

DISS. ETH NO. 19671

**VULNERABILITY ASSESSMENT OF ROAD
TRANSPORT INFRASTRUCTURE**

A dissertation submitted to

ETH ZURICH

for the degree of

Doctor of Sciences

presented by

ALEXANDER LUCAS ERATH

Dipl. Bauing. ETH

born 16.10.1980

citizen of
Basel, Switzerland

accepted on the recommendation of

Prof. Kay W. Axhausen, examiner
Prof. Mike G. H. Bell, co-examiner

2011

Abstract

The overall aim of this dissertation is to develop a methodology that allows the assessment of indirect consequences of road network failures that, on the one hand can be used to enhance infrastructure management system by the notion of network vulnerability and, on the other hand can be performed with reasonable computational effort. To this end, the dissertation focusses on three different issues: the development of an adaptive failure consequences assessment, the estimation of a statistical model and the evaluation of the relevance of joint failure scenarios when prioritising natural hazard protection measures.

It is demonstrated that based on network and transport demand characteristics, a meaningful link typology with respect to their potential of inducing failure consequences can be obtained based on cluster analysis. For each of those clusters, a separate strategy for failure consequence assessment has been developed. Both key assumptions, namely the use of subnetworks and the omission of assignment for links with low demand, have been successfully validated for the case of the Swiss National Transport Model. Since the concomitant decrease of computation intensity is massive, a network-wide assessment of single link failure consequences including mode and destination choice effects becomes possible.

Based on the variables shortest detour, link type as well as network density and volume a statistical model to evaluate failure consequences is developed. Although the proposed model does not allow to indicate possible failure consequences with high precision given the overall model fit, the results are still relevant for vulnerability analysis. First, the application of the model permits obtaining a first indication of a network's vulnerability structure with considerably lower requirements in terms of data availability and computational effort. Second, the inclusion of vulnerability into infrastructure management systems requires also the indication of failure probability. The level of precision when indicating failure probability based on natural hazard maps in current practice is normally relatively restricted featuring only a couple of ordinal scaled probability categories. The presented statistical model at least meets or

even exceeds such accuracy.

The assumption of single link failures is rather restrictive and especially challenged by threats that are caused by one extreme natural event. The main challenge is the number of potential scenarios that arise when relaxing the assumption of single link failure and allowing that two or more links are in failure state at the same time. The main challenge is to cope with the number of joint failure scenarios with supposedly different failure consequences which need to be considered for a comprehensive vulnerability assessment. Based on the mathematical formulation of possible difference between single and joint link failure assessment, a methodology which employs the demand distribution patterns caused by single link failure to reduce the number of relevant joint failure scenarios is developed and applied for a case study. By applying a gradual approach to evaluate the impact of single link protection measures, it is demonstrated that the prioritisation of failure protection measures based on joint link assessment differs on the whole only little from the solution obtained by restricting to single link failures. However, the methodology was able to detect one link that serves as principal detour alternative in case of several other single link failure scenarios as the most effective protection opportunity.

Potential for further research is considered in the improvement of the adaptive failure consequence assessment by employing multi-path algorithm for route search, the consideration of both road and rail network failure and the development of more sophisticated statistical methods for estimating failure consequences.

Zusammenfassung

Ziel dieser Dissertation ist die Entwicklung einer Methodik, die erlaubt Kosten zu quantifizieren, die Verkehrsteilnehmern infolge von Streckenausfällen im Strassennetz entstehen. Damit die Resultate zur netzweiten Optimierung von Schutzmassnahmen verwendet werden können, muss die Quantifizierung von Streckenausfallskosten netzweit möglich und zugleich aber mit vernünftigem Rechenaufwand bewältigbar sein. Drei Ansätze stehen dabei im Vordergrund: Die Entwicklung einer adaptiven Quantifizierungsmethode, die statistische Modellierung von Streckenausfallskosten und die Relevanz mehrerer gleichzeitigen Ausfälle hinsichtlich der Priorisierung von Schutzmassnahmen.

Die adaptive Quantifizierung von Streckenausfällen gründet auf einer statistischen Streckentypologisierung, welche streckenspezifischen Charakteristika des Verkehrsnetzes und der Verkehrsnachfrage berücksichtigt. Für jeden so definierten Streckentyp wurde eine hinsichtlich des Rechenaufwandes optimierte Berechnungsmethode entwickelt. Die zentralen Vereinfachungen dabei sind die Verwendung von Teilnetzen und der teilweise Verzicht auf eine Neuberechnung der Verkehrsflüsse. Die Validität dieser Vereinfachungen wurde anhand des Schweizer Verkehrsmodells sorgfältig geprüft und konnte bestätigt werden. Die damit erreichte Verringerung der Rechenintensität ermöglicht die netzweite Bewertung von Streckenausfällen unter Berücksichtigung von Verkehrsmittel- und Zielwahleffekten.

Das statistische Modell zur Quantifizierung von Streckenausfallskosten kombiniert die Variablen Streckentypologie, Strassennetzdichte sowie Streckenbelastung im Normalfall als erklärende Variablen. Obschon die Erklärungskraft des statistischen Modells beschränkt ist, sind die Resultate für die Analyse der Verletzlichkeit von Strassennetzen dennoch von hoher Relevanz. So ermöglicht die Anwendung des Modells eine erste netzweite Übersicht der Verletzlichkeit, welche hinsichtlich des Datenbedarfs und Rechenaufwands vergleichsweise geringe Anforderungen stellt. Berücksichtigt man weiter die Präzision bei der Quantifizierung der Streckenausfallswahrscheinlichkeit, die mit gängigen Methoden meist

nur eine ordinale Skalierung innerhalb einiger weniger Kategorien zulässt, so vermag das statistische Modell diese Genauigkeit zu erreichen oder gar zu übertreffen.

Die Annahme statistisch unabhängiger Streckenausfälle wird als starke Vereinfachung erachtet und muss im speziellen in Frage gestellt werden, wenn die Gefahren im selben extremen Naturereignis gründen. Sollen Netzzustände, welche zwei oder mehrere gleichzeitige Streckenausfälle umfassen, ebenfalls berücksichtigt werden, erhöht sich die Anzahl potentieller Szenarien aber exponentiell. Aufgrund der zu erwartenden Differenzen zwischen einzelnen und gleichzeitigen Ausfällen wurde eine Methode entwickelt, die erlaubt die Anzahl der tatsächlich zu berücksichtigenden Szenarien beträchtlich zu reduzieren. In einer sich auf ein Teilnetz beschränkte Fallstudie wird gezeigt werden, dass die Priorisierung von Schutzmassnahmen sich unter der Annahme von Einzelausfällen gegenüber Mehrfachausfällen nur leicht unterscheiden. Allerdings wird auch offenbar, dass Schutzmassnahmen an Strecken berechtigt sein können, welche bei Ausfällen anderer Strecken als wichtige Umfahrung dienen, hinsichtlich eines Einzelausfalls aber von untergeordneten Relevanz sind.

Die Verbesserung der adaptiven Bewertungsmethode birgt weiteres Forschungspotential, insbesondere die Verwendung von Routensuchalgorithmen welche ein Bündel sinnvoller, aber sich hinsichtlich des Streckenverlaufs dennoch deutlich unterscheidenden Routen generieren. Weiter ist die Berücksichtigung von gleichzeitigen Ausfällen im Strassen- und Eisenbahnnetz sowie die Verwendung verfeinerten Methoden bei der statistischen Modellierung von Streckenausfallkosten erstrebenswert.