



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Eidgenössisches Departement für
Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK

Bundesamt für Energie BFE

Jahresbericht 14. Dezember 2009

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

Autor:

Dr. Mathias Raschke, LSA, ETH Zürich

BFE-Bereichsleiter: Dr. Michael Moser

BFE-Programmleiter: Dr. Michael Moser

BFE-Vertrags- und Projektnummer: 153269 / 102556

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

Inhaltsverzeichnis

1	Zusammenfassung	4
2	Projektziele	4
3	Durchgeführte Arbeiten und erreichte Ergebnisse	6
3.1	Ergebnisse zu Schadens- und Verlustfunktionen	6
3.1.1	Statistische Modelle	6
3.1.2	<i>Versagensfunktionen für Elemente des Übertragungsnetzes - Erdbeben</i>	7
3.1.3	<i>Versagensfunktionen für Elemente des Übertragungsnetzes - Sturm</i>	7
3.1.4	<i>Versagensfunktionen für Elemente der ICT-Netzes - Erdbeben</i>	8
	<i>Versagensfunktionen für Elemente der ICT-Netzes - Sturm</i>	8
3.2	Ergebnisse zu Gefährdungsmodellen	8
3.2.1	<i>Erdbebenmodell</i>	8
3.2.2	<i>Wintersturmmodell</i>	10
3.3	Ergebnisse zu Netzmodellen	10
3.3.1	<i>Modell für ein ICT-Netz</i>	10
3.3.2	<i>Modell für das Schweizer Übertragungsnetz</i>	11
3.3.3	<i>Theoretische Arbeiten zu Netzwerken</i>	11
3.3.4	<i>Modellierung von Interaktionen zwischen Netzwerken</i>	12
3.4	Ergebnisse von Risikoanalysen	13
3.4.1	<i>Erdbebenrisikoanalyse eines ICT-Netz</i>	13
3.4.2	<i>Erdbebenrisikoanalyse des Schweizer Übertragungsnetzes</i>	13
3.5	Bewertung der Ergebnisse	15
3.6	Publikation der Ergebnisse	16
4	Nationale Zusammenarbeit	16
5	Internationale Zusammenarbeit	16
6	Bewertung 2009 und Ausblick 2010	17
7	Referenzen	18
8	Anhang	19

1 Zusammenfassung

Im vergangenen Berichtszeitraum wurde der Projektplan modifiziert. Da die zweite PhD-Stelle nicht besetzt worden ist, hätte eine Einschränkung der Projektziele parallel zur Einschränkung der Projektmittel erfolgen müssen. Dies wurde durch die Modifikation des Projektplanes verhindert. Das Projekt wird nun am Ende des Jahres 2010 beendet und die Erfüllung aller Projektziele kann somit angestrebt werden.

Der Stand der Projektarbeit stimmt mit dem aktuellen Zeitplan (Tab.A1) überein. Im Einzelnen ist der Stand:

- Die Projektvorbereitungen wurden schon im vorletzten Berichtszeitraum abgeschlossen.
- Die Modellierung des Stromnetzes ist abgeschlossen und ist weit reichender und physikalisch realistischer als ursprünglich vorgesehen. Das gesamte UCTE-Netz wurde modelliert.
- Die Adaption eines vorhandenen, etablierten Modells der Erdbebengefährdung wurde 2008 abgeschlossen.
- Die Entwicklung von Versagens- bzw. Schadensfunktionen für den Erdbebenfall wurde 2008 abgeschlossen. Eine Aktualisierung konkreter Funktionen erfolgte aber im vergangenen Berichtszeitraum aufgrund verbesserter Daten und Quellenlage.
- Die Modellierung von Schadensfunktionen für Sturm ist in Arbeit.
- Eine Adaption eines Sturmmodells in die Risikomodellierung kann nicht durchgeführt werden da einfach kein zugängliches Modell existiert. Für ein eignes Sturmmodell wurden die grundsätzlichen statistischen Ansätze entwickelt. Das konkrete Modell für die Schweiz ist in Arbeit.
- Ergebnisse für das Erdbebenrisiko des Schweizer Übertragungsnetzes und für ein ICT-Netz liegen vor.
- Verschiedene statistische Modellierungen und Untersuchungen für die Versagensfunktionen und für Netzwerke wurden durchgeführt.
- Die Modellierung der Interaktion ist in Arbeit.

Hervorzuheben ist, dass trotz unvorhergesehener Schwierigkeiten wie das Fehlen adaptierbarer Modelle die Projektziele weitgehend erfüllt werden. Die größten Schwierigkeiten in der weiteren Realisierung des Projekts stellen voraussichtlich das Fehlen von Informationen und Daten der ICT-Netze und das Fehlen praktikabler Interaktionsmodelle dar.

Erste Publikationen werden in Zusammenarbeit mit anderen Mitgliedern des LSA erstellt.

2 Projektziele

Ziel des Projektes ist es, die Sicherheit und Verletzbarkeit des Stromnetzes der Schweiz in Interaktion mit dem Kommunikationssystem beim Auftreten der grossräumigen Schadensereignisse Sturm 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. In der Fig.1 sind die Modelle des Projektes und ihre Verknüpfungen dargestellt.

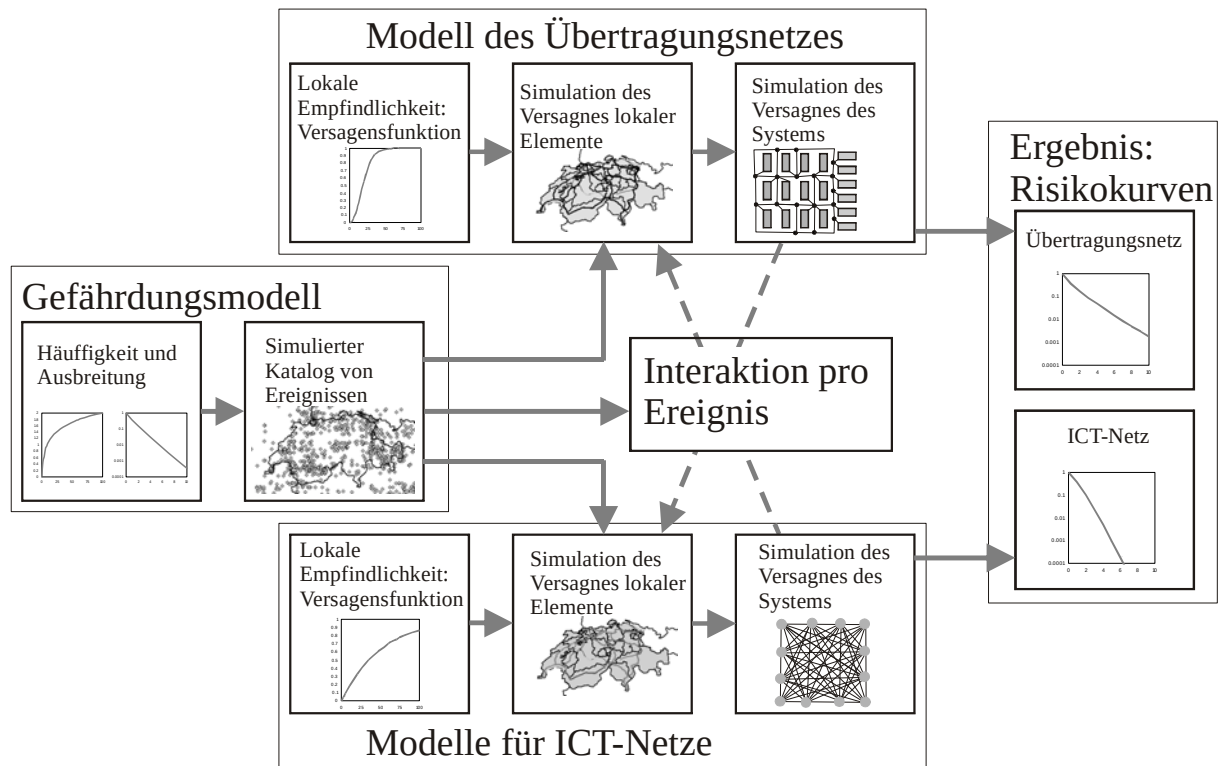


Fig.1: Zu erstellende Modelle

Die Teilmodelle finden sich entsprechend in den Meilensteinen der Arbeitspakete wieder. In Tab.1 sind alle Meilensteine aufgeführt. Im Jahr 2009 sollen die Modellierung des Stromnetzes (M2.1) und die Adaption des Sturmmodells (M4.1) abgeschlossen worden sein und bis zum Jahreswechsel soll die Modellierung der ICT-Netze abgeschlossen werden. Die Kopplung der Netze (M5), die Schadensfunktionen für Sturm (M4.2) und die getrennte Risikoanalyse (M4.3) soll laut Plan ebenfalls bis Ende 2009 durchgeführt werden.

Tab.1: Meilensteine des Projektes (Zeitplan im Anhang)

Nr.	Zwischenschritte bzw. Meilensteine	Bearbeiter	Status
1	Vorbereitungen	M. Raschke	abgeschlossen
2.1	Netzmodellierung Strom	E. Bilis	Abgeschlossen, Modifikationen teilweise notwendig
2.2	Gefährdungsmodell Erdbeben	M. Raschke	abgeschlossen
2.3	Schadensfunktionen Erdbeben	M. Raschke	abgeschlossen
3	Netzmodellierung ICT	E. Bilis - Fluss und Topologie M. Raschke - Geographie	erste Analyse abgeschlossen, weitere in Arbeit
4.1	Gefährdungsmodell Sturm	M. Raschke	in Entwicklung
4.2	Schadensfunktionen Sturm	M. Raschke	in Arbeit
4.3	Risikoanalyse Erdbeben für Strom und ICT getrennt	E. Bilis und M. Raschke	Analysen abgeschlossen, Modifikationen in Diskussion
5	Modellierung der gekoppelten Systeme Strom und ICT	E. Bilis	in Arbeit
6	Risikoanalyse Erdbeben und Sturm für die gekoppelten Netze	E. Bilis und M. Raschke	in Arbeit

3 Durchgeführte Arbeiten und erreichte Ergebnisse

3.1 Ergebnisse zu Schadens- und Verlustfunktionen

3.1.1 Statistische Modelle

Es wurde eine theoretische Diskussion der Schadensfunktionen durchgeführt, die im konkreten Fall als Versagensfunktion den Zusammenhang zwischen lokaler Erdbebenstärke x und Versagenswahrscheinlichkeit F des Elements beschreibt. Praktisch alle publizierten Funktionen sind Log-Normalverteilungen, wie z.B. die Funktionen im HAZUS Manual [8]. Die Log-Normalverteilung hat aber das schwere Ende („heavy tail“), was eine steigende Hazardrate zur Folge hat. Dies ist aus strukturmechanischer Sicht durch nichts zu begründen. Die Weibull Verteilung hat an den Enden mit einer möglichen fallenden Hazardrate günstigere Eigenschaften (vergleiche [7], S.14). Außerdem ist sie eine Extremwertverteilung des Minimums. 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. Weiterentwickelt wurde auch die Modellierung zufälliger Versagenswahrscheinlichkeiten in einer Versagensfunktion. „Zufällige Versagenswahrscheinlichkeit“ bedeutet, das $P(x)$ nur den Erwartungswert der lokalen Versagenswahrscheinlichkeit beschreibt. Das Problem ist wurde auch schon von Straub et al. [28] für Elemente von Unterstationen unter Erdbebeneinwirkung behandelt. Der hier entwickelte Ansatz ist eine flexiblere Verallgemeinerung. Es wird eine Funktion des Erwartungswertes der Versagenswahrscheinlichkeit und eine Funktion der Varianz modelliert mit der die Betaverteilung der Versagenswahrscheinlichkeit formuliert werden kann. Die zusätzliche Varianz der Versagenswahrscheinlichkeit verursacht eine größere Varianz der Verteilung Versagter Elemente. In Fig.2a ist der Zusammenhang Erwartungswert-Varianz der Verteilungen dargestellt. 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. Zusätzlich wurde die Maximum-Likelihood Schätzung in der Regressionsanalyse um eine Restriktion aus der Goodness-of-fit Technik erweitert, ähnlich wie durch Li et al. [14]. In Fig.2b-c wird eine publizierte Bayes-Schätzung mit den Ergebnissen einer neuen Schätzung verglichen. Die Versagensfunktion ist die eines Trafos.

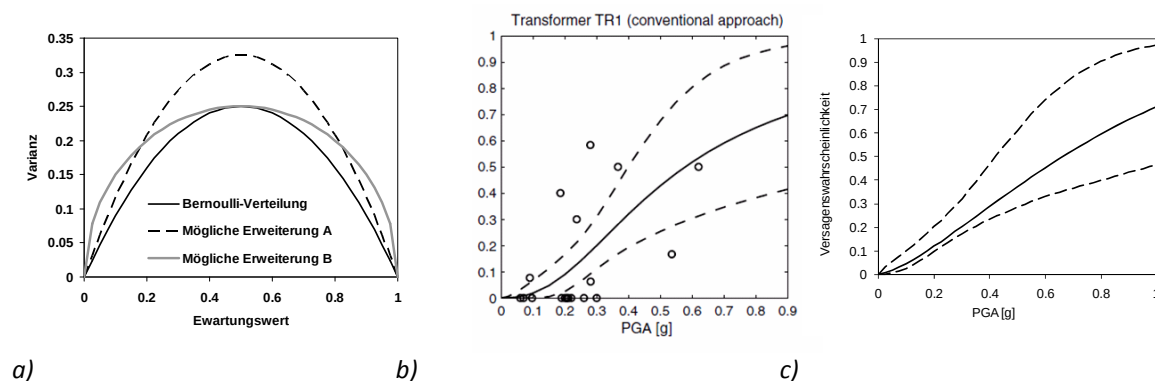


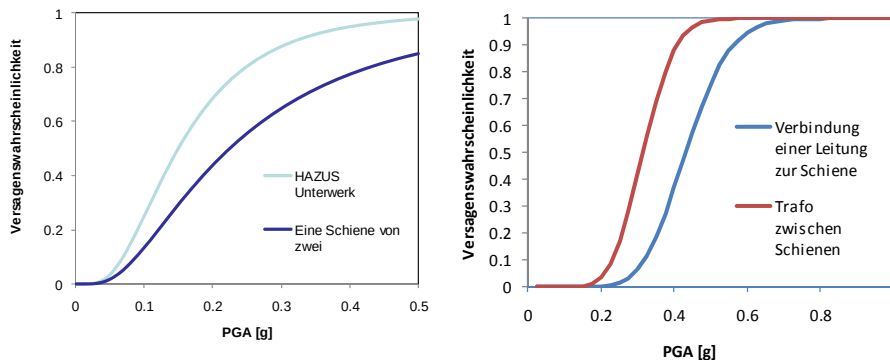
Fig.2: a) Erwartungswert und Varianz der Verteilung der Versagenswahrscheinlichkeit, b) Geschätzte Versagensfunktion und Vertrauensbereich für ein Trafo nach Straub et al. [28], c) Schätzung nach neuer Methode für denselben Trafo-Typ

3.1.2 Versagensfunktionen für Elemente des Übertragungsnetzes - Erdbeben

Da keine Daten über das Erdbebenverhalten von Elementen des Schweizer Übertragungsnetzes vorhanden sind, wurde versucht Daten aus anderen Regionen zu sammeln und auszuwerten. Als einzig nennenswerter Datensatz ist der von Anagnos [1] zugänglich und wurde entsprechend Abschnitt 3.1.1 analysiert. Aber der Datensatz ist widersprüchlich und unbeabsichtigt zensiert. Als Alternative wurden dann modellierte Funktionen recherchiert, welche für die Elemente des Schweizer Übertragungsnetzes verwendet werden könnten. In einer ersten, einfachen Risikostudie wurde eine Funktion des HAZUS Manuals [8] berücksichtigt. Die entsprechende Funktion und deren Modifikation sind in Fig.3a dargestellt. Da diese Funktionen zu unrealistisch hohen Versagenswahrscheinlichkeiten schon bei relativ kleinen, lokalen Erdbebenstärken führt, wurden realistischere Funktionen recherchiert. Wichtige Quellen waren [2], [19] und [26]. Die Funktionen von Oikawa et al. [19] wurden am Ende ausgewählt. Sie stehen in keinem Widerspruch zu zwei anderen Quellen. Oikawa et al. [19] beschreibt die Versagensfunktionen für verschiedenen Elemente wie Leistungsschalter oder Trafo sowie für verschiedene Grade an Zuverlässigkeit bei seismischer Einwirkung (Bauzeit). Es wurden die Funktionen der Einzelnen Elemente zu zwei Funktionen zusammengefasst unter Annahme statistischer Unabhängigkeit mittels

$$P = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - P_i) \quad (1)$$

Worin P_i das Versagen der Einzelemente und P deren Zusammenfassung symbolisiert. Die zwei Funktionen beschreiben das Erdbebeninduzierte Versagen des Anschlusses einer Leitung an eine Schiene sowie einer Trafo-Einheit zwischen zwei Schienen. Die Funktionen sind in Fig.3b dargestellt. Da in den Funktionen die lokale Erdbebenstärke mittels PGA beschrieben wird, im Gefährdungsmodell aber die Intensitäten verwendet werden, muss eine Umrechnung erfolgen, die an entsprechender Stelle erklärt ist.



a)

b)

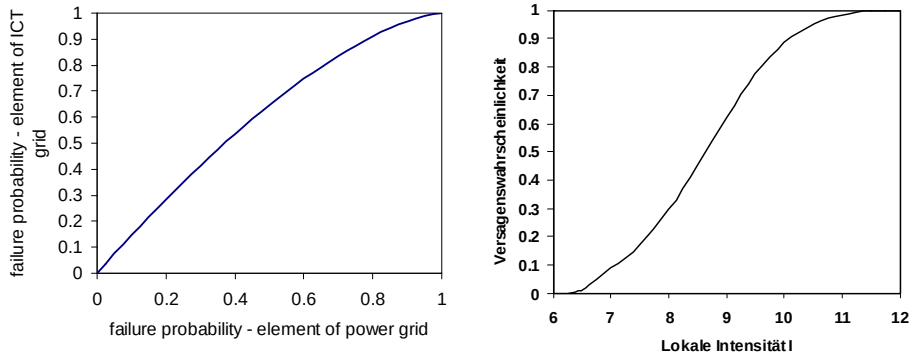
Fig.3: a) Versagensfunktionen nach Angaben aus [8], b) Versagensfunktionen nach Angaben aus [19]

3.1.3 Versagensfunktionen für Elemente des Übertragungsnetzes - Sturm

Die Theorie für die Versagensfunktionen wurden in Abschnitt 3.1.1 schon erläutert. Konkrete Versagensfunktionen für Sturm werden derzeit noch entwickelt. Es wurden nur wenige empirische Daten in der Literatur ([3], [29]) gefunden. Eine Funktion wurde bereits von und Funktion Reed [21] entwickelt.

3.1.4 Versagensfunktionen für Elemente der ICT-Netzes - Erdbeben

Für Elemente der ICT-Netze konnten nur Versagensfunktionen von HAZUS [8] recherchiert werden. Da jedoch schon die Funktionen in HATZS für Elemente der Stromnetze nicht realistisch sind (Abschnitt 0), kann nicht erwartet werden, dass die Funktionen der ICT realistisch sind. Es wird aber die Möglichkeit untersucht, die HAZUS-Funktionen zu einer Skalierung der Versagenswahrscheinlichkeiten zu benutzen (Fig.4a).



a)

b)

Fig.4: a) Schema einer Skalierung der Versagenswahrscheinlichkeit, b) Beispiel für konstruierte Versagensfunktion

Weiterhin wurden die zu erwartenden Schäden an Bauwerken, die ICT-Elemente tragen oder beinhalten, dazu verwendet, ein plausible Versagensfunktionen der ICT-Elemente zu konstruieren. Die von Raschke [20] entwickelten Funktionen für die makroseismischen Schäden an Bauwerken wurden dem zugrunde gelegt. Ein Beispiel für eine solche Funktion ist in Fig.4b dargestellt. Die Versagenswahrscheinlichkeit für die ICT-Elemente wurde entsprechend Tab. 1 zugeordnet. Die makroseismischen Schäden sind in [10] erläutert.

Tab. 1: Versagenswahrscheinlichkeit von ICT Elementen in Abhängigkeit vom makroseismischen Schaden

Schadensgrad	D0	D1	D2	D3	D4	D5
Serverversagen	0	0.1	0.6	0.9	1	1
Kabelversagen	0	0	0.1	0.5	1	1

Versagensfunktionen für Elemente der ICT-Netzes - Sturm

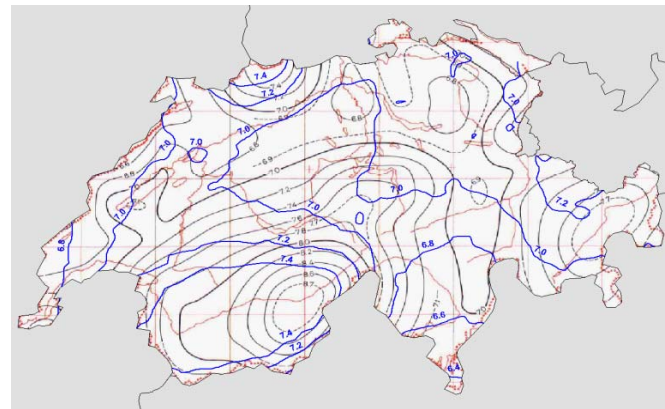
Die Theorie für die Versagensfunktionen wurden in Abschnitt 3.1.1 schon erläutert. Empirische Daten oder publizierte Versagensfunktionen konnten bisher nicht recherchiert werden.

3.2 Ergebnisse zu Gefährdungsmodellen

3.2.1 Erdbebenmodell

Ausgangspunkt für die Adaption eines Gefährdungsmodells für Erdbeben war das Modell des SED [9]. Die Quellregionen sind in Fig.5a dargestellt. Da die lokale Erdbebenstärke entweder mit der makroseismischen Intensität [10] oder der PGA (peak ground acceleration) beschrieben werden sollte, um Kompatibilität zu möglichen Versagensfunktionen zu gewährleisten, konnte nicht die ursprünglichen Abnahmefunktionen verwendet werden. Diese modellieren die lokale Erdbebenstärke im

A topographic map of Switzerland, color-coded by elevation. The map shows the Alpine region with various cantons and cities labeled. The color gradient ranges from green (lower elevations) to orange and red (higher elevations). Major cities like Basel, Zurich, Bern, Lucerne, and Geneva are marked. The map also shows the surrounding regions of France, Germany, and Italy.



d)

9

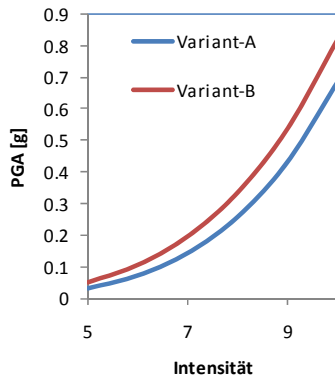
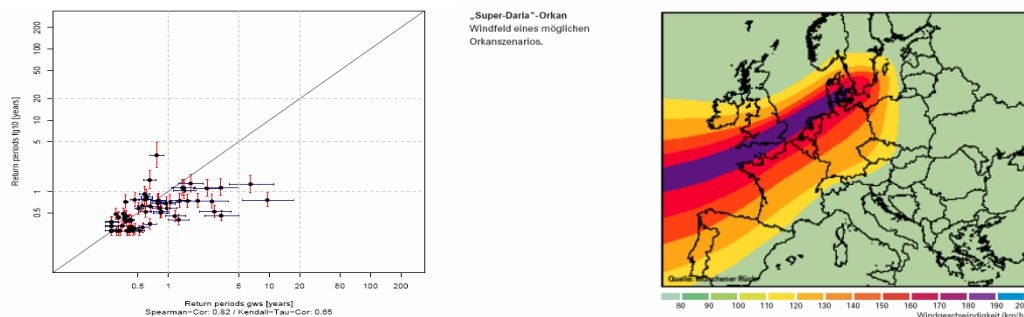


Fig.6: Angenommener Zusammenhang Intensität – PGA

3.2.2 Wintersturmmodell

Bei der Ausarbeitung des Projektplanes wurde davon ausgegangen, dass Sturmmodelle zugänglich sind, die das Gebiet der Schweiz abdecken. Im Laufe der Projektarbeit musste festgestellt werden, dass dies nicht der Fall ist. Die Modellierung von Stürmen steckt aus Sicht des Autors noch in den Anfängen. Nur die Jährlichkeit der historischen Stürme zu schätzen ist schwierig, wie die Arbeit von Della-Marta et al. [5] zeigt. Die Ergebnisse sind dabei nicht sehr genau (s. Fig.7a). Inwieweit in der Versicherungswirtschaft bessere Modelle benutzt werden, kann nicht endgültig geklärt werden. Aber es werden Stürme modelliert (Fig.7b). Derzeit wird ein stochastisches Sturmmodell durch die Projektgruppe entwickelt. Dabei wird versucht so weit wie möglich auf abgeschlossene Arbeiten in der Metrologie [24], [25] und Statistik [4] zurückgegriffen.



a)

b)

Fig.7: Sturmmodelle: a) Schätzungen der Wiederkehrperiode historischer Stürme nach [5], b) Modellierter Sturm nach [17]

3.3 Ergebnisse zu Netzmodellen

3.3.1 Modell für ein ICT-Netz

Es sind nur wenige Informationen oder Daten über ICT-Netze zugänglich, was vor der Planung des Projekts nicht bekannt war. In Zusammenarbeit mit Dr. L. Zhou des LSA konnte ein einfaches, reales Netz modelliert werden. Die Netz-Repräsentanz wurde mittels *Anylogic* modelliert, die geographische Repräsentanz wurde mittels *MapInfo* (GIS) modelliert. In Fig.8 ist das Netz dargestellt.

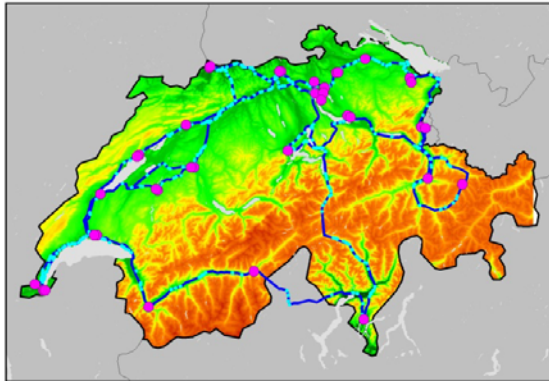
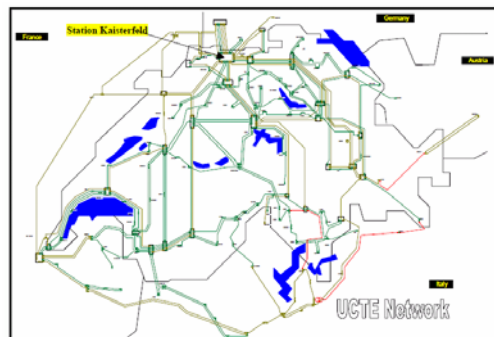


Fig.8: Konkretes, modelliertes ICT Netz (Server - violette Punkte, Leitungen - blau, Brücken - hellblau)

3.3.2 Modell für das Schweizer Übertragungsnetz

Für das Schweizer Übertragungsnetz lagen nach intensiven Recherchen genügend Informationen vor, um es physikalisch (Stromfluss) und geographisch modellieren zu können. Der Stromfluss wurde mittels der Software *Neplan* modelliert. Das gesamte UCTE-Netzwerk wurde dabei berücksichtigt. In Fig.9a ist das *Neplan*-Modell schematisch dargestellt. Die geographische Repräsentanz wurde mit der Software *MapInfo* (GIS) modelliert (Fig.9b). Wichtige GIS-Daten wurden vom Bundesamt für Raumentwicklung ARE zur Verfügung gestellt.



a)



b)

Fig.9: Übertragungsnetz: Neplan-Schema, b) GIS-Modell

3.3.3 Theoretische Arbeiten zu Netzwerken

In Zusammenarbeit mit den LSA-Mitgliedern M. Schläpfer und R. Nibali wurde die Quantifizierung der Abhängigkeit (Assoziation) der Anzahl von Verbindungen eines Knotens von denen der Nachbarknoten untersucht. Im Bereich der Netzwerktheorie und der Modellierung komplexer Systeme wird diese Assoziation seit der Publikation von Newman [18] mit dem Pearsons Korrelationskoeffizienten ρ quantifiziert. Da die Anwendbarkeit des Korrelationskoeffizienten von Pearson begrenzt ist und mit Kendall-Gibsons τ [12] eine gute Alternative zur Verfügung steht, wurden die Eigenschaften beider Masse untersucht. Von Interesse war dabei der Einfluss der maximalen Anzahl an Verbindungen ($h_{\max}$) auf das Assoziationsmaes im Falle gekappter Zufallsverteilung mit einem "heavy tail". Kendall-Gibsons τ ist das bessere Maß, da es von $h_{\max}$ weniger beeinflusst wird. Beispiele dafür sind in Fig.10 dargestellt.

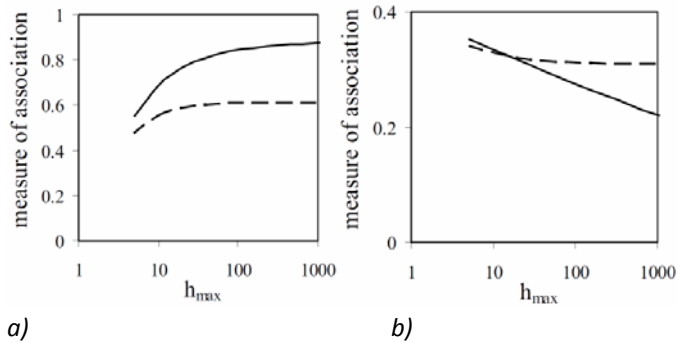


Fig.10: Einfluss von $h_{\max}$ auf Pearsons ρ (durchgehende Linie) und Kedall-Gibsons τ (unterbrochene Linie: a) Beispiel einer Zeta Verteilung, b) Beispiel einer generalisierten Zipf Verteilung

Weiterhin wurde mit M. Schlöpfer und R. Nibali die Modellierung von Abhängigkeitsstrukturen in Netzwerken weiterentwickelt. Dafür wurden Copulas eingeführt, die schon oft in der klassischen Statistik bivariater, kontinuierlicher Daten verwendet werden [16]. Ein Beispiel für eine solche Abhängigkeitsstruktur wird in Fig.11a gezeigt. Die Achsen bezeichnen jeweils die Anzahl von Verbindungen pro Netzwerkknoten.

Defizite in der Simulationstechnik (Monte Carlo Simulation) für Netzwerke wurde ebenfalls durch Untersuchungen in Kooperation mit M. Schlöpfer und R. Nibali beseitigt. Ein Vergleich zwischen einer klassischen Monte Carlo Simulation einfacher, bivariater Verteilungen mit einem Netzwerk ist in Fig.11b zu sehen. Im Idealfall würde $f(\text{ist})$ und $f(\text{soll})$ eine Linie bilden. Die Simulationen für die Netzwerke streuen stärker, mehr Bedingungen eingehalten werden müssen als bei den einfachen, bivariaten Verteilungen.

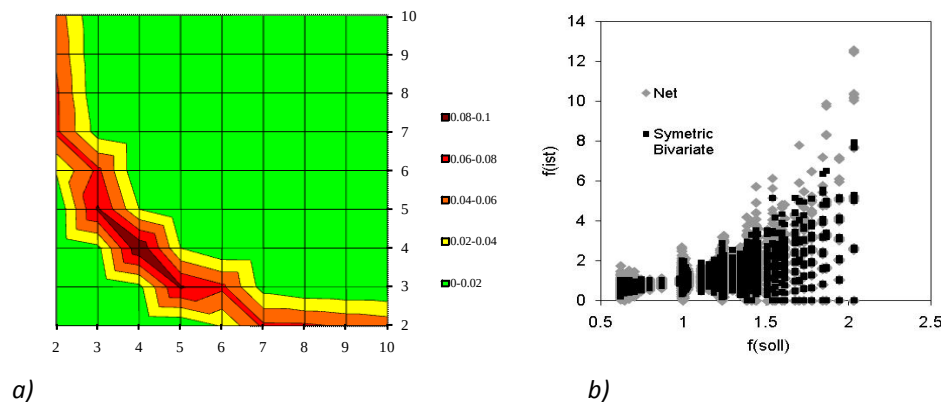


Fig.11: Abhängigkeitsstrukturen in Netzwerken: a) Beispiel einer Abhängigkeit mit negativer Assoziation, b) Vergleich der Simulationsergebnisse für klassische bivariate, diskrete Zufallsverteilungen und für Netzwerke

3.3.4 Modellierung von Interaktionen zwischen Netzwerken

Die Interaktionen zwischen den verschiedenen Infrastrukturnetzen konnte bisher nicht befriedigend modelliert werden. So konnten kaum Daten oder Informationen zur Quantifizierung der Interaktionen recherchiert werden. In einer der neusten Veröffentlichungen ([15], Tab.2-4) wurde der Versuch unternommen, die Gegenseitigen Abhängigkeiten anhand empirischer Beobachtungen abzuschätzen. Der Energiesektor ist dabei eher der inzidierende Sektor. Andere Bereiche sind eher abhängig vom

Energiesektor, als dieser von den anderen Bereichen. Unabhängig davon ist konkrete Modellierung von Interaktionen sehr schwierig, da die verschiedenen Repräsentanz der Netze (physikalisch [Stromfluss, Kommunikationsfluss], geographisch) über die verschiedensten Softwareplattformen modelliert werden. Auch hier stehen die wissenschaftlichen Entwicklungen erst am Anfang, wie an dem Projekt IRRIS [11] deutlich wird. In diesem laufenden, wissenschaftlichen Projekt wird mit viel Aufwand versucht, solche Interaktionen über Softwareschnittstellen zu modellieren.

3.4 Ergebnisse von Risikoanalysen

3.4.1 Erdbebenrisikoanalyse eines ICT-Netz

Für ein einfaches ICT Netz (Abschnitt 3.3.1) wurde für die modellierte Erdbebengefährdung (Abschnitt 3.2.1) und angenommenen Versagensfunktionen (Abschnitt 3.1.4) eine Erdbebenrisikoanalyse durchgeführt. Dafür wurden die simulierten Erdbeben verarbeitet. Die lokalen Erdbebenstärken wurden für die Netzelemente berechnet. Das Versagen der Netzelemente wurde dann in Abhängigkeit von der lokalen Erdbebenstärke Monte Carlo simuliert. Die Häufigkeit des Versagens einzelner Elemente ist in Fig.12a zu sehen. Sie folgt der geographischen Konzentration der Erdbebengefährdung (Fig.5a). Die Häufigkeit der Versagensereignisse ist in Fig.12b dargestellt. Das Erdbebenrisiko für das betrachtete Netz ist klein. Der Charakter der Häufigkeitsverteilung entspricht im Bereich kleiner Ereignisse (wenige Elemente versagen) einem Fréchet „Tail“. Im Bereich großer Ereignisse ähnelt der Verlauf der Häufigkeiten einem Weibull „Tail“.

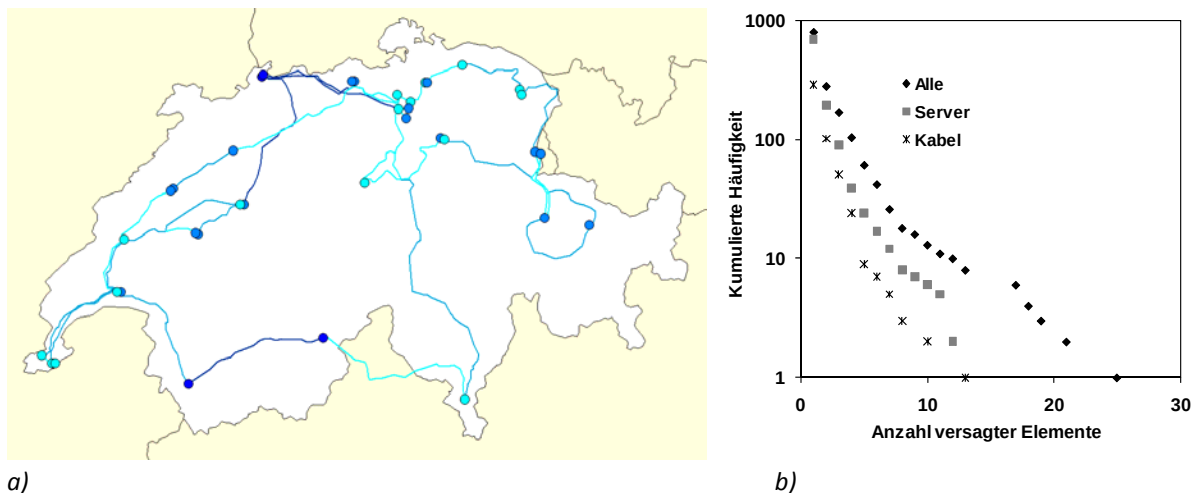


Fig.12: Erdbebenanalyse eines ICT-Netzes: a) relative Häufigkeit des Ausfalls infolge eines Erdbebens (hellblau - gering, dunkelblau - hohe Häufigkeit, Linien - Kabel, Punkte - Server), b) Häufigkeit der Ereignisse nach der Anzahl versagter Elemente

3.4.2 Erdbebenrisikoanalyse des Schweizer Übertragungsnetzes

In einer ersten Analyse wurde das Gefährdungsmodell (Abschnitt 3.2.1) mit den Funktionen von HAZUS verknüpft (Fig.3a). Das resultierende Risiko ist wie erwartet viel zu hoch (s. Fig.13). Die Elemente können hier dabei „Schienen“ interpretiert werden.

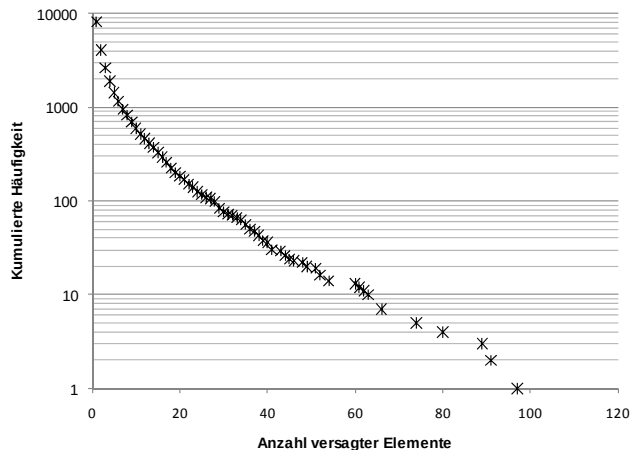


Fig.13: Erdbebenanalyse des Übertragungsnetzes - Häufigkeit der simulierten Ereignisse nach der Anzahl versagter Elemente

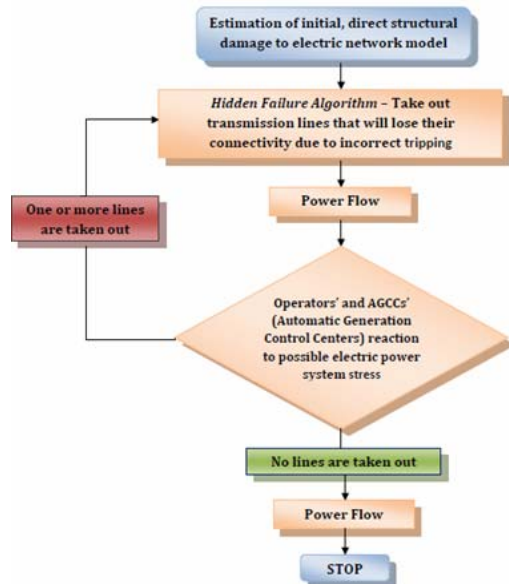


Fig.14: Prozedur in Neplan

In einer genaueren und differenzierteren Analyse wurden die Versagensfunktionen entsprechend Fig.3b verwendet. Ein versagendes Element ist dabei der Anschluss einer Leitung an eine Schiene mit allen Schaltern, Leistungsschaltern und sonstigen technischen Equipment, oder ein Trafo zwischen zwei Schienen einschließlich Schaltern, Leistungsschaltern und sonstigem technischen Equipment. Nach der Monte Carlo Simulation des Versagens der Elemente für ein simuliertes Beben werden diese Informationen in Neplan weiter verarbeitet. Die Analyse in Neplan erfolgte entsprechend Fig.14. Ergebnisse dieser Analyse sind in Fig.15 dargestellt. Der Umfang an verlorener Generatorleistung und die verlorener Last hängt von einigen Details der Modellierung ab und wird noch weiterhin untersucht. Die relative Häufigkeit des Versagens von Elementen ist in Fig.16 geographisch dargestellt. Die Häufigkeiten korrelieren wieder mit den Konzentrationen an lokaler Erdbebengefährdung (Fig.5c). Die dargestellten Ergebnisse beziehen sich auf eine Transformation der lokalen Erdbebenstärke gemäß Fig.6,

Variante B. Nach den bisherigen Ergebnissen kann das Übertragungsnetz der Schweiz bzw. das UCTE Netz als robust gegenüber den Ausfällen infolge von Erdbeben in der Schweiz und angrenzten Regionen betrachtet werden.

Die Häufigkeiten in Fig.13 und 15a entsprechen im Bereich kleiner Ereignisse wieder einem Fréchet „Tail“ und einem Weibull „Tail“ im Bereich größerer Ereignisse.

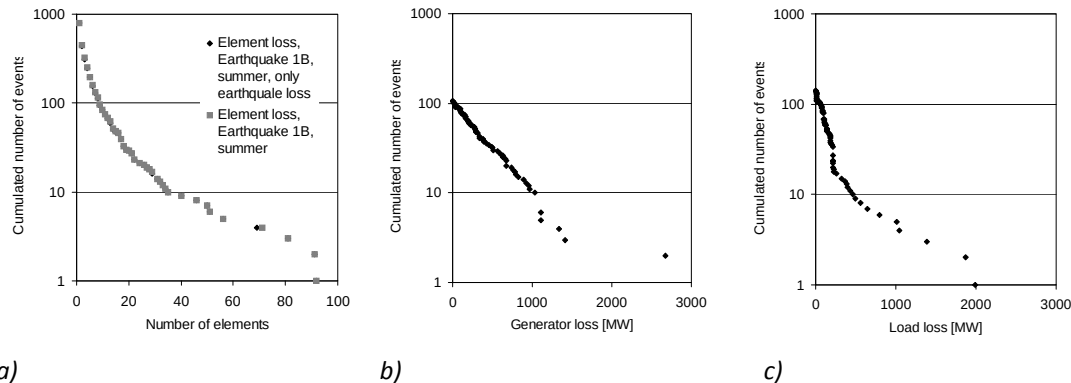


Fig.15: Ergebnisse der Erdbebenanalyse für das Übertragungsnetz: a) Häufigkeit des Ausfalls von Elementen pro Ereignis, b) Verlorene Generatorleistung, c) Verlorene Last

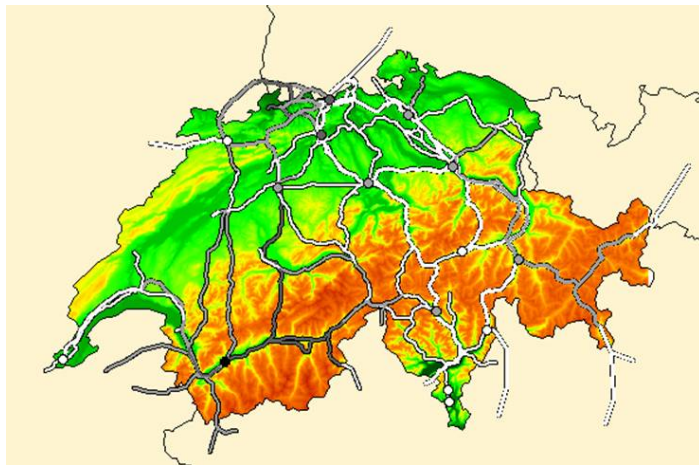


Fig.16: Relative Häufigkeit des Versagens der Elemente infolge eines Erdbebens (Linien – Leitungen, Punkte – Trafos, weiß – geringe Häufigkeit, schwarz – hohe Häufigkeit)

3.5 Bewertung der Ergebnisse

Bei der Planung des Projektes wurde davon ausgegangen, dass die einzelnen Teile der Gefährdungsmodelle vorhanden und zugänglich sind. Dies ist für die Gefährdung durch Stürme nicht der Fall. Auch wurde davon ausgegangen, dass genügend Daten und Informationen frei zur Verfügung stehen würden, um ICT-Netze zu modellieren, was auch nicht der Fall ist. Das die Modellierung von Interaktionen und wechselseitigen Abhängigkeiten bisher nur in Ansätzen erfolgte (Stand der Wissenschaft), konnte ebenfalls nicht vorhergesehen werden. Aus der aktuellen Perspektive sind die Projektziele als sehr ambitioniert einzuschätzen. Die trifft umso mehr zu, wenn man die Ressourcen des Projektes mit denen anderer Projekte z.B. IRIS [11] vergleicht. Deshalb können die bereits erzielten

Erkenntnisse sehr positiv beurteilt werden. Die durchgeführte Modellierung der Erdbebengefährdung braucht keinen Vergleich mit den Ergebnissen anderer Forschungsgruppen zu scheuen (vergleiche mit [6], [26], [27]). Die Effizienz der Bearbeitung des komplexen Themas wird hier positiv bewertet. Positiv werden auch die theoretischen Arbeiten zu den Netzwerken bewertet.

3.6 Publikation der Ergebnisse

Die Veröffentlichung der wissenschaftlichen Ergebnisse erfolgt in einem unbefriedigenden Tempo. Ursache dafür sind einerseits fehlende Ressourcen. Im Projektplan ist keine Zeit in den Arbeitspaketen für die Erstellung von Veröffentlichungen vorgesehen. Andererseits werden im Projekt die verschiedensten Bereiche untersucht. Die Fülle an Ergebnissen kann nicht in einer entsprechenden Anzahl an Publikationen umgesetzt werden. Die Untersuchungen und neuen Methoden zur grundsätzlichen Modellierung von Versagensfunktionen (Abschnitt 3.1.1) konnten deshalb nicht zu einem Artikel zusammengefasst werden. Die Ergebnisse der theoretischen Untersuchung von Netzwerken (Abschnitt 3.3.3) werden gerade aufbereitet. Der Artikel "Quantifying degree-degree association in complex networks" der Autoren Mathias Raschke, Roberto Nibali and Markus Schläpfer soll in den nächsten Wochen fertig gestellt und bei der Physical Review E eingereicht werden. Der aktuelle Entwurf des Artikels wird dem Bericht angehängt. Der Artikel "Random generation of networks with defined association structure" der Autoren Mathias Raschke, Roberto Nibali and Markus Schläpfer ist in Arbeit. Die drei genannten Autoren arbeiten nicht mehr zeitgleich am LSA, was die Fertigstellung der zwei Artikel ebenfalls verzögert.

Die stochastischen Ansätze zur Modellierung von Naturereignissen sollten als Artikel in der „Natural Hazards“ zu veröffentlicht werden.

Die Ergebnisse der Erdbebenrisikoanalyse des Übertragungsnetzes werden als sehr wichtig angesehen. Zurzeit werden die Struktur und der Grad der Detaillierung eines möglichen Artikels vom Projektteam diskutiert.

4 Nationale Zusammenarbeit

Im Rahmen des Projektes kam es zu keiner formellen Zusammenarbeit mit anderen nationalen Institutionen oder Einrichtungen. Ein informeller Austausch und Kommunikation erfolgte mit dem Schweizer Erdbebendienst und MeteoSchweiz. Das Bundesamt für Raumentwicklung ARG stellte notwendige GIS-Daten bereit. Mit Vertretern des Bundesamtes für Umwelt (BAFU) es wird seit einigen Wochen bezüglich der Erdbebensicherheit des Übertragungsnetzes (Unterstationen) kommuniziert. Mit den Kollegen des LASEN [13] wird über der Modellierung des Stromnetzes und der Wetterereignisse kommuniziert.

5 Internationale Zusammenarbeit

Im Rahmen des Projektes kam es zu keiner formellen Zusammenarbeit mit anderen internationalen Institutionen oder Einrichtungen.

Infolge eines Arbeitsbesuches von Prof. Krögers am Central Research Institute of Electric Power Industry (CRIEPI) in Japan waren einige wichtige Publikationen und Informationen zugänglich.
Mit der UCTE stehen die Projektbearbeiter ebenfalls in Kontakt.

6 Bewertung 2009 und Ausblick 2010

Der Fortschritt der Projektarbeit stimmt weitgehend mit den Meilensteinen (Tab.1) des Projektplans (Tab.A1) überein. Deutliche Verzögerungen gibt es nur bei der Modellierung der Sturmgefährdung (M4.1), da im Widerspruch zur Planung des Projektes keine vorhandenen Modelle adaptiert werden können, sondern ein neuer Ansatz entwickelt werden musste und derzeit in einem konkreten Modell umgesetzt wird. Die Netzmodellierung des Stromnetzes (M2.1) kann leider auch nicht als völlig abgeschlossen betrachtet werden, da jede tiefer gehende Modifikation und Anpassung des Modells in Neplan die Überarbeitung des GIS-Modells sowie der Simulationen erforderlich macht. Die Modellierungen von ICT-Netzen (M3, 4.3, 5 und 6) wird durch das Fehlen von Informationen und Daten erschwert. Dafür wurden bereits getrennte Erdbebenrisikoanalyse für das Übertragungsnetz und ein ICT-Netz durchgeführt (M4.3).

Als bedeutende Innovationen werden hier die theoretischen Arbeiten zu den Netzwerken sowie das Modell zur Erdbebenrisikoanalyse des Übertragungsnetzes angesehen.

Im kommenden Jahr soll das Projekt abgeschlossen werden. Zwei große Herausforderungen sind dabei zu bewältigen: die Sturmmodellierung und die Modellierung der gekoppelten Netze. Außerdem sind die Endberichte zu erstellen. Es wird angestrebt, weitere Ergebnisse wissenschaftlich zu publizieren. Die begrenzten Projektressourcen könnten dies jedoch verzögern.

7 Referenzen

- [1] Anagnos, T.: **Development of an electrical substation equipment performance database for evaluation of equipment fragilities**. Final report for PG&E and Peer, San Jose State University, 1999
- [2] Bastami, M.: **Seismic Assessment of Medium and High Voltage Power Substation Equipments**. In proceedings of 14WCEE. 2008
- [3] Bin, S., Koval, D., Shen, S.: **Modelling Extreme-Weather-Related Transmission Line Outage**. In: Proceedings of the 1999 IEEE Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering. 1999
- [4] Coles, S.: **Regional Modelling of Extreme Storms via Max-Stable Processes**. Journal of the Royal Statistical Society. Series B, 55: 797-816. 1993
- [5] Della-Marta, P., Mathis, H., Frei, C., Liniger, M., Kleinn, J.: **The return period of wind storms over Europe**. Int. J. Climatol. 29: 437-459. 2009
- [6] Duenas-Ororio, L. and Vemuru, S.M.: **Cascading failures in complex infrastructure systems**. Structural Safety 31: 157-167, 2009
- [7] Fahrmaier, L.: **Lebensdauer- und Ereignisanalyse, Vorlesungsskript SS07**. Institut für Statistik, Ludwig-Maximilians-Universität München, 2007
- [8] Federal Emergency Management Agency (FEMA): **HAZUS 97 technical manual**. 1997
- [9] Giardini, D., Wiemer, S., Fäh, D., 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
- [10] Grünthal, G. (ed.): **European Macroseismic Scale 1998**. Cahiers du Centre Européen de Géodynamique et de Séismologie, Volume 15, Luxembourg 1998.
- [11] IIRIIS – Integrated Risk Reduction of Information-based Infrastructure Systems: <http://www.irriis.org/>
- [12] Kendall, M. and Gibbons, J.: **Rank Correlation Methods**. A Charles Griffin Title. 1990
- [13] LASEN: **Vulnerability of Electricity supply system under extreme weather conditions**. Projekt der EPFL. 2006-2009. <http://lasen.epfl.ch/page39417.html>
- [14] Li, D., Hüsler, J., Raschke, M.: **The estimation of the generalized Pareto distribution by maximum likelihood and goodness of fit**. Communications in Statistic - Theory and Methods. (2009, akzeptiert)
- [15] Luijff, E., Nieuwenhuijs, A., Klaver, M., van Eeten, M., Cruz, E.: **Empirical Findings on Critical Infrastructure Dependencies in Europe**. In: Setola R., Geretschuber S.(Eds.): CRITIS 2008: 302-310, Springer-Verlag Berlin Heidelberg. 2009.
- [16] Mari, D., Kotz, S.: **Correlation and dependence**. London: Imperial College Press. 2001
- [17] MunichRe: **Winterstürme in Europa (II)**. 2001
- [18] Newman, M. E. J.: **Assortative Mixing in Networks**. Phys. Rev. Lett. 89: 208701-208704. 2002
- [19] Oikawa, T., Fukushima, S., Takase, H., Uchiyama, T., Muramatsu, K.: **Seismic Reliability Evaluation of Electrical Power Transmission Systems and its Effect on Core Damage Frequency**. Transactions, SMIRT 16, 2001
- [20] Raschke, M.: **Die Korrelation zwischen Erdbebenstärke und Bauwerksschaden und deren Anwendung in der Risikoanalyse**. Dissertation an der Bauhaus-Universität Weimar (2003) Shaker Verlag, 2004
- [21] Reed, D.: **Electric utility distribution analysis for extreme winds**. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics 96: 123-140. 2008
- [22] Rüttner, E.: **Earthquake Hazard Evaluation for Switzerland**. Geophysique, Nr. 29, Schweizer Erdbebendienst, 1995
- [23] Säggerer, R., Mayer-Rosa, D.: **Erdbebengefährdung der Schweiz**. Schweizer Bauzeitung, Jahrgang 96, Heft 7, 107-123, 1978
- [24] Schiesser, H., Pfister, C. Bader, J.: **Winter Storms in Switzerland North of the Alps 1864/1865-1993/1994**. Theor. Appl. Climatol. 58: 1-19. 1997
- [25] Schiesser, H., Waldvogel, A., Schmid, W., Willemse, S.: **Klimatologie der Stürme und Sturmsysteme anhand von Radar- und Schadendaten - Schlussbericht NFP 31**. VdF, Zürich. 1997
- [26] Shinozuka, M., Chang, S.E., Cheng, T.-C., Feng, M., O'Rourke, T.D., Saadeghvaziri, M.A., Dong, X., Jin, X., Wang, Y., Shi, P.: **Resilience of integrated power and water systems**. mceer.buffalo.edu/publications/resaccom/04-SP01/06_shino.pdf. 2004
- [27] Shinozuka, M., Dong, X., Chen, T.C., Jin, X.: **Seismic performance of electric transmission network under component failure**. Earthquake Engng Struct. Dy. 2007; 36: 227-244
- [28] Straub, D., Kiureghian, A. D.: **Improved seismic fragility modeling from empirical data**. Structural Safety 30, 2008, 320-336
- [29] VSE CH: **Statistik 2006 - über die Verfügbarkeit der Elektrizitätsversorgung der Schweiz**. 2007

8 Anhang

Die Entwürfe der Artikel sind separat angehängen und sind vertraulich zu behandeln.

Tab.A1: Aktueller Zeitplan des Projekts

Arbeits- pakete		A1 Vorbereitung	A2 Netzmodelle			A3 Gefährdung		A4 Schadens- funktionen		A5 Risikoanalyse	
		M1	M2.1	M3	M5	M2.2	M4.1	M2.3	M4.2	M4.3	M6
2008	4										
	5										
	6										
	7										
	8										
	9										
	10										
	11										
	12										
	1										
	2										
	3										
2009	4										
	5										
	6										
	7										
	8										
	9										
	10										
	11										
	12										
	1										
	2										
	3										
2010	4										
	5										
	6										
	7										
	8										
	9										
	10										
	11										
	12										
	1										
	2										
	3										