

**Fachveröffentlichung der
Bundesanstalt für Straßenwesen**

bast

Stand der Technik hinsichtlich der Bewertung von Resilienzmaßnahmen

22. November 2017

Bericht zum BASt-Forschungsprogramm Straßenwesen
FE 89.0320/2016

Forschungsnehmer: EBP Schweiz AG
Zollikerstraße 65
CH-8702 Zollikon

Forschungsgeber: Bundesanstalt für Straßenwesen BASt
Brüderstraße 53
D-51427 Bergisch Gladbach

Bearbeiter: Markus Deublein
Frank Bruns
Franziska Roth
Christoph Zulauf

Kurzfassung

Eine wesentliche Herausforderung für Entscheidungsträger im Infrastrukturmanagement besteht in der Beurteilung der Resilienz ihres Infrastrukturnetzes (und der zugehörigen Einzelobjekte) sowie in der Wahl geeigneter Maßnahmen, um die Resilienz ihres Netzes zu gewährleisten oder im Bedarfsfall sogar zu erhöhen. Insbesondere unter Berücksichtigung immer knapper werdender Ressourcen ist es erforderlich, anhand geeigneter Methoden nur solche Maßnahmen zur Erhöhung der Resilienz durchzuführen, die in einem ausgewogenen Verhältnis zwischen Maßnahmenkosten und dem dadurch bewirkten Nutzen stehen.

Das Ziel des vorliegenden Forschungsvorhabens besteht in der Erarbeitung einer Übersicht des aktuellen Stands an Methoden zur Abwägung von Nutzen und Kosten von Maßnahmen zur Erhöhung der Resilienz von Straßeninfrastrukturen. Auf dieser Grundlage sollen Empfehlungen zur Wahl geeigneter Verfahren resp. methodischer Ansätze ausgesprochen werden. Anhand von Fallbeispielen soll abschließend der aktuelle internationale Anwendungsstand von Resilienzkonzepten in der Praxis aufgezeigt werden.

Die Untersuchungen beruhen auf einer umfassenden Literaturstudie, in der sowohl wissenschaftliche Publikationen, als auch technische Berichte, Richtlinien und Normen analysiert wurden. Die Literaturstudie spiegelt kritisch den aktuellen, internationalen Stand der Technik bezüglich Methoden zur Bewertung von Resilienzmaßnahmen an Objekten und Netzen der Straßenverkehrsinfrastruktur.

Definition Resilienz

Unter Resilienz wird die Fähigkeit eines Systems verstanden, sich auf (potenziell) schadhafte Ereignisse vorzubereiten, sie einzukalkulieren, sie abzuwehren, sie zu verkräften und sich möglichst schnell davon zu erholen. Schadhafte Ereignisse sind menschlich, technisch sowie natürlich verursachte außergewöhnliche Ereignisse oder Veränderungsprozesse, die extreme oder katastrophale Folgen haben.

Definition Resilienzmaßnahmen

Unter Resilienzmaßnahmen werden jene baulichen, technischen, planerischen und organisatorischen Maßnahmen am Einzelobjekt (z.B. Brücke oder Tunnel) oder für das gesamte Infrastrukturnetz verstanden, die über die Vorgaben aus den geltenden Regelwerken (Normen, Design Codes, etc.) hinausgehen (z.B. Verwendung von Hochleistungsbeton bei Brücken, wenn gemäß Norm aufgrund der Pla-

nungssituation eigentlich nur konventionelle Betontypen vorgesehen sind). Resilienzmaßnahmen lassen sich entweder einem Objekt oder einem Infrastrukturnetz bzw. einer Region zuordnen.

Bewertung von Resilienzmaßnahmen

Das entwickelte Vorgehen zur Bewertung von Resilienzmaßnahmen lehnt sich an bereits etablierte Vorgehensprinzipien an, wie sie beispielweise im Kontext von Risikoanalysen oder bei der Bewertung von Aus- und Neubaumaßnahmen in der Verkehrsplanung zur Anwendung kommen. Um der Perspektive von objekt- oder netzbezogenen Resilienzbeurteilungen gerecht zu werden, wurden die Vorgehensschritte entsprechend modifiziert. Die nachfolgende Abbildung 1 zeigt das prinzipielle Vorgehen zur Bewertung von Resilienzmaßnahmen.

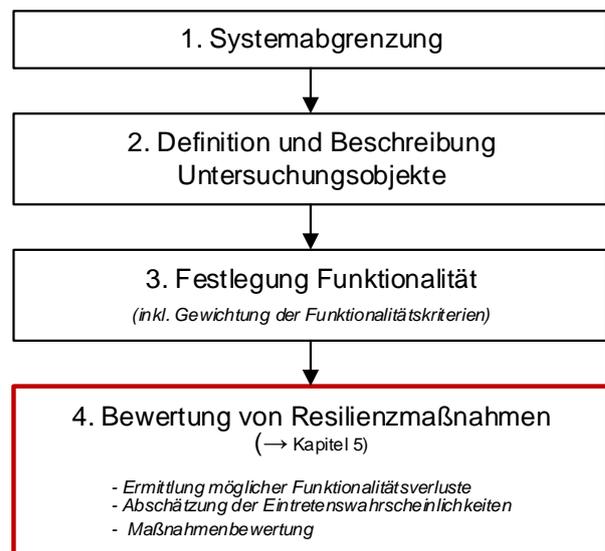


Abbildung 1: Prinzipielles Vorgehen bei der Bewertung von Resilienzmaßnahmen.

Im internationalen Vergleich zeigt sich, dass zwischen den einzelnen Ländern zwar teilweise bedeutende Unterschiede bestehen, aber auch wichtige Gemeinsamkeiten in der methodischen Vorgehensweise existieren. Am häufigsten wird eine Nutzen-Kosten-Analyse durchgeführt und in vielen Fällen mit weiteren Kriterien ergänzt sowie zu einer Multikriterienanalyse (VWA, KWA, NWA) oder einer Kombination aus Nutzen-Kosten-Analyse und Multikriterienanalyse ausgebaut.

Für Resilienzmaßnahmen sollten die Kosten und die Wirkungen – je nach Planungsstand – möglichst gut geschätzt werden. Dies gilt für die Investitionen, die reduzierten Wahrscheinlichkeiten für schadhafte Ereignisse, deren Einwirkung auf die Funktionalität des Systems, das Schadensausmaß und die Zeit-

dauer der Erholung des Systems. Solche Abschätzungen sollten den Einsatz verschiedener Bewertungsmethoden mit unterschiedlichem Tiefgang (bis zur Nutzen-Kosten-Analyse) ermöglichen. Nach Möglichkeit sollten die Unschärfen der Abschätzungen in der Bewertung der Resilienzmaßnahmen berücksichtigt werden. Falls nicht alle erwarteten Wirkungen monetarisierbar sind, können ergänzend auch die Vergleichswert-, Nutzwert- oder Kosten-Wirksamkeits-Analyse durchgeführt werden. Für eine verlässliche Bewertung von Resilienzmaßnahmen sollten dann allerdings alle drei Verfahren gemeinsam angewendet werden. Eine Erkenntnis aus den Untersuchungen ist überdies, dass die gesamtwirtschaftlichen Auswirkungen von Maßnahmen in Deutschland in aktuellen Projekten und Vorgaben für Projekte nicht berücksichtigt werden.

Untersuchung von Fallbeispielen

Anhand von ausgewählten, internationalen Fallbeispielen wird gezeigt, wie sich der aktuelle Anwendungsstand des Resilienzkonzepts im praktischen Alltag des Infrastrukturmanagements darstellt.

Bei der Recherche nach Fallbeispielen wurde offensichtlich, dass der Begriff Resilienz heute zwar in vielen verschiedenen wissenschaftlichen Disziplinen verwendet wird. Was jedoch in der wissenschaftlichen Theorie als ein bereits akzeptiertes und etabliertes Konzept erscheint, ist in der täglichen Praxis des Infrastrukturmanagements bisher nur selten umfänglich umgesetzt. Zwar werden häufig Bewertungen von Verkehrsmaßnahmen durchgeführt. Diese sind aber weniger Resilienzmaßnahmen, sondern hauptsächlich für Neu- und Ausbauprojekte erstellt worden.

Aus den analysierten Fallbeispielen lässt sich aus einem übergeordnetem Blickwinkel ableiten, dass das Thema bereits bei den Entscheidungsträgern angekommen, die Umlegung und Implementierung in den praktischen Alltag von Infrastrukturmanagern aber noch sehr punktuell und eher selten vollzogen sowie kaum dokumentiert ist.

Empfehlungen

Für die Wahl geeigneter Verfahren und Methoden zur Bewertung von Resilienzmaßnahmen wird empfohlen, das Resilienzkonzept, wie es in diesem Bericht beschrieben ist, nach Möglichkeit in bestehende Verfahren einzubetten und nicht verschiedene neue Bewertungsverfahren zu entwickeln.

Ein innovativer Ansatz für ein Resilienzmanagement, der in einem ersten Schritt eher pragmatisch erfolgen sollte, könnte in einem zweistufigen Verfahren liegen:

- 1) Netscreening auf übergeordneter Ebene (mit geringem Analyse-Tiefgang) zur Identifikation der Schwachstellen im System. Dabei sollte folgenden Fragen nachgegangen werden: Welche Elemente eines Systems sind als besonders kritisch zu beurteilen (Kritikalität)? Wo besteht ein erhöhter Resilienzbedarf aufgrund einer potenziellen Bedrohungslage?
- 2) Unter Kenntnis der kritischen Elemente im System (Ergebnisse aus Schritt 1, Netscreening) sollten konkrete, vertiefte, komplexere Resilienzanalysen auf Objektebene durchgeführt werden. Die entscheidende Fragestellung dabei lautet: Wo lohnt es sich, wie viel zur Erhöhung der Resilienz zu investieren? Welche Systemelemente und schadhafte Ereignisse gehören in den Analysehorizont? Was sind die tatsächlich wichtigsten (zu bewertenden) Funktionalitätskomponenten?

Ein zukünftig noch zu etablierendes Resilienzmanagement kann auf die beschriebenen Bewertungsverfahren abgestützt werden. Je nach Umfang der Resilienzmaßnahme ist auch der Umfang der Wirkungsermittlung mit zunehmender Komplexität und zunehmenden Aufwand behaftet. Aufgrund des großen Aufwands im Rahmen der Monetarisierung der einzelnen Komponenten der Systemfunktionalität wird empfohlen, nur bei eher aufwändigen (teuren) Resilienzmaßnahmen auf die Bewertungsmethode der Nutzen-Kosten-Analyse zurückzugreifen. Eine Bewertung von Resilienzmaßnahmen mit geringen Kostenfolgen ist alternativ auch anhand der anderen Methoden möglich (einzeln oder am besten in Kombination).

Nicht zuletzt wird ein einheitliches Begriffsverständnis und die Verwendung einheitlicher Begriffe empfohlen: Alle Beteiligten im Kontext des Infrastrukturmanagements sollen dieselben Begriffe mit demselben Verständnis bei der Diskussion von Resilienzmaßnahmen verwenden. Dazu legt der vorliegende Bericht den Grundstein.

Inhalt

1	Einleitung	7
1.1	Ausgangslage	7
1.2	Problemstellung	7
1.3	Vorgehen	7
2	Resilienz	8
2.1	Definition	8
2.2	Ermittlung von Resilienz	12
3	Resilienzmaßnahmen	13
3.1	Definition	13
3.2	Übersicht und Typisierung	13
4	Vorgehen zur Bewertung von Resilienzmaßnahmen	15
4.1	Systemabgrenzung	15
4.2	Definition und Beschreibung der Untersuchungsobjekte	16
4.3	Abbilden der Funktionalität	16
5	Methodische Ansätze zur Bewertung von Resilienzmaßnahmen	18
5.1	Allgemeines	18
5.2	Ermittlung des möglichen Funktionalitätsverlusts	18
5.3	Abschätzung der Eintrittswahrscheinlichkeit	19
5.4	Methoden zur Bewertung von Resilienzmaßnahmen	19
5.5	Fazit	23
6	Fallbeispiele	25
7	Schlussfolgerungen und Empfehlungen	28
7.1	Schlussfolgerungen	28
7.2	Empfehlungen	29
8	Ausblick	30
A1:	Factsheets zu Fallbeispielen	37
A2:	Beispiele für gesamtwirtschaftlichen Folgeabschätzungen von Verkehrsmaßnahmen	51

1 Einleitung

1.1 Ausgangslage

Die Sicherstellung der Resilienz der Infrastruktur im Falle von natürlichen oder vom Menschen verursachten, schadhafte Ereignissen gewinnt für die Betreiber von Infrastrukturen zunehmend an Bedeutung. Durch geeignete bauliche, technische oder organisatorische Maßnahmen soll gewährleistet werden, dass der Ereignisfall möglichst vermieden wird oder im Ereignisfall die Verfügbarkeit und Funktionalität des betroffenen Infrastrukturnetzes für sämtliche Nutzergruppen erhalten bleibt, indem die Ereignisfolgen gemildert und die Funktionalität des Systems möglichst schnell wiederhergestellt werden.

Eine wesentliche Herausforderung für die Entscheidungsträger besteht in der Beurteilung der Resilienz ihres Infrastrukturnetzes (und der zugehörigen Einzelobjekte) sowie in der Wahl geeigneter Maßnahmen, um die Resilienz ihres Netzes zu gewährleisten oder im Bedarfsfall sogar zu erhöhen. Insbesondere unter Berücksichtigung immer knapper werdender Ressourcen ist es erforderlich, anhand geeigneter Methoden nur solche Maßnahmen zur Erhöhung der Resilienz durchzuführen, die in einem ausgewogenen Verhältnis zwischen Maßnahmenkosten und dem dadurch bewirkten Nutzen stehen.

Das Thema Resilienz ist ein wichtiger Bestandteil der langfristigen strategischen Ausrichtung der Forschungsvorhaben der Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt).

1.2 Problemstellung

Als Ausgangspunkt für vertiefte zukünftige Untersuchungen der BASt wird in der vorliegenden Studie der aktuelle Stand der Forschung zur Bewertung von Resilienzmaßnahmen dargestellt. In dieser Arbeit soll in Abhängigkeit spezifischer Kriterien geprüft werden, welche Verfahren zur Bewertung von Maßnahmen in welchen Situationen und Zeitpunkten zur Verbesserung der Resilienz am besten geeignet sind.

Das Ziel des Forschungsvorhabens besteht in der Erarbeitung einer Übersicht des aktuellen Stands an Methoden zur Abwägung von Nutzen und Kosten von Maßnahmen zur Erhöhung der Resilienz von Straßeninfrastrukturen. Auf dieser Grundlage sollen Empfehlungen zur Wahl geeigneter Verfahren resp. methodischer Ansätze ausgesprochen werden.

Anhand von Fallbeispielen soll abschließend der aktuelle internationale Anwendungsstand von Resilienzkonzepten in der Praxis aufgezeigt werden.

1.3 Vorgehen

Die Untersuchungen des Standes der Technik hinsichtlich der Bewertung von Resilienzmaßnahmen wird in die folgenden fünf Hauptfragestellungen gegliedert (Abbildung 2).

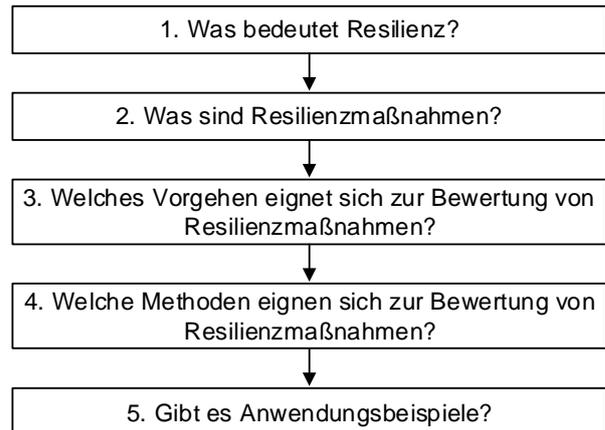


Abbildung 2: Hauptfragestellungen für Projektbearbeitung

„Resilienz“ ist ein moderner und vielseitig verwendeter Begriff. Dies nicht nur im Infrastrukturmanagement, sondern auch (und vor allem) in vielen anderen Disziplinen. Das Ziel der ersten Hauptfragestellung besteht deshalb darin, aus der bestehenden Vielzahl an Resilienzdefinitionen eine für das Infrastrukturmanagement von Straßenverkehrsanlagen einschlägige und geeignete Definition abzuleiten. Auf Grundlage eines konsolidierten Verständnisses der Prozesse hinter dem Begriff Resilienz lässt sich eine kohärente Definition von Resilienzmaßnahmen ableiten. Diese Maßnahmen werden im Kontext der Resilienzdefinition typisiert.

Ein zentrales Element der Untersuchungen liegt schließlich in der Beantwortung der Hauptfragestellung, welches Vorgehen für eine Bewertung von Resilienzmaßnahmen am geeignetsten ist. Der im Kontext der vorliegenden Untersuchungen wichtigste Teil des Vorgehens zur Bewertung von Resilienzmaßnahmen ist die Auswahl und Beschreibung von effizienten Methoden zur Maßnahmenbewertung. Aufgrund des Umfangs und der Wichtigkeit dieser 4. Hauptfragestellung, werden die Ansätze zur Bewertung von Resilienzmaßnahmen in einem separaten Kapitel beschreiben und diskutiert.

Eine Auswahl an Fallbeispielen soll aufzeigen, ob und wie die theoretischen Überlegungen zur Bewertung von Resilienzmaßnahmen heute in der Praxis zur Anwendung gelangen. Dafür werden ausgewählte Studien analysiert, geeignete Fallbeispiele

identifiziert und anhand von Factsheets zusammenfassend dokumentiert.

Den Abschluss der Untersuchungen bildet auf Grundlage der Resultate der vorhergehenden Hauptfragestellungen die Ableitung von Empfehlungen für die BAST, um geeignete methodische Ansätze zur Durchführung von Bewertungen von Resilienzmaßnahmen effizient nutzen zu können.

Die Untersuchungen beruhen auf einer umfassenden Literaturstudie, in der sowohl wissenschaftliche Publikationen, als auch technische Berichte, Richtlinien und Normen analysiert wurden. Die Literaturstudie spiegelt kritisch den aktuellen, internationalen Stand der Technik bezüglich Methoden zur Bewertung von Resilienzmaßnahmen an Objekten und Netzen der Straßenverkehrsinfrastruktur. Mit dem Ziel der Erstellung einer Auslegeordnung der für die Fragestellungen der BAST am meisten relevanten methodischen Ansätze zur Maßnahmenbewertung geht die Literaturrecherche insbesondere der Frage nach, wie sich Resilienz einheitlich definieren lässt, welche Bewertungsmethoden es für Resilienzmaßnahmen gibt und welche Bewertungskriterien zur Anwendung kommen.

Die nachfolgenden Kapitel gliedern sich entsprechend der Hauptfragestellungen aus Abbildung 2.

2 Resilienz

2.1 Definition

Resilienz lässt sich vereinfachend als die inhärente Fähigkeit eines Systems beschreiben, Veränderungen und Störungen unterschiedlicher Art zu absorbieren, sich ihnen anzupassen und die charakteristische Funktionalität des Systems zu bewahren. Resilienz ist demzufolge eine Systemeigenschaft und kein Systemzustand [1]. Sie ist umso grösser, je besser außergewöhnliche, schadhafte Ereignisse verkräftet, störende Einwirkungen auf das System antizipiert und adaptive Lerneffekte für das System gewonnen werden können [1]–[32].

In der vorliegenden Untersuchungen wird die folgende Definition von Resilienz mit dem begleitenden Fachexperten der BAST und unter Berücksichtigung der Definitionen in [2] und [3] festgelegt:

«Resilienz ist die Fähigkeit eines Systems, sich auf tatsächlich oder potenziell schadhafte Ereignisse vorzubereiten, sie einzukalkulieren, sie abzuwehren, sie zu verkräften, sich möglichst schnell davon zu erholen und sich ihnen immer erfolgreicher anzupassen. Schadhafte Ereignisse sind menschlich, technisch sowie natürlich verursachte außergewöhnliche Ereignisse

oder Veränderungsprozesse, die extreme oder katastrophale Folgen haben.»

Die Resilienz eines Systems lässt sich fünf verschiedenen, zeitlich aufeinanderfolgenden Phasen zuordnen und in Form des Resilienzzyklus in Abbildung 3 darstellen [1]:

Die erste Phase beinhaltet die Vorbereitung auf außergewöhnliche, schadhafte Ereignisse, zum Beispiel durch eine Ausstattung mit geeigneten Frühwarnsystemen (prepare). Durch eine Reduzierung der zugrundeliegenden Risikofaktoren soll zudem das Eintreten eines oder mehrerer Ereignisse verhindert werden (prevent).



Abbildung 3: Resilienzzyklus in Anlehnung an [1]

Tritt ein außergewöhnliches, schadhafte Ereignis trotzdem ein, ist es wichtig, dass vorhandene Schutzsysteme fehlerfrei funktionieren und die negativen Auswirkungen möglichst geringgehalten werden (protect). Durch schnelle und gut organisierte Sofortmaßnahmen wird das aus dem Ereignis resultierende Schadensausmaß reduziert und die Funktionalität des Systems möglichst aufrechterhalten (respond). Abschließend zeichnet sich ein resilientes System vor allem auch dadurch aus, dass es in der Lage ist, sich zu erholen und adaptiv einen Lerneffekt aus dem Geschehen zu gewinnen, um für künftige Ereignisfälle besser gewappnet zu sein (recover).

Entwicklung von Resilienz

Ursprünglich wurde die Definition und die Anwendung des Begriffs Resilienz in der Psychologie verwendet und spiegelte die Erholungsfähigkeit der Menschen nach einer Erkrankung oder Schicksalsschlägen wider. Ausgehend vom lateinischen Ursprung des Wortes Resilienz (*resiliere* = im Sinne eines Abprallens oder Zurückspringens) besteht zwischen den verschiedenen wissenschaftlichen

Disziplinen, die diesen Begriff verwenden, ein gemeinsamer Kern: Dies in Bezug auf einen erfolgreichen Umgang eines Systems mit einer Störung oder Einwirkung (einem „Schock“ unter schadhafte Ereignissen), insbesondere durch Anpassungsfähigkeiten oder Möglichkeiten zur Verringerung der Verwundbarkeit [11]. Die Störungen werden durch außergewöhnliche, schadhafte Ereignisse ausgelöst und führen zu direkten und indirekten Konsequenzen. Die Gesamtheit der Konsequenzen wird allgemein als das zu erwartende Schadensausmaß in Folge eines Ereignisses verstanden. Im Kontext der hier durchgeführten Resilienzüberlegungen wird das Schadensausmaß durch den Funktionalitätsverlust des betrachteten Systems repräsentiert.

Diskussionen und Definitionen rund um den Begriff Resilienz im Kontext des Katastrophenmanagements, des Schutzes kritischer Infrastrukturen und von sozialen Systemen häufig grundlegend mit der Art und Weise verknüpft, wie ein System auf ein oder mehrere außergewöhnliche, schadhafte Ereignisse reagiert und wie man es darauf vorbereiten kann [24].

Bei schadhafte Ereignissen handelt es sich beispielsweise um durch den Klimawandel verursachte Naturkatastrophen, Terroranschläge oder schwere Industrieunfälle. Solche Ereignisse und ihre Folgen (gleichbedeutend mit Schadensausmaß, Konsequenzen) stellen für einzelne Systeme und moderne Gesellschaften gravierende Bedrohungssituationen dar. Gleichzeitig sorgen eine steigende Komplexität und die zunehmende Vernetzung der Gesellschaft dafür, dass manche Systeme zusätzlich anfällig für so genannte Kaskadeneffekte werden. Als Konsequenz sollten (nicht nur technische) Systeme möglichst resilient gestaltet werden, um Gesellschaften und ihre relevanten Teilsysteme zu befähigen, die durch schadhafte Ereignisse hervorgerufenen Schäden zu minimieren.

Resilienz wird heute als umfassender, holistischer Problemlösungsansatz gesehen, dessen Ziel es ist, die generelle Widerstands- und Regenerationsfähigkeit von (technischen) Systemen zu erhöhen. Dabei ist es egal, ob die drohenden schadhafte Ereignisse schon bekannt sind oder völlig neu und unerwartet eintreten. Prävention und Antizipation werden daher als essentielle Bestandteile von Resilienz angesehen [31]. Unter Resilienz kann auch das Ausmaß an Beeinträchtigungen verstanden werden, die ein System verkraften kann, ohne in einen nächsten stabilen Zustand überzugehen [1]. Zentrales Element des Resilienzkonzepts ist also die Fähigkeit eines Systems zur Selbst-Rehabilitation, ge-

nauer noch zur autonomen Anpassung und Wiederinstandsetzung in der Zeit nach einem einwirkenden Ereignis [33] [32].

Auf der Suche nach einer geeigneten Definition von Resilienz werden häufig auch die eng mit Resilienz verknüpften Begriffe wie Risiko, Verwundbarkeit, Robustheit und Kritikalität genannt. Um das Resilienzkonzept im Rahmen des Infrastrukturmanagements nachvollziehbar definieren zu können, erscheint es an dieser Stelle wichtig, die teilweise eng damit verknüpften Konzepte sinnvoll voneinander zu unterscheiden und den übergeordneten Kontext darzustellen.

Einbettung in das Risikokonzept

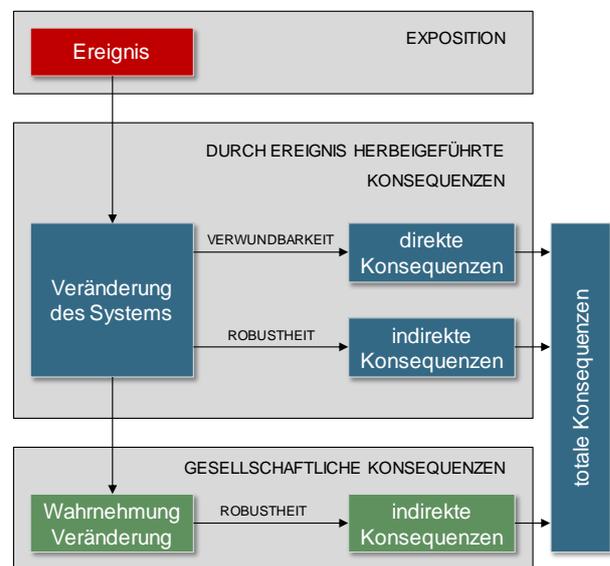


Abbildung 4: Abbildung der Zusammenhänge zwischen einem Ereignis und dessen Konsequenzen nach [34].

Resilienzüberlegungen lassen sich schlüssig in das systemische Risikokonzept aus Abbildung 4 einbetten. Unter **Risiken** sind auf das System einwirkende Ereignisse zu verstehen, die mit einer bestimmten Wahrscheinlichkeit (W) eintreten und im Ereignisfall zu einer Störung des Systems und zu einem Versagen von Systemkomponenten oder des Gesamtsystems führen können (Konsequenzen, Schadensausmaß (A)). Aus mathematischer Sicht wird das Risiko (R) als das Produkt aus Eintretenswahrscheinlichkeit und dem zu erwartenden Schadensausmaß definiert [35] [34] [36], [37]:

$$R = W \times A \quad \{\text{Formel 1}\}$$

Unschärfen in den Annahmen, sowohl für die Eintretenswahrscheinlichkeit bestimmter Ereignisse, als auch für das jeweils zu erwartende Schadensausmaß lassen sich mittels probabilistischer Methoden quantifizieren und in der Entscheidungsfindung berücksichtigen [38].

Mit Blick auf Abbildung 4 wird angenommen, dass jedes System unterschiedlichen kurz- und langfristigen Ereignissen ausgesetzt ist. Dies wird als die Exposition des Systems bezeichnet. Die Ereignisse wirken auf das System ein und können zu Veränderungen der Systemstabilität führen. Dadurch werden direkte oder indirekte Konsequenzen innerhalb des Systems verursacht.

Der Begriff **Verwundbarkeit** (engl. Vulnerability) beschreibt in diesem Zusammenhang die direkten Konsequenzen (oder Schäden), die durch das Einwirken eines Ereignisses auf eine einzelne Systemkomponente entstehen. Zum Beispiel das Versagen eines Seiles/Kabels (=Systemkomponente) einer Hängebrücke (=System) durch Starkwinde (=Ereignis). Die Verwundbarkeit des Systems Brücke wird demzufolge über die Versagenswahrscheinlichkeit der Systemkomponenten definiert. Die Verwundbarkeit eines Systems lässt sich nach [34] quantifizieren als der Anteil der Risiken aufgrund von direkten Konsequenzen am Gesamtwert des betrachteten Infrastruktursystems. Dabei müssen sämtliche relevanten Expositionen innerhalb eines definierten Zeitraums berücksichtigt werden¹.

Massnahmen zur Reduktion der Verwundbarkeit eines Systems setzen darauf, durch eine Verstärkung einzelner Systemkomponenten (nach dem Prinzip des schwächsten Kettengliedes) deren Versagenswahrscheinlichkeiten und die direkten Konsequenzen im Ereignisfall zu reduzieren. [5], [21].

Robustheit (engl. Robustness) beschreibt die Fähigkeit eines Systems, Ausfälle von einzelnen Systemkomponenten ohne einen Verlust der Systemfunktionalität zu verkraften. In Abbildung 5 ist die Robustheit eines Systems anhand des reziproken Wertes des absoluten Funktionalitätsverlusts zum Zeitpunkt der Einwirkung (graues Feld) erkennbar. Je größer der Funktionalitätsverlust zum Zeitpunkt der Einwirkung und kurz danach, desto kleiner die Robustheit eines Systems.

Robustheit wird durch die indirekten Konsequenzen abgebildet; mit zweierlei Ausprägungen:

a) Zum einen handelt es sich dabei um die Folgen der direkten Konsequenzen innerhalb des Systems nach Einwirkung eines Ereignisses. Das heißt, dass durch die Robustheit die Reaktion des Gesamtsystems auf das Versagen einer oder mehrerer einzelner Systemkomponenten zu verstehen ist. Fällt diese Folgereaktion gering aus, so kann das System als robust bezeichnet werden. Beispiel für ein

robustes System: Die Hängebrücke aus oben genannten Beispiel ist so konstruiert, dass das Versagen eines einzelnen Seiles/Kabels kein Versagen der ganzen Brücke nach sich zieht.

b) Die Robustheit eines Systems wird aber auch die indirekten Konsequenzen einer Systemveränderung auf die Gesellschaft wiedergespiegelt. Das heißt, welche Auswirkungen die Systemänderung auf die Funktionalität des Systems im gesellschaftlichen Kontext aufweist. Exemplarisch kann man fragen: Wird durch das Versagen eines Seiles/Kabels der Hängebrücke die Funktionalität der Brücke eingeschränkt? Kann nur noch eine reduzierte Verkehrsmenge über die Brücke geführt werden und entstehen als Folge davon teure Stau- und Wartezeiten im Berufs- und Logistikverkehr?

Die Robustheit lässt sich quantifizieren als der Quotient aus direkten Risiken und den Gesamtrisiken des Systems. Dabei müssen innerhalb eines definierten Zeitraums sämtliche Expositionen (mögliche Ereignisse) sowie die verschiedenen potenziellen Schadenszustände der Systemkomponenten berücksichtigt werden [34].

Durch die proaktive, zyklische und holistische Charakteristik geht die **Resilienz** über das klassische, vorher beschriebene Risikokonzept hinaus. Denn es umfasst die Fähigkeit eines Systems, zusätzlich auch die Einwirkungen durch noch unbekannte, komplexe, unsichere, sich verändernde zukünftige Ereignisse zu überleben und sogar einen Gewinn für die zukünftige Systemfunktionalität daraus zu ziehen [39] [40]. Im Gegensatz zur Resilienz beinhaltet der Begriff Robustheit nicht die Fähigkeit der Reorganisation nach einem Ereignis, sondern wird eher als statische Systemeigenschaft gesehen [1], [11]. Das Resilienzkonzept eröffnet einen neuen, bisher eher wenig diskutierten Handlungsspielraum in der Entscheidungsfindung. Resilienz bezieht sich vor allem darauf, sich auf die Konsequenzen von nicht immer bekannten schadhafte Ereignissen vorzubereiten, indem der Funktionalitätsabfall möglichst gering und die Erholungszeit möglichst kurz sind.

In Bezug auf Ingenieurbauten sind die gängigen Expositionen und ihre mutmaßlichen Einwirkungen auf das System durch entsprechende Vorgaben für die Bemessung oder Sicherheitsfaktoren in den einschlägigen Normen und Design-Codes abgedeckt. Die Eintretenswahrscheinlichkeiten und das Schadensausmaß können (unter Berücksichti-

¹ In manchen Publikationen werden die Begriffe Robustheit und Verwundbarkeit als sich komplementär entsprechende Konzepte definiert (siehe z.B. [6]). Im Kontext des konstruktiven Ingenieurwesens und des (technischen) Infrastrukturmanagements folgen

die Autoren der vorliegenden Studie den Definitionen im Rahmen des Risikokonzepts gemäß [34].

gung der Unschärfen) abgeschätzt werden. Schadhafte Ereignisse, die über die normativen Berücksichtigungen hinausgehen, werden durch die Konzepte der Robustheit und Resilienz beeinflusst.

Im Zusammenhang mit der «Nationalen Strategie zum Schutz Kritischer Infrastrukturen (KRITIS-Strategie)» des Bundesministeriums des Innern gilt die Verkehrs- und Transportinfrastruktur (neben der Energieversorgung, der Informations- und Kommunikationstechnologie wie der Trinkwasserversorgung und Abwasserentsorgung) als besonders schutzbedürftig [41]. Denn Verkehrsinfrastrukturen

haben aufgrund ihrer strukturellen, funktionellen und technischen Positionierung im gesellschaftlichen Gesamtsystem eine sogenannte **systemische Kritikalität**.

Dabei handelt es sich allgemein um das relative Maß für die Bedeutsamkeit einer Infrastruktur in Bezug auf die Konsequenzen, die eine Störung oder ein Funktionalitätsverlust für die Versorgungssicherheit der Gesellschaft mit wichtigen Gütern und Dienstleistungen hat [41].

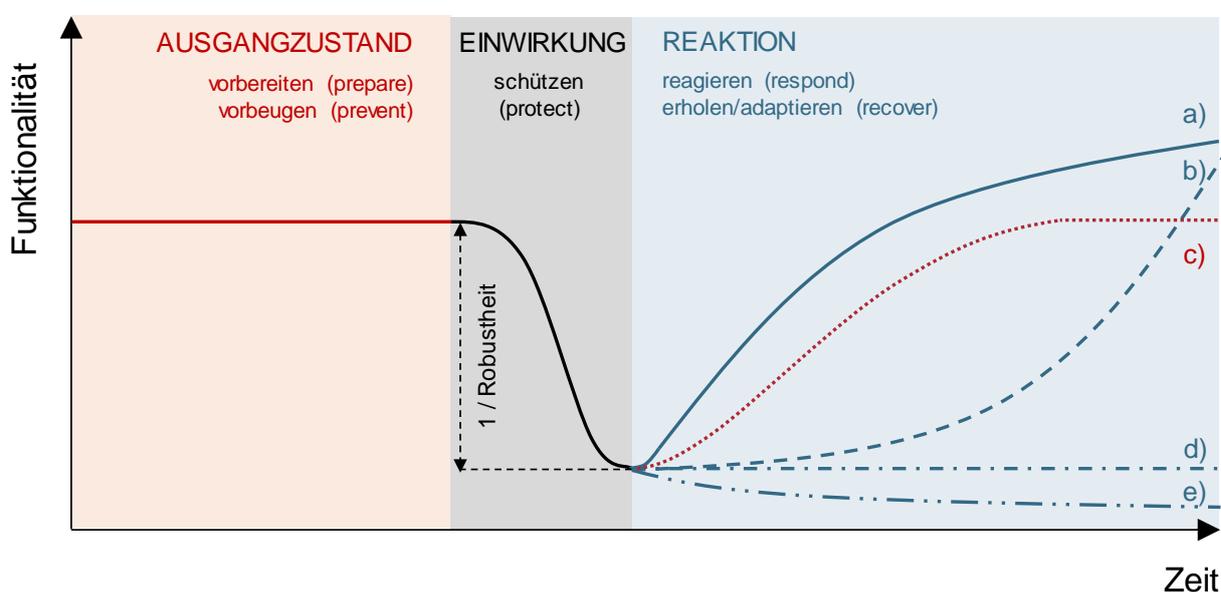


Abbildung 5 Ausgangszustand und Reaktion eines mehr (Kurve a, b und c) oder weniger (Kurve d oder e) resilienten Systems vor und nach einer Einwirkung auf das System durch ein oder mehrere Ereignisse (in Anlehnung an [24]);

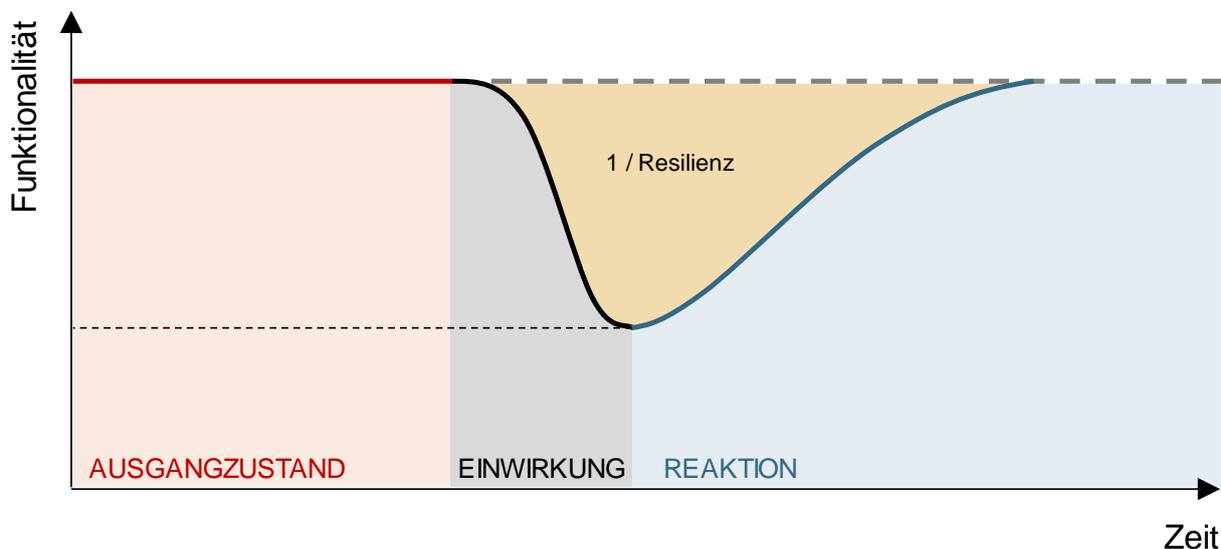


Abbildung 6: Bestimmung der Resilienz als das Integral über die Fläche des Funktionalitätsverlusts über die Zeit bis zur Wiederherstellung der vollständigen Funktionalität in Anlehnung an [42].

Eine Infrastruktur besitzt vor allem dann eine systemische Kritikalität, wenn sie aufgrund ihrer strukturellen, funktionellen und technischen Positionierung im Gesamtsystem der Infrastrukturbereiche von besonders hoher interdependenter Relevanz ist [41], [43], [44], [45]. Beispielsweise kann eine einzelne Brücke im Versagensfall einen sehr grossen regionalen Funktionalitätsverlust des Systems «regionales Strassennetz» verursachen, indem für die Nutzer grosse Reisezeiten oder Verzögerungen in industriellen Logistikketten entstehen. Ein Infrastrukturobjekt gilt als kritisch, wenn die durch ein Ereignis verursachten, mit einer bestimmten Wahrscheinlichkeit zu erwartenden Konsequenzen (z.B. volkswirtschaftliche Kosten eines Funktionalitätsverlusts) einen vorher festgelegten Grenzwert für ein aus Sicht Infrastrukturbetreiber und/oder Politik bzw. Gesellschaft akzeptables Risiko übersteigen.

Resilienz im Verkehrs-Infrastrukturmanagement

Für eine Beschreibung von Resilienz im (Straßen-)Infrastrukturmanagement eignet sich die Darstellung der Funktionalität des Systems Straße über die Zeit vor, während und nach einer „schockartigen“ Einwirkung eines außergewöhnlichen, schadhafte Ereignisses. Die Funktionalität des Systems kann dabei sehr unterschiedliche Elemente umfassen. Im Rahmen der Systemdefinition muss festgelegt werden, wodurch die Funktionalität des Systems definiert wird (z.B. Kapazität, Sicherheit, Reisezeit, etc.). Unter normalen Bedingungen befindet sich gemäß Abbildung 5 das System in seinem mehr oder weniger stabilen Ausgangszustand; die erforderliche Funktionalität des Systems ist gewährleistet. Um die Funktionalität auch während der Einwirkung durch ein schadhafte Ereignis möglichst zu behaupten bzw. die Einwirkung möglichst zu minimieren, können vorbereitende und vorbeugende Maßnahmen getroffen werden – die Resilienz des Systems wird manifestiert. Dennoch, es kann zu einem Verlust der Funktionalität des Systems kommen.

Maßnahmen zum direkten Schutz des Systems zum Zeitpunkt eines schadhafte Ereignisses tragen dazu bei, dass dieser Funktionalitätsverlust möglichst gering ausfällt. Anhand der kurz- und mittelfristigen Reaktion des Systems nach einem schadhafte Ereignis zeigt sich, wie resilient das System tatsächlich auf die Einwirkung reagiert. An dieser Stelle spielt die zeitliche Komponente eine entscheidende Rolle. Denn, eine schnelle Erholung (von der schockartigen Einwirkung) mit einer Regeneration auf das ursprüngliche Niveau (Kurve c in Abbildung 5) der Funktionalität oder sogar darüber hinaus (Kurven a oder b) in möglichst kurzer Zeit

spiegelt eine hohe Resilienz wieder. Kurve b) erreicht zwar auch wieder das ursprüngliche Niveau der Funktionalität, beansprucht dafür aber einen deutlich längeren Zeitraum – die Resilienz eines Systems mit diesem Kurvenverlauf der Funktionalität ist gegenüber a) deutlich geringer. Als nicht resilient lassen sich Systeme bezeichnen, deren Funktionalitätskurven entsprechend den Funktionen d) und e) in Abbildung 5 verlaufen.

Resilienz beschreibt die zeitlich gestaffelte Vorbereitung und Reaktion eines Systems auf Störeinflüsse durch schadhafte Ereignisse. Daraus ergibt sich für die Ermittlung der Resilienz eines Systems zwangsläufig auch die Notwendigkeit der Festlegung eines Zeitraums, innerhalb dessen die Folgen einer Störung untersucht werden. Dieser Zeitraum muss ausreichend ausgedehnt sein, damit längerfristige Adaptionsprozesse mitberücksichtigt werden können; denn sonst besteht die Gefahr, dass die Beurteilung von Resilienz sich lediglich auf eine eher kurzfristige Betrachtung von Betroffenheit oder Resistenz beschränkt [11]. Auf der anderen Seite erhöhen lange Betrachtungszeiträume durch eine Zunahme der Anzahl an Störfaktoren auch die Komplexität der Resilienzbeurteilung. Der Vergleich mit einer Referenzsituation wird bei langen Betrachtungszeiträumen zunehmend schwerer.

2.2 Ermittlung von Resilienz

Die Vielfalt möglicher Ansätze zur Ermittlung oder Messung von Resilienz ist mit der Anzahl unterschiedlicher Begriffsdefinition von Resilienz vergleichbar. Aufbauend auf die grafische Definition in Abbildung 5 und in Anlehnung an den Ansatz zur Quantifizierung von Resilienz des *US Departments for Homeland Security* [28] ist die Darstellung zur Ermittlung bzw. Quantifizierung der Resilienz in Abbildung 6 entstanden. Ausgehend vom Ausgangszustand mit einer Funktionalität des Systems von 100% lässt sich demnach die Resilienz als die Fläche zwischen der 100%-Funktionalitätslinie (grau, gestrichelt) und der Funktionalitätslinie während und nach der Einwirkung durch ein schadhafte Ereignis bis zum erneuten Erreichen des Ausgangszustands darstellen (gelbe Fläche) und berechnen. Vereinfachend wird hier angenommen, dass sich die Funktionalität des Systems „nur“ bis zur 100%-Linie regeneriert. Entsprechend der Kurven a) und b) in Abbildung 5 ist durch Adaptions- und Lerneffekte aber auch das Erreichen einer höheren Funktionalität im Nachgang zur Einwirkung denkbar. Wie tief der Funktionalitätsverlust ausfällt hängt von der Robustheit des Systems zusammen. Mathematisch ausgedrückt handelt es sich um das reziproke Integral der Funktionalitätskurve über die

Zeit. Reziprok deshalb, weil, je größer die gelbe Fläche, umso kleiner die Resilienz eines Systems [28].

3 Resilienzmaßnahmen

3.1 Definition

Unter Resilienzmaßnahmen werden jene baulichen, technischen, planerischen und organisatorischen Maßnahmen am Einzelobjekt (z.B. Brücke oder Tunnel) oder für das gesamte Infrastrukturnetz verstanden, die über die Vorgaben aus den geltenden Regelwerken (Normen, Design Codes, etc.) hinausgehen (z.B. Verwendung von Hochleistungsbeton bei Brücken, wenn gemäß Norm aufgrund der Planungssituation eigentlich nur konventionelle Betontypen vorgesehen sind)².

Die Entwicklung von Strategien zur Implementierung oder Stärkung der Resilienz eines Verkehrsnetzes stützt sich auf bereits bekannte Konzepte zur Identifikation und dem Schutz kritischer Infra-

strukturen, Risikokonzepten und -management sowie der Notfallplanung im Katastrophenschutz. In diesem Kontext benennen Tierney und Bruneau (2007) die 4R-Faktoren für Resilienz: Sie umfassen Redundanz, Robustheit, Ressourcenbereithaltung und Reaktionsschnelligkeit [46].

Auf Grundlage von [14] wird davon ausgegangen, dass eine Erhöhung der Verkehrssystemresilienz im Wesentlichen anhand der nachfolgenden acht Strategien in Abbildung 7 erreicht werden kann.

3.2 Übersicht und Typisierung

Entsprechend Abbildung 3 kann man die Resilienz eines Systems anhand von Resilienzmaßnahmen in den unterschiedlichen Phasen erhöhen. Diese Maßnahmen können sich auf einzelne Objekte (z.B. Brücke oder Tunnel) oder auf das gesamte Straßennetz (Brücken und Tunnel und Strecken) bzw. eine bestimmte Region beziehen.

Strategie	Erläuterung
Hinzufügen von Redundanz	Das Hinzufügen von Redundanzen erhöht die Resilienz eines Systems, indem im Ereignisfall z.B. Verkehrsflüsse über eine oder mehr Alternativrouten umgeleitet werden können.
Vorhalten von Backup-Komponenten	Die Resilienz eines Systems wird durch den schnellen Einsatz vorhandener Backup-Systemkomponenten im Ereignisfall erhöht.
Bereitstellen von Ersatzmöglichkeiten	Der gewünschte Prozess der Funktionalität kann von einer Systemkomponente auf eine andere übertragen werden (z.B. Strasse -> Schiene).
Reduktion der Verletzlichkeiten	Konstruktive Anpassungen von Objekten zur Eliminierung oder Reduktion ihrer Verletzlichkeit im Falle von schadhafte Ereignissen
Erhöhung der Improvisationsfähigkeiten	Resilienz hängt auch von der spontanen Improvisationsfähigkeit eines Systems ab. Unter Improvisationsfähigkeit ist die Anpassung eines Prozesses an eine Einwirkung in Echtzeit zu verstehen.
Prioritärer Zugang zu wichtigen Ressourcen	Das System erhält vorrangigen Zugang zu kritischen Ressourcen (z.B. Treibstoffe, Wasser, Manpower), um schnellstmöglich den Ausgangszustand der Funktionalität wiederzuerlangen.
Ausarbeitung einer Systemmodellierung	Die Funktionalität des Systems und die Abhängigkeiten des Systems von anderen Systemen werden modellhaft abgebildet. Die Kenntnis der Abhängigkeiten hilft bei der Abschätzung der Risiken.
Vorhalten von logistischen Backup-Lösungen	Dies beinhaltet vor allem Planungsprozesse, um Backup-Lösungen zum erforderlichen Zeitpunkt schnellstmöglich einsetzen zu können.

Abbildung 7: Strategien zur Erhöhung der Resilienz [14]

² Unter dem holistischen Blickwinkel einer (gesellschaftlichen) Resilienz Betrachtung können theoretisch auch Maßnahmen zur Verbesserung des menschlichen Verhaltens in Extremsituationen zur Verbesserung der Resilienz und zum direkten Schutz des Nutzers der Infrastruktur beitragen [11]. Der Fokus der vor-

liegende Studie liegt jedoch ausschliesslich auf technischen, planerischen und organisatorischen Maßnahmen. Auf die Darstellung edukativer Maßnahmen wird aus Gründen des Umfangs im Rahmen dieser Studie verzichtet.

		OBJEKT (Brücke/Tunnel)		NETZ / REGION	
Phase	Beschreibung	technisch	planerisch / organisatorisch	technisch	planerisch / organisatorisch
PREPARE	Vorbereitungsmaßnahmen, die vor Eintreten eines außergewöhnlichen, schadhaften Ereignisses umgesetzt werden. Sie dienen dazu, das Eintreten von schadhaften Ereignissen zu antizipieren und das System auf mögliche Einwirkungen vorzubereiten. Beispiel: "Frühwarnsystem" zur kontinuierlichen Einschätzung von Risiken und der Vorbereitung auf mögliche Katastrophen.	Objektüberwachung, die im Ereignisfall schnelles effektives / effizientes objektbezogenes Eingreifen ermöglicht z.B. Gefahrguterkennung im Tunnel mittels Kamera.	Objekt spezifische Notfallpläne, Übungen, Vorbereitungen etc. über die Norm hinaus, die im Ereignisfall schnelles und effektives / effizientes objektbezogenes Eingreifen ermöglichen z.B. Notfallübung für eine spezifische Brücke.	Überwachung auf Systemebene die im Ereignisfall schnelles effektives / effizientes Verkehrsmanagement auf Systemebene ermöglicht z.B. Pegelstandsmonitoring als Input für Prognosemodelle und Frühwarnsysteme.	Notfallpläne, Rettungsübungen, Vorbereitungen etc. die im Ereignisfall schnelles effektives / effizientes Verkehrsmanagement auf Systemebene ermöglichen z.B. Rollen und Verantwortlichkeiten geklärt, Notfallmanagementspläne erstellen, Kritikalität der Objekte kennen.
PREVENT	Maßnahmen, welche die Eintrittenswahrscheinlichkeit eines außergewöhnlichen, schadhaften Ereignisses reduzieren. Potenzielle Gefährdungen werden frühzeitig erkannt und die damit verbundenen Risikofaktoren reduziert bzw. Resilienzfaktoren erhöht.	Technische, objektbezogene Maßnahmen, welche die Eintrittenswahrscheinlichkeit eines widrigen Ereignisses reduzieren z.B. Freibordvergrößerung, Detektion überhitzter Fahrzeuge, Zutrittsverhinderung bei Brücken.	Organisatorische, objektbezogene Maßnahmen, die die Eintrittenswahrscheinlichkeit eines widrigen Ereignisses reduzieren z.B. Verschleissen der Bestandesunterlagen von Brücken.	Dieser Kombination lassen sich keine Maßnahmen zuordnen.	Organisatorische, netzweite Maßnahmen, welche die Eintrittenswahrscheinlichkeit von widrigen Ereignissen reduzieren. z.B. regionale Fahrverbote, Compliance aller Objekte mit bestehendem Normenwerk sicherstellen Kaskadische Zusammenhänge vermeiden
PROTECT	Maßnahmen, deren Wirkung sich zum Zeitpunkt des Ereignisses schützend entfaltet und die negativen Einwirkungen auf die Funktionalität des Systems reduziert (inkl. direkter Schutz betroffener Personen im Moment des Ereignisses). Beispiel: Sicherstellung der vollen Funktionsfähigkeit von Schutzsysteme.	Technische Maßnahmen am Objekt, die vor Eintreten des Ereignisses implementiert werden und im Ereignisfall direkt wirken. z.B. Hochleistungsbojen bei Brücken, automatische Brandbekämpfungsanlage in Tunneln, Stäkerer oder mehrere (Redundanz) Pumpsysteme in Unterführungen.	Organisatorische, objektbezogene Maßnahmen, die während des Ereignisfalls eine schützende Wirkung entfalten z.B. Vorhalten einer Tunnelfeuerwehr.	Technische Maßnahmen auf Netzebene, die vor Eintreten des Ereignisses implementiert werden und im Ereignisfall direkt wirken. z.B. technische Vorbereitung von Hochwasser-Korridoren oder Überläufe mit Pufferzonen	Organisatorische Maßnahmen auf Netzebene, die vor Eintreten des Ereignisses implementiert werden und im Ereignisfall direkt wirken. z.B. regelmäßige Inspektionen der Objekte; Compliance mit Regelvorgaben; Kaskadische Zusammenhänge und Abhängigkeiten vermeiden (indirekte Konsequenzen)
RESPOND	Maßnahmen, deren Wirkung sich unmittelbar nach dem Ereignis entfaltet und die darauf abzielen, im Ereignisfall die Funktionalität des Gesamtsystems aufrecht zu erhalten (inkl. Schutz noch nicht betroffener Personen, Rettung und Ersthilfe der betroffenen Personen). Beispiel: Schnelle und funktionierende Sofortmaßnahmen.	Technische Maßnahmen, die unmittelbar nach Eintreten des Ereignisses objektspezifisch greifen, um Systemfunktionalität zu erhalten z.B. automatische Sperrrichtungen, verkürzte Notausgangsbastarde in Tunneln, spezieller automatischer Brückennotruf.	Planerische / organisatorische Maßnahmen, die unmittelbar nach Eintreten des Ereignisses objektspezifisch greifen, um Systemfunktionalität zu erhalten z.B. effizienter Einsatz Rettungskräfte / Katastrophenhilfe z.B., Tunnelkommunikation.	Technische Maßnahmen auf Systemebene, die vor dem Eintreten eines Ereignisses implementiert werden und unmittelbar nach dem Ereignisfall greifen, um Systemfunktionalität zu erhalten. z.B. Netzwerkredundanz (alternative Verkehrswege und Transportmittel), Schnittstellen zu anderen Systemen.	Planerische / organisatorische Maßnahmen auf Systemebene, die vor Eintreten des Ereignisses implementiert werden und unmittelbar nach dem Ereignis greifen, um Systemfunktionalität zu erhalten. z.B. Nutzerinformator, Kommunikationsysteme, Vernetzung der unterschiedlichen Hilfsorganisationen/Verantwortlichen
RECOVER	Maßnahmen, die nach einem Ereignis implementiert werden, um die Systemfunktionalität innerhalb möglichst kurzer Zeit wiederherzustellen bzw. durch Lernprozesse und Erfahrungen über den Ausgangszustand hinaus zu verbessern.	Technische Maßnahmen am Objekt, die vor oder nach dem Eintreten des Ereignisses implementiert werden, um die Systemfunktionalität möglichst schnell wiederherzustellen z.B. temporärer Austausch nicht funktionsfähiger Elemente.	Planerische / organisatorische Maßnahmen am Objekt, die nach dem Eintreten des Ereignisses implementiert werden, um die Systemfunktionalität möglichst schnell wiederherzustellen z.B. beschleunigte Abwicklung von Baubewilligungen.	Technische Maßnahmen auf Systemebene, die nach dem Eintreten des Ereignisses implementiert werden, um die Systemfunktionalität möglichst schnell wiederherzustellen z.B. Verfügbarmachung einer neuen Route z.B. Feldwegs, Ausbau eines zuvor nicht befahrbaren Feldwegs, Bau einer alternativen Stresse, "schwimmende Brücke"	Planerische / organisatorische Maßnahmen auf Systemebene, die nach dem Eintreten des Ereignisses implementiert werden, um die netzweite Systemfunktionalität möglichst schnell wiederherzustellen z.B. Ausweisung alternativer Route, effektive Schadensbeurteilung.

Abbildung 8: Typisierung und Beschreibung von Resilienzmaßnahmen entsprechend Resilienzyklus und Systemdefinition

Der Einsatz verschiedener Methoden ist dadurch bedingt, dass je nach Charakteristik einer Maßnahme (oder eines Projektes) unterschiedliche Anforderungen an die Bewertungsmethode gestellt werden. Zur Kategorisierung der Methoden werden daher vorgängig potenzielle Resilienzmaßnahmen zusammengestellt und typisiert. Die Typisierung der Resilienzmaßnahmen in Abbildung 8 erfolgt sowohl unter Berücksichtigung des zeitlichen Aspekts der Resilienzdefinition (siehe Abbildung 3 des Resilienzzyklus) als auch auf Grundlage der oben gezeigten Systemdifferenzierung.

4 Vorgehen zur Bewertung von Resilienzmaßnahmen

Das Vorgehen zur Bewertung von Resilienzmaßnahmen lehnt sich an bereits etablierten Vorgehensprinzipien an, wie sie beispielweise im Kontext von Risikoanalysen oder bei der Bewertung von (Aus- und Neubau-) Maßnahmen in der Verkehrsplanung (zum Beispiel entsprechend dem BVWP) zur Anwendung kommen [47]–[50]. Um der Perspektive von objekt- oder netzbezogenen Resilienz-betrachtungen gerecht zu werden, wurden die Vorgehensschritte in Abbildung 9 entsprechend modifiziert.

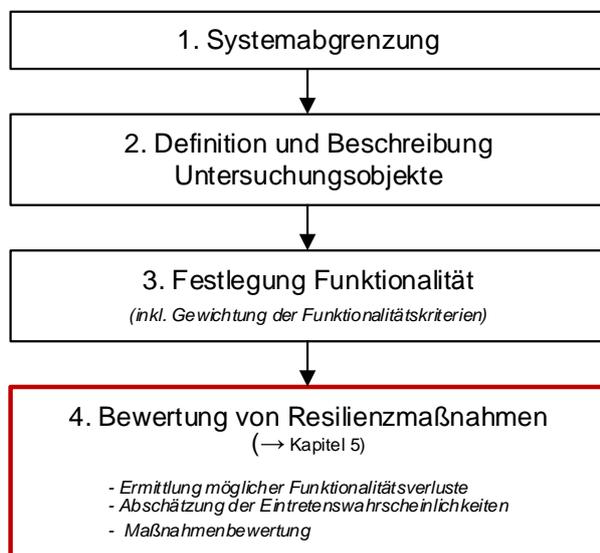


Abbildung 9: Prinzipielles Vorgehen bei einer Bewertung; der Vorgehensschritt 4 wird separat in Kapitel 5 erläutert.

Entsprechend Abbildung 9 umfasst das Vorgehen zur Bewertung von Resilienzmaßnahmen als ersten Schritt eine Systemabgrenzung zur Festlegung des räumlichen, zeitlichen und inhaltlichen Betrachtungs- und Beurteilungshorizonts. Anhand der im Anschluss daran erfolgenden Beschreibung und Definition der Untersuchungsobjekte wird festgelegt, welche Art von Objekten mit welcher Relevanz

und/oder Kritikalität (siehe Definition in Abschnitt 2.1) für das Gesamtnetz in die Resilienzbeurteilung mit einbezogen werden. Die Festlegung der Funktionalität im Schritt 3 beinhaltet die Auswahl an Kriterien, welche die Funktionalität eines Systems abbilden. Die Resultate der ersten drei Vorgehensschritte bildet die Grundlage für die eigentliche Bewertung von Resilienzmaßnahmen im Vorgehensschritt 4. Dort findet anhand spezifischer, methodischer Ansätze eine (quantitative) Bewertung von Maßnahmen zur Sicherstellung der System-Funktionalität oder zur Minderung negativer, ereignisbezogener Einwirkungen auf die Funktionalität des Systems statt.

In den nachfolgenden Kapiteln werden die einzelnen Schritte im Vorgehen zur Bewertung von Resilienzmaßnahmen aus Abbildung 9 erläutert.

4.1 Systemabgrenzung

Ein wichtiger erster Schritt besteht in einer für die im Rahmen des zu analysierenden Objekts oder Infrastrukturnetzes adäquaten Systemabgrenzung.

Um zu wissen, in welchem Rahmen die Analyse der zu untersuchenden Objekte erfolgt, muss festgelegt werden, in welchen räumlichen, zeitlichen und inhaltlichen Systemgrenzen die Untersuchung erfolgt. Hinsichtlich Resilienzmaßnahmen sind die folgenden Punkte bei der Systemabgrenzung zu berücksichtigen:

Räumliche Abgrenzung:

- **Projektperimeter:** Damit ist üblicherweise der Bereich bezeichnet, innerhalb dessen die Maßnahme umgesetzt wird (z.B. Maßnahme am Einzelobjekt oder für das Gesamtnetz).
- **Wirkungsperimeter:** Entsprechend einer Bewertung von Neu- und Ausbaumaßnahmen ist der Perimeter mindestens entsprechend demjenigen zu wählen, in welchem die Resilienzmaßnahmen wirken (z.B. in Form von Veränderung von Verkehrsmengen).

Zeitliche Abgrenzung:

- **Resilienz betrachtet per Definition eine dynamische Veränderung eines Systems:** Durch ein bestimmtes schadhafes Ereignis findet eine (negative) Einwirkung / Störung der Funktionalität eines Systems statt. Nach einer bestimmten Zeit erholt sich die Funktionalität des Systems wieder und übertrifft möglicherweise durch Adaption sogar ihr ursprüngliches Funktionalitätsniveau. Eine Maßnahme beeinflusst diesen

dynamischen Aspekt. Die Bewertung muss die unterschiedlichen Entwicklungen dieses zeitlichen Verlaufs berücksichtigen.

Inhaltliche Abgrenzung:

- Im Rahmen der inhaltlichen Systemabgrenzung muss u.a. festgelegt werden, auf welche Objekt- oder Netztypen sich die Resilienzanalyse beziehen soll. Hierzu gehört auch die Frage, welche schadhafte Ereignisse bei der Resilienzanalyse berücksichtigt werden.

4.2 Definition und Beschreibung der Untersuchungsobjekte

Die Bewertung von Resilienzmaßnahmen beruht auf einem Vergleich zwischen einem Ausgangs- resp. Referenz- und einem Planfall (mehrere Varianten möglich). Der Referenzfall entspricht dem Zustand eines Systems, ohne der zu bewertenden Resilienzmaßnahme. Für den Planfall – also den Zustand des Systems mit der umgesetzten Resilienzmaßnahme – ist dann darzulegen, inwieweit die zu bewertenden Resilienzmaßnahmen Einfluss auf die Wahrscheinlichkeit und Intensität der Einwirkung sowie die Regeneration des Systems nach der Einwirkung gegenüber dem Referenzfall hat. Ferner sind die Aufwendungen (i.d.R. dargestellt als Kosten) der Resilienzmaßnahme zu erläutern und darzulegen.

4.3 Abbilden der Funktionalität

Wenn die Untersuchungsobjekte festgelegt sind, muss definiert werden, hinsichtlich welcher Komponenten die Bewertung der Resilienzmaßnahmen erfolgt. Die Gesamtheit der festgelegten Komponenten bildet (modellhaft) die Funktionalität des Systems ab.

Naheliegender im Kontext von Straßenverkehrs-Infrastrukturen ist es beispielsweise, die Funktionalität eines Systems (Objekt oder Netz) vereinfachend über das Angebot einer bestimmten Verkehrskapazität abzubilden. Diese eindimensionale Funktionalitätskomponente ließe sich jedoch anhand von weiteren Komponenten zu einer mehrdimensionalen Kombination erweitern.

Um die Bandbreite möglicher Komponenten zur Abbildung der Funktionalität eines Systems zu veranschaulichen, ist nachfolgend eine (nicht abschließende) Liste möglicher Komponenten dokumentiert:

- Verkehrskapazität
- Verletzungsintensität der Nutzer
- Reisezeit

- Reisekomfort
- Umweltbelastung (z.B. CO₂-Emissionen)
- Volkswirtschaftliche Schäden / Bruttoinlandsprodukt

Das Ziel der Bewertung von Resilienzmaßnahmen liegt darin, Aufwand (i.d.R. als Kosten abgebildet) und Wirkungen von Maßnahmen gegenüberzustellen. Dies kann nur gelingen, wenn sich die Wirkung von Maßnahmen qualitativ (z.B. bei einer Nutzwertanalyse) oder quantitativ als ein mit den Kosten der Maßnahmen vergleichbarer Wert (z.B. Nutzen-Kosten-Analysen) ermitteln lässt.

Als Maßnahmenwirkung wird die Erhöhung der Resilienz des Systems verstanden; also die Beeinflussung des Verlaufs der Funktionalitätskurve und der damit verbundenen Flächengröße gemäß Abbildung 6. Der veränderte Verlauf der Funktionalitätskurve bewirkt wiederum eine Veränderung einer oder mehrerer Komponenten, die zur Abbildung der Systemfunktionalität herangezogen wurden (z.B. Erhöhung der Reisezeit im Ereignisfall).

Für jeden Planfall (mit Resilienzmaßnahme) und für den Referenzfall sind die Auswirkungen auf die einzelnen Funktionalitätskomponenten zu prognostizieren.

Diese Prognose kann unterschiedliche Bearbeitungstiefen aufweisen:

- Detaillierte Quantifizierungen aufgrund von Modellen, Prognosen und Berechnungen (z.B. mit Verkehrsmodellen)
- Abschätzung von Wirkungen
- Einfache Bepunktung, z.B. mit einem Schulnotensystem (z.B. die Maßnahme dürfte eine kleine/mittlere/große Wirkung haben). Auch dabei können Ausmaß der Wirkung (hoch, mittel tief mit Anzahl Betroffener (viele, wenige Betroffene) berücksichtigt werden.

Für die Bewertung von Resilienzmaßnahmen ist es wichtig, die Eintretenswahrscheinlichkeit eines außergewöhnlichen, schadhafte Ereignisses, das dadurch entstehende Schadensausmaß und die Dauer der Erholung des Systems zurück auf das Ausgangsniveau (oder darüber hinaus) berücksichtigen zu können. Bei der Abschätzung der Eintretenswahrscheinlichkeiten, des zu erwartenden Schadensausmaßes und der voraussichtlichen Erholungsdauer des Systems können durch einen probabilistischen Berechnungsansatz zusätzlich Unschärfen in den Schätzungen dargestellt und in der Entscheidungsfindung berücksichtigt werden. Gleichzeitig dient diese Darstellung der Unschärfen auch der strategischen Informationsbeschaffung, beispielsweise um einzelne Unschärfen bei Bedarf

durch zusätzliche Informationsbeschaffung (Daten, Befragungen, Modellierungen) zu reduzieren.

Eine zentrale Rolle spielen oftmals die gesamtwirtschaftlichen Wirkungen von Resilienzmaßnahmen. In den gängigen Bewertungsverfahren (siehe Kapitel 5.1) sind diese über die Reisezeiteinsparungen und Transportkostensenkungen der Verkehrsteilnehmer abgebildet. Standardmäßig werden auch monetarisierte Personenschäden, Heilungskosten, Erwerbsausfall etc. genauso berücksichtigt wie Auswirkungen auf die Umwelt. Die nachfolgende Abbildung 10 zeigt beispielhaft die Nutzen- und Kostenkomponenten des BVWP 2030 für die gesamtwirtschaftliche Bewertung von Maßnahmen. In der Bewertungspraxis hat sich die folgende Einteilung der Wirkungen ergeben:

- direkte Wirkungen einer Maßnahme (Bau, Unterhalt, Betrieb)
- direkte - interne - Wirkungen der Maßnahme (meistens der Verkehrsteilnehmer, wie z.B. Veränderungen der Reisezeiten und der Betriebskosten der Fahrzeuge)
- Veränderung externer Effekte durch die Maßnahme: Auswirkungen auf die natürliche Umwelt oder die Verkehrssicherheit.

- Indirekte Wirkung der Maßnahme: z.B. Produktivitäts- und Beschäftigungseffekte durch verbesserten Zugang zu Absatz- und Beschaffungsmärkten)

Im BVWP 2030 werden alle dargestellten Komponenten monetarisiert. Eine Monetarisierung von Maßnahmenwirkungen erlaubt eine direkte Gegenüberstellung von Maßnahmenkosten und Maßnahmennutzen (z.B. Quotient aus Nutzen und Kosten im Rahmen einer Nutzen-Kosten-Analyse). Für die später erläuterten Bewertungsmethoden ist eine Differenzierung in die folgenden Monetarisierungsansätze sinnvoll.

- Direkte Monetarisierungsansätze (z.B. Sachschäden am Objekt)
- Indirekte Monetarisierungsansätze (z.B. Heilungskosten von Verletzten)
- Immaterielle Monetarisierungsansätze (z.B. Zahlungsbereitschaft zur Vermeidung von Schmerz und Leid)

Die Komponenten entsprechend Abbildung 10 sind auch zur Abbildung der System-Funktionalität bei Resilienzmaßnahmen zu betrachten.

Nutzenkomponente	Bezeichnung	Kurzbeschreibung
Investitionskosten		Summe aller projektspezifischen Kosten
Veränderung der Betriebskosten	NB	Änderung der Beförderungs- bzw. Transportkosten im Personen- und Güterverkehr
Veränderung der Reisezeit	NRZ	Nutzen aus veränderter Reisezeit im Personenverkehr
Veränderung der Transportzeitnutzen der Ladung	NTZ	Nutzen aus veränderter Transportzeit im Güterverkehr
Veränderung der Zuverlässigkeit	NZ	Projektinduzierte Nutzen aus Veränderung der Zuverlässigkeit von Verkehrsabläufen
Veränderung des impliziten Nutzens	NI	Implizierter Nutzen durch zusätzliche Mobilität
Veränderung der Verkehrssicherheit	NS	Veränderung der Unfallkosten hinsichtlich Personen- und Sachschäden
Veränderung der Geräuschbelastung	NG	Nutzen aus projektinduzierten Veränderungen der Geräusch- bzw. Lärmbelastung
Veränderung der Abgasbelastung	NA	Nutzen aus projektinduzierten Veränderungen der Abgasbelastung (Luftschadstoffe und Treibhausgasemissionen)
Lebenszyklusemission von Treibhausgasen der Infrastruktur	NL	Summe der Treibhausgasemissionen durch Bau, Unterhalt und Betrieb des Infrastrukturprojekts («Lebenszyklusemissionen»)
Veränderung der innerörtlichen Trennwirkung	NT	Verminderung innerörtlicher Trennwirkungen (Wartezeiten und Umwege für Fussgänger)
Nutzen bei konkurrierenden Verkehrsträgern	NK	Auswirkungen eines Projekts auf den Nutzen aus der Benutzung anderer Verkehrsträger
Veränderung der Betriebs- und Instandhaltungskosten der Verkehrswege	NW	Nutzen aus projektinduzierten Veränderungen der Erneuerungs- und Instandhaltungskosten

Abbildung 10: Nutzen- und Kostenkomponenten der Bewertungsmethodik des BVWP 2030 [51]

Auswirkungen auf das wirtschaftliche Wachstum und die Beschäftigung werden – wie das Beispiel BVWP 2030 zeigt – nur sehr selten in die Bewertung von (Resilienz-) Maßnahmen einbezogen. Zur Überprüfung der gesamtwirtschaftlichen Folgen von (Resilienz-)Maßnahmen bestehen zwar verschiedene statistische und/oder gesamtwirtschaftliche Modelle (siehe Anhang 2). Diese haben – im Gegensatz zu England und Österreich – bislang aber keinen Eingang in standardisierte Bewertungsverfahren in Deutschland gefunden. Im BVWP 2030 wurde aufgrund der Probleme sogar auf eine entsprechende Bewertungskomponente, die Bestandteil der früheren Bewertungsmethodik war, verzichtet. Gründe dafür sind, dass die Schätzung solcher Effekte weniger sicher und robust ist, als die von anderen Wirkungen. Zudem besteht die Gefahr hinsichtlich Doppelzählungen, insbesondere weil die Abgrenzung zu den bestehenden Nutzenkomponenten (insb. Reisezeiten) nicht klar ist und die Methodiken zur Ermittlung solcher Effekte einer stetigen Diskussion unterliegen [49]. Auch werden Wachstums- und Struktureffekte von Verkehrsmaßnahmen zum Teil argumentativ ausgeschlossen, weil Verkehrsinfrastruktur in hohem Ausmaß zur Verfügung steht (Ubiquität der Verkehrsinfrastruktur).

Das Abbilden der Funktionalität eines Systems hängt stark von der räumlichen, zeitlichen und inhaltlichen Systemabgrenzung ab. Je nach Projektdimension und politischen Rahmenbedingungen können die Auswirkungen der Resilienzmaßnahmen auf alle Bereiche der Nachhaltigkeit und auf alle Verkehrsarten und Verkehrsmittel sowie auf die Gesamtwirtschaft berücksichtigt werden.

Es gilt festzuhalten, dass es eine Vielzahl von Bewertungskomponenten für Maßnahmen im Verkehrsbereich gibt. Diese müssen für Resilienzmaßnahmen nicht neu erfunden werden. Erfahrungsgemäß stellt die Ermittlung der Auswirkungen bezüglich Resilienz (Wahrscheinlichkeit, Ausmaß und Reaktion aufgrund einer Einwirkung über die Zeit) in der Praxis eine große Herausforderung dar. Umgekehrt ist aber auch anzumerken, dass die Resilienz bei der Bewertung von Maßnahmen im Verkehrsbereich üblicherweise nicht berücksichtigt wird. Sie stellt keine eigene Nutzenkomponente dar. Es sollte deshalb geprüft werden, inwieweit Resilienz als eigene Bewertungskomponente in solche Verfahren aufgenommen werden könnte.

5 Methodische Ansätze zur Bewertung von Resilienzmaßnahmen

5.1 Allgemeines

Die Auslegeordnung und Auswahl der methodischen Ansätze zur Bewertung von Resilienzmaßnahmen stellt einen wichtigen Fokus der vorliegenden Untersuchungen dar. Dabei wird die Frage untersucht, ob die in Erwägung gezogenen Maßnahmen für eine resiliente Systemfunktionalität verhältnismäßig resp. zweckmäßig sind.

Zur Beantwortung dieser Frage können unterschiedliche methodische Ansätze zur Bewertung der Resilienzmaßnahmen herangezogen werden. Diese lassen sich folgender Struktur unterordnen und werden in den nachfolgenden Kapiteln detailliert beschrieben:

1. Methoden zur Ermittlung des erwarteten Funktionalitätsverlusts im Ereignisfall.³
2. Methoden zur Abschätzung der Eintrittswahrscheinlichkeiten von schadhafte Ereignissen.
3. Methoden zur Bewertung von Resilienzmaßnahmen.

5.2 Ermittlung des möglichen Funktionalitätsverlusts

Der erwartete Funktionalitätsverlust lässt sich anhand der konzeptionellen Überlegungen in Kapitel 2.2 durch das Flächenintegral über der (im Ereignisfall abfallenden und danach wieder ansteigenden) Funktionalitätskurve ableiten. Für diese Abschätzung des Funktionalitätsverlusts ist allerdings eine vorhergehende Definition der System-Funktionalität zwingend. Das heißt, es müssen jene (eines oder mehrere) Beurteilungskomponenten festgelegt werden, welche im Zusammenhang mit der Resilienzanalyse die Funktionalität des Systems beeinflussen. In anderen Worten: Die Funktionalität wie in Abbildung 5 in Form eines Kurvenverlaufs dargestellt, entspricht der Funktion aus einem oder mehreren Beurteilungskriterien (z.B. Verkehrskapazität, Todesfälle, Bruttoinlandsprodukt).

³ Nach Ansicht der Autoren steht bei Resilienzanalysen die Ermittlung des erwarteten Funktionalitätsverlusts im Falle eines schadhafte Ereignisses im Vordergrund und wird deshalb als erster Analyseschritt aufgeführt. Bei reinen Risikobetrachtungen

erfolgen die Analyseschritte 1 und 2 oft in umgekehrter Reihenfolge.

5.3 Abschätzung der Eintrittswahrscheinlichkeit

Die Risikoermittlung erfolgt zweistufig: Zum einen bedarf es einer Abschätzung des im Ereignisfall zu erwartenden Funktionalitätsverlusts des Systems. Zum anderen muss die Wahrscheinlichkeit abgeschätzt werden, mit der das zu berücksichtigende schadhafte Ereignis stattfinden wird oder mit der das zu berücksichtigende schadhafte Ereignis eine negative Einwirkung auf das System verursachen wird. Die Methoden zur Abschätzung von Eintrittswahrscheinlichkeiten sind sehr zahlreich und mit unterschiedlichem statistischen Tiefgang.

Die Beschreibung der Methoden zur Ermittlung der erwarteten Wahrscheinlichkeit von schadhafte Ereignissen sowie zur Berücksichtigung der damit verbundenen Unschärfen ist nicht Gegenstand der vorliegenden Untersuchungen. Hierzu wird z.B. auch bestehende risikobasierte Ansätze und Verfahren verwiesen. Für die Bewertung von Resilienzmaßnahmen ergeben sich folgende Anforderungen:

- a) Es müssen zu betrachtende schadhafte Ereignisse definiert werden (z.B. Unwetter, Terrorismus),
- b) deren Eintretenswahrscheinlichkeit muss abgeschätzt werden⁴ und
- c) es muss dargestellt werden, ob und inwieweit die zu bewertende Resilienzmaßnahme die Eintretenswahrscheinlichkeit beeinflusst.

Allerdings obliegt die Einschätzung solcher Wahrscheinlichkeiten nur selten dem Infrastrukturbetreiber selbst, da entweder von den Behörden Grundlagen (z.B. Kartenmaterial für Naturgefahren oder netzweiten Unfallrisiken) zur Verfügung gestellt oder mit Hilfe von Experten solche Wahrscheinlichkeiten ermittelt werden.

5.4 Methoden zur Bewertung von Resilienzmaßnahmen

Es besteht heute eine Vielzahl an Methoden und Vorgehensweisen zur Bewertung von Resilienzmaßnahmen. Dies ist unter anderem dadurch bedingt, dass Resilienzmaßnahmen hinsichtlich unterschiedlicher schadhafte Ereignisse wie Naturkatastrophen (Hochwasser, Stürme etc.), vorzeitige Alterung der Infrastruktur aufgrund extremer Umweltbedingungen etc. vorgekehrt und diese auch von unterschiedlichen Fachdisziplinen bewertet wer-

den. Gemein haben die Methoden, dass sie größtenteils auf einer Gegenüberstellung der investierten Maßnahmenkosten und des resultierenden Nutzens für die Gesellschaft beruhen. Allerdings können die Berechnungsansätze sehr unterschiedlich sein, wodurch letztlich auch unterschiedliche Ergebnisse erzielt werden oder unterschiedliche Empfehlungen resultieren. Ein wesentlicher Unterschied ist beispielsweise, wie weit der „Nutzen-Begriff“ gefasst wird oder inwieweit die Maßnahmenwirkungen monetarisiert werden.

Im Folgenden werden zunächst die in der berücksichtigten Literatur am häufigsten vorkommenden Bewertungsverfahren vergleichend beschrieben.

Diese sind:

- Deskriptive Beurteilung (DB)
- Vergleichswertanalyse (VWA)
- Nutzwertanalyse (NWA)
- Kosten-Wirksamkeits-Analyse (KWA)
- Nutzen-Kosten-Analyse (NKA)

VWA, NWA und KWA werden auch als Multikriterielle Verfahren (engl. = Multi-Criteria-Analysis (MCA)) bezeichnet [48], [52]. Die unterschiedlichen Verfahren der MCA zeichnen sich dadurch aus, dass sie kein einzelnes übergeordnetes Kriterium nutzen. Die NKA hat im Gegensatz dazu ein Oberziel, nämlich die Steigerung der gesellschaftlichen Wohlfahrt, welche durch verschiedene Kriterien aus Umwelt und Gesellschaft konkretisiert wird. Letztlich werden somit in allen Verfahren eine Vielzahl von Kriterien und Indikatoren verwendet [53] [54] [47].

Deskriptive Beurteilung

Bei der deskriptiven Beurteilung werden die Wirkungen ausschließlich qualitativ beschrieben. Es erfolgt keine Bewertung (Bepunktung oder Benotung) der Wirkungen.

Vergleichswertanalyse

In der Vergleichswertanalyse werden den Auswirkungen, die in benoteten, physikalischen bzw. monetären Messgrößen ausgedrückt sind, Punkte (Vergleichswerte) zugeordnet, so dass die Auswirkungen miteinander vergleichbar sind.

Nutzwertanalyse

Die vorher beschriebenen Vergleichswerte bilden die Basis der Nutzwertanalyse. In der Nutzwertanalyse werden, um eine Gesamtbewertung vorneh-

4 Ggf. unter Berücksichtigung der Unschärfen

men zu können, die Vergleichswerte resp. Zielbeiträge unter Einbezug der entsprechenden Zielgewichtung addiert.

Da die Vergleichswert- und die Nutzwertanalyse aufeinander aufbauen, erfolgt die Beschreibung der Verfahren hier gemeinsam.

Sowohl in der Vergleichswert- wie auch in der Nutzwertanalyse werden die Auswirkungen ermittelt (vgl. Abbildung 11, Schritt 1) und diesen Auswirkungen mittels Nutzenfunktionen innerhalb einer einheitlichen (Noten-)Skala Punkte zugeteilt (Schritt 2). Dabei spielt es keine Rolle, ob die Skala von +3 bis -3 oder von +1000 bis -1000 geht. Sie muss lediglich bei allen Indikatoren gleich angewendet werden, so wie beispielsweise bei Schulnoten die Notenskala von 1 bis 6 ausreicht.

Ziel der Nutzwertanalyse ist die Ermittlung eines Gesamtnutzwertes je Planfall/Resilienzmaßnahme. Dazu ist allen Indikatoren ein Gewicht (in %) zugeordnet, mit welchem der Vergleichswert zu multiplizieren ist. Wo ein Indikator nicht bewertet werden kann, behält dieser trotzdem sein Gewicht, aber es werden keine Veränderungen gegenüber dem Referenzfall ausgewiesen. Damit wird verhindert, dass die bewerteten Indikatoren durch die Nicht-Bewertung anderer ein größeres Gewicht erhalten. Die entstehenden Produkte aus Vergleichswert und Zielgewicht (Teilnutzwert) werden über alle Indikatoren summiert. Das Resultat ist die Entscheidungskennziffer Gesamtnutzwert (vgl. Abbildung 11, Schritt 3)

Zur Festlegung der Nutzenfunktionen (vgl. Abbildung 11, Schritt 2) besteht kein allgemein anerkanntes Verfahren. Dies birgt allerdings die Gefahr, dass durch die vorgenommene Skalierung Wertungen in das Verfahren einfließen, die als versteckte, implizite Gewichtung wirken. Um bei diesem Verfahrensschritt größtmögliche Transparenz zu gewährleisten, werden die Nutzenfunktionen offen ausgewiesen, nach möglichst einheitlichen Grundsätzen, leicht verständlich und nachvollziehbar sowie nicht unter idealtypischen oder hypothetischen Annahmen definiert.

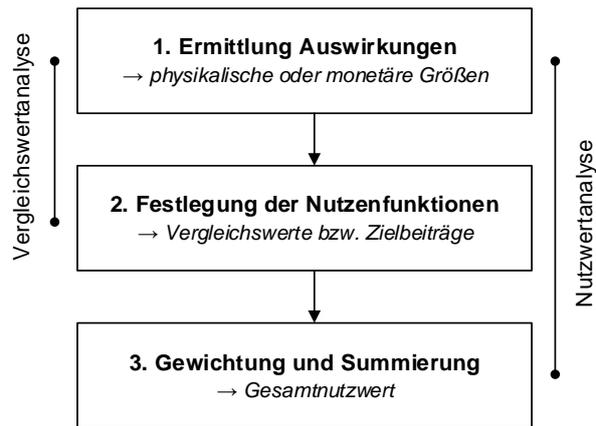


Abbildung 11: Vorgehen bei der Vergleichswert- und Nutzwertanalyse

Dabei liegt die größte Herausforderung in der Benotung der deskriptiven Indikatoren. Hier obliegt es allein dem Bewerter, zu sagen, was für ihn eine 1 oder eine 6 ist.

Für alle Indikatoren mit physikalischen Messgrößen können relative oder absolute Nutzenfunktionen definiert werden. Relativ sind diese, wenn nur Varianten untereinander verglichen und bewertet werden. Die beste Variante erhält die maximale Punktzahl, die schlechteste erhält die geringste Punktzahl. Dazwischen wird linear interpoliert. Weil bei diesem Vorgehen keine absoluten Werte berücksichtigt sind, werden kleine Unterschiede bei einem Indikator folglich gleich groß bewertet, wie große Unterschiede bei einem anderen Indikator.

Eine absolute Bewertung erfolgt erst dann, wenn die Grenzen der Nutzenfunktionen durch „absolute“ Regeln definiert werden. Zum Beispiel können die Eckwerte der Skala durch eine 10%ige Verbesserung (entspricht maximaler Punktzahl) bzw. Verschlechterung (entspricht minimaler Punktzahl) des Referenzfalls erreicht werden. Dazwischen wird linear interpoliert. In den folgenden Fällen sollte aber von dieser Regel abgewichen werden:

- Die Zusammenhänge sind nichtlinear: So ist z.B. die Schadenswirkung beim Lärm nicht linear, sondern logarithmisch. Die Nutzenfunktionen und die Skalenendpunkte sind fallspezifisch festzulegen.
- Zum Beispiel, indem Eckwerte der Nutzenfunktion als Abweichungen von 3dB(A) festgelegt werden, was einer Verdopplung bzw. Halbierung der Schallenergie entspricht.
- Mindeststandard oder gesetzlich Vorgaben bereits im Referenzfall erfüllt. Die Planfälle erzielen bezüglich eines Indikators größere Veränderungen als 10% gegenüber dem Referenzfall. Wenn aber bereits der Referenzfall die Einhaltung des Ziels (z.B. die

Einhaltung von Grenzwerten erfüllt), sollte die Skala z.B. auf 100% Veränderung gegenüber dem Referenzfall festgelegt werden, um diesbezügliche Veränderungen nicht zu stark zu gewichten.

Bei Indikatoren mit monetären Messgrößen kann der MONAQ-Ansatz (Ansatz der monetären Äquivalenz) berücksichtigt werden. Dabei wird zugrunde gelegt, dass eine Veränderung um 1 Mio. EUR pro Jahr immer gleich viele Punkte ergeben muss. Als Basis zur Ermittlung der Veränderung der Punktzahl dient das Ergebnis Infrastruktur: Die minimale Punktzahl entspricht den jährlichen Infrastrukturkosten (Kapitaldienst und Erhaltungskosten), welche aus der Investition einer (gedachten) Höchstvariante, z.B. von 50 Mrd. EUR entstehen. Die daraus folgenden jährlichen Infrastrukturkosten (Kapitaldienst und Erhaltung) betragen rund 2,4 Mio. EUR. Anhand dieses Betrags lässt sich ein Quotient „Nutzenpunkte je 1 Mio. EUR“ bilden. Bei einer Skala von 100 Punkten (z.B. von -50 bis +50 Punkten) ergeben sich daraus rund 48 Mio. EUR pro Jahr für einen Nutzenpunkt. Dieser Wert wird auf die übrigen monetären Indikatoren übertragen. Dadurch ist eine Bewertungsübereinstimmung der monetären Indikatoren mit der Nutzen-Kosten-Analyse gewährleistet. Wird diese nicht gewünscht, weil man z.B. die Monetarisierung von Unfallschäden und von CO₂-Emissionen kritisch gegenübersteht, kann mit den physikalischen Messeinheiten für Unfälle oder Emissionen wie oben für andere physikalische Messeinheiten vorgegangen werden.

Kosten-Wirksamkeits-Analyse

Für die Nutzwertanalyse werden alle Vergleichswerte mit dem Zielgewicht multipliziert und addiert. Damit erhält man einen Gesamtnutzwert, der Aussagen dazu zulässt, welche Variante die Vorteilhaftere ist. Bei einer Skala, welche die Abweichungen vom Referenzfall anzeigt, können auch Aussagen getroffen werden, ob die Variante besser oder schlechter als dieser Referenzfall ist.

Werden die Investitions-, Betriebs- und (diskontierten) Jahreskosten nicht in der Nutzwertanalyse berücksichtigt, sondern der Nutzwert über alle anderen Indikatoren auf die Investitionskosten bezogen, erhält man ein Kosten-Wirksamkeits-Verhältnis, welches als Effizienzmaß geeignet ist („Wieviel Nutzenpunkte erhält man je eingesetztem Euro?“). In diesem Fall spricht man von einer Kosten-Wirksamkeits-Analyse.

Nutzen-Kosten-Analyse

Die am häufigsten angewandte Methode zur Maßnahmen-Bewertung ist die Nutzen-Kosten-Analyse. Die volkswirtschaftliche Nutzen-Kosten-Analyse

untersucht die zu bewertenden Planfälle unter dem Hauptziel der gesamtwirtschaftlichen, monetär bewerteten Wohlfahrtssteigerung. Für alle betrachteten Kriterien sind die maßnahmenbedingten Änderungen zu quantifizieren und diese Veränderungen zu monetarisieren. Der Nutzen-Kosten-Analyse liegt das Opportunitätskostenprinzip zugrunde. Bei der Realisierung eines Angebotskonzeptes können die hierfür eingesetzten Mittel nicht mehr für andere öffentliche oder private Verwendungszwecke eingesetzt werden. Hinsichtlich der Wirkungen nach der Realisierung kann es bei den einzelnen Zielen zu Einsparungen an Ressourcen oder zu einem Mehrverbrauch kommen (z. B. Energieverbrauch). Kosten werden somit auch als negative Nutzen, als verhinderte positive Wirkungen relevanter Alternativen gesehen, Nutzen entsprechend als negative Kosten. Kosten sind daher stets Opportunitätskosten (entgangener Nutzen alternativer Verwendungen) und Nutzen entsprechend Opportunitätsnutzen (entgangene Kosten alternativer Verwendung). Ein maßnahmenbedingter Mehrverbrauch von Energie stellt somit Kosten bzw. negative Nutzen dar, weil die Ressource Energie nicht in alternativer Verwendung eingesetzt werden kann (z.B. zum Heizen von Wohnungen); maßnahmenbedingte Reduktionen des Energieverbrauchs stellen umgekehrt Nutzen bzw. negative Kosten dar, da die Energie nunmehr für alternative Zwecke zur Verfügung steht.

In der Kosten-Nutzen-Analyse werden Ressourcenverbräuche betrachtet, sofern diese monetarisierbar sind. Dabei zählen als Ressourcen bspw. die Infrastruktur, das Personal, Rollmaterial, Umwelt oder Zeit. Im Bereich „Ziele“ sind diejenigen Indikatoren dargestellt, welche im Rahmen des Deutschen Bundesverkehrswegeplans monetarisiert und damit in den Kosten-Nutzen-Analyse berücksichtigt werden [55].

Für die Bewertung der Auswirkungen werden Wertansätze in Geldeinheiten herangezogen (z.B. EUR je emittierter Tonne CO₂ oder EUR je Personendauer) und die maßnahmenbedingten Veränderungen gegenüber dem Referenzfall damit multipliziert.

Die Veränderungen der Ressourcenverbräuche werden im Rahmen für die Realisierungs- und die Nutzungsdauer des Projektes ermittelt. Für die Wirtschaftlichkeitsberechnung wird eine reale (teuerungsberichtigte) soziale Diskontrate zugrunde gelegt. Durch Diskontierung der Werte für die einzelnen Jahre (Barwerte) und deren Addition ergibt sich der Barwert (Kapitalwert) des Projektes.

Die Summe der Barwerte über alle Indikatoren ergibt die Nutzen-Kosten-Differenz. Ist die Nutzen-

Kosten- Differenz grösser als Null, so ist die Maßnahme volkswirtschaftlich sinnvoll. Jenes Angebotskonzept mit der höchsten Nutzen-Kosten-Differenz ist aus volkswirtschaftlicher Optik zu favorisieren.

Das Ergebnis einer Nutzen-Kosten-Analyse gibt dem Entscheidungsträger Auskunft darüber, ob sich die Realisierung einer Maßnahme im Vergleich zum Referenzfall aus Sicht der Effizienz lohnt. Zudem lassen sich anhand der Nutzen-Kosten-Analyse auch verschiedene Maßnahmenvarianten miteinander vergleichen oder priorisieren. Dadurch wird ermöglicht, die finanziellen Mittel dort einzusetzen, wo der volkswirtschaftliche Nutzen am größten ist.

Abbildung von Resilienz in bereits bestehenden Bewertungsverfahren

Prinzipiell sind die heute bereits bestehenden Bewertungsverfahren z.B. zur Bewertung von Neu- und Ausbaumaßnahmen im Verkehr auch geeignet, um Resilienzmaßnahmen zu bewerten. Dazu zählen in Deutschland vor allem die folgenden Ansätze:

- Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur BMVI (2006): Standardisierte Bewertung von Verkehrswegeinvestitionen des öffentlichen Personennahverkehrs).
- Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur BMVI (2014): Endbericht zum FE-Projekt 96.0974/2011: Grundsätzliche Überprüfung und Weiterentwicklung der Kosten-Nutzen-Analyse im Bewertungsverfahren der Bundesverkehrsplanung.
- Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur BMVI (2016): Bundesverkehrswegeplan 2030.
- Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen FGSV (1997): Empfehlungen für Wirtschaftlichkeitsuntersuchungen von Straßen) (Die Aktualisierung der EWS ist in Bearbeitung, aber noch nicht publiziert)

Im internationalen Vergleich zeigt sich, dass zwischen den einzelnen Ländern zwar teilweise bedeutende Unterschiede bestehen, aber auch wichtige Gemeinsamkeiten in der methodischen Vorgehensweise existieren. Am häufigsten wird eine Nutzen-Kosten-Analyse durchgeführt und in vielen Fällen mit weiteren Kriterien ergänzt sowie zu einer Multikriterienanalyse (VWA, KWA, NWA) oder einer Kombination aus Nutzen-Kosten-Analyse und Multikriterienanalyse ausgebaut.

In der Praxis werden verschiedene Methoden zur Bewertung von Projekten und Maßnahmen angewendet. Der größte Unterschied zwischen den Bewertungsverfahren liegt dabei in der jeweiligen Bearbeitungstiefe und den damit verbundenen Anforderungen an die Bearbeitenden. Zusätzliche Unterschiede können beispielsweise durch die Wahl des Betrachtungszeitraumes oder durch unterschiedliche Systemabgrenzungen und Definitionen der Funktionalität eines Systems entstehen.

In Abbildung 12 ist ein Methodenvergleich auf Grundlage der gesichteten Literatur und den eigenen Erfahrungen zu finden. Dabei werden die oben ausgewählten Methoden vergleichend gegenübergestellt.

Der Fokus für die Auswahl der für das vorliegende Forschungsprojekt relevanten Methoden liegt auf folgenden Fragestellungen:

- Ist die Methode grundsätzlich für alle Maßnahmen im Bereich der Straßeninfrastruktur und Verkehrsmodi anwendbar?
- Welche Voraussetzungen (Daten, Know-how, etc.) sind für eine Anwendung der Methode erforderlich?
- Wie hoch ist der Grad der Komplexität sowie der Standardisierungsgrad bei der Anwendung der Methode?
- Wie ist die Praxistauglichkeit der Methode zu bewerten?
- Wie zuverlässig, nachvollziehbar und auch vertretbar sind die methodenspezifischen Ergebnisse? Welche Unsicherheiten bei der Anwendung bestehen?

Diese Fragen bilden das Gerüst der Gegenüberstellung der Bewertungsmethoden in Abbildung 12 und lassen sich mit Bezug zu Resilienzmaßnahmen wie folgt zusammenfassend beantworten:

- Sämtliche berücksichtigte Methoden lassen sich für eine Bewertung von Resilienzmaßnahmen im Bereich der Straßeninfrastruktur anwenden.
- Die Nutzen-Kosten-Analyse stellt die höchsten Anforderungen hinsichtlich Datenbedarf und dem Wissen über Wirkungsketten sowie Abhängigkeiten zwischen Systemen und deren Modellierung. Mit Bezug zur Resilienzmaßnahmen steigen die Anforderungen noch, da Wahrscheinlichkeiten für Einwirkungen auf die Funktionalität und das Schadensausmaß abgeschätzt werden müssen.
- Die deskriptive Beurteilung von Resilienzmaßnahmen kann aufgrund ihrer geringen

Komplexität ohne große Voraussetzungen mit qualitativen Einschätzungen angewandt werden, wie z.B. Investitionen (gering/mittel/hoch) Schadensausmaß (gering/mittel/hoch). Dieser Aspekt relativiert sich allerdings, denn aufgrund der fehlenden formalen Herleitungen und Rahmen ist bei der deskriptiven Beurteilung eine vollständige und korrekte Argumentation über eine Vielzahl von Indikatoren durchaus eine komplexe Angelegenheit.

- Mit dem BVWP und der EWS bestehen standardisierte Verfahren für die Nutzen-Kosten-Analyse. Für die anderen Verfahren gibt es keine Standardisierung (z.B. von Punkteregebnissen, Nutzenfunktionen etc.). Diese werden in jedem Anwendungsfall erneut festgelegt.
- Die Praxistauglichkeit aus Sicht des Anwenders nimmt ausgehend von einer qualitativen deskriptiven Beurteilung hin zu einer komplexeren Nutzen-Kosten-Analyse ab.
- Aus Sicht der Entscheidungsträger verhält sich dieser Umstand jedoch genau umgekehrt, weil bei einer Nutzen-Kosten-Analyse die Ergebnisziffer eine „vertraute Dimension“ in Form von Geldeinheiten oder eines Faktors aufweist und dem Kostenaufwand von Maßnahmen in gleichem Maß gegenübergestellt werden kann. Für Entscheidungsträger sind die Resultate somit besser verständlich, vermittelbar und auf einem Blick erkennbar.
- Aufgrund der Standardisierung bestehen die geringsten Unsicherheiten bei der Nutzen-Kosten-Analyse, auch wenn die Unsicherheiten bezüglich Datenverfügbarkeit und Modellannahmen größer sind. Hier gilt aber: „Besser gut geschätzt als schlecht geraten.“
- Für die Vergleichswertanalyse, Nutzwertanalyse und Kosten-Wirksamkeitsanalysen ergibt sich der Vorteil, dass mehr Funktionalitätskomponenten und dadurch auch mehr Wirkungen berücksichtigt werden können als bei der KNA, da diese für sämtliche zu berücksichtigenden Funktionalitätskomponenten monetäre Bewertungssätze benötigt.

5.5 Fazit

Für Resilienzmaßnahmen sollten die Kosten und die Wirkungen – je nach Planungsstand – möglichst gut geschätzt werden. Dies gilt für die Investitionen, die reduzierten Wahrscheinlichkeiten für schadhafte Ereignisse, deren Einwirkung auf die Funktionalität des Systems, das Schadensausmaß und die Zeitdauer der Erholung des Systems. Solche Schätzun-

gen sollten den Einsatz verschiedener Bewertungsmethoden mit unterschiedlichem Tiefgang (bis zur Nutzen-Kosten-Analyse) ermöglichen. Nach Möglichkeit sollten die Unschärfen der Schätzungen in der Bewertung der Resilienzmaßnahmen berücksichtigt werden.

Falls nicht alle erwarteten Wirkungen monetarisierbar sind, können ergänzend auch die Vergleichswert-, Nutzwert- oder Kosten-Wirksamkeits-Analyse durchgeführt werden. Für eine verlässliche Bewertung von Resilienzmaßnahmen sollten dann allerdings alle drei Verfahren gemeinsam angewendet werden.

Fazit ist auch, dass die gesamtwirtschaftlichen Auswirkungen von Maßnahmen in Deutschland in aktuellen Projekten und Vorgaben für Projekte nicht berücksichtigt werden. Entsprechende Verfahren bestehen vor allem in Österreich und England (vgl. Anhang 2).

	deskriptive Beurteilung	Multikriterielle Verfahren (Multi-Criteria-Analysis (MCA))		Nutzen-Kosten-Analyse (NKA)
		Vergleichswertanalyse (VWA)	Kosten-Wirksamkeits-Analyse (KWA)/ Nutzwertanalyse (NWA)	
Ist die Methode grundsätzlich für alle Maßnahmen im Bereich der Straßeninfrastruktur und Verkehrsmodi anwendbar?	ja	ja	ja	ja
Welche Voraussetzungen (Daten, Know-how, etc.) sind für eine Anwendung der Methode erforderlich?	Keine Voraussetzung. Beurteilung erfolgt auf Grundlage einer qualitativ begründeten Experteneinschätzung quantifizierte und nicht quantifizierte Wirkungen werden berücksichtigt	wie deskriptive Beurteilung. Zusätzlich müssen Punkteregeln erstellt werden. quantifizierte und nicht quantifizierte Wirkungen werden berücksichtigt.	wie VWA Zusätzlich müssen Gewichtungen je Indikator vorliegen. quantifizierte und nicht quantifizierte Wirkungen werden berücksichtigt	Wirkungen müssen quantifiziert werden, z.B. mit Verkehrsmodellen. Monetäre Wertansätze nicht unbedingt verfügbar. Quantifizierung notwendig.
Wie hoch ist der Grad der Komplexität sowie der Standardisierungsgrad bei der Anwendung der Methode?	formal gering keine Standardisierung	gering keine Standardisierung	größer als bei VWA aufgrund Gewichtung keine Standardisierung	große Komplexität große Standardisierung (siehe. BVWP, EWS)
Wie ist die Praxis-tauglichkeit der Methode zu bewerten?	Anwendung erscheint einfach, argumentative Verfahren haben aber auch den Nachteil, dass die Nachvollziehbarkeit nutr bedingt gegeben ist Entscheidungsunterstützung gering: Entscheidungsträger haben kaum die Möglichkeit Argumentation je Indikator zu lesen (zeitl. Aufwand zu groß)	Wie deskriptive Beurteilung: Anwendung erscheint einfach, Punkte-regeln sind aber nicht normiert oder standardisiert. => kann zu geringe Akzeptanz führen Höher als deskriptive Beschreibung, da Vor- und Nachteile schneller erkennbar sind.	wie VWA Ziel- und Indikator-gewichte nicht normiert o-der standardisiert => geringe Akzeptanz geringer als VWA: Gesamtnutzwert wenig Aussagekraft. Keine Vergleichsmöglichkeit, ob das Ergebnis gut o-der schlecht ist.	Aufwendiges Verfahren zur Ermittlung der Auswirkungen großer Datenbedarf sehr hoch: Da Investition in EUR ein Nutzen in gleicher Dimension gegenübergestellt wird. Die Größenordnung/Relevanz der einzelnen Indikatoren steht im Verhältnis zur gesellschaftlichen Bedeutung
Wie zuverlässig, nachvollziehbar und auch vertretbar sind die methodenspezifischen Ergebnisse? Welche Unsicherheiten bei der Anwendung bestehen?	je nach Bearbeiter können Ergebnisse unterschiedlich sein, da kein klares Modell angewendet wird große Unsicherheiten	wie deskriptive Indikatoren bei Quantifizierungen tendenziell höhere Validität der Ergebnisse geringere Unsicherheit als deskriptive Beschreibung	wie VWA Nachvollziehbarkeit der Ergebnisse wird aber aufgrund der Zielgewichtung und der fehlenden Standardisierung erschwert	Nachvollzug durch Standardisierung der Verfahren gegeben. abhängig von Güte der Modelle und der Datengrundlagen, prinzipiell aber besser als die anderen Verfahren, da für Quantifizierung mehr über Wirkungen nachgedacht und formaler abgeleitet werden muss. Unsicherheiten vorhanden
Können gesamtwirtschaftliche Wirkungen berücksichtigt werden?	nur argumentativ, (Behauptungen) ohne Nachweis oder Modelle	wie deskriptive Argumente ansonsten wie alle anderen Indikatoren	Wie deskriptive Argumente. ansonsten wie alle anderen Indikatoren	Erstellung Modelle notwendig Grundlagen heute in D fehlend

Abbildung 12: Vergleich der wichtigsten Bewertungsverfahren

6 Fallbeispiele

In diesem Kapitel wird anhand von Fallbeispielen gezeigt, wie sich das Resilienzkonzept in den praktischen Alltag des Infrastrukturmanagements umlegen lässt. Der Begriff Resilienz wird heute zwar in vielen verschiedenen wissenschaftlichen Disziplinen verwendet. Was jedoch in der wissenschaftlichen Theorie als ein bereits akzeptiertes und etabliertes Konzept erscheint, ist in der täglichen Praxis des Infrastrukturmanagements bisher nur selten umfänglich umgesetzt. Die durchgeführte Recherche nach Studien und Fallbeispielen zur praktischen Umsetzung führte zu einem eher überschaubaren Bild: Zwar werden häufig Bewertungen von Verkehrsmaßnahmen durchgeführt. Diese sind aber weniger Resilienzmaßnahmen, sondern hauptsächlich für Neu- und Ausbauprojekte erstellt worden.

Mit Bezug zu Resilienzmaßnahmen konnten nur wenig Studien gefunden. Aus verschiedenen, nachfolgend beschriebenen Gründen, stehen die folgenden fünf Fallbeispiele dennoch stellvertretend für den (weltweiten) aktuellen Anwendungsstand der Bewertung von Resilienzmaßnahmen.

Fallbeispiel 1, Neuseeland:

“Measuring the Resilience of Transport Infrastructure” [3], New Zealand Transport Agency Research Report No. 546, 2014.

Hierbei handelt es sich um einen Forschungsbericht, der durch die AECOM New Zealand Ltd im Auftrag der New Zealand (NZ) Transport Agency erstellt wurde. Die NZ Transport Agency ist ein neuseeländisches, staatseigenes Unternehmen, das dem Transportministerium (Ministry of Transport) unterstellt ist. Der Bericht beinhaltet einen Vorschlag für ein Konzept zur Bewertung der Resilienz des neuseeländischen Transportsystems. Dies anhand einer Methodik, die auf Grundlage ausgewählter Resilienzindikatoren einen sogenannten «resilience score» für einzelne Objekte, Streckenabschnitte oder das Gesamtnetz ausweist. Berücksichtigt werden können unterschiedlichste Arten von schädigenden Ereignissen, die auf das betrachtete System einwirken (single and all-hazards-approach). Dieses Bewertungskonzept unterstützt Entscheidungsträger dabei, gezielt Maßnahmen auszuwählen, die zu einer möglichst effizienten Erhöhung der Resilienz beitragen (Erhöhung des resilience score).

An diesem Fallbeispiel ist hervorzuheben, dass

Resilienzmassnahmen auch – weggehend vom technischen und organisatorischen Strasseninfrastruktursystem – auf das eigene Unternehmen ausgedehnt werden. So werden beispielsweise solche Fragestellungen berücksichtigt: Wie lässt sich das Risiko- und Resilienzbewusstsein unter den eigenen Mitarbeitern einer Infrastruktur betreibenden Organisation erhöhen?

In diesem Fallbeispiel wird ein konkretes Konzept zur Messung der Resilienz von Strasseninfrastruktursystemen vorgeschlagen. Zudem werden Ansätze zur Implementierung in die alltäglichen Prozesse der Infrastrukturbetreiber aufgezeigt und mittels Beispielen veranschaulicht. Das Konzept der Resilienzmessung scheint plausibel und die Umsetzung anhand sogenannter «Dashboards»⁵ praktikabel. Dem Entscheidungsträger wird dadurch schnell offenbart, an welchen Stellen und in welchem Maße Maßnahmen zu einer Erhöhung der Resilienz beitragen. Durch zusätzliche (nicht im Bericht beschriebene) Nutzen-Kosten-Überlegungen könnte somit ein kostenoptimales Set an Massnahmen identifiziert werden.

Der Nutzen einer solchen standardisierten Resilienzmessung für den Infrastrukturbetreiber liegt vor allem in der Identifikation möglichst wirksamer Massnahmen zur Erhöhung der Resilienz einzelner Objekte oder des gesamten Infrastrukturnetzes im Perimeter des Entscheidungsträgers. Die Methodik zur Ermittlung des Resilience Score im genannten Fallbeispiel ist zwar nicht kompliziert und kann anhand meist verfügbarer IT-Programme (z.B. Microsoft Excell) umgesetzt werden. Ein bedeutender Aufwand kann allerdings in der initialen Erfassung der jeweiligen Indikatoren und ihrer fortlaufenden Aktualisierung entstehen.

Dass die Fragestellung der Resilienz in diesem Fallbeispiel sehr umfassend diskutiert wird, zeigt auch der Hinweis im Anhang des Berichts auf die Komplexität der Abschätzung von Eintretenswahrscheinlichkeiten schädigender Ereignisse und die damit verbundenen Unsicherheiten bei der Risikoeermittlung. Die Autoren des Fallbeispiels empfehlen, sich bei der Abschätzung der Eintretenswahrscheinlichkeit auf breitere Verteilungsformen der zugrundgelegten Wahrscheinlichkeitsverteilungen zu stützen, als dies bisher üblich war/ist. Dadurch werden konservativere Annahmen für die Wiederkehrperiodizität von schadhafenden Ereignissen getroffen (man geht von häufigeren Fällen aus).

Fallbeispiel 2, Schweiz:

«Bewertung von Varianten zur Verbesserung der

⁵ Unter einem Dashboard ist in diesem Zusammenhang eine übersichtliche Darstellung der wichtigsten Resilienzindikatoren zu verstehen, so dass auf einem Blick besonders niedrige Werte

erkannt und entsprechende Handlungsoptionen zur angestrebten Resilienz des verantworteten Systems abgeleitet werden können.

Wintersicherheit auf der Kantonsstrasse Sils» [56], EBP-Bericht, 2014

Zur Erhöhung der Winter- und Sommersicherheit der Hauptstraße zwischen Silvaplana - Castasegna hat der Kanton Graubünden in der Schweiz verschiedene Varianten erarbeiten lassen. Das Tiefbauamt des Kantons Graubünden beauftragte die EBP Schweiz AG, drei Varianten sowie die Nullvariante unter Verwendung von Risikoanalysen zu bewerten. Wesentliche Kenngrösse der Untersuchungen waren die Sperrzeiten für die Hauptstrasse und somit der Funktionalitätsverlust der Strasse über die Zeit im Sinne der unter Kapitel 2.1 dargestellten Definition von Resilienz.

Die Maßnahmen und Varianten, die in diesem Fallbeispiel zur Diskussion stehen, sind nicht zwingend als Resilienzmaßnahmen zu verstehen. Jedoch unter Berücksichtigung der Definition von Resilienzmaßnahmen in Kapitel 3.1 (Maßnahmen, die über die normativen/zwingenden Vorgaben hinausgehen) kann im Rahmen des im Fallbeispiel skizzierten Bewertungsverfahrens das Durchführen von aufwändigeren Risikobetrachtungen je nach Umsetzungsvariante selbst (also die Initiierung und Durchführung dieser risikobasierten Variantenstudie selbst) auch als Resilienzmaßnahme verstanden werden.

Fallbeispiel 3, USA:

«Seismic Options Analysis in Western Oregon» [57], EDR-Group, 2014

Für ein Erdbeben der Stärke 9.0 in der Subduktionszone im Westen Oregons an der amerikanischen Pazifikküste erarbeiteten zuständige Stellen ein Szenario über zu erwartende Infrastrukturschäden. Dieses war im Rahmen dieses Fallbeispiel der Ausgangspunkt für die Analysen der volkswirtschaftlichen Verluste, welche durch die disruptive Verschlechterung der Erreichbarkeit und die Unterbrechung von Güterströmen entstünden. Es wurde analysiert, wie stark welche Warenströme und damit welche Branchen von den Straßenunterbrechungen betroffen wären, welche direkten wirtschaftlichen Verluste dies zur Folge hätte und zu welchen indirekten und induzierten Einbußen dies führen würde. In einem weiteren Schritt wurde untersucht, inwieweit sich die Schäden durch drei unterschiedlich umfangreiche Programme für Investitionen in die Erdbebensicherheit zur Erhöhung der Resilienz der Infrastrukturbauten reduzieren ließen. Die Auswahl dieses Fallbeispiels ist erfolgt, weil sich durch das verwendete Tool ein Beispiel für eine alltagstaugliche, IT-gestützte Hilfestellung für Entscheidungsträger zeigen lässt, die auch eine Abschätzung der gesamtwirtschaftliche Folgen durch

schädigende Ereignisse und Einwirkungen auf die Strasseninfrastruktur beinhaltet.

Das Fallbeispiel TREDPLAN stützt sich im Wesentlichen auf eine grosse Datenbank, in der neben dem georeferenzierten Inventar des Strasseninfrastrukturnetzes auch Eingangsgrößen wie Bevölkerungseigenschaften, ökonomische und geschäftliche Muster sowie Handels- und Logistikströme hinterlegt sind. Durch eine intelligente Verknüpfung dieser Datengrundlagen lassen sich die Auswirkungen externer, schädigender Ereignisse auf ein System und dessen umgebende Region abschätzen.

Bei TREDPLAN handelt es sich um ein kostenpflichtiges Tool, das im Moment für eine Anwendung in den USA zur Verfügung steht. Bei Verfügbarkeit der entsprechenden Datengrundlagen könnte das Tool auch in Europa zum Einsatz kommen und Entscheidungsträgern im Infrastrukturmanagement als nützliches Hilfsmittel dienen.

Fallbeispiel 4, Europa:

«Security of Road Transport Networks (SeRoN)» [58], EU-Forschungsprojekt, 7. Rahmenprogramm, 2012

Im Forschungsprojekt „Security of Road Transport Networks (SeRoN)“ im Kontext des 7. EU-Forschungsrahmenprogramms wurde zwischen 2009 bis 2012 eine Methodik zur Identifizierung und Quantifizierung der Risiken kritischer Straßenelemente entwickelt und anhand von Fallbeispielen exemplarisch angewendet. Auf Grundlage von Kosten-Wirksamkeits-Analysen wird die Verhältnismäßigkeit von möglichen zusätzlichen Maßnahmen untersucht. Die Bewertung der Resilienz beruht also auf einer Einschätzung der resultierenden Risiken des Ausfalls eines kritischen Straßenelements der Verhältnismäßigkeit möglicher ergänzender risikomindernder Maßnahmen. Das entwickelte Verfahren gibt eine umfassende und gegliederte Übersicht über mögliche Schutzmaßnahmen für kritische Straßenelemente. Ebenso wurden im Forschungsprojekte normierte Richtkosten für zahlreiche Maßnahmen ausgewiesen. Ein spezifisches Verfahren zur Selektion potenziell geeigneter Maßnahmen ist nicht weiter definiert. Sie wird den Anwendern des Verfahrens überlassen.

Für die Anwendung des oben beschriebene Verfahrens wurde in ein IT-Tool entwickelt, das Infrastrukturbetreiber bei der Identifikation kritischer Netzbereiche unterstützen kann. Die Berechnungen innerhalb des (Excel-) Tools sind zwar von geringer Komplexität, allerdings umfasst das Tool viele Arbeitsblätter, so dass eine Anwendung aufwändig werden kann. Weil einige der Input-Daten durch Infrastrukturbetreiber und/oder Verkehrsexperten abge-

schätzt werden müssen, ist der Aufwand für die Erhebung der Inputgrößen beachtlich und setzt meist den Zugriff auf Verkehrs- und Logistikmodelle voraus. Sobald diese Grundeingaben vorliegen, kann das entwickelte Tool jedoch eine hilfreiche Unterstützung für Entscheidungsträger im Infrastrukturmanagement darstellen. Anhand von Beispiel-Anwendungen an besonders kritischen Verkehrsachsen (Öresund-Brücke und Brenner Strecke) wird die Tool-Anwendung anschaulich demonstriert. Das Fallbeispiel zielt auf die Identifikation besonders kritischer Strassennetzabschnitte. Es beinhaltet dagegen keine Massnahmeevaluation, um jene Abschnitte, Objekte oder Netzbereiche resilienter zu gestalten. Unschärfen in der Abschätzung der Eintretenswahrscheinlichkeiten oder des Schadensausmasses werden nur am Rande berücksichtigt.

Fallbeispiel 5, Deutschland:

«Verbundprojekt SKRIBT [45] – Schutz kritischer Brücken und Tunnel im Zuge von Straßen», Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) & VDI Technologiezentrum GmbH & BAST, 2013

Das Projekt SKRIBT wurde durch das BMBF initiiert. Ziel des Berichts war es für Strassenbrücken und -tunnel potentielle Gefährdungen zu identifizieren (Bedrohungsanalyse), Objektanalysen durchzuführen und Schutzmassnahmen zu entwickeln. Berücksichtigt werden können unterschiedlichste Arten von Gefahren (all hazard approach). Der Begriff Resilienz wird als solcher nicht verwendet. Die berücksichtigten Massnahmen reduzieren jedoch die Eintrittswahrscheinlichkeit und die Schäden eines möglichen Ereignisses und können somit entsprechend der Definition in Kapitel 3.1 auch als Resilienzmassnahmen betrachtet werden.

Dieses Fallbeispiel zeigt den aktuellen Stand der Überlegungen zum Umgang mit aussergewöhnlichen, schädigenden Ereignissen an Strassenbrücken und -tunneln in Deutschland. Das Resilienzkonzept wird dabei nur implizit aufgegriffen und implementiert.

In diesem Fallbeispiel werden konkrete Schutzmassnahmen für Brücken, Tunnel und ihre Nutzer empfohlen. Dies auf Grundlage einer indikatorbasierten Identifikation von kritischen Bauwerken. Dies ist ein im Grunde vergleichbares Vorgehen wie im Neuseeländischen Fallbeispiel 1, allerdings mit dem Unterschied, dass – anders als beim Resilience Score – sich der Ansatz in SKRIBT eher auf Kriterien der Kritikalität als auf jene der Resilienzbeurteilung stützt (siehe Differenzierung in Kapitel 2.1). Dabei werden auch die Massnahmenkosten im Zusammenhang mit Lebenszykluskosten sowie Wirksamkeits-Kosten-Analysen berücksichtigt. Die Methodik im Fallbeispiel SKRIBT ist sehr anschaulich beschrieben und dargestellt. Dies schafft eine wichtige

Grundlage für eine praktische Anwendung. Einst in den Kontext der Resilienzbeurteilung überführt, können die aufgeführten Massnahmenarten und -kosten eine sehr gute Grundlage für eine praktische Umlegung des Resilienzkonzepts bieten.

Die Identifikation kritischer Objekte anhand der Synthese verschiedener Eingangs- bzw. Indikatorgrößen im genannten Fallbeispiel ist relativ komplex. Die Erfassung der Eingangsgrößen ist bei Initiierung des Verfahrens aufwändig. Auf Unschärfen bei den Abschätzungen für die Eintretenswahrscheinlichkeiten schädigender Ereignisse sowie das zu erwartende Schadensausmass im Ereignisfall wird in diesem Fallbeispiel nicht eingegangen.

Factsheets

Diese Fallbeispiele spiegeln aus Sicht der Autoren den (weltweiten) Anwendungsstand von Resilienzkonzepten wider. Zusätzlich zu den Kurzbeschreibungen in den vorangegangenen Abschnitten wurden sie entsprechend der folgenden Fragestellungen ausgewertet:

1. Was war der Anlass für die Durchführung von Resilienzbeurteilungen?
2. Wie wurde die Resilienz bewertet/indiziert?
3. Wie wurden Resilienzmassnahmen abgeleitet und wie sind sie der Typisierung aus Abbildung 8 zuzuordnen?
4. Wie wurden Resilienzmassnahmen bewertet? Falls vorhanden: Was war das Nutzen-Kosten-Verhältnis? Wurden gesamtwirtschaftliche Folgen ausgewiesen?
5. Wie wird die praktische Umsetzung, Anwendbarkeit, Praktikabilität vollzogen bzw. sichergestellt?

Die Antworten auf diese Fragestellungen sind in Form von Factsheets im Anhang 1 zusammengefasst.

Erkenntnisse

Aus den Analysen der Fallbeispiele und der Beantwortung der oben genannten Fragestellungen lassen sich auf übergeordneter Ebene die folgenden Erkenntnisse ableiten:

- Aktuell werden die Herausforderungen des Resilienzmanagements in erster Linie von Wissenschaftlern statt von Infrastrukturbetreibern diskutiert.
- Zwar ist das Thema bereits bei den Entscheidungsträgern angekommen, die Umlegung und Implementierung in den praktischen Alltag von Infrastrukturmanagern ist

aber noch sehr punktuell und eher selten vollzogen sowie kaum dokumentiert.

- Aus den analysierten Fallbeispielen wird ersichtlich, dass es weltweit sehr unterschiedliche Ansätze zur Berücksichtigung von Resilienz und ihrer Ermittlung gibt.
- Bei der Bewertung von Resilienzmaßnahmen kommen – wenn überhaupt – vielfältige Bewertungsmethoden zum Einsatz. Es gibt nicht die eine, bereits etablierte Standardmethode.

Bei der ausführlichen Recherche nach praxisnahen Fallbeispielen fällt auf, dass

- Auslöser der bewerteten Maßnahmen nicht zwingend die Resilienz war.
- eine sehr nahe Verwandtschaft zu bzw. teilweise eine Einbettung in Risikoanalysen und -Bewertungen besteht.
- in den angewandten Bewertungsverfahren die Auswirkung der bewerteten Maßnahme auf die Resilienz des Verkehrssystems nur sehr am Rande behandelt wird.
- gesamtwirtschaftliche Auswirkungen nur sehr selten in die Bewertungen mit einbezogen werden.

Die analysierten Fallbeispiele zeigen jedoch, dass:

- bereits nutzbare Methoden bestehen, um die Resilienzmaßnahmen zu bewerten.
- die eigentliche große Herausforderung für quantifizierbare und monetarisierbare Bewertungen die Kenntnis von Eintretenswahrscheinlichkeiten von Störungen ist (bzw. die Entwicklung geeigneter Prädiktionsmodelle).
- für gesamtwirtschaftliche Analysen in Deutschland Grundlagen und Tools wie z.B. TREDPLAN in den USA noch nicht vorhanden sind.

7 Schlussfolgerungen und Empfehlungen

7.1 Schlussfolgerungen

Eine systemische Betrachtung von Resilienz ist international aktuell ein sehr breit und intensiv diskutiertes Thema im Verkehrs-Infrastrukturmanagement. Es bestehen zahlreiche Definitionen von Resilienz. Die Essenz dieser Diskussionen liegt in

einem Verständnis, das sich wie folgt nach [11] zusammenfassen lässt: Resilienz ist die Fähigkeit eines Systems, tatsächliche oder potenziell schadhafte Ereignisse abzuwehren, sich darauf vorzubereiten, sie einzukalkulieren, sie zu verkraften und sich möglichst schnell davon zu erholen. Schadhafte Ereignisse sind menschlich, technisch sowie natürlich verursachte Disruptionen oder Veränderungsprozesse, die katastrophale Folgen haben und in den gängigen Normen und Design-Codes nicht berücksichtigt werden. Resilienz kann nur im konsequenten Zusammenspiel zwischen technischen, gesellschaftlichen und ökonomischen Lösungsansätzen erhöht werden. Insbesondere das Zusammendenken der verschiedenen Lösungsmöglichkeiten und ihre zielgerichtete kombinierte Verwendung vor, während und nach einem Krisenfall zeichnen resiliente Systeme aus. Resilienz ist zudem kein statischer Zustand, sondern eine Eigenschaft dynamischer und entwicklungsfähiger Systeme. Die Resilienz eines Systems ist umso größer, je besser es schädigende Ereignisse verkraften kann. Bei geringer Resilienz können bereits geringe Einwirkungen oder Störungen zu erheblichen Systemveränderungen oder gar zum Kollabieren der System-Funktionalität führen.

Bei den Diskussionen zur Resilienz geht es um eine möglichst gesamtheitliche Betrachtung, die einerseits im Strasseninfrastrukturbereich nicht nur Einzelobjekte, sondern das Gesamtsystem berücksichtigt und darüber hinaus auch weitreichende indirekte und immaterielle Aspekte in die Betrachtung der möglichen Konsequenzen einbezieht. Dementsprechend stehen in diesem Kontext systemsische bzw. ganzheitliche Konzepte im Vordergrund:

- Resilienz ist kein Zustand eines Systems, der einmal erreicht und dann fixiert wird, sondern vielmehr eine Systemeigenschaft, die ständig „trainiert“, verbessert resp. aufrechterhalten werden muss.
- Weder Robustheit noch Resilienz können als alleiniges Paradigma für Schutzkonzepte im Straßen-Infrastrukturmanagement dienen. Moderne Schutzkonzepte sollten sich auf eine ausgewogene Strategie stützen, die unter verschiedenen Blickwinkeln standhält: Einzelne Komponenten müssen robust sein, die Netze resilient.
- Die Resilienz eines Gesamtsystems zu betrachten ist von besonderer Bedeutung und eine wesentliche Herausforderung zugleich. Besonders im Hinblick auf das Portfolio von Infrastrukturobjekten handelt es sich dabei um mehr als nur eine Reihe von

physischen Anlagen. Wichtig ist die Funktionalität im Sinne eines Systems/Verbunds. Im Kontext der Straßeninfrastrukturen geht es dabei um die damit verbundenen Sicherstellung der Versorgung und Dienstleistung für die Gesellschaft. Diese Funktionalität muss auch dann verfügbar sein, wenn eines oder mehrere Glieder der Infrastrukturlinie versagt haben oder ausgefallen sind.

Die Berücksichtigung der dynamischen Systemfunktionalität über die Zeit unter Einwirkungen von schädigenden Ereignissen kann als Resilienz eines Systems bezeichnet werden. Vornehmlich wird das Thema Resilienz in wissenschaftlichen Publikationen und theoretischen Berichten diskutiert.

7.2 Empfehlungen

Die nachfolgenden Empfehlungen leiten sich aus den unter Kapitel 5.4 beschriebenen Methoden zur Bewertung von Resilienzmaßnahmen sowie den Erkenntnissen aus den Fallbeispielen in Kapitel 6 ab:

- Einbettung in bestehende Verfahren: Um eine gute Akzeptanz, breite Anwendung und konsistente Berücksichtigung des Resilienzkonzepts zu gewährleisten, sollten nicht verschiedene neue Bewertungsverfahren entwickelt werden, sondern der Resilienz Aspekt nach Möglichkeit in bereits bestehende Verfahren integriert bzw. diese Verfahren entsprechend „ausgebaut“ werden (siehe Kapitel 6, Fallbeispiel 2).
 - Unabhängig davon, wie Resilienzmaßnahmen bewertet werden können, sollte geprüft werden, dass die Resilienz als eigene Nutzenkomponente im Zielsystem z.B. bei der Bewertung von Neu- und Ausbauten aufgeführt wird. Dazu ist ein entsprechendes Verfahren zur Messung der potenziellen Wirkung der Maßnahmen zu entwickeln. Wenn eine quantitative Auswirkungsermittlung und Monetarisierung zu aufwendig sein sollten, kann dies z.B. auch mittels eines pragmatischen Punktesystems wie etwa in Neuseeland (Kapitel 6, Fallbeispiel 1, [3]) erfolgen.
 - Ein innovativer Ansatz für ein Resilienzmanagement, der in einem ersten Schritt eher pragmatisch erfolgen sollte, könnte in einem zweistufigen Verfahren liegen:
- 1) Im ersten Schritt wird ein Netscreening auf übergeordneter (Netz-) Ebene (mit geringem Analyse-Tiefgang) zur Identifikation der Schwachstellen im System durchgeführt. Dabei sollte folgenden Fragen untersucht werden: Sind alle Systemelemente konform mit

den aktuell geltenden Normen und Regelwerken (Compliance)? Welche Elemente des Systems sind als besonders kritisch zu beurteilen (Kritikalität)? Wo besteht ein erhöhter Resilienzbedarf aufgrund einer potentiellen Bedrohungslage? Zur Umsetzung wird ein Indikatorensystem wie im Fallbeispiel 1 aus Neuseeland empfohlen.

- 2) In einem zweiten Schritt – unter Kenntnis der kritischen Elemente im System – sollten spezifische, vertiefte, komplexere Resilienzanalysen auf Objektebene durchgeführt werden. Die entscheidende Fragestellung dabei lautet: Wo lohnt es sich, wie viel zur Erhöhung der Resilienz zu investieren? Welche Systemelemente und schadhafte Ereignisse sind in den Analysen zu berücksichtigen? Welches sind die wichtigsten (zu bewertenden) Funktionalitätskomponenten? Wichtig ist auch die Frage nach der Praktikabilität und des Nutzens: Welcher Tiefgang für die Bewertung der vorliegenden, beabsichtigten Resilienzmaßnahmen lohnt sich resp. ist verhältnismäßig?
- Für ein zukünftig noch zu etablierendes Resilienzmanagement kann auf die beschriebenen Bewertungsverfahren zurückgegriffen werden. Je nach Umfang der Resilienzmaßnahme ist auch der Umfang der Wirkungsermittlung mit zunehmender Komplexität und damit auch mit zunehmendem Aufwand behaftet. Aufgrund des eher großen Aufwands im Rahmen der Monetarisierung der einzelnen Komponenten der Systemfunktionalität wird empfohlen, nur bei eher aufwändigen (teureren) Resilienzmaßnahmen auf die Bewertungsmethode der Nutzen-Kosten-Analyse zurückzugreifen. Eine Bewertung von kleineren (weniger kostenintensiven) Resilienzmaßnahmen ist alternativ auch anhand der anderen Methoden möglich (einzeln oder am besten in Kombination).
 - Nicht zuletzt wird ein einheitliches Begriffsverständnis und die Verwendung einer konsistenten Terminologie empfohlen: Alle Beteiligten im Kontext des Infrastrukturmanagements sollen dieselben Begriffe mit demselben Verständnis bei der Diskussion von Resilienzmaßnahmen verwenden. Dazu legt der vorliegende Bericht den Grundstein.

8 Ausblick

Das langfristige Ziel der BAST liegt in der Entwicklung und Implementierung eines konsistenten und integralen Resilienzmanagements. Unter integralem Resilienzmanagement wird verstanden, dass alle Phasen des Resilienzzyklus (prepare, prevent, protect, respond, recover) und alle Maßnahmengruppen (technisch, planerisch/organisatorisch) und -ebenen (Objekt, Netz) in die Resilienzbeurteilung einbezogen werden.

Als erster Schritt in diese Richtung wurde anhand der vorliegenden Untersuchungen zum einen eine konsistente Verständnisgrundlage des Resilienzbegriffs und möglicher Resilienzmaßnahmen geschaffen. Zum anderen wurde eine Auslegeordnung möglicher methodischer Verfahren zur Bewertung von Resilienzmaßnahmen erarbeitet.

Nun geht es darum, auf Basis der vorliegenden Erkenntnisse eine Weiterentwicklung und Anwendung der methodischen Verfahren im Kontext eines integralen Resilienzmanagements anzustoßen, damit diese in Zukunft als praxisorientierte Hilfsmittel für die Entscheidungsträger im Straßen-Infrastrukturmanagement genutzt werden können.

Für diese Weiterentwicklung werden die folgenden Aspekte als wichtig erachtet:

- Ein relativ kurzfristig umsetzbarer, pragmatischer und mutmasslich schnell akzeptierter Ansatz liegt in der Implementierung der Resilienzbeurteilung in bereits bestehende Bewertungskonzepte des Straßen-Infrastrukturmanagements (z.B. Resilienz als Zielsystem im BVWP).
- Ein entscheidender Schritt für eine ganzheitliche, konzeptionelle und systematische Beurteilung der Verfügbarkeit bzw. Funktionalität der Straßeninfrastruktur bei disruptiven Ereignissen und in der Folge schadhafte Einwirkungen liegt in der Weiterentwicklung und im Aufzeigen der praktischen Umsetzbarkeit der in diesem Forschungsprojekt dargelegten Methoden zur Maßnahmenfindung. Ein zukünftiges Ziel besteht darin, durch die systematische Identifikation von wirtschaftlich verhältnismäßigen Maßnahmen eine Bewältigung von schadhafte Einwirkungen auf das Infrastruktursystem zu gewährleisten. Dies bedeutet, mit angemessenem Mitteleinsatz eine möglichst schnelle Wiederherstellung der Funktionsfähigkeit sowie des Betriebes einer Infrastruktur in Folge eines disruptiven Ereignisses zu gewährleisten. Die Entwicklung solcher Ansätze zur Identifikation besonders geeigneter Resilienzmassnahmen über alle Resilienzpha-

sen hinweg stellt einen wichtige Forschungsbedarf dar und wurde für die Phasen „respond“ und „recover“ bereits von der BAST initiiert.

- Entwicklung eines geeigneten Indikatorsystems zur Beurteilung der Resilienz eines Strassenverkehrsnetzes. Um überhaupt Aussagen über die Resilienz eines Systems treffen oder zwischen verschiedenen Systemen vergleichen zu können, braucht es eine stimmige Methode zur Bewertung der Resilienz einer Straßen-Infrastruktur. Eng gekoppelt an bestehende Konzepte zur Beurteilung der Kritikalität (siehe Fallbeispiel 4, SeRon), können diese in Richtung einer Resilienzbewertung ergänzt bzw. ausgeweitet werden. Das Ziel besteht in einer indikatorbasierten Ableitung eines Resilience-Score auf Objekt- oder Netzebene, das als Benchmark sowohl für das eigene Resilienzmanagement, aber auch im Vergleich mit anderen Städten, Regionen, Objekten, etc. dienen kann.
- Entwicklung einer Methode zur Identifikation der (Kosten-) optimalen Massnahmen zur Erhöhung der Resilienz des Objektes, des Netzes. Dies entspräche beispielsweise einer Kombination aus dem Neuseeländischen Scoring-Ansatz (siehe Fallbeispiel 1) und einem noch zu entwickelnden, IT-gestützten Tool, das auf Grundlage von Kostenwirksamkeitsanalysen die effizientesten Stellschrauben (Massnahmen) zur Erhöhung der Resilienz im System detektiert.
- Festlegung der erforderlichen Mindestresilienz von Systemen. Damit verbunden ist die Frage: Wenn sich Resilienz bewerten lässt, welchen Resilienzwert möchte man erreichen? Was ist die Zielvorgabe und lässt sich solch eine Ziel-Resilienz überhaupt vorschreiben?
- Untersuchungen zur Echtzeit-Resilienz-Dashboard, z.B. pegelstandsabhängig bei andauernden Regenfällen. Kombination mit Frühwarnsystemen und Echtzeit-Risikomodellierungen.
- Prüfen der Verknüpfungsmöglichkeiten verschiedener Datenquellen, um Mobilitätsströme abzubilden und um Echtzeit-Prädiktionen des Mobilitätsverhaltens im Falle von disruptiven Ereignissen abschätzen und um lenkend/steuernd eingreifen zu können.
- Als Grundlage der Resilienzbewertung liefern Folgeabschätzungen von potenziellen Ereignissen z.B. anhand von Flood-Prediction-Models wichtige Inputwerte. Die Neuentwicklung solcher Modelle oder die Implementierung bestehender Modelle in den Gesamtkontext des Resilienzmanagements stellt eine wichtige zukünftige Auf-

gabe dar. Damit verbunden ist die Gewährleistung der Informationsverfügbarkeit durch eine sinnvolle Verknüpfung der relevanten Datenbanken (Verkehr, Bevölkerung, Naturgefahren, Unfallrisikokarten, Mobilitätsströme, ...).

- Häufig führen bereits Sachschadensunfälle zu merklichen Kapazitätseinbußen im Strassennetz. Durch die Entwicklung von Unfallprädiktionsmodellen können für einzelne Strassenabschnitte in Abhängigkeit von Verkehrs- und Infrastrukturparametern die Unfallwahrscheinlichkeiten (in der Zukunft oder in Echtzeit) abgeschätzt und abgebildet werden. Für das Autobahnnetz der Schweiz und Österreichs bestehen bereits solche Unfallprädiktionsmodelle [59] [60]. Eine georeferenzierte Umlegung auf Netzkarten ermöglicht einen direkten Überblick der erwarteten unfallgefährdeten Netzabschnitte
- Schaffung von Schnittstellen für alle Beteiligten. Resilienzmanagement kann nicht ausschließlich durch die verantwortlichen Infrastrukturbetreiber aufgebaut und entwickelt werden. Es müssen sämtliche Beteiligten (Vertreter der Einsatzkräfte, Verantwortliche aus den betroffenen Kommunen, Vertreter des öffentlichen Verkehrs, Kommunikationsdienstleister, Forschungsstellen...) für ein gemeinsames Ziel gewonnen werden.

Literaturverzeichnis

- [1] K. Thoma, "Resilience-by-Design': Strategie für die technologischen Zukunftsthemen, acatech STUDIE," 2014.
- [2] M. W. Hynes, S. M. Purcell, S. D. Walsh, and E. Ehimen, "Formalizing Resilience Concepts for Critical Infrastructure," in *EU Research Project RESILENS - Realising European Resilience for Critical Infrastructure: Resource Guide on Resilience*, IRGC, Ed. Lausanne: EPFL International Risk Governance Center, 2016.
- [3] J. Hughes and K. Healy, "Measuring the resilience of transport infrastructure - NZ Transport Agency research report 546," 2014.
- [4] "World Energy Perspective: The road to resilience - managing and financing extrem weather risks," World Energy Council, 2015.
- [5] S. W. Gilbert and D. T. Butry, "Community Resilience Economic Decision Guide for Buildings and Infrastructure Systems."
- [6] T. Aven, "On Some Recent Definitions and Analysis Frameworks for Risk, Vulnerability, and Resilience," *Risk Anal.*, vol. 31, no. 4, pp. 515–522, 2011.
- [7] S. Proag and V. Proag, "The cost benefit analysis of providing resilience," *Procedia Econ. Financ.*, vol. 18, pp. 361–368, 2014.
- [8] E. D. Vugrin, D. E. Warren, M. A. Ehlen, and R. C. Camphouse, "A Framework for Assessing the Resilience of Infrastructure and Economic Systems," in *Sustainable and Resilient Critical Infrastructure Systems*, Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2010, pp. 77–116.
- [9] "Resilience-by-Design': Strategie für die technologischen Zukunftsthemen, acatech POSTION," acatech, 2014.
- [10] C. Edwards, *Resilient nation*. 2009.
- [11] R. (Hrsg. . Wink, *Multidisziplinäre Perspektiven der Resilienzforschung (Studien zur Resilienzforschung)*. 2016.
- [12] T. Prior and F. Roth, "Disaster, resilience and security in global cities," *J. Strateg. Secur.*, 2013.
- [13] A. Rose, "Measuring Economic Resilience: Recent Advances and Future Priorities," 2015.
- [14] D. R. Fletcher and D. S. Ekern, "UNDERSTANDING TRANSPORTATION RESILIENCE: A 2016-2018 ROADMAP," vol. 59, 2018.
- [15] TCRP, "Improving the Resiliency of Transit Systems Threatened by Natural Disasters." [Online]. Available: <http://apps.trb.org/cmsfeed/TRBNetProjectDisplay.asp?ProjectID=3744>.
- [16] J. Coaffee, "Rescaling and responsabilising the politics of urban resilience: From national security to local place-making," *Politics*, 2013.
- [17] U. D. F. Transport, *Government Response to the Transport Resilience Review*, no. November. 2014.
- [18] S. Kim and H. Yeo, "A Flow-based Vulnerability Measure for the Resilience of Urban Road Network," *Procedia - Soc. Behav. Sci.*, vol. 218, pp. 13–23, May 2016.
- [19] J. Coaffee, D. Wood, P. Rogers, and D. Wood, *The Everyday Resilience of the City: how cities respond to terrorism and disaster*. 2008.
- [20] P. Brabhakaran, "Recent advances in improving the resilience of road networks," in *2006 New Zealand Society of Earthquake Engineering (NZSEE) Conference*, 2006.
- [21] S. L. Cutter, C. G. Burton, and C. T. Emrich, "Disaster Resilience Indicators for Benchmarking Baseline Conditions," *J. Homel. Secur. Emerg. Manag.*, vol. 7, no. 1, 2010.
- [22] T. Prior, "Measuring Critical Infrastructure Resilience: Possible Indicators, Risk and Resilience Report 9," 2015.
- [23] T. Prior and J. Hagmann, "Measuring Resilience: Benefits and Limitations of Resilience Indices," 2012.
- [24] T. Prior and M. Herzog, "The Practical Application of Resilience: Resilience Manifestation and Expression, Risk Factsheet 9," 2013.
- [25] S. W. Gilbert, "Disaster Resilience : A Guide to the Literature, NIST report 1117," 1010.
- [26] R. Fischer *et al.*, "Construction a Resilience Index for the Enhanced Critical Infrastructure Protection Prgram," 2010.
- [27] S. Massoud Amin, "Resilience and Self-healing Challenge: Present/Possible Futures," in *CRITIS'08, 3rd International Workshop on Critical Information Infrastructures Security*, 2008.

- [28] "Resilience: Key Products & Projects," Transportation Research Board, TRB, 2017.
- [29] "Infrastructure Risk and Resilience: Managing Complexity and Uncertainty in Developing Cities," The Institution of Engineering and Technology (IET), 2014.
- [30] R. Gustavsson and B. Ståhl, "Self-healing and Resilient Critical Infrastructures," Springer, Berlin, Heidelberg, 2009, pp. 84–94.
- [31] G. C. Gallopín, "Linkages between vulnerability, resilience, and adaptive capacity," *Glob. Environ. Chang.*, vol. 16, no. 3, pp. 293–303, 2006.
- [32] J. Hagmann, "3 RG REPORT Factsheet Neue Gefahrenkonzepte in der internationalen Sicherheitsanalyse," Zurich, Switzerland, 2012.
- [33] J. Weichselgartner and I. Kelman, "Challenges and opportunities for building urban resilience," *A/Z ITU J. Fac. Archit.*, vol. 11, no. 1, pp. 20–35, 2014.
- [34] Joint Committee of Structural Safety. JCSS, *Risk Assessment in Engineering*. Joint Committee of Structural Safety. JCSS, 2010.
- [35] L. Fahrmeir, I. Pigeot, R. Künstler, and G. Tutz, *Statistik*. 2010.
- [36] Bundesamt für Strassen ASTRA, "Naturgefahren auf den Nationalstrassen: Risikokonzept," 2012.
- [37] Bundesamt für Strassen ASTRA, "ASTRA 19003: Management von Naturgefahren auf den Nationalstrassen," 2014.
- [38] JCSS, "Probabilistic Model Code," *Internet Publ.*, 2001.
- [39] C. Folke, S. R. Carpenter, B. Walker, M. Scheffer, T. Chapin, and J. Rockström, "Resilience thinking: Integrating resilience, adaptability and transformability," *Ecol. Soc.*, vol. 15, no. 4, 2010.
- [40] R. W. Scholz, Y. B. Blumer, and F. S. Brand, "Risk, vulnerability, robustness, and resilience from a decision-theoretic perspective," *J. Risk Res.*, vol. 15, no. 3, pp. 313–330, 2012.
- [41] Bundesministerium des Innern, "Nationale Strategie zum Schutz Kritischer Infrastrukturen (KRITIS-Strategie)," 2009.
- [42] W. Zhang and N. Wang, "Resilience-based risk mitigation for road networks," *Struct. Saf.*, vol. 62, pp. 57–65, 2016.
- [43] A. Bundesamt für Strassen, "Nationale Strategie zum Schutz kritischer Infrastrukturen," 2012.
- [44] M. Herzog and F. Roth, "Dritter Trilateraler Workshop D-A-CH - Schutz Kritischer Infrastrukturen, CSS Tagungsbericht," 2013.
- [45] "Verbundprojekt SKRIBT, Schutz kritischer Brücken und Tunnel im Zuge von Straßen, Schlussbericht: Schutz kritischer Brücken und Tunnel, Öffentliche Fassung."
- [46] K. Tierney and M. Bruneau, "Conceptualizing and measuring resilience - A Key to Disaster Loss Reduction," *TR News*, vol. 250, no. May-June, pp. 14–18, 2007.
- [47] Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur BMVI, "Grundsätzliche Überprüfung und Weiterentwicklung der Nutzen-Kosten-Analyse im Bewertungsverfahren der Bundesverkehrswegeplanung," 2015.
- [48] European Commission, *Cost-benefit and multi-criteria analysis for new road construction*. Office for Official Publications of the European Communities, 1996.
- [49] W. Rothengatter, "Erweiterte wirtschaftliche Folgewirkungen von Verkehrsinvestitionen - Wider Economic Impacts," *Zeitschrift für Verkehrswiss.*, vol. 88, no. 1, pp. 1–20, 2017.
- [50] Forschungsgesellschaft für Strassen- und Verkehrswesen FGSV, "Empfehlungen für Wirtschaftlichkeitsuntersuchungen von Strassen," 1997.
- [51] Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur BMVI, "Bundesverkehrswegeplan 2030," 2016.
- [52] M. Turró, "Evaluation of transport projects in the European Investment Bank," *Integr. Transp. Infrastruct. Plan. Eur.*, 2001.
- [53] P. Cerwenka, *Handbuch der Verkehrsplanung*. Österreichischer Kunst- und Kulturverlag, 2007.
- [54] S. M. Grant-Muller, P. MacKie, J. Nellthorp, and A. Pearman, "Economic appraisal of European transport projects: The state-of-the-art revisited," *Transp. Rev.*, vol. 21, no. 2, pp. 237–261, Jan. 2001.
- [55] D. Brümmerhoff, *Finanzwissenschaft*, 10. Auflag. München: Oldenbourg, 2011.
- [56] F. Bruns, P. Loher, R. Müller, P. Ruggli, and C. Willi, "Erhöhung der Winter- und Sommersicherheit Föglias-Plaun da Lej," EBP Schweiz AG, Zürich, Schweiz, 2012.

- [57] Tredis, "TREDPLAN." 2017.
- [58] J. Ulbrich, C. Dünser, C. Zulauf, I. Kaundinya, and N. Holthausen, "Security of Road Transport Networks (SeRoN) - Deliverable 400: Importance of the structures for the traffic network," 2012.
- [59] M. Deublein, M. Schubert, B. T. Adey, J. Köhler, and M. H. Faber, "Prediction of road accidents: A Bayesian hierarchical approach," *Accid. Anal. Prev.*, vol. 51, pp. 274–291, 2013.
- [60] M. Deublein, M. Schubert, B. T. Adey, and B. Garcia de Soto, "A Bayesian network model to predict accidents on Swiss highways," *Infrastruct. Asset Manag.*, vol. 2, no. 4, pp. 145–158, 2015.
- [61] IWW, SRF, and VWI, "Volkswirtschaftliche Bewertung des Projektes Baden-Württemberg 21 (BW21)," Karlsruhe, 2009.

Weitere gesichtete, aber nicht zitierte Fallbeispiele:

- Eisenbahnbundesamt, „Unfall Eschede / Teil I: Einführung in die risikobasierte Sicherheitsplanung“, „Unfall Eschede / Teil II: Abschätzung des Gesamtrisikos für den ICE-Verkehr und Einordnung eines Unglücks wie Eschede in diesen Rahmen“, „Unfall Eschede / Teil III: Prüfung von Massnahmen“, Ernst Basler + Partner, 1999 (nicht öffentlich; Untersuchungen im Nachgang zum Bahnunfall in Eschede vom 3. Juni 1998)
- Betriebskommission Gotthard Strassentunnel, „Verbesserung der Selbstrettungs-Massnahmen im Gotthard-Strassentunnel“, Ernst Basler + Partner, 2002 (nicht öffentlich; Untersuchungen im Nachgang zum Tunnelbrand im Gotthard-Strassentunnel vom 24. Oktober 2001)
- Bundesamt für Strassen ASTRA, Expertengruppe Ausstellbuchten, Analyse und Bewertung von Massnahmen zu Ausstellbuchten in Nationalstrassentunneln, „ , Ernst Basler + Partner, Ingenieurbüro Schüler , 2012 (nicht öffentlich; Untersuchungen im Nachgang zum Bus-Unfall am 13. März 2012 in einem Nationalstrassentunnel der Autobahn A9 bei Sierre)

A1: Factsheets zu Fallbeispielen

Factsheet 1		Measuring the resilience of transport infrastructure		
		Hughes, J. F. and Healy K. (2014). Measuring the resilience of transport infrastructure. NZ transport Agency research report 546. 82pp. (https://www.nzta.govt.nz/)		
Kurzbeschreibung				
Der Bericht wurde durch die AECOM New Zealand Ltd im Auftrag der <i>New Zealand (NZ) Transport Agency</i> erstellt. Die <i>NZ Transport Agency</i> ist ein neuseeländisches, staatseigenes Unternehmen, das dem Transportministerium (Ministry of Transport) unterstellt ist. Ziel der Untersuchungen zur Erstellung des Berichts war es, ein Konzept zur Bewertung der Resilienz des neuseeländischen Transportsystems zu entwickeln. Berücksichtigt werden können unterschiedlichste Arten von Katastrophen (single and all-hazards-approach).				
Anlass für den Bericht				
Auslöser für die Erstellung des Berichts war die generelle Verantwortung für ein funktionierendes, sicheres Transportsystem. Zudem verpflichtet der <i>National Infrastructure Plan 2011</i> die Transportbehörde dazu, eine Indikatoren zur Beurteilung der Resilienz des Systems in ihrem Verantwortungsbereich zu entwickeln.				
Wie wurde die Resilienz bewertet/indexiert?				
Die Resilienz wird anhand von Resilienzindikatoren beurteilt. Mittels einer Liste von zugehörigen Massnahmen wird auf einer Skala von 1 bis 4 bewertet, inwieweit diese umgesetzt sind. Eine Gewichtung verschiedener Kategorien ist möglich. Output ist ein Resilienzwert zwischen 1 (niedrige Resilienz) und 4 (sehr hohe Resilienz). Anhand dieses Resilienzwertes (Score) können unterschiedliche Objekte oder Netze relativ miteinander verglichen werden.				
Wie wurden Maßnahmen abgeleitet und welche?				
Für verschiedene Dimensionen (technisch, organisatorisch), Prinzipien (Robustheit, Redundanz, etc.) und Kategorien (strukturell, prozedural, etc.) wurden Indikatoren entwickelt, die mit entsprechenden Massnahmen verknüpft wurden. Diese Feingliederung erlaubt es, auf Grundlage der ermittelten Resilienzwerte, Massnahmen genau dort einzuleiten, wo eine Erhöhung der Resilienz aufgrund eines niedrigen Resilienzwertes notwendig erscheint. Die im Fallbeispiel diskutierten Resilienzmassnahmen lassen sich wie folgt in die Massnahmentypisierung einordnen:				
Resilienzmassnahmen	Objekt		Netz/Region	
	technisch	planerisch/ organisatorisch	technisch	planerisch/ organisatorisch
Phase				
prepare	<ul style="list-style-type: none"> • Unterhaltsarbeiten • Objektüberwachung • Frühwarnsysteme 	<ul style="list-style-type: none"> • Integration resilientes Design in Richtlinien • Backups und regelmäßige Aktualisierung wichtiger Informationen • Geeignete Versicherung der Objekte • Wiederherstellungspläne • Pläne für benötigtes Austauschmaterial 	<ul style="list-style-type: none"> • Verkehrsüberwachung 	<ul style="list-style-type: none"> • Unternehmensinternes Risiko- und Resilienzbewusstsein entwickeln • Wissens- und Informationstransfer • Partnerschaften mit anderen Sektoren • Risikoanalysen mit Berücksichtigung von Kaskadeneffekten • Projekte auf Resilienz überprüfen • Einsatzpläne und -material definieren • Verkehrsmanagementpläne für verschiedene Szenarien • Ersatzroutenplanung mit Priorisierung • Konzept zur Priorisierung Ressourcenverteilung

				<ul style="list-style-type: none"> • Notfalltraining unter Einbezug der Öffentlichkeit • Backups und regelmäßige Aktualisierung wichtiger netzweiter Informationen • Präventive Abklärung der Zutrittsberechtigung auf Privatgrund im Ereignisfall • Sicherstellung der Finanzierung, übergreifende Arbeitsgruppen, Kostenteilungsvereinbarungen • Pläne für Ausweisung alternativer Routen
prevent	<i>keine Angaben</i>			
protect				
respond	<i>keine Angaben</i>	<ul style="list-style-type: none"> • Nutzerinformationen • Überlappende Kommunikationskanäle bereitstellen 	<ul style="list-style-type: none"> • Redundante Verkehrswege mit ausreichender Kapazität und minimaler Reisezeitdifferenz schaffen • Alternative Transportmittel mit ausreichender Kapazität verfügbar machen 	<ul style="list-style-type: none"> • Nutzerinformation bezüglich Problemen und alternativen Routen • Überlappende Kommunikationskanäle nutzen
recover	<ul style="list-style-type: none"> • Vorhandensein von Austauschmaterial gewährleisten 	<i>keine Angaben</i>		

Wie wurden Maßnahmen bewertet? Was war das Kosten-Nutzen-Verhältnis? Wurden gesamtwirtschaftliche Folgen ausgewiesen?

Im vorliegenden Fallbeispiel hat keine Bewertung der Maßnahmen stattgefunden. Zur Umsetzung der im o.g. Bericht beschriebenen Methodik wird von der NZ Transport Agency u.a. gerade eine Case Study durchgeführt: „Improving network safety and resilience“. Dabei liegt der Fokus vor allem auf einem 5km langen Passstraße (State Highway 73) zwischen Canterbury und der Westküste, die besonders eng ist und regelmäßig durch Steinschläge und starken Schneefällen versperrt wird. Die Fertigstellung dieses 22 Mio. Dollar teuren Projekts ist für 2019 geplant.

Sind Umsetzung, Anwendbarkeit, Praktikabilität, etc. bewertet?

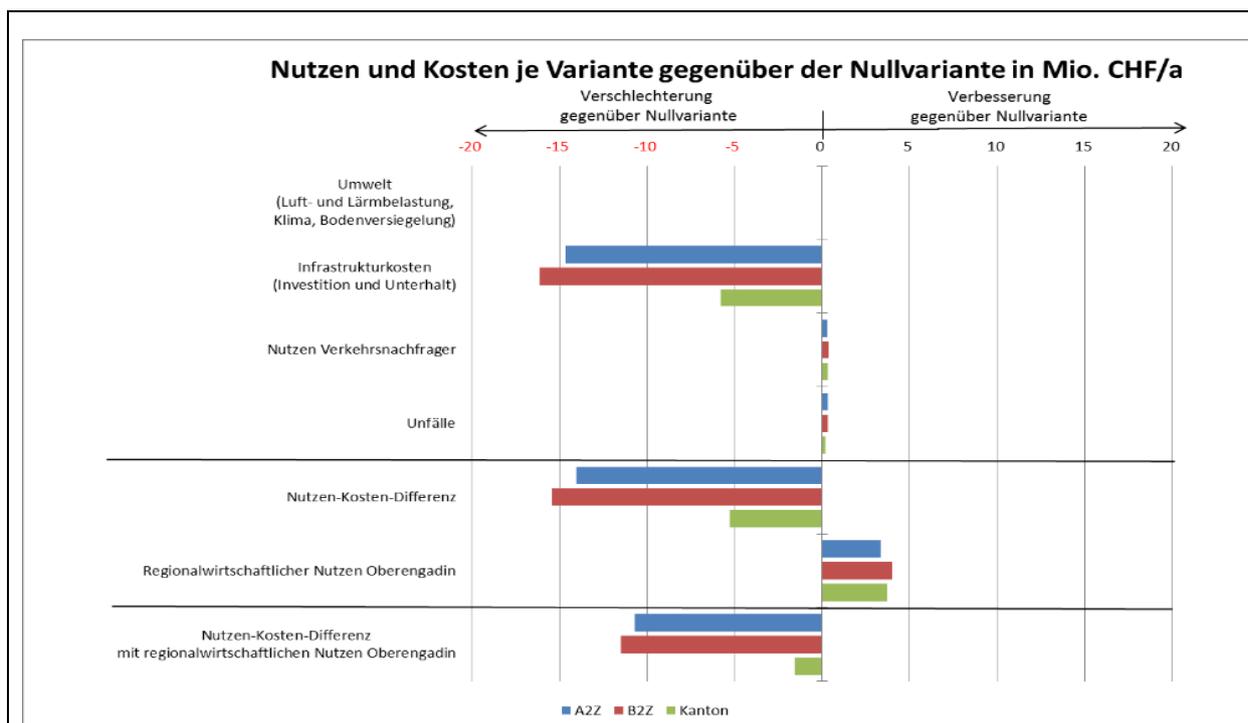
Es handelt sich um ein reines Resilienz-Bewertungstool mit einem einfach verständlichen Scoring System. Anhand dieser Resilienzbewertung kann der Entscheidungsträger erkennen, in welchem (resilienten) Zustand sich sein System befindet und an welchen Stellschrauben er anhand geeigneter Resilienzmaßnahmen drehen sollte, um die Resilienz seines Systems zu erhöhen. Eine Maßnahmenpriorisierung oder -auswahl könnte anhand einer zusätzlich integrierten Nutzen-Kosten-Analyse stattfinden (wird bisher nicht gemacht).

Es findet keine Risikoabschätzung (Schadensausmaß über Eintretenswahrscheinlichkeit) statt. Das Schema wurde im Rahmen des Berichts nicht auf ein reales Fallbeispiel angewendet.

Factsheet 2	Bewertung von Varianten zur Verbesserung der Wintersicherheit auf der Kantonsstraße Sils (Schweiz)
Kurzbeschreibung	
Zur Erhöhung der Winter- und Sommersicherheit der Hauptstraße zwischen Silvaplana - Castasegna hat der Kanton Graubünden verschiedene Varianten erarbeiten lassen. Das Tiefbauamt des Kantons Graubünden beauftragte EBP, drei Varianten sowie die Nullvariante zu bewerten	
Anlass für den Bericht	
Die Hauptstraße H3b Silvaplana – Castasegna ist auf dem rund 3.5 Kilometer langen Abschnitt Sils Föglias bis Sils Plaun da Lej durch Naturereignisse gefährdet. Hauptsächlich sind es Lawinen, aber auch Rufen, Murgänge sowie Stein- und Blockschlag. Da nur punktuell Schutzmaßnahmen vorhanden sind, muss die Kantonsstrasse bei einer Gefährdung (insbesondere bei Lawinengefahr) gesperrt werden. Eine Unterbrechung dieser kantonal bedeutenden Verkehrsachse schneidet das Bergell vom übrigen Kantonsgebiet ab. Betroffen sind dann auch der Arbeits- und Tourismusverkehr vom Oberengadin von und nach Norditalien. Dadurch entstehen direkte und indirekte wirtschaftliche Einbußen.	
Wie wurde die Resilienz bewertet/indexiert?	
Die Sperrung der Straße stellt eine Maßnahme zur Vermeidung von Schäden im Ereignisfall dar. Die Ausbauvarianten können als Resilienzmaßnahmen betrachtet werden, da sie im Ereignisfall von Lawinen etc. ermöglichen, dass keine Sperrung entsteht. Der Schock bleibt also ganz oder teilweise aus.	
Wesentliches Element der Bewertung waren die Sperrzeiten. Je kürzer die Sperrzeit, desto höher der Nutzen. Die Auswirkung der Varianten auf einige Indikatoren der Kosten-Nutzen-Analyse ist abhängig davon, inwieweit die Sperrzeiten reduziert werden. Der Zusammenhang zwischen der Reduktion der Sperrzeiten und den Indikatoren ist in der nachfolgenden Abbildung dargestellt.	
<pre> graph LR subgraph Varianten V1[Reduktion Sperrdauer] V2[Reduktion Anzahl Sperrungen] end subgraph Betroffene B[Anzahl betroffener Personen/Fahrzeuge] end subgraph NutzenVerkehrsteilnehmer N1[Veränderung Wartezeit] N2[Veränderung Fahrtweite] N3[Verschiebung der Fahrt] end subgraph Indikatoren I1[Veränderung Fahrleistung [Fzkm/a]] I2[Veränderung Fahrzeugstunden [Fzh/a]] end subgraph Auswirkungen A1[1.1 Luft-, 1.2 Lärm- und 1.3 Klimabelastung] A2[2.2 Auswirkungen auf die Verkehrsnachfrager] A3[2.3a Wirkungen auf die Regionalwirtschaft Oberengadin] end V1 --> B V2 --> B B --> N1 B --> N2 B --> N3 N1 --> I1 N2 --> I2 N3 --> I1 N3 --> I2 N3 --> A2 I1 --> A1 I2 --> A1 I2 --> A2 I2 --> A3 </pre>	
Durch eine Reduktion der Anzahl Sperrungen und der Sperrdauer profitieren die Verkehrsteilnehmer. Daher ist zu ermitteln, wie viele Personen oder Fahrzeuge von einer Reduktion der Sperrzeiten profitieren. Der Nutzen der Verkehrsteilnehmer im Vergleich zur Nullvariante besteht fallweise in einer kürzeren Wartezeit bis zur Öffnung der Straße, selteneren Umwegfahrten über eine längere Route bzw. einer geringeren Zahl von Fahrten, die ganz entfallen bzw. um (mehrere) Tage verschoben werden. Unter Berücksichtigung der Anzahl jeweils betroffener Personen oder Fahrzeuge verändern sich die Fahrleistungen und die Fahrzeugstunden je Jahr. In der Kantonsvariante wird auch berücksichtigt, dass im Falle von Sperrungen und einer Umleitung durch Sils die Fahrleistungen steigen und dass Wartezeiten aufgrund des Einbahnverkehrs bestehen. Die Veränderungen gehen in die Berechnung der Indikatoren Luft, Lärmbelastung, Klimabelastung und Auswirkungen auf die Verkehrsnachfrager ein. Beim Indikator zu den Auswirkungen auf die Verkehrsnachfrager wird zudem berücksichtigt, wie viel Verkehrsteilnehmer ihre Fahrt um einen oder mehrere Tage verschieben müssen. Die Ermittlung der regionalwirtschaftlichen Auswirkungen basiert direkt auf der Reduktion der Anzahl Sperrungen ohne expliziten Bezug zur Verkehrsnachfrage.	

Wie wurden Maßnahmen abgeleitet und welche?				
Die verschiedenen Massnahmen wurden vorgängig zur Bewertung durch die Verwaltung erarbeitet.				
Resilienzmaßnahmen	Objekt		Netz/Region	
	technisch	planerisch/ organisatorisch	technisch	planerisch/ organisatorisch
prepare	<i>keine Angaben</i>	<ul style="list-style-type: none"> Monitoring der Lawinengefahr 	<i>keine Angaben</i>	
prevent	<ul style="list-style-type: none"> Lawinensprengmasten 	<ul style="list-style-type: none"> Kontrollierte Lawinensprengungen auslösen und Straße kurzfristig sperren 		
protect	<ul style="list-style-type: none"> Bau eines Tunnels und/oder einer Galerie 	<i>keine Angaben</i>		
respond	<i>keine Angaben</i>		<i>keine Angaben</i>	<ul style="list-style-type: none"> Ausweisung einer alternativen Route
recover				
Wie wurden Maßnahmen bewertet? Was war das Kosten-Nutzen-Verhältnis? Wurden gesamtwirtschaftliche Folgen ausgewiesen?				
Für die Bewertung der Resilienzmaßnahmen wurden komplementär die Verfahren der deskriptiven Beschreibung und der Nutzen-Kosten-Analyse für einen Vergleich unterschiedlicher Varianten angewandt. In nachfolgender Tabelle ist das für die Kosten-Nutzen-Analyse bzw. die deskriptive Beschreibung verwendete Ziel- und Indikatorensystem differenziert in die drei Bereiche Umwelt, Wirtschaft und Gesellschaft zusammengefasst.				
Bereich	Indikator	Kosten-Nutzen-Analyse	Deskriptiv	
1. Umwelt	1.1. Luft- und Lärmbelastung	X	-	
	1.2. Klimabelastung	X	-	
	1.3 Bodenversiegelung	X	-	
	1.4 Landschafts- und Ortsbild	-	X	
	1.5 Gewässer	-	X	
	1.6 Materialbewirtschaftung Tunnelaushub	-	X	
2. Wirtschaft	2.1 Infrastrukturkosten: Investitions-, Betriebs- und Unterhaltskosten Infrastruktur	X	-	
	2.2 Auswirkungen auf die Verkehrsnachfrager	X	-	
	2.3a Wirkungen auf die Regionalwirtschaft:			
	• Oberengadin	X	-	
	• Bergell	-	X	
	2.3b Image Engadin	-	X	
	2.4 Realisierungszeit	-	X	
2.5 Baurisiko	-	X		
3. Gesellschaft	3.1 Auswirkungen auf Fussgänger Sils	-	X	
	3.2 Unfälle infolge von Naturgefahren	X	-	
	3.3 Erreichbarkeit Sils	-	X	
Die Ergebnisse der Kosten-Nutzen-Analyse für die Hauptbewertung sind in nachfolgender Darstellung abgebildet. Dabei wird die Nutzen-Kosten-Differenz als Summe der Zielbeiträge Umwelt, Infrastrukturkosten, Nutzen Verkehrsteilnehmer und Unfälle ausgewiesen. Die so berechnete Nutzen-Kosten-Differenz entspricht nationalen Vorgaben für die Bewertung von Verkehrsinfrastrukturmassnahmen.				
In der Nutzen-Kosten-Differenz entsprechend den Verfahren des Bundes (Schweiz) sind regionalwirtschaftliche Auswirkungen nicht berücksichtigt, da diese oftmals eine Umverteilung zwischen Regionen darstellen können. ⁶⁾ Die regionalwirtschaftlichen Auswirkungen auf das Oberengadin werden hier aber zusätzlich berechnet und ausgewiesen.				

⁶⁾So könnten Einnahmefälle im Engadin beispielsweise zu zusätzlichen Einnahmen in anderen Regionen wie Flims, Arosa oder Davos führen.



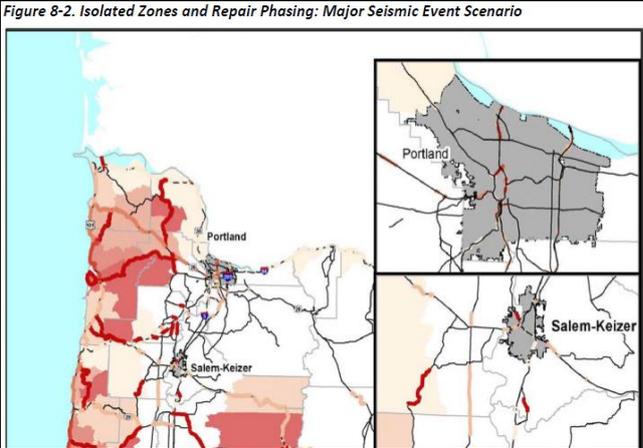
Unter Vernachlässigung der Auswirkungen auf die Regionalwirtschaft resultiert aus volkswirtschaftlicher Sicht für alle drei Varianten eine negative Nutzen-Kosten-Differenz. Den Infrastrukturkosten stehen kaum Nutzen gegenüber. Aus volkswirtschaftlicher Sicht ist somit keine der Varianten empfehlenswert.

Berücksichtigt man zusätzlich den regionalwirtschaftlichen Nutzen für das Oberengadin verbessert sich das Ergebnis. Dennoch weisen die Varianten A2Z und B2Z weiterhin deutlich negative Nutzen-Kosten-Differenzen in Höhe von 10.8 bzw. 11.5 Mio. Franken je Jahr. Aufgrund der geringeren Infrastrukturkosten erzielt die Variante des Kantons unter Einbezug der regionalwirtschaftlichen Effekte eine vergleichsweise geringe negative Nutzen-Kosten-Differenz in Höhe von 1.6 Mio. Franken je Jahr. Hierbei ist aber zu beachten, dass aus Sicht der Gutachter die angenommenen Werte für den regionalwirtschaftlichen Nutzen sehr hoch sind.

Hier wird untersucht, inwieweit die Varianten Verbesserungen für die Regionalwirtschaft im Oberengadin und im Bergell bringen. Aufgrund der reduzierten Sperrzeiten fallen gegenüber der Nullvariante zusätzliche Einnahmen im Tourismus und in der Bauwirtschaft an. Ferner wird der Aufwand für die Bereitstellung des Personals reduziert. Die verbesserte Erreichbarkeit aufgrund reduzierter Sperrzeiten hat zudem einen Einfluss auf das Image der Region. Mit Angaben der Wirtschaft konnte der Schadenskostensatz für einen Sperrtag ermittelt werden. Dieser beträgt ca. 3 Mio. CHF je Tag. Mit der Veränderung der Sperrtage in den Varianten konnten die gesamtwirtschaftlichen Effekte berücksichtigt in der Nutzen-Kosten-Analyse berücksichtigt werden

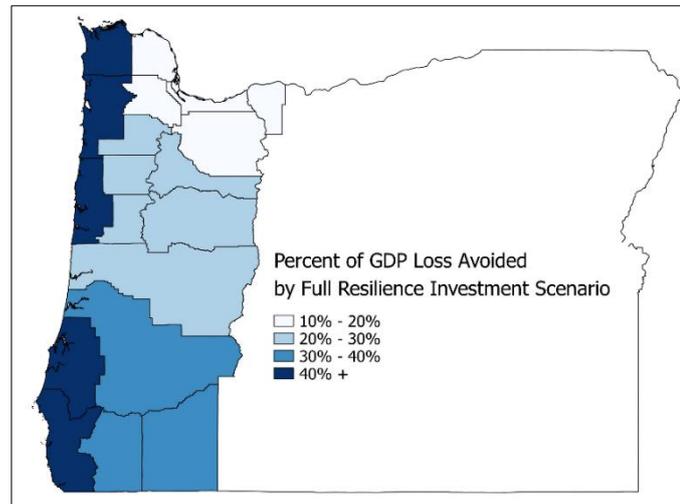
Sind Umsetzung, Anwendbarkeit, Praktikabilität, etc. bewertet?

Verfahren und Vorgehen sind umsetzbar, anwendbar und praktikabel gewesen. Die gesamte Bewertung erfolgt mit ca. 500 Arbeitsstunden inkl. Datenrecherche, Aufbereitung, Sitzungen und Präsentationen.

Factsheet 3		Seismic Options Analysis in Western Oregon (USA)		
Portland Business Alliance / Oregon Business Council / Port of Portland (2014): Economic Impacts of Congestion in Oregon (Chapter 8: Seismic Options Analysis). Bearbeiter: EDR Group, Boston (Partnerunternehmen von EBP)				
Kurzbeschreibung				
Für ein Erdbeben der Stärke 9.0 in der Subduktionszone im Westen Oregons an der amerikanischen Pazifikküste erarbeiteten zuständige Stellen ein Szenario über zu erwartende Infrastrukturschäden. Dieses war der Ausgangspunkt für die Analysen der volkswirtschaftlichen Verluste, welche durch die disruptive Verschlechterung der Erreichbarkeit und die Unterbrechung von Güterströmen entstünden. Es wurde analysiert, wie stark welche Warenströme und damit welche Branchen von den Straßenunterbrechungen betroffen wären, welche direkten wirtschaftlichen Verluste dies zur Folge hätte und zu welchen indirekten und induzierten Einbußen dies führen würde. In einem weiteren Schritt wurde untersucht, inwieweit sich die Schäden durch drei unterschiedlich umfangreiche Programme für Investitionen in die Erdbebensicherheit zur Erhöhung der Resilienz der Infrastrukturbauten reduzieren ließen.				
Anlass für den Bericht				
Vorgängerberichte bereiteten die notwendigen Szenarien zu Infrastrukturschäden und Investitionsprogrammen auf. Im Rahmen dieser Analyse sollte dargestellt werden, wie sich Investitionsprogramme in die Erdbebensicherheit des übergeordneten Straßennetzes oder das Fehlen derselben im Fall eines seismischen Großereignisses auf die Wirtschaft Oregons auswirken.				
Wie wurde die Resilienz bewertet/indexiert?				
Das Basisszenario, in welchem der Westen Oregons von einem Erdbeben betroffen ist, ohne dass vorher Investitionen in die Resilienz des Straßennetzes getätigt wurden, wird verglichen mit drei verschiedenen Investitionsszenarien. Das in diesem Rahmen angewandte IT-Tool TREDPLAN erlaubt die Analyse und Bewertung der Auswirkungen auf spezifische Güterströme. Mit der Hilfe eines Verkehrsmodells wurde der Effizienzverlust des Verkehrssystems ermittelt, der ebenfalls Eingangsgröße für das Tool ist. Ergebniskennziffern sind die Veränderung von gesamtwirtschaftlichen Größen wie Beschäftigung oder Sozial- oder Bruttoinlandsprodukt (GDP).				
		<p>Figure 8-2. Isolated Zones and Repair Phasing: Major Seismic Event Scenario</p> 		
Wie wurden Maßnahmen abgeleitet und welche?				
Im vorliegenden Projekt waren die Maßnahmen (Investitionsprogramme zur Erhöhung der Resilienz des Straßennetzes) bereits vordefiniert. Anhand von TREDPLAN könnten aber das Ausloten der Folgen eines externen Ereignisses und damit die effiziente Maßnahmenplanung unterstützt werden. So ließe sich beispielsweise ermitteln, zwischen welchen Quellen und Zielen Güter transportiert werden, die für die regionale Wirtschaft von besonders großer Bedeutung sind. Die Resilienz der Verkehrsträger, die diesen Routen dienen und die damit für die wirtschaftliche Tätigkeit einer Region besonders wichtig sind, kann mit entsprechenden Maßnahmen gezielt verstärkt werden.				
Resilienzmaßnahmen	Objekt		Netz/Region	
	technisch	planerisch/ organisatorisch	technisch	planerisch/ organisatorisch
Phase				
prepare	<p>TREDPLAN wird bei besonders kritischen Infrastruktursituationen eingesetzt, um die Effekte bestimmter Maßnahmen auf das zu analysierende Gesamtsystem abzuschätzen. Der Einsatz eines solchen Instruments geht über die Vorgaben in den Planungsnormen hinaus und kann somit selbst als planerisch/organisatorische Maßnahme auf Netz- oder Regionaler Ebene verstanden werden.</p>			
prevent				
protect				
respond				
recover				

Wie wurden Maßnahmen bewertet? Was war das Kosten-Nutzen-Verhältnis? Wurden gesamtwirtschaftliche Folgen ausgewiesen?

Es wurde ermittelt, wie groß die gesamtwirtschaftlichen Schäden aufgrund des seismischen Ereignisses wären und welcher Anteil davon sich durch die Resilienzmaßnahmen verhindern ließe. Die Maßnahmen werden im Rahmen der Resilienzanalyse hinsichtlich gesamtwirtschaftlicher Kenngrößen wie Beschäftigung oder Sozial- oder Bruttoinlandsprodukt (GDP) bewertet.

**Sind Umsetzung, Anwendbarkeit, Praktikabilität, etc. bewertet?**

Die durchgeführten Analysen erfordern Input-Output-Modelle. Die in diesem Fall verwendeten Tools, TREDPLAN (<https://www.tredis.com/products/tredplan>) und TREDIS (<http://www.tredis.com/products/product-overview>) liegen für Europa nicht vor.

Factsheet 4	Security of Road Transport Networks (SeRoN)
Kurzbeschreibung	
<p>Im Forschungsprojekt „Security of Road Transport Networks (SeRoN)“ im Kontext des 7. EU-Forschungsrahmenprogramms wurde zwischen 2009 bis 2012 eine Methodik zur Identifizierung und Quantifizierung der Risiken kritischer Straßeninfrastrukturelemente entwickelt und anhand von Fall-beispielen exemplarisch angewendet.</p>	
Anlass für den Bericht	
<p>Forschungsvorhaben im Rahmen des 7. EU-Rahmenprogramms</p>	
Wie wurde die Resilienz bewertet/indexiert?	
<p>Das Vorgehen zur Bewertung der Resilienz von Straßenabschnitten erfolgt auf Basis von vier Vorgehensschritten:</p> <p><i>1. Identifikation von potenziell kritischen Elementen in einem definierten Straßennetz:</i></p> <p>Die Methode fokussiert auf Tunnel und Brücken als potenziell kritischste Elemente in Straßennetzen. In Abhängigkeit verschiedener objektspezifischer Charakteristika (z.B. Länge, Verkehrsaufkommen, Schwerverkehrsanteil, erwartete Wiederinstandsetzungszeit) wird die Kritikalität bewertet.</p> <p><i>2. Bewertung und Priorisierung der Relevanz der identifizierten Elemente</i></p> <p>Aus Blickwinkel der zu erwartenden netzweiten Konsequenzen bei einem Ausfall der identifizierten Elemente wird eine Priorisierung ermittelt.</p> <p><i>3. Risikoabschätzung für die kritischsten Elemente</i></p> <p>Für die kritischsten Elemente wird auf Basis eines definierten Katalogs von Gefährdungen und Beurteilungskriterien die Risiken abgeschätzt. Für die Risikoabschätzung werden neben der Eintrittshäufigkeit auslösender Ereignisse die direkten Konsequenzen (z.B. Todesopfer und Verletzte, Sachschäden) wie auch die indirekten Konsequenzen (z.B. regionalökonomische Auswirkungen durch Fahrzeitverlängerungen und Umweltbelastungen infolge von Umwegfahrten) in monetarisierter Form berücksichtigt.</p> <p><i>4. Analyse und Bewertung Risikominderungsmaßnahmen</i></p> <p>Auf Grundlage von Kosten-Wirksamkeits-Analysen wird die Verhältnismäßigkeit von möglichen zusätzlichen Maßnahmen untersucht.</p> <p>Die Bewertung der Resilienz beruht also auf einer Einschätzung der resultierenden Risiken des Ausfalls eines kritischen Straßenelements der Verhältnismäßigkeit möglicher ergänzender risikomindernder Maßnahmen.</p> <p>Das entwickelte Verfahren wurde für verschiedene Brücken und Tunnel im europäischen Straßennetz exemplarisch angewandt. Im Fokus der Analysen stand dabei die Anwendungen und Validierung des Verfahrens und nicht die spezifische Suche nach Resilienzmaßnahmen für die jeweiligen Objekte.</p>	
Wie wurden Maßnahmen abgeleitet und welche?	
<p>Das entwickelte Verfahren gibt eine umfassende und gegliederte Übersicht über mögliche Schutzmaßnahmen für kritische Straßeninfrastrukturelemente. Ebenso wurden im Forschungsprojekte normierte Richtkosten für zahlreiche Maßnahmen ausgewiesen. Ein spezifisches Verfahren zur Selektion potenziell geeigneter Maßnahmen ist nicht weiter definiert. Sie wird den Anwendern des Verfahrens überlassen.</p> <p>Die im Fallbeispiel diskutierten Resilienzmaßnahmen lassen sich wie folgt in die Maßnahmentypisierung einordnen:</p>	

Resilienzmaßnahmen	Objekt		Netz/Region	
	technisch	planerisch/ organisatorisch	technisch	planerisch/ organisatorisch
prepare	<ul style="list-style-type: none"> • Objektüberwachung • Verkehrsüberwachung und -kontrolle • Schnelle Echtzeit Detektion und Übermittlung 	<ul style="list-style-type: none"> • Vorort-Inspektionen • Vorabregelungen von Abläufen und Anforderungen • Schulung des Überwachungs- und Bedienpersonals • Entwicklung von Notfall- und Gefahrenabwehrplänen • Notfallübungen 	<ul style="list-style-type: none"> • Verkehrsüberwachung und -kontrolle 	<ul style="list-style-type: none"> • Vorabregelung von Abläufen und Anforderungen • Schulung des Überwachungs- und Bedienpersonals • Entwicklung von Notfall- und Gefahrenabwehrplänen • Notfallübungen
prevent	<ul style="list-style-type: none"> • Physische Barrieren • IT-Sicherheit • Limitierung von schadhafteffekten 	<ul style="list-style-type: none"> • Zugangskontrolle 	<i>keine Angaben</i>	
protect	<ul style="list-style-type: none"> • Schutzverkleidungen • Verstärkung struktureller Elemente • Design und Layout 	<i>keine Angaben</i>		
respond	<ul style="list-style-type: none"> • Geländeeigenschaften • Flucht- und Evakuationsbedingungen 	<ul style="list-style-type: none"> • Geeignete Straßennutzerinformation und -instruktion 	<ul style="list-style-type: none"> • Redundantes Design 	<ul style="list-style-type: none"> • Geeignete Straßennutzerinformation und -instruktion
recover	<ul style="list-style-type: none"> • Temporärer Austausch • Schnelle Reparatur 	<ul style="list-style-type: none"> • Rekonstruktions- und Wiederherstellungspläne • Beschleunigte Planung und Abwicklung von Baubewilligungen • Effektive Schadensbeurteilung 	<i>keine Angaben</i>	

Wie wurden Maßnahmen bewertet? Was war das Kosten-Nutzen-Verhältnis? Wurden gesamtwirtschaftliche Folgen ausgewiesen?

Die Beurteilung von Maßnahmen zur Minderung der Risiken (resp. zur Erhöhung der Resilienz) basiert auf einer Kosten-Wirksamkeits-Analyse). Dazu werden für die Entscheidung hinsichtlich zusätzlicher Maßnahmen die Abschätzung der netzweiten (monetarisierten) bei Konsequenzen einer möglichen Nicht-Verfügbarkeit des kritischen Straßeninfrastrukturelements den Kosten (für Investition und Betrieb) der Maßnahme gegenübergestellt.

Sind Umsetzung, Anwendbarkeit, Praktikabilität, etc. bewertet?

Das im Forschungsprojekt entwickelte Verfahren fokussiert netzweiten Auswirkungen bei einem Ausfall kritischer Straßeninfrastrukturelement. Für die direkten und die indirekten Auswirkungen wurden im Forschungsprojekt teilweise sehr komplexe Modellrechnungen für die Ermittlung der Konsequenzen angewandt. So wurden beispielsweise umfassende Analysen der zu erwartenden Verkehrsverlagerungen mit aufwändigen Verkehrsmodellen ermittelt. Für eine breite Anwendung – z.B. für das gesamte Bundesfernstraßennetz – sind das entwickelte Verfahren und die zugehörigen Methoden und Modell teilweise zu aufwändig. Dementsprechend eignet sich das Verfahren primär für spezifische Einzelfallbetrachtungen.

Factsheet 5	Verbundprojekt SKRIBT – Schutz kritischer Brücken und Tunnel im Zuge von Straßen					
<i>Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) & VDI Technologiezentrum GmbH (2013): Verbundprojekt SKRIBT – Schutz kritischer Brücken und Tunnel im Zuge von Straßen. Schlussbericht: Schutz kritischer Brücken und Tunnel (http://www.skribt.org/).</i>						
Kurzbeschreibung						
Das Projekt SKRIBT wurde durch das BMBF initiiert. Ziel des Berichts war es für Strassenbrücken und -tunnel potentielle Gefährdungen zu identifizieren (Bedrohungsanalyse), Objektanalysen durchzuführen und Schutzmassnahmen zu entwickeln. Berücksichtigt werden können unterschiedlichste Arten von Gefahren.						
Anlass für den Bericht						
Der Bericht wurde im Rahmen des SKRIBT Projekts, als Teil des Programms «Forschung für die zivile Sicherheit», erstellt.						
Wie wurde die Resilienz bewertet/indexiert?						
Der Begriff Resilienz wird als solcher nicht verwendet. Die Massnahmen reduzieren jedoch die Eintrittswahrscheinlichkeit und die Schäden eines möglichen Ereignisses und können somit als Resilienzmassnahmen betrachtet werden. Es wurde eine Bedrohungs- und Objektanalyse durchgeführt. Kritische Bauwerke wurden identifiziert unter Berücksichtigung von Nutzer, Bauwerk und Verkehr.						
Wie wurden Massnahmen abgeleitet und welche?						
Die Einwirkungen eines Ereignisses wurden der Widerstandsfähigkeit eines Bauwerks gegenübergestellt und daraus Massnahmen zur Erhöhung der Widerstandsfähigkeit abgeleitet. Es erfolgte eine Einteilung in bautechnische, betriebliche und organisatorische Massnahmen mit Zuordnung zu verschiedenen Verantwortlichen (Bauwerkseigentümer, Bauwerksbetreiber, Einsatzdienste). Präventive und ausmassmildernde Massnahmen zum Bauwerks- und zum Nutzerschutz. Die Massnahmen wurden einer oder mehreren Ereigniskategorien zugeordnet.						
Resilienzmassnahmen	Objekt		Netz/Region			
Phase	technisch	planerisch/ organisatorisch	technisch	planerisch/ organisatorisch		
prepare	<ul style="list-style-type: none"> • Gefahrgutererkennung (T) • ITCC Integration (T) • Schnellere Ereignisdetektion (T) • Windgeschwindigkeitswarnanlage (B) • Pegelmessung (B) 	<ul style="list-style-type: none"> • TLZ Operatoren-Training (T), Alarm- und Gefahrenabwehrpläne (T), Übungen Betriebs- und Einsatzdienste (T), Vorinformation Tunnelnutzer (T), Situationstraining Tunnelnutzer (T), Notfallübungen auf Brücken (B) 	<i>keine Angaben</i>			
prevent	<ul style="list-style-type: none"> • Physische Barrieren/Zugangshinderung (B) • Parkverhinderung unter Brücken (B) • Windschutzwände (B) • Freibordvergrößerung (B) • Gefahrgutlimitierung (T) • Gasdetektion (T) • Detektion überhitzter Fahrzeuge (T) 	<ul style="list-style-type: none"> • Verschließen der Bestandesunterlagen (B) 			<i>keine Angaben</i>	
protect	<ul style="list-style-type: none"> • Hochleistungsbeton als Konstruktionsbeton (B,T), Vorsatzschale aus mikrobewehrtem Hochleistungsbeton (B,T), Brandschutzbeton (T), Dämpferbeton (T), zweischalige Bauweise (T), Verstärkung und Aufbetonschicht (B), Pfeilerscheibe statt Stütze (B), Anprallschutz (B), Lagerschutz (B) 	<i>keine Angaben</i>				

	<ul style="list-style-type: none"> • Dimensionierung für Explosionslasten (T) • Entwurf statisch unbestimmtes System (B) • Bemessung auf höhere Anpralllasten (B) • Brandschutzbekleidungen (T), automatische Brandbekämpfungsanlage (T), verlängerte Vollbrandphase (T), Rauchabsaugung (T) • Verkürzte Notausgangsabstände (T) • Spezieller Brückennotruf (B) 			
respond	<ul style="list-style-type: none"> • Automatische Sperreinrichtungen (B), Softstop-Barriere (T) 	<ul style="list-style-type: none"> • Tunnelkommunikation (T) 	<ul style="list-style-type: none"> • Globale Redundanz 	<i>keine Angaben</i>
recover	<i>keine Angaben</i>			
Wie wurden Maßnahmen bewertet? Was war das Kosten-Nutzen-Verhältnis? Wurden gesamtwirtschaftliche Folgen ausgewiesen?				
Wirksamkeits-Kosten-Analyse unter Berücksichtigung gesellschaftlicher Akzeptanz und betriebs-, und volkswirtschaftlicher Aspekte. Kosten-Nutzen-Differenz und Kosten-Nutzen-Quotient wurden für die vier Beispielbauwerke berechnet. Gesamtwirtschaftliche Aspekte wurden beurteilt.				
Sind Umsetzung, Anwendbarkeit, Praktikabilität, etc. bewertet?				
Anhand von vier Beispielbauwerken wurde die Anwendbarkeit überprüft. Gemäss Bericht wird ein Verfahren zur Verfügung gestellt, dass trotz hoher Komplexität eine hohe Praktikabilität aufweist.				

A2: Beispiele für gesamtwirtschaftlichen Folgeabschätzungen von Verkehrsmaßnahmen

Zur Überprüfung der gesamtwirtschaftlichen Folgen von (Resilienz-)Maßnahmen bestehen verschiedene statistische und/oder gesamtwirtschaftliche Modelle. Diese unterscheiden sich nach den betrachteten verkehrlichen Inputgrößen (Infrastruktur oder Erreichbarkeit) und den betrachteten gesamtwirtschaftlichen Outputgrößen (Kapitalproduktivität, Wertschöpfung, Beschäftigung, Immobilienpreise):

- Analysen zu Infrastruktur und Kapitalproduktivität
- Regionalwirtschaftliche Modelle: Analysen zu Erreichbarkeit und Wertschöpfung

Im Folgenden werden entsprechende Verfahren und Vorgehensweisen, wie sie auch für die Bewertung von Resilienzmaßnahmen verwendet werden könnten zusammenfassend dargestellt. Diese Studien dokumentieren den für die Praxis relevanten Stand der Forschung [49]. In [49] werden zudem jüngere Entwicklungen wie System Dynamics Modelle wie das Modell ASTRA und integrierte Bewertungsmodelle wie HIGHTOOL oder TRIMODE aufgeführt. ASTRA dient aber zur Simulation der Ausbreitung neuer Technologien. Auch die integrierten Bewertungsmodelle koppeln lediglich bestehende Partialmodelle miteinander, welche wiederum auf bestehende und regionalwirtschaftliche Modelle zurückgreifen, die hier auch in weiterer Folge beschrieben werden.

Analysen zu Infrastruktur und Kapitalproduktivität

In den folgenden Studien wird aufgezeigt, in welchem Ausmaß eine Investition den gesamtwirtschaftlichen Kapitalstock erhöht und wie hoch die Kapitalproduktivität einer solchen Investition ist. Nicht weiter berücksichtigt wird dabei, um was für Projekte es sich handelt, ob diese verkehrsplanerisch sinnvoll sind oder wie sich diese auf Reisezeiten auswirken.

Prinzipiell könnten solche Kapitalproduktivitäten auch für Investitionen in Resilienzmaßnahmen ermittelt und angewendet werden. Liegen solche Kapitalproduktivitäten vor, könnten diese einfach angewendet werden.

Konjunkturforschungsstelle der ETH Zürich, KOF (2005)

In einer Literaturanalyse untersuchte die KOF mehrere ausländische und inländische empirische Studien, in welchen Zusammenhänge zwischen Infrastrukturinvestitionen und Wirtschaftswachstum mithilfe statistischer Modelle beschrieben wurden. In den meisten Studien konnten wachstumssteigernde Wirkungen von Investitionen in die öffentliche Infrastruktur empirisch nachgewiesen werden.

Für die Berechnung der Rentabilität von Infrastrukturinvestitionen in der Schweiz geht die KOF von einer Produktionselastizität zwischen 0.02 und 0.06 aus. Die daraus berechnete Rentabilität des schweizerischen Verkehrsinfrastrukturkapitals von 6% bis 12% wird von den Autoren als eher konservative Schätzung betrachtet. Die als Untergrenze geschätzten Rentabilität von rund 6% ist dabei höher ist als der aktuelle Realzinssatz und viele Anlageformen.

Rheinisch-Westfälisches Institut für Wirtschaftsförderung, RWI (2010)

Die Studie „Verkehrsinfrastrukturen – Wachstumsaspekte im Rahmen einer gestaltenden Finanzpolitik“ des RWI untersucht die volkswirtschaftlichen Effekte getätigter Investitionen in die Verkehrsinfrastruktur in Deutschland ohne Berücksichtigung der Erreichbarkeitsveränderungen. Anhand dreier Modelle (Vektorautoregressives Modell, Panelanalyse und Strukturmodell) werden Regressionskoeffizienten bzw. Elastizitäten zwischen Investitionen in die Verkehrsinfrastruktur und mehreren wirtschaftlichen Kenngrößen (BIP, Erwerbstätigkeit, Investitionsvolumen, Preise etc.) berechnet und auf statistische Signifikanz hin überprüft.

Mithilfe des vektorautoregressiven Modells ermitteln die Autoren einen positiven Wachstumseffekt von Verkehrsinfrastrukturinvestitionen ein Jahr nach dessen Tätigung. Im späteren zeitlichen Verlauf kann dieser jedoch nicht weiterverfolgt werden. Zusätzlich wird aufgezeigt, dass Investitionen in den Straßenverkehr stärkere Wachstumseffekte entfalten als diejenigen in den Schienenverkehr. Mit der Panelanalyse wurde ein positiver Zusammenhang zwischen Verkehrsinvestitionen und dem BIP ermittelt, wobei die davon abgeleiteten Elastizitätskennziffern (0.03 – 0.08) eher geringe Werte aufweisen. An Orten mit weniger weit entwickelter Verkehrsinfrastruktur (Ostdeutschland vgl. mit Westdeutschland) scheinen solche Investitionen mehr wertschöpfungsrelevante Wirkungen zu erzielen. Das Strukturmodell zeigt, ähnlich wie das vektorautoregressive Modell, ebenfalls Effekte ein Jahr nach Investitionstätigkeit auf, welche sich im späteren Verlauf deutlich abschwächen.

Regionalwirtschaftliche Modelle: Analysen zu Erreichbarkeit und Wertschöpfung

Die hier verfolgten Ansätze versuchen Verbesserungen im Verkehrsnetz und ihre Auswirkung auf die Wertschöpfung (BIP) vorwiegend mittels statistischer Regressionsanalyse direkt zu erfassen. Dazu wird stets ein Erreichbarkeitsindikator berechnet. Die Ermittlung der Erreichbarkeit erfolgt in den untersuchten Studien jedoch unterschiedlich, z.B.:

1. *BAK Basel (2011)*: BAK Basel einen eigenen Erreichbarkeitsindikator, welcher primär auf der Erfassung von Reisezeiten basiert. Anstelle von Reisezeiten können auch Luftliniendistanzen verwendet werden, wobei dann die Zentralität der geographischen Lage ermittelt wird. Zur Erfassung der Zusammenhänge zwischen Wertschöpfung (BIP) und Erreichbarkeit werden klassische ökonometrische Strukturmodelle verwendet, welche nebst multimodaler Erreichbarkeitskennziffern (MIV + ÖV) mehrere Kontrollvariablen auf Ebene der MS-Regionen beinhalten. Mittels eines solchen Modells wurde für den Gotthard-Eisenbahnbasistunnel ein jährlicher BIP-Anstieg von 1.1 bis 3.2 Mia. CHF hergeleitet, was einer Amortisationsdauer der Verkehrsinfrastruktur von 4 bis 11 Jahren entspricht.
2. *Department for Transport, DfT und Graham, Großbritannien (2005-2009)*: Verbesserte Erreichbarkeiten führen zu einer Konzentration wirtschaftlicher Aktivitäten gemäß dem britischen Department for Transport (DfT) und damit zu positiven Externalitäten, den sogenannten Agglomerationseffekten. Gemäß Graham (2006) wirkt sich die Effizienz eines Verkehrssystems indirekt auf die Produktivität von Arbeitskräften aus. Dazu definiert er den Begriff der *Effektiven Dichte*, welcher die Anzahl Arbeitskräfte einer Branche an einem bestimmten Ort zuzüglich derjenigen in anderen Lokalitäten, invers gewichtet durch einen Distanzfaktor, widerspiegelt. Die effektive Dichte kann dabei auf vier Arten ermittelt werden. In einer weiterführenden Untersuchung ermittelt Graham et al. (2009) nebst revidierten Elastizitätskennziffern branchenspezifische Distanzdegradationsfaktoren zur genaueren Bestimmung der effektiven Dichte. Die Werte sind in der untenstehenden **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** wiedergegeben. Deren Verwendung wird vom DfT zur Berechnung von Agglomerationseffekten in Kosten-/Nutzenanalysen empfohlen und ist für mehrere

Projekte zum Ausbau der Eisenbahninfrastruktur in Großbritannien dokumentiert (z.B. Crossrail)

Branche	Elastizität der Produktivität bezüglich effektiver Dichte	Distanzdegradationsfaktor α
Manufacturing	0.021	1.097
Construction	0.034	1.562
Consumer Services	0.024	1.818
Business Services	0.083	1.746
All Industries	0.043	1.655

Abbildung 13: Kennzahlen zur branchenabhängigen Elastizität der Produktivität bezogen auf die effektive Dichte und zur Distanzdegradation gemäß Graham et al. (2009)

3. *Ernst Basler + Partner, EBP (2005)*: In dieser Studie werden mittels Clusteranalyse Produktionsfunktionen für drei Regionstypen (Städte und Umland, Grenz- und Randregionen, alpine Bezirke) und vier Branchen (Landwirtschaft, Industrie, Dienstleistungen ohne Tourismus, Tourismus) in Österreich aufgestellt, welche auch den Faktor *Erreichbarkeit* beinhalten. Dieser wird mittels Potentialansatz gemessen an der von einem politischen Bezirk aus zu erreichenden Anzahl Einwohner (Bevölkerungserreichbarkeitspotential) hergeleitet. Das Modell wurde an zwei Fallbeispielen angewendet. Dabei werden maßnahmenbedingte Veränderungen der Bruttowertschöpfung von 459 Mio. EUR/a bzw. 340 Mio. EUR/a ermittelt, entsprechend einer Zunahme der nationalen Bruttowertschöpfung um 0.22% bzw. 0.16%. Anschließend wird der Nutzen gemäß herkömmlicher Kosten-Nutzen-Analyse berechnet. Der Nutzen ist in der Kosten-Nutzen-Analyse um 265 Mio. EUR/ bzw. 151 Mio. EUR/a geringer als gemäß Wertschöpfungsanalyse. Dabei wurden etwaige Doppelzählungen bereits herausgerechnet. Die Studie zeigt zudem auf, wie Veränderungen der Bruttowertschöpfung zukünftig in Kosten-Nutzen-Analysen integriert werden können.

Institut für Höhere Studien, IHS (2006)

Das IHS erarbeitete das Erreichbarkeitsabhängige Regionalmodell (EAR), welches eine Verknüpfung zwischen der Erreichbarkeit und sozioökonomischen Kennziffern wie Bruttowertschöpfung, Anzahl Firmen, Anzahl Arbeitsstellen etc. herstellt. Die Erreichbarkeit einer Region wird dementsprechend gemäß folgender Formel definiert:

$$E_i = \sum (a_{ij}) * w_{ij}$$

Die Bedeutung der Variablen lautet wie folgt:

E_i : Erreichbarkeit der Region i,

a_{ij} : Reisezeit zwischen der Region i und einer Region j

w_{ij} : Individueller Gewichtungsfaktor je Erreichbarkeitsindikator

Der Faktor w_{ij} in der obigen Formel kann für die Berechnung folgender Erreichbarkeitskennziffern angepasst werden:

- Erreichbarkeit über lange Distanzen
- Erreichbarkeit über kurze Distanzen
- Häufigkeitsgewichtete Erreichbarkeit über lange Distanzen
- Häufigkeitsgewichtete Erreichbarkeit über kurze Distanzen
- Distanz zu einem regionalen Zentrum

Das IHS ermittelt Elastizitäten des Brutto-Regionalprodukts in Abhängigkeit der häufigkeitsgewichteten Erreichbarkeit über lange Distanzen von 0.02 und der Distanz zum regionalen Zentrum von 0.01. Darauf basierend berechnet das IHS voraussichtliche Wertschöpfungseffekte von vier österreichischen Eisenbahnprojekten auf der räumlichen Aggregationsebene der Bundesländer. Diese sind in Abbildung 14 wiedergegeben.

Erhöhung Brutto-Regionalprodukt [Mio. EUR/10a]			
	Semmering-Basistunnel (altes Projekt)	Umfahrung Selzthal	Mariazellerbahn
Burgenland	0	0	0
Kärnten	43.99	0	0
Niederösterreich	78.51	0	8.14
Oberösterreich	0	0	0
Salzburg	0	2	0
Steiermark	80.42	9	0
Tirol	0	2.23	0
Vorarlberg	0	1.09	0
Wien	83.11	0	0
Summe	286.03	14.32	8.14

Abbildung 14: Erhöhung der Bruttowertschöpfung in den österreichischen Bundesländern aufgrund von drei Eisenbahnprojekten

Das Modell von IWW et al. [61] enthält die Potentialfaktoren Infrastruktur, hoch qualifiziertes Humankapital, weiche Standortfaktoren und Umweltqualität. Dies Potentialfaktoren werden zusammen mit

einem exogenen Parameter über eine Cobb-Douglas-Funktion verknüpft und im Querschnitt geschätzt. Die Ergebnisse für Berechnungen mit neuer Infrastruktur geben Potentiale für die wirtschaftliche Entwicklung an. Diese treten nur ein, wenn die Verkehrsinfrastruktur einen Engpass in der regionalen Entwicklung darstellen. Nur falls das der Fall ist, sind die berechneten Potentiale für Wirkungsanalysen relevant.