

REsilient MotorwAy INfrastructure REMAIN

ERGEBNISBERICHT

Ein Projekt finanziert im Rahmen der
Verkehrsinfrastrukturforschung 2020
(VIF 2020)

November 2022



Impressum:

Herausgeber und Programmverantwortung:

Bundesministerium für Klimaschutz
Abteilung Mobilitäts- und Verkehrstechnologien
Radetzkystraße 2
1030 Wien

 **Bundesministerium**
Klimaschutz, Umwelt,
Energie, Mobilität,
Innovation und Technologie

ÖBB-Infrastruktur AG
Praterstern 3
1020 Wien

 **ÖBB**
INFRA

Autobahnen- und Schnellstraßen-Finanzierungs-
Aktiengesellschaft
Schnirchgasse 17
1030 Wien

 **ASFINAG**

Für den Inhalt verantwortlich:

Vill Ziviltechniker GmbH
Veitschbach 10
8692 Neuberg/Mürz

 **VILL**
ZIVILTECHNIKER

AIT Austrian Institute of Technology GmbH
Giefinggasse 4
1210 Wien

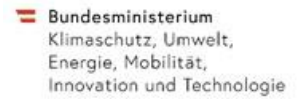
 **AIT**
AUSTRIAN INSTITUTE
OF TECHNOLOGY
TOMORROW TODAY

Deighton Ingenieurbüro für Verkehrswesen und
Infrastrukturplanung GmbH
Naglergasse 7
1010 Wien

 **d** **deighton**

VCE Vienna Consulting Engineers ZT GmbH
Viaduktgasse 2
1030 Wien

 **VCE**
Vienna Consulting
Engineers ZT GmbH



Programmmanagement:

Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft mbH
Thematische Programme
Sensengasse 1
1090 Wien



REMAIN

REsilient MotorwAy Infrastructure

ERGEBNISBERICHT

Ein Projekt finanziert im Rahmen der

Verkehrsinfrastrukturforschung

(VIF2020)

AutorInnen:

DI Dr. Eva M. EICHINGER-VILL

DI Dr. Robert VEIT-EGERER

DI Dr. Alois VORWAGNER

DI Dr. Alfred WENINGER-VYCUDIL

em. o.Univ.-Prof. DI Dr. Johann LITZKA

DI Theresa REIMOSER

DI Dr. Christian GASSER

Auftraggeber:

Bundesministerium für Klimaschutz

Autobahnen- und Schnellstraßen-Finanzierungs-Aktiengesellschaft

Auftragnehmer:

Vill Ziviltechniker GmbH

AIT Austrian Institute of Technology GmbH

VCE Vienna Consulting Engineers ZT GmbH

Deighton Ingenieurbüro für Verkehrswesen und Infrastrukturplanung GmbH

VORWORT

Der vorliegende Bericht fasst die Ergebnisse des Projekts REMAIN (Resilient Motorway Infrastructure) zusammen, das aus Mitteln der Verkehrsinfrastrukturforschung 2020 finanziert wurde und erstmalig eine Methodik zur Beurteilung der Resilienz von Anlagen der Straßeninfrastruktur entwickelt.

Die hervorragende Unterstützung und die konstruktive und wertschätzende Zusammenarbeit mit den Auftraggebern während der gesamten Projektlaufzeit haben maßgebend zum Gelingen des Projekts beigetragen. Das Projektteam bedankt sich daher herzlich bei den Vertreter*innen der Auftraggeber: DI Christian Honeger, Dr. Thomas Moser und Dr. Dominik Prammer von der ASFINAG, DI Dirk Neuburg und DI Juliana Reimoser von der Stadt Wien sowie Dr. Johann Horvatits und Dr. Wolfgang Kluger-Eigl vom BMK haben das Projekt durch ihre Beiträge und Ideen sehr bereichert.

Großer Dank gilt auch den Expert*innen aus den Bereichen Asset Management, Risikomanagement, Verkehrsmanagement und Naturgefahren der ASFINAG für die wertvollen Anregungen und Diskussionen im Rahmen der technisch-inhaltlichen Workshops.

Nicht zuletzt gilt ein besonderer Dank den Mitgliedern des Technical Advisory Boards (TAB), allen voran Prof. Dr. Johann Litzka in seiner Funktion als technisch-wissenschaftlicher Leiter des TAB sowie Prof. Dr. Johannes Hübl und Dr. Nikolaus Müllner dafür, dass sie das Team über die gesamte Laufzeit mit ihrer fachlichen Expertise unterstützt haben.

EXECUTIVE SUMMARY

Im Rahmen des Projekts REMAIN wird erstmalig eine Methodik zur Ermittlung von Resilienz-kennzahlen und damit verbunden eines Resilienz-Labelings für die Bewertung von Anlagen der Straßeninfrastruktur und von geplanten Bau- und/oder Erhaltungsmaßnahmen entwickelt. Das Projekt konzentriert sich dabei auf drei wesentliche Resilienz Aspekte:

- Identifizierung und Beschreibung der Exposition gegenüber Gefahren für einen Netzabschnitt und der in diesem Abschnitt vorhandenen Assets
- Grundsätzliche Beurteilung des Widerstandes bzw. der Wiederherstellungskraft der Netzabschnitte und der in diesem Abschnitt vorhandenen Assets gegenüber den vorhandenen Gefahren (Resilienz-Labeling)
- Beurteilung der Wirkung von geplanten Bau- oder Erhaltungsmaßnahmen auf die Resilienz (Erhöhung des Widerstandes) vor dem Hintergrund einer höchstmöglichen Zuverlässigkeit und Verfügbarkeit mithilfe von Resilienz-kennzahlen

Die Resilienz-kennzahlen werden so entwickelt, dass sie in den Kennzahlenkatalog des Straßeninfrastrukturbetreibers aufgenommen werden können und künftig z.B. im Zuge der Erstellung des Bauprogramms als weitere Indikatoren zur Bewertung und folglich Priorisierung von Projekten/Maßnahmen, zur Steuerung, zur Risikobewertung und zur Nachverfolgung der Erreichung von übergeordneten Kunden- und Finanzzielen dienen. Zusätzlich können die Resilienz-kennzahlen bei der Projektentwicklung mitberücksichtigt werden, um im Zuge der Umsetzung einer Bau- oder Erhaltungsmaßnahme gleichzeitig die Resilienz eines Netzabschnitts bzw. eines Assets zu erhöhen.

Dieser Bericht präsentiert detailliert die Ergebnisse und Erkenntnisse aus allen Arbeitspaketen des Projekts REMAIN. Das Kapitel „Stand der Technik und der Forschung“ enthält neben einer zielgerichteten Literaturrecherche auch die grundlegenden, projektrelevanten Begriffe und Definitionen sowie eine Beschreibung des technisch-wissenschaftlichen Lösungsansatzes.

Das Kapitel „Ableitung von infrastrukturbezogenen Resilienz-Einflussgrößen“ beschreibt methodische Grundlagen zur Resilienzbewertung und zur Definition von Resilienz-Einflussgrößen. Darauf aufbauend wird ein Konzept zur Ableitung infrastrukturbezogener Resilienz-Einflussgrößen vorgestellt. Weiters erfolgt die Auswahl der im Projekt zu betrachtenden Anlagen (den sogenannten REMAIN-Assetkategorien), deren Gliederung in sogenannte Modellanlagen sowie insbesondere die für das Projekt REMAIN relevanten infrastrukturbezogenen Einflussgrößen für die entsprechenden REMAIN-Assetkategorien.

Im Kapitel „Gefahrenidentifikation“ erfolgt die Beschreibung der asset- und abschnittsspezifischen Gefahren (der sogenannten REMAIN-Gefahren). Jede dieser 18 REMAIN-Gefahren wird in Form eines Factsheets detailliert beschrieben und die Relevanz der Gefahren für die einzelnen REMAIN-Assetkategorien mit Hilfe einer Gefahren-Asset-Matrix beurteilt.

Im darauffolgenden Kapitel „Auswirkungen der Gefahren“ werden die infrastrukturbezogenen Resilienz-Einflussgrößen mit den Gefahren verknüpft, um deren Auswirkung auf die Resilienz der verschiedenen REMAIN-Assetkategorien beurteilen zu können.

Auf Grundlage dieser Erkenntnisse wird schließlich im Kapitel „Entwicklung einer asset-spezifischen Resilienzkennzahl“ pro REMAIN-Asset erfasst, wie viele der Einflussgrößen für die Resilienz dieses Assets hinsichtlich einer REMAIN-Gefahr als relevant sind und diese im Anschluss gewichtet. Dies ist die Basis für den Berechnungsalgorithmus für Resilienzkennzahlen

Dieser Berechnungsalgorithmus bildet die Grundlage für eine vollständige, allgemein anwendbare Methodik zur Ermittlung der Resilienzkennzahlen. Die Methodik kann in weiterer Folge als zusätzliches Kriterium bei der Beurteilung/Präzisierung/Priorisierung des bestehenden (zustandsgetriebenen) Bauprogramms angewendet werden. Die Erstellung eines rein resilienzgetriebenen Bauprogramms ist nicht Ziel des Projekts. Mit der entwickelten Methodik zur Herleitung der Resilienzkennzahlen wird jedoch der etwaige Bedarf von resilienzsteigernden Baumaßnahmen sichtbar gemacht.

Schließlich werden Empfehlungen zur Implementierung der Resilienzkennzahlen und des Resilienz-Labelings gegeben. Diese Empfehlungen werden gemeinsam mit den notwendigen Anforderungen – vor allem in Bezug auf die erforderlichen Daten und deren Qualität – in einem Implementierungsleitfaden zusammengefasst. Dabei ist es notwendig, die Erkenntnisse mit generellen Anforderungen aus den Geschäftsprozessen des Asset Managements des Infrastrukturbetreibers zu verknüpfen, sodass für eine umfassende Implementierung auch aus organisatorischer Sicht die richtigen Schritte gesetzt werden können.

INHALTSVERZEICHNIS

1	Einleitung	10
1.1	Aufgabenstellung	10
1.2	Arbeitspakete	11
1.3	Zusammenspiel der Arbeitspakete AP 3, AP 4, AP 5 und AP6.....	12
1.4	Abstimmung mit den Auftraggebern	13
2	Stand der Technik und der Forschung (AP 2)	14
2.1	Asset Management	14
2.2	Stand der Forschung zur Resilienz im Asset Management.....	15
2.3	Status Quo der Resilienzbewertung von Verkehrsnetzen	20
2.4	Weitere relevante Projekte und Literaturquellen	25
2.5	Zu beantwortende Forschungsfragen.....	31
2.6	Weitere Begriffe und Begriffsabgrenzung für das Projekt REMAIN.....	32
2.7	Möglichkeiten zur Beurteilung der Resilienz	35
2.8	Systemabgrenzung	37
2.9	Vorschlag eines technisch-wissenschaftlichen Lösungsansatzes.....	37
3	Ableitung von infrastrukturbezogenen Resilienz-Einflussgrößen (AP 3)	41
3.1	Grundlagen	41
3.2	Methodik zur Ableitung der Resilienz-Einflussgrößen.....	44
3.3	REMAIN-Assets	45
3.4	Resilienz-Einflussgrößen.....	50
4	Gefahrenidentifikation (AP 4)	60
4.1	Ziele und Nicht-Ziele des Arbeitspakets 4 „Gefahrenidentifikation“	60
4.2	Gefahren für die Straßeninfrastruktur und Ihre Assets.....	62

5	Auswirkungen der Gefahren (AP 5)	69
5.1	Konzeptionelle Vorbemerkungen.....	69
5.2	Beurteilung der Einflussgrößen	72
5.3	Einstufung der Gefahren und Ermittlung des Gefahrenpotentials	95
6	Entwicklung einer asset-spezifischen Resilienz Kennzahl (AP 6)	99
6.1	Gewichtung der Resilienz-Einflussgrößen	99
6.2	Entwicklung eines Berechnungsalgorithmus für Resilienz Kennzahlen	113
7	Integration und Implementierung (AP 7)	123
7.1	Anwendungsrahmen Implementierungsleitfaden	123
7.2	Überblick Inhalt Implementierungsleitfaden	124
7.3	REMAIN im Erhaltungsmanagement.....	125
	Literaturverzeichnis	126

ANHANG 1: Resilienz-Einflussgrößen

ANHANG 2: REMAIN-Gefahren Factsheets

ANHANG 3: Vollständige Tabellen der bewerteten Einflussgrößen

ANHANG 4: Vollständige Tabellen der gewichteten Einflussgrößen

ANHANG 5: Implementierungsleitfaden

1 EINLEITUNG

1.1 Aufgabenstellung

Im Rahmen des Projekts REMAIN wird erstmalig eine Methodik zur Ermittlung von Resilienz-kennzahlen und damit verbunden eines Resilienz-Labelings für die Bewertung von Anlagen der Straßeninfrastruktur und von geplanten Bau- und/oder Erhaltungsmaßnahmen entwickelt. Das Projekt konzentriert sich dabei auf drei wesentliche Resilienz Aspekte:

- Identifizierung und Beschreibung der Exposition gegenüber Gefahren für einen Netzabschnitt und der in diesem Abschnitt vorhandenen Assets
- Grundsätzliche Beurteilung des Widerstandes bzw. der Wiederherstellungskraft der Netzabschnitte und der in diesem Abschnitt vorhandenen Assets gegenüber den vorhandenen Gefahren (Resilienz-Labeling)
- Beurteilung der Wirkung von geplanten Bau- oder Erhaltungsmaßnahmen auf die Resilienz (Erhöhung des Widerstandes) vor dem Hintergrund einer höchstmöglichen Zuverlässigkeit und Verfügbarkeit mithilfe von Resilienz-kennzahlen

Die Resilienz-kennzahlen werden so entwickelt, dass sie in den Kennzahlenkatalog des Straßeninfrastrukturbetreibers aufgenommen werden können und künftig z.B. im Zuge der Erstellung des Bauprogramms als weitere Indikatoren zur Bewertung und folglich Priorisierung von Projekten/Maßnahmen, zur Steuerung, zur Risikobewertung und zur Nachverfolgung der Erreichung von übergeordneten Kunden- und Finanzzielen dienen. Zusätzlich können die Resilienz-kennzahlen bei der Projektentwicklung mitberücksichtigt werden, um im Zuge der Umsetzung einer Bau- oder Erhaltungsmaßnahme gleichzeitig die Resilienz eines Netzabschnitts bzw. eines Assets zu erhöhen.

Im Projekt REMAIN wird daher zunächst eine vollständige, allgemein anwendbare Methodik zur Ermittlung der Resilienz-kennzahlen ausgearbeitet, die in weiterer Folge als zusätzliches Kriterium bei der Beurteilung/Präzisierung/Priorisierung des bestehenden (zustandsgetriebenen) Bauprogramms konkretisiert wird. Die Erstellung eines rein resilienzgetriebenen Bauprogramms ist nicht Ziel des Projekts. Mit der entwickelten Methodik zur Herleitung der Resilienz-kennzahlen wird jedoch der etwaige Bedarf von resilienzsteigernden Baumaßnahmen sichtbar gemacht.

Schließlich werden Empfehlungen zur Implementierung der Resilienz-kennzahlen und des Resilienz-Labelings gegeben. Diese Empfehlungen werden gemeinsam mit den notwendigen

Anforderungen – vor allem in Bezug auf die erforderlichen Daten und deren Qualität – in einem Implementierungsleitfaden zusammengefasst.

1.2 Arbeitspakete

Das Projekt setzt sich aus insgesamt 9 Arbeitspaketen zusammen (Tabelle 1), wobei sich die Arbeitspakete 2 bis 7 mit den technisch-inhaltlichen Aspekten beschäftigen, während die restlichen Arbeitspakete die organisatorischen Anforderungen hinsichtlich Projektsteuerung (Arbeitspaket 1), Workshops, Berichte und Präsentationen (Arbeitspaket 8) sowie die Begleitung des Projekts durch ein Technical Advisory Board (TAB) abdecken.

Tabelle 1: Arbeitspakete im Projekt REMAIN

Arbeitspakete im Projekt	Zieldatum
AP 1: Projektmanagement	30.11.2022
AP 2: Stand der Technik und Begriffsdefinitionen	30.09.2021
AP 3: Ableitung von infrastrukturbezogenen Resilienz-Einflussgrößen	31.01.2022
AP 4: Gefahrenidentifikation	31.01.2022
AP 5: Auswirkungen der Gefahren	31.03.2022
AP 6: Entwicklung einer asset-spezifischen Resilienzkennzahl	31.07.2022
AP 7: Integration	31.10.2022
AP 8: Workshops, Berichte, Präsentationen	30.11.2022
AP9: Technical Advisory Board	30.11.2022

Dies spiegelt sich auch in den nachfolgenden Kapiteln wider, welche die Inhalte der Arbeitspakete 2 bis 7 abdecken und auf Basis der für jedes Arbeitspaket verfassten Zwischenberichte (intern) erstellt wurden:

- REMAIN RESilient MotorwAy INFrastructure – Zwischenbericht AP 2: Stand der Technik und Begriffsdefinitionen
- REMAIN RESilient MotorwAy INFrastructure – Zwischenbericht AP 3: Ableitung von infrastrukturbezogenen Resilienz-Einflussgrößen
- REMAIN RESilient MotorwAy INFrastructure – Zwischenbericht AP 4: Gefahrenidentifikation

- REMAIN REsiliant MotorwAy INfrastructure – Zwischenbericht AP 5: Auswirkungen der Gefahren
- REMAIN REsiliant MotorwAy INfrastructure – Zwischenbericht AP 6: Entwicklung einer asset-spezifischen Resilienzkenzahl
- REMAIN REsiliant MotorwAy INfrastructure – Zwischenbericht AP 7: Integration und Implementierungsleitfaden

1.3 Zusammenspiel der Arbeitspakete AP 3, AP 4, AP 5 und AP 6

Die Arbeitspakete AP 3 (Ableitung von infrastrukturbezogenen Resilienz-Einflussgrößen) und AP4 (Gefahrenidentifikation) laufen zeitlich parallel ab und ergänzen einander inhaltlich, wobei

- AP 3 die Widerstandsseite und
- AP 4 die Einwirkungsseite

einer Struktur bzw. eines Netzabschnitts behandelt (Abbildung 1).

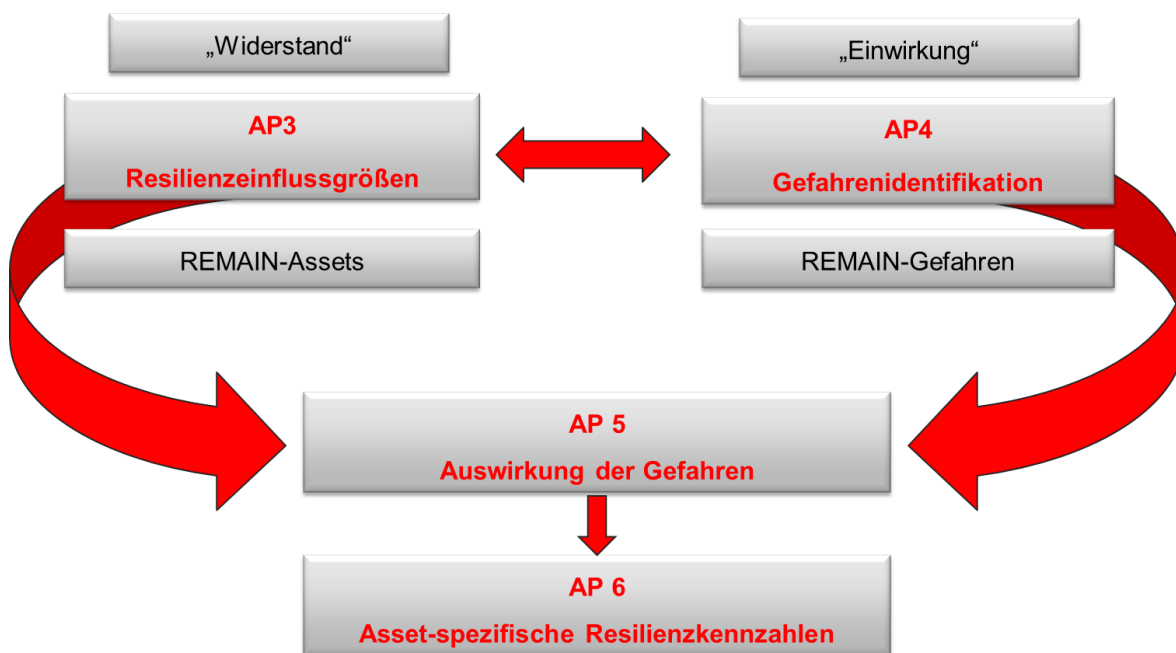


Abbildung 1: Zusammenhang zwischen den Arbeitspaketen AP 3, AP 4, AP 5 und AP 6

Einflussgrößen und Gefahrenexposition werden zuerst getrennt betrachtet. Die Kombination der Einflussgrößen (AP 3) mit der standortspezifischen Gefährdung (AP 4) stellt das zentrale Element der Infrastruktur-Resilienz dar und ist Gegenstand des AP 5. Darauf aufbauend erfolgt im AP 6 die Definition der maßgebenden Einflussgrößen für die vier Resilienz-Teilindikatoren

Robustheit, Redundanz, Ressourcen und Rapidität und die Ableitung eines Algorithmus zur Ermittlung von Resilienzkennzahlen aus den vier Teilindikatoren.

1.4 Abstimmung mit den Auftraggebern

Im Zuge der gesamten Projektlaufzeit erfolgte eine intensive Abstimmung mit den Auftraggebern sowohl im Rahmen von Workshops mit dem gesamten Projektkonsortium als auch mit ausgewählten Expert*innen zur vertieften Diskussion und Entscheidungsfindung ausgewählter technisch-inhaltlicher Fragestellungen. Folgende Abstimmungstermine fanden statt:

- 22. Juni 2021: FFG Kick-off Meeting
- 1. Juli 2021: Kick-off Meeting mit den Auftraggebern
- 24. September 2021: 1. Workshop mit den Auftraggebern
- 14. Dezember 2021: Expertengruppe AP3/AP4
- 2. März 2022: 2. Workshop mit den Auftraggebern
- 9. September 2022: Expertengruppe AP5/AP6
- 11. November 2022: 3. Workshop mit den Auftraggebern (Abschlussworkshop)

2 STAND DER TECHNIK UND DER FORSCHUNG (AP 2)

Dieses Kapitel enthält die Zusammenfassung des Stands der Technik und der Forschung. Es enthält neben einer zielgerichteten Literaturrecherche auch die Ergebnisse eines gemeinsamen Workshops zwischen Auftraggebern und Auftragnehmern am 24. September 2021, in dem die Begriffsabgrenzung abgeglichen sowie die Vorschläge des technisch-wissenschaftlichen Lösungsansatzes präsentiert und die geplante Methodik abgestimmt wurden.

Resilienzforschung von kritischen Infrastrukturen war und ist international, sowohl von Forschungseinrichtungen als auch von Seiten der Infrastrukturbetreiber und (regionaler) Verwaltungen, ein Thema von sehr hoher Bedeutung. Dementsprechend gab es in den letzten Jahren eine Vielzahl von Projekten und Publikationen in diesem Bereich. Dieser Abschnitt stellt den Stand der Technik und der Forschung zur Resilienz im Asset Management im Kontext der Straßeninfrastruktur dar und fasst die Ergebnisse einer Recherche von relevanten Projekten in einer kurzen und prägnanten Form zusammen. So entsteht ein Überblick von Forschungsansätzen, Methodiken und deren mögliche Anwendbarkeit in Bezug auf die Beurteilung der Resilienz der Straßeninfrastruktur und ihrer Assets.

2.1 Asset Management

Die systematische Erhaltungsplanung oder das Asset Management fokussiert sich auf die Sicherstellung der Zuverlässigkeit und Verfügbarkeit von physischen Assets, wie z. B. Straßen, Ingenieurbauwerken und sonstigen Anlagen. Als ein Steuerungsinstrument im Asset Management dienen Schlüsselindikatoren (Key Performance Indikatoren oder KPIs), die als Vergleichswert von Parametern für Qualität, Verfügbarkeit und Verkehrssicherheit unter Berücksichtigung von Lebenszykluskosten und Risiken dienen.

Eine wesentliche Voraussetzung für die effiziente Verwendung eines solchen Bewertungsinдикators ist eine zielorientierte Herangehensweise, die nach unterschiedlichen Bewertungskriterien, wie z.B. Kosten, Verfügbarkeit oder Verkehrssicherheit, aber auch Resilienz erfolgen kann. Neben der natürlichen Alterung von Bauwerken sind es disruptive Ereignisse, welche im Zuge der Nutzungsdauer eines Bauwerks auftreten können. Bauwerke werden im Zuge ihrer Errichtung auf bestimmte genormte Einwirkungen ausgelegt, deren Bemessungsansätze zum Zeitpunkt der Bauwerkerrichtung festgelegt wurden. Diese umfassen neben Lastansätzen aus der Nutzung als Bemessungslasten auch außergewöhnliche Einwirkungen wie Anprall, Erdbeben, Brand.

Voraussetzung für ein zielgerichtetes Asset Management ist die Kenntnis über die Infrastruktur und deren Zustände. Dies beinhaltet die bestmögliche Erfassung von Plan- und Istzuständen. Außerdem sollen die Auswirkungen von gesetzten Erhaltungsmaßnahmen in Bezug auf die (strategischen) Ziele bzw. auf die Anforderungen der Stakeholder laufend evaluiert werden (Abbildung 2).

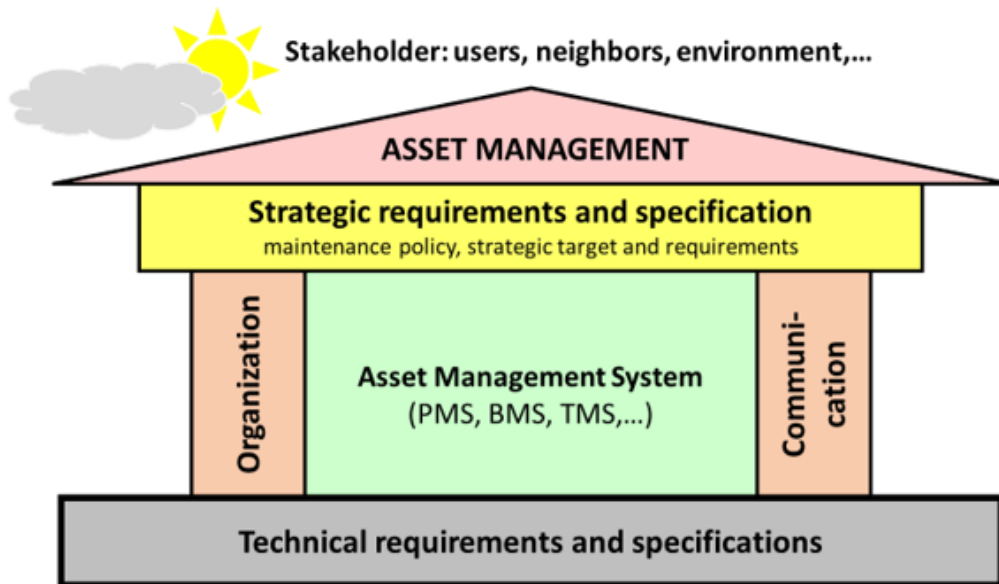


Abbildung 2: Übersicht Asset Management

2.2 Stand der Forschung zur Resilienz im Asset Management

Die ungestörte Funktionalität als Verfügbarkeit des Straßennetzes für die Transportmobilität ist unverzichtbar für die Gesellschaft. Verschiedene disruptive Ereignisse (Naturgefahren und anthropogene Ursachen oder Bauwerksalterung) können die Funktionalität der Straßeninfrastruktur beeinträchtigen und somit die Mobilitätsleistung gerade dann schwächen, wenn sie besonders dringend gebraucht wird (z.B. zur Erstversorgung sowie zur Beseitigung anderer Folgen dieser Ereignisse). Deshalb soll die **Fähigkeit des Straßennetzes, bei disruptiven Ereignissen mit möglichst kleiner Beeinträchtigung des Betriebs umzugehen bzw. verkraften zu können**, gefördert werden.

Zur Abgrenzung und verbesserten Definition von Resilienz ist wichtig, die Funktionalität der Infrastruktur auf die entsprechende Betrachtungsebene zu beziehen. Als Bezugsgröße können Einzelbauwerke, Straßenabschnitte oder Teilnetze herangezogen werden, aber auch unterschiedliche Netzebenen wie regionale Straßen, Landes- und Bundesstraßennetz, oder hochrangige Netze wie Autobahnen und Schnellstraßen, jeweils für sich oder als gesamtes Mobilitätssystem.

Um Resilienz im Kontext von Asset Management zu diskutieren, sind einheitliche Begriffsbestimmungen bzw. Definitionen erforderlich. Für Resilienz gibt es viele Definitionen, eine davon wurde von [1] wie folgt definiert: „Resilienz ist die Fähigkeit, sich auf disruptive Ereignisse vorzubereiten, sie einzukalkulieren, sie abzuwehren, Auswirkungen zu verkraften, sich möglichst schnell davon zu erholen und sich ihnen immer erfolgreicher anzupassen“. Weitere Ausführungen zur Begriffsfestlegungen sind im Kapitel 2.6 spezifisch für das Projekt REMAIN abgeleitet worden.

Das Resilienzkonzept wird insbesondere dort angewandt, wo die Funktionalität (z.B. Straßeninfrastruktur = Transportfähigkeit von Personen und Güter) des Systems von kritischer Bedeutung ist. Empirische Studien zum Thema Resilienz sind am häufigsten in den Sektoren Flugverkehr, Medizin und chemische Industrie zu finden [2], gefolgt von Kernkraft und Schienenverkehr.

Der Prozess einer Störung bis zur Wiederherstellung der Funktionalität einer Systemfunktion $\varphi(t)$ verläuft im Ereignisfall ohne Schutzfunktion über 3 Phasen ab:

- Respond: Direkte Antwort des Systems auf ein Störereignis
- React: Reaktionsphase des Systems auf ein Störereignis
- Recover: Wiederherstellungsphase (= Einleiten einer Maßnahme) bis auf ein bestimmtes Zustandsniveau

Liegen Schutzfunktionen durch vorbereitende Maßnahmen (Vorkehrungen) vor, werden sowohl das Schadensausmaß als auch die Unterbrechungszeit wesentlich reduziert. Schutzmaßnahmen sind entsprechend Abbildung 3:

- Prepare: Vorbereitende Maßnahmen zur Störungsminimierung
- Protect: Direkte Schutzmaßnahmen gegen gezielte Störungen
- Prevent: Generelle Vermeidungsstrategien

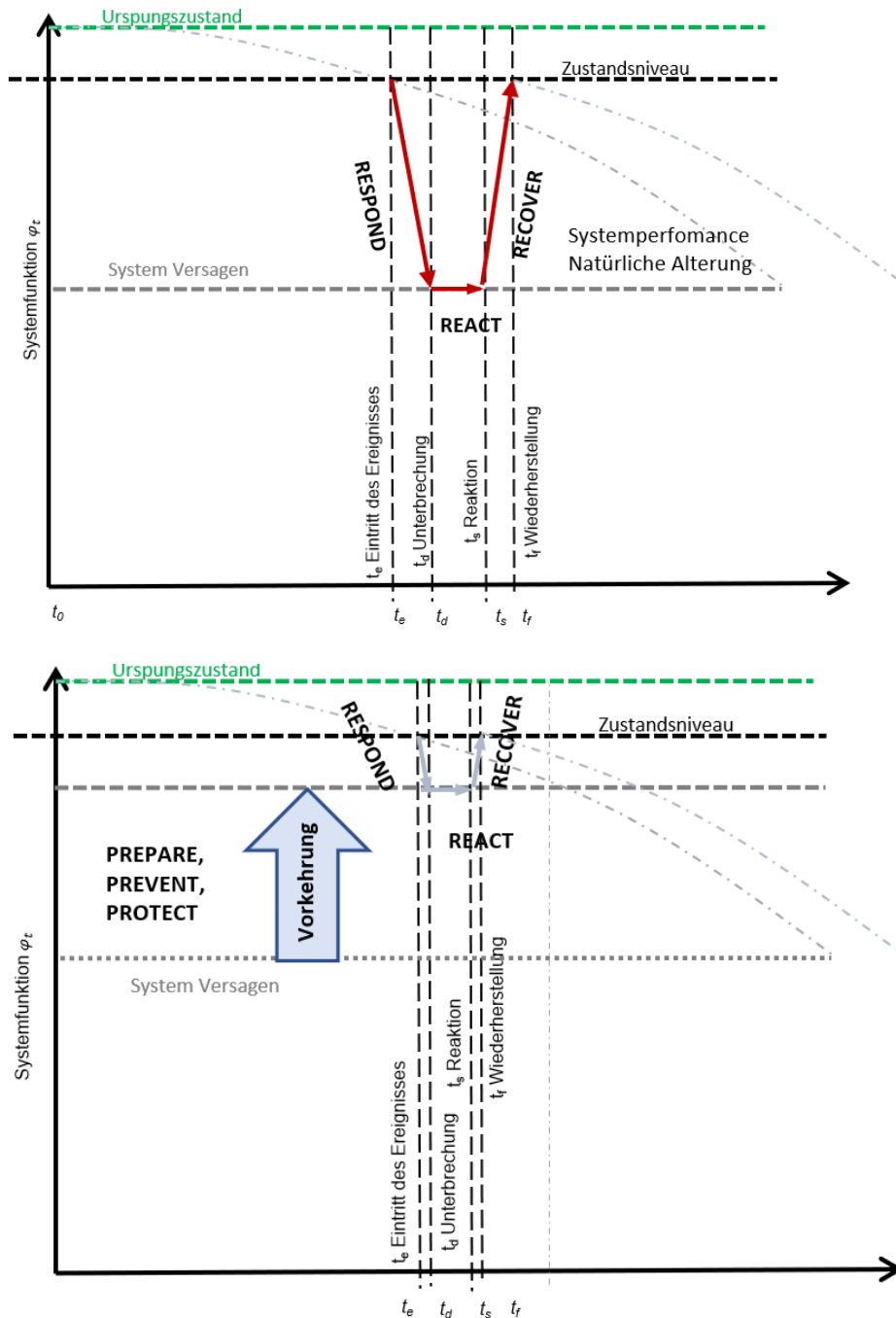


Abbildung 3: Prozess Störung und Wiederherstellung der Systemfunktion $\varphi(t)$

Die Systemfunktion bzw. $\varphi(t)$ z.B. für ein Straßennetz, steht wie in Abbildung 4 unten dargestellt in direktem Zusammenhang mit der Resilienz. Sie nimmt nach einem disruptiven Ereignis schnell ab. Die Größe des Verlustes ist durch die Vulnerabilität (=Verwundbarkeit- siehe Begriffe Kapitel 2.6) der Infrastruktur und durch die Intensität des Ereignisses gegeben. In der Wiederherstellungsphase beginnt sich die Systemfunktion nach dem Schadenseintritt mit der

Einleitung der Maßnahmen zu erhöhen, bis zu ihrer endgültigen Wiederherstellung (Abbildung 4 unten).

Zur quantitativen Bewertung der System Resilienz wurden in der Literatur [3] verschiedene Definitionen vorgeschlagen. Sie kann über verschiedene Wege des Verlaufes der Systemperformance $\varphi(t)$, welche äquivalent zur Funktionalität $Q(t)$ ist, ausgedrückt werden. Dabei ist wichtig festzuhalten, dass die Funktionalität proportional zur Systemperformance sein kann, $Q(t) \propto \varphi(t)$. Eine der am meisten verwendeten Definitionen ist die Betrachtung des Resilienzverlustes R (Abbildung 4 oben), berechnet aus dem Integral des Verlusts der Funktionalität $Q(t)$ über die Zeit.

$$R = \int_{t_0}^{t_1} [100 - Q(t)] dt$$

Gl. 1

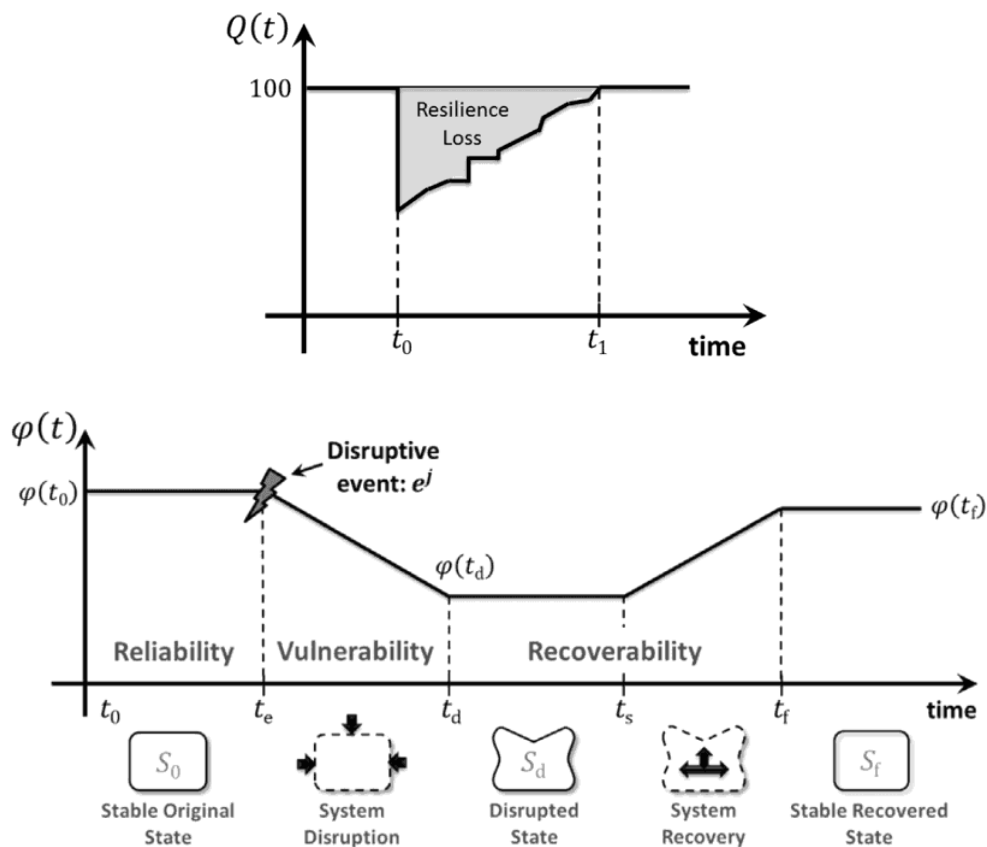


Abbildung 4: Resilienzverlust auf Basis der Funktionalität $Q(t)$ (oben) und Systemfunktion $\varphi(t)$ (unten) nach disruptiven Ereignissen [3]

Die Funktionalität $Q(t)$ lässt sich dimensionslos (wie in Gl. 1 in Prozent) oder in projektspezifischen Einheiten (z.B. in Währung, Durchsatz an Verkehr, etc.) erfassen. Besteht ein linearer Zusammenhang zwischen Systemfunktionalität und Systemqualität, so entspricht die

dimensionslose Erfassung der Systemqualität gerade der Systemfunktionalität. Werden nicht Systeme, sondern Einzelbestandteile eines Netzes z.B. Tragwerke betrachtet, kann unter $Q(t)$ aber auch die Funktionalität dieses Einzeltragwerkes verstanden werden.

Beispielsweise lässt sich somit die Funktionalität eines (Brücken-)Tragwerks $Q(t)$ nach Einwirkung eines Ereignisses für die Wiederherstellung angelehnt an [5] probabilistisch aus den bedingten Wahrscheinlichkeiten $P_{S=DS_i|IM}$ bestimmen (= Wahrscheinlichkeit, dass das Ausmaß des Schadens dem i -ten Zustand zugeordnet werden kann ($S = DS_i$)), unter der Bedingung, dass ein Ereignis der Intensität IM eingetreten ist. Die Variable $i = 1, 2, \dots, n$ repräsentiert dabei den Index des Schadenszustandes. Ordnet man in weiterer Folge jedem Schadenszustand eine Wiederherstellungsfunktion FR_i zu, so ergibt sich die Funktionalität für beispielsweise $n = 4$ Funktionalitätsstufen (bzw. Schadenszustände) wie folgt:

$$Q(t) = \sum_{i=1}^4 FR_i(t) \cdot P_{S=DS_i|IM} \quad \text{Gl. 2}$$

Die Dauer der Wiederherstellung einzelner Stufen der Funktionalität kann auch als probabilistische Variable erweitert werden. So wurden von [5] die Wahrscheinlichkeiten der Wiederherstellungsphase einer Beispielbrücke nach Erdbebeneinwirkung mittels Monte-Carlo berechnet. So können für beispielsweise $n = 4$ Funktionalitätsstufen einer Brücke ($i = 1$: Notzugang (Emergency access), $i = 2$: eingeschränkte Spurführung (one lane closed), $i = 3$: Gewichtsbeschränkung (weight restriction) und $i = 4$: uneingeschränkte Funktion (open)) die zugehörigen Wahrscheinlichkeiten, dass sich die untersuchte Brücke in den jeweiligen verschiedenen Funktionsstufen befindet, berechnet werden (Ergebnis siehe Abbildung 5). Wie anhand des Beispiels gezeigt wird, nimmt die Wahrscheinlichkeit, dass sich die Brücke in einem kritischen Funktionszustand befindet, mit der Zeit ab, wenn Reparaturen/Sanierungen an der Brücke durchgeführt werden, die Kurve für uneingeschränkte Funktion (open) nimmt über die Zeit zu. Wie aus Abbildung 5 hervorgeht, beträgt die Wahrscheinlichkeit, diese Brücke nach 500 Tagen ab der Wiederherstellungsphase für den Verkehr zu öffnen, nahezu 1,0. Es besteht eine hohe Wahrscheinlichkeit, dass eine Fahrspur innerhalb von 90 Tagen nach der Wiederherstellungsphase geschlossen wird, diese nimmt dann fortlaufend deutlich abnimmt [5].

Die Summe der Wahrscheinlichkeiten für die verschiedenen Funktionalitätsstufen ist, per Definition immer gleich eins [5]. Daher können die Funktionalitätsstufen als eine Reihe von sich gegenseitig ausschließenden und gemeinsam erschöpfenden Ereignissen definiert werden. Weitere probabilistische Berechnungsparameter zur Bestimmung der Wahrscheinlichkeiten sind in [5] definiert.

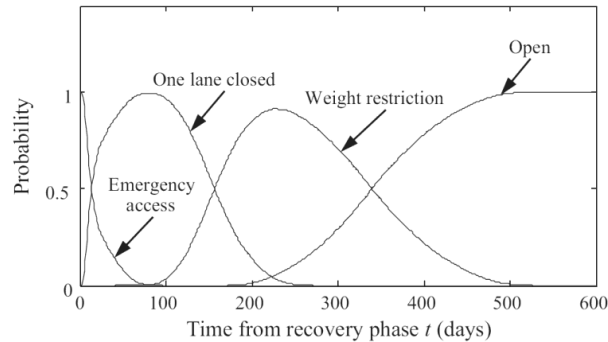


Abbildung 5: Wahrscheinlichkeit verschiedener Funktionalitätsstufen einer Brücke nach einem disruptiven Ereignis [5]

Die Resilienzbewertung geht über die Bewertung der Verwundbarkeit (Vulnerabilität) hinaus, indem zusätzlich zur Abschätzung des Schädigungsgrades durch ein disruptives Ereignis auch die Funktionalität des Tragwerks und ihre zeitliche Entwicklung in der Wiederherstellungsphase abgeschätzt werden. Darauf aufbauend wird dann die zeitliche Entwicklung der Performance vom Straßennetz durch Netzwerksimulation bewertet.

Die Dauer der Wiederherstellungsphase hängt u.a. von der Reaktionsfähigkeit der zuständigen Organisationen ab. Das Benchmark Resilience Tool [6] bewertet beispielsweise basierend auf 13 Indikatoren die organisatorische Resilienz der teilnehmenden Organisationen. Mit dem Tool wurden Umfragen zu Führung, Einstellung der Mitarbeiter, Problembewusstsein, effektiven Partnerschaften, internen Ressourcen usw. ausgewertet mit dem Ergebnis, dass die befragten Organisationen stark in effektiven Partnerschaften sind, aber schwach im Aufbrechen von Silodenken sind. Die Ergebnisse zeigen auch, dass leitende Angestellte die Widerstandsfähigkeit ihrer Organisationen viel positiver einschätzen als andere Mitarbeiter.

2.3 Status Quo der Resilienzbewertung von Verkehrsnetzen

Im Bauwesen wird die Bewertung der Verwundbarkeit („Vulnerability“) von Bauwerken vor allem im Erdbebeningenieurwesen seit rund zwei Dekaden zur Bewertung und Beurteilung herangezogen [7]. Durch Einbeziehung von sogenannten Vulnerability Functions, welche stark auf probabilistischen Ansätzen beruhen, können Auftretenswahrscheinlichkeiten, aber auch (nichtlineare) Systemreserven von Einzelbauwerken dargestellt werden, aus denen in weiterer Folge auch deren Resilienz abgeleitet werden kann. Basierend auf dieser Erkenntnis wurde 1997 in den Vereinigten Staaten von Amerika vom National Institute of Building Science die HAZUS Methode entwickelt [8], mit dem Ziel unter anderem den finanziellen Schaden an Hochbauten zufolge Erdbebenereignissen abschätzen zu können. Die Geburtsstunde von

resilienz-basierendem Ingenieurwesen geht mit dem Kobe-Erdbeben einher, bei welchem die Straßeninfrastruktur stark beschädigt wurde [9][10]. Seit dem Kobe-Erdbeben ist evident, dass eine resiliente Verkehrsinfrastruktur für das Wohl der Gesellschaft (sei dies nun in wirtschaftlicher oder gesellschaftlicher Hinsicht) von hoher Relevanz ist.

Durch Resilienzbewertung der Verkehrsnetze können kritische Punkte im Verkehrssystem entdeckt werden, und durch geeignete Maßnahmen kann die Systemresilienz erhöht werden. Zhang&Wang [11] haben den WIPW (Weighted Independent Pathways) Indikator zur Bewertung der Resilienz von Straßennetzen vorgeschlagen, und damit kritische Brücken im Netz identifiziert, die im Erdbebenfall die Performance des Gesamtsystems beeinträchtigen würden. Die Analyse baut dabei auf den Vulnerabilitätskurven einzelner Tragwerke auf, die die Wahrscheinlichkeit einzelner Schädigungsgrade bei definierter Einwirkung ausdrücken.

Im Forschungsprojekt RESILENS [12] wurde dagegen eine Methodik der Resilienzbewertung vorgestellt, die auf Expertenwissen aufbaut, und mit gewichteten Benotungen arbeitet. Der Vorteil der Nutzung von Expertenwissen statt der simulationsbasierten Vulnerabilitätskurven ist der deutlich geringere Aufwand. Der Nachteil besteht in einem gewissen Grad an Subjektivität der Benotungen und Gewichtungsfaktoren, die nicht genau reproduzierbar sind.

Im Forschungsprojekt INFRARISK [13] wurden Vulnerabilitätskurven von Brücken und Tunneln gegen Erdbeben, Flut und Untergrundversagen zusammengestellt. Es wurde hier das Problem der unterschiedlichen Taxonomien behandelt, und eine Methodik der Transformation der Vulnerabilitätskurven zu anderen Taxonomien basierend auf Bayes'schen Netzwerken vorgeschlagen. Weiterhin wurden hier Expertenbefragungen zur Abschätzung des Verlustes der Funktionalität von Tragwerken durchgeführt. Daraus resultierte eine Abschätzung der zeitlichen Entwicklung der Funktionalität von Tragwerken in der Wiederherstellungsphase, abhängig vom Schädigungsgrad nach einem disruptiven Ereignis. Das INFRARISK-Projekt baute auf anderen Vorprojekten auf, wie z.B. auf das Projekt MATRIX [14], welches eine Methode der Vulnerabilitätsbewertung gegenüber mehreren Risiken erarbeitete.

Die Bewertung des Tragwerkszustands nach disruptiven Ereignissen erfolgt hauptsächlich durch visuelle Inspektion. Im Forschungsprojekt IN2RAIL [15] wurden z.B. die wichtigsten Parameter für Brücken- und Tunnelinspektionen zusammengestellt, diese sind jedoch nicht speziell für die Bewertung nach Extremereignissen gedacht. Für die Tragwerksbewertung können neben der visuellen Inspektion auch messbasierte Techniken des Structural Health Monitoring eingesetzt werden [16], die sowohl mit Dauerüberwachung als auch mit wiederholenden Messungen arbeiten können. Diese wurden ebenfalls für die Bewertung des Zustands alternder

Tragwerke entwickelt, und nicht speziell für die Bewertung nach Extremereignissen. Diese Methoden lassen sich grundsätzlich auch für die Bewertung nach Extremereignissen verwenden, jedoch könnte durch eine auf die Problemstellung spezialisierte Anpassung ihre Effizienz erhöht werden.

Um bei einem disruptiven Ereignis das Verkehrssystem aufrecht zu erhalten, gibt es Eingriffsmöglichkeiten auf mehreren Ebenen. Zum einen ist es in der Infrastrukturplanung essenziell Redundanzen einzuplanen, wie es etwa die Ergebnisse des Forschungsgebiets des redundanten Netzwerkdesigns [17][18] nahelegen, das sowohl in der Telekommunikations- als auch in der Straßennetzplanung zum Einsatz kommt. Zum anderen ist die Verlagerung von Verkehrsströmen nach einem disruptiven Ereignis aktueller Forschungsgegenstand. Insbesondere beschäftigen sich die Arbeiten von Miller-Hooks [19][20][21] und anderen Autoren [22][23][25] mit Resilienz in Straßen- und Transportnetzen. Üblicherweise werden hierbei Methoden der stochastischen Optimierung angewandt, die zweistufig aufgebaut sind. In der ersten Stufe werden unter Berücksichtigung der Ausfallwahrscheinlichkeiten die Pfade für jedes Quelle-Ziel (oder Supply-Demand) Paar festgelegt, die dann in der zweiten Stufe auf das eingetretene Szenario, also das disruptive Ereignis, angepasst werden, was der Berechnung von Ausweichrouten entspricht. Dabei kommen je nach konkreten Anforderungen (spezialisierte) Routing- [26][27][28] als auch Flussalgorithmen [29] zum Einsatz. Andere Anwendungsgebiete, die jedoch ähnliche Methodiken benutzen, umfassen z.B. Service Netzwerk Design [30] und Katastrophenhilfe [31][32][33].

Im Rahmen des Projekts AllTraIn [34] wurde ein All-Hazard Guide für alle relevanten Gefahren für Verkehrsinfrastrukturen in Europa entwickelt. Darüber hinaus wurden Kriterien für die Klassifizierung von Verkehrsinfrastrukturen, die auf der Schadensanfälligkeit beruhen, sogenannte Hazard Fact Sheets, entwickelt und mit einem Nummerncode versehen. Als eine Vorlage für das Erstellen eines Bewertungsmodells für ein bestimmtes lokales Phänomen und die Eingabe der Informationen wurde eine Mischung aus strukturellen Faktoren und Ereignissen eingeführt. Als Bezeichnung für diesen Ansatz wird im Kontext von AllTraIn der Begriff "Gefahrenbaum" eingeführt.

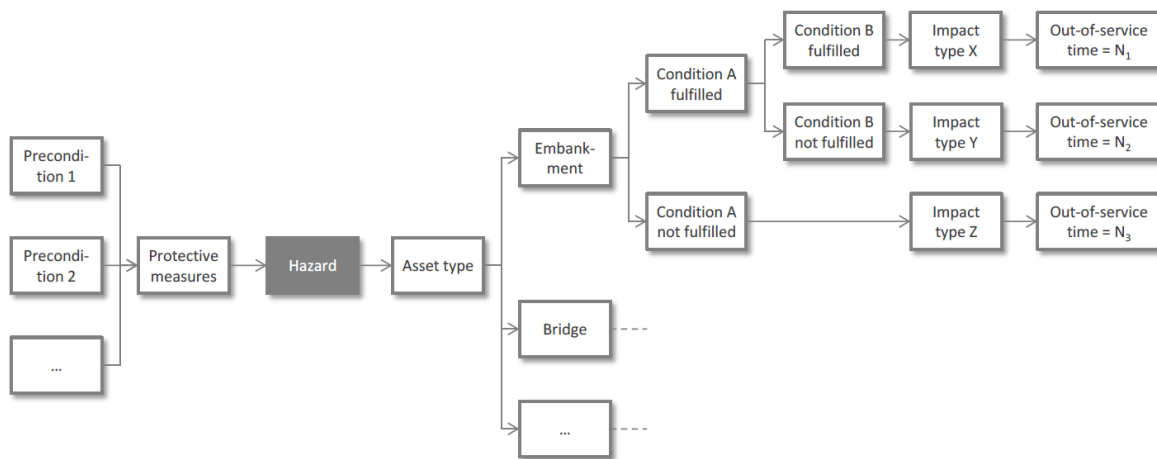


Abbildung 6: Allgemeines Design eines Gefahrenbaumes nach dem Projekt AllTrain [34]

Der endgültige Leitfaden (All-Hazard Guide) ermöglicht es Eigentümern und Betreibern von Verkehrsnetzen (sowohl Straßen- als auch Schieneninfrastruktur), einerseits alle relevanten Bedrohungen für ihre Infrastrukturen und andererseits die Arten von Infrastrukturen in ihrem Netz zu identifizieren, die für eine bestimmte Bedrohung anfällig sind, wobei diese Zusammenhänge mit Gefahrenbäumen erarbeitet werden. Dieser Ansatz zielt auf die Vorbeugung und Ausfallsicherheit kritischer Infrastrukturen (Kritikalitätsanalyse) ab, indem er die Risikobewertung und die Entwicklung von Methoden zum Schutz dieser anregt und unterstützt.

Im Rahmen des Projekts FORESEE [35], in das auch die ASFINAG als Mitglied der Stakeholder Reference Group involviert ist, wurde ein Toolkit zur Resilienzbeurteilung für Eisenbahn- und Straßenkorridore und Logistikterminals entwickelt, um das Ausmaß und/oder die Dauer von Störereignissen, die von Menschen oder der Natur erzeugt werden, zu reduzieren. Die Validierung dieses Toolkits soll im Rahmen von sechs Demonstrationsprojekten (u.a. an ausgewählten Brücken und Tunnel) erfolgen.

Das Projekt RESIST [36] endete im August 2021 und beschäftigt sich mit der Erhöhung der Resilienz von Brücken/Tunneln durch Roboterinspektion und prädiktive Analyse, der möglichst raschen Wiederherstellung der Netzverfügbarkeit nach einem Extremereignis und der effektiven Kommunikation zwischen Infrastrukturbetreibern und -nutzern, Einsatzkräften und der betroffenen Öffentlichkeit.

Das kürzlich fertig gestellte Projekt RITUN-Tunnel Resilienz [37] erstellte einen Leitfaden und enthält alle für die Anwendung in der Praxis notwendigen Informationen und Werkzeuge, um die Resilienz von Straßentunneln systematisch zu verbessern. Hierzu gehört zum einen die

Steigerung der Widerstandsfähigkeit von Tunneln gegenüber äußeren Einflüssen und zum anderen die beschleunigte Rückkehr zur vollen Verfügbarkeit nach Eintritt eines Ereignisses. Auch wird die Möglichkeit berücksichtigt, Tunnel nach einem Ereignis unter Einhaltung des geforderten Sicherheitsniveaus temporär zu betreiben und so eine Teilverfügbarkeit zu gewährleisten. Voraussetzung für die Identifikation von Resilienzmaßnahmen ist die Kenntnis der potenziellen Bedrohungen. Hierfür wurden auf Grundlage des All-Gefahren-Ansatzes allen relevanten Bedrohungen Wirkungsnoten zugeordnet und hieraus Schadensszenarien abgeleitet, und die Auswirkungen der Schadensszenarien auf den Tunnelbetrieb und den Verkehr dargestellt. Ergänzend wurden minimale Betriebsbedingungen erarbeitet, die es durch Umsetzung von Kompensationsmaßnahmen erlauben, einen Tunnel nach einem Ereignis sicher weiter zu betreiben. Die identifizierten Resilienzmaßnahmen wurden mit einer Methodik zur zielgerichteten Auswahl erarbeitet und durch so genannte Fact-Sheets mit detaillierten Informationen zu den Maßnahmen entwickelt und mit Beispielen hinterlegt.

Das in der RVS 09.03.11 definierte Tunnel-Risikoanalysemodell [38] hat zum Ziel, potenzielle Gefährdungen in Straßentunneln und deren Auswirkungen auf die Tunnelnutzer in quantitativer Form als Risiko darzustellen und zu bewerten. Diese Methode ist besonders für Risikovergleiche auf quantitativer Ebene gut geeignet. Es besteht aus mehreren Modulen, mit denen Risikoanalysen für verschiedene Aufgabenstellungen und für verschiedene Arten von Tunneln flexibel durchführbar sind. Es zielt in erster Linie auf die Einwirkungen von Brand ab, berücksichtigt aber auch Unterbrechungen aus Verkehrsüberlastung und Pannen, und liefert dafür Berechnungsmodelle.

Das Forschungsprojekt „Resilienz der Straßeninfrastruktur“ der BASt [4] entwickelte ein modular aufgebautes Konzept für ein Resilienzmanagementsystem. Dieses Konzept bildet die Vorbereitung, die Prävention und den Schutz vor einem disruptiven Ereignis sowie die Reaktion und Regeneration nach dessen Eintritt ab. Die Konzeptentwicklung beschränkte sich hierbei nicht auf theoretische Vorgaben, sondern es wurde auf die Anbindung an bestehende Managementsysteme geachtet. Das berücksichtigte Spektrum an disruptiven Ereignissen umfasst von Menschen verursachte Ereignisse, meteorologische Einflüsse infolge von Niederschlag, Wärme, Kälte, Wind und Schnee sowie gravitationsbedingte (Steinschlag, Muren, Lawinen...), hydrologische und geophysikalische Gefährdungen. Darüber hinaus lassen sich Einwirkungen infolge von Bränden oder technischen Störungen berücksichtigen. In einer 5-stufigen Skala zur Schwere bzw. Intensität eines Ereignisses lassen sich alle Gefahren einteilen. Die Vorgehensweise zur Bewertung von Resilienzen wurde exemplarisch an einem fiktiven Beispiel demonstriert. Im Ergebnis lassen sich mit der vorgestellten Methodik Verluste in der

Verfügbarkeit und Funktionalität über die Zeit aufzeigen. Darüber hinaus gibt es noch Forschungsbedarf bei der Frage, wie das entwickelte Konzept in ein konkretes Verfahren überführt werden kann, um auf Basis der bestehenden Managementsysteme und Daten jederzeit über die Resilienz der Straßeninfrastruktur Auskunft geben zu können.

In [39] wird als ein erster Ansatz für Resilienzbewertung für das ASFINAG-Netz als ein Framework präsentiert. Der Ansatz beruht auf 2 Strategien, einerseits darin die Verhinderung der Gefahren vor allem durch Erhöhung der Robustheit und Redundanz zu stärken, andererseits das Management bei Störeinflüssen zu verbessern (zielt auf die Aspekte Rapidität und Ressourcen ab). Das Resultat soll in einer Karte von Risk- Spots münden, die die Betreiber unterstützen sollen.

2.4 Weitere relevante Projekte und Literaturquellen

Nachfolgend sind in einer kurzen übersichtlichen Form verschiedene Literaturquellen und Projekte, welche das Thema Resilienz behandelten, chronologisch aufgelistet, ergänzt mit einer Kurzzusammenfassung der relevanten Inhalte.

SPUR (2009) – Defining resilience: What San Francisco needs from its seismic mitigation policies [59]: Die SPUR-Methode konzentriert sich auf die Definition von Leistungszielen für verschiedene Gebäudegruppen (d. h. Gruppen von Gebäuden, die eine Gemeinschaftsdienstleistung erbringen, wie z. B. kritische Reaktionseinrichtungen, Notunterkünfte oder Nachbarschaftsdienste) und die Definition der angestrebten Erholungszeit für ein bestimmtes Erdbebenszenario in der San Francisco Bay Area.

Cimellaro et al. (2010) – Framework for analytical quantification of disaster resilience [40]: In dieser Publikation steht die Bewertung der Katastrophenresilienz basierend auf dimensionslosen analytischen Funktionen im Fokus. Diese Funktionen beziehen sich auf die Veränderung der Funktionalität während eines bestimmten Zeitraums, einschließlich der Verluste während der Katastrophe und des Erholungspfad. Diese zeitliche Entwicklung einschließlich der Wiederherstellung unterscheidet den Resilienz-Ansatz von anderen Ansätzen, die sich mit der Abschätzung von Schäden und deren momentanen Auswirkungen befassen.

CUTTER et al. (2010) – Disaster resilience indicators for benchmarking baseline conditions [41]: In diesem Papier werden eine Methodik und eine Reihe von Indikatoren zur Messung der grundlegenden Parameter, die die Resilienz fördern, vorgestellt. Durch die Festlegung von Ausgangsbedingungen wird es möglich, Veränderungen der Resilienz

an bestimmten Orten im Laufe der Zeit zu beobachten und einen Ort mit einem anderen zu vergleichen, wobei die Art der Gefahr vorab nicht näher definiert ist. Die Resilienz wird in Form eines sogenannten Resilience Scores, der sich aus einem Score für Soziales, Wirtschaft, Institutionen, Infrastruktur und kommunales Kapital zusammensetzt, beschrieben. Die verwendete Methodik wird in einer Fallstudie vorgestellt.

FISCHER et al. (2010) – Constructing a resilience index for the enhanced critical infrastructure protection program [44]: Die Publikation zeigt die Entwicklung einer Methodik zur Beurteilung der Resilienz anhand eines Resilienzindex (RI) von 0 (geringe Resilienz) bis 100 (hohe Resilienz). Der RI vergleicht den Grad der Widerstandsfähigkeit kritischer Infrastrukturen und dient als Orientierungshilfe für die Priorisierung begrenzter Ressourcen zur Verbesserung der Widerstandsfähigkeit.

SKRIBT (2011) – Schutz kritischer Brücken und Tunnel im Zuge von Straßen [56]: Zielsetzung des Forschungsvorhabens ist zunächst die Identifizierung möglicher Bedrohungsszenarien, die sich unmittelbar auf Brücken- und Tunnelbauwerke und deren Nutzer auswirken können ("All-Hazards-Ansatz"). Die Auswirkungen der verschiedenen Szenarien auf die Bauwerke und deren Nutzer werden bestimmt. Dazu werden unter anderem Berechnungen von Brand-, Rauch- und Schadgasausbreitungen sowie von Explosionen durchgeführt. Mögliche Schutzmaßnahmen werden mittels Risiko- und Szenarioanalysen sowie Kosten-Nutzen-Analysen auf ihre Wirksamkeit und Effizienz hin untersucht. Hieraus ergibt sich die Ableitung wirksamer baulicher, betrieblicher und organisatorischer Schutzmaßnahmen.

SeRoN (2012) – Security of Road transport Networks. [55]: Das Projekt untersucht die Auswirkungen von Angriffen auf regionale und überregionale Verkehrsverbindungen. Auf Grundlage von kategorisierten Infrastrukturen wurde ein Risikobewertungsinstrument entwickelt, das verschiedene Bewertungsparameter und Risiken auf Objektebene berücksichtigt.

STREST (2013) – Harmonized approach to stress tests for critical infrastructures against natural hazards [60]: Im Zuge des Projekts wurde eine Methodik zur Beurteilung der Gefährdungen, der Vulnerabilität der kritischen Infrastrukturelemente sowie des Risikos und der Resilienz entwickelt, wobei der Fokus auf Erdbeben, Tsunamis, geotechnischen Auswirkungen und Überschwemmungen liegt. Zusätzlich setzt sich das Projekt zum Ziel, Richtlinien für die systematische Implementierung von Stresstests zu entwickeln.

FRITZSCHE et al. (2014) – The Vulnerability Sourcebook. Concept and guidelines for

standardised vulnerability assessments [45]: Diese Publikation beschreibt einen standardisierten Ansatz zur Bewertung der Vulnerabilität, wobei ein breites Spektrum von Sektoren und Themen (z. B. Wassersektor, Landwirtschaft, Fischerei, verschiedene Ökosysteme), räumlicher Ebenen (Gemeinde, subnational, national) sowie Zeithorizonte (z. B. aktuelle Gefährdung oder Gefährdung mittel- bis langfristig) abgedeckt wird. Die Publikation bietet eine schrittweise Anleitung für die Konzeption und Durchführung einer Vulnerabilitätsanalyse, die den gesamten Lebenszyklus von Anpassungsmaßnahmen abdeckt, unter Verwendung konsistenter und in der Praxis bewährter Methoden.

HUGHES/HEALY (2014) – Measuring the resilience of transport infrastructure [46]: Ziel

der Publikation ist die Entwicklung einer Methodik, um das Konzept der Resilienz in der Transportinfrastruktur zu definieren, zu messen und zu verbessern.

NIST framework (2015) – Community Resilience Planning Guide for Buildings and Infrastructure Systems [50]: Das Ziel des Projekts ist die Entwicklung eines neuen Frame-

works, das die Möglichkeiten aller verfügbaren Methoden zusammenfasst und neue Konzepte rund um die Resilienz, die in jüngerer Zeit erforscht wurden, aufnimmt. Es werden drei Arten von Metriken vorgestellt, die von Gemeinden herangezogen werden können, um Verbesserungen durch das Verständnis und die Umsetzung einer proaktiven Planung messbar zu machen: (i) Wiederherstellungszeiten der Funktionsfähigkeit von Gebäuden und Infrastruktursystemen, (ii) wirtschaftliche Kennzahlen zur Darstellung von Unternehmen, Erfassung von Unternehmen, Einkommen, etc. und schließlich (iii) soziale Kennzahlen zur Darstellung von Überlebenswahrscheinlichkeiten, Sicherheit, etc. Das NIST stellt kein systematisches und theoretisches Framework für die Bewertung der Resilienz zur Verfügung, vielmehr liefert es eine Art Leitfaden, wie ein Framework aussehen sollte.

RAIN-EX (2016) – Risk-based approach for the protection of land transport infrastruc-

ture against extreme rainfall [53]: Die größte Herausforderung im Forschungsprojekt „Risikobasierter Ansatz zum Schutz der Landverkehrsinfrastruktur vor den Auswirkungen extremer Regenfälle“ (RAINEX) lag in der Entwicklung einer Methodik, welche die Sicherheitsaspekte, die zu einer steigenden Auswirkung auf die Verfügbarkeit und Qualität des Verkehrsnetzes führen, berücksichtigt. Insbesondere wurden extreme Wetterereignisse und daraus resultierende Gefahrenlagen und die Auswirkungen des sich ändernden Klimas berücksichtigt. Das Ziel des RAINEX-Projekts besteht in der Sicherstellung der Verfügbarkeit der Landverkehrsinfrastruktur durch die Bereitstellung einer direkt

anwendbaren Methodik für Eigentümer und Betreiber von Landverkehrsinfrastrukturen. Die Methodik ermöglicht die Identifizierung und Bewertung kritischer Verkehrsinfrastrukturen hinsichtlich ihrer Exposition und Verwundbarkeit gegenüber Gefahren, die durch extreme Regenerereignisse verursacht werden. Der hier entwickelte methodische Ansatz lässt eine systematische Anwendung auf das ganze europäische Landverkehrsnetz zu. Die RAINEX-Methodik kann sowohl durch Nutzung kostenloser Open-Source-Tools, als auch durch die Verwendung umfangreicherer kommerzieller Softwareprogramme umgesetzt werden.

RESILENS (2016) – Realising European resilience for critical infrastructure [12]: Ziel des Projekts war die Entwicklung einer RESILENS-Entscheidungsunterstützungsplattform (RES-DSP) bis zum Technology Readiness Level (TRL) 5 oder höher. Zu diesem Zweck wurde ein Resilienzmanagementleitfaden (European Resilience Management Guideline, ERMG) vorgestellt. Dieser soll die praktische Anwendung des Resilienzkonzepts auf kritische Infrastrukturen unterstützen. Dazu wurden eine Resilienzmanagementmatrix und ein Audit Toolkit (ReMMAT) entwickelt. Um eine selbständige Anwendung des RES-DSP zu ermöglichen, wurde auch ein E-Learning Hub zur Verfügung gestellt.

RESOLUTE (2016) – Resilience management guidelines and operationalization applied to urban transport environment [54]: Das Projekt beschäftigt sich auf übergeordneter Ebene mit der Thematik Resilienzmanagement. Auf Grundlage einer Analyse der bestehenden Resilienzbeurteilungs- und Resilienzmanagementkonzepte wird ein europäischer Leitfaden für das Resilienzmanagement (ERMG) vorgestellt, wobei berücksichtigt wird, dass es bei der Resilienz nicht um die Leistung einzelner Systemelemente geht, sondern vielmehr um die Interaktionen innerhalb von und zwischen Systemen. Weiters wird ein "Collaborative Resilience Assessment and Management Support System (CRAMSS)" für urbane Transportsysteme entwickelt.

SmartResilience (2016) – Smart resilience indicators for smart critical infrastructure [57]: SmartResilience zielt darauf ab, eine innovative "ganzheitliche" Methodik zur Bewertung der Resilienz bereitzustellen, die auf Resilienzindikatoren beruht. Im Wesentlichen werden bestehende Indikatoren, die für die Bewertung der Resilienz geeignet sind, ermittelt. In weiterer Folge werden Resilienzindikatoren, einschließlich solcher aus großen Datenmengen (Big Data- Ansätzen) identifiziert und eine Methodik zur Resilienzbewertung entwickelt.

New Zealand Transport Agency (2016) – National State Highway Resilience [49]: In der Publikation wird eine Methodik entwickelt, um die Resilienz des State Highway Networks auf nationaler und regionaler Ebene zu beurteilen. Diese wird in weiterer Folge auch umgesetzt und kommentiert.

INTACT (2017) – Impact of extreme weather on critical infrastructure [48]: Die Publikation beschreibt eine Methodik zur Beurteilung der Vulnerabilität und der Analyse von Maßnahmen (INTACT Reference Guide). Zusätzlich wurde eine Methodik für ein Risikomanagement entwickelt (Risk Management Decision Framework). Um die Methode zu überprüfen, wurde diese in Fallbeispielen angewandt.

RAIN (2017) – Risk analysis of infrastructure networks in response to extreme weather [52]: Das Projekt liefert einen methodischen Ansatz für eine Kritikalitätsanalyse und Bewertung von Straßen- und Schieneninfrastrukturelementen, die gegenüber extremen Regenereignissen anfällig sind. Der Benutzer soll bei der Identifikation und Bewertung von exponierten, verwundbaren sowie kritischen Verkehrsinfrastrukturen unterstützt werden.

UNISDR (2012) – Making cities resilient [61]: Das "Disaster Resilience Scorecard for Cities" (eine Studie des UN-Office for Disaster Risk Reduction UNDRR) bietet eine Reihe von Bewertungen an, die es Städten ermöglicht, ihre Resilienz gegenüber Naturkatastrophen zu beurteilen. Das Framework beinhaltet verschiedene Bewertungskriterien in den Bereichen Forschung, Organisation, Infrastruktur, Reaktionsfähigkeit, Umwelt und Wiederherstellungszeit.

DARWIN (2018) – Expecting the unexpected and know how to respond [42]: Das Hauptziel und Kernergebnis des Projekts ist die Entwicklung der "DARWIN Resilience Management Guidelines" (DRMG). Die DRMG verbessern die Fähigkeit der Beteiligten zur Antizipation, Überwachung, Reaktion, Anpassung und zum Lernen sich weiterzuentwickeln, um im Angesicht von Krisen effizient zu handeln. Die DRMG sind keine präskriptiven Leitlinien für Krisenmanagement an sich, sondern ermöglichen Organisationen eine kritische Betrachtung ihrer eigenen Krisenmanagementprozesse und -praktiken auf der Grundlage von Forschung und Praxis zum Resilienzmanagement.

DEUBLEIN et al. (2018) – Reaktion- und Wiederherstellungsprozess für die Straßeninfrastruktur nach disruptiven Ereignissen [43]: In diesem BAST Bericht wird eine Methodik zur Priorisierung im Zuge des Reaktions- und Wiederherstellungsprozesses für die Straßeninfrastruktur nach disruptiven Ereignissen im Hinblick auf die Resilienz

vorge stellt. Im Zuge der Entwicklung der Resilienzmanagement Methodik werden Verfahren zur Quantifizierung der Resilienz und zur Maßnahmenbeurteilung vorgestellt und in einem Tool umgesetzt.

IMPROVER (2018) – Improved risk evaluation and implementation of resilience concepts to critical infrastructure [47]: Das Hauptergebnis des IMPROVER-Projekts zielt auf eine verallgemeinerte Methodik für die Operationalisierung der Resilienz kritischer Infrastrukturen ab. Die Methodik skaliert von der Systemebene auf die Ebene eines Netzes von miteinander verbundenen Systemen (ein System von Systemen). Erarbeitet wurde:

- Ein Resilienzindex für kritische Infrastrukturen und die dazugehörige Methodik für die Umsetzung als indikatorbasierter Rahmen mit 340 Indikatoren für die Bewertung der Widerstandsfähigkeit kritischer Infrastrukturen.
- Eine Methodik zur Analyse der technologischen Widerstandsfähigkeit einer Infrastruktur, welche verschiedene Zeitskalen nach einem Vorfall sowie die Wiederherstellungsphase beinhaltet.
- Eine Bewertungsmethodik zur Ermittlung der Toleranz gegenüber Unterbrechungen, aufbauend auf Befragungen von verschiedenen Gemeinden (=akzeptiertes Risiko)
- Entwicklung einer eignen Methode zur Analyse der organisatorischen Widerstandsfähigkeit zur Ermittlung der organisatorischen Resilienz.

Um die Methode zu überprüfen, wurde diese in Fallbeispielen und „Living -Laboratories“ angewandt.

SMR (2018) – Smart Mature Resilience [58]: Das Projekt liefert einen Leitfaden (European Resilienz Management Guideline) für das Resilienzmanagement, der Entscheidungsträger in Städten bei der Entwicklung und Umsetzung von Resilienzmaßnahmen unterstützt. Das Framework bedient sich fünf strategischer, resilienzfördernder Instrumente und kann als eine Entwicklung mit iterativen Schritten beschrieben werden, bei der die Städte und Gemeinden unterschiedliche Ausgangspunkte haben und sich in verschiedenen Stadien der Resilienzreife befinden. Der Ansatz ist offen für alle Arten von Gefahren.

PIARC (2021) – Climate change and resilience of road networks [51]: Ziele, dieses sich aktuell in der Bearbeitung befindlichen Projekts "Klimawandel und Widerstandsfähigkeit von Straßennetzen" sind in Abstimmung mit anderen relevanten Technischen Komitees der PIARC Gefahren und Umweltbedrohungen im Zusammenhang mit der

Widerstandsfähigkeit der Straßeninfrastruktur zu identifizieren und verschiedene Ansätze zur Erhöhung der Widerstandsfähigkeit zu bewerten, wobei die wirtschaftlichen, ökologischen und sozialen Aspekte des Widerstandsmanagements berücksichtigt werden.

2.5 Zu beantwortende Forschungsfragen

Mit dem APCC-Bericht 2014 [62] ist belegt, dass auch in Österreich nicht nur die mittleren Temperaturen steigen, sondern vor allem die regionalen Extrema und Häufigkeiten von Starkniederschlägen, Hitze/Kälteperioden oder Orkanen zunehmen. Aber es sind nicht nur die natürlichen globalen Treiber wie Klimawandel, sondern auch sozialpolitische Aspekte wie z.B. Terrorismusbekämpfung oder Pandemien, welche systemrelevante Entscheidungen von Politik und Verwaltungsorganen beeinflussen.

Das Bewusstsein für unvorhersehbare, "seltene" Ereignisse nimmt – nicht zuletzt aufgrund der breiten medialen Berichterstattung zu den möglichen Folgen des Klimawandels – auch in der Bevölkerung und auf Ebene der politischen Entscheidungsträger kontinuierlich zu, und es gibt die Forderung, dass Organisationen Resilienz gegenüber diese aufbauen müssen. Die Forschung sowie auch Infrastrukturbetreiber haben darauf bereits reagiert. Neubewertungen von Naturgefahren finden laufend statt. So wurde mit dem SHARE-Projekt [63] die seismologische Einwirkung in Europa 2014 neu durchgeführt und bildet hier die Basis für die Neuauflage der derzeit in finaler Überarbeitung befindlichen Normenreihe EN1998. Die ASFINAG hat unlängst ein Projekt zur Erstellung von Naturgefahrenkarten abgeschlossen.

Aber Interdependenzen in modernen Straßeninfrastruktursystemen erfordern einen umfassenden Ansatz zur Bewertung von Gefahren und potenziellen Ausfallmodi. Die Beurteilung der Resilienz des Straßennetzes und seiner einzelnen Assets ist somit nicht nur aus Sicht des Straßeninfrastrukturbetreibers, sondern auch aus gesellschaftspolitischer Sicht ein wichtiges Ziel.

Funktionalität und Verfügbarkeit des Transportsystems werden beeinflusst von konkreten disruptiven Störereignissen oder langsam fortschreitender Bauwerksalterung. Infrastrukturbauten müssen laufend erneuert werden. Dies findet in der Regel durch geplante Maßnahmen statt. Bei Nichterkennen von Schäden kann Bauwerksalterung ebenfalls zu ungeplanten disruptiven Störereignissen führen. Somit entstehen Beeinträchtigungen der Funktionalität entweder aus der Verschlechterung des Zustands des Bauwerks selbst bzw. dessen Bestandteilen (Komponenten wie Entwässerung, Fahrbahnübergangskonstruktionen etc.) oder aber auch aus

Einwirkungen, welche im Zuge der Nutzung resultieren können (z.B. Überladung von Fahrzeugen, Anprall, Brand etc.).

Derzeit beruhen in Österreich Entscheidungen, welche zur Instandsetzung oder Erneuerung von Anlagen der Straßeninfrastruktur (Assets) führen, zumeist auf dem Anlagenzustand (z.B. ausgedrückt durch die Zustandsnoten gemäß den maßgebenden RVS-Richtlinien [64][65]), aber auch auf der Netzverfügbarkeit. Resilienzbewertungen werden hierzulande – wie auch in den meisten anderen Ländern Europas – noch nicht verwendet. Es existieren allerdings – wie in den Kapiteln 2.2 und 2.3 angeführt - zahlreiche Forschungsansätze, deren Übertragung in die tägliche Praxis der Straßeninfrastrukturbetreiber jedoch noch nicht oder nur unzureichend erfolgt ist. Dazu müssen diese Ansätze aber auch auf ein in der Praxis mit gegebenen Daten umsetzbares Niveau gebracht werden bzw. auf eine bestimmte Infrastruktur mit ihren Eigenheiten adaptiert werden.

Forschungsbedarf im Projekt REMAIN wird daher vor allem in der Erstellung eines straßensystemgerechten Frameworks zur Ermittlung einer Resilienz Kennzahl identifiziert. Wichtige Elemente dafür sind die für Straßeninfrastruktur passende Unterteilung des Resilienzbegriffs, Erheben der die Resilienz beeinflussenden Größen und die Erstellung einer Bewertungsmatrix mit relevanter (seltener) auftretender Gefahren auch unter Einbezug sonstiger ungeplanter Unterbrechungen wie Anprall oder Brand. Auch muss gezeigt werden, welche Daten für eine Bewertung bereits zur Verfügung stehen und welche es noch zu erheben gilt, um die Gewichtung unterschiedlicher die Resilienz beeinflussender Faktoren und deren Aspekte im Hinblick unterschiedlicher Gefahren zu ermöglichen. Ziel muss es sein, eine (qualitativ) bewertbare Form einer Resilienz Kennzahl als Bewertungsgröße für das Bauprogramm zu erlangen.

2.6 Weitere Begriffe und Begriffsabgrenzung für das Projekt REMAIN

Resilience Engineering ist eine relativ junge Methodik im Ingenieurwesen und erlaubt, bei korrekter Anwendung, Schwachstellen von Systemen zufolge extremer Ereignisse zu quantifizieren respektive zu verbessern. Zum gemeinsamen Verständnis im vorliegenden Forschungsprojekt, aber auch um die potenzielle zukünftige Anwendung zu fördern, ist ein klar definiertes Vokabular unumgänglich.

2.6.1 Definition des Begriffs „Resilienz“

Der Begriff „Resilienz“ wurde durch die Pionierarbeit von Holling in den 1970er Jahren geprägt, insbesondere durch seine Arbeit aus dem Jahre 1973 “Resilience and stability of ecological systems” [66]. Basierend auf dieser ursprünglichen Definition ist wichtig festzuhalten, dass

Resilienz als universelles Konzept zur Erfassung des Zustandes ökologischer Systeme wie folgt interpretiert werden kann:

“Resilience is the ability of an ecosystem to persist over time despite external stressors. The ecosystem may evolve or adapt to the stressor, and the goal was not to return to the original state but rather to a state better suited for the conditions.”

Die „Resilienz eines Systems“ kann also mannigfaltig interpretiert werden. Beispielsweise ist die Erfassung der Resilienz des Systems „Straßeninfrastruktur“ von volkswirtschaftlichem Interesse zur Sicherstellung des gesellschaftlichen Wohlstands (Stichwort Güterverkehr). Für einen Infrastrukturbetreiber hingegen kann die Resilienz-Beurteilung Einfluss auf die Prognose, Budgetierung und Planung eines Bauprogramms haben.

Bis hin zur Jahrtausendwende wurde die weitere Entwicklung des resilienzbasierten Ingenieurwesens in den USA forciert, insbesondere um seismologische sowie klimatisch bedingte Ereignisse (Erdbeben, Hurricanes, Buschfeuer, etc.) und deren Auswirkungen auf Bauwerke (v.a. Hochbauten) zu quantifizieren. Hervorzuheben sind dabei die Methodiken des verhaltensbasierten Windingenieurwesens und des verhaltensbasierten Erdbebeningenieurwesens zur Quantifizierung von Schäden bis hin zu Wiederherstellungskosten der Funktionstüchtigkeit von Gebäuden.

Die quantitative Beschreibung des Verhaltens der Infrastruktur zufolge extremer Ereignisse ist wesentlich komplexer als von Hochbauten und ist deshalb heute noch ein Gebiet der Grundlagenforschung. Deshalb wurden in der Ingenieurpraxis *qualitative Methoden* zur Erfassung der Resilienz entwickelt. In diesem Kontext sind im deutschsprachigen Raum insbesondere die Leistungen des Forschungsprojekts „AllTraln“ [34] sowie die Beiträge der Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt) [4][37], hervorzuheben. Eine exzellente deutschsprachige Einführung in das Fachgebiet der Infrastruktur-Resilienz geben Scharte et.al [67].

Basierend auf diesen zentralen Quellen wird **für das Projekt REMAIN folgende Definition des Begriffs „Resilienz“** vorgeschlagen bzw. festgelegt:

Resilienz ist die Fähigkeit des Systems der Straßeninfrastruktur, tatsächliche oder potenziell widrige Ereignisse abzuwehren, sich darauf vorzubereiten, sie einzukalkulieren, sie zu verkraften, sich davon zu erholen und sich ihnen immer erfolgreicher anzupassen. Widrige Ereignisse sind entweder menschlichen, technischen oder natürlichen Ursprungs und können katastrophale Folgen nach sich ziehen.

Der gewählte Systembegriff im Kontext Straßeninfrastruktur beinhaltet sowohl Planung, Betrieb und Instandhaltung der für die Straßeninfrastruktur maßgebenden Assets und Objekte. Der in Abbildung 7 dargestellte Resilienzzyklus definiert dabei die wesentlichen ablaufenden Stufen bei Störereignissen und Wiederherstellung der Funktionalität.

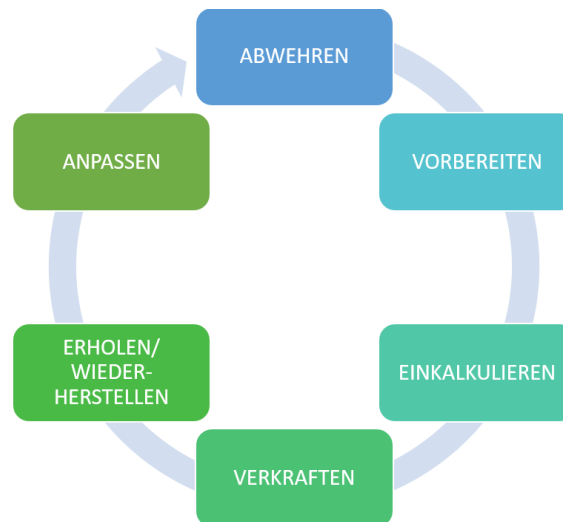


Abbildung 7: Darstellung des Resilienzzyklus als Veranschaulichung der Definition im Zuge von REMAIN

2.6.2 Dimensionen von Resilienz

Im Projekt REMAIN werden die international anerkannten Definitionen zur Charakterisierung der Dimensionen der Resilienz verwendet. Anhand der folgenden Begrifflichkeiten kann die Funktionalität eines Systems (siehe Abbildung 8) beschrieben werden.

- **Robustheit:** Bezeichnet die Fähigkeit eines Systems, Veränderungen ohne Anpassung seiner anfänglich stabilen Struktur standzuhalten. So wird darunter z.B. die Fähigkeit eines Tragwerks und seiner Bauteile verstanden, Schädigungen oder ein Versagen auf Ausmaße zu begrenzen, die in einem vertretbaren Verhältnis zur Ursache stehen. Beispiel: Brücke mit Umlagerungsmöglichkeiten in Längs- und Querrichtung.
- **Redundanz:** Ist das zusätzliche Vorhandensein funktional gleicher oder vergleichbarer Teile eines technischen Systems, wenn diese bei einem störungsfreien Betrieb im Normalfall nicht benötigt werden. Beispiel: Getrennte Brückentragwerke, Verfügbarkeit und Kapazität einer Alternativroute.
- **Rapidität:** Wird als Schnelligkeit oder Raschheit einer Reaktion verstanden. Beispiel: Reaktionszeit nach Gefahrenerkennung wie z.B. FFS (Fixed Firefighting System) im Tunnel, Messung der Pegelstände und Niederschläge und daraus abgeleitete Hochwasserwarnung, Wiederherstellungszeit der Funktionalität nach Ereigniseintritt.

- **Ressourcen:** Sind Mittel, Gegebenheiten wie auch Merkmale bzw. Eigenschaften, um Ziele zu verfolgen, Anforderungen zu bewältigen, spezifische Handlungen zu tätigen oder einen Vorgang zielgerecht ablaufen zu lassen. Beispiel: Verfügbarkeit Trafficmanager, Streckendienst und Geräte.

In der grafischen Darstellung des Resilienzverlustes (Abbildung 8) manifestieren sich die Robustheit und Redundanz in der Ausprägung des Funktionalitätsverlustes (Vertikale Achse als Systemqualität), während sich die Rapidität und Ressourcen in der Dauer des Verlustes (horizontale Zeitachse) manifestieren. Im Sinne der Anpassung an eine Gefahr können also auch Schutzmaßnahmen bzw. vorbereitende Maßnahmen nach dem Prinzip „prepare, protect, prevent“ verstanden werden, die das Schadensausmaß und die Unterbrechungszeit unter Umständen wesentlich reduzieren können.

2.6.3 Definition weiterer zentraler Begriffe

Folgende Begriffe sind im Rahmen des Projekts REMAIN ebenfalls von Bedeutung:

- **Vulnerabilität:** Vulnerabilität beschreibt die direkten Konsequenzen (oder Schäden), die durch das Einwirken eines Ereignisses auf eine einzelne Systemkomponente entstehen. Beispielsweise wird die Vulnerabilität des Systems Brücke demzufolge über die Versagenswahrscheinlichkeit der Systemkomponenten definiert. Die Vulnerabilität eines Systems lässt sich nach JCSS 2010 [68] bzw. BASt [4] quantifizieren als der Anteil der Risiken aufgrund von direkten Konsequenzen am Gesamtwert des betrachteten Infrastruktursystems.
- **Risiko:** Risiko kann als die Kombination der Eintrittswahrscheinlichkeit eines Ereignisses und der daraus resultierenden Konsequenzen verstanden werden (nach ISO 3100:2009[69]).
- **Kritikalität:** Kritikalität beschreibt die Bedeutung eines Infrastrukturelements oder -abschnitts für die Verfügbarkeit eines Verkehrsinfrastrukturnetzes (nach PIARC [51]).
- **Diversität:** Diversität umfasst die Verschiedenartigkeit der Ausführung von Redundanzen eines Systems, um die Wahrscheinlichkeit gemeinsam verursachter Ausfälle (common cause failures) zu reduzieren.

2.7 Möglichkeiten zur Beurteilung der Resilienz

Abbildung 8 stellt schematisch die Funktionalität bzw. Systemqualität einer Infrastruktur dar. In diesem Kontext wird unter Infrastruktur entweder eine Komponente (also ein Asset), z.B.

eine Brücke oder ein Tunnel, oder ein System von aneinander gereihten Komponenten (z.B. ein Autobahnabschnitt) verstanden. Die Variable $Q(t)$ ist wie bereits definiert die Systemqualität der Infrastruktur zwischen dem Eintritt des Verlustes zum Zeitpunkt t_0 bis zur Wiederherstellung zum Zeitpunkt t_1 . Grafisch manifestiert sich ein hoher Verlust der Resilienz wie in Abbildung 8 in einem größeren grau dargestellten Bereich. Damit lässt sich mathematisch diese Fläche als der Verlust der Resilienz R am besten beschreiben und bestimmen. Eine Minimierung des Verlustes kann aber auch im Zuge einer Resilienzbewertung als das „Potential“ der Resilienz verstanden werden.

Bei einem Wert der Systemqualität von 100% ist die Infrastruktur uneingeschränkt verfügbar. Resiliente Infrastruktur ist geprägt durch Minimierung des Verlustes R und zeichnet sich wie folgt aus:

- Minimale Ausfallwahrscheinlichkeit
- Minimale Konsequenzen, falls Infrastruktur versagt (geringe Schäden an der Infrastruktur, geringe ökonomische und ökologische Auswirkungen, geringe Anzahl Getöteter)
- Minimale Wiederherstellungsdauer

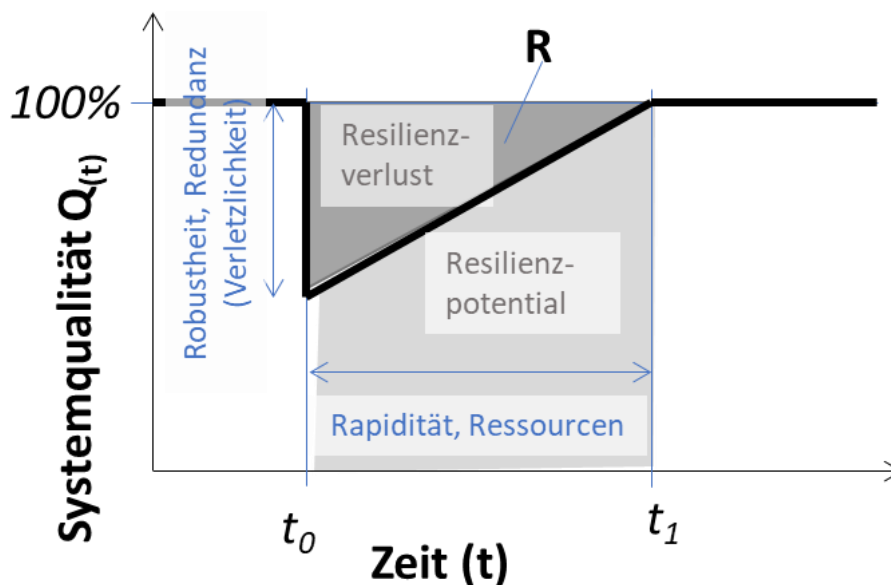


Abbildung 8: Resilienzverlust bzw. -potential einer Infrastruktur im Zusammenhang mit ihren Dimensionen

2.8 Systemabgrenzung

Da der Resilienzbezug sowohl für einen Bauteil als auch für einen Infrastrukturabschnitt, ein Teilnetz oder einen Netzabschnitt definiert werden kann, ist hier vor allem eine systemische Betrachtung relevant. Resilienzüberlegungen können auf unterschiedlichen Netzwerkebenen getrennt (hoch- oder niederrangiges Straßennetz, Schienennetz) oder als gesamtes Transportsystem (intermodal) definiert werden. Dies lässt sich am besten in Hinblick auf Redundanzen betrachten. Kommt es nun in einem betrachteten Verkehrssystem (z.B. hochrangiges Netz) zu einem unvorhergesehenen Ereignis, wäre es naheliegend, Ausweichrouten im umgebenden niederrangigen Landes-/ Stadtstraßennetz oder mit einem anderen Verkehrssystem (z.B. Bahn) kombiniert zu definieren.

Die Definition des Verkehrssystems hat hier auf die Resilienz unterschiedliche Auswirkungen und daran sind auch die Einwirkungsgrößen (Gefahrentyp und Größe der Gefahr) gekoppelt. Bei disruptiven Ereignissen natürlichen Ursprungs mit großem Impact wie z.B. Jahrhundertflut oder Erdbeben ist mit großer Wahrscheinlichkeit auch die umgebende Infrastruktur des niederrangigen Straßennetzes betroffen und macht dieses unpassierbar. Bei kleineren Ereignissen (wie z.B. lokale kurzzeitige Behinderung der Fahrbahn) macht es aber durchaus Sinn, die Netzwerke anderer Betreiber mit in Betrachtung zu ziehen.

Grundsätzlich hat aber auch der Infrastrukturbetreiber ein hohes Interesse daran, die Verfügbarkeit im eigenen Netz aufrecht zu erhalten. Dies ist vor allem dann wichtig, wenn die Kennzahl zur Bewertung des eigenen Bauprogramms dienen sollte. Aus diesen Gründen wurde in Absprache mit den Auftraggebern des Projekts REMAIN im Zuge des Workshops am 24.09.2021 beschlossen, dass vorrangig nur das Netz jedes Betreibers für sich betrachtet wird. Das entwickelte Framework sollte allerdings in der Lage sein, in Spezialfällen auch Ausweichrouten außerhalb des betrachteten Netzes (als sogenannte Teilindikatoren „Add-On's) zu definieren (z.B. bei einer Unpassierbarkeit eines Autobahnabschnittes und lokale klein-/großräumige Ausweichrouten andere Betreiber).

2.9 Vorschlag eines technisch-wissenschaftlichen Lösungsansatzes

In diesem Abschnitt werden der technisch-wissenschaftliche Lösungsansatz sowie die geplante Methodik (in Anlehnung an die im Projektantrag enthaltenen Arbeitspakete) vorgestellt, welche im weiteren Projektlauf angepasst und detailliert ausgearbeitet wurden. Ziel war, eine Aussage über die Resilienz eines einzelnen Assets bzw. eines Abschnitts des

Straßennetzes des jeweiligen Infrastrukturbetreibers zu gewinnen. Der geplante Ablauf der Resilienz Bewertung ist generell in Abbildung 9 dargestellt und wird im Folgenden im Detail beschrieben.



Abbildung 9: Ablauf der Resilienzbewertung

2.9.1 Ableitung von infrastrukturbezogenen Resilienz-Einflussgrößen

Zuerst erfolgt die gemeinsame Auswahl (Projektteam, Auftraggeber) projektrelevanter Assets und Streckenabschnitte. Für diese Abschnitte bzw. Assets werden Faktoren, die die Resilienz beeinflussen (sogenannte Resilienz-Einflussgrößen) abgeleitet. Dabei erfolgt eine Unterteilung in:

- **strukturelle Einflussgrößen** (z.B. Art des Baumaterials, Konstruktionsform)
- **natürliche Einflussgrößen** (z.B. geologische Gegebenheit des Standorts, Gefahrenexposition)
- **verkehrliche Einflussgrößen** (z.B. Verkehrsart, Verkehrsstärke) und
- **lokal operative Einflussgrößen** (z.B. vorhandene Verkehrssteuerung, Streckendienst/Einsatzkräfte).

Besonderes Augenmerk wird dabei auf die seitens der ASFINAG definierten **Schlüsselbauwerke** bzw. kritischen Bauwerke und die Netzabschnitte, wo sich diese befinden, gelegt.

Anschließend erfolgen eine Vorbewertung und Aufbereitung der Resilienz-Einflussgrößen im Hinblick auf Robustheit, Redundanz, Ressourcen und Rapidität zur Bewältigung der Gefahr. Die in diesem Schritt definierten Resilienz-Einflussgrößen bilden die Basis für die Ermittlung der Resilienzkennzahl und deren vier Teilindikatoren.

2.9.2 Gefahrenidentifikation

Es wird zwischen **menschlichen, technischen und natürlichen Gefahren** unterschieden, wobei diese **getrennt betrachtet** werden. Als Basis dienen u.a. die Naturgefahren-

Hinweiskarten der ASFINAG, Erdbebenkarten (z.B. Share) und Informationen aus dem SOTRA-Tool oder dem Network Safety Management.

Es wird ein **Gefahrenkatalog** erstellt und eine qualitative Unterteilung je Einwirkung in Warnstufen vorgenommen. Der Gefahrenkatalog kann als eigenständiges Dokument betrachtet werden, da dieser nicht direkt mit den Assets verknüpft ist.

Eine erste Indikation relevanter Gefahren geben die von der ASFINAG bis 2020 aufgezeichneten 5226 Ereignisse (siehe [39] bzw. Abbildung 10)

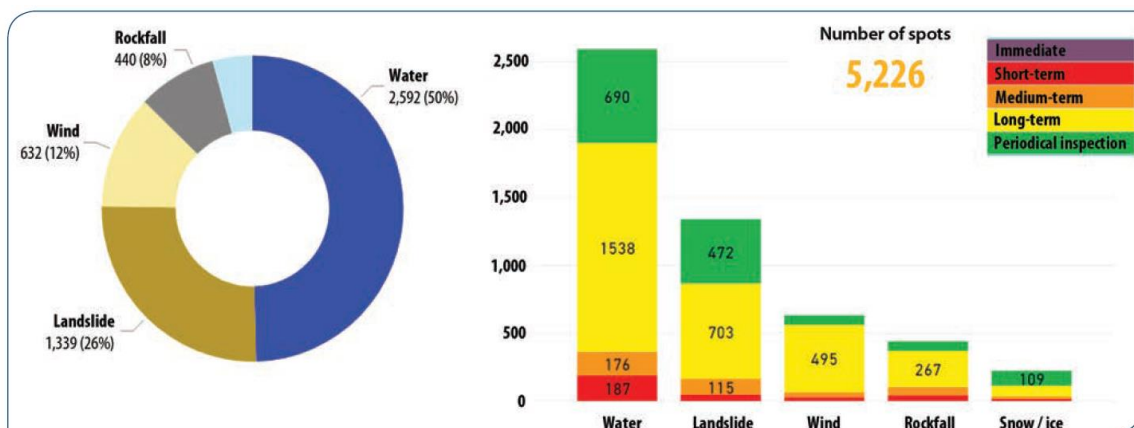


Abbildung 10: Übersicht identifizierter Gefahren im Straßennetz der ASFINAG aus [39]

2.9.3 Auswirkung von Gefahren

Es erfolgt die Bewertung der Verletzlichkeit (Vulnerabilität) von Assets bei gegebenen Einwirkungen auf

- Asset-Ebene (z.B. einzelne Brücke oder Tunnel) und auf
- System-Ebene (z.B. auf Streckenabschnitt des jeweiligen Betreibers)

Ziel ist es, einen **asset-spezifischen Verletzlichkeits-Katalog** zu entwickeln. Dabei werden qualitativ die Eintrittswahrscheinlichkeiten zugewiesen (Ampel-System: grün bis rot). Beispielsweise weist ein Tunnel eine geringe Vulnerabilität hinsichtlich Waldbrands, aber eine hohe Vulnerabilität hinsichtlich Fahrzeugbrand auf.

2.9.4 Entwicklung einer asset-spezifischen Resilienz-Kennzahl

Unter Berücksichtigung der infrastrukturbezogenen Resilienz-Einflussgrößen sowie der identifizierten Gefahren und deren Auswirkungen auf die einzelnen Assets bzw. Netzabschnitte

wird eine Kennzahl bzw. Kennzahlen zur Bewertung der Resilienz anhand der Verfügbarkeit (= Gegenteil von Ausfalldauer) des Straßennetzes ermittelt.

3 ABLEITUNG VON INFRASTRUKTURBEZOGENEN RESILIENZ-EINFLUSSGRÖSSEN (AP 3)

In diesem Kapitel werden die Ergebnisse des Arbeitspakets 3 zusammengefasst. Dazu werden in Abschnitt 3.1 die methodischen Grundlagen zur Resilienzbewertung und Definitionen von Resilienz-Einflussgrößen in der Literatur erläutert. Darauf aufbauend wird in Abschnitt 3.2 ein Konzept zur Ableitung infrastrukturbezogener Resilienz-Einflussgrößen vorgestellt.

Dieses Konzept wurde in gemeinsamen Workshops/Abstimmungen zwischen Auftraggebern und Auftragnehmern (14.12.2021, 20.01.2022, 02.03.2022) ausgehend von einem 1. Grobkonzept präsentiert und schrittweise ausdetailliert. Ergebnisse dieser Zusammenarbeit waren

- einerseits die in Abschnitt 3.3 enthaltene getroffene Auswahl an Anlagen (den sogenannten REMAIN-Assetkategorien),
- deren Gliederung in sog. Modellanlagen sowie
- insbesondere die für das Projekt REMAIN relevanten infrastrukturbezogenen Einflussgrößen für die entsprechenden Asset-Kategorien, welche in Abschnitt 3.4 behandelt werden.

3.1 Grundlagen

In Kapitel 2 wurden der Stand der Technik der Infrastruktur-Resilienzforschung und Begriffsdefinitionen bzw. -abgrenzungen (insbesondere die Begriffe *Resilienz*, *Vulnerabilität*, *Risiko*, *Kritikalität* und *Diversität*) zusammengefasst. Diese Hintergründe werden im Folgenden in Bezug auf die resilienzbeeinflussenden Faktoren („Resilienz-Einflussgrößen“) weiter ausgeführt.

3.1.1 Resilienzbewertung – Theoretischer Hintergrund

Wie in Kapitel 2 dargestellt, geht die Resilienzbewertung über die Bewertung der Vulnerabilität hinaus, indem zusätzlich zur Abschätzung des Schädigungsgrades durch ein disruptives Ereignis auch die Funktionalität des Objektes und ihre zeitliche Entwicklung in der Wiederherstellungsphase abgeschätzt werden. Darauf aufbauend wird dann die zeitliche Entwicklung der Performance des Straßennetzes durch Netzwerksimulation bewertet.

Bezugnehmend auf die in Kapitel 2 vorgestellte Gleichung 2 zur Berechnung der Funktionalität eines (Brücken-)Tragwerks werden im Zuge des Projekts REMAIN jene Faktoren ermittelt, die einen Einfluss auf die Wahrscheinlichkeit $P_{S=DS_i|IM}$ haben. Dabei wird in AP 3 nur die Widerstands- (=Bauwerks)seite betrachtet, während in AP4 die Einwirkungs- (=Gefahren)seite (Gefahrenidentifikation) behandelt wird.

Da eine quantitative Beschreibung des Verhaltens von Infrastruktur zufolge extremer Ereignisse derzeit nur schwer bzw. mit nur mit sehr aufwendigen Methoden (z.B. Vulnerabilitätsfunktionen) möglich ist und die Datenlage dafür nicht ausreichend vorhanden ist, wird im Zuge des Projekts REMAIN ein qualitativer Ansatz verfolgt (z.B. erfolgt im AP5 eine Bewertung der einzelnen Einflussgrößen mit „gut“, „mittel“, „schlecht“ – siehe Kapitel 5). Diese Vorgehensweise wird im vorliegenden Kapitel vorgestellt und in den darauffolgenden Kapiteln konkretisiert.

3.1.2 Resilienzbewertung – Praktische Herangehensweise

Um das in Kapitel 3.1.1 beschriebene Resilienzkonzept für eine praktische Anwendung zur Bewertung von bestehenden Bauprogrammen zugänglich zu machen, wurden im Projektantrag bzw. in AP2 die folgenden Schritte definiert, welche in diesem Abschnitt kurz umrissen werden.

3.1.2.1 Definition der Zielgröße Funktionalität

Zur grundlegenden Zielausrichtung ist eine einheitliche Definition der Zielgröße im Hinblick auf die Bewertung des Bauprogramms erforderlich. Eine Straßeninfrastruktur und deren Assets müssen immer mehrere Anforderungen ausreichend erfüllen können, um eine gewünschte Funktionalität zu gewährleisten. Allgemeine Zielgrößen sind z.B. im Projekt RITUN [37] in Anlehnung an den deutschen Bundesverkehrswegeplan BVWP 2030 definiert worden.

Kategorie	Funktionalität (Zielgröße)	Indikator
Wirtschaftliche Aspekte	Reise-/Transportzeit	Fahrzeugstunden
	Kapazität	Kapazität
	Betriebskosten	Beförderungs-/Transportkosten
	Innerörtliche Trennwirkung	Wartezeit (innerorts)
	Wertschöpfungseffekte	Wertschöpfung/Beschäftigung
Verkehrssicherheit	Unfallkosten	Personen-/Sachschäden
Umwelt	Luftschadstoff-/Treibhausgasemissionen	Fahrleistung
	Lärmbelastung	Fahrleistung (innerorts)
	Beeinträchtigung durch das Bauwerk	Qualitative Indikatoren
	Landschafts-/Ortsbild	Qualitative Indikatoren

Abbildung 11: Mögliche Zielgrößen nach BVWP 2030 bzw. [37]

Diese unterschiedlichen Kategorien erscheinen aber für diese Forschungsaufgabe zu komplex definiert, um ein Bauprogramm bewerten zu können. Auch stehen nicht alle erforderlichen

Indikatoren flächendeckend als Datengrundlage zur Verfügung. Heruntergebrochen auf die einzelnen Elemente bzw. Objekte wird eine **Definition der Funktionalität in Bezug auf die Verkehrsverfügbarkeit als die wichtigste Anforderung und Zielgröße betrachtet.**

3.1.2.2 Stand der Technik und Verwendung dieser Literatur bei der Ableitung von Resilienz-Einflussgrößen

Das REMAIN Konzept zur Ableitung infrastrukturbezogener Resilienz-Einflussgrößen sieht vor, dass zuerst eine gemeinsame Festlegung (Projektteam, Auftraggeber) der repräsentativen Assets erfolgt. Die abzuleitenden Resilienz-Einflussgrößen sind als Eigenschaften dieser Assets zu sehen.

Anschließend erfolgen eine Vorbewertung und Aufbereitung der Resilienz-Einflussgrößen im Hinblick auf Robustheit, Redundanz, Ressourcen und Rapidität zur Bewältigung der Gefahr. Die in diesem Schritt definierten Resilienz-Einflussgrößen bilden die Basis für die Ermittlung der Resilienzkennzahl und deren Teilindikatoren.

Die im Projekt AllTrain [34] definierten „strukturellen Faktoren“ können mit den im Projekt REMAIN abzuleitenden Einflussgrößen verglichen werden. Es ist jedoch zu berücksichtigen, dass die in AllTrain definierten Einflussfaktoren nur die Vulnerabilität einer Struktur gegenüber einer Gefahr beschreiben und dass das AllTrain-Tool nur eine binäre Skala zur Beurteilung der Einflussgrößen bietet: Die grundsätzliche Fragestellung des Tools ist, ob eine Infrastruktur für eine bestimmte Bedrohung anfällig ist und nicht, inwiefern die Funktionalität bei Eintritt eines Ereignisses beeinträchtigt ist.

Vergleichbar mit den Resilienz-Einflussgrößen im Projekt REMAIN sind die in der BAST-Methodik [4] verwendeten „Verwundbarkeitsparameter“ eines Objekts, dazu zählen Objekttyp, Robustheit, Erhaltungszustand, Umgebungsbedingungen, Schutzmaßnahmen, Verfügbarkeit von Objektdaten und die Zugänglichkeit zu Schwachstellen. Auch hier beschreiben die Verwundbarkeitsparameter eines Objekts nur die Vulnerabilität desselben, die Bewertung der Auswirkung auf die Verfügbarkeit erfolgt erst nach Verknüpfung mit der jeweiligen Exposition.

Die im AP 3 abgeleiteten Resilienz-Einflussgrößen werden in weiterer Folge mit den in AP4 identifizierten Gefahren verknüpft. Es erfolgt eine Bewertung der Auswirkung eines potenziell eintretenden Ereignisses auf die Verfügbarkeit eines Assets. Diese kann beispielsweise wie im Projekt der BAST [4] matrixartig als Funktionalitätsverlust über die Ausfalldauer dargestellt werden.

3.2 Methodik zur Ableitung der Resilienz-Einflussgrößen

Ziel des Arbeitspakets 3 ist die Ableitung von infrastrukturbezogenen Resilienz-Einflussgrößen, welche in weiterer Folge zur Bewertung des Funktionalitätsverlustes auf Objekt- bzw. Netzebene herangezogen werden können.

Alle im Zuge des AP3 abgeleiteten Resilienz-Einflussgrößen sind somit bauwerksbezogene Eigenschaften, welche sich durch die konstruktive Durchbildung (strukturelle Einflussgrößen) und die Randbedingungen (z.B. verkehrliche und operative Einflussgrößen) auszeichnen.

Die obige Definition impliziert, dass Einflussgrößen nicht mit der Gefahrenexposition vermischt werden dürfen. Beispielsweise repräsentiert eine „natürliche“ Einflussgröße lediglich die Randbedingung einer Brücke – konkret, ob ein Pfeiler auf einem Rutschhang gegründet ist oder nicht. Die Kombination der Einflussgrößen (AP3) mit der standortspezifischen Gefährdung (AP4) stellt das zentrale Element der Infrastruktur-Resilienz dar und ist Gegenstand des AP5 (siehe Kapitel 5).

Die Resilienzbewertung in REMAIN geht über die Bewertung der Vulnerabilität hinaus, indem zusätzlich zur Abschätzung des Schädigungsgrades durch ein disruptives Ereignis auch die Funktionalität des Assets (z.B. Tragwerks) und ihre zeitliche Entwicklung in der Wiederherstellungsphase abgeschätzt werden. Darauf aufbauend wird dann die zeitliche Entwicklung der Performance des Straßennetzes durch Netzwerksimulation bewertet.

Die in REMAIN verwendete Funktionalität adressiert die Verfügbarkeit der Straßeninfrastruktur, welche grundsätzlich durch folgende Indikatoren beschrieben werden kann:

- Unterbrechungszeit
- Baustellenfreiheit
- Zunahme der Reisezeit
- Verkehrsfluss im betrachteten Abschnitt/ Teilnetz

Der Verkehrsfluss wird dabei als Indikatorgröße erachtet, welche überwachbar bzw. messbar ist.

Im Sinne einer qualitativen Bewertung wird vorgeschlagen, die Verfügbarkeit in Anlehnung an [4] bzw. [37] in 3 Gruppen zu unterteilen:

- Notbetrieb / Gesperrt: Zugang nur für Experten, bzw. Spezial- und Bergfahrzeuge
- Eingeschränkter Betrieb: z.B. einzelne Fahrstreifen gesperrt, Gewichts- und/oder Geschwindigkeitsbeschränkung etc.

- Uneingeschränkter Betrieb: Betrieb für den Verkehr ist uneingeschränkt wieder möglich. Der wiederhergestellte Zustand entspricht mindestens den für die Verkehrsfreigabe erforderlichen Auflagen und Vorschriften.

Die dabei verwendete Ampel-Skala soll diese Abstufung der Funktionalität widerspiegeln.

3.3 REMAIN-Assets

Die ASFINAG ist für den Erhaltungszustand unterschiedlichster Asset-Klassen zuständig.

Die Hauptklassen sind:

- Straßenoberbau
- Brücken
- Tunnel (inkl. elektrotechnische und maschinelle Ausrüstungen) und Galerien

Weitere Asset-Klassen sind:

- Stützbauwerke
- Schutzbauwerke
- Lärmschutzbauwerke
- Überkopfkonstruktionen (Wegweiser, VBA, Maut-Gantries)
- elektrotechnische und maschinelle Ausrüstungen im Freiland
- Hochbauten (Autobahnmeistereien, Betriebsgebäude)

Daneben gibt es im Netz der ASFINAG noch weitere Objekte, wie z.B. Durchlässe oder Entwässerungsanlagen.

Im Zuge des Projekts erfolgte in Abstimmung mit den Fachexpert*innen der ASFINAG eine Clusterung all dieser unterschiedlichen Bauwerke in die folgenden fünf Asset-Kategorien (die sogenannten REMAIN-Assets):

1. Brücken
2. Tunnel und Galerien
3. Stütz- und Schutzbauwerke
4. Lärmschutzbauwerke
5. Strecke plus: Straßenoberbau, Straßenunterbau, Überkopfkonstruktionen, Wegweiser, VBA, Maut-Gantries, Entwässerungsanlagen, Durchlässe, Brücken < 5m lichte Weite, Mauern < 1 m Höhe, weitere verbundene Kleinanlagen

Die Beurteilung der Resilienz erfolgt für die REMAIN-Assets Brücken, Tunnel und Galerien, Stütz- und Schutzbauwerke sowie Lärmschutzbauwerke objektbezogen und für das REMAIN-Asset Strecke plus von Anschlussstelle zu Anschlussstelle, bzw. von Anschlussstelle bis zum nächsten Asset der Kategorie Brücken oder Tunnel und Galerien (Abbildung 12).

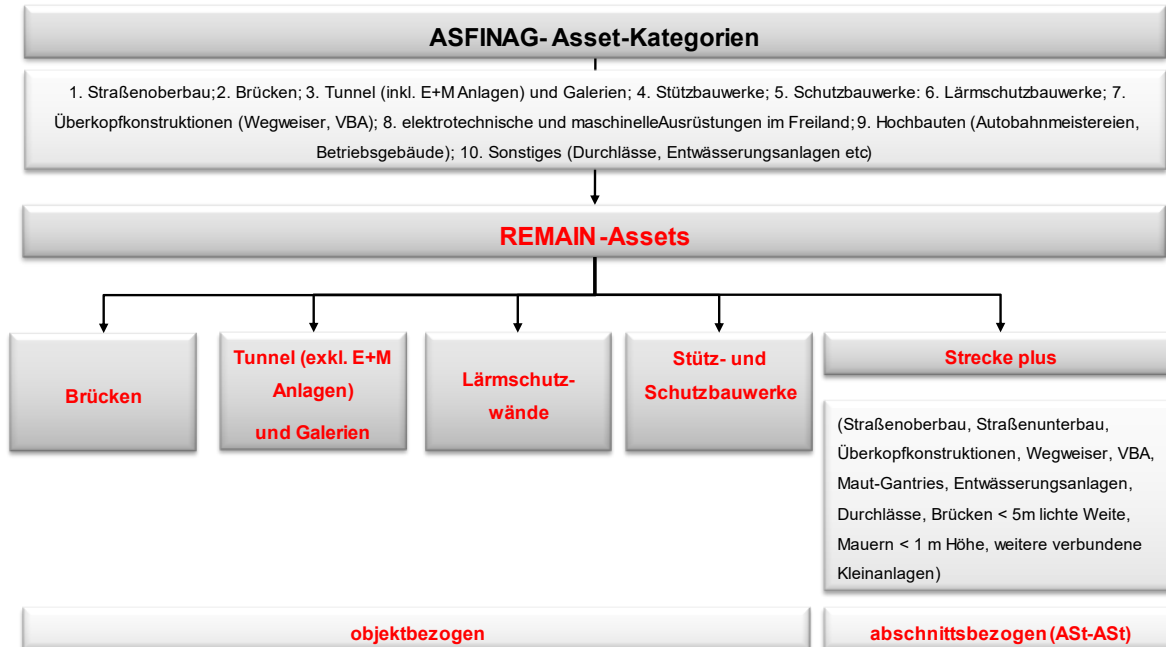


Abbildung 12: Überführung der ASFINAG-Asset-Kategorien in die sogenannten REMAIN-Assets

In Anlehnung an die ASFINAG-Baukennzahlen werden Brücken ab einer Stützweite von > 5,0 m objektbezogen betrachtet (und nicht ab einer lichten Weite > 2,0 m wie z.B. in der RVS-Serie 13.03 vorgesehen). Kürzere Brücken (< 5,0 m) fallen in die REMAIN-Assetkategorie „Strecke plus“. Sinngemäß gilt diese Abgrenzung für Mauern < 1,0 m Höhe, die nicht der REMAIN-Assetkategorie Stütz- und Schutzbauwerke, sondern der Strecke plus zugeordnet werden.

Hochbauten (Autobahnmeistereien, Betriebsgebäude) und im Speziellen die darin enthaltene für die Verkehrssteuerung relevante IT-Infrastruktur werden im Zuge des Projekts nicht betrachtet, da deren Verfügbarkeit durch andere Maßnahmen im Sinne der Disaster Recovery sichergestellt werden muss. Die Disaster Recovery stellt nach einem Katastrophen- oder Störfall den IT-Betrieb wieder her. Sie beinhaltet unterschiedliche Maßnahmen, die zur Wiederaufnahme des Betriebs zu ergreifen sind, wie z.B. Maßnahmen zur Wiederherstellung der

IT-Infrastrukturen, zur Rücksicherung von Daten oder zur Behebung von Soft- und Hardware-Störungen.

Bewusst ausgeklammert wurden auch Betriebs- und Sicherheitseinrichtungen in Tunnels (elektro-maschinelle Ausstattung), da im Zuge des Projekts REMAIN rein der konstruktive Aspekt der Objekte in Hinblick auf das Bauprogramm beleuchtet wird.

3.3.1 Anlagengliederung

In Anlehnung an den Projektantrag wurde zunächst davon ausgegangen, ausschließlich die seitens der ASFINAG im Netzzustandsbericht [70] definierten „Schlüsselbauwerke“ heranzuziehen. Dabei handelt es sich um Brücken und Tunnel, die nach folgenden, von der ASFINAG definierten, Kriterien ausgewählt werden [70]:

Brücken

Schlüsselbauwerke sind jene Objekte, die im Falle einer Instandsetzung oder Neuerrichtung einen überdurchschnittlichen Einfluss auf die Kunden- und Finanzziele des Unternehmens haben. Für die Festlegung von Schlüsselbauwerken in der Assetklasse Brücke wurde folgende Vorselektion getätigt:

- *Objekte auf denen beide Richtungsfahrbahnen auf einem Tragwerk liegen,*
- *Objekte auf denen im Baustellenfall (Instandsetzung oder Erneuerung) keine mit vertretbarem Aufwand sinnvolle Baustellenverkehrsführung eingerichtet werden kann,*
- *Objekte mit Neubaukosten inkl. Nebenkosten > € 10 Mio.*

Ausgehend von diesen drei Kriterien erfolgte eine ingenieurtechnische Evaluierung, wobei dabei Objekte aufgrund Ihrer Wichtigkeit ergänzt oder beispielsweise bei Vorliegen einer adäquaten Umleitung gestrichen wurden.

Tunnel

Schlüsselbauwerke werden definiert, um Objekte zu identifizieren, die unabhängig vom Alter oder Zustand, aufgrund ihrer Funktion im Streckennetz erheblichen Einfluss auf die Einhaltung von Kunden- oder Finanzziele der ASFINAG ausüben. In die Kategorie Tunnel-Schlüsselbauwerk fallen derzeit 10 innerstädtische und 2 größere, einröhrige Tunnel.

Das Hauptziel des Projekts REMAIN ist jedoch die Entwicklung einer Methodik zur Resilienz-Bewertung, welche sich auf das gesamte Portfolio eines Straßenerhalters beziehen soll.

Insofern würden sich bei alleiniger Fokussierung auf die Schlüsselbauwerke folgende Widersprüche auftun:

- Einerseits liegen Auswahlkriterien für Schlüsselbauwerke nur für die REMAIN-Assetkategorien Brücke und Tunnel vor;
- andererseits haben die betreffenden Objekte durch ihren Status als Schlüsselbauwerke sowieso schon eine Sonderstellung/Priorisierung im Bauprogramm – während der Rest des Portfolios nicht sichtbar/berücksichtigt wäre.

Da es seitens der ASFINAG derzeit keine generelle Clusterung ihrer Anlagen gibt, wurde ein Vorschlag einer Anlagengliederung (Tabelle 2) ausgearbeitet. Die Entwicklung der Modellanlagen erfolgte vor dem Hintergrund, die große und heterogene Anzahl an Anlagen im Zuge einer Portfoliobetrachtung in eine stark begrenzte Anzahl an Modellanlagen-Kategorien einordnen zu können und somit bei der Anwendung der REMAIN Methodik im Zuge der weiterführenden Analysen auf Portfoliolevel deutlich generalisierter und effizienter vorgehen zu können.

Der Vorschlag einer Anlagengliederung beruht auf der Basis der Gliederung infolge Baukennzahlen (betrifft die Kategorien Brücken, Tunnel und Galerien sowie Stütz- und Schutzbauwerke) bzw. infolge der Schadensfolgeklassen (betrifft die Kategorie Lärmschutzwände). Für die im Zuge des Projekts REMAIN neu eingeführte Kategorie Strecke plus wurde eine Gliederung anhand der Topografie als sinnvoll erachtet.

Tabelle 2: Anlagengliederung und Modellanlagenübersicht

REMAIN-Assetkategorien					
	BRÜCKEN (in Anlehnung an ASFINAG Baukennzahlen)	TUNNEL & GALERIEN (in Anlehnung an ASFINAG Baukennzahlen)	STRECKE PLUS (Straßenoberbau, Straßenunterbau, Überkopfkonstruktionen, Wegweiser, VBA, Maut-Gantries, Entwässerungsanlagen, Durchlässe, Brücken < 5m lichte Weite, Mauern < 1m Höhe, weitere verbundene Kleinanlagen)	LÄRMSCHUTZWÄNDE (in Anlehnung an ASFINAG Schadensfolgeklassen)	STÜTZ- UND SCHUTZBAUWERKE (in Anlehnung an ASFINAG Baukennzahlen)
#1	Stahlbeton Hauptfahrbahn, Flachgründung (Stützweite 5-35m)	Geschlossene Bauweise	Topographie - Flachland	Höhe < 5,5m	Steinschichtung h = 1-3m
#2	Stahlbeton Hauptfahrbahn, Tiefgründung (Stützweite 5-35m)	Offene Bauweise (mit Bodenplatte)	Topographie - Hügelland	Höhe > 5,5m	Steinschichtung h = 3-5m
#3	Stahlbeton Überführung/Rampen (Stützweite 5-40m)	Offene Bauweise (ohne Bodenplatte)	Topographie - Gebirge		Steinschichtung h > 5m
#4	Stahlverbund Hauptfahrbahn (Stützweite 30-70m)				Stahlbetonmauer, Winkelstützmauer
#5	Stahlverbund Überführung (Stützweite 25-70m)				Stahlbetonmauer, geankert
#6	Spannbeton Hauptfahrbahn (Stützweite 30-160m)				Krainerwand/Welser Verbau
#7	Spannbeton Überführung (Stützweite 30-50m)				Spritzbeton (inkl. Bewehrung)

3.4 Resilienz-Einflussgrößen

Die im Zuge des Projekts REMAIN definierten Einflussgrößen wurden mit konkretem Bezug zum ASFINAG-Portfolio und den der ASFINAG zur Verfügung stehenden Daten abgeleitet.

Die Grundlage für die Gliederung der Einflussgrößen in strukturelle Einflussgrößen, natürliche Einflussgrößen, verkehrliche Einflussgrößen und lokal-operative Einflussgrößen erfolgt in Anlehnung an das Projekt AllTrIn [34] und wurde für die REMAIN-Assets wie folgt adaptiert:

- Strukturelle Einflussgrößen beschreiben dabei als signifikant eingestufte Schadensanfälligkeitsmerkmale, die mit der physischen Struktur und dem mechanischen System, aus dem das Asset besteht, verbunden sind. Diese Merkmale beeinflussen seine Anfälligkeit für die untersuchten Auswirkungen, z.B. Art des Baumaterials.
- Natürliche Einflussgrößen, einschließlich der Merkmale der natürlichen Umgebung, in der sich das Asset befindet, können als wesentlich für sein Verhalten als Reaktion auf die Auswirkung betrachtet werden, z.B. die geologischen Gegebenheiten des Standorts.
- Verkehrliche Einflussgrößen umfassen Faktoren, die die nicht strukturellen Auswirkungen (Störung) wesentlich beeinflussen könnten, einschließlich der Hauptmerkmale des Verkehrs bei/auf dem Asset, z.B. DTV.
- Lokal-operative Einflussgrößen geben an, ob ein Kommunikationssystem zur Überwachung des Assets vorhanden ist oder nicht, z.B. Vorhandensein einer Verkehrssteuerung.

In den folgenden Abschnitten werden die im Zuge des Arbeitspakets 3 definierten Resilienz-Einflussgrößen, nach den fünf Asset-Kategorien gegliedert, vorgestellt.

Die hier dargestellten Einflussgrößen sind das Ergebnis der gemeinsamen Abstimmungsarbeit zwischen Auftragnehmern und ASFINAG. Es werden hier nur jene Einflussgrößen tabellarisch erfasst, die einerseits für die ASFINAG relevant sind und die andererseits auch mit konkreten Daten hinterlegt werden können.

Etwaige weitere Einflussgrößen, die nach Resilienz-Gesichtspunkten relevant wären, aber zu denen nach derzeitigem Stand keine Daten vorhanden sind, sind dem ANHANG 1 bzw. dem Implementierungsleitfaden (ANHANG 5) zu entnehmen.

3.4.1 Framework für Resilienz beeinflussende Größen

3.4.1.1 Allgemeines

Abbildung 13 stellt das Zusammenwirken der im Zuge des Arbeitspakets zu definierenden Einflussgrößen mit spezifischen Gefahren an spezifischen REMAIN-Assets dar. Anhand der Graphik ist ersichtlich, dass nach der Auswahl der Assets eine Spezifizierung der Gefahr

erfolgen muss, da es zu diesem Zeitpunkt nicht möglich ist, eine qualitative Bewertung hinsichtlich der Resilienz (= Beantwortung der Frage, inwiefern sich eine Einflussgröße auf die Resilienz positiv/negativ auswirkt) nur anhand der Infrastruktureigenschaften zu erstellen. Beispielsweise hat die Tatsache, dass eine Brücke nach EC8 bemessen wurde, einen positiven Einfluss auf die Resilienz gegenüber Erdbeben; auf die Resilienz gegenüber Starkregen hat sie allerdings keinen Einfluss. Der Prozess muss also für jede identifizierte Gefahr neu erfolgen (Interaktion AP 3 und AP 4).

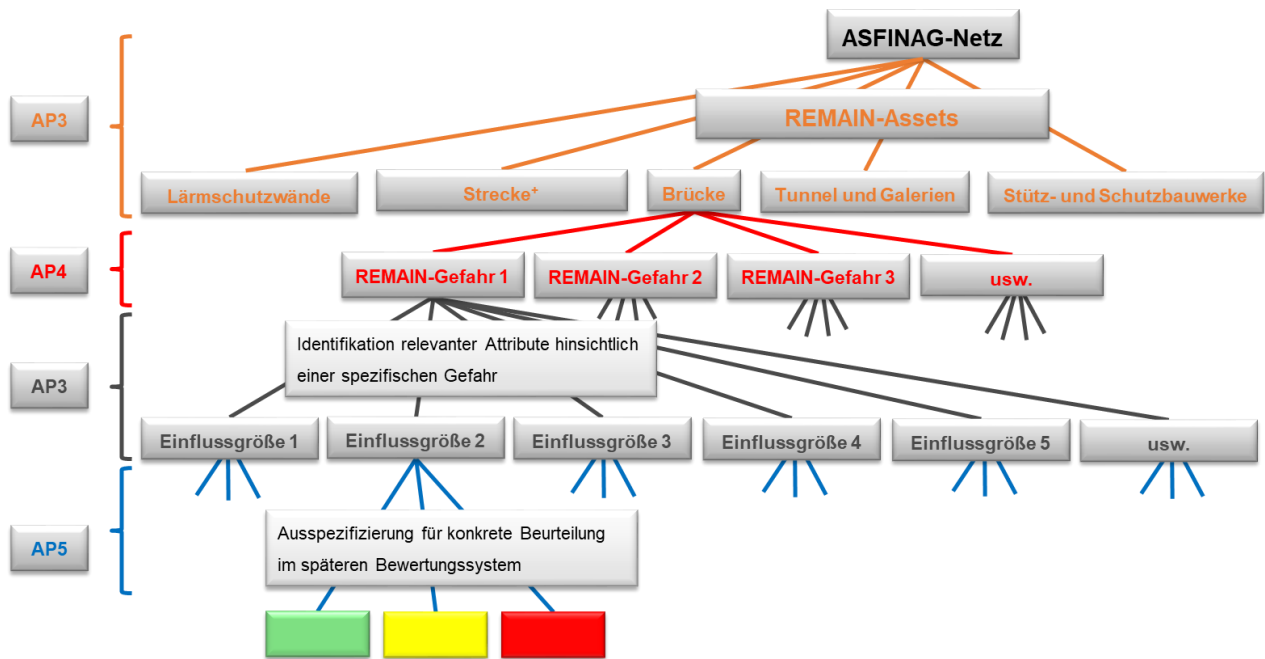


Abbildung 13: Framework für die Resilienz beeinflussende Größen

Im Arbeitspaket 3 erfolgt demnach eine grundsätzliche Identifikation und Kategorisierung von Einflussgrößen, die für die Resilienz eines Assets maßgeblich sein können. Ob diese Einflussgrößen allerdings in Bezug auf eine spezifische Gefährdung überhaupt relevant sind und welche konkreten Punkte sich positiv oder negativ auf die Resilienz auswirken, kann erst nach Verschneidung mit den potenziellen Gefahren (AP 4 bzw. AP 5) für ein Asset bestimmt werden. Der aktuelle Vorschlag an Einflussgrößen ist als weitgehend universell anzusehen und wird in weiterer Folge gefahrenabhängig spezifiziert (reduziert).

Abbildung 14 zeigt einen Vorschlag, wie die Verschneidung mit den Gefahren erfolgen kann. Die Resilienz-Einflussgrößen (hier exemplarisch für eine Asset-Kategorie dargestellt) werden zeilenweise auf der linken Seite eingetragen. Spaltenweise kann nun eine qualitative Bewertung der Resilienz eines Assets hinsichtlich einer der im AP4 definierten REMAIN-Gefahren für die gewählte Einflussgröße erfolgen. Konkret handelt es sich bei der in AP5

vorzunehmenden Bewertung um die feldweise Befüllung der dafür vorgesehenen, derzeit noch leeren Zellen, z.B. mit einer Bewertung „von-bis“ oder ja/nein-Attributen (siehe Kapitel 5).

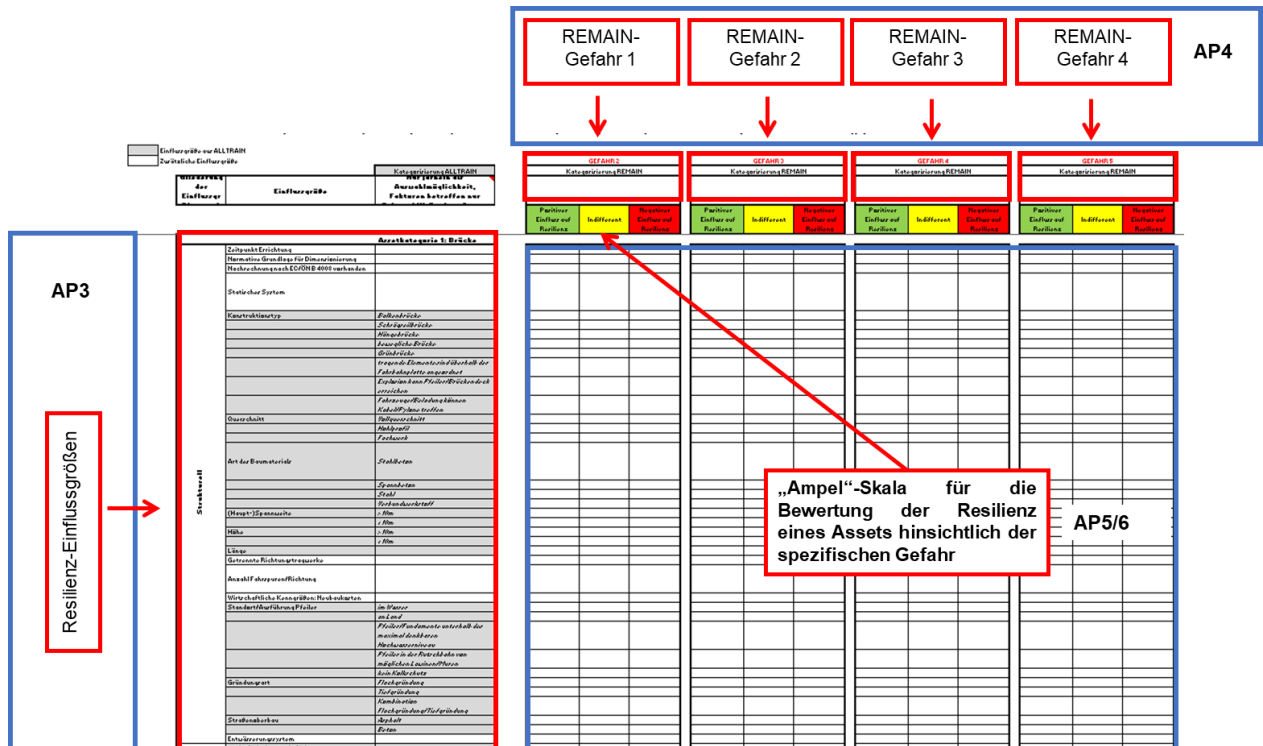


Abbildung 14: Übersichtsdarstellung der Verschneidung der Resilienz-Einflussgrößen mit den identifizierten Gefahren (Beispiel REMAIN-Assetkategorie Brücken)

3.4.1.2 Gliederung der Bewertung nach Teilindikatoren

Das Projekt RITUN [37] definiert sehr anschaulich, wie resilienzsteigernde Maßnahmen Einfluss auf die Funktionalität und damit Verminderung des Resilienzverlustes R haben können und stellt folgende Szenarien gegenüber (Abbildung 15):

- Ohne Maßnahme (Vergleichsbasis)
- Vorbeugende Maßnahmen → Verhinderung des Störereignisses (im Idealfall bei rechtzeitig gesetzter Maßnahme, bzw. Auslegung des Bauwerks auf diese Gefahr z.B. Erdbebenbemessung)
- Schützende oder reaktive Maßnahmen → Reduktion des Funktionalitätsverlustes
- Erholende Maßnahmen → Reduktion der Wiederherstellungsdauer

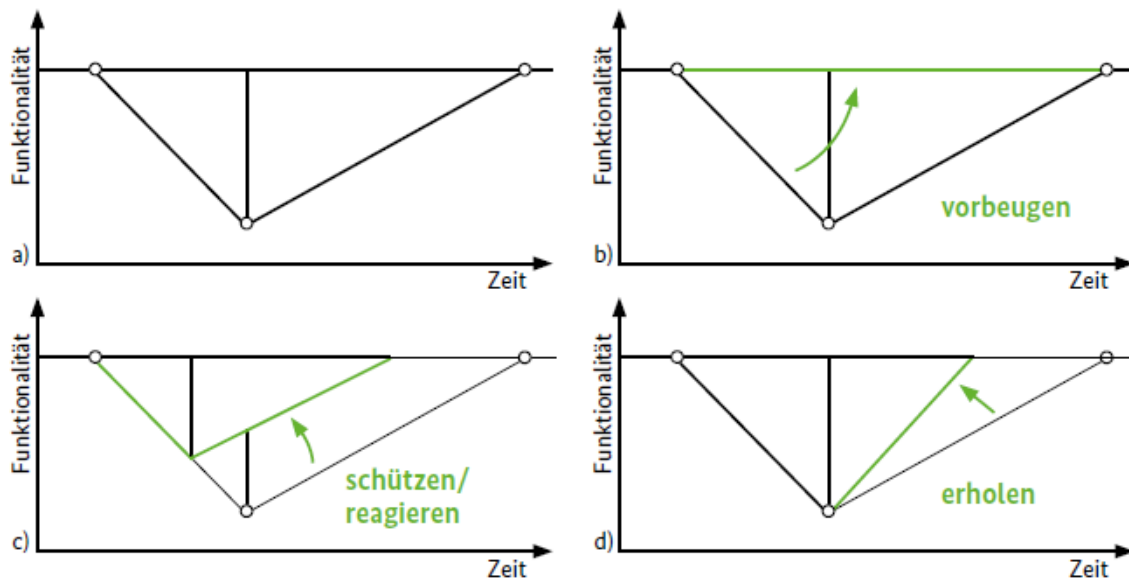


Abbildung 15: Idealisierte Darstellung resilienzverbessernder Maßnahmen [37]

Maßnahmen bzw. Resilienz Einflussgrößen können auch durch die in Kapitel 2 definierten Teilindikatoren der Resilienz: Robustheit, Redundanz, Rapidität und Ressourcen ausgedrückt werden und ihr Einfluss kann idealisiert auch grafisch in Abbildung 16 dargestellt werden.

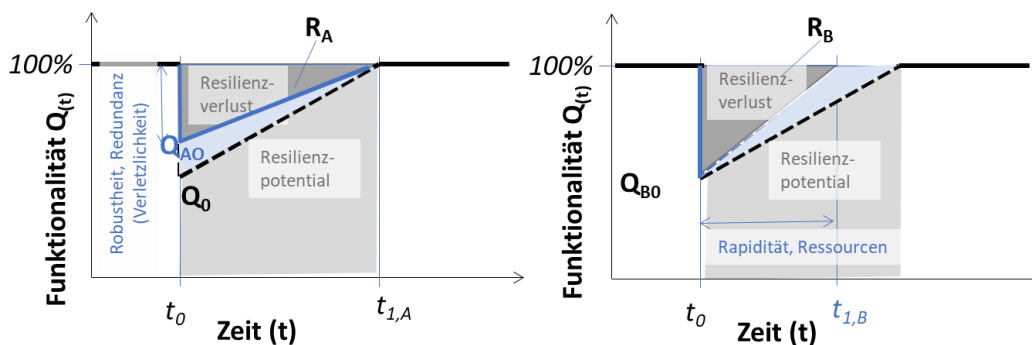


Abbildung 16: Idealisierte Resilienzverbessernde Maßnahmen in Bezug auf Robustheit, Redundanz (A, links) sowie Rapidität und Ressourcen (B, rechts)

Eine weitere mögliche Unterteilung der Teilindikatoren wäre in Bezug auf Schadensszenarien in die Gruppen Prävention und Mitigation nach [37] zu treffen (Abbildung 17), das wird aber nicht weiter verfolgt.

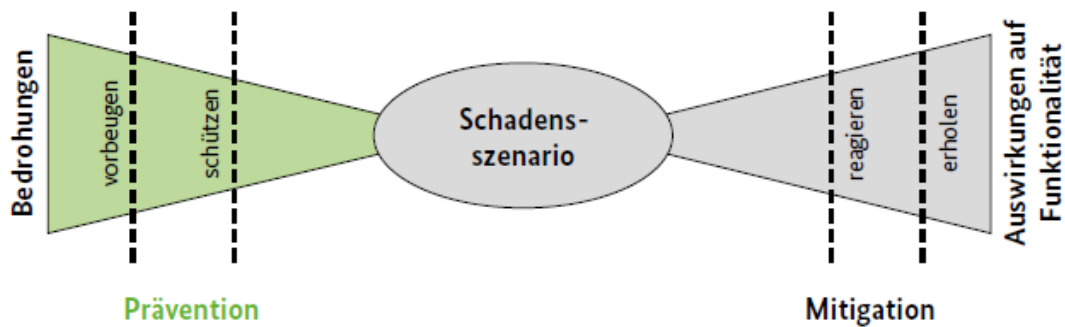


Abbildung 17: Teilindikatoren Prävention und Mitigation in Bezug auf Schadensszenarien nach [37]

Abbildung 18 veranschaulicht, wie die Gliederung der Bewertung der Resilienz in Teilindikatoren in der REMAIN-Einflussgrößen-Matrix erfolgen kann:

- Es besteht die Möglichkeit, für jeden der 4 in AP 2 gewählten Teilindikatoren eine eigene Bewertung vorzunehmen. Selbstverständlich bleiben bei dieser Bewertung manche Zellen leer, da eine Einflussgröße im Normalfall nur eine Auswirkung auf einen der vier Teilindikatoren der Resilienz hat. Beispielsweise beeinflusst die Art des Baumaterials eines Infrastrukturelements nur den Teilindikator Robustheit.
- Um die Dimensionen der Matrix zu reduzieren, besteht alternativ die Möglichkeit, die vier Teilindikatoren der Resilienz in Anlehnung an Abbildung 16 in zwei Bewertungskategorien zusammenzufassen:
 - Unter Robustheit & Redundanz werden dabei jene Faktoren zusammengefasst, die die Größe des Funktionalitätsverlustes (y-Achse) beeinflussen.
 - Eine Auswirkung auf Rapidität & Ressourcen zeigt sich bei Einfluss eines Faktors auf die Zeit bis zur Wiederherstellung der Funktionalität (x-Achse).
- Zu guter Letzt ist aus Sicht auch noch eine Zusammenführung der 4 Teilindikatoren in eine singuläre Gesamt-Bewertung vorstellbar.

Weitere diesbezügliche Details zur gewählten Vorgangsweise werden ebenso wie die Bildung und Gewichtung der in Abbildung 18 ersichtlichen "Zwischensummen" aus den verschiedenen Kategorien der Einflussgrößen (strukturell, natürlich, verkehrlich, lokal/operativ) in den nachfolgenden Kapiteln entsprechend konkretisiert.

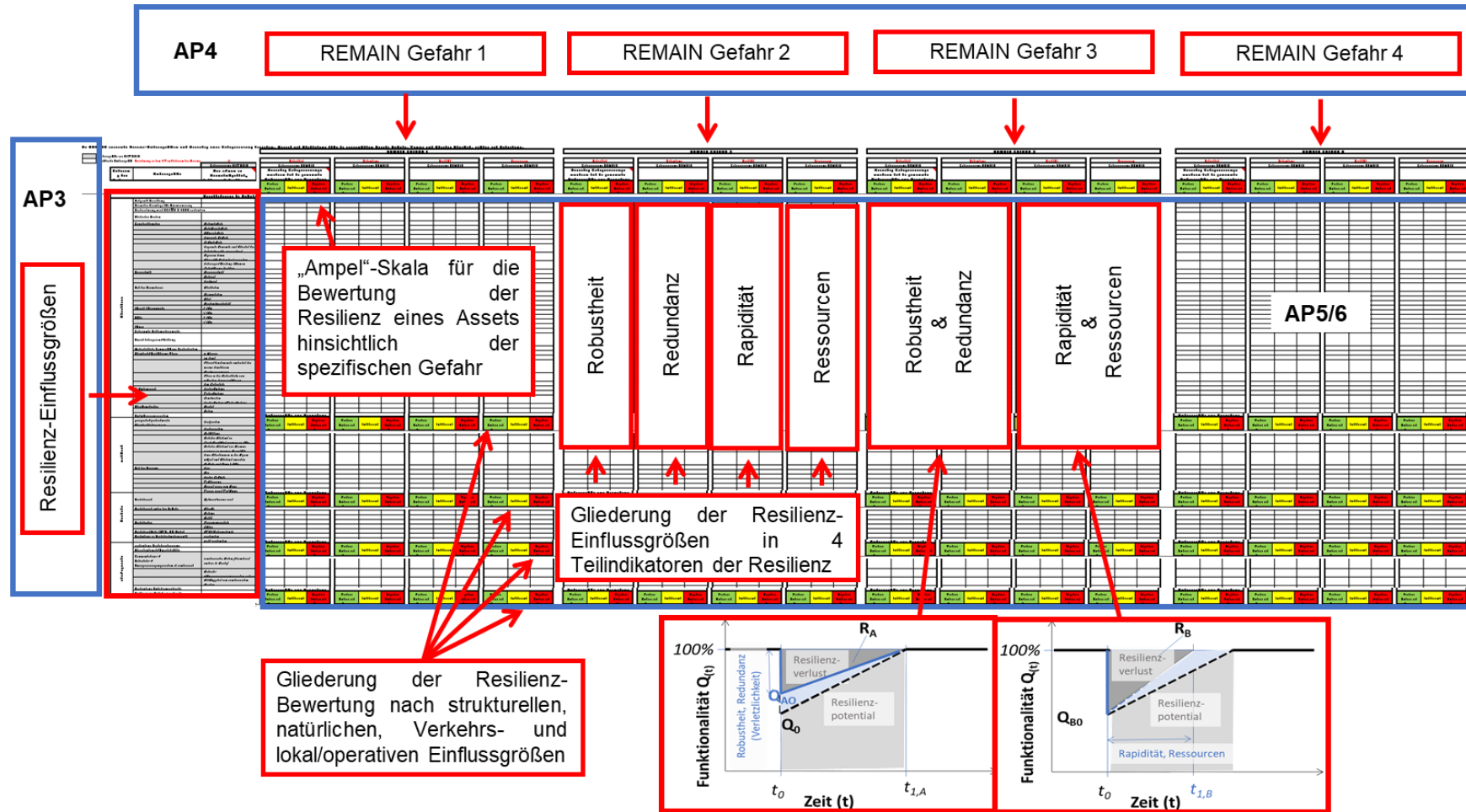


Abbildung 18: Übersichtsdarstellung: Verschneidung der Resilienz-Einflussgrößen mit den identifizierten Gefahren unter Berücksichtigung der vier Teilindikatoren der Resilienz

3.4.2 Resilienz-Einflussgrößen für Brücken

Nachfolgende Tabelle 3 zeigt jene Resilienz-Einflussgrößen, die für die REMAIN-Assetkategorie Brücken abgeleitet wurden.

Besonders hervorzuheben für diese REMAIN-Assetkategorie sind die strukturellen Einflussgrößen (Zeitpunkt Errichtung, statisches System, Querschnitt etc.), zu denen auch ausreichend Daten in guter Qualität zur Verfügung stehen.

Brücken werden im Projekt REMAIN grundsätzlich objektbezogen definiert, wobei die Strecke plus bei einer Brücke jedenfalls in neue Abschnitte unterteilt wird. Der Straßenoberbau einer Brücke wird daher auch als Einflussgröße einer Brücke geführt.

Die lokal-operativen Einflussgrößen (vorhandener Streckendienst, Verkehrsdatensensorik, etc.) und die Einflussgröße Verkehrsstärke unterscheiden sich nicht grundlegend von jenen bei den anderen REMAIN-Assetkategorien.

Tabelle 3: Resilienz-Einflussgrößen Brücken

REMAIN-Assetkategorie 1: Brücken			
Strukturell	Zeitpunkt Errichtung		z.B. nach 1980/nach 1960/nach 1940
	Normative Grundlage für Dimensionierung		z.B. nach EC, nach ÖNORM xy
	Statisches System		z.B. Durchlaufträgerwirkung, Umlagerungseffekte können genutzt werden
	Konstruktionstyp	Balkenbrücke/Schrägseilbrücke/Hängebrücke/bewegliche Brücke/Grünbrücke tragende Elemente sind überhalb der Fahrbahnplatte angeordnet Explosion kann Pfeiler/Brückendeck erreichen Fahrzeuge/Beladung können Kabel/Pylone treffen	z.B. Rahmentragwerk als weitere Kategorie?
	Querschnitt	Vollquerschnitt/Hohlquerschnitt/Fachwerk	
	Art des Baumaterials	Stahlbeton/Spannbeton/Stahl/Verbundwerkstoff	z.B. bei Beton: Verwendung hochduktiler Bewehrungsstahl; teilweise durch Anlagengliederung schon abgedeckt
	(Haupt-)Spannweite	> 25m < 25m	evtl. durch Anlagengliederung schon abgedeckt
	Länge		
	Getrennte Richtungstragwerke		
	Anzahl Fahrstreifen/Richtung		mehrere Fahrstreifen/Richtung: Möglichkeit, nur einen Fahrstreifen zu sperren, um Verfügbarkeit nicht gleich auf 0 zu reduzieren
Verkehr	Gründungsart	Flachgründung/Tiefgründung/Kombination Flachgründung/Tiefgründung	
	Straßenoberbau	Asphalt/Beton	
lokal/operativ	Verkehrsstärke (DTV, DTLV)	DTV/Spitzenstunde	
	Streckendienst/Einsatzkräfte	Unterscheidung: Traffic Manager/normaler Streckendienst	Traffic Manager: nur in Ballungszentren (W, L, SBG) Verfügbarkeit 24/7 -> Reaktionszeit
	Dichte Kameraüberwachung		Unterscheidung: permanent/drehbar
	Verkehrsdatensensorik	z.B. Stauerkennungssensoren	im Tunnel/Freiland
	vertiefter Kenntnisstand durch Bauwerksüberwachung	Handnaheprüfung/ Sonderprüfung/ Dauermessung	Vermischung Zustands-getriebenes Bauprogramm mit Resilienz-getriebenem Alternativ-Bauprogramm
Vorhandene Umfahrungsstrecke		im ASFINAG-Netz (im Landesstraßennetz) (siehe GIS)	

3.4.3 Resilienz-Einflussgrößen für Tunnel und Galerien

Bei Tunnelanlagen handelt es sich um neuralgische Objekte des Verkehrsnetzes. Aufgrund ihrer eingeschränkten Zugänglichkeit und ihrer umfangreichen Ausstattung mit Sicherheits-

und Versorgungstechnik sind sie besonders anfällig für Störungen und können langwierige Verkehrsbehinderungen verursachen. Wesentlich ist die Unterscheidung zwischen Tunnel und Galerien sowie die Unterscheidung zwischen Tunnel mit und jenen ohne Gegenverkehr. Tabelle 4 zeigt die Resilienz-Einflussgrößen für Tunnel.

Tabelle 4: Resilienz-Einflussgrößen Tunnel

		REMAIN-Assetkategorie 2: Tunnel & Galerien	
Strukturell	Normative Grundlage/ Eröffnung	Wesentlich: vor oder nach 1995	Unterschiede in Ansatz aktiver/passiver Erddruck ab 1995
	Anzahl der Tunnelröhre	1 oder 2	
	Anzahl der Fahrstreifen	1,2,3	
	Gegenverkehr	Ja/Nein	
	Zwischendecke vorhanden	ja/nein	
	Tunnellänge	kurz 80-500m mittel 500-4000m lang > 4.000m	LT. RVS ab 80m Tunnel, ab 500m STSG anzuwenden ab 4000 m besonders Lüftungssysteme
	Tunnelart	Galerie, Tunnel,	
	Bauweise	Geschlossen Bauweise; offene Bauweise; Deckelbauweise	
	Tunneltyp	Tunnel, Einhausung/Überdeckung, Unterflurtrasse, Grüntunnel	
	natürlich	Tunnel dient als Schutzmaßnahme gegen Naturgefahren	
verkehrlich	Verkehrsstärke (DTV, SV-Anteil)	DTV/Spitzenstunde	Definintion? Fahrstreifenbezogen?
	Anteil Gefahrguttransport		
lokal/operativ	STSG TuRisMO vertiefte Analyse vorhanden	ja/nein- Nicht erforderlich	Analyse ist erforderlich für alle Tunnel ab 500 m-
	Gefährdungsklasse lt. RVS09.03.11/ TuRisMo	I,II,III,IV	
	vertiefter Kenntnisstand durch Bauwerksüberwachung	Handnaheprüfung/ Sonderprüfung/ Dauermessung	Vermischung Zustands-getriebenes Bauprogramm mit Resilienz-getriebenem Alternativ-Bauprogramm
	Streckendienst/Einsatzkräfte	Unterscheidung: Traffic Manager/normaler Streckendienst/	Traffic Manager: nur in Ballungszentren (W, L, SBG) Verfügbarkeit 24/7 -> Reaktionszeit
	Tunnelfeuerwehr vorhanden	vorhanden ja/nein	
	Dichte Kameraüberwachung		Unterscheidung: permanent/drehbar im Tunnel
	Verkehrsdatensensorik	z.B. Stauerkennungssensoren	im Tunnel
Vorhandene Umfahrstrecke	vorhanden ja/nein	im ASFINAG-Netz (im Landesstraßennetz) (siehe GIS)	

3.4.4 Resilienz-Einflussgrößen für Strecke plus

Im Vergleich zu den anderen Anlagen, die individuell betrachtet bzw. kategorisiert werden, zeichnet für die Strecke plus maßgebend verantwortlich der Straßenoberbau und der Straßenunterbau, jedoch in Kombination mit kleineren Anlagen entlang dieser Strecke. Darunter fallen folgende Kleinanlagen:

- Durchlässe (Entwässerung)
- Brücken < 5 m lichte Weite
- Mauern < 1 m Höhe
- Maut-Gantries
- Wegweiser
- Überkopfwegweiser
- Sonstige Kleinanlagen der Straßenausrüstung

Dabei ist die Anzahl dieser Kleinanlagen (sofern Daten vorhanden) die maßgebende Eingangsgröße. Spezifische Daten dieser Kleinanlagen werden derzeit nicht explizit im Berechnungsalgorithmus berücksichtigt.

Eine Strecke plus erstreckt sich dabei maximal zwischen zwei Anschlussstellen. Befindet sich zwischen den Anschlussstellen ein REMAIN-Asset der Kategorien Brücke oder Tunnel und Galerien, wird die Strecke plus an dieser Stelle unterbrochen. Nachfolgende Tabelle 5 beschreibt die Eingangsdaten für die Strecke plus wie sie der ASFINAG bereits zur Verfügung stehen bzw. welche ohne großen Mehraufwand erhoben werden können.

Tabelle 5: Resilienz-Einflussgrößen Strecke plus

REMAIN-Assetkategorie 3: Strecke+			
strukturell	Normative Grundlage für Dimensionierung		<i>Gibt sowieso nur RVS 03.08.63</i>
	Bauweise	Asphalt/Beton	
	Lastklasse		<i>LK gem RVS03.08.63</i>
	Tragschicht		
	Binderschicht		
	Deckschicht		
	Anzahl Fahrstreifen/Richtung		<i>mehrere Fahrstreifen/Richtung: Möglichkeit, nur einen Fahrstreifen zu sperren, um Verfügbarkeit nicht gleich auf 0 zu reduzieren</i>
	Fahrbahnbreite		
	Wirtschaftliche Kenngrößen: Neubaukosten		
	Anzahl Durchlässe		<i>Für Strecke+</i>
Anzahl Gantries / Überkopfwegweiser		<i>Für Strecke+</i>	
Verkehr	Verkehrsart	Highway/normal road	<i>bei ASFINAG nur Autobahn/Schnellstraße relevant, kann man sonst noch differenzieren?</i>
	Verkehrstyp	Personenverkehr	
		Güter	
Verkehrsstärke (DTV, DTLV)	DTV/Spitzenstunde		
lokal/ operativ	vorhandene Verkehrssteuerung		
	Streckendienst/Einsatzkräfte		

3.4.5 Resilienz-Einflussgrößen für Lärmschutzwände

Nachfolgende Tabelle 6 zeigt jene Resilienz-Einflussgrößen, die für die REMAIN-Assetkategorie Lärmschutzwände abgeleitet wurden. Diese Tabelle bildet den Bearbeitungsstand nach Ende des Arbeitspakets AP3 ab und wird im Zuge der weiteren Projektbearbeitung noch modifiziert.

Für Lärmschutzwände beschränken sich die strukturellen Einflussgrößen auf die geometrischen Abmessungen und das Material. Weiters ist es wichtig, zu berücksichtigen, ob sich eine Lärmschutzwand neben einer Bahnstrecke befindet, da es dadurch zu erhöhten dynamischen Beanspruchungen kommt.

Die lokal/operativen Einflussgrößen (vorhandener Streckendienst, Verkehrsdatensensorik, etc.) und die Einflussgröße Verkehrsstärke unterscheiden sich nicht grundlegend von den anderen REMAIN-Assetkategorien.

Tabelle 6: Resilienz-Einflussgrößen Lärmschutzwände

REMAIN-Assetkategorie 4: Lärmschutzwände			
Strukturell	Zeitpunkt Errichtung		z.B. nach 1980/nach 1960/nach 1940
	Höhe (OK Wand - OK Fundament)	< 5,50m	
		> 5,50m	
	Länge		
	Material Steher neben Bahnstrecke	Stahl/Beton ja/nein	
	Anzahl Fahrstreifen/Richtung		mehrere Fahrstreifen/Richtung: Möglichkeit, nur einen Fahrstreifen zu sperren, um Verfügbarkeit nicht gleich auf 0 zu reduzieren
Verkehr	Verkehrsstärke (DTV, DTLV)	DTV/Spitzenstunde	
lokal/operativ	Streckendienst/Einsatzkräfte	Unterscheidung: Traffic Manager/normaler Streckendienst	Traffic Manager: nur in Ballungszentren (W, L, SBG) Verfügbarkeit 24/7 -> Reaktionszeit
	Dichte Kameraüberwachung		Unterscheidung: permanent/drehbar
	Verkehrsdatensorik	z.B. Stauerkennungssensoren	im Tunnel/Freiland
	vertiefter Kenntnisstand durch Bauwerksüberwachung	Handnaheprüfung/ Sonderprüfung/ Dauermessung	Vermischung Zustands-getriebenes Bauprogramm mit Resilienz-getriebenem Alternativ-Bauprogramm
	Vorhandene Umfahrungsstrecke		im ASFINAG-Netz (im Landesstraßennetz) (siehe GIS)

3.4.6 Resilienz-Einflussgrößen für Stütz- und Schutzbauwerke

Je nach Konstruktionstyp weisen Stütz- und Schutzbauwerke stark unterschiedliche Charakteristiken auf. Es gibt Gewichtskonstruktionen, Winkelstützwände, eingespannte Konstruktionen sowie Sonderkonstruktionen. Gerade bei den eingespannten (rückverankerten) Konstruktionen ist die Unsicherheit bezüglich der Standsicherheit oft hoch, da über den Zustand der Anker oft wenig bekannt ist. Tabelle 7 zeigt die Resilienz-Einflussgrößen für Stütz- und Schutzbauwerke.

Tabelle 7: Resilienz-Einflussgrößen Stütz- und Schutzbauwerke

REMAIN-Assetkategorie 5: Stützbauwerke			
strukturell	Konstruktionstyp	Gewichtskonstruktion	
		Stahlbeton Winkelstützwand	Geankert/ungeankert
		Eingespannte Konstruktion	Geankert/ungeankert
		Sonderkonstruktionen	
	Wandhöhe (FOK-WOK)	1,5-4,0 m	<1,5m nicht in RVS aufgenommen
	4-8,0 m		
	> 8,0 m	Def. Schadensfolgeklasse ASFINAG/ÖBB	
Verkehr	Verkehrsstärke (DTV, DTLV)	DTV	Definintion? Fahrstreifenbezogen?
lokal/operativ	Streckendienst/Einsatzkräfte	Unterscheidung: Traffic Manager/normaler Streckendienst/	Traffic Manager: nur in Ballungszentren (W, L, SBG) Verfügbarkeit 24/7 -> Reaktionszeit
	vertiefter Kenntnisstand durch Bauwerksüberwachung	Handnaheprüfung/ Sonderprüfung/ Dauermessung	Vermischung Zustands-getriebenes Bauprogramm mit Resilienz-getriebenem Alternativ-Bauprogramm
	Vorhandene Umfahrungsstrecke	vorhanden ja/nein	im ASFINAG-Netz (im Landesstraßennetz) (siehe GIS)

4 GEFAHRENIDENTIFIKATION (AP 4)

In diesem Kapitel werden die Ergebnisse des Arbeitspakets 4 zusammengefasst. Im Zuge dieses Arbeitspakets wurden folgende Aufgaben behandelt:

- Identifikation der asset- und abschnittsspezifischen Gefahren (sog. REMAIN-Gefahren)
- Detaillierte Beschreibung der identifizierten Gefahren in Form von Factsheets
- Beurteilung der Relevanz der Gefahren für die einzelnen REMAIN-Assets mit Hilfe einer Gefahren-Asset-Matrix
- Bestandserhebung von ASFINAG-internen und externen Daten zur Gefahrenidentifikation inklusive einer Analyse der Datenqualität

Die Inhalte dieses Arbeitspakets wurden in gemeinsamen Workshops bzw. Abstimmungsworkshops zwischen Auftraggebern und Auftragnehmern (14. Dezember 2021, 20. Jänner 2022, 02. März 2022) im Detail diskutiert und einem Konsens zugeführt.

4.1 Ziele und Nicht-Ziele des Arbeitspakets 4 „Gefahrenidentifikation“

Im Rahmen des vorliegenden Arbeitspakets 4, das parallel und in enger Abstimmung mit Arbeitspaket 3 „Ableitung von infrastrukturbezogenen Resilienz-Einflussgrößen“ umgesetzt wurde, erfolgt die Identifikation der für die Straßennetzabschnitte bzw. die betrachteten Asset-Kategorien (die sogenannten REMAIN-Assets) relevanten Gefahren.

Es werden sämtliche relevante Gefahren für die Sicherheit und Verfügbarkeit der betrachteten Asset-Kategorien bzw. der Straßennetzabschnitte dargestellt und Wirkungsorten zugeordnet.

Dabei wird grundsätzlich zwischen menschlichen, natürlichen und sonstigen Gefahren unterschieden und eine für das ASFINAG-Netz sinnvolle Kategorisierung der Gefahren entwickelt, die bereits bestehende Kategorisierungen berücksichtigt (z.B. auf Basis des Handlungsleitfadens „Naturgefahren-Management in der ASFINAG Bau Management GmbH“ [72]).

Es wird analysiert, welche Daten bereits heute für das ASFINAG-Netz zur Verfügung stehen und in welcher Qualität diese bereits vorhanden sind bzw. welche Daten künftig noch (besser) erfasst, aufbereitet oder beschafft werden müssen.

Mit den Auftraggebern wurde im Rahmen des 1. gemeinsamen Projekt-Workshops am 24.9.2021 vereinbart, den Fokus des Projekts tatsächlich nicht nur auf Naturgefahren zu

legen, sondern zwischen menschlichen, natürlichen und sonstigen Gefahren zu unterscheiden, wobei diese getrennt betrachtet werden sollen.

Weiters wurde vereinbart, dass böswillige und daher kaum vorhersehbare Handlungen von Personen oder Gruppen, besonders Terror, aber auch Blackout, nicht behandelt werden, da diese durch andere Mechanismen abgedeckt sind.

Erhaltungs- und Instandhaltungsmaßnahmen werden nicht als „Gefahr“ berücksichtigt, da es sich um planbare Ereignisse mit planbaren Konsequenzen an den Assets handelt und der Zeitpunkt ihres Auftretens somit gesteuert und optimiert werden kann. Die im Zuge von REMAIN betrachteten Gefahren sind im Gegensatz dazu disruptive Ereignisse mit einer probabilistischen Natur und einer daraus resultierenden "Nicht-Planbarkeit" des Ereignisses selbst sowie seiner Konsequenzen.

Möglichkeiten, um künftig Erhaltungs- und Instandhaltungsmaßnahmen mit dem Resilienzkonzept verknüpfen zu können, bestehen beispielsweise im Rahmen der probabilistischen Sicherheitsanalyse (PSA), wobei Risiken von Assets mittels der Methoden der Wahrscheinlichkeitsrechnung und Systemanalyse untersucht werden. In der Risikoanalyse wird üblicherweise der zu analysierende Zustand zum Zeitpunkt der Analyse festgelegt und somit eingefroren („snapshot in time“). Spätere Veränderungen der Assets oder neue Kenntnisstände über Daten und Modelle der probabilistischen Sicherheitsanalyse (PSA) werden nicht berücksichtigt. Im Gegensatz dazu besteht die Aufgabe einer „Living PSA“ darin, die PSA über die Lebensdauer eines Assets aktuell zu halten. Falls die Resilienzkennzahl ständig aktuell gehalten wird, kann dies für die Planung sehr hilfreich sein – bei manchen Kernkraftwerken ist es gängige Praxis, die Instandhaltungsarbeiten im Sinne der Living PSA nach einem Äquivalent der Resilienzkennzahl zu planen, da Instandhaltungsmaßnahmen, die dazu führen, dass einzelne Assets nicht oder nur eingeschränkt verfügbar sind, sich in der Resilienzkennzahl des Gesamtsystems niederschlagen [71].

Schlussendlich ist die Beurteilung der Wirkung von Erhaltungsmaßnahmen auf die Resilienz, die Neupriorisierung bestehender Erhaltungsvorhaben und der Variantenvergleich dieser Maßnahmen im Rahmen der Bewertung des bestehenden Bauprogramms aber – im Gegensatz zur resilienzgesteuerte Maßnahmenentwicklung – sehr wohl Teil des Projekts.

4.2 Gefahren für die Straßeninfrastruktur und Ihre Assets

4.2.1 Allgemeine Definition des Begriffs „Gefahr“

Gefahren werden definiert als mögliche Ereignisse, die die Sicherheit und/oder die Verfügbarkeit der Straßeninfrastruktur und ihrer Assets beeinträchtigen können [4], [34], wobei folgende Ereignisse berücksichtigt werden:

- menschliche Gefahren,
- natürliche Gefahren (Naturgefahren),
- sonstige Gefahren.

Im Zuge des Projekts erfolgt die Betrachtung der einzelnen Gefahr als lokales Phänomen, d.h. am Standort des jeweiligen Assets bzw. des betrachteten Netzabschnitts. Bei dieser Art der Betrachtung ist das etwaig auslösende Anfangsereignis irrelevant, z.B. ist im Falle der lokalen Gefahr „Hochwasser“ nicht relevant, ob dieses auf das Anfangsereignis „Regen“ oder das Anfangsereignis „Schneesmelze“ zurückzuführen ist. Es geht lediglich um das lokale Phänomen, das heißt um die Art, in der sich die Gefahr bei einem bestimmten Asset oder einem Netzabschnitt manifestieren kann. Relevant ist die tatsächliche Auswirkung bzw. Gefahr am jeweiligen Asset.

Im Arbeitspaket 5 werden diese Gefahren als lokale Phänomene (d.h., Art, in der die Gefahr sich manifestiert) dann mit der Auswirkung (d.h., Art, in der die Gefahr auf das Anlagegut schlussendlich einwirkt) verknüpft (sh. Kap. 5).

4.2.2 Untersuchungen zu Gefahren und Schäden an Assets

Rückschlüsse auf die im Rahmen von REMAIN zu betrachtenden Gefahren können u.a. auch aus Untersuchungen zur Versagenswahrscheinlichkeit von Bauwerken gezogen werden. In [73] wurde eine Schadensdatenbank mit über 3 Millionen Brücken ausgewertet. Dabei zeigt sich, dass die 657 untersuchten Schadensszenarien ihren Ursprung in rund 30% der Fälle in Naturgefahren haben, die anderen Szenarien sind operativen oder menschlichen Ursprungs (Abbildung 19). Versagen während der Bauphase wurden in dieser Untersuchung nicht berücksichtigt.

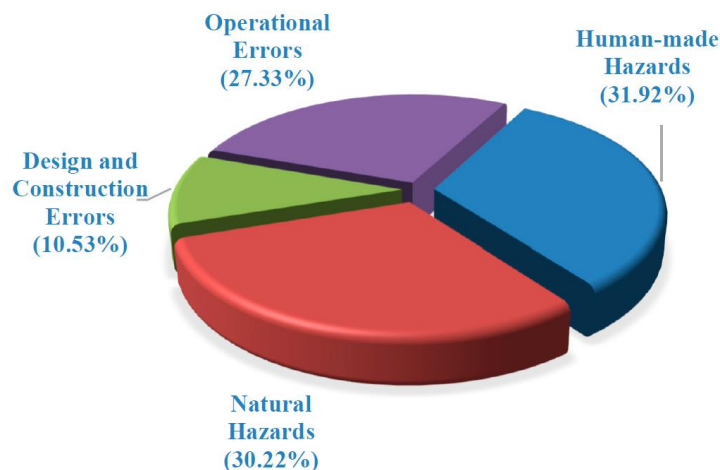


Abbildung 19: Verteilung der Schadensursachen [73]

Eine detaillierte statistische Aufbereitung der Ursachen für Brückenversagen ist in [74] bzw. [75] enthalten. Dabei zeigt sich, dass Fahrzeuganprall, Flut, Unterspülung und Überlastung zu den häufigsten Einsturzursachen zählen (Abbildung 20).

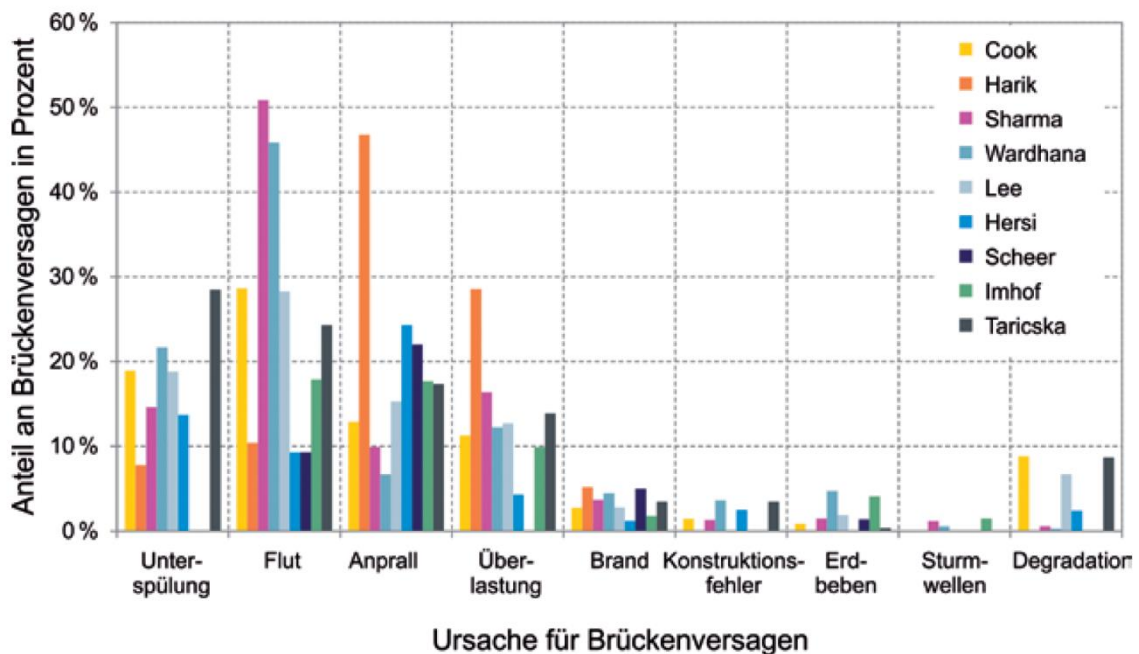


Abbildung 20: Einsturzursachen von Brücken [75]

In [74] wird eine Methode aufbauend auf statistischen Auswertungen der Einsturzhäufigkeiten von Brücken vorgestellt, die Rückschlüsse auf individuelle Brückeneinstürze erlaubt. Aus diesen Auswertungen wurden zwölf Faktoren mit einem Einfluss auf die

Versagenswahrscheinlichkeiten abgeleitet. Abbildung 21 veranschaulicht die Korrekturfaktoren der Versagenswahrscheinlichkeit, die für die zwölf Faktoren angesetzt werden können. Die meisten Ursachen werden derzeit weder in den deterministischen noch den probabilistischen Berechnungen explizit berücksichtigt.

Damit wird versucht, den Einfluss auf Brückeneinstürze grafisch aufzubereiten und erste Schritte in Richtung einer Quantifizierung zu setzen (positiver Einfluss: grün, Faktor <1,0 Einsturzwahrscheinlichkeit nimmt ab, negativer Einfluss: orange Faktor >1,0 Einsturzwahrscheinlichkeit nimmt zu). So hat eine Zunahme der statischen Bestimmtheit oder Ankündigung von Fehlern ebenso wie die Berücksichtigung der Gebrauchstauglichkeit einen positiven, reduzierenden Einfluss auf die Einsturzwahrscheinlichkeit. Der Unterschied der Versagenswahrscheinlichkeit zwischen Bauwerken mit statischer Bestimmtheit und Unbestimmtheit aufgrund der Systemreserven beträgt somit ca. eine Zehnerpotenz [75], [76].

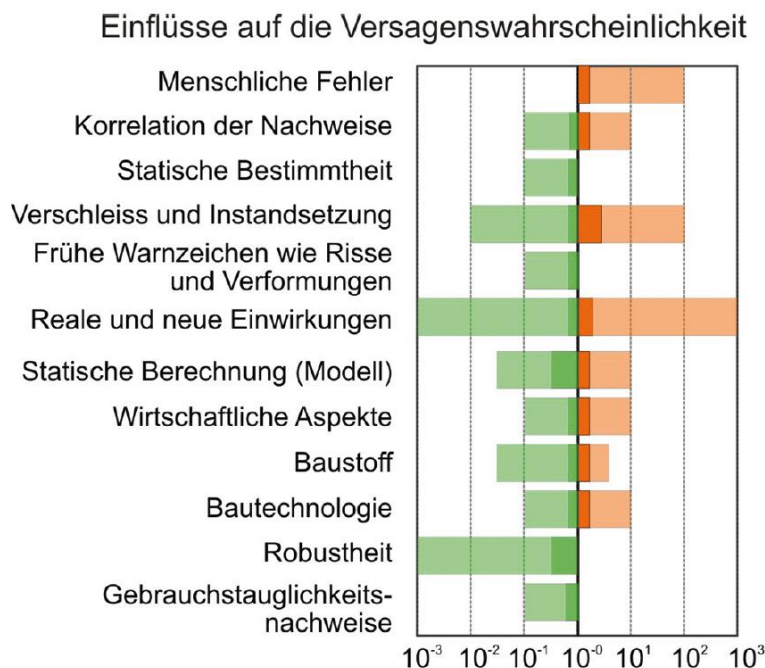


Abbildung 21: Einflüsse auf die Berechnung der Versagenswahrscheinlichkeiten [74]

4.2.3 REMAIN-Gefahren

Alle im Zuge des Projekts berücksichtigten, insgesamt 18 Gefahren (die sogenannten REMAIN-Gefahren) werden im Detail in Gefahren-Fact-Sheets beschrieben, die vertiefte Informationen zu den einzelnen Gefahren enthalten (siehe ANHANG 2). Die im Zuge des Projekts zu berücksichtigenden Gefahren wurden gemeinsam mit den Fachexpert:innen der ASFINAG festgelegt.

Nicht behandelt werden, wie bereits erwähnt:

- böswillige und daher kaum vorhersehbare Handlungen von Personen oder Gruppen, besonders Terror, Vandalismus, Cyber-Attacken, aber auch Blackout, da diese durch entsprechende Security-Maßnahmen auf anderer Ebene behandelt werden müssen;
- unerwartetes Material- oder Systemversagen, da dieses ebenfalls nicht vorhersehbar ist und durch technisch-organisatorische Maßnahmen abgedeckt werden muss (z.B. organisationsintern abgestimmtes einheitliches Vorgehen bei neuen wissenschaftlichen Erkenntnissen in Bezug auf die Tragfähigkeit von Bestandskonstruktionen – Stichwort: Spannungsrissskorrosion);
- geplante disruptive Ereignisse (z.B. geplante Erhaltungsmaßnahmen);
- Gefahren im Rahmen des operativen Betriebs (z.B. Fehlbedienungen bzw. menschliches Fehlverhalten in betrieblicher Hinsicht).

Die Bezeichnung der konkreten Gefahren erfolgt – wo möglich – in Übereinstimmung mit dem Handlungsleitfaden „Naturgefahren-Management in der BMG“ der ASFINAG aus dem Jahr 2020 [72].

4.2.3.1 Menschliche Gefahren

Menschliche Gefahren können grundsätzlich in beabsichtigte und unbeabsichtigte Handlungen unterteilt werden. Viele Gefahren können die Folge einer beabsichtigten oder unbeabsichtigten Handlung sein (z. B. ein Brand). (sh. Tab. 8)

Risiken durch benachbarte Industrieanlagen („Seveso-Betriebe“ gem. §4 BStG) werden durch die konkrete Gefahr Explosion/Brand bzw. Freisetzen von Gefahrenstoffen berücksichtigt. Gemäß §4 BStG ist ein Seveso-Betrieb ein Betrieb, der in den Geltungsbereich der Richtlinie 2012/18/EU zur Beherrschung der Gefahren schwerer Unfälle mit gefährlichen Stoffen fällt. Seveso-Betriebe sind entweder Betriebe der unteren Klasse (Art. 3 Z 2 der Richtlinie 2012/18/EU) oder Betriebe der oberen Klasse (Art. 3 Z 3 der Richtlinie 2012/18/EU).

Die Gefahr Überladung/Überbeanspruchung umfasst sowohl überladene Fahrzeuge als auch zu breite/hohe Fahrzeuge.

Tabelle 8: Menschliche Gefahren

Menschliche Gefahren
Gefahr am Asset
Fahrzeug-/Schiffsanprall
Explosion/Brand
Freisetzung von Gefahrenstoffen
Überladung/Überbeanspruchung

4.2.3.2 Natürliche Gefahren (Naturgefahren)

Tabelle 9 enthält die Liste der im Zuge des Projekts behandelten natürlichen Gefahren (Naturgefahren). Die Gefahrenkategorisierung erfolgt unter Berücksichtigung der Kategorisierung und Nomenklatur des Handlungsleitfadens „Naturgefahren-Management in der BMG“ der ASFINAG aus dem Jahr 2020 [72].

Tabelle 9: Natürliche Gefahren

Natürliche Gefahren	
Gefahrenkategorie	Gefahr am Asset
Meteorologische Gefahren	<ul style="list-style-type: none"> • Sturm • Schnee(verwehung), Eis • extrem hohe Temperatur
Geophysikalische Gefahren	<ul style="list-style-type: none"> • Erdbeben • Bodensenkung, -verformung, -verschiebung
Gravitative Gefahren	<ul style="list-style-type: none"> • Schneerutsch, Lawine, Eissturz • Rutschung, Hangmure • Steinschlag, Blockschlag, Felssturz, Bergsturz
Hydrologische Gefahren	<ul style="list-style-type: none"> • Hochwasser Wildbach bzw. Fluss, Überflutung • Ufererosion, Kolkbildung

4.2.3.3 Sonstige Gefahren

Neben natürlichen und menschlichen Gefahren werden die in Tabelle 10 enthaltenen sonstigen Gefahren berücksichtigt.

Tabelle 10: Sonstige Gefahren

Sonstige Gefahren
Gefahr am Asset
Wald-/Flurbrand
Windwurf, umgestürzte Bäume
Tiere auf der Fahrbahn
Strom-/Kommunikationsausfall

4.2.4 REMAIN-Gefahren-Asset-Matrix

Trifft eine Gefahr auf eine Schwachstelle im Straßennetz (insbesondere zufolge technischer und/oder organisatorischer Mängel), so kann diese unterschiedliche Schadensszenarien auslösen und dadurch die Funktionalität des Straßennetzes und seiner Assets reduzieren.

In diesem Sinne wurde eine REMAIN-Gefahren-Asset-Matrix entwickelt, welche die in Abschnitt 4.2.2 beschriebenen REMAIN-Gefahren den in Abschnitt 3.3 definierten REMAIN-Assets zuordnet. Anhand dieser Matrix ist zu erkennen, welche Gefahren für welche Assets relevant sein können. Dies erlaubt in weiterer Folge eine Identifikation der relevanten Gefahren für das zu bewertende Asset bzw. den zu bewertenden Netzabschnitt im Falle des REMAIN-Assets Strecke plus.

REMAIN- Gefahren-Asset- Matrix						
		Strecke plus	Brücken	Tunnel und Galerien	Stütz- und Schutzbauwerke	Lärmschutzbauwerke
Menschliche Gefahren						
	<i>Fahrzeug-/Schiffsanprall</i>	X	X	X	X	X
	<i>Explosion/Brand</i>	X	X	X	X	X
	<i>Freisetzung von Gefahrenstoffen</i>	X		X		
	<i>Überladung / Überbeanspruchung</i>	X	X			
Natürliche Gefahren						
Meteorologische Gefahren						
	Sturm	X	X			X
	Schnee(verwehung), Eis	X	X			X
	extrem hohe Temperatur	X	X			
Geophysikalische/geologische Gefahren						
	Erdbeben	X	X	X	X	X
	Bodensenkung, -verformung, -verschiebung	X	X	X	X	X
Gravitative Gefahren						
	Schneerutsch, Lawine, Eissturz	X	X	X	X	X
	Rutschung, Hangmure	X	X	X	X	X
	Steinschlag, Blockschlag, Felssturz, Bergsturz	X	X	X	X	X
Hydrologische Gefahren						
	Hochwasser, Überflutung	X	X	X	X	X
	Ufererosion, Kolkbildung	X	X		X	X
Sonstige Gefahren						
	<i>Wald-/Flurbrand</i>	X	X	X	X	X
	<i>Windwurf, umgestürzte Bäume</i>	X			X	X
	<i>Tiere auf der Fahrbahn</i>	X	X	X		
	<i>Strom-/Kommunikationsausfall</i>	X		X		

Abbildung 22: REMAIN-Gefahren-Asset-Matrix

5 AUSWIRKUNGEN DER GEFAHREN (AP 5)

In diesem Kapitel werden die Ergebnisse des Arbeitspakets 5 (Auswirkungen der Gefahren) zusammengefasst. Es wird detailliert beschrieben, welche Auswirkungen die in AP 3 erarbeiteten Einflussgrößen (siehe Kapitel 3) bezüglich der in AP 4 erarbeiteten Gefahren (siehe Kapitel 4) auf die Resilienz der verschiedenen Asset-Kategorien haben. Das Ergebnis dieses Arbeitspaketes ist im Wesentlichen die Zuordnung jeder Einflussgröße zu einer der Auswahlmöglichkeiten „gut“, „moderat“ oder „schlecht“ (bzw. „nicht relevant“), was die Auswirkungen hinsichtlich der jeweils betrachteten Gefahr betrifft. Die vorgenommenen Zuordnungen werden in Tabellen dargestellt. Die Grundlage dieser Zuordnungen sind Experteneinschätzungen und Diskussionen innerhalb des REMAIN-Konsortiums sowie Befragungen externer Experten der ASFINAG und aus der Wissenschaft.

5.1 Konzeptionelle Vorbemerkungen

Wie bereits in Kapitel 2 dargelegt wurde, ist ein resilientes System dadurch gekennzeichnet, dass im Falle eines disruptiven Ereignisses der Verlust an Funktionalität gering und die Zeitdauer bis zur Wiederherstellung der vollen (oder auch einer hinreichenden) Funktionalität kurz ist. Im Sinne von Abbildung 23 bedeutet dies, dass eine Minimierung der blauen Fläche mit einer Maximierung der Resilienz einhergeht.

Es ist Stand der internationalen Forschung und Praxis, dass die Resilienz in die vier Teilbereiche (oder „Dimensionen“) Robustheit, Redundanz, Rapidität und Ressourcen unterteilt werden kann. Im Zuge des Forschungsprojektes REMAIN wurde erkannt, dass „Robustheit“ und „Redundanz“ den Verlust an Funktionalität bestimmen, während die Zeitdauer der Wiederherstellung der Funktionalität von „Rapidität“ und „Ressourcen“ abhängt. Diese klare Zuordenbarkeit der vier Teilbereiche der Resilienz zu den Dimensionen Funktionalität bzw. Zeit hat sich als sehr zweckmäßig für eine systematische Untersuchung der Resilienz erwiesen. Konsequenterweise werden in weiterer Folge nur mehr die Funktionalität und die Zeit als „Dimensionen“ aufgefasst, und Robustheit und Redundanz sowie Rapidität und Ressourcen im Zuge der Bewertung der Einflussgrößen jeweils paarweise untersucht und diesen beiden Dimensionen zugeordnet.

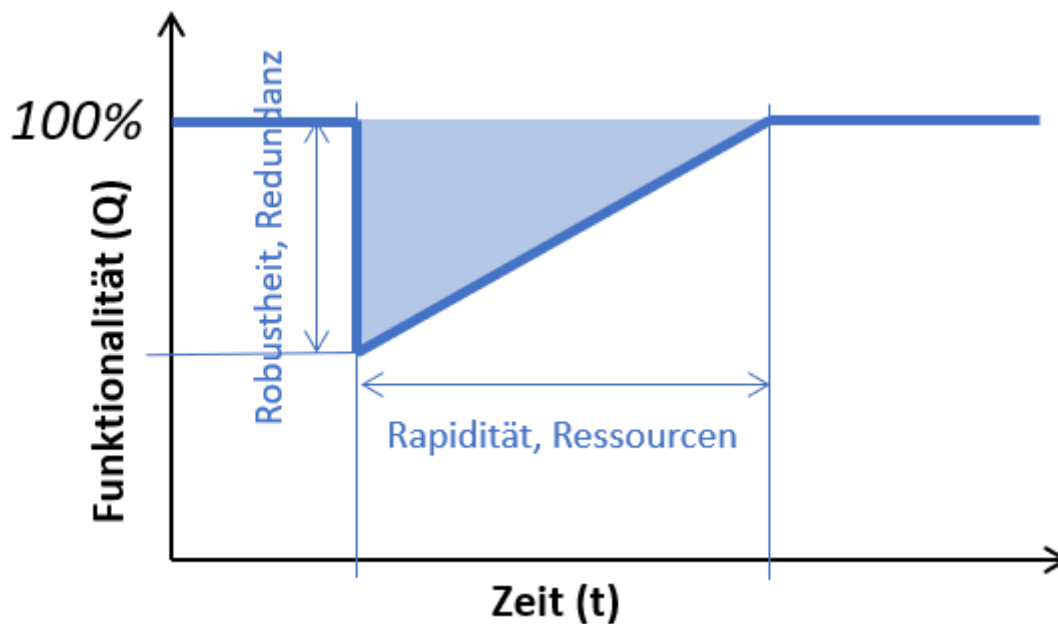


Abbildung 23: Ein resilientes System ist dadurch gekennzeichnet, dass im Falle eines disruptiven Ereignisses der Verlust an Funktionalität gering und die Zeitdauer bis zur Wiederherstellung der vollen (oder auch einer hinreichenden) Funktionalität gering ist.

Werden – wie im vorliegenden Projekt – *mehrere* Gefahren betrachtet, so gilt es zu beachten, dass die in Kapitel 3 beschriebenen Einflussgrößen der fünf Asset-Kategorien hinsichtlich unterschiedlicher Gefahren grundsätzlich unterschiedliche Auswirkungen auf die Resilienz haben, wobei zudem zwischen den Auswirkungen auf die zwei Dimensionen Funktionalität und Zeit zu unterscheiden ist.

Dieser Sachverhalt ist in Abbildung 24 in dreidimensionaler Darstellung grundsätzlich beschrieben: Im gezeigten Beispiel bewirkt „Gefahr 2“ (rechtes Bild) einen geringeren Funktionalitätsverlust, führt aber zu einer längeren Wiederherstellungsdauer als „Gefahr 1“ (linkes Bild).

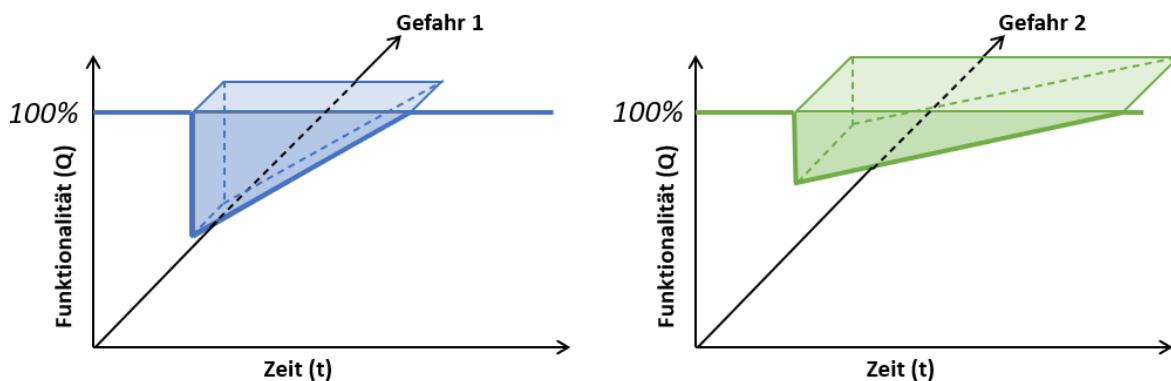


Abbildung 24: Konzept zur Beurteilung der Resilienz für eine Asset-Kategorie: „Gefahr 2“ (rechtes Bild): bewirkt in diesem Beispiel einen geringeren Funktionalitätsverlust, führt aber zu einer längeren Wiederherstellungsdauer als „Gefahr 1“ (linkes Bild). Aus der „Tiefe“ der Körper ist weiterhin ersichtlich, dass die Gefährdung durch „Gefahr 2“ am betrachteten Standort größer ist als durch „Gefahr 1“.

Die Erstellung eines Frameworks, bei welchem die Beurteilung der Resilienz hinsichtlich jeder Gefahr getrennt vorgenommen wird, bietet zudem den Vorteil, dass dem Anwender Kennzahlen zur Verfügung gestellt werden können, welche die Resilienz des untersuchten Objektes hinsichtlich jeder einzelnen Gefahr angeben. So kann beispielsweise für eine untersuchte Brücke sofort festgestellt werden, hinsichtlich welcher Gefahren sie eine geringe Resilienz aufweist. Im Rahmen einer Variantenstudie kann zudem festgestellt werden, welche Maßnahmen Verbesserungen in Hinblick auf kritische Gefahren bringen.

Bei der Ableitung einer (Gesamt-)Resilienz Kennzahl, in welche alle untersuchten Gefahren einfließen, gilt es zu beachten, dass das *Ausmaß der Gefährdung* durch die einzelnen Gefahren eine Rolle spielen muss. Als Beispiel sei ein Bauwerk in einem nicht erdbebengefährdeten Gebiet genannt, welches („zufällig“) eine erdbebensichere Bauweise aufweist. Es wäre nicht gerechtfertigt, wenn seine („zufällige“) Robustheit gegen Erdbeben denselben Einfluss auf die Beurteilung seiner (Gesamt-)Resilienz Kennzahl hätte wie seine Resilienz hinsichtlich anderer Gefahren, welche am Standort eine viel höhere Relevanz haben.

In dieser Hinsicht ist es konzeptionell sinnvoll, die „Gefahr“ (oder genauer: das Ausmaß der Gefährdung des jeweiligen REMAIN-Assets durch die betrachtete Gefahr) als dritte Dimension in die Resilienz-Beurteilung einzuführen, so wie es in Abbildung 24 dargestellt ist. Das sich dabei ergebende Volumen ist (bei Betrachtung einer einzelnen Gefahr) ein Maß für die *Vulnerabilität* des Assets hinsichtlich der betrachteten Gefahr. Denn es gilt: Je kleiner die Resilienz hinsichtlich der Gefahr und je größer die Relevanz der Gefahr, desto größer das Volumen (sh. Abb. 27). Ebenso kann man ein großes Volumen als großes

Resilienzpotential deuten, in dem Sinne, dass Investitionen in die Verbesserung der Resilienz hinsichtlich der betrachteten Gefahr relativ viel bringen.

Bei der Ableitung einer (Gesamt-)Resilienz Kennzahl wiederum kann die dritte Dimension als Gewichtung der Teil-Resilienzen dienen. Dadurch wird die (relative) Gefährdung durch die unterschiedlichen Gefahren berücksichtigt.

In Kapitel 5.3 wird ein Konzept für die Bewertung des Gefahrenpotentials erarbeitet. Das Ausmaß der Gefährdung durch unterschiedliche Gefahren ist stark vom Standort abhängig und muss für bestimmte Gefahren für das zu untersuchende Objekt individuell festgelegt werden.

5.2 Beurteilung der Einflussgrößen

Die Beurteilung der Einflussgrößen wurde in einer Excel-Tabelle vorgenommen. Dazu wurde die Liste der Einflussgrößen so formuliert, dass jede Zeile eine eigene Aussage bildet, welche für das (vom Anwender) zu untersuchende Objekt entweder zutreffen oder nicht zutreffen kann.

Die Beurteilung der Einflussgrößen im Rahmen der Erstellung des REMAIN-Frameworks erfolgte folgendermaßen. Für alle fünf Asset-Kategorien wurde für jede für das Objekte relevante Einflussgröße beurteilt, ob sie

- gut
- moderat oder
- schlecht

ist, und zwar für jede betrachtete Gefahr hinsichtlich:

- Robustheit/Redundanz (Abnahme der Funktionalität) sowie
- Ressourcen/Rapidität (Dauer der Wiederherstellung, „Zeitachse“).

Der Ausdruck „gut“ ist dabei so zu verstehen, dass das Zutreffen der jeweiligen Aussage (der Einflussgröße) bedeutet, dass die Abnahme der Funktionalität bzw. Dauer der Wiederherstellung dadurch geringer wird – die Resilienz steigt also. „Schlecht“ steht hingegen für weniger Robustheit/Redundanz (also stärkere Abnahme der Funktionalität) bzw. weniger Ressourcen/Rapidität (also höhere Dauer der Wiederherstellung).

Beispielhaft ist dieses Vorgehen in Tabelle 11 und in Tabelle 12 dargestellt. Tabelle 11 enthält die Beurteilungen einiger Einflussgrößen der Asset-Kategorie „Brücke“ für die

Gefahr „Sturm“ und hinsichtlich „Robustheit/Redundanz“. Tabelle 12 enthält die entsprechenden Beurteilungen hinsichtlich „Ressourcen/Rapidität“.

Tabelle 11: Beurteilungen einiger Einflussgrößen der Asset-Kategorie „Brücke“ für die Gefahr „Sturm“ hinsichtlich „Robustheit/Redundanz“

REMAIN-Asset-Kategorie 1: Brücken		Robustheit/Redundanz		
		Abnahme der Funktionalität		
		gut	moderat	schlecht
Zeitpunkt der Errichtung	vor 1960			X
	1960 - 1980			X
	1980 - 2000		X	
	nach 2000	X		
Normative Grundlage für Dimensionierung	nach Eurocode	X		
	nach älterer Norm			X

Tabelle 12: Beurteilungen einiger Einflussgrößen der Asset-Kategorie „Brücke“ für die Gefahr „Sturm“ hinsichtlich „Ressourcen/Rapidität“ (sämtliche dargestellte Einflussgrößen sind nicht relevant)

REMAIN-Asset-Kategorie 1: Brücken		Ressourcen/Rapidität		
		Dauer der Wiederherstellung		
		gut	moderat	schlecht
Zeitpunkt der Errichtung	vor 1960			
	1960 - 1980			
	1980 - 2000			
	nach 2000			
Normative Grundlage für Dimensionierung	nach Eurocode			
	nach älterer Norm			

Wie aus Tabelle 11 hervorgeht, wird ein früher Zeitpunkt der Errichtung (vor 1960 bzw. zwischen 1960 und 1980) als nachteilig („schlecht“) hinsichtlich der Robustheit/Redundanz

bei Sturm angesehen. Eine nach dem Jahr 2000 errichtete Brücke wird in dieser Hinsicht hingegen positiv bewertet: Zeitpunkt der Errichtung nach 2000 ist „gut“ für Robustheit/Redundanz. Dasselbe gilt, falls der Eurocode die normative Grundlage die Dimensionierung darstellt. Hintergrund dieser Bewertung ist die Tatsache, dass das Verständnis aerodynamischer Beanspruchungen im Laufe der vergangenen Jahrzehnte kontinuierlich zugenommen hat und dieses Wissen schließlich auch im Eurocode [82] seinen Niederschlag fand. Dementsprechend ist davon auszugehen, dass neuere Brücken eine allgemein größere Robustheit gegenüber der Gefahr „Sturm“ aufweisen als ältere.

Andererseits spielen der Zeitpunkt der Errichtung sowie die normative Grundlage der Dimensionierung einer Brücke keine Rolle bei der Dauer der Wiederherstellung nach einem Sturmschaden. Diese Einflussgrößen sind also irrelevant hinsichtlich der Dimension „Ressourcen/Rapidität“ und die entsprechenden Zellen in Tabelle 12 sind dementsprechend grau eingefärbt.

Es wurde bewusst eine qualitative und keine quantitative Art der Beurteilung gewählt. Jeder Versuch, die Auswirkungen der Einflussgrößen auf die Abnahme der Funktionalität oder die Dauer der Wiederherstellung quantitativ zu erfassen, würde dem Anspruch des Projektes an Allgemeingültigkeit und Anwendbarkeit nicht gerecht werden und eine höhere Genauigkeit höchstens vortäuschen. Die für eine quantitative Beurteilung benötigten Parameterwerte sind nämlich in der Regel (noch) gar nicht vorhanden und wären in jedem Fall oft sehr subjektiv und mit großen Unsicherheiten behaftet.

Demgegenüber bildet der entwickelte Ansatz, bei dem eine Vielzahl von Eigenschaften der zu untersuchenden Assets qualitativ in die Bewertung eingehen, die Grundlage zum Erreichen des Projektzieles: Ein Framework zu schaffen, mit dem verschiedene Varianten hinsichtlich ihrer Resilienz beurteilt werden können und welches eine zusätzliche Grundlage für Entscheidungen über das Bauprogramm bietet.

Im Folgenden sind sämtliche Einflussgrößen aller fünf Asset-Kategorien tabellarisch dargestellt und erläutert. Die Tabellen enthalten auch jene Einflussgrößen (in grau), zu welchen derzeit noch keine (aufbereiteten) Daten bei der ASFINAG vorliegen. Im Zuge der weiteren Bearbeitung von REMAIN werden diese Einflussgrößen zum jetzigen Zeitpunkt nicht weiter berücksichtigt. Im Implementierungsleitfaden (Abschnitt 7 bzw. Anhang 5) wird jedoch erläutert, welche der derzeit noch nicht verfügbaren Daten zu den Einflussgrößen einen Mehrwert für die Resilienzbewertung schaffen würden. Das REMAIN-Framework ist in Abstimmung mit den Auftraggebern jedenfalls so konzipiert, dass eine Prognose auch mit der vorhandenen Datenlage möglich ist.

In den nächsten Abschnitten folgen auf jede der Tabellen Erläuterungen zu den technischen Hintergründen, auf Grundlage derer die Beurteilung der Einflussgrößen erfolgt ist. Bemerkungen zu Einflussgrößen, die nicht weiterverfolgt werden, sind dabei grau gekennzeichnet.

5.2.1 Einflussgrößen der REMAIN-Assetkategorie 1: Brücken

REMAIN-Assetkategorie 1: Brücken		
strukturell	Zeitpunkt der Errichtung	vor 1960
		1960 - 1980
		1980 - 2000
		nach 2000
	Normative Grundlage für Dimensionierung	nach Eurocode
		nach älterer Norm
	Nachrechnung nach Eurocode oder ÖN B 4008 vorhanden	ja
		nein
	Statisches System	statisch bestimmt
		statisch unbestimmt
	Konstruktionstyp	Balkenbrücke
		Schrägseilbrücke
		Hängebrücke
		Rahmentragwerk
		integrale Brücke
	Fahrzeuge/Beladung können tragende Elemente treffen (Hänger oder Pfeiler oberhalb der Fahrbahn)	ja
		nein
	Querschnitt	Vollquerschnitt
		Hohlkastenquerschnitt
		Fachwerk
Baumaterial	Stahlbeton	
	Spannbeton	
	Stahl	
	Verbund	
(Haupt-)Spannweite	> 25 m	
	< 25 m	
Höhe	> 10 m	
	< 10 m	
Gliederung	Einfeldbrücke	
	Mehrfeldbrücke	
Getrennte Richtungstragwerke vorhanden	ja	
	nein	
	2	

	Anzahl der Fahrstreifen pro Richtung	mehr als 2
	Fahrbahnbreite	Pannestreifen vorhanden oder Fahrstreifenbreite > 3,5 m
		Pannestreifen nicht vorhanden und Fahrstreifenbreite < 3,5 m
	Pfeiler	liegen im Wasser
		liegen unterhalb des denkbaren Hochwasserniveaus
		liegen in der Rutschbahn von möglichen Lawinen/Muren
		Kolkschutz vorhanden
Gründungsart	Flachgründung	
	Tiefgründung	
Straßenoberbau/ Fahrbahn	Asphalt	
	Beton	
Entwässerungssystem vorhanden	ja	
	nein	
natürlich	geologische/geotechnische Standortbedingungen	Festgestein
		Lockergestein
		Schüttung
		seitlicher Abstand zu Gestrüpp/Wald < 10 m
		seitlicher Abstand zur Baumlinie geringer als maximale Baumhöhe
		keine Staublawinen in der Region möglich und Abstand zwischen Brücke und Hang > 50 m
	Brücke quert	Fluss
		See
		flaches Gelände
		Tal
Autobahn		
Verkehr	Verkehrsart unter der Brücke	Straße
		Schiene
		Schiff
	Brücke wird in der Regel nicht befahren	trifft zu (z.B. Grünbrücke)
		trifft nicht zu (= Brücke wird i. d. R. befahren)
	Verkehrsstärke DTV	> 50.000
10.000 - 50.000		
< 10.000		

	Anteil Gefahrguttransport	hoch
		mittel
		niedrig
	Brücke ist Teil eines Verkehrsknotenpunkts	ja
		nein
lokal/operativ	Verkehrssteuerung vorhanden	ja
		Nein
	Streckendienst/Einsatzkräfte: Traffic Manager verfügbar	ja
		nein
	Kameraüberwachung	nicht vorhanden
		nicht schwenkbar
		schwenkbar
	Verkehrsdatensensorik: Stauerkennungssensoren o.Ä. vorhanden	ja
		nein
	Monitoring	vorhanden
		nicht vorhanden
	Fahrzeit über Ausweichroute	weniger als eine halbe Stunde
zwischen halbe Stunde und eine Stunde		
mehr als eine Stunde		

Zeitpunkt der Errichtung: Bezüglich zahlreicher Gefahren ist ein früher Zeitpunkt der Errichtung im Allgemeinen nachteilig. Brücken, die in der Nachkriegszeit und auch noch in den 1960er- und 1970er-Jahren errichtet wurden, weisen oft eine bauliche Grundbeschaffenheit auf, die nicht den heutigen Qualitätsansprüchen genügt und mit vorzeitigen Degradationserscheinungen einhergeht.

Normative Grundlage der Dimensionierung: Nach Eurocode oder Eurocode-nahe bemessene Brücken weisen im Allgemeinen eine höhere Robustheit auf als nach älteren Normen bemessene Brücken. Insbesondere hinsichtlich der erforderlichen Betondeckung sind die Eurocodes [81] oder Eurocode-nahe nationale Normen als Fortschritt gegenüber den Vorgängernormen anzusehen, was sich vor allem in der besseren Dauerhaftigkeit der nach Eurocode bemessenen Bauwerke niederschlägt.

Nachrechnung nach Eurocode oder ÖN B 4008 [80] vorhanden: Falls vorhanden, bessere Abschätzung der Tragfähigkeit und der kritischen Grenzzustände möglich.

Statisches System: Hier ist die Bewertung je nach Gefahr sehr unterschiedlich. Im Fall, dass die betrachtete Gefahr den Charakter einer einwirkenden Kraft hat (z.B. „Fahrzeug-/Schiffsanprall“, „Explosion/Brand“, „Überladung/Überbeanspruchung“, „Erdbeben“), ist ein statisch unbestimmtes System robuster, da eine Kräfteumlagerung stattfinden kann. Im

Fall, dass den Auflagern Verschiebungen aufgezwungen werden („Bodensenkung, -verformung, -verschiebung“, „Ufererosion, Kolkbildung“), würden bei statisch unbestimmten Tragwerken Zwangskräfte entstehen, welche für die Tragsicherheit („Robustheit“) tendenziell als nachteilig zu betrachten sind. Analoges gilt für die Gefahr „extrem hohe Temperaturen“.

Konstruktionstyp: Es ist im Allgemeinen davon auszugehen, dass Schrägseilbrücken und Hängebrücken im Vergleich zu Balkenbrücken und Rahmentragwerken eher weniger robust sind. Ihre Schadensanfälligkeit bei Gefahren wie „Sturm“ ist höher. Längere integrale Brücken hingegen haben eine grundsätzlich größere Anfälligkeit für Zwangskräfte (ausgelöst etwa durch hohe Temperaturen).

Fahrzeuge/Beladung können tragende Elemente treffen (Hänger oder Pfeiler oberhalb der Fahrbahn): Auch bei dieser Einflussgröße sind Schrägseilbrücken und Hängebrücken eher gefährdet als Brücken, bei welchen sich alle tragenden Teile unterhalb der Fahrbahn befinden. Diese Einflussgröße betrifft allerdings nur zwei bestimmte Gefahren, nämlich (vor allem) „Fahrzeug-/Schiffsanprall“ sowie „Explosion/Brand“. Hinsichtlich aller anderen Gefahren ist diese Einflussgröße irrelevant.

Querschnitt: Bezüglich einiger Gefahren wie z.B. Felssturz ist ein Fachwerk eher weniger robust als ein Vollkastenquerschnitt.

Baumaterial: Aufgrund der filigraneren Bauweise bei Verwendung von Stahl im Vergleich zu Stahlbeton ist die Robustheit von Stahlbrücken eher geringer.

(Haupt-)Spannweite: Brücken mit längeren Spannweiten weisen hinsichtlich einiger Gefahren wie z.B. „extrem hohe Temperaturen“ eine höhere Gefährdung auf.

Höhe: Hinsichtlich der Gefahren „Schneerutsch, Lawine, Eissturz“, „Rutschung, Hangmure“ und „Steinschlag, Blockschlag, Felssturz, Bergsturz“ werden höhere Brücken (> 10 m) besser bewertet als niedrigere (< 10 m), da angenommen wird, dass eine höhere Brücke etwa einen Steinschlag mitunter völlig unbeschadet überstehen kann, wenn der Steinschlag zur Gänze unterhalb des Brückendecks stattfindet. Die Wahrscheinlichkeit ist hier also höher, dass es zu keiner Verkehrseinschränkung (sprich zu keinem Funktionalitätsverlust) kommt. Bei anderen Gefahren verhält es sich allerdings umgekehrt (z.B. bei Sturm). Ebenso sind höhere Brücken hinsichtlich „Ressourcen/Rapidität“ eher im Nachteil – wegen der erschwerten Zugänglichkeit.

Gliederung: Bei den meisten natürlichen Gefahren sind Einfeldbrücken aufgrund ihrer einfacheren Bauweise (weniger Fahrbahnübergänge usw.) als robuster und weniger stör anfällig zu betrachten.

Getrennte Richtungsfahrbahnen vorhanden: Das Zutreffen dieses Einflusskriteriums ist hinsichtlich mehrerer Gefahren als positiv anzusehen – sowohl hinsichtlich Redundanz (Möglichkeit der Sperrung nur einer Richtungsfahrbahn) als auch hinsichtlich Rapidität (bessere Zugänglichkeit für Einsatzfahrzeuge).

Anzahl der Fahrstreifen pro Richtung: Das Vorhandensein von mehr als zwei Fahrstreifen bietet Vorteile hinsichtlich Redundanz (mehr Platz für Verkehrsfluss) und Rapidität (mehr Platz für Einsatzfahrzeuge).

Fahrbahnbreite: Ebenso ist das Vorhandensein eines Pannestreifens bzw. eine höhere Fahrstreifenbreite günstig, was Redundanz und Rapidität angeht.

Pfeiler: Hier hängt die Bewertung stark von der betrachteten Gefahr ab. Zum Beispiel sind im Wasser liegende Pfeiler stark gefährdet durch „Hochwasser, Überflutung“ und „Ufererosion, Kolkbildung“. Ein vorhandener Kolkschutz reduziert wiederum die Gefahr einer Kolkbildung.

Gründungsart: Eine Tiefgründung ist hinsichtlich mehrerer mit großen Kräften einhergehenden Gefahren wie z.B. Lawinen robuster als eine Flachgründung.

Straßenoberbau: Ein Betonoberbau ist anfällig für Blow-ups (betrifft die Gefahr „extrem hohe Temperaturen“). Zudem dauert die Wiederherstellung eines Betonoberbaus länger (Rapidität).

Entwässerungssystem vorhanden: Erhöht die Robustheit hinsichtlich (der Auswirkungen) der Gefahr „Hochwasser, Überflutung“.

Geologische/Geotechnische Standortbedingungen: Festgestein ist hinsichtlich zahlreicher Gefahren günstig hinsichtlich Robustheit. Ein nahegelegener Wald kann hingegen je nach Gefahr sowohl Vorteile als auch Nachteile haben. Im Fall von Lawinen, Murgängen und Steinschlag kann er als Schutzwall dienen, während er bei einem Waldbrand die Ursache der Gefahr darstellt.

Brücke quert: Eine Brücke, die ein Tal quert, ist besonders anfällig für Gefahren wie Lawine, Murgang oder Steinschlag. Eine Brücke, die einen Fluss, einen See oder eine Autobahn quert, ist grundsätzlich hinsichtlich der Rapidität (Erreichbarkeit) im Nachteil.

Brücke wird in der Regel nicht befahren: Grünbrücken sind nicht anfällig für manche Gefahren, wie z.B. Überbeanspruchung/Überladung.

Verkehrsstärke DTV (durchschnittliche tägliche Verkehrsstärke): Es wird davon ausgegangen, dass große Verkehrsstärken negative Auswirkungen auf die Rapidität haben (behinderte Erreichbarkeit durch Einsatzfahrzeuge).

Brücke ist Teil eines Verkehrsknotenpunktes: Es wird davon ausgegangen, dass eine Brücke, die Teil eines Verkehrsknotenpunktes ist, nach einem disruptiven Ereignis nicht so schnell wiederhergestellt werden kann (eingeschränkter Platz für Aufräum- und Bauarbeiten). Das hätte negative Auswirkungen auf die Rapidität.

Verkehrssteuerung vorhanden: Positiv hinsichtlich „Ressourcen/Rapidität“ (betrifft alle Gefahren).

Streckendienst/Einsatzkräfte: Traffic Manager verfügbar: Positiv hinsichtlich „Ressourcen/Rapidität“ (betrifft alle Gefahren).

Kameraüberwachung: Eine vorhandene (und im besten Fall schwenkbare) Kameraüberwachung ist als positiv hinsichtlich der „Ressourcen“ anzusehen.

Verkehrsdatensensorik: Stauerkennungssensoren o.Ä. vorhanden: Eine vorhandene Verkehrsdatensensorik ist als positiv hinsichtlich der „Ressourcen“ anzusehen.

Monitoring: Ein vorhandenes Monitoring kann unter Umständen drohende Gefahren (leichter) erkennen lassen. Gezielte Schutzmaßnahmen können daraufhin ergriffen werden. Dieser Umstand wird durch eine positive Beurteilung der Robustheit bei den betreffenden Gefahren berücksichtigt.

Fahrzeit über Ausweichroute: Bei dieser Einflussgröße ist das betrachtete Asset als Teil eines Verkehrsnetzes anzusehen. Hinsichtlich der Redundanz ist die Frage zu stellen, inwiefern eine reduzierte Funktionalität des betrachteten Assets (Befahrbarkeit alternierend nur in eine Richtung, Sperre für LKW, Totalsperre) durch eine Ausweichroute kompensiert werden kann. Obwohl diese Einflussgröße auf eine „andere“ Route – eben die potenzielle Ausweichroute – abstellt, betrifft sie das betrachtete, zu beurteilende Asset. Denn es ist das betrachtete Asset, welches einer Alternative bedarf, um redundant zu sein.

5.2.2 Einflussgrößen der REMAIN-Assetkategorie 2: Tunnel & Galerien

Die REMAIN-Assetkategorie „Tunnel & Galerien“ umfasst keine Einflussgröße zum Fahrbahnoberbau. Die Art des Fahrbahnoberbaus (Beton oder Asphalt) spielt nämlich hauptsächlich in Bezug auf extrem hohe Temperaturen eine Rolle (Möglichkeit von Blow-ups). Wetterbedingte extrem hohe Temperaturen sind in Tunnels und Galerien allerdings ausgeschlossen.

REMAIN-Assetkategorie 2: Tunnel & Galerien		
strukturell	Normative Grundlage (oder sonst Baujahr)	vor 1995
		1995-2006
		nach 2006 (STSG)
	Anzahl der Tunnelröhren	1
		2
	Anzahl der Fahrstreifen pro Richtung	2
		mehr als 2
	Fahrbahnbreite	Pannestreifen vorhanden oder Fahrstreifenbreite > 3,5 m
		Pannestreifen nicht vorhanden und Fahrstreifenbreite < 3,5 m
	Gegenverkehr vorhanden	ja
		nein
	Zwischendecke vorhanden	ja
		nein
	Tunnellänge	< 500 m
		500 - 4.000 m
> 4.000 m		
Tunnelart	Tunnel	
	Galerie	
Bauweise	geschlossene Bauweise	
	offene Bauweise	
	Deckelbauweise	
Tunneltyp	Tunnel	
	Einhausung/Überdeckung	
	Unterflurtrasse	
	Grüntunnel	
Überdeckungshöhe	gering: geringer als 2-mal Tunneldurchmesser	
	mittel: zwischen 2-mal und 5-mal Tunneldurchmesser	
	mächtig: mehr als 5-mal Tunneldurchmesser	
Baulicher Brandschutz vorhanden	ja	
	nein	
natürlich	geologische/geotechnische Standortbedingungen	Festgestein
		Lockergestein
		Schüttung
		Tunnelabschnitte in Rutschzone
		asymmetrischer Erddruck
	hydrologische Standortbedingungen	Längsprofil/Portale oberhalb des maximal denkbaren Grund-/Hochwasserniveaus
		Längsprofil/Portale unterhalb des maximal denkbaren Grund-/Hochwasserniveaus

	Überbauung vorhanden	ja
		nein
	Tunnel ist gegen Naturgefahren dimensioniert	ja
		nein
Verkehr	Verkehrsstärke DTV	> 50.000
		10.000 - 50.000
		< 10.000
	Tunnel/Galerie ist Teil eines Verkehrsknotenpunkts	ja
		nein
lokal/operativ	Verkehrssteuerung vorhanden	ja
		nein
	Streckendienst/Einsatzkräfte: Traffic Manager verfügbar	ja
		nein
	STSG -TuRisMO: vertiefte Analyse vorhanden	ja
		nein
	Monitoring	vorhanden
		nicht vorhanden
	Kameraüberwachung	nicht vorhanden
		nicht schwenkbar
		schwenkbar
	Verkehrsdatensensorik: Stauerkennungssensoren o.Ä. vorhanden	ja
		nein
Fahrzeit über Ausweichroute	weniger als eine halbe Stunde	
	zwischen halbe Stunde und eine Stunde	
	mehr als eine Stunde	

Normative Grundlage (oder sonst Baujahr): Das Jahr 1995 ist von Bedeutung, weil seit damals eine realistischere Berechnung des Erddruckes vorgeschrieben ist. Eine weitere Verbesserung hinsichtlich der Robustheit erfolgte 2006 durch Inkrafttreten des STSG (Straßentunnel-Sicherheitsgesetz) [79].

Anzahl der Tunnelröhren: Zwei getrennte Tunnelröhren können für die Rapidität vorteilhaft sein und ebenso für die Redundanz, da gegebenenfalls nur eine Röhre gesperrt werden muss, während der Verkehr in der anderen weiterlaufen kann.

Anzahl der Fahrstreifen pro Richtung: Das Vorhandensein von mehr als zwei Fahrstreifen bietet leichte Vorteile hinsichtlich Redundanz (mehr Platz für Verkehrsfluss) und Rapidität (mehr Platz für Einsatzfahrzeuge).

Fahrbahnbreite: Ebenso ist das Vorhandensein eines Pannestreifens bzw. eine höhere Fahrstreifenbreite günstig, was Redundanz und Rapidität anbelangt.

Gegenverkehr vorhanden: Gegenverkehr beeinträchtigt die Rapidität. Außerdem steigt die Unfallgefahr, wodurch die Anfälligkeit für die Gefahren „Fahrzeuganprall“ und „Explosion/Brand“ steigt (schlecht für Robustheit).

Zwischendecke vorhanden: Vorteile der Zwischendecke (gegenüber keiner Belüftung bzw. gegenüber abgehängter Belüftungsrohre): 1) Bildet ein Brandschott. 2) Reduziert Unfallgefahr zufolge "Tunnelblick", denn sie reduziert die "Kreisrundheit" des Tunnels. 3) Sie bildet eine Aussteifungsebene. 4) Großer Lüftungsquerschnitt. Nachteil: Kaum inspizierbar.

Tunnellänge: Lange Tunnel haben Nachteile hinsichtlich Rapidität.

Tunnelart: Die leichtere Zugänglichkeit einer Galerie im Vergleich zu einem Tunnel verbessert „Ressourcen/Rapidität“. Andererseits ist die Robustheit von Galerien bezüglich mancher Gefahren wie z.B. Fahrzeuganprall oder Erdbeben geringer als die Robustheit von Tunnel.

Bauweise: Die geschlossene Bauweise wird in Hinblick auf die Gefahr „Bodensenkung, -verformung, -verschiebung“ als robuster angesehen.

Überdeckungshöhe: Eine große Überdeckungshöhe (tief liegender Tunnel) ist hinsichtlich Lawinen, Murgängen und „Bodensenkung, -verformung, -verschiebung“ günstig.

Geologische/geotechnische Gefahren: Im Vergleich zu Lockergestein oder Schüttungen bietet Festgestein als Standortbedingung eine höhere Robustheit in Bezug auf mehrere Gefahren wie z.B. Erdbeben oder „Bodensenkung, -verformung, -verschiebung“ Demgegenüber ist es besonders ungünstig, wenn Tunnelabschnitte in Rutschzonen oder Tunnelportale unterhalb von Lawinenhängen liegen. Auch ein asymmetrischer Erddruck wirkt sich negativ auf die Robustheit aus.

Hydrologische Standortbedingungen: Die Robustheit gegenüber der Gefahr „Hochwasser, Überflutung“ ist höher, wenn das Längsprofil und die Portale eines Tunnels oberhalb des maximal denkbaren Hochwasserniveaus liegen. Vorteile bestehen aber auch hinsichtlich anderer Gefahren, wie z.B. Stromausfall.

Überbauung vorhanden: Eine vorhandene Überbauung wird als leicht nachteilig hinsichtlich der Gefahren „Erdbeben“ und „Bodensenkung, -verformung, -verschiebung“ angesehen.

Tunnel ist gegen Naturgefahren dimensioniert: Es wird davon ausgegangen, dass z.B. eine Steinschlaggalerie gerade gegenüber jener Gefahr eine hohe Robustheit hat, aufgrund der sie gebaut wurde.

Verkehrsstärke DTV (durchschnittlichen täglichen Verkehrsstärke): Es wird davon ausgegangen, dass große Verkehrsstärken negative Auswirkungen auf die Rapidität haben (behinderte Erreichbarkeit durch Einsatzfahrzeuge).

Tunnel/Galerie ist Teil eines Verkehrsknotenpunktes: Es wird davon ausgegangen, dass ein Tunnel, der Teil eines Verkehrsknotenpunktes ist, nach einem disruptiven Ereignis nicht so schnell wiederhergestellt werden kann (eingeschränkter Platz für Aufräum- und Bauarbeiten). Die Rapidität wird deshalb negativ beurteilt.

Verkehrssteuerung vorhanden: Positiv hinsichtlich „Ressourcen/Rapidität“ (betrifft alle Gefahren).

Streckendienst/Einsatzkräfte vorhanden: Positiv hinsichtlich „Ressourcen/Rapidität“ (betrifft alle Gefahren).

STSG TuRisMO: vertiefte Analyse vorhanden: Diese Analyse ist für alle Tunnel ab 500 m Länge erforderlich. Es wird davon ausgegangen, dass die Kategorie „Ressourcen“ dadurch verbessert wird.

Monitoring: Ein vorhandenes Monitoring kann unter Umständen drohende Gefahren (leichter) erkennen lassen. Gezielte Schutzmaßnahmen können daraufhin ergriffen werden. Dieser Umstand wirkt sich positiv auf die Robustheit bei den betreffenden Gefahren aus.

Kameraüberwachung: Eine vorhandene (und im besten Fall schwenkbare) Kameraüberwachung ist als „positive Ressource“ anzusehen.

Verkehrsdatensensorik: Stauerkennungssensoren o.Ä. vorhanden: Eine vorhandene Verkehrsdatensensorik ist als „positive Ressource“ anzusehen.

Fahrzeit über Ausweichroute: Bei dieser Einflussgröße ist das betrachtete Asset als Teil eines Verkehrsnetzes anzusehen. Hinsichtlich der Redundanz ist die Frage zu stellen, inwiefern eine reduzierte Funktionalität des betrachteten Assets (Befahrbarkeit alternierend nur in eine Richtung, Sperre für LKW, Totalsperre u.a.) durch eine Ausweichroute kompensiert werden kann. Obwohl diese Einflussgröße auf eine „andere“ Route – eben die potenzielle Ausweichroute – abstellt, betrifft sie das betrachtete, zu beurteilende Asset. Denn es ist das betrachtete Asset, welches einer Alternative bedarf, um redundant zu sein.

5.2.3 Einflussgrößen der REMAIN-Assetkategorie 3: Strecke plus

REMAIN-Assetkategorie 3: Strecke plus		
strukturell	Bauweise Oberbau	Asphalt
		Beton
	Deckschicht	Beton
		Asphalt
	Oberbaukonstruktion	unterdimensioniert (VBI-Koeffizient < 1)
		Richtig dimensioniert bzw. überdimensioniert (VBI-Koeffizient ≥ 1)
	Querschnitt Unterbau	Damm
		Einschnitt
	Höhe Damm	> 1 m
		< 1 m
	Tiefe Einschnitt	> 2 m
		< 2 m
	Lage	Ebene
		Tal
Hang		
Entwässerungssystem	hohe Kapazität	
	mittlere Kapazität	
	geringe Kapazität	
Anzahl der Fahrstreifen pro Richtung	2	
	mehr als 2	
Fahrbahnbreite	Pannestreifen vorhanden oder Fahrstreifenbreite > 3,5 m	
	Pannestreifen nicht vorhanden und Fahrstreifenbreite < 3,5 m	
Funktionierende Durchlässe vorhanden	ja	
	nein	
Gantries / Überkopfwegweiser vorhanden	ja	
	nein	
natürlich	geologische/geotechnische Standortbedingungen	Festgestein
		Lockergestein
		Schüttung
		Straße liegt in der Rutschbahn von möglichen Lawinen/Muren
		Gründung in wasserempfindlichem Boden
	Hydrologische Standortbedingungen	Straße liegt oberhalb des maximal denkbaren Grund-/Hochwasserniveaus
		Straße liegt unterhalb des maximal denkbaren Grund-/Hochwasserniveaus

	Vegetation	seitlicher Abstand zu Gestrüpp/Wald geringer als 10 m
		seitlicher Abstand zur Baumlinie geringer als maximale Baumhöhe
Verkehr	Verkehrsstärke DTV	> 50.000
		10.000 - 50.000
		< 10.000
lokal/operativ	Verkehrssteuerung vorhanden	Ja/nein
	Streckendienst/Einsatzkräfte: Traffic Manager verfügbar	ja
		nein
	Kameraüberwachung	nicht vorhanden
		nicht schwenkbar
		schwenkbar
	Verkehrsdatensensorik: Stauerkennungsensoren o.Ä. vorhanden	ja
		nein
	Monitoring	vorhanden
		nicht vorhanden
	Fahrzeit über Ausweichroute	weniger als eine halbe Stunde
		zwischen halbe Stunde und Stunde
mehr als eine Stunde		

Bauweise Oberbau: Was die Robustheit anbelangt, ist eine Fahrbahndecke aus Beton anfällig für Blow-ups. Dies ist vor allem bei der Gefahr „extrem hohe Temperaturen“ von Bedeutung. Unter dem Gesichtspunkt der Rapidität gilt, dass eine Asphaltfahrbahn schneller wieder hergestellt werden kann als eine aus Beton.

Deckschicht: Deckschichten aus Asphalt können schneller wieder hergestellt werden als solche aus Beton.

Oberbaukonstruktion: Der Verkehrsbelastungskoeffizient (VBI-Koeffizient) wird zur Kategorisierung einer Oberbaukonstruktion in über-, richtig- und unterdimensionierte Aufbauten verwendet und stellt somit eine wesentliche Eingangsgröße für die Prognose der Zustandsentwicklung dar. Der Verkehrsbelastungskoeffizient ist gemäß [83] als Quotient zwischen zulässiger Verkehrsbelastung einer Oberbaukonstruktion und der vorhandenen bzw. prognostizierten Verkehrsbelastung innerhalb der Bemessungsperiode definiert. Liegt der Verkehrsbelastungskoeffizient bei 1 oder darüber, so ist der betrachtete Abschnitt richtig dimensioniert bzw. überdimensioniert (gut für die Robustheit), ist der Koeffizient kleiner als 1, so ist der betrachtete Abschnitt unterdimensioniert (schlecht für die Robustheit).

Querschnitt Unterbau: Hinsichtlich „Sturm“ ist eine Lage im Einschnitt als eher geschützte Lage anzusehen (also höhere Robustheit). Andererseits erhöht eine Lage im Einschnitt die Anfälligkeit gegenüber Gefahren wie „Hochwasser, Überflutung“ und „Schnee(verwehung), Eis“.

Höhe Damm: Ein hoher Damm bedeutet größere Exponiertheit gegenüber „Sturm“, aber größeren Schutz gegenüber „Hochwasser, Überflutung“ und „Schnee(verwehung), Eis“.

Tiefe Einschnitt: Ein tiefer Einschnitt bedeutet größere Exponiertheit gegenüber „Hochwasser, Überflutung“ und „Schnee(verwehung), Eis“, aber größeren Schutz gegenüber „Sturm“.

Lage: Die Lage eines Abschnitts in „Ebene“, „Tal“, oder „Hang“ bestimmt maßgeblich seine Exponiertheit gegenüber einer Reihe von Gefahren wie z.B. Murgängen.

Entwässerungssystem: Ein Entwässerungssystem mit hoher Kapazität bietet Schutz vor „Hochwasser, Überflutung“.

Anzahl der Fahrstreifen pro Richtung: Das Vorhandensein von mehr als zwei Fahrstreifen bietet leichte Vorteile hinsichtlich Redundanz (mehr Platz für Verkehrsfluss) und Rapidität (mehr Platz für Einsatzfahrzeuge).

Fahrbahnbreite: Ebenso ist das Vorhandensein eines Pannestreifens bzw. eine höhere Fahrstreifenbreite günstig, was Redundanz und Rapidität anbelangt.

Funktionierende Durchlässe vorhanden: Funktionierende Durchlässe erhöhen die Robustheit gegenüber „Hochwasser, Überflutung“. Als Durchlässe werden sowohl Bauwerke der Straßenentwässerung als auch Überführungsbauwerke, die zu kurz sind, um als „Brücke“ zu gelten, bezeichnet. Es ist davon auszugehen, dass beim Vorhandensein von funktionierenden Durchlässen ein Wasserstau unwahrscheinlicher wird.

Gantries/ Überkopfwegweiser vorhanden: Es wird von der Möglichkeit ausgegangen, dass von Gantries oder Überkopfwegweiser Eiszapfen auf die Fahrbahn fallen. Daher werden vorhandene Gantries/ Überkopfwegweiser bei der Gefahr „Schnee(verwehung), Eis“ negativ bewertet.

Geologische/ geotechnische Standortbedingungen: Festgestein bietet eine erhöhte Robustheit bei Erdbeben und gegenüber der Gefahr „Bodensenkung, -verformung, -verschiebung“.

Hydrologische Standortbedingungen: Wenn die Straße oberhalb des maximal denkbaren Grund-/Hochwasserniveaus liegt, ist sie besser gegen „Bodensenkung, -verformung, -verschiebung“, „Ufererosion, Kolkbildung“ und vor allem „Hochwasser, Überflutung“ geschützt.

Vegetation: Eine nahe gelegene Vegetation bietet Schutz vor Lawinen, Muren und extrem hohen Temperaturen, vergrößert aber andererseits die Gefahr von „Wald-/Flurbrand“ und stellt eine Gefahrenquelle bei „Sturm“ dar.

Verkehrsstärke DTV (durchschnittliche tägliche Verkehrsstärke): Es wird davon ausgegangen, dass große Verkehrsstärken negative Auswirkungen auf die Rapidität haben (behinderte Erreichbarkeit durch Einsatzfahrzeuge).

Verkehrssteuerung vorhanden: Positiv hinsichtlich „Ressourcen/Rapidität“ (betrifft alle Gefahren).

Streckendienst/Einsatzkräfte vorhanden: Positiv hinsichtlich „Ressourcen/Rapidität“ (betrifft alle Gefahren).

Kameraüberwachung: Eine vorhandene (und im besten Fall schwenkbare) Kameraüberwachung ist als „positive Ressource“ anzusehen.

Verkehrsdatensensorik: Stauerkennungssensoren o.Ä. vorhanden: Eine vorhandene Verkehrsdatensensorik ist als „positive Ressource“ anzusehen.

Monitoring: Ein vorhandenes Monitoring kann unter Umständen drohende Gefahren (leichter) erkennen lassen. Gezielte Schutzmaßnahmen können daraufhin ergriffen werden. Dieser Umstand wird durch eine positive Beurteilung der Robustheit bei den betreffenden Gefahren berücksichtigt.

Fahrzeit über Ausweichroute: Bei dieser Einflussgröße ist das betrachtete Asset als Teil eines Verkehrsnetzes anzusehen. Hinsichtlich der Redundanz ist die Frage zu stellen, inwiefern eine reduzierte Funktionalität des betrachteten Assets (Befahrbarkeit alternierend nur in eine Richtung, Sperre für LKW, Totalsperre u.a.) durch eine Ausweichroute kompensiert werden kann. Obwohl diese Einflussgröße auf eine „andere“ Route – eben die potenzielle Ausweichroute – abstellt, betrifft sie das betrachtete, zu beurteilende Asset. Denn es ist das betrachtete Asset, welches einer Alternative bedarf, um redundant zu sein.

5.2.4 Einflussgrößen der REMAIN-Assetkategorie 4: Lärmschutzwände

REMAIN-Assetkategorie 4: Lärmschutzwände		
strukturell	Zeitpunkt der Errichtung	vor 2000
		2000 bis Planungshandbuch ASFINAG [78]
		ab Planungshandbuch ASFINAG [78]
	Höhe (OK Wand - OK Fundament)	< 5,50 m
		> 5,50 m
	Länge	< 1.000 m
		> 1.000 m
	Material Steher	Beton
Stahl		
Liegt neben Bahnstrecke	ja	
	nein	
Anzahl der Fahrstreifen pro Richtung	2	
	mehr als 2	
Fahrbahnbreite	Pannestreifen vorhanden oder Fahrstreifenbreite > 3,5 m	
	Pannestreifen nicht vorhanden und Fahrstreifenbreite < 3,5 m	
natürlich	Standortbedingungen	Seitlicher Abstand zu Gestrüpp/Wald geringer als 10 m
		Seitlicher Abstand zur Baumlinie geringer als maximale Baumhöhe
Verkehr	Verkehrsstärke DTV	> 50.000
		10.000 - 50.000
		< 10.000
	Lärmschutzwand ist Teil eines Verkehrsknotenpunkts	ja
		nein
lokal/operativ	Verkehrssteuerung vorhanden	ja
		nein
	Streckendienst/Einsatzkräfte: Traffic Manager verfügbar	ja
		nein
	Kameraüberwachung	nicht vorhanden
		nicht schwenkbar
		schwenkbar
Verkehrsdatensensorik: Stauererkennungssensoren o.Ä. vorhanden	ja	
	nein	
Monitoring	vorhanden	
	nicht vorhanden	
Fahrzeit über Ausweichroute	weniger als eine halbe Stunde	
	zwischen halbe Stunde und eine Stunde	
	mehr als eine Stunde	

Zeitpunkt der Errichtung: Neuere Lärmschutzwände werden im Allgemeinen als robuster angesehen als ältere.

Höhe (OK Wand – OK Fundament): Hinsichtlich Stürmen sind niedrige Lärmschutzwände grundsätzlich robuster. Andererseits ist davon auszugehen, dass hinsichtlich eines Fahrzeuganpralls höhere Wände robuster sind, da deren Verankerung und deren Fundamente auf viel größere Einwirkungen bemessen sind (bei Annahme einer über die Höhe konstanten Windlast geht die Wandhöhe quadratisch in das Einspannmoment ein). Der Wert von 5,5 Metern stellt den Richtwert für die maximale Höhe von Lärmschutzwänden dar – welcher allerdings in besonderen Fällen (Topografie, mehr als drei Fahrstreifen) überschritten werden darf.

Länge: Bei sehr langen Lärmschutzwänden (> 1000 m) wird davon ausgegangen, dass die Erreichbarkeit durch Einsatzkräfte und Bautrupps eingeschränkt ist. Deshalb wird die Rapidität negativ bewertet.

Material Steher: Steher aus Beton werden hinsichtlich eines Fahrzeuganpralls und anderer Gefahren als robuster angesehen.

Liegt neben Bahnstrecke: Neben einer Bahnstrecke liegende Lärmschutzwände sind einer zusätzlichen Gefährdung durch Fahrzeuganprall ausgesetzt. Andererseits wird davon ausgegangen, dass sie eine höhere Robustheit gegenüber Stürmen haben, da sie auf aerodynamische Belastungen zufolge von Zugvorbeifahrten bemessen sind.

Anzahl der Fahrstreifen je Richtung: Breitere Straßen bieten grundsätzlich eine leicht bessere Zugänglichkeit. Daher wird die Rapidität positiv bewertet. Leichte Vorteile kann es bisweilen auch hinsichtlich der Redundanz geben.

Fahrbahnbreite: Breitere Straßen bieten grundsätzlich eine leicht bessere Zugänglichkeit. Daher wird die Rapidität positiv bewertet. Leichte Vorteile kann es bisweilen auch hinsichtlich der Redundanz geben.

Standortbedingungen: Eine nahe gelegene Vegetation bietet Schutz vor Lawinen, Muren und extrem hohen Temperaturen, vergrößert aber andererseits die Gefahr von Wald-/Flurbrand und stellt eine Gefahrenquelle bei „Sturm“ dar.

Verkehrsstärke DTV (durchschnittliche tägliche Verkehrsstärke): Es wird davon ausgegangen, dass große Verkehrsstärken negative Auswirkungen auf die Rapidität haben (behinderte Erreichbarkeit durch Einsatzfahrzeuge).

Lärmschutzwand ist Teil eines Verkehrsknotenpunktes: Es wird davon ausgegangen, dass eine Lärmschutzwand, die Teil eines Verkehrsknotenpunktes ist, nach einem disruptiven Ereignis nicht so schnell wiederhergestellt werden kann (eingeschränkter Platz für Aufräum- und Bauarbeiten). Die Rapidität wird deshalb negativ beurteilt.

Verkehrssteuerung vorhanden: Positiv hinsichtlich „Ressourcen/Rapidität“ (betrifft alle Gefahren).

Streckendienst/Einsatzkräfte vorhanden: Positiv hinsichtlich „Ressourcen/Rapidität“ (betrifft alle Gefahren).

Kameraüberwachung: Eine vorhandene (und im besten Fall schwenkbare) Kameraüberwachung ist als „positive Ressource“ anzusehen.

Verkehrsdatensensorik: Stauerkennungssensoren o.Ä. vorhanden: Eine vorhandene Verkehrsdatensensorik ist als „positive Ressource“ anzusehen.

Monitoring: Ein vorhandenes Monitoring kann unter Umständen drohende Gefahren (leichter) erkennen lassen. Gezielte Schutzmaßnahmen können daraufhin ergriffen werden. Dieser Umstand wird durch eine positive Beurteilung der Robustheit bei den betreffenden Gefahren berücksichtigt.

Fahrzeit über Ausweichroute: Bei dieser Einflussgröße ist das betrachtete Asset als Teil eines Verkehrsnetzes anzusehen. Hinsichtlich der Redundanz ist die Frage zu stellen, inwiefern eine reduzierte Funktionalität des betrachteten Assets (Befahrbarkeit alternierend nur in eine Richtung, Sperre für LKW, Totalsperre u.a.) durch eine Ausweichroute kompensiert werden kann. Obwohl diese Einflussgröße auf eine „andere“ Route – eben die potenzielle Ausweichroute – abstellt, betrifft sie das betrachtete, zu beurteilende Asset. Denn es ist das betrachtete Asset, welches einer Alternative bedarf, um redundant zu sein.

5.2.5 Einflussgrößen der REMAIN-Assetkategorie 5: Stützbauwerke

REMAIN-Assetkategorie 5: Stützbauwerke		
strukturell	Konstruktionstyp und Erscheinungsjahr der normativen Grundlage (alternativ: Baujahr)	Gewichtskonstruktion
		sonstige Konstruktion; vor 1974
		sonstige Konstruktion; 1974 - 1995
		sonstige Konstruktion; nach 1995
	Wandhöhe (FOK-WOK)	1,5 - 4,0 m
		4 - 8,0 m
		> 8,0 m
	Abstand zur Straße	Verhältnis Wandhöhe/Abstand > 0,75
		Verhältnis Wandhöhe/Abstand 0,5 - 0,75
		Verhältnis Wandhöhe/ Abstand < 0,5
	Anzahl der Fahrstreifen pro Richtung	2
		mehr als 2
	Fahrbahnbreite	Pannestreifen vorhanden oder Fahrstreifenbreite > 3,5 m
Pannestreifen nicht vorhanden und Fahrstreifenbreite < 3,5 m		
Wandlänge	< 300 m	
	> 300 m	
Ausreichend dimensionierte und funktionierende Entwässerung vorhanden?	ja	
	nein	
	unbekannt	
Entwässerung ist versintert	ja	
	nein	
natürlich	geologische/geotechnische Standortbedingungen	Festgestein
		Lockergestein
		Schüttung
		Rutschhang
	seitliche Auflast vorhanden	ja nein
permanenter Wasserdruck vorhanden	ja nein	
	Verkehr	Verkehrsstärke DTV
10.000 - 50.000		
< 10.000		
Stützbauwerk ist Teil eines Verkehrsknotenpunkts	ja nein	
	lokal/operativ	Verkehrssteuerung vorhanden
ja		

	Streckendienst/Einsatzkräfte: Traffic Manager verfügbar	nein
	Kameraüberwachung	nicht vorhanden
		nicht schwenkbar
		schwenkbar
	Verkehrsdatensensorik: Stauer- kennungssensoren o.Ä. vorhan- den	ja
		nein
	Monitoring	vorhanden
		nicht vorhanden
	Fahrzeit über Ausweichroute	weniger als eine halbe Stunde
		zwischen halbe Stunde und Stunde
		mehr als eine Stunde

Konstruktionstyp und Erscheinungsjahr der normativen Grundlage (alternativ: Baujahr): Allgemein zeichnen sich Gewichtskonstruktionen durch ihre hohe Robustheit aus. Bei den anderen Konstruktionstypen spielt die Bemessung auf Erddruck eine bedeutende Rolle für die Robustheit (Standicherheit). Aufgrund eines realistischeren Ansatzes des Erddruckes kann davon ausgegangen werden, dass neuere Stützbauwerke robuster sind als ältere.

Wandhöhe (FOK-WOK): Im Allgemeinen sind niedrigere Stützbauwerke robuster als höhere und/oder sind hinsichtlich der Rapidität im Vorteil. Die Einteilung der Höhenstufen erfolgte in Anlehnung an die Schadensfolgeklassen der Asfinag.

Abstand zur Straße: Ein verhältnismäßig kleiner Abstand zur Straße erhöht die Gefahr eines Fahrzeuganpralls sowie von „Explosion/Brand“. Außerdem kann davon ausgegangen werden, dass dadurch die Zugänglichkeit für Einsatz- und Baufahrzeuge eingeschränkt wird (schlecht für Rapidität).

Anzahl der Fahrstreifen pro Richtung: Das Vorhandensein von mehr als zwei Fahrstreifen bietet leichte Vorteile hinsichtlich Redundanz (mehr Platz für Verkehrsfluss) und Rapidität (mehr Platz für Einsatzfahrzeuge).

Fahrbahnbreite: Ebenso ist das Vorhandensein eines Pannestreifens bzw. eine höhere Fahrstreifenbreite günstig, was Redundanz und Rapidität angeht.

Wandlänge: Bei sehr langen Stützbauwerken (> 300 m) wird davon ausgegangen, dass die Erreichbarkeit für Baupersonal eingeschränkt ist und die Wiederherstellungszeit lang ist. Deshalb wird die Rapidität negativ bewertet.

Ausreichend dimensionierte und funktionierende Entwässerung vorhanden: Eine ausreichend dimensionierte und funktionierende Entwässerung ist von höchster Wichtigkeit für die Standsicherheit von Stützbauwerken. Sie verhindert nämlich, dass sich Wasser hinter der Mauer sammelt, welches einen (unzulässig hohen) hydrostatischen Druck ausübt. Konkret hat sie positive Auswirkungen auf die Robustheit hinsichtlich der Gefahren „Hochwasser, Überflutung“, „Ufererosion, Kolkbildung“, „Rutschung, Hangmure“, „Bodensenkung, -verformung, -verschiebung“ und auch „Wald-/Flurbrand“ (Abfluss des Löschwassers).

Entwässerung versintert: Die Versinterung der Entwässerung verhindert deren ordnungsgemäße Funktionsweise und kann nicht durch eine einfache Kanalspülung behoben werden. Die Auswirkungen einer nicht richtig funktionierenden Entwässerung sind oben beschrieben.

Geologische/geotechnische Standortbedingungen: Festgestein bietet gegenüber den anderen genannten Standortbedingungen mehr Robustheit.

Seitliche Auflast vorhanden: Es wird davon ausgegangen, dass eine vorhandene seitliche Auflast die Robustheit bei Erdbeben verringert.

Permanenter Wasserdruck vorhanden: Ein Permanenter Wasserdruck verringert die Robustheit bei Erdbeben und hinsichtlich der Gefahren „Rutschung, Hangmure“, „Steinschlag, Blockschlag, Felssturz, Bergsturz“ und (vor allem) „Bodensenkung, -verformung, -verschiebung“.

Verkehrsstärke DTV (durchschnittliche tägliche Verkehrsstärke): Es wird davon ausgegangen, dass große Verkehrsstärken negative Auswirkungen auf die Rapidität haben (behinderte Erreichbarkeit durch Einsatzfahrzeuge).

Stützbauwerk ist Teil eines Verkehrsknotenpunktes: Es wird davon ausgegangen, dass ein Stützbauwerk, das Teil eines Verkehrsknotenpunktes ist, nach einem disruptiven Ereignis nicht so schnell wiederhergestellt werden kann (eingeschränkter Platz für Aufräum- und Bauarbeiten). Die Rapidität wird deshalb negativ beurteilt.

Verkehrssteuerung vorhanden: Positiv hinsichtlich „Ressourcen/Rapidität“ (betrifft alle Gefahren).

Streckendienst/Einsatzkräfte vorhanden: Positiv hinsichtlich „Ressourcen/Rapidität“ (betrifft alle Gefahren).

Kameraüberwachung: Eine vorhandene (und im besten Fall schwenkbare) Kameraüberwachung ist als „positive Ressource“ anzusehen.

Verkehrsdatensensorik: Stauerkennungssensoren o.Ä. vorhanden: Eine vorhandene Verkehrsdatensensorik ist als „positive Ressource“ anzusehen.

Monitoring: Ein vorhandenes Monitoring kann unter Umständen drohende Gefahren (leichter) erkennen lassen. Gezielte Schutzmaßnahmen können daraufhin ergriffen werden. Dieser Umstand wird durch eine positive Beurteilung der Robustheit bei den betreffenden Gefahren berücksichtigt.

Fahrzeit über Ausweichroute: Bei dieser Einflussgröße ist das betrachtete Asset als Teil eines Verkehrsnetzes anzusehen. Hinsichtlich der Redundanz ist die Frage zu stellen, inwiefern eine reduzierte Funktionalität des betrachteten Assets (Befahrbarkeit alternierend nur in eine Richtung, Sperre für LKW, Totalsperre u.a.) durch eine Ausweichroute kompensiert werden kann. Obwohl diese Einflussgröße auf eine „andere“ Route – eben die potenzielle Ausweichroute – abstellt, betrifft sie das betrachtete, zu beurteilende Asset. Denn es ist das betrachtete Asset, welches einer Alternative bedarf, um redundant zu sein.

5.3 Einstufung der Gefahren und Ermittlung des Gefahrenpotentials

Zur Bestimmung der Resilienzkenzahl müssen die im Rahmen des Arbeitspakets 4 ermittelten 18 REMAIN-Gefahren hinsichtlich ihres jeweiligen Gefahrenpotentials eingestuft werden. Diese Einstufung der REMAIN-Gefahren ermöglicht die Beurteilung der Relevanz der einzelnen Gefahren für das jeweilige Asset.

In Anlehnung an den Handlungsleitfaden „Naturgefahren-Management in der BMG“ [72] werden für alle REMAIN-Gefahren durchgängig 5 + 1 Stufen des Gefahrenpotentials GP verwendet (Gefahrenpotential GP0-GP5), wobei das Gefahrenpotential GP0 bedeutet, dass die Gefahr am Asset nicht vorhanden ist (Tabelle 13).

Tabelle 13: Stufen des Gefahrenpotentials

Stufen	Beschreibung
Gefahrenpotential	
GP0	kein Gefahrenpotential (Gefahr am Asset nicht vorhanden)
GP1	geringes Gefahrenpotential
GP2	mäßiges Gefahrenpotential
GP3	erhebliches Gefahrenpotential
GP4	hohes Gefahrenpotential
GP5	Sehr hohes Gefahrenpotential

Für die sechs bereits vom Handlungsleitfaden „Naturgefahren-Management in der BMG“ [72] abgedeckten REMAIN-Gefahren wird die Klassifizierung hinsichtlich des Gefahrenpotentials übernommen.

Für alle weiteren REMAIN-Gefahren erfolgt die Einstufung der Gefahren bzw. die Ermittlung des Gefahrenpotentials anhand abgesicherter Datenquellen (z.B. ASI, ZAMG) und Überführung in eine ebenfalls 5+1-teilige Skala (Gefahrenpotential GP0-GP5).

Das Ergebnis ist in Tabelle 14 zusammengefasst, wobei die bereits im Handlungsleitfaden „Naturgefahren-Management in der BMG“ [72] enthaltenen REMAIN-Gefahren grün unterlegt sind.

Tabelle 14: Einstufung/Gefahrenpotential der REMAIN-Gefahren

REMAIN-Gefahren	Referenzunterlagen	Einheit	Einstufungskriterien					Anmerkung	
			GP0	GP1	GP2	GP3	GP4		GP5
Menschliche Gefahren			kein Gefährdungspotential	geringes Gefährdungspotential	mäßiges Gefährdungspotential	erhebliches Gefährdungspotential	hohes Gefährdungspotential	sehr hohes Gefährdungspotential	
Fahrzeug-/Schiffsmprall	ASFINAG-Karte Unfallkostenraten/Unfallhäufungsstellen	Unfallkostenrate	0-0,01	0,01-0,02	0,02-0,03	0,03-0,04	0,04-0,05	>0,05	Alternative Unfallhäufigkeitskarte ASFINAG
Explosion, Brand	Registrierung Tunnel, RVS 09.03.12	Gefahranteil SV		<1%		1-3%		>3%	falls Daten nicht vorhanden, Vorschlag Anteil SV von 10 bis 25%
Freisetzung von Gefahrstoffen	Registrierung Tunnel, RVS 09.03.12	Gefahranteil SV		<1%		1-3%		>3%	falls Daten nicht vorhanden, Vorschlag Anteil SV von 10 bis 25%
Überladung / Überbeanspruchung	Daten aus WIM und stationären Kontrollstellen; SOTRA-Daten	Anteil überladene LKW	0	<5%		5-10%		>10%	falls Daten Überladungsanteil nicht bekannt, dann Vorschlag SV-Anteil von 10 bis 25%
Natürliche Gefahren									
Sturm	Windkarten in ÖNORM EN bzw. B 1991-1-4; Hora-Datenbank www.hora.gv.at	Basisswindgeschwindigkeit vb.o nach ÖN B1991-4		<20 m/s	20-22,5 m/s	22,5-25 m/s	25,0-26,5 m/s	>26,5	Ermittelbar nach https://www.hora.gv.at/
Schnee(verwehung), Eis	ASFINAG Naturgefahrenkarte (Gefahrenart Schnee/Eis)	GP X							Mit Naturgefahrenkarten ASFINAG abgleichen
Extrem hohe Temperaturen	Wetterkarten/ ZAMG; ÖNORM EN bzw. B 1991-1-5 Temperatur	Hitzetage > 30°C		<10		10-30		>30	
Erdbeben	Erdbebenkarte der ÖNORM EN/B 1998; Referenzbodenbeschleunigung	Zone nach ÖNORM B 1998-1	Zone 0	Zone 1 + 2		Zone 3		Zone 4	
Bodensenkung,-verformung,-verschiebung	Geologische Karten, Berechnungen zur Setzungsgeschwindigkeit	Dauer der Setzung		Setzung klingen während Bauphase ab		Setzungen klingen in den ersten 5 Jahren nach Errichtung ab		Permanente oder periodische Setzungen	
Schneerutsch, Lawine, Eissturz	ASFINAG Naturgefahrenkarte (Gefahrenart Lawine)	GP X							Mit Naturgefahrenkarten ASFINAG abgleichen
Rutschung, Hangmure	ASFINAG Naturgefahrenkarte (Gefahrenart Rutschung)	GP X							Mit Naturgefahrenkarten ASFINAG abgleichen
Stein-, Blockschlag, Fels-, Bergsturz	ASFINAG Naturgefahrenkarte (Gefahrenart Sturzprozess)	GP X							Mit Naturgefahrenkarten ASFINAG abgleichen
Hochwasser, Überflutung	ASFINAG Naturgefahrenkarte (Gefahrenart Wasser)	GP X							Mit Naturgefahrenkarten ASFINAG abgleichen
Ufererosion, Kolkbildung	Abgeleitet aus ASFINAG Naturgefahrenkarte (Gefahrenart Wasser)	GP X	Kein Fluss						Mit Naturgefahrenkarten ASFINAG abgleichen
Sonstige Gefahren									
Wald-, Flurbrand	Waldbrandrisiko-Karte Österreich https://www.naturgefahren.at/projekte/waldbrand_risikokarte.ht	Waldbrandrisiko gem. Waldbrandrisikokarte	kein Baumbestand	sehr gering	gering	mäßig	hoch	sehr hoch	ZAMG Information zur Waldbrandgefahr (Karte)
Windwurf, umgestürzte Bäume	ASFINAG Naturgefahrenkarte (Gefahrenart Windwurf)	GP X							Alternativ falls Bewertungskriterien der Baumhöhe/Baumkataster mit Baumhöhe
Tiere auf der Fahrbahn	KFV Wildunfallkarte 2019/20	Wildunfälle/1000km2 und Jahr		<500	500-1000	1000-1500	1500-2000	>2000	
Strom-/Kommunikationsausfall		Wahrscheinlichkeit	nicht wahrscheinlich			wahrscheinlich		sehr wahrscheinlich	

Tabelle 14 enthält auch Informationen zu den für die Ermittlung des Gefahrenpotentials verwendeten Referenzunterlagen sowie Detailinformationen zu den Einstufungskriterien. All diese Informationen sind auch in den REMAIN-Gefahren-Fact-Sheets enthalten, sodass für jede REMAIN-Gefahr nicht nur die Auswirkungen auf die unterschiedlichen REMAIN-Assets, sondern auch Einflussparameter, Kenngrößen und Gefahrenpotential aus den Fact-Sheets (siehe Anhang 2) entnommen werden können.

6 ENTWICKLUNG EINER ASSET-SPEZIFISCHEN RESILIENZKENNZAHL (AP 6)

6.1 Gewichtung der Resilienz-Einflussgrößen

6.1.1 Darstellung der Ergebnisse aus AP 5 und statistische Auswertung

Auf Grundlage der Ergebnisse aus Kapitel 5 (AP 5) wurde pro REMAIN-Asset erfasst, wie viele der Einflussgrößen für die Resilienz dieses Assets hinsichtlich einer REMAIN-Gefahr als relevant erachtet wurden und somit einer Bewertung zugeführt wurden.

Abbildung 25 stellt diese blockweise Auswertung der Relevanz der Einflussgrößen grafisch dar: Weiße Felder bedeuten, dass mindestens eine Einflussgröße dieses Blocks (gemeint sind hier die Blöcke strukturelle, natürliche, verkehrliche und lokal-operative Einflussgrößen) in Bezug auf die Gefahr *i* eine Relevanz hat und somit in weiterer Folge auch gewichtet werden muss. Für graue Felder gilt hingegen, dass keine Einflussgröße dieses Blocks relevant ist – diese Einflussgrößen erhalten folglich eine Gewichtung von 0%.

Gefahr 1 - 18

Einflussgrößen blockweise: strukturell, natürlich, verkehrlich, lokal/operativ

				menschliche Gefahren						natürliche Gefahren										Sonstige Gefahren						
				Fahrzeugs regal	Explosion/ Brand	Freizeitau sgew Gefahren offen	Überladu ng Überbeans pruchung	Sturm	Schnee- ever wucht Eis	extr em hohe Temperatu ren	Erdbeben	Bodense nk ung- verform ung	Lawine	Murgang	Felsbruc h, sturz, Steinschlag	Hochwasse r, Überflut ung	Untergru nd Verform ung	Wald Flurbrand	Windwurf, umgestür zte Bäume	Tiere auf der Fahrbahn	Überwe rtetes Versagen	Stromaus fall				
				Ry	Rx	Ry	Rx	Ry	Rx	Ry	Rx	Ry	Rx	Ry	Rx	Ry	Rx	Ry	Rx	Ry	Rx	Ry	Rx			
REMAIN-Assetkategorie 1: Brücken																										
strukturell	Einwirkende Bruchlage	Normative Grundlage für Dimensionierung	Statisches System																							
Verkehr	Brücke wird in der Regel nicht befahren	Verkehrsstärke & DVV																								
lokal/operativ	Strukturelemente/Inspektionsfälle: Traffic Manager verfügbar	Kamerabüberwachung																								
REMAIN-Assetkategorie 2: Tunnel & Galerien																										
strukturell	Einwirkende Bruchlage	Normative Grundlage (oder sonstiger Baupunkt)	Auswahl der Tunnelart																							
Verkehr	Tunnel dient als Schutzmaßnahme gegen Naturgefahren	Verkehrsstärke & DVV																								
lokal/operativ	Strukturelemente/Inspektionsfälle: Traffic Manager verfügbar	SISG / TüfSISG vorliegend für Analyse vorhanden																								
REMAIN-Assetkategorie 3: Strecke plus																										
strukturell	Bauweise	Deckungsfläche	Auswahl der Fahrbahnart																							
Verkehr	Verkehrsstärke & DVV																									
lokal/operativ	Strukturelemente/Inspektionsfälle: Traffic Manager verfügbar																									
REMAIN-Assetkategorie 4: Lärmschutzwände																										
strukturell	Einwirkende Bruchlage	Wahl der Wand- oder Fundamentlänge	Materialstärke																							
Verkehr	Verkehrsstärke & DVV																									
lokal/operativ	Strukturelemente/Inspektionsfälle: Traffic Manager verfügbar	Kamerabüberwachung																								
REMAIN-Assetkategorie 5: Stützwerke																										
strukturell	Einwirkende Bruchlage	Normative Grundlage (oder sonstiger Baupunkt)	Auswahl der Tunnelart																							
Verkehr	Verkehrsstärke & DVV																									
lokal/operativ	Monitoring																									

- Einflussgrößen-Block ist nicht relevant für Resilienzbeurteilung -> keine Gewichtung notwendig
- Einflussgrößen-Block ist relevant für Resilienzbeurteilung -> Gewichtung zuordnen!

Abbildung 25: Grafische Darstellung der in AP5 als relevant (weiß) bzw. nicht relevant (grau) gekennzeichneten Einflussgrößenblöcke – Schematische Darstellung für alle REMAIN-Assets und alle REMAIN-Gefahren

Die quantitative Auswertung ergab, dass im Mittel über alle REMAIN-Assets und REMAIN-Gefahren ca. 30% der Einflussgrößen für die Dimensionen Ry „Robustheit/Redundanz“ (Funktionalität, siehe Abbildung 23) und/oder die Dimensionen Rx „Ressourcen/Rapidität“ (Dauer der Wiederherstellung, siehe Abbildung 23) relevant sind und somit eine Gewichtung erhalten müssen.

6.1.2 Vorgehensweise bei der Gewichtung

Die Gewichtung der Einflussgrößen stellt sicher, dass bei der nachfolgenden Berechnung von Resilienzkenzahlen (siehe Kapitel 6.2) den für eine ausgewählte REMAIN-Gefahr *maßgeblichen* Einflussgrößen der notwendige Einfluss zuteilwird. Beispielsweise hat die Einflussgröße *Konstruktionstyp* einer Brücke (Balkenbrücke, Schrägseilbrücke, etc.) gegenüber der REMAIN-Gefahr *Sturm* einen größeren Einfluss auf die Resilienz des Assets als die Einflussgröße *Fahrbahnbreite* gegenüber der REMAIN-Gefahr *Ufererosion, Kolkbildung*. Diese Unterschiede müssen in den zu entwickelnden Berechnungsalgorithmus für Resilienzkenzahlen einfließen, daher wird zuallererst ein gefahren- und assetspezifischer prozentueller Gewichtungsfaktor für jede Einflussgröße definiert.

Der Grundgedanke bei der Vergabe dieser Gewichtungsfaktoren war es, von einer größerteiligen Betrachtung schrittweise zu einer kleinteiligeren Betrachtung überzugehen. Dazu wurde zuerst ein theoretisches, allgemeingültiges Grundgerüst zur Gewichtung der Einflussgrößenblöcke je REMAIN-Asset aufgebaut und dieses dann – wo notwendig – auf Zeilenebene, also für jede einzelne Einflussgröße verfeinert. So konnte sichergestellt werden, dass einerseits die Gewichtungen für alle REMAIN-Gefahren und REMAIN-Assets demselben Konzept folgen, aber andererseits auch asset- bzw. gefahrenspezifische Schwerpunkte gesetzt werden. Diese Vorgehensweise impliziert auch, dass für die endgültige Gewichtung mehrere Iterationsschleifen notwendig waren, die im Folgenden erläutert werden.

Der erste Ansatz zur Gewichtung basiert auf der Idee, dass strukturelle und natürliche Einflussgrößen tendenziell einen größeren Einfluss auf die y-Dimension (Funktionalität) haben, verkehrliche und lokal-operative Einflussgrößen tendenziell einen größeren Einfluss auf die x-Dimension (Zeit) haben. Daher wurde zunächst eine blockweise 75/25% bzw. 25/75% Aufteilung (Abbildung 26) festgelegt.

	y-Dimension (Funktionalität)	x-Dimension (Zeit)
	R _y	R _x
Strukturelle Einflussgrößen	75%	25%
Natürliche Einflussgrößen		
Verkehrliche Einflussgrößen	25%	75%
Lokal- operative Einflussgrößen		

Abbildung 26: Erster Ansatz einer blockweisen Gewichtung

Allerdings stellte sich beim ersten Versuch, diese Gewichtung auch einflussgrößenweise (von der blockweisen Betrachtung weg hin zur Zeilenebene) anzuwenden, heraus, dass dieser Ansatz nur für die x-Dimension (Zeit) funktioniert. Bei Anwendung auf die y-Dimension tritt asset- wie auch gefahrenunabhängig folgendes Problem auf: Fast alle verkehrlichen und lokal-operativen Einflussgrößen haben nie einen Einfluss auf die y-Dimension (Funktionalität) – beispielhaft sei hier die Einflussgröße *Verkehrsstärke DTV* angeführt, die nur eine direkte Auswirkung auf die Rapidität hat (behinderte Erreichbarkeit durch Einsatzfahrzeuge), nicht aber auf Robustheit, Redundanz oder Ressourcen¹. Dadurch ergibt sich, dass die wenigen verkehrlichen und lokal-operativen Einflussgrößen, die einen Einfluss auf die y-Dimension haben können (ein bis maximal zwei Zeilen, abhängig von der REMAIN-Assetkategorie) immer eine Gewichtung von 25 bzw. 12,5% erhalten, während strukturelle Einflussgrößen nur Gewichtungen zwischen 5 bis 10% pro Zeile bekommen, siehe Abbildung 27. Dies steht im Widerspruch zur ursprünglichen Idee, dass strukturelle Einflussgrößen einen größeren Einfluss auf die y-Dimension haben als auf die x-Dimension. Der Ansatz der 75/25% Gewichtung für die y-Dimension (Funktionalität) wurde daher nicht weiterverfolgt.

¹ Anmerkung: Die Verkehrsstärke kann allerdings gefahrenabhängig (z.B. über die Unfallkostenrate für die Gefahr *Fahrzeug-/Schiffsanprall*) eine Auswirkung auf das Gefahrenpotential GP und somit die dritte Dimension (sh. Kap. 6.2.3.3) der Resilienz haben.

Einflussgröße			angestrebte Gewichtung Ry	angestrebte Gewichtung Rx	
REMAIN-Assetkategorie 1: Brücken					
strukturell	Zeitpunkt der Errichtung	vor 1960	5%	2%	
		1960 - 1980			
		1980 - 2000			
		nach 2000			
	Normative Grundlage für Dimensionierung	nach Eurocode	5%	2%	
		nach älterer Norm			
	Statisches System	statisch bestimmt	5%	2%	
		statisch unbestimmt			
	Konstruktionstyp	Balkenbrücke	5%	2%	
		Schrägseilbrücke			
		Hängebrücke			
		Rahmentragwerk			
		integrale Brücke			
	Fahrzeuge/Beladung können tragende Elemente treffen	ja	5%	2%	
		nein			
	Querschnitt	Vollquerschnitt	5%	2%	
		Hohlkastenquerschnitt			
Fachwerk					
Baumaterial	Stahlbeton	5%	2%		
	Spannbeton				
	Stahl				
	Verbund				
(Haupt-)Spannweite	> 25 m	5%	2%		
	< 25 m				
Gliederung	Einfeldbrücke	5%	2%		
	Mehrfeldbrücke				
Getrennte Richtungstragwerke vorhanden	ja	5%	2%		
	nein				
Anzahl der Fahrstreifen pro Richtung	2	5%	2%		
	mehr als 2				
Fahrbahnbreite	Pannestreifen vorhanden oder Fahrstreifenbreite > 3,5 m	5%	2%		
	Pannestreifen nicht vorhanden und				
Gründungsart	Flachgründung	5%	2%		
	Tiefgründung				
Straßenoberbau	Asphalt	5%	2%		
	Beton				
Verkehr	Brücke wird in der Regel nicht befahren	trifft zu (z.B. Grünbrücke)	13%	15%	
		trifft nicht zu (= Brücke wird i. d. R. befahren)			
	Verkehrsstärke DTV	> 50.000	0%	15%	
10.000 - 50.000					
< 10.000					
lokal/operativ	Streckendienst/Einsatzkräfte: Traffic Manager verfügbar	ja	0%	15%	
		nein			
	Kameraüberwachung	nicht vorhanden	0%	15%	
		nicht schwenkbar			
		schwenkbar			
	Verkehrsdatensensorik: Stauerkennungssensoren o.Ä.	ja	0%	15%	
nein					
Monitoring	vorhanden	13%	0%		
	nicht vorhanden				
			Σ	100%	100%

Abbildung 27: Anwendung der 75/25% Gewichtung auf die y-Dimension (Prozentangaben sind gerundet)

Stattdessen wurde für die y-Dimension der Ansatz einer gleichmäßigen Gewichtung für alle relevanten Zeilen (= die Zeilen, die nicht für jede REMAIN-Gefahr im Vorhinein wegfallen) weiterverfolgt. Die in Tabelle 15 dargestellte generalisierte erste Bewertung ist noch gefahrenunabhängig und wird erst in den nächsten Schritten für jede REMAIN-Gefahr und jedes REMAIN-Asset verfeinert.

Tabelle 15: Gefahrenunabhängige erste Gewichtung

Einflussgröße		angestrebte Gewichtung Ry	angestrebte Gewichtung Rx	
REMAIN-Assetkategorie 1: Brücken				
strukturell	Zeitpunkt der Errichtung	vor 1960	6%	2%
		1960 - 1980		
		1980 - 2000		
		nach 2000		
	Normative Grundlage für Dimensionierung	nach Eurocode	6%	2%
		nach älterer Norm		
	Statisches System	statisch bestimmt	6%	2%
		statisch unbestimmt		
	Konstruktionstyp	Balkenbrücke	6%	2%
		Schrägeilbrücke		
		Hängebrücke		
		Rahmentragwerk		
	Fahrzeuge/Beladung können tragende Elemente treffen (Hänger oder Pfeiler oberhalb der Fahrbahn)	ja	6%	2%
		nein		
	Querschnitt	Vollquerschnitt	6%	2%
		Hohlkastenquerschnitt		
		Fachwerk		
Baumaterial	Stahlbeton	6%	2%	
	Spannbeton			
	Stahl			
	Verbund			
(Haupt-)Spannweite	> 25 m	6%	2%	
	< 25 m			
Gliederung	Einfeldbrücke	6%	2%	
	Mehrfeldbrücke			
Getrennte Richtungstragwerke vorhanden	ja	6%	2%	
	nein			
Anzahl der Fahrstreifen pro Richtung	2	6%	2%	
	mehr als 2			
Fahrbahnbreite	Pannestreifen vorhanden oder Fahrstreifenbreite > 3,5 m	6%	2%	
	Pannestreifen nicht vorhanden und Fahrstreifenbreite < 3,5 m			
Gründungsart	Flachgründung	6%	2%	
	Tiefgründung			
Straßenoberbau	Asphalt	6%	2%	
	Beton			
verkehrlich	Brücke wird in der Regel nicht befahren	trifft zu (z.B. Grünbrücke)	6%	15%
		trifft nicht zu (= Brücke wird i. d. R. befahren)		
	Verkehrsstärke DTV	> 50.000	0%	15%
10.000 - 50.000				
< 10.000				
lokal/operativ	Streckendienst/Einsatzkräfte: Traffic Manager verfügbar	ja	0%	15%
		nein		
	Kameraüberwachung	nicht vorhanden	0%	15%
		nicht schwenkbar		
		schwenkbar		
	Verkehrsdatensensorik: Stauerkennungssensoren o.Ä. vorhanden	ja	0%	15%
nein				
Monitoring	vorhanden	6%	0%	
	nicht vorhanden			
Σ		100%	100%	

Tabelle 15: Gefahrenunabhängige erste Gewichtung (Fortsetzung)

Einflussgröße			angestrebte Gewichtung Ry	angestrebte Gewichtung Rx
REMAIN-Assetkategorie 2: Tunnel & Galerien				
strukturell	Normative Grundlage (oder sonst Baujahr)	vor 1995	8%	2%
		1995-2006		
		nach 2006 (STSG)		
	Anzahl der Tunnelröhren	1	8%	2%
		2		
	Anzahl der Fahrstreifen pro Richtung	2	8%	2%
		mehr als 2		
	Fahrbahnbreite	Pannstreifen vorhanden oder Fahrstreifenbreite > 3,5 m	8%	2%
		Pannstreifen nicht vorhanden und Fahrstreifenbreite < 3,5 m		
	Gegenverkehr vorhanden	ja	8%	2%
		nein		
	Zwischendecke vorhanden	ja	8%	2%
nein				
Tunnellänge	< 500 m	8%	2%	
	500 - 4.000 m			
	> 4.000 m			
Tunnelart	Tunnel	8%	2%	
	Galerie			
Bauweise	geschlossene Bauweise	8%	2%	
	offene Bauweise			
	Deckelbauweise			
Tunneltyp	Tunnel	8%	2%	
	Einhausung/Überdeckung			
	Unterflurtrasse			
	Grüntunnel			
natürlich	Tunnel ist gegen Naturgefahren dimensioniert	ja	8%	2%
		nein		
verkehrlich	Verkehrsstärke DTV	> 50.000	0%	15%
		10.000 - 50.000		
		< 10.000		
lokal/operativ	Streckendienst/Einsatzkräfte: Traffic Manager verfügbar	ja	0%	15%
		nein		
	STSG TuRisMO: vertiefte Analyse vorhanden	ja	0%	15%
		nein		
	Monitoring	vorhanden	8%	0%
		nicht vorhanden		
	Kameraüberwachung	nicht vorhanden	0%	15%
		nicht schwenkbar		
schwenkbar				
Verkehrsdatensensorik: Stauererkennungssensoren o.Ä. vorhanden	ja	0%	15%	
	nein			
			Σ	Σ
			100%	100%

Tabelle 15: Gefahrenunabhängige erste Gewichtung (Fortsetzung)

Einflussgröße			angestrebte Gewichtung Ry	angestrebte Gewichtung Rx
REMAIN-Assetkategorie 3: Strecke plus				
strukturell	Bauweise	Asphalt Beton	13%	4%
	Deckschicht	Beton Asphalt	13%	4%
	Lastklasse	unterdimensioniert (VBI-Koeffizient < 1) richtig dimensioniert (VBI-Koeffizient ≥ 1)	13%	4%
	Anzahl der Fahrstreifen pro Richtung	2 mehr als 2	13%	4%
	Fahrbahnbreite	Pannestreifen vorhanden oder Fahrstreifenbreite > 3,5 m Pannestreifen nicht vorhanden und Fahrstreifenbreite < 3,5 m	13%	4%
	Durchlässe vorhanden	ja nein	13%	4%
	Gantries / Überkopfwegweiser vorhanden	ja nein	13%	4%
	verkehrlich	Verkehrsstärke DTV	> 50.000	
10.000 - 50.000			0%	19%
< 10.000				
lokal/operativ	Streckendienst/Einsatzkräfte: Traffic Manager verfügbar	ja	0%	19%
		nein		
	Kameraüberwachung	nicht vorhanden	0%	19%
		nicht schwenkbar schwenkbar		
	Verkehrsdatensensoren: Stauererkennungssensoren o.Ä. vorhanden	ja	0%	19%
		nein		
Monitoring	vorhanden nicht vorhanden	13%	0%	
Σ			100%	100%

Einflussgröße			angestrebte Gewichtung Ry	angestrebte Gewichtung Rx
REMAIN-Assetkategorie 4: Lärmschutzwände				
strukturell	Zeitpunkt der Errichtung	vor 2000	13%	4%
		2000 - Planungshandbuch ASFINAG		
		ab Planungshandbuch ASFINAG		
	Höhe (OK Wand - OK Fundament)	< 5,50 m	13%	4%
		> 5,50 m		
	Länge	< 1.000 m	13%	4%
		> 1.000 m		
	Material Steher	Beton	13%	4%
Stahl				
Liegt neben Bahnstrecke	ja	13%	4%	
	nein			
Anzahl der Fahrstreifen pro Richtung	2	13%	4%	
	mehr als 2			
Fahrbahnbreite	Pannestreifen vorhanden oder Fahrstreifenbreite > 3,5 m	13%	4%	
	Pannestreifen nicht vorhanden und Fahrstreifenbreite < 3,5 m			
verkehrlich	Verkehrsstärke DTV	> 50.000	0%	19%
		10.000 - 50.000		
		< 10.000		
lokal/operativ	Streckendienst/Einsatzkräfte: Traffic Manager verfügbar	ja	0%	19%
		nein		
	Kameraüberwachung	nicht vorhanden	0%	19%
		nicht schwenkbar schwenkbar		
	Verkehrsdatensensoren: Stauererkennungssensoren o.Ä. vorhanden	ja	0%	19%
		nein		
Monitoring	vorhanden nicht vorhanden	13%	0%	
Σ			100%	100%

Tabelle 15: Gefahrenunabhängige erste Gewichtung (Fortsetzung)

Einflussgröße			angestrebte Gewichtung Ry	angestrebte Gewichtung Rx
REMAIN-Assetkategorie 5: Stützbauwerke				
strukturell	Konstruktionstyp und Erscheinungsjahr der normativen Grundlage (alternativ: Baujahr)	Gewichtskonstruktion	20%	6%
		sonstige Konstruktion; vor 1974		
		sonstige Konstruktion; 1974 - 1995		
		sonstige Konstruktion; nach 1995		
	Wandhöhe (FOK-WOK)	1,5 - 4,0 m		
4 - 8,0 m				
> 8,0 m				
Anzahl der Fahrstreifen pro Richtung	2	20%	6%	
	mehr als 2			
Fahrbahnbreite	Pannestreifen vorhanden oder Fahrstreifenbreite > 3,5 m	20%	6%	
	Pannestreifen nicht vorhanden und Fahrstreifenbreite < 3,5 m			
verkehrl	Verkehrsstärke DTV	> 50.000	0%	19%
		10.000 - 50.000		
		< 10.000		
lokal/operativ	Streckendienst/Einsatzkräfte: Traffic Manager verfügbar	ja	0%	19%
		nein		
	Kameraüberwachung	nicht vorhanden	0%	19%
		nicht schwenkbar		
		schwenkbar		
	Verkehrsdatensensoren: Stauerkennungssensoren o.Ä. vorhanden	ja	0%	19%
		nein		
Monitoring	vorhanden	20%	0%	
	nicht vorhanden			
Σ			100%	100%

Die Herleitung der tatsächlichen Gewichtungsanteile für die einzelnen REMAIN-Gefahren erfolgt dann in mehreren Schritten und soll hier anhand des REMAIN-Assets Brücke in Bezug auf die Gefahr *Fahrzeug-/Schiffsanprall* beispielhaft illustriert werden.

Tabelle 16 zeigt den ersten Schritt der Herleitung: Die in Tabelle 15 allgemein definierten Gewichtungssätze werden mit der in AP5 erfolgten Bewertung verknüpft. Da aber einzelne Einflussgrößen als „nicht relevant“ eingestuft wurden (grau hinterlegt), wird für diese keine Gewichtung angesetzt. Daraus folgt, dass die Summe der Gewichtungsanteile < 100% sein kann.

Im nächsten Schritt (Tabelle 17) wurde durch die Expert*innen des REMAIN-Konsortiums eine gefahrenspezifische Schwerpunktsetzung bei der Gewichtung vorgenommen – z.B. wurde für die Gefahr *Fahrzeug-/Schiffsanprall* die Einflussgröße *Fahrzeuge/Beladung können tragende Elemente treffen (Hänger oder Pfeiler oberhalb der Fahrbahn)* als maßgeblich erachtet und deswegen dafür ein höherer Prozentsatz angesetzt (Tabelle 17 in rot – der Zahlenwert wurde von ursprünglich 6% auf 30% erhöht).

Tabelle 16: Herleitung der tatsächlichen gefahren- und assetspezifischen Gewichtung am Beispiel Brücke x Fahrzeug-/Schiffsanprall – Schritt 1

Einflussgröße			Robustheit/Redundanz				Ressourcen/Rapidität				
			Funktionalität			Gewichtung	Dauer der Wiederherstellung			Gewichtung	
			gut	moderat	schlecht	Gew. Angestrebte Ry	gut	moderat	schlecht	Gew. Angestrebte Rx	
REMAIN-Assetkategorie 1: Brücken											
strukturell	Zeitpunkt der Errichtung	vor 1960			x	6%				0%	
		1960 - 1980			x						
		1980 - 2000		x							
		nach 2000									
	Normative Grundlage für Dimensionierung	nach Eurocode				6%				0%	
		nach älterer Norm			x						
	Statisches System	statisch bestimmt				6%				0%	
		statisch unbestimmt			x						
	Konstruktionstyp	Balkenbrücke				6%				0%	
		Schrägeilbrücke			x						
		Hängebrücke			x						
		Rahmentragwerk			x						
	Fahrzeuge/Beladung können tragende Elemente treffen (Hänger oder Pfeiler oberhalb der Fahrbahn)	ja			x	6%				0%	
		nein									
	Querschnitt	Vollquerschnitt				0%				0%	
		Hohlkastenquerschnitt									
		Fachwerk									
	Baumaterial	Stahlbeton				0%				0%	
		Spannbeton									
		Stahl									
Verbund											
(Haupt-)Spannweite	> 25 m				0%			x	2%		
	< 25 m						x				
Gliederung	Einfeldbrücke				0%				0%		
	Mehrfeldbrücke										
Getrennte Richtungstragwerke vorhanden	ja				6%			x	2%		
	nein			x				x			
Anzahl der Fahrstreifen pro Richtung	2		x		6%			x	2%		
	mehr als 2		x								
Fahrbahnbreite	Pannstreifen vorhanden oder Fahrstreifenbreite > 3,5 m				0%			x	2%		
	Pannstreifen nicht vorhanden und Fahrstreifenbreite < 3,5 m							x			
Gründungsart	Flachgründung			x	6%				0%		
	Tiefgründung						x				
Straßenoberbau	Asphalt				0%				0%		
	Beton										
verkehrlich	Brücke wird in der Regel nicht befahren	trifft zu (z.B. Grünbrücke)			6%				0%		
		trifft nicht zu (= Brücke wird i. d. R. befahren)		x							
	Verkehrsstärke DTV	> 50.000				0%			x	15%	
10.000 - 50.000							x				
< 10.000							x				
lokal/operativ	Streckendienst/Einsatzkräfte: Traffic Manager verfügbar	ja			0%			x	15%		
		nein								x	
	Kameraüberwachung	nicht vorhanden				0%				15%	
		nicht schwenkbar							x		
		schwenkbar									
	Verkehrsdatensensoren: Stauerkennungssensoren o.Ä. vorhanden	ja				0%			x	15%	
		nein							x		
Monitoring	vorhanden			x	6%				0%		
	nicht vorhanden		x								
						63%					67%

Tabelle 17: Herleitung der tatsächlichen gefahren- und assetspezifischen Gewichtung am Beispiel Brücke x Fahrzeug-/Schiffsanprall – Schritt 2

Einflussgröße			Robustheit/Redundanz			Ressourcen/Rapidität		
			Gewichtung Ry			Gewichtung Rx		
			Gew. Angestrebte Ry	REMAIN-Expert*innenbeurteilung	Gew. Nach Korrektur	Gew. Angestrebte Rx	REMAIN-Expert*innenbeurteilung	Gew. Nach Korrektur
REMAIN-Assetkategorie 1: Brücken								
strukturell	Zeitpunkt der Errichtung	vor 1960 1960 - 1980 1980 - 2000 nach 2000	6%		6%	0%		0%
	Normative Grundlage für Dimensionierung	nach Eurocode nach älterer Norm	6%		6%	0%		0%
	Statisches System	statisch bestimmt statisch unbestimmt	6%		6%	0%		0%
	Konstruktionstyp	Balkenbrücke Schrägseilbrücke Hängebrücke Rahmentragwerk integrale Brücke	6%		6%	0%		0%
	Fahrzeuge/Beladung können tragende Elemente treffen (Hänger oder Pfeiler oberhalb der Fahrbahn)	ja nein	6%	30%	30%	0%		0%
	Querschnitt	Vollquerschnitt Hohlkastenquerschnitt Fachwerk	0%		0%	0%		0%
	Baumaterial	Stahlbeton Spannbeton Stahl Verbund	0%		0%	0%		0%
	(Haupt-)Spannweite	> 25 m < 25 m	0%		0%	2%		2%
	Gliederung	Einfeldbrücke Mehrfeldbrücke	0%		0%	0%		0%
	Getrennte Richtungstragwerke vorhanden	ja nein	6%		6%	2%		2%
	Anzahl der Fahrstreifen pro Richtung	2 mehr als 2	6%		6%	2%		2%
	Fahrbahnbreite	Pannestreifen vorhanden oder Fahrstreifenbreite > 3,5 m Pannestreifen nicht vorhanden und Fahrstreifenbreite < 3,5 m	0%		0%	2%		2%
	Gründungsart	Flachgründung Tiefgründung	6%		6%	0%		0%
	Straßenoberbau	Asphalt Beton	0%		0%	0%		0%
	Verkehr	Brücke wird in der Regel nicht befahren	trifft zu (z.B. Grünbrücke) trifft nicht zu (= Brücke wird i. d. R. befahren)	6%	10%	10%	0%	
Verkehrsstärke DTV		> 50.000 10.000 - 50.000 < 10.000	0%		0%	15%	3%	3%
		Streckendienst/Einsatzkräfte: Traffic Manager verfügbar	ja nein	0%		0%	15%	3%
lokal/operativ	Kameraüberwachung	nicht vorhanden nicht schwenkbar schwenkbar	0%		0%	15%	3%	3%
		Verkehrsdatensensorik: Stauerkennungssensoren o.Ä. vorhanden	ja nein	0%		0%	15%	3%
	Monitoring	vorhanden nicht vorhanden	6%		6%	0%		0%
		Σ		63%		90%	67%	

Die Summe der Gewichtungen kann nach Schritt 2 noch < 100%, aber auch > 100% ergeben, deswegen erfolgt in Schritt 3 (Tabelle 18) noch eine Normierung der vergebenen Gewichtsanteile auf in Summe 100% (aliquote Aufteilung der Prozentsätze auf die verbleibenden, relevanten Einflussgrößen).

Tabelle 18: Herleitung der tatsächlichen gefahren- und assetspezifischen Gewichtung am Beispiel Brücke x Fahrzeug-/Schiffsanprall – Schritt 3

Einflussgröße			Robustheit/Redundanz				Ressourcen/Rapidität				
			Gewichtung Ry		Gewichtung Rx						
			Gew. Angestrebte Ry	REMAIN-Expert*innenbeurteilung	Gew. Nach Korrektur	Gew. berechnet Ry	Gew. Angestrebte Rx	REMAIN-Expert*innenbeurteilung	Gew. Nach Korrektur	Gew. berechnet Rx	
REMAIN-Assetkategorie 1: Brücken											
strukturell	Zeitpunkt der Errichtung	vor 1960									
		1960 - 1980	6%		6%	7%	0%		0%	0%	
		1980 - 2000									
		nach 2000									
	Normative Grundlage für Dimensionierung	nach Eurocode	6%		6%	7%	0%		0%	0%	
		nach älterer Norm									
	Statisches System	statisch bestimmt	6%		6%	7%	0%		0%	0%	
		statisch unbestimmt									
	Konstruktionstyp	Balkenbrücke									
		Schrägseilbrücke									
		Hängebrücke	6%		6%	7%	0%		0%	0%	
		Rahmentragwerk									
	Fahrzeuge/Beladung können tragende Elemente treffen (Hänger oder Pfeiler oberhalb der Fahrbahn)	ja	6%	30%	30%	33%	0%		0%	0%	
		nein									
	Querschnitt	Vollquerschnitt									
		Hohlkastenquerschnitt	0%		0%	0%	0%		0%	0%	
		Fachwerk									
	Baumaterial	Stahlbeton									
Spannbeton		0%		0%	0%	0%		0%	0%		
Stahl											
Verbund											
(Haupt-)Spannweite	> 25 m	0%		0%	0%	2%		2%	9%		
	< 25 m										
Gliederung	Einfeldbrücke	0%		0%	0%	0%		0%	0%		
	Mehrfeldbrücke										
Getrennte Richtungstragwerke vorhanden	ja	6%		6%	7%	2%		2%	9%		
	nein										
Anzahl der Fahrstreifen pro Richtung	2	6%		6%	7%	2%		2%	9%		
	mehr als 2										
Fahrbahnbreite	Pannstreifen vorhanden oder Fahrstreifenbreite > 3,5 m	0%		0%	0%	2%		2%	9%		
	Pannstreifen nicht vorhanden und Fahrstreifenbreite < 3,5 m										
Gründungsart	Flachgründung	6%		6%	7%	0%		0%	0%		
	Tiefgründung										
Straßenoberbau	Asphalt	0%		0%	0%	0%		0%	0%		
	Beton										
Verkehr	Brücke wird in der Regel nicht befahren	trifft zu (z.B. Grünbrücke)	6%	10%	10%	11%	0%		0%	0%	
		trifft nicht zu (= Brücke wird i. d. R. befahren)									
	Verkehrsstärke DTV	> 50.000	0%		0%	0%	15%	3%	3%	16%	
10.000 - 50.000											
lokal/operativ	Streckendienst/Einsatzkräfte: Traffic Manager verfügbar	ja	0%		0%	0%	15%	3%	3%	16%	
		nein									
	Kameraüberwachung	nicht vorhanden	0%		0%	0%	15%	3%	3%	16%	
		nicht schwenkbar									
	Verkehrsdatensensorik: Stauererkennungssensoren o.Ä. vorhanden	ja	0%		0%	0%	15%	3%	3%	16%	
		nein									
	Monitoring	vorhanden	6%		6%	7%	0%		0%	0%	
nicht vorhanden											
Σ			63%		90%	100%	67%		19%	100%	

Die hier gezeigte Methode wurde auf alle REMAIN-Assets und für diese auf alle REMAIN-Gefahren angewendet, die Ergebnisse (resultierende Gewichtung in Tabellenform) sind dem ANHANG 4 zu entnehmen.

6.1.3 Statistische Auswertung der resultierenden Gewichtung

Um die rechnerisch resultierende Gewichtung aus dem beschriebenen methodischen Vorgehen zu evaluieren, wurde ein Vergleich zwischen der Ausgangsannahme (75/25% Ansatz – siehe Abbildung 29 links oben) und dem Endergebnis vorgenommen.

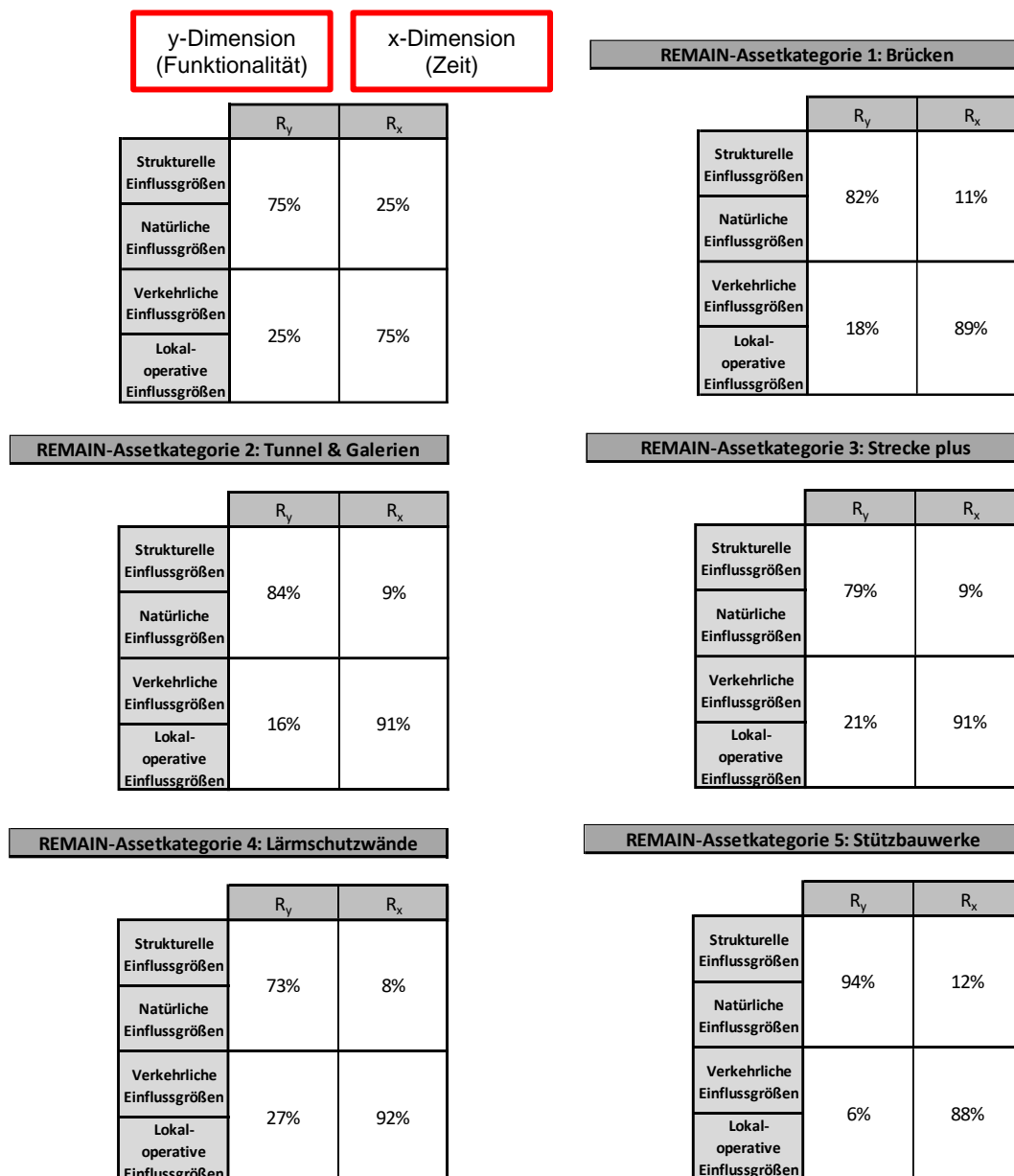


Abbildung 28: Statistische Auswertung der resultierenden Gewichtung

Die Auswertung ergibt, dass sich im Mittel über alle REMAIN-Assets eine Verteilung der Gewichtung-Prozentsätze von 82/18% für die y-Dimension und 10/90% für die x-Dimension ergibt. Die Ergebnisse weisen je REMAIN-Asset eine gewisse Schwankungsbreite auf, wobei diese für die x-Dimension deutlich geringer ist als in der y-Dimension. Da die verkehrlichen und lokal-operativen Einflussgrößen aber für alle REMAIN-Assets annähernd gleich sind (während in den Blöcken strukturell und natürlich die Anzahl der Einflussgrößen und auch die Einflussgrößen selbst stark variieren) ist es wenig überraschend, dass hier die Abweichungen geringer ausfallen. Insgesamt fallen die rechnerisch ermittelten Schwankungsbreiten jedenfalls assetübergreifend relativ gering aus und stellen damit einen stabilen Zwischenstand im Zuge des methodisch darauf aufbauenden Berechnungsalgorithmus dar.

6.2 Entwicklung eines Berechnungsalgorithmus für Resilienzken- zahlen

6.2.1 Verwendete Nomenklatur der Resilienzken- zahlen

Zunächst werden die Indizes der in REMAIN entwickelten Resilienzkenzahlen im Sinne einer eindeutigen, weiterführenden Verwendung spezifiziert (Abbildung 30):

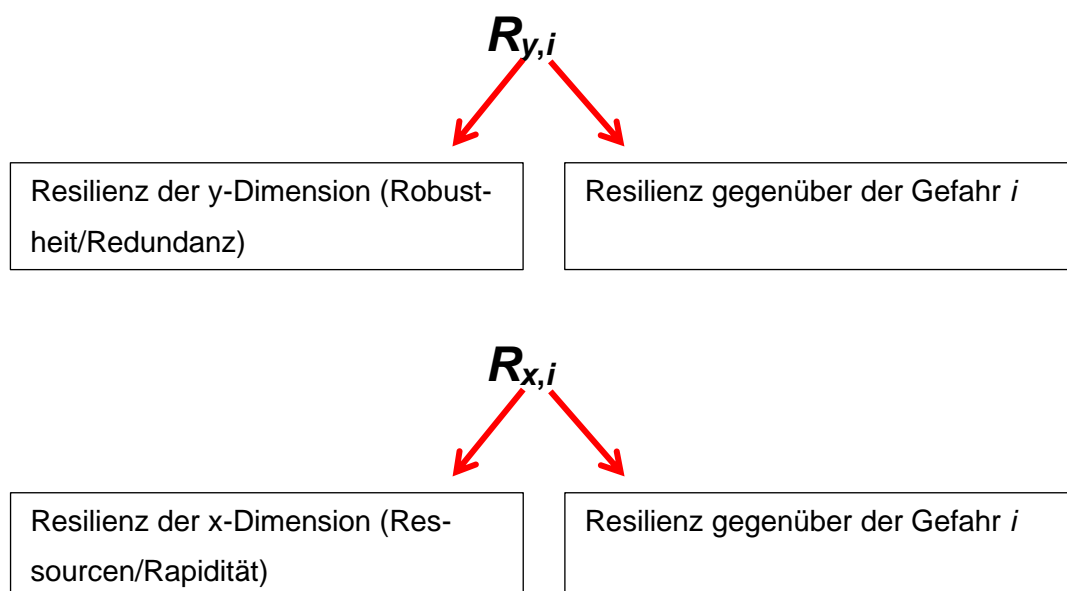


Abbildung 29: Eindeutige Bezeichnung der Resilienzkenzahlen

$R_{x,i}$ bezeichnet also die Teil-Resilienzkenzahl der x-Dimension bezüglich der Gefahr i , $R_{y,i}$ die Resilienzkenzahl der y-Dimension bezüglich der Gefahr i . R_i bezeichnet die gemittelte

Resilienz Kennzahl der beiden ersten genannten Dimensionen für die Gefahr i (Flächenbe-
trachtung, siehe Kapitel 6.2.3.2). Der Vollständigkeit halber sei hier noch die Relevanz der
Gefahr GP als dritte Dimension der Resilienz Kennzahlen (siehe Kapitel 5) angeführt, die
wiederrum mit den anderen beiden Dimensionen verknüpft werden kann (siehe Kapitel
6.2.3.3).

In Hinblick auf die nachfolgenden Kapitel ist festzuhalten, dass die in AP6 abgeleiteten
Resilienz Kennzahlen vorerst nur für **eine** REMAIN-Gefahr i gültig sind. Eine gefahrenüber-
greifende Verschneidung der Resilienz Kennzahlen und mögliche Darstellungsarten sind
erst Gegenstand des Arbeitspakets AP7 (Kapitel 7).

6.2.2 Berechnungsalgorithmus für die Teil-Resilienz Kennzahlen

Um die in AP5 vorgenommenen Bewertungen und die in Kapitel 6 erläuterten Gewichtun-
gen in aussagekräftige und vergleichbare Kennzahlen überzuführen, wurden zuerst die Be-
wertungen der Einflussgrößen nach dem „Ampelsystem“ (gut/moderat/schlecht) in Zahlen-
werte nach einer Ordinalskala eingeteilt:

Gut => 1

Moderat => 3

Schlecht => 5

In Abbildung 30 ist anhand eines einfachen Erläuterungsbeispiels für ein REMAIN-Asset
und eine REMAIN-Gefahr gezeigt, wie die Bewertungen und Gewichtungen in die Tabelle
der Resilienz-Einflussgrößen Eingang finden.

Robustheit/Redundanz			Ressourcen/Rapidität		
Funktionalität			Dauer der Wiederherstellung		
Gew.			Gew.		
		x			
x					
		x			
x					
		x			
x			x		
	x			x	
		x			
		x			
x			x		
Summe			Summe		
100%			100%		

Abbildung 30: Schematische Darstellung der bewerteten und gewichteten Resilienz-Einflussgrößen

Die Resilienzkenzzahlen $R_{y,i}$ und $R_{x,i}$ werden nach folgenden Gleichungen als gewichtetes Mittel berechnet:

$$R_{y,i} = \frac{\sum_{k=1}^n w_{k,y,i} \cdot r_{k,y,i}}{\sum_{k=1}^n w_{k,y,i}} \quad \text{Gl. 3}$$

$w_{k,y,i}$ Gewicht der Einflussgröße k in der Dimension y bezüglich der Gefahr i

$r_{k,y,i}$ Bewertung der Einflussgröße k in der Dimension y bezüglich der Gefahr i

$$R_{x,i} = \frac{\sum_{k=1}^n w_{k,x,i} \cdot r_{k,x,i}}{\sum_{k=1}^n w_{k,x,i}} \quad \text{Gl. 4}$$

$w_{k,x,i}$ Gewicht der Einflussgröße k in der Dimension x bezüglich der Gefahr i

$r_{k,x,i}$ Bewertung der Einflussgröße k in der Dimension x bezüglich der Gefahr i

Abbildung 31 zeigt die Berechnung der Kennzahlen anhand des vorher gezeigten Erläuterungsbeispiels.

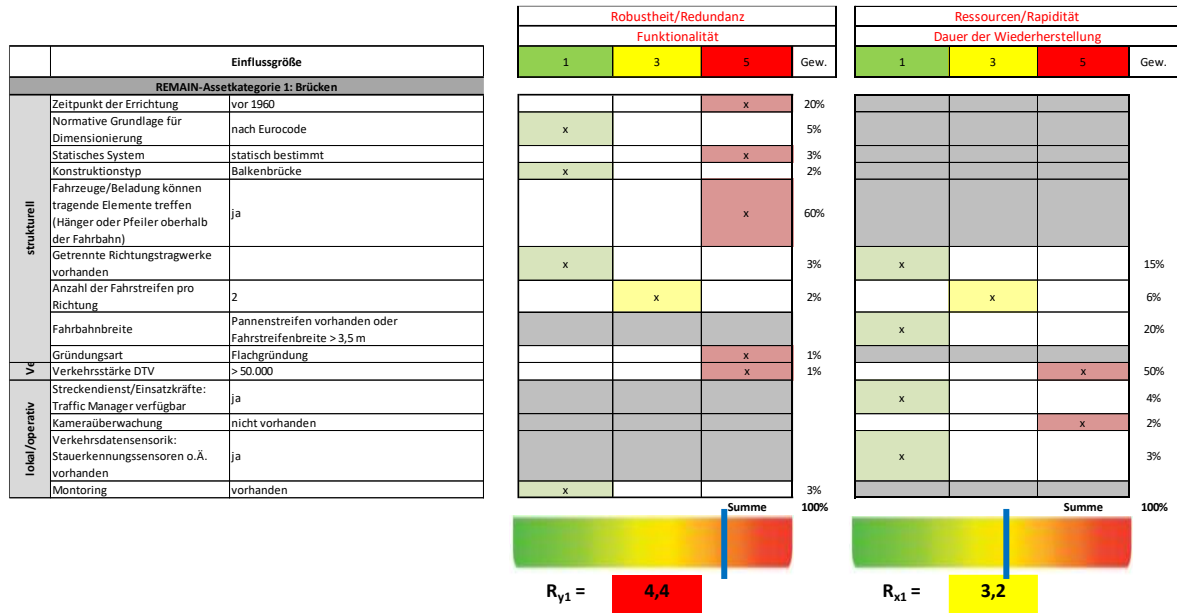


Abbildung 31: Berechnung der Resilienz Kennzahlen – Erläuterungsbeispiel

Um die berechneten Kennzahlen wieder in die dreiteilige Ampelskala überzuführen, wird die in Abbildung 32 dargestellte Einteilung verwendet. Zur Zuteilung der rechnerisch erhaltenen Kennzahlen in das Ampelsystem erfolgt eine Aufteilung der vorhandenen Gesamtbandbreite 1-5 in 3 konstante Klassenbreiten.



Abbildung 32: Konvertierung in die REMAIN-Ampelskala

6.2.3 Ermittlung kombinierter Resilienzkenzahlen

6.2.3.1 Verschneiden der Teil-Resilienzkenzahlen mit dem Gefahrenpotenzial GP

Die Teil-Resilienzkenzahlen $R_{y,i}$ und $R_{x,i}$ sind zwar bezüglich des betrachteten Assets standortspezifisch, jedoch nehmen sie keinen Bezug auf die tatsächliche Eintrittswahrscheinlichkeit der betrachteten Gefahr am Standort des Assets. Beispielsweise kann ein Asset laut den Teil-Resilienzkenzahlen eine schlechte Bewertung gegenüber der REMAIN-Gefahr Erdbeben aufweisen. Befindet sich dieses Asset allerdings in der Erdbebenzone 0, werden die Teil-Resilienzkenzahlen in diesem konkreten Fall keine Relevanz für die Erstellung des Bauprogramms oder die Beurteilung des Gesamtnetzes haben. Dieser Umstand wird erst sichtbar, wenn die Teil-Resilienzkenzahlen $R_{y,i}$ und $R_{x,i}$ mit dem Gefahrenpotenzial GP (Kapitel 5) zu den Kennzahlen $R_{y,GP,i}$ und $R_{x,GP,i}$ verknüpft werden, wie in den nachfolgenden Gleichungen gezeigt.

$$R_{y,GP,i} = \sqrt{R_{y,i} \cdot GP} \quad \text{Gl. 5}$$

$$R_{x,GP,i} = \sqrt{R_{x,i} \cdot GP} \quad \text{Gl. 6}$$

Die Berechnung über das geometrische Mittel ergibt sich aus der Betrachtung der Resilienz als Volumenkörper (siehe Kapitel 5) mit den drei Dimensionen Funktionalität y , Zeit x und Gefahrenpotenzial GP und gleichzeitig dem Bestreben, die für die Bewertung der Einflussgrößen eingeführte Ordinalskala von 1 bis 5 mit den korrelierenden Ampelfarben nicht zu verlassen.

6.2.3.2 Berechnung der gemittelten Resilienzkenzahl R_i und Darstellung als Fläche

Grundsätzlich wurden die Kennzahlen $R_{y,i}$ und $R_{x,i}$ bewusst voneinander getrennt behandelt, da bei einem Verschneiden der zwei Dimensionen (bzw. der vier Teilindikatoren der Resilienz) zwangsläufig Information verloren geht. Dennoch wird es im Zuge des Hochaggregierens der einzelnen Teil-Resilienzkenzahlen notwendig sein, diese zwei Dimensionen zu einer Kennzahl zu vereinen. Zu diesem Zwecke wurde – in Anlehnung an Abbildung 8 – eine Berechnung der gemittelten Resilienzkenzahl R_i über das geometrische Mittel. Die Berechnung als geometrisches Mittel (Diagonale der durch $R_{y,i}$ und $R_{x,i}$ aufgespannten Fläche) wurde wie schon in Abschnitt 6.2.3.1 verwendet, um die eingeführte 1-5 Notenskala weiterhin verwenden zu können.

Die Berechnung der Gesamt-Resilienzkenzahl R_i gegenüber der Gefahr i erfolgt als geometrisches Mittel nach folgender Gleichung:

$$R_i = \sqrt{R_{x,i} \cdot R_{y,i}}$$

Gl. 7

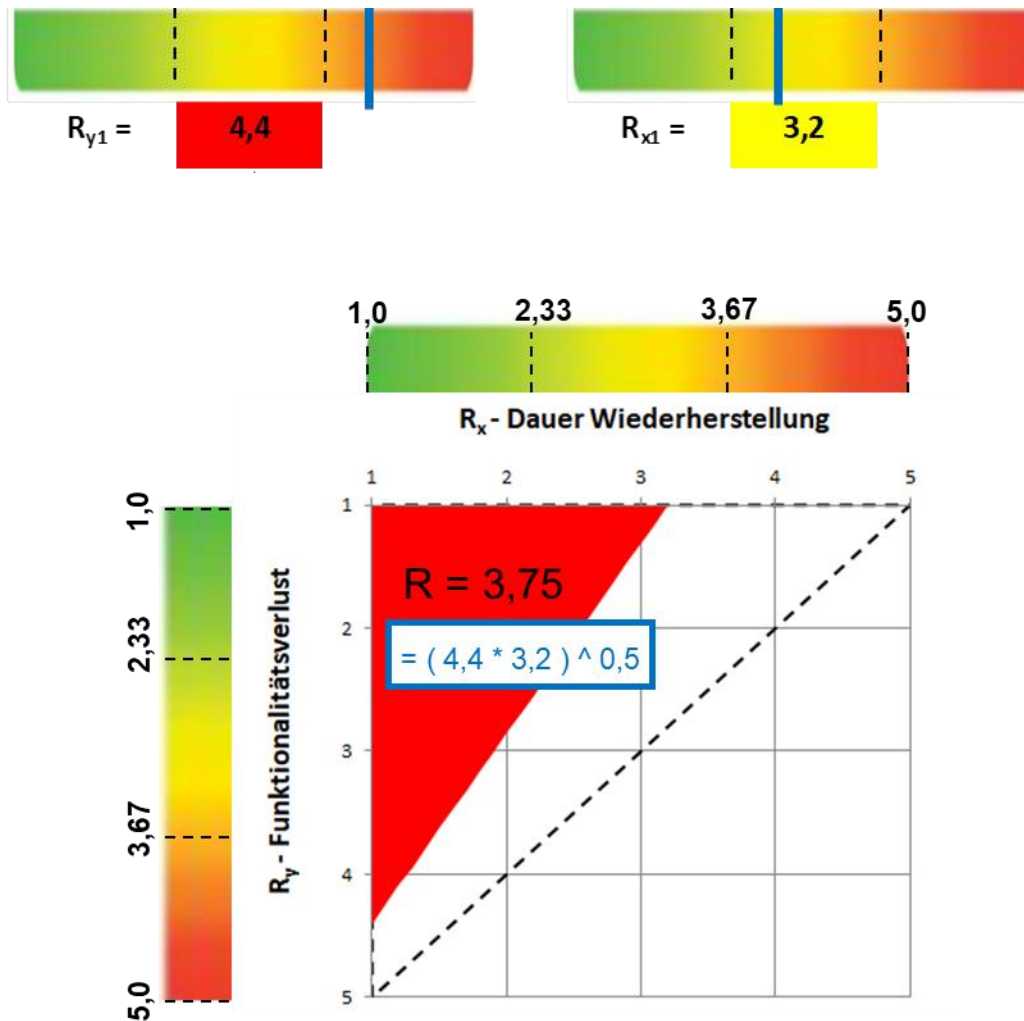


Abbildung 33: Darstellung der Teil-Resilienzkenzahlen $R_{y,i}$ und $R_{x,i}$ und Berechnung der gemittelten Resilienzkenzahl R_i (Diagonale der Fläche)

Zur Veranschaulichung der gemittelten Resilienzkenzahl R_i wurde eine flächenhafte Darstellung gewählt (siehe Abbildung 33 und Abbildung 34).

Die berechneten Teil-Resilienzkenzahlen $R_{y,i}$ und $R_{x,i}$ werden auf der Funktionalitäts- bzw. Zeitachse aufgetragen, die Größe und Form der aufgespannten Fläche geben Aufschluss über die Gesamtresilienz des betrachteten Assets gegenüber der Gefahr i . Diese Darstellungsart bietet gegenüber der Kennzahl allein den Vorteil, dass ersichtlich ist, welche Dimension in welchem Umfang zur gemittelten Resilienzkenzahl R_i beiträgt.

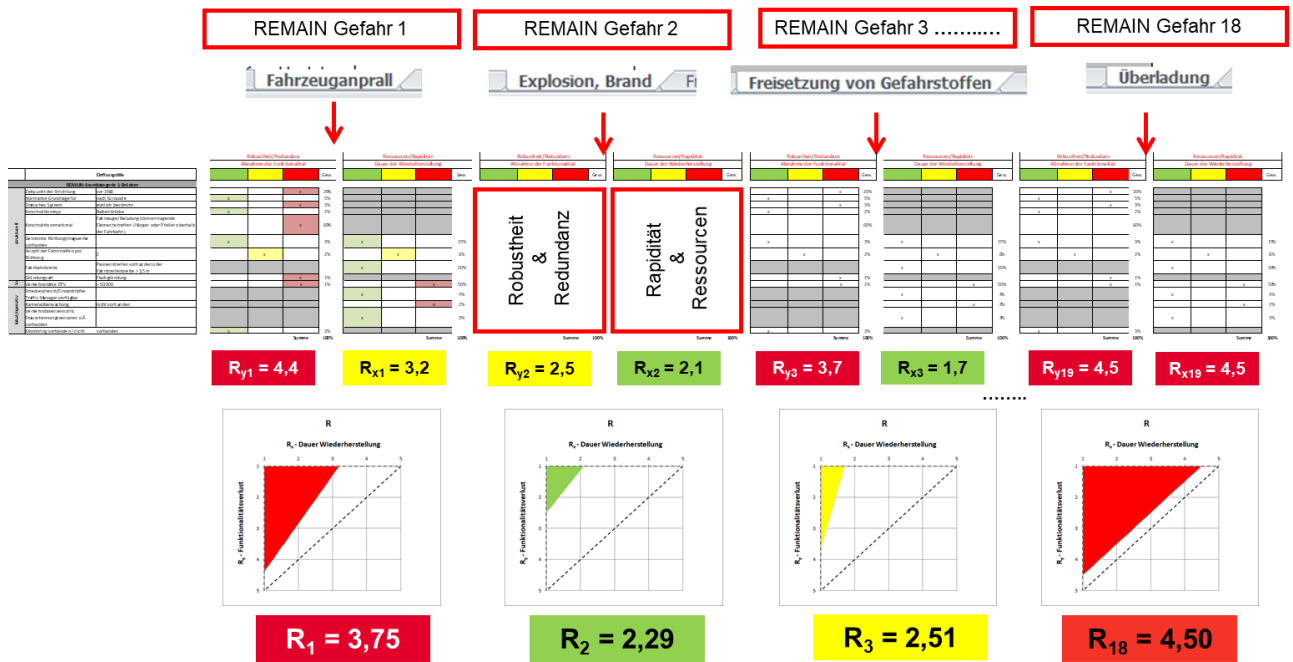


Abbildung 34: Flächendarstellung und Berechnung der gemittelten Resilienzkenzahlen R_i für Brücken exemplarisch für vier REMAIN-Gefahren

6.2.3.3 Berechnung der Gesamt-Resilienzkenzahl $R_{V,i}$ und Darstellung als Volumen

Die Darstellung der Resilienz als Volumen stellt eine Weiterentwicklung der flächigen Darstellung dar, indem das jeweilige Gefahrenpotenzial GP als dritte Dimension eingeführt wird (Abbildung 35).

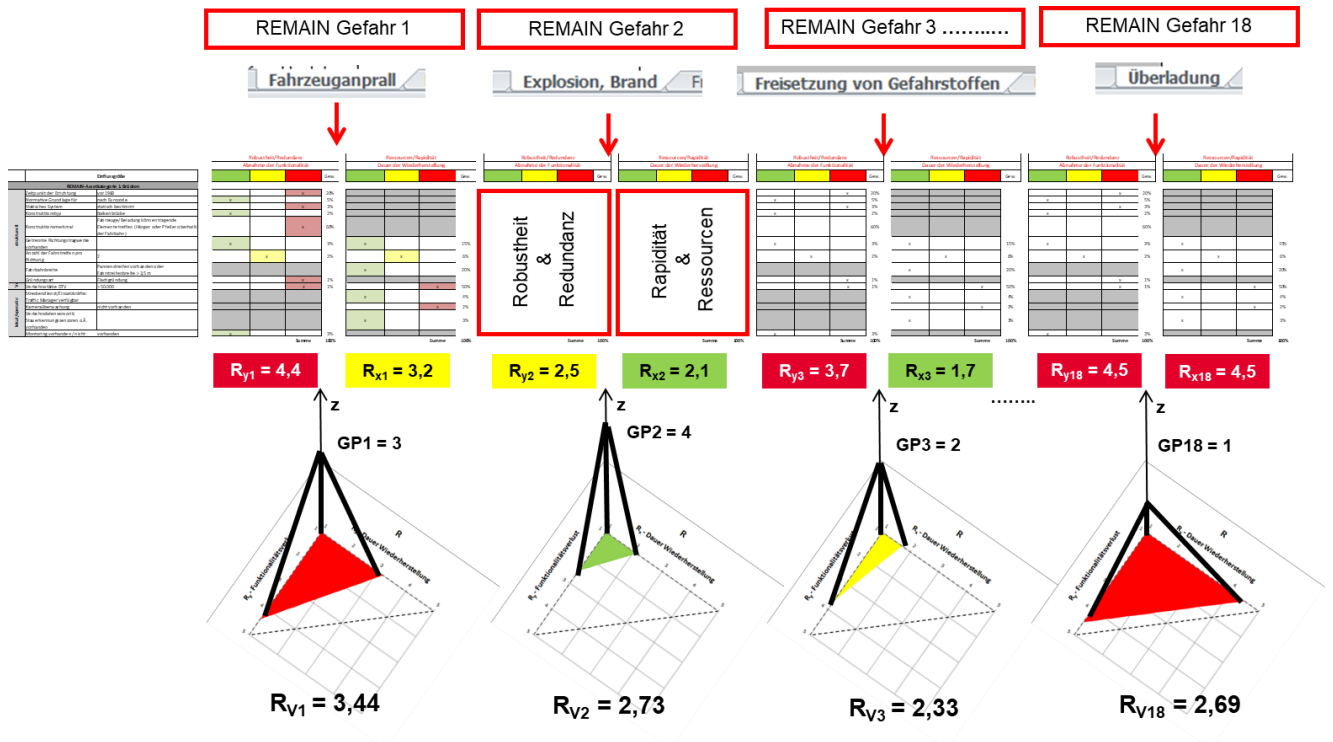


Abbildung 35: Volumendarstellung der Resilienz (Beispiel für Brücken) - exemplarisch für vier REMAIN-Gefahren

Die Berechnung der Gesamt-Resilienz $R_{V,i}$ in Form einer Zusammenführung dreier Dimensionen – wiederum als geometrisches Mittel – erfolgt nach folgender Gleichung:

$$R_{V,i} = \sqrt[3]{R_{x,i} \cdot R_{y,i} \cdot GP} \quad \text{Gl. 8}$$

Wiederum ist zu beachten, dass im Zuge der Zusammenführung dreier Resilienzdimensionen zu einer einzigen Kennzahl Information verloren geht.

Abschließend sind in **Abbildung 36** die verschiedenen Kennzahlen und ihre Berechnungsformeln übersichtlich zusammengefasst.

Teil-Resilienz Kennzahlen $R_{y,i}$ & $R_{x,i}$

$$R_{y,i} = \frac{\sum_{k=1}^n w_{k,y,i} \cdot r_{k,y,i}}{\sum_{k=1}^n w_{k,y,i}}$$

→ gefahrenspezifisch, assetspezifisch, dimensionsspezifisch

$$R_{x,i} = \frac{\sum_{k=1}^n w_{k,x,i} \cdot r_{k,x,i}}{\sum_{k=1}^n w_{k,x,i}}$$

Teil-Resilienz Kennzahlen verschnitten mit Gefahrenpotenzial $R_{y,GP,i}$ & $R_{x,GP,i}$

$$R_{y,GP,i} = \sqrt{R_{y,i} \cdot GP}$$

→ gefahrenspezifisch, assetspezifisch, dimensionsspezifisch,

$$R_{x,GP,i} = \sqrt{R_{x,i} \cdot GP}$$

standortspezifisch

Gemittelte Resilienz Kennzahl R_i

$$R_i = \sqrt{R_{x,i} \cdot R_{y,i}}$$

→ gefahrenspezifisch, assetspezifisch

Gesamt-Resilienz Kennzahl $R_{V,i}$

$$R_{V,i} = \sqrt[3]{R_{x,i} \cdot R_{y,i} \cdot GP}$$

→ gefahrenspezifisch, assetspezifisch, standortspezifisch

Abbildung 36: Übersicht über die zu ermittelnden Resilienz Kennzahlen und Berechnungsformeln (je Asset und Gefahr)

7 INTEGRATION UND IMPLEMENTIERUNG (AP 7)

7.1 Anwendungsrahmen Implementierungsleitfaden

Die Empfehlungen für die Integration und die Implementierung sind ein weiteres Ergebnis des Projektes REMAIN für die praktische Anwendung der entwickelten Modelle und Algorithmen. Dabei ist es notwendig, diese Erkenntnisse mit generellen Anforderungen aus den Geschäftsprozessen des Asset Managements der ASFINAG zu verknüpfen, sodass für eine umfassende Implementierung auch aus organisatorischer Sicht die richtigen Schritte gesetzt werden können.

Für eine erfolgreiche Implementierung wird grundsätzlich ein iterativer Prozess empfohlen, der in einem umfassenden Implementierungsleitfaden zusammengestellt ist. Dieser Implementierungsleitfaden kann dem Anhang 5 zu diesem Endbericht entnommen werden. Für eine Anwendung und eine erfolgreiche Implementierung sind dabei folgende Randbedingungen zu beachten:

- Definition von spezifischen Implementierungsfragen im Hinblick auf den Nutzen und den Aufwand einer umfassenden Implementierung der REMAIN-Erkenntnisse
- Verfügbarkeit der für eine REMAIN-Analyse erforderlichen Eingangsdaten unter Bezugnahme auf die hier beschriebenen Modelle und Algorithmen
- Anwendbarkeit der REMAIN-Modelle unter Heranziehung der zur Verfügung stehenden Daten sowie unter Berücksichtigung der Prozesse des Datenflusses
- Definition der Zielsetzungen für die Visualisierung bzw. Darstellung der Ergebnisse aus dem REMAIN Prozessen mit Bezug auf die jeweiligen Anwender bzw. Anwendergruppen innerhalb der Organisation der ASFINAG

Die Integration dieser aus den Randbedingungen ableitbaren Prozesse und Bausteine in ein Asset-Management-System ist der letzte Schritt im Rahmen der Implementierung, gefolgt von einem Verbesserungsprozess im Rahmen der praktischen Anwendung, der kontinuierlich vor allem das Management mit den Daten und Ergebnissen einer solchen Anwendung optimieren sollte. Auch die Anforderungen für die praktische Umsetzung in ein Asset Management System sind somit eine zentrale Frage für den Implementierungsleitfaden.

7.2 Überblick Inhalt Implementierungsleitfaden

Der im Anhang 5 dargestellte Implementierungsleitfaden ist so aufgebaut, dass eine schrittweise Implementierung sowie eine darauf aufbauende Verbesserung der REMAIN-Anwendungsvorschläge erzielt werden kann. Neben den technischen Anforderungen befasst sich der Implementierungsleitfaden auch mit den organisatorischen Randbedingungen und Herausforderungen. Vor dem Start einer umfassenden Implementierung sind somit auch organisatorische Fragen mit den betroffenen Personengruppen (Zielgruppen und Zielpersonen auf unterschiedlichen Entscheidungsebenen) zu diskutieren. Diese Fragen sind ebenfalls im Implementierungsleitfaden zusammengestellt.

Der Implementierungsleitfaden unterstützt mit folgendem Inhalt die Integration sowie praktische Anwendung von REMAIN:

- Implementierungsfragen und Anwendungsrahmen für eine zielgerechte bzw. zielorientierte und somit effiziente Implementierung
- Anforderungen an die Eingangsdaten
 - Generelle Anforderungen
 - Spezifische Anforderungen für die Anwendung der REMAIN-Algorithmen
- Prozesse der Implementierung
 - Implementierung von REMAIN unter Heranziehung der Mindestanforderungen
 - Erweiterung von REMAIN unter Heranziehung von zusätzlichen Daten und Informationen
 - Anforderungen an Asset Management Systeme
- Ergebnisse und Präsentationsvorschläge
 - Anforderungen an die Ergebnisse
 - Kennwert Prioritätenreihung – Verbesserungspotential Resilienz
 - Vorschläge für die Anwendung der Ergebnisse für die strategische Erhaltungsplanung
 - Empfehlungen zur Visualisierung der Ergebnisse (REMAIN Dashboard, REMAIN-Streckenband, Resilienz-Karte und REMAIN-Label)
- Weitere Empfehlungen

- Prozesse nach der Implementierung
- Risiko der Implementierung

Wie bereits erwähnt, kann der gesamte Implementierungsleitfaden dem Anhang 5 entnommen werden.

7.3 REMAIN im Erhaltungsmanagement

Es sei an dieser Stelle nochmals explizit darauf hingewiesen, dass der im Rahmen des gegenständlichen Forschungsprojektes entwickelte Algorithmus auch für weiterführende Fragestellung im Erhaltungsmanagement der ASFINAG oder anderer Straßenverkehrsinfrastrukturbetreiber verwendet werden kann. Im Rahmen der Diskussionen mit den Auftraggebern wurden dabei folgende zukünftigen Aufgabenbereiche skizziert, die im Rahmen einer Implementierung zu präzisieren wären:

- Analyse der aktuellen Resilienzsituation auf dem gesamten Netz der ASFINAG (und nicht nur auf den im Bauprogramm aufgelisteten Abschnitten)
- Vergleich von unterschiedlichen Erhaltungsszenarien unter Verwendung der in REMAIN entwickelten Resilienzkennzahlen
- Prognose der Resilienz unter Verwendung der mit Lebenszyklusprozessen und Prognosen verknüpften Asset Management Systemen (z.B. Pavement Management System und Brücken Management System)
- Überprüfung der Anwendung der Resilienzkennzahlen als Zielfunktion im Rahmen einer Optimierung
- Abgrenzung der Anwendbarkeit der entwickelten Resilienzmethodik auf die Gefahr eines Ausfalls durch einen mangelnden Zustand bestimmter Assets oder Subassets oder durch weitere, bis dato nicht quantifizierte Gefahren

LITERATURVERZEICHNIS

- [1] Deutsche Akademie der Technikwissenschaften (Hrsg.) (2014). Resilience-by-Design: Strategie für die technologischen Zukunftsthemen. acatech Studie.
- [2] Weber Righi, A., Abreu Saurin, T. und Wachs, P. (2015). A systematic literature review of resilience engineering - Research areas and a research agenda proposal. Reliability Engineering and System Safety vol.141.
- [3] Hosseini, S., Barker, K. und Ramirez-Marquez, J. E. (2015). A review of definitions and measures of system resilience, Reliability Engineering and System Safety 145.
- [4] Bundesanstalt für Straßenwesen (2020). Resilienz der Straßenverkehrsinfrastruktur – Stand der Forschung und Potenziale im Management von außergewöhnlichen Ereignissen. Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt), Bergisch Gladbach (unveröffentlicht)
- [5] Dong, Y. und Frangopol, D. M. (2015). Risk and resilience assessment of bridges under mainshock and aftershocks incorporating uncertainties. Engineering Structures vol. 83.
- [6] Brown, C., Seville, E. und Vargo, J. (2017). Measuring the organizational resilience of critical infrastructure providers: A New Zealand case study, International Journal of Critical Infrastructure Protection. Sheffield (NZ).
- [7] Mileti, D. (1999). Disasters by design - a reassessment of natural hazards in the United States. Joseph Henry Press, Washington, DC (US).
- [8] Whitman, R., Anagnos, T., Kircher, C., Lagorio, H., Lawson, R. und Schneider, P. (1997). Development of a national earthquake loss estimation methodology. Earthquake Spectra 13 (4).
- [9] Miles, S. und Chang, S. (2006). Modeling community recovery from earthquakes. Earthquake Spectra 22 (2).
- [10] Miles, S. und Chang, S. (2011). ResilUS: a community based disaster resilience model. Cartography and Geographic Information Science 38 (1).
- [11] Zhang, W. und Wang, N. (2016). Resilience-based risk mitigation for road networks, Structural Safety vol. 62, pp 57-65.
- [12] RESILENS Project (2016). Deliverable D2.2: Qualitative, Semi-Quantitative and Quantitative Methods and Measures for Resilience Assessment and Enhancement. <http://resilens.eu/>
- [13] INFRARISK (FP7) Project (2016). Novel indicators for identifying critical infrastructure at risk from Natural Hazards. <https://www.infrarisk-fp7.eu/>
- [14] MATRIX (FP7) Project (2014). New methodologies for multi-hazard and multi-risk assessment methods for Europe.
- [15] IN2RAIL Project (2016). Innovative Intelligent Rail, Deliverable D4.1 Report on key parameters for bridge and tunnel inspections.

- [16] TRIMM (FP7) Project (2015). Tomorrow's Road Infrastructure Monitoring and Management. Deliverable D3.2 - Final report of advanced bridge monitoring techniques.
- [17] Hu, B., Leitner und M., Raidl, G. (2010). The generalized minimum edge-biconnected network problem: Efficient neighborhood structures for variable neighborhood search. *Networks* 55.
- [18] Sterbenz, J., Hutchison, D., Çetinkaya, E., Jabbar, A., Rohrer, J., Schöller, M. und Smith, P. (2010). Resilience and survivability in communication networks: Strategies, principles, and survey of disciplines. *Computer Networks* 54 (8).
- [19] Chen, L. und Miller-Hooks, E. (2012). Resilience: an indicator of recovery capability in intermodal freight transport. *Transportation Science* 46.1.
- [20] Miller-Hooks, E., Zhang, X. und Faturechi, R. (2012). Measuring and maximizing resilience of freight transportation networks. *Computers & Operations Research* 39 (7).
- [21] Faturechi, R. und Miller-Hooks, E. (2014). Travel time resilience of roadway networks under disaster. *Transportation research part B: methodological* 70.
- [22] Jenelius, E. Petersen, T. und Mattsson L. (2006). Importance and exposure in road network vulnerability analysis. *Transportation Research Part A: Policy and Practice* 40 (7).
- [23] Mattsson, L., Jenelius, E. (2015). Vulnerability and resilience of transport systems – a discussion of recent research. *Transportation Research Part A: Policy and Practice* 81.
- [24] PIARC (2022). Disaster Management Manual. <https://www.piarc.org/en/PIARC-knowledge-base-Roads-and-Road-Transportation/Road-Administration/Risk-Management/Disaster-Management-Manual>.
- [25] Scott, D., Novak, D., Aultman-Hall, L. und Guo, F. (2006). Network robustness index: A new method for identifying critical links and evaluating the performance of transportation networks. *Journal of Transport Geography* 14 (3).
- [26] Dijkstra, E. (1959). A note on two problems in connexion with graphs. *Numerische Mathematik* 1.
- [27] Li, J., Mirchandani, P. und Borenstein, D. (2009). Real-time vehicle rerouting problems with time windows. *European Journal of Operational Research*, Volume 194, Issue 3.
- [28] van der Merwe, M., Ozlen, M., Hearne, J. und Minas, J. (2017). Dynamic rerouting of vehicles during cooperative wildfire response operations. *Annals of Operations Research* 254 (3).
- [29] Ahuja, R., Magnanti, T. und Orlin, J. (1993). *Network flows: theory, algorithms, and applications*. Upper Saddle River, NJ (US).
- [30] Crainic, T. (2000). Service network design in freight transportation. *European Journal of Operational Research* 122.2.

- [31] Najafi, M., Eshghi, K. und de Leeuw, S. (2014). A dynamic dispatching and routing model to plan/re-plan logistics activities in response to an earthquake. *OR spectrum* 36 (2).
- [32] Nolz, P., Doerner K., Gutjahr, W. und Hartl, R. (2010). A Bi-objective Metaheuristic for Disaster Relief Operation Planning. *Advances in multi-objective nature inspired computing* 272.
- [33] Özdamar, L. und Demir, O. (2012). A hierarchical clustering and routing procedure for large scale disaster relief logistics planning. *Transportation Research Part E Logistics and Transportation Review* 48 (3).
- [34] AllTrain Project (2015). All-Hazard Guide for transport infrastructure. <https://www.alltrain-project.eu/>
- [35] FORESEE Project (2022). Future proofing strategies for resilient transport networks against Extreme Events. <https://foreseeproject.eu>
- [36] RESIST Project (2020). RESilient transport InfraSTructure to extreme events. <https://www.resistproject.eu>.
- [37] RITUN Project (2020). Resiliente Straßentunnel. https://www.bast.de/BASt_2017/DE/Publikationen/Fachveroeffentlichungen/Ingenieurbau/Downloads/B3-RITUN/RITUN.html.
- [38] RVS 09.03.11 (2019). Tunnel-Risikoanalysemodell, Richtlinien und Vorschriften für den Straßenbau, Forschungsgesellschaft Straße - Schiene - Verkehr (FSV), Wien.
- [39] Haidin, R., Hain, D., Honeger, C. und Tanasic, N. (2021). Improving Resilience of Road networks- Framework. *PIARC Routes/Roads* Nr. 389/ 2.
- [40] Cimellaro, G., Reinhorn, A. und Bruneau, M. (2010). Framework for analytical quantification of disaster resilience. *Engineering Structures* 32.
- [41] Cutter, S., Burton, C. und Emrich, C. (2010). Disaster resilience indicators for benchmarking baseline conditions. *Journal of Homeland Security and Emergency Management* 7 (1).
- [42] DARWIN Project (2018). Expecting the unexpected and know how to respond. <https://h2020darwin.eu/>
- [43] Deublein, M., Roth, F., Bruns, F. und Zulauf, C. (2021). Reaktion- und Wiederherstellungsprozess für die Straßeninfrastruktur nach disruptiven Ereignissen, *BASt-Forschungsbericht Heft B 165*.
- [44] Fisher, R., Bassett, G., Buehring, W., Collins, M., Dickinson, D., Eaton, L., Millier, D., Petit, F., Peyton, S., Wallace, K., Whitfield, R. und Peerenboom J. (2010). Constructing a resilience index for the enhanced critical infrastructure protection program - *Decision and Information Sciences*. Argonne, IL (US).
- [45] Fritzsche, K., Schneiderbauer, S., Bubeck, P., Kienberger, S., Buth, M., Zebisch, M. und Kahlenborn, W. (2014). *The Vulnerability Sourcebook - Concept and guidelines for standardised vulnerability assessments*.

- [46] Hughes, J. und Healy, K. (2014). Measuring the resilience of transport infrastructure. New Zealand Transport Agency research report 546. ISBN 978-0-478-41915-3.
- [47] IMPROVER Project (2018). Improved risk evaluation and implementation of resilience to critical infrastructure. <https://cordis.europa.eu/project/id/653390/de>
- [48] INTACT Project (2017). Impact of extreme weather on critical infrastructure. <http://www.intact-project.eu/>
- [49] Opus International Consultants Ltd. (2016). National State Highway Resilience - 9 Priority Programme Business Case Corridors. NZ Transport Agency, Wellington, New Zealand.
- [50] NIST SP 1190 (2016). Community Resilience Planning Guide for Buildings and Infrastructure Systems, National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, USA.
- [51] PIARC briefing Note TC 1.4 (2021). Terminology on resilience and coordination with related PIARC technical committees (unveröffentlicht).
- [52] RAIN Project (2017). Risk analysis of infrastructure networks in response to extreme weather. <https://www.rain-project.eu>
- [53] RAINEX Project (2016). Risk-based approach for the protection of land transport infrastructure against extreme rainfall. <http://www.rainex-project.eu/>
- [54] RESOLUTE Project (2016). Resilience management guidelines and operationalization applied to urban transport environment. <http://www.resolute-eu.org>
- [55] SeRoN Project (2012). Security of Road transport Networks. <http://www.seron-project.eu/>
- [56] SKRIBT Project (2011). Schutz kritischer Brücken und Tunnel im Zuge von Straßen. VDI Technologiezentrum GmbH, Düsseldorf, Deutschland.
- [57] Smart Resilience Project (2016). Smart Resilience Indicators for Smart Critical Infrastructure. <http://www.smartresilience.eu-vri.eu/>. European Risk & Resilience Institute (EU-VRI), Stuttgart, Deutschland.
- [58] SMR Project (2018). Smart Mature Resilience. <https://smr-project.eu>
- [59] SPUR Project (2009). Defining resilience - What San Francisco needs from its seismic mitigation policies. <http://www.spur.org/>
- [60] STREST Project (2013). Harmonized approach to stress tests for critical infrastructures against natural hazards. <http://www.strest-eu.org/>
- [61] UNISDR/UNDRR (2012). How to make cities more resilient: a handbook for local government leaders. United Nations Office for Disaster Risk Reduction UNDRR, <https://www.unisdr.org/campaign/resilientcities/>
- [62] APCC - Austrian Panel on Climate Change Report (2014). Austrian Assessment Report 2014, Wien.
- [63] SHARE Project. Seismic Hazard Harmonization in Europe. <http://www.share-eu.org/>

- [64] RVS 13.03.11 (2009). Überwachung, Kontrolle und Prüfung von Kunstbauten, Straßenbrücken, Richtlinien und Vorschriften für den Straßenbau, Forschungsgesellschaft Straße - Schiene - Verkehr (FSV), Wien.
- [65] RVS 13.03.31 (2013). Überwachung, Kontrolle und Prüfung von Kunstbauten, Straßentunnel, baulich konstruktive Teile. Richtlinien und Vorschriften für den Straßenbau, Forschungsgesellschaft Straße Schiene Verkehr (FSV), Wien.
- [66] Holling, C. (1973). Resilience and stability of ecological systems. Annual Review of Ecology and Systematics 4.
- [67] Scharte, B., Hiller, D., Leismann, T. und Thoma, K. (2014). Resilien-Tech. „Resilience-by-Design“: Strategie für die technologischen Zukunftsthemen. Freiburg, Deutschland.
- [68] JCSS (2008). Risk Assessment in Engineering: Principles, System Representation & Risk Criteria. Joint Committee of Structural Safety.
- [69] ISO 31000 (2009). Risk Management – Principles and guidelines.
- [70] ASFINAG (2020). Netzzustandsbericht (internes Dokument).
- [71] EINSTEIN (2015). Risikobasiertes Entscheidungsmodell zur Ermittlung des optimalen Instandsetzungszeitpunktes von Infrastrukturbauten. Verkehrsinfrastrukturforschung.
- [72] ASFINAG (2020). Naturgefahren-Management in der BMG – Handlungsleitfaden.
- [73] Eidsvig, U., Santamaría, M., Galvão, N., Tanasic, N., Piciullo, L., Hajdin, R., Nadim, F., Sousa, H. und Matos, J. (2021). Risk Assessment of Terrestrial Transportation Infrastructures Exposed to Extreme Events. Infrastructures 2021, 6, 163. <https://doi.org/10.3390/infrastructures6110163>.
- [74] Proske, D., Hostettler, S. und Friedl, H. (2020). Korrekturfaktoren der Einsturzwahrscheinlichkeit von Brücken. Beton- und Stahlbetonbau, 115: 128-135. <https://doi.org/10.1002/best.201900072>.
- [75] Proske, D. (2018): Versagenshäufigkeiten und Versagenswahrscheinlichkeiten von Brücken, Tagungsband 28. Dresdner Brückenbausymposium, ISSN 1613-1169, Technische Universität Dresden.
- [76] Schneider, R., Fischer, J., Bügler, M., Nowak, M., Thöns, S., Borrmann, A. und Straub, D. (2015). Assessing and updating the reliability of concrete bridges subjected to spatial deterioration-principles and software implementation. Structural Concrete 16 (2015), H. 3, pp. 356–365.
- [77] Austrian Standards Institute (2014). Normensammlung Schutz vor Naturgefahren – Die Normenreihe ONR 24800 über Wildbach-, Lawinen- und Steinschlagschutzbauwerke, Wien.
- [78] ASFINAG (2013). HB 029 SG ASG Planungsanweisung Lärmschutz (V2.00).
- [79] Bundesgesetz über die Sicherheit von Straßentunneln (Straßentunnel-Sicherheitsgesetz – STSG). BGBl. I Nr. 54/2006.
- [80] ÖNORM B 4008-2 (2018). Bewertung der Tragfähigkeit bestehender Tragwerke - Teil 1: Brückenbau.

- [81] ÖNORM EN 1992-1-1 (2015). Eurocode 2: Bemessung und Konstruktion von Stahlbeton- und Spannbetontragwerken - Teil 1-1: Allgemeine Bemessungsregeln und Regeln für den Hochbau.
- [82] ÖNORM EN 1991-1-4 (2011). Eurocode 1: Einwirkungen auf Tragwerke - Teil 1-4: Allgemeine Einwirkungen – Windlasten.
- [83] Weninger-Vycudil, A., Simanek, P., Brozek, B. und Litzka, J. (2016). Handbuch Pavement Management in Österreich, Im Auftrag der ASFINAG, Wien (unveröffentlicht).