



MASTERARBEIT / MASTER'S THESIS

Titel der Masterarbeit / Title of the Master's Thesis

„Vulnerabilität von Straßen gegenüber flachgründigen
Rutschungen - Konzepte und eine Anwendung in
Waidhofen an der Ybbs“

verfasst von / submitted by

Bakk. rer. nat. Péter Salgó

angestrebter akademischer Grad / in partial fulfilment of the requirements for the degree of
Master of Science (MSc)

Wien, 2015 / Vienna 2015

Studienkennzahl lt. Studienblatt /
degree programme code as it appears on
the student record sheet:

A 066 855

Studienrichtung lt. Studienblatt /
degree programme as it appears on
the student record sheet:

Masterstudium Geographie

Betreut von / Supervisor:

Univ.-Prof. Dipl.-Geogr. Dr. Thomas Glade

Eidesstattliche Erklärung

Hiermit versichere ich, dass ich die vorliegende Masterarbeit selbstständig verfasst, andere als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel nicht benutzt und mich auch sonst keiner unerlaubter Hilfe bedient habe, dass ich dieses Masterarbeitsthema bisher weder im In- noch im Ausland in irgendeiner Form als Prüfungsarbeit vorgelegt habe und dass diese Arbeit mit der vom Begutachter beurteilten Arbeit vollständig übereinstimmt.

Wien, 18. November 2015

Péter Salgó

Danksagung

Ich möchte mich an dieser Stelle bei all jenen, die mich während meiner Studienjahre begleitet haben, bedanken. An erster Stelle bei meiner Familie, die mich während meiner ereignisreichen Studienzeit von der Heimat aus unterstützt hat und mir immer beistand. Ich danke auch meinen Professorinnen und Professoren, insbesondere Herrn Univ.-Prof. Dr. Thomas Glade, der mein Interesse an der Risikoforschung geweckt hat. Auch Herrn Univ.-Prof. Dr. Rainer Bell bin ich dankbar für all die Hilfe und die Ideen, die er mir beim Verfassen meiner Masterarbeit gegeben hat. Für die mehrmaligen persönlichen Konsultationen möchte ich an dieser Stelle meinen Dank an Frau Dr. Maria Papathoma-Köhle aussprechen. Ohne ihre Inputs wäre eine derart interessante Studie nicht zustande gekommen. Die selbstlose Hilfe von Herrn Mag. Stefan Steger, der mir durch seine Lehrveranstaltungen gute Kenntnisse über Geoinformatik vermittelt hat, schätze ich überaus.

Einen besonderen Dank richte ich an Herrn DI Gert Kratzer von der NÖ Straßenbauabteilung 6, der mir bei der Datenakquisition behilflich war und viel zu meinem Verständnis des Straßenwesens beitrug. Die Expertenaussagen von Herrn Andreas Hirtenlehner, Straßenmeister der Straßenmeisterei Waidhofen an der Ybbs, erleuchteten viele für mich neue Aspekte des praktischen Umgangs mit Naturgefahren im Untersuchungsgebiet – ich bin sehr dankbar dafür.

Zu guter Letzt möchte ich mich bei meinen Freundinnen und Freunden bedanken, die mir die Welt gezeigt haben und für mich sowohl in guten als auch schwierigen Zeiten da gewesen sind. In meinem zukünftigen Leben soll mein Wissen auch zu ihrem Glück beitragen.

Danke und köszönöm!

Zusammenfassung

Die physische Vulnerabilität von Straßen gegenüber Rutschungen wurde in den wissenschaftlichen Studien der vergangenen Jahre vorwiegend auf qualitative Weise erfasst. Die in der vorliegenden Arbeit verwendete Methodologie zur quantitativen Analyse der physischen Vulnerabilität von Straßen gegenüber flachgründigen Rutschungen basiert auf dem innovativen Rahmenkonzept von Uzielli et al. (2008), das die Vulnerabilität als eine Funktion der Rutschungsintensität und der inhärenten Faktoren, der Suszeptibilität, beschreibt. Dieser quantitative Ansatz konnte zum ersten Mal an linienhafte Risikoelemente, im konkreten Fall an Straßen, angepasst und entsprechend angewandt werden. Die Ergebnisse der Fallstudie, die im Gebiet von Waidhofen an der Ybbs (Österreich), einem langjährigen Untersuchungsgebiet der Universität Wien, durchgeführt wurde, zeigten eine heterogene Verteilung der berechneten Vulnerabilitätswerte, da im Gegensatz zu früheren Studien zu diesem Forschungsthema die beitragenden gefahrenrelevanten und inhärenten Vulnerabilitätskomponenten stärker zum Ausdruck gebracht werden konnten. Besonders der Einfluss der Exposition und der zum Teil neu eingeführten Suszeptibilitätsfaktoren, die die technischen Schutzsysteme und den Erhaltungszustand betreffen, wurde ersichtlich. Die größte Beschränkung des Modells, die sich aus der schwierigen Erfassung der benötigten Datengrundlagen zur Intensität von Rutschungen und zur Suszeptibilität der Straßen ergeben hat, wird im Rahmen dieser Arbeit anhand des Fallbeispiels veranschaulicht. Anschließend werden mögliche Lösungswege diskutiert.

Abstract

In recent studies, the physical landslide vulnerability of roads has primarily been assessed qualitatively. This paper on the subject of the quantitative analysis of the physical vulnerability of roads is based on the innovative conceptual framework defined by UZIELLI et al. (2008). This framework uses a methodology that describes vulnerability as a function of landslide intensity and of inherent factors, herein referred to as “susceptibility”. For the first time, an attempt was made to adopt and test the above-mentioned approach on linear risk elements, particularly on roads. The results of the case study, which was conducted in the area of the city of Waidhofen an der Ybbs (Austria), a long-standing study area of the University of Vienna, show a heterogeneous distribution of the calculated vulnerability values. The reason for this is that this model gives more weight to the contributing factors “hazard” and “susceptibility” than previous studies on this research topic did. Especially, the factor “exposure” as well as the newly introduced susceptibility factors that are related to technical retaining structures and the level of maintenance have a major impact on the vulnerability values. The main limitation of the model that results from the difficulty of the acquisition of data on landslide intensity and on the susceptibility of roads is discussed using the case study. Concluding, the author provides possible solutions.

Inhaltsverzeichnis

1	Einführung	1
1.1	Naturkatastrophen und ihre Bedeutung	1
1.2	Katastrophale Konsequenzen von gravitativen Massenbewegungen	3
1.3	Forschungsthese	6
2	Theoretische Grundlagen	9
2.1	Gravitative Massenbewegungen	9
2.1.1	Definition und Klassifikation	9
2.1.2	Rutschungen	12
2.2	Rutschungsgefahr und Rutschungsgefährdung	14
2.2.1	Begriffsdefinitionen	14
2.2.2	Intensität	16
2.2.3	Vorbedingungen und Auslöser	19
2.2.4	Sekundäre Gefahren	21
2.2.5	Gefahren- und Gefährdungsanalyse	22
2.3	Vulnerabilität gegenüber Rutschungen	24
2.3.1	Begriffsdefinition	24
2.3.2	Historische Entwicklung des Konzepts	26
2.3.3	Vulnerabilitätsanalyse	27
2.4	Rutschungsrisiko	33
2.4.1	Begriffsdefinition	33
2.4.2	Risikoanalyse	34
3	Methodik	38
3.1	Technische Eigenschaften von Straßen	38
3.1.1	Historische Entwicklung von Straßen	38

3.1.2	Materialien	40
3.1.3	Aufbau von befestigten Straßen.....	41
3.1.4	Entwässerung	48
3.1.5	Schutzsysteme.....	50
3.2	Nichttechnische Eigenschaften	56
3.2.1	Kategorisierung des Straßennetzes.....	56
3.2.2	Straßenerhaltung	59
3.3	Vulnerabilitätsanalyse von Straßen	61
3.3.1	Kritische Infrastrukturforschung	61
3.3.2	Qualitative Methoden	62
3.3.3	Semiquantitative und quantitative Methoden	66
3.4	Vulnerabilitätsmodell nach UZIELLI et al. (2008)	73
3.5	Anpassung des Vulnerabilitätsmodells von UZIELLI et al.	81
3.5.1	Intensität	82
3.5.2	Suszeptibilität.....	86
4	Untersuchungsgebiet.....	96
4.1	Geographische Lage	96
4.2	Klima und Hydrologie	97
4.3	Geologie, Geomorphologie und Böden	101
4.4	Landnutzung	106
4.5	Rutschungsgefährdung	108
4.5.1	Baugrundkataster.....	109
4.5.2	Statistische Gefährdungsanalyse.....	112
4.6	Straßennetz.....	115
5	Ergebnisse	122
5.1	Intensitätskomponente der Vulnerabilität	122
5.1.1	Kinetische und kinematische Intensität	122

5.1.2	Exposition und räumlicher Wirkungsquotient	126
5.2	Suszeptibilitätskomponente der Vulnerabilität	139
5.2.1	Bauliche Suszeptibilität von Straßen.....	139
5.2.2	Suszeptibilität betreffend die technischen Schutzsysteme	141
5.2.3	Suszeptibilitätsfaktor des Erhaltungszustands	144
5.3	Gesamtvulnerabilität des Straßennetzes.....	146
5.3.1	Regionale Verteilung der Vulnerabilität.....	146
5.3.2	Auswahl einzelner Streckenabschnitte	157
6	Diskussion	164
6.1	Erkenntnisse über den Forschungsstand	164
6.2	Erkenntnisse aus der Umsetzung des Modells	165
6.2.1	Vorteile des Modells.....	165
6.2.2	Beschränkungen des Modells	168
7	Perspektiven.....	176
	Abbildungsverzeichnis	181
	Tabellenverzeichnis	184
	Literaturverzeichnis	186
	Anhang I.	199
	Anhang II.	201

1 Einführung

1.1 Naturkatastrophen und ihre Bedeutung

Naturkatastrophen sind extreme Ereignisse, die dem menschlichen Leben bzw. Gütern aller Art erhebliche Schäden zufügen können. Zwar haben sie natürliche Ursachen, aber häufig sind anthropogene Tätigkeiten ihre Auslöser (SHALUF 2007). Ein Beispiel für eine menschlich beeinflusste Naturkatastrophe ist der Klimawandel. Dieser ist, wie manche andere Naturkatastrophen, ein langsames, über Jahrzehnte entstehendes Phänomen. Andere Naturkatastrophen wie Erdbeben oder Lawinen ereignen sich innerhalb von Minuten und lassen dem Menschen oft kaum Zeit, um sich oder seine Wertsachen in Sicherheit zu bringen.

Eine Naturkatastrophe im wissenschaftlichen Sinne findet nur dann statt, wenn menschliche Leben und Güter (in der Fachsprache als „Risikoelemente“ zusammengefasst) bei einer eintretenden Gefahr Schäden erleiden. Ein Erdbeben in einem abgelegenen, unbewohnten und wirtschaftlich nicht genutztem Gebiet ist daher keine Naturkatastrophe i. e. S., sondern vielmehr ein Naturereignis. Laut der gängigen Definition des United Nations Office for Disaster Risk Reduction (UNISDR 2004) lösen Naturkatastrophen eine massive Störung des ordnungsgemäßen Funktionierens des Gesellschaftssystems aus, indem die betroffene Gesellschaft die entstandenen menschlichen, materiellen, ökonomischen oder ökologischen Verluste aus eigener Kraft nicht mehr bewältigen kann. Naturkatastrophen sind demzufolge eine Interaktion der einsetzenden Gefahr und einer vulnerablen Gesellschaft bzw. ihrer materiellen (z. B. Infrastruktur) und immateriellen (z. B. Wirtschaftsleistung einer Region) Güter. Die Eintrittswahrscheinlichkeit dieser Interaktion wird als Risiko bezeichnet (siehe Kap. 2.4).

Lebewesen und Güter weisen eine inhärente (also innewohnende) Stärke bzw. Schwäche auf, welche das Widerstandsvermögen gegenüber einer Gefahr bzw. einer potenziellen Katastrophe bestimmt. In diesem Kontext verwendet man in der Fachsprache den Begriff der „Vulnerabilität“, welcher aus dem Lateinischen stammt und mit „Verwundbarkeit“ oder „Verletzbarkeit“ übersetzt wird. Diese wichtige Eigenschaft wird in der Wissenschaft zunehmend untersucht, da ihre positive

Beeinflussung in Hinsicht auf die Risikominimierung effektiver sein kann als eine rein physikalische Gefahrenabwehr. In dieser Arbeit wird ein Schwerpunkt auf die Erforschung der Vulnerabilität gelegt.

Naturkatastrophen evolvierten aus der Verkettung unerwünschter physikalischer und sozialer Umstände und verursachen jedes Jahr schwerwiegende Schäden für die menschliche Umwelt. Ein Grund dafür ist die rapide wachsende Weltbevölkerung, verbunden mit der Zunahme der Bevölkerungsdichte in (vorwiegend urbanen) Regionen, die von Naturgefahren regelmäßig heimgesucht werden. Außerdem nimmt die absolute Summe der versicherten Gegenstände in den Industriestaaten kontinuierlich zu, was dazu führt, dass das Ausmaß der materiellen Schäden immer größer wird.

Eine Tendenz lässt sich dabei klar erkennen. Je höher der Entwicklungsgrad (wird stark vereinfacht durch das Bruttoinlandsprodukt ausgedrückt), desto niedriger ist die Zahl der Todesopfer, die bei Naturkatastrophen ums Leben kommen. Andererseits: Je höher entwickelt ein Land ist, desto mehr (versicherte) ökonomische Schäden sind im Falle einer Naturkatastrophe zu erwarten (siehe Abb. 1).

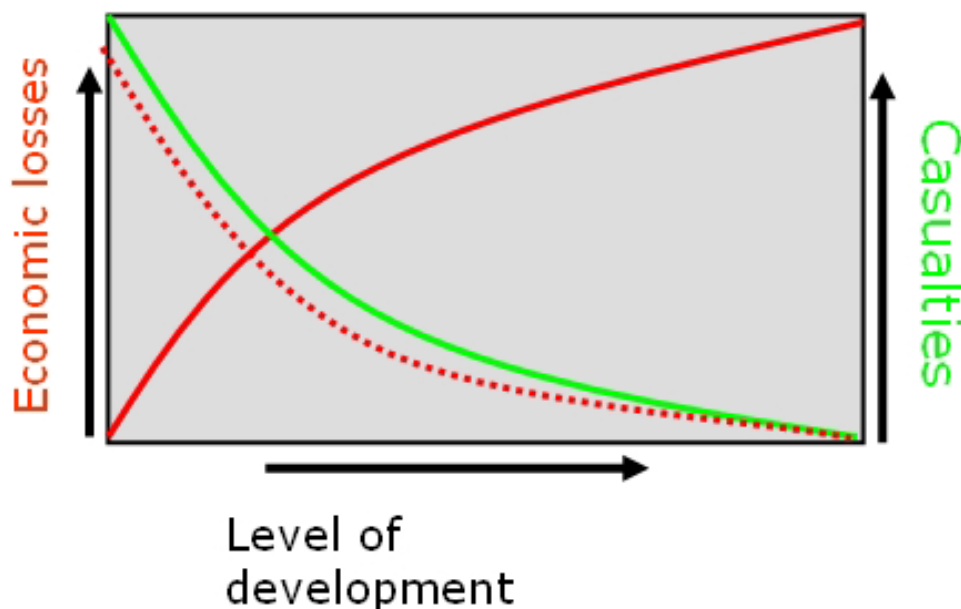


Abb. 1: Der Zusammenhang zwischen Entwicklungsgrad, ausgedrückt in BIP (rote gepunktete Linie), ökonomischen Schäden (rote Linie) und Zahl der Todesopfer infolge von Naturkatastrophen. Quelle: VAN WESTEN et al. 2010

Statistisch gesehen scheinen Naturkatastrophen häufiger zu werden, wobei erwähnt werden muss, dass das weltweite Meldernetz, das wir heute kennen, früher noch nicht existierte. Heutzutage erfährt man sogar über Naturkatastrophen in entlegenen Regionen – dank der Telekommunikationstechnologien häufig in Echtzeit. Früher war das nicht der Fall und aus diesem Grund wurden Naturkatastrophen, die sich in wenig erschlossenen Gebieten abspielten, selten oder nur mit großer zeitlicher Verspätung wahrgenommen bzw. aufgezeichnet (ALEXANDER 2005). Historische Daten weisen daher oft ein hohes Maß an Unsicherheiten auf, was Art, Größe und Folgen von Naturkatastrophen betrifft (VAN WESTEN et al. 2010).

Unabhängig von der absoluten Zahl der Betroffenen waren katastrophale Naturereignisse immer schon wichtige Auslöser von Krieg und Migration. In diesem Sinne spürt man die Folgen von Naturkatastrophen weit über die Grenzen des direkt betroffenen Gebietes. In einer globalisierten Welt können lokale Probleme schneller als je zuvor zum globalen Problem werden. Aus diesem Grund muss die Vermeidung von menschlichen bzw. ökonomischen Verlusten aufgrund von Naturkatastrophen nicht nur für die Wissenschaft, sondern für alle Gesellschaften der Welt von höchster Priorität sein.

1.2 Katastrophale Konsequenzen von gravitativen Massenbewegungen

Jahr für Jahr verursachen gravitative Massenbewegungen, wie Rutschungen, Murgänge oder Felsstürze, weltweit erhebliche Schäden an menschlichem Leben und Gütern. Allein in der zweijährigen Periode zwischen 2013 und 2015 kamen mehrere Tausend Menschen infolge von gravitativen Massenbewegungen ums Leben, mehrere Millionen waren von diesen Ereignissen indirekt betroffen.

Bei gravitativen Massenbewegungen, wie bei so vielen anderen (Natur-)Katastrophen, mussten die Entwicklungsländer die höchste Zahl an Todesopfern beklagen. Viele dieser Länder liegen in der (sub-)tropischen Klimazone mit wiederkehrenden Regenperioden und gegebenenfalls haben sie dazu noch (zum Teil tektonisch aktive) Orogene (ALEXANDER 2005). Da gleichzeitig die Menschen in

diesen Regionen sehr wenig auf die Auswirkungen von Naturgefahren vorbereitet sind, ist das menschliche Leben hier am meisten vulnerabel. Da Rutschungen einen schnellen Ablauf haben können, sind die Folgen in vielen armen Regionen mit einer unvorbereiteten Bevölkerung und einem schwachen Zivilschutzsystem besonders katastrophal. Das war auch 2014 bei der Abe-Barek-Rutschung in Afghanistan der Fall, der 2 700 Menschen zum Opfer fielen (ZHANG et al. 2015).

Allerdings sind auch Regionen des wohlhabenden Europas von den negativen Auswirkungen gravitativer Massenbewegungen betroffen, wobei hier die Schäden, im Unterschied zu den Entwicklungsländern, vorwiegend finanzieller Natur sind. Modellschätzungen des Joint Research Centre der Europäischen Kommission zufolge ist auf dem europäischen Kontinent eine Fläche von bis zu 255 000 km² von einer mittleren bzw. hohen Gefährdung durch gravitative Massenbewegungen betroffen. Somit sind insgesamt 15,4 Mio. Menschen in Europa direkt gefährdet; 3,7 Mio. von ihnen leben in Zonen hoher Gefahr. Besonders die Gebirgsregionen Europas, wie die Alpen oder das Balkangebirge, werden verstärkt von gravitativen Massenbewegungen bedroht (JAEDICKE et al. 2014).

Häufig treten gravitative Massenbewegungen als sekundäre Gefahren auf, das heißt, sie werden von einer anderen Gefahr ausgelöst. Die häufigsten Gefahren, welche sie auslösen können, sind Hochwasser und Erdbeben. In solchen Fällen werden die Verluste oft nur der primären Gefahr zugeschrieben, was zu einer Verzerrung der Statistiken führt (ALEXANDER 2005, NADIM et al. 2006). Beispielsweise starben 2013 infolge des Uttarakhand-Hochwassers in Indien 6 453 Menschen, 4 473 wurden verletzt und weitere 3,4 Mio. Menschen waren indirekt von der Katastrophe betroffen (GUHA-SAPIR et al. 2015). Wie viele Menschen davon durch die begleitenden Rutschereignisse ums Leben kamen oder Schäden erlitten, wurde nicht dokumentiert und kann dementsprechend nur geschätzt werden. Solche Fälle sind leider häufig und machen eine Quantifizierung der globalen Rutschungsaktivität bzw. ihrer Folgen besonders schwierig (SIDLE und OCHIAI 2006).

Ein weiteres Problem, das für alle Naturgefahren gilt, sind die unterschiedlichen methodologischen Ansätze von statistischen Datenbanken. Es werden beispielsweise Grenzen gesetzt, ab wie vielen Toten bzw. Schäden man von einer Naturkatastrophe sprechen kann (ALEXANDER 2005, PETLEY 2012). In den reichen

Ländern sind die Schadenssummen im Vergleich zur Zahl der Todesopfer, welche im Schnitt niedriger als in den Entwicklungsländern bei vergleichbaren Naturereignissen ist, in der Regel hoch. Aus diesem Grund scheinen in vielen Datenbanken kleinere Katastrophen nicht auf, beispielsweise der Gasen-Hangrutsch von 2005, welchem zwei Menschen zum Opfer gefallen sind und das somit das tödlichste Rutschereignis Österreichs im letzten Jahrzehnt war (ANDRECS et al. 2007).

Finanzielle Schäden infolge gravitativer Massenbewegungen nehmen erhebliche Ausmaße an. Laut Statistik werden die weltweiten ökonomischen Verluste bedingt durch Rutschungen auf mehr als 18 Mrd. US-Dollar für die 10-Jahres-Periode zwischen 2005 und 2015 beziffert (GUHA-SAPIR et al. 2015). Sämtliche Berechnungen geben sogar eine viel höhere Summe an; die U.S. Geological Survey (USGS) beziffert die jährlichen Schadenskosten mit 2 bis 4 Mrd. US-Dollar nur für die Vereinigten Staaten (USGS 2015).

Große finanzielle Schäden entstehen durch indirekte Folgen von gravitativen Massenbewegungen. So können beispielsweise Straßensperren und Umleitungen infolge von rutschungsbedingten Fahrbahnschäden in hohen wirtschaftlichen Verlusten resultieren. Diese Verluste sind öfter größer als die physikalischen Schäden, welche die primäre Konsequenz eines Rutschereignisses darstellen.

Allgemein hängt die Höhe ökonomischer Schäden durch gravitative Massenbewegungen mit dem Benutzungsgrad bzw. mit der ökonomisch-sozialen Bedeutung eines Objekts zusammen. Die Versicherungsindustrie sieht daher die Objekte und Dienstleistungen des öffentlichen Sektors und der privaten Wirtschaft am höchsten gefährdet. Es wird betont, dass Schäden an der kritischen Infrastruktur (insbesondere Verkehrs- bzw. Gas-, Telekommunikations- und Stromnetze, Öl- und Wasserleitungen) die negativsten wirtschaftlichen und sozialen Folgen haben können (MUNICH RE 2015).

Ein gutes Beispiel für die oft hohe Schadensempfindlichkeit der Infrastruktur gegenüber gravitativen Massenbewegungen sind die Rutschungsschäden am US-Highway 50 in den Jahren 1982–83. Nach intensiven Winterstürmen gingen dort zahlreiche Rutschungen nieder, die den Straßen erhebliche Schäden zufügten, was die Erreichbarkeit wichtiger Tourismusgemeinden am Lake Tahoe stark beeinträchtigte. Die Sanierung der Straße kostete 6,2 Mio. US-Dollar, aber die

wirtschaftlichen Schäden übertrafen diese Summe mit 120 Mio. US-Dollar um ein Vielfaches (SIDLE und OCHIAI 2006).

Die Vulnerabilität des Verkehrsnetzes gegenüber gravitativen Massenbewegungen ist ein zurzeit wenig erforschtes Gebiet, das jedoch ein hohes soziales und wirtschaftliches Potenzial aufweist. Es ist ein Musterbeispiel dafür, dass eine mangelnde Kenntnis über die Vulnerabilität zu überproportional hohen Schäden führen kann, welche eigentlich größtenteils vermieden werden könnten. Erst durch das Wissen über alle wichtigen materiellen und immateriellen Eigenschaften der betroffenen Risikoelemente ist es möglich, Maßnahmen an wirklich kritischen Stellen zu setzen.

1.3 Forschungsthese

Schätzungen zufolge verlaufen Verkehrswege allein in Europa in der Länge von insgesamt 20 000 km durch Gebiete mit einer hohen Gefährdung durch gravitative Massenbewegungen (JAEDICKE et al. 2014). Davon ist jedoch nicht nur die physische Infrastruktur betroffen, sondern es sind sowohl Menschenleben als auch Wirtschaftsgüter gefährdet. Dennoch wurde die Vulnerabilität der Verkehrsinfrastruktur bisher nur wenig erforscht, obwohl sie eine wichtige Komponente des (quantifizierbaren) Risikos darstellt. Die überwiegende Zahl der publizierten Studien konzentriert sich auf die Gefahrenkomponente, welche als eine Variable der zeitlichen und/oder räumlichen Auftretenswahrscheinlichkeit gehandhabt wird. Die Frage nach der quantitativen physischen Vulnerabilität, die oft nur geschätzt wird, wird in diesen Studien häufig nur am Rande behandelt.

Die physische Vulnerabilität von Straßen gegenüber Rutschungen und anderen Arten gravitativer Massenbewegungen wird außerdem in der Forschungsliteratur hauptsächlich durch qualitative Methoden erfasst, da es sich um eine schwer modellierbare Gefahr handelt. Auch die räumliche Variabilität der Vulnerabilität gegenüber Rutschungen bringt zahlreiche Probleme mit sich, welche quantitative Untersuchungen, die über den lokalen Maßstab hinausgehen, deutlich einschränken.

Im Laufe der letzten Jahre haben Fachexperten dennoch des Öfteren versucht, semiquantitative und quantitative Vulnerabilitätsmodelle für Rutschungen zu entwickeln. Diese Modelle binden auch die Gefahr in ihr Vulnerabilitätskonzept ein, welches sich vorwiegend in der Abhängigkeit des Schadenspotenzials von der Gefahrenintensität festmachen lässt. Risikoelemente haben demnach nicht nur eine inhärente, sondern auch eine extrinsische Vulnerabilitätskomponente, welche sich spezifisch auf die Gefahreigenschaften bezieht.

Die Methode von UZIELLI et al. (2008) verspricht eine besser quantifizierbare Erfassungsmöglichkeit der Vulnerabilität gegenüber Rutschungen, die noch dazu ausdrücklich für Verkehrsbauten anwendbar ist. Aus diesem Grund wird in dieser Arbeit die universelle Eignung des Modells von UZIELLI et al. mithilfe eines Fallbeispiels untersucht. In diesem Fallbeispiel liegt der Fokus auf dem hochrangigen Straßennetz und seiner Vulnerabilität gegenüber flachgründigen Translationsrutschungen.

Das Rahmenkonzept von UZIELLI et al. wurde von KAYNIA et al. (2008) bereits auf Gebäude übertragen. Diese Publikation ist gleichfalls richtungsweisend für das Vorgehen bei der Umsetzung des Modells in die Praxis, auch im vorliegenden Fall für Straßen. Das Modell soll dabei beweisen, dass es die nötige Flexibilität innehat, eine Anpassung gewissen Grades je nach untersuchtem Risikoelement bzw. nach Datenverfügbarkeit zuzulassen.

Das Ziel dieser Arbeit ist daher, die folgenden Forschungsfragen zu beantworten:

Forschungsfrage 1:

Wie bestimmt man die physische Vulnerabilität der Straßen gegenüber flachgründigen Rutschungen und aus welchen Faktoren setzt sich diese zusammen?

Forschungsfrage 2:

Ist eine zuverlässige Erfassung der physischen Vulnerabilität des Verkehrsnetzes auf regionaler Ebene mithilfe des Modells von UZIELLI et al. möglich?

Die Ergebnisse dieser Arbeit sollen dementsprechend die folgenden Thesen beweisen:

Forschungsthese 1:

Für die quantitative Bestimmung der physischen Vulnerabilität von Straßen gegenüber flachgründigen Rutschungen kann eine Kombination aus direkten und indirekten Parametern, die leicht erfassbar sind, herangezogen werden.

Forschungsthese 2:

Die von UZIELLI et al. (2008) vorgeschlagene und von KAYNIA et al. (2008) angewandte quantitative Vulnerabilitätsanalyse ist auch für das Straßennetz auf regionaler Ebene anwendbar.

Die Hauptziele der Studie werden dementsprechend wie folgt formuliert:

Forschungsziel 1:

Eine für andere Studien leicht übertragbare Methodologie zur quantitativen Bestimmung der physischen Vulnerabilität des Straßennetzes gegenüber flachgründigen Rutschungen soll gefunden werden.

Forschungsziel 2:

Mithilfe dieser Studie soll ein Lösungsansatz für das Problem der regionalen Bestimmung der Vulnerabilität gegenüber flachgründigen Rutschungen aufgezeigt werden.

2 Theoretische Grundlagen

2.1 Gravitative Massenbewegungen

2.1.1 Definition und Klassifikation

Unter dem Begriff „gravitative Massenbewegungen“ (engl. *landslides* oder seltener *mass movements*) wird eine Reihe von Prozessen zusammengefasst, bei welchen bodenbildendes Material (inkl. Locker- und Festgesteinen) mithilfe der Schwerkraft und in häufiger Anwesenheit von Wasser hangabwärts verlagert wird (CROZIER 1986, CRUDEN und VARNES 1996, LATELTIN 1997, GLADE et al. 2005, SIDLE und OCHIAI 2006, FELL et al. 2008, PRINZ und STRAUSS 2011). Gravitative Massenbewegungen können auch als eine Ausprägung der Hanginstabilität aufgefasst werden (GLADE und CROZIER 2005).

Es gibt große Unterschiede hinsichtlich der Entstehung, des Ablaufs und der Wirkungsweise der einzelnen Arten der gravitativen Massenbewegungen (LATELTIN 1997). Beispielsweise laufen zwar die meisten Prozesse auf der Erdoberfläche ab, gravitative Massenbewegungen kommen aber auch unter Wasser vor. Infolge von submarinen Rutschungen können Suspensionsströme ausgelöst werden, die sich mit hohen Geschwindigkeiten und bis zu über 1 000 km weit im Meereswasser fortbewegen können (LEE und JONES 2014). Auch die Prozessgeschwindigkeiten sind variabel; Sturzprozesse sind spontaner und daher gefährlicher als langsame Kriechprozesse, die einen kontinuierlichen Ablauf haben.

Die gängigste englischsprachige Klassifikation von gravitativen Massenbewegungen (siehe Abb. 2) beruht auf dem 1978 publizierten Werk von VARNES (SIDLE und OCHIAI 2006, SASSA 2007), wobei die Klassifikation auf diagnostischen Merkmalen basiert (CROZIER 1986¹). Es werden dabei drei Arten von Ausgangsmaterial, nämlich Boden (engl. *earth*), Fels (engl. *rock*) und Felsschutt (engl. *debris*), und fünf Arten von Verlagerungsprozessen unterschieden. Die hangabwärts gerichtete Verlagerung des

¹ Europäisches Programm zu Klimatologie und natürlichen Gefahren

Materials kann gleitend bzw. stürzend oder fließend sein und als Fließen bzw. Strom (engl. *flow*), Kippen (engl. *topple*), Rutschung (engl. *slide*), Sturz (engl. *fall*) oder Zerreißung (engl. *spread*) bezeichnet werden (CROZIER 1986). Diese Klassifikation wurde 1996 von CRUDEN und VARNES durch einen zusätzlichen Verlagerungsprozess, nämlich dem Kriechen, ergänzt.

HUNGR et al. schlugen 2014 eine leichte Modifizierung dieser Klassifikation vor, um die in den Natur- und Ingenieurwissenschaften verwendeten Bezeichnungen zu vereinheitlichen. Es sollte dadurch Klarheit über das Ausgangsmaterials herrschen, das hier nunmehr strikt der Korngröße nach klassifiziert wurde. Außerdem schlugen die Autoren vor, den englischen Begriff „*soil*“ (dt. *Erde*) durch den wissenschaftlich genaueren Terminus „*soil*“ (dt. *Boden*) zu ersetzen und die Klasse der „komplexen Prozesse“ abzuschaffen, da diese nur geringe Aussagekraft hätten (HUNGR et al. 2014).

Neben der in der Geografie verwendeten Varnes-Klassifikation existieren weitere Klassifikationen, die zum Teil im geotechnischen Bereich Anwendung finden. Eine solche ist die Klassifikation von SASSA (1985 und 1989), welche auf dem Auslösemechanismus basiert. Weitere bekannte und weitverbreitete Klassifikationen sind die Klassifikationen von BRUNSDEN (1985) und HUTCHINSON (1989) sowie die von der Europäischen Gemeinschaft ausgearbeitete EPOCH-Klassifikation aus dem Jahr 1993.

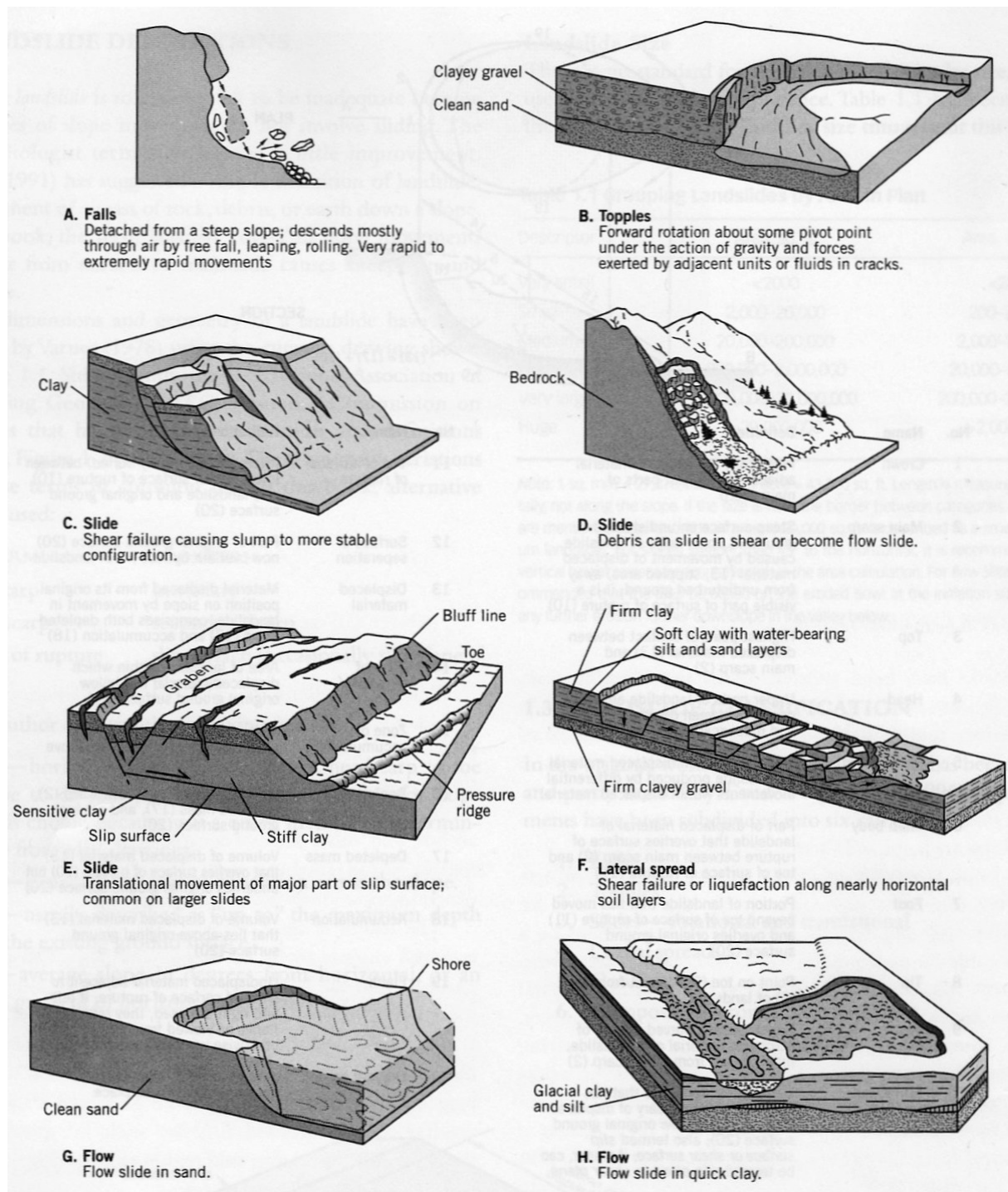


Abb. 2: Arten von Verlagerungsprozessen nach der Klassifikation von VARNES (1978). Quelle: CORNFORTH 2005

Die deutsche Terminologie weicht etwas von der englischen ab. Man unterscheidet im Wesentlichen zwischen Sturzprozessen (Block- und Steinschlag, Berg- und Felssturz), Rutschungen und Hangmuren (LATELTIN 1997). Es werden dabei häufig

Begrifflichkeiten verwendet, die kein Pendant in der englischen Sprache haben und vice versa.

Ein Beispiel ist der englische Begriff *rockfall*, der im Deutschen je nach bewegter Gesteinsmasse als Steinschlag, Block-, Fels- oder Bergsturz bezeichnet wird. Auch der international verwendete Begriff *landslide* sorgt nicht nur außerhalb der Wissenschaft häufig für Verwirrung, denn er wird immer wieder fälschlicherweise als Rutschung, Schlammlawine oder (wortwörtlich) Erdrutsch ins Deutsche übersetzt. Unter dem englischen Terminus *landslide* werden nämlich alle gravitativen Massenbewegungen unabhängig vom Material bzw. von dessen Verlagerungsprozessen zusammengefasst. Umgekehrt sollte das deutsche Wort „Rutschung“, gemäß der Klassifikation von VARNES, als *(earth) slide* oder *(earth) flow* übersetzt werden. In dieser Arbeit liegt der Fokus auf der letztgenannten Art der gravitativen Massenbewegungen.

2.1.2 Rutschungen

Rutschungen sind eine Ausprägungsart gravitativer Massenbewegungen, bei welchen das bodenbildende Material entlang einer Gleitfläche abtransportiert wird. Aus diesem Grund werden sie im Deutschen auch als „Gleitdenudation“ bezeichnet. Im Unterschied zu anderen gravitativen Massenbewegungsprozessen ist die Rutschmasse dabei miteinander verbunden, d. h. zumindest unter Bewahrung von Schollenverbänden und ohne Verlust des Kontaktes zum unterlagernden Material hangabwärts (GBA [o. J.], LATELTIN 1997, LESER 2009, LEE und JONES 2014).

Die Akkumulationsform von Rutschungen ist zungenförmig und konvex gewölbt. Häufig ist die Oberfläche des Akkumulationskörpers bucklig oder wellig. Der Ablauf des Rutschungsprozesses kann unterschiedlich schnell sein, die Geschwindigkeitsbereiche liegen zwischen Meter pro Stunde und Millimeter pro Jahr (GBA [o. J.], LESER 2009).

Man unterscheidet je nach Form der Gleitfläche und des Abgleitmechanismus Rotations- und Translationsrutschungen (siehe Abb. 3), aber auch Mischformen beider Typen sind möglich. Rotationsrutschungen sind „scherspannungskontrollierte

Bewegungen entlang einer oder mehrerer Flächen“ (GBA [o. J.]: 9), die oft ein beschränktes Volumen besitzen (LATELTIN 1997). Im Anbruchbereich, wo die Rotationsbewegung um eine Achse parallel zum Hang erfolgt, ist die Gleitfläche in der Regel konkav. Die Rutschmasse rotiert demnach beim Abgleiten. Im Unterschied dazu kommt es bei einer Translationsrutschung zu keiner (wesentlichen) Rotation der Rutschmasse. Sie gleitet entlang einer ebenen oder beinahe ebenen Gleitfläche den Hang hinunter und kann eine volumenbedingte Ausdehnung von wenigen Quadratmetern bis hin zu Quadratkilometern aufweisen (GBA [o. J.], DIKAU 1996, LATELTIN 1997, PRINZ und STRAUSS 2011).

Eine spezielle Rutschungsform bilden flachgründige Translationsrutschungen, die in der Regel spontan (z. B. durch Starkregenereignisse) ausgelöst werden. Sie werden als oberflächige Rutschungen kategorisiert, da die Maximaltiefe ihrer Gleitfläche in der Regel bei zwei Metern liegt (LATELTIN 1997). Diese Maximaltiefe wurde bisher nicht universell definiert und wird von manchen Autoren mit drei (CROSTA und FRATTINI 2003) oder sogar zehn Metern (WOLLNY 1999) angegeben.

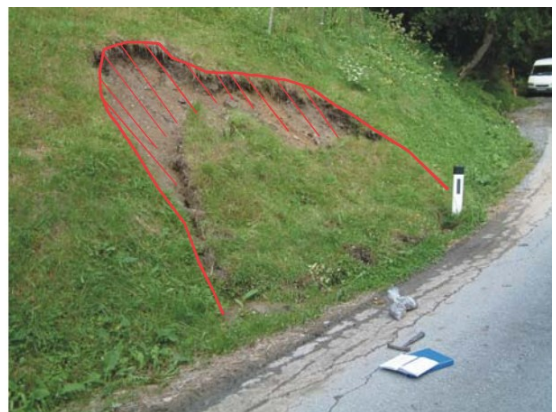


Abb. 3: Rotationsrutschung (links) und (flachgründige) Translationsrutschung (rechts). Quelle: GBA (o. J.) nach TILCH, N. (Fotoarchiv der GBA)

2.2 Rutschungsgefahr und Rutschungsgefährdung

2.2.1 Begriffsdefinitionen

Gravitative Massenbewegungen, wie Rutschungen, sind wichtige geomorphologische Prozesse, die in einem großen Ausmaß für die Genese von Landformen verantwortlich sind. Sie werden aber auch als wichtige Gefahrenquellen angesehen und können daher, samt Erdbeben und Vulkanausbrüchen, zur Gruppe der geologischen Gefahren gezählt werden (SHALUF 2007), wobei manche Wissenschaftler sie wegen ihrem häufigsten Auslöser zu den hydrologischen Gefahren zählen (VAN WESTEN et al. 2010).

Gefahr und Gefährdung

Das Wort Gefahr (engl. *hazard*) hat eine negative Bedeutung und drückt laut Duden (2015) eine „*Möglichkeit, dass jemandem etwas zustößt*“ oder „*dass ein Schaden eintritt*“ bzw. ein „*drohendes Unheil*“ aus. Der Wahrscheinlichkeitsaspekt in diesem Begriff lässt sich gut mittels der typischen Verbindungen des Wortes veranschaulichen. So werden beispielsweise Adjektive wie „akut“, „ausgehend“, „möglich“, „potenziell“ oder „unmittelbar“ sehr häufig in Verbindung mit Gefahr verwendet (Duden 2015).

Eine Gefahr besteht erst dann, wenn Menschen und/oder ihr Gut von einem (Natur-)Ereignis theoretisch bedroht werden könnten (GLADE und CROZIER 2005). Dementsprechend wird „Gefahr“ in der Fachliteratur meistens als ein Ereignis oder Phänomen definiert, welches unter Umständen einen Schaden jeglicher Art (wie beispielsweise physische, ökonomische, soziale und gesundheitliche Schäden bei Menschen) verursachen kann (GLADE und CROZIER 2005, VAN WESTEN et al. 2010, UNISDR 2014).

Das bedeutet aber nicht zwangsweise, dass bei einer hohen Gefahr Mensch und Gut tatsächlich hohe Schäden erleiden müssen. Dazu sollen erstens Menschen oder

Wertsachen am Ort des Auftretens einer Gefahr anwesend sein, zweitens eine bestimmte Schwäche (Vulnerabilität) gegenüber dieser Gefahr aufweisen. Daher empfehlen viele Forscher die Gefahr eher als ein wertfreies Konzept anzusehen, das nur die zukünftige Eintrittswahrscheinlichkeit eines (Natur-)Ereignisses ausdrücken soll. (FUCHS et al. 2007, VAN WESTEN et al. 2010)

Jede Gefahr kann in unterschiedlichen Intensitäten auftreten und zeigt je nach Intensität eine bestimmte zeitliche und räumliche Ausprägung (UNISDR 2014). Demzufolge ist eine Gefahr die Wahrscheinlichkeit eines potenziell schädigenden Ereignisses in einer bestimmten Zeiteinheit, die von der Intensität (oder Magnitude) des Ereignisses abhängt. Aus diesem Grund kann eine Gefahr auch als die zeitlich-räumliche Auftretenswahrscheinlichkeit einer bestimmten Intensität (Magnitude) von einem bestimmten Ereignis angegeben werden (GLADE und CROZIER 2005).

Wenn keine zeitlichen Angaben zur Gefahr gemacht werden können – etwa aufgrund fehlender Aufzeichnungen über historische Ereignisse –, aber die räumliche Auftretenswahrscheinlichkeit berechnet wird, spricht man in der Fachsprache von einer „Gefährdung“ (engl. *susceptibility*). Sie wird auch als räumliche Auftretenswahrscheinlichkeit eines Ereignisses bezeichnet (LEE und JONES 2014). Die Gefährdung ist somit ein Teil der Gefahr, der nur die Frage „Wo?“, aber nicht die Frage „Wann?“ beantworten kann.

Rutschungsgefahr und Rutschungsgefährdung

Wendet man die Begriffe „Gefahr“ und „Gefährdung“ spezifisch für Rutschungen an, so definiert VARNES (1984) die Rutschungsgefahr als die Auftretenswahrscheinlichkeit von einer Rutschung in einem bestimmten Gebiet und Zeitraum. Charakterisiert wird eine Rutschungsgefahr demzufolge von einem möglichst abgrenzbaren Ort und von einer zeitlichen Wiederkehrrate bei einer bestimmten Intensität, die vom Volumen bzw. von der Fläche, vom Rutschungstyp und von der Rutschgeschwindigkeit abhängig ist (FELL et al. 2008).

Die zeitliche Gefahrenkomponente – also die temporäre Auftretenswahrscheinlichkeit oder Wiederkehrrate (engl. *frequency*) – ist wegen lückenhafter und seltener historischer Aufzeichnungen bei Rutschungen sehr schwer zu ermitteln. Die zeitliche Auftretenswahrscheinlichkeit hängt vorwiegend von klimatischen bzw. meteorologischen Faktoren ab und es wird daher oft versucht, diese empirisch zu modellieren. Die räumliche Auftretenswahrscheinlichkeit einer Rutschungsgefahr wird im Unterschied dazu mehr von landschaftlich-topografischen und geologisch-pedologischen Faktoren gesteuert.

Häufig wird bei Rutschungen mangels zeitlicher Komponente nur eine Gefährdung angegeben. Diese beruht auf der Wahrscheinlichkeit einer Rutschung in einem bestimmten Gebiet, ohne dass Angaben über die Wiederkehrrate eines Ereignisses einer bestimmten Intensität gegeben werden (GUZZETTI 2006; CONSTANTIN et al. 2011).

2.2.2 Intensität

Jede Gefahr besitzt eine Intensität (engl. *intensity*), aus welcher die potenzielle Zerstörungskraft direkt oder indirekt abgeleitet werden kann. Die Intensität dient dazu, die Ausprägungen einer Gefahr abzustufen zu können. Ein Naturereignis kann bei einer hohen Intensität zerstörerisch wirken, wird aber bei einer sehr niedrigen Intensität kaum als Gefahr gehandhabt. So lösen beispielsweise Regenfälle nur ab einer bestimmten Regenmenge pro Zeiteinheit eine Gefahr (z. B. Rutschungen) aus.

Die Intensität, die die Höhe des zu erwarteten Schadens mitbestimmt, kann als Skala angegeben werden. Skalen werden in Klassen – gegebenenfalls anhand ermittelter Schwellwerte – unterteilt (VAN WESTEN et al. 2010). Die Intensität wird in der Wissenschaft auch als Maß der (potenziellen) Zerstörungskraft eines Ereignisses bezeichnet (HUNGR 1997, CARDINALI et al. 2002).

Bei dem ebenso häufig verwendeten Begriff „Magnitude“ (engl. *magnitude*) steht im Unterschied dazu die freigesetzte und absolut messbare Energie im Mittelpunkt, die genauso in Klassen unterteilt werden kann (VAN WESTEN et al. 2010). Obwohl viele

Autoren die beiden Begriffe als Synonyme verwenden, sollte man bedenken, dass nur von wenigen Gefahren (z. B. Erdbeben) die genaue Magnitude zu eruieren ist.

Die Intensität einer Rutschung hängt stark vom Rutschungstyp und von den möglichen Auswirkungen ab. Diese Auswirkungen können als eine Funktion des Volumens und der Geschwindigkeit des bewegenden Rutschkörpers dargestellt werden (GLADE und CROZIER 2005). Die Kenntnis der Geschwindigkeit ist bei der Errechnung der Auslaufdistanz (engl. *run-out distance*) von großer Bedeutung. Zur Berechnung der Geschwindigkeit einer einzelnen Rutschung braucht man jedoch eine Vielzahl an Messungen, deren Ergebnisse wegen ihrer Standortspezifität nicht direkt auf andere Rutschkörper übertragbar sind und bei regionalen Analysen eine wesentliche Schwierigkeit darstellen (vgl. GLADE und CROZIER 2005).

Das Problem mit dem komplexen Wesen der Rutschungsintensität konnte bisher in wissenschaftlichen Kreisen nicht gelöst werden. Aus diesem Grund wird in der Fachliteratur die Intensität einer Rutschung oft qualitativ, also anhand des beobachteten Schadens, geschätzt oder gar nicht erst behandelt. Um die Komponenten der Intensität auf regionaler Ebene zu ermitteln, werden vorwiegend empirische Modelle, die bestimmte Umweltparameter kombinieren, verwendet.

Es existiert in der Fachliteratur keine einheitliche Definition zur quantitativen Ermittlung der Rutschungsintensität (CARDINALI et al. 2002, GLADE und CROZIER 2005, UZIELLI et al. 2008 nach HUNGR 1997). Nach HUNGR (1997) ist die Intensität aus einer Reihe an räumlich verteilten Parametern, die die Zerstörungskraft einer gravitativen Massenbewegung beschreiben, zusammengesetzt. HUNGR (1997) und FELL et al. (2008) zählen unterschiedliche Möglichkeiten für die Quantifizierung der Intensität von gravitativen Massenbewegungen auf. Im Falle von Rutschungen kann die Intensität demnach aus den folgenden Berechnungen ermittelt werden:

- (maximale) Rutschgeschwindigkeit $\times$ Rutschungsvolumen
- (maximale) Rutschgeschwindigkeit $\times$ Rutschungstiefe
- Gesamtverschiebung der Rutschung
- Verlagerungsunterschied (Berechnung der Gesamtverschiebung aus der Distanz zwischen Anrisskante und Fußspitze der Rutschung (engl. *toe*), relativ zur unveränderten Umgebung)

In den meisten Fällen werden nur die Rutschgeschwindigkeit und das Rutschungsvolumen erfasst bzw. abgeschätzt. CARDINALI et al. (2002) haben diese zwei Faktoren mittels einer Gleichung mathematisch in Verbindung gebracht, indem sie die Intensität (I) als Funktion der Rutschungsvolumen (v) und der erwarteten Rutschgeschwindigkeit (s) definiert haben:

$$I = f(v, s) \quad (2.1)$$

Anhand der Ergebnisse dieser Gleichung wurden von den Autoren vier qualitative Intensitätsklassen (geringe, mittlere, hohe und sehr hohe Intensität) erstellt, wobei die Rutschgeschwindigkeiten nur in qualitativer Form angeführt werden. Die Klassen sind bei unterschiedlichen Gefahrentypen nicht miteinander vergleichbar, wie das auch in der Tab. 1 (a) ersichtlich wird. Die Intensitätsklassen wurden in einer Matrix mit den Wiederkehrzeiten der Rutschungen kombiniert, um daraus Gefahrenklassen erstellen zu können (siehe Tab. 1 [b]).

Tab. 1: (a): Intensitätsklassen für drei gravitative Massenbewegungsarten; (b) Verknüpfung der Intensität mit der Wiederkehrzeit. Quelle: CARDINALI et al. 2002

Estimated volume (m ³)	Expected landslide velocity		
	Fast moving landslide (Rock fall)	Rapid moving landslide (Debris flow)	Slow moving landslide (Slide)
< 0.001	Slight (1)		
< 0.5	Medium (2)		
> 0.5	High (3)		
< 500	High (3)	Slight (1)	
500–10 000	High (3)	Medium (2)	Slight (1)
10 000–50 000	Very High (4)	High (3)	Medium (2)
> 500 000		Very High (4)	High (3)
>> 500 000			Very High (4)

(a)

Estimated landslide frequency	Landslide intensity			
	Light (1)	Medium (2)	High (3)	Very high (4)
Low (1)	1 1	1 2	1 3	1 4
Medium (2)	2 1	2 2	2 3	2 4
High (3)	3 1	3 2	3 3	3 4
Very high (4)	4 1	4 2	4 3	4 4

(b)

Ein neuer Ansatz für die Bestimmung der quantitativen Intensität ist das von UZIELLI et al. (2008) vorgeschlagene Modell, welches sowohl die kinetischen als auch die kinematischen Faktoren einer Rutschung für die Berechnung der Intensität berücksichtigt. Das Intensitätsmodell ist Teil einer gleichfalls von UZIELLI et al. aufgestellten Formel, die eine quantitative Berechnung der physischen Vulnerabilität erzielt (siehe Kap. 3.4).

2.2.3 Vorbedingungen und Auslöser

Damit aus einer Gefahr ein tatsächlich ablaufendes Ereignis wird, müssen vorerst gewisse Prozesse in Gang gesetzt werden. GLADE und CROZIER (2005) zählen vier notwendige Faktoren auf, die zur Verwirklichung einer Gefahr nötig sind. Der sogenannte „Vorkonditionierungsfaktor“ (engl. *precondition factors*) bezieht sich auf die Vorbedingungen, welche zur Gefahreninitiierung erfüllt werden müssen. Diese sind inhärente statische Faktoren, die bei Rutschungen hauptsächlich die Lithologie, Tektonik bzw. Topografie und zum Teil die Hydrologie betreffen. Ohne anfälliges Muttergestein und mangels hoher Hangneigungswinkel ist etwa die Wahrscheinlichkeit einer Rutschung gering (GLADE und CROZIER 2005, LEE und JONES 2014).

Die sogenannten „vorbereitenden Faktoren“ (engl. *preparatory factors*) weisen im Unterschied zu den Letztgenannten einen dynamischen Charakter auf, sind aber noch keine direkte Ursache für eine Rutschung. Sie sind für die Verlagerung des Systemgleichgewichts vom stabilen zum marginal stabilen Zustand verantwortlich. Der marginal stabile Zustand besteht nur so lange, bis keine größeren Kräfte auftreten, die sein fragiles Gleichgewicht kippen. Ein solcher Faktor kann die Verwitterung sein, die sich mit der Veränderung der meteorologischen und klimatischen Bedingungen über die Zeit ändern kann (GLADE und CROZIER 2005).

An dieser Stelle sollte auch der menschliche Einfluss erwähnt werden, der oft auf den ersten Blick nicht von natürlichen Faktoren unterschieden werden kann. Zum Beispiel reduzieren Kahlschläge und intensive Landwirtschaft die Verwurzelungsdichte und tragen gleichzeitig zur Abnahme der Scherfestigkeit des

Hanges bei. Auch die beim Straßenbau falsch angelegten Hanganschnitte bzw. Anschüttungen und ein künstlich modifizierter Grundwasserabfluss können destabilisierend wirken (CORNFORTH 2005, SIDLE und OCHIAI 2006). Außerdem werden die vorbereitenden Faktoren indirekt anthropogen durch den Klimawandel verstärkt, der vermutlich zu einer erhöhten Auftretenswahrscheinlichkeit von extremen Wetterereignissen führt (NADIM et al. 2006).

Die sogenannten „unmittelbaren Auslöser“ (engl. *triggering factors*) kippen letztendlich das System, indem sie es in einen aktiv instabilen Zustand bringen – die gravitative Massenbewegung findet statt. Anschließend stellt sich ein neues Gleichgewicht ein, das aber nicht zwingend von langer Dauer sein muss. Die häufigsten unmittelbaren Auslöser bei Rutschungen sind Starkregen, Schneeschmelze, Erdbeben und künstlich – etwa entlang von Straßen – errichtete An- bzw. Einschnitte (SHALUF 2007, VAN WESTEN et al. 2010). Zusammengefasst können die unmittelbaren Auslöser von endo- oder exogener Natur sowie natürlich oder menschlich bedingt sein.

Bei der Anwesenheit von Wasser wird der Boden ab einer bestimmten Menge gesättigt, kohäsionslos und folglich instabil. Die Hanginstabilität wird durch hohe Hangneigungswinkel gepaart mit einer spärlichen bzw. fehlenden Vegetationsdecke verstärkt. Besonders bei der negativen Entwicklung der Vegetation ist der Mensch häufig mitverantwortlich. Man trifft auf zahlreiche Beispiele, wo natürliche Auslöser und menschliche vorbereitende Faktoren eng miteinander verbunden sind. Das sorgt für die Entstehung von komplexen Abläufen, welche wiederum die richtige Wahl effektiver Gegenmaßnahmen erschweren (MALAMUD et al. 2004, GLADE und CROZIER 2005).

Die Zeit, die vom ersten Anzeichen einer einsetzenden Gefahr bis zum Eintritt des Ereignisses vergeht (engl. *time of onset*), ist je nach Gefahrentyp und Auslösemechanismus unterschiedlich (VAN WESTEN et al. 2010). Bei Rutschungen, die von Erdbeben ausgelöst werden, ist dieser Zeitraum sehr gering und die Gefahr ist daher oft nicht vorhersehbar. Bei solchen schnell auftretenden und daher unerwarteten Naturkatastrophen rechnet man mit den höchsten Opferzahlen (SIDLE und OCHIAI 2006). Andere Auslöser, wie Starkregen, sind besser vorhersehbar und die Anzeichen eines Hangversagens, wie Risse am Anbruch der Rutschfläche,

entwickeln sich des Öfteren sukzessive, was mehr Zeit für eine adäquate Vorgehensweise der Sicherheitsbehörden zulässt.

Rutschereignisse können also sowohl binnen Minuten (bei vorwiegend endogenen Auslösern) als auch über einen Zeitraum von Wochen oder Monaten einsetzen. Die räumliche Ausprägung ist vom Auslöser abhängig. Je nach Art und Intensität des herbeiführenden (Natur-)Ereignisses ist das räumliche Ausmaß einer Gefahr lokal, regional oder global. Eine Rutschungsgefahr kann lokal und regional auftreten. Das räumliche Muster der Rutschflächen ist daher entweder konzentrisch oder zerstreut (VAN WESTEN et al. 2010).

Zuletzt bestimmen die sogenannten „tragenden Faktoren“ (engl. *sustaining factors*) das Verhalten eines instabilen, bereits rutschenden Hanges. Entscheidend sind die Dauer des auslösenden Ereignisses und die Ablaufgeschwindigkeit des Prozesses, die vom Rutschungstyp bestimmt wird. Als Beispiel können lang anhaltende Starkregenfälle genannt werden, die eine Vielzahl an (z. B. flachgründigen) Rutschungen auslösen bzw. neu aktivieren können.

2.2.4 Sekundäre Gefahren

Nicht nur Rutschungen können von anderen Gefahren, wie Hochwasser oder Erdbeben, ausgelöst werden, sondern sie selbst sind in der Lage, weitere – sogenannte „sekundäre“ – Gefahren zu initiieren. Vermutlich die häufigste sekundäre Gefahr, die von Rutschungen ausgeht, sind Flutwellen, die durch das Aufstauen von Flüssen mit Rutschungsmaterial hervorgerufen werden.

Dass sekundäre Gefahren manchmal bedrohlicher als ihre Auslöser sind, zeigen die katastrophalen Folgen der Gros-Ventre-Rutschung in den USA im Jahr 1927. Infolge der sich 1925 ereignenden Rutschung wurde ein kleiner Fluss aufgestaut. Der natürliche Damm, der aus dem natürlichen Rutschungsmaterial bestand, brach zwei Jahre später nach Regenfällen und intensiver Schneeschmelze durch. Die über 15 Meter hohe Flutwelle tötete mehrere Menschen und zerstörte eine ganze Siedlung (ALDEN 1976).

Als ein weiteres Beispiel für eine von Rutschungen ausgehende sekundäre Gefahr kann die Katastrophe in Longarone, Italien, genannt werden, welche zum Teil durch Fahrlässigkeit bedingt war. 1956 errichtete man eine hohe Bogenstaumauer, um den Bergfluss Vajont zwecks hydroelektrischer Stromerzeugung aufzustauen. Trotz warnender geologischer Anzeichen wurde der Stausee gefüllt und das Kraftwerk in Betrieb genommen. In der Nacht des 9. Oktober 1963 rutschte eine angrenzende Bergflanke von 270 Mio. m³ Fest- und Lockermaterial in den Stausee und löste eine enorme Flutwelle von 30 Mio. m³ Wasservolumen aus. Die Staumauer blieb zwar intakt, aber die Flutwelle konnte sie überströmen und sowohl talauf- als auch talabwärts eine große Zerstörung anrichten. Ungefähr 2 000 Menschen fielen der Flutwelle zum Opfer, mehrere Ortschaften wurden zerstört (WARD und DAY 2011).

Tsunamis können gleichfalls durch Rutschungen ausgelöst werden. In diesen Fällen gleitet eine voluminöse Rutschmasse mit großer Geschwindigkeit ins Wasser. 1792 ereignete sich beispielsweise ein solches Phänomen, als Bergsturzmaterial in die Bucht der Ariake-See in Japan rutschte. Als unmittelbare Konsequenz des ausgelösten Tsunamis starben Aufzeichnungen zufolge 14 500 Menschen (LEE und JONES 2014).

Erosion als Gefahr wird selten wahrgenommen, ist aber für das Ökosystem eine große Bedrohung. Die durch Rutschungen verloren gegangene Bodenbedeckung kann sich unter bestimmten ökologisch-klimatischen Bedingungen nicht regenerieren. Wiederum bewirkt das im Ökosystem einen positiven (also ungünstigen) Rückkopplungseffekt. In erosionsanfälligen Gebieten fördert jede Art landwirtschaftlicher Aktivität die Erosion, welche nur mithilfe umfassender und kostspieliger Maßnahmen in Grenzen gehalten werden kann.

2.2.5 Gefahren- und Gefährdungsanalyse

Im Rahmen einer Gefahrenanalyse (engl. *hazard assessment*) werden die physikalischen Aspekte einer Gefahr mithilfe historischer Aufzeichnungen und der Interpretation von topografischen, geologischen und hydrologischen Informationen ermittelt, um auf räumliche und zeitliche Gefahreneigenschaften sowie auf die

Intensität von zukünftigen Ereignissen schließen zu können (VAN WESTEN et al. 2010).

Die Modellierung der Gefahr ist ein grundlegender Schritt für jede Analyse, insbesondere für die Berechnung des Risikos (siehe Kap. 2.4.2). Zu diesem Zweck sollten alle wichtigen Eigenschaften der Gefahr bekannt sein, insbesondere diejenigen, die räumliche und zeitliche Aspekte betreffen, um eine Auftretenswahrscheinlichkeit bestimmen zu können. Mittels eines Gefahrenmodells können Gefahrenkarten entworfen werden, die ein bestimmtes Gebiet in sämtliche Gefahrenklassen unterteilen.

Von einer Gefahrenkarte lässt sich nicht nur die räumliche, sondern auch die zeitliche Auftretenswahrscheinlichkeit eines bestimmten Gefahrentyps ablesen (u. a. HERVÁS und BOBROWSKY 2009). In vielen Fällen ist aber nur die Ermittlung der räumlichen Ausdehnung von Rutschungen möglich; die zeitlichen Eigenschaften können durch das Fehlen von Informationen über frühere Rutschungen nur sehr mühsam oder gar nicht eruiert werden.

Analysen, die die zeitliche Gefahrenkomponente nicht miteinbeziehen, werden „Gefährdungsanalysen“ (engl. *susceptibility assessment*) genannt. Sie untersuchen nur die physikalische Wahrscheinlichkeit einer Gefahr (Rutschung) in einem spezifischen Gebiet, indem sie die möglichen gefahrenanfälligen Stellen identifizieren und (gegebenenfalls) für eine bestimmte Intensität die räumliche Ausbreitung der Gefahr abgrenzen. Das Ergebnis einer Gefährdungsanalyse kann in Form einer Gefahrenhinweiskarte zum Ausdruck gebracht werden. Diese unterteilt das Untersuchungsgebiet in mehrere Gefährdungszonen, die Aussagen über die räumliche Auftretenswahrscheinlichkeit bzw. über die potenzielle Ausdehnung der Gefahr machen. Gefährdungsmodelle können demnach als Grundlage für Gefahrenanalysen dienen, sollen aber nicht als gleichwertig angesehen werden (FELL et al. 2008, PITILAKIS et al. 2011).

Eine wichtige Idee im Hinblick auf eine Rutschungsgefahrenanalyse stammt vom schottischen Geologen JAMES HUTTON. Sie sagt aus, dass die Vergangenheit der Schlüssel für die Zukunft ist. Dementsprechend geht man von einer höheren zeitlichen und räumlichen Auftretenswahrscheinlichkeit in Gebieten aus, die bereits in

der Vergangenheit viele Rutschereignisse aufwiesen. Aus diesem Grund sind Rutschungsinventare für genaue Analysen unentbehrlich (FELL et al. 2008).

Da bei der Gefährdungsmodellierung häufig ungenügende Informationen über historische Ereignisse zur Verfügung stehen, wird angenommen, dass Gebieten mit erhöhter physikalischer Anfälligkeit ein höherer Gefährdungswert zugewiesen werden kann. Obwohl die Anfälligkeit gegenüber der Gefahr und die Auftretenswahrscheinlichkeit häufig miteinander korrelieren, können mittels der Anfälligkeit keine explizite Folgerungen hinsichtlich der zeitlichen Dimension der Gefahr gemacht werden (FELL et al. 2008, HERVÁS und BOBROWSKY 2009).

2.3 Vulnerabilität gegenüber Rutschungen

2.3.1 Begriffsdefinition

Der Begriff „Vulnerabilität“ stammt vom lateinischen Wort *vulnerare* und kann mit „Verletzbarkeit“ oder „Verwundbarkeit“ übersetzt werden (ALEXANDER 2005). Dieses Wort wird heutzutage von vielen Disziplinen verwendet, um allgemein das Potenzial eines körperlichen oder materiellen bzw. technischen Schadens aus der menschlichen Perspektive zu beschreiben (LEE und JONES 2014). Es existiert jedoch keine einheitliche Definition von „Vulnerabilität“, der Ausdruck wird je nach Wissenszweig und Forschungsschwerpunkt anders genutzt. Bereits dieser Umstand erschwert den Schritt in Richtung empirischer Erfassung der Vulnerabilität (vgl. VAN WESTEN et al. 2010).

In den Sozialwissenschaften versteht man unter Vulnerabilität die beschränkte Fähigkeit einer Gesell- oder Gemeinschaft, einer (Natur-)Gefahr standhalten zu können. Dementsprechend kommt überall dort eine erhöhte Vulnerabilität vor, wo die Menschen eine aufkommende Gefahr nicht ausreichend wahrnehmen und bewältigen, dieser nicht entgegenwirken und sich von dieser nicht erholen können (BLAİKIE 1994). Diese Verwundbarkeit wird von unterschiedlichen ökonomischen, physikalischen, soziopolitischen und Umweltfaktoren beeinflusst (vgl. THYWISSEN 2006, UNISDR 2014, IFRC 2015).

Aus natur- und ingenieurwissenschaftlicher Sicht wird die Vulnerabilität als das zu erwartende Schadensausmaß eines Risikoelements definiert, welches im Gefahrenbereich einer Naturgefahr in bestimmter Intensität auftritt (UNDRO 1982, GLADE und CROZIER 2005, PITILAKIS et al. 2011). Ein wichtiger Unterschied zur sozialwissenschaftlichen Herangehensweise ist dabei die konsequente Einbindung der spezifischen Gefahrencharakteristika in die Analyse, insbesondere die der Intensität und des räumlichen Gefahrenausmaßes (FELL 1994, FUCHS et al. 2007).

FUCHS et al. (2011) geben einen Überblick über die aktuellen Vulnerabilitätsdefinitionen, die in den Naturwissenschaften verwendet werden. Es werden Definitionen von HUFSCMIDT und PAPATHOMA-KÖHLE et al. zitiert, die besagen, dass die Vulnerabilität das zu erwartende Schadensausmaß ist, welches von den Eigenschaften des Risikoelements im Hinblick auf eine spezifische Gefahr abhängt. TOTSCHNIG et al. fügen hinzu, dass bei der Vulnerabilitätsberechnung auch zeitliche und räumliche Aspekte der Gefahr von Bedeutung sind. Obwohl geringfügige Unterschiede zwischen den Definitionen festzustellen sind, kann die Vulnerabilität umfassend als *„ein Konzept, das nicht nur die Gefahr an sich, sondern ihre Folgen auf die betroffenen Elemente betrachtet“* definiert werden (vgl. FUCHS et al. 2011).

Je nach Untersuchungsgegenstand differenziert man zwischen institutioneller (oder politischer), kultureller, ökologischer, ökonomischer, physischer und sozialer (oder humaner) Vulnerabilität (VAN WESTEN et al. 2010). Die Klassifikation der unterschiedlichen Vulnerabilitätsarten ist nicht einheitlich. In der Fachliteratur kommt es bei der Typisierung der Vulnerabilität häufig zur Verwendung von Adjektiven mit einer ähnlichen, jedoch nicht identischen Bedeutung (z. B. humane und soziale Vulnerabilität).

Es existiert zudem keine einheitliche Definition der physischen Vulnerabilität. Sie kann aber umfassend als die Vulnerabilität der physischen Umwelt definiert werden (DE LEÓN und CARLOS 2006). In der überwiegenden Zahl der Fälle werden bei der Ermittlung der physischen Vulnerabilität ausschließlich gebaute Strukturen auf ihr Schadenspotenzial hin untersucht. Die potenziellen Schäden müssen jedoch nicht zwingend technischer Natur sein. Nach VAN WESTEN et al. (2010) ist die physische

Vulnerabilität ein intrinsischer Wert eines Risikoelements, die unabhängig von seiner räumlichen Lage zur Gefahr ist.

2.3.2 Historische Entwicklung des Konzepts

Ursprünglich wurde der Vulnerabilitätsbegriff von den Sozialwissenschaften entwickelt. In den 1970er-Jahren versuchten sie, eine Kenngröße für die Beschreibung menschlicher Einflussfaktoren bei Katastrophen zu finden, da diese bis zu jenem Zeitpunkt außer Acht gelassen wurden. In der damaligen Praxis betrachtete man ausschließlich Gefahrenkomponente und wies bei Katastrophen die Schuld einzig den Naturkräften zu. Die soziale Komponente war in dieser rein naturwissenschaftlich-ingenieurwissenschaftlichen Herangehensweise irrelevant, die die Gefahr approximiert mit dem Risiko gleichgesetzt hat. Maßnahmen zur technischen Gefahrenminimierung wurden demnach als ausreichendes Risikomanagement angesehen (vgl. BLAIE 1994, VAN WESTEN et al. 2010).

Im Laufe der darauffolgenden Jahrzehnte änderte sich die Perspektive, indem man den Faktor Mensch in die Risikoanalyse einband. Dadurch wurde neben physischen Gegebenheiten der unbelebten Natur erstmals auch das menschliche Verhalten bei Katastrophen näher untersucht. Die Entscheidungsträger und Wissenschaftler entdeckten neue Formen des Risikomanagements, welche nicht materieller Natur waren. Zu solchen Maßnahmen zählten Frühwarnsysteme oder die Sensibilisierung der Bevölkerung gegenüber Gefahren. Man legte damit den Fokus auf die soziale Kapazität, welche benötigt wird, um mit einer Gefahr umzugehen (ALEXANDER 2005, VAN WESTEN et al. 2010).

Nach aktuellem Paradigma ist die physische und soziale Vulnerabilität nicht nur allein von den inhärenten Eigenschaften eines Risikoelements abhängig. Vielmehr soll sie als Teil eines komplexen Wirkungsgefüges angesehen werden, in welchem die Vulnerabilität eine multidimensionale, maßstabs- und ortsabhängige sowie dynamische Größe ist. Jedes Risikoelement weist eine situationsspezifische Bewältigungs- bzw. Anpassungsfähigkeit auf, welche der Vulnerabilität entgegenwirkt (VAN WESTEN et al. 2010, UNISDR 2014).

2.3.3 Vulnerabilitätsanalyse

Schadensarten und Indikatoren der physischen Vulnerabilität

Zweck der physischen Vulnerabilitätsanalyse ist die Identifikation sowie Quantifizierung von Schwachstellen eines Objekts gegenüber einer bestimmten Gefahr. Diese Schwachstellen können sowohl von materieller als auch von immaterieller Natur sein. Sie sind Eigenschaften eines Objekts, die bis zum Auftreten der Gefahr eine wertfreie Rolle spielen können, aber beim Gefahrenereignis das Risikoelement unterschiedlich stark schwächen. Wiederum können Objekte Stärken gegenüber einer Gefahr aufweisen, die abschwächend auf die zerstörerischen Kräfte reagieren können.

Vulnerabilitätsindikatoren können als diese Schwächen und Stärken eines Systems aufgefasst werden. Für die Charakterisierung der physischen Vulnerabilität sind sie unentbehrlich, denn es sollen dafür diejenigen Eigenschaften eines Risikoelements ermittelt werden, welche die Vulnerabilität gegenüber einer spezifischen Gefahr verstärken bzw. vermindern. Im Falle von Rutschungen sind diese beispielsweise bei Straßen das Baumaterial oder bei Häusern die Größe und Exposition der Fenster.

Die Relevanz einzelner Indikatoren wird u. a. an den Schäden am Objekt nach einem zerstörerischen Naturereignis ersichtlich. Dennoch bedarf es vieler Informationen über das Objekt bzw. über die Gefahr, um die Indikatoren hierarchisch ordnen zu können. Beim Vorhandensein mehrerer Indikatoren müssen diese nach ihrer Relevanz bezüglich eines bestimmten Gefahrenszenarios geordnet werden. Zu diesem Zweck können Aggregations-, Gewichtung- oder Normierungsmethoden angewendet werden (PAPATHOMA-KÖHLE 2012). Die Indikatoren auszuwählen und zu ordnen ist jedoch – besonders im Falle von Rutschungen – ein sehr komplexes Vorhaben.

Oft stellt die Unkenntnis über mögliche Indikatoren eine große Beschränkung für die Vulnerabilitätsanalyse dar. Das Ziel analytischer Verfahren kann daher auch die Erhebung aller für die Vulnerabilität relevanten Variablen eines Objekts sein. Im Laufe von analytischen Verfahren wird das Objektverhalten bei einer einsetzenden

Gefahr chronologisch untersucht und anhand eines Schadenbildes werden Rückschlüsse auf die wichtigen Faktoren (Indikatoren) gemacht.

Schäden sind die Manifestation der Vulnerabilität in Hinsicht auf die Konsequenzen eines eingetretenen Gefahrenszenarios. Diese negativen Folgen von Gefahr bilden das Maß für die Berechnung der physischen Vulnerabilität und stehen daher im Fokus einer Vulnerabilitätsanalyse (CIUREAN et al. 2013). Nach GLADE (2003) kann man daher die Vulnerabilitätsanalyse mehr oder weniger mit einer Konsequenzanalyse gleichsetzen.

Ein Ereignis kann neben direkten auch indirekte Konsequenzen (Schäden) verursachen, welche zwar keine unmittelbare Folgen einer Gefahr sind, aber von ihr ursprünglich ausgelöst werden. Bei indirekten Schäden kann es sich gleichermaßen um konkrete Sachschäden als auch um schwer quantifizierbare immaterielle Schäden (z. B. Zeitverlust) handeln. Häufige auftretende indirekte Folgen von Naturgefahren sind beispielsweise Umweltschäden und die Beeinträchtigung von Ökosystemdienstleistungen. Auch erhöhte Ausgaben der Rettungsdienste, bedingt durch Katastropheneinsätze, werden oft zu den indirekten Schäden gezählt (ROBERDS 2005, SIDLE und OCHIAI 2006).

Ein gutes Beispiel für beide Schadensarten sind Rutschungen, die Straßen beschädigen. Es entstehen in diesen Fällen direkte ökonomische Schäden, die sich etwa aus den Kosten für die Reparatur der Infrastruktur ergeben. Ein gleichfalls wirtschaftlicher, jedoch indirekter Schaden, der bei einem solchen Ereignis auftreten kann, ist die Beeinträchtigung der lokalen Produktivität durch eine erschwerte Verkehrslage sein. Da die holistische Erfassung indirekter Schäden sehr komplex ist, konzentriert man sich in den meisten Studien auf die Schäden, welche die direkten Konsequenzen einer Gefahr sind (ROBERDS 2005, VAN WESTEN et al. 2010).

Quantifizierung der physischen Vulnerabilität

Gemessen wird die Vulnerabilität anhand des Schadenanteils an einem Risikoelement (GLADE 2003). Zu den häufigsten physischen Schäden direkter Natur zählen strukturelle und materielle Schäden jeglicher Art. Die Grenze zwischen physischen und ökonomischen Schäden ist dabei nicht scharf definiert, da die Angabe der absoluten Verluste in der Regel in Geldsummen erfolgt. Beide sind aber eine direkte Schadensart; das heißt, es handelt sich bei ihnen um unmittelbare Folgen eines Ereignisses (SIDLE und OCHIAI 2006).

Die Quantifizierung von Schäden und somit der Vulnerabilität ist an sich ein kompliziertes Verfahren, das einerseits von der Art des Schadens und andererseits vom Fokus der Untersuchung abhängt. Die Art der Quantifizierung wird in Einklang mit den vorhandenen Informationen über Indikatoren des Risikoelements bzw. der Gefahr gewählt. Objekteigene Indikatoren steuern die Höhe des Schadensausmaßes. Eine wichtige Rolle bei der Auswahl dieser Indikatoren spielt die gewählte räumliche Dimension der Untersuchung. Studien im regionalen Maßstab lassen beispielsweise das Öfteren viele Indikatoren aus Gründen der Generalisierung außer Acht. Dahingegen wird bei lokalen bzw. analytischen Untersuchungen eine Vielzahl an Indikatoren benötigt.

Die Vulnerabilität wird häufig als eine Funktion des geschätzten Schadens definiert. Mathematisch wurde die Vulnerabilität (gegenüber Rutschungen) von EINSTEIN (1998) als die Schadenswahrscheinlichkeit beim Eintritt eines bestimmten Gefahrenszenarios beschrieben (siehe Gleichung [Gl.] 2.1). Ein Gefahrenszenario verfügt über eine bestimmte Intensität (Magnitude) und weist eine zeitliche und räumliche Auftretenswahrscheinlichkeit auf (FELL et al. 2008, PITILAKIS et al. 2011).

$$V_L = P[D_L \geq 0 | L] \quad (2.1)$$

wobei

V_L ... Vulnerabilität (gegenüber Rutschungen)

P ... Wahrscheinlichkeit

D_L ... Schadensausmaß; $D_L \in [0; 1]$

L ... (Rutschungs-)Gefahr

Die Vulnerabilität, die auf das Schadensausmaß bezogen ist, wird als ein Zahlenwert auf einer Skala zwischen 0 und 1 angegeben, wobei das Schadensausmaß gegen 1 zunimmt. Das heißt, wenn die Vulnerabilität gleich 0 ist, sind es keine Schäden zu erwarten, bei einem Wert von 1 geht man von einem Totalschaden aus (vgl. UNDRO 1982, FELL et al. 2008).

Die überwiegende Zahl der Studien gibt die physische Vulnerabilität als Verhältnis der schadensbedingten Reparaturkosten zu den Neubaukosten eines Objektes (monetärer Schaden) an (Gl. 2.2). Dabei dürfen auch andere Direktausgaben, wie Instandhaltungskosten, berücksichtigt werden. Zur Berechnung der physischen Vulnerabilität basierend auf monetären Werten müssen die Gesamtkosten pro Materialeinheit bekannt sein.

$$V = \frac{\text{schadensbedingte Reparaturkosten}}{\text{Neubaukosten}} \quad (2.2)$$

wobei $V \in [0; 1]$

Diese Art der Quantifizierung beruht auf einem quantitativen, kostenfokussierten Ansatz. Es gibt jedoch auch Studien, die die Vulnerabilität auf einer qualitativen Skala zum Ausdruck bringen (vgl. CARDINALI et al. 2002). Wenn die physische Vulnerabilität nicht in Form von direkten monetären Sachschäden ausgedrückt wird, kann entweder der intrinsische (vom Lat. *intrinsecus* = innerlich, von innen her) oder der utilitaristische (vom Lat. *utilitas*, auf Deutsch „Nutzen“ oder „Vorteil“) Wert eines Objektes herangezogen werden (ALEXANDER 2005).

Unter dem intrinsischen Wert wird die subjektive (oder immaterielle) Bedeutung eines Risikoelements verstanden. Der utilitaristische Wert hingegen besagt, welchen materiellen Nutzen ein Objekt für das ordnungsgemäße Funktionieren des Gesellschafts- bzw. Wirtschaftssystems hat. Straßen vom gleichen Bautyp können demnach einen unterschiedlichen utilitaristischen Wert aufweisen, je nachdem welche Rolle sie in diesen Systemen spielen.

Die von utilitaristischen Werten ausgehende Vulnerabilität wird häufig in qualitativen Klassen (z. B. von niedriger bis sehr hoher Vulnerabilität) angegeben. Diese qualitativen Vulnerabilitätsklassen können im Laufe der Vulnerabilitätsanalyse in numerische Vulnerabilitätswerte von 0 bis 1 umgewandelt werden. Dabei wird es dem Fachwissen bzw. der Erfahrung des Verfassers überlassen, welche Vulnerabilitätswerte als Klassengrenzen fungieren sollen – eine einheitliche Methodologie dafür ist noch nicht vorhanden.

Methoden der physischen Vulnerabilitätsanalyse

Es gibt mehrere Möglichkeiten, wie eine Vulnerabilitätsanalyse durchgeführt werden kann. Die Art der Analyse ist grundsätzlich von der Qualität und der Quantität der Datengrundlagen abhängig. Die einzelnen Methoden können in zwei zusammenfassende Gruppen, nämlich in die Gruppe der analytischen Modelle und in die Gruppe der empirischen Modelle, eingeteilt werden.

Analytische Modelle finden hauptsächlich bei ingenieurwissenschaftlichen Fragestellungen Anwendung. Sie untersuchen – in der Regel im großen Maßstab – das physikalische Verhalten von gebauten Strukturen während eines Gefahrenereignisses. Das Gefahrenszenario kann dabei auch gestellt sein; das Untersuchungsobjekt wird mit Sensoren ausgestattet, um eine Simulation unter Laborbedingungen durchführen zu können.

Im Laufe einer analytischen Untersuchung wird eine Vielzahl an Parametern verwendet, was zu einem erhöhten Rechenbedarf führt. Vorteile von analytischen Modellen sind die hohe Genauigkeit der Untersuchung und ihr wichtiger Beitrag zum

besseren Verständnis von physikalischen Prozessabläufen und Gesetzmäßigkeiten. Der größte Nachteil liegt in der beschränkten Verwendbarkeit in der Praxis, da sich die Modellergebnisse meist auf ein individuelles Objekt beziehen und auf andere Objekte nicht direkt übertragbar sind.

Empirische Modelle basieren hingegen auf Beziehungen unter Faktoren, welche die Vulnerabilität beschreiben sollen. Es wird dabei nicht die Wirkungsweise des Systems untersucht, sondern das System wird als eine Blackbox aufgefasst, dessen In- und Output-Werte mithilfe von Formeln in Beziehung miteinander gebracht werden (DESCH 2013).

Bei empirischen Modellen geht man bei der Vulnerabilitätsanalyse von Beobachtungen früherer Ereignisse aus, die dokumentiert worden sind. Bei ausreichender Information von guter Qualität kann eine Analyse ausschließlich auf dokumentierte Schäden stützend durchgeführt werden. Zu diesem Zweck werden Schadensberichte statistisch ausgewertet, um anschließend die Vulnerabilität berechnen zu können.

Insbesondere bei Rutschungen ist man des Öfteren aber mit der Tatsache konfrontiert, dass Datensätze über historische Ereignisse, falls sie überhaupt vorhanden sind, qualitative und quantitative Mängel aufweisen, die eine empirische Analyse nicht zulassen. Stattdessen muss, um eine Vulnerabilitätsbewertung erstellen zu können, die statistische Wahrscheinlichkeit für das Auftreten bestimmter Schäden herangezogen werden. Die Bestimmung dieser Werte hängt stark von der persönlichen Einschätzung der Experten ab.

Es gibt mehrere Möglichkeiten, die Vulnerabilität grafisch darzustellen. Bei immer größer werdender Zahl der Methoden wird eine Beziehung zwischen Vulnerabilität und Gefahrintensität hergestellt. Diese Beziehung kann mittels einer Vulnerabilitätsmatrix dargestellt werden. Von Vulnerabilitätskurven lässt sich zusätzlich die Interaktion der Gefahr mit dem Schadensausmaß und der Vulnerabilität ableiten. Für die Erstellung einer Vulnerabilitätskurve müssen jedoch die Gefahrenparameter (Intensität) weitgehend bekannt sein. Außerdem muss eine statistische Korrelation der Schäden bestehen, was wiederum die Verfügbarkeit einer qualitativ und quantitativ angemessenen Datenmenge voraussetzt (PAPATHOMA-KÖHLE et al. 2015).

Viele Methoden verzichten jedoch auf das Miteinbeziehen von Informationen über Gefahrenintensitäten in die Vulnerabilitätsanalyse. Solche Ansätze werden besonders bei solchen Gefahren angewandt, wo die Interaktion zwischen Gefahr und Schadensausmaß sehr komplex ist. Das ist besonders bei kleinräumig auftretenden Gefahren (wie Rutschungen) der Fall, wo die Vulnerabilität eine orts- bzw. zeitspezifische Variabilität zeigen kann (PAPATHOMA-KÖHLE 2012).

Zusätzlich zum komplexen physikalischen Verhalten erschwert das Fehlen einer einheitlichen Intensitätsskala die Vulnerabilitätsanalyse von Rutschungen. Auch die häufige Unkenntnis über historische Ereignisse ist ein großes Hindernis, das bisher noch nicht überwunden werden konnte. Das ist auch die Erklärung dafür, warum in vielen Studien über Rutschungen – unabhängig von ihrer tatsächlichen Intensität – den Risikoelementen der maximale Vulnerabilitätswert von 1 (Totalschaden) zugewiesen wird. Die Studien jedoch, die eine Differenzierung der Vulnerabilität nach Gefahreigenschaften vorsehen, weisen den einzelnen Risikoelementen unterschiedliche Vulnerabilitätswerte (häufig aufgrund von Experteneinschätzung) zu. Dabei wird in der Regel die Intensität der Gefahr berücksichtigt (siehe z. B. GLADE 2003).

2.4 Rutschungsrisiko

2.4.1 Begriffsdefinition

Ein wichtiges Ziel der Vulnerabilitätsanalyse ist die Bewertung des daraus ergebenden Risikos dar. Wenn es durch ungünstige Umstände zur Interaktion von Gefahr und Vulnerabilität kommt, kann sich ein Schaden oder im Extremfall eine Katastrophe daraus entwickeln. Die Wahrscheinlichkeit eines solchen Ereignisses wird „Risiko“ genannt und kann demnach als eine Funktion der von der Natur bedingten Gefahr und der Vulnerabilität der menschlichen Umwelt aufgefasst werden.

Eine bis heute verwendete Definition von „Risiko“ stammt von der UNDRO (1982). Das Risiko sei demgemäß der erwartete (menschliche und materielle) Verlust,

welcher infolge eines bestimmten Naturereignisses entsteht. In einer aktuelleren Definition der UNISDR (2009) wird das Risiko als die Wahrscheinlichkeit eines Ereignisses und dessen negativen Konsequenzen beschrieben. Auffällig bei beiden Definitionen ist jedoch das Fehlen des Begriffs „Vulnerabilität“, die ein zentraler Bestandteil des Risikos ist.

Andere Autoren bringen in ihren Definitionen diesen wichtigen Aspekt explizit zum Ausdruck (vgl. GLADE 2003, LEE und JONES 2014):

„Risk is concerned with the likelihood and scale of future adverse consequences that are the product of the interaction of hazard, vulnerability and exposure. Thus, both the magnitude-frequency characteristics of hazard and variations in vulnerability and exposure over space and time contribute to risk.” (LEE und JONES 2014)

Das rutschungsspezifische Risiko kann als die zeitliche und räumliche Wahrscheinlichkeit eines schadenden Rutschereignisses von einer bestimmten Intensität definiert werden. Die Risikoelemente verfügen über eine rutschungsspezifische Vulnerabilität, die abhängig von ihren Eigenschaften zu mehr oder weniger Schäden beitragen kann.

2.4.2 Risikoanalyse

Die qualitative Erfassung des Risikos kann durch ein konzeptionelles Modell beschrieben werden, welches das Risiko als das Produkt der Gefahr (H) und der Vulnerabilität (V), dividiert durch die Bewältigungsfähigkeit (C , capacity) definiert (siehe Gl. 2.3). Diese Formel kann zwar als Gleichung dargestellt werden, dennoch findet sie nur bei rein qualitativen Ansätzen Anwendung, wenn keine numerischen Werte über die Gefahr bzw. Vulnerabilität vorhanden sind (VAN WESTEN et al. 2010).

$$R = H \cdot \frac{V}{C} \quad (2.3)$$

wobei

R ... Risiko

H ... Gefahr

V ... Vulnerabilität

C ... Bewältigungsfähigkeit (*capacity*)

Wenn das Risiko qualitativ erfasst wird, basiert die Bewertung auf der Einschätzung des Experten. Das Risiko kommt in solchen Fällen gleichfalls qualitativ zum Ausdruck. Es werden dabei Begriffe verwendet, die die Höhe des Risikos beschreiben, wie z. B. niedriges, mittleres oder hohes Risiko. Qualitative Risikoanalysen kommen besonders dann zum Einsatz, wenn nur unzureichende Informationen über die Gefahr (bzw. seltener die Vulnerabilität) vorhanden sind.

Quantitativ kann das Risiko in der Regel als das Produkt von Gefahr, Vulnerabilität und der Anzahl der Risikoelemente (A) berechnet werden (Gl. 2.4). Diese Gleichung wird – im Unterschied zum qualitativen Modell – für die Ermittlung von numerischen Werten eingesetzt. Die einzelnen Faktoren können stellenweise noch weiter unterteilt werden; bei der Gefahr wird zum Beispiel zwischen einer räumlichen und einer zeitlichen Komponente unterschieden.

$$R = H \cdot V \cdot A \quad (2.4)$$

wobei

R ... Risiko

H ... Gefahr

V ... Vulnerabilität

A ... Anzahl der Risikoelemente

Für die Ermittlung des quantitativen Risikos werden numerische Daten über die räumlichen und zeitlichen Eigenschaften der Gefahr bzw. der Vulnerabilität benötigt, da das Risiko die Konsequenzen (Schäden) einer Gefahr für eine bestimmte Zeitperiode und für ein bestimmtes Risikoelement angibt. Die Berechnung des Risikos wird durch die Kombination der Gefahr – ausgedrückt durch die Auftretenswahrscheinlichkeit – mit der Vulnerabilität – im Sinne des Schadensanteils – durchgeführt (siehe dazu Abb. 4). Das numerische Ergebnis der quantitativen Risikobewertung kann entweder in relativen (als Wahrscheinlichkeit von 0 bis 1) oder in absoluten monetären Werten ausgedrückt werden.

Grafisch lässt sich das Risiko mittels einer Risikokurve veranschaulichen. Dazu soll zuerst die Gefahrenintensität gegen den Schadensanteil in einem Diagramm eingetragen werden, um diese anschließend zu einer Linie verbinden können. Die Fläche unterhalb der so entstandenen Risikokurve nennt man Gesamtrisiko.

Die Berechnung des Rutschungsrisikos gestaltet sich in der Regel als besonders schwierig, da die Gefahrenparameter nur bedingt zu eruieren sind. Außerdem weisen Risikoelemente gegenüber einer Rutschung je nach ihrer räumlichen Lage eine unterschiedlich hohe Vulnerabilität auf – also nicht nur die Gefahrenwahrscheinlichkeit, sondern auch die Schadenswahrscheinlichkeit variiert stark im Raum. Beispielsweise kann eine flachgründige Rutschung unterhalb einer Straße zum Totalschaden führen, aber auch nur mindere Schäden zufügen, wenn sie die Straße allein mit ihrer Fußspitze berührt. Trotz dieser Schwierigkeiten ist die Risikobewertung von Rutschungen ein wachsendes Forschungsfeld, das sich Hand in Hand mit der Vulnerabilitätsforschung entwickelt.

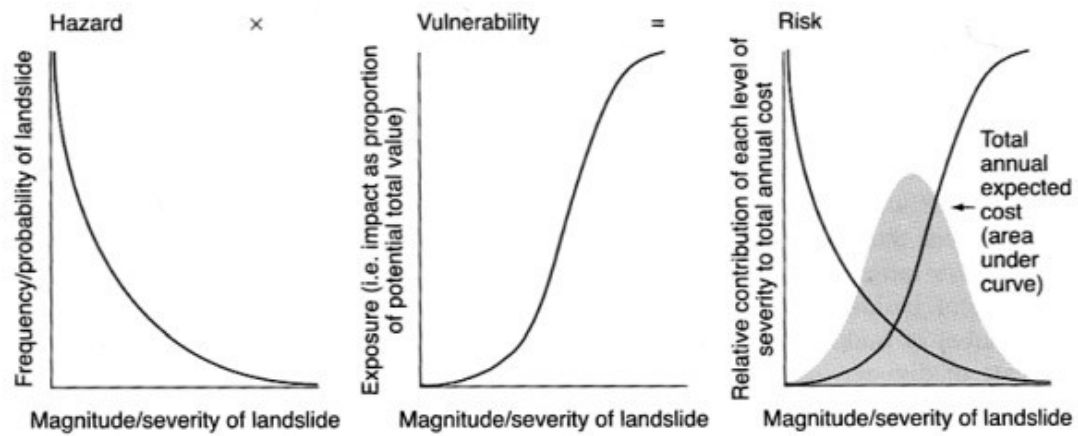


Abb. 4: Risiko als Produkt von Gefahr (Auftretenswahrscheinlichkeit) und Vulnerabilität (Schadensanteil). Ein Beispiel für Rutschungen. Quelle: LEE und JONES 2014 nach COBURN und SPENCE 1992

3 Methodik

3.1 Technische Eigenschaften von Straßen

3.1.1 Historische Entwicklung von Straßen

Der Mensch hat seit jeher Wege bzw. Straßen benutzt. Die Hauptaufgabe der Wege im Zeitalter des Urmenschen war die physische Verbindung zwischen Sippen bzw. zu anderen Individuen. Später, als der Mensch angefangen hat mit Waren zu handeln, mussten längere Strecken periodisch überwältigt werden. Aus Sicherheitsgründen, wie der Orientierung oder dem Schutz vor Raubtieren, wurden dafür immer die gleichen Wege von den Menschen genutzt. Es entstanden weite Trampelpfade, die als Vorläufer der Straßen betrachtet werden können. (N.N. 1976, LAY 2009)

Historische Aufzeichnungen berichten über die vermutlich ersten gepflasterten Wege um 4000 v. Chr., die im Assyrischen Reich gebaut worden sind. Auch die Ägypter und die Griechen errichteten Straßen mit befestigter Oberfläche (sog. staubfreie Straßen) aus administrativen oder sakralen Gründen. Diese Wege sind aber eher eine Seltenheit geblieben. Das außerstädtische Wegenetz bestand weiterhin aus markierten aber unbefestigten Pisten.

Die Etrusker und nachfolgend die Römer revolutionierten den Straßenbau. Es wurde die sog. Römerstraße entwickelt, welche der erste Straßentyp war, der ein menschlich stabilisiertes Fundament (lat. *statumen*) sowie mehrere Straßenschichten und eine Entwässerungssystem besaß. Die technischen Lösungen wurden immer ans vorherrschende natürliche Umfeld angepasst, wobei man sich dabei um einen geradlinigen Verlauf bemühte. Da dieses bis zu 80 000 km lange Straßennetz vorwiegend für militärische Zwecke gebaut wurde, wurden zudem die strategisch wichtigeren Abschnitte bei Möglichkeit gepflastert. (N.N. 1976, LAY 2009)

Nach einer Periode des technischen Rückschritts während des Mittelalters konnte sich der Straßenbau in der Neuzeit weiterentwickeln. Ein großer An Schub für die Entwicklung gab die von GAUTIER in der Mitte des 18. Jahrhunderts erfundene

Methode der Packlage, die ein Steinbett als Unterbau für die Schotterstraßen vorsah. Da aber diese Bauweise sehr kostspielig war, schlug der schottische Erfinder McADAM eine günstigere Methode vor, die Makadamstraße, die der Ausgangspunkt der modernen Straße war. Demnach sollten Straßen, anstatt eines teuren Fundaments, einen aus mehreren Schotterlagen unterschiedlicher Körnung bestehenden Aufbau haben. Diese Lagen wurden nach dem Auftragen mechanisch und mithilfe von Wasser verdichtet.

Obwohl die Makadamstraße eine günstige, bahnbrechende Lösung war, die die rasche Verkehrserschließung abgelegener Landesteile ermöglichte, hatte sie viele Schwachstellen. Ein großes Manko der Methode war der schnelle Kohäsionsverlust im Straßenkörper, was zur raschen Bildung von Schlaglöchern bei bereits geringer Verkehrsbelastung führte. Durch die inzwischen erfolgende Zunahme des motorisierten Verkehrs wurden Straßen mit einer widerstandsfähigeren Straßenoberfläche benötigt.

Diesem Wunsch kam das Teer-Makadam-Verfahren nach, was eine Makadamstraße, die durch das Einmischen von Teer befestigt wurde, bedeutete. Der nötige Teer stammte aus der Leuchtgasherstellung, wo dieser als Nebenprodukt der Verkokung gebildet wurde. Zusätzlich tritt mit der Erfindung des Portlandzements ein weiteres bis heute verwendetes Bindemittel auf, das aus gebrannten und nachfolgend gemahlenen CaCO_3 , SiO_2 , Al_2O_3 und FeO besteht. Dank des Zements konnte letztendlich der Straßenbeton erfunden werden.

Der letzte Schritt in Richtung moderner Straße, die wir heute als solche kennen, war die Erfindung des Asphalts. Ein Asphaltbelag dient einem ähnlichen Zweck wie die Teerbefestigung von Makadamstraßen. Als Bindemittel wird jedoch Bitumen verwendet. Bitumen, ein Nebenprodukt der fraktionierten Destillation von Rohöl aus den Erdölraffinerien, hat bessere physikalische Eigenschaften als Teer und bewirkt eine höhere Alterungsbeständigkeit von Straßen. Mithilfe des vielseitigen Einsatzes vom Asphalt können heutzutage Straßen mit einer derart hohen Qualität errichtet werden, wie es sie noch nie zuvor gab.

3.1.2 Materialien

Straßen können befestigt oder unbefestigt sein. Unbefestigte Straßen nutzen den natürlichen Untergrund (Boden oder Fels) als Straßenkörper, zusätzlich kann eine Schotterdecke aufgetragen werden, um die Straße vor Erosion besser zu schützen. In sog. Dritte Welt-Ländern gehören viele unbefestigte Straßen zu den Verkehrsadern (Bsp: die wichtigste Ost-West-Verbindung in Nepal). In den Industrieländern spielen dagegen unbefestigte Straßen eine geringe Rolle. Wegen ihrer hohen Beständigkeit und Verkehrskapazität werden in diesen Ländern befestigte Verkehrswege (vorwiegend als Asphaltstraßenbauweise) gebaut, die zwar höhere Errichtungskosten haben, aber eine bessere Beständigkeit sowie eine größere Fahrsicherheit gewährleisten.

Ein Grundbestandteil einer befestigten Straße ist das Bindemittel, das für den Zusammenhalt und Stabilität der festen Bestandteile sorgt. Früher nutzte man Teer (auch Teerpech genannt), ein Verbrennungsprodukt organischer Materialien, für diesen Zweck, dieser wurde aber in den meisten Ländern im Laufe des letzten Jahrhunderts vom weniger umweltbelastenden Bitumen abgelöst.

Bitumen wird zum größten Teil aus Erdöl, einem Stoffgemisch bestehend vorwiegend aus Kohlenwasserstoffen, gewonnen. Die natürlichen Vorkommen von Bitumen begrenzen sich auf wenige Asphaltseen der Welt, wie den La Brea Pitch Lake in Trinidad, der eine natürliche Zusammensetzung von 39% Bitumen, 30% Mineralstoffen und 31% emulgiertes Salzwasser aufweist. Bitumen besteht vorwiegend aus naphthenischen und aromatischen Ringsystemen mit einer großen molekularen Variation der Bestandteile. Dieses elasto-viskose Gemisch ist sehr wasserundurchlässig und widerstandsfähig gegenüber den häufigsten anorganischen Lösungen. Aus diesen Gründen eignet sich Bitumen hervorragend als Bindemittel im Straßenbau. (WIEHLER und WELLNER 2005)

Weitere Bindemittel zur Straßenbefestigung sind Zement und Kalk. Zement ist ein Grundbestandteil von Betonstraßen. Zement wird aber auch bei Asphaltstraßen als kohäsionstärkendes Mittel verwendet, indem es in sandig-kiesige Böden eingemischt wird. Dadurch werden die Frostbeständigkeit und die Biegezugfestigkeit der Straße erhöht. (WIEHLER und WELLNER 2005, LAY 2009)

Kalk, ein wesentlich günstigeres Bindemittel, wird gleichfalls bei Bodenverbesserungsmaßnahmen genutzt, um die Beständigkeit des Bodens gegenüber Bodenwasser und der Verkehrslast zu erhöhen. Der schluffig-sandige Boden wird durch die Zugabe von Kalk chemisch sowie physikalisch verändert und führt durch die Herabsetzung der Kapillarität, Erhöhung der Wasserbeständigkeit und Verringerung der Frostveränderlichkeit zu einer besseren Tragfähigkeit der Straße. Es gilt stets, dass je nach Bodentyp ein anderes Gemisch von verwendeten Materialien gewählt werden muss. (WIEHLER und WELLNER 2005, LAY 2009)

Natürliche und künstlich hergestellte Fest- und Lockergesteine, die in die Oberbauschichten der Straße eingesetzt werden, bezeichnet man in der Fachsprache als Gesteinskörnungen. Es werden vorwiegend Gesteinskörnungen mit runder Kornform und gleichmäßiger Korngröße bevorzugt, die einen sehr niedrigen Ton- oder Mergelanteil aufweisen. Je nach Bauklasse und Anwendungsbereich gibt es unterschiedliche Richtwerte.

Bord- und Kantensteine werden entweder aus Naturstein oder aus günstigerem Beton hergestellt und wirken unter anderem den negativen Folgen der lateralen Fahrbahnausdehnung entgegen. (LAY 2009)

3.1.3 Aufbau von befestigten Straßen

Vertikaler Aufbau

Ein Straßenkörper setzt sich aus einem Ober- und Unterbau sowie aus dem natürlichen Untergrund, der verschieden gut tauglich für den Straßenbau sein kann, zusammen (siehe Abb. 5). Der Unterbau liegt über dem natürlich gelagerten Boden des Untergrunds, wobei die Grenze dazwischen als Untergrundplanum (UPL) bezeichnet wird. Im Bauwesen wird unter Planum im Allgemeinen eine ebene Oberfläche verstanden.

Der Unterbau besteht aus einer aufgetragenen Lockersedimentschicht. Diese Schicht ist in der Mehrzahl der Fälle verdichteter Boden, der mithilfe von

Bodenverbesserungsmaßnahmen, wie die Anreicherung von Kalk, technisch verbessert wird. Oft dienen Dammschüttungen als Unterbaumaterial. Bei Einschnitten wird der Unterbau gelegentlich weggelassen. (WIEHLER und WELLNER 2005, LAY 2009)

Der Oberbau einer befestigten Straße, welcher sich über das Unterbauplanum (UBPL) erstreckt, ist weitaus komplexer aufgebaut und trägt die Hauptlast des Verkehrs und muss somit den Kräften am stärksten standhalten. Die Tragschicht kann ein- oder mehrschichtig ausgeprägt sein und besteht aus sog. Gesteinskörnungen. Als Gesteinskörnungen werden in der Fachsprache natürliche und künstliche Gesteinsstücke bzw. industrielle Nebenprodukte und Recyclingbaustoffe bezeichnet, die für den Straßenbau einsetzbar sind. Dafür müssen sie bestimmte Anforderungen bezüglich der Korngröße, der Kornform und der chemisch-physikalischen Beständigkeit erfüllen. Das Spektrum der verwendeten Korngrößen erstreckt sich von der Großgruppe der Sande bis zu den Kiesen. Gesteinskörnungen werden häufig als korngestufte Gemische im Oberbau eingesetzt.

Der Oberbau hat im Öfteren eine untere Tragschicht, welche dem Feuchte- und Frostschutz dienen kann oder einfach als eine zusätzliche Verstärkung des Straßenkörpers eingebaut wird. Diese Tragschicht wird nach unten vom Unterbauplanum, nach oben vom Planum der unteren Tragschicht begrenzt (uTPL). Besonders bei bindigen Böden mit einer niedrigen Permeabilität ist die Herstellung einer solchen Zwischenschicht nötig. Aus diesem Grund ist Sand die Hauptkomponente dieser Feuchte- bzw. Frostschutzschicht, da er neben seiner guten Sortierung eine optimale Wasserdurchlässigkeit aufweist.

An den oberen Tragschichten können Bodenverbesserungs- bzw. Bodenverfestigungsmaßnahmen z.B. mittels Kalk bzw. Zement durchgeführt werden, die dem Zweck dienen, die Eigenschaften des Bodens zu optimieren. Man unterscheidet zwischen Tragschichten mit und ohne Bindemittel. Diese haben unterschiedliche Funktionen und Aufbau, dennoch tragen beide zur erhöhten Tragfähigkeit des Straßenkörpers bei.

Die Tragwirkung beruht bei Tragschichten ohne Bindemittel ausschließlich auf innerer Reibung. Ist ein Bindemittel vorhanden, wird die Kohäsionskraft zusätzlich

verstärkt. Die am häufigsten eingesetzten Tragschichten ohne Bindemittel sind Schotter- und Kiessandtragschichten. Bei Tragschichten mit Bindemittel handelt es sich meist um Befestigungsschichten, die eine leistungsfähige und kostengünstige Befestigung des obersten Straßenkörpers gewährleisten. Vorwiegend werden heutzutage Asphalttragschichten, bestehend aus einem Gemisch von Gesteinskörnungen, Füller (Gesteinsmehle) und Bitumen, hergestellt. Bei Straßen, die eine große Verkehrslast tragen müssen, können auch Betontragschichten verwendet werden. (WIEHLER und WELLNER 2005)

Über die Tragschicht liegt die Deckschicht (kurz: Decke), welche die oberste Ebene einer Straße darstellt und mittels des Tragsschichtplanums (TPL) vom Oberbau getrennt wird. Ihre Höhe wird Befestigungsoberkante (BOK) genannt. Hauptaufgaben der Deckschicht sind die Minderung der verkehrsbedingten Lärm- und Staubbelastung bei einem hohen Verformungswiderstand sowie die Verbesserung des Fahrzeugverhaltens auf der Straße. Die Decke ist daher verfestigt und besteht je nach Bauart aus Asphalt oder Zementbeton. Früher hat man vorwiegend Pflastersteine verwendet, die heute aber nur mehr selten, hauptsächlich aus ästhetischen Gründen, eingesetzt werden. (WIEHLER und WELLNER 2005)

Asphaltdeckschichten schließen nach unten mit einer Binderschicht an den Oberbau an. Der Asphaltbinder sorgt für einen festen Übergang zwischen der oberen Tragschicht und der Decke. Aus diesem Grund sollen Binderschichten einen niedrigen Hohlraumgehalt besitzen, sonst kommt es (insbesondere bei Gussasphaltdecken) zur unerwünschten Blasenbildung. Auch für den restlichen Teil der Decke wird eine hohlraumarme Bauweise wegen der immer stärker werdenden Verkehrslast und wegen dessen verstärkter Wetterbeständigkeit empfohlen. Guss- und Splittmastixasphalt sowie Asphaltbeton und Asphaltmastix sind die gängigsten hohlraumarmen Decken. Sie haben unterschiedliche Vor- und Nachteile und werden daher nach bautechnisch-wirtschaftlichen Gesichtspunkten eingesetzt.

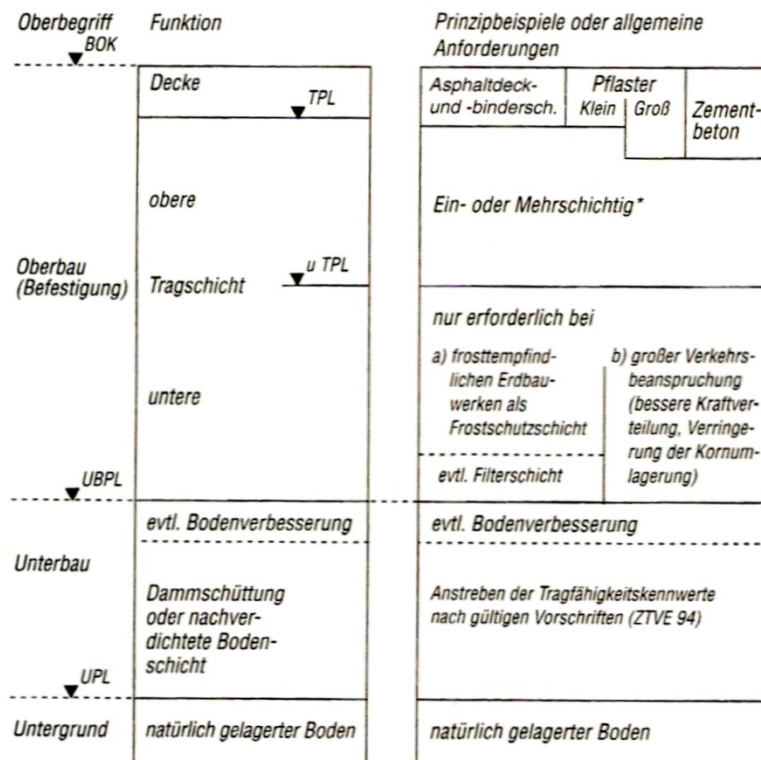


Abb. 5: Schichtenaufbau des Straßenkörpers. Quelle: WIEHLER und WELLNER 2005.

Deckschichten aus Zementbeton werden nur im Spezialfall eingesetzt, da sie eine kosten- und ressourcenintensive Bauart darstellen. Sie benötigen eine besondere Bauausführung, die beispielsweise eine Profilierung der Oberfläche und der Zugabe von luftporenbildenden Mitteln vorsieht. Problematisch ist bei Zementbetondecken außerdem die Plattenbauweise, wodurch verschiedenartige Fugen verwendet werden müssen.

Horizontaler Aufbau

Der horizontale Aufbau von Straßen wird anhand des Straßenquerschnitts beschrieben (siehe Abb. 6). Zum Straßenquerschnitt gehören alle befestigten sowie unbefestigten Teile der Straßenanlage. Der zentrale Teil des Straßenkörpers ist die im Oberbau befestigte Fahrbahn, welche eine Querneigung mit geringem Prozentsatz aufweisen kann. Häufig ist sie dachförmig geneigt, damit das Wasser zu

beiden Rändern abfließen kann (siehe dazu Kap. 3.1.4). Auch zum befestigten Teil der Straße gehört der Randstreifen, welcher im Unterschied zur Fahrbahn im Normalfall nicht befahren wird, dennoch potentiell befahren werden kann.

Der unbefestigte Seitenstreifen (auch Bankett genannt), der eventuell mittels Bord- oder Kantensteinen vom Randstreifen getrennt wird, gehört samt dem befestigten Straßenoberbau zur sogenannten Straßenkrone. Die Straßenkrone umfasst die Gesamtbreite der Straße. Unter Umständen ist ein Seitenstreifen bedingt durch steile Böschungswinkel (z.B. bei An- und Einschnitt im Fels) nicht vorhanden. Bei solchen Straßenkronen ist gleichzeitig eine technische Fahrbahnbefestigung bzw. ein Schutzsystem zu erwarten.

Randwärts der Straßenkrone nimmt die Neigung in der Regel zu. Einerseits sind die seitlichen Entwässerungsanlagen (Mulden, Gräben), andererseits die Damm- (unterhalb der Fahrbahn) bzw. Einschnittböschungen (oberhalb der Fahrbahn) dafür verantwortlich. Diese sind wichtige Bestandteile aller Straßen, da sie technisch so konzipiert sind, dass die Möglichkeit einer Rutschung unmittelbar unter- und oberhalb der Straßenkrone minimiert wird (siehe dazu auch Kap. 3.1.5). Die Straßenanlage endet dort, wo die bautechnisch modifizierten Erdbauwerke aufhören und die implizit nicht zur Straßenanlage gehörende Umgebung anschließt. (WIEHLER und WELLNER 2005, LAY 2009)

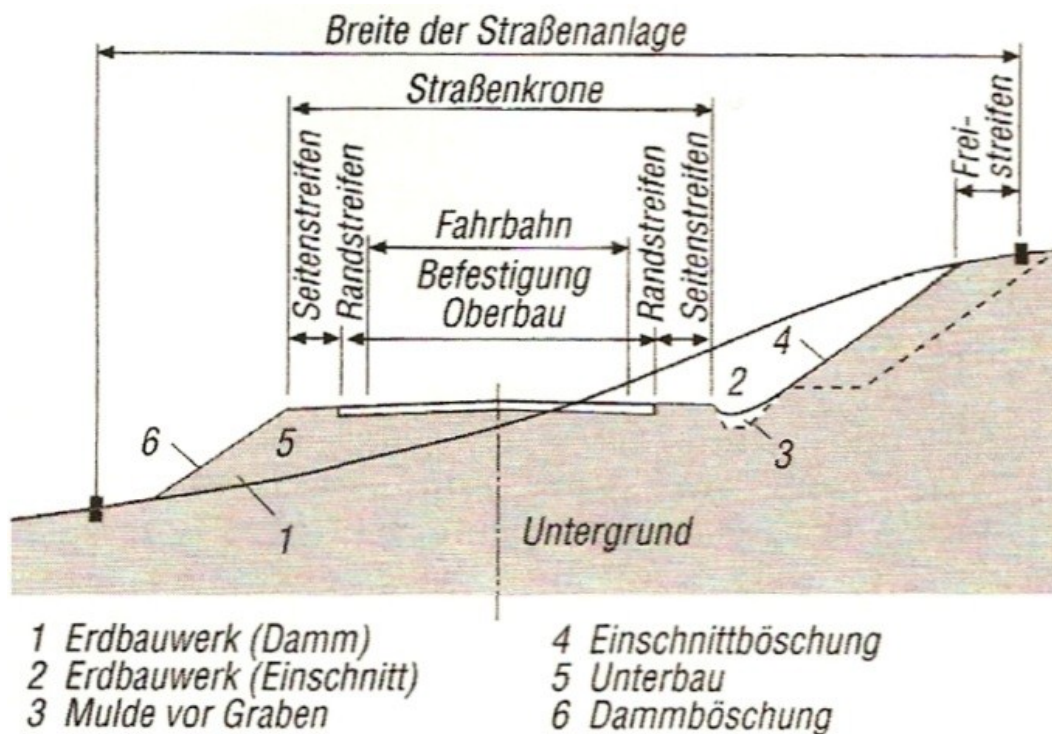


Abb. 6: Horizontaler Aufbau von Straßenanlagen, visualisiert als Prinzipquerschnitt. Quelle: WIEHLER und WELLNER 2005.

Hanganschnitte

Bei unebenen topographischen Verhältnissen, wie im Hügel- oder Bergland, erfordert die Trassenführung häufig einen Hanganschnitt (siehe Abb. 7). Das Ziel ist stets, aus einem Hangabschnitt ein rutschungssicheres Planum ohne großen technischen und wirtschaftlichen Aufwand herzustellen. Dabei wird die natürliche Hangneigung verändert, was wiederum die Gefahr von Rutschungen mit sich bringt. Aus diesem Grund werden unterschiedliche Konstruktionstechniken angewandt, damit die neu entstandenen Hänge nachhaltig stabilisiert werden können.

Diese Techniken unterscheiden sich im Wesentlichen durch die Art des Ab- und Auftrags von Erdbauwerken. Die kosteneffizienteste Methode ist, wenn das Aushubmaterial gleich vor Ort für den Bau von Dammböschungen verwendet werden kann. Ein solcher Erdmassenausgleich kann jedoch nur bei ausreichendem Platz und mit aus ingenieurgeologischer Sicht geeignetem Aushubmaterial erfolgen. (BRUNEKREEF und SENG 1996)

Bei der Errichtung von Hanganschnitten ist von großer Bedeutung, dass Tiefeinschnitte sowie zu hohe Neigungswinkel möglichst vermieden werden sollten, da diese verstärkt zur Destabilisierung des Hanges führen können. Auch eine leistungsfähige Drainage des betroffenen Hangbereichs muss vorhanden sein, damit es zu keiner Unterspülung des Straßenkörpers kommt (siehe dazu Kap. 3.1.4). Bei steilen bzw. aus bodentechnisch-geologischer Sicht problematischen Hängen sowie in ufernahen Bereichen werden außerdem vermehrt Kunstbauten errichtet, die die Straße von geogenen Gefahren schützen sollen (siehe Kap. 3.1.5). Die Auswahl des geeigneten Schutzsystems verlangt eine sehr gründliche Analyse bei der Bauplanung, da neben geomorphologischen, auch geologische, hydro(geo)logische und wirtschaftliche Faktoren berücksichtigt werden müssen. (CORNFORTH 2005)

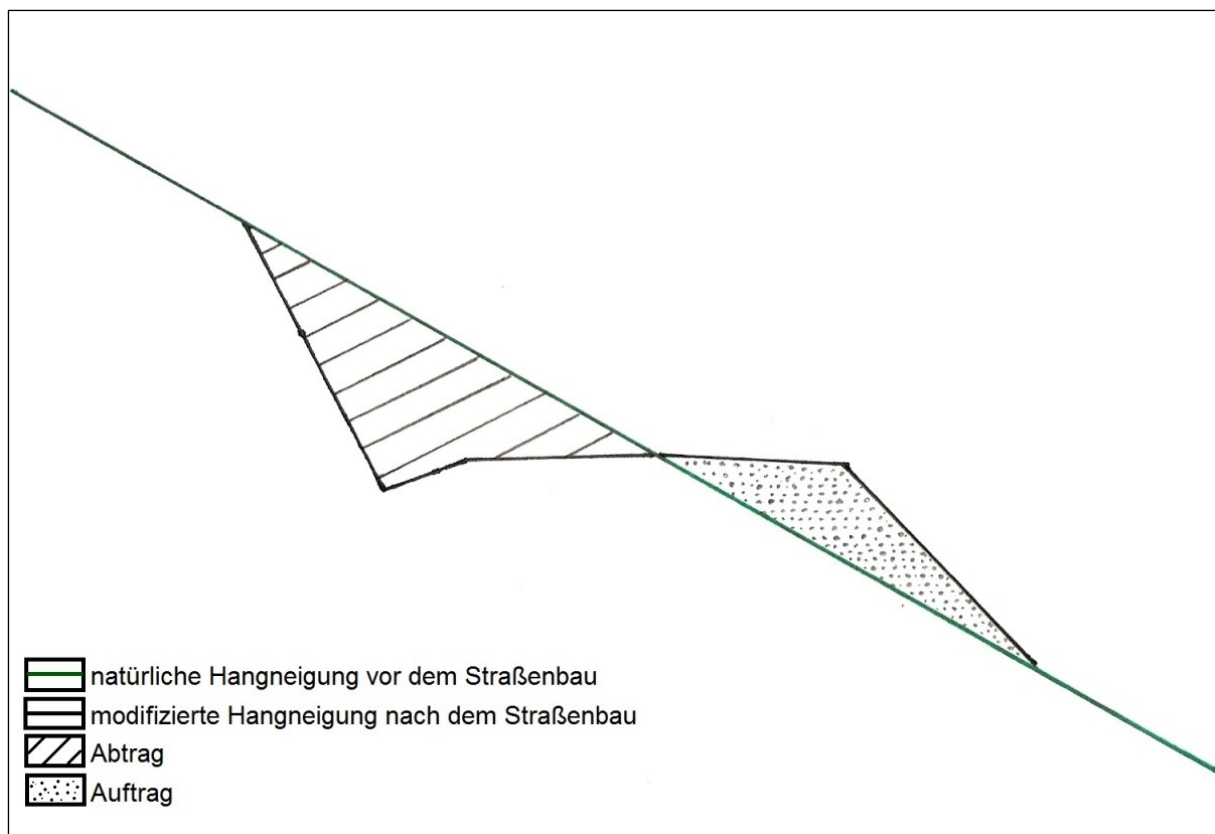


Abb. 7: Schematischer Querschnitt eines Hanganschnittes bei Straßen. Quelle: eigener Entwurf.

3.1.4 Entwässerung

Entwässerung des Untergrundes

Es muss für eine optimale Entwässerung (Drainage) des Untergrundes gesorgt werden, damit die Tragschichten der Fahrbahn strukturell stabil bleiben und es zur keiner Rutschung im Bereich der Straßenanlage kommt. Wenn das Grundwasserniveau nicht im optimalen Bereich gehalten werden kann oder es wetterbedingt zu Bodensättigung im Straßenuntergrund kommt, wird die Straße von Unterspülung bedroht. Besonders in Tallagen und an konkaven Hängen findet man Böden mit einem erhöhten Grundwassereinfluss, worauf bei der Bauplanung und -ausführung besonders geachtet werden muss. Rutschungen bedingt durch Unterspülung sind eine sehr häufige Ursache von Straßenschäden. (CORNFORTH 2005)

Die unterirdische Entwässerungsleistung einer Straße ist neben der dominanten Bodenart (Korngröße) stark von den verwendeten Baumaterialien in der unteren Tragschicht des Oberbaus und im gesamten Bereich des Unterbaus abhängig. Diese Straßenschichten müssen also so konzipiert sein, dass sie den festen Straßenkörper vor hohen Grundwasserpegeln und somit auch vor Frosteinwirkung im Winter schützen können.

In den Unterbau kann, wie bereits erwähnt, Zement oder Kalk eingemischt werden, um die Kohäsion der Bodenpartikel bei einem gesenkten Wassergehalt gewährleisten zu können. Außerdem wird sehr häufig Sand als untere Tragschicht aufgetragen, da dieser eine sehr gute Filterwirkung, Forstbeständigkeit, verbunden mit einer hohen Wirtschaftlichkeit, aufweist. (KENDRICK et al. 2004, WIEHLER und WELLNER 2005)

Technische Kunstbauten zur Entwässerung müssen überall dort installiert werden, wo der Straßenkörper natürliche Abflüsse (z. B. Quellen) kreuzt, was bei den meisten Straßenan- bzw. -einschnitten der Fall ist. Ein wichtiges Risikoelement bilden dabei Durchlässe, Düker und Sickerrohrleitungen, welche das Wasser hangabwärts bzw. in den Untergrund abführen können. Düker und Durchlässe sind überall dort notwendig,

wo natürliche (unter-, als auch oberirdische) Abflüsse die Straßenanlage durchqueren. Sickerrohrleitungen besitzen im Unterschied zu Durchlässen Schlitze an der Oberfläche, wodurch das Sickerwasser ins Rohr gelangen und anschließend abfließen kann.

Oberflächenentwässerung

Die Entwässerung von Straßen mindert die erosive Wirkung des Wassers und sorgt für ein besseres Fahrzeugverhalten auf der Verkehrsfläche. Damit sich das Wasser nicht auf der Straße ansammelt und seitlich abfließen kann, sind die Fahrbahnen in der Regel nach außen geneigt (sog. Dachformprofil). Diese Querneigung kann je nach Straßenbreite und Befestigungsoberfläche ein- oder zweiseitig sein und unterschiedliche Mindestneigungswerte aufweisen. Schotterdecken müssen beispielsweise die 1,6-fache Neigung der von Asphaltdecken aufweisen, damit eine optimale Entwässerungsleistung gegeben ist. (WIEHLER und WELLNER 2005)

Auch das von der Fahrbahn abfließende Wasser muss weggeleitet werden, damit der Seitenstreifen und indirekt der Unterbau nicht durchfeuchtet werden und somit die Tragfähigkeitsschwankungen der Straße im akzeptablen Bereich bleiben. Hierbei hilft wiederum die Gravitationskraft, indem das Wasser durch die leicht geneigte Fahrbahn in die Straßengräben gelenkt wird, wo es durch das Vorhandensein eines Gefälles zum natürlichen Vorfluter bzw. in die unterirdische Kanalisation abfließen kann.

Falls ein Hanganschnitt durch natürliche, auf die Oberfläche tretende Quellabflüsse gelegt wird, muss das austretende Wasser mittels Entwässerungsleitungen (Düker) von der Straße geleitet werden. Dabei wird darauf geachtet, dass der Unterhang, worauf der Verkehrsweg gebaut wurde, vom künstlichen Wasseraustritt nicht destabilisiert werden kann. Das kanalisierte Ablaufwasser wird daher häufig erst weiter hangabwärts, wo die Gefahr einer Unterspülung minimal ist, ins Freie geleitet.

Die Form und Bemessung der Oberflächenentwässerungsanlagen hängt von den erwarteten Wassermengen und von der Entwurfsgeschwindigkeit der Straße ab. Bei

Niedriggeschwindigkeitsstraßen, wie beispielsweise Gemeindestraßen innerhalb der Ortschaft, können tiefe Straßengräben angelegt werden. Solche Gräben werden aber bei höherrangigen Straßen und außerhalb von Ortschaften nicht gebaut, da sie die Verkehrssicherheit, etwa beim Abkommen eines Fahrzeuges von der Fahrbahn, gefährden würden. Stattdessen werden hier flachere Entwässerungsmulden gegraben, die bei Bedarf über eine zusätzliche unterirdische Sammelleitung verfügen können. (WIEHLER und WELLNER 2005)

Besonders bei einem Längsgefälle von über 4% müssen die Entwässerungsanlagen (Gräben und Mulden) gestuft gebaut werden. Auf diese Weise kann die hohe Energie des abfließenden Wassers gemindert und die Entwässerungsanlagen vor starker Erosion geschützt werden. (WIEHLER und WELLNER 2005)

3.1.5 Schutzsysteme

Es gibt eine Vielzahl an ingenieurtechnischen Möglichkeiten, Hänge bei Anschnitten zu stabilisieren. Am häufigsten kommen Stützbauwerke zum Einsatz, die die vom Hang kommenden Kräfte in Anker, Steifen oder in den Untergrund übertragen können. Je nach Eigenschaften des Hanges, Gefährdungspotenzial und Ressourcenverfügbarkeit wird die bestgeeignete Methode implementiert. Es werden hier fünf gängige Techniken vorgestellt, die bei der Sicherung der Hänge Anwendung finden.

Geotextilverbau

Synthetische Geotextil finden im Straßenbau Einsatz als moderner Erosionsschutz. Im Unterbau eingebaut können sie zur Verbesserung der Tragfähigkeit des Straßenbauwerks beitragen. Dabei lassen sie das Wasser zwischen ihren Maschen versickern und werden deshalb mehr als feste Materialien bevorzugt. Ein großer Vorteil ist außerdem das niedrige Gewicht von synthetischen Geotextilien, wodurch

die mechanische Belastung eines erosionsanfälligen Untergrundes verringert werden kann. (KENDRICK et al. 2004)

Bei Verwendung von geotextilen Trennlagen wird eine Verlagerung vom Granulat des Unterbaus in den Untergrund, bedingt häufig durch Wassereinwirkung, verhindert. Eine Verlagerung kann die Tragfähigkeit der festen Fahrbahn bei bestimmten wasserdurchlässigen Böden gefährden.

Auch Böschungen können mittels Geotextilien gegen Erosion und oberflächigen Rutschungen geschützt werden, vorausgesetzt es handelt sich um einen nicht zu steilen Hang (CORNFORTH 2005). Bei natürlichen Böschungen werden Geotextilien hangparallel eingesetzt (siehe Abb. 8). Böschungen, die durch künstliche, schichtweise Auftragung von Bodenmaterial errichtet worden sind, können Geotextilien horizontal nach jeder aufgetragener Schicht eingebaut werden.

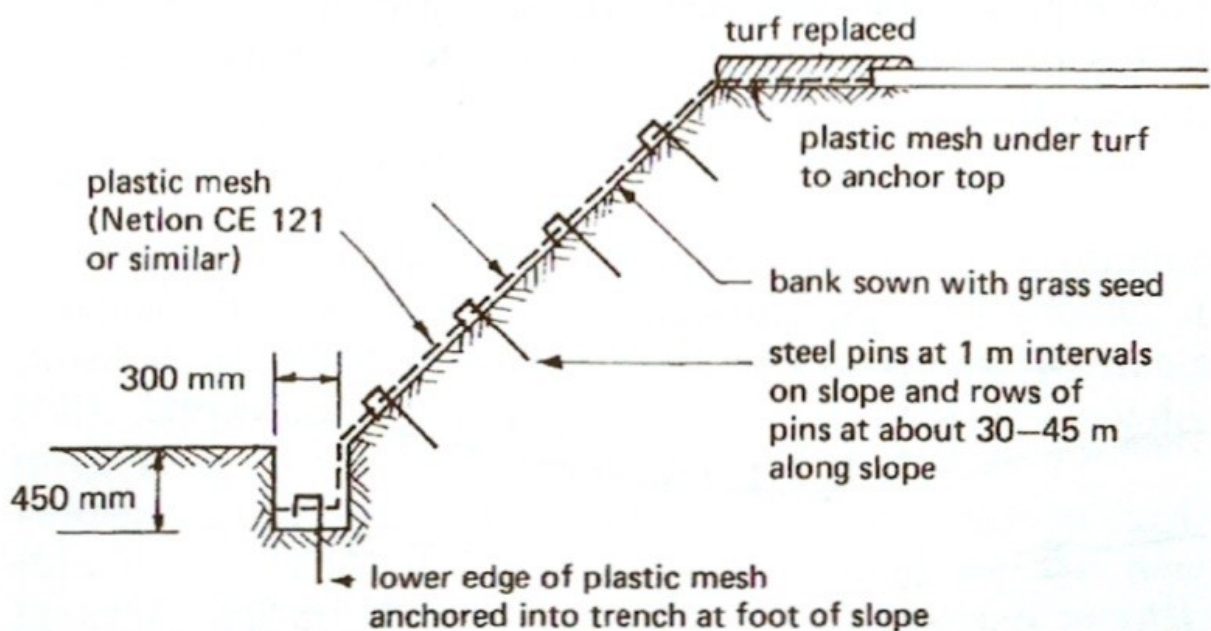


Abb. 8: Anwendung von Geotextilien zur Stabilisierung von Böschungen. Quelle: KENDRICK et al. 2004

Gabionenwände

Gabione, auch Drahtschotterkästen genannt, sind mit Steinen gefüllte Drahtkörbe (sog. Schüttkörbe), die unter anderem als Böschungsbefestigung sowie als kostengünstige Hangsicherung zum Einsatz kommen (VEDER 1981). Sie bieten eine sehr kosten- und ressourcengünstige Alternative zu Stützmauern. Die Körbe, die aus verzinktem Stahlgitter bestehen und gruppenweise miteinander verbunden sind, werden mit Steinen gefüllt, um der vom Hang wirkenden Kräfte entgegensteuern zu können (siehe Abb. 9 oben).

Die Steine müssen hierbei so ausgewählt werden, dass ihre Größe zwar die Maschenweite des Drahtnetzes überschreitet, jedoch einen minimalen Durchmesser von ungefähr 150 mm hat, damit die nötige Stabilität des Kastens gewährleistet ist. In der Fachliteratur werden harte, nur langsam verwitternde Gesteine mit einer Körnung zwischen 150 und 250 mm als optimale Gabionfüller genannt. (KENDRICK et al. 2004)

Bei der Errichtung von Gabionenwänden muss der Boden, auf den die Drahtkästen platziert werden, vorher geebnet werden. Die seitlichen Kästen einer Mauerreihe sollten zusätzlich mit einer Stange in den Untergrund verankert werden. Es können mehrere Gabionenreihen, auch in Verbindung mit Geotextilien, zur Stabilisierung von Hängen angelegt werden (siehe Abb. 9 unten).

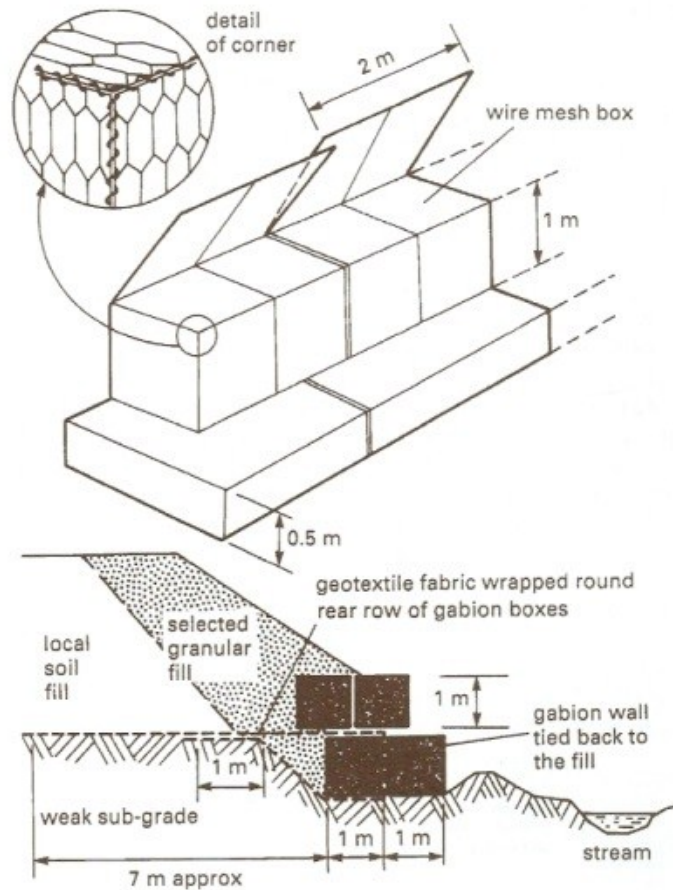


Abb. 9: Gabionenwände und ihre Verwendungsmöglichkeiten. Oben: Äußere Maße von Gabionen. Unten: Anwendungsbeispiel. Quelle: KENDRICK et al. 2004.

Natursteinmauern

Natursteinmauern bestehen aus Bruch- oder Blocksteinen und werden als kleinere Hangsicherungen eingesetzt. Falls zwischen den Natursteinen der Mauer ein Bindemittel (z.B. Zement) vorhanden ist, spricht man von einer vermörtelten Mauer (siehe Abb. 10). Wenn keine Bindemittel beim Bau von Natursteinmauern eingesetzt werden, dann handelt es sich um eine Trockensteinmauer. (KELLER und SHERAR 2003, WU 2006)

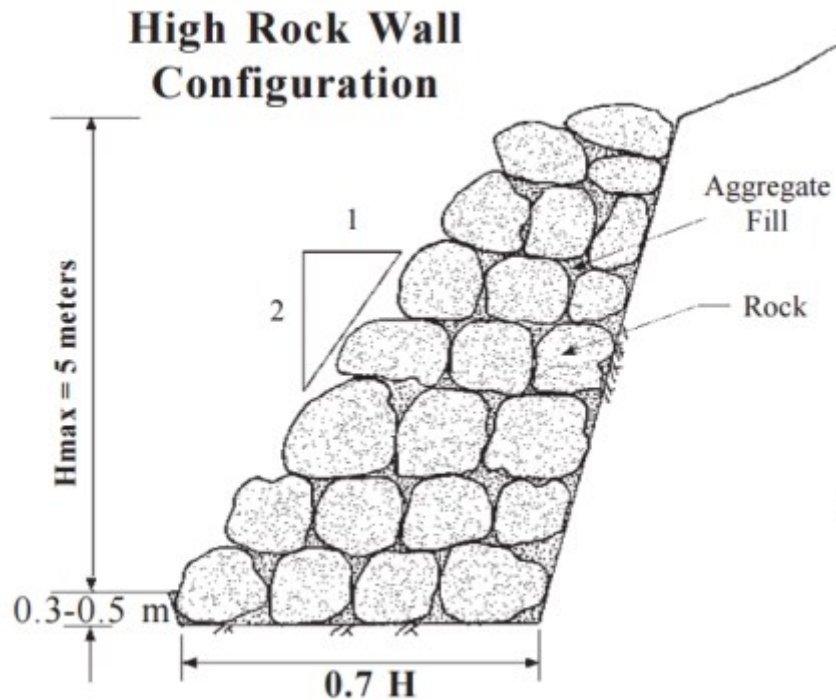


Abb. 10: Beispiel einer vermörtelten Natursteinmauer. Quelle: KELLER und SHERAR 2003.

(Stahl-)Betonmauern

Beton- sowie Stahlbetonmauern sind feste Stützmauern, die im Unterschied zu Gabionenwänden ein Fundament im Untergrund besitzen. Ähnlich der Wirkungsweise der Gabionen, leiten sie die vom Hang wirkenden Kräfte, dank ihrer Form bzw. ihres Mauer gewichts, durch ihre Sohle in den Untergrund. Es können dabei unterschiedliche Formen und Materialien zum Einsatz kommen (siehe Abb. 11). Je nach technischen Eigenschaften, Herstellung und Einbaubedingungen können (Stahl-)Betonmauern unterschiedlich benannt werden (z.B. Ortbeton oder Walzbeton). Stahlbetonmauern werden durch den Bewehrungsstahl zusätzlich verstärkt. Sie weisen daher nicht nur eine höhere Druckfestigkeit, sondern auch eine verstärkte Zugfestigkeit gegenüber Betonmauern auf. (KENDRICK et al. 2004, WU 2006)

Die Rückwand der Mauer ist lotrecht bei normalen Geländeverhältnissen, eine gegebenenfalls multiple, Neigung wird bei komplexerem Terrain nötig. Dort, wo das

Gelände steil ist oder wenig Platz zur Verfügung steht, können Speziallösungen, wie der Einbau von Konsolen oder Zusatzspornen, Anwendung finden. Winkelstützmauern, eine spezielle Art von Stahlbetonmauern, können dank ihres Fundamentsporns auch bodenmechanisch problematische Hänge stabilisieren (Wu 2006).

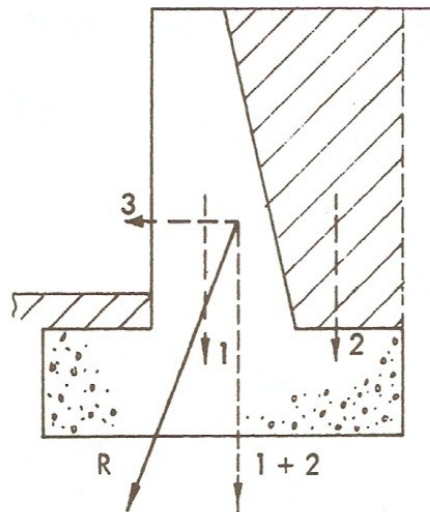


Figure 8.37 Retaining wall

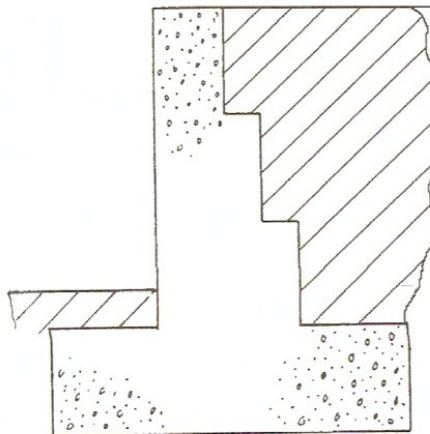


Figure 8.38 Alternative stepped shape

Abb. 11: Unterschiedliche (Beton- bzw. Stahlbeton-)Stützmauerkonstruktionen. Quelle KENDRICK et al. 2004.

Bodenvernagelung

Ein Hang kann auch mit einer Stahlbewehrung befestigt werden. In diesem Fall wendet man die Technik der Bodenvernagelung an und verzichtet somit auf fest verankerte Mauerwerke. Vorteil der Methode ist ein, im Vergleich zu anderen Stützmauern geringer Material- und Arbeitsaufwand. Die Einsatzmöglichkeiten dieser Methode sind jedoch auf Hänge mit besseren bodenmechanischen Eigenschaften beschränkt (VEDER 1981).

Bei der Bodenvernagelung müssen der Aushub und die Wandbefestigung lagenweise erfolgen. Der Abtrag erfolgt also Schicht für Schicht abwärts von der ursprünglichen Geländeoberkante. Zwecks Befestigung wird Spritz- oder Ortbeton aufgetragen. Die Betonschicht wird in Folge mit Stahlnägeln durchbohrt, welche eine einheitliche Länge haben, die ca. 50-70% der Wandhöhe ausmacht. Um die Stabilität zu erhöhen, werden letztlich übriggebliebene Freiräume in den Bohrlöchern mit einer Zementsuspension gefüllt (Wu 2006).

3.2 Nichttechnische Eigenschaften

3.2.1 Kategorisierung des Straßennetzes

Allgemeine Kategorisierungsmerkmale

Das Straßensystem kann in Straßenkategorien unterteilt werden. Die Zugehörigkeit einer Straße zu einer bestimmten Kategorie wird durch Gesetze (s. Straßenverkehrsordnung) und durch offizielle Widmung festgelegt. Daher können Straßen zwar ähnliche technische Eigenschaften aufweisen, müssen dennoch nicht zwingend zur selben Kategorie gehören. Die Hierarchie der Straßen wird nämlich nicht nur durch die Bauart, sondern u.a. auch durch die Verkehrsstärke und die Bedeutung festgelegt.

Obwohl der Name der einzelnen Kategorien von Land zu Land variiert, lässt sich trotzdem eine weltweit verbreitete und klare Unterscheidung aufgrund der zulässigen Höchstgeschwindigkeit erkennen. Autobahnen und Schnellstraßen weisen in allen Ländern, die diese Straßenkategorie besitzen, die höchsten Werte für die zulässige Höchstgeschwindigkeit auf. Gefolgt werden sie von Fernverkehrs- oder Überlandstraßen, welche (über-)regionale Zentren miteinander verbinden und gemeinsam mit den Autobahnen bzw. Schnellstraßen das Rückgrat des Verkehrsnetzes bilden. Die höchst zugelassene Geschwindigkeit für Fahrzeuge ist jedoch auf diesen Straßen in der Regel etwas niedriger als die auf den Autobahnen bzw. Schnellstraßen.

In vielen Ländern, wie auch in Österreich, gibt es zusätzlich eine Abstufung von Fernverkehrsstraßen je nach räumlicher Bedeutung. Niederrangigere Fernverkehrsstraßen haben nur eine regionale oder lokale Bedeutung, sie können außerdem leicht umgefahren werden. Die hochrangigsten Fernverkehrswege sind von überregionaler Bedeutung und haben oft, besonders in gebirgigem Terrain, keine parallel verlaufenden Alternativstrecken, auf welche die Fahrzeuge im Falle einer Straßensperre ausweichen können.

Die niedrigste Stufe in der Rangordnung des Straßensystems nehmen die Gemeindestraßen ein. Sie dürfen stellenweise nur mit Schrittgeschwindigkeit befahren werden und können sowohl befestigt als auch unbefestigt sein. Gemeindestraßen sind in der Regel schmaler als die vorigen Kategorien gebaut und befinden sich häufig im Privatbesitz. Unter anderem fungieren landwirtschaftliche Straßen wie Karrenwege oder Hofzufahrten oft als Privatstraßen.

Obwohl der Rang, also die Kategorie einer Straße, die Bedeutung eines Verkehrsweges für das Gesamtnetz explizit ausdrücken kann, sind nicht alle Straßen innerhalb einer Kategorie für den Verkehr von gleicher Bedeutung. Zwecks Differenzierung wird die durchschnittliche tägliche Verkehrsstärke (DTV) als Indikator herangezogen. Diese drückt die durchschnittliche Anzahl an Fahrzeugen aus, die durch einen Straßenquerschnitt pro Tag passieren. Registriert wird die DTV in der Regel mittels automatischer Bemessung (z.B. mittels einer Dauerzählstelle). Um zu statistisch aussagekräftigen Werten zu kommen, sollte die Bemessung über mehrere Monate bis zu einem Jahr kontinuierlich erfolgen.

Straßenkategorien in Österreich

In Österreich differenziert man rechtlich betrachtet zwischen Bundes-, Landes- und Gemeindestraßen (siehe Tab. 2). Zum Bundesstraßennetz gehören die Autobahnen (Abk.: A) und Schnellstraßen (S), welche vom Bund durch die ASFINAG (Autobahnen- und Schnellstraßen Finanzierungs-Aktiengesellschaft) verwaltet werden. Laut Bundesstraßengesetz müssen Bundesstraßen verschiedene technisch-regulatorische Bedingungen erfüllen, die genau definiert werden. Ein Punkt des Bundesstraßengesetzes (BStG) besagt beispielsweise das Folgende:

§ 2. (1) „Die Bundesstraßen eignen sich für den Schnellverkehr im Sinne der straßenpolizeilichen Vorschriften, weisen keine höhengleichen Überschneidungen mit anderen Verkehrswegen auf und dienen nicht der lokalen Aufschließung.“ (RIS 2015)

Gemeinsam mit den Landesstraßen (L oder Landesstraßen L) gehören seit 2002 auch die sog. Bundesstraßen² (B oder Landesstraßen B) zum Kompetenzbereich der Bundesländer. Jedes Bundesland verfügt über ein Straßengesetz, das über die Rechte und Pflichten zwischen Land und Gemeinden verteilt. Diese Rechte und Pflichten betreffen vorwiegend die Erhaltungs- und Finanzierungszuständigkeiten (vgl. NÖ Straßengesetz).

Letztendlich gibt es in Österreich Privatwege, die nicht von der öffentlichen Hand finanziert und erhalten werden. Diese können fallweise öffentlich benutzbar sein, allerdings können in bestimmten Fällen Mautgebühren für die Benutzung erhoben werden.

² In dieser Arbeit wird die inoffizielle Bezeichnung „Bundesstraße“ als Synonym für „Landesstraße-B“ verwendet.

Tab. 2: Straßenkategorien in Österreich

Straßenkategorie	Abkürzung	Erhalter
Autobahn	A	Bund (ASFINAG)
Schnellstraße	S	Bund (ASFINAG)
Landesstraße B	B	Land
Landesstraße L	L	Land
Gemeindestraße	-	Gemeinde / Land
Privatstraße	-	Privatperson(en)

In Österreich wird außerdem von einer Ortsstraße gesprochen, wenn eine Straße sich innerhalb des Ortsgebiets, also zwischen den Hinweiszeichen „Ortstafel“ und „Ortsende“, befindet. Straßen außerhalb des Ortsgebiets werden Freilandstraßen genannt. Das Gesetz sieht andere Bestimmungen für Freiland- und für Ortsstraßen vor. Diese Kategorisierung wird in der Fachliteratur auch häufig verwendet, da sie auf einem leicht erfassbaren Unterscheidungsmerkmal beruht. Der Nachteil einer solchen Kategorisierung ist jedoch die fehlende Information über die Herkunft der Straßenerhaltung und über den Rang der einzelnen Straßen in der Straßenhierarchie.

3.2.2 Straßenerhaltung

Zweck

Die Erhaltung des Straßennetzes ist ein genauso wichtiger Teil des Straßenmanagements wie die Planung, der Bau bzw. die Sanierung von neuen oder von bestehenden Straßen. Die Erhaltung einer Straße stellt im Unterschied zur Sanierung eine präventive Maßnahme dar, welche eine Maximierung der Materiallebensdauer von Straßen erzielt. Eine Verschlechterung des Straßenzustands kann dabei höchstens aufgehalten aber nicht reversibel gemacht werden. Obwohl jede Straße unabhängig von der Nutzung regelmäßig

instandgehalten werden muss, machen alters- oder verkehrsbedingte Reparaturmaßnahmen ca. 30% der Gesamterhaltungskosten aus (LAY 2009).

Die Straßenerhaltung umfasst alle Aufgaben, die zum Erhalt der ursprünglichen Qualität von materiellen und immateriellen Komponenten einer Straße beitragen. Eine wichtige Entscheidung der Erhaltungsebene ist die Festlegung der optimalen Häufigkeit der Durchführung dieser Aufgaben, da dabei Kosten und Nutzen abgeschätzt werden müssen. Ein gut funktionierendes Straßenerhaltungsmanagement ist daher neben der Verfügbarkeit finanzieller und personeller Ressourcen stark von der persönlichen Erfahrung bzw. Einschätzung der beauftragten Fachexpertin oder des beauftragten Fachexperten (z.B. des Leiters der Straßenmeisterei) abhängig. Sie bzw. er entscheidet über die organisatorischen Einzelheiten bezüglich der Straßenerhaltungsaufgaben, welche vom Streckendienst ausgeführt werden.

Streckendienst

Der motorisierte Streckendienst (StreMot) hat vielfältige, der Verkehrssicherheit dienende Überwachungs- sowie Erhaltungsaufgaben, die im Rahmen von geplanten Streckenbereisungen durchgeführt werden. Der StreMot stellt einen wichtigen Arbeitsbereich des Straßendienstes dar und ist für die Aufrechterhaltung eines funktionierenden Verkehrsnetzes unentbehrlich.

Ein StreMot-Dienst wird von einem ausgebildeten Streckenwart ausgeführt. Zu seinen Aufgaben zählen die in regelmäßigen Abständen erfolgende Kontrolle des Straßenzustands und die Kontrolle aller Kunstbauten und Nebenanlagen (wie Böschungen, Durchlässe oder Stützmauern). Alle beobachteten Unregelmäßigkeiten werden in Form eines Streckenprotokolls schriftlich festgehalten.

Kleinere Schäden, wie Schlaglöcher oder auf die Straße abgerutschter Boden mit geringem Volumen, werden von StreMots behoben. Auch das Freimachen von Durchlässen, das die notwendige Entwässerung von Straßen und Hängen sichert und eine Unterspülung der Straße verhindern soll, ist eine ihrer Kernaufgaben, die eine enorme Bedeutung für die Hangstabilität hat. Bei größeren Straßenschäden

wird die zuständige Straßenmeisterei benachrichtigt, die über die weiteren bautechnisch-administrativen Schritte (z.B. längere Straßensperren oder bauingenieurtechnisch aufwändigere Maßnahmen) entscheiden muss.

Die Streckenwarte sind so geschult, dass sie potentielle Gefahrenquellen für die Straße bzw. für den Verkehr erkennen können. Allerdings ist die Erkennung stark von der Bereisungsfrequenz, der Erfahrung des Mitarbeiters sowie von umweltbedingten Faktoren abhängig. Außerdem steigt die Wahrscheinlichkeit der Erkennung einer Abnormität, wenn die Zusammensetzung der StreMot-Besatzung über längere Zeit unverändert bleibt. Somit kann sich das Personal besser auch auf kleinere Veränderungen entlang einer regelmäßig befahrenen Strecke sensibilisiert werden.

Die Bereisungshäufigkeit der Strecken wird in der Regel nach den jährlichen durchschnittlichen Tagesverkehr (JDTV oder häufig DTV) ausgelegt, welcher als die durchschnittliche Zahl der an einer Messstelle täglich vorbeifahrenden Kraftfahrzeuge angegeben wird. Denn je mehr befahren eine Strecke ist, desto intensiver ist die Abnutzung der Fahrbahn. Außerdem erhöht sich durch den dichteren Verkehr die Unfallwahrscheinlichkeit. Die Bereisungspläne basieren hauptsächlich auf diesen Annahmen. Es können jedoch bestimmte Streckenabschnitte für die StreMots unabhängig von der JDTV priorisiert werden, die erfahrungsgemäß häufiger Schauplatz von Verkehrsunfällen bzw. von technischen Schäden sind.

3.3 Vulnerabilitätsanalyse von Straßen

3.3.1 Kritische Infrastrukturforschung

Die Vulnerabilitätsbewertung von Infrastruktur ist ein Thema, welches von vielen Disziplinen erforscht wird. Besonders die kritische Infrastruktur, auf welcher die ordnungsgemäße Funktionalität eines Gesellschaftssystems beruht, stand häufig im Fokus der Studien. Als kritische Infrastruktur zählt, neben etwa dem Energie- oder dem Telekommunikationsnetz, die Verkehrsinfrastruktur, welche die Mobilität der

Gesellschaft garantieren soll. Die Europäische Union zählt den Verkehr in ihrer Richtlinie (2008/114/EC) zur kritischen Infrastruktur, die in 5 Klassen unterteilt wird. Diese sind Straßenverkehr, Eisenbahnverkehr, Flugverkehr sowie Binnenschiff- und Seeschifffahrt (EU 2008).

Im Verlauf der letzten Jahrzehnte beschäftigten sich mehrere Studien mit der Vulnerabilität der kritischen Infrastruktur, welche als ein Netzwerk aufgefasst bestimmte Schwachpunkte gegenüber einer Gefahr aufweisen kann (vgl. RINALDI et al. 2001, MENONI et al. 2002, MATISZIW und MURRAY 2009). Der Schwerpunkt liegt jedoch bei den meisten Publikationen bei den Systemeigenschaften und nicht bei der direkten Beziehung der Systemeigenschaften zur Gefahr. Die Vulnerabilität wurde oft als Maß für das Nichtfunktionieren eines Gesamtnetzwerks, verursacht durch Ausfall von dessen Komponenten, verwendet. Beispielsweise analysierte BERDICA (2002) die Betriebsfähigkeit des Straßennetzes im Falle einer menschlich- oder umweltbedingten Unterbrechung. In der kritischen Infrastrukturforschung lässt sich nur vereinzelt eine Fokussierung auf die Naturgefahrenanalyse (z.B. Rutschungsgefahrenanalyse) finden.

3.3.2 Qualitative Methoden

Die bisherigen Erkenntnisse über die Vulnerabilität der kritischen Infrastruktur, wie beispielsweise die des Straßennetzes, gegenüber Rutschungen stammen vorwiegend aus der Risikoforschung. In diesem Gebiet wird ein Schwerpunkt vergleichsweise häufiger auf die Gefahr als auf Systemzusammenhänge gesetzt. Die meisten Studien verwenden dabei qualitative Methoden für die Bestimmung der Vulnerabilität eines Risikoelements. Gegenüber Rutschungen wird außerdem häufig die maximale Vulnerabilität (Totalschaden, $V = 1$) a priori angenommen und es wird sich nicht weiter mit dieser Fragestellung beschäftigt (GLADE 2003).

Qualitative Methoden, die im Gegensatz dazu eine intensitätsabhängige Vulnerabilität vorsehen, bedienen sich der Information aus historischen Aufzeichnungen, Feldstudien und mittels Experteneinschätzung (CIUREAN 2013). Als Endergebnis werden häufig Vulnerabilitätsklassen erstellt, die qualitativ (z.B.

niedrige, mittlere, hohe Vulnerabilität) beschrieben werden. Die qualitative Bewertung von Vulnerabilität benötigt eine Synthese vieler analytischer und empirischer Informationen, die sich jedoch nicht in Form einer mathematischen Gleichung darstellen lässt (vgl. DAI et al. 2002, LI et al. 2010, LEE und JONES 2014).

Obwohl qualitative Modelle sich manchmal indirekt mit intensitätsbezogenen Informationen auseinandersetzen, werden diese Informationen jedoch nicht quantitativ erfasst bzw. aufgeführt. Aus diesem Grund kann kein direkter Zusammenhang zwischen Rutschungsschäden (Vulnerabilität) und Gefahrenintensität dargestellt werden.

Die Studie von CARDINALI et al. (2002) behandelt beispielsweise die Vulnerabilität von Straßen im Rahmen einer Risikoanalyse für unterschiedliche gravitative Massenbewegungen. Die Bewertung der Vulnerabilität erfolgt dabei qualitativ. Zu diesem Zweck werden Werte aus der Forschungsliteratur bzw. aus dem Rutschungsinventar sowie Expertenwissen herangezogen. Die Vulnerabilität wird mittels Schadensklassen visualisiert (siehe Tab. 3). Die Schadensklassen sollen eine qualitative Beziehung zwischen objektspezifischen Schäden und der Gefahrenintensität, die hier eine Funktion von Volumen und Rutschgeschwindigkeit ist (siehe Formel 2.1), ausdrücken.

Demnach wird Feldwegen die höchste Vulnerabilität gegenüber Rutschungen zugewiesen, da diese bereits bei einer niedrigen Intensität Totalschaden erleiden können. Die niedrigste Vulnerabilität wurde den Hauptverkehrsstraßen zugeordnet, da diese materialbedingt widerstandsfähiger sind.

Tab. 3: Intensitätsabhängige Vulnerabilität, ausgedrückt in qualitativen Schadensklassen (A = geringfügiger / oberflächlicher Schaden, F = mittelschwerer / funktioneller Schaden, S = totaler / struktureller Schaden) nach Risikoelement (MR = Hauptverkehrsstraßen, SR = Nebenstraßen, FR = Feldwege, RW = Bahnlinien) in der Publikation von CARDINALI et al. (2002). Quelle: CARDINALI et al. (2002).

Landslide Intensity		Elements at Risk											Population		
		Structures and infrastructures										Others			
		Buildings					Roads								
HD	LD	IN	FA	SP	C	MR	SR	FR	RW	Q	Direct	Indirect	Homeless		
Light	Rock fall	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	No	No	No
	Debris flow	A	A	A	A	A	A	A	F	F	A	A	No	No	No
	Slide	A	A	A	A	A	A	A	F	S	A	A	No	No	No
Medium	Rock fall	F	F	F	F	F	F	F	F	F	F	F	Yes	Yes	Yes
	Debris flow	F	F	F	F	F	F	F	F	F	F	F	Yes	Yes	Yes
	Slide	F	F	F	F	F	F	F	S	S	F	F	No	Yes	No
High	Rock fall	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	Yes	Yes	Yes
	Debris flow	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	Yes	Yes	Yes
	Slide	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	No	Yes	Yes
Very high	Rock fall	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	Yes	Yes	Yes
	Debris flow	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	Yes	Yes	Yes
	Slide	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	No	Yes	Yes

REMONDO et al. (2005, 2008) quantifizieren die direkte Vulnerabilität von Straßen gegenüber Rutschungen anhand früherer Schäden, die in einem Inventar aufgezeichnet worden sind. Die Vulnerabilität berechnet man anhand von Schadensaufzeichnungen durch das Verhältnis zwischen mittlerer Schadenssumme und dem aktuellen monetären Wert (Neuerrichtungskosten) pro Laufmeter (siehe Gl. 3.1). Diese Art der Vulnerabilitätsbewertung findet im Falle von Verkehrsbauwerken sehr häufig Anwendung, da sie relativ einfach zu erfassen ist.

$$V = \frac{\text{mittl. Schadenssumme pro Laufmeter und Gefahrenszenario}}{\text{aktueller monetärer Wert pro Laufmeter}} \quad (3.1)$$

Man unterscheidet zwischen vier Straßenkategorien, für welche die durchschnittlichen Neuerrichtungskosten pro Laufmeter sowie die durchschnittlichen Schadenssummen statistisch bestimmt worden sind. Die durchschnittliche Höhe der Schäden entspricht laut Autoren der mittleren Intensität von Rutschungen im Untersuchungsgebiet. Die Berechnungen der Vulnerabilität beziehen sich daher nur auf ein spezifisches Gefahrenszenario. Den höchsten Vulnerabilitätswert erhielten mithilfe dieser Methodologie die Gemeindestraßen, den niedrigsten die Autobahnen (siehe Tab. 4).

Tab. 4: Aus dem aktuellen monetären Wert (*Value* in €/m) und den mittleren Schadenssummen (*Losses* in €/m) errechnete Vulnerabilitätswerte des Verkehrsnetzes in den Studien von REMONDO et al. (2005, 2008)
Quelle: REMONDO et al. 2005.

Type	Value (€/m)	Losses (€/m)	Vulnerability
Railway track	120	101.0	0.84
Local road	100	92.5	0.93
Regional road	690	89.5	0.13
National road	1,400	85.0	0.06
Motorway	6,000	72.5	0.01

ZÉZERE et al. (2008) führten eine Bewertung der Vulnerabilität anhand Gefahrencharakteristika durch. Dies erfolgte im Rahmen einer probabilistischen Risikoanalyse des Straßennetzes gegenüber Rutschungen. Die Autoren fügten jedem Risikoelement eine indirekt intensitätsabhängige Vulnerabilität hinzu. Sie definierten die Intensität als die Kombination von Gründigkeit, Volumen und Geschwindigkeit einer Rutschung. Aufgrund dessen wurden die Rutschungen in drei, der Systematik von Rutschungen entsprechenden Klassen, eingeteilt. Somit wurden zwar Intensitäten indirekt und allgemein beschrieben, jedoch nicht quantifiziert.

Für vier unterschiedliche Straßenkategorien berechnete man durchschnittliche und gefahrenabhängige Vulnerabilitätswerte (also Fixwerte), die sich auf diese indirekte

Tab. 5: Gefahrenabhängige Vulnerabilität von Straßen in der Studie von ZÉZERE et al. (2008). Quelle: modifiziert nach ZÉZERE et al. (2008).

Risikoelement	Vulnerabilität gegenüber flachgründigen Translationsrutschungen	Vulnerabilität gegenüber Rotations- und Translationsrutschungen
Autobahn	0,6	1
Nationalstraße	0,6	1
Regionalstraße	0,6	1
Landstraße	0,6	1

Intensität beziehen und in Verbindung mit früheren Schadenssummen aus dem Inventar bzw. aus der Fachliteratur stehen. Zur rechnerischen Ermittlung der Einzelwerte wurde die Vulnerabilität aus dem Quotient der schadensbedingten Reparatur- zu den Neubaukosten errechnet. Die klassenabhängigen, durchschnittlichen Vulnerabilitätswerte waren dennoch ein Produkt von Annahmen, die von den Experten getroffen wurden.

Die Annahmen der Autoren betrafen einerseits die gebietsspezifischen Charakteristika der Rutschungsgefahr, andererseits die Eigenschaften der Risikoelemente. Dementsprechend ging man sowohl bei Translations-, als auch bei Rotationsrutschungen von einem Totalschaden bei allen Straßentypen aus. Eine Ausnahme stellten flachgründige Translationsrutschungen dar, die erfahrungsgemäß weniger Schäden verursachen können (siehe Tab. 5).

3.3.3 Semiquantitative und quantitative Methoden

Semiquantitative Methoden drücken, im Unterschied zu qualitativen Methoden, die Abhängigkeit des Schadensausmaßes von der Gefahrenintensität explizit aus. Die Quantifizierung der Intensität, und demzufolge die Erfassung der Vulnerabilität, erfolgt jedoch in Klassen. (CIUREAN 2013)

JAISWAL et al. (2010) gingen beispielsweise in ihrer Studie vergleichbar zu REMONDO et al. (2005, 2008) vor. Allerdings wurden die objektspezifischen Vulnerabilitäten drei Intensitätsklassen zugewiesen (siehe Tab. 6). Die Grenzen der Intensitätsklassen (oder Magnitudenklassen wie die Autoren sie bezeichneten) wurden in erster Linie aufgrund des Rutschungsvolumens festgelegt. Außerdem stellte man eine Beziehung zwischen Volumen, Tiefe, Auslaufdistanz und der Auftretenswahrscheinlichkeit von Rutschungen her, um die Intensitätsklassen zu charakterisieren. Die Vulnerabilität wurde nur für einen Straßentyp (befestigte Straßen) bewertet und zeigt einen (schrittweisen) Anstieg mit der Zunahme der Intensität. Zur Berechnung des Vulnerabilitätswertes für jede einzelne Intensitätsklasse wurde analog zur REMONDO et al. (2005) die Gleichung 3.1 herangezogen.

Tab. 6: Magnitudenklassen (Intensitätsklassen) M-I bis M-III und die davon abhängigen Vulnerabilitätswerte des Verkehrsnetzes in der Fallstudie von JAISWAL et al. (2010). Abkürzungen: V= Volumen (m³), S_d = Tiefe der Plaie (m), RD = Auslaufdistanz (m), P = Auftretenswahrscheinlichkeit. Quelle: JAISWAL et al. (2010)

Size class	V, range (m ³)	S _d (m)	RD (m)	A _d (m)	P, range (average)	
					<100 slides/year	≥100 slides/year
M-I	< 10 ²	< 1	< 10	1	0.5–1 (0.85)	0.39
M-II	10 ² – 10 ³	< 2	10–50	< 2	0.01–0.33 (0.13)	0.53
M-III	> 10 ³	2–8	> 50	< 5	0–0.16 (0.02)	0.08

Type of Element at Risk	Vulnerability		
	M-I	M-II	M-III
Infrastructure			
Railway line	0.5	1	1
Road (Asphalt)	0.2	0.4	0.8

Eine quantitative Erfassung der Vulnerabilität zeichnet sich dadurch aus, dass das Schadensausmaß mit der Intensität in eine direkte Beziehung gesetzt wird. Dadurch soll die quantitative Vulnerabilitätsbewertung objektivere Ergebnisse als die qualitativen bzw. semiquantitativen Methoden liefern. Eine empirische oder probabilistische Vorgehensweise wird bevorzugt, dennoch darf die Analyse auch heuristisch (also basierend auf Expertenmeinung) erfolgen. Bei empirischen Methoden werden dokumentierte Schadensinformationen (in der Regel in einem Rutschungsinventar aufgezeichnet) verwendet, probabilistische Analysen rechnen wiederum mit statistischen Werten. (vgl. CIUREAN 2013)

Trotz fortan sich entwickelnder Methoden ist die quantitative Berechnung der Vulnerabilität gegenüber Rutschungen, wie bereits erwähnt, äußerst problematisch. In der Vulnerabilitätsforschung gibt es bisher nur wenige Ansätze, die sich eine quantitative Vulnerabilitätsbewertung von physischen Objekten gegenüber Rutschungen zum Ziel gesetzt haben. GLADE (2003) bezeichnet eine der größten Schwierigkeiten in dieser Hinsicht. Diese sind ähnlich ablaufende, aber im Raum verteilte Rutschereignisse können bei identischen Risikoelementen zu unterschiedlichen Vulnerabilitäten führen. Zusätzlich wird die Analyse durch eine räumlich differenzierte Auftretenswahrscheinlichkeit der Gefahr erschwert. Daraus

ergeben sich zahlreiche Probleme, die bis zum jetzigen Zeitpunkt nicht gelöst werden konnten.

Infolgedessen müssen weiterhin bestimmte Faktoren der Intensität bzw. inhärenten Eigenschaften der Risikoelemente für die Vulnerabilitätsanalyse ausgewählt bzw. festgelegt werden. In dieser Hinsicht erfolgt eine Art Generalisierung, sowohl der Gefahren-, als auch der Risikoelemente. Die Auswahl hängt dabei von der Einschätzung des Experten ab. Das bedeutet, obwohl es quantitative Erfassungs- und Analysemöglichkeiten der Vulnerabilitätsfaktoren in Bezug auf Rutschungen vorhanden sind, stehen noch keine rein quantitativen Methoden zur Verfügung, die auf das Expertenwissen gänzlich verzichten könnten.

GALLI und GUZZETTI (2007) gingen empirisch in ihrer Studie vor, da sie für die Bestimmung der Vulnerabilität Vulnerabilitätskurven, basierend auf Werten aus einem Rutschungsinventar, erstellten. Die Vulnerabilitätskurven setzten die Größe von Rutschflächen, die hier zur Beschreibung der Intensität verwendet worden sind, mit dem dokumentierten Schadensausmaß für jedes Risikoelement in Beziehung. Das Verhältnis der Rutschflächen zum Schadensausmaß zeigte dabei ein nichtlineares Muster.

Die Direktschäden wurden heuristisch (also wissensbasiert) bewertet. Dabei standen die intrinsischen Eigenschaften der Risikoelemente im Fokus und demnach war die soziale bzw. ökonomische Bedeutung einer Straße das Hauptunterscheidungsmerkmal. Es wurden weitere Merkmale wurden gleichfalls berücksichtigt, welche durch die fallweise Gewichtung eine mehr oder weniger wichtige Rolle spielen.

Bei den weiteren Merkmalen handelt es sich um die technischen Eigenschaften von Straßen. Diese betreffen das Alter, die Bauart sowie den Erhaltungszustand von Verkehrswegen. Mithilfe dieser Informationen unterschied man zwischen zwei Arten von Verkehrsbauwerken, nämlich zwischen befestigten (Vorfahrt-) und unbefestigten (Neben-) Straßen. Die intensitätsabhängigen Vulnerabilitäten für diese beiden Kategorien wurden im Laufe der Analyse voneinander getrennt bestimmt.

Die früheren Schadensausmaße wurden mit den zugehörigen Intensitätswerten in ein Diagramm eingetragen, um zu einer intensitätsabhängigen Vulnerabilität zu

gelangen. Die inhärente Unsicherheit der heuristischen Schadensanalyse wurde in diesem Diagramm mittels Fehlerbalken für die messfehlerbedingten Abweichungen der Werte visualisiert. Mithilfe von Potenzfunktionen konnten Schwellwerte für die minimalen bzw. maximalen Vulnerabilitäten bestimmt werden. Miteinander gezeichneten formten diese Werte eine minimale bzw. maximale Vulnerabilitätskurve (siehe Abb. 12).

Die Ergebnisse der Studie zeigten, dass die höchsten Vulnerabilitätswerte solche Straßenabschnitte besitzen, die in der Vergangenheit einen Totalschaden erlitten haben und infolgedessen für eine längere Zeit gesperrt bleiben mussten. Wenn sich in der Nähe von Straßen keine parallel verlaufenden Alternativstrecken befanden, ist der Vulnerabilitätswert zusätzlich angestiegen. Hauptverkehrswegen wurde zudem, im Gegensatz zu den Ergebnissen von CARDINALI et al. (2002), eine höhere Vulnerabilität als weniger stark befahrenen Verkehrsverbindungen zugeordnet.

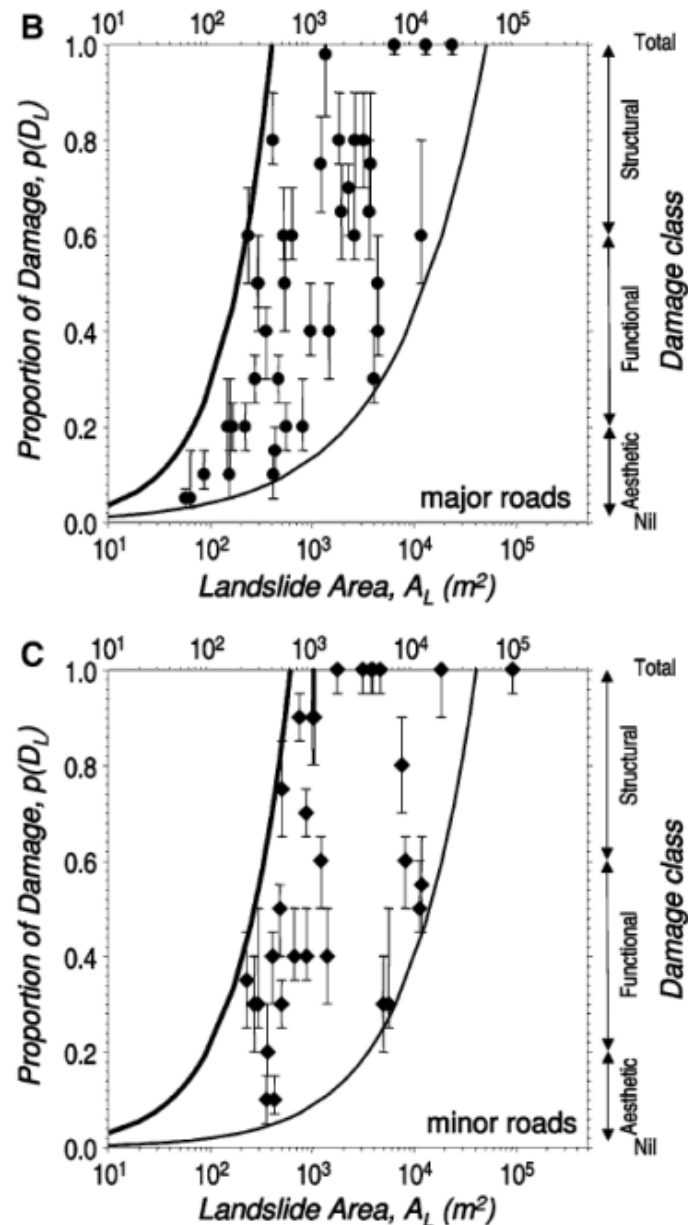


Abb. 12: Vulnerabilitätskurven für befestigte (Vorfahrt-) Straßen (Diagramm B) und unbefestigten (Neben-) Straßen (Diagramm C). Zu den einzelnen Schadenswerten werden die Unsicherheiten darstellend Fehlerbalken angezeigt. Quelle: GALLI und GUZZETTI 2007.

Im Rahmen des *SafeLand*-Projektes (2011) wurden zwecks der quantitativen Ermittlung der Vulnerabilität gegenüber gravitativen Massenbewegungen (in der Fallstudie für Murgänge) Fragilitätskurven, welche auf der Einschätzung von Experten aus der Wissenschaft bzw. aus der Praxis beruhen, entwickelt. Die Informationen über die Intensitätsabhängigkeit von Straßenschäden wurden mithilfe von Fragebögen, die von den Experten ausgefüllt worden sind, aufgenommen. Somit handelt es sich um eine heuristische Analyse, die jedoch eine statistische Validierung

der Ergebnisse vorsieht. Dabei werden die aus den Fragilitätskurven abgeleiteten Werte mit den dokumentierten Schadenswerten zweier realen Ereignisse verglichen.

Die Fragilitätskurve fungiert als eine Funktion des Volumens (charakterisierend für die Intensität) und der Schadenswahrscheinlichkeit (siehe Abb. 13). Für jeden Schadenszustand („begrenzter Schadenszustand“, „schwerer Schadenszustand“, „totaler Schadenszustand“) wurde ein intensitätsabhängiger Wahrscheinlichkeitswert für das Überschreiten des jeweiligen Schadenszustandes von den Experten angegeben.

Die Schadenszustände wurden vorher qualitativ für zwei Straßenkategorien, nämlich für die Schnellstraßen (min. Höchstgeschwindigkeitsgrenze von 80 km/h und mindestens eine feste Spur je Fahrtrichtung vorhanden) sowie für Gemeindestraßen (oder „Straßen mit lokaler Bedeutung“; max. Höchstgeschwindigkeitsgrenze von 50 km/h, ein- oder mehrspurig, befestigt oder unbefestigt), gesondert beschrieben. Sie betreffen strukturelle und funktionelle Eigenschaften von Verkehrsbauten.

Die Antworten der befragten Experten wurden anhand ihrer Angaben zur Selbsteinschätzung über das Ausmaß an Erfahrung gewichtet und in Form einer gewichteten Fragilitätskurve dargestellt (Abb. 13). Eine zunehmende Unsicherheit bezüglich des Schadensausmaßes lässt sich bei steigender Intensität feststellen. Außerdem hat die Auswahl einer statistischen Gewichtungsmethode einen großen Einfluss auf die Ergebnisse, welcher jedenfalls nicht beseitigt werden konnte. (PITILAKIS et al. 2011, WINTER et al. 2013, WINTER et al. 2014)

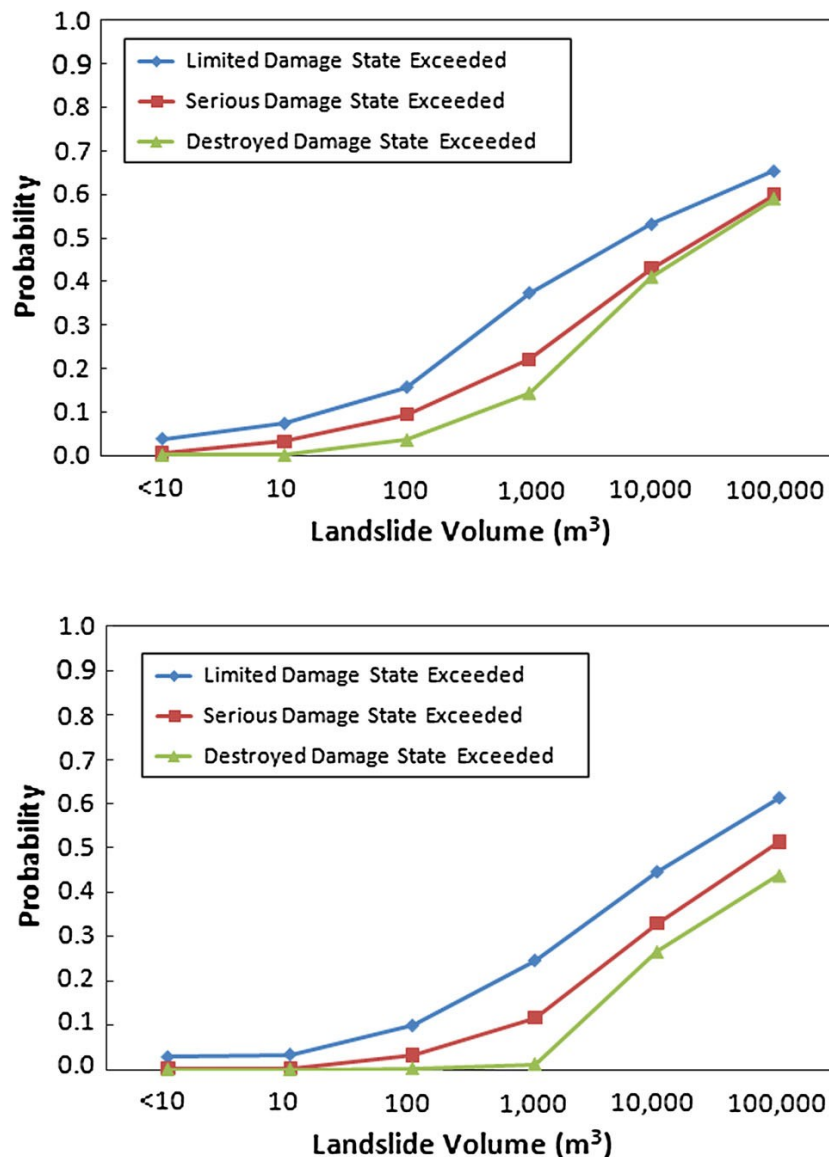


Abb. 13: Gewichtete Fragilitätskurven von Gemeindestraßen (oben) und von Schnellstraßen (unten) für drei Schadenszustände. Abszissenachse: Volumen des Murgangs (m³), Ordinatenachse: Schadenswahrscheinlichkeit. Quelle: WINTER et al. 2014.

Die bekanntesten quantitativ-probabilistischen Ansätze zur Bestimmung der Vulnerabilität gegenüber Rutschungen stammen von UZIELLI et al. (2008) und LI et al. (2010). Beide Methoden beruhen auf einer Integration der Gefahrenintensität und der inhärenten Eigenschaften des Risikoelements in eine Formel. Der Hauptunterschied zwischen den Modellen liegt in der Auswahl der ins Modell einfließenden Faktoren.

Das Rahmenkonzept von UZIELLI et al. (2008) bietet eine Möglichkeit, die für die quantitative Ermittlung der physischen und sozialen Vulnerabilität gegenüber Rutschungen geeignet sein soll. Die Suszeptibilität, welche die inhärente

Widerstandskraft der Risikoelemente gegenüber einer bestimmten Gefahr quantifizieren soll, wird dabei mit der Intensität der Gefahr multipliziert. Somit soll die Vulnerabilität anhand von erfassbaren Indikatoren messbar sein, ohne dass umfassende Informationen über frühere Ereignisse benötigt werden. KAYNIA et al. (2008) setzten dieses Konzept für ein Untersuchungsgebiet vom regionalen Maßstab um. Die Ergebnisse ihrer Studie zeugen von einer guten universellen Anwendbarkeit, vorausgesetzt es stehen ausreichend gebietsspezifische Informationen zur Verfügung. Trotz Verwendung statistischer Daten, mussten auch hier viele Annahmen durch die Experten getroffen werden.

LI et al. (2010) schlugen ein Modell vor, welches auf dem abgeänderten Konzept von UZIELLI basiert. Ihr quantitativer Ansatz unterscheidet sich vom Letzteren ausschließlich durch eine andere Indikatorenzusammenstellung. Es wurden beispielsweise die inhärenten Eigenschaften des Risikoelements (bei UZIELLI et al.: Suszeptibilität) ausschließlich durch ihre strukturelle Widerstandskraft gegenüber der Gefahr beschrieben. Die Intensität wurde in diesem Modell zudem klar definiert und stellt eine Funktion der Geschwindigkeit und der Gründigkeit der Rutschung dar, was jedoch eine genaue Kenntnis dieser Faktoren voraussetzt.

3.4 Vulnerabilitätsmodell nach UZIELLI et al. (2008)

Das Rahmenkonzept von UZIELLI et al. (2008) bewertet die physische Vulnerabilität von Objekten auf quantitativer Weise. Es wurde eine Gleichung aufgestellt, die die Intensität und die inhärenten Objekteigenschaften (hier als *Suszeptibilität* bezeichnet) miteinander in Relation setzt. Demzufolge ist die Vulnerabilität (V) ereignis- und insbesondere intensitätsspezifisch und hängt nicht nur allein von den Eigenschaften des Risikoelements bzw. der Gefahr im Allgemeinen ab. Die Gleichung besteht aus zwei Variablen, nämlich die der Intensität (I) bzw. der Suszeptibilität (S), welche miteinander multipliziert werden:

$$V = I \cdot S \quad (3.2)$$

wobei

V ...Vulnerabilität, $V \in [0; 1]$

I ...Intensität, $I \in [0; 1]$

S ...Suszeptibilität, $S \in [0; 1]$

Das szenariogestützte Modell lässt eine Anwendung für Gefahren jeglicher Intensität zu, da die Vulnerabilität unabhängig von der zeitlichen Auftretenswahrscheinlichkeit von Rutschungen berechnet wird. Es wird daher immer von einem bestimmten Szenario ausgegangen und somit wird immer nur eine Berechnung für ein spezifisches Ereignis durchgeführt. Um die Vulnerabilität eines anderen Gefahrenszenarios modellieren zu können, müssen die Faktoren, welche die Intensität und Suszeptibilität bestimmen, geändert werden. Diese Faktoren werden mathematisch in Nebenrechnungen der Hauptgleichung miteinander verbunden.

UZIELLI et al. nehmen die Definition von HUNGR (1997) als Basis, die die Intensität als eine *„Zusammenstellung an flächendifferenzierten Parametern, die die Zerstörungskraft einer gravitativen Massenbewegung beschreiben“* definiert. Die Parameter sind dimensionslos und basieren auf (statistisch) ermittelten Werten. Die Rutschungsintensität (I) setzt sich aus mehreren Variablen zusammen (siehe Gl. 3.3); die Autoren sprechen daher von einer *composite landslide intensity*. Die Variablen sind vorwiegend Parameter, welche die kinetischen und kinematischen Eigenschaften der Rutschung beschreiben. Die kinetischen Faktoren quantifizieren Rutschungseigenschaften, bei welchen kinetische Energie erzeugt wird.

$$I = k_s \cdot [r_k \cdot I_k + r_m \cdot I_m] \quad (3.3)$$

wobei $I \in [0; 1]$ und

k_s ...räumlicher Wirkungsquotient, $k_s \in [0; 1]$

r_k ...kinetischer Relevanzfaktor, $r_k \in [0; 1]$ und $r_k = 1 - r_m$

r_m ...kinematischer Relevanzfaktor, $r_m \in [0; 1]$ und $r_m = 1 - r_k$

I_k ...kinetischer Intensitätsparameter, $I_k \in [0; 1]$

I_m ...kinematischer Intensitätsparameter, $I_m \in [0; 1]$

Kinetische Energie entsteht bei der Bewegung eines Objekts, wie im konkreten Fall beim Abgleiten einer Rutschmasse. Wichtige Parameter sind dabei die Rutschgeschwindigkeit, die räumlichen Ausmaße (Volumen) und das Material der Rutschmasse. Die Kombination dieser Parameter bestimmt die potentielle Zerstörungskraft einer Rutschung (LEE und JONES 2014).

Die kinematische Komponente beschreibt die Geometrie von Bewegungen. Dementsprechend bezieht sie sich nicht unmittelbar auf die Kräfte, die die Bewegung ausgelöst haben – diese werden bereits der kinetischen Energie zugeordnet. Die kinematischen Faktoren erfassen die bewegungsbedingte Formveränderung eines Körpers. Bei Rutschungen wird diese Größe durch die Gesamtverschiebung, die von der Art und dem Ausmaß der Rutschung abhängig ist, beschrieben.

Der Parameter, die die kinetische Intensität im Modell quantifiziert soll (*kinetic intensity parameter*, I_k), wird aus der Geschwindigkeit der Rutschung (v) abgeleitet (siehe Gl. 3.4). Die Geschwindigkeit lässt sich direkt mittels Messungen oder indirekt anhand statistischer Beziehungen bestimmen. Wenn I_k gleich 0 ist, handelt es sich um eine Rutschung mit weniger als 16 mm/a (bzw. $5 \cdot 10^{-7}$ mm/s) Bewegungsrate. An Rutschungen, die sich mit über $5 \cdot 10^3$ mm/s fortbewegen, wird der maximale Wert von 1 zugewiesen. Zur Berechnung von I_k für Geschwindigkeitsraten zwischen diesen Extrema wird die folgende Formel, welche auf einer Skala der geschwindigkeitsabhängigen Schadensausmaßes von CRUDEN und VARNES (1996) beruht, vorgeschlagen:

$$I_k = 0,1[\log_{10} C + 6,3] \quad (3.4)$$

wobei

I_k ...kinetischer Intensitätsparameter, $I_k \in [0; 1]$

C ...Rutschgeschwindigkeit in mm/s, wenn $5 \cdot 10^{-7} \leq C \leq 5 \cdot 10^3$

Das kinematische Intensitätsparameter (*kinematic intensity parameter*, I_m) wird von der absoluten Verlagerung der Rutschung bestimmt. Sie ist vom Rutschungstyp abhängig und kann entweder analytisch oder empirisch ermittelt werden. Der Wert 0 wird genau dann von I_m angenommen, wenn das Risikoelement nicht auf dem Rutschkörper liegt. Je größer die Distanz der rutschungsbedingten Verlagerung eines Objekts, desto höher die Wahrscheinlichkeit, dass es zu erheblichen Schäden kommt. Man bezeichnet als „*threshold displacement*“ (D_t) den Grenzwert für eine maximale Verlagerung, ab welchem irreversible Schäden auftreten. Das Verhältnis dieser Verlagerungsdistanz zur absoluten oder tatsächlichen Verlagerungsdistanz (*actual displacement* D_a) des Rutschkörpers entscheidet über die anzuwendende Berechnungsformel des kinematischen Intensitätsparameters (siehe Gl. 3.5).

$$I_m = \begin{cases} \frac{2D_a^2}{D_t^2}, & \text{wenn } \frac{D_a}{D_t} < 0,5 \\ 1 - \frac{2(D_t - D_a)^2}{D_t^2}, & \text{wenn } 0,5 \leq \frac{D_a}{D_t} \leq 1 \\ 1, & \text{wenn } \frac{D_a}{D_t} > 1 \end{cases} \quad (3.5)$$

wobei

I_m ...kinematischer Intensitätsparameter, $I_m \in [0; 1]$

D_a ...*actual displacement* in mm

D_t ...*threshold displacement* in mm

Alternativ zu Messwerten vom Feld können statistische Grenzwerte für das Erreichen eines bestimmten (oder maximalen) Schadensausmaßes aus der Theorie für die Bestimmung des kinematischen Parameters herangezogen werden. Je höher auch dieser Wert des Parameters ($[0;1]$), desto größer wird die Gesamtintensität (I).

Die Werte der kinematischen sowie der kinetischen Intensität werden vom Experten mittels dem sog. kinetischen (*kinetic*, r_k) bzw. kinematischen (*kinematic*, r_m) Relevanzfaktor (*relevance factor*) gewichtet und miteinander addiert (siehe Gl. 3.3). In der Regel überwiegt die kinetische Komponente, wenn sich die Rutschung schnell ereignet (hohe Rutschgeschwindigkeit); umgekehrt ist der kinematische Einfluss bei langsam bewegendenden Rutschungen höher (LEE und JONES 2014). Abhängig von der Bedeutung des jeweiligen Intensitätsfaktors wird diesen, dimensionslosen Relevanzfaktoren ein vom Experten geschätzter Wert zwischen 0 und 1 zugewiesen, sodass sie miteinander die Summe von 1 ergeben.

Schließlich wird die Gleichung mit dem räumlichen Wirkungsquotienten (*spatial impact ratio*, k_s) multipliziert, welches das Verhältnis der von der Rutschung betroffenen (exponierten) Fläche (A_i) zur Gesamtfläche (A_t) der Risikoelemente ausdrückt (Gl. 3.6). Damit wird die räumliche Komponente der Gefahrenintensität in die Berechnung miteinbezogen. Vereinfacht heißt das, dass mit steigendem Flächenanteil der Rutschflächen die Intensität der Gefahr und damit verbunden auch die Vulnerabilität erhöht wird.

(3.6)

$$k_s = \frac{A_i}{A_t}$$

wobei

A_i ...exponierte Fläche des Risikoelements

A_t ...Gesamtfläche des Risikoelements

Die Gesamtintensität wird mit der Suszeptibilität multipliziert, um zu einem Vulnerabilitätswert zu gelangen. Die Suszeptibilität (S) – nicht zu verwechseln mit dem englischen Fachbegriff „*susceptibility*“, der auf Deutsch mit dem *Terminus technicus* „Gefährdung“ übersetzt wird³ – wird von UZIELLI et al. folgendermaßen definiert:

³ für die Übersetzung wichtigster Fachbegriffe siehe Anhang I

„Susceptibility refers to a lack of inherent capacity of the elements in the spatial extension under investigation to preserve their physical integrity and functionality in the course of the physical interaction with a generic sliding mass“ – UZIELLI et al. 2008

Demnach ist die Suszeptibilität eine inhärente Eigenschaft, die die physischen und funktionellen Schwächen eines Risikoelements beschreibt. Sie ist zwar unabhängig von der Intensität der Gefahr aber nicht von der Art der Gefahr (z.B. flachgründige Translationsrutschung). Die Suszeptibilität ist in diesem Sinne eine Eigenschaft, die die allgemeinen Schwächen eines Risikoelements gegenüber einer Gefahr misst. Ein Beispiel aus dem Alltag wäre die unterschiedliche Wasserdichtigkeit von Textil- und Lederwaren. Beide Materialarten sind bis zu einer bestimmten Wassermenge wasserabweisend. Die nötige Wassermenge zum Verlust der Wasserdichtigkeit ist jedoch für beide Materialien unterschiedlich; es wird davon ausgegangen, dass Leder bei zunehmender Wassersäule länger wasserabweisend bleibt als herkömmliche Textilien. Obwohl die Wassersäule (ähnlich zur Gefahrenintensität) nicht bekannt ist, kann eine qualitative und legitime Differenzierung (vgl. Suszeptibilität) zwischen den Materialien vorgenommen werden.

Für die Bestimmung der Suszeptibilität werden, gemäß dem vorgeschlagenen Konzept, n_s Suszeptibilitätsfaktoren herangezogen (siehe Gl. 3.7). Diese Faktoren können statistisch oder empirisch ermittelte Kennzahlen (z.B. Bevölkerungsdichte) oder geschätzte Werte sein. Die Faktoren (ε_i) sind dimensionslos und weisen Werte zwischen 0 und 1 auf. Sie drücken das eigenschaftsspezifische Defizit an Widerstandsfähigkeit eines Risikoelements aus. Im Laufe der Berechnung werden die einzelnen Faktoren von 1 abgezogen und anschließend miteinander multipliziert (vgl. Gl. 3.7). Diese Summe wird wiederum von 1 subtrahiert, um zu dem Endergebnis, dem Suszeptibilitätswert zu kommen.

$$S = 1 - \prod_{i=1}^{n_s} (1 - \varepsilon_i)$$

wobei $S \in [0; 1]$ und

n_s ...Anzahl der Suszeptibilitätsfaktoren

ε_i ...Suszeptibilitätsfaktor mit dem Laufindex i aus einer Menge von n_s Faktoren, wobei $\varepsilon_i \in [0; 1]$

Für Bauwerke, wie Straßen, werden von UZIELLI et al. drei Suszeptibilitätsfaktoren verwendet, die von AMATRUDA et al. (2004) empfohlen worden sind (siehe Gl. 3.7). Der erste Faktor betrifft die baulich-strukturellen Eigenschaften des Objekts. Konkret handelt es sich bei diesem Faktor um die mangelnde Widerstandsfähigkeit des Materials gegenüber einer Rutschung. Diese wird von baulichen Merkmalen, wie der Art der Fahrbahnbefestigung bei Verkehrsbauten, bestimmt. Aus diesem Grund wird dieser Faktor als baulicher Faktor bezeichnet.

Der Erhaltungszustand des Verkehrsbauwerks wird vom zweiten Faktor beschrieben. Je nach Interpretation können hierbei unterschiedliche materielle und immaterielle Eigenschaften herangezogen werden. Fahrbahnschäden sind beispielsweise die auffälligsten, materiellen Ausprägungen eines schlechten Erhaltungszustandes. Schäden können dabei nicht nur ein Ausdruck materieller Abnutzung sein, sondern häufig sind sie die Manifestation einer zu niedrigen Durchführungsfrequenz von Straßenerhaltungsaufgaben. So ist beispielsweise eine regelmäßige Kontrolle der Fahrbahn durch einen Streckendienst – und damit verbunden eine Früherkennung und Sanierung von Straßenschäden – für die Ausprägung des Faktors entscheidend.

Die strategische Bedeutung von Straßen kann zusätzlich als dritter Faktor für die Analyse der Suszeptibilität von Verkehrsbauwerken herangezogen werden. Die strategischen Straßen, in der englischen Fachliteratur *lifelines* genannt, sind die wichtigsten Lebensadern für die Bevölkerung bzw. für die Wirtschaft einer Region. Ihre reibungslose Funktionalität ist nicht nur im Alltag von Bedeutung, sondern auch in Katastrophenfällen, da sie ein schnelles Vorankommen der Einsatzkräfte ins Katastrophengebiet ermöglichen.

Meistens handelt es sich bei strategisch wichtigen Straßen um Verkehrswege höheren Ranges. Neben Straßenkategorien, die eine Hierarchie im Straßennetz schaffen, können auch weitere Merkmale berücksichtigt werden. Häufig werden durchschnittlicher täglicher Verkehr, die Zahl der erschlossenen Bevölkerung, die Netzdichte oder die Nähe zu Alternativstrecken für die Prioritisierung verwendet (vgl. CIRIANNI et al. 2012).

Von diesen drei Faktoren werden im Ansatz von UZIELLI et al. zwei zur Ermittlung der Suszeptibilität von Bauwerken (S_{STR}) verwendet: der bauliche sowie der dem Erhaltungszustand betreffende Faktor. Diese zwei Faktoren werden in die Formel der Suszeptibilität (Gl. 3.7) eingesetzt, wodurch sich die folgende Gleichung ergibt:

$$S_{STR} = 1 - (1 - \varepsilon_{STY})(1 - \varepsilon_{SMN}) \quad (3.8)$$

wobei $S_{STR} \in [0; 1]$ und

ε_{STY} = baulicher Suszeptibilitätsfaktor, $\varepsilon_{STY} \in [0; 1]$

ε_{SMN} = Suszeptibilitätsfaktor des Erhaltungszustands, $\varepsilon_{SMN} \in [0; 0,5]$

Die Bestimmung der einzelnen Werte von Faktoren kann zwar auf statistischen oder analytischen Modellen beruhen, dennoch erfolgt die Wertzuweisung subjektiv durch die Einschätzung des Anwenders. Die Autoren der Studie haben beispielsweise für die Bestimmung des baulichen Suszeptibilitätsfaktors von Gebäuden die von HEINIMANN (1999) vorgeschlagenen Werte zwischen 0 und 1 herangezogen. Da die Gesamtsuszeptibilität mehr vom Baumaterial als von dessen Erhaltungszustand abhängt, wurde der Höchstwert für den Suszeptibilitätsfaktor des Erhaltungszustands auf 0,5 reduziert. Mit diesem vom baulichen Suszeptibilitätsfaktor abweichenden Wertintervall wird dafür gesorgt, dass die Suszeptibilität praktisch nie den Wert 0 annimmt.

3.5 Anpassung des Vulnerabilitätsmodells von UZIELLI et al.

Das Vulnerabilitätsmodell von UZIELLI et al. sieht für die Berechnung von Intensität und Suszeptibilität das Heranziehen unterschiedlicher Faktoren vor, die die wichtigsten Eigenschaften der Gefahr bzw. des Risikoelementes beschreiben. Die Werte dieser Faktoren können direkt erhoben oder aus Statistiken abgeleitet werden. Das Modell sei, den Autoren zufolge, flexibel, sodass die Zusammenstellung von Faktoren je nach Fragestellung und nach individueller Beurteilung des Experten frei wählbar ist. Demzufolge können Faktoren geändert und zusätzliche hinzugefügt werden.

In dieser Analyse arbeitet man mit den Grundformeln der Intensität und Suszeptibilität (Gl. 3.3, Gl. 3.7), die von UZIELLI et al. vorgeschlagen wurden, jedoch sind Änderungen bezüglich der Faktoren vorgesehen. Der Hauptgrund dafür ist der Wunsch nach einem an die Fragestellung besser angepassten Modell. Außerdem sind gewisse Änderungen von den Eigenschaften des verfügbaren Datensatzes abhängig. Die im Fokus dieser Arbeit liegenden Risikoelemente, die Straßen, weisen spezielle Merkmale auf, die sich von Merkmalen anderer Objekttypen unterscheiden und bei einer Vulnerabilitätsbewertung nicht außer Acht gelassen werden sollten.

Die Linearität von Straßen stellt einen großen Verhältnisunterschied zwischen Länge und Breite der Risikoelemente dar. Die Breite ist in der Regel um ein Vielfaches kleiner als die Gesamtlänge eines Straßenabschnitts. Verbunden mit einer großen räumlichen Ausdehnung des Straßennetzes bedarf die Gefahren- und Vulnerabilitätsanalyse anderer Methoden als flächenhafte Risikoelemente (z.B. Gebäude), die kleinräumig abgrenzbar vorkommen.

Für die Adaptierung des Rahmenkonzepts von UZIELLI et al. werden objektspezifische Eigenheiten in Betracht genommen. Das inkludiert die Interaktion mit der Gefahr, welche gleichfalls einen besonderen Charakter hat. Um eine wissenschaftliche Herangehensweise zu garantieren, stützt man sich bei Möglichkeit, neben Einschätzungen von Experten, auf Methoden aus vergleichbaren wissenschaftlichen Studien.

3.5.1 Intensität

Die Formel, welche zur Ermittlung der Intensität von UZIELLI et al. vorgeschlagen wurde, verwendet mehrere Parameter, die vom Anwender bestimmt werden müssen (Gl. 3.3). Für die Bestimmung dieser Parameter können Durchschnittswerte mehrerer Messungen, Werte aus einem Rutschungsinventar oder Zahlen aus Statistiken herangezogen werden. Die letztere Vorgehensweise wird dann gewählt, wenn es keine bzw. sowohl quantitativ als auch qualitativ nicht ausreichende Messdaten verfügbar sind.

Kinetischer Intensitätsparameter

Die kinetischen und kinematischen Intensitätsparameter sind grundlegende Faktoren für die Bestimmung der Gesamtvulnerabilität. Im Konzept von UZIELLI et al. werden für ihre Berechnung Modelle, die auf statistischen Erkenntnissen beruhen, vorgeschlagen (Gl. 3.4, 3.5). Diese Modelle setzen jedoch die Kenntnis bestimmter Rutschungseigenschaften voraus.

Für der Bestimmung der kinetischen Intensität (I_k) wurde in der Fallstudie von KAYNIA et al. (2008) die Rutschgeschwindigkeit (C) anhand der lokalen Rutschungseigenschaften geschätzt. Im Untersuchungsgebiet in der Schwäbischen Alb kommen vorwiegend kleinflächige Translationsrutschungen vor, die zum Teil einen fließenden Charakter aufweisen. Die typische Geschwindigkeit der Rutschungen wurde mit 0,1 mm/s angegeben, die nach der Klassifikation von CRUDEN und VARNES (1996) einem mäßig schnellen Massenbewegungsprozess entspricht (siehe Tab. 7). Durch das Einsetzen dieses Werts in die Formel 3.4 berechnete man eine kinetische Intensität von 0,53 für das gesamte Untersuchungsgebiet.

Tab. 7: Klassifikation der Geschwindigkeit von Rutschungen nach CRUDEN und VARNES (1996)

Geschwindigkeitsklasse	Beschreibung	Geschwindigkeit (mm/s)	typische Geschwindigkeit
7	extrem schnell	$\geq 5 \cdot 10^3$	≥ 5000 mm/s
6	sehr schnell	$\geq 5 \cdot 10^1$	≥ 3 m/min
5	schnell	$\geq 5 \cdot 10^{-1}$	$\geq 1,8$ m/h
4	mäßig schnell	$\geq 5 \cdot 10^{-3}$	$\geq 1,8$ cm/h
3	langsam	$\geq 5 \cdot 10^{-5}$	$\geq 1,6$ m/a
2	sehr langsam	$\geq 5 \cdot 10^{-7}$	≥ 16 mm/a
1	extrem langsam	$< 5 \cdot 10^{-7}$	< 16 mm/a

Für die hiesige Fallstudie müssen mangels konkreter Messwerte Annahmen über die typische Geschwindigkeit der im Untersuchungsgebiet vorkommenden flachgründigen Translationsrutschungen getroffen werden. Nach Rücksprache mit Fachexperten kann demnach bei den vorherrschenden Rutschungen von einer ähnlichen mittleren Geschwindigkeit wie in der Studie von KAYNIA et al. (2008) ausgegangen werden.

Man geht daher von Rutschgeschwindigkeiten der Geschwindigkeitsklasse 4 der Klassifikation von CRUDEN und VARNES (1996) aus. Es werden Berechnungen mit den oberen und unteren Grenzwerten dieser Klasse von 0,005 mm/s bzw. 0,5 mm/s sowie mit dem von KAYNIA et al. geschätzten Wert von 0,1 mm/s durchgeführt. Diese drei Szenarien sollen zudem den Einfluss des gewählten kinetischen Parameters auf die Vulnerabilität widerspiegeln.

Kinematischer Intensitätsparameter

Die kinematische Intensität wird mithilfe von Gleichung 3.5 bestimmt. Die Formel rechnet dabei mit theoretischen Werten, die die tatsächliche (bzw. typische) Verlagerungsdistanz von Rutschkörpern und ihre maximale Verlagerungsdistanz, ab welcher Objektschäden auftreten können, angeben. Die Bestimmung dieser Werte

auf regionaler Ebene ist jedoch problematisch. Daher werden oft hypothetische Zahlen verwendet.

Wenn der Wert des kinematischen Intensitätsparameters größer als 0 ist, befindet sich das Risikoelement zu einem gewissen Teil auf dem Rutschkörper. Je nach tatsächlicher Verlagerungsdistanz schwankt dieser Wert zwischen 0 und 1. KAYNIA et al. (2008) verwendeten für ihre Berechnung einen tatsächlichen Verlagerungswert von 500 mm und gaben 2500 mm für die maximale Verlagerung an. Die Autoren wählten diese Zahlen aufgrund der Rutschungscharakteristika aus. Demnach sind sie typische Werte für die im Untersuchungsgebiet vorkommenden Translationsrutschungen, die nur mit einer geringen Verlagerung der Risikoelemente durch die Rutschung rechnen. Im Gegensatz dazu wurde im Anwendungsbeispiel von UZIELLI et al. der kinematische Parameter auf 0 gesetzt. Die Annahme der Autoren war in diesem Fall, dass die Risikoelemente sich nicht direkt am Rutschkörper befinden.

In dieser Studie werden drei Ausprägungsmöglichkeiten des kinematischen Faktors modelliert. Es wird für ein Szenario angenommen, dass die Risikoelemente nicht am Rutschkörper liegen und damit einen kinematischen Parameter von 0 aufweisen. Auch der entgegengesetzte Fall wird modelliert. Wenn alle Risikoelemente durch eine Rutschung auf eine Distanz verlagert werden, können sie einen Totalschaden erleiden. Hier wird der kinematische Parameter mit 1 gleichgesetzt.

Außerdem werden die Werte von KAYNIA et al. eingesetzt, um einen Szenario abseits der Extrema demonstrieren zu können. Hier rechnet man nur mit einer sehr geringen rutschungsbedingten Verlagerung der Risikoelemente. Obwohl diese Werte ausdrücklich für kleinflächige Translationsrutschungen berechnet worden sind, werden sie nur hypothetisch und unter Vorbehalt für das hiesige Fallbeispiel herangezogen.

Relevanzfaktoren

Die Relevanzfaktoren, die die Bedeutung der kinetischen bzw. kinematischen Intensitätskomponente für rutschungsbedingte Schäden zum Ausdruck bringen sollen, müssen anhand des Rutschungstyps vom Anwender bestimmt werden. Die zwei Faktorenwerte sollen, wie bereits im Kap. 3.4 erläutert, so gewählt werden, dass sie zueinander addiert 1 ergeben. Je höher der Wert eines Faktors ist, desto stärker wird der zugehörige Parameter bei der Berechnung der Gesamtintensität ins Gewicht fallen.

Im Fokus dieser Arbeit steht die Vulnerabilität von Straßen gegenüber flachgründigen Translationsrutschungen. Ähnlich wie in der Studie von KAYNIA et al. spielt die kinematische Komponente eine etwas wichtigere Rolle für die Gesamtintensität, bedingt von der Art der Gefahr bzw. des betrachteten Risikoelements. Im Fallbeispiel von KAYNIA et al. wird dem kinematischen Relevanzfaktor der Wert von $r_m=0,6$ zugewiesen, wodurch der kinetische Relevanzfaktor den Wert $r_k=0,4$ annimmt. Diese Werte werden für die hiesige Fragestellung als geeignet beurteilt und finden dementsprechend bei den Berechnungen Anwendung.

Räumlicher Wirkungsquotient

Der räumliche Wirkungsquotient (k_s) ergibt sich aus dem Verhältnis der von der Rutschung betroffenen Fläche zur Gesamtfläche aller Risikoelemente, die in diesem Fall Straßen sind. Die Berechnung stellt ein simpler Rechenschritt in Richtung Gesamtintensität dar, die mittels GIS-Methoden ermittelt werden kann. Im Rahmen dieser Arbeit werden dazu Rasterkalkulationen durchgeführt, mithilfe deren die physische Betroffenheit (fachsprachlich Exposition) der Risikoelemente gegenüber Rutschungen quantifiziert werden kann.

Zu diesem Zweck wird, analog zur Vorgehensweise von KAYNIA et al. in ihrer Fallstudie, eine Gefahrenhinweiskarte des Untersuchungsgebiets herangezogen. Dementsprechend werden nur die zweithöchste und die höchste aller

Gefährdungsklassen berücksichtigt, da nur diese eine hohe räumliche Auftretenswahrscheinlichkeit versprechen. Es wird die Annahme getroffen, dass Flächen, bei denen mit einer hohen räumlichen Auftretenswahrscheinlichkeit für Rutschungen gerechnet wird, als von Rutschungen betroffene Flächen bezeichnet werden dürfen (siehe dazu Kap. 5.1.2).

Für jeden Straßentyp wird getrennt ein räumlicher Wirkungsquotient berechnet. Somit kann für eine adäquate räumliche Differenzierung der Intensität unter den Risikoelementen gesorgt werden. Die durch die Expositionsberechnung ermittelten Werte des räumlichen Wirkungsquotients haben nämlich einen wesentlichen Einfluss auf die Gesamtintensität I .

3.5.2 Suszeptibilität

Im Rahmenkonzept von UZIELLI et al. wird die Suszeptibilität von Bauwerken mithilfe der Gleichung 3.8 berechnet. Es werden dabei zwei Faktoren, die von AMATRUDA et al. (2004) vorgeschlagen worden sind, in die Formel eingesetzt, die die strukturelle Qualität von (Verkehrs-)Bauwerken in Hinsicht auf ihre Widerstandskraft gegenüber Rutschungen beschreiben sollen.

Dank der Flexibilität der Formel 3.7 kann eine beliebige Anzahl an Faktoren für die Bestimmung der Suszeptibilität herangezogen werden. Die Auswahl bzw. Gewichtung der Faktoren hängt dabei von der Einschätzung des Anwenders ab. Da in den Fallbeispielen von UZIELLI et al. (2008) und KAYNIA et al. (2008) ausschließlich Gebäude auf ihre strukturelle Suszeptibilität bzw. physische Vulnerabilität untersucht worden sind, musste eine neue Auswahl von Suszeptibilitätsfaktoren für die Vulnerabilitätsberechnung von Straßen getroffen werden.

Die zwei Faktoren, nämlich der bauliche sowie der dem Erhaltungszustand betreffende Faktor, die UZIELLI et al. (2008) für die Berechnung der Suszeptibilität von Bauwerken vorgeschlagen haben, können auch für die Typisierung von Straßen verwendet werden. Denn vergleichbar zu Gebäuden haben die Materialeigenschaften und der Erhaltungszustand einen großen Einfluss auf die Widerstandsfähigkeit von Straßen gegenüber Rutschungen. Zusätzlich wird ein

objektspezifischer Faktor eingeführt, welcher das Vorhandensein von technischen Schutzsystemen (siehe auch Kap. 3.1.5) anbelangt. Somit wird durch das Einsetzen dieser Faktoren in die Formel 3.7 die folgende, spezifisch für Straßen angepasste Gleichung aufgestellt:

$$S_{STR} = 1 - (1 - \varepsilon_{STY})(1 - \varepsilon_{STS})(1 - \varepsilon_{SMN}) \quad (3.9)$$

wobei $S_{STR} \in [0; 1]$ und

ε_{STY} = baulicher Suszeptibilitätsfaktor, $\varepsilon_{STY} \in [0; 1]$

ε_{STS} = Suszeptibilitätsfaktor des technischen Schutzsystems, $\varepsilon_{STS} \in [0; 1]$

ε_{SMN} = Suszeptibilitätsfaktor des Erhaltungszustands, $\varepsilon_{SMN} \in [0; 0,5]$

Die Bestimmung der einzelnen Werte der drei Faktoren kann auf statistischen oder analytischen Untersuchungen beruhen, oder es werden Werte aus anderen Modellen verwendet. Die Autoren der Studie von UZIELLI et al. (2008) haben beispielsweise für die Bestimmung des baulichen Suszeptibilitätsfaktors von Gebäuden die von HEINIMANN (1999) vorgeschlagenen Werte herangezogen. In der Regel erfolgt die endgültige Wertzuweisung durch die Einschätzung des Anwenders.

Der Wert des Suszeptibilitätsfaktor wird auf einer Skala von 0 bis 1 angegeben. Je höher dieser Wert, desto kleiner ist die Widerstandsfähigkeit des Risikoelements gegenüber Rutschungen, bedingt durch die betrachtete Objekteigenschaft. Ein Suszeptibilitätsfaktor ist somit ein Maß des Defizits eines inhärenten Merkmals.

Baulicher Suszeptibilitätsfaktor

Leichte Rutschungsschäden, die beispielsweise allein zur Verschmutzung der Fahrbahn führen, werden in der Fachliteratur öfters als oberflächliche oder begrenzte Schäden bezeichnet. Wenn schwere Schäden auftreten, spricht man von funktionellen Schäden, da in solchen Fällen strukturell wichtige Bestandteile einer Straße, wie die Straßendecke oder die Tragschichten, partiell beschädigt werden.

Ein Totalschaden tritt dann auf, wenn eine Straßenstrecke durch Rutschungsschäden zur Gänze neu errichtet oder umfassend saniert werden muss, damit sie wieder befahrbar wird (vgl. CARDINALI et al. 2002, GALLI und GUZZETTI 2007, PITILAKIS et al. 2011).

Ob ein Totalschaden auftreten kann, hängt stark von der Bauweise der Straße ab. Auf die gleiche Gefahrenintensität zeigen unterschiedliche Bauweisen eine unterschiedliche Reaktion; eine Rutschung mittlerer Intensität kann beispielsweise eine unbefestigte Straße zur Gänze zerstören, während eine gut befestigte und mit Schutzsystemen ausgestattete Straße bei einer Rutschung vergleichbarer Intensität möglicherweise nur begrenzte oder keine Schäden erleiden muss. Die Bauweise einer Straße ist somit ein grundlegender Faktor für die Stabilität von Straßen. Sie wird implizit durch den Straßentyp bzw. durch die Straßenkategorie ausgedrückt.

Da in der Fachliteratur noch keine universellen Werte für die bauliche Suszeptibilität bzw. Vulnerabilität von Straßen existieren, müssen bezüglich der numerischen Ausprägung der baulichen Suszeptibilität Annahmen getroffen werden. Die baulichen Suszeptibilitätsfaktoren, die in anderen Studien verwendet worden sind, beruhen einerseits auf Schadensklassifikationen in der Fachliteratur (vgl. GALLI und GUZZETTI 2007, PITILAKIS et al. 2011), andererseits spiegeln sie eine gebiets- und objektsspezifische Bewertung des Schadenpotentials wider und sind daher für andere Regionen nicht direkt übertragbar. Dennoch stützt man sich in dieser Fallstudie bei der Bestimmung des baulichen Suszeptibilitätsfaktors neben Expertenschätzungen auch auf die Erkenntnisse aus anderen Publikationen.

In Österreich, ähnlich zu den Ländern Westeuropas, weisen Straßen eine hohe Neubauqualität auf. Sogar unbefestigte Gemeindestraßen sollen so ausgelegt werden, dass für den vorgesehenen Verkehr die Gefahrenwahrscheinlichkeit durch Straßenschäden minimal gehalten werden kann. Aus diesem Grund wird den unbefestigten Straßen im Untersuchungsgebiet anstatt des für diesen Straßentyp häufig verwendeten Maximalwerts von 1,00 der Wert von 0,95 zugewiesen (siehe Tab. 8). Die Praxis zeigt dennoch, dass die unbefestigten Straßen am häufigsten Schäden erleiden, was teils auf die naturgemäß niedrige Widerstandsfähigkeit der Bauweise, teils auf fahrlässige Planung und mangelhafte Straßenerhaltung

zurückzuführen ist. Daher kann wiederum kein niedrigerer Wert als 0,95 für den baulichen Suszeptibilitätsfaktor dieser Straßenkategorie zugewiesen werden.

Befestigte Gemeindestraßen haben im Untersuchungsgebiet eine im internationalen Vergleich sehr hohe Qualität, aber sie unterscheiden sich vom höherrangigen Straßennetz unter anderem durch ein weniger ausgeprägtes Entwässerungs- und Schutzsystem. Die Fahrbahnen von befestigten Gemeindestraßen sind außerdem nicht für das Tragen von schweren Lasten bestimmt und haben aus diesem Grund einen geringmächtigeren vertikalen Aufbau als höherrangige Straßen. Da die Breite von Gemeindestraßen grundsätzlich kleiner als die von höherrangigen Straßen ist, müssen entgegenkommende Fahrzeuge gelegentlich auf die Seitenstreifen ausweichen, um einander vorbeikommen zu können (Bsp. für eine schmale Fahrbahn: siehe Abb. 26). Dadurch entstehen auf längere Zeit Fahrbahnschäden, welche durch das öftere Fehlen von Bord- oder Kantensteinen zusätzlich verstärkt werden können.

Aufgrund dieser Fakten und wissenschaftlichen Quellen zufolge sind befestigte Gemeindestraßen im Untersuchungsgebiet die schadenanfälligen von allen Straßen mit einer Fahrbahndecke. Dieser Meinung sind auch die Experten der NÖ Straßenbauabteilung sowie der Straßenmeisterei Waidhofen an der Ybbs gewesen, die im Rahmen einer Befragung die Gemeindestraßen als die am häufigsten von Rutschungen betroffene und gleichzeitig schadenanfällige Straßenkategorie bezeichneten (siehe Anhang II.). Ein Suszeptibilitätsfaktor mit dem Wert von 0,40 wird deshalb für die Straßenkategorie der befestigten Gemeindestraßen gewählt, denn dieser Wert entspricht in etwa den gängigen Klassifikationen in der Fachliteratur, wo diese als *minor (paved) roads* bezeichnete Straßen eine mittlere Vulnerabilität aufweisen. Der Grund dafür, dass der Wert kleiner als 0,50 ist, liegt darin, dass es sich laut Expertenaussage um Straßen von hoher Bauqualität handelt, die sich nicht so stark in Bezug auf die Bauweise von den höherrangigen Straßenkategorien unterscheiden.

Die Landesstraßen L (informell: Landesstraßen), die im Unterschied zu den vorigen Straßenkategorien ein Untersuchungsgegenstand dieser Arbeit sind, sind im Untersuchungsgebiet baulich unterschiedlich ausgeprägt. Bedingt durch die Geographie bzw. durch raumplanerische Vorschriften kann eine Schwankung der

Straßenbreite innerhalb dieser Straßenkategorie festgestellt werden. Sämtliche Landesstraßen im Untersuchungsgebiet, insbesondere die mit einer vierstelligen Nummer versehen sind, zeigen eine vergleichbare Bauqualität und Bauweise wie befestigte Gemeindestraßen und gehen sogar öfters in diese über (z.B. L6196). Landesstraßen mit einer zweistelligen Nummer (z.B. L93) sind in der Regel technisch etwas umfangreicher als die vierstelligen Landesstraßen oder die befestigten Gemeindestraßen ausgebaut. Ein baulicher Suszeptibilitätsfaktor von 0,30 für Landesstraßen L drückt einerseits die allgemein größeren baulichen Dimensionen als bei Gemeindestraßen aus, berücksichtigt aber andererseits die stellenweise erkennbare Analogie mit Gemeindestraßen (siehe Tab. 8).

Die inoffiziell auch als Bundesstraßen bezeichneten Landesstraßen B sind im Unterschied zu den Landesstraßen L immer stärker als Gemeindestraßen ausgebaut. Diese Verkehrswege, die in der englischsprachigen Fachliteratur auch *major roads* genannt werden, müssen hohe Verkehrslasten tragen, da sie regionale bzw. überregionale Verbindungsachsen sind. Bei der Planung wird dieser Umstand berücksichtigt, sodass der Bau von belastungsfähigeren Straßenkörpern für Bundesstraßen vorgesehen ist. Bei Fahrbahnschäden muss auf diesen Straßen mit großen Verkehrsbehinderungen, die zu einem überörtlichen Problem wachsen können, gerechnet werden. Aus diesem Grund ist eine technisch-planerische Risikominimierung bei Bundesstraßen von höchster Priorität.

Die Bundesstraßen (B31, B121) stellen die hochrangigsten Verkehrswege im Gebiet von Waidhofen an der Ybbs dar. Ihre Maximalbreite übertrifft die von den Landesstraßen. Sie besitzen zudem die größten technischen Straßenanlagen, nämlich zwei Tunnelbauten an der B31. Bedingt durch eine größere Homogenität der Bauweise als bei Landesstraßen wird ein Suszeptibilitätswert von 0,20 dieser Straßenkategorie zugewiesen. Damit soll unterstrichen werden, dass ein Unterschied zu Landesstraßen bzw. zu den höherrangigen Autobahnen und Schnellstraßen besteht.

Letztere Kategorien sind zwar im Untersuchungsgebiet nicht vertreten, deren Suszeptibilitätswert wird hier allerdings als Orientierung angeführt. Autobahnen und Schnellstraßen sind demnach die am technisch aufwändigsten errichteten Straßenanlagen (vgl. SIDLE und OCHIAI 2006), die daher mit einem baulichen

Suszeptibilitätswert von 0,10 versehen werden. Für diese oberste Kategorie in der Straßenhierarchie wird bewusst nicht der Minimalwert von 0 angenommen, weil durch mögliche, willkürlich auftretende Qualitätsschwankungen des Straßenmaterials eine inhärente, bauliche Schwäche nicht gänzlich ausgeschlossen werden kann.

Tab. 8: Werte des baulichen Suszeptibilitätsfaktors (ε_{STY}) nach Straßenkategorien

Straßenkategorie	ε_{STY}
Autobahn und Schnellstraße	0,10
Landesstraße B	0,20
Landesstraße L	0,30
Gemeindestraße, befestigt	0,40
Gemeindestraße, unbefestigt	0,95

Suszeptibilitätsfaktor der technischen Schutzsysteme

Die relative Lage der technischen Schutzsysteme (im Weiteren vereinfacht auch „Mauer“ bezeichnet) zur Straße kann als hang- oder talseitig beschrieben werden. Hangseitige Mauern sichern an erster Stelle die Einschnittböschungen oberhalb der Straßenkrone. Im Weiteren können sie den dahinterliegenden Hang stabilisieren, indem (kleinere) Rutschbewegungen von ihnen mechanisch aufgehalten werden. Talseitige Mauern sichern die Dammböschung unterhalb der Straße. Gelegentlich ist eine Dammböschung nicht vorhanden und der Straßenkörper wird von einem talseitigen Mauerwerk gestützt. Entscheidend für die Planung von Schutzsystemen sind die vermuteten Maße und die Lage der (potentiellen) Rutschung (siehe Abb. 14).

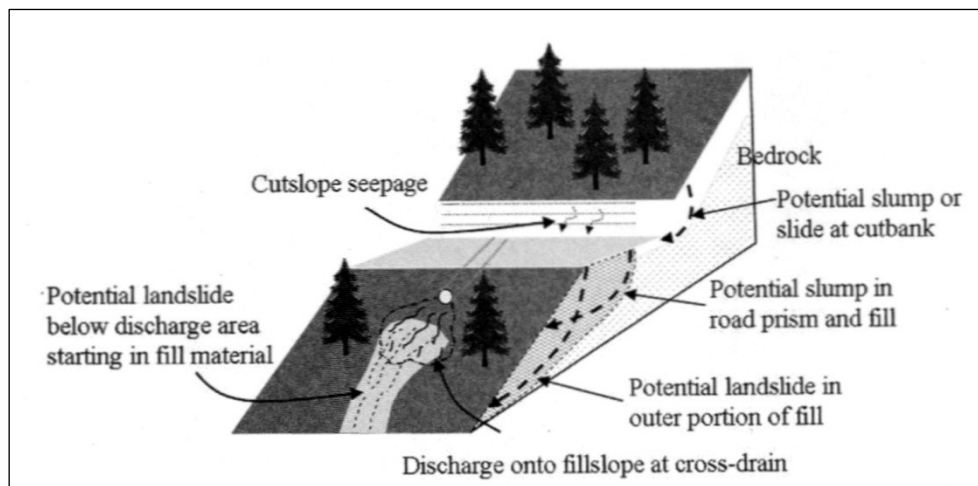


Abb. 14: Mögliche Rutschungsszenarien bei Straßen. Quelle: SIDLE und OCHIAI 2006

In dem adaptierten Modell wird Straßenabschnitten, die mit einem technischen Schutzsystem ausgestattet sind, ein Suszeptibilitätsfaktor betreffend der technischen Schutzsysteme von 0,05 zugewiesen. Der Wert von 0,05 drückt die entlang dieser Straßenabschnitte herrschende, sehr niedrige Wahrscheinlichkeit von rutschungsbedingten Schäden aus.

Theoretisch besteht die Möglichkeit, dass bei der Planung bestimmte Gefahrenszenarien (z.B. unüblich hohe Intensitäten) nicht einkalkuliert werden oder dass unerwartete Materialversagen innerhalb des Schutzsystems auftreten. Schutzsysteme können außerdem ineffektiv wirken, wenn die Rutschung unterhalb des Straßenbauwerkes und des dazugehörigen Schutzsystems ihre Gleitfläche aufweist. Bei diesem Szenario wird die gesamte Straßenanlage von der Massenbewegung mitgerissen (CORNFORTH 2005). Aus diesen Gründen heraus kann der Suszeptibilitätsfaktor sogar beim Vorhandensein eines Schutzsystems den absoluten Minimalwert von 0 nicht annehmen (siehe Tab. 9).

Für den umgekehrten Fall, wenn kein Schutzsystem entlang einer Straße vorhanden ist, nimmt der Suszeptibilitätsfaktor der technischen Schutzsysteme den Wert von 0,99 an. Das heißt, dass das Schadenpotential in diesen Straßenabschnitten nicht zusätzlich mittels technischer Schutzsysteme vermindert wird. Der Wert wurde jedoch nicht auf 1 gesetzt, da auch bauliche Maßnahmen zur Hangsicherung existieren, wie speziell angelegte Erdbauwerke, die nicht zu technischen Schutzsystemen zählen, obwohl sie einen künstlichen Schutz gegenüber

Rutschungen bieten. Ihre Bedeutung ist jedoch für größere Rutschungen niedrig und sie fallen daher bei der Bestimmung des Suszeptibilitätsfaktors nur wenig ins Gewicht.

Tab. 9: Die Ausprägungen des Suszeptibilitätsfaktors der technischen Schutzsysteme (ε_{STS})

Schutzsystem	ε_{STS}
vorhanden	0,05
nicht vorhanden	0,99

Suszeptibilitätsfaktor des Erhaltungszustands

Für die Beschreibung des Erhaltungszustands werden von UZIELLI et al. (2008) fünf qualitative Klassen verwendet, die sich auf den Erhaltungsgrad des Baumaterials beziehen. Die Erhaltungszustände von Bauwerken reichen demnach von sehr schlecht bis sehr gut. Zu jeder deskriptiven Klasse wird ein Wert zur Quantifizierung der Suszeptibilität betreffend den Erhaltungszustand zugewiesen.

Da dieser Faktor von geringerer Bedeutung als die beiden anderen Faktoren für die Gesamtsuszeptibilität (S) ist und auch vom Baumaterial abhängt, wird er dementsprechend gewichtet, indem sein Maximalwert auf 0,50 herutergesetzt wird. In der Klassifikation von UZIELLI et al. (2008) wurde der Maximalwert dieses Suszeptibilitätsfaktors der Klasse des sehr schlechten Erhaltungszustands zugewiesen. Bauwerke, die sich in einem durchschnittlichen Erhaltungszustand befinden, bekamen den Wert von 0,25. Wenn der Erhaltungszustand als sehr gut beurteilt wurde, nahm der Suszeptibilitätsfaktor den Wert von 0,00 an.

Eine Anwendung der geschilderten Klassifikation stellte sich für ein regionales Straßennetz als problematisch heraus. Straßen sind linienhafte Objekte mit einer sehr großen räumlichen Erstreckung, aufgrund dessen der Erhaltungsgrad des Baumaterials innerhalb des Risikoelements schwanken kann. Die lückenlose

Erfassung des unterschiedlichen Erhaltungsgrades aller Straßenabschnitte bedeutet für eine regionale Betrachtung unverhältnismäßig viel Zeit und Aufwand.

Aus diesem Grund wird in der vorliegenden Arbeit für die Beschreibung des Erhaltungszustands anstelle des materiellen Erhaltungsgrades die Bereisungshäufigkeit des Streckendienstes herangezogen. Diese nichttechnische Eigenschaft von Straßen, beschrieben im Kap. 3.2.2, bezieht sich indirekt auf den materiellen Zustand der Straße. Denn je häufiger eine Strecke von einem StreMot befahren wird, desto höher ist die Wahrscheinlichkeit, dass potentielle Gefahren rechtzeitig erkannt und abgewendet werden können. Zu diesen Gefahren zählen auch anfängliche Straßenschäden, die sich durch ein schnelles Eingreifen nicht weiter ausdehnen oder womöglich behoben werden können.

Angepasst an die verfügbaren Daten werden die Werte des Suszeptibilitätsfaktors bestimmt (siehe Tab. 10). Der höchste Wert von 0,50 erhält das Szenario, wenn auf einer Strecke keine Kontrollen erfolgen (z.B. Privatwege). Wenn seltener als einmal in der Woche eine Straße kontrolliert wird, geht man von einem Wert von 0,40 aus. Bei einer Bereisungshäufigkeit von mindestens einmal in der Woche sinkt der Wert des Suszeptibilitätsfaktors auf 0,30. Eine wöchentlich mindestens zweimal erfolgende Streckenbereisung wird mit dem Wert von 0,20 angegeben. Der niedrigste Wert des Suszeptibilitätsfaktors betreffend den Erhaltungszustand ist 0,10. Er wird dann einer Straße zugewiesen, wenn mindestens dreimal wöchentlich eine Streckenkontrolle stattfindet. Der Minimalwert von 0,00 kann nicht erreicht werden, da das Erkennen von Gefahren auch von der subjektiven Einschätzung der StreMot-Besatzung und nicht nur allein von der Bereisungshäufigkeit abhängt. Das heißt, sogar bei einer sehr hohen Kontrolldichte kann die Nichterkennung von bestimmten Prozessen, die negative Folgen für den Erhaltungszustand haben könnten, nicht zur Gänze ausgeschlossen werden.

Tab. 10: Die Ausprägungen des Suszeptibilitätsfaktors betreffend den Erhaltungszustand (ε_{SMN})

Bereisungshäufigkeit	ε_{SMN}
mind. 3-Mal/Woche	0,10
mind. 2-Mal/Woche	0,20
mind. 1-mal/Woche	0,30
< 1-mal/Woche	0,40
keine Kontrolle	0,50

4 Untersuchungsgebiet

4.1 Geographische Lage

Waidhofen an der Ybbs ist eine Statutarstadt und gleichzeitig ein politischer Bezirk im Südwesten Niederösterreichs. Die Stadt zählt zu den Kulturregionen Mostviertel und Eisenwurzen, die das wirtschaftlich-kulturelle Erbe des Gebietes prägen. Das Mostviertel ist bekannt für seine sanfte, hügelige Landschaft, die südlich der Donau anfängt und sich bis zu den Bergen der Nördlichen Kalkalpen erstreckt. Das Klima und die Böden sind optimal für den Obstbau, woher auch der Name der Kulturregion kommt. Die Eisenwurzen ist ein etwas ungenauer abgegrenztes Gebiet, welches sich über die Landesgrenzen hinaus erstreckt und ein historisches Bergbaugebiet umfasst.

Tab. 11: Die Ergebnisse der Registerzählung von der Bevölkerung nach Ortschaften für Waidhofen an der Ybbs. Quelle: Statistik Austria 2013

Ortsteil	Einwohnerzahl (2011)
Konradsheim	665
Kreilhof	326
Rien	646
St. Georgen in der Klaus	523
St. Leonhard am Wald	497
Waidhofen an der Ybbs	3.886
Windhag	1.826
Wirts	529
Zell-Arzberg	1.451
Zell-Markt	1.106

Die Gemeinde Waidhofen an der Ybbs im niederösterreichischen Alpenvorland zählte im Jahr 2013 11 425 Einwohner auf rund 131,31 km² Fläche. Das ergibt eine in Relation zum österreichischen Mittelwert niedrige Bevölkerungsdichte von rund 87

Einwohnern pro Quadratkilometer (AMT DER NIEDERÖSTERREICHISCHEN LANDESREGIERUNG 2015a). Die Bevölkerung konzentriert sich auf die drei zentralen (Waidhofen an der Ybbs, Zell-Arzberg, Zell-Markt) der insgesamt zehn Ortsteile (siehe Tab. 11), die restlichen Siedlungsteile befinden sich fast ausschließlich in der nördlichen Hälfte des Bezirks und erstrecken sich östlich bzw. westlich des Ortskerns.

4.2 Klima und Hydrologie

Das Klima von Waidhofen an der Ybbs wird in der Klimaklassifikation nach KÖPPEN und GEIGER zum humid-kontinentalen Klimatyp Dfb gezählt. Dieser Klimatyp gehört zur Klimazone D der warmgemäßigten Klimate und weist vollfeuchte Verhältnisse (Klimatyp f) auf. Da in keinem der Monate eine Durchschnittstemperatur über 22 °C erreicht wird, aber mindestens vier Monate von über 10 °C Durchschnittstemperatur aufweisen, wird die Typisierung mit der Klimauntertyp b vervollständigt. (PEEL et al. 2007)

Dementsprechend sind die Sommer gemäßigt warm mit einer durchschnittlichen Temperatur von 17,1 °C und der mittlere Jahresniederschlag beträgt 1136,6 l/m², der über die zwölf Monate des Jahres ohne große Schwankbreite verteilt ist. Die feuchteste Jahreszeit ist der Sommer. Im Juli wird zudem die höchste monatliche Niederschlagssumme verzeichnet (siehe Abb. 15). (ZAMG) Es ist außerdem mit einer orographisch bedingten Zunahme der Niederschläge und mit der Abnahme der Temperatur in höheren Lagen zu rechnen. (CANLI 2013)

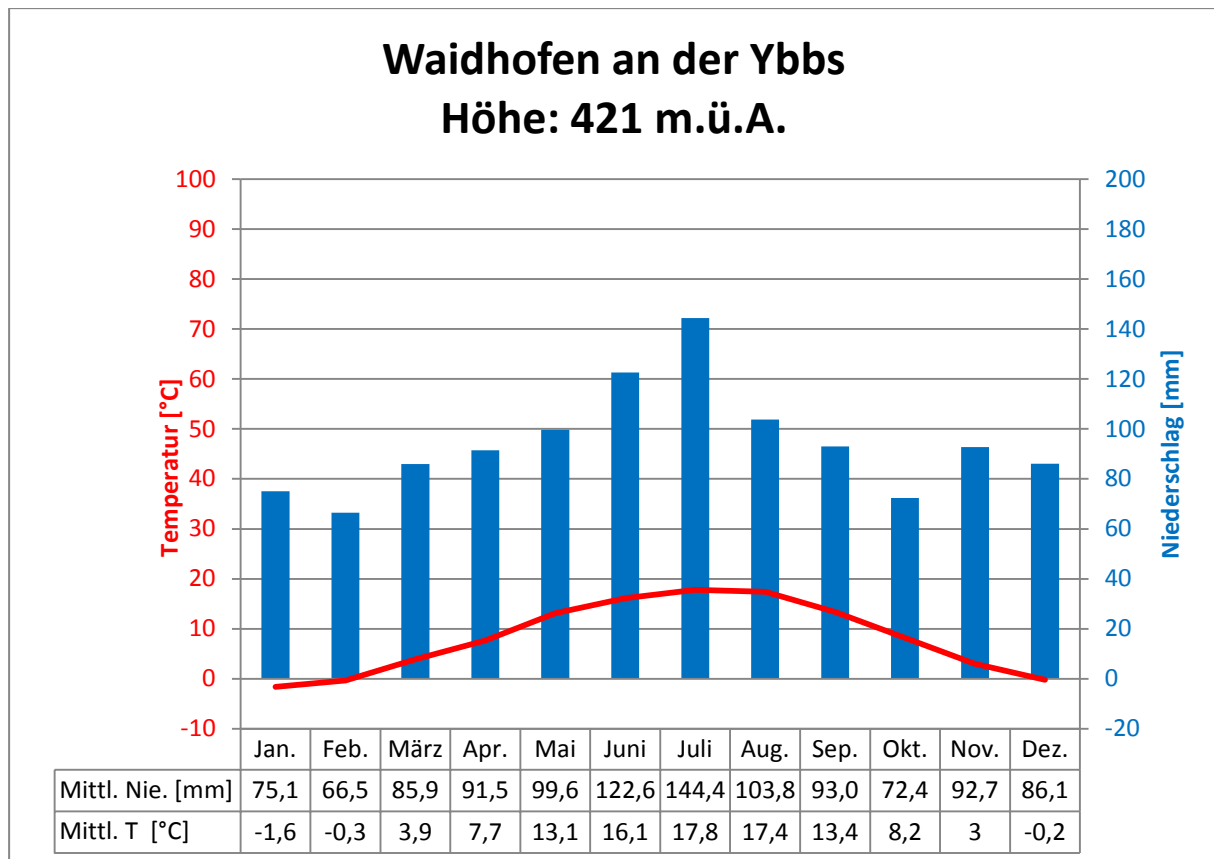


Abb. 15: Klimadiagramm von Waidhofen an der Ybbs. Datengrundlage: ZAMG Klimanormalwerte Österreich 1971-2000

Das wichtigste Gewässer der Gemeinde ist der Ybbs-Fluss, ein rechter Nebenfluss der Donau. Seine Quelle liegt bei Mariazell in den Alpen; er mündet nach ca. 130 km südöstlich von Ybbs an der Donau in die Donau. Der Fluss fließt von Südosten nach Nordwesten in dem von ihm benannten Ybbstal und hat ein Einzugsgebiet von 92 464,2 km² (AMT DER NIEDERÖSTERREICHISCHEN LANDESREGIERUNG 2015b). Der mittlere Abfluss beträgt am Oberlauf bei Lunz 4,5 m³/s, in der Nähe von Waidhofen an der Ybbs bei Opponitz 19,8 m³/s und an der Donaumündung bei Ybbs an der Donau 1.810 m³/s. Das letzte 100-jährige Hochwasser ereignete sich 2013 mit einem gemessenen HQ100-Wert von 11 000 m³/s bei Ybbs (AMT DER NIEDERÖSTERREICHISCHEN LANDESREGIERUNG 2015b, BMLFUW 2015).

Es gibt zudem mehrere Bäche bzw. kleine Flüsse im Untersuchungsgebiet, die innerhalb oder in der Nähe der administrativen Grenzen der Stadt in die Ybbs

münden (siehe Abb. 16 und Abb. 17). Im Folgenden werden diese Fließgewässer von Norden nach Süden nach ihrer Mündungshöhe aufgelistet⁴:

Linke Zuflüsse der Ybbs:

- Nellingbach
- (Seebach, Weißenbach, Luger Bach → Waidhofenbach, Redtenbach →) Schwarzbach
- Eibenbach
- Ofenbach

Rechte Zuflüsse der Ybbs:

- Luegbach
- Urlbach

Weitere Fließgewässer, die außerhalb von Waidhofen/Ybbs in die Ybbs münden:

- Biberbach (Zufluss der Url, die später in die Ybbs [Unterlauf] mündet)
- Flaschelsteinbach → Zauchbach (mündet später in die Ybbs [Unterlauf])

Der Schliefaubach und der in ihn mündende Bremstallbach haben ihren Ursprung am östlichen Rand des Untersuchungsgebiets und gehören nicht zum Einzugsgebiet der Ybbs, sondern sind Zuflüsse der Kleinen Erlauf. Die Kleine Erlauf vereint sich flussabwärts mit der Großen Erlauf unter dem Namen Erlauf, welcher anschließend östlich der Ybbsmündung in die Donau mündet.

Die Bäche werden von zahlreichen Rinnsalen und kleinen Zuflutern gespeist. Sie fungieren häufig als natürliche Drainagen an Hängen und sind in der Regel von Wald oder dichter Vegetation umgeben. Ein wichtiger Grund für die verbliebenen grünen Streifen entlang dieser ist eine erhöhte Rutschungsgefahr an steilen Hängen, welche durch die Vegetation verringert werden kann.

⁴ Mit einem Pfeil wird darauf hingewiesen, dass ein Fließgewässer zuerst sich mit einem anderen vereint, bevor es sich in den unmittelbaren Zufluss des Hauptstromes mündet.



Abb. 16: Die größten Fließgewässer von Waidhofen an der Ybbs. A: Nellingbach, B: Redtenbach, C: Luegbach, D: Urlbach, E: Schwarzbach, F: Ybbs. Quelle: eigene Aufnahmen.

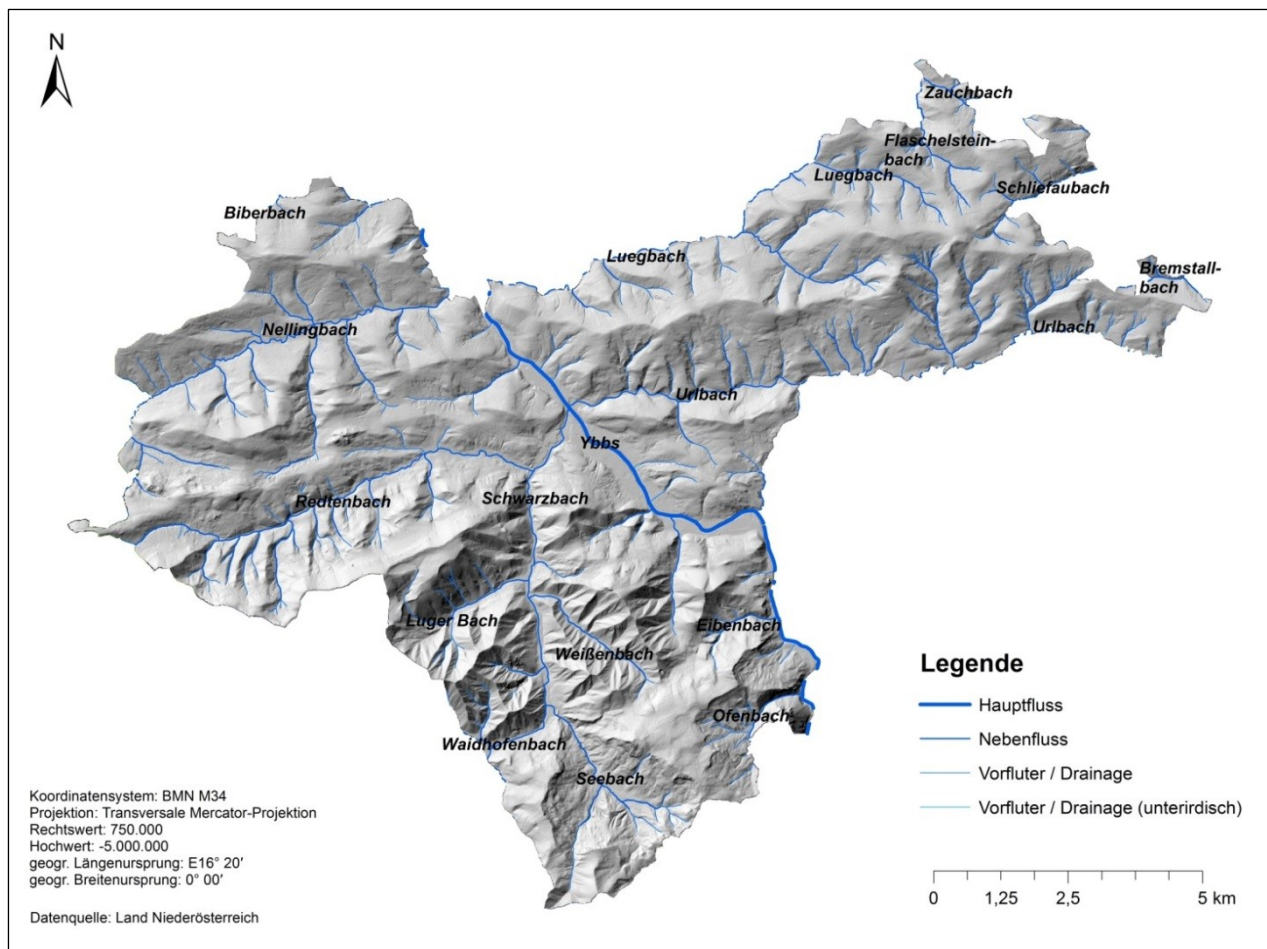


Abb. 17 Das Gewässernetz in Waidhofen an der Ybbs.

4.3 Geologie, Geomorphologie und Böden

Das Untersuchungsgebiet besteht aus sechs tektonischen Einheiten, welche im Prinzip lithografischen Gruppen entsprechen (siehe Abb. 18). Diese können in sogenannte „geologische Formationen“ unterteilt werden, welche die Basis der Lithostratigrafie bilden. Da aber in Waidhofen an der Ybbs über 30 unterschiedliche Formationen vorkommen, werden diese nicht im Detail, sondern zusammengefasst als Teil der tektonischen Einheiten diskutiert.

Die tektonisch älteste Einheit im Untersuchungsgebiet sind die Nördlichen Kalkalpen. Sie machen mit einem Anteil von rund 35 % die zweitgrößte aller Einheiten aus und erstrecken sich in der gesamten südlichen Hälfte des Untersuchungsgebietes bis einschließlich des Buchenbergs im Norden. Die Gesteine der Nördlichen Kalkalpen

sind im Untersuchungsgebiet hauptsächlich seichtmarinen Ursprungs aus dem Obertrias. Die Opponitz-Formation aus dem Oberen Karnium dominiert den südlichsten Teil und besteht aus mit großer Variation abwechselnden Kalkstein-, Mergelstein-, Rauwacke- und Gipsschichten. Die Rauwacken haben eine Bedeutung als wichtige Grundwasserleiter in der Region. Eine weitere wichtige Formation bildet der Hauptdolomit aus dem Norium, dessen dick gebankte Dolomitschichten, bestehend aus Riffsedimenten, charakteristisch sind. Daneben gibt es eine Reihe kleinflächig auftretender Formationen der Nördlichen Kalkalpen aus dem Jura bzw. aus der Kreide, welche verstärkt im nördlichen Teil der tektonischen Einheit vorkommen (JANDA 2000).

Anschließend an die Nördlichen Kalkalpen Richtung Norden befindet sich die Grestener Klippenzone, die gemeinsam mit der rhenodanubischen Flyschzone zur nördlichen Außenzone der Ostalpen gehört und auf ca. 5 % der Fläche des Untersuchungsgebietes vorkommt (OBERHAUSER und BAUER 2013). Die Grestener Klippenzone besteht aus einer tektonisch älteren Formation, die in der geologischen Epoche vom Unter- bis zum Mittel-Jura entstand und vor allem Sandkalke, schiefrige Tonmergel und Kohle führt. Die bei Weitem präseineren Gesteine der Grestener Klippenzone stammen aus dem Albium bis Mittlerem Eozän und bestehen vorwiegend aus Tonmergeln. Sie bilden die Buntmergelserie, die wegen ihrer Rutschungsanfälligkeit bekannt ist (DECKER 1991).

Östlich der Ybbs – im Bereich von Zell-Arzberg – tritt die inneralpine Molasse kleinräumig zutage. Der Flächenanteil beträgt innerhalb des Gemeindegebiets lediglich 0,6 %. Sie ist auf der Klippenzone hängend und wird aus Tonmergel- und Sandsteinschichten des Oberen Eozäns bis Oligozäns aufgebaut.

Die weitaus größte tektonische Einheit bildet die Flyschzone, die ungefähr 50 % des Gesamtgebietes einnimmt. Sie schließt an die Nördlichen Kalkalpen bzw. die Klippenzone an. Tektonisch liegt die Flyschzone höher als die Klippenzone und besteht aus mehreren Formationen. Die tieferen Flyschschichten aus der Kreide werden dabei von höheren Schichten aus der Oberkreide bis Paleozän überlagert.

Die ältesten Flyschsedimente gehören zur Reiselberg-Formation, welche im Zeitraum vom Cenomanium bis zum Turonium gebildet wurde. Sie kommt nur stellenweise vor und besteht aus kalkhaltigem Quarzsandstein, Ton- und

Mergelstein. Stratigrafisch höher liegt die Zementmergelserie (mit der Perneck-Formation) aus dem Santonium bis Campanium. Hier kommen vorwiegend Kalksandsteine und Mergelsteine vor. Die jüngsten Flyschsedimente in Waidhofen an der Ybbs stammen aus dem Maastrichtium bis Paleozän und sind aus kalkhaltigem Quarzsandstein, Ton- und Mergelstein zusammengesetzt. Sie werden zur Altenglach-Formation gezählt und sind im Untersuchungsgebiet am weitesten verbreitet.

Entlang der Ybbs findet man stellenweise fluviale Terrassen. Westlich der Ybbs erstreckt sich eine Riss-Hochterrasse, die Deckschichten von Löss und Lehm aufweist. Besser ausgeprägt sind die Würm-Niederterrassen, die aus Kiesen und Sanden aufgebaut sind. Der Anteil der fluvialen Terrassen am Gesamtgebiet beträgt 0,5 %.

In den fluvialen Tälern, besonders im Flusstal der Ybbs, stößt man auf postglaziale Talfüllungen aus dem Quartär. Diese holozänen Sedimente machen etwa 7,7 % der Gesamtfläche aus und bestehen vorwiegend aus Kies und Aulehm.

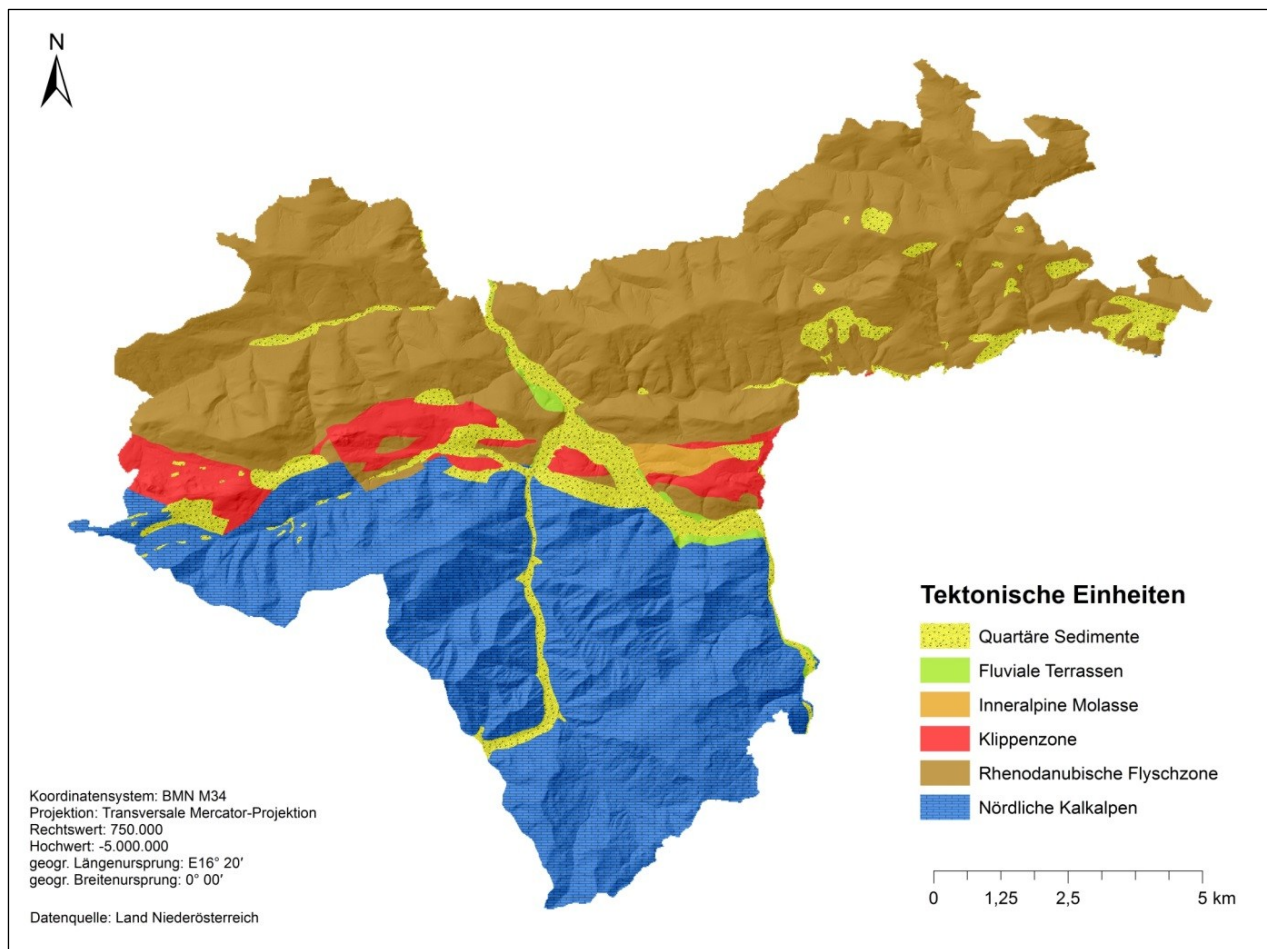


Abb. 18: Tektonische Einheiten in Waidhofen an der Ybbs

Rutschungen treten besonders häufig im Überschiebungsbereich der Nördlichen Kalkalpen und der Klippen- bzw. Flyschzone auf. Die nördliche Seite des Redtenbachtals ist ein von extensiven Hangrutschungen betroffenes Gebiet in Waidhofen an der Ybbs (DECKER 1991). Die vermerkten Rutschungen im Baugrunderkennungskataster (BGK) ereigneten sich hier überwiegend auf dem mergelig-tonigen Untergrund der Klippen- und Flyschzonen (vgl. PROMPER et al. 2014).

Der Flysch ist bekanntermaßen rutschungsgefährdet, da er nicht aus hartem Festgestein, sondern aus einer gering zementierten Abfolge von klastischen Sedimenten besteht. Die Kohäsionsschwäche dieses Gemisches führt zu erhöhter Erosion und zu starken Massenbewegungen. Die Flyschlandschaft des Untersuchungsgebiets wird von steilhängigen Hügeln mit flachen Kuppen mit einer durchschnittlichen Höhe zwischen 600 und 800 m gekennzeichnet.

Die Klippenzone ist geomorphologisch ähnlich dem Flysch aufgebaut, wobei das etwas unruhigere Relief auf eine stärkere tektonische Beanspruchung folgen lässt. An den zahlreichen Deckengrenzen der Klippenzone mit benachbarten tektonischen Einheiten kommt es häufig zu Massenbewegungen.

In der Einheit der Nördlichen Kalkalpen nimmt die Reliefenergie Richtung Süden zu (siehe Abb. 19). Durch die Präsenz karbonathaltiger Gesteine sind die Verwitterungsmechanismen von denjenigen der vorher diskutierten Flysch- und Klippenzonen abweichend. Das wird an den steiler werdenden Hängen und an den schroffen Gipfeln sichtbar, die eine menschliche Nutzung erschweren. Da sich auf diesem von gut konsolidierten Gesteinen aufgebauten Gelände keine mächtigen Böden ausbilden können, nimmt auch die Rutschungshäufigkeit ab (nach CANLI 2013). Dennoch ist die Gefahr von gravitativen Massenbewegungen vorhanden, da die Geomorphologie dieser geologischen Einheit Felsstürze begünstigt.

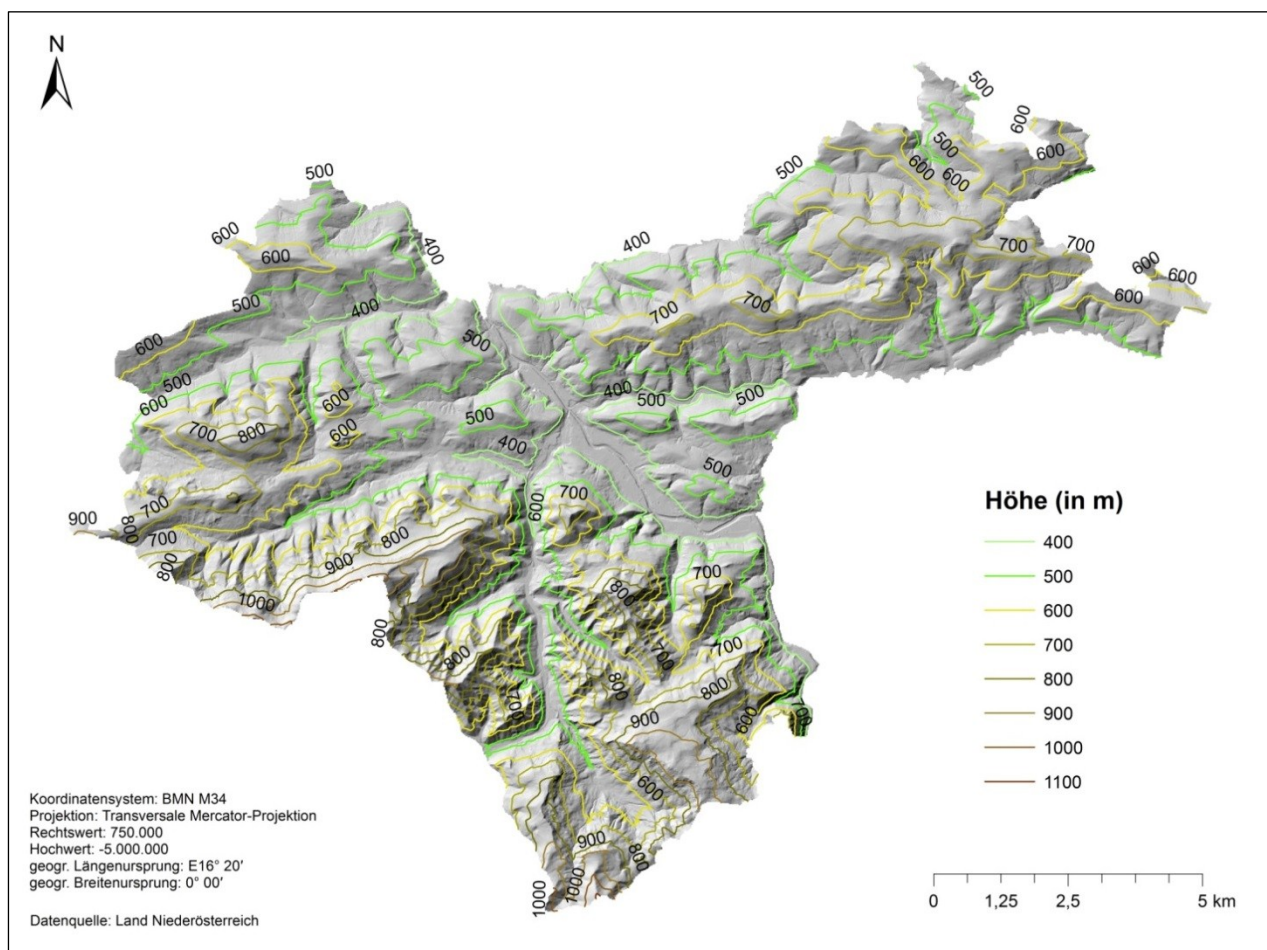


Abb. 19: Höhenlinienkarte von Waidhofen an der Ybbs

Die häufigsten Bodentypen von Waidhofen an der Ybbs sind neben Braunerden die Felsbraunerden, Lockersediment-Braunerden und Braunlehme (BFW 2015), die aus dem kalkig-tonigen (also mergeligen) Ausgangsgestein entstanden sind. Bedingt durch das abwechselnde Auftreten von kalkigen und silikatischen Chemismus des Untergrunds bildeten sich mancherorts Pararendsina-Böden. Infolge der lokalen Abwesenheit von karbonathaltigem Material im Untergrund treten Ranker außerhalb der Einheit der Nördlichen Kalkalpen selten auf. Beeinflusst von hydrologischen, mikroklimatischen und geologischen Faktoren findet man kleinräumig Böden, die laut Systematik der Böden Österreichs (NESTROY et al. 2011) als Hangpseudogley, Hanggley, Typischer Gley, Gley oder Planieboden eingestuft werden können.

Die dominante Bodenart variiert zwischen sandigem Schluff und lehmigem Schluff bzw. schluffigem Lehm (BFW 2015). Nach der empirischen RUSLE⁵-Erosionsberechnung von STRAUSS (2006) liegt der jährliche Bodenabtrag zwischen unterhalb von $0,2 \text{ t} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{a}^{-1}$ im Süden und bis zu $2 \text{ t} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{a}^{-1}$ im Norden des Untersuchungsgebietes. Diese Erosionsverluste sind für die Landwirtschaft unter den derzeitigen klimatischen Bedingungen tolerierbar, jedoch kommen stellenweise höhere Erosionswerte durch gravitative Massenbewegungen vor.

4.4 Landnutzung

Der Anteil der Waldflächen in Waidhofen an der Ybbs beträgt 44,15 % (AMT DER NIEDERÖSTERREICHISCHEN LANDESREGIERUNG 2015a). Die Wälder kommen vorwiegend in den südlichen, kalkalpinen Teil der Gemeinde vor (siehe Abb. 20). In diesem Bereich sind die geomorphologischen Gegebenheiten, wie sehr steile Hänge, für landwirtschaftliche Zwecke nur begrenzt geeignet und es wurde daher die natürliche Vegetation größtenteils behalten bzw. es werden sämtliche Flächen nur forstwirtschaftlich genutzt.

⁵ Revised Universal Soil Loss Equation

Die Äcker und Wiesen stellen den größten Flächenanteil dar. Sie machen miteinander 50,61 % der Gesamtfläche aus und kommen insbesondere in der nördlichen Hälfte des Untersuchungsgebietes vor (siehe Abb. 20), wo die sanfteren Reliefformen eine Bewirtschaftung begünstigen. Der überwiegende Teil der Äcker und Wiesen wird landwirtschaftlich genutzt, nur ein geringer Anteil dient als Gärten sowie als Bau- und Erholungsflächen.

Unter versiegelten und nicht bewachsenen Flächen werden im hiesigen Kontext alle Gebäude, Infrastrukturobjekte und Steinbrüche zusammengefasst. Ihr Flächenanteil im Untersuchungsgebiet beträgt 4,52 %. Beinahe 70 % dieser Flächen sind Straßen und Bahnlinien, was auch die ökologische Bedeutung und die große Dimension des Verkehrsnetzes unterstreicht.

Die restliche Fläche von 0,7 % wird von Wasserkörpern eingenommen, die zu 98 % Fließgewässer sind. An dem wichtigsten Fließgewässer, der Ybbs, befinden sich mehrere Kleinwasserkraftwerke. Das neu errichtete Laufkraftwerk Schütt in Gstadt versorgt mit einer Leistung 1 970 kW rund die Hälfte der Haushalte der Gemeinde mit Strom (EVN 2011).

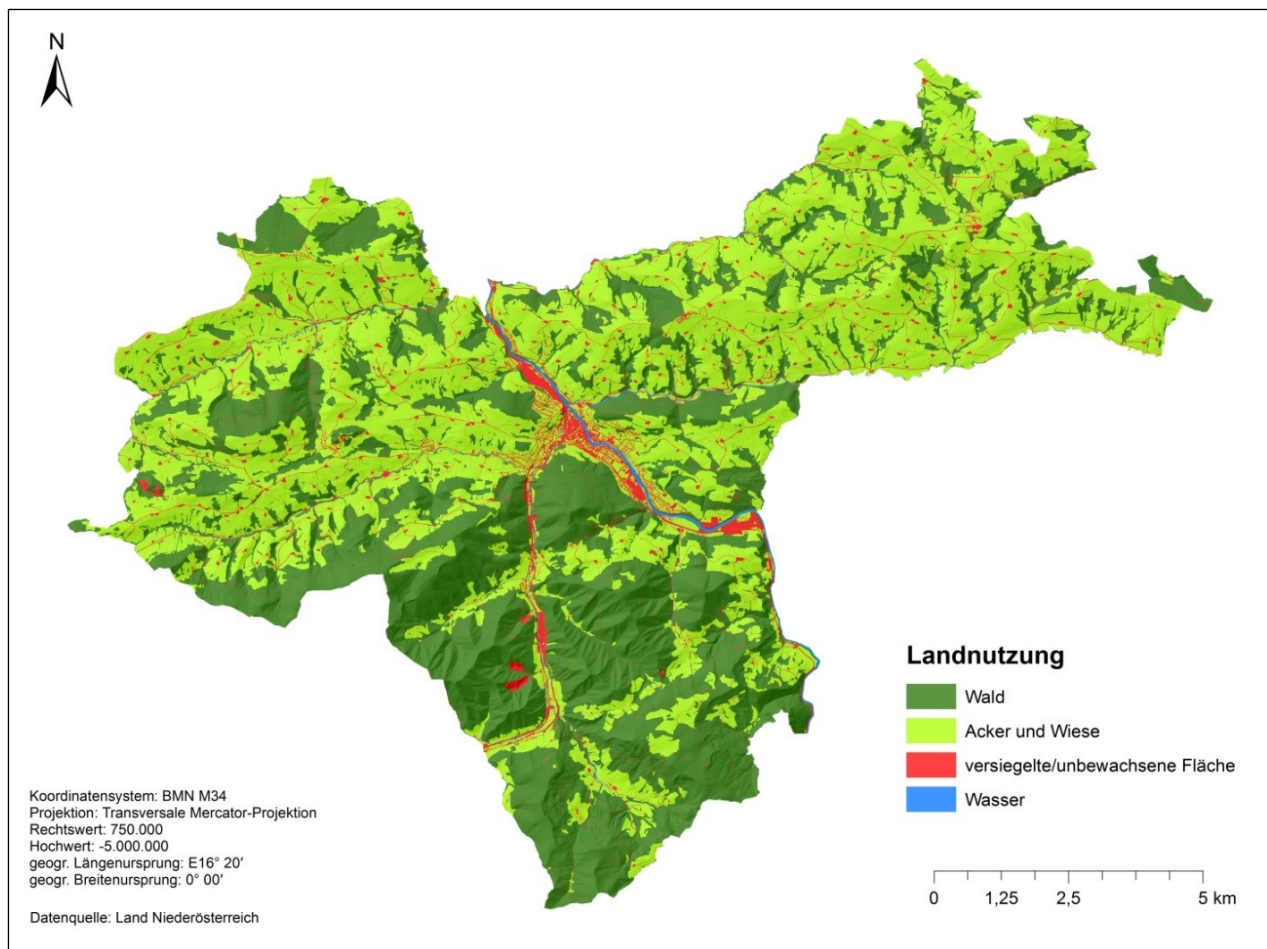


Abb. 20: Landnutzung in Waidhofen an der Ybbs

4.5 Rutschungsgefährdung

Um die Rutschungsgefährdung, also die räumliche Auftretenswahrscheinlichkeit von Rutschungen, in Waidhofen an der Ybbs quantifizieren und visuell darstellen zu können, wurde das Projekt „MoNoe“ („Methodenentwicklung für die Gefährdungsmodellierung von Massenbewegungen in Niederösterreich“, Projektlaufzeit: 12. 05. 2009–31. 03. 2013) ins Leben gerufen. Die beitragenden Wissenschaftler von der Universität Wien, des Austrian Institut of Technology und von JOANNEUM RESEARCH DIGITAL führten eine Gefährdungsanalyse bzw. Gefährdungsmodellierung durch, um Gefahrenhinweiskarten für das Untersuchungsgebiet erstellen zu können.

Die Gefährdungsmodellierung beruhte einerseits auf Informationen aus dem Baugrundkataster (BGK) des Landes Niederösterreich, andererseits wurde eigens für diesen Zweck ein ALS-DGM (ein digitales Geländemodell aus Airbone-Lasercan-Daten) erstellt. Mithilfe generalisierter additiver Modelle (GAM) wurden die ermittelten Daten kombiniert, um die Auftretenswahrscheinlichkeiten von Rutschungen in jeder lithologischen Einheit (siehe Kap. 4.3) zu ermitteln. Für eine möglichst hohe Modellgüte wurden ROC⁶-Kurven erstellt und aus ihnen AUROC⁷-Werte berechnet, sodass die Validierung des Modells erfolgen kann. Außerdem wurde die Leistungsfähigkeit des Modells mittels wiederholter *k*-facher Kreuzvalidierung überprüft (BELL et al. 2013b).

4.5.1 Baugrundkataster

Im Baugrundkataster (BGK) des Landes Niederösterreich wurden für die Periode zwischen 1971 und 2009 insgesamt 167 rutschungsrelevante Ereignisse innerhalb der administrativen Grenzen von Waidhofen an der Ybbs aufgezeichnet (BELL et al. 2013b) (siehe Abb. 21). Im Rahmen des MoNoe-Projektes konnten jedoch 25 dieser Datensätze nicht aufgearbeitet werden, da sie unvollständig und daher nicht eindeutig zuordenbar waren. Nur die übrig gebliebenen 142 Datensätze konnten somit für die Analyse verwendet werden.

Bei der Mehrheit von Rutschungen in Waidhofen an der Ybbs handelt es sich nach diesem Inventar um flachgründige Rutschungen mit beschränkter Ausdehnung (BELL et al. 2013b), da die geschätzte mittlere Tiefe aller Rutschungen nur 2,2 m beträgt und die häufigsten Rutschflächen eine Größe von weniger als 35 x 35 m (oder 1 200 m²) haben und dementsprechend als relativ klein zu bezeichnen sind.

Die überwiegende Zahl der gemeldeten Rutschungen gab es nach intensiven Regenfällen oder bei der Schneeschmelze. Als Auslöser von Rutschungen wurde in zehn Fällen Bautätigkeit angegeben.

⁶ Receiver Operating Characteristic

⁷ auch ROC-AUC-Werte genannt; „area under the curve“

Die Verteilung der aufgezeichneten Rutschungen auf die einzelnen lithologischen Einheiten zeigt, dass die höchste Rutschungsdichte in der Klippenzone auftritt. Die meisten Rutschungen im Inventar wurden in der Flyschzone kartiert, die wenigsten in den Nördlichen Kalkalpen bzw. in der Einheit der quartären Sedimente. BELL et al. (2013b) weisen aber darauf hin, dass *„41 % der Rutschungen nicht nur aus der anstehenden Geologie, sondern auch aus Anschüttungen besteht oder nur aus angeschüttetem Material aufgebaut ist.“* Das heißt, die natürlichen Untergrundverhältnisse können zwar ein Vorkonditionierungsfaktor sein, aber anthropogene Einflüsse, wie schlecht ausgeführte Bauarbeiten, spielen in vielen Fällen eine bedeutendere Rolle.

Auf Wiesen und Äckern ereigneten sich 72 % aller Rutschungen. Erwartungsgemäß wurden nur wenige Rutschungen in den Wäldern dokumentiert, wobei Rutschungen in diesen Gebieten häufig nicht erkannt werden oder ungemeldet bleiben. Über 20 % der Rutschungen betrafen Bauland, wobei das Ursprungsgebiet der Rutschungen häufig im Bereich von Wiesen und Äckern lag. Über ein Drittel (41 %) aller dokumentierten Rutschungen wurden an früheren Rutschflächen ausgelöst (BELL et al. 2013b).

Am häufigsten wurden die Infrastruktur und die Bauwerke, u. a. das Verkehrsnetz, beschädigt. Eine besonders hohe Dichte an rutschungsbedingten Schäden von Infrastruktur und Bauwerken wurde in den Tälern des Nelling- und Redtenbachs verortet. Der hohe Anteil der Schäden von 76 % an Infrastruktur und Bauwerken bedeutet aber nicht zwingend, dass die Rutschungen im unmittelbaren Bereich von Bauobjekten ausgelöst worden sind, sondern nur, dass sie von einer Rutschung, möglicherweise ausgelöst in einer anderen Nutzungsklasse, getroffen worden sind.

Wiesen und Äcker sind, wie bereits erläutert, die häufigsten Ursprungsgebiete von Rutschungen. Die hier ausgelösten Massenbewegungen werden aber häufig nur dann gemeldet, wenn sie Bauwerke oder Bauland beschädigen. Sie bleiben oft ungemeldet, wenn ausschließlich landwirtschaftliche Flächen betroffen sind. Schäden an landwirtschaftlichen Flächen kommen auffällig selten (24 %) im Inventar vor, obwohl sie die rutschungsanfälligste Nutzungsklasse darstellen. Laut Experten muss daher der Anteil der Schäden an landwirtschaftlichen Flächen als weitaus

höher und derjenige an Infrastruktur als niedriger angenommen werden (BELL et al. 2013b).

Ein großes Problem bei den BGK-Datensätzen stellt die hohe Unsicherheit bezüglich der Lagegenauigkeit der dokumentierten Rutschungen dar. Da nur bei 24 % aller aufgezeichneten Rutschungsereignisse eine genau Angabe zur Lage der Rutschfläche vorhanden ist, können die Datensätze des Baugrundkatasters für eine statistische Analyse der Rutschungsgefährdung nicht verwendet werden, sondern dienen lediglich als wichtige Informationsquellen über die ungefähren Eigenschaften von Massenbewegungen im Untersuchungsgebiet.

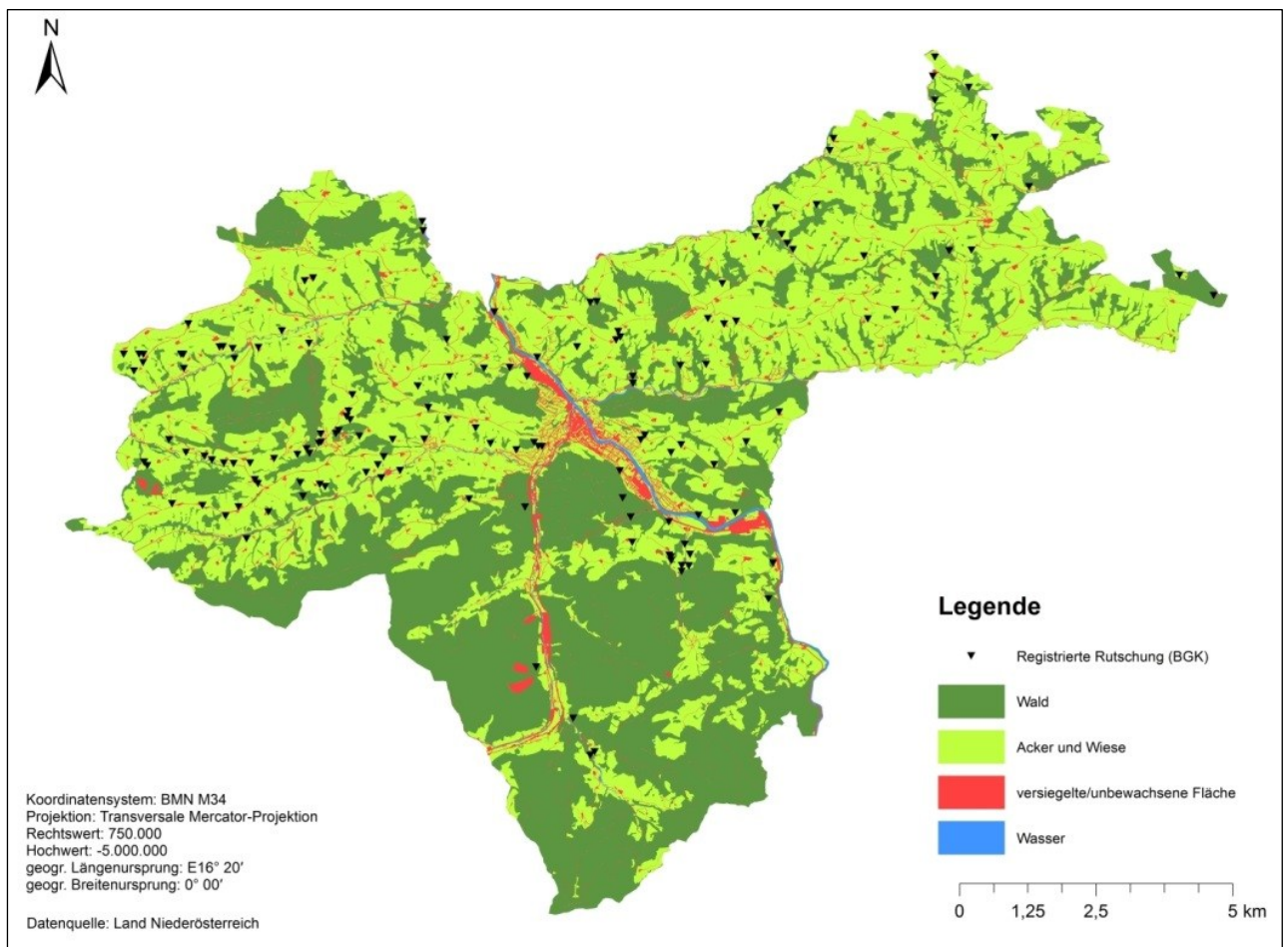


Abb. 21: Registrierte Rutschungen im Baugrundkataster des Landes Niederösterreich für Waidhofen an der Ybbs

4.5.2 Statistische Gefährdungsanalyse

Wegen der beschränkten Verwendbarkeit des Baugrundkatasters (BGK) für die Erstellung eines Gefährdungsmodells wurde im Rahmen des MoNoe-Projekts eine statistische Analyse mittels eigenkartierten Anrisspunkten durchgeführt. Man entschied sich für einen statistischen Ansatz, da dieser ein hohes Maß an Objektivität garantierte.

Dafür mussten an erster Stelle alle sichtbaren Anrisspunkte mithilfe des ALS-DGM und dessen Derivaten kartiert werden. Im Untersuchungsgebiet konnten 1 061 Rutschungen auf diese Weise verortet werden, was ein Mehrfaches der Anzahl der im BGK registrierten Rutschungen war. Im Rahmen von stichprobeartigen Geländebegehungen wurden die im Geoinformationssystem (GIS) kartierten Rutschungen auf ihre Lage und Existenz überprüft.

Anschließend wurden rutschungssteuernde Faktoren für das Gesamtgebiet erfasst. Diese Faktoren, welche im Modell unabhängige Variablen sind, beschreiben Umweltparameter, die bei der Initiierung von Rutschungen eine Rolle spielen können. Dabei wird stets die Annahme getroffen, dass zukünftige Rutschungsereignisse unter ähnlichen Bedingungen wie in der Vergangenheit ablaufen werden (BELL et al. 2013a).

Die unabhängigen Variablen umfassten eine Reihe an unterschiedlichen Umweltparametern wie die Geologie, die Exposition oder die Hangneigung. Im Laufe der Gefährdungsmodellierung wurde eine statistische Beziehung zwischen ihnen und den kartierten Rutschungen errechnet. Da der Beitrag der einzelnen Umweltparameter zum Auslösen von Rutschungen unterschiedlich groß ist, wurde eine Validierung der Ergebnisse mithilfe des AUROC-Werts durchgeführt.

Der zur Gefährdungsmodellierung gewählte Ansatz der generalisierten additiven Modelle (GAM) untersucht die Parameterkombination für jede einzelne lithologische Einheit. Wegen der großen, insbesondere geologischen Heterogenität des Untersuchungsgebiets musste eine statistische Methode gewählt werden, die eine hohe Flexibilität aufweist. Die GAM-Methode berücksichtigt gleichzeitig die speziellen

Charakteristika einzelner geologischer Einheiten, während die Vergleichbarkeit der Gefährdungsklassifikation unter diesen Einheiten bestehen bleibt.

Demgemäß wurde das Untersuchungsgebiet für die Gefährdungsanalyse in lithologische Einheiten aufgeteilt und es wurde für jede dieser Einheiten ein Gefährdungsmodell erstellt. Somit konnten für jede Einheit unterschiedliche Parameterkombinationen für die Rutschungsinittierung bestimmt werden, um die natürlichen Bedingungen im Modell besser wiederzugeben.

Die einzelnen Gefährdungsmodelle mussten jedoch am Ende der Analyse wieder zusammengeführt werden, um ein einheitliches Rutschungsgefährdungsmodell für das gesamte Gebiet zu erhalten. Hierfür wurde die relative Rutschungsdichte jeder lithologischen Einheit zu den anderen lithologischen Einheiten berechnet und die Wahrscheinlichkeitswerte wurden anhand dessen angepasst.

Aus den Ergebnissen der Gefährdungsmodellierung wurde eine Gefahrenhinweiskarte erstellt. Dazu mussten die Gefährdungswerte klassifiziert werden. Die Klassengrenzen der drei Gefährdungsklassen (gering, mittel, hoch) wurden in Abhängigkeit vom Rutschungsanteil in den einzelnen Klassen vom Experten gewählt, um eine leicht nachvollziehbare Einteilung zu schaffen. 5 % der kartierten Rutschungen entfielen in die Klasse mit geringer Gefährdung, 25 % in diejenige mit mittlerer Gefährdung und 70 % der kartierten Rutschungsanrisse fielen in die höchste Gefährdungsklasse. Die finale Gefahrenhinweiskarte, die auch in dieser Arbeit Anwendung findet, wird in Abb. 22 dargestellt.

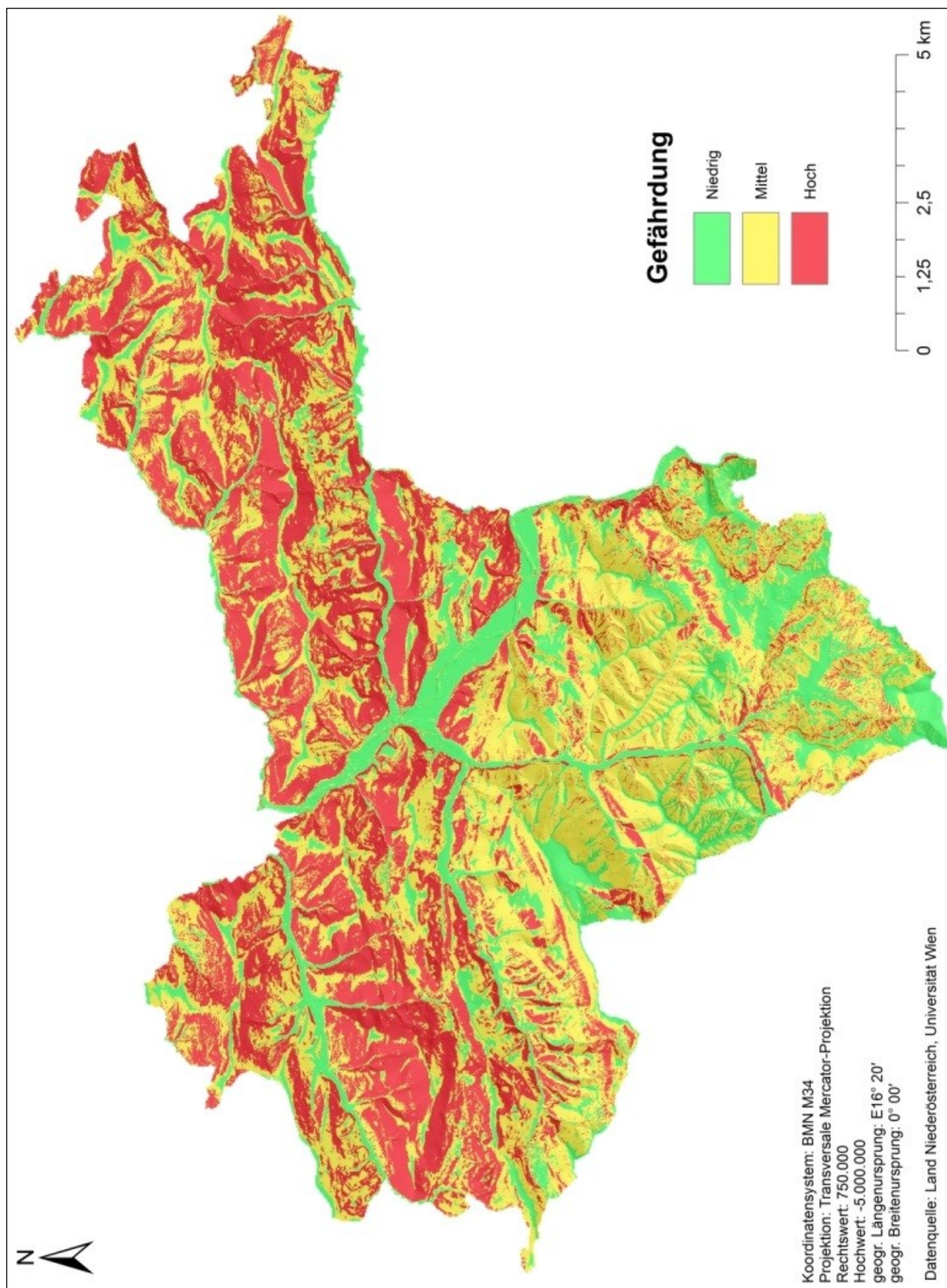


Abb. 22: Im Rahmen des MoNoe-Projekts erstellte Gefahrenhinweiskarte für Rutschungen (Waidhofen an der Ybbs)

4.6 Straßennetz

Das Straßennetz von Waidhofen an der Ybbs ist annähernd 720 km lang. Die hochrangigsten Straßen innerhalb der Gemeindegrenzen sind die Landesstraßen B (auch „Bundesstraße“ genannt), also die B 121 und die B 31 (siehe Abb. 23 und Abb. 24). Die B 121 (auch Weyrer-Straße genannt) verläuft in nordsüdlicher Richtung auf einer 10 km langen Strecke durch das Gemeindegebiet. Sie verbindet die Stadt nach Norden mit der Bezirksstadt Amstetten und darüber hinaus mit der Westautobahn, nach Süden ist die Straße eine wichtige Verbindung ins benachbarte Oberösterreich, wo die Straße in Weyer ihr südliches Ende hat.

Die B 31 (oder Ybbstal-Straße) hat ihren Ausgangspunkt in der Nähe des Zentrums von Waidhofen an der Ybbs und verläuft innerhalb der Gemeindegrenzen auf 9 km Länge in nordwest-südöstlicher Richtung. Die Straße verlässt das Untersuchungsgebiet südlich der Mündung des Ofenbaches und führt weiter bis nach Göstling an der Ybbs. Zwei Tunnel in der Nähe des Zentrums sind als Teil der B 31 errichtet worden, um den Durchgangsverkehr im Stadtgebiet zu reduzieren. Der 250 m lange Schillerparktunnel wurde 1996 fertiggestellt, der 1 500 m lange Citytunnel folgte im Jahr 2011. Beim Bau des letzteren Tunnels mussten geotechnische Schwierigkeiten, bedingt durch Hangkriechen, überwunden werden. Der Citytunnel wurde nämlich durch den Buchenberg gebohrt, der zur vorher diskutierten (siehe Kap. 4.3) rutschungsanfälligen Grestener Klippenzone gehört (BRUNNER et al. 2011).

Weitere wichtige Verkehrswege innerhalb der Gemeinde bilden die Landesstraßen L, die sich im Unterschied zu den Landesstraßen B vornehmlich in Ost-West-Richtung erstrecken (siehe Abb. 23 und Abb. 24). Die längste und verkehrstärkste von ihnen ist die L 93, die westlich der Ybbs im Redtenbachtal und östlich der Ybbs entlang des Urlbachs verläuft, wo sie später in nordöstliche Richtung abzweigt und nach St. Leonhard am Walde führt.

Am westlichen Ybbsufer findet man die L 88 und die L 6195 im Nellingbachtal sowie kürzere Landesstraßen, die die Einbindung kleinerer Ortsteile ins höherrangige Straßennetz gewährleisten. Östlich der Ybbs kreuzt die L 92 das Gemeindegebiet bei St. Leonhard. Die L 6190 führt ab der Kreuzung mit der L 93 weiter dem Urlbachtal

entlang. Am nördlichen Rand von Waidhofen an der Ybbs verläuft die L 6192 entlang des Luegbachs. Die gesamte Länge aller Landesstraßen beträgt knapp 50 km.

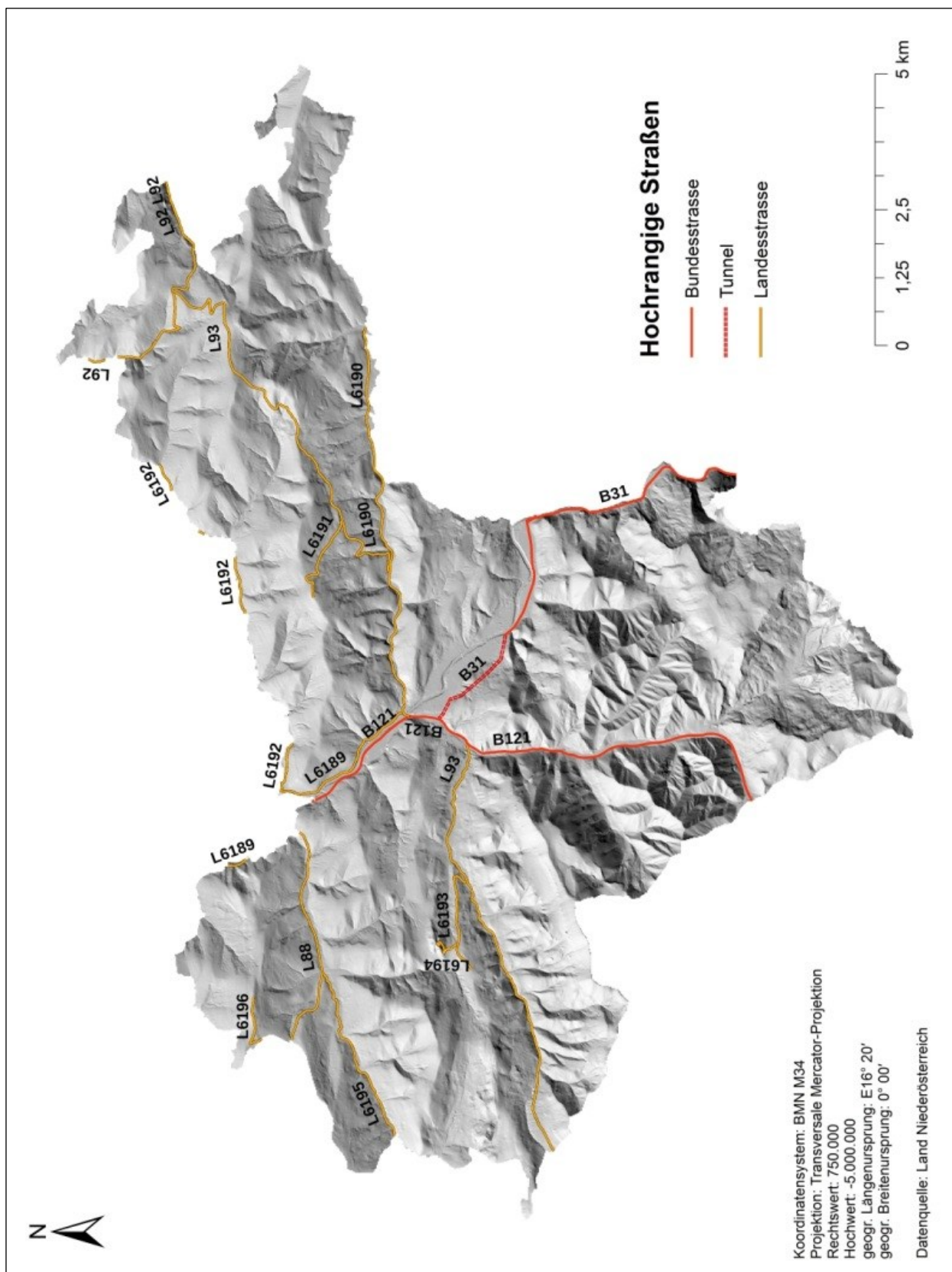


Abb. 23: Lage der Bundes- und Landesstraßen in Waidhofen an der Ybbs samt Straßennummerierung



Abb. 24: Landesstraße B (Bundesstraßen) (Bild A) und Landesstraße L (Landesstraßen) (Bild B) in Waidhofen an der Ybbs. Quelle: eigene Aufnahmen.

Das weitaus längste Straßennetz bilden befestigte Gemeindestraßen (siehe Abb. 25 und Abb. 26) mit einer Gesamtlänge von rund 350 km. Sie sind im Unterschied zu den Bundes- und Landesstraßen weniger breit und verfügen häufig nicht über getrennte Fahrstreifen. Sie verbinden in der Regel kleinere Siedlungen und Einfamilienhäuser mit dem höherrangigen Verkehrsnetz. Hofzufahrten und Privatstraßen bilden im Untersuchungsgebiet einen hohen Anteil der befestigten Gemeindestraßen.

Die Straßenkategorie der unbefestigten Straßen kommt in Waidhofen an der Ybbs am zweithäufigsten vor. Obwohl sie insgesamt 300 km lang ist, überschreiten ihre einzelnen Gesamtlängen nur selten 1 000 m (siehe Abb. 25 und Abb. 26). Die unbefestigten Straßen werden vorwiegend für land- und forstwirtschaftliche Zwecke genutzt und daher offiziell auch als Traktor- oder Karrenwege bezeichnet. Sie sind zum überwiegenden Teil Privatstraßen, sind in der Regel sehr schmal und bilden häufig Sackgassen.

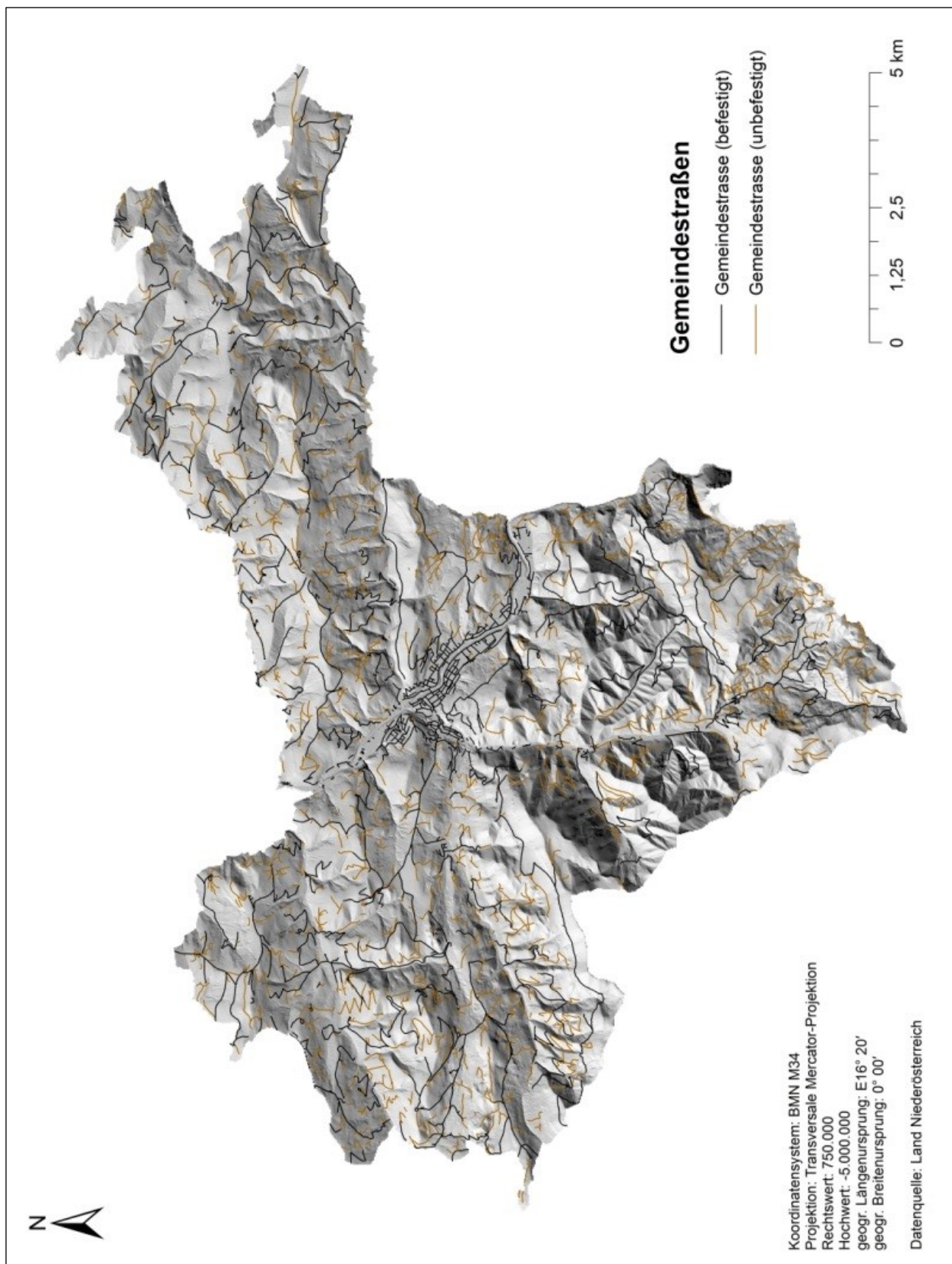


Abb. 25: Lage der befestigten und unbefestigten Gemeindestrassen in Waidhofen an der Ybbs

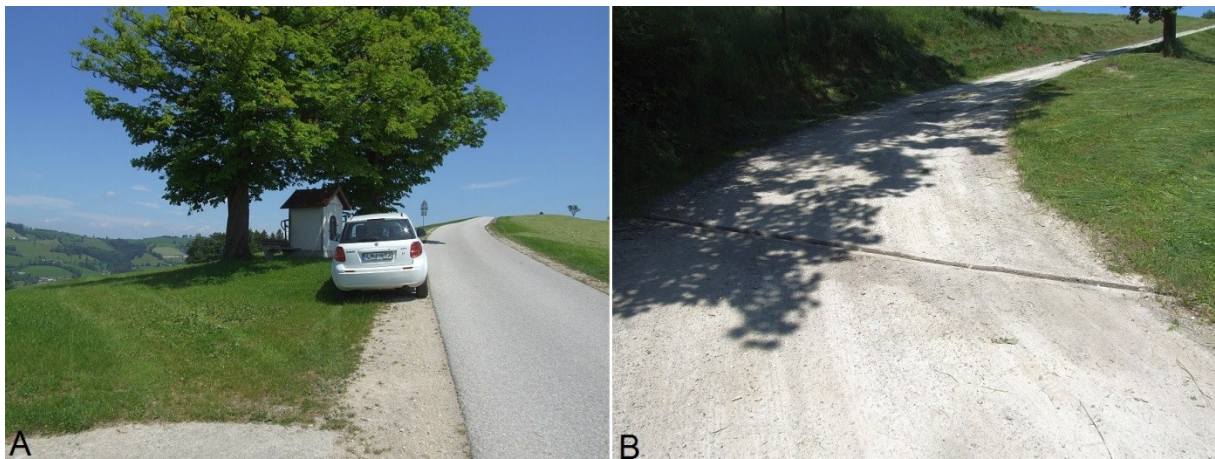


Abb. 26: Befestigte (Bild A) und unbefestigte Gemeindestraße (Bild B) in Waidhofen an der Ybbs. Quelle: eigene Aufnahmen.

Technische Schutzsysteme, auch als „Verbauungen“ bezeichnet, sollen Verkehrsbauwerke vor Unterspülung, Hangbewegungen und anderen gravitativen Massenbewegungen schützen (siehe dazu Kap. 3.1.5). Allein entlang des etwa 70 km langen, hochrangigen Straßennetzes von Waidhofen an der Ybbs kommen technische Schutzsysteme auf einer Gesamtlänge von 13,415 km vor. Die Art und die Dimension der Verbauungen hängen immer von den lokalen hydrologischen Verhältnissen und den Untergrundverhältnissen ab. Besonders viele technische Schutzsysteme kommen entlang von Fließgewässern und in tektonisch unruhigen Gebieten vor.

Insgesamt wurden entlang der Landesstraßen B und L 254 Einzelkonstruktionen aufgezeichnet, die von der Art der Konstruktion her vorwiegend Stütz- und Ufermauern sind (siehe Abb. 27). Jeweils etwa 15 % aller Konstruktionen machen Steinwürfe (Steinschüttungen) und Wandmauern aus. Der Großteil der Schutzsysteme (65 %) wurde aus Naturstein hergestellt. Stahlbeton ist das zweithäufigste Material (30 %), das vor allem beim Bau von Stützmauern Anwendung fand. Die restlichen 5 % der Konstruktionen wurden aus Holzbohlen, Schalsteinen oder Ortbeton errichtet (NÖ STRASSENBAUABTEILUNG 6 2015).

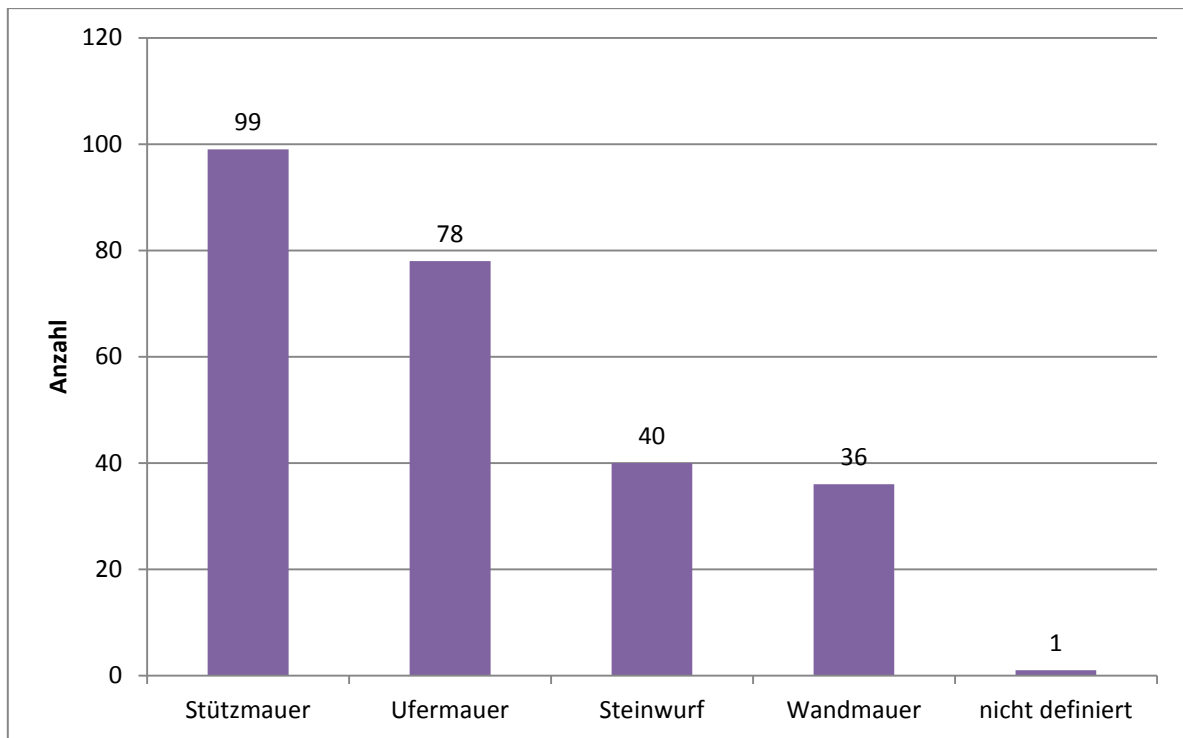


Abb. 27: Schutzsysteme nach Art der Konstruktion entlang des hochrangigen Straßennetzes in Waidhofen an der Ybbs. Quelle: NÖ STRASSENBAUABTEILUNG 6 2015.

5 Ergebnisse

5.1 Intensitätskomponente der Vulnerabilität

5.1.1 Kinetische und kinematische Intensität

Kinetische Intensität

Es wurden für drei mögliche Szenarien kinetische Intensitäten (I_{k1} , I_{k2} , I_{k3}) berechnet. Das erste Szenario rechnet mit dem unteren Grenzwert der mäßig schnellen Geschwindigkeitsklasse von CRUDEN und VARNES (1996) und sieht eine mittlere Rutschgeschwindigkeit von $C_I=0,005$ mm/s vor (vgl. Tab. 7). Dieses entspricht umgerechnet einer Bewegungsrate von etwa 1,8 cm/h. Setzt man diesen Wert in die Gleichung 3.4 ein, erhält man 0,39 als Ergebnis für den kinetischen Intensitätsparameter I_{k1} :

$$I_{k_1} = 0,1[\log_{10}0,005 + 6,3] \quad (5.1)$$

$$I_{k_1} = 0,39$$

KAYNIA et al. (2008) rechneten mit einer durchschnittlichen Geschwindigkeit von 0,1 mm/s für Translationsrutschungen, welche in ihrem Untersuchungsgebiet vorkamen. Dieser Wert wurde von den Autoren unter Berücksichtigung der lokalen Gegebenheiten bzw. der Charakteristika früherer Rutschungsereignisse geschätzt. Obwohl der abweichende geologische Aufbau und der etwas niedrigere Jahresniederschlag einen direkten Vergleich mit den Rutschungen in Waidhofen an der Ybbs nicht möglich macht, können die Prozesse dennoch ähnlich bewertet werden. Eine durchschnittliche Rutschgeschwindigkeit von 0,1 mm/s soll außerdem nach bisherigen Erkenntnissen theoretisch nicht untypisch für das Untersuchungsgebiet sein. Aus dieser Überlegung heraus wurde die Berechnung der

kinetischen Intensität auch mit dem Geschwindigkeitswert $C_2=0,1$ mm/s durchgeführt:

$$I_{k_2} = 0,1[\log_{10}0,1 + 6,3] \quad (5.2)$$

$$I_{k_2} = 0,53$$

Zuletzt wurde auch der Höchstwert der Geschwindigkeitsklasse 4 (mäßig schnelle Rutschungen) von CRUDEN und VARNES (1996) für die Formel verwendet. Dies entspricht einer Bewegungsrate von $C_3=0,5$ mm/s oder umgerechnet 1,8 m/h. Über diesem Grenzwert treten sog. schnelle Rutschungen auf, die zu einem noch höheren Schadensausmaß führen können. Mithilfe dieses Wertes steigt der Parameter der kinetischen Intensität auf 0,59:

$$I_{k_3} = 0,1[\log_{10}0,5 + 6,3] \quad (5.3)$$

$$I_{k_3} = 0,59$$

Kinematische Intensität

Da genaue Werte zur Verteilung der kinematischen Komponente im Untersuchungsgebiet nicht vorhanden sind, wurden für die kinematische Intensität gleichfalls drei Möglichkeiten überlegt. Sie sollen zwei Extremszenarien und ein durchschnittliches Ereignis darstellen, die zwar auf theoretischen Überlegungen beruhen, dennoch im Untersuchungsgebiet vorkommen können.

Im ersten Szenario liegen die Risikoelemente, also die Bundes- bzw. Landesstraßen nicht am Rutschkörper. In diesem Falle kommt es zu keinem Versatz des Untergrunds unmittelbar im Bereich der Straße. Dementsprechend verfügt die

Intensität an der betrachteten Stelle über keine kinematische Komponente, woraus sich die folgende Gleichung ergibt:

$$I_{m_1} = 0 \quad (5.4)$$

Liegt das Risikoelement zu einem gewissen Teil auf dem sich bewegenden Rutschkörper, kommt es zu einer Verlagerung des Risikoelements. Hier können bei Straßen, abhängig von der Rutschgeschwindigkeit, größere Schäden entstehen. In der Studie von KAYNIA et al. (2008) wurde eine nur auf einer sehr kurzen Distanz erfolgende Verlagerung angenommen. In diesem Fall nimmt die kinematische Intensitätskomponente einen niedrigen Wert an, wie das aus der folgenden Berechnung ersichtlich ist:

$$I_{m_2} = \frac{2 \cdot 500^2}{2500^2}$$

$$I_{m_2} = 0,08$$

(5.5)

Das dritte Szenario ergibt den höchsten Wert für die kinematische Intensitätskomponente (Gl. 5.6). Hier wurde angenommen, dass das Risikoelement auf dem Rutschkörper liegt und von ihm auf eine Distanz verlagert wird, ab welcher ein Totalschaden bei ausreichender Rutschgeschwindigkeit zu vermuten ist. Somit hat die kinematische Komponente ein sehr großes Gewicht in der Berechnung, wobei ein solches Szenario eher selten vorkommt.

$$I_{m_3} = 1 \quad (5.6)$$

Relevanzfaktoren und Summe der Intensitätsfaktoren

Die errechneten Werte für die kinetische sowie die kinematische Intensität wurden im nächsten Schritt mit dem zugehörigen Relevanzfaktor multipliziert. Diese Art von Gewichtung soll die physikalischen Charakteristika des vorherrschenden Rutschungstyps betonen. Angesichts des Fokus dieser Studie auf flachgründige Translationsrutschungen zeigen die Relevanzfaktoren in ihrer Ausprägung keinen großen Unterschied. Die kinematische Intensität wurde etwas stärker als die kinetische gewichtet. Der kinematische Intensitätsfaktor wird demzufolge mit 0,6 multipliziert, der kinetische Intensitätsfaktor mit dem Multiplikationsfaktor von 0,4 gewichtet.

Die auf diese Weise erhaltenen gewichteten Produkte ($I_{mx} \cdot r_m$; $I_{kx} \cdot r_k$) der einzelnen Intensitätsfaktoren wurden im nächsten Schritt miteinander addiert. Da jeweils drei unterschiedliche Werte für die kinematische sowie kinetische Intensität bestimmt worden sind, ergibt dies neun möglichen Kombinationen. Diese neun Möglichkeiten stellen neun Szenarien dar, in welchen unterschiedliche kinetische und kinematische Kräfte auftreten. Die Produkte der einzelnen Komponente sowie ihre Summe werden in der Tab. 12 angeführt.

Tab. 12: Werte und Produkte der kinetischen und kinematischen Intensitätskomponenten sowie ihre gewichteten Summen

	I_k	I_m	$I_k \cdot r_k$	$I_m \cdot r_m$	$I_k \cdot r_k + I_m \cdot r_m$
Szenario 1	0,39	0	0,156	0	0,156
Szenario 2	0,39	0,08	0,156	0,048	0,204
Szenario 3	0,39	1	0,156	0,6	0,756
Szenario 4	0,53	0	0,212	0	0,212
Szenario 5	0,53	0,08	0,212	0,048	0,26
Szenario 6	0,53	1	0,212	0,6	0,812
Szenario 7	0,59	0	0,236	0	0,236
Szenario 8	0,59	0,08	0,236	0,048	0,284
Szenario 9	0,59	1	0,236	0,6	0,836

Die höchsten Werte für die gewichteten Summen erhielt man für jene Szenarien, die mit einem maximalen kinematischen Intensitätsfaktor gerechnet wurden. Die kleinsten Summen wurden umgekehrt für Szenarien berechnet, die den kinematischen Faktor auf 0 setzen. Die Werte, die von KAYNIA et al. vorgeschlagen worden sind, resultierten in einer eher niedrigen gewichteten Summe (Szenario 5).

5.1.2 Exposition und räumlicher Wirkungsquotient

Für die Ermittlung der Exposition des Straßennetzes gegenüber Rutschungen wurden als erster Schritt alle Tunnelabschnitte aus dem Datensatz entfernt, da diese unterirdisch verlaufen und anhand des vorliegenden Modells keine Aussagen über ihre Vulnerabilität getroffen werden konnte. Tunnelbauten können zwar auch von (vorwiegend tiefgründigen) Rutschungen gefährdet sein, aber ihre Widerstandsfähigkeit und technischen Eigenschaften sind von jenen oberirdisch geführten Straßentypen grundlegend verschieden.

Als nächster Schritt wurden die Vektordaten des Straßennetzes in Rasterform umgewandelt. Dazu musste eine sinnvolle Rasterauflösung gewählt werden, die einerseits die durchschnittliche Breite von Straßen möglichst maßstabsgetreu wiedergibt, andererseits an die Zellengröße der Gefahrenhinweiskarte angepasst ist, um anschließend die zwei Datensätze mithilfe einer Rasterkalkulation kombinieren zu können.

Die Breite von Straßen ist nicht nur von der Kategorie bzw. von dem Verkehrsaufkommen abhängig, sondern wird auch von der natürlichen und gebauten Umgebung begründet. Daher kann es kleinräumig zu Schwankungen in der Breite von Straßen kommen, was sich wiederum durch Verbot- und Beschränkungszeichen entlang solcher Straßenabschnitte manifestieren lässt.

Dennoch können übliche Werte für die Breite von Fahrbahnen unterschiedlicher Straßentypen herangezogen werden. Nach der Klassifikation von LAY (2009) erstrecken sich die Fahrbahnbreiten je nach Straßenkategorie im Durchschnitt

zwischen 6 und 13 Meter (siehe Tab. 13). Gelegentlich können Straßenkronen eine noch größere Breite aufweisen, insbesondere wenn getrennte Fahrbahnen vorhanden sind, wie zum Beispiel bei Autobahnen.

Tab. 13: Fahrbahnbreiten von Straßen, modifiziert nach LAY (2009)

Straßentyp	Durchschnittliche Fahrbahnbreite (m)
niederrangige Straßen (z.B. Gemeindestraßen)	6,0 – 7,5
Straßen mit regionaler Bedeutung (z.B. Landesstraßen L)	10,5
Straßen mit überregionaler Bedeutung (z.B. Landesstraßen B)	13,0
Straßen mit getrennten Fahrbahnen (z.B. Autostraßen)	7,5 (je Fahrbahn)

Die in der Tab. 13 angeführten Werte der Fahrbahnbreiten stimmen mit den Aussagen der befragten Fachexperten aus dem Untersuchungsgebiet überein. Sie berichteten über durchschnittliche Fahrstreifenbreiten von 5 bis 5,5 m bei Landes- und von 6 bis 7 m bei Bundesstraßen (Landesstraßen B). Somit kommt man auf eine mittlere Fahrbahnbreite von 10 bis 11 m bzw. von 12 bis 14 m.

Da die Gefahrenhinweiskarte in einer Auflösung von 10 x 10 Meter vorliegt, wäre die Wahl einer kleineren Auflösung für das Straßennetz nicht sinnvoll gewesen. Ein Vielfaches dieser Zellengröße (z.B. 20 x 20 m) hätte auf der anderen Seite zu einer Abnahme der Lagegenauigkeit der Straßen geführt. Diese Überlegungen haben dazu geführt, dass im Laufe der Konvertierung (Rasterung) von Vektordaten des Straßennetzes in das Raster eine mit der Gefahrenhinweiskarte identische Rasterweite von 10 x 10 Meter gewählt wurde. Ein Ausschnitt aus der ursprünglichen Karte, in dieser Straßen mithilfe von Vektoren dargestellt werden (Abb. 28), wird mit der neu erstellten Karte des rasterisierten Straßennetzes (Abb. 29) verglichen.

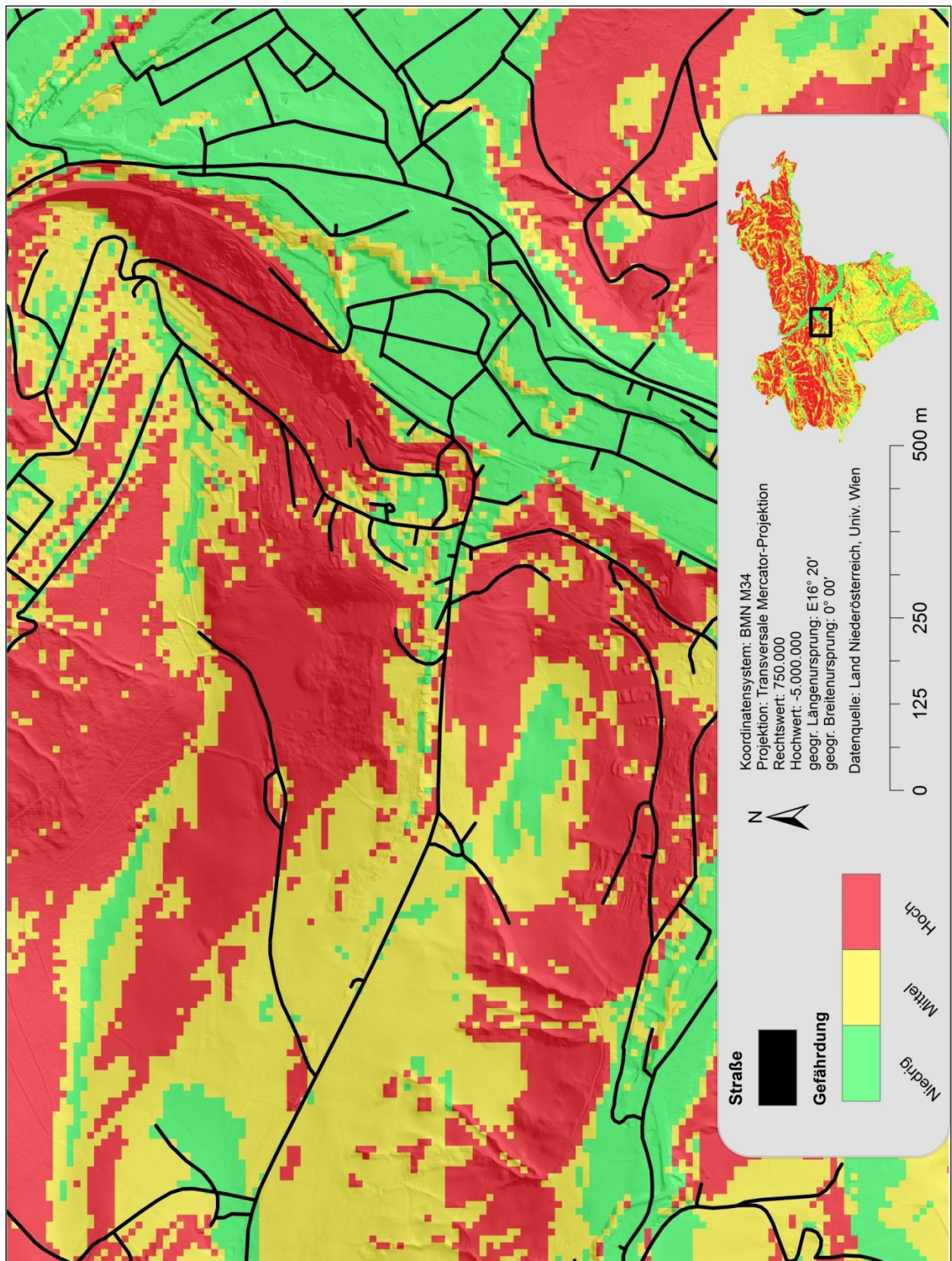


Abb. 28: Straßen als Vektordaten auf der Gefahrenhinweiskarte (Ausschnitt)

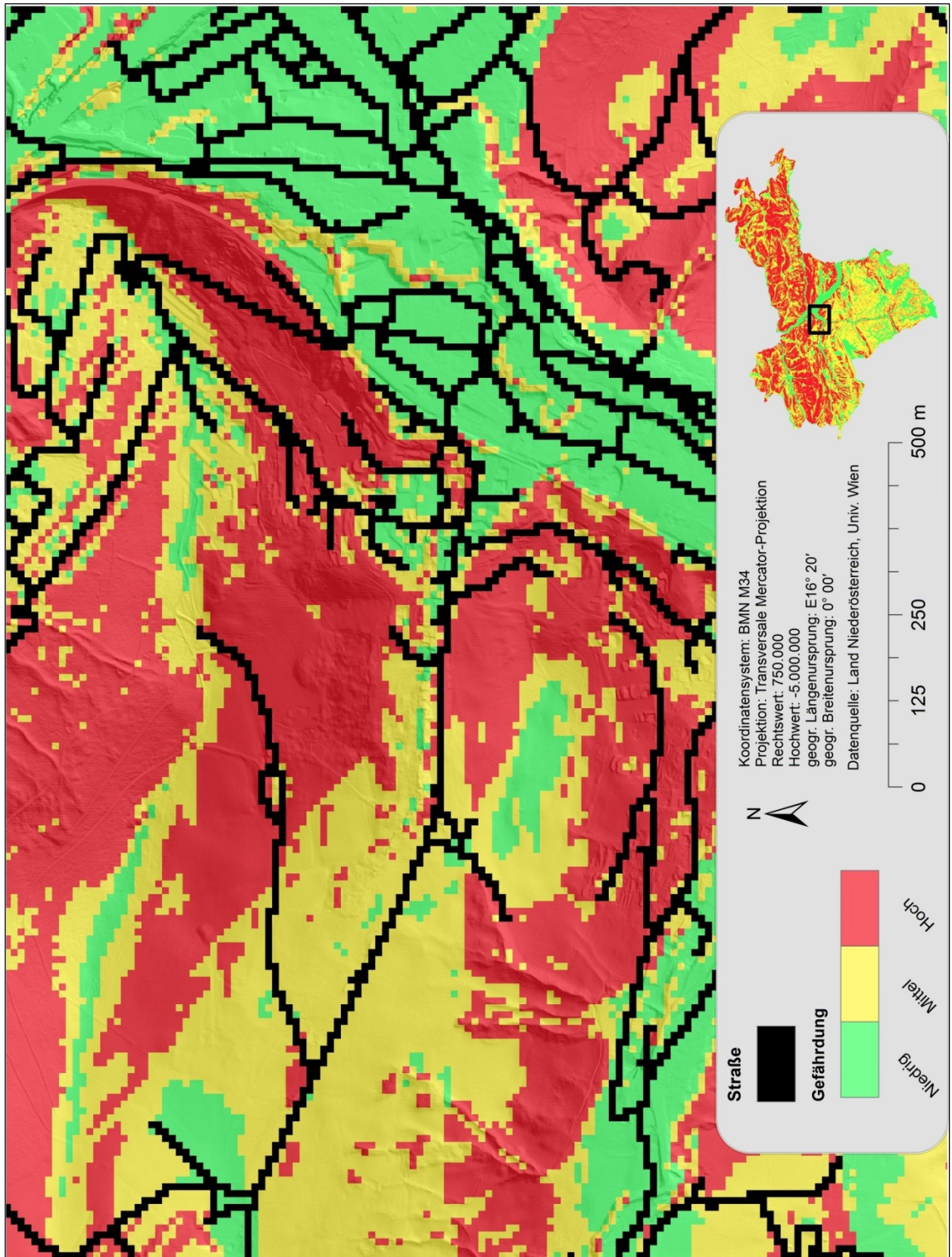


Abb. 29: Straßen als Rasterdaten auf der Gefahrenhinweiskarte (Ausschnitt)

Um die Eignung der gewählten Rastergröße zu überprüfen, wurde die Lagegenauigkeit des neu erstellten Rasterdatensatzes mit jener der ursprünglichen Vektordaten visuell verglichen. Bei der computergestützten Kartierung des Straßennetzes wurden Polylinien stets so gesetzt, dass sie möglichst der Fahrbahnmitte folgen (siehe Abb. 30).

Ungenauigkeiten bzw. kleinere Abweichungen im Meterbereich können jedoch vorkommen, besonders dort, wo die Interpretation des Luftbildes erschwert war. Unter anderem zählt eine hohe Baumdichte, wie beispielsweise in Wäldern oder entlang von Fließgewässern, sowie eine Unter- oder Überbelichtung zu den häufigsten Problemen bei der Kartierung von Straßen mithilfe von Orthophotos.

Demzufolge beeinflusst auf der einen Seite die Qualität der Vektorgrafik die Lagegenauigkeit der daraus berechneten Rasterdaten. Auf der anderen Seite können Rastergrafiken – im Unterschied zu Vektordaten – von Natur aus nicht vollständig an die natürlichen Formen angepasst werden, da sie auf Bildpunkten basieren. Aus diesem Grund tritt infolge der Rasterung ein Treppeneffekt auf, der dazu führt, dass die einzelnen Rasterzellen dem Straßenverlauf nicht immer exakt wie die Polylinien des Vektorformats folgen können. Besonders große Diskrepanzen sind in kurvenreichen Straßenabschnitten zu beobachten. Hierbei kann die Mitte der Rasterzellen von der tatsächlichen Fahrbahnmitte stellenweise um mehrere Meter entfernt sein. Die höchste Lagegenauigkeit tritt entlang geradgeführter Strecken auf, die entweder in einer Nord-Süd-Richtung oder West-Ost-Richtung verlaufen.

Eine gute Verwendbarkeit des generierten Rasterdatensatzes konnte trotz dieser Limitierungen festgestellt werden. Die Rasterzellen decken zum Großteil die gesamte Fahrbahnbreite ab und nur selten treten nennenswerte Verschiebungen auf (siehe Abb. 31). Die gewählte Rasterweite von 10 x 10 Meter stellt außerdem die räumliche Dimension von sowohl Landes- als auch von Bundesstraßen optimal dar.

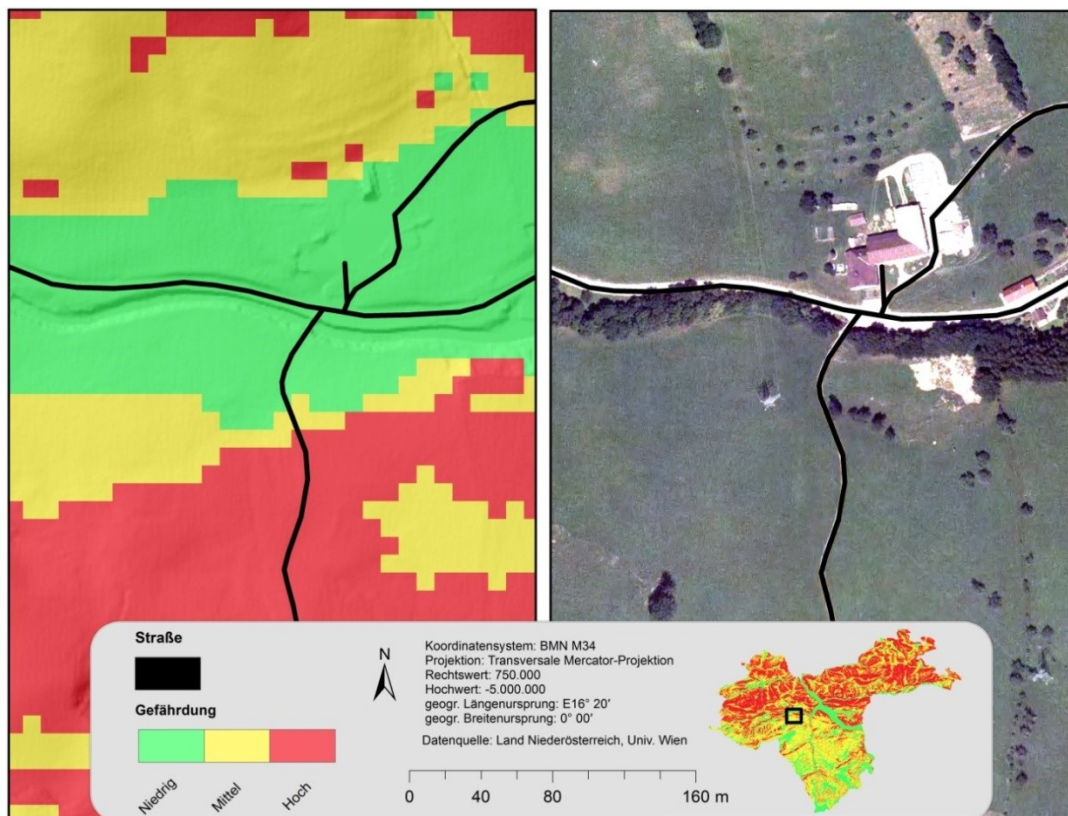


Abb. 30: Straßen als Vektoren auf der Gefahrenhinweiskarte bzw. auf dem Orthophoto (Ausschnitt)

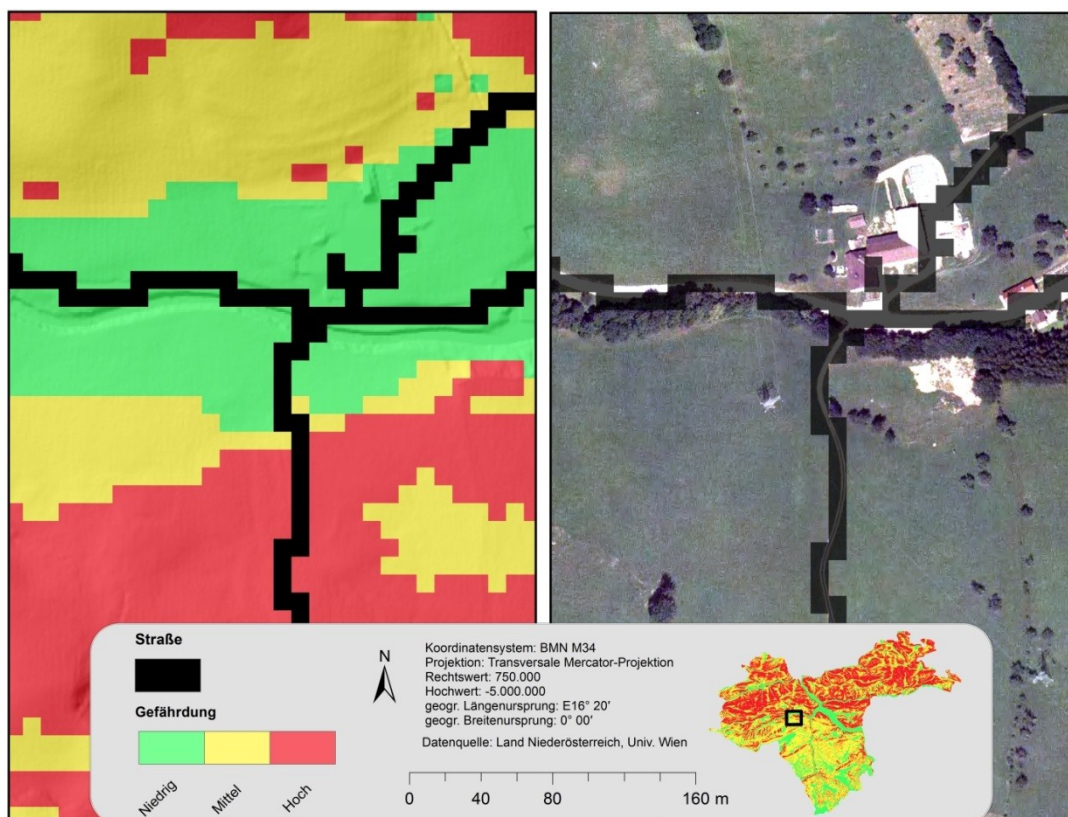


Abb. 31: Straßen als Raster auf der Gefahrenhinweiskarte bzw. auf dem Orthophoto (Ausschnitt)

Die Grundlage zur Berechnung der Exposition von Straßen (in diesem Fall der Bundes- sowie Landesstraßen) gegenüber Rutschungen liefert die Gefahrenhinweiskarte. Wenn der Anteil der von Rutschungen betroffenen Flächen der Risikoelemente ermittelt werden sollte, muss zunächst festgelegt werden, wie diese Flächen definiert und voneinander abgegrenzt werden sollen.

Die Gefährdungsklassen, die anhand des Rutschungsanteils festgelegt worden sind (siehe dazu Kap. 4.5.2), beschreiben die Gefährdung auf qualitativer Weise. Der kleinste Flächenanteil von 18% weist die Klasse mit niedriger Gefährdung auf. In etwa 43% der Gesamtfläche kommt eine mittlere Gefährdung vor. Die Gefährdungsklasse mit der höchsten Gefährdung hat einen Flächenanteil von 39% (Abb. 32).

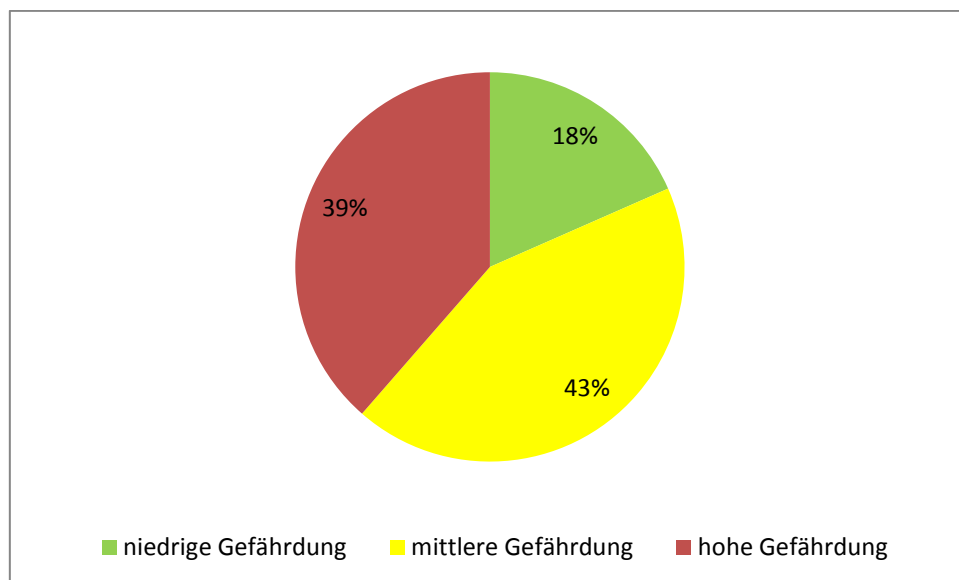


Abb. 32: Flächenanteile von Gefährdungsklassen der Gefahrenhinweiskarte

Identisch zur Vorgehensweise von KAYNIA et al. (2008) werden in dieser Studie ebenfalls nur die höchsten Gefährdungsklassen als von Rutschungen betroffen angesehen. Bei Flächen, die eine niedrige Gefährdung aufweisen, ist die räumliche Auftretenswahrscheinlichkeit einer Rutschung dermaßen gering, dass hier theoretisch keine Rutschungsgefahr besteht.

Im Unterschied zur Fallstudie von KAYNIA et al. (2008) wurde die ursprüngliche Gefährdungskarte jedoch mit drei anstatt vier Klassen versehen. Da in der

Expositionskarte nur zwei Klassen vorkommen (von Rutschungen betroffen bzw. nicht betroffen), musste eine Entscheidung getroffen werden, ob nur die höchste Gefährdungsklasse oder auch die mittlere Gefährdungsklasse in die Berechnung der Exposition miteinbezogen werden sollte.

Nachdem insgesamt 95% der kartierten Rutschungsanrisse in der mittleren und hohen Gefährdungsklasse enthalten sind und das Gebiet bekanntermaßen anfällig für Rutschungen ist, wurden beide Klassen als von Rutschungen betroffen ausgewiesen (siehe Abb. 33). Diese zwei höchsten Gefährdungsklassen enthalten 82% der Gesamtfläche, wobei sie unterschiedliche Gefährdungsgrade zusammenfassend darstellen. Die aus diesen zwei Klassen neu erstellte Gefährdungsklasse („von Rutschungen betroffen“) indiziert ausschließlich das räumliche (und keinesfalls das zeitliche) Potential für eine Rutschung, wenn alle Vorbedingungen zur Gefahreninitiierung erfüllt sind (siehe Kap. 2.2.3).

Auf dieser reklassifizierten Gefahrenhinweiskarte wird die Exposition des bereits rasterisierten Straßennetzes ersichtlich (Abb. 33). Um den genauen Anteil der exponierten Pixel ermitteln zu können, müssen die Straßenkarten mit der neuen Gefahrenhinweiskarte verschnitten werden. Dabei wird jeder Pixelwert neu errechnet und anschließend klassifiziert.

Es wurden Expositionskarten für jede Landes- und Bundesstraße (nach Straßennummern) erstellt. Dazu wurden die Werte der neu klassifizierten Gefahrenhinweiskarte extrahiert und mithilfe einer Maske auf die Rasterzellen der jeweiligen Straße übertragen. Die einzelnen Pixel konnten damit in zwei Klassen (nicht exponiert, exponiert) unterteilt werden (Abb. 34). Die Anzahl der exponierten Rasterzellen wurde durch die Gesamtanzahl der Rasterzellen dividiert, um den räumlichen Wirkungsquotienten, der für die Ausprägung der Intensitätskomponente im Vulnerabilitätsmodell eine wichtige Rolle spielt, zu berechnen.

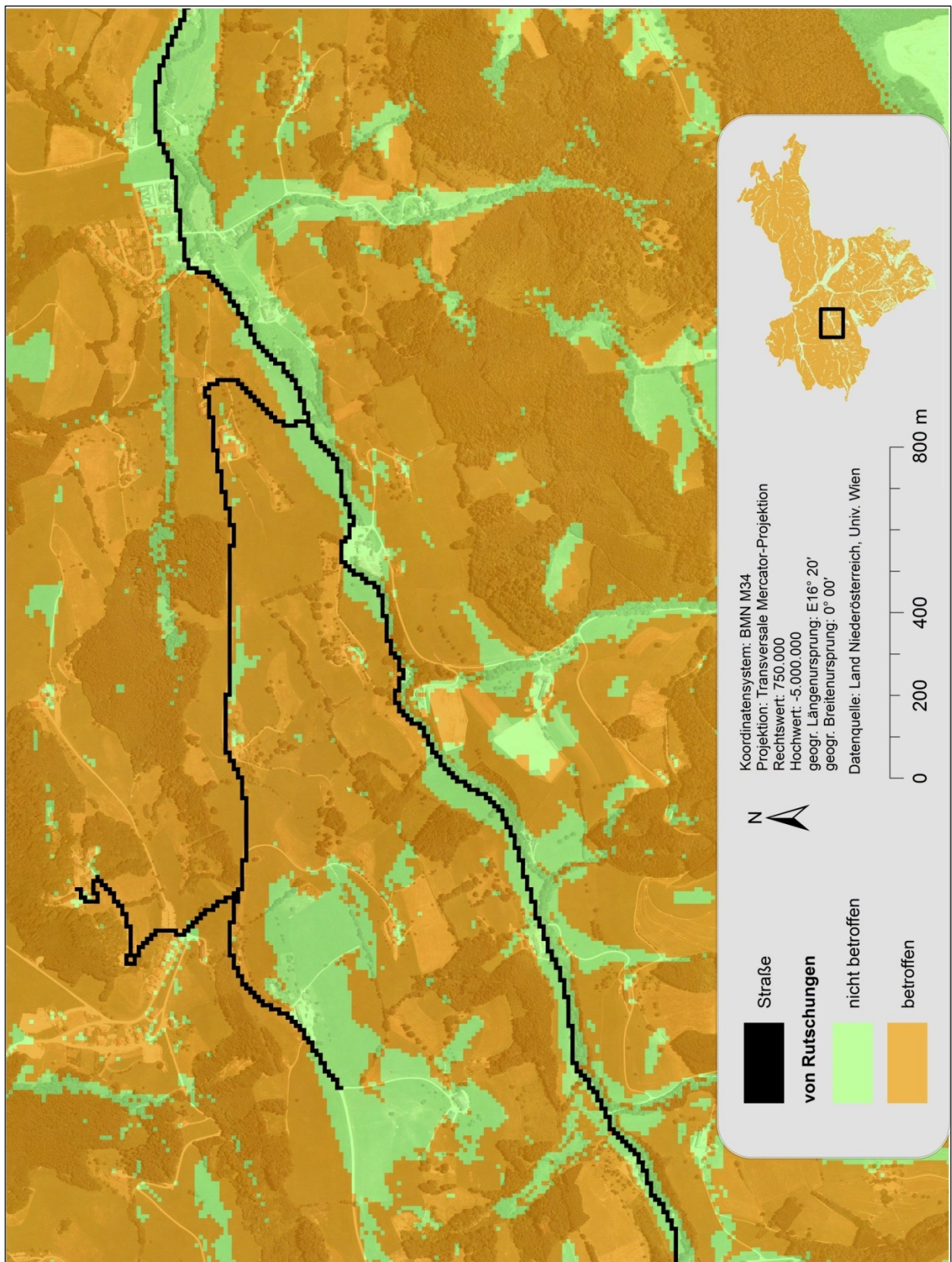


Abb. 33: Von Rutschungen betroffene und nicht betroffene Flächen im Untersuchungsgebiet (Ausschnitt)

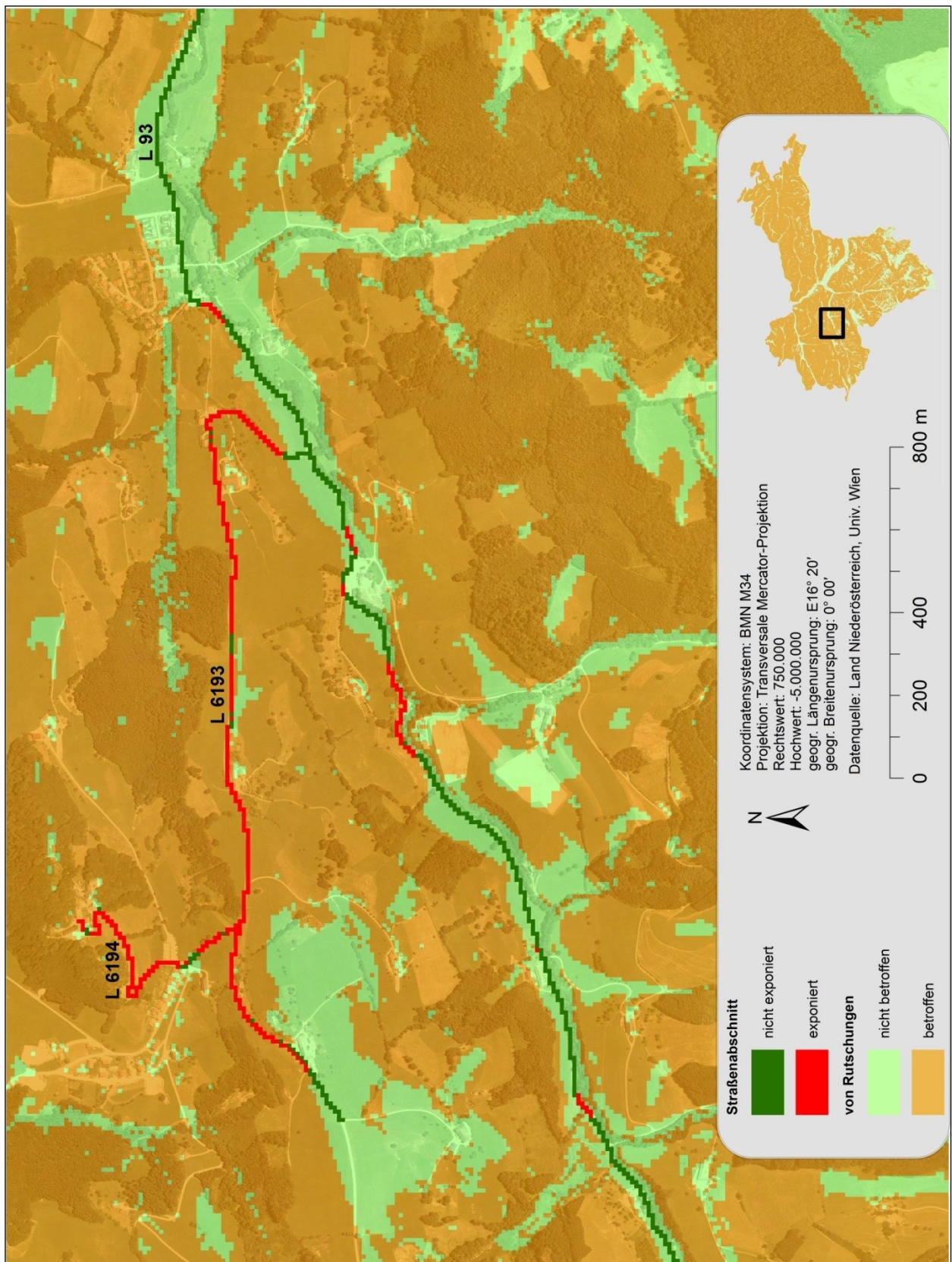


Abb. 34: Exponierte Straßenabschnitte (rot) von Landesstraßen, berechnet anhand der reklassifizierten Gefahrenhinweiskarte (Ausschnitt)

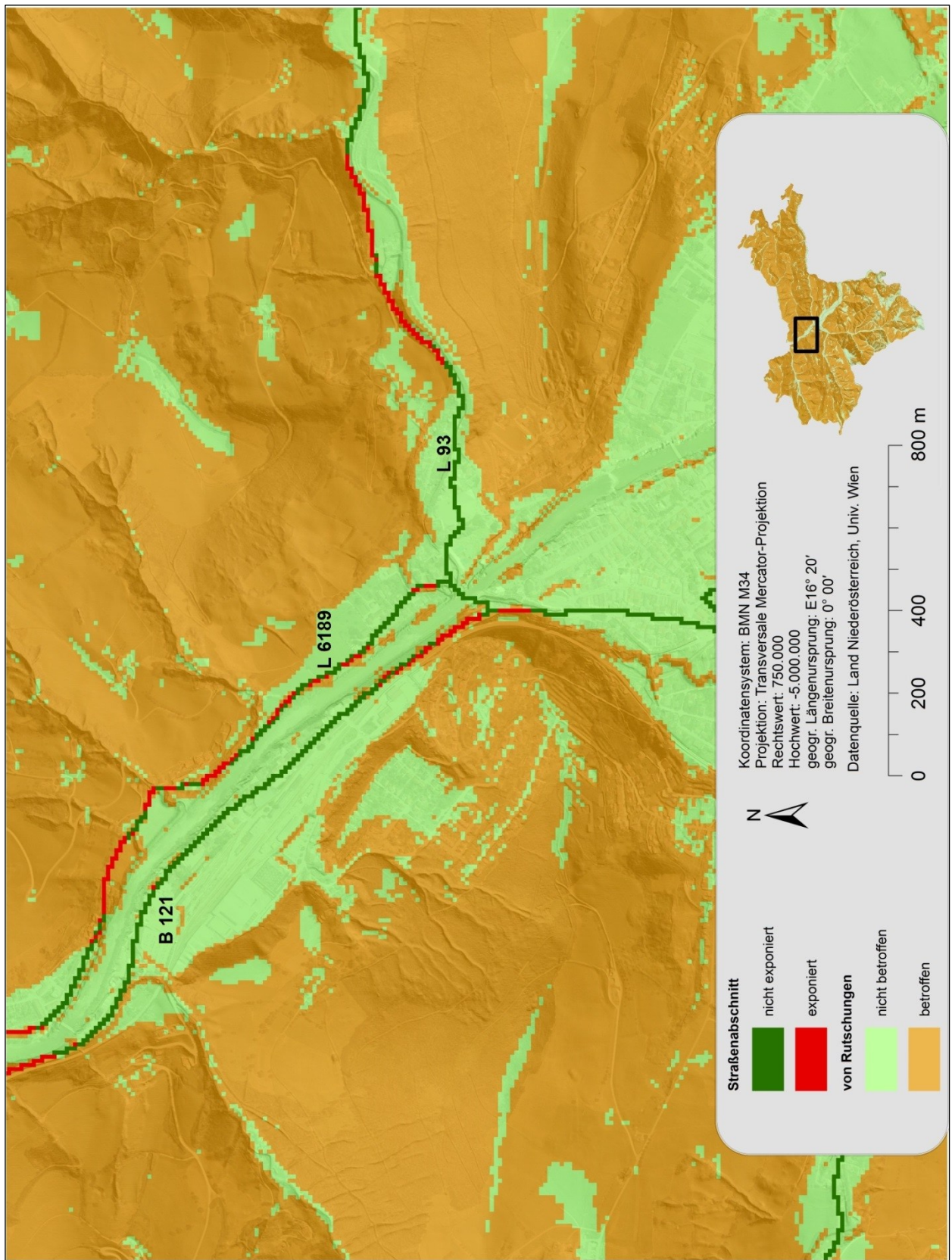


Abb. 35: Exponierte Straßenabschnitte (rot) von Bundes- und Landesstraßen, berechnet anhand der reklassifizierten Gefahrenhinweiskarte (Ausschnitt)

Der räumliche Wirkungsquotient (k_s) ist bei jeder Straße unterschiedlich ausgeprägt (Tab. 14) und weist einen Mittelwert von etwa 0,50 auf. Je mehr Pixelwerte einer Straße als exponiert ausgewiesen wurden, desto höher wurde der k_s -Wert. Die höchsten Werte wurden logischerweise für kurze Straßen, die zum Großteil im exponierten Bereich liegen, berechnet. Solche Straßen sind beispielsweise die L 6193 sowie die L 6194, nördlich des Redtenbachtals (siehe Abb. 34). Umgekehrt haben kurze Straßen außerhalb des Gefährdungsbereichs die niedrigsten räumlichen Wirkungsquotienten (z.B. L 6195). Eine Straße, die zum Großteil in ebener Lage, entfernt von Hängen und Fließgewässern verläuft, führt ebenfalls zu niedrigen k_s -Werten (siehe Abb. 35).

Tab. 14: Exposition und räumlicher Wirkungsquotient von Straßen nach Straßennummern

Straße (nach Straßennummer)	Exposition	räumlicher Wirkungsquotient (k_s)
B 31	23,03%	0,2303
B 121	14,24%	0,1424
L 88	58,99%	0,5899
L 92	77,62%	0,7762
L 93	47,09%	0,4709
L 6189	45,89%	0,4589
L 6190	42,21%	0,4221
L 6191	73,36%	0,7336
L 6192	32,11%	0,3211
L 6193	81,50%	0,8150
L 6194	88,04%	0,8804
L 6195	15,25%	0,1525
L 6196	42,45%	0,4245

Zum Vergleich wurde die gleiche Berechnung der Exposition für Landes- sowie Bundesstraßen in Kategorien durchgeführt (Tab. 15). Dabei wurden die Straßen nicht einzeln, sondern ihre Summen in Form von Straßenkategorien auf die Exposition untersucht. Infolgedessen wird mit viel größeren Gesamtflächen gerechnet, dies letztendlich eine Homogenisierung der Daten bewirken kann.

Die Ergebnisse zeigten, dass Landesstraßen viel mehr exponiert liegen als die Bundesstraßen, welche vorwiegend in breiteren Tälern verlaufen. Rund die Hälfte der Gesamtfläche von Landesstraßen ist von Rutschungen betroffen. Hierbei muss jedoch darauf hingewiesen werden, dass Bundesstraßen im Untersuchungsgebiet eine kürzere Gesamtlänge als Landesstraßen haben. Rechnet man daher mit normierten Werten, dann ergibt sich für beide Straßenkategorien ein Expositionsanteil von ca. 19%.

Die Aussagekraft der nach dieser Methode ermittelten zwei k_s -Werte ist geringer als Quotienten, die für alle Straßen separat ermittelt worden sind. Das liegt daran, dass bei der letzteren Methode die Exposition nicht über eine große Fläche verteilt vorliegt, sondern, bedingt durch die räumlichen Unterschiede in der Gefährdung, für jede Straße unterschiedliche Werte annimmt. Aus diesem Grund wurden für die nachfolgenden Rechenschritte die einzeln ermittelten räumlichen Wirkungsquotienten herangezogen.

Tab. 15: Exposition und der räumliche Wirkungsquotient nach Straßenkategorie

Straßenkategorie	Exposition	räumlicher Wirkungsquotient (k_s)
Landesstraßen	50,55%	0,5055
Bundesstraßen	17,95%	0,1795

5.2 Suszeptibilitätskomponente der Vulnerabilität

5.2.1 Bauliche Suszeptibilität von Straßen

Die Bestimmung der baulichen Suszeptibilität basiert auf den materiellen Eigenschaften von Straßen. Im Laufe dieser Vulnerabilitätsanalyse wurden die sog. Bundes- und Landesstraßen untersucht. Diesen Straßenkategorien wurden Suszeptibilitätswerte betreffend die bauliche Widerstandsfähigkeit vom Autor festgelegt (Kap. 3.5.2). Alle Bundesstraßen im Untersuchungsgebiet haben dementsprechend einen Wert von 0,2 für den baulichen Suszeptibilitätsfaktor erhalten, den Landesstraßen wurde ein Wert von 0,3 zugewiesen (siehe Abb. 36).

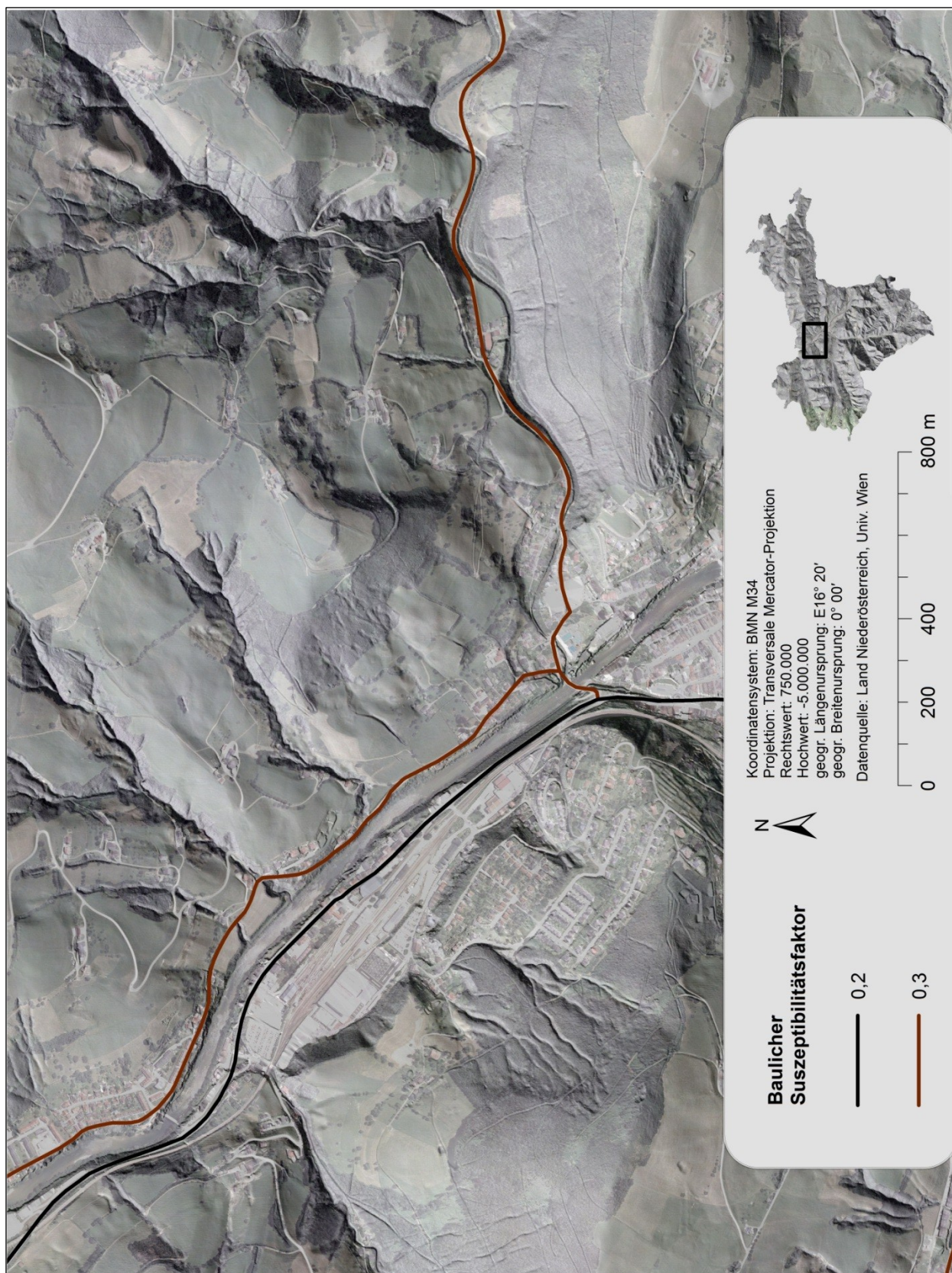


Abb. 36: Werte des baulichen Suszeptibilitätsfaktors im Untersuchungsgebiet (Ausschnitt)

5.2.2 Suszeptibilität betreffend die technischen Schutzsysteme

Insgesamt 254 technische Schutzsysteme sind entlang der Bundes- und Landesstraßen in Waidhofen an der Ybbs errichtet worden (Abb. 37) (NÖ STRASSENABTEILUNG 6 2015). Sie schützen Straßen vorwiegend gegenüber Hangbewegungen, die durch Rutschungen oder durch Unterspülung ausgelöst werden. Die technischen Schutzsysteme können aus verschiedenen Materialien bestehen und entweder hang- oder talseitig bzw. beidseitig einer Straße liegen. Es wurde für die Studie die Annahme getroffen, dass alle Schutzsysteme so installiert worden sind, dass sie gegenüber einer ortspezifischen Gefahr den höchsten Schutz bieten können.

Im Laufe der GIS-Analyse wurden die Schutzsysteme anhand einer Tabelle der Niederösterreichischen Straßenabteilung 6 mit Angaben zum Material und Lage digitalisiert. Zur möglichst genauen Verortung wurde der NÖ Atlas der Niederösterreichischen Landesregierung zur Hilfe genommen, von welchem die nötige Information zur Kilometrierung der Straßen entnommen wurde.

Aus den Ergebnissen wird ersichtlich, dass die meisten Schutzsysteme in Tälern errichtet worden sind. Eine besonders hohe Dichte an Schutzsystemen weist die L 93 entlang des Redtenbaches auf (siehe Abb. 38). Dieses Gebiet wurde in der Vergangenheit öfters von zerstörerischen Massenbewegungen, die zum Großteil durch fluviale Erosion ausgelöst worden sind, heimgesucht. Auch entlang des Nellingbachs, insbesondere an der L 6195, sind viele Einzelkonstruktionen zum Schutz der Straßen ersichtlich. Die größte Gesamtlänge von Schutzsystemen, die sich außerhalb von Tälern befinden, weist die L 93 in ihrem östlichen Teil auf. Auch die L 92 besitzt in der Nähe des Schliefaubaches zahlreiche Schutzsysteme im hügeligen Terrain.

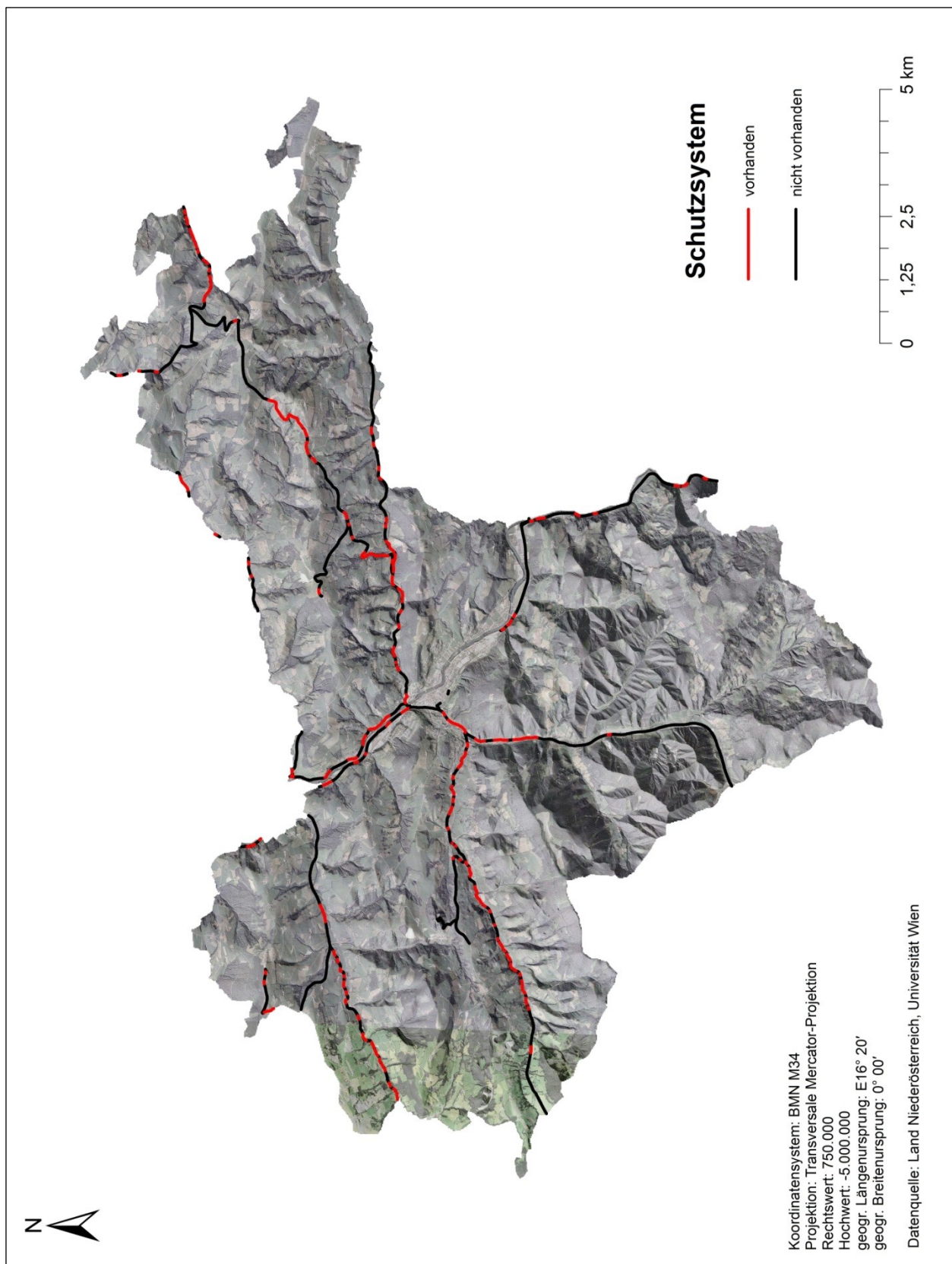


Abb. 37: Technische Schutzsysteme entlang des hochrangigen Straßennetzes in Waidhofen an der Ybbs im Überblick

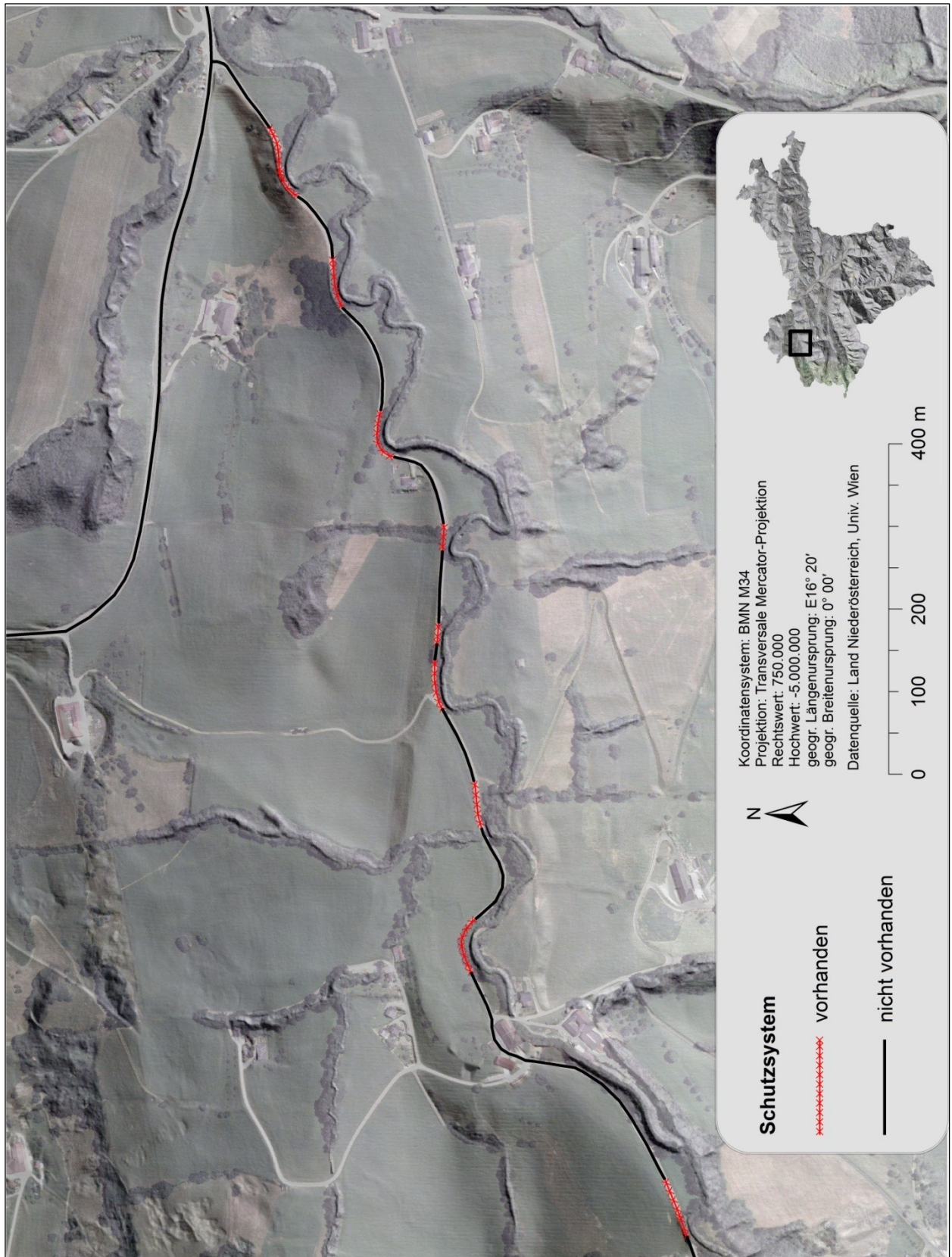


Abb. 38: Technische Schutzsysteme entlang des Redtenbaches (Ausschnitt)

5.2.3 Suszeptibilitätsfaktor des Erhaltungszustands

Zur Bestimmung des Suszeptibilitätsfaktors betreffend die Straßenerhaltung wurden Informationen von der NÖ Straßenbauabteilung 6 bzw. der Straßenmeisterei in Waidhofen an der Ybbs verwendet. Aus diesen Informationen wurden die Mindestbereisungshäufigkeiten jeder einzelner Straße entnommen und ins GIS eingetragen.

Die hochrangigen Straßen (Bundes- und Landesstraßen) in Waidhofen an der Ybbs werden je nach Verkehrsstärke und Bedeutung von mindestens ein- bis dreimal wöchentlich von dem Streckendienst kontrolliert und gegebenenfalls gewartet. Daraus wurden drei Werte für den Suszeptibilitätsfaktor betreffend die Straßenerhaltung abgeleitet, die visuell in der Abb. 39 dargestellt werden.

Der höchste Suszeptibilitätsfaktor von 0,3 wurde 30% der Straßen zugewiesen. Etwa 44% der Straßen werden mindestens zweimal wöchentlich kontrolliert und weisen daher einen Wert von 0,2 auf. Die Straßen, die mindestens dreimal in der Woche vom Streckendienst bereist werden, machen 26% des hochrangigen Straßennetzes aus und erhielten einen Wert von 0,1.

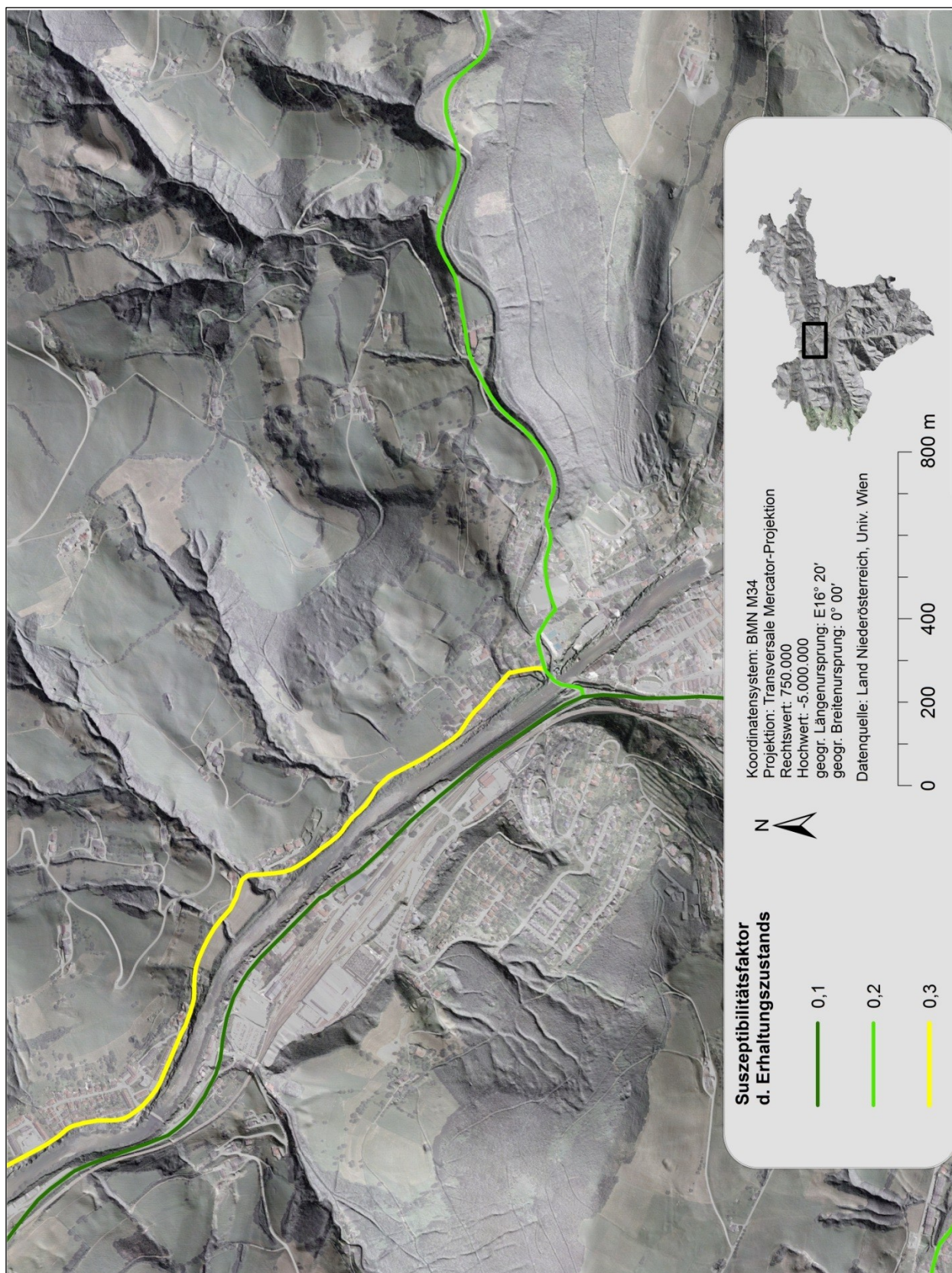


Abb. 39: Werte für den Suszeptibilitätsfaktor des Erhaltungszustands im Untersuchungsgebiet (Ausschnitt)

5.3 Gesamtvulnerabilität des Straßennetzes

5.3.1 Regionale Verteilung der Vulnerabilität

Die Gesamtvulnerabilität des hochrangigen Straßennetzes wurde mithilfe der berechneten spezifischen Intensität bzw. Suszeptibilität ermittelt. Um soweit zu kommen, mussten jedoch zunächst die neun Intensitätsszenarien mit den einzelnen räumlichen Wirkungsquotienten multipliziert werden. Dadurch erhielt jeder Straßenabschnitt einen spezifischen Intensitätswert, dessen Höhe vorwiegend von der Exposition des Elements abhängt. Zur Berechnung der Intensität wurde der folgende Befehl (Bsp. für Szenario 9) im *ArcGIS Field Calculator* für jedes Risikoelement (Straßenabschnitt) ausgeführt:

(5.7)

$$\text{INT9} = [\text{ksS}] * ([\text{rK}] * [\text{if_IK3}] + [\text{rM}] * [\text{if_IM3}])$$

wobei

INT9...Intensitätswert (für Szenario 9)

[ksS]... objektspezifischer räumlicher Wirkungsquotient

[rK]... kinetischer Relevanzfaktor (konst.)

[if_IK3]...kinetischer Intensitätsfaktor (für I_{k3})

[rM]... kinematischer Relevanzfaktor (konst.)

[if_IM3]... kinematischer Intensitätsfaktor (für I_{m3})

Im Unterschied zur Intensität, die nur durch den räumlichen Wirkungsquotient eine Variation zwischen den einzelnen Risikoelementen zeigt, hat die Suszeptibilität drei Faktoren, die unterschiedliche Werte annehmen. Obwohl die Suszeptibilität als inhärente Eigenschaft keine gefahrenabhängigen Szenarien aufweist, können die einzelnen Suszeptibilitätsfaktoren auf sechsfacher Weise miteinander kombiniert werden. Dafür wurde die folgende Gleichung für jedes Risikoelement im GIS berechnet:

(5.8)

$$SUS = 1 - (1 - [sf_BAU]) * (1 - [sf_SCH]) * (1 - [sf_ERH])$$

wobei

SUS ... Suszeptibilitätswert

sf_BAU... Baulicher Suszeptibilitätsfaktor

sf_SCH... Suszeptibilitätsfaktor des technischen Schutzsystems

sf_ERH... Suszeptibilitätsfaktor des Erhaltungszustands

Schließlich wurden die ermittelten elementspezifischen Intensitäts- und Suszeptibilitätswerte gemäß Gleichung 3.2 miteinander multipliziert. Man erhielt dadurch neun verschiedene Vulnerabilitätswerte für jedes Risikoelement und Intensitätsszenario. Ein Beispiel für die Berechnung eines szenarioabhängigen Vulnerabilitätswertes liefert die folgende, im GIS ausgeführte Gleichung:

(5.9)

$$V9S = [SUS] * [INT9]$$

wobei

V9S...Vulnerabilitätswert (Gesamtvulnerabilität) für das 9. Intensitätsszenario

SUS... Suszeptibilitätswert

INT9... Intensitätswert (für Szenario 9)

Die Ergebnisse zeigten, dass zwar die Höhe der Vulnerabilität vom Szenario zum Szenario variiert, das räumliche Verteilungsmuster der Vulnerabilität aber unverändert bleibt. Es wurden aus diesem Grund nur drei Szenarien für eine nähere Analyse ausgewählt. Die Wahl fiel auf zwei Extremszenarien und auf ein Durchschnittsszenario, um die Unterschiede zwischen den Szenarien gut veranschaulichen bzw. Folgerungen einfacher ableiten zu können.

Das Szenario 9 (siehe Abb. 40) weist den höchsten Wert für den kinematischen bzw. kinetischen Intensitätsfaktor auf. Vor allem die kinematische Komponente, die hier

das Maximum von 1 annimmt, trägt zu vergleichbar hohen Vulnerabilitätswerten bei. Wenn $I_{m3}=1$, dann überlappen sich insbesondere die Flächen der Straße und des Rutschkörpers. Das bedeutet, dass ein großer physikalischer Impuls auf das Risikoelement ausgeübt wird, wodurch große Schäden entstehen können.

Die Höhe des Schadens ist allerdings auch von der kinetischen Intensität, also der Rutschgeschwindigkeit abhängig. Obwohl der kinetische Intensitätsfaktor von allen Szenarien in diesem Szenario seinen höchsten Wert von 0,59 (Obergrenze der Geschwindigkeitsklasse 4) annimmt, ist er noch immer wenig ausgeprägt im Vergleich zum kinematischen Intensitätsfaktor. Außerdem wird der kinetische Intensitätsfaktor zusätzlich von dem zugehörigen Relevanzfaktor geschwächt.

Die maximalen Vulnerabilitätswerte von Straßen liegen bedingt durch die höchstmöglichen Intensitätsfaktoren, zwischen 0,6 und 0,8 für dieses Extremszenario. Straßen mit Vulnerabilitäten in diesem Intervall sind Landesstraßen mit einer lokalen Bedeutung, die der Einbindung kleiner Ortsteile ins übergeordnete Straßennetz dienen. Sie haben nur vereinzelt Schutzsysteme und liegen in rutschungsgefährdeten, oft steilen Bereichen. Bedingt durch ihre kurze Länge und hohe Exposition, weisen sie die höchsten k_s -Werte auf. Der räumliche Wirkungsquotient hat bekanntermaßen einen bedeutenden Einfluss auf den Intensitätsfaktor, von dem letztendlich auch die Vulnerabilität abhängt.

Einen Vulnerabilitätswert von 0,3 bis 0,6 weisen Landesstraßen von größerer Gesamtlänge auf. Sie verlaufen zum Großteil in Tälern und werden des Öfteren durch Schutzsysteme vor Massenbewegungen gesichert. In diesen Abschnitten ist die Vulnerabilität bis zu 50% niedriger im Vergleich zu ungesicherten Strecken der gleichen Straße. Es wurden Vulnerabilitätswerte um 0,6 für Straßen bzw. Abschnitte errechnet, die eine vergleichsweise kleine Gesamtlängen und eine hohe Exposition aufweisen.

Erwartungsgemäß weisen Bundesstraßen die niedrigsten Vulnerabilitätswerte auf. Dies wird bedingt durch mehrere Faktoren, die teils der inhärenten Suszeptibilität, teils der gefahrenabhängigen Intensität zuzuschreiben sind. Die Bundesstraßen haben eine niedrigere bauliche Suszeptibilität und werden am häufigsten von dem Streckendienst befahren bzw. kontrolliert. Sie weisen außerdem zahlreiche Schutzsysteme in den exponierten Abschnitten auf. Ein mehr oder weniger ebener

Verlauf, häufig in breiten Tälern, führt dazu, dass der räumliche Wirkungsquotient kleine Werte annimmt, wodurch die Intensität zusätzlich vermindert wird. Als Ergebnis weisen Bundesstraßen sogar für Szenario 9 einen maximalen Vulnerabilitätswert kleiner als 0,2 auf.

Zusammenfassend für das Szenario 9 kann behauptet werden, dass im Untersuchungsgebiet nur vereinzelt ein hoher Schadensanteil ($V > 0,6$) erwartet werden kann. Der Großteil des hochrangigen Straßennetzes weist eine mittlere bis geringe Vulnerabilität gegenüber flachgründigen Rutschungen der Geschwindigkeitsklasse 4 auf (siehe Abb. 40).

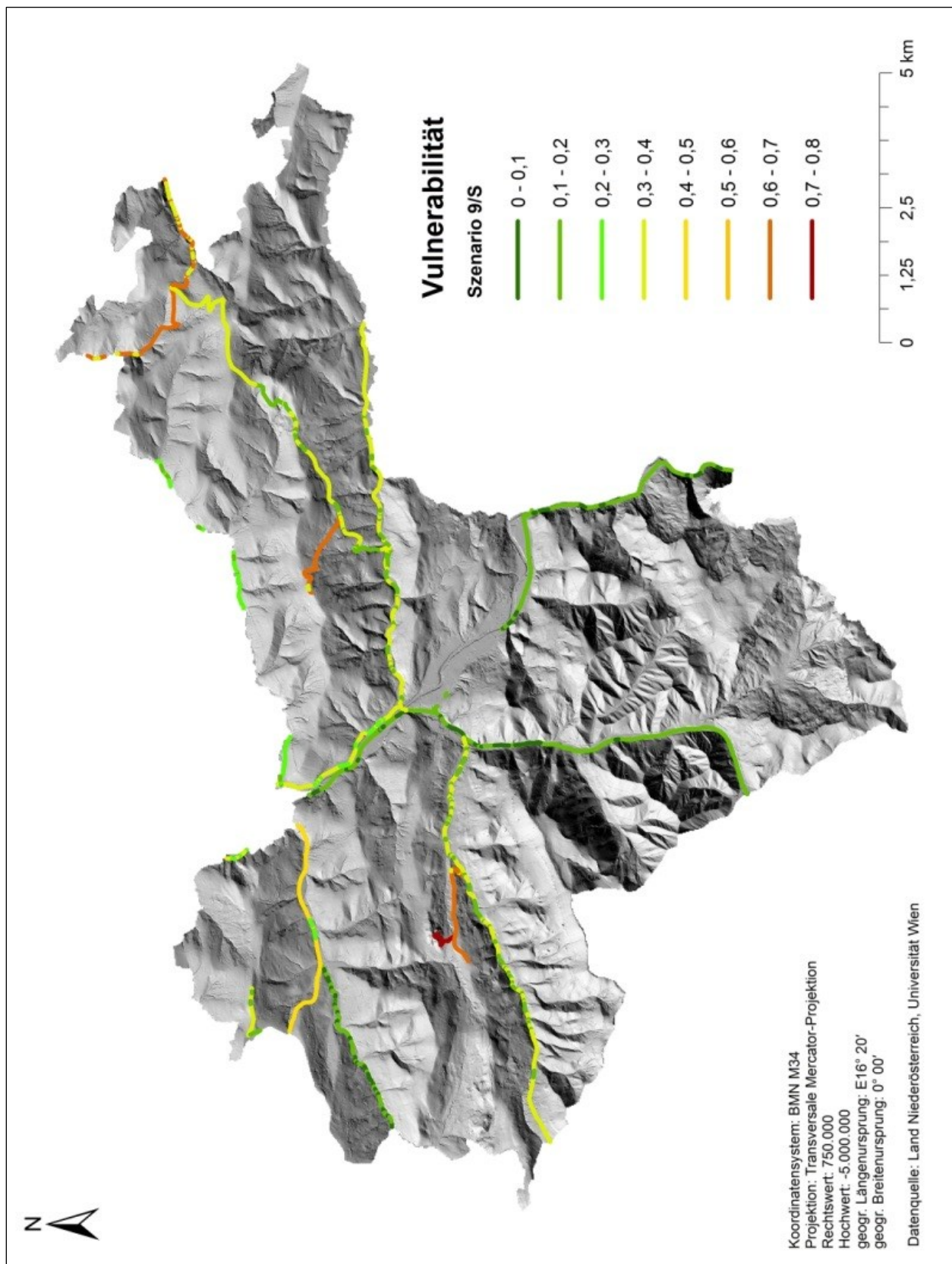


Abb. 40: Vulnerabilität von Straßen für Szenario 9/S (S = separate k_s -Werte für jede Straße)

Das zweite untersuchte Szenario (Szenario 5) weist sowohl für den kinetischen als auch für den kinematischen Intensitätsfaktor einen mittleren Wert auf. Die Werte sind dabei identisch mit jenen der Fallstudie von KAYNIA et al. (2008) und sollen ein Ereignis von gemäßigter Intensität beschreiben. Die kinetische Intensität ist mit einem Faktor von 0,53 ähnlich hoch wie bei Szenario 9 und wirkt damit für die Geschwindigkeitsklasse 4 charakteristisch. Im Unterschied dazu ist der kinematische Intensitätsfaktor um Potenzen kleiner als beim Szenario 9, in dem dieser den maximalen Wert von 1 angenommen hat. Der niedrige Wert von 0,08 für die kinematische Intensitätskomponente bewirkt eine starke Abnahme der Vulnerabilität aller Risikoelemente.

Die höchsten Vulnerabilitätswerte liegen dementsprechend niedrig zwischen 0,2 und 0,25 (siehe Abb. 41 und Abb. 42). Die relative Verteilung bzw. Abstufung der Vulnerabilität ist identisch wie bei Szenario 9, nur die absoluten Werte der Vulnerabilität haben sich verändert. Denn weder wurde die Suszeptibilität noch der räumliche Wirkungsquotient der einzelnen Straßenabschnitte neu berechnet, ausschließlich die Intensitätsfaktoren wurden modifiziert.

Der Unterschied zwischen den Vulnerabilitätswerten der schadenanfälligsten und der am wenigsten schadenanfälligen Straße wurde auf etwa 0,2 verringert. Das heißt, dass bei diesem mittleren Szenario die schadenanfälligsten Abschnitte höchstens ein Fünffaches des Schadensausmaßes von jenen Straßen, die die niedrigste Vulnerabilität besitzen, aufweisen können. Im Vergleich kann der Unterschied des Schadenpotentials ein Fünfzehnfaches bei Szenario 9 betragen.

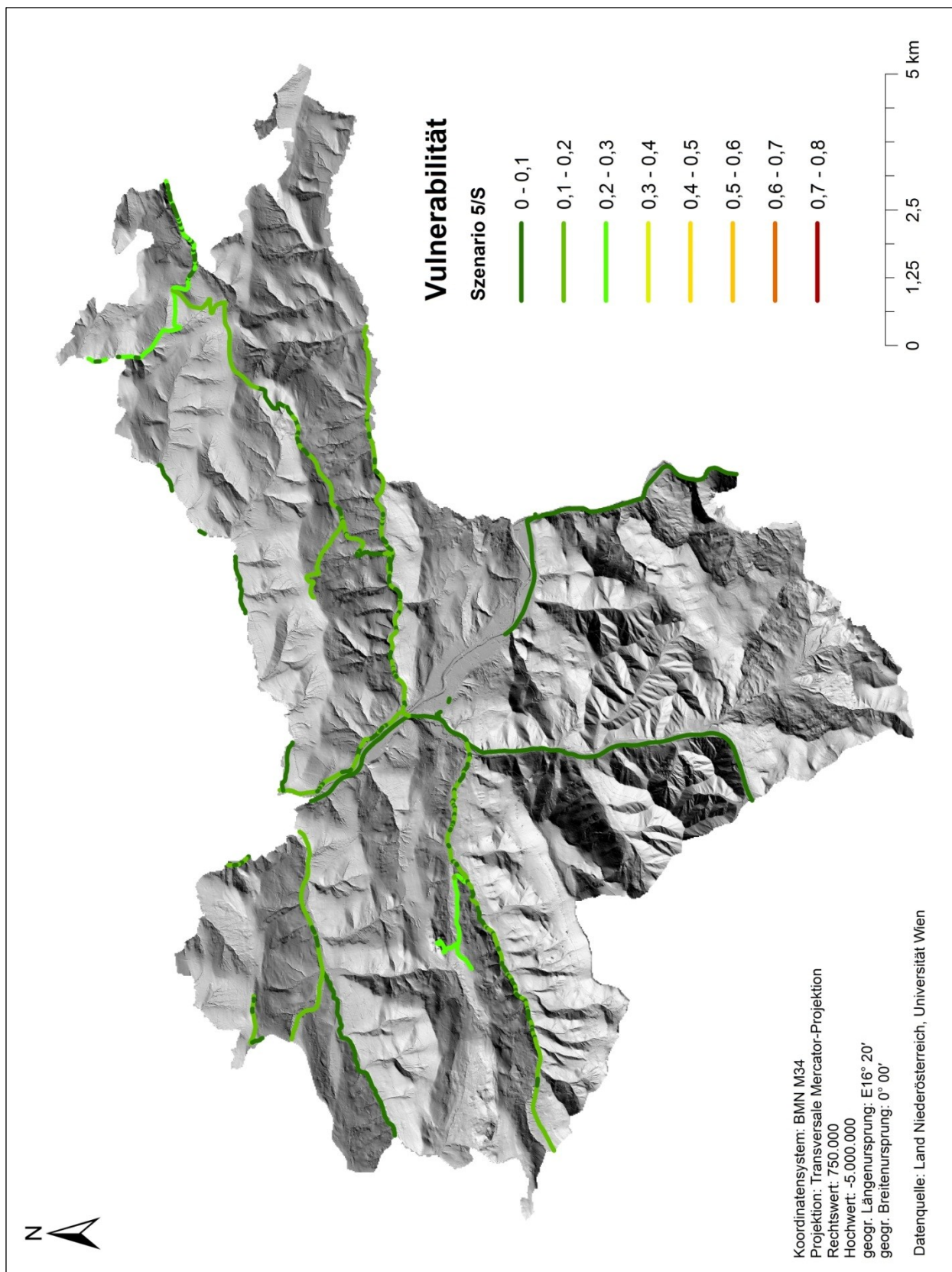


Abb. 41: Vulnerabilität von Straßen für Szenario 5/S (S = separate k_s -Werte für jede Straße)

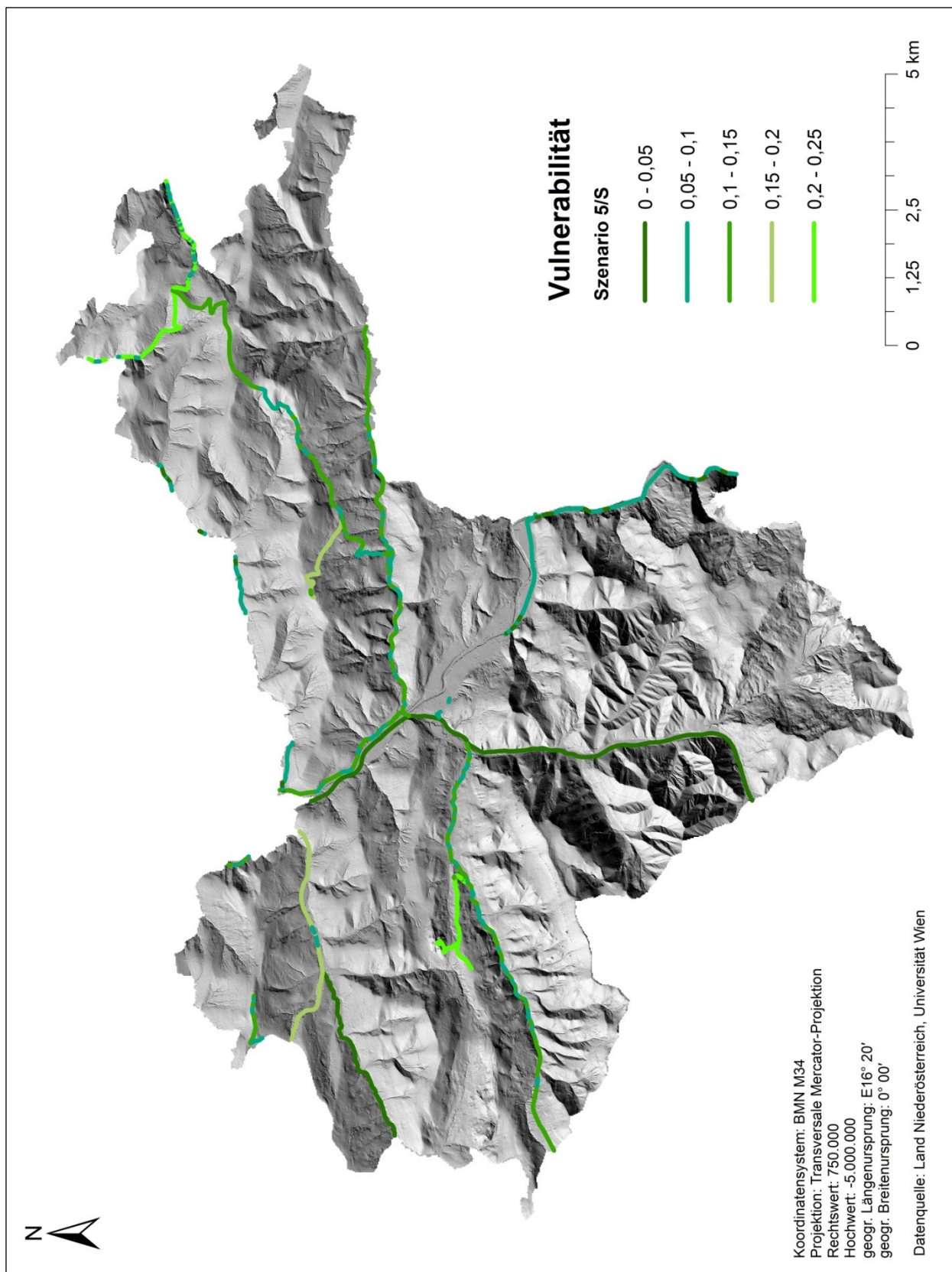


Abb. 42: Vulnerabilität von Straßen für Szenario 5/S (S = separate k_s -Werte für jede Straße), unterteilt in Klassen mit einer Größe von 0,05

Im Szenario 1 rechnete man mit der kleinstmöglichen kinematischen Intensität ($I_{mI}=0$), wenn der Rutschkörper nicht unmittelbar unter der Straße liegt und daher zu keiner Verlagerung des Risikoelements durch die Rutschung erfolgen kann. Somit hat die Intensität nur eine kinetische Komponente, die hier gleichfalls einen kleinen Wert ($I_{kI}=0,19$) annimmt. Für dieses Extremszenario wurde eine Rutschgeschwindigkeit gewählt, welche die untere Grenze der Geschwindigkeitsklasse 4 definiert.

Die Vulnerabilität ist dementsprechend gering mit einem Maximum kleiner als 0,15 (siehe Abb. 43 und Abb. 44). Durch die fehlende kinematische Komponente und durch die geringe Rutschgeschwindigkeit sind nur begrenzte Schäden bei diesem Szenario zu erwarten, die vorwiegend von oberflächlicher Natur sind. Zu solchen oberflächlichen Schäden zählen beispielsweise die rutschungsbedingte Verschmutzung der Fahrbahn und die Verstopfung von Durchlässen.

Bedingt durch die minimale Vulnerabilität sind für das Szenario 1 an vielen Straßenabschnitten und insbesondere an Bundesstraßen mit nahezu keinen Schäden zu rechnen. Erst eine Zunahme der Rutschgeschwindigkeit könnte dazu führen, dass die Vulnerabilität an diesen Stellen trotz fehlender kinematischer Intensitätskomponente wieder steigen kann.

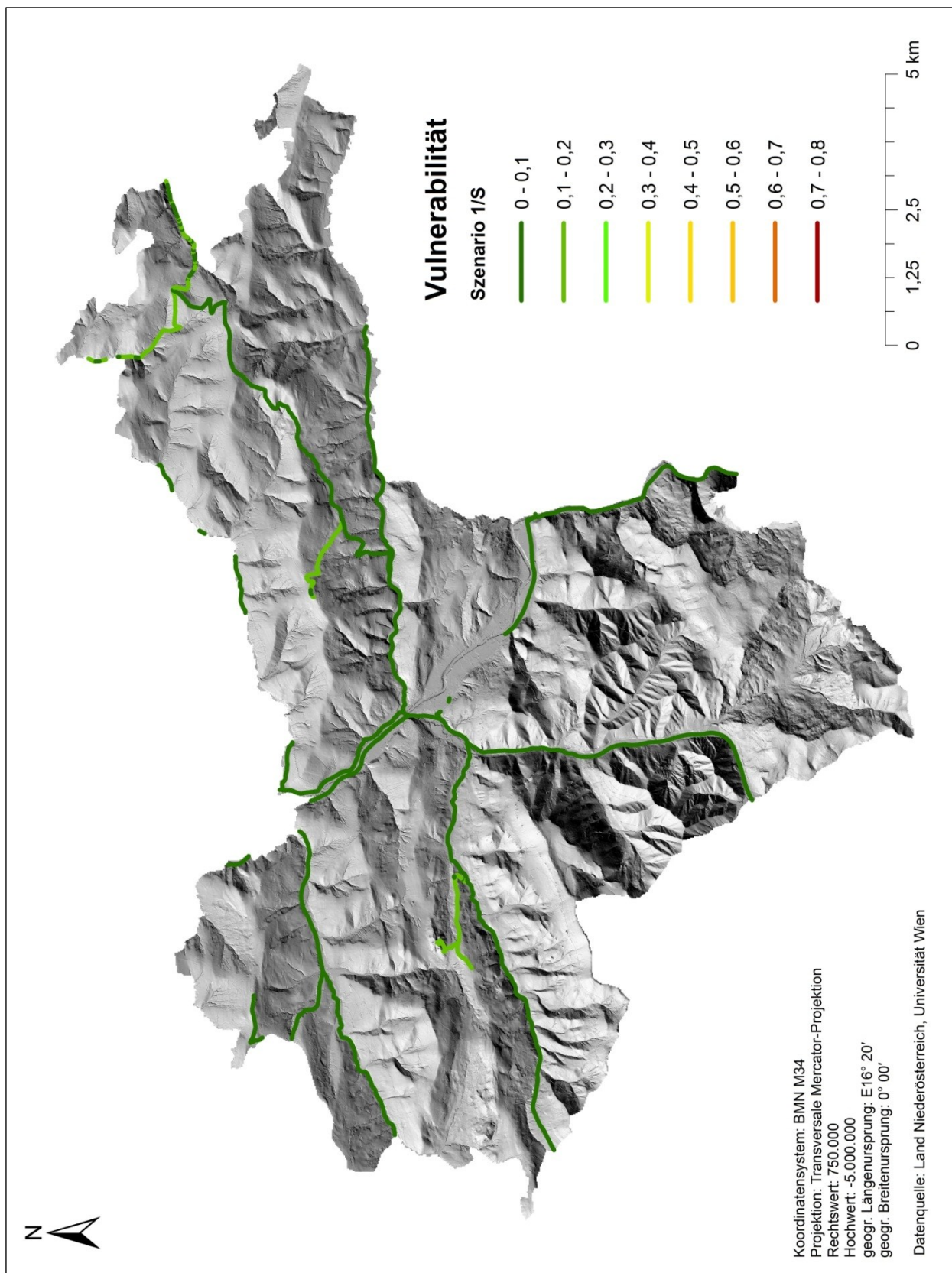


Abb. 43: Vulnerabilität von Straßen für Szenario 1/S (S = separate k_s -Werte für jede Straße)

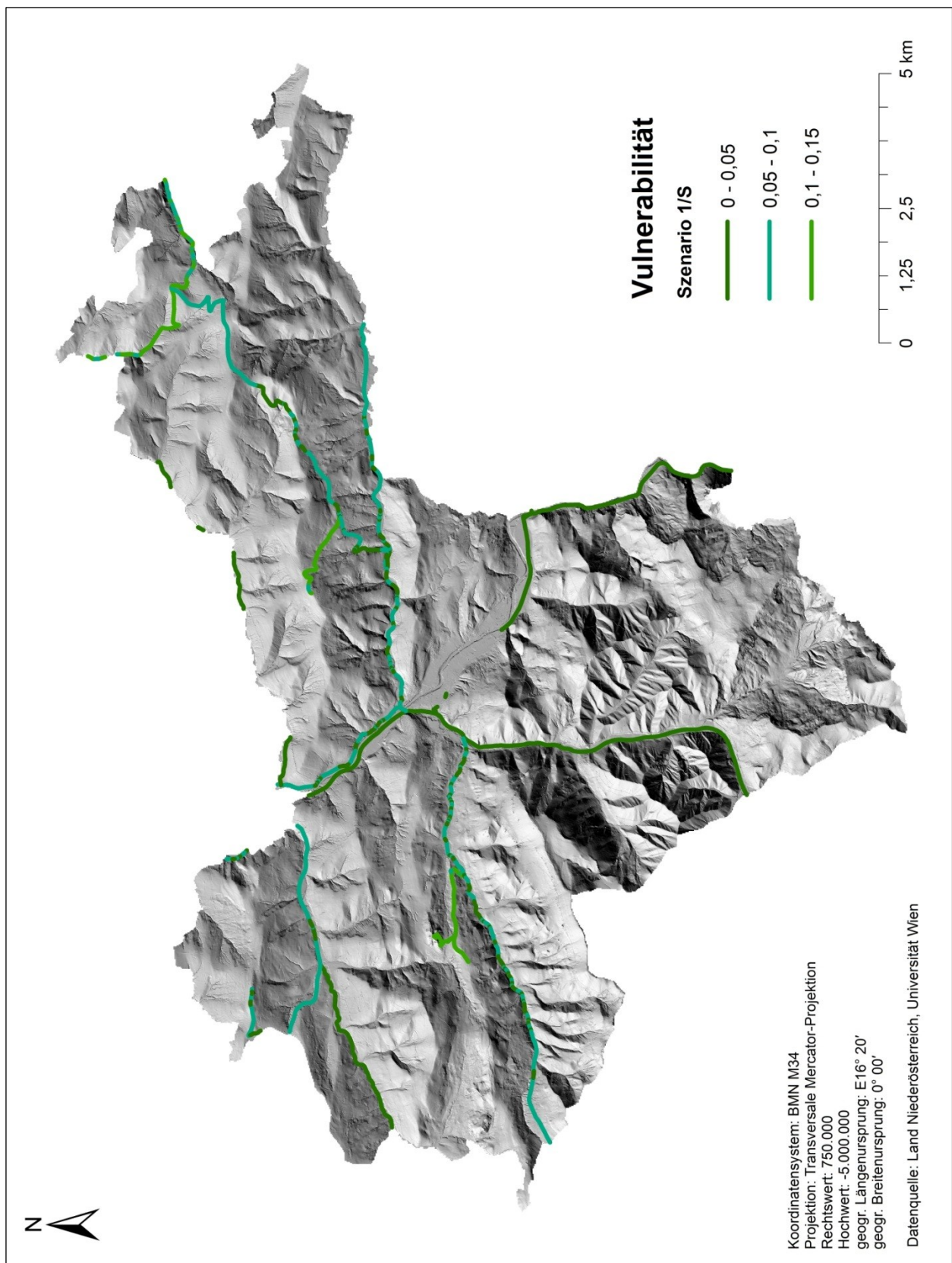


Abb. 44: Vulnerabilität von Straßen für Szenario 1/S (S = separate k_s -Werte für jede Straße), unterteilt in Klassen mit einer Größe von 0,05

5.3.2 Auswahl einzelner Streckenabschnitte

Um die spezifischen Einzelheiten der erstellten Vulnerabilitätskarten untersuchen zu können, werden drei Ausschnitte näher analysiert. Die Analysen erfolgen jeweils für das Szenario mit dem höchsten kinetischen bzw. kinematischen Intensitätsfaktor (Szenario 9), da hier die Differenzen zwischen den Vulnerabilitäten am leichtesten zu erfassen sind.

Im Laufe der Analysen werden die Ergebnisse auf ihre Abhängigkeit von technischen und Umweltfaktoren untersucht. Außerdem soll die Beeinflussung einzelner modellinterner Faktoren anhand konkreter Beispiele diskutiert werden. Die für diese Beispiele ausgewählten Gebiete sollen die Heterogenität des Untersuchungsgebietes sowie der Risikoelemente widerspiegeln.

Auswahl 1: Ortskern Waidhofen an der Ybbs

Das hochrangige Straßennetz im Ortskern von Waidhofen an der Ybbs weist (auch) für das Szenario 9 eine niedrige Vulnerabilität auf (siehe Abb. 45). Zu den Gründen gehören eine vergleichsweise ebene Topographie, die daraus resultierende niedrige Exposition und die niedrige bauliche sowie den Erhaltungszustand betreffende Suszeptibilität von Bundesstraßen, welche hier das Straßennetz zu einem großen Anteil ausmachen.

Die ebenen Bereiche des Gebietes werden von quartären Sedimenten aufgebaut. Die die Täler begrenzenden Hänge bestehen aus Flysch, Gesteinen der Klippenzone sowie in manchen Fällen aus Sedimenten der fluvialen Terrassen. Entlang der B 121 und der L 93 sind Schutzsysteme gegenüber Rutschungen errichtet worden. Viele der restlichen Schutzsysteme haben eine Hauptfunktion als Ufermauern.

Der Großteil der Straßen verläuft in Gebieten mit einer niedrigen Gefährdung. Nur in der Nähe von Hängen kommt es zu mittlerer und seltener zu hoher Gefährdung, wie bei der L 6198 und L 93. Die Maximalwerte der Vulnerabilität erreichen im ausgewählten Gebiet knapp die 0,4-Marke.

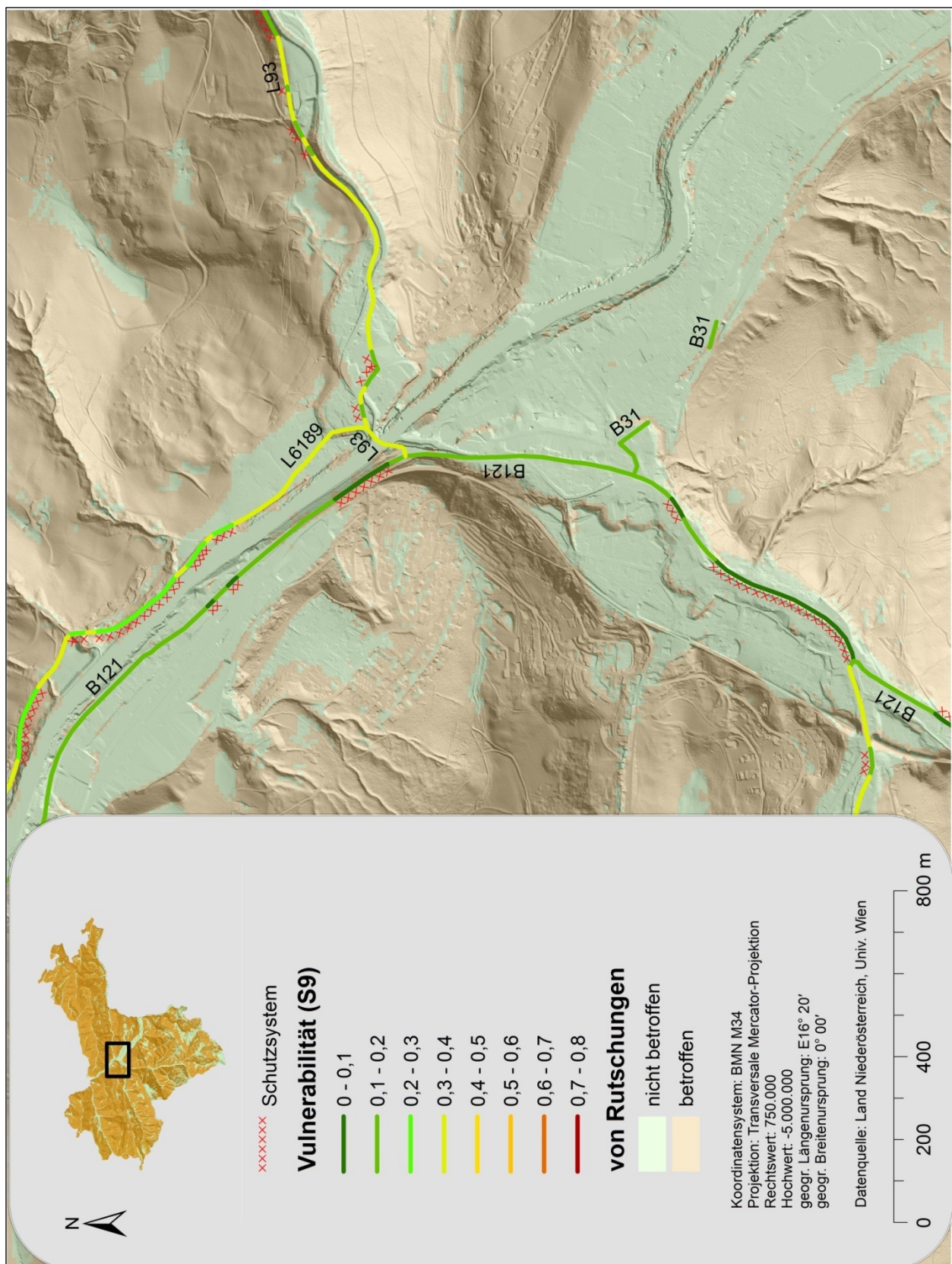


Abb. 45: Vulnerabilität des hochrangigen Straßennetzes im Ortskern von Waidhofen an der Ybbs (Szenario 9)

Auswahl 2: Ortsteil St. Georgen in der Klaus und das Nellingbachtal

Auffällig an diesem Beispiel ist die höhere Vulnerabilität der L 88 im Vergleich zur L 6195, welche im Nellingbachtal Richtung Westen weiterführt (siehe Abb. 46). Die L 88 hat zwar einen niedrigeren den Erhaltungszustand betreffenden Suszeptibilitätsfaktor und eine größere Gesamtlänge, weist aber im Westen einen steilen Abschnitt auf, der durch ein Gebiet mit hoher Gefährdung führt. Es wurde eine Exposition von 58,99 % für die L 88 ermittelt, welche somit beinahe viermal so groß ist wie die von der L 6195.

Die Bedeutung des räumlichen Wirkungsquotienten kommt auch bei der L 6196 besonders gut zum Ausdruck. Diese Straße führt bis zum Ortsteil St. Georgen in der Klaus, welcher auf der flachen Kuppe des Faßbergs liegt. Obwohl am östlichen Ende der Straße die Neigung und damit verbunden auch die Gefährdung abnehmen, hat die Straße einen steilen Verlauf, jedoch zum Großteil außerhalb des Untersuchungsgebietes. Daraus folgt, dass die Straßenlänge und somit das absolute Ausmaß der exponierten Abschnitte nicht in ihrer Gänze erfasst werden konnten. Das hat dazu geführt, dass der räumliche Wirkungsquotient einen niedrigen Wert annahm. Daher sind hier die Ergebnisse besonders kritisch zu bewerten, da unvollständige Daten zu Falschinterpretationen führen könnten.

Eine höhere Vulnerabilität wäre schon aus dem Grund für die L 6196 zu erwarten, da sie in der besonders rutschungsanfälligen Rhenodanubischen Flyschzone liegt und die vorherrschende Landnutzungstypen Äcker und Wiesen sind. Im Unterschied dazu verlaufen die Straßen entlang des Nellingbachs teilweise auf den sanfteren Geländeformen der quartären Sedimente, die hier in einem begrenzten Raum des Tales den Untergrund bilden.

Technische Schutzsysteme wurden vorwiegend entlang der L 6195 errichtet, jedoch häufig in Form von Ufermauern. Die L 6196 besitzt dazu im Gegenteil vorwiegend Stützmauern, die gegenüber Rutschungen errichtet worden sind. Entlang der L 88 kommen auffällig wenige Schutzsysteme vor, welches den lokalen Verhältnissen zuzuschreiben ist. Interessant ist dabei die Diskrepanz zwischen der geringen Anzahl

der Schutzsysteme, die oft als Zeiger für die Gefährdung dient, und der hohen, im GIS berechneten Expositionsanteil der Straße.

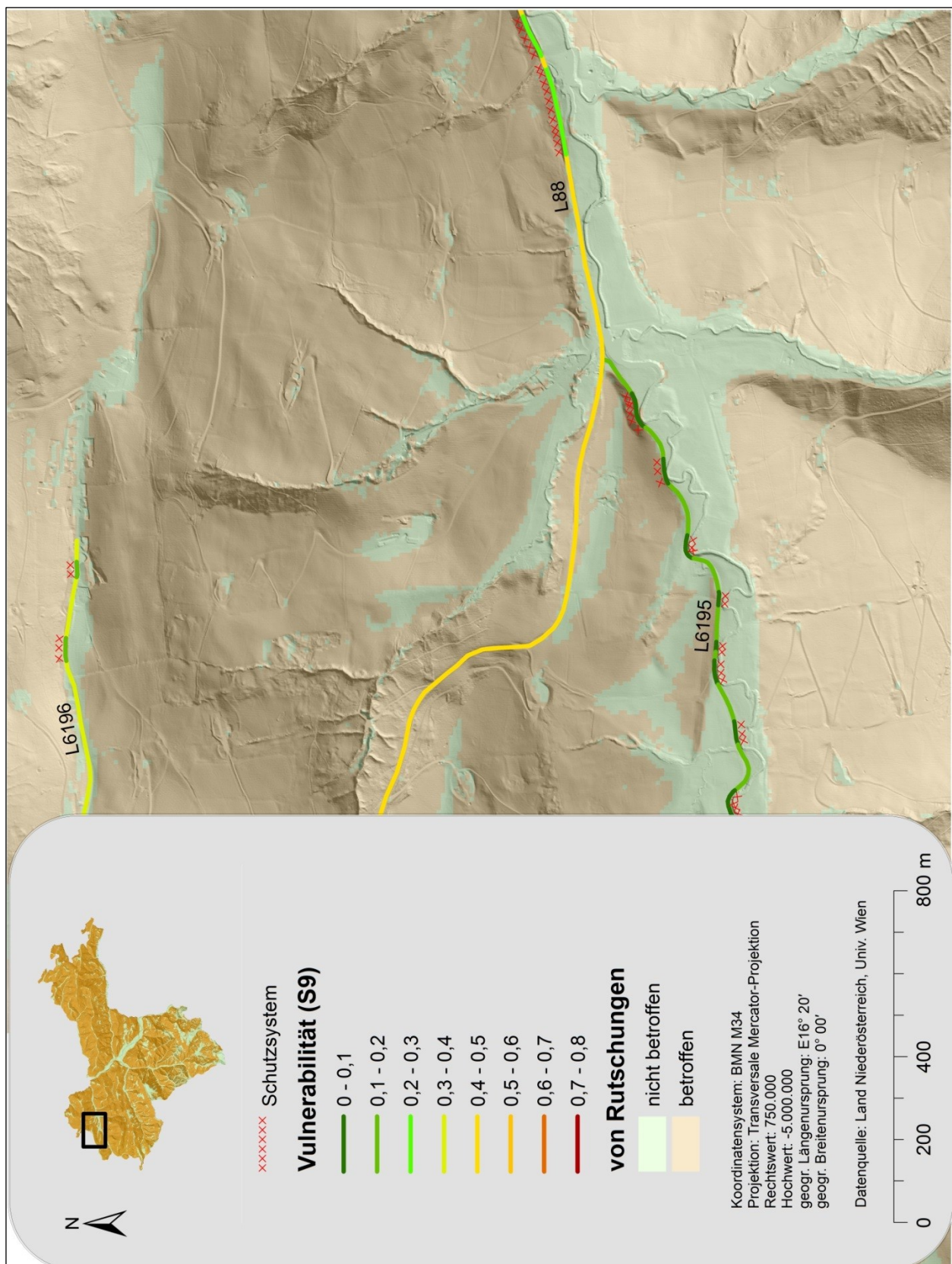


Abb. 46: Vulnerabilität des hochrangigen Straßennetzes im Ortsteil St. Georgen in der Klaus und im Nellingbachtal (Szenario 9)

Auswahl 3: Ortsteil Konradsheim und das Redtenbachtal

In diesem Beispiel wird eine der höchstvulnerablen Straßen, nämlich die L 6194 vorgestellt. Diese Landesstraße weist eine besonders kurze Gesamtlänge auf und liegt zu 88,04 % gegenüber Rutschungen exponiert. Dieser Umstand bedingt einen sehr hohen Wert für die Gesamtintensität, was wiederum in direktem Verhältnis zur Vulnerabilität steht. Auch alle drei Suszeptibilitätsfaktoren nehmen ihren höchstmöglichen Wert für die L 6194 an, wodurch sich der hohe Wert von 0,73 für die Gesamtvulnerabilität zusätzlich erklären lässt.

Die L 6193 weist eine leicht niedrigere Vulnerabilität (für Szenario 9: $V=0,68$) auf, da sie einen niedrigeren räumlichen Wirkungsquotienten hat. Die Suszeptibilität ist an zwei Abschnitten auch von der L 6194 abweichend, da sich zwei technische Schutzsysteme (Stütz- und Wandmauer) entlang der Straße befinden. Außerdem besitzt die Straße auch eine größere Gesamtlänge und eine kleinere Steigung als die L 6194.

Am Ufer entlang des Redtenbaches verläuft die L 93, die in dem gezeigten Ausschnitt eine Vielzahl an technischen Schutzsystemen aufweist. Nach Expertenaussagen ereigneten sich entlang dieses Straßenabschnitts die meisten Rutschungen (NÖ STRASSENABTEILUNG 6 2015). Dennoch ist die Gesamtvulnerabilität (an Stellen ohne technische Schutzsysteme) mit einem Wert von knapp unter 0,4 relativ gering im Vergleich zu den vorher diskutierten Straßen des untersuchten Gebietes. Der Grund dafür liegt in der sehr großen Länge der L 93, da sie das gesamte Gebiet von Waidhofen an der Ybbs von Osten nach Westen durchkreuzt. Obwohl die absolute Länge der exponierten Abschnitte hoch ist, ergibt diese in Relation zur Gesamtlänge trotzdem einen niedrigen räumlichen Wirkungsquotienten, der wiederum zu verminderten Vulnerabilitätswerten führt.

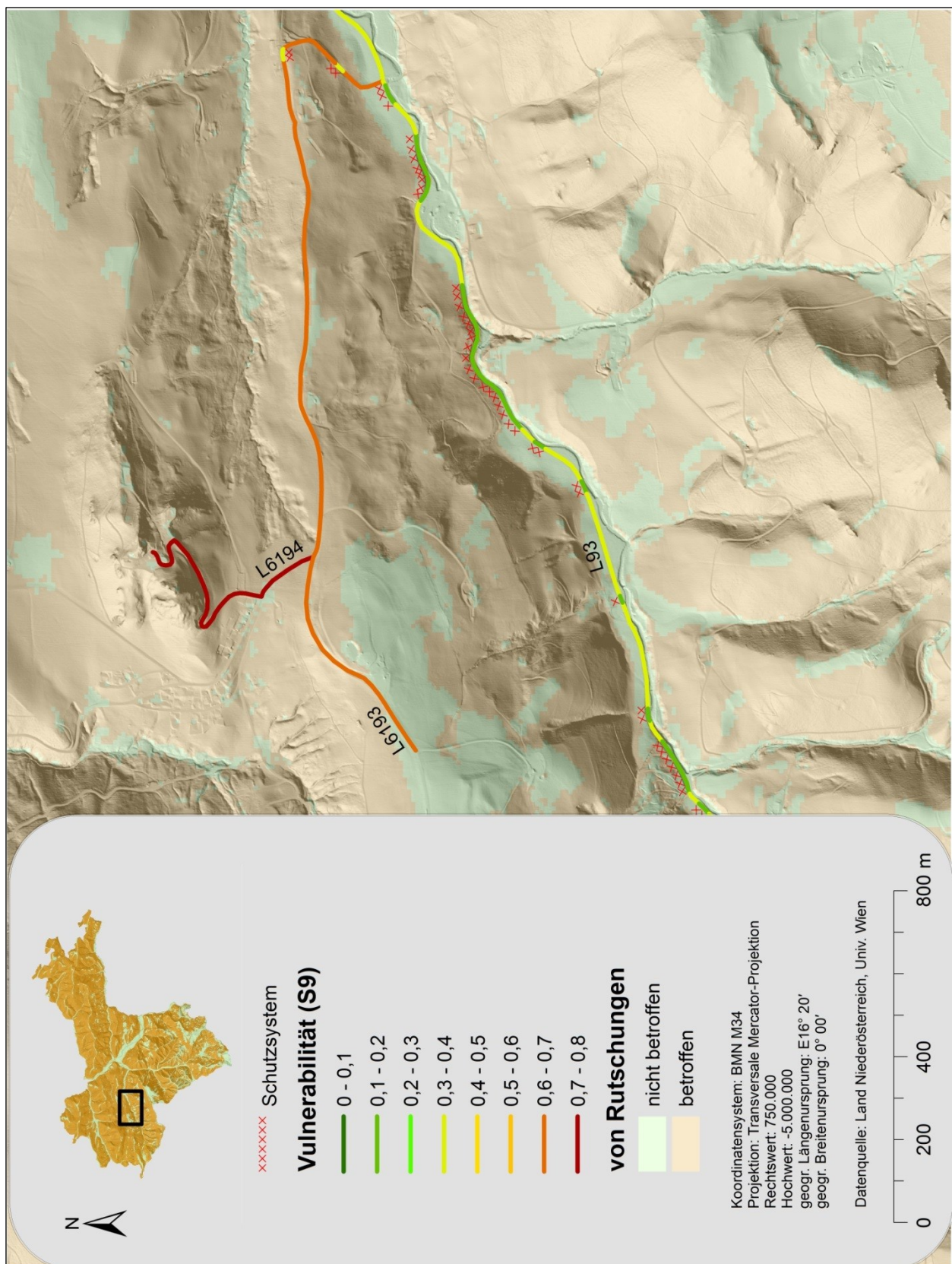


Abb. 47: Vulnerabilität des hochrangigen Straßennetzes im Ortsteil Konradsheim und im Redtenbachtal (Szenario 9)

6 Diskussion

6.1 Erkenntnisse über den Forschungsstand

Die physische Vulnerabilität von Straßen kann mithilfe qualitativer, semiquantitativer und quantitativer Modelle bestimmt werden. Des Öfteren binden diese Modelle den Aspekt der Gefahr mit ein, indem die Vulnerabilität intensitätsabhängige Werte annimmt. Die Intensität der Gefahr wird dabei von Autor zu Autor unterschiedlich definiert. In den meisten Fällen wird das Volumen der Rutschung für die Bestimmung der Intensität herangezogen. Gelegentlich wird die Rutschgeschwindigkeit als weiterer Faktor berücksichtigt. Seltener werden auch andere Gefahrencharakteristika, wie die Rutschfläche oder die Auslaufdistanz, von den Wissenschaftlern als kennzeichnend für die Intensität verwendet.

Bis zum jetzigen Zeitpunkt hat sich keine wissenschaftliche Studie explizit mit der physischen Vulnerabilität von Straßen gegenüber flachgründigen Rutschungen auseinandergesetzt. Auch konnte keine einheitliche Methodologie für die Analyse der physischen Vulnerabilität von Strukturen ausgearbeitet werden. Die einschlägigen Publikationen haben aber insgesamt einen großen Beitrag zum Verständnis der steuernden Faktoren der Vulnerabilität von Straßen gegenüber Rutschungen geleistet. Es wurden Methoden ausgearbeitet, anhand derer Schäden der gebauten Verkehrsinfrastruktur zur Vulnerabilitätsbewertung quantifiziert bzw. klassifiziert werden können (siehe Kap. 3.3). Viele dieser Methoden drücken die Abhängigkeit der Vulnerabilität von inhärenten, materialbezogenen bzw. von externen, gefahrengesteuerten Faktoren in qualitativer oder quantitativer Weise aus.

Zu den inhärenten Faktoren zählen vorwiegend die Bedeutung und die Materialeigenschaften einer Straße, welche das Schadenpotenzial und die Schadenhöhe indirekt bestimmen. Denn je bedeutender bzw. besser ausgebaut eine Straße ist, desto höher sind die Kosten, die durch ein rutschungsbedingtes Schadenereignis auftreten können. Die Schäden, entweder materieller oder immaterieller Natur, stellen dabei direkte oder indirekte Folgen einer Rutschung dar.

Als weitere Faktoren, die die inhärente Widerstandsfähigkeit von Straßen gegenüber Rutschungen beeinflussen können, dienen bauliche Maßnahmen, wie Stützmauern, oder auch den Erhaltungszustand betreffende materielle und immaterielle Mittel. Diese konnten in der vorliegenden Studie erfolgreich für die Vulnerabilitätsberechnung herangezogen werden. Den Erhaltungszustand betreffende Faktoren waren dabei die einzigen indirekten – also aus immateriellen Eigenschaften abgeleiteten – technischen Parameter, die Anwendung fanden.

Mithilfe eines quantitativen Vulnerabilitätsmodells, das auf dem progressiven Rahmenkonzept von UZIELLI et al. (2008) beruht, konnte der Einfluss einzelner Faktoren, die die Vulnerabilität spezifisch für Straßen bedingen, näher untersucht werden. Dafür wurden kleinere Änderungen am ursprünglichen Modell vorgenommen, um dieses besser an die Fragestellung anpassen zu können. Es wurden anhand eines Fallbeispiels Erkenntnisse über die Fähigkeiten des vorgeschlagenen Modells gewonnen, die im Folgenden diskutiert werden.

6.2 Erkenntnisse aus der Umsetzung des Modells

6.2.1 Vorteile des Modells

Das Vulnerabilitätskonzept von UZIELLI et al. (2008) hat sich in seiner Form als ein flexibles und auf einer regionalen Ebene anwendbares Modell bewährt. Die Anpassung des Modells an die spezifische Fragestellung der Analyse konnte ohne größere Schwierigkeiten durchgeführt werden. Da das Konzept bisher nur für die Ermittlung der Vulnerabilität von Gebäuden bzw. Personen umgesetzt wurde, war eine Adaptierung des Modells für die Vulnerabilitätsanalyse von Straßen nötig gewesen (UZIELLI et al. 2008, KAYNIA et al. 2008).

Linienhafte Objekte, wie im hiesigen Fall Straßen, weisen bestimmte Charakteristika auf, die von Gebäuden verschieden sind. Sie haben einen Einfluss sowohl auf die Intensitäts- als auch auf die Suszeptibilitätskomponente der Vulnerabilität. Als wichtiger Unterschied zu anderen Bauwerken ist die Geometrie von Straßen zu nennen, die eine lokale Abgrenzung des Objekts wesentlich erschwert. Im Gegenteil zu Gebäuden haben Straßen keine Innenräume und vor allem keine vertikale

Komponente (abgesehen vom inneren Aufbau des Straßenkörpers und von eventuellen technischen Schutzsystemen entlang von Straßen), was eine Vulnerabilitätsanalyse wiederum erleichtern kann.

Im adaptierten Vulnerabilitätsmodell von UZIELLI et al. (2008) konnten solche Eigenheiten von Straßen durch die Beifügung neuer Suszeptibilitätsfaktoren zum Ausdruck gebracht werden. Es wurde ein Suszeptibilitätsfaktor für technische Schutzsysteme eingeführt, da diese einen stark mindernden Effekt auf die Höhe der Vulnerabilität ausüben können. Auch der Erhaltungszustand, ein wichtiger Faktor bei allen Bauwerken, konnte indirekt durch die Bereisungshäufigkeiten des Straßendienstes bewertet werden. Dafür musste dementsprechend der Suszeptibilitätsfaktor des Erhaltungszustands von Gebäuden für Straßen angepasst werden.

Eine große Stärke des Modells von UZIELLI et al. (2008) ist die umfassende Intensitätsanalyse, wodurch die Vulnerabilität mit der lokalspezifischen Gefahreigenschaften in Verbindung gebracht werden kann. Die Ermittlung der Intensität stellt einer der wichtigsten Schritte in Richtung quantitative Analyse dar, weshalb auch einen Schwerpunkt im Modell auf ihr gelegt wird.

Für die Berechnung der Intensität werden im Gegensatz zu den meisten bisherigen Modellen mehrere Komponente der Gefahr herangezogen, was die Möglichkeit der besseren Anpassung des Modells an lokale Verhältnisse mit sich bringen soll. Dabei werden relativ leicht ermittelbare Parameter, nämlich die Geschwindigkeit und die Verlagerungsdistanz von Rutschungen, verwendet. Der Intensitätswert kombiniert demnach die kinetische mit der kinematischen Komponente, wodurch eine genauere Abschätzung der Art bzw. der Höhe der Schäden ermöglicht wird. Durch einen Gewichtungsfaktor kann die Bedeutung der kinetischen sowie der kinematischen Komponente zusätzlich bestimmt werden, wodurch noch besserer Ergebnisse erzielt werden können.

Mithilfe des räumlichen Wirkungsquotienten kann zudem die Intensität elementenweise oder nach Gruppen von Risikoelementen erfasst werden, was bei früheren Modellen, die eine einheitliche Intensität über ein gesamtes Untersuchungsgebiet ausgewiesen hatten, nicht der Fall war. Dadurch kommt eine standortabhängige Differenzierung der Intensität unter den Risikoelementen zu

Stände, die zu großen Vulnerabilitätsunterschieden, sogar innerhalb einer Klasse von Risikoelementen, führen kann.

Das Modell von UZIELLI et al. (2008) ist also aus vielen Gründen genauer und beruht mehr auf empirischen bzw. analytischen Werten als seine Vorgänger, wodurch ein hohes Maß an Objektivität erzielt werden kann. Das Modell kann dazu noch mit vielen, zum Teil austauschbaren Parametern umgehen und liefert dementsprechend räumlich höher aufgelöste bzw. besser differenzierbare Ergebnisse als traditionelle Modelle. Diese große Flexibilität des Modells lässt sich gut am Beispiel des neu eingeführten Suszeptibilitätsfaktors der technischen Schutzsysteme veranschaulichen, da er sich ohne Probleme ins Modell integrieren ließ und zu plausibleren Vulnerabilitätswerten führte.

Die Ergebnisse der Fallstudie bestätigen also die Forschungsthese, dass das quantitative Vulnerabilitätsmodell von UZIELLI et al. (2008) nicht nur für Gebäude und Personen sondern auch für das Straßennetz auf regionaler Ebene anwendbar ist. Die Erfassung der physischen Vulnerabilität von Straßen mithilfe des Modells kann bei ausreichender Qualität sowie Quantität von Daten zuverlässig erfolgen. Die für die einzelnen Intensitätsszenarien errechneten Vulnerabilitätswerte sind glaubhaft und spiegeln die lokalen Verhältnisse gut wider.

Die angepasste Methodologie lässt sich außerdem leicht auf andere Studien mit einem unterschiedlichen Untersuchungsgebiet übertragen, insofern eine ausreichende Menge an Daten mit einer hohen Qualität zur Verfügung stehen. Die Rechenschritte sind darüber hinaus leicht nachvollziehbar und liefern jeweils klare Werte, die sich leicht interpretieren lassen.

Obwohl sämtliche gefahrenbezogene Daten zur Intensität zwecks der Vulnerabilitätsberechnung benötigt werden, verlangt das Modell keine zeitlichen Gefahreninformationen. Demnach reicht eine Kenntnis über die räumlichen Auftretenswahrscheinlichkeiten von Rutschungen für die Berechnung der Intensitätskomponente der Gesamtvulnerabilität.

Durch das Miteinbeziehen der Gefahrenintensität in den Prozess der Vulnerabilitätsbewertung konnte ein quantitatives Modell erstellt werden, das gefahren- und standortspezifische Werte für die Risikoelemente aufweist. Somit

eignet sich das Modell bestens für die Ermittlung der Vulnerabilität in (semi-)quantitativen Risikoanalysen und es könnte einen bedeutenden Antrieb für Fortschritte in der Risikoforschung geben.

Durch die Vulnerabilitätsanalyse von Straßen mithilfe des angepassten Modells von UZIELLI et al. (2008) konnten außerdem neue Erkenntnisse über die Interaktion (flachgründiger) Rutschungen mit Verkehrsbauwerken gewonnen werden. Die Ergebnisse zeigen einen erheblichen Informationsgewinn gegenüber traditionellen Ansätzen, weil die Gefahrenkomponenten der Vulnerabilität im Modell gleichrangig wie die inhärenten Eigenschaften (Suszeptibilität) behandelt werden.

In den bisherigen Studien stellte sich meistens die Bauart von Straßen, gegebenenfalls indirekt, durch die Bedeutung bzw. Straßenkategorie, ausgedrückt, als wichtigster steuernder Faktor für die Vulnerabilität heraus. Im Gegensatz dazu spielt für Straßen der Fallstudie das Baumaterial eine geringere Rolle; eher die Höhe der Gefahrenintensität scheint den größten Einfluss auf die Vulnerabilität zu haben.

6.2.2 Beschränkungen des Modells

Die größte Schwierigkeit bei der Anwendung des Modells war die Akquisition von Daten für die Ermittlung der Intensität. Für die Bestimmung des kinetischen und des kinematischen Intensitätsfaktors mussten Gefahrenparameter (Rutschgeschwindigkeit, Verlagerungsdistanz) verwendet werden, die nur durch zahlreiche Feldmessungen und multitemporale Analysen gewonnen werden können. Solche Methoden sind jedoch finanziell und zeitlich sehr aufwendig und können deshalb nur selten vorgenommen werden. Außerdem sind diese Methoden für die regionale Ebene nur beschränkt anwendbar, da sie einen sehr hohen Rechenaufwand mit sich bringen.

Eine andere Möglichkeit, zu den nötigen Informationen über die Intensitätsparameter zu gelangen, ist die Verwendung von statistischen Werten aus einer Datenbank. Der Gebrauch von statistischen Werten wirkt sich zwar homogenisierend auf die Ergebnisse aus, kann aber bei Analysen auf regionaler Ebene die einzige Option für den Erwerb standortspezifischer Gefahrendaten sein.

Die Vielzahl an gefahrenrelevanten Aufzeichnungen für das Untersuchungsgebiet, die dank des Baugrundkatasters und des MoNoe-Berichts zur Verfügung stand, konnte dennoch keine Informationen über die benötigten zwei Parameter, die Rutschgeschwindigkeit und die Verlagerungsdistanz, liefern. Somit musste der Verfasser der vorliegenden Arbeit auf hypothetische Werte zurückgreifen, die einerseits für das Untersuchungsgebiet und andererseits für den gebietsspezifischen Rutschungstyp als charakteristisch bezeichnet werden können. Obwohl das Modell äußerst flexibel ist, ist es nicht möglich, die Intensitätsfaktoren – im Gegensatz zu den Suszeptibilitätsfaktoren – auszuwählen. Die Intensitätsfaktoren können nicht durch andere Parameter, wie das Volumen oder die Rutschfläche, ersetzt werden.

Für die Bestimmung der Rutschgeschwindigkeit, die für die Berechnung des kinematischen Intensitätsfaktors benötigt wird, mussten dementsprechend Annahmen getroffen werden. Es wurden drei Szenarien (I_{k1} , I_{k2} , I_{k3}) mit unterschiedlichen Rutschgeschwindigkeiten der Geschwindigkeitsklasse 4 von CRUDEN und VARNES (1996) aufgestellt, um die Veränderung des kinematischen Intensitätsfaktors besser veranschaulichen können. Diese Szenarien können sich nur hypothetisch ereignen und stützen sich in keiner Weise auf Daten, welche im Untersuchungsgebiet erhoben wurden.

Bei einem Szenario wurde der identische Geschwindigkeitswert wie in der Studie von KAYNIA et al. (2008) verwendet, der allerdings von den Autoren der Studie auch nur geschätzt wurde. Dieser Wert konnte außerdem nur unter Vorbehalt für das Untersuchungsgebiet herangezogen werden, da die geografischen Gegebenheiten in Waidhofen an der Ybbs zum Teil von jenen des Untersuchungsgebiets in der Studie von KAYNIA et al. (2008) abweichen.

Noch problematischer stellte sich die Ermittlung des kinematischen Intensitätsfaktors heraus, da die Verlagerungsdistanz bei jeder einzelnen Rutschung, abhängig von ihrer relativen Lage zum Straßenkörper, unterschiedliche Werte annehmen kann. Da ein durchschnittlicher Wert für ein regionales Straßennetz kaum Aussagekraft hätte und nur schwer zu eruieren wäre, wurden hier auch drei potenzielle Szenarien für die Ausprägung des kinematischen Intensitätsfaktors (I_{m1} , I_{m2} , I_{m3}) berechnet. Diese Szenarien rechnen mit zwei Extremwerten und mit einem durchschnittlichen Wert der Verlagerungsdistanz. Somit werden wiederum einheitliche Werte für die gesamte

Fläche des Untersuchungsgebietes ausgewiesen, wodurch lokale Unterschiede in der Ausprägung des Faktors nicht beachtet werden können.

Aussagekräftigere Informationen über die beiden Parameter bedürften einer genauen Untersuchung jedes einzelnen Rutschkörpers, was auf regionaler Ebene einen unverhältnismäßig hohen Aufwand erfordern würde. Denn je nach Topografie und Untergrundverhältnissen kann die Rutschgeschwindigkeit kleinräumig stark variieren, was eine Verwendung einheitlicher Werte infrage stellt. Auch die relative Lage des Rutschkörpers zur Straße kann nur durch kleinräumige Analysen, bei welchen beispielsweise die Rutschfläche bestimmt wird, ermittelt werden.

Die Relevanzfaktoren, welche der Gewichtung der Intensitätsfaktoren dienen, werden nach Einschätzung des Anwenders bestimmt. Dies erfordert eine hohe Vertrautheit einerseits mit der Thematik und andererseits mit den lokalen Charakteristika der Gefahr. Zur Ermittlung von Relevanzfaktoren können Inventare und Schadensberichte analysiert bzw. Feldstudien durchgeführt werden. Dennoch erfolgt die Gewichtung auf einer überwiegend subjektiven Basis.

Möglicherweise die innovativste, aber gleichzeitig auch die kritischste Intensitätskomponente ist der räumliche Wirkungsquotient. Er übt einen großen Einfluss auf den Intensitätswert aus, da durch ihn die Exposition der Risikoelemente zur Gefahr als zusätzlicher Gewichtungsfaktor in die Intensitätsformel eingebunden wird.

Die Höhe des Quotienten wird durch die Definition der Gesamtfläche eines Risikoelements beeinflusst. Bedingt durch ihre Geometrie und räumliche Ausdehnung ist bei Straßen – im Unterschied zu Gebäuden – eine Abgrenzung der Gesamtfläche besonders problematisch. In der vorliegenden Fallstudie wurden Straßen nach ihrer Straßenummerierung unterteilt und auf ihre Vulnerabilität analysiert. Auch die Berechnung der Gesamtfläche folgte diesem Prinzip, sodass für längere Straßen eine höhere Gesamtfläche als für kürzere Straßen errechnet wurde.

Ein entscheidendes Manko dieser Methode ist, dass längere Straßen eine niedrigere Exposition als kürzere aufweisen können, während sie auf einer insgesamt größeren Fläche von Rutschungen gefährdet sind. Die subjektive Definition bzw. Abgrenzung von einzelnen Risikoelementen bringt aus diesen Gründen eine Unsicherheit ins

Modell, die für Straßen und andere linienhafte Objekte besonders hoch ausfallen kann.

Für die Berechnung der Exposition mussten die in Vektorform vorliegenden Straßen gerastert werden. Die Zellengröße bei Rasterdaten hängt in erster Linie von der Auflösung der Daten ab und ist ausschlaggebend für die Qualität der Analyse. Da viele Daten aufgrund methodologisch-technischer Beschränkungen in einer kleineren Auflösung als andere Datensätze vorliegen, ist man gezwungen, die räumliche Auflösung der Analyse an den Datensatz mit der kleinsten Auflösung anzupassen. Nur bei einer gleichen Rasterauflösung ist eine rechnerische Kombination von Daten möglich.

Das Straßennetz hätte zwar in einer Auflösung von 1 x 1 Meter gerastert werden können, aber da die Auflösung der Gefahrenhinweiskarte eine Auflösung von 10 x 10 Meter aufwies, mussten die Rasterdaten der Straßen an diese Auflösung angepasst werden. Die kleinere Auflösung bringt jedoch eine Verminderung der Genauigkeit mit sich, die die Qualität der Ergebnisse leicht beeinträchtigen könnte.

Der lineare Charakter von Straßen verursachte Schwierigkeiten bei der Datenverarbeitung im GIS, wo Berechnungen ausschließlich mittels Rasterwerten erfolgen. Der Grund dafür ist, dass die Rasterzellen der gerasterten Straßen im Gegensatz zu den ursprünglichen Vektordaten nicht dem exakten Straßenverlauf folgen können. Es kommt stellenweise zu – bis zu mehreren Metern – großen Abweichungen der Rasterzellen von der Fahrbahnmitte. Diese Tatsache limitiert die Aussagekraft der Ergebnisse mit der Zunahme des Maßstabs.

Auch die Gefährdung betreffend traten Probleme auf, die nur zum Teil gelöst werden konnten. Ein solches Problem war die Auswahl der Gefährdungsklassen für die Erstellung der Expositionskarte. Bereits die Einteilung der Gefahrenhinweiskarte in Gefährdungsklassen hängt stark vom Verwendungszweck und somit von der subjektiven Einschätzung des Bearbeiters ab. Zur Abgrenzung der Flächen, die von Rutschungen betroffen sind, konnten jedoch ausschließlich die vorhandenen Gefährdungsklassen herangezogen werden, da sie die sichersten Informationsquellen für die Ermittlung der räumlichen Verbreitung von Rutschungen darstellten.

Für die Erstellung der Expositions Karte wurden die mittleren und hohen Gefährdungsklassen als von Rutschungen betroffene Klassen ausgewiesen. Flächen mit einer niedrigen Gefährdung wurden „als von Rutschungen nicht betroffen“ (also als „nicht exponiert“) ausgewiesen. Die Entscheidung, welche Gefährdungsklassen für die Exposition relevant sind und welche nicht, erfolgte auf subjektiver Basis nach wissenschaftlicher Abwägung des Autors.

Von der auf diese Weise erstellten Expositions Karte können keine Informationen zur exakten Lage von Rutschflächen abgeleitet werden. Sie dient lediglich der Abgrenzung von Flächen mit einem hohen Rutschungspotenzial von jenen mit einer geringeren Auftretenswahrscheinlichkeit von Rutschungen. Demnach kann aber die Möglichkeit nicht völlig ausgeschlossen werden, dass eine Rutschung außerhalb der gefährdeten Bereiche erfolgen kann. Außerdem werden bei der Ausweisung von exponierten Straßenabschnitten alle Bereiche, die potenziell von Rutschungen betroffen sein können, erfasst. Beispielsweise können als „nicht exponiert“ ausgewiesene Straßenabschnitte durch Rutschungen, die ihren Ursprung nicht unmittelbar im Bereich des Verkehrsbauwerkes haben, beschädigt werden.

Die Auswahl und die Bestimmung der Suszeptibilitätsfaktoren erfolgten auf der Basis von Expertenmeinungen. Ein besonders großes, aber altbekanntes Problem stellte dabei die subjektive Einschätzung der Ausprägung und der Bedeutung der einzelnen Faktoren dar. Universell anwendbare Methodologien für die Bestimmung inhärenter Eigenschaften von Straßen in Bezug auf Rutschungen fehlen bis zum jetzigen Zeitpunkt.

Demnach beruhen die Werte einzelner Suszeptibilitätsfaktoren auf Annahmen, die zum Teil aus der Forschungsliteratur stammen. Die Komplexität der strukturellen Verhaltensweise von Verkehrsbauwerken bei Rutschungen ist so hoch, dass sogar analytische Methoden keine allgemeingültigen Ergebnisse liefern können. Beispielsweise leistet die Bauart von Straßen je nach Untersuchungsgebiet einen unterschiedlich hohen Beitrag zur Vulnerabilität, da die Baustandards von Region zu Region verschieden sind. In Waidhofen an der Ybbs weisen Straßen eine sehr hohe bauliche Qualität auf und daher können die baulichen Suszeptibilitätswerte der einzelnen Straßenkategorien für sie nicht direkt von anderen Regionen übernommen werden.

Dem Suszeptibilitätsfaktor betreffend die technischen Schutzsysteme wurde in der Forschung bisher wenig Beachtung geschenkt, obwohl er einen wesentlichen Einfluss auf die Vulnerabilität ausübt. Im Unterschied zu dem den baulichen Zustand bzw. den Erhaltungszustand betreffenden Suszeptibilitätsfaktor konnte der Suszeptibilitätsfaktor betreffend die technischen Schutzsysteme verhältnismäßig objektiv erfasst werden. So konnten bestimmte Eigenschaften von technischen Schutzsystemen, die eine große Bedeutung für die Effektivität der Bauwerke gegenüber Rutschungen haben, in die Analyse miteinbezogen werden. Bei der Berechnung der Suszeptibilität fand keine Differenzierung nach Art und Material statt. Daraus folgend wurden alle Schutzsysteme, unabhängig von ihrer zugeteilten Funktion, als gleichwertig robust gegenüber flachgründigen Rutschungen ausgewiesen. Das entspricht jedoch nicht immer der Realität und die diesbezüglichen Ergebnisse sind daher rein hypothetisch.

Bei der Digitalisierung der technischen Schutzsysteme konnte das Problem, dass des Öfteren mehrere technische Schutzsysteme an einer Stelle vorkamen, nicht überwunden werden. Durch die Art der GIS-Analyse konnte keine Möglichkeit gefunden werden, eine lokal begrenzte Mehrzahl an Schutzsystemen im Rahmen des Modells zum Ausdruck zu bringen. Die Überlegung einer Differenzierung in hang- und talseitige Schutzsysteme wurde letztendlich verworfen, weil ihr vulnerabilitätsmindernder Effekt nicht von der Lage des Schutzsystems, sondern von der Lage des Rutschkörpers in Relation zum Bauwerk abhängt.

Für die Bestimmung des Erhaltungszustands von Straßen wurde als Indikator die Bereisungshäufigkeit der Straßen durch den Straßendienst eingeführt. Obwohl ein logischer Zusammenhang zwischen diesen beiden Faktoren besteht, basiert eine solche Vorgehensweise größtenteils auf Hypothesen. Theoretisch könnten Straßen gelegentlich einen schlechten Erhaltungszustand trotz hoher Bereisungshäufigkeit aufweisen. Nach Einschätzung der befragten Experten (siehe dazu Fragebogen im Anhang II) ist Letzteres jedoch untypisch für das Untersuchungsgebiet. In anderen Regionen, die Gegenstand von Vulnerabilitätsanalysen sind, mag diese Kausalität nicht bestehen und somit ist die in dieser Arbeit vorgeschlagene Methode nur unter bestimmten Voraussetzungen einsetzbar.

Eine Art Gewichtung erfolgte auch bei den Suszeptibilitätsfaktoren, die zum Teil wegen der Konstruktionsweise des Modells nötig war. Eine Schwäche des Modells ist die Suszeptibilitätsgleichung, wo die einzelnen Faktoren den Extremwert von 1, dem die höchste Suszeptibilität zugeordnet wird, nur unter bestimmten Bedingungen annehmen sollten. Wenn nämlich ein einziger Faktor diesen Wert aufweist, kommt es zu dem absurden Fall, dass für die Gesamtsuszeptibilität – ungeachtet der Werte anderer Suszeptibilitätsfaktoren – sofort ein maximaler Wert von 1 errechnet wird. Das würde in der Praxis bedeuten, dass die inhärente Komponente der Vulnerabilitätsgleichung die Gesamtvulnerabilität größtmöglich verstärkt, obwohl die Suszeptibilität nur eines einzigen Faktors maximal ist. Andere Faktoren, die eine ebenso wichtige Rolle für die Gesamtsuszeptibilität spielen könnten, würden dadurch automatisch außer Acht gelassen. Dieser Fall wird durch das folgende Beispiel verdeutlicht, das mit einem maximalen Suszeptibilitätswert für den baulichen Suszeptibilitätsfaktor rechnet:

(6.1)

$$SUS = 1 - (1 - [sf_BAU]) * (1 - [sf_SCH]) * (1 - [sf_ERH])$$

wobei

SUS ... Suszeptibilitätswert

sf_BAU... baulicher Suszeptibilitätsfaktor

sf_SCH... Suszeptibilitätsfaktor des technischen Schutzsystems

sf_ERH... Suszeptibilitätsfaktor des Erhaltungszustands

und falls

$$sf_BAU = 1$$

$$sf_SCH = 0,1$$

$$sf_ERH = 0,3$$

dann

$$SUS = 1 - (1 - [1]) * (1 - [0,1]) * (1 - [0,3])$$

$$SUS = 1 - (0) * (0,9) * (0,7)$$

$$SUS = 1$$

Die Gewichtung der Suszeptibilitätsfaktoren durch die Vergabe eines kleineren Intervalls für die möglichen Werte zeugt jedoch von der hohen Flexibilität des Modells. Doch die Möglichkeit einer objektiven Gewichtung bleibt dabei auch beschränkt, da dafür eine derart große Menge an Informationen nötig wäre, die im Rahmen der meisten Studien aus Ressourcengründen nicht ermittelt werden kann.

7 Perspektiven

Das Rahmenkonzept von UZIELLI et al. (2008) stellt einen wichtigen Schritt in Richtung einer einheitlichen quantitativen Methodologie zur Ermittlung der physischen Vulnerabilität gegenüber (flachgründigen) Rutschungen dar. Um die Verwendbarkeit des Konzepts insbesondere für Straßen verbessern zu können, werden im Folgenden einige Empfehlungen diesbezüglich abgegeben.

Eine große Stärke des Konzepts besteht in der Einbeziehung der Gefahrenintensität, die mithilfe verschiedener Komponenten charakterisiert werden kann. Die Auswahl, welche Parameter berücksichtigt werden und welche nicht, hängt von der Datenverfügbarkeit und von der persönlichen Einschätzung des Experten ab. Es sollte daher eine Methodologie für die Auswahl von Intensitätsparametern, welche den Charakter der Rutschung bestmöglich wiedergeben, ausgearbeitet werden.

Die verwendeten Parameter der Gefahrenintensität sollten außerdem möglichst leicht zu erfassen sein. Die im Fallbeispiel verwendeten Parameter stellten sich nämlich als schwer zu eruieren heraus, obwohl über das Untersuchungsgebiet außerordentlich viele und qualitativ hochwertige Informationen zur Verfügung standen. Die Rutschgeschwindigkeit und die Verlagerungsdistanz als Intensitätsparameter zu ermitteln, ist ressourcenintensiv und für Studien auf regionaler Ebene kaum zu bewältigen.

Es wird daher die Verwendung von Intensitätsparametern vorgeschlagen, die anhand von Luftbildern und durch wenige punktuelle Feldmessungen abgeleitet werden können. Für eine qualitativ zufriedenstellende Methode kämen dabei nur solche Parameter infrage, durch die statistische Aussagen auf regionaler Ebene gemacht werden können. Rutschungsparameter mit einer starken Abhängigkeit von lokalen Verhältnissen, wie die Verlagerungsdistanz, zeigen im regionalen Maßstab eine hohe Schwankungsbreite in ihren Werten und sind somit weniger für statistische Aussagen geeignet.

Die Verwendung der mittleren Größe von Rutschflächen als Intensitätsparameter hätte gegenüber den hier verwendeten Parametern demnach den Vorteil, dass sich

Rutschflächen statistisch gut beschreiben lassen und auch computergestützt kartiert werden können. Indirekt könnte dadurch auch die Verlagerungsdistanz von Rutschkörpern besser bestimmt werden.

Eine Vereinheitlichung der Methodologie der Intensitätsermittlung würde auch der besseren Vergleichbarkeit von Studien dienen. Dafür müssten auch die Rutschungsinventare nach einem ähnlichen Prinzip aufgebaut sein. Der Zugriff auf relevante Werte wäre somit wesentlich erleichtert, da sie schon vom Anfang an (z. B. im Baugrunderkaster) aufgezeichnet wären und nicht über neue analytische und Datenverarbeitungsschritte ermittelt werden müssten.

Zur Berechnung der Exposition von linienhaften Elementen wie Straßen gegenüber Rutschungen sollte eine einheitliche Methode ausgearbeitet werden. Die größte Schwierigkeit liegt dabei in der Abgrenzung bzw. Definition der einzelnen Risikoelemente. Im Gegensatz zu Gebäuden weist die Dimension von Straßen – bedingt durch ihre variierende Gesamtlänge – große Unterschiede auf, was zur Verzerrung von Ergebnissen führen kann.

Straßen und andere linienhafte Objekte könnten auch abschnittsweise (z. B. in Abschnitten von 1 000 Metern) und nicht als Ganzes auf ihre Exposition hin untersucht werden. Somit wäre der räumliche Wirkungsquotient besser differenziert und mehr den lokalen Verhältnissen angepasst. Außerdem hätte die Gefahr der Unter- oder Überschätzung des Expositionsanteils für Straßen an der Peripherie des Untersuchungsgebietes, die ihren Verlauf nur abschnittsweise und nur auf einer kurzen Gesamtstrecke innerhalb des Untersuchungsgebietes haben, mithilfe dieses Ansatzes möglicherweise minimiert werden können. Diese Vorgehensweise konnte jedoch in der vorliegenden Studie nicht getestet werden, da sich dafür der bestehende Datensatz nicht ohne Probleme umformen ließ.

Für die Expositionsanalyse notwendige Daten über die Gefahr bzw. Gefährdung sollten eine möglichst hohe räumliche Auflösung haben. Modelle, die Rasterdaten mit einer kleineren als 10 x 10 Meter großen Rasterweite verwenden, sind für die Expositionsanalyse von Straßen ungeeignet, da sie zu inakzeptabel hohen Ungenauigkeiten führen können. Auch optimal aufgelöste Rasterdaten können mit Verzerrungen behaftet sein. Daher wird die Überlegung gemacht, dass in zukünftigen

Studien die Exposition auch für Pufferbereiche neben den Straßen berechnen werden könnte, um die Unsicherheiten des Modells besser quantifizieren zu können.

Die Faktoren der Suszeptibilität, die von UZIELLI et al. (2008) vorgeschlagen worden sind, wurden vom Autor zum Großteil übernommen, da in der Literatur bis zum jetzigen Zeitpunkt keine universellen Charakterisierungsschemata für die inhärenten Eigenschaften von Straßen vorliegen. In Zukunft sollten daher Wege gefunden werden, um eine einheitliche Auswahl an allgemeingültigen Faktoren zur Berechnung der Suszeptibilität von Straßen zu treffen. Ähnlich wie bei der Intensität sollten diese Faktoren leicht erfassbar und trotzdem charakterisierend für die Verkehrsbauwerke sein.

Ein Suszeptibilitätsfaktor, der auf jeden Fall eine große Rolle beim strukturellen Verhalten von Straßen gegenüber Rutschungen spielt, betrifft die baulichen Aspekte. Oft wird die Stellung einer Straße in der Straßenhierarchie, angegeben durch Straßenkategorien, mit bestimmten baulichen Qualitäten in Verbindung gesetzt. Da jedoch diese Kausalität bei Straßen nicht immer deutlich ausgeprägt ist, sollte möglicherweise die Bauart besser charakterisiert werden und die Bedeutung der Straßenkategorien sollte reduziert werden. Somit könnten die strukturellen Komponenten von Straßen mehr ins Gewicht fallen, was zu einer Objektivierung der Ergebnisse führen könnte.

Der im Fallbeispiel neu eingeführte Faktor, der die Suszeptibilität betreffend die technischen Schutzsysteme angeben soll, ist für die Gesamtvulnerabilität von Straßen gegenüber Rutschungen von großer Bedeutung. Eine Differenzierung dieser Bauwerke nach ihren technischen Eigenschaften bzw. nach ihrem spezifischen Einsatzbereich wäre wünschenswert. Dadurch könnten sie auch untereinander gewichtet werden, um ihre Effektivität gegen einen bestimmten Rutschungstyp besser zum Ausdruck zu bringen.

Auch die zur Straße relative Lage von technischen Schutzsystemen sollte nach Möglichkeit für die Bestimmung der Suszeptibilität herangezogen werden. Es könnte eine Rolle spielen, ob ein solches Bauwerk tal- oder hangseitig liegt, besonders bei Fällen, in denen die Lage und die Art der Rutschung bekannt sind. Dadurch gäbe es auch die Möglichkeit, Schutzsysteme auf ihre Stabilität hin zu überprüfen.

Die Bereisungshäufigkeit des Straßendienstes konnte als Indikator für den Erhaltungszustand nur aus dem Grund für die vorliegende Fallstudie herangezogen werden, weil diese den Erhaltungszustand von Straßen des Untersuchungsgebiets optimal widerspiegelt. Da aber die Bereisungshäufigkeit kein universelles Maß für die Quantifizierung der Suszeptibilität betreffend den Erhaltungszustand ist, müssten bessere analytische Methoden zur Erfassung des Erhaltungszustandes gefunden werden.

Angesichts der Ergebnisse wird empfohlen, objektivere Gewichtungsmethoden für die Suszeptibilitätsfaktoren zu erarbeiten, da sich die bisherigen Studien diesbezüglich vorwiegend auf Expertenschätzung gestützt haben. Dazu könnte eine Vorgehensweise wie von PITILAKIS et al. (2011) verwendet werden, wo eine Vielzahl an Experten aus der Praxis und der Wissenschaft befragt wurden.

Aufzeichnungen der Straßenmeisterei Waidhofen an der Ybbs, die im Rahmen eines persönlichen Treffens diskutiert worden sind (Fragebogen dazu siehe Anhang II), deuten darauf hin, dass ein Hauptgrund von Rutschungen die falsche Landnutzung sein könnte. Besonders Flachwurzler an Steilhängen verursachten in den letzten Jahren in dieser Hinsicht immer wieder Probleme, da sie vor allem infolge von Starkregenereignissen und starkem Wind entwurzelt wurden und damit große Mengen an Bodenmaterial mobilisierten, die letztendlich Straßenbauwerke beschädigten. Zukünftige Studien könnten daher näher auf die genaue Interaktion der Vegetation und der Rutschungsgefahr eingehen.

Abbildungsverzeichnis

Abb. 1: Der Zusammenhang zwischen Entwicklungsgrad, ausgedrückt in BIP (rote gepunktete Linie), ökonomischen Schäden (rote Linie) und Zahl der Todesopfer infolge von Naturkatastrophen. Quelle: VAN WESTEN et al. 2010	2
Abb. 2: Arten von Verlagerungsprozessen nach der Klassifikation von VARNES (1978). Quelle: CORNFORTH 2005	11
Abb. 3: Rotationsrutschung (links) und (flachgründige) Translationsrutschung (rechts). Quelle: GBA (o. J.) nach TILCH, N. (Fotoarchiv der GBA).....	13
Abb. 4: Risiko als Produkt von Gefahr (Aufretenswahrscheinlichkeit) und Vulnerabilität (Schadensanteil). Ein Beispiel für Rutschungen. Quelle: LEE und JONES 2014 nach COBURN und SPENCE 1992.....	37
Abb. 5: Schichtenaufbau des Straßenkörpers. Quelle: WIEHLER und WELLNER 2005.	44
Abb. 6: Horizontaler Aufbau von Straßenanlagen, visualisiert als Prinzipquerschnitt. Quelle: WIEHLER und WELLNER 2005.	46
Abb. 7: Schematischer Querschnitt eines Hanganschnittes bei Straßen. Quelle: eigener Entwurf.	47
Abb. 8: Anwendung von Getextilien zur Stabilisierung von Böschungen. Quelle: KENDRICK et al. 2004.....	51
Abb. 9: Gabionenwände und ihre Verwendungsmöglichkeiten. Oben: Äußere Maße von Gabionen. Unten: Anwendungsbeispiel. Quelle: KENDRICK et al. 2004.....	53
Abb. 10: Beispiel einer vermörtelten Natursteinmauer. Quelle: KELLER und SHERAR 2003.	54
Abb. 11: Unterschiedliche (Beton- bzw. Stahlbeton-)Stützmauerkonstruktionen. Quelle KENDRICK et al. 2004.	55
Abb. 12: Vulnerabilitätskurven für befestigte (Vorfahrt-) Straßen (Diagramm B) und unbefestigten (Neben-) Straßen (Diagramm C). Zu den einzelnen Schadenswerten werden die Unsicherheiten darstellend Fehlerbalken angezeigt. Quelle: GALLI und GUZZETTI 2007.	70
Abb. 13: Gewichtete Fragilitätskurven von Gemeindestraßen (oben) und von Schnellstraßen (unten) für drei Schadenszustände. Abszissenachse: Volumen des	

Murgangs (m^3), Ordinatenachse: Schadenswahrscheinlichkeit. Quelle: WINTER et al. 2014.	72
Abb. 14: Mögliche Rutschungsszenarien bei Straßen. Quelle: SIDLE und OCHIAI 2006	92
Abb. 15: Klimadiagramm von Waidhofen an der Ybbs. Datengrundlage: ZAMG Klimanormalwerte Österreich 1971-2000	98
Abb. 16: Die größten Fließgewässer von Waidhofen an der Ybbs. A: Nellingbach, B: Redtenbach, C: Luegbach, D: Urlbach, E: Schwarzbach, F: Ybbs. Quelle: eigene Aufnahmen.	100
Abb. 17 Das Gewässernetz in Waidhofen an der Ybbs.	101
Abb. 18: Tektonische Einheiten in Waidhofen an der Ybbs	104
Abb. 19: Höhenlinienkarte von Waidhofen an der Ybbs	105
Abb. 20: Landnutzung in Waidhofen an der Ybbs	108
Abb. 21: Registrierte Rutschungen im Baugrundkataster des Landes Niederösterreich für Waidhofen an der Ybbs.	111
Abb. 22: Im Rahmen des MoNoe-Projekts erstellte Gefahrenhinweiskarte für Rutschungen (Waidhofen an der Ybbs)	114
Abb. 23: Lage der Bundes- und Landesstraßen in Waidhofen an der Ybbs samt Straßennummerierung	117
Abb. 24: Landesstraße B (Bundeststraßen) (Bild A) und Landesstraße L (Landesstraßen) (Bild B) in Waidhofen an der Ybbs. Quelle: eigene Aufnahmen. .	118
Abb. 25: Lage der befestigten und unbefestigten Gemeindestrassen in Waidhofen an der Ybbs	119
Abb. 26: Befestigte (Bild A) und unbefestigte Gemeindestraße (Bild B) in Waidhofen an der Ybbs. Quelle: eigene Aufnahmen.	120
Abb. 27: Schutzsysteme nach Art der Konstruktion entlang des hochrangigen Straßennetzes in Waidhofen an der Ybbs. Quelle: NÖ STRASSENBAUABTEILUNG 6 2015.	121
Abb. 28: Straßen als Vektordaten auf der Gefahrenhinweiskarte (Ausschnitt)	128
Abb. 29: Straßen als Rasterdaten auf der Gefahrenhinweiskarte (Ausschnitt)	129
Abb. 30: Straßen als Vektoren auf der Gefahrenhinweiskarte bzw. auf dem Orthophoto (Ausschnitt)	131
Abb. 31: Straßen als Raster auf der Gefahrenhinweiskarte bzw. auf dem Orthophoto (Ausschnitt)	131

Abb. 32: Flächenanteile von Gefährdungsklassen der Gefahrenhinweiskarte.....	132
Abb. 33: Von Rutschungen betroffene und nicht betroffene Flächen im Untersuchungsgebiet (Ausschnitt).....	134
Abb. 34: Exponierte Straßenabschnitte (rot) von Landesstraßen, berechnet anhand der reklassifizierten Gefahrenhinweiskarte (Ausschnitt).....	135
Abb. 35: Exponierte Straßenabschnitte (rot) von Bundes- und Landesstraßen, berechnet anhand der reklassifizierten Gefahrenhinweiskarte (Ausschnitt)	136
Abb. 36: Werte des baulichen Suszeptibilitätsfaktors im Untersuchungsgebiet (Ausschnitt).....	140
Abb. 37: Technische Schutzsysteme entlang des hochrangigen Straßennetzes in Waidhofen an der Ybbs im Überblick	142
Abb. 38: Technische Schutzsysteme entlang des Redtenbaches (Ausschnitt)	143
Abb. 39: Werte für den Suszeptibilitätsfaktor des Erhaltungszustands im Untersuchungsgebiet (Ausschnitt).....	145
Abb. 40: Vulnerabilität von Straßen für Szenario 9/S (S = separate k_s -Werte für jede Straße).....	150
Abb. 41: Vulnerabilität von Straßen für Szenario 5/S (S = separate k_s -Werte für jede Straße).....	152
Abb. 42: Vulnerabilität von Straßen für Szenario 5/S (S = separate k_s -Werte für jede Straße), unterteilt in Klassen mit einer Größe von 0,05.....	153
Abb. 43: Vulnerabilität von Straßen für Szenario 1/S (S = separate k_s -Werte für jede Straße).....	155
Abb. 44: Vulnerabilität von Straßen für Szenario 1/S (S = separate k_s -Werte für jede Straße), unterteilt in Klassen mit einer Größe von 0,05.....	156
Abb. 45: Vulnerabilität des hochrangigen Straßennetzes im Ortskern von Waidhofen an der Ybbs (Szenario 9).....	158
Abb. 46: Vulnerabilität des hochrangigen Straßennetzes im Ortsteil St. Georgen in der Klaus und im Nellingbachtal (Szenario 9).....	161
Abb. 47: Vulnerabilität des hochrangigen Straßennetzes im Ortsteil Konradsheim und im Redtenbachtal (Szenario 9)	163

Tabellenverzeichnis

Tab. 1: (a): Intensitätsklassen für drei gravitative Massenbewegungsarten; (b) Verknüpfung der Intensität mit der Wiederkehrrate. Quelle: CARDINALI et al. 2002...	18
Tab. 2: Straßenkategorien in Österreich.....	59
Tab. 3: Intensitätsabhängige Vulnerabilität, ausgedrückt in qualitativen Schadensklassen (A = geringfügiger / oberflächlicher Schaden, F = mittelschwerer / funktioneller Schaden, S = totaler / struktureller Schaden) nach Risikoelement (MR = Hauptverkehrsstraßen, SR = Nebenstraßen, FR = Feldwege, RW = Bahnlinien) in der Publikation von CARDINALI et al. (2002). Quelle: CARDINALI et al. (2002).	64
Tab. 4: Aus dem aktuellen monetären Wert (<i>Value</i> in €/m) und den mittleren Schadenssummen (<i>Losses</i> in €/m) errechnete Vulnerabilitätswerte des Verkehrsnetzes in den Studien von REMONDO et al. (2005, 2008) Quelle: REMONDO et al. 2005.....	65
Tab. 5: Gefahrenabhängige Vulnerabilität von Straßen in der Studie von ZÊZERE et al. (2008). Quelle: modifiziert nach ZÊZERE et al. (2008).	65
Tab. 6: Magnitudenklassen (Intensitätsklassen) M-I bis M-III und die davon abhängigen Vulnerabilitätswerte des Verkehrsnetzes in der Fallstudie von JAISWAL et al. (2010). Abkürzungen: V= Volumen (m ³), S _d = Tiefe der Plaike (m), RD = Auslaufdistanz (m), P = Auftretenswahrscheinlichkeit. Quelle: JAISWAL et al. (2010)	67
Tab. 7: Klassifikation der Geschwindigkeit von Rutschungen nach CRUDEN und VARNES (1996).....	83
Tab. 8: Werte des baulichen Suszeptibilitätsfaktors (ε_{STY}) nach Straßenkategorien.	91
Tab. 9: Die Ausprägungen des Suszeptibilitätsfaktors der technischen Schutzsysteme (ε_{STS}).....	93
Tab. 10: Die Ausprägungen des Suszeptibilitätsfaktors betreffend den Erhaltungszustand (ε_{SMN}).....	95
Tab. 11: Die Ergebnisse der Registerzählung von der Bevölkerung nach Ortschaften für Waidhofen an der Ybbs. Quelle: Statistik Austria 2013	96
Tab. 12: Werte und Produkte der kinetischen und kinematischen Intensitätskomponenten sowie ihre gewichteten Summen	125

Tab. 13: Fahrbahnbreiten von Straßen, modifiziert nach LAY (2009).....	127
Tab. 14: Exposition und räumlicher Wirkungsquotient von Straßen nach Straßennummern.....	137
Tab. 15: Exposition und der räumliche Wirkungsquotient nach Straßenkategorie..	138

Literaturverzeichnis

ALDEN, W. C. (1976): Landslide and flood at Gros Ventre, Wyoming. – In: R. TANK (Hrsg.): Focus on Environmental Geology.

ALEXANDER, D. (2005): Vulnerability to landslides. – In: GLADE, T. (Hrsg.): Landslide hazard and risk. – Wiley & Sons, Chichester.

AMATRUDA, G.; BONNARD, C.; CASTELLI, M.; FORLATI, F.; GIACOMELLI, M.; MORELLI, M.; PARO, L.; PIANA, F.; PIRULLI, M.; POLINO, R.; PRAT, P.; RAMASCO, M.; SCAVIA, C.; BELLARDONE, G.; CAMPUS, S.; DURVILLE, J.-L.; POISEL, R.; PREH, A.; ROTH, W.; TENTSCHERT, E.H. (2004): A key approach: the IMIRILAND project method. Identification and mitigation of large landslide risks in Europe — advances in risk assessment. – In: Bonnard, C., Forlati, F., Scavia, C. (Hrsg.), European Commission, Fifth Framework Program. Balkema, 13-44.

Amt der Niederösterreichischen Landesregierung (Hrsg.) (2015a): Statistische Daten. Bezirk Waidhofen an der Ybbs; http://www01.noel.gv.at/scripts/cms/ru/ru2/stat_ssi.asp?NR=303 (05.02.2015).

Amt der Niederösterreichischen Landesregierung (Hrsg.) (2015b): Wasserstandsnachrichten Hochwasserprognosen in Niederösterreich - Ybbs; <http://www.noel.gv.at/Externeseiten/wasserstand/static/stations/207126/station.html#> (02.02.2015).

ANDRECS, P.; HAGEN, K.; LANG, E.; STARY, U.; GARTNER, K.; HERZBERGER, E.; HAIDEN, T. (2007): Dokumentation und Analyse der Schadensereignisse 2005 in den Gemeinden Gasen und Haslau (Steiermark). Bundesforschungs- und Ausbildungszentrum für Wald, Naturgefahren und Landschaft. BFW-Dokumentation 6/2007, auch online unter: http://bfw.ac.at/030/pdf/bfw-dok_6.pdf (12.01.2015).

BELL, R.; GLADE, T. (2004): Quantitative risk analysis for landslides? Examples from Búdudalur, NW-Iceland. – In: Natural Hazards and Earth System Science 4(1), 117-131.

BELL, R.; PETSCHKO, H.; GLADE, T. (2013a): Gefährdungsmodellierung bei gravitativen Massenbewegungen, NÖ Geotage "Geogene Gefahren und Raumordnung", 19. - 20. September 2013, Rabenstein an der Pielach, Niederösterreich.

BELL, R.; PETSCHKO, H.; PROSKE, H.; LEOPOLD, P.; HEISS, G.; BAUER, C.; GOETZ, J.; GRANICA, K.; GLADE, T. (2013b): Methodenentwicklung zur Gefährdungsmodellierung von Massenbewegungen in Niederösterreich – MoNOE, Vorläufiger Endbericht, Wien.

BERDICA, K. (2002): An introduction to road vulnerability: what has been done, is done and should be done – In: Transport Policy 9(2), 117-127.

BFW (Bundesforschungs- und Ausbildungszentrum für Wald, Naturgefahren und Landschaft) (Hrsg.) (2015): eBOD – Digitale Bodenkarte von Österreich; http://gis.lebensministerium.at/eBOD/frames/index.php?&gui_id=eBOD (03.02.2015).

BLAIKIE, P. (1994): At risk : natural hazards, people's vulnerability, and disasters. Routledge, London.

BMLFUW (Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft) (Hrsg.) (2015): eHYD; <http://ehyd.gv.at/> (02.02.2015).

BRUNEKREEF, S. H.; SENG, H. J. (1996): Aktives Bodenaushubmanagement: Grundlagen, gesetzliche Bestimmungen, Kosten; mit 21 Tabellen (Vol. 502). Expert Verlag.

BRUNNER, M.; ENENGL, E. (2011): City Tunnel in Waidhofen an der Ybbs – difficulties facing near-surface tunnelling in creeping soil. Citytunnel Waidhofen an der Ybbs – Schwierigkeiten einer oberflächennahen Tunnelherstellung im Kriechhangbereich. – In: Geomechanics and Tunnelling 4 (5), 576-583.

CANLI, E. (2013): Physikalisch basierte Gefährdungsmodellierung flachgründiger Translationsrutschungen in einem geologisch heterogenen Gebiet mittels SINMAP : dargestellt am Bezirk Waidhofen/Ybbs (Niederösterreich). – Masterarbeit, Universität Wien, Wien.

CARDINALI, M.; REICHENBACH, P.; GUZZETTI, F.; ARDIZZONE, F.; ANTONINI, G.; GALLI, M.; SALVATI, P. (2002): A geomorphological approach to the estimation of landslide

hazards and risks in Umbria, Central Italy. – In: Natural Hazards and Earth System Science 2(1/2), 57-72.

CIRIANNI, F.; FONTE, F.; LEONARDI, G.; SCOPELLITI, F. (2012): Analysis of lifelines transportation vulnerability – In: Procedia – Social and Behavioral Sciences 53, 29-38.

CIUREAN, R. L.; SCHRÖTER, D.; GLADE, T. (2013): Conceptual Frameworks of Vulnerability Assessments for Natural Disasters Reduction. INTECH Open Access Publisher.

CONSTANTIN, M.; BEDNARIK, M.; JURCHESCU, M. C.; VLAICU, M. (2011): Landslide susceptibility assessment using the bivariate statistical analysis and the index of entropy in the Sibiciu Basin (Romania). – In: Environmental Earth Sciences 63(2), 397-406.

CORNFORTH, D. H. (2005): Landslides in practice: investigations, analysis, and remedial-preventative options in soils. Wiley, Hoboken NJ.

CROSTA, G. B.; FRATTINI, P. (2003): Distributed modelling of shallow landslides triggered by intense rainfall. – In: Natural Hazards and Earth System Science 3(1/2), 81-93.

CROZIER, MICHAEL J. (1986): Landslides: causes, consequences & environment. Croom Helm, London.

CRUDEN, D. M.; VARNES, D. J. (1996): Landslide types and processes. Special Report. National Research Council, Transportation Research Board 247, 36-75.

DAI, F. C.; LEE, C. F.; NGAI, Y. Y. (2002): Landslide risk assessment and management: an overview. – In: Engineering Geology 64(1), 65-87.

DAS, I.; KUMAR, G.; STEIN, A.; BAGCHI, A.; & DADHWAL, V. K. (2011): Stochastic landslide vulnerability modeling in space and time in a part of the northern Himalayas, India. – In: Environmental monitoring and assessment 178(1-4), 25-37.

DE LEÓN, V.; CARLOS, J. (2006): Vulnerability: a conceptional and methodological review. UNU-EHS.

DECKER, K. (1991): Bericht 1990 über geologische Aufnahmen an der Kalkalpen-Flysch-Grenze auf Blatt 70 Waidhofen an der Ybbs. – In: Jahrbuch der Geologischen Bundesanstalt 143 (3), 476-477.

DESCH, G. (2013): Empirische Modelle. – Skriptum, Karl-Franzens Universität Graz, Graz.

DIKAU, R. (Hrsg.) (1996): Landslide recognition: identification, movement and causes. Report No. 1 of the European Commission Environment Programme, Contract No. EV5V-CT94-0454. Wiley, Chichester.

Duden (Hrsg.) (2005): Wörterbuch: Gefahr, <http://www.duden.de/rechtschreibung/Gefahr> (22.3.2015)

EINSTEIN, H. H. (1998): Special lecture: landslide risk assessment procedure. – In: BONNARD, C. (Hrsg.): Landslides. A.A. Balkema.

ERBER, C.; FLORIANCIC, M.; FUNDNEIDER, L.; GOKESCH, K.; LÜCKSMANN, T.; RYBNICEK, K.; SALGÓ, P.; TADER, A.; WIDZYK, M.; ZWIRNER, K. (2013): Vulnerabilitäts- und Risikoanalyse Waidhofen an der Ybbs. Projektbericht. Seminararbeit, Universität Wien, Wien.

EU (Europäische Kommission der Europäischen Union) (2008): Council Directive 2008/114/EC of 8 December 2008 on the identification and designation of European critical infrastructures and the assessment of the need to improve their protection. – In: Official Journal of the European Union L345, 75-82.

EVN (evn naturkraft Erzeugungsgesellschaft m.b.H.) (Hrsg.) (2011): EVN eröffnet Kleinwasserkraftwerk Schütt in Waidhofen/Ybbs; online 11.07.2011, <http://www.evn-naturkraft.at/Medien/EVN-eroffnet-Kleinwasserkraftwerk-Schutt-in-Waidho.aspx?listnode=/Medien> (09.12.2014).

FELL, R. (1994): Landslide risk assessment and acceptable risk – In: Canadian Geotechnical Journal 31: 261–272.

FELL, R.; COROMINAS, J.; BONNARD, C.; CASCINI, L.; LEROI, E.; SAVAGE, W. Z. (2008): Guidelines for landslide susceptibility, hazard and risk zoning for land use planning. Engineering Geology, 102(3), 85-98.

FUCHS, S.; HEISS, K.; HÜBL, J. (2007): Towards an empirical vulnerability function for use in debris flow risk assessment – In: Natural Hazards And Earth System Sciences 7(5): 495-506.

FUCHS, S.; KUHLCHE, C.; MEYER, V. (2011): Editorial for the special issue: vulnerability to natural hazards. The challenge of integration. – In: Natural Hazards 58(2): 609-619.

GALLI, M.; GUZZETTI, F. (2007): Landslide vulnerability criteria: a case study from Umbria, Central Italy. – In: Environmental Management 40(4), 649-665.

GBA (Geologische Bundesanstalt) (Hrsg.) (o.J.): Allgemeine Informationen zu Massenbewegungen. General information about mass movements; https://www.geologie.ac.at/fileadmin/user_upload/dokumente/pdf/service/webapplikation/allgemeine_info_mass_end_h.pdf (04.01.2015)

GLADE, T. (2003): Vulnerability assessment in landslide risk analysis. – In: Erde 134(2), 123-146.

GLADE, T.; CROZIER, M. J. (2005): The nature of landslide hazard impact. – In: GLADE, T. (Hrsg.): Landslide hazard and risk. – Wiley & Sons, Chichester.

GUHA-SAPIR, D.; BELOW, R.; HOYOIS, P. (2015): EMDAT: International Disaster Database – online: www.emdat.be (02.01.2015)

GUISAN, A., WEISS, S.B., WEISS, A.D. (1999): GLM versus CCA spatial modeling of plant species distribution – In: Plant Ecology (143): 107-122.

GUZZETTI, F. (2006): Landslide hazard and risk assessment. Doktorarbeit, Universität Bonn.

HEINIMANN, H. R. (Hrsg.). (1999): Risikoanalyse bei gravitativen Naturgefahren. BUWAL, Dokumentation.

HERVÁS, J.; BOBROWSKY, P. (2009): Mapping: inventories, susceptibility, hazard and risk. – In: Landslides–Disaster Risk Reduction. Springer, Berlin, Heidelberg.

HUNGR, O. (1997): Some methods of landslide hazard intensity mapping. – In: CRUDEN, D. M. und FELL, R. (Hrsg.): Landslide risk assessment. Proceedings

International Workshop on Landslide Risk Assessment, Honolulu, 19–21 February 1997. Balkema, Rotterdam, 215-226.

HUNGR, O.; LEROUEIL, S.; PICARELLI, L. (2014): The Varnes classification of landslide types. An update. – In: *Landslides* 11(2), 167-194.

IFRC (The International Federation of Red Cross and Red Crescent Societies) (Hrsg.) (2015): What is vulnerability?; <https://www.ifrc.org/en/what-we-do/disaster-management/about-disasters/what-is-a-disaster/what-is-vulnerability/> (06.01.2015).

JAEDICKE, C.; VAN DEN EECKHAUT, M.; NADIM, F.; HERVÁS, J.; KALSNES, B.; VANGELSTEN, B. V.; SMITH, J. T.; TOFANI, V.; CIUREAN, R.; WINTER, M. G.; SVERDRUP-THYGESON, K.; SYRE, E.; SMEBYE, H. (2014): Identification of landslide hazard and risk 'hotspots' in Europe. – In: *Bulletin of Engineering Geology and the Environment* 73(2), 325-339.

JAISWAL, P.; VAN WESTEN, C. J. (2009): Estimating temporal probability for landslide initiation along transportation routes based on rainfall thresholds. – In: *Geomorphology* 112(1), 96-105.

JAISWAL, P.; VAN WESTEN, C. J.; JETTEN, V. (2010): Quantitative assessment of direct and indirect landslide risk along transportation lines in southern India. – In: *Natural Hazards and Earth System Science* 10(6), 1253-1267.

JANDA, C. (2000): Geologisch-fazielle Untersuchungen in der Lunzer Decke südwestlich von Weyer (Oberösterreich). – Diplomarbeit, Universität Wien, Wien.

KAYNIA, A. M.; PAPATHOMA-KÖHLE, M.; NEUHÄUSER, B.; RATZINGER, K.; WENZEL, H.; MEDINA-CETINA, Z. (2008): Probabilistic assessment of vulnerability to landslide: application to the village of Lichtenstein, Baden-Württemberg, Germany. – In: *Engineering Geology* 101(1), 33-48.

KELLER, G.; SHERAR, J. (2003): Low-volume roads engineering: Best management practices field guide. USDA Forest Service/USAID; online unter: http://ntl.bts.gov/lib/24000/24600/24650/Index_BMP_Field_Guide.htm (05.02.2015)

KENDRICK, P.; COPSON, M.; BERESFORD, S.; MCCORMICK, P. (2004⁵): Roadwork: theory and practice. Elsevier Butterworth-Heinemann, Oxford.

LATELTIN, O. (1997): Berücksichtigung der Massenbewegungsgefahren bei raumwirksamen Tätigkeiten. Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft.

LAY, M. G. (2009⁴): Handbook of road technology. Spon Press, London.

LEE, E. M.; JONES, D. K. C. (2014): Landslide risk assessment. ICE Publications, London.

LESER, H. (2009⁹): Geomorphologie. Westermann, Braunschweig.

LI, Z.; NADIM, F.; HUANG, H.; UZIELLI, M.; LACASSE, S. (2010): Quantitative vulnerability estimation for scenario-based landslide hazards. – In: Landslides 7(2), 125-134.

MALAMUD, B. D.; TURCOTTE, D. L.; GUZZETTI, F.; REICHENBACH, P. (2004): Landslide inventories and their statistical properties. – In: Earth Surface Processes and Landforms 29(6), 687-711.

MATISZIW, T. C.; MURRAY, A. T. (2009): Modeling s–t path availability to support disaster vulnerability assessment of network infrastructure. – In: Computers & Operations Research 36(1), 16-26.

MENONI, S.; PERGALANI, F.; BONI, M. P.; PETRINI, V. (2002): Lifelines earthquake vulnerability assessment: a systemic approach. – In: Soil Dynamics and Earthquake Engineering 22(9), 1199-1208.

Munich Re (Munich Reinsurance America) (2015): Landslide; <http://www.munichre.com/us/weather-resilience-and-protection/rise-weather/weather-events/landslide/index.html> (06.05.2015).

N.N. (1976): Die Geschichte der Strassen. – In: Das Wohnen 51, 22-24.

NADIM, F.; KJEKSTAD, O.; PEDUZZI, P.; HEROLD, C.; JAEDICKE, C. (2006): Global landslide and avalanche hotspots – In: Landslides 3(2), 159-173.

NESTROY, O.; AUST, G.; BLUM, W. E. H.; ENGLISCH, M.; HAGER, H.; HERZBERGER, E.; KILIAN, W.; NELHIEBEL, P.; ORTNER, G.; PECINA, E.; PEHAMBERGER, A.; SCHNEIDER, W.; WAGNER, J. (2011): Systematische Gliederung der Böden Österreichs: Österreichische Bodensystematik 2000 in der revidierten Fassung von 2011. Österr. Bodenkundliche Gesellschaft.

NÖ Straßenbauabteilung 6 (2015): pers. Kommunikation. – Amstetten, Waidhofen an der Ybbs.

OBERHAUSER, R.; BAUER, F. K. (Hrsg.) (2013): Der Geologische Aufbau Österreichs. Springer Verlag, Wien.

PAPATHOMA-KÖHLE, M. (2012): Vulnerability assessment. – Vorlesungsskriptum, Universität Wien, Wien.

PAPATHOMA-KÖHLE, M.; ZISCHG, A.; FUCHS, S.; GLADE, T.; KEILER, M. (2015): Loss estimation for landslides in mountain areas. An integrated toolbox for vulnerability assessment and damage documentation. – In: Environmental Modelling & Software, 63, 156-169.

PEEL, M. C.; FINLAYSON, B. L.; MCMAHON, T. A. (2007): Updated world map of the Köppen-Geiger climate classification – In: Hydrology and earth system sciences discussions 4(2): 439-473.

PETLEY, D. (2012): Global patterns of loss of life from landslides – In: Geology 40(10), 927-930.

PETSCHKO, H.; BELL, R.; GLADE, T.; GOETZ, J.; HEISS, G.; LEOPOLD, P. (2013): MoNOE – Modellierung der Rutschprozesse. – In: Berichte Geol. B.-A. 100 (NÖ GEOTAGE – 19. & 20. 9. 2013 in Rabenstein an der Pielach), 77-86.

PITILAKIS, K.; FOTOPOULOU, S.; ARGYROUDIS, S.; PITILAKIS, D.; SENETAKIS, K.; TREULOPOULOS, K.; KAKDERI, K.; RIGA, E. (Hrsg.) (2011): Physical vulnerability of elements at risk to landslides. Methodology for evaluation, fragility curves and damage states for buildings and lifelines. Deliverable 2.5 in EU FP7 research project no. 226479. SafeLand: Living with landslide risk in Europe; online 02.04.2011, www.safeland-fp7.eu/results/Documents/D2.5_revised.pdf (11.12.2014).

PRINZ, H.; STRAUß, R. (2011⁵): Ingenieurgeologie. Springer-Verlag.

PROMPER, C.; GASSNER, CH.; GLADE, T. (2015): Spatiotemporal patterns of landslide exposure – a step within future landslide risk analysis on a regional scale applied in Waidhofen/Ybbs Austria. – In: International Journal of Disaster Risk Reduction 12, 25-33.

PROMPER, C.; PUISSANT, A.; MALET, J.-P.; GLADE, T. (2014): Analysis of land cover changes in the past and the future as contribution to landslide risk scenarios. – In: *Applied Geography* 53, 11-19.

PUBLISHER, ROTTERDAM PP 1075–1090

REMONDO, J.; BONACHEA, J.; CENDRERO, A. (2005): A statistical approach to landslide risk modelling at basin scale: from landslide susceptibility to quantitative risk assessment. – In: *Landslides* 2(4), 321-328.

REMONDO, J.; BONACHEA, J.; CENDRERO, A. (2008): Quantitative landslide risk assessment and mapping on the basis of recent occurrences. – In: *Geomorphology* 94(3), 496-507.

RINALDI, S. M.; PEERENBOOM, J. P.; KELLY, T. K. (2001): Identifying, understanding, and analyzing critical infrastructure interdependencies. – In: *Control Systems, IEEE* 21(6), 11-25.

RIS (Bundeskanzleramt Rechtsinformationssystem) (2015): Bundesgesetz vom 6. Juli 1960, mit dem Vorschriften über die Straßenpolizei erlassen werden (Straßenverkehrsordnung 1960 - StVO. 1960), online unter: <https://www.ris.bka.gv.at/GeltendeFassung.wxe?Abfrage=Bundesnormen&Gesetzesnummer=10011336> (02.09.2015)

ROBERDS, W. (2005): Estimating temporal and spatial variability and vulnerability. – In: *Landslide risk management*. Taylor & Francis, London, 129-158.

SASSA, K. (2007): *Progress in landslide science*. Springer, Berlin.

SHALUF, I. M. (2007): Disaster types. – In: *Disaster Prevention and Management, An International Journal* 16(5), 704-717.

SIDLE, ROY C.; OCHIAI, HIROTAKA (2006): *Landslides: processes, prediction, and land use*. American Geophysical Union, Washington, DC.

STANFEL, D. (2014): Ybbstalbahn: Waidhofen an der Ybbs - Gstadt - Ybbsitz/Kienberg-Gaming. Bahnmedien.at, Wien.

Statistik Austria (Hrsg.) (2013): Registerzählung 2011. Gemeinde: Waidhofen an der Ybbs (30301); online 31.07.2013, <http://www.statistik.at/blickgem/rg3/g30301.pdf> (02.05.2015)

STEGER, S. (2014a): Erklärende Variablen und Rutschungskartierung. – Skriptum, Universität Wien, Wien.

STEGER, S. (2014b): Explorative Datenanalyse und heuristische Gefährdungsmodellierung. – Skriptum, Universität Wien, Wien.

STRAUSS, P. (2006): Integrated Land Use Planning. Teilprojekt Evaluierung von Bodenerosion und Schwebstoffeintrag im Einzugsgebiet der Ybbs. Endbericht, Petzenkirchen.

THYWISSEN, K. (2006): Comparative Glossary for Core Terms of Disaster Reduction. United Nations University, Bonn.

UNDRO (United Nations Disaster Relief Organization) (Hrsg.) (1982): Natural disasters and vulnerability analysis. Office of the United Nations Disaster Relief Coordinator, Genf.

UNISDR (2009): Terminology on Disaster Risk Reduction. Geneva, Switzerland, online unter: http://www.unisdr.org/files/7817_UNISDRTerminologyEnglish.pdf (3.6.2015)

UNISDR (United Nations International Strategy for Disaster Reduction) (Hrsg.) (2014): Living with Risk. A global review of disaster reduction initiatives. 1 – United Nations, New York.

USGS (United States Geological Survey) (2015): Landslides FAQs; <http://www.usgs.gov/faq/categories/9752/2607> (04.05.2015).

UZIELLI, M.; NADIM, F.; LACASSE, S.; KAYNIA, A. M. (2008): A conceptual framework for quantitative estimation of physical vulnerability to landslides – In: Engineering Geology 102(3-4), 251-256.

VAN WESTEN, C.J.; ALKEMA, D.; DAMEN, M.C.J.; KERLE, N.C.; KINGMA, N.C. (2010): Multi-hazard risk assessment. Guide book. – United Nations University, ITC School on Disaster Geoinformation Management.

- VARNES, D. J. (1984). Landslide hazard zonation: a review of principles and practice.
- VEDER, C. (1981): Landslides and their stabilization. Springer-Verlag.
- WARD, S. N.; DAY, S. (2011): The 1963 landslide and flood at Vaiont Reservoir Italy. A tsunami ball simulation. – In: Italian Journal of Geosciences 130(1), 16-26.
- WIEHLER, H.-G.; WELLNER, F. (Hrsg.) (2005⁵): Straßenbau: Konstruktion und Ausführung. Huss-Medien, Verl. Bauwesen, Berlin.
- WINTER, M. G.; SMITH, J. T.; FOTOPOULOU, S.; PITILAKIS, K.; MAVROULI, O.; COROMINAS, J.; ARGYROUDIS, S. (2014): An expert judgement approach to determining the physical vulnerability of roads to debris flow. – In: Bulletin of Engineering Geology and the Environment 73(2), 291-305.
- WINTER, M.; SMITH, J. T.; FOTOPOULOU, S.; PITILAKIS, K.; MAVROULI, O.; COROMINAS, J.; ARGYROUDIS, S. (2013): The physical vulnerability of roads to debris flow. – In: Proceedings of the 18th international conference on soil mechanics and geotechnical engineering, Paris, 2-6.
- WOLLNY, K. (1999): Die Natur der Bodenwelle des Georadar und ihr Einsatz zur Feuchtebestimmung. Herbert Utz Verlag.
- WU, W. (2006): Geotechnik II. Konstruktive Ausbildung von Stützmauern. – Skriptum, Universität für Bodenkultur, Wien.
- ZÉZERE, J. L., GARCIA, R. A. C., OLIVEIRA, S. C., & REIS, E. (2008): Probabilistic landslide risk analysis considering direct costs in the area north of Lisbon (Portugal). – In: Geomorphology, 94(3), 467-495.
- ZHANG, J.; GURUNG, D.R.; LIU, R.; MURTHY, M.S.R.; SU, F. (2015): Abe Barek landslide and landslide susceptibility assessment in Badakhshan Province, Afghanistan. – In: Landslides; online 15.03.2015, DOI: 10.1007/s10346-015-0558-5.

Anhang I.

Wörterbuch der wichtigsten Fachbegriffe

Deutsch	Englisch
absolute Verlagerung	absolute displacement
Anbruch	crown
Anpassungsfähigkeit	resilience
Anrisskante, Plaie	scar
Anschüttung	fill
Auftretenswahrscheinlichkeit	probability of occurrence
Auslaufdistanz	run-out distance
Bewältigungsfähigkeit	coping capacity
Dammböschung	fill slope
Einschnittböschung	cut slope
Exposition	exposure
flachgründige Rutschung	shallow slide
Fragilitätskurve	fragility curve
Fußspitze (einer Rutschung)	toe
Gefahr	hazard
Gefährdung	susceptibility
Gefährdungsanalyse	susceptibility assessment
Gefahrenanalyse	hazard assessment
Gefahrenhinweiskarte	susceptibility map
Gefahrenkarte	hazard map
Gesamtverschiebung	total displacement
Gleitfläche	surface of rupture
gravitative Massenbewegung	landslide
Hanganschnitt	slope cut

Hangschutt	debris
Hauptabbriss	main scarp
physische Vulnerabilität	physical vulnerability
Risiko	risk
Risikoanalyse	risk assessment
Risikoelement	element at risk
Rotationsrutschung	rotational slide
Rutschgeschwindigkeit	landslide velocity
Rutschkörper	landslide body
Rutschmasse	sliding mass?
Rutschung	(earth-)slide
Rutschungstiefe, Gründigkeit der Rutschung	landslide depth
Rutschungsvolumen	landslide volume
Translationsrutschung	translational slide
Verlagerungsunterschied	differential displacement
Vulnerabilität	vulnerability
Vulnerabilitätsanalyse	vulnerability assessment
Widerstandskraft, Widerstandsfähigkeit	resistance
Wiederkehrrate	frequency

Terminologie zur Beschreibung von Rutschungsmerkmalen basiert größtenteils auf der internationalen Nomenklatur der UNESCO Working Party for World Landslide Inventory (1993) und ihrer deutschen Übersetzung von PRINZ und STRAUß (2011).

Anhang II.

Interviewfragen für das Treffen mit der NÖ Straßenbauabt. 6, sowie der Straßenmeisterei Waidhofen/Ybbs

- 1) In welchem Teil von Waidhofen an der Ybbs (WY) passieren Ihrer Meinung nach die meisten Straßenschäden infolge von Rutschungen/Erdrutschen?
- 2) Auf einer Skala von 1 bis 10, wie bedeutend für Ihre Arbeit empfinden Sie Rutschungen im Vergleich zu anderen Naturgefahren (Hochwasser, Felssturz, etc.) für das Gebiet von WY?

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
sehr geringe Bedeutung					sehr hohe Bedeutung				

- 3) Was sind die häufigsten Straßenschäden, die durch Rutschungen entstehen?
- 4) Welche Straßenkategorie (*B/L-Str.*, *Gemeindestr. befestigt*, *Gemeindestr. unbefestigt*) ist nach Ihrer Einschätzung am häufigsten von Rutschungen betroffen und warum?
- 5) Wie oft kam es Ihrer Einschätzung nach zu einem Rutschungs-Großereignis (z.B. verbunden mit einer Totalsperre) und was war der häufigste Auslöser (Regen, Tauwetter,...)?
- 6) Wie wichtig sind Stremots für die Früherkennung von rutschungsbedingten Schäden (auf einer Skala von 1 bis 10)?

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
sehr unwichtig					sehr wichtig				

- 7) Wird bei Stremots-Fahrten explizit auf Rutschungsindizen geschaut?