

# Modellierung der Felssturzgefährdung am Mittelrhein- und Moseltal

TEEMU HAGGE-KUBAT, PHILIP SÜßER, FRIEDER ENZMANN & ANSGAR WEHINGER

**Kurzfassung:** Das Mittelrhein- und das Moseltal sind in den letzten Jahren häufig von Steinschlägen und Felsstürzen betroffen gewesen. Durch die geomorphologische Grundsituation sowie die dichte Verkehrsinfrastruktur innerhalb der Täler kommt es in diesem Gebiet immer wieder zu erheblichen Schadensfällen. Diese haben weitreichende wirtschaftliche und infrastrukturelle Folgen, bei denen auch Personenschäden nicht auszuschließen sind. Es besteht daher der konkrete Bedarf einer vorsorgenden Gefahrenanalyse um weitere Schäden nach Möglichkeit zu verhindern und Präventionsmaßnahmen zu realisieren. Der hier vorgestellte Forschungsansatz hat die Ausweisung unterschiedlicher Gefahrenzonen von Steinschlägen und Felsstürzen für die anliegende Infrastruktur innerhalb des Mittelrhein- sowie Moseltals zum Ziel. Dafür wurden auf Basis von hochauflösenden LiDAR-Geländemodellen in die Fläche gerechnete Steinschlagsimulationen mittels der Open Source Software SAGA GIS durchgeführt. Es konnte gezeigt werden, dass durch die präzise Ausweisung der Steinschlagquellgebiete mittels Surf-Slope-Index, sowie von Daten zur Vegetation und Geologie konkrete Felssturzereignisse plausibel nachgestellt werden können. Durch die Validierung mittels der Rutschungsdatenbanken von LGB und LBM sowie zahlreichen Groundchecks im Gelände konnten die Modellierungsergebnisse bestätigt und weitere Verbesserungen erzielt werden. Anhand der Verschneidung mit realen Infrastrukturdaten wurden Vulnerabilitätsberechnungen durchgeführt, die eine Gefährdungsabschätzung konkreter Streckenabschnitte der Verkehrsinfrastruktur ermöglicht. Diese decken sich mit den tatsächlich stattgefundenen Schadensfällen und Sicherungsmaßnahmen und können entsprechend als plausibel eingeschätzt und für eine Gefährdungszonierung verwendet werden.

**Abstract:** In recent years the Middle Rhine- and Moselle-valley has often been affected by rockfall-events. Due to the high geogenic exposure as well as the dense traffic infrastructure in the valleys, significant cases of damage with far-reaching economic and infrastructural consequences occurred in this area. Therefore there is a specific need for a precautionary risk analysis in order to prevent further damage and to implement preventive measures. The research approach presented here aims to identify different danger zones for adjacent infrastructure in the valleys. For this purpose, rockfall simulations were calculated using the open source software SAGA GIS on the base of high-resolution LiDAR terrain models. It could be shown that concrete rockfall events were plausibly simulated through the precise identification of the rockfall source areas and further input data like vegetation and geology. Validation using the LGB and LBM landslide databases as well as numerous ground checks allowed the modelling results to be plausible. By intersecting with real infrastructure data, it was possible to carry out risk assessments of specific sections of roads and railway lines. These coincide with the actual cases of damage and safety measures and can therefore be assessed as plausible and used for hazard zoning.

## 1. Einleitung und Situation

An den Hangflanken der rheinland-pfälzischen Flusstäler sind geogene Naturgefahren in Form von gravitativen Massenbewegungen häufig anzutreffende Phänomene (ALBERTI et al. 2013, WEHINGER & KATTLER 2014). Bereits seit Jahrhunderten werden solche Ereignisse und Schadensfälle in diesen Gebieten dokumentiert und die talseitigen Ortschaften sowie die kritische Infrastruktur stellenweise durch Hangsicherungsmaßnahmen geschützt (GRUNERT & HESS 2010).

Vor allem Steinschläge und Felsstürze, bei denen einzelne Festgesteinspartien der Gravitation folgend rapide ins Tal fallen bzw. stürzen, sind durch die hohe Reliefenergie der Hänge und die anstehenden, zerklüfteten devonischen Felsausbisse häufige Phänomene. Quellgebiete für Steinschläge sind Felsaufschlüsse sowie instabile (alte) Weinbergsmauern. Ursachen der Steinschläge sind physikalische Verwitterungsprozesse wie wiederholte Frost-Tau-Wechsel, Insolationgradienten, Kluftwasserdrücke sowie Bewuchs (Wurzelsprengung und andere Faktoren) (u.a. DIKAU et al. 2019). Dabei kommt es entlang des Trennflächengefüges zu Stabilitätsversagen einzelner Gesteinspartien und einer initialen Bewegung. Diese Prozesse entwickeln sich schnell und oft unvorhergesehen mit zum Teil sehr hohen Geschwindigkeiten und kinetischen Energien in der Sturzphase. Man unterscheidet Sturzprozesse semantisch grundsätzlich auf Basis der Masse und der Anzahl der bewegten Kubatur in drei Kategorien. So werden einzelne Blöcke mit einer Masse unterhalb von  $10 \text{ m}^3$  als Steinschlag bezeichnet, während stürzende Massen oberhalb von  $10 \text{ m}^3$  meist in Kombination mit einer Zerteilung in kleinere Blöcke als Felssturz bezeichnet werden. Massenbewegungen oberhalb von  $1 \text{ Mio. m}^3$ , bei denen ganze Hangflanken kollabieren, werden Bergstürze genannt, sind aber in Rheinland-Pfalz äußerst seltene Phänomene und können eher im hochalpinen Terrain beobachtet werden (DIKAU et al. 2019).

In Rheinland-Pfalz sind aufgrund dieser Prozesse etliche Schadensfälle bekannt, die besonders den Verkehr (Bahnstrecken und Bundesstraßen) innerhalb der Flusstäler von Rhein und Mosel in erheblichem Maße betrafen und zu hohen wirtschaftlichen, infrastrukturellen und nicht zuletzt auch zu Personenschäden geführt haben. Als aktuelle Beispiele dafür sind unter anderem der Felssturz in Kestert (vgl. Abb. 1, LGB 2021), der Steinschlag zwischen Koblenz-Moselweis und -Lay (LBM 2021) sowie diverse weitere Streckensperrungen sowie Beräumungs- und Sicherungsmaßnahmen in mehrstelliger Millionenhöhe aus den letzten Jahren zu nennen.

Zur Minimierung solcher Naturgefahren steht das Erkennen des Risikos an erster Stelle. Ausgehend von der Einstufung der Gefahr können anschließend weitere messtechnische Beobachtun-



Abb. 1: Drohnenaufnahme des Felssturzes bei Kestert vom 15.03.2021. (Foto: T. HAGGE-KUBAT, 18.03.2021)

gen sowie konkrete Schutzmaßnahmen angewendet werden. Daraus ergibt sich der konkrete Bedarf einer Gefahren- und Risikoabschätzung im Mittelrhein- und Moseltal, um flächendeckend gefährdete Gebiete zu identifizieren und geeignete Sicherungsmaßnahmen und Vulnerabilitätsminimierung zu betreiben. Das erste Mittel stellt dabei die Gefährdungszonierung in Form von Gefahrenkarten dar. Ein solches Kartenmaterial ist bisher für den Prozess Steinschlag/Felssturz in Rheinland-Pfalz flächendeckend nicht vorhanden, sodass sich Sicherungsmaßnahmen bisher vornehmlich auf Orte mit bereits stattgefundenen Ereignissen beschränken und potenziell gefährdete Gebiete zum Teil nicht bekannt sind.

Im Rahmen dieser Studie wird eine Gefährdungseinschätzung des Sturzpoteuzials für das gesamte Mittelrhein- und Moseltal erstellt. Die in diesem Artikel beschriebenen Ergebnisse sind Teil des MABEIS-Projekts. In Kooperation mit dem Landesamt für Geologie und Bergbau Rheinland-Pfalz (LGB) und dem Landesbetrieb Mobilität Rheinland-Pfalz (LBM) arbeitet die Arbeitsgruppe „Geoinformatik“ des Instituts für Geowissenschaften an der Johannes Gutenberg-Universität Mainz am Projekt MABEIS (Massenbewegungs-Informationssystem). Ziel des Projektes ist die Entwicklung eines geographischen Informationssystems mit dem dynamische Suszeptibilitäts- und Gefahrenhinweiskarten für Massenbewegungen als Prognosewerkzeug für Rheinland-Pfalz generiert werden können. Dieser Artikel stellt eine Vorabveröffentlichung von Teilen der Dissertation HAGGE-KUBAT dar.

## 2. Projektgebiet

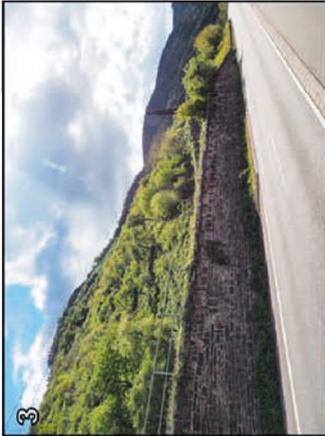
### Situation

Das Untersuchungsgebiet liegt im Bundesland Rheinland-Pfalz, im Mittelrhein- sowie im Moseltal. Beide sind als „Steinschlagreviere“ hinreichend bekannt und bieten durch das dichte und stark frequentierte Verkehrsnetz gegenüber Steinschlägen und Felsstürzen eine hohe Exposition (GRUNERT & HESS 2010). Dazu kommt eine gute Dokumentation der Ereignisse durch die Schadensfalldatenbank des Landesamtes für Geologie und Bergbau Rheinland-Pfalz sowie die Schadensfalldokumentationen des Landesbetriebes Mobilität. Daher weisen diese Gebiete eine hohe Relevanz bei gleichzeitig guter Datenlage für eine Validierung auf, wodurch sie entsprechend in der Priorisierung der Modellentwicklung als Testgebiete als erstes bearbeitet wurden.

Das Projektgebiet wird durch die Städte Bingen im Südosten, Bonn im Nordwesten sowie Koblenz (Nordosten) und Trier (Südwesten) begrenzt. Entlang der topographischen Kartenblätter im Maßstab 1:25000 wurde in einem circa 5 km breiten Streifen entlang der Flussläufe modelliert (siehe Abb. 3). Insgesamt hat das Projektgebiet eine Fläche von knapp 850 km<sup>2</sup> und zieht sich circa 230 km entlang der Mosel und 160 km entlang des Rheins.

### Geologie

Durch die geomorphologische Grunddisposition des engen, canyonartigen, antezedenten Durchbruchstals des Rheins sowie des tief ins Rheinische Schiefergebirge eingeschnittenen Moseltals kommt es an den unzähligen herausgewitterten Felsspornen immer wieder zu Abbruchsereignissen. Im Rahmen der variskischen Orogenese wurden die im devonischen Ozeantrug des Rhenoheryznischen Beckens abgelagerten feinkörnigen Sedimente intensiv gefaltet, geschiefert, entlang von Störungen versetzt, geklüftet sowie schwach metamorph überprägt. Dadurch entstand ein natürliches, intensiv verzweigtes Trennflächen- und Klüftinventar im Gesteinskörper. Lithologisch handelt sich hierbei um sandige Tonschiefer und Tonsteine (zum Teil in Wech-



sellagerung) sowie quarzitische Sandsteine und Quarzite (LGB 2005). Im Zuge der tertiären und quartären Hebung des Rheinischen Schiefergebirges vertieften Rhein und Mosel ihr Flussbett und schufen die Grundzüge der heutigen Morphologie. Das angelegte Trennflächengefüge war dann Ansatzpunkt für chemische, vor allem aber physikalische Erosionsprozesse, die den Fels

Abb. 2 (links): Zusammenstellung der verschiedenen Arten von Massenbewegungen am Beispiel des Rheinabschnitts von Kamp-Bornhofen bis Kestert: Beispiel 1: Mure am Auslauf eines Nebentals bei Kamp-Bornhofen. Während der Bahndurchlass noch ausreichend Raum bot, wurde die daneben verlaufende Bundesstraße 42 überschüttet; Beispiel 2: Beräumung einer Mure direkt oberhalb der Bahntrasse südlich von Kamp-Bornhofen. Weiter besteht hier eine Steinschlaggefährdung, weshalb dort eine Kombination aus Murgangssperre und Steinschlagschutzzaun errichtet wurde; Beispiel 3: Fossile Großrutschung südlich Kamp-Bornhofen. Der Rutschungsfuß wurde beräumt und zum Schutz der Bundesstraße 42 eine Stützmauer errichtet. Der Rhein ist hier durch die Rutschung verengt; Beispiel 4: Hangsituation südlich Bad Salzig. Hier besteht eine Steinschlaggefährdung für die Bahntrasse und die Bundesstraße 9 durch den steil stehenden Fels sowie Weinbergsmauern; Beispiel 5: Felssturz südlich Kestert. Der Felssturz überschüttete den Fangraum bergseits der Bahntrasse und alte Steinschlagsicherungen (alle Fotos von 2021, A. WEHINGER.)

an seiner Oberfläche entlang des angelegten Trennflächengefüges, in Fragmente unterschiedlicher Größe zerteilt. Während vor allem die unteren und mittleren Hangpartien heutzutage von unterschiedlich mächtigen Deckschichten aus Schieferschutt überlagert sind, entstanden in den oberen Hangabschnitten Rippen aus steilstehenden Ton-/Siltschiefen und quarzitäen Sandsteinen/Quarziten. Diese Felsaufschlüsse stellen potenzielle Steinschlagquellgebiete dar (LGB 2005).

### Nutzung

Die beschriebenen Flusstäler von Rhein und Mosel werden auf der gesamten Strecke intensiv verkehrstechnisch genutzt. Das Mittelreintal ist beispielsweise für den Güterverkehr als Nadelöhr das Verbindungsstück zwischen den großen Häfen in Nordeuropa und den Verbrauchern in Mittel- und Südeuropa. 170 Züge durchqueren jeweils auf beiden Seiten im Durchschnitt täglich das Tal. Auf beiden Seiten des Rheins sowie der Mosel verlaufen zudem Bundesstraßen häufig direkt am Hangfuß. Die bis über 60° steilen Hänge sind aufgrund der geeigneten klimatischen Bedingungen bei südlicher Exposition verbreitet weinbaulich genutzt. Alternativ sind die Hänge zumeist mit dichter Vegetation überwachsen und unterliegen vielfach keiner rezenten Nutzung. Am Talfuß befinden sich an breiteren Talabschnitten langgestreckte Siedlungen, welche heutzutage vom Weinbau und Tourismus geprägt sind. Abb. 2 zeigt beispielhaft für den Rheinabschnitt von Kamp-Bornhofen bis Kestert die verschiedenen Typen von Massenbewegungen und deren Einfluss auf die Infrastruktur und Bebauung.

## 3. Schadensfalldatenbank

Schadensfalldatenbanken können einen Schlüssel zur Validierung von Massenbewegungsmodellierung darstellen (GUZZETTI et al. 2012). Ein genaues Inventar von Massenbewegungen ist daher von entscheidender Bedeutung und eine wesentliche Eingangsgröße für die Untersuchung der Beziehung zwischen der räumlichen Verteilung von Steinschlägen und Felsstürzen sowie deren Einflussfaktoren (Bock et al. 2013). Die Rutschungsdatenbank Rheinland-Pfalz ist ein gemeinsames Projekt des Landesamtes für Geologie und Bergbau Rheinland-Pfalz und der Forschungsstelle Rutschungen (FSR) an der Johannes Gutenberg-Universität Mainz. Die Ereignisdatenbank beinhaltet Rutschungen, Felsstürze, Steinschläge, Erdfälle und Tagesbrüche auf der gesamten Fläche des Bundeslandes. Kumuliert handelt es sich um knapp 3000 Schadensfälle auf der gesamten Landesfläche (Stand: 2021). Im Wesentlichen wurden diese durch das LGB und im Gelände erfasst, dokumentiert oder wurden aus einschlägigen Diplomarbeiten und Dissertationen zusammengetragen. Neben dieser Datenbank dokumentiert der Landesbetrieb

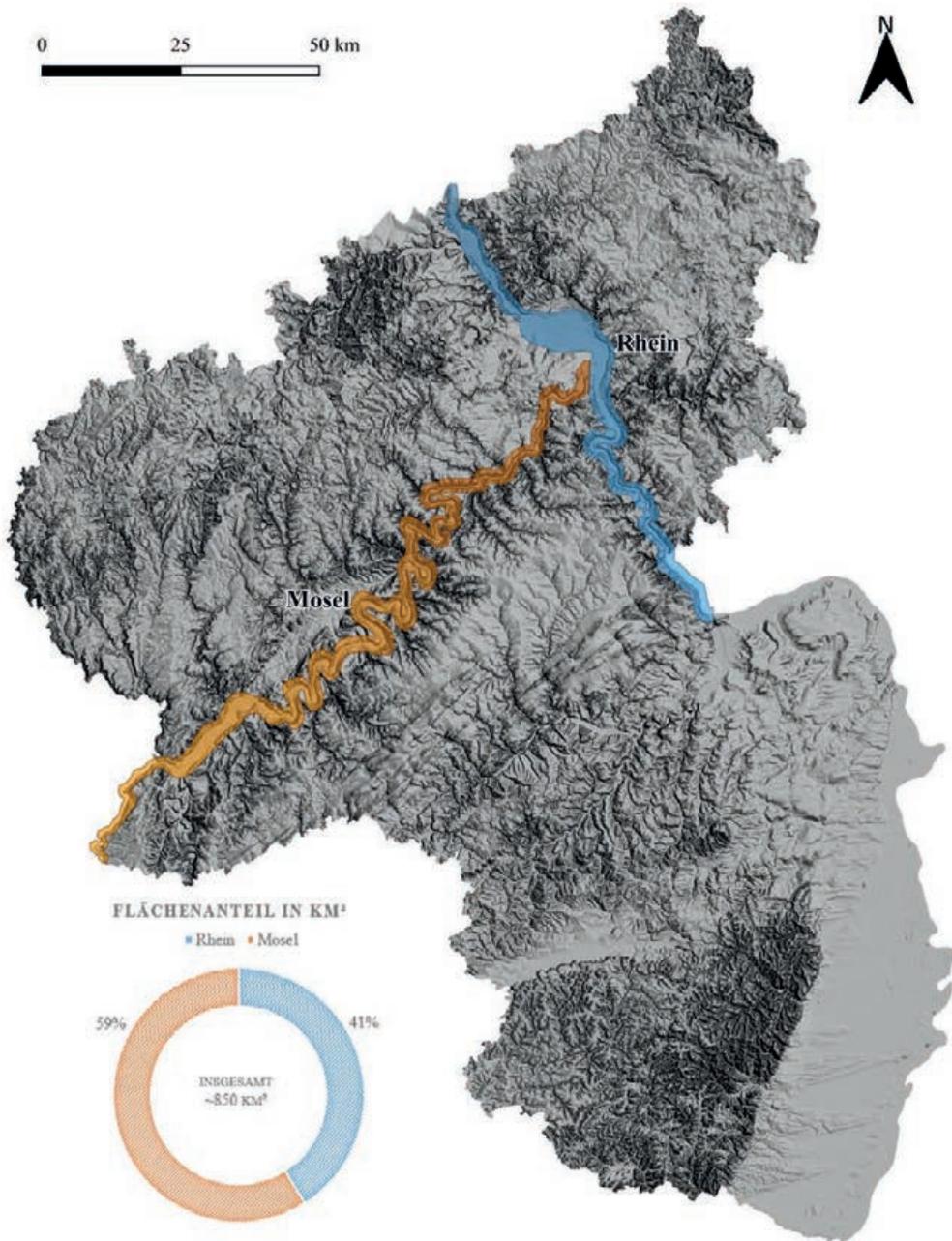


Abb. 3: Reliefkarte von Rheinland-Pfalz mit eingezeichneten Projektgebieten am Mittelrhein und im Moseltal.

Mobilität Rheinland-Pfalz alle Ereignisse, die den Straßenverkehr beeinflussen und mit Massenbewegungen in Zusammenhang stehen. Mehr als 300 weitere Ereignisse konnten somit zum Zeitpunkt dieser Studie landesweit zusätzlich zur Validierung der Modellierungen herangezogen werden. Generell enthält die Schadensfallbank nur registrierte Ereignisse. Ereignisse, bei denen kein Schaden für anthropogene Infrastruktur eintritt, werden meist nicht angezeigt und sind daher in der Datenbank zumeist nicht vertreten.

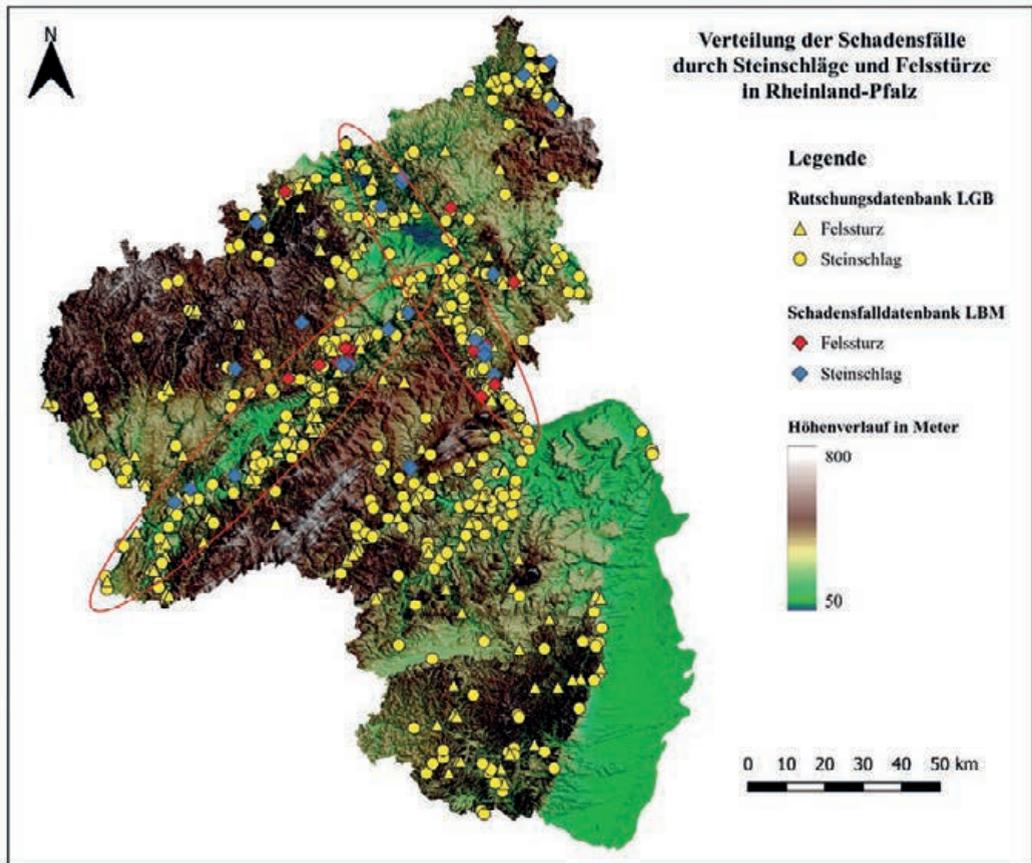


Abb. 4: Verteilung der Schadensfälle durch Steinschläge und Felsstürze in Rheinland-Pfalz mit eingezeichneten Verläufen der Flusstäler von Rhein und Mosel.

Wie aus Abb. 4 deutlich wird, befindet sich eine deutliche Aggregation von Einträgen in den Schadensfalldatenbanken mit der Kennung „Steinschlag“ oder „Felssturz“ entlang der rheinland-pfälzischen Flusstäler und dabei vor allem entlang des Rheins und der Mosel.

Dies lässt sich auf zwei wesentliche Gründe zurückführen:

- ◆ *Topographische und geologische Voraussetzungen:* Die Kombination aus jungen Durchbruchstälern mit zum Teil sehr steilem Relief und dem Schiefergebirge mit zahlreichen Trennflächen, Störungen und Anisotropien bietet sehr gute Voraussetzungen für Erosionsprozesse und Massenbewegungen.
- ◆ *Nähe zu Infrastruktur:* Diese natürlichen Voraussetzungen treffen auf ein seit römischer Zeit ausgebautes und frequentiertes Infrastruktursystem. Somit können bereits kleinere Steinschläge große wirtschaftliche Auswirkungen haben und Ereignisse werden häufiger als Schadensfälle angezeigt.

Daher ist in diesen beiden Flusstälern die Notwendigkeit einer Gefährdungsanalyse am größten, die in dieser Studie den Ausgangspunkt einer zukünftig landesweiten Modellierung darstellt.

## 5. Simulation des Sturzprozesses

In dieser Studie wurde das Gravitational-Process-Path Modell (GPP) für die Simulation von Steinschlägen und Felsstürzen verwendet. Das GPP ist ein seit 2017 fest eingebundenes Modell der open source GIS Software SAGA (System for Automated Geoscientific Analyses), durch das gravitative Massenbewegungsprozesse auf der Basis eines digitalen Geländemodells (DGM) simuliert werden können. Das GPP-Modell kombiniert verschiedene Sub-Modelle (u.a. Trajektorien- und Geschwindigkeitsberechnung) um die Bewegung eines Massepunktes vom Startpunkt bis zum Ablagerungsbereich physikalisch zu simulieren. Durch die Modellkomponente des *1-parameter friction model* kann der Prozess eines Steinschlags innerhalb des GPP modelliert werden (WICHMANN 2017).

Das Modell berechnet dabei für jede definierte Startzelle den hangabwärtigen Sturzverlauf sowie die maximale Geschwindigkeit auf Basis der Topographie, mithilfe der Neigung, Zellvorgängergeschwindigkeit sowie Reibungskoeffizienten der Nachbarzellen. Für jede dieser Startzellen wird eine nutzerdefinierte Anzahl von wiederholten Modellberechnungen durchgeführt. Der stochastische Algorithmus der Modellierung (*Monte Carlo random walk*, vgl. GAMMA 1996) ermöglicht dabei durch einstellbare Kalibrierungsparameter jeweils leicht unterschiedliche laterale Modellierungen für die einzelnen Iterationen. Das finale Modell berechnet sich aus der Überlagerung der einzelnen Iterationen (WICHMANN 2017). Sobald ein Gesteinsblock initial den Kontakt zur Oberfläche verliert, wird von freiem Fall ausgegangen und folgt der Gleichung

$$v_i = \sqrt{2 \cdot g \cdot h_f} \quad (1)$$

wobei  $v_i$  die Geschwindigkeit [m/s],  $g$  die Erdbeschleunigung [m/s<sup>2</sup>] und  $h_f$  die Höhendifferenz [m] zwischen der Startzelle und der gerade prozessierten Zelle darstellt. Der Aufprall auf dem Hang wird modelliert, wenn der Winkel zwischen der Startzelle und der aktuellen Position des Partikels den definierten Grenzwert des freien Falls unterschreitet. Dabei kann der Energieverlust des Aufpralls nach SCHEIDEGGER (1975), in der  $K$  den Betrag der unverbrauchten Energie in Prozent angibt, gemäß

$$v_i = \sqrt{2 \cdot g \cdot h_f \cdot K} \quad (2)$$

oder nach KIRKBY & STATHAM (1975), wenn  $\beta_i$  den lokalen Steigungsgradienten angibt, berechnet werden:

$$v_i = \sqrt{2 \cdot g \cdot h_f \cdot \sin \beta_i} \quad (3)$$

Dabei wird die Fallgeschwindigkeit parallel zur Steigung gespeichert. Die Berechnung der Bewegung nach dem Aufprall kann durch die Prozesse des Gleitens und des Rollens erfolgen:

$$v_i = \sqrt{v_{(i-1)}^2 + 2 \cdot g \cdot (h - \mu_s \cdot D)} \quad (4)$$

für den Prozess des Gleitens bildet sich aus der Geschwindigkeit  $v_{(i-1)}$  [m/s] der vorherigen Zellen des Sturzes,  $h$  gibt die Höhendifferenz der angrenzenden Zellen in Meter an,  $D$  ist der horizontale Abstand der angrenzenden Zellen und  $\mu_s$  ist der Gleitreibungskoeffizient. Für die Berechnung von Rollbewegungen wird Gleichung (4) folgendermaßen modifiziert:

$$v_i = \sqrt{v_{(i-1)}^2 + \frac{10}{7} \cdot g \cdot (h - \mu_r \cdot D)} \quad (5)$$

Der Rollwiderstandskoeffizient  $\mu_r$  ersetzt dabei den Gleitreibungskoeffizienten. Das Stoppen des modellierten Blockes erfolgt schlussendlich bei einer simulierten Geschwindigkeit von null (WICHMANN 2017).

Das GPP-Modell liefert nach einem erfolgreichen Modellierungsversuch die Outputs, die für eine Analyse der Steinschlaggefahr maßgeblich sind. So werden hierbei nicht nur der wahrscheinlichste Weg eines Gesteinskörpers den Hang abwärts modelliert, sondern zudem deren Auslaufstrecke und potenziellen Ablagerungsbereiche. Zusätzlich wird auch die maximale Geschwindigkeit in jeder Rasterzelle berechnet. Aus diesen Informationen lassen sich weitere Schussfolgerungen, die für eine Analyse der Vulnerabilität durch Sturzprozesse entscheidend sind, ableiten. So lassen sich aus der vermuteten oder ermittelten Masse und der modellierten Geschwindigkeit in Kombination mit der Kenntnis des wahrscheinlichsten Weges die kinetische Energie errechnen, die ein Gesteinskörper entlang seines Sturztrajektors oder bei Aufprall mit einem Hindernis erreichen würde. Dies kann dafür genutzt werden, um bereits vorhandene Schutzmaßnahmen, wie etwa Fangzäune, auf ihre Wirksamkeit zu überprüfen oder bei der Planung neuer Sicherungsmaßnahmen Mindestanforderungen zu definieren. Darüber hinaus lassen sich weitere entscheidende Parameter in das Modell integrieren, um beispielsweise die dämpfende Wirkung von Vegetation oder verschiedener Untergründe zu berücksichtigen.

Dabei ist zu beachten, dass die derzeit im GPP-Modell implementierten Modellierungsansätze nicht auf vollständig physikalischen Prozessen basieren, sondern auf validierten empirischen Prinzipien aufbauen, um die typischen makroskopischen Eigenschaften der Sturzbewegung näherungsweise zu modellieren (WICHMANN 2017). Heutzutage sind eine Reihe von rein physikalisch basierten numerischen Simulationsmodellen verfügbar (vgl. DORREN 2003, FRATTINI et al. 2008, Lu et al. 2018, Rossi et al. 2021), die es ermöglichen, Prozesse tiefergehend und mit einer höheren Präzision der einzelnen Sturzparameter zu simulieren. Diese Modelltypen erfordern jedoch eine Vielzahl geotechnischer Parameter wie etwa tiefergehende Gesteinseigenschaften, Blockgeometrien, Kohäsion oder geomechanische Bodenparameter. Diese erforderlichen detaillierten Informationen und die tatsächliche reale Situation und Heterogenität sowie die dafür benötigten Rechen- und Zeitaufwendungen beschränken die Anwendbarkeit dieser Modelle daher zumeist auf kleinskalige und fallbezogene Gebiete oder auf einzelne Sturzereignisse (AGLIARDI et al. 2009, MICHOUH et al. 2012, Lu et al. 2018, WICHMANN 2017). Da in dieser Arbeit jedoch der Anspruch besteht, eine flächendeckende Analyse der Gefährdung potentiell stürzender Massen innerhalb der Flusstäler von Rhein und Mosel zu erstellen, sind diese Modelle in diesem Kontext eher ungeeignet. Obwohl einige im GPP-Modell enthaltene Modellierungsansätze auf relativ einfachen Konzepten basieren, ermöglicht ihre komplexe Wechselwirkung die Abgrenzung des Ausmaßes von Sturzprozessen in zufriedenstellendem Maße auch für größere Gebiete (vgl. Simulationsergebnisse Kapitel 6). Akzeptable und plausible Ergebnisse können mit einer deutlich kleineren Anzahl an Eingabedaten und Modellparametern erzielt werden. So können durch verschiedene in dieser Arbeit entwickelte Implementation selbst mehrere Quadratkilometer große Gebiete in einem vertretbaren zeitlichen Rahmen gerechnet werden.

## 6. Modellierungsablauf

Die erfolgreiche Identifikation von Quellgebieten, aus den sich Steinschläge und Felsstürze entwickeln können, stellt ein maßgebliches Kriterium für die erfolgreiche Modellierung und Gefährdungszonierung dar (Rossi et al. 2021). Auf Basis eines hochaufgelösten DGMs in 1x1 Meter Auf-

lösung wurde im Rahmen des MABEIS-Projekts ein spezieller Index entwickelt, der geologische Aufschlüsse wie Felswände oder herausgewitterte Felsnasen mit hoher Präzision und Auflösung flächendeckend in Rheinland-Pfalz darstellt (vgl. Abb. 5). Dieser Index errechnet sich aus dem Quotienten der realen Oberfläche des Geländes (real surface) und der Hangneigung (slope) gemäß der Formel

$$SIDX = \frac{\log(surface)}{\log(slope)} \quad (6)$$

Dabei zeigen Werte  $> 0$  (dimensionslos) direkt Aufschlüsse oder geländestützende Mauerwerke an, Werte  $< 0$  lediglich steiles bodenbedecktes Gelände aus denen sich eher keine Steinschläge entwickeln können. Anthropogene Gebäudeflächen, welche anderenfalls ebenfalls Werte über 0 anzeigen, können in einem zweiten Schritt der Prozessierung durch Maskierung extrahiert werden.

Umfangreiche Geländekartierungen im Rahmen des Projektes haben gezeigt, dass durch den Index hervorgehobene Bereiche zu ca. ~95% mit offenen Felsbereichen verbunden sind. Die Darstellung des SIDX kann dazu dienen, Aufschlüsse gezielt im Gelände aufzusuchen um Lage- oder Trennflächenmessungen sowie Gesteinsbeschreibungen vornehmen zu können. Innerhalb dieser Studie wurde er jedoch hauptsächlich zur halbautomatisierten Identifikation von Quellgebieten für Steinschläge und Felsstürze genutzt. Dabei ist zu berücksichtigen, dass in der Realität nicht alle offenen Felsnasen gleichermaßen absturzgefährdet sind und daher unterschiedlich exponiert gegenüber eines tatsächlichen Steinschlagrisikos sind. Dennoch geht von den allermeisten

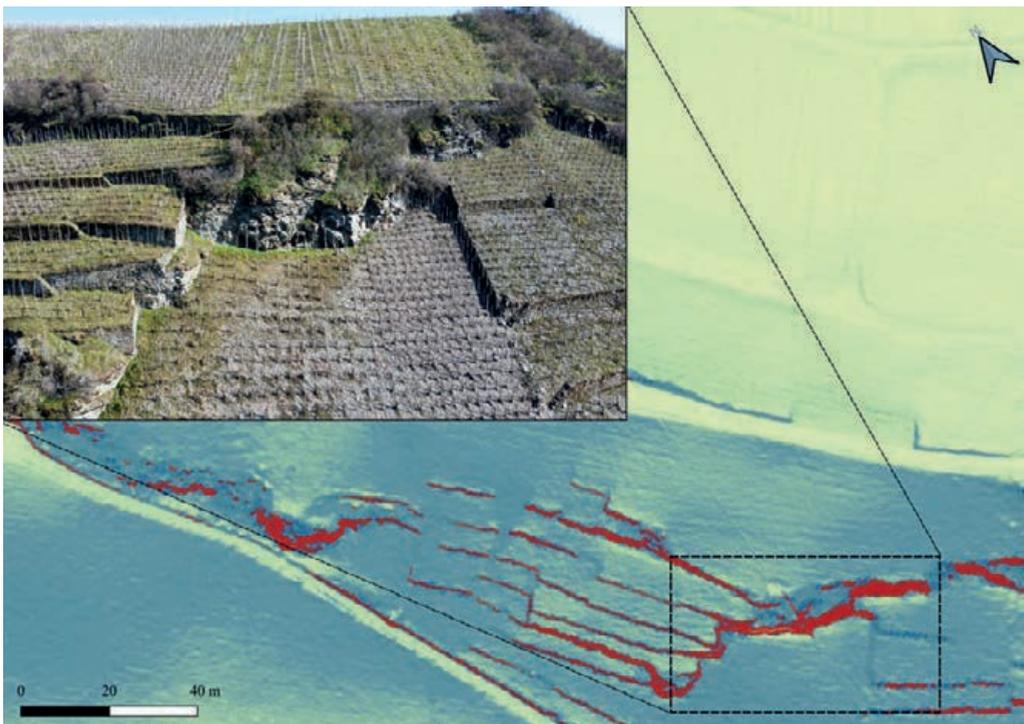


Abb. 5: SIDX Darstellung eines Aufschlusses bei Mehring an der Mosel. Die Felsaufschlüsse sowie alte Weinbergsmauern sind rot dargestellt, lediglich steiles Gelände blau (Drohnenaufnahme, HAGGE-KUBAT 21.03.2021).

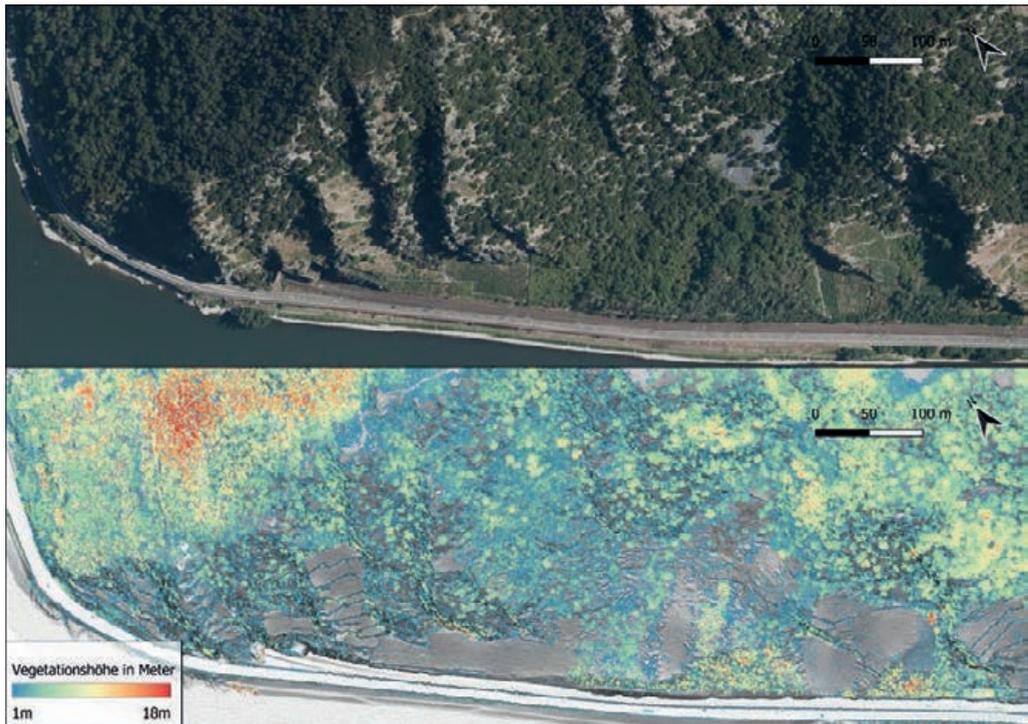


Abb. 6: Vegetationsverteilung extrahiert aus LiDAR-Daten am Rossstein (unten) im Vergleich mit der realen Situation aus Luftbilddaten (oben).

offenen Felsbereiche durch physikalische Erosionsprozesse früher oder später zumindest das Potenzial einer Steinschlagquelle aus, sodass diese Bereiche (ebenso wie alte Weinbergsmauern) für eine umfassende Karte des theoretischen Steinschlagpotenzials ebenfalls zu berücksichtigen sind.

Eine konkrete flächendeckende Risikoanalyse einzelner Felsbereiche (Suszeptibilität) ist innerhalb des MABEIS-Projektes in Bearbeitung und wird zu späterem Zeitpunkt publiziert (vgl. Kap. 11).

Neben der Identifikation der Quellgebiete lassen sich aus den LiDAR-Rohbefliegungsdaten des Landesamtes für Vermessung und Geobasisinformation Rheinland-Pfalz (LVerGeo) noch weitere Parameter ableiten, die entscheidenden Einfluss auf die modellierten Reichweiten und Geschwindigkeiten der Sturztrajektorien haben. So können beispielsweise die Vegetationsdichte und -höhe extrahiert werden und in das Modell integriert werden (Abb. 6). Vegetation spielt in der Transitzone von Sturzprozessen eine entscheidende Rolle, da Blöcke in ihrem Sturztrajektor an Baumstämmen abprallen und von Buschwerk gebremst werden können (vgl. Abb. 16). Dabei sind der Abstand und Durchmesser der Baumstämmen sowie die Art der Vegetation entscheidend. Vegetation und Schutzwälder spielen in der Steinschlag- und Felssturzprävention im alpinen Raum bereits eine übergeordnete Rolle und müssen für eine adäquate Modellierung modelltechnisch implementiert werden (DORREN et al. 2005, Moos et al. 2020). Im GPP-Modell konnten dafür den LiDAR-Vegetationsinformationen klassifizierte Rauigkeitsparameter aus Literaturdaten zugewiesen werden, die bei dichterem und höherer Vegetation bremsender auf die Sturzeschwindigkeit wirken und die Transitdistanz demzufolge zum Teil markant verkürzen.

In Kombination mit geologischen Informationen zur Gesteinsart und einer standardisierten Kubatur eines Gesteinsblocks von  $1 \text{ m}^3$  Größe lässt sich auf dieser Basis das GPP-Modell ausgehend aus den definierten Quellgebieten rechnen.

Als Ergebnis werden Rasterkarten erzeugt, welche die absolute Anzahl an modellierten Trajektorien durchläufen pro Rasterzelle für die definierte Zahl an Modellierungsiterationen sowie die maximal modellierte Geschwindigkeit eines Blocks pro Rasterzelle angeben. Daraus ergibt sich der Wirkungsbereich des Modellierungsvorgangs und damit die Reichweiten der Trajektorien die von den Quellgebieten ausgehen.

In Abb. 7 ist der gesamte Modellierungs- und Validierungsvorgang (siehe Kap. 8) als schematisches Flussdiagramm dargestellt.

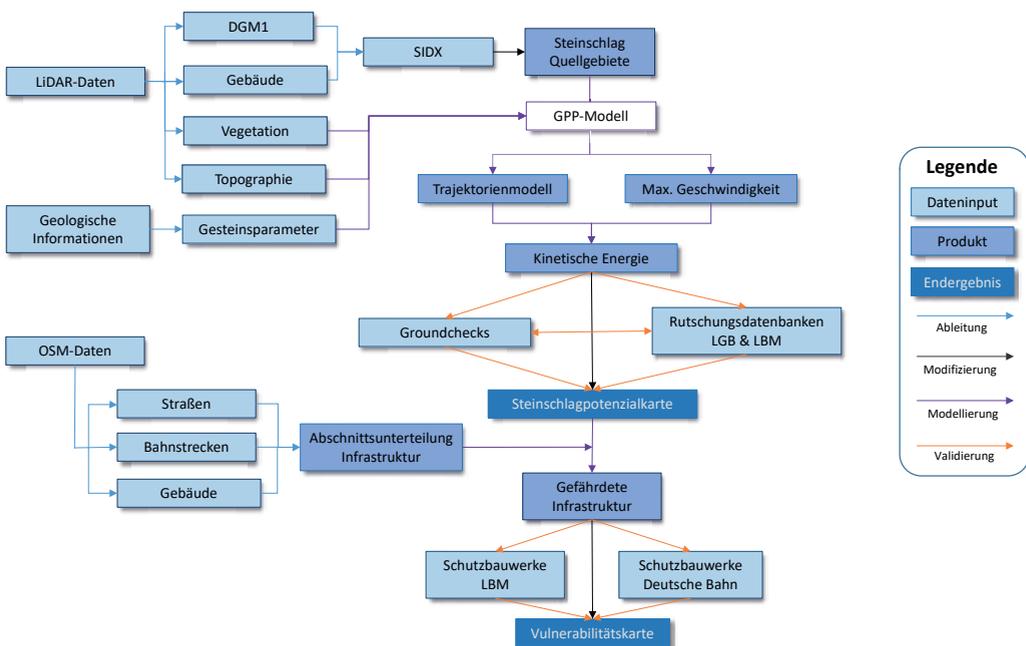


Abb. 7: Schematische Darstellung des Modellierungsvorgangs mittels GPP-Modell (DGM = Digitales Geländemodell, SDIX = Aufschlusskarte, GPP = Gravitational-Process-Path Modell).

## 7. Ergebnisse der Steinschlagmodellierung

Der Vorteil des vorgestellten Modellierungskonzepts besteht unter anderem in der Skalierbarkeit der Dateneingabe. So ist es möglich, auch größere Gebiete im beschriebenen teilautomatisierten Workflow innerhalb eines vertretbaren Zeitrahmens zu rechnen. Auf dieser Basis konnte in dieser Studie das gesamte Mittelrhein und Moseltal abschnittsweise modelliert und für die gesamte Projektgebietsfläche ein theoretisches Steinschlagpotenzial errechnet werden. Aufgrund der geographischen Größe dieses Gebietes (ca.  $850 \text{ km}^2$ ) und der Detaillierung der Modellierung bieten sich für die Ergebnisdarstellung dieses Artikels kleinräumigere Darstellungen gegenüber großräumigen Übersichten bevorzugt an, so dass im Folgenden drei repräsentative Modellierungsbeispiele kurz aufgezeigt und diskutiert werden.

## I. Rossstein

Der Hangbereich des Rosssteins gegenüber der Stadt Oberwesel ist eines der bekanntesten Gebiete für verschiedene Massenbewegungen, wie Steinschläge, Felsstürze und Muren, im Mittelrheintal. Etliche stark erodierte und zerklüftete Felsklippen devonischen Schiefers liegen hier markant steil aufragend oberhalb der rechtsrheinischen Bahnstrecke zwischen Rüdesheim um Koblenz. Diverse Schadensfälle sind in diesem Gebiet aus der Vergangenheit bekannt (ALBERTI et al. 2013, GRUNERT & HESS 2010, SCHMIDT 2009). Massive Sicherungsmaßnahmen der deutschen Bahn sichern die unterliegend angrenzende Bahnstrecke und zeugen von der erhöhten Steinschlag- und Murengefahr.

Abb. 8 zeigt die Steinschlagmodellierung für den Rossstein im Vergleich zur Verortung der Schadensfälle und der Sicherungsmaßnahmen. Die modellierten Trajektorien werden hierbei farblich von blau (geringe Trajektorienfrequenz pro Rasterzelle) bis rot (hohe Trajektorienfrequenz) dargestellt. Die Trajektorienfrequenz gibt die wahrscheinlichsten Sturzbahnen für Steinschlag-/Felssturzereignisse aus den jeweiligen Quellgebieten an.

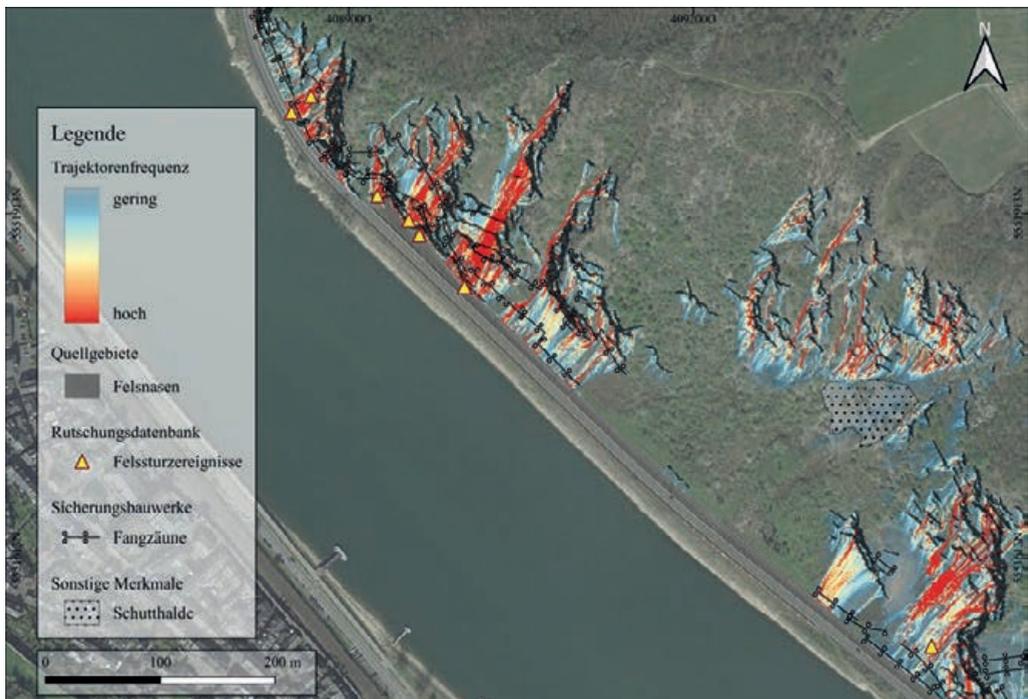


Abb. 8: Steinschlagmodellierung des Rosssteins mit eingezeichneten Schadensfällen und Sicherungsmaßnahmen.

Die modellierten Trajektorien zeigen plausibel diejenigen Hangbereiche an, bei denen in den letzten Jahrzehnten tatsächliche Sturzereignisse in den Datenbanken verzeichnet sind (gelbe Markierungen). Darüber hinaus passen die modellierten Sturzbahnen zu den realen Sicherungsmaßnahmen der deutschen Bahn. Die Fangzäune enden dort, wo auch in der Modellierung keine Trajektorien mehr berechnet werden. Insgesamt erscheint das Steinschlagpotenzial durch die rezenten Schutzmaßnahmen in zufriedenstellendem Maße gesichert zu sein. Vorhandene Quellgebiete, die außerhalb der Sicherungsmaßnahmen verortet sind, erreichen mit ihren Tra-

jektorien nicht die Bahnstrecke, sondern werden durch die Topografie und die Vegetation vorher abgebremst und aufgehalten. Zeugnis davon ist unter anderem eine größere Schutthalde im nordöstlichen Teil des Hanges. Auch hier enden die Trajektorien der hangaufwärtsliegenden Quellgebiete direkt oberhalb der Schutthalde, sodass sich die modellierten Ablagerungsbereiche (Stopping Positions) direkt in der realen Schutthalde enden. Dies könnte invers auch die Entstehung der Schutthalde erklären. Insgesamt zeigt sich eine deutliche Übereinstimmung der Modellierung mit den realen Verhältnissen.

## II. Beilstein – Burg Metternich

Südlich von Beilstein an der Mosel befindet sich ein steil nach Westen, zur Mosel hin abfallender Berghang oberhalb der Landstraße 98. Bekannt ist der Bergrücken durch die auf einem markanten Felsporn gelegene Ruine der Burg Metternich auf seiner Kuppe. In der Vergangenheit kam es laut den Schadensdokumentationen von LGB und LBM in den Jahren 1961, 1964 und 2010 zu mehreren Schadensfällen durch Steinschlag- und Felssturzereignisse im betreffenden Hangbereich unterhalb der Burgruine. Bei den Ereignissen stürzten Blöcke bis auf die knapp 60 Meter unterliegende Landstraße. Die hier vor allem direkt unterhalb des Burgsockels anstehenden Ton- und Bänderschieferlagen fallen steil hangparallel ein und sind von starken Querklüften und Störungen durchzogen. Der weitere Hangbereich ist steil abfallend und wird vor allem weinbaulich genutzt, bevor am Hangfuß ein Parkplatz und die L98 anschließt.

Die Steinschlagmodellierung für den betreffenden Hangbereich (Abb. 9) zeigt, dass sich der Hauptwirkungsbereich für stürzende Massen in einem Korridor von knapp 30 Metern Breite im zentralen Hangbereich befindet. Dabei werden in der Modellierung Trajektorien, entsprechend



Abb. 9: Steinschlagmodellierung des Burgbergs bei Beilstein mit eingezeichneten Schadensfällen der Rutschungsdatenbank Rheinland-Pfalz.



Abb. 10: Drohnenaufnahme des Westhangs des Burgbergs mit eingekreistem Steinschlagfangzaun auf halber Hanghöhe.



Abb. 11: Drohnenaufnahme der offenen Felspartie unterhalb der Burg Metternich mit eingekreisten „Stummen Zeugen“ (Relikte früherer Steinschläge/Felsstürze).

der Schadensfalldokumentationen, auch bis hin zur L98 und sogar bis zu Mosel berechnet. Die zur Validierung herangezogenen Lokalitäten der realen Schadensfälle liegen wie schon im Fallbeispiel des Rossteins genau innerhalb des modellierten Hauptpotenzialgebietes (erwählter Korridor), wobei darauf hingewiesen werden muss, dass die Dokumentation älterer Steinschläge und Felsstürze nicht immer eine absolut sichere Verortung erlaubt.

Im modellierten Hauptsturzgebiet befindet sich auf halber Hanghöhe ein verhältnismäßig neuer Steinschlagfangzaun von 2,5 Metern Höhe (Abb. 10). Weiter wird das von der Modellierung ausgewiesene Steinschlagpotenzial von rezenten Abbrüchen aus der Felswand unterhalb der Burgruine und vorgefundenen „Stumme Zeugen“ bestätigt (Abb. 11).

Die Modellierung kann auch in diesem Fall als plausibel beschrieben werden und weitere Rückschlüsse gezogen werden. Dadurch, dass die L98 sowie der Parkplatz an dieser Stelle in Form des korrekt positionierten, modernen Fangzauns gesichert ist, lässt sich eine Gefahr für parkenden Autos oder den Verkehr als deutlich verringert beschreiben. Dennoch geht ein Restrisiko bei größeren Abbrüchen von diesem Hangbereich aus.

### III. Rheinsteig bei Wellmich

Im Jahr 2018 ereignete sich auf dem europäischen Fernwanderweg E3 (Rheinsteig) bei Wellmich – St. Goarshausen ein kleineres Felssturzereignis, infolge des Kollabierens einer alten Weinbergs-/Stützmauer. Die Mauer, die zur Stabilisierung einer Serpentinenspitzenkehre des Wanderwegs diente, wurde vermutlich infolge des Bewuchses (Wurzeldruck, Bodenbildung) und der damit verbundenen Auflockerung, der abnehmenden Drainagewirkung und zunehmenden Frostempfindlichkeit mit der Zeit instabil und kollabierte schließlich am 10.04.2018. Dabei rollten die kubisch behauenen Bruchsteine die steile Böschung hinab und hinterließen einen Schuttfächer auf dem darunter liegenden Teil des Serpentinengeweges (Abb. 12). Teile der oberliegenden Serpentine wurden dabei mitgerissen, sodass der Wanderweg zwischenzeitlich gesperrt werden musste.



Abb. 12: Steinschlagmodellierung und Geländeaufnahme des Fessturzereignisses bei Wellmich (Foto: T. HAGGE-KUBAT, 11.04.2018).

Die Thematik von versagenden instabilen Weinbergsmauern ist allgemein bekannt und wird insbesondere in nicht mehr bewirtschafteten Weinbergen in Zukunft noch häufiger zu Schadensfällen an Rhein und Mosel führen. Daher wurde im Rahmen dieser Studie generell auch alten Weinbergs- und Stützmauern als potenzielle Steinschlagquellgebiete definiert und in die Modellierung mit einbezogen. In diesem Fall zeigt die Modellierung ihr Potenzial als Werkzeug für eine konkrete Einzelfallbetrachtung eines stattgefundenen Ereignisses. Es wird deutlich, dass das Modell den realen Sturzverlauf der kollabierten Mauer sehr präzise errechnet und die Endpositionen der modellierten Trajektorien mit dem realen Ablagerungsbereich übereinstimmen (Abb. 12). Die rechnerischen Stopping Positions entsprechen also den tatsächlichen. Bei einer Geländebegehung am 11.04.2018 wurden zudem in den Hangbereichen, in denen die Modellierung die höchste Trajektorienfrequenz ermittelt, die meisten Steinschlagmarken, wie etwa Baumtreffer, „Stumme Zeugen“ oder Bodenriefen vorgefunden.

Die sehr gute Übereinstimmung von rechnerischem Modell und tatsächlichem Ereignis belegt, dass die angewandten Werkzeuge prinzipiell für die Identifikation von Gefahrenbereichen und die Positionierung und Dimensionierung von Schutzmaßnahmen, wie Fangzäunen, geeignet ist.

## 8. Validierung

Zur Validierung des modellierten Steinschlagpotenzials wurden vorrangig die beschriebene Rutschungsdatenbank des LGB, die Ereignisakten des LBM sowie die Befunde aus zahlreichen Gelände-

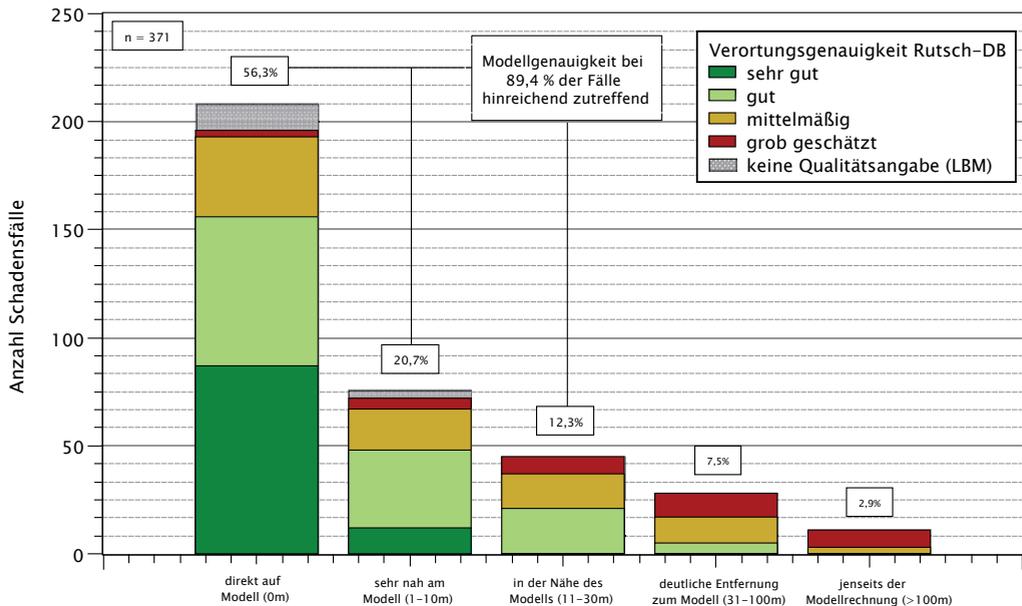


Abb. 13: Vergleich der Lage und Qualität der Einträge der Rutschungsdatenbanken mit den Modellierungsergebnissen.

begehungen herangezogen. In den Datenbanken wurden hierbei zunächst die Fälle nach dem Prozesstyp „Steinschlag“ und „Felssturz“ klassifiziert. Insgesamt konnten so 371 Einzelereignisse in den Datenbanken im betreffenden Projektgebiet an Rhein und Mosel mit den Modellierungsergebnissen verglichen werden. Entscheidendes Kriterium ist hierbei die Qualität der Verortung der Ereignisse sowie eine mögliche Beschreibung des aufgetretenen Prozesses.

Dabei ist allgemein darauf hinzuweisen, dass Prozesse wie Steinschläge oder Felsstürze, die in Ihrem Sturzverlauf vom Quell- bis zum Ablagerungsgebiet zum Teil dutzende Meter umfassen, nicht vollständig über Einzelpunkte beschrieben werden können. Dies ist bei der Prüfung der Ereignisdaten ebenso wie die unterschiedliche Qualität der Verortung in den zum Teil historischen Unterlagen zu beachten. In den Metadaten der LGB-Datenbank sind Qualitätsangaben der Verortungsgenauigkeit einzelner Punkte verfügbar. In der Regel sind jedoch insbesondere neuere Ereignisse hinreichend genau verortet und lassen sich dementsprechend gut mit den Modellierungsergebnissen in Relation setzen.

Generell lässt sich feststellen, dass die Modellierungsergebnisse und die Punkte der Rutschungsdatenbanken durchaus kongruent sind. Wie in Abb. 13 dargestellt, zeigt sich, dass knapp 56,3% der lokalisierten Schadensfälle der Datenbanken im Projektgebiet überwiegend direkt auf modellierten Trajektorien liegen. Weitere 33% der Schadensfälle sind in einem Bereich von bis zu 30 Meter unmittelbar neben den errechneten Bahnen verortet. Insgesamt sind damit über 90% der in den Datenbanken beschriebenen Ereignisse durch die Modellierung treffend rekonstruierbar. Die vorgestellten Fälle aus Kap. 7 stehen dafür beispielhaft und lassen sich äquivalent auf dutzende weitere Fälle adaptieren. Darüber hinaus muss darauf hingewiesen werden, dass sich innerhalb der knapp 10 % der Fälle, welche nicht direkt den Modellierungsergebnissen zugeordnet werden können, die meisten Fälle mit einer geringeren Verortungsgenauigkeit befinden und daher möglicherweise nicht zuverlässig lokalisiert werden konnten.



Abb. 14: „Stummer Zeuge“, eingeschlagen auf einem Wanderweg bei Valwig an der Mosel (Foto: T. HAGGE-KUBAT, 15.10.2020).

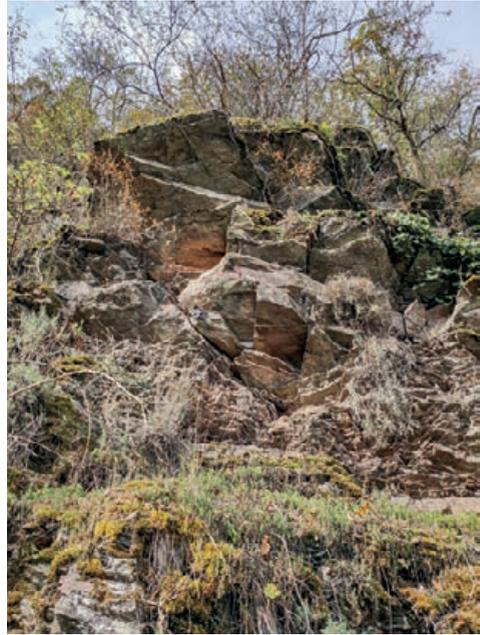


Abb. 15: Zerklüftete Felswand bei Cochem an der Mosel mit Anzeichen von rezenten Ausbrüchen (Foto: T. HAGGE-KUBAT, 14.10.2020).



Abb. 16: Blockeinschlag in einen Baum bei Trechtingshausen im oberen Mittelrheintal (Foto: T. HAGGE-KUBAT, 09.03.2021).

Zusätzlich zu den Datenbanken wurden verschiedene modellierte Quellgebiete und Trajektorienverläufe gezielt im Gelände aufgesucht und nach Hinweisen auf eine mögliche oder bereits stattgefundenene Steinschlagaktivität überprüft. Dabei wurden, wie die Abbildungen 14 bis 16 belegen, in der Regel adäquate Marker wie Ausbrüche aus Felswänden, Vegetationseinschläge, „Stumme Zeugen“ oder rezente Sicherungsmaßnahmen vorgefunden.

## 9. Ermittlung der infrastrukturellen Vulnerabilität

Die Modellvalidierung zeigt, dass die errechneten Sturzbahnen mit realen Ereignissen und Geländebefunden vergleichbar sind. Daher wurde in einem weiteren Schritt versucht auf dieser Basis die Vulnerabilität der Verkehrsinfrastruktur im Projektgebiet zu ermitteln. Hierzu wurden zunächst aus den

frei verfügbaren OSM (Open Street Map)-Vektordaten die Straßen- und Bahnstreckenverläufe extrahiert. Die Verkehrswege wurden anschließend in Teilstücke von 5 Metern Länge segmentiert und bei gegebener Überschneidung die Rasterwerte der Steinschlagmodellierung zugewiesen (Abb. 17).

Es ergeben sich Segmente mit Werten, bei denen von einer Steinschlaggefahr auszugehen ist und solche, die rechnerisch von keinem Einfluss betroffen sind. Der Prozess wurde als Eigenentwicklung skriptbasiert automatisiert und als „VulWay“-Prinzip benannt.

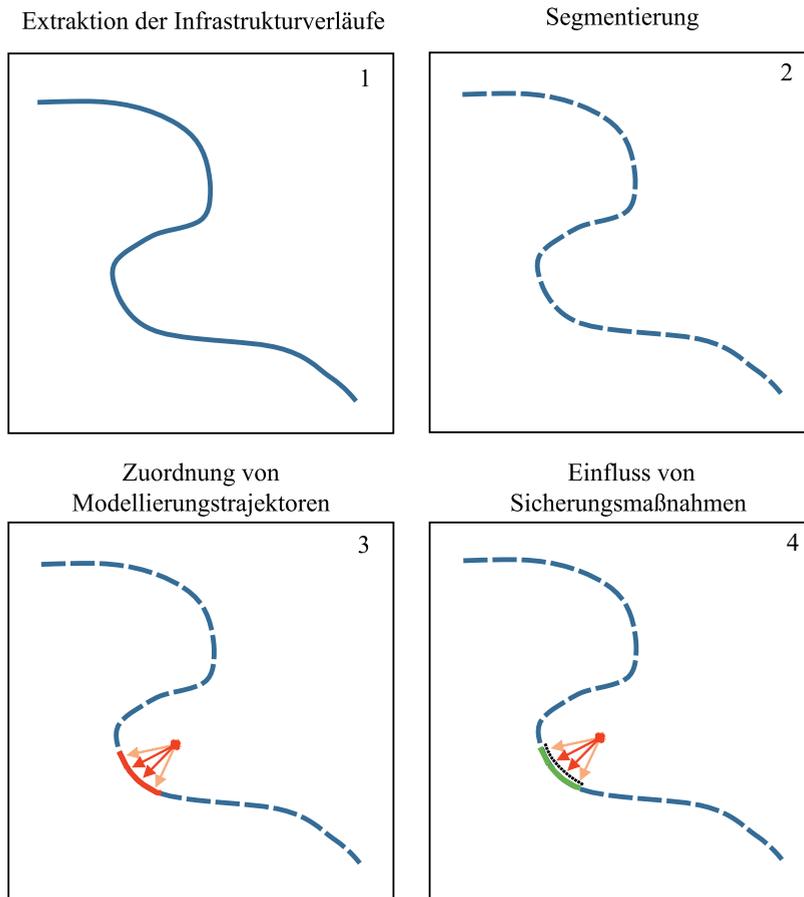


Abb. 17: Schematische Darstellung der Identifikation von steinschlaggefährdeten Streckenabschnitten mittels des VulWay-Prinzips.

In vielen Fällen sind betroffene Streckenabschnitte bereits durch verschiedene Schutzbauwerke wie Fangzäunen, Vernetzungen oder Schutzplanken gesichert. Entsprechend wurden innerhalb dieser Studie auch Daten von Schutzbauwerken des LBM und der deutschen Bahn für das Land Rheinland-Pfalz implementiert. Die Lage, Größe und Art des Schutzbauwerks konnten auf diesem Weg mit den Modellierungsergebnissen verschnitten werden und Straßen- sowie Bahnabschnitte, welche modelltechnisch ursprünglich als „gefährdet“ klassifiziert wurden, als

## Gefährdung der Infrastruktur durch Felsstürze

Ausschnitt Kartenblatt 5711

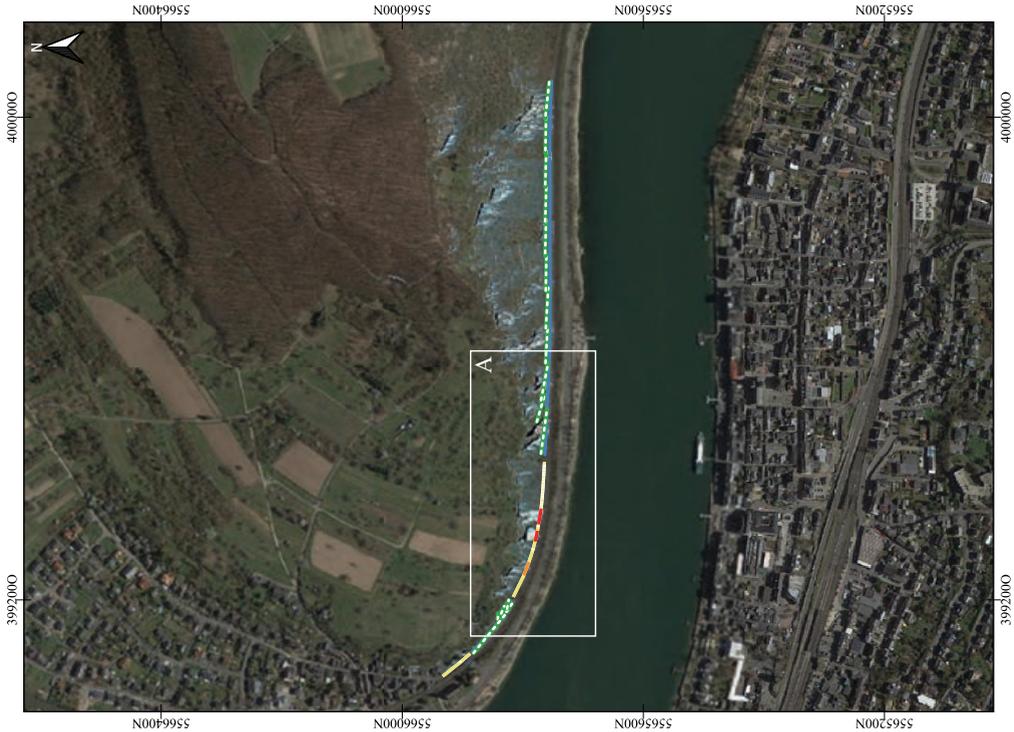
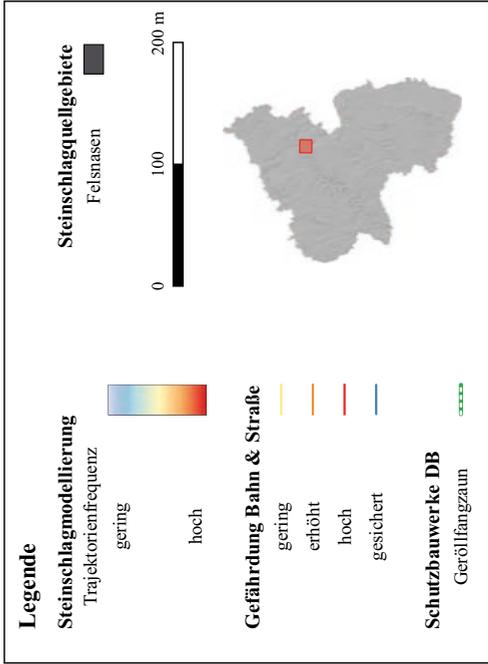


Abb. 18: Vulnerabilitätsberechnung der Infrastruktur auf Basis der Steinschlagmodellierung bei Filsen im Mittelrheintal.

„gesichert“ bestimmt werden. Auch hierbei ließ sich durch Geländebegehungen eine hohe Übereinstimmung von Modellierungsergebnissen und Gefährdungs- und Sicherungsbereichen nachweisen.

Abb. 18 stellt beispielhaft die beschriebene Vulnerabilitätsbestimmung auf einem Ausschnitt des Kartenblattes TK 25 5711 bei Filsen am Rhein dar. Dieser Bereich des oberen Mittelrheintals weist eine hohe Exposition gegenüber stürzender Massenbewegungen auf, da hier hangseitig markant viele offene Felswände und verwitterte Felsformationen anstehen. Davon zeugen diverse Vernetzungen zur Sicherung der rechtsrheinischen Bahnstrecke. Wie zu erkennen ist, decken sich ein Großteil der modellierten Gefahrenzonen für Steinschläge/Felsstürze mit den vorhandenen Sicherungsmaßnahmen der deutschen Bahn, sodass die Bahnstrecke an diesen Bereichen hinreichend gesichert scheint. Darüber hinaus sind allerdings einige Segmente ausgewiesen, bei denen nach jetzigem Stand, von einer hohen modelltechnischen Vulnerabilität der Bahnstrecke ohne entsprechende Sicherung auszugehen ist (Vergrößerung A). Hier kann die Modellierung zur anschließenden gezielten Überprüfung solcher Bereiche dienen.

Es ist an dieser Stelle darauf hinzuweisen, dass die vorgestellten Modellierungen prinzipiell eine vereinfachte Abbildung der natürlichen Prozesse darstellen und daher die Ergebnisse in der Örtlichkeit zu überprüfen sind.

## 10. Fazit

Eine flächendeckende Kartierung der Steinschlag- und Felssturzgefährdung an den exponierten Hängen der rheinland-pfälzischen Flusstäler ist bislang nicht verfügbar. Die zahlreichen Schadensfälle und kostenintensiven Sicherungsmaßnahmen, welche zum Schutz der kritischen Infrastruktur in diesem Gebiet errichtet wurden, zeigen, dass ein solches Kartenwerk die Präventionsbemühungen von den Verkehrssicherungspflichtigen, wie Bahn, LBM, Kommunen u.a., in entscheidendem Maße verbessern könnte. Daher wurde im Rahmen des MABEIS-Projektes der erste Schritt unternommen, ein halbautomatisiertes System zu entwickeln, welches potenzielle Steinschlagquellgebiete hochaufgelöst definiert und deren Sturzpotential modelliert. Das entwickelte System, basiert vollständig auf Open Source Software wie QGIS und SAGA GIS sowie hochaufgelösten LiDAR-Daten des Landesamtes für Vermessung und Geobasisinformation (LVermGeo) Rheinland-Pfalz. Das Modell nutzt eine präzise Ausweisung der Steinschlagquellgebiete mittels Surface-Index, sowie weiterer Inputdaten zu Vegetation und Geologie um das theoretische Steinschlagpotenzial des gesamten Mittelrhein- sowie Moseltals flächig zu berechnen. Es konnten sowohl konkrete Steinschlag- und Felssturzereignisse plausibel nachgestellt, als auch bislang nicht bekannte potenzielle Gefährdungsgebiete detektiert werden. Ein zentraler Bestandteil der Modelentwicklung ist die Validierung unter Einbezug der Schadensdatenbanken von LGB und LBM sowie zahlreicher Geländeüberprüfungen. Zusätzlich sind Schutzmaßnahmen wie Fangzäune oder Vernetzungen in das Modell integriert und deren Schutzwirkung berücksichtigt.

Durch die Implementierung der realen Infrastruktur konnten flächendeckende Vulnerabilitätsberechnungen durchgeführt werden, welche konkrete Streckenabschnitte von Bahnstecken und Straßen für weitere Gefährdungsabschätzungen ausweist. Diese decken sich mit den tatsächlichen Schadensfällen und Sicherungsmaßnahmen und können daher als plausibel eingeschätzt werden. Die Ergebnisse dieser Studie können als Hinweis dienen, welche Stellen zukünftig besonderer planungstechnischer Aufmerksamkeit zukommen könnte.

Abschließend ist erneut zu bemerken, dass Simulationsrechnungen zur Abschätzung von Prozessen in der Natur zwar eine große und oft nicht ersetzbare Bedeutung haben, dass sie aber letztlich nur eine vereinfachte Abbildung dieser natürlichen Prozesse ermöglichen. Eine konkrete Betrachtung der realen lokalen Verhältnisse durch Untersuchungen und Kartierungen im Gelände sowie die Untersuchung von Schadensereignissen ist deshalb unerlässlich.

## 11. Ausblick

Das in dieser Studie vorgestellte System lässt sich als plausibles Instrument für eine Steinschlagpotenzialanalyse der großen Flusstäler in Rheinland-Pfalz beschreiben. Die hier vorgestellten Ergebnisse sind gleichwohl weiterzuentwickeln und an zukünftigen Ereignissen fortlaufend zu validieren. In einem weiteren Schritt soll das System auch auf zusätzliche Gebiete und schlussendlich die gesamte Landesfläche von Rheinland-Pfalz ausgeweitet werden.

Dabei ist die Suszeptibilität, also die Risikoeinschätzung, für das Eintreten solcher Fälle in der Potenzialanalyse noch nicht berücksichtigt. Zukünftig könnte eine solche Suszeptibilitätsanalyse einen weiteren Beitrag dazu leisten, die Steinschlaggefährdungseinschätzung weiter zu verfeinern und befindet sich derzeit in der Entwicklungsphase im MABEIS-Projekt. Eine solche Analyse basiert auf verschiedenen Inputparametern die klimatische, gesteinsmechanische und anthropogene Bedingungen abbilden (Abb. 18). Diese können mit verschiedener Gewichtung eine Einschätzung über eine differenzierte Risikolage bedeuten.



Abb. 19: Schematische Darstellung einer möglichen Suszeptibilitätsanalyse von Hangbereichen in Rheinland-Pfalz. Weiterhin sind die verschiedenen Faktoren, die die Gefahr durch Massenbewegungen beeinflussen, zusammengestellt.

Bei einer erfolgreichen Durchführung und Validierung dieses Systems könnten die Ergebnisse in Kombination mit den in diesem Artikel vorgestellten Potenzialanalysen zu einer weiteren Annäherung einer flächendeckenden Gefahrenhinweiskarte für das Land Rheinland-Pfalz führen. Bei entsprechender Anwendung und der damit verbundenen Vermeidung oder Minderung von Schadensfällen ergibt sich ein enormes volks- und betriebswirtschaftliches Einsparpotential.

## Schriften

- AGLIARDI, F., CROSTA, G. B., & FRATTINI, P. (2009): Integrating rockfall risk assessment and countermeasure design by 3D modelling techniques. – *Natural Hazards and Earth System Sciences*, **9** (4): 1059-1073.
- ALBERTI, M., WEHINGER, A. & KRAUTER, E. (2013): Hang und Felssicherungsmaßnahmen in der Welterberegion Oberes Mittelrheintal. Geländeexkursion am 13.06.2013. – Forschungsstelle Rutschungen an der Johannes Gutenberg-Universität Mainz. 13. Weiterbildungsseminar Rutschungen: 39-42; Mainz.
- BOCK, B., WEHINGER, A., & KRAUTER, E. (2013). Hanginstabilitäten in Rheinland-Pfalz–Auswertung der Rutschungsdatenbank Rheinland-Pfalz für die Testgebiete Wißberg, Lauterecken und Mittelmosel. – *Mainzer Geowiss Mitt*, **41**: 103-122; Mainz.
- DIKAU, R., EIBISCH, K., EICHEL, J., MESSENZEHL, K. & SCHLUMMER-HELD, M. (2019): Gravitative Massenbewegungen und Reliefformung. – *Geomorphologie*: 189-225; Heidelberg.
- DORREN, L. K. A (2003): A review of rockfall mechanics and modelling approaches. – *Progress in Physical Geography*, **27**: 69–87.
- DORREN, L.K.A., BERGER, F., LE HIR, C., MERMIN, E. A & TARDIF, P. (2005): Mechanisms, effects and management implications of rockfall in forests. – *Forest Ecology and Management*, **215** (1–3): 183–195.
- FRATTINI, P., CROSTA, G., CARRARA, A., & AGLIARDI, F. (2008): Assessment of rockfall susceptibility by integrating statistical and physically-based approaches. – *Geomorphology*, **94** (3-4): 419-437.
- GAMMA, P. (1996): Großräumige Modellierung von Gebirgsgefahren mittels rasterbasiertem Random Walk. – *Modellierung und Simulation räumlicher Systeme mit Geographischen Informationssystemen, Proceedings-Reihe der Informatik*, **96** (9): 93–105.
- GRUNERT, J., & HESS, S. (2010): The upper middle Rhine valley as a risk area. – *Natural hazards*, **55** (3): 577-597; Mainz.
- GUZZETTI, F., MONDINI, A. C., CARDINALI, M., FIORUCCI, F., SANTANGELO, M., & CHANG, K. T. (2012): Landslide inventory maps. New tools for an old problem. – *Earth-Science Reviews*, **112**: 42-66.
- KIRKBY, M. J. & STATHAM, I. (1975): Surface stone movement and scree formation. - *J. Geol.* **83** (3): 349-362; Chicago (The University of Chicago Press).
- LBM (2021): B49 – Koblenz: Steinschlag zwischen Moselweiß & Lay. Internet: <https://lbm.rlp.de/de/aktuelles/detail/news/News/detail/b-49-koblenz-steinschlag-zwischen-moselweiss-und-lay/> (01.07.2021).
- LGB (2005): Geologie von Rheinland-Pfalz. Landesamt für Geologie und Bergbau Rheinland-Pfalz (Hrsg.). – VII, 400 S; Stuttgart (Schweizerbart).
- LGB (2021): Der Felssturz von Kestert vom 15.03.2021. Projektbericht. – Internet: <https://www.lgb-rlp.de/fachthemen/projekte/projektliste/felssturz-bei-kestert.html> (13.06.2021).
- LU, G., CAVIEZEL, A., CHRISTEN, M., BÜHLER, Y., & BARTELT, P. (2018): Modelling rockfall dynamics using (convex) non-smooth mechanics. – *Numerical Methods in Geotechnical Engineering*, **9**: 575-583; Porto.
- MICHOUD, C., DERRON, M. H., HORTON, P., JABOYEDOFF, M., BAILLIFARD, F. J., LOYE, A., NICOLET, P., PEDRAZZINI, A. & QUEYREL, A. (2012): Rockfall hazard and risk assessments along roads at a regional scale. example in Swiss Alps. – *Natural Hazards and Earth System Sciences*, **12** (3): 615-629.
- MOOS, C., KHELIDJ, N., GUIGAN, A., LISCHKE, H., & RANDIN, C. F. (2021): A quantitative assessment of rockfall influence on forest structure in the Swiss Alps. – *European Journal of Forest Research*, **140** (1): 91-104.

- ROSSI, M., SARRO, R., REICHENBACH, P., & MATEOS, R. M. (2021): Probabilistic identification of rock-fall source areas at regional scale in El Hierro (Canary Islands, Spain). – *Geomorphology*, **381**: 107661.
- SCHEIDEGGER, A. (1975): *Physical Aspects of Natural Catastrophes*. – 289 S., Amsterdam (Elsevier)
- SCHMIDT, H. (2009): *Gravitative Massenbewegungen im Oberen Mittelrheintal*. – Diplomarbeit an der Johannes Gutenberg-Universität Mainz; Mainz [unveröff.].
- WEHINGER, A. & KATTLER, R. (2014): Massenbewegungen im Mittelrheintal – Untersuchungen zum möglichen Einfluss von bahnbedingten Erschütterungen auf die Hangstabilität. – *Mainzer geowiss. Mitt.*, **42**: 143-166.
- WICHMANN, V. (2017): The Gravitational Process Path (GPP) model (v1.0) - A GIS-based simulation framework for gravitational processes. – *Geoscientific Model Development*, **10**: 3309– 3327.

Manuskript eingegangen am 5.9.2021

#### Anschriften der Autoren

TEEMU HAGGE-KUBAT

Institut für Geowissenschaften, Johannes Gutenberg-Universität Mainz  
Johann-Joachim-Becher-Weg 21  
D-55128 Mainz  
E-Mail: hagge-kubat@uni-mainz.de

PHILIP SÜßER

Institut für Geowissenschaften, Johannes Gutenberg-Universität Mainz  
Johann-Joachim-Becher-Weg 21  
D-55128 Mainz  
E-Mail: suesser@uni-mainz.de

Prof. Dr. FRIEDER ENZMANN

Institut für Geowissenschaften, Johannes Gutenberg-Universität Mainz  
Johann-Joachim-Becher-Weg 21  
D-55128 Mainz  
E-Mail: enzmann@uni-mainz.de

ANSGAR WEHINGER

Landesamt für Geologie und Bergbau Rheinland-Pfalz  
Emy-Roeder-Straße 5  
D-55129 Mainz  
E-Mail: ansgar.wehinger@lgb-rlp.de