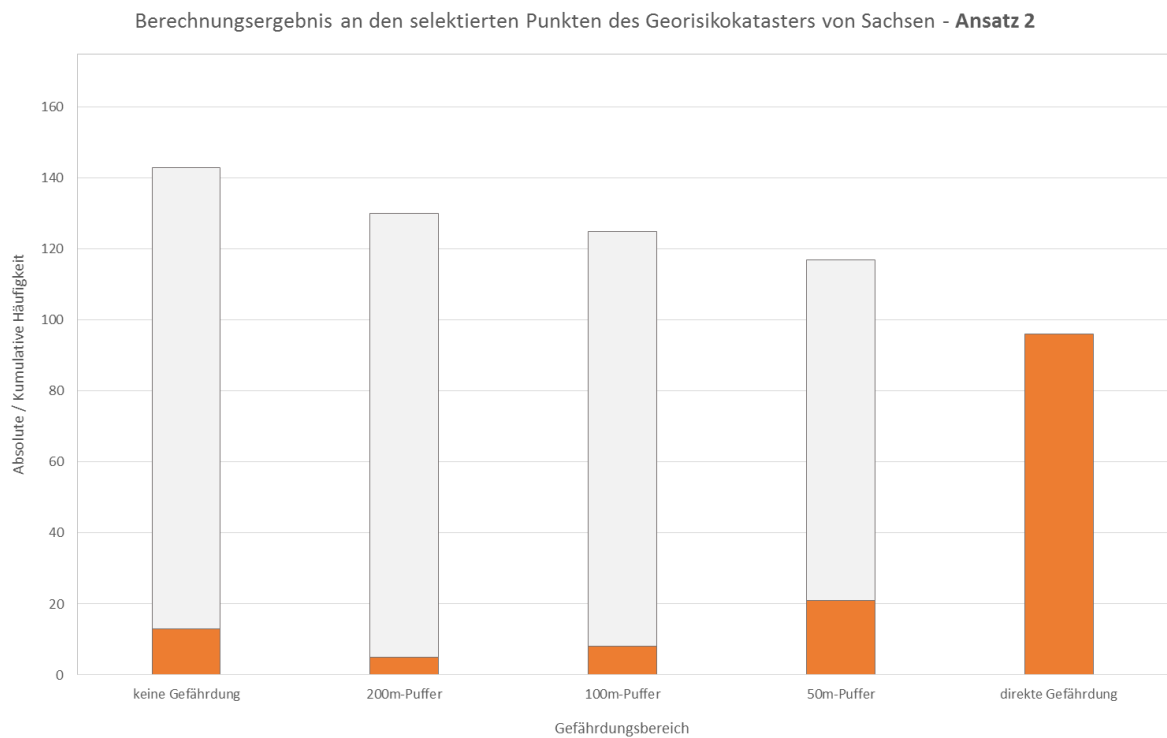


Abbildung 75: Histogramm mit der absoluten (in Orange) und kumulativen (in Grau, von rechts nach links gerechnet) Häufigkeit der selektierten Punkte des Georisikokatasters von Sachsen, mit welcher sich diese in eine der ermittelten Gefahrenzone (0 m, 50 m, 100 m, 200 m) um Bereiche mit einem berechneten Gefährdungspotenzial größer bzw. gleich 0,75 (75%) entsprechend Ansatz 2 befinden

Als Zusammenfassung der Ausweisung von gefährdeten Gleisabschnitten gibt die folgende Tabelle 11 einen Überblick über die Gesamtlängen der mit den verschiedenen Puffern als gefährdet ausgewiesenen Bahnstrecken für Gesamt-Deutschland nach Ansatz 1 und für Sachsen nach Ansatz 1 und 2 zum unmittelbaren Vergleich.

Tabelle 11: Überblick über die Gesamtlängen der Streckenabschnitte für Deutschland nach Ansatz 1 und Sachsen nach Ansatz 1 und 2, welche innerhalb eines Puffers von 0 m, 50 m, 100 m und 200 m entfernt von einem Bereich mit einer Gefahrenklasse von größer bzw. gleich 10 (nach Ansatz 1) oder einem Bereich mit einem Gefährdungspotentials größer bzw. gleich 0,75 (nach Ansatz 2) liegen

	Deutschland		Sachsen			
	Ansatz 1		Ansatz 1		Ansatz 2	
Gleislage	[km]	[%]	[km]	[%]	[km]	[%]
<i>insgesamt</i>	55348,2	100,00	3657,3	100,00	3657,3	100,00
<i>keine Gefährdung</i>	53179,8	96,08	3563,6	97,44	3091,6	84,53
<i>Gefährdung im 200-m-Puffer</i>	1034,2	1,87	53,5	1,46	137,6	3,76
<i>Gefährdung im 100-m-Puffer</i>	387,2	0,70	19,8	0,54	93,1	2,54
<i>Gefährdung im 50-m-Puffer</i>	669,7	1,21	19,2	0,52	170,3	4,66
<i>direkte Gefährdung (0-m-Puffer)</i>	77,2	0,14	1,2	0,03	164,7	4,50

Deutschlandweit wurden nach dem Ansatz 1 mit den Entscheidungsbäumen insgesamt etwa 3,9% des Streckennetzes als gefährdet klassifiziert. Beim einem Vergleich der beiden Ansätze 1 und 2 in Sachsen sind 2,6% des Streckennetzes nach Ansatz 1 gefährdet und 15,5% des Streckennetzes nach Ansatz 2 mit Hilfe der künstlichen neuronalen Netze.

Direkt gefährdet sind deutschlandweit 0,14% des Streckennetzes nach Ansatz 2. Für das Teilgebiet des Streckennetzes von Sachsen sind nach Ansatz 1 0,03% direkt gefährdet und im Vergleich dazu nach Ansatz 2 4,50%.

5 Gefahrenhinweiskarten

5.1 Gefahrenhinweiskarte für Deutschland

Basierend auf den Modellierungsergebnissen des Ansatzes 1 (wissensbasiert) wurde eine deutschlandweite Gefahrenhinweiskarte im Maßstab 1:1.000.000 in der Größe A0 erstellt. Diese Karte ist im Anhang 1 zu finden und zudem außermaßstäblich in der Abbildung 76 dargestellt.

Zur Orientierung ist im Hintergrund der Karte eine vereinfachte topographische Karte auf Grundlage von OpenStreetMap-Daten dargestellt, welche über die Esri-Hintergrunddaten in ArcGIS zur Verfügung stehen.

Darüber abgebildet ist das Berechnungsergebnis nach Ansatz 1 entsprechend Abschnitt 3.1.1. Die Gefahrenklassen sind als Rasterdaten in transparenten Farben von grün (nicht gefährdet) bis rot (sehr stark gefährdet) dargestellt.

Zur besseren Hervorhebung der Gefährdung wurden darüber die gefährdeten Gleisbereiche entsprechend Abschnitt 3.2.1 auf die Karte gedruckt. Die gefährdeten Gleisbereiche sind als Linien-Vektordaten in kräftigen Farben von grün (nicht gefährdet) bis rot (sehr stark gefährdet) dargestellt.

Komplettiert wird die Übersichtskarte von einem kurzen Text mit der Erläuterung des Karteninhaltes und der Methodik sowie der Abbildung mit dem Klassifikationsschema der Gesteinsklasse und der Hangneigungsklasse und der Abbildung mit dem wissensbasierten Schema zur Ermittlung der „Modifikatoren“ der Gefahrenklasse.

Die Karte steht zudem digital als Mxd-Datei für ArcGIS 10.2.2 und höhere Versionen zur Verfügung.

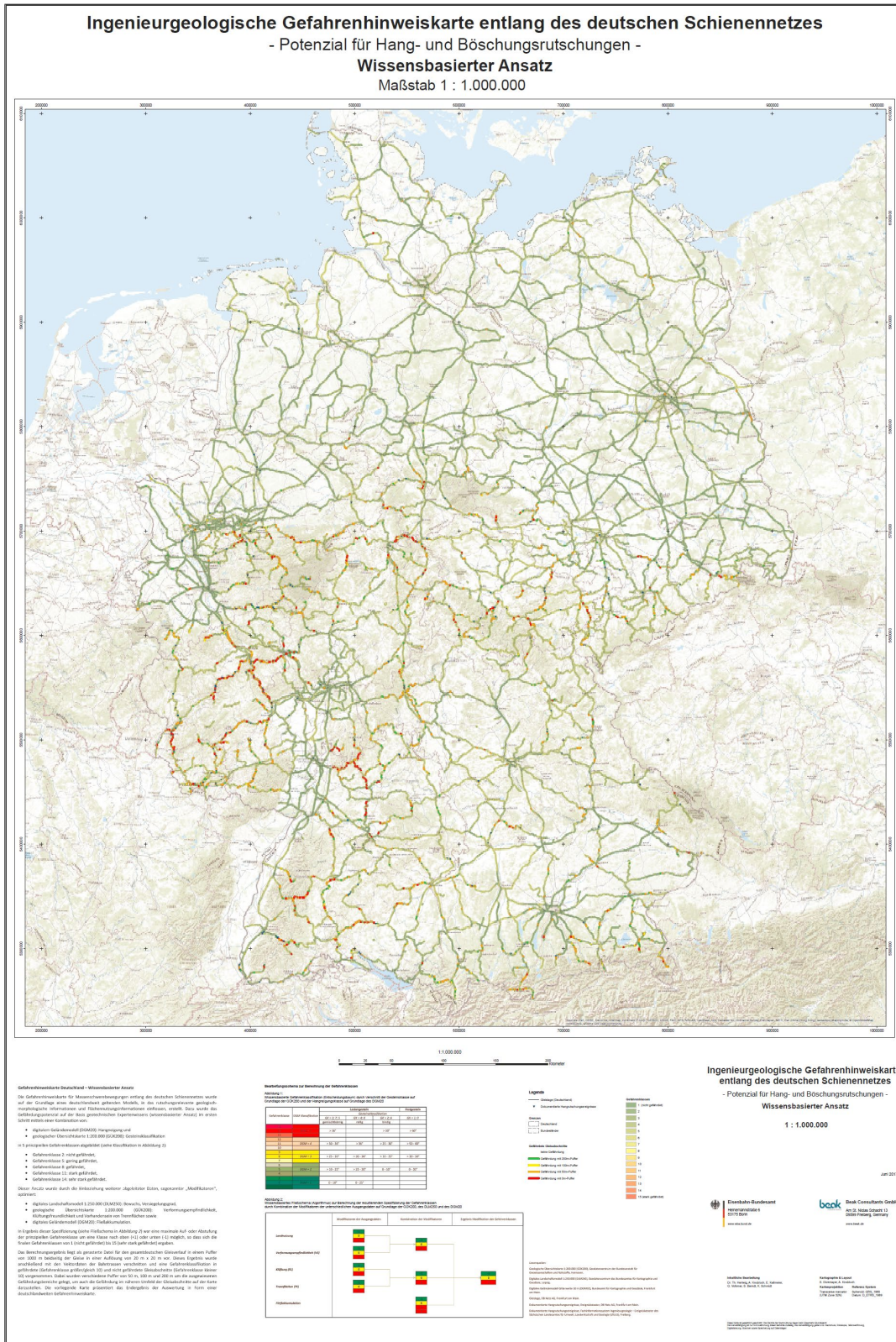


Abbildung 76: Ingenieurgeologische Gefahrenhinweiskarte entlang des deutschen Schienennetzes

5.2 Gefahrenhinweiskarte für Sachsen

Zum Vergleich der Berechnungsergebnisse des Ansatzes 1 (wissensbasiert) und 2 (datenbasiert) wurde eine sachsenweite Gefahrenhinweiskarte im Maßstab 1:500.000 in der Größe A0 erstellt. Dazu sind auf der Karte zwei Kartenrahmen zu finden – mit jeweils einer sachsenweiten Teilkarte für jeden der beiden Ansätze. Diese gesamte Karte ist im Anhang 2 zu finden und zudem außermaßstäblich in der Abbildung 77 dargestellt.

Zur Orientierung ist im Hintergrund der beiden Teilkarten eine vereinfachte topographische Karte auf Grundlage von OpenStreetMap-Daten dargestellt, welche über die Esri-Hintergrunddaten in ArcGIS zur Verfügung stehen.

Darüber abgebildet ist das Berechnungsergebnis nach Ansatz 1 entsprechend Abschnitt 3.1.1 bzw. nach Ansatz 2 entsprechend Abschnitt 3.1.2. Die Gefahrenklassen sind als Rasterdaten in transparenten Farben von grün (nicht gefährdet) bis rot (sehr stark gefährdet) dargestellt.

Zur besseren Hervorhebung der Gefährdung wurden darüber die gefährdeten Gleisbereiche entsprechend Abschnitt 3.2.1 bzw. 3.2.2 auf die Karte gedruckt. Die gefährdeten Gleisbereiche sind als Linien-Vektordaten in kräftigen Farben von grün (nicht gefährdet) bis rot (sehr stark gefährdet) dargestellt.

Komplettiert wird die Übersichtskarte von einem kurzen Text mit der Erläuterung des Karteninhaltes und der Methodik sowie der Abbildung mit dem Klassifikationsschema der Gesteinsklasse und der Hangneigungsklasse, der Abbildung mit dem wissensbasierten Schema zur Ermittlung der „Modifikatoren“ der Gefahrenklasse und einer Abbildung mit dem Modellierungsschema mit Hilfe des künstlichen neuronalen Netzes.

Die Karte steht zudem digital als Mxd-Datei für ArcGIS 10.2.2 und höhere Versionen zur Verfügung.

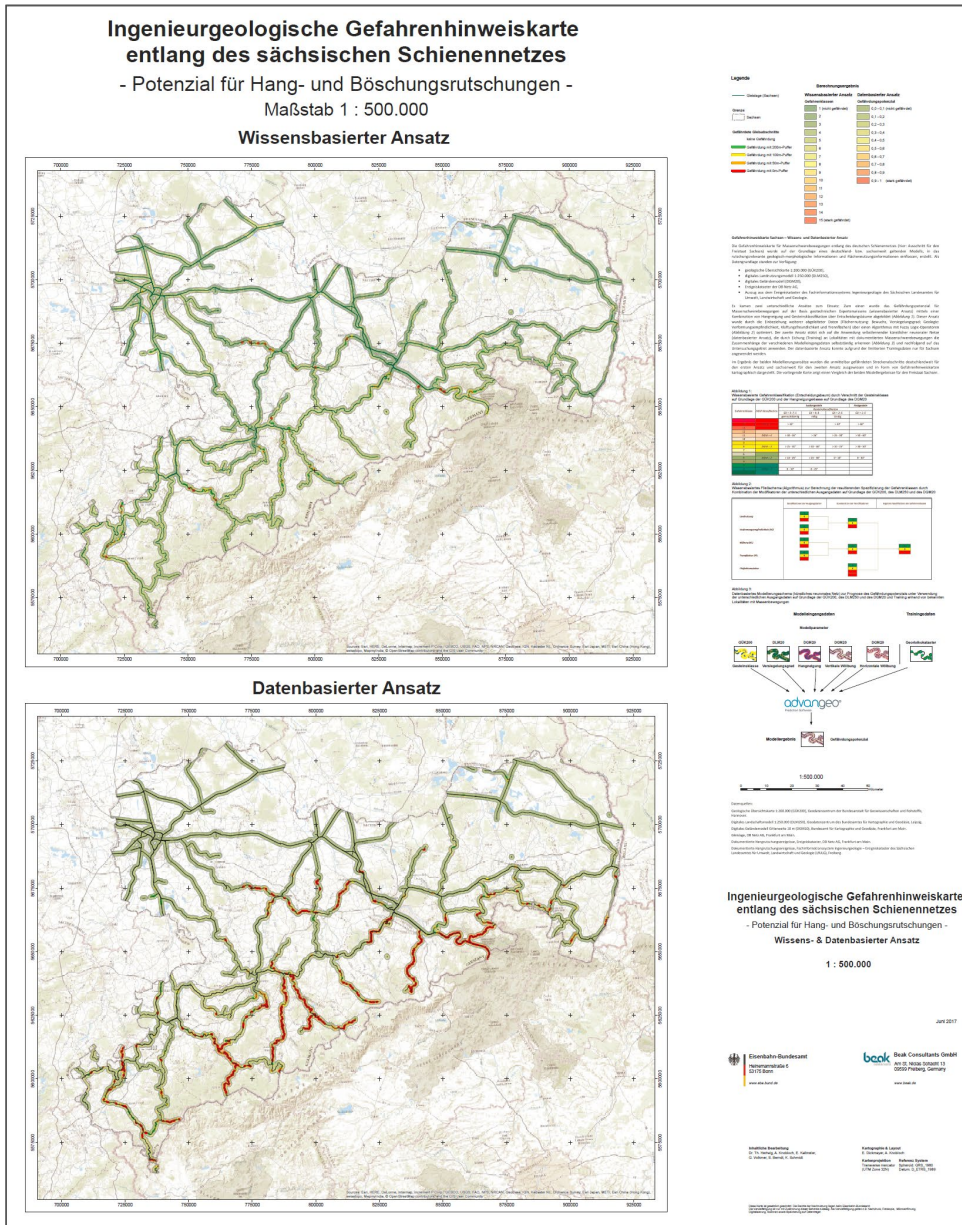


Abbildung 77: Ingenieurgeologische Gefahrenhinweiskarte entlang des sächsischen Schienennetzes

6 Schlussfolgerungen

6.1 Zusammenfassung der Ergebnisse

Das Projekt umfasste die Erstellung einer Gefahrenhinweiskarte für Massenschwerebewegungen entlang des deutschen Schienennetzes auf der Grundlage eines deutschlandweit geltenden ingenieurgeologischen Modells, in das relevante morphologisch-geologische und Flächennutzungsinformationen einfließen. Als Datengrundlage standen zur Verfügung:

- geologische Übersichtkarte GÜK200,
- digitales Landschaftsmodell DLM250,
- digitales Geländemodell DGM25 und DGM10,
- Ereigniskataster der Deutschen Bahn,
- Auszug aus dem Ereigniskataster des Sächsischen Landesamtes für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie.

Es kamen zwei unterschiedliche Ansätze zum Einsatz: Zum einen wurde das Gefährdungspotenzial für Massenschwerebewegungen auf der Basis geotechnischen Expertenwissens (wissensbasierter Ansatz) mittels einer Kombination von Hangneigung und Gesteinsklassifikation abgebildet. Dieser Ansatz wurde durch die Einbeziehung weiterer abgeleiteter Daten (Flächennutzung: Bewuchs, Versiegelungsgrad; Geologie: Korngröße, Verformungsempfindlichkeit, Klüftung und Trennflächen) optimiert. Der zweite, datenbasierte Ansatz, stützt sich auf die Anwendung selbstlernender künstlicher neuronaler Netze, die durch das „Training“ mit bekannten Lokalitäten mit Massenschwerebewegungen die Zusammenhänge der Modelleingangsdaten selbstständig erkennen und nachfolgend auf das definierte Untersuchungsgebiet anwenden. Der datenbasierte Ansatz konnte aufgrund der limitierten Trainingsdaten nur für Sachsen angewendet werden.

Im Ergebnis der beiden Modellierungsansätze wurden die unmittelbar gefährdeten Streckenabschnitte deutschlandweit für den ersten Ansatz und sachsenweit für den zweiten Ansatz ausgewiesen und in Form von Gefahrenhinweiskarten kartographisch dargestellt. Zudem stellt der vorliegende Bericht eine umfangreiche Beschreibung der verwendeten Methodik und der verwendeten Daten dar und ist somit als Erläuterung zu den Gefahrenhinweiskarten zu verstehen.

Dritter wesentlicher Ergebnisteil ist das digitale Informationssystem, welches in ArcGIS auf Grundlage aller Ausgangsdaten und aller Ergebnisse als Mxd-Datei erstellt wurde. Es ermöglicht die Detailrecherche und Analyse der Eingangsparameter und der berechneten Gefahrenklasse bzw. dem berechneten Gefährdungspotenzial (siehe Abbildung 78).

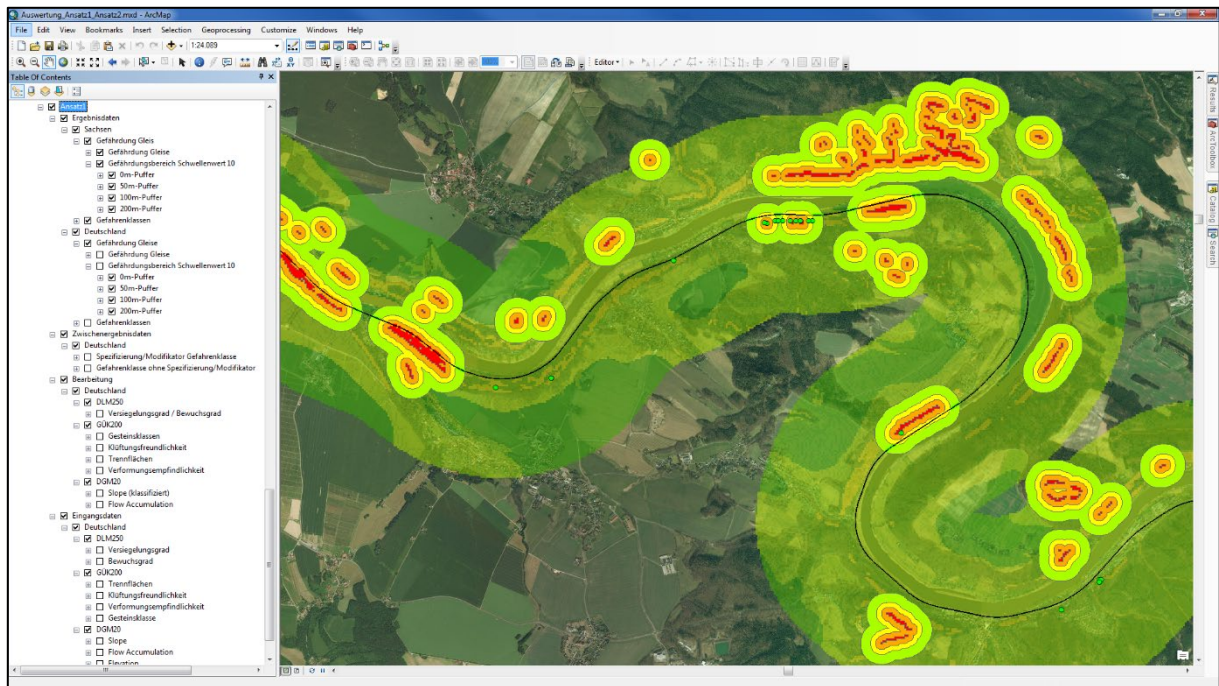


Abbildung 78: GIS-Datei zur Visualisierung, Recherche und Analyse der Ausgangsdaten und Modellergebnisse. Hier: Darstellung der Punkte aus dem Georisikokataster (in Grün) mit gepufferten Bereichen um die Gefahrenklasse größer bzw. gleich 10 nach Ansatz 1 sowie in Transparenz dahinter das Berechnungsergebnis nach Ansatz 1 sowie Luftbilder im Hintergrund

6.2 Bewertung der Ergebnisse

Beide angewandten Verfahren ergaben sehr gut differenzierte Gefahrenhinweise entlang der Bahnstrecken. Die Differenzierung basiert im Wesentlichen auf der Hangneigung, die als Raster mit einer Kantenlänge von 20 m vorliegt. Man erkennt auf den Karten aber auch, dass insbesondere die geologischen Eingangsdaten (Ausprägung der Klüftigkeit der Gesteine sowie deren Schichtung bzw. Schieferung) nur auf sehr großen Flächen wirken (Grundflächen von $n \times 100 \text{ m}$ bis $n \times 1.000 \text{ m}$). Dadurch wird die genannte Differenzierung teilweise wieder „aufgehoben“ bzw. nivelliert, da der Bearbeitungsmaßstab der GÜK200 1:200.000 beträgt (minimale dargestellte Fläche rd. $0,5 \text{ cm} \times 0,5 \text{ cm}$ entsprechend $1000 \text{ m} \times 1000 \text{ m}$). Andererseits ist die Einbeziehung dieser geologischen Daten unverzichtbar für eine differenzierte Aussage. Es ist verständlich, dass genauere Angaben zu den anstehenden Gesteinen, als die GÜK zulassen, die Differenzierung erhöhen werden und dass die zusätzliche Einbeziehung von Daten, wie sie z. B. auf den Geologischen Karten 1:25.000 (GK25) vorliegen (Angaben zu den Trennflächen in den Festgesteinen: Einfallswinkel und Fallrichtung von Klüftung, Schichtung und Schieferung sowie deren Ausprägungsgrad) die Differenzierung der Gefährdung sowie die Plausibilität der Ergebnisse wesentlich erhöhen werden. Die kleinsten dargestellten Flächen in den GK25 haben eine Größe von rd. $125 \text{ m} \times 125 \text{ m}$, was eine Vergrößerung des Detaillierungsgrades gegenüber der GÜK200 um den Faktor 64 bedeutet.

Eine Aufwertung des datenbasierten Ansatzes wird darin gesehen, die KNN auch in anderen naturräumlichen Gliederungen Deutschlands an Ereignispunkten trainieren zu lassen. Bisher ist dies nur für Sachsen erfolgt.

Im Rahmen des Projektes erfolgt die Bewertung der Gefahren in einem Bereich von jeweils 1.000 Metern beiderseits der Bahnstrecken. Für in Tälern verlaufende Strecken ist diese Herangehensweise in Ordnung, für am Hang verlaufende Strecken bewerten wir auch die höhenmäßig unterhalb der Bahnstrecken befindlichen Flächen mit – was zwar allgemein für Rutschungsereignisse, die die oberhalb liegenden Bahngleise mit beeinträchtigen können, richtig ist, für Steinschlag und Felssturz aber irreführend.

7 Empfehlungen

7.1 Überblick

Die aufgezeigten deutlichen Verbesserungsmöglichkeiten der vorliegenden Gefahrenhinweiskarten lassen sich mit unterschiedlichen Methoden bewältigen:

1. Training des KNN in weiteren naturräumlichen Regionen Deutschlands,
2. Vergrößerung des Maßstabes der einbezogenen geologischen Karten,
3. Verwendung eines geologischen 3D-Untergrundmodells,
4. Kennzeichnung der höhenmäßig oberhalb/unterhalb der Bahnlinien verlaufenden Bereiche,
5. Einbeziehung von Klimadaten.

Für alle Methoden gibt es unterschiedliche Geltungsbereiche, da momentan nicht in allen Bundesländern Deutschlands eine GK25 flächendeckend vorrätig ist und ein 3D-Modell des Untergrundes in einer Auflösung adäquat zum DGM nur in Sachsen existiert (50m-Gridauflösung bei cm-Auflösung in vertikaler Richtung).

Es wird vorgeschlagen, die zweite und dritte Methode in einigen Bereichen Sachsens zu testen, da hier die Voraussetzung für beide vorliegt (insbesondere die GK25 sowie die bereits im Vorhaben Hyk50 kartierten Bereiche). Die Einbeziehung der Klimadaten (Quelle Deutscher Wetterdienst) kann durch eine umfangreiche Anpassung und Erweiterung des bestehenden Modells zum zweiten Ansatz für das gesamte Bundesgebiet realisiert werden.

7.2 Einbeziehung weiterer naturräumlicher Regionen Deutschlands

Die KNN werden in weiteren naturräumlichen Regionen trainiert, für die gefährdungsrelevante Ereignispunkte vorliegen (Rutschungen, Steinschlag usw.). Dadurch wird die Akzeptanz der Ergebnisse weiter erhöht, da davon auszugehen ist, dass in unterschiedlichen Regionen unterschiedliche Kombinationen von Eingangsdaten Relevanz erreichen.

7.3 Einbeziehung der GK25

Die geologischen Flächeneinheiten der GÜK200 werden durch die der GK25 diversifiziert. Es kommt dabei die gleiche Herangehensweise zur Anwendung, wie schon im Primärprojekt:

Unterscheidung nach Locker- und Festgestein, Gesteinsbewertungen usw.

Es werden die Details zu Einfallswinkel und Fallrichtung von Klüftung, Schichtung und Schieferung digitalisiert und prozessiert:

Zum Beispiel wird ermittelt, ob die genannten Diskontinuitätsflächen mit bzw. gegen die Richtung des Hanges fallen (siehe Abbildung 79 und Abbildung 80).

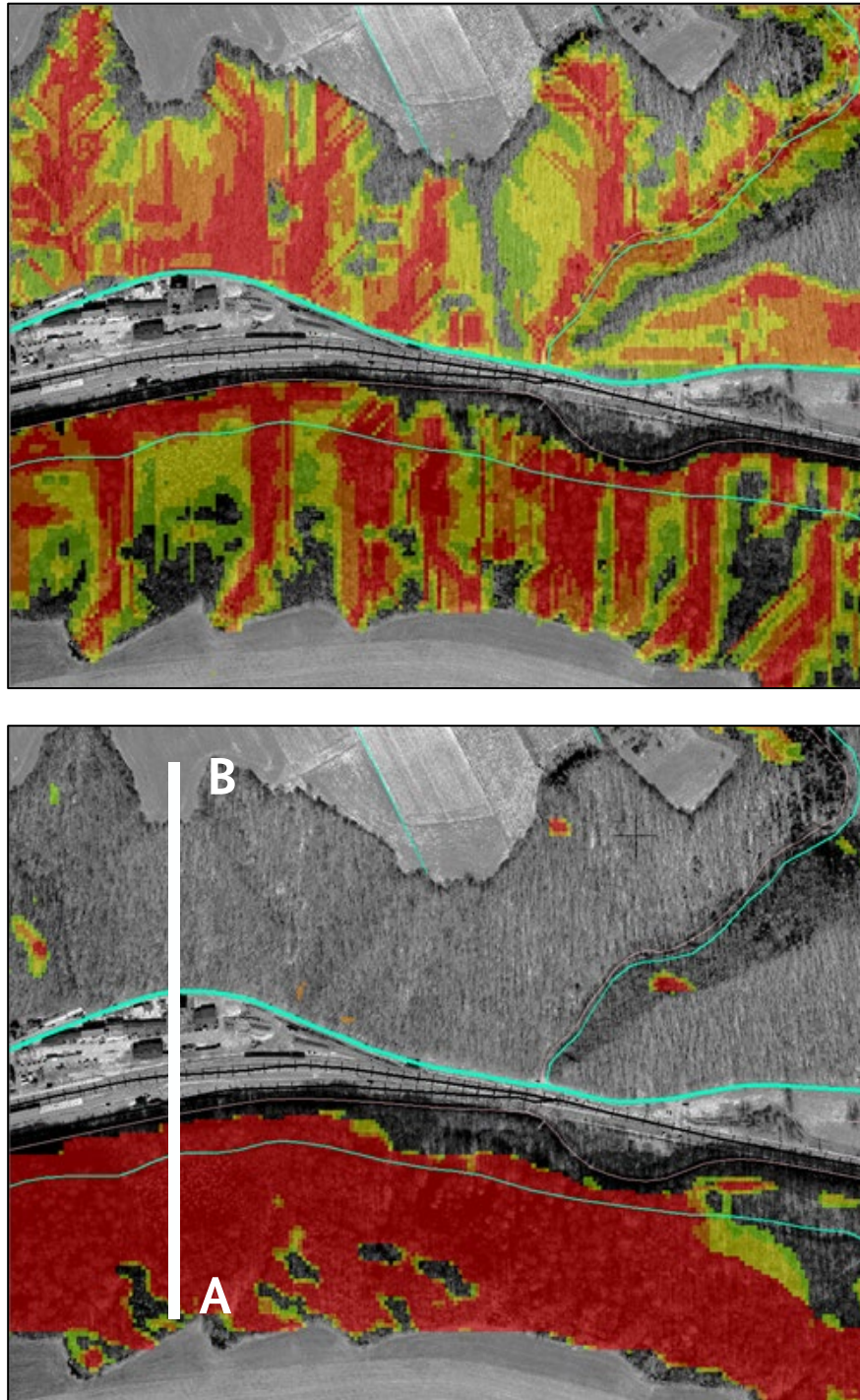


Abbildung 79: Vergleich des Gefährdungspotenzials der Eisenbahnstrecke Dresden – Chemnitz im Gebiet von Tharandt durch Erosionsrinnen (oben) und Hangrutschungen (unten), berechnet mit advangeo® Prediction Software. A – B: Schnittspur für Abbildung 80)

Die Berücksichtigung der Einfallrichtungen von Hang und Gleitflächen im Untergrund erfordert detailliertere geologische Kenntnisse (Beispiel siehe Abbildung 80), welche aus der GÜK200 aber kaum ableitbar sind.

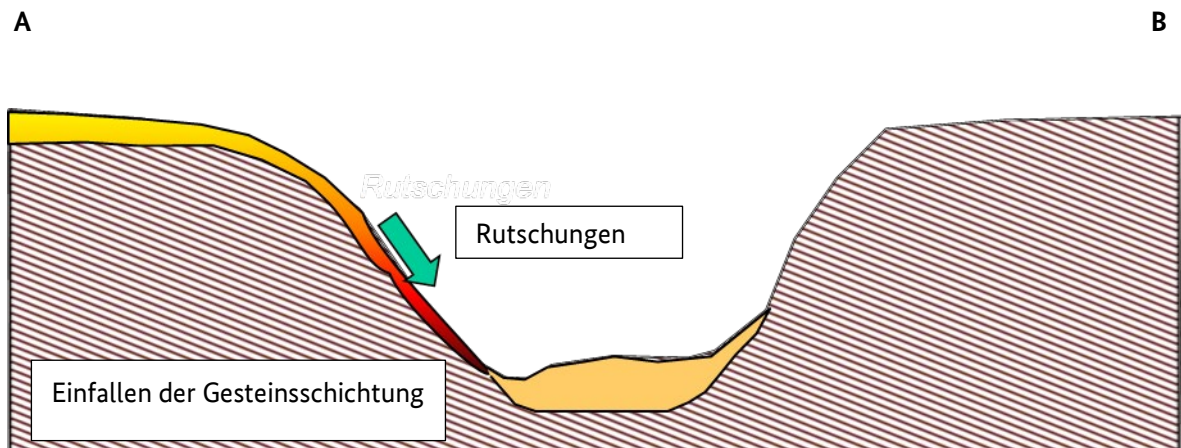


Abbildung 80: Zusammenhang zwischen Einfallen der Gesteinsschichtung/-schieferung, Hangrichtung und Rutschungsgefährdung

Anschließend wird ein qualitativer und quantitativer Vergleich der Herangehensweisen mit der GÜK200 bzw. der GK25 empfohlen.

Vorschlag 5 Kartenblätter GK25:

- 5146 Lichtenberg,
- 5047 Freital,
- 5050 Königstein-Hohnstein,
- 5442 Aue,
- 5240 Zwickau.

Sobald die notwendigen Ereignisdaten vorliegen, wird empfohlen, die Übertragbarkeit auf das gesamte Bundesgebiet zu testen.

7.4 Einbeziehung des 3D-Modell des Untergrundes

Mit der bisherigen Vorgehensweise werden die geologischen Verhältnisse in den Bewertungsgebieten durch die Verbreitungsflächen der geologischen Einheiten charakterisiert. Damit kann man in den wenigsten Fällen auf die konkrete vertikale Abfolge der Gesteine am Standort zurückgreifen: meist wird dann davon ausgegangen, dass das bezeichnete Gestein im gesamten Teufenprofil anzutreffen ist. Oberflächennahe Gesteinswechsel können in der Regel nicht in die Bewertung einbezogen werden. Das gilt ebenso auch für periglaziale Deckschichten, geringmächtige pleistozäne und/oder tertiäre Bedeckungen, ältere Terrassen in Hanglage usw.

Die geologischen Flächeneinheiten der GÜK200 werden durch die Verbreitungsflächen der geologischen Einheiten aus der Hyk50-Datenbank diversifiziert (kleinste Flächengröße rd. 1 ha): bezüglich der Flächendaten kommt dabei die gleiche Herangehensweise zur Anwendung, wie schon im Primärprojekt:

- Unterscheidung nach Locker- und Festgestein, Korngrößen, Gesteinsbewertungen usw.

Die 3D-Daten gestatten es, die Abfolge der geologischen Einheiten im Teufenbereich zwischen Geländeoberkante und dem Verlauf der Bahnlinie bei der Risikoabschätzung zu berücksichtigen: das betrifft

- die Raumlage und die Ausprägung der Kontaktflächen für die einzelnen Gesteine,
- die Bewertung der unterschiedlichen Petrographien im Querschnitt zum Beobachtungspunkt auf der Bahnlinie.

Es ist ein neues Bewertungsschema aufzustellen, in dem die vertikale Abfolge der Gesteine in die Bewertung der Gefährdung einbezogen werden kann.

Details zu Einfallswinkel und Fallrichtung von Klüftung, Schichtung und Schieferung werden wie in den Blattsnitten mit GK25 digitalisiert und prozessiert:

- Zum Beispiel wird ermittelt, ob die genannten Diskontinuitätsflächen mit bzw. gegen die Richtung des Hanges fallen.

Anschließend wird ein qualitativer und quantitativer Vergleich der Herangehensweisen mit GÜK200 und 3D-Modelldaten empfohlen.

Vorschlag 4 Kartenblätter 1:50.000:

- L5146 Freiberg (inkl. Tharandt/Freital),
- L5148 Pirna,
- L5340 Zwickau,
- L4944 Döbeln.

7.5 Kennzeichnung der höhenmäßig oberhalb/unterhalb der Bahnlinien verlaufenden Bereiche

Es wird die Entwicklung von einfachen und schnellen GIS-Methoden empfohlen, um den Höhenbezug zwischen der Bahnlinie und der Umgebung flächenhaft darzustellen. Die Unterscheidung hilft klar zu differenzieren, welche Gefährdungsbereiche ein reelles Gefährdungspotenzial für die Infrastruktur Gleis haben.

7.6 Einbeziehung von Klimadaten

Der Deutsche Wetterdienst ermittelt in regelmäßigen Abständen raumbezogene Klimadaten (Niederschlagsmengen, Regionen mit Starkregenereignissen, ...), die für eine Prognose zu Massenschwerebewegungen entlang des deutschen Schienennetzes in den datenbasierten Ansatz einbezogen werden können. Die damit trainierten künstlichen neuronalen Netze können so auch auf zukünftige prognostizierte Änderungen der Parameter (Ab- und Zunahme von Niederschlägen, räumliche Verlagerung der Starkregenereignisse, ausgeprägtere Saisonalitäten, ...) angewendet werden (Zeitreihenanalyse) und somit auch zeitliche und räumliche Veränderungen des Gefahrenpotenzials für das Schienennetz aufzeigen. Die Einbeziehung derartiger Daten wurde bereits im Referenzprojekt IKSB (Prognose von Kippenstabilitäten im Lausitzer Braunkohlerevier) (Lit 17) erfolgreich angewendet.

Grundsätzliche Herangehensweise bei der Zeitreihenanalyse-Analyse der zeitlichen Variation der Modelleingangsdaten und Kalibrierung mit Klima-Daten zu unterschiedlichen Zeitpunkten:

- Die Trainings-/Ereignisdaten und alle anderen zeitabhängigen Modelleingangsdaten, z. B. auch die Flächennutzung und der Bewuchs, werden in einen zeitlichen Bezug gebracht und dem KNN-Modelle in Zeitscheiben (halbjährlich, jährlich, 5-Jahresrhythmus, ...) zur Verfügung gestellt.
- Die zeitlich unabhängigen Daten (Morphologie, Geologie und Ableitungen) stehen in allen Zeitscheiben gleichermaßen zur Verfügung.
- Das künstliche neuronale Netz lernt so aus den Daten der Vergangenheit Zusammenhänge zwischen den Modelleingangsparametern (Niederschlagsmengen, Häufigkeit von Starkregenereignissen, Geologie, Morphologie, ...), wertet sie und ist in der Lage, das „erlernte Wissen“ auf zukünftige Verhältnisse (z.B. Klimadaten aus DWD-Modellen) anzuwenden.

8 Abkürzungsverzeichnis

Begriff	Erläuterung
AG	Auftraggeber
AN	Auftragnehmer
BAST	Bundesanstalt für Straßenwesen
Beak	Beak Consultants GmbH
DGM	Digitales Geländemodell
DLM	Digitales Landschaftsmodell
EBA	Eisenbahn-Bundesamt
GIS	Geographisches Informationssystem
GK	Geologische Karte
GÜK	Geologische Übersichtskarte
KNN	Künstliche Neuronale Netze
LfULG	Sächsisches Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie
WoE	Weights of Evidence
FL	Fuzzy Logic
RMSE	Root Mean Squared Error

9 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Massenauftrag durch einen Schuttstrom entlang der Bahnlinie Bad-Schandau – Schöna am 24.05.2016 (Bildquelle: dpa/Sebastian Kahnert)	10
Abbildung 2: Methodik der Algorithmen/Entscheidungsbäume	11
Abbildung 3: Methodik der multivariaten Statistik/künstlichen neuronalen Netze	12
Abbildung 4: Schema eines vorwärtsgerichteten (feedforward) Netzes (Quelle: Lit 1).....	15
Abbildung 5: Prinzipielle Komponenten der advangeo® Prediction Software	17
Abbildung 6: Überblick der Gleislage in Deutschland	20
Abbildung 7: Überblick der GÜK200 von Deutschland mit Blattschnittgrenzen.....	21
Abbildung 8: Überblick über Topologiefehler (Polygone in Gelb) in der deutschlandweit zusammengefassten GÜK200	22
Abbildung 9: Anzahl der Topologiefehler „Gaps“ und „Overlap“ in der Shapefile-Datei der deutschlandweit zusammengefassten GÜK200	23
Abbildung 10: Überblick des DLM250 von Deutschland.....	24
Abbildung 11: Überblick der verfügbaren Kacheln des DGM10 von Deutschland	25
Abbildung 12: Überblick der relevanten Punkte aus dem Schadenskataster der DB Netz AG	27
Abbildung 13: Überblick der relevanten Punkte für Sachsen aus dem Schadenskataster der DB Netz AG und des Sächsischen Landesamtes für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie und Lage der Detailkarte „Sächsische Schweiz/Elbsandsteingebirge“ (vgl. Abschnitt 3.2.2).....	28
Abbildung 14: Überblick des Gleispuffers mit 1000 m beidseitig in Sachsen.....	29
Abbildung 15: Workflow zum Prozessieren und zur Klassifizierung der GÜK200	30
Abbildung 16: Abgeleitete Darstellung der Gesteinsklasse aus der GÜK200 für Sachsen im 1000-m-Pufferbereich um die Bahngleise.....	35
Abbildung 17: Abgeleitete Darstellung der Verformungsempfindlichkeit aus der GÜK200 für Sachsen im 1000-m-Pufferbereich um die Bahngleise	36
Abbildung 18: Abgeleitete Darstellung der Klüftungsfreundlichkeit aus der GÜK200 für Sachsen im 1000-m-Pufferbereich um die Bahngleise.....	37
Abbildung 19: Abgeleitete Darstellung der Trennflächen im Festgestein aus der GÜK200 für Sachsen im 1000-m-Pufferbereich um die Bahngleise	38
Abbildung 20: Abgeleitete Darstellung der Gesteinsklassen aus der GÜK200 für den Teilbereich der Sächsischen Schweiz/Elbsandsteingebirge in Sachsen im 1000-m-Pufferbereich um die Bahngleise.....	39
Abbildung 21: Abgeleitete Darstellung des Bewuchsgrades in Prozent aus dem DLM250 für Sachsen im 1000-m-Pufferbereich um die Bahngleise	45
Abbildung 22: Abgeleitete Darstellung des Versiegelungsgrades in Prozent aus dem DLM250 für Sachsen im 1000-m-Pufferbereich um die Bahngleise.....	46
Abbildung 23: Abgeleitete Darstellung des Bewuchsgrades in Prozent aus dem DLM250 für den Teilbereich der Sächsischen Schweiz/Elbsandsteingebirge in Sachsen im 1000-m-Pufferbereich um die Bahngleise	47

Abbildung 24: Abgeleitete Darstellung des Versiegelungsgrades in Prozent aus dem DLM250 für den Teilbereich der Sächsischen Schweiz/Elbsandsteingebirge in Sachsen im 1000-m-Pufferbereich um die Bahngleise.....	48
Abbildung 25: Abgeleitete Darstellung der Modifikatoren für die Landnutzung zur Verwendung im Ansatz 1, basierend auf dem DLM250 für den Teilbereich der Sächsischen Schweiz / Elbsandsteingebirge in Sachsen im Pufferbereich um die Bahngleise.....	49
Abbildung 26: Workflow Prozessieren des DGM	50
Abbildung 27: Abgeleitete Darstellung der absoluten Höhe aus dem ungeglätteten DGM10 für Sachsen im 1000-m-Pufferbereich um die Bahngleise.....	51
Abbildung 28: Modell zum Ausschneiden der Raster auf den 1000 m-Gleispuffer	52
Abbildung 29: Abgeleitete Darstellung der absoluten Höhe aus dem ungeglätteten DGM20 für den Teilbereich der Sächsischen Schweiz/Elbsandsteingebirge in Sachsen im 1000-m-Pufferbereich um die Bahngleise	53
Abbildung 30: Abgeleitete Darstellung der absoluten Höhe aus dem geglätteten DGM20 für den Teilbereich der Sächsischen Schweiz/Elbsandsteingebirge in Sachsen im 1000-m-Pufferbereich um die Bahngleise	54
Abbildung 31: Abgeleitete Darstellung der Hangneigung aus dem ungeglätteten DGM20 für den Teilbereich der Sächsischen Schweiz/Elbsandsteingebirge in Sachsen im 1000-m-Pufferbereich um die Bahngleise	55
Abbildung 32: Abgeleitete Darstellung der Hangneigung aus dem geglätteten DGM20 für den Teilbereich der Sächsischen Schweiz/Elbsandsteingebirge in Sachsen im 1000-m-Pufferbereich um die Bahngleise.....	56
Abbildung 33: Abgeleitete Darstellung der Fließakkumulation aus dem geglätteten DGM20 für den Teilbereich der Sächsischen Schweiz/Elbsandsteingebirge in Sachsen im 1000-m-Pufferbereich um die Bahngleise	57
Abbildung 34: Schematische Darstellung der positiven (konvexen) und negativen (konkaven) Komponenten der horizontalen Wölbung (plan curvature). Aus: Lit 18.	58
Abbildung 35: Schematische Darstellung der positiven (konvexen) und negativen (konkaven) Komponenten der vertikalen Wölbung (profile curvature). Aus: Lit 18.....	58
Abbildung 36: Abgeleitete Darstellung der negativen horizontalen Wölbung aus dem geglätteten DGM20 für den Teilbereich der Sächsischen Schweiz/Elbsandsteingebirge in Sachsen im 1000-m-Pufferbereich um die Bahngleise	59
Abbildung 37: Abgeleitete Darstellung der positiven horizontalen Wölbung aus dem geglätteten DGM20 für den Teilbereich der Sächsischen Schweiz/Elbsandsteingebirge in Sachsen im 1000-m-Pufferbereich um die Bahngleise	60
Abbildung 38: Abgeleitete Darstellung der negativen vertikalen Wölbung aus dem geglätteten DGM20 für den Teilbereich der Sächsischen Schweiz/Elbsandsteingebirge in Sachsen im 1000-m-Pufferbereich um die Bahngleise	61
Abbildung 39: Abgeleitete Darstellung der positiven vertikalen Wölbung aus dem geglätteten DGM20 für den Teilbereich der Sächsischen Schweiz/Elbsandsteingebirge in Sachsen im 1000-m-Pufferbereich um die Bahngleise	62

Abbildung 40: Abgeleitete Darstellung der Klassifikation der Hangneigung zur Verwendung im Ansatz 1, basierend auf dem ungeglätteten DGM20 für den Teilbereich der Sächsischen Schweiz/Elbsandsteingebirge in Sachsen im 1000-m-Pufferbereich um die Bahngleise.....	63
Abbildung 41: Abgeleitete Darstellung der Modifikatoren für die Fließakkumulation zur Verwendung im Ansatz 1, basierend auf dem ungeglätteten DGM20 für den Teilbereich der Sächsischen Schweiz/Elbsandsteingebirge in Sachsen im 1000-m-Pufferbereich um die Bahngleise.....	65
Abbildung 42: Detailkarte von Sachsen mit einem beispielhaften Überblick über die originalen Punkte aus dem Schadenskataster des Sächsischen Landesamtes für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie, den zusätzlich dazu digitalisierten, gepufferten Punkten durch Beak und den verwendeten Trainingspixeln für den Modellansatz 2	66
Abbildung 43: Berechnete Gefahrenklassen auf Grundlage der Kombination von Gesteinsklasse und der Hangneigungsklasse ohne Hinzunahme der zusätzliche Modifikatoren für Sachsen im 1000-m-Pufferbereich um die Bahngleise.....	68
Abbildung 44: Berechnete Gefahrenklassen auf Grundlage der Kombination von Gesteinsklasse und der Hangneigungsklasse ohne Hinzunahme der zusätzliche Modifikatoren für den Teilbereich der Sächsischen Schweiz/Elbsandsteingebirge in Sachsen im 1000-m-Pufferbereich um die Bahngleise.....	69
Abbildung 45: Fließschema (Algorithmus) zur Berechnung der resultierenden Modifikation (Spezifizierung) der Gefahrenklassen durch Kombination der Modifikatoren der unterschiedlichen Ausgangsdaten	70
Abbildung 46: Berechneter resultierender Modifikator (Spezifizierung) der Gefahrenklassen durch Kombination der Modifikatoren der unterschiedlichen Ausgangsdaten für Sachsen im 1000-m-Pufferbereich um die Bahngleise.....	71
Abbildung 47: Berechneter resultierender Modifikator (Spezifizierung) der Gefahrenklassen durch Kombination der Modifikatoren der unterschiedlichen Ausgangsdaten für den Teilbereich der Sächsischen Schweiz/Elbsandsteingebirge in Sachsen im 1000-m-Pufferbereich um die Bahngleise.....	72
Abbildung 48: Erstellung des „Base Raster“ unter „Base Data“ innerhalb der advangeo® Prediction Software	73
Abbildung 49: Import der originalen Punkte des Ereigniskatasters als Trainingsdaten unter „Source Data“ innerhalb der advangeo® Prediction Software.....	74
Abbildung 50: Erweiterung „Erosion“ innerhalb der advangeo® Prediction Software und darin verfügbare Werkzeuge zur Vorprozessierung von digitalen Geländemodellen, Landnutzungsdaten und geologischen Daten	75
Abbildung 51: Prozessierung der originalen Punkte des Ereigniskatasters und Erzeugung von Rasterdaten als Trainingsdaten unter „Processed Source Data“ innerhalb der advangeo® Prediction Software	76
Abbildung 52: Rasterdatei mit Punkten des Ereignisrasters mit einem Zellwert von „0“ und zufällig verteilten zusätzlichen Pixeln mit 20% Modellgebietsabdeckung mit einem Zellwert von „1“ zur Verwendung als Trainingsdaten in der advangeo® Prediction Software.....	77
Abbildung 53: Umskalierung der Hangneigung des DGM20 aus den „Processed Source Data“ und Erzeugung von „Model Input Data“ in der advangeo® Prediction Software.....	78

Abbildung 54: Erstellung eines Trainingsszenarios für ein „Prediction“-Modell unter „Parametrized Models“ in der advangeo® Prediction Software und Auswahl des Trainingsgebietes, der Trainingsdaten und der Modelleingangsdaten.....	79
Abbildung 55: Kurve des gemittelten quadrierten Fehlers zwischen dokumentiertem und berechnetem Gefährdungspotenzial an den Trainingspunkten, welche die Veränderung des Fehlers über die 100 Trainingsiterationen verdeutlicht.....	80
Abbildung 56: Histogramm aller beim Training verwendeten Pixel (Rasterpunkte) und prognostiziertes Gefährdungspotenzial zwischen 0 (kein Gefährdungspotenzial) und 1 (hohes Gefährdungspotenzial)	81
Abbildung 57: Histogramm der beim Training verwendeten Pixel (Rasterpunkte) mit dem Wert 1 und prognostiziertes Gefährdungspotenzial zwischen 0 (kein Gefährdungspotenzial) und 1 (hohes Gefährdungspotenzial)	82
Abbildung 58: Workflow im „Model Builder“ von ArcGIS zur deutschlandweiten Erstellung von Pufferpolygone im 50 m, 100 m und 200 m Abstand um die Gefahrenklasse 10 und höher aus der Berechnung von Ansatz 1.....	85
Abbildung 59: Workflow im „Model Builder“ von ArcGIS zum deutschlandweiten Verschnitt der Pufferpolygone im 50 m, 100 m und 200 m Abstand um die Gefahrenklasse 10 und höher aus der Berechnung von Ansatz 1 mit der deutschlandweiten Gleislage.....	86
Abbildung 60: Erstellte Gefährdungsbereiche in 0 m, 50 m, 100 m und 200 m Abstand (Puffer) um die berechneten Bereiche mit einer Gefahrenklasse größer bzw. gleich 10 entsprechend Ansatz 1.....	87
Abbildung 61: Erstellte Gefährdungsbereiche in 0m, 50 m, 100 m und 200 m Abstand (Puffer) um die berechneten Bereiche mit einem Gefährdungspotenzial von größer bzw. gleich 0,75 (75%) entsprechend Ansatz 2.....	89
Abbildung 62: Berechnete finale Gefahrenklasse nach Ansatz 1 für Sachsen im 1000-m-Pufferbereich um die Bahngleise.....	90
Abbildung 63: Berechnete finale Gefahrenklasse nach Ansatz 1 für den Teilbereich der Sächsischen Schweiz/Elbsandsteingebirge in Sachsen im 1000-m-Pufferbereich um die Bahngleise	91
Abbildung 64: Berechnetes Gefährdungspotenzial nach Ansatz 2 für Sachsen im 1000-m-Pufferbereich um die Bahngleise.....	92
Abbildung 65: Berechnetes Gefährdungspotenzial nach Ansatz 2 für den Teilbereich der Sächsischen Schweiz/Elbsandsteingebirge in Sachsen im 1000-m-Pufferbereich um die Bahngleise.....	93
Abbildung 66: Histogramm mit der absoluten Häufigkeit der berechneten Gefahrenklasse an den selektierten Punkten des Georisikokatasters von Sachsen auf Grundlage des Ansatzes 1.....	95
Abbildung 67: Histogramm mit der absoluten Häufigkeit des berechneten Gefährdungspotenzials an den selektierten Punkten des Georisikokatasters von Sachsen auf Grundlage des Ansatzes 2	96
Abbildung 68: Histogramm mit der kumulativen Häufigkeit (von rechts nach links gerechnet) des berechneten Gefährdungspotenzials an den selektierten Punkten des Georisikokatasters von Sachsen auf Grundlage des Ansatzes 2.....	97

Abbildung 69: Deutschlandweite Darstellung der Gleisabschnitte, die direkt im Bereich der berechneten Gefahrenklassen größer bzw. gleich 10 liegen oder in einem Umkreis (Puffer) von 50, 100 oder 200 m davon entfernt nach Ansatz 1.....	98
Abbildung 70: Darstellung der Gleisabschnitte, die direkt im Bereich der berechneten Gefahrenklassen größer bzw. gleich 10 liegen oder in einem Umkreis (Puffer) von 50, 100 oder 200 m davon entfernt für das Teilgebiet Sachsen nach Ansatz 1	99
Abbildung 71: Darstellung der Gleisabschnitte, die direkt im Bereich der berechneten Gefahrenklassen größer bzw. gleich 10 liegen oder in einem Umkreis (Puffer) von 50, 100 oder 200 m davon entfernt für den Teilbereich der Sächsischen Schweiz/Elbsandsteingebirge in Sachsen nach Ansatz 2.....	100
Abbildung 72: Darstellung der Gleisabschnitte die direkt im Bereich des berechneten Gefährdungspotenzials größer bzw. gleich 0,75 (75%) liegen oder in einem Umkreis (Puffer) von 50, 100 oder 200 m davon entfernt für das Teilgebiet Sachsen nach Ansatz 2.....	101
Abbildung 73: Darstellung der Gleisabschnitte, die direkt im Bereich des berechneten Gefährdungspotenzials größer bzw. gleich 0,75 (75%) liegen oder in einem Umkreis (Puffer) von 50, 100 oder 200 m davon entfernt für den Teilbereich der Sächsischen Schweiz/Elbsandsteingebirge in Sachsen nach Ansatz 2.....	102
Abbildung 74: Histogramm mit der absoluten (in Orange) und kumulativen (in Grau, von rechts nach links gerechnet) Häufigkeit der selektierten Punkte des Georisikokatasters von Sachsen, mit welcher sich diese in eine der ermittelten Gefahrenzone (0 m, 50 m, 100 m, 200 m) um Bereiche mit einer berechneten Gefahrenklasse größer bzw. gleich 10 entsprechend Ansatz 1 befinden.....	103
Abbildung 75: Histogramm mit der absoluten (in Orange) und kumulativen (in Grau, von rechts nach links gerechnet) Häufigkeit der selektierten Punkte des Georisikokatasters von Sachsen, mit welcher sich diese in eine der ermittelten Gefahrenzone (0 m, 50 m, 100 m, 200 m) um Bereiche mit einem berechneten Gefährdungspotenzial größer bzw. gleich 0,75 (75%) entsprechend Ansatz 2 befinden	104
Abbildung 76: Ingenieurgeologische Gefahrenhinweiskarte entlang des deutschen Schienennetzes....	107
Abbildung 77: Ingenieurgeologische Gefahrenhinweiskarte entlang des sächsischen Schienennetzes.	109
Abbildung 78: GIS-Datei zur Visualisierung, Recherche und Analyse der Ausgangsdaten und Modellergebnisse. Hier: Darstellung der Punkte aus dem Georisikokataster (in Grün) mit gepufferten Bereichen um die Gefahrenklasse größer bzw. gleich 10 nach Ansatz 1 sowie in Transparenz dahinter das Berechnungsergebnis nach Ansatz 1 sowie Luftbilder im Hintergrund.....	111
Abbildung 79: Vergleich des Gefährdungspotenzials der Eisenbahnstrecke Dresden – Chemnitz im Gebiet von Tharandt durch Erosionsrinnen (oben) und Hangrutschungen (unten), berechnet mit advangeo® Prediction Software. A – B: Schnittspur für Abbildung 80)	114
Abbildung 80: Zusammenhang zwischen Einfallen der Gesteinsschichtung/-schieferung, Hangrichtung und Rutschungsgefährdung.....	115

10 Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Klassifikationsschema der GÜK200 auf Grundlage der Gesteinsklasse	32
Tabelle 2: Klassifikationsschema der GÜK200 auf Grundlage der Verformungsempfindlichkeit und verwendete Modifikatoren für die Berechnung der Gefährdungspotenziale nach Ansatz 1	32
Tabelle 3: Klassifikationsschema der GÜK200 auf Grundlage der Korngröße	32
Tabelle 4: Klassifikationsschema der GÜK200 auf Grundlage der Klüftungsfreundlichkeit und verwendete Modifikatoren für die Berechnung der Gefährdungspotenziale nach Ansatz 1	33
Tabelle 5: Klassifikationsschema der GÜK200 auf Grundlage des Vorhandenseins von Trennflächen und verwendete Modifikatoren für die Berechnung der Gefährdungspotenziale nach Ansatz 1.....	33
Tabelle 6: Klassifikationsschema des DLM250 und verwendete Modifikatoren für die Berechnung der Gefährdungspotenziale nach Ansatz 1	41
Tabelle 7: Klassifikationsschema des DGM20 auf Grundlage der Hangneigung.....	62
Tabelle 8: Klassifikationsschema des DGM20 auf Grundlage der Fließakkumulation und verwendete Modifikatoren für die Berechnung der Gefährdungspotenziale nach Ansatz 1	64
Tabelle 9: Expertenwissensbasierte Klassifikation (Entscheidungsbaum) des Gefährdungspotenzials durch Verschnitt der Gesteinsklasse auf Grundlage der GÜK200 und der Hangneigungsklasse auf Grundlage des DGM20.....	67
Tabelle 10: Überblick über die verwendeten Modelleingangsdaten und ihrer Gesamtgewichtung im finalen Prognosemodell für das Gefährdungspotenzial – Methode 1: Summe der Gewichte als Connection Weights, Methode 2: Summe der Gewichte nach Garson’s Algorithm	83
Tabelle 11: Überblick über die Gesamtlängen der Streckenabschnitte für Deutschland nach Ansatz 1 und Sachsen nach Ansatz 1 und 2, welche innerhalb eines Puffers von 0 m, 50 m, 100 m und 200 m entfernt von einem Bereich mit einer Gefahrenklasse von größer bzw. gleich 10 (nach Ansatz 1) oder einem Bereich mit einem Gefährdungspotenzial größer bzw. gleich 0,75 (nach Ansatz 2) liegen.....	105

11 Quellenverzeichnis

- Lit 1: BARTH, A., A. KNOBLOCH, S. NOACK & F. SCHMIDT (2014): Neural Network-Based Spatial Modeling of Natural Phenomena and Events. In: Systems and Software Development, Modeling, and Analysis: New Perspectives and Methodologies. IGI-Global. ISBN13: 9781466660984. P. 186-211
<http://www.igi-global.com/book/systems-software-development-modeling-analysis/99911>
- Lit 2: BARTH, A., A. KNOBLOCH, M. URVOUIS (2010): Neural network based predictive mapping with advangeo® and its application in the AEGOS project. Presentation at the Annual Conference of the Remote Sensing Group. London. 2010.
http://www.beak.de/advangeo/sites/default/files/file/GRSG_20101202_Presentation.pdf
- Lit 3: BARTH, A., A. KNOBLOCH, C. LEGLER, S. NOACK: Nutzung künstlicher neuronaler Netze zur Einschätzung der Rohstoffperspektivität des Erzgebirges. Vortrag auf der Tagung „Bergbau, Rohstoffe und Energie“, 2015. TU Freiberg. Abstrakt veröffentlicht in: "Bergbau, Energie und Rohstoffe", 7.- 9.10. 2015, Tagungsband, 388 Seiten, Hrsg: DMV, RDB, Institut für Markscheidewesen und Geodäsie, Institut für Bergbau und Spezialtiefbau der TU Freiberg, ("Wissenschaftliche Schriftenreihe des Markscheidewesens" des DMV)
http://tu-freiberg.de/sites/default/files/media/institut-fuer-markscheidewesen-und-geodaesie-12465/aktuelles/BEuR2015/dokumente/keur2015_ankuendigung.pdf
- Lit 4: BEAK CONSULTANTS GMBH (2010): Planung und Entwicklung von softwaregestützten wissensbasierten Verfahren zur Prognose von Ereignissen und Phänomenen im mehrdimensionalen Raum. Abschlussbericht zur Eigenforschung. Unterstützt vom Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie.
- Lit 5: BEAK CONSULTANTS GMBH (2013): Entwicklung der Fachschale Erosion für Advangeo Prediction Software. Abschlussbericht zur Eigenforschung. Unterstützt vom Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie.
http://www.beak.de/advangeo/sites/default/files/file/BEAK_2011/advangeo_Erosion_Folien.pdf
- Lit 6: BEAK CONSULTANTS GMBH (2013): Entwicklung der Fachschale Rohstoffe für Advangeo Prediction Software. Abschlussbericht zur Eigenforschung. Unterstützt vom Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie.
- Lit 7: BEAK CONSULTANTS GMBH (2015): Nutzerhandbuch und Dokumentation der advangeo® Prediction Software.
- Lit 8: Geologische Karte 1:200.000: Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe. Extrahiert am 30.09.2016 von
http://www.bgr.bund.de/DE/Themen/Sammlungen-Grundlagen/GG_geol_Info/Karten/Deutschland/GUEK200/guek200_node.html;jsessionid=DBC9407D4C692720E6921630EEE3329C.1_cid331
- Lit 9: HASSOUN. (1995). Fundamentals of Artificial Neural Networks. MIT Press. Kasabov 1996.
- Lit 10: HAYKINS, S. (1998). Neural Networks: A Comprehensive Foundation (2nd edition). Prentice Hall. Bishop 2008.
- Lit 11: HIELSCHER, P., BARTH, A.: Auf der Suche nach verdeckten Lagerstätten: 3DPrognosen mit künstlichen neuronalen Netzen. Vortrag auf dem 22. Firmenkolloquium der Firma Beak Consultants GmbH, 15.04.2016.

- Lit 12: HIELSCHER, P., S. NOACK, A. KNOBLOCH, A. BARTH: Entwicklung eines Verfahrens zur dreidimensionalen Prognose von verdeckten Rohstofflagerstätten am Beispiel des Erzgebirges. Unveröffentlichte Projektunterlagen. 2016.
- Lit 13: METELKA, V., L. BARATOUX, M. JESSEL, A. BARTH & S. NABA: Regolith landform mapping in western Burkina Faso, using airborne geophysics and remote sensing data in a neural. Research Gate, 2015.
https://www.researchgate.net/publication/267801516_REGOLITH_LANDFORM_MAPPING_IN_WESTERN_BURKINA_FASO_USING_AIRBORNE_GEOPHYSICS_AND_REMOTE_SENSING_DATA_IN_A_NEURAL-NETWORK_Metelka
- Lit 14: NOACK, S., A. KNOBLOCH, S.H. ETZOLD, A. BARTH, E. KALLMEIER: Spatial predictive mapping using artificial neural networks. The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Volume XL-2, 2014. ISPRS Technical Commission II Symposium, 6 – 8 October 2014, Toronto, Canada
<http://www.int-arch-photogramm-remote-sens-spatial-inf-sci.net/XL-2/79/2014/isprsarchives-XL-2-79-2014.pdf>
- Lit 15: OLDEN, J. O., JACKSON, D. A. (2002): Illuminating the “black box”: a randomization approach for understanding variable contributions in artificial neural networks. In: Ecological Modelling 154 (2002) 135 – 150, 2002.
- Lit 16: OLDEN, J. D., JOY, M. K., DEATH, R. G. (2004): An accurate comparison of methods for quantifying variable importance in artificial neural networks using simulated data. In: Ecological Modelling 178 (2004) 389-397, 2004.
- Lit 17: ROSCHER, M., A. BARTH, M. KALLMEIER, C. DREBENSTEDT, M. GÖTZ (2014): Aufbau eines integrierten Kippensicherheits- und Bewertungssystems (IKSB). Bericht der Beak Consultants GmbH und der TU Bergakademie Freiberg an die Lausitzer- und Mitteldeutsche Bergbauverwertungsgesellschaft. Unveröffentlicht
- Lit 18: ET Surface User Guide. Raster Surface.
http://www.et-st.com/et_surface/userguide/Raster/ETG_RasterCurvature.htm

12 Anhänge

Anhang 1: Ingenieurgeologische Gefahrenhinweiskarte entlang des deutschen Schienennetzes -
Potenzial für Hang- und Böschungsrutschungen: Wissensbasierter Ansatz, Maßstab
1:1.000.000

Anlage 2: Ingenieurgeologische Gefahrenhinweiskarte entlang des sächsischen Schienennetzes -
Potenzial für Hang- und Böschungsrutschungen: Wissens- & Datenbasierter Ansatz,
Maßstab 1:500.000