



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Eidgenössisches Departement für
Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK
Bundesamt für Energie BFE

Jahresbericht 31. Dezember 2008

Interaktion von Kommunikations- und Stromnetz der Schweiz bei grossflächigen Schadensereignissen

Auftraggeber:

Bundesamt für Energie BFE
Forschungsprogramm Netze
CH-3003 Bern
www.bfe.admin.ch

Kofinanzierung:

swisselectric research, CH-3001 Bern

Auftragnehmer:

ETH Zürich
Institut für Energietechnik
Laboratorium für Sicherheitsanalytik
Sonneggstrasse 3
CH-8092 Zürich
www.lsa.ethz.ch

Autor:

Dr. Mathias Raschke, ETH Zürich, mrashke@mavt.ethz.ch

BFE-Bereichsleiter: Dr. Michael Moser

BFE-Programmleiter: Dr. Rainer Bacher

BFE-Vertrags- und Projektnummer: 153269 / 102556

Für den Inhalt und die Schlussfolgerungen ist ausschliesslich der Autor dieses Berichts verantwortlich.

Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung	4
Abstract	4
1. Ausgangslage	5
2. Ziel der Arbeit	5
3. Methode.....	6
4. Ergebnisse.....	6
5. Diskussion	10
6. Referenzen	10

Zusammenfassung

Das Projekt ist im Berichtszeitraum in weitgehender Übereinstimmung mit dem Projektplan bearbeitet worden. Das Gefährdungsmodell für Erdbeben wurde adaptiert. Schadensfunktionen für Erdbeben und Methoden zu ihrer Schätzung wurden entwickelt und angepasst. Die Modellierung des Schweizer Übertragungsnetzes verzögert sich aufgrund der späten Besetzung der PhD-Stelle. Im Gegensatz dazu ist die Modellierung eines Kommunikationsnetzes unter Berücksichtigung des Erdbebenrisikos weiter fortgeschritten als geplant. Das Versagen von Knoten und Verbindungen des SWITCH Netzes aufgrund von Erdbebeneinwirkungen wurde bereits simuliert. Die grundlegenden Ansätze für die Interaktion der Netze wurden recherchiert, theoretische Untersuchungen zur Interaktion werden durchgeführt. Die Möglichkeiten der konkreten Modellierung der Interaktionen können noch nicht abgeschätzt werden. Die Begrenzung der Projektziele aufgrund der Nichtbesetzung der zweiten PhD-Stelle wurde noch nicht definiert. Sie wird sich aber voraussichtlich auf die Modellierung der Wetterkatastrophen und der Kommunikationsnetze beziehen, da vor allem in diesen Bereichen für die Untersuchungen erforderliche Informationen und Daten nur in Teilen zur Verfügung stehen. Erste wissenschaftliche Ergebnisse sind neue Ansätze zur statistischen Modellierung von Schadensfunktionen und die erste Schätzung des Erdbebenrisikos des SWITCH Netzes.

Abstract

The project is in process with extensive conformance with the project plan. The hazard model for earthquakes was adopted. Damage and failure functions for earthquakes and methods for their estimation were developed and adopted. The modelling of the transportation grid of Switzerland is lagging because the PhD vacancy has been filled late. In contrast to this the modelling of a communication grid under consideration of earthquake risk is more advanced than planned. Failure of nodes and lines were simulated already. Basic approaches of interaction between different grids were researched, theoretical investigations are carrying out. Possibilities of concrete modelling of interactions can not be assessed completely. A reduction of goals of the project caused by the vacant, second PhD position can not be defined already. It will be related to the modelling of weather catastrophes and communication grids because information and data needed for the research are only partly available. First scientific results are new approaches for statistical modelling of failure and damage functions and a first estimation of the earthquake risk of the SWITCH grid.

1. Ausgangslage

Das Transportnetz (Strom) ist notwendig für die Aufrechterhaltung des öffentlichen Lebens in der Schweiz. Umso wichtiger ist die Gewährleistung der Funktionsfähigkeit des Transportnetzes bei Einwirkungen aus Naturkatastrophen wie Erdbeben und Sturm. Die Funktionsfähigkeit des Transportnetzes kann nur mit den dazugehörigen Kommunikationsmitteln sichergestellt werden. Deshalb ist auch die Robustheit der Kommunikationsnetze gegenüber diesen grossflächigen Schadensereignissen wichtig. Schäden an den jeweiligen Netzen können durch Interaktionen zu grösseren Ausfällen führen. Wissenschaftliche Untersuchungen und Modellierungen des Risikos Schweizer Infrastrukturnetze infolge von Naturgefahren wurden bisher nur in Ansätzen durchgeführt.

Zur Zuverlässigkeit von komplexeren Transportnetzen wurden schon verschiedenste Untersuchungen durchgeführt und publiziert. Das Schweizer Transportnetz wurde im Rahmen von Forschungen von M. Schläpfer (Mitglied des LSA) in einer Masterarbeit [1] untersucht. Das Versagen von Netzelementen hat in diesen Modellen keine externen Ursachen.

Das Risiko kleinerer Hochspannungsnetze hinsichtlich des Erdbebenrisikos wurde ebenfalls bereits untersucht. Die Arbeit von Shinozuka et al. [2] für den Großraum Los Angeles gehört dabei zu den fortgeschrittensten. Das untersuchte Netz ist allerdings nicht sehr groß, die Modellierung des Stromflusses und das Erdbebengefährdungsmodell sind stark vereinfacht.

Extreme Wetterereignisse wurden erst ansatzweise untersucht und modelliert. Broström [3] entwickelte Ansätze für ein Eissturmmodell. Die Modellparameter wurden nur für spezielle Fälle ermittelt. Das LASEN (Laboratory of Energy Systems) der EPFL (Swiss Federal Institute of Technology) bearbeitet zurzeit ein Projekt zum Risiko des Schweizer Transportnetzes hinsichtlich extremer Wetterereignisse [4]. Eine vollständige Risikoanalyse, deren Ergebnis die Schätzung einer Häufigkeitskurve von Schadensereignissen ist, wird in diesem Projekt voraussichtlich nicht durchgeführt werden.

Die Interaktion verschiedener Infrastrukturnetze wurde bisher vorwiegend theoretisch und/oder in kleinem Massstab untersucht. Duenas-Osorio et al. (s. [5] und [6]) benutzte zwar konkrete Infrastrukturnetze, unter anderem Stromnetze, wendete aber nur theoretische Modellierungen von Interaktionen ohne statistische Verifizierung an. Newman et al. [7] untersucht theoretische Netze mit vielen Knoten, die sich nur sehr grob auf Stromnetze übertragen lassen. Schneider et al. [8] modellierte konkrete Interaktionen von Elementen des Daten und Stromnetzes, allerdings nur für eine Unterstation. Dudenhoeffer et al. [9] gibt einen guten Überblick über die verschiedensten Ansätze und Modellierungen hinsichtlich der von Interaktionen und Abhängigkeiten von Infrastrukturnetzen in vergangenen Forschungsprojekten. Empirische Untersuchungen wurden kaum durchgeführt.

Die Beeinträchtigung von Stromnetzen infolge von Erdbebeneinwirkungen wurde schon gut in verschiedenen Berichten und Meldungen [10] - [20] dokumentiert. Grössere Schadensfälle im Transportnetz infolge von Wetterereignissen wurden seltener dokumentiert.

2. Ziel der Arbeit

Ziel des Projektes ist es, die Sicherheit und Verletzbarkeit des Stromnetzes der Schweiz in Interaktion mit dem Kommunikationssystem beim Auftreten der grossräumigen Schadensereignisse Gewittersturm und Erdbeben durchgängig mit probabilistischen Methoden zu analysieren.

Das Risiko des Stromnetzes soll im Rahmen des Projektes quantifiziert werden. Dies geht weit über konventionelle Empfindlichkeitsuntersuchungen mittels definierter Szenarien hinaus. Die Interaktionen mit Schäden am Daten- und Kommunikationsnetz sollen dabei berücksichtigt werden.

3. Methode

In dem Projekt werden verschiedene Softwarepakete und Methoden angewendet, welche sind:

- Simulationssoftware (z.B. AnyLogic) zur Modellierung des Stromflusses im Übertragungsnetz oder Kommunikationsnetz,
- Geo-Informationssystem wie MapInfo zur geographischen Modellierung von Netzen und Einwirkung,
- Statistische Methoden wie die binäre Regression, die ML-Schätzung oder die Jackknife-Technik,
- Statistische Software in Eigenentwicklung auf der Plattform von VB.net und
- Monte Carlo Methode für Simulationen.

Die Gefährdung durch Wetterereignisse bzw. Erdbeben wird durch existierende Gefährdungsmodelle beschrieben, welche adaptiert werden.

4. Ergebnisse

Als ein erstes, praktisch relevantes Ergebnis kann hier die theoretische Diskussion und Modellierung der Schadensfunktionen genannt werden, die im konkreten Fall als Versagensfunktion den Zusammenhang zwischen lokaler Erdbebenstärke x (maximale Bodenbeschleunigung, makroseismische Intensität) und Versagenswahrscheinlichkeit P des Elements beschreibt. Praktisch alle entsprechenden publizierten Funktionen sind Log-Normalverteilungen, wie z.B. die Funktionen im HAZUS Manual [21]. Die Verwendung der Log-Normalverteilung wurde in den Publikationen - so weit es zu über-schauen ist - nie theoretisch diskutiert. Das Problem der Log-Normalverteilung ist aber das schwere Ende der Verteilung („heavy tail“), was eine steigende Hazardrate zur Folge hat. Das bedeutet, die relative Festigkeit und Widerstandskraft der „überlebten“ Elemente steigt. Dies ist aus strukturmechanischer Sicht durch nichts zu begründen. Die Weibull-Verteilung hat an den Enden mit einer möglichen fallenden Hazardrate günstigere Eigenschaften (s. Abbildung 1). Außerdem ist sie eine Extremwertverteilung des Minimums. Und da bei einer Kette von Subelementen das Versagen des schwächsten Gliedes über das Versagen des gesamten Elementes entscheidet, drängt sich die Weibull-Verteilung praktisch auf. Es ist auch eine typische Verteilung zur Beschreibung strukturmechanischer Festigkeiten.

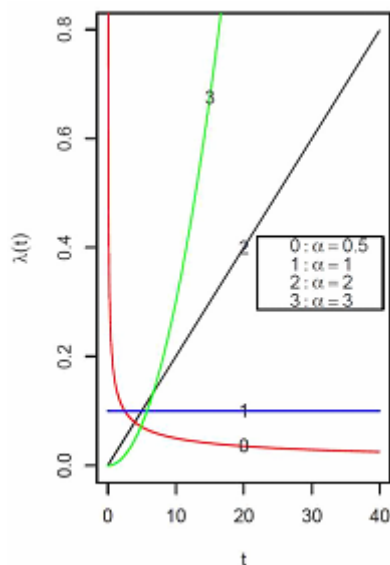


Abbildung 1: Hazardrate der Weibull-Verteilung (aus [22], S. 14, t – Variable [$t \geq 0$], λ – Hazardrate)

Ein weiterer Fortschritt wurde bei der Modellierung zufälliger Versagenswahrscheinlichkeiten in einer Versagensfunktion erzielt. „Zufällige Versagenswahrscheinlichkeit“ bedeutet, dass $P(x)$ nur den Erwartungswert der lokalen Versagenswahrscheinlichkeit beschreibt. Das Problem ist an sich nicht neu und wurde auch schon von Straub et al. [23] für Elemente von Unterstationen unter Erdbebeneinwirkung behandelt. Allerdings ist der hier entwickelte Ansatz eine flexiblere Verallgemeinerung. Es wird zur Funktion des Erwartungswertes der Versagenswahrscheinlichkeit $P(x)$ eine Funktion der Varianz $\sigma^2(P)$ hinzugefügt. Die lokale Versagenswahrscheinlichkeit wird dann als Betaverteilte Zufallsvariable modelliert, deren Parameter aus Erwartungswert und Varianz ermittelt werden können. Dieser Ansatz entspricht einer Mischung aus Bernoulli-Verteilung. Die Bernoulli-Verteilung (s. [24], S. 265) ist die Verteilung des Versagens von Elementen bei konstanter Versagenswahrscheinlichkeit. Die zusätzliche Varianz der Versagenswahrscheinlichkeit verursacht eine größere Varianz der Verteilung versagter Elemente. In Abbildung 2 ist der Zusammenhang Erwartungswert-Varianz der Verteilungen dargestellt.

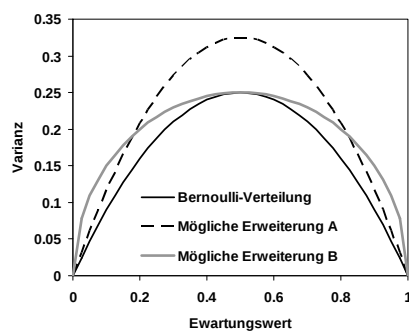


Abbildung 2: Erwartungswert und Varianz der Verteilung der Versagenswahrscheinlichkeit

Der Sachverhalt der variablen Versagenswahrscheinlichkeiten für die Subelemente einer Unterstation impliziert das ungünstige Wirken der uniformen Subelemente. Aus der Sicht der Robustheitsbewertung wäre eine geringere Gleichförmigkeit der Subelemente günstiger.

Probleme bereitet die Schätzung der Parameter der Versagensfunktionen mittels einer binären Regression, da die vorhandenen Daten schlecht sind. Die Verzerrungen und Streuungen der Schätzung sind sehr groß.

Für die Beschreibung der Erdbebengefährdung wurde auf ein Modell des Schweizer Erdbebendienstes (SED) [25] zurückgegriffen. Eine Gefährdungskarte dieses Modells ist in Abbildung 3 dargestellt. Abbildung 4 enthält die verwendeten Quellregionen. Eine Adaption des Modells war notwendig, um die lokalen Gefährdungen mittels der makroseismischen Intensitäten beschreiben zu können. Makroseismische Intensitätsskalen wie die EMS 98 [26] beziehen sich auch auf Erdbebenschäden und sind deshalb für die Risikoanalyse besonders geeignet. Deshalb mussten Abnahmebeziehungen für Intensitäten implementiert werden. Dazu wurde die Arbeit von Rüttner [27] verwendet, die sich auf Beben in und um die Schweiz herum bezieht. Ergebnis ist ein adaptiertes Gefährdungsmodell. Die lokalen Intensitäten für eine Wiederkehrperiode von 475 Jahren sind in Abbildung 5 dargestellt. Die Gefährdung ist insgesamt geringer als in dem älteren Modell von Säggerer et al. [28]. In Abbildung 6 werden die lokalen Gefährdungen für eine Wiederkehrperiode von 1000 Jahren mittels der Verteilungsfunktion der Standortanteile verglichen. Das Gefährdungsmodell wird als simulierter Katalog (100000 mal 1 Jahr) weiter verarbeitet.

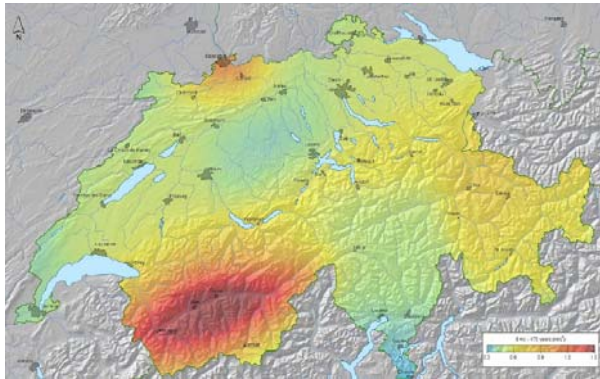


Abbildung 3: Lokale Erdbebengefährdung (aus [25], Abbildung 32)

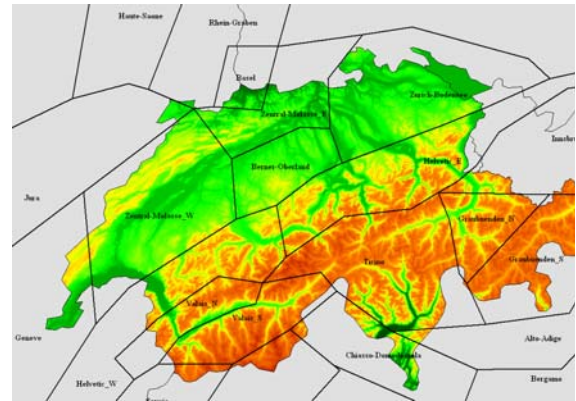


Abbildung 4: Quellregionen nach dem Modell des SED [25]

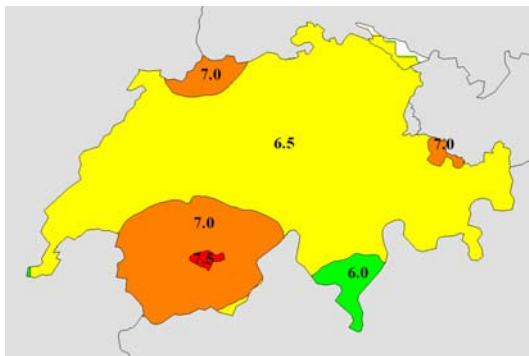


Abbildung 5: Lokale Gefährdungsintensitäten für eine Wiederkehrperiode von 475 Jahren ($\sigma=0$)

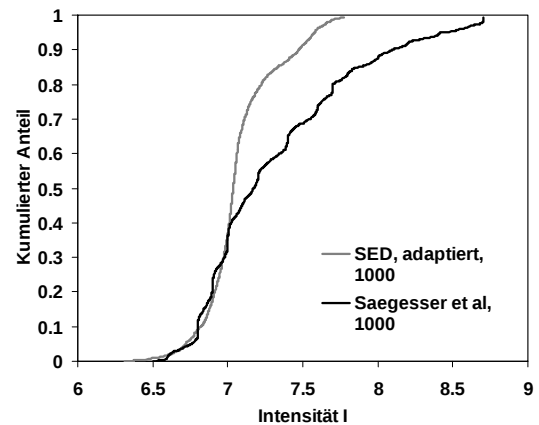


Abbildung 6: Vergleich der kumulierten Anteile eines Standorttrasters für die Schweiz

Mit dem SWITCH Netz wurde ein erstes Kommunikationsnetz modelliert (s. Abbildung 7 mit Knoten und Verbindungen sowie Überbrückungsbauwerken). Dies geschah in Zusammenarbeit mit Dr. L. Zhou des LSA. Verschiedenste Annahmen mussten dabei getroffen werden, um eine erste Simulation des Versagens von Elementen des Netzes für das adaptierte Gefährdungsmodell durchzuführen. Eine solche Annahme ist die verwendete Versagensfunktion für die Knoten, wie sie in Abbildung 8 zu sehen ist. Die Funktion wurde mittels Plausibilitätsbetrachtungen und makroseismischer Schadensfunktionen [29] entwickelt. Die Ergebnisse der Simulationen sind in Abbildung 9 dargestellt. Das Risiko ist unerwartet gering, was einerseits daran liegen kann, dass nicht alle Netzelemente modelliert werden konnten, da entsprechende Versagensfunktionen und geographische Daten fehlen. Andererseits ist das Netz nicht sehr groß, es hat relativ wenige Knoten. Die Schweizer Erdbeben haben eine starke Abklingfunktion, hohe, lokale Erdbebenstärken betreffen nur relativ kleine Gebiete. Damit sind je Ereignis nur wenige Elemente von Versagensrelevanten Erdbebenstärken betroffen. Die Versagensfunktionen könnten auch zu optimistisch ($\rightarrow$ kleineres Risiko) angenommen worden sein.

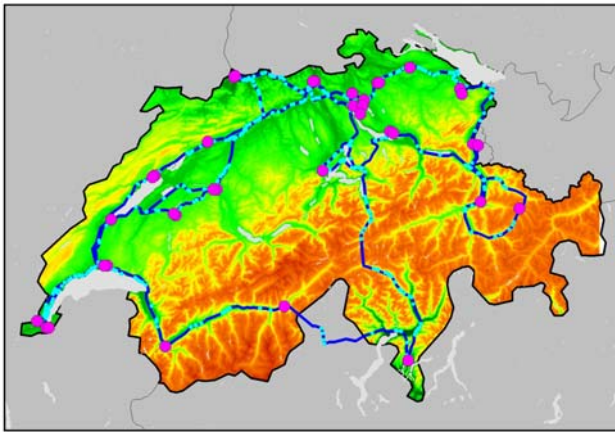


Abbildung 7: Modellierter Geographie des SWITCH Netz

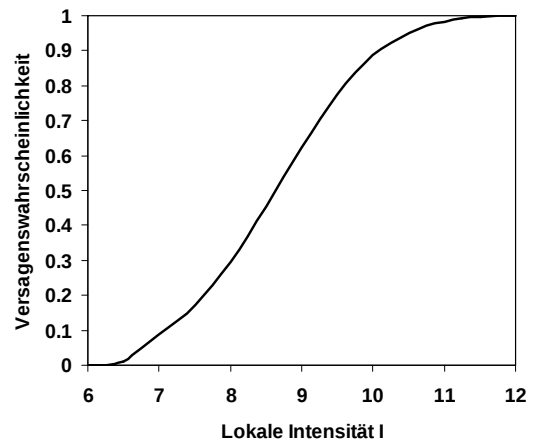


Abbildung 8: Modellierter Versagenswahrscheinlichkeit eines Knoten

Qualitativ kann eine erste Schlussfolgerung dahingehend getroffen werden, dass der Verlauf der kumulierten Häufigkeit am Anfang eher einem Fréchet Fall der generalisierten Pareto-Verteilung entspricht und am Ende eher einem Weibull Fall (s. Abbildung 10). Die generalisierte Pareto-Verteilung beschreibt näherungsweise die Enden von fast allen Verteilungen (vergleiche mit [30]). Das Ende der kumulierten Häufigkeit entspricht graphisch einem Weibull Fall, was mit der Annahme im Modell der Erdbebengefährdung übereinstimmt, in dem es eine obere Begrenzung für die Erdbeben hinsichtlich der Magnitude gibt.

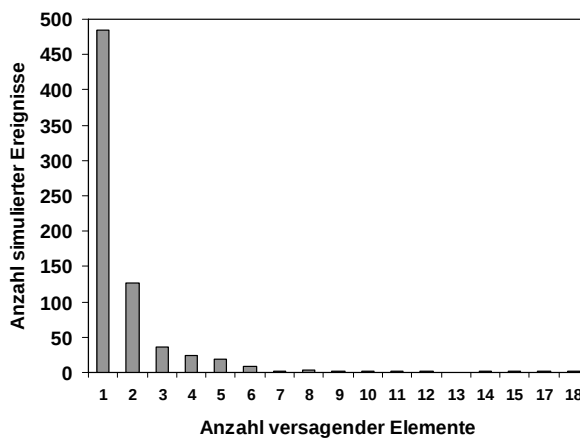


Abbildung 9: Ergebnisse der Simulation von 100000x1 Jahr für das SWITCH Netz

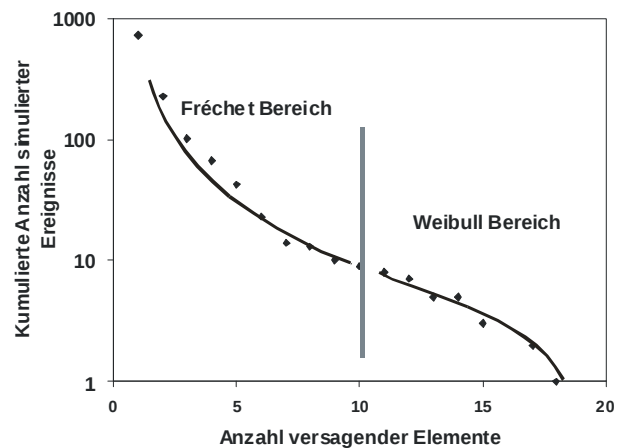


Abbildung 10: Charakter der Häufigkeitsfunktion

5. Diskussion

Unabhängig von der personellen Ausstattung des Projektes begrenzt der Umfang bzw. das Fehlen erforderlicher Daten und Methoden die Möglichkeiten des Projektes. So stehen nur spärliche Informationen zu den verschiedenen ICT-Netzwerken zur Verfügung. Die methodischen Grundlagen zur Modellierung der Interaktionen sind ebenfalls begrenzt. Auch die Modelle für die Gefährdung durch Wetterkatastrophen sind noch nicht in dem Maße entwickelt, verbreitet und vielfältig wie die Modelle zur Erdbebengefährdung. Die Reduzierung der Projektziele wird sich deshalb voraussichtlich auf die Modellierung der Wetterkatastrophen und der Kommunikationsnetze beziehen. Die Möglichkeit abstrakte Netze unter Einwirkung grossflächiger Schadensereignisse theoretisch zu untersuchen besteht auf jeden Fall.

Diese Erkenntnisse zu den Rahmenbedingungen des Projektes konnten erst im Laufe des Projektes gewonnen werden und standen beim Entwurf der Projektanträge nicht zur Verfügung.

6. Referenzen

- [1] T. Kessler: **Reliability Analysis of the Swiss High Voltage Transmission System**. Master Thesis, ETH Zürich, 2007
- [2] M. Shinozuka, X. Dong, T.C. Chen, X. Jin: **Seismic performance of electric transmission network under component failure**. Earthquake Engng. Struct. Dy. 2007; 36: 227-244
- [3] E. Broström: **Ice Storm Modelling in Transmission System Reliability Calculations**. Licentiate thesis, Stockholm: Electric Power Systems. 2007
- [4] LASEN: **Vulnerability of Electricity supply system under extreme weather conditions**. Projekt der EPFL. 2006-2009. <http://lasen.epfl.ch/page39417.html>
- [5] L. Duenas-Osorio, J. I. Craig and B. J. Goodno: **Probabilistic response of interdependent infrastructure networks**. Working paper, down loading 08/2008, http://mceer.buffalo.edu/research/International_Research/ANCER/Activities/2004/osorio_I_maec.pdf. 2004
- [6] L. Duenas-Osorio, J. I. Craig and B. J. Goodno: **Seismic response of critical interdependent networks**. Earthquake Engineering and Structural Dynamics; 36:285-306. 2007
- [7] D. E. Newman, B. Nkei, B. A. Carreras, I. Dobson, V. E. Lynch, P. Gradney: **Risk assessment in complex interacting infrastructure systems**. Thirty-eighth Hawaii International Conference on System Sciences, Hawaii, January 2005
- [8] K. Schneider, C.-C.L. Fellow, J.-P. Paul: **Assessment of Interactions Between Power and Telecommunications Infrastructures**. IEEE TRANSACTIONS ON POWER SYSTEMS, VOL. 21, NO. 3, AUGUST 2006
- [9] D. Dudenhofer, S. Hartley, M. Perman: **Critical Infrastructure Interdependency Modeling: A Survey of U.S. and International Research**. INL/EXT-06-11464, https://www.pcsforum.org/library/files/1159904563-TSWG_INL_CIP_Tool_Survey_final.pdf. 2006
- [10] ABB Communications: **Compact switchgear brings peace of mind in Mexican earthquake zone**. <http://www.abb.com/cawp/seitp202/fbfb9610fdf33c22c12573b700535663.aspx>, 2008
- [11] Environmental News: **Japan, UN, to Probe Earthquake Damage at Nuclear Power Plant**. <http://www.ens-newswire.com/ens/jul2007/2007-07-24-01.asp>, 2007
- [12] G.W.Housner, P.C. Jennings: **The San Fernando California earthquake**. Earthquake engineering and structural dynamics, Vol. 1, 5-31, 1972
- [13] D.L. Lau, A. Tang, J.-R. Pierre: **Performance of lifelines during the 1994 Northridge earthquake**. Can. J. Civ. Eng. 22: 438-451, 1995
- [14] L.V. Lund (Ed.) ASCE: **Lifeline performance, San Simeon Earthquake, December 22, 2003**. www.asce.org/pdf/sansimeon.pdf, 2004
- [15] MarketWatch: **Southern California Edison Transmission and Generation Operating Normally Following Today's Earthquake**. <http://www.marketwatch.com/news/story/southern-california-edison-transmission-generation/story.aspx?guid={88DAB84E-E8AD-4368-A0B7-5F11BDDC2E62}>, 29 July, 2008
- [16] W.E. McKeivitt, P.A.M. Timler, K.K. Lo: **Non-structural damage from the Northridge earthquake**. Can. J. Civ. Eng. 22: 428-437, 1995
- [17] L.L. Noson, A. Qamar, G.W. Thorsen: **WASHINGTON STATE EARTHQUAKE HAZARDS**. WASHINGTON DIVISION OF GEOLOGY AND EARTH RESOURCES, INFORMATION CIRCULAR 85, http://www.pnsn.org/INFO_GENERAL/NQT/welcome.html, 1988
- [18] Reuters: **No damage to power lines from Nevada earthquake**. <http://www.reuters.com/article/topNews/idUSN2144046320080221>, 2008
- [19] Risk Management Solutions (RMS): **Event report - Chi-Chi, Taiwan earthquake** (http://www.rms.com/publications/Taiwan_Event.pdf), 2000
- [20] A.J.Schiff, A.K. Tang (Ed.): **Chi-Chi, Taiwan, earthquake of September 21, 1999 lifeline performance**. Technical council on lifeline earthquake engineering, Monograph No 18, 2000
- [21] Federal Emergency Management Agency (FEMA): **HAZUS 97 technical manual**. 1997

- [22] L. Fahrmaier: **Lebensdauer- und Ereignisanalyse, Vorlesungsskript SS07**. Institut für Statistik, Ludwig-Maximilians-Universität München, 2007
- [23] D. Straub, A. D. Kiureghian: **Improved seismic fragility modeling from empirical data**. Structural Safety 30, 2008, 320-336
- [24] H. Rinne: **Taschenbuch der Statistik**. 4. Auflage, Verlag Harri Deutsch, Frankfurt 2008
- [25] D. Giardini, S. Wiemer, D. Fäh, N. Deichmann, N.: **Seismic Hazard Assessment of Switzerland, 2004**. Swiss Seismological Service, ETH Zürich, download 08/2008: http://www.earthquake.ethz.ch/research/Swiss_Hazard/Swiss_Hazard/downloads/Hazard_report_2004.pdf, 2004
- [26] G. Grünthal, G. (ed.): **European Macroseismic Scale 1998**. Cahiers du Centre Européen de Géodynamique et de Séismologie, Volume 15, Luxembourg 1998.
- [27] E. Rüttner, E.: **Earthquake Hazard Evaluation for Switzerland**. Geophysique, Nr. 29, Schweizer Erdbebendienst, 1995
- [28] R. Sägesser, D. Mayer-Rosa: Erdbebengefährdung der Schweiz. Schweizer Bauzeitung, Jahrgang 96, Heft 7, 107-123, 1978
- [29] M. Raschke: **Die Korrelation zwischen Erdbebenstärke und Bauwerksschaden und deren Anwendung in der Risikoanalyse**. Dissertation an der Bauhaus-Universität Weimar (2003) Shaker Verlag, 2004
- [30] J. Beirlant, Y. Georgebeur, J. Segers, J. Teugels: **Statistics of Extremes – Theory and Application**. Wiley Series in Probability and Statistics, John Wiley & Sons Ltd., Chichester 2004