



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

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

Schlussbericht 25. November 2010

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, mrashcke@mavt.ethz.ch

BFE-Bereichsleiter: Dr. Michael Moser

BFE-Programmleiter: Dr. Michael Moser

BFE-Vertrags- und Projektnummer: SI/500179-01 / SI/500179

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

Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung	4
Ausgangslage	5
Ziele der Arbeit	6
Methoden - Projektaufbau und Analysekonzept	6
Ergebnisse	8
1. Entwickelte und adaptierte Gefährdungsmodelle	8
1.1. Das Erdbebengefährdungsmodell	8
1.2. Das Wintersturmmodell	10
2. Modelle für die Empfindlichkeit von Netzelementen bezüglich der Einwirkung aus Erdbeben oder Sturm	13
2.1. Statistische Modelle für Versagensfunktionen	13
2.2. Versagensfunktionen für Elemente des Übertragungsnetzes – Erdbeben	14
2.3. Versagensfunktionen für Elemente des Übertragungsnetzes – Sturm	15
2.4. Versagensfunktionen für Elemente der ICT-Netze – Erdbeben	15
2.5. Versagensfunktionen für Elemente der ICT-Netze – Wintersturm	16
3. Die Modelle der Infrastrukturnetze und ihre Reaktion auf Schadensereignisse	16
3.1. Modell für ein ICT-Netz	16
3.2. Modell für das Schweizer Übertragungsnetz	16
3.3. Modellierung der Reaktion des Übertragungsnetzes auf Ausfälle	17
3.4. Modellierung von Interaktionen zwischen Infrastrukturnetzen	18
4. Die Schätzung der Erdbeben- und Wintersturmriskos für die Infrastrukturnetze	19
4.1. Risikosimulationen und Kriterien der Ereignisgröße	19
4.2. Analyse des Erdbebenrisikos für ein ICT-Netz	19
4.3. Analyse des Erdbebenrisikos für das Schweizer Übertragungsnetz	20
4.4. Modell und Analyse des Erdbebenrisikos eines ICT-Netzes in Interaktion mit Ausfällen des Stromnetzes	24
4.5. Analyse des Wintersturmriskos für das Schweizer Übertragungsnetz	24
5. Zusätzliche Untersuchungen und Entwicklungen	25
5.1. Theoretische Arbeiten zu Netzwerken	25
5.2. Empfindlichkeit des Stromnetzes gegenüber zielgerichteten, menschlichen Einwirkungen	27
Diskussion und Bewertung der Ergebnisse	28
Schlussfolgerungen	29
Symbolverzeichnis	31
Referenzen	32
Anhang	35

Zusammenfassung

Ziel des durchgeführten Projektes war, das Risiko des Schweizer Stromübertragungsnetzes und von Netzen der Informations- und Kommunikationstechnik (ICT) aus großflächigen Naturereignissen wie Erdbeben und Sturm wissenschaftlich zu modellieren und zu schätzen. Das generelle Projektziel, die Quantifizierung des Risikos von Infrastrukturnetzen, wurde erreicht. Die wichtigsten Teilleistungen sind:

- Adaption des Erdbebengefährdungsmodells des Schweizer Erdbebendienstes,
- Neuentwicklung eines probabilistischen Ansatzes für ein Wintersturmmodell in Europa und dessen Umsetzung in ein Wintersturmmodell für die Schweiz,
- Modellierung eines ICT-Netzes,
- Modellierung des gesamten *ENTSO-E* Übertragungsnetzes für den Stromfluss und den Schweizer Teil bezüglich der direkten Ausfälle aus Wintersturm und Erdbeben,
- Simulation von Schadensereignissen und Schätzung der jeweiligen Risiken.

Aus wissenschaftlicher Sicht stellen diese Modellierungen eine Weiterentwicklung hinsichtlich der Realitätsnähe, dem Detaillierungsgrad sowie in der Anwendung probabilistischer Methoden dar. Die wichtigsten praktischen Erkenntnisse sind:

- Die empfindlichsten Elemente im Übertragungsnetz bezüglich Erdbeben sind die Transformatoren.
- Das Erdbebenrisiko des Schweizer Übertragungsnetzes ist relativ gering, ein Ausfall eines Netzelementes (Leitung, Transformator) ereignet sich nach einer konservativen Schätzung etwa alle 100 Jahre.
- Größere Ausfälle, die zur Isolation von Unterwerken führen würden, was als regionaler Versorgungsausfall interpretiert werden kann, ereignen sich etwa alle 500 Jahre (konservative Schätzung).
- Verglichen damit ist das Wintersturmrisko des Schweizer Übertragungsnetzes größer bezüglich Ereignisse, bei denen nur wenige Netzelemente versagen.
- Sehr seltene Schadensereignisse mit einer großen Anzahl von ausgefallenen Elementen werden eher durch Erdbeben als durch Winterstürme verursacht.
- Sicherheitsabschaltung von Kernkraftwerken im Erdbebenfall: Wenn ein Block im Durchschnitt alle 475 Jahre aufgrund eines Erdbebens am Standort heruntergefahren würde, dann würden in etwa 50% dieser Fälle ein oder mehrere weitere Blöcke ebenfalls heruntergefahren werden.
- Eine einfache Übertragung der Ergebnisse auf die Verteilernetze ist problematisch.

Das geschätzte Risiko für die betrachteten Netze steht nicht im Widerspruch zu den Beobachtungen in den vergangenen Jahrzehnten.

Ausgangslage

Das Übertragungsnetz (Strom) ist notwendig für die Aufrechterhaltung des öffentlichen Lebens in der Schweiz. Umso wichtiger ist die Gewährleistung der Funktionsfähigkeit des Übertragungsnetzes bei Einwirkungen aus Naturkatastrophen wie Erdbeben und Sturm. Die Funktionsfähigkeit des Übertragungsnetzes kann nur mit den dazugehörigen Kommunikationsmitteln sichergestellt werden. Diese stellen dem Operateur die Daten über den Netzzustand bereit und sichern den Informationsaustausch mit den verschiedenen Netzelementen (Kraftwerke, Unterwerke usw.). Deshalb ist auch die Robustheit der Kommunikations- und Datennetze gegenüber diesen grossflächigen Schadensereignissen wichtig. Schäden an den jeweiligen Netzen könnten durch Interaktionen zu noch grösseren Ausfällen führen. Die praktische Relevanz des Projektes ergibt sich direkt aus den dokumentierten Schadensfällen infolge von Naturkatastrophen. Die Beeinträchtigung von Stromnetzen durch Erdbebeneinwirkungen wurde schon in verschiedenen Berichten und Meldungen (s.[1], [14], [19], [26], [28], [30], [31], [37], [42], [43] und [50]) dargestellt. Grössere Schadensfälle in Übertragungsnetzen infolge von Wetterereignissen wurden seltener und weniger ausführlich dokumentiert, dies obwohl der Ausfall einzelner Netzelementen durch Witterungseinflüsse nicht selten ist. Ein grösseres Ereignis ist der Schnee- und Eissturm im Münsterland (Deutschland, 2005), welcher Teile eines Verteilungsnetzes zerstörte. Unabhängig von der Qualität der Schadensberichte macht die Wichtigkeit der Stromnetze eine Untersuchung deren Ausfallrisikos erforderlich, welches die Hauptmotivation für die vorliegenden Untersuchungen ist.

Der Stand der Wissenschaft kann wie folgt skizziert werden. Die Zuverlässigkeit von komplexen Übertragungsnetzen wurde schon verschiedentlich untersucht und Ergebnisse wurden publiziert. So wurde im Rahmen der Forschungen von M. Schläpfer (Mitglied des LSA) eine Masterarbeit zur Zuverlässigkeit des Schweizer Übertragungsnetzes erstellt [24]. Das Versagen von Netzelementen hat in diesen Modellen keine externen Ursachen. Auch das Risiko kleinerer Hochspannungsnetze hinsichtlich des Erdbebenrisikos wurde bereits untersucht, die Arbeit von Shinozuka et al. [52] für den Großraum Los Angeles ist dafür ein gutes Beispiel. Das berücksichtigte Netz ist allerdings nicht sehr groß und die Modellierung des Stromflusses und das Erdbebengefährdungsmodell sind stark vereinfacht. Die fortschrittlichste Risikomodellierung wurde von Vanzi [57] für einen Teil Italiens erstellt. Diese Arbeit blieb von der Fachwelt weitgehend unbeachtet und wurde erst im Laufe der Projektarbeit recherchiert. Extreme Wetterereignisse wurden erst ansatzweise untersucht und modelliert, so entwickelte Broström [7] einen Ansatz für ein Eissturmmodell ohne konkrete Parameter zu schätzen. Das LASEN (Laboratory of Energy Systems) der EPFL (Swiss Federal Institute of Technology) bearbeitete ein Projekt zum Risiko des Schweizer Transportnetzes hinsichtlich extremer Wetterereignisse (s.[25]), die Ergebnisse werden aber erst in Kürze mit der Dissertation von R. Barben [4] publiziert. Eine vollständige Risikoanalyse einschließlich der Schätzung einer Häufigkeitskurve von Schadensereignissen wurde in dieser Arbeit (so weit wir informiert sind), nicht durchgeführt.

Die Interaktion verschiedener Infrastrukturnetze wurde bisher vorwiegend theoretisch und/oder in kleinem Massstab untersucht. Dueñas-Orsorio et al. ([11] und [12]) benutzte zwar konkrete Infrastrukturnetze, unter anderem Stromnetze, wendete aber nur theoretische Modellierungen von Interaktionen ohne statistische Verifizierung an. In der Arbeit von Shinozuka et al. [53] wurde nur der kausale Zusammenhang zwischen dem Wasserversorgungsnetz und dessen Stromversorgung betrachtet, ICT-Netze fanden keine besondere Berücksichtigung. Newman et al. [36] untersucht theoretische Netze mit vielen Knoten, die sich nur sehr grob auf reale Stromnetze übertragen lassen. Schneider et al. [48] modellierte konkrete Interaktionen von

Elementen des Daten und Stromnetzes, aber nur für eine Unterstation. Dudenhoeffer et al. [10] gibt einen guten Überblick über die verschiedensten Ansätze und Modellierungen hinsichtlich der von Interaktionen und Abhängigkeiten von Infrastrukturnetzen in vergangenen Forschungsprojekten. Danach wurden kaum empirische Untersuchungen oder Modellierungen im Detail durchgeführt.

Bei der Modellierung von großflächigen Wetterereignissen haben wir uns auf Winterstürme beschränkt, da Gewitterstürme schon im Projekt des LASEN (EPFL) berücksichtigt werden.

Unserem Projektteam gehörten Evangelis Bilis und Mathias Raschke an, letzterer war auch für die Leitung verantwortlich. Träger des Projekts war Laboratorium für Sicherheitsanalytik an der ETH Zürich unter Leitung von Prof. Kröger.

Ziel der Arbeit

Die Projektziele werden am besten mit einem Zitat aus den Vereinbarungen zwischen dem LSA und dem BFE und swisselectric research zusammengefasst: *„Ziel des Projektes ist es, die Sicherheit und Verletzbarkeit des Stromnetzes der Schweiz in Interaktion mit dem Informations- und Kommunikationssystem beim Auftreten von großräumigen Schadensereignissen durchgängig mit probabilistischen Methoden umfassend zu analysieren.“*. Dementsprechend sollte im Rahmen des Projektes das Risiko des Stromnetzes quantifiziert werden, was weit über die konventionellen Empfindlichkeitsanalysen hinausgeht. Gleiches sollte für ICT-Netze durchgeführt werden. Besonders Augenmerk sollte auf die Interaktionen zwischen den Netzen gelegt werden. Erdbeben und Stürme waren dabei die großflächigen Schadensereignisse, die untersucht bzw. modelliert werden sollten. Ein Kriterium zur Quantifizierung der Schadensereignisse (z.B. Anzahl ausgefallener Elemente, abgeworfene Last) war nicht von vorn herein festgelegt.

Methoden - Projektaufbau und Analysekonzept

Um dem Projektziel einer durchgängigen Analyse gerecht zu werden, waren verschiedene Arbeitspakete (Tab.1) geplant. In ihnen sollten die notwendigen Modelle für eine durchgehende Analyse erstellt werden, wie sie in Abb.1 schematisch dargestellt sind.

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

Nr.	Zwischenschritte bzw. Meilensteine
1	Vorbereitungen
2.1	Netzmodellierung - Strom
2.2	Gefährdungsmodell - Erdbeben
2.3	Schadensfunktionen - Erdbeben
3	Netzmodellierung - ICT
4.1	Gefährdungsmodell - Sturm
4.2	Schadensfunktionen - Sturm
4.3	Risikoanalyse Erdbeben für Strom und ICT getrennt
5	Modellierung der gekoppelten Systeme Strom und ICT
6	Risikoanalyse Erdbeben und Sturm für die gekoppelten Netze

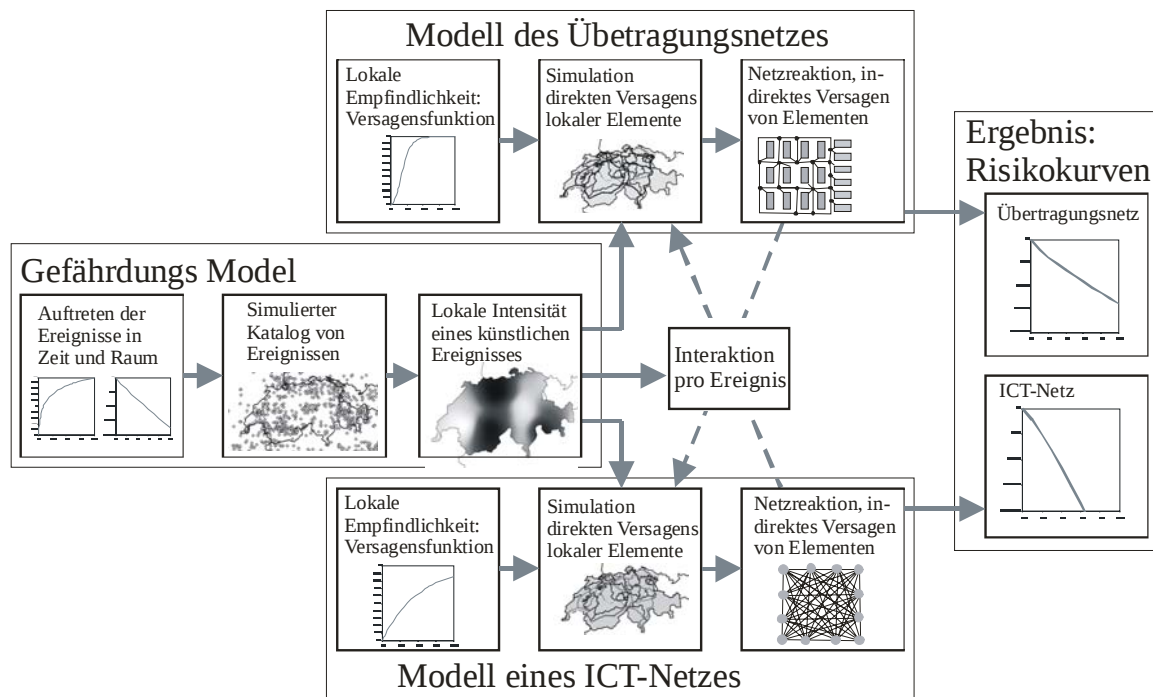


Abb.1: Modelle, die im Rahmen der durchgehenden Analyse erstellt und verknüpft werden mussten

Ursprünglich war geplant, die verschiedenen notwendigen Elemente des Gesamtmodells mit vorhandenen Modellen zu füllen bzw. vorhandene Modelle zu adaptieren. Notwendige Elemente waren und sind:

- Gefährdungsmodelle, welche die Auftretenshäufigkeit der Naturereignisse Erdbeben und Sturm in Zeit und Raum beschreiben, einschliesslich deren lokale Ereignisintensität,
- Empfindlichkeitsfunktionen, welche den Zusammenhang von direktem Versagen von Elementen und der auf sie wirkenden lokalen Ereignisintensität beschreiben (Versagensfunktionen), und
- Modelle welche die Funktionalität der Netze (z.B. Stromfluss) genügend realistisch abbilden, einschliesslich dem indirekten Versagen von Netzelementen (Überlastungen usw.).

Probabilistische Methoden kamen in den Gefährdungsmodellen (Auftretenswahrscheinlichkeit), den Versagensfunktionen sowie bei der Monte Carlo Simulation konkreter, künstlicher Ereignisse zur Anwendung. Aufgrund der Komplexität der verschiedenen Sachverhalte kann eine Risikokurve, welche die Auftretenshäufigkeit oder Auftretenswahrscheinlichkeit in Relation zur Ereignisgröße darstellt, nur durch die Simulation einer großen Anzahl von Ereignissen bzw. vielen Jahren, in denen Ereignisse stattfinden könnten, geschätzt werden. Entsprechend dem statistischen Grenzwertsatz von Gliwko ist eine große Stichprobe simulierter Ereignisse eine gute Schätzung für eine Risikokurve. Die konsequente Anwendung der Monte Carlo Simulation bei der Generierung der Schadensereignisse gewährleistet ein durchgehend probabilistisches Modell. Für ein einzelnes, künstliches Ereignis wurde dabei wie folgt vorgegangen. Zuerst wurde entsprechend dem Gefährdungsmodell ein Erdbeben oder Sturmereignis simuliert. Dabei wirkt auf jedes Netzelement eine lokale Ereignisintensität. Entsprechend der Versagensfunktion für dieses Element ergibt sich eine bedingte Versagenswahrscheinlichkeit, mit der in einem zweiten Schritt das direkte Versagen der berücksichtigten Netzelemente simuliert wurde. In einem dritten Schritt wird die Reaktion des Netzes berechnet. Dies schließt „hidden failures“ anderer Netzelemente ebenso ein wie das Versagen infolge von Überlastungen. Mögliche Fehler des Operators wurden ebenso berücksichtigt. Dieses Ablaufschema ist in Abb.2 dargestellt.

Wie schon erwähnt war bei der Planung des Projekts vorgesehen, vorhandene Modelle zu übernehmen bzw. zu adaptieren. Dies betraf vor allem die Gefährdungsmodelle für Erdbeben und Sturm. Für die Modellierung der Reaktion des Stromnetzes war ursprünglich angedacht, ein objektorientiertes Modell (Plattform: Anylogic) einer vorangegangenen Masterarbeit zu adaptieren (s.[24] und [47]). Auch sollten Versagensfunktionen eher recherchiert und ausgewählt als speziell entwickelt werden.

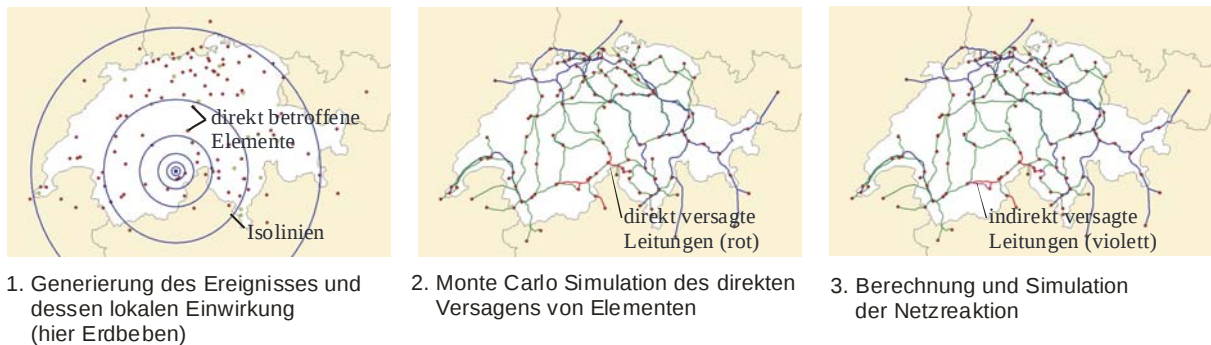


Abb.2: Schema des Ablaufs einer Ereignissimulation für den Erdbebenfall

Ergebnisse

1. Entwickelte und adaptierte Gefährdungsmodelle

1.1. Das Erdbebengefährdungsmodell

Ausgangspunkt für die Adaption eines Gefährdungsmodells für Erdbeben war das Modell des Schweizer Erdbebendienstes (SED, [17]). Die Quellregionen sind in Abb.3a dargestellt. Da die lokale Erdbebenstärke entweder mit der makroseismischen Intensität (s. [18]) oder der PGA (peak ground acceleration) beschrieben werden sollte, um Kompatibilität zu möglichen Versagensfunktionen zu gewährleisten, konnte nicht die ursprünglichen Abnahmefunktionen verwendet werden, da diese die lokale Erdbebenstärke im Spektralbereich modellieren. Stattdessen wurde die Abnahmefunktion von Rüttner [44] implementiert, welche sich direkt auf die Region der Schweiz bezieht. Die Umwandlung der Magnituden in Epizentralintensitäten ist dabei mit dem SED-Modell kompatibel.

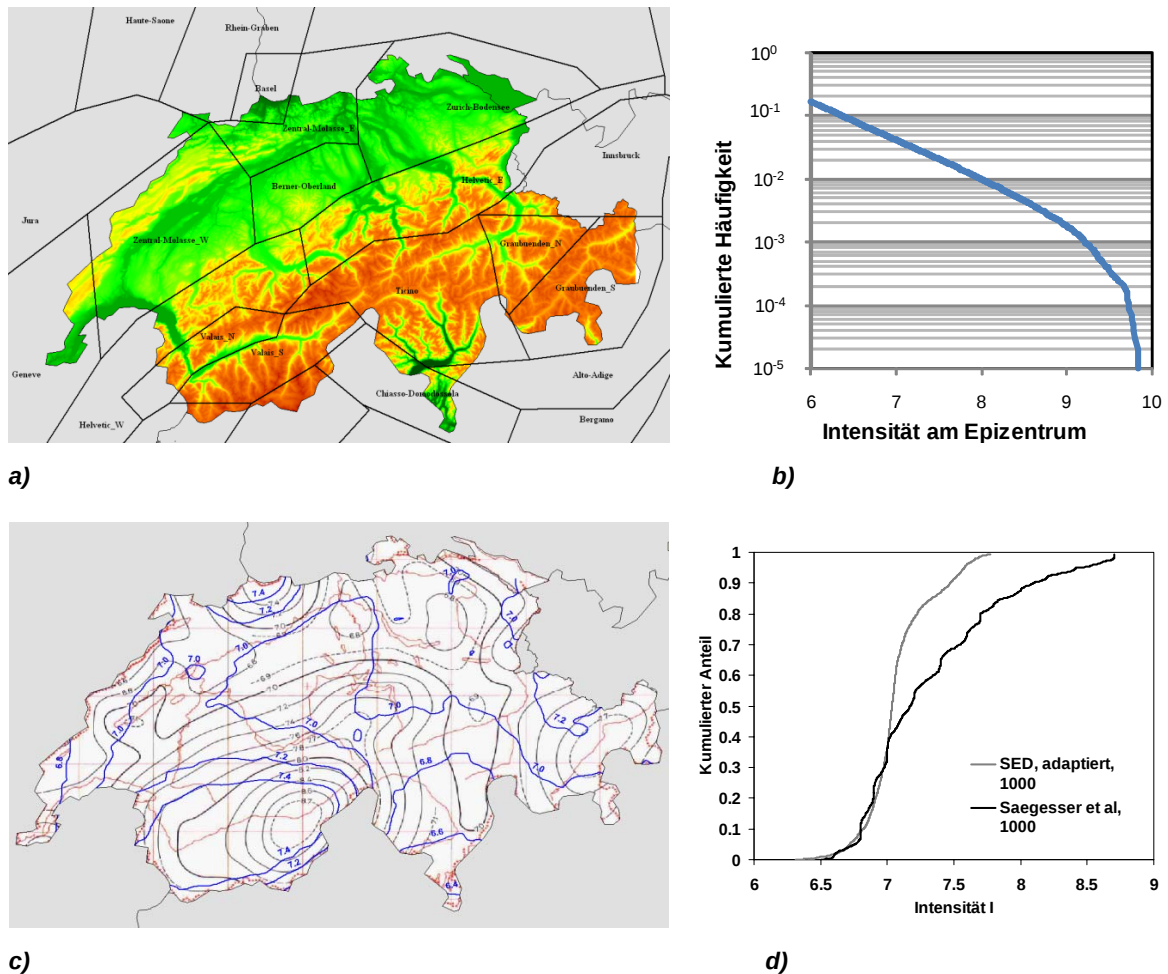
Die modellierte Häufigkeit der Epizentralintensitäten ist in Abb.3b dargestellt. Die resultierende lokale Gefährdung für eine Wiederkehrperiode von 1000 Jahren konnte mit dem älteren Modell von Säggerer et al. [45] verglichen werden (Abb.3c). Die Verteilungen der lokalen Gefährdungsintensitäten werden in Abb.3d gegenübergestellt. Die modellierte Gefährdung des adaptierten Modells ist deutlich kleiner als bei Säggerer et al. [45].

Eine mögliche Reststreuung in der Abnahmebeziehung wurde nicht berücksichtigt. Diese spielt in der probabilistischen seismischen Hazardanalyse (PSHA) eine wichtige Rolle, aber folgende Punkte bleiben in klassischen Modellen unbeachtet

- Für ein Szenario müsste die Reststreuung ein Zufallsfeld bilden, von dem es aber keine Informationen bezüglich der Kovarianzfunktion gibt.
- Für die Risikoanalyse ist es eher wichtig, dass die kumulierte Fläche in der Abnahmebeziehung (s. [40]) korrekt widerspiegelt wird.

- Für eine Extremwertvariable (PGA) wird in klassischen Modellen keine Extremwertverteilung verwendet, was dem Stand der Statistik widerspricht.
- Die Abnahmebeziehungen werden für gewöhnlich durch eine Regressionsanalyse empirischer Daten ermittelt. Die Messfehler der Regressoren werden in klassischen Modellen dem Regressanden zugeschrieben, was die Reststreuung vergrößert. Diese Erhöhung ist weder für die PSHA noch für eine Risikoanalyse nicht gerechtfertigt.

In den großflächigen Erdbebenszenarien des HAZUS (s. [16]) wird die Reststreuung der Abnahmefunktionen ebenfalls nicht berücksichtigt.



Die Modellierung der Erdbebenereignisse ist mit dem Ansatz von Vanzi [57] vergleichbar und entspricht dem Stand der Wissenschaft. Dueñas-Osorio et al. [13] konstruierten Erdbebenereignisse mit Karten der lokalen Gefährdung, was zu unrealistischen lokalen Intensitäten je Ereignis führt. Eine Gefährdungskarte ist keine Karte der lokalen Intensität eines Ereignisses.

Teilergebnisse dieses Unterprojektes wurden bereits publiziert (s. Abschnitt Kommunikation, [a], [c]).

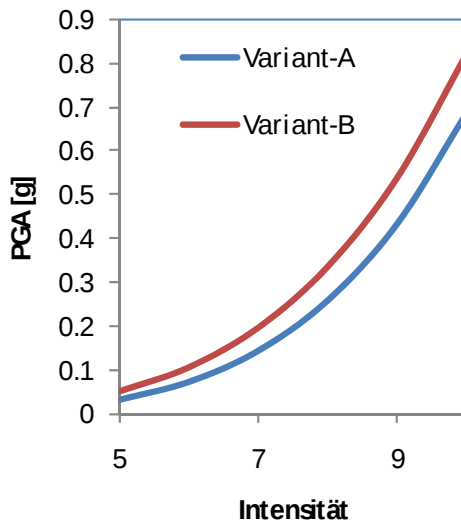


Abb.4: Angenommener Zusammenhang zwischen Intensität und PGA

1.2. Das Wintersturmmodell

Bei der Ausarbeitung des Projektplanes wurde davon ausgegangen, dass Sturmmodelle zugänglich sind, welche das Gebiet der Schweiz abdecken. Im Laufe der Durchführung des Projektes musste festgestellt werden, dass dies nicht der Fall ist. Die Modellierung von Stürmen steckt aus Sicht des Autors noch in den Anfängen. Allein schon die Schätzung der Jährlichkeit der historischen Stürme ist schwierig, wie die Arbeit von Della-Marta et al. [9] zeigt, die Schätzungen sind sehr ungenau (s. Abb.5a). Inwieweit in der Versicherungswirtschaft bessere Modelle benutzt werden, konnte nicht endgültig geklärt werden, aber es werden Stürme modelliert (Abb.5b). Dementsprechend wurde im Rahmen des Projektes ein neues Wintersturmmodell entwickelt. Der grundsätzliche Ansatz folgt dabei der Konstruktion maxi-stabiler Zufallsfelder (s. [20], [21], [46] und [54]). Die Zufallsfelder $Y(t)$ der lokalen Maxima der Sturmereignisse werden konstruiert mit

$$Y(t) = \sigma_y(t)(X + W(t) + v(t)) + \mu_y(t), \quad (1)$$

worin X eine zufällige Sturmmagnitude, $W(t)$ ein Gauß-Feld, $v(t)$ eine Abnahmefunktion (die Windgeschwindigkeit in der Nähe der Zugbahn ist größer als in größerem Abstand) und $\sigma_y(t)$ und $\mu_y(t)$ den lokalen Einfluss beschreiben. Das jährliche Maximum $Z(t)$ an einer Stelle t ergibt sich dann für m konstruierte Ereignisse pro Jahr mit

$$Z(t) = \text{Max}\{Y_1(t), \dots, Y_i(t), \dots, Y_m(t)\}. \quad (2)$$

In der Abb.6 und 7a ist dieses Modell schematisch dargestellt. Für das Wintersturmmodell der Schweiz genügte es, einfache, lineare Zugbahnen und ihre Zufälligkeit zu modellieren. Dabei wurde auf Arbeiten von Schiesser et al. [49] zurückgegriffen. Für die Schätzung der weiteren Modellparameter wurden die

Maxima der Wintersaison von Windstationen des meteorologischen Dienstes der Schweiz verwendet. Mit diesem Sampling soll die Trennung zwischen Sommergewittern und Winterstürmen gewährleistet sein. Die eher lokalen Föhnstürme konnten nicht weiter berücksichtigt werden.

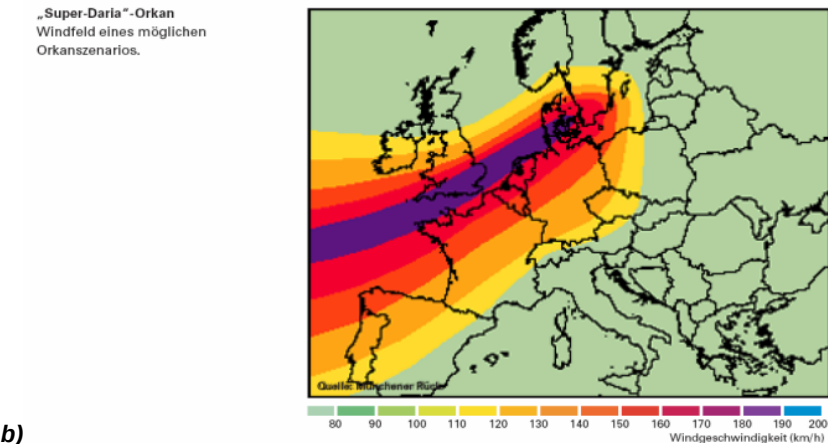
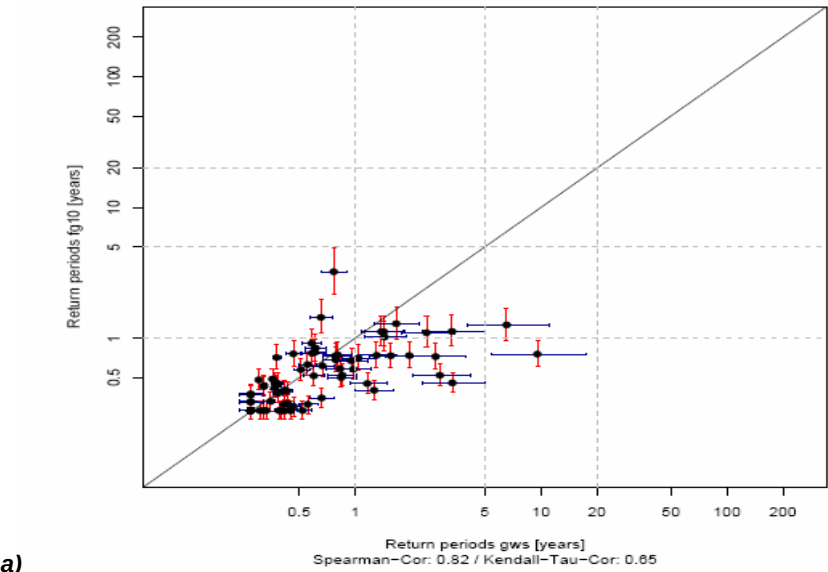


Abb.5: Bisherige Sturmmodelle: a) Schätzungen der Wiederkehrperiode historischer Stürme aus Della-Marta et al. [9], b) Modellierter Sturm nach MunichRe [32]

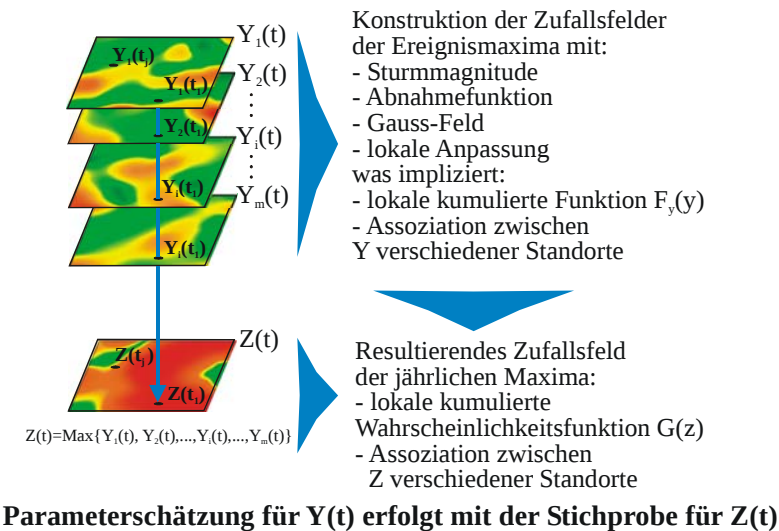


Abb.6: Schema des konstruierten Modells für Winterstürme

Die Jahresmaxima der Windstationen können sehr gut mit einer Extremwertverteilung vom Typ Gumbel beschrieben werden. Ergebnisse von Anpassungstests nach Stephens [55] und das Bayessche Informationskriterium (BIC, s. [51]) legen dies nahe.

Für die Schätzung der Parameter des gesamten Wintersturmmodells wurde die Maximum-Likelihood-Methode verwendet. Die Assoziation zwischen den Windstationen wurde dabei mittels der konstruierten Vertrauensbereiche für die Schätzung von Kendalls τ (s.[23]) berücksichtigt. Die gute Übereinstimmung der beobachteten und simulierten Assoziationen wird in Abb.7b deutlich. Die starke Streuung der beobachteten Assoziationen ist auf die kleinen Stichprobenumfänge zurückzuführen. Der BIC für das Wintersturmmodell ist kleiner als der BIC für rein lokale Modelle, was ein Indikator für eine gute Modellanpassung ist. Die Plausibilität der generierten Stürme macht der Vergleich zwischen einem historischen Sturm und einem simulierten Sturm in der Abb.8 deutlich.

Für die Analyse des Sturmrisikos wurde ein Katalog von 1000x1 Jahr simuliert mit jeweils 30 Sturmereignissen. Kleine simulierte Ereignisse können dabei als „windige Tage“ interpretiert werden.

Die Ergebnisse dieses Projektteils wurden teilweise schon publiziert (s. Abschn. Kommunikation, [c]).

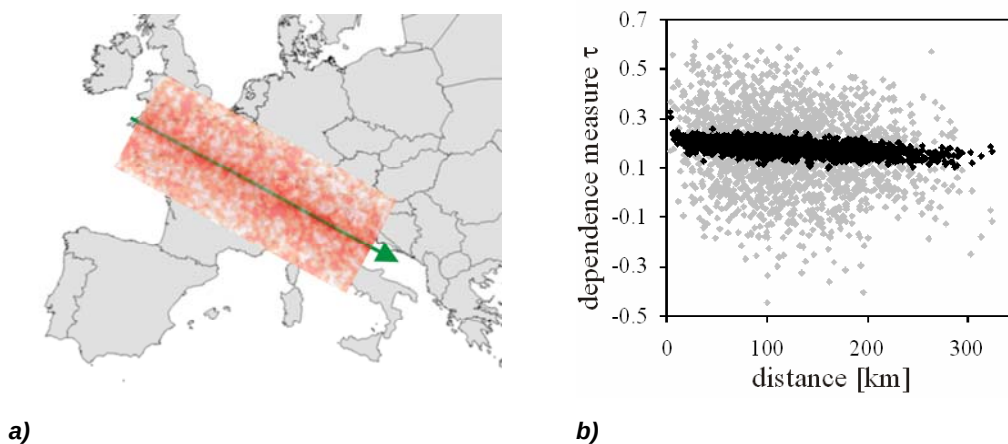


Abb.7: Details des Wintersturmmodells: a) Beispiel eines konstruierten Sturms (grüner Pfeil - Zugbahn, rote Schattierungen – Windfeld, bedeckt ganz Europa), b) geschätzte und simulierte Assoziationen der Jahresmaxima

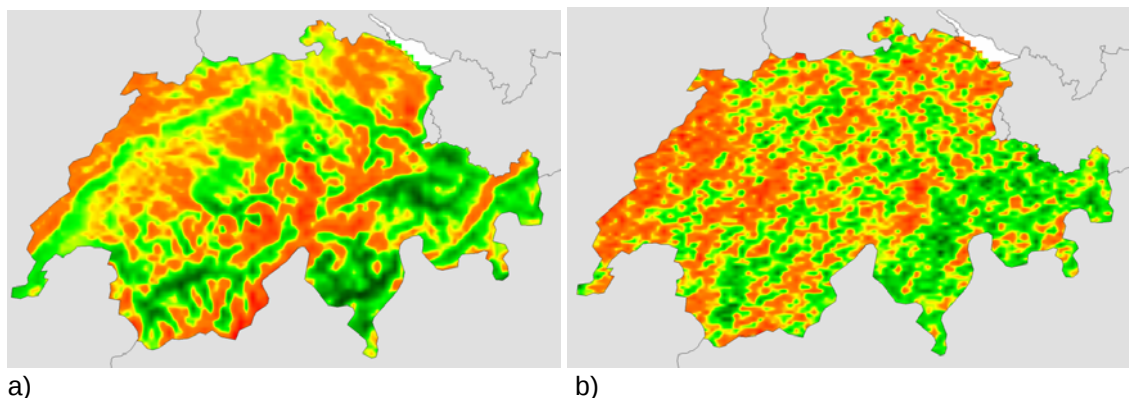
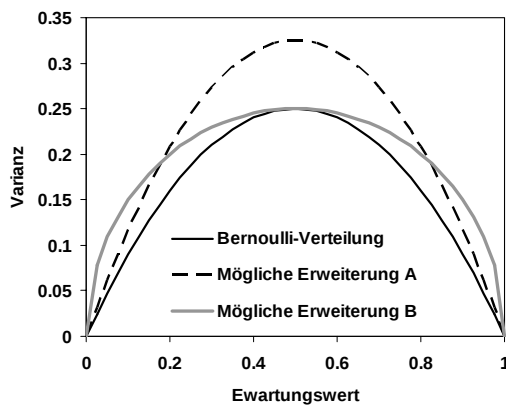


Abb.8: Qualitativer Vergleich von Stürmen: a) Rekonstruktion eines historischen Sturms (COSMO-Modell, www.cosmo-model.org), b) simulierter Sturm (grün – geringe Spitzenwindgeschwindigkeit, rot – hohe Spitzenwindgeschwindigkeit; die räumliche Auflösung der Simulation ist größer)

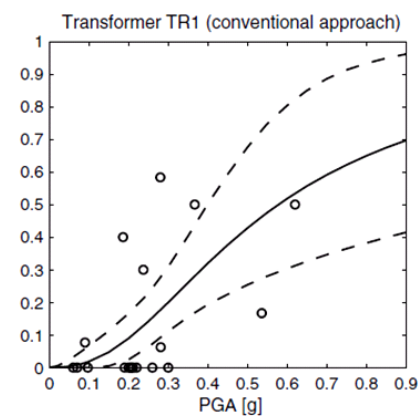
2. Modelle für die Empfindlichkeit von Netzelementen bezüglich der Einwirkung aus Erdbeben oder Sturm

2.1. Statistische Modelle für Versagensfunktionen

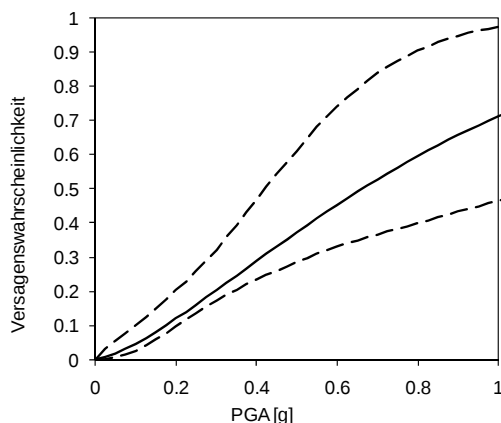
Es wurde eine theoretische Diskussion der Schadensfunktionen durchgeführt, die im konkreten Fall als Versagensfunktion den Zusammenhang zwischen lokaler Erdbebenstärke x und Versagenswahrscheinlichkeit F des Elements beschreibt. Praktisch alle publizierten Funktionen sind Log-Normalverteilungen, wie z.B. die Funktionen im *HAZUS* Manual (s.[16]). Die Log-Normalverteilung hat aber eine fallende Hazardrate. Dies ist aus strukturellemechanischer Sicht durch nichts zu begründen. Die Weibull Verteilung hat an den Enden mit einer möglichen fallenden Hazardrate günstigere Eigenschaften (vergleiche [15], 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. Weiterhin wurde die Versagenswahrscheinlichkeiten auch als Zufallsvariable modelliert. In diesem Fall wird mit der Versagensfunktion der Zusammenhang zwischen dem Erwartungswert der Versagenswahrscheinlichkeit und der lokalen Ereignisintensität beschrieben.



a)



b)



c)

Abb.9: a) Erwartungswert und Varianz der Verteilung der Versagenswahrscheinlichkeit, b) Geschätzte Versagensfunktion und Vertrauensbereich für einen Transformatortyp aus Straub et al. [56], c) Schätzung nach neuer Methode für denselben Transformatortyp

Dieses Problem wurde schon von Straub et al. [56] für Elemente von Unterstationen unter Erdbebeneinwirkung behandelt. Demgegenüber ist der hier entwickelte Ansatz eine flexiblere Verallgemeinerung. Im neuen Modell werden eine Funktion des Erwartungswertes der Versagenswahrscheinlichkeit und eine Funktion der Varianz modelliert, mit der die Beta-Verteilung der Versagenswahrscheinlichkeit formuliert werden kann. Die zusätzliche Varianz der Versagenswahrscheinlichkeit verursacht eine größere Varianz der Verteilung versagter Elemente. In Abb.9a 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 dazu wurde die Maximum-Likelihood-Schätzung in der Regressionsanalyse um eine Restriktion aus der Goodness-of-fit Technik erweitert, ähnlich wie durch Li et al. [27]. In Abb.9b-c wird eine publizierte Bayes-Schätzung mit den Ergebnissen einer neuen Schätzung verglichen; die Versagensfunktion ist die eines Trafos. Die gewonnen Erkenntnisse wurden teilweise schon publiziert (s. Abschn. Kommunikation, [d]).

2.2. 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 [2] zugänglich und wurde dementsprechend analysiert. Allerdings ist der Datensatz widersprüchlich und unbeabsichtigt zensiert, weshalb die Analyseergebnisse nicht weiter verwendet werden konnten. Als Alternative wurden dann publizierte Funktionen recherchiert, welche für die Elemente des Schweizer Übertragungsnetzes verwendet werden könnten. In einer ersten, einfachen Risikostudie wurde eine HAZUS-Funktion (s.[16]) berücksichtigt. Die entsprechende Funktion und deren Modifikation sind in Abb.10a dargestellt. Da diese Funktionen zu unrealistisch hohen Versagenswahrscheinlichkeiten schon bei kleinen, lokalen Erdbebenstärken führen, wurde nach weiteren, publizierten Funktionen gesucht. Wichtige Quellen waren Bastami [5], Oikawa et al. [38] und Shinozuka et al. [53]. Die Funktionen von Oikawa et al. [38] wurden am Ende ausgewählt. Sie scheinen eine breite empirische Basis zu haben, die Informationen zu den makroseismischen Intensitäten legen dies nahe. Die Funktionen für die einzelnen Elemente wurden zu zwei Funktionen zusammengefasst unter Annahme statistischer Unabhängigkeit mit

$$P = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - P_i) , \quad (3)$$

worin P_i das Versagen der Einzelelemente und P deren Zusammenfassung symbolisiert. Die zwei Funktionen beschreiben das durch Erdbeben induzierte funktionale Versagen des Anschlusses einer Leitung an eine Schiene sowie der Trafo-Einheiten zwischen den Schienen. Die Funktionen sind in Abb.10b dargestellt. Da in den Funktionen die lokale Erdbebenstärke mittels PGA beschrieben wird, im Gefährdungsmodell aber makroseismische Intensitäten verwendet werden, muss eine Umrechnung erfolgen, die an entsprechender Stelle erklärt ist.

Einige Resultate wurden bereits publiziert (s. Abschn. Kommunikation, [a] und [c]).

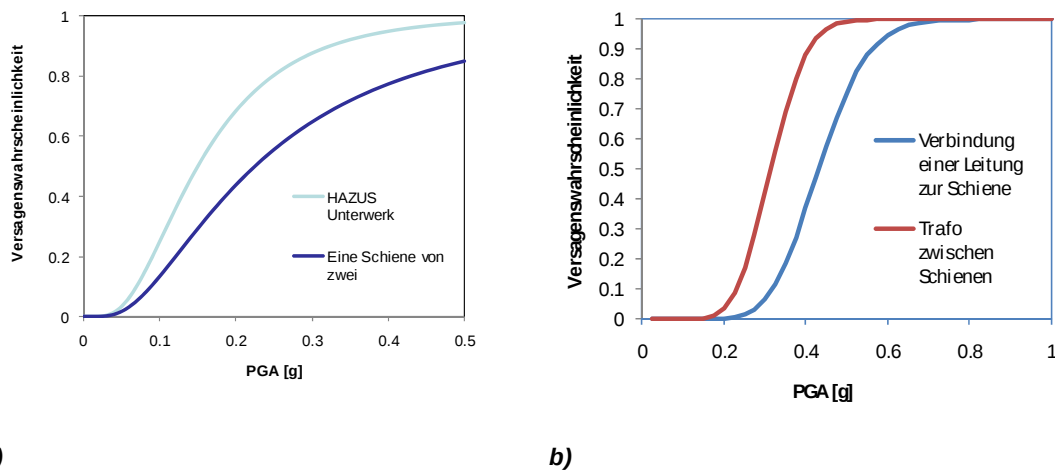


Abb.10: a) Versagensfunktionen nach Angaben aus FEMA (1997), b) Versagensfunktionen nach Angaben aus Oikawa et al. (2001)

2.3. Versagensfunktionen für Elemente des Übertragungsnetzes – Sturm

Es wurden nur wenige empirische Daten in der Literatur ([6] und [58]) gefunden; eine Funktion für lokale Verteilungsnetze wurde bereits von Reed [41] entwickelt. Entsprechend den theoretischen Untersuchungen für die Erdbebenversagensfunktionen wurde hier die kumulative Funktion einer Weibull Verteilung verwendet. Potenziert wurde darin die Windgeschwindigkeit entsprechend Reed [41] und Winkler et al. [60] mit 2. Der Skalenparameter wurde mit an dem Wintersturmmodell justiert so dass die durchschnittliche Ausfallrate 4 Leitungen pro Jahr beträgt. Eine Alternative mit der Potenz 3 wurde später ebenfalls berücksichtigt. Eine kleinere Potenz als 2 wäre nicht plausibel, da in Baunormen die Windlast oft proportional zur quadrierten Windgeschwindigkeit angenommen wird. Ausserdem treten ab einer Potenz <1 die oben beschriebenen Plausibilitätsprobleme des statistischen Modells auf.

Die Ergebnisse sind in Teilen publiziert (s. Abschn. Kommunikation, [c]).

2.4. Versagensfunktionen für Elemente der ICT-Netze – Erdbeben

Nur für Elemente von gebäude- und firmeninterner ICT-Netze wurden Versagensfunktionen in Publikationen gefunden (HAZUS, s.[16]). Da jedoch schon die Funktionen in HAZUS für Elemente der Stromnetze nicht realistisch sind, kann nicht erwartet werden, dass die Funktionen der ICT realistisch sind. Zeitweilig wurde aber die Möglichkeit in Betracht gezogen, skalierte HAZUS-Funktionen zu verwenden. Da aber die grundsätzliche Formulierung der HAZUS-Funktionen mit einer logarithmischen Normalverteilung zu einer unplausiblen Form der statistischen Hazardfunktion führt, wurde dieser Ansatz nicht weiter verfolgt.

Für eine Risikoschätzung wurden schließlich die zu erwartenden Schäden an Bauwerken, die ICT-Elemente tragen oder beinhalten, dazu verwendet, ein plausible Versagensfunktionen der ICT-Elemente zu konstruieren. Dem wurden die von Raschke [39] entwickelten Funktionen für die makroseismischen Schäden an Bauwerken zugrunde gelegt.

2.5. Versagensfunktionen für Elemente der ICT-Netze – Wintersturm

Es konnten keine relevanten Daten, Informationen oder Empfindlichkeitsfunktionen in Publikationen gefunden werden. Eine Modellierung war nicht möglich.

3. Die Modelle der Infrastrukturnetze und ihre Reaktion auf Schadensereignisse

3.1. Modell für ein ICT-Netz

Es sind nur wenige Informationen oder Daten über ICT-Netze kommerzieller Anbieter in der Schweiz zugänglich, was bei der Planung des Projekts nicht bekannt war. In Zusammenarbeit mit Dr. L. Zhou des LSA konnte ein einfaches Netz modelliert werden, das sich an das *SWITCH* Netz¹ anlehnt. Die Netz-Repräsentanz wurde mittels *Anylogic* modelliert, die geographische Repräsentanz wurde mittels *MapInfo* (GIS) erstellt. In Abb.11 ist das ursprüngliche Netz dargestellt, welches unter anderem aus 37 Servern bestand. Etwa 1½ Jahre später passten wir unser Modell der Entwicklung des Netzes an. Es wurde dafür in MatLab modelliert und enthält etwa 60 Server.

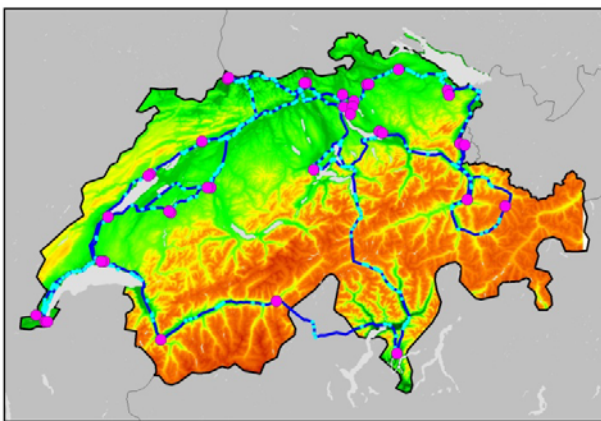


Abb.11: Konkretes, modelliertes ICT-Netz (Server - violette Punkte, Leitungen - blau, Brücken - hellblau)

3.2. Modell für das Schweizer Übertragungsnetz

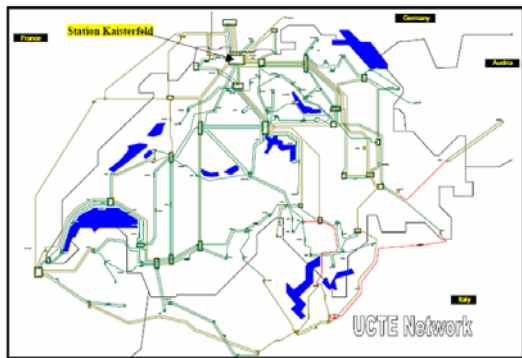
Für das Schweizer Übertragungsnetz lagen nach intensiven Recherchen genügend Informationen vor, um es physikalisch und geographisch modellieren zu können. Der physikalische Stromfluss und die Netzreaktion wurden mittels der Software *NEPLAN* modelliert, dabei wurde das gesamte *ENTSO-E* Netz (ehemals *UCTE* Netz) berücksichtigt. In Abb.12a ist das *NEPLAN* Modell schematisch dargestellt. Die geographische Repräsentanz wurde mit der Software *MapInfo* (GIS) erstellt (Abb.12b). Hierbei konnte nur der Schweizer Teil des *ENTSO-E* Netzes modelliert werden. Bei der Generierung der Schadensereignisse wurden auch nur direkte Ausfälle von Elementen des Schweizer Teils des *ENTSO-E* Netzes (bzw. einiger angrenzender Unterstationen) simuliert. Wichtige GIS-Daten wurden vom Bundesamt für Raumentwicklung (*ARE*) zur Verfügung gestellt. Für die Erdbebenrisikoschätzung wurden die geographische Lage der Anschlüsse der Übertragungsleitungen bzw. der Transformatoren benötigt, da dies die empfindlichen Elemente im Erdbebenfall sind.

¹ Das SWITCH Netz ist das internetbasierte Datennetz der Schweizer Universitäten und Hochschulen.

Im Gegensatz dazu sind die Hochspannungsleitungen kritische Elemente im Sturmfall. Deshalb wurden für das Wintersturmriskomodell die Leitungen diskretisiert, verschiedene Punkte einer Leitung können versagen. Die Funktionalität einer Leitung wurde weiterhin als ein Objekt behandelt.

Das Übertragungsnetz arbeitet übers Jahr nicht mit derselben Konfiguration, es muss zwischen Sommer und Winterbetrieb unterschieden werden. Deshalb wurden trotz des ungeplanten Mehraufwands Modelle für beide Varianten erstellt. Für die Netzlast wurde jeweils ein Snapshot des Netzbetriebes verwendet, der in etwa das 90% Fraktile der Netzlast darstellt.

Die Ergebnisse wurden in Teilen schon publiziert (s. Anhang, Publikationen, [a], [c]).



a)



b)

Abb.12: Übertragungsnetz: a) NEPLAN Schema für den Schweizer Teil des ENTSO-E Netzes, b) GIS-Modell für den Schweizer Teil des ENTSO-E Netzes

3.3. Modellierung der Reaktion des Übertragungsnetzes auf Ausfälle

Bei der Simulation des Stromflusses wurde auch „verstecktes Versagen“ („hidden failure“, s.[8]) modelliert. Dieses „versteckte Versagen“ ist als eine seltene, aber mögliche Reaktion eines Netzelements, die erkennbar wird, wenn ein benachbartes Netzelement infolge äusserer Einwirkungen versagt. Die Wahrscheinlichkeiten für das „versteckte Versagen“ wurden nach Bae et al. [3] und Chen et al. [8] geschätzt. Die Möglichkeit einer fehlerhaften Reaktion durch den Operateur wurde nach dem einfachen Modell von Williams [59] berücksichtigt. Im Stromflussmodell wurden die Überlastungen von Leitungen einbezogen und die Überspannung an Schienen angezeigt. Der Simulationsalgorithmus für das Stromnetz ist in Abb.13 dargestellt. Das direkte Versagen von Netzelementen infolge der natürlichen Einwirkung wurde immer als synchron angenommen, was besonders im Falle von Wintersturm konservativ ist. Ein Sturmereignis dauert mehrere Stunden bis Tage, ein synchroner Ausfall von Elementen ist eher unwahrscheinlich. Ein Operateur hat im Falle des synchronen Ausfalls weniger Handlungsspielraum für seine Reaktion und der indirekte Ausfall weiterer Elemente infolge Überlastungen ist wahrscheinlicher. Deshalb wird das Risiko durch den angenommenen synchronen Ausfall überschätzt. Andere Modellkomponenten könnten diesen Einfluss natürlich durch Unterschätzungen kompensieren.

Einige Ergebnisse wurden schon veröffentlicht (s. Abschn. Kommunikation, [a], [c]).

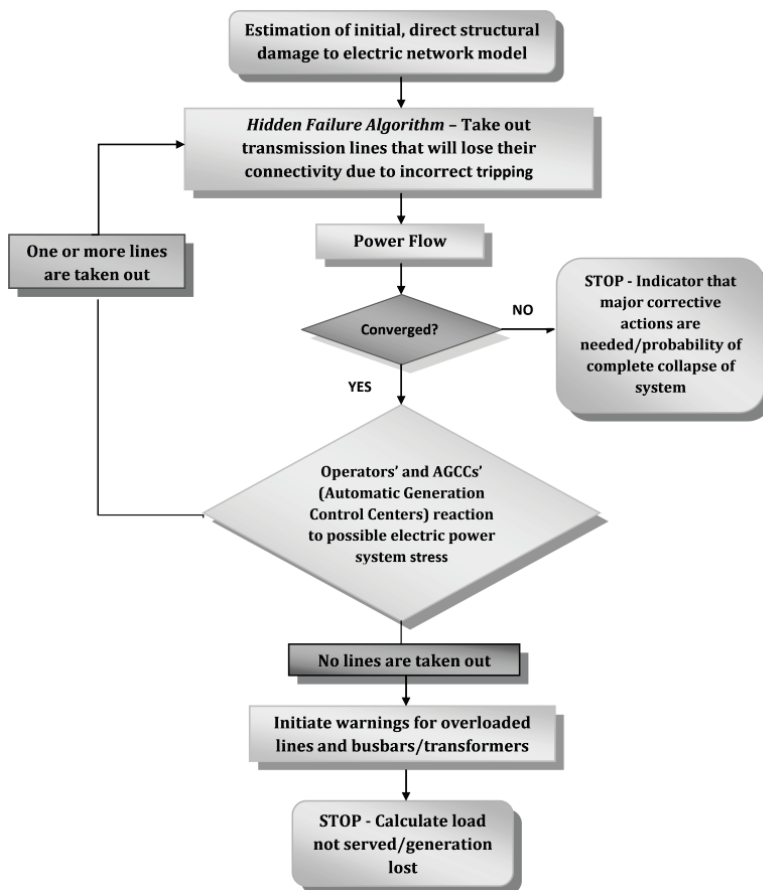


Abb.13: Berechnungsalgorithmus für die Simulation der Reaktion des Übertragungsnetzes

3.4. Modellierung von Interaktionen zwischen Infrastrukturnetzen

Ein wichtiges Augenmerk sollte in dem Projekt auf der Modellierung der Interaktion zwischen dem Stromnetz und ICT-Netzen liegen. Die Interaktionen konnten nur in Ansätzen berücksichtigt werden. Gründe dafür sind:

- die Existenz diverser ICT-Netzen (Telefon, Handynetz, verschiedene Datennetze, Internet) mit verschiedener Hard- und Software,
- das Fehlen detaillierter Informationen über die Netze, da die privaten Betreiber aus wirtschaftlichen und sicherheitstechnischen Gründen nicht an deren Weitergabe interessiert sind, und
- das Fehlen von anwendbaren Modellen für die einfache und konkrete Berücksichtigung von Interaktionen in Risikoanalysen.

Im LSA werden gegenwärtig unabhängig vom vorliegenden Projekt Methoden zur Erfassung von Interaktionen zwischen kritischen Infrastrukturnetzen entwickelt (s.[34]). Konkret wird ein Stromnetz und dessen SCADA-System modelliert. Schon die Berücksichtigung eines einzelnen Unterwerkes erfordert dabei komplexe Softwaretechniken.

4. Schätzung des Erdbeben- und Wintersturmriskos für die Infrastrukturnetze

4.1. Risikosimulationen und Kriterien der Ereignisgrösse

Unabhängig davon, ob das Erdbebenrisiko oder das Wintersturmrisiko geschätzt wurde, in Anlehnung an die Modellverknüpfungen in Abb.1 bzw. entsprechend Abb.2, erfolgt die Simulation eines Naturereignisses wie folgt:

1. Simulation des Ereignisses in Zeit und Raum
2. Bestimmen der Wahrscheinlichkeit des Versagens lokaler Netzelemente
3. Simulation des direkten Versagens der Netzelemente
4. Simulation/Berechnung des Antwortverhaltens des Netzes, einschließlich indirektem Versagen

Daraus ergibt sich die verbleibende bzw. eingeschränkte Funktionalität des Netzes für dieses simulierte Ereignis. Die Simulationsschritte wurden mit verschiedensten Modellen und Programmen durchgeführt wie *MapInfo*, *NEPLAN*, *Excel* oder selbst entwickelten *VB.net* Applikationen.

Für die Risikoschätzung wurden die Schadensereignisse anhand verschiedener Kriterien quantifiziert. Das prägnanteste Kriterium für das Antwortverhalten des Übertragungsnetzes ist die Anzahl an ausgefallenen Leitungen pro Ereignis. Für ein lokales Verteilungsnetz wäre die Anzahl von Haushalten, die von einem Stromausfall betroffen sind, ein gutes Kriterium. Aber das Übertragungsnetz ist nur indirekt mit den Haushalten verbunden. Das Kriterium des Lastabwurfes, wie es von Kessler [24] verwendet wurde, ist für unser Modell nicht so gut geeignet, unter anderem weil diese Ereignis mit einem gewissen Lastabwurf relative selten sind, seltener als der einfache Ausfall einer oder mehrerer Leitungen. Für das betrachtete ICT-Netz ist die Anzahl an ausgefallenen Servern und Verbindungen zwischen den Servern das Kriterium für die Grösse des Schadensereignisses. Der Versorgungsausfall für etwaige Nutzer konnte auch hier nicht direkt simuliert werden.

Bei der Interpretation der Ergebnisse sollte beachtet werden, dass die Schätzungen umso genauer sind, je häufiger die Ereignisse bei einer Simulation auftraten. Dies ist der Grund, warum hier vor allem absolute, simulierte Häufigkeiten von Ereignissen dargestellt werden anstatt der jährlichen Häufigkeiten. Die Vertrauensbereiche der Schätzungen könnten entsprechend den Schätzungen für eine Poisson Verteilung konstruiert werden.

4.2. Analyse des Erdbebenrisikos für ein ICT-Netz

Das geschätzte Erdbebenrisiko des modellierten ICT-Netzes ist relativ gering. Die alte Variante des Netzes mit 37 Servern beschreibt in etwa den Zustand von im Jahre 2007. Die neue Variante beschreibt den Zustand im Jahre 2009-2010, die Anzahl der Server ist auf über 60 angewachsen. Dieser Unterschied macht sich in der Häufigkeit versagter Server bemerkbar (Abb.14b), ist aber bezogen auf die Gesamtzahl der Server nicht relevant, wie in Abb.14c zu sehen ist. Die Risikokurve für die Verbindungen (Leitungen) im Netz folgt von Anfang an einer Exponentialfunktion (Abb.14a) im Gegensatz zum Ausfallhäufigkeit der Server bzw. der Server und Verbindungen. Das Erdbebenrisiko der einzelnen Netzelemente folgt der Erdbebengefährdung (Vergleiche Abb.3c und 15). Das Erdbebenrisiko wurde auch anhand eines Graphenmodells erfasst. Verschiedene Parameter eines Graphen werden dafür in Abb.16 verwendet. Bemerkenswert ist der „heavy tail“ Charakter der charakteristischen Pfadlänge. In seltenen Fällen der Simulationen für 100.000x1 Jahr würde sich das modellierte Netz teilen (Abb.16c). Allerdings ist das reale Netz Teil des europäischen Netzes. Über die Netze der benachbarten Länder wären die Teile des Schweizer Netzes auch in diesen Fällen miteinander verbunden.

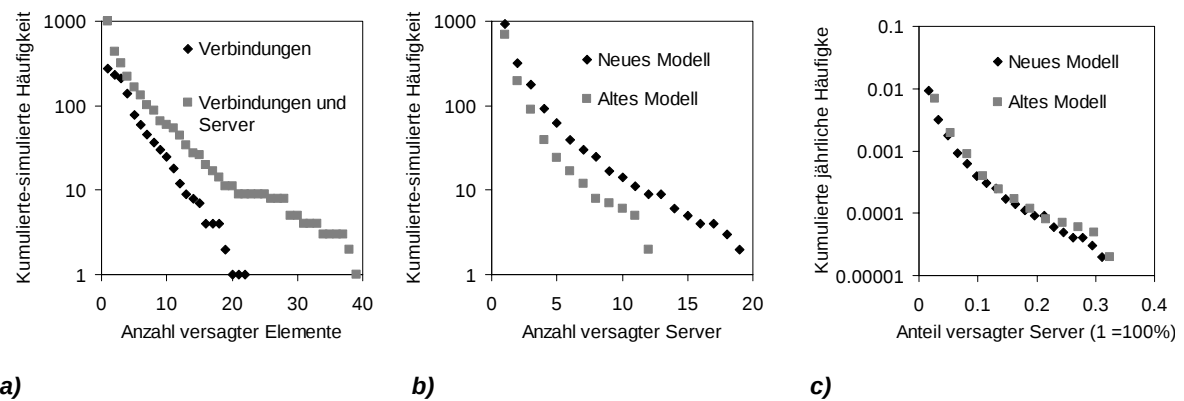


Abb.14: Erdbebenrisiko eines ICT-Netzes als kumulierte Ereignishäufigkeit : a) absolute Häufigkeit zur Anzahl versagter Verbindungen bzw. aller Netzelemente – neues Modell, b) absolute Häufigkeit versagter Server – altes und neues Modell, c) jährliche Häufigkeit von Ereignissen mit Serverversagen



Abb.15: Relatives Erdbebenrisiko einzelner Komponenten - altes Netz (hellblau - gering, dunkelblau - hohe Häufigkeit, Linien - Kabel, Punkte – Server)

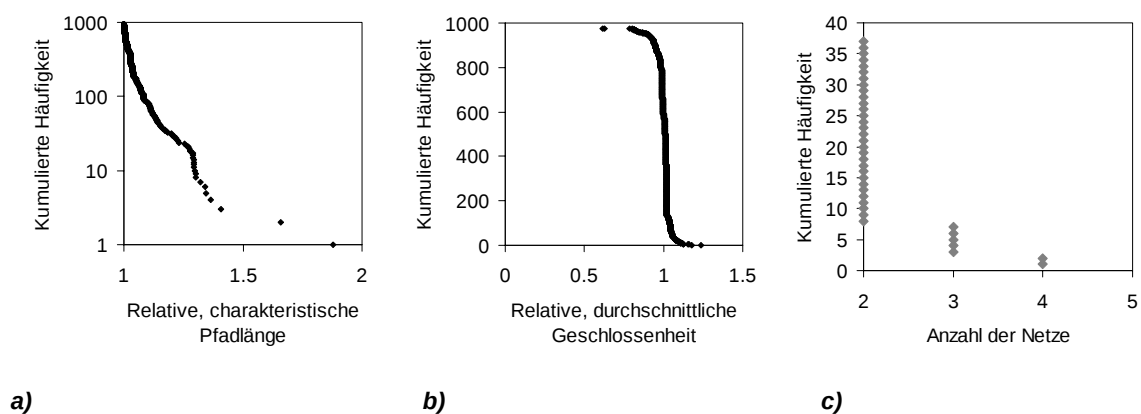


Abb.16: Erdbebenrisiko eines ICT-Netzes, beschreiben mit der Netzmetrik, relativ zum ungeschädigten Netz: a) charakteristische Pfadlänge, b) Geschlossenheit, c) Teilung des Netzes

4.3. Analyse des Erdbebenrisikos für das Schweizer Übertragungsnetz

Die Analyse des Erdbebenrisikos wurde für den Netzbetrieb Sommer und Winter und für die zwei Varianten der Transformation der Intensität in die PGA (Abb.4) durchgeführt, der künstliche Erdbebenkatalog für 100.000x1Jahr wurde berücksichtigt. Das heisst, die simulierten Häufigkeiten dividiert durch 100.000

ergeben eine Schätzung der jährlichen Häufigkeit. Die Genauigkeit der Schätzung steigt mit der Häufigkeit und ist ab 10 simulierten Ereignissen in 100.000x1 Jahr-Simulationen (jährliche Häufigkeit von 10^{-4}) genau genug. Diese Genauigkeit bezieht sich aber nur auf die Art der Schätzung, nicht auf die Genauigkeit der Gefährdungs- und Empfindlichkeitsmodelle.

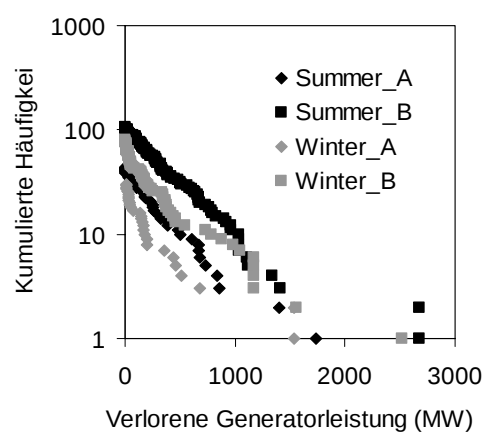
Die kumulierten Häufigkeiten der Ereignisse nach verschiedenen Kriterien des Risikos sind in Abb.17 dargestellt. Einzelne Leitungen fallen am häufigsten aus. Die Ergebnisse für das Sommernetz unterscheiden sich nicht sehr von denen für das Winternetz. Die Transformation der makroseismischen Intensität in die PGA hat einen viel größeren Einfluss. Nach den durchgeführten Simulationen beträgt die Wiederkehrperiode für Erdbebenereignisse, welche mindestens den Ausfall einer Leitung verursachen, etwa 100 Jahren. Diese konservative Schätzung steht nicht im Widerspruch zu den Beobachtungen (keine Ausfälle in den letzten Dekaden). Die Ereignisbeschreibung „isolierter Knoten“ bezieht sich auf die Isolation von Unterwerkschienen und tritt nach der konservativen Schätzung etwa alle 500 Jahre auf. Solche Ereignisse werden wahrscheinlich auch mit Versorgungsausfällen in der Schweiz verbunden sein. Allerdings bleibt das *ENTSO-E* Netz auch in Fällen einer großen Anzahl ausgefallener Netzelemente stabil, in nur sehr wenigen Fällen gab es keine Konvergenz im *NEPLAN* Modell.

Das Risiko einzelner Netzelemente folgt wie erwartet der lokalen Erdbebengefährdung mit Konzentrationen im Raum Basel und im Wallis (s. Abb.18). Eine Sensibilitätsanalyse der Netzparameter für „verstecktes Versagen“ und Operatorfehler weist die Robustheit diesbezüglich nach. Die Anzahl an ausgefallenen Leitungen (Abb.19) wird nicht wesentlich davon beeinflusst. Der Einfluss der Versagensfunktion kann über die Varianten der Transformation interpretiert werden und ist groß. Gleiches gilt für den Einfluss des Gefährdungsmodells. Das hier geschätzte Risiko sollte nicht sehr vom realen Risiko abweichen, da für Elemente des Schweizer Stromnetzes (nicht nur des Übertragungsnetzes) für die letzten Dekaden keine Ausfälle infolge von Erdbeben dokumentiert sind.

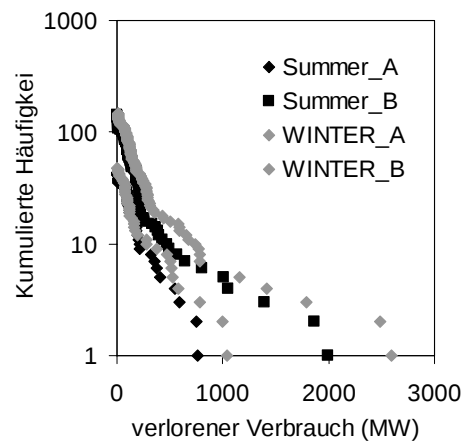
Die Sicherheitsabschaltungen der Kernkraftwerke im Falle eines Erdbebens wurden in den beschriebenen Schätzungen nicht berücksichtigt. Hierfür wurden separate Modellierungen und Berechnungen durchgeführt. Das maßgebende Beben für eine Sicherheitsabschaltung ist die lokale Einwirkung mit einer Wiederkehrperiode von 475 Jahren. Entsprechend dem hier verwendeten Modell für die Erdbebengefährdung liegen die lokalen makroseismischen Intensitäten der Schweizer Reaktoren für eine Wiederkehrperiode von 475 Jahren bei etwa 6.6 (EMS, nach Grünthal 1998). Die Wahrscheinlichkeit ist relativ groß, dass im Falle eines Erdbebens ein oder mehrerer Kernkraftwerke automatisch abgeschaltet werden (s. Abb.19c), ohne dass andere Elemente ausfallen (Leitungen, Transformatoren). Ursache ist die geringe Ausfallwahrscheinlichkeit der Netzelemente für Intensitäten im Bereich 6.6-7.0 (s. Abb.4 und 10b).

Aufgrund der relativ nahen geographischen Lage einiger Kernkraftwerke zueinander, ist die Häufigkeit einer simultanen Sicherheitsabschaltung mehrerer Kernkraftwerke relativ groß. Trotzdem war die Stabilität des gesamten *ENTSO-E* Netzes nur in einem Fall der Erdbebensimulationen mit Kernkraftwerken zusätzlich zu den instabilen Simulationen ohne Kernkraftwerke beeinträchtigt.

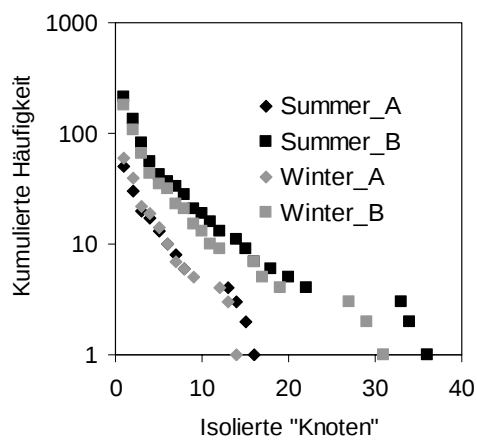
Da die 475-Jahre-Einwirkung auch zur Auslegung/Bemessung von Anlagen und Einrichtungen im Kraftwerk verwendet wird, ist diese, wie alle Bemessungseinwirkungen, eher zu hoch als zu niedrig geschätzt. Deshalb ist die reale Wiederkehrperiode der Sicherheitsabschaltung je Kernkraftwerk aufgrund eines Erdbebens wahrscheinlich größer als 475 Jahre.



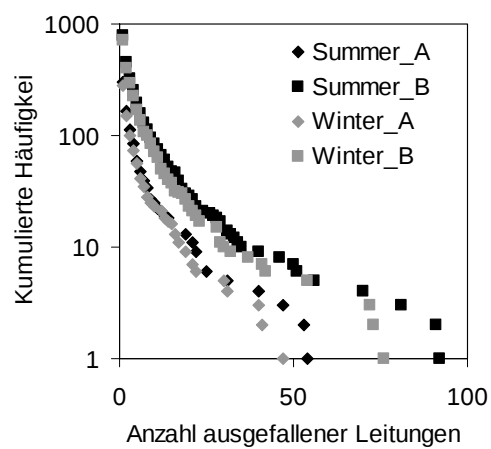
a)



b)



c)



d)

Abb.17: Erdbebenrisiko des Übertragungsnetzes: a) Abkopplung modellierter Generatorleistung, b) Abkopplung modellierten Verbrauchs, c) isolierte „Knoten“, d) Ausfall von Leitungen

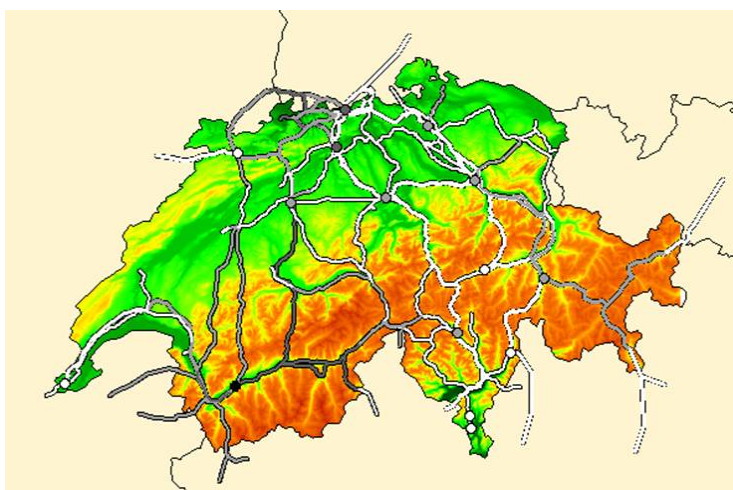
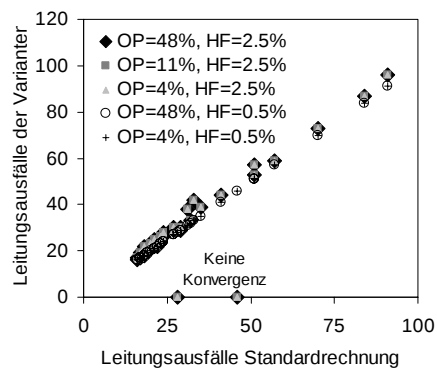
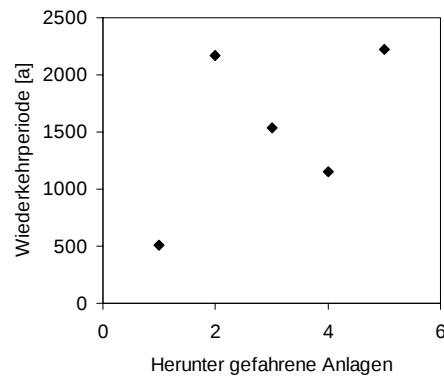


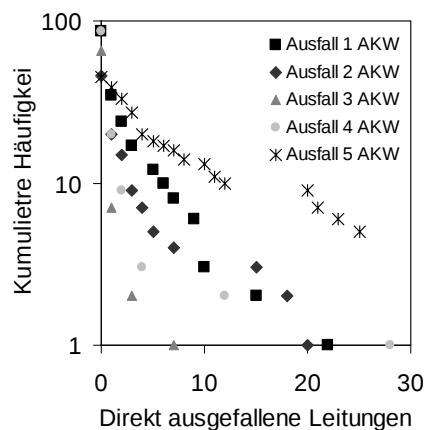
Abb.18: Relative Häufigkeit des Versagens der Elemente infolge eines Erdbebens (Linien – Leitungen, Punkte – Trafos, weiß – geringe Häufigkeit, schwarz – hohe Häufigkeit)



a)



b)



c)

Abb.19: Weitere Berechnungen zum Erdbebenrisiko: a) Sensitivitätsanalyse (OP – Wahrscheinlichkeit für Fehler des Operators, HF – Wahrscheinlichkeit für „hidden failure“), b) Geschätzte Wiederkehrperiode von Sicherheitsabschaltungen für den Erdbebenfall (pro Kernkraftwerk alle 475 Jahre), c) Kumulierte Häufigkeit direkt ausgefallener Leitungen zur Anzahl an Sicherheitsabschaltungen von Kernkraftwerken (Netzvariante Sommer, Transformation A, s.Abb.4)

Bezüglich der verwendeten Snapshots können die Ergebnisse als relativ konservativ interpretiert werden. Theoretisch ist es möglich, für jedweden Zustand des Netzes eine Risikokurve zu ermitteln. Die Risikokurve des gesamten Systems wäre dann eine Mittelung aller Risikokurven im Sinne einer gemischten Verteilung. Da die verwendeten Snapshots einen größeren Netzstress als 90% aller Situationen beinhaltet, ist die Wahrscheinlichkeit groß, dass eine gemittelte Risikokurven aller Netzsituationen unter den hier berechneten liegt. Nur im Bereich sehr seltener Ereignisse könnte das reale Risiko über dem geschätzten liegen. Auf die Erstellung von Vertrauensbereichen wurde hier verzichtet, aber diese würden den Schätzungen für eine Poisson-Verteilung folgen.

Teile der Ergebnisse wurden bereits veröffentlicht (s. Anhang, Publikationen, [a], [c]).

4.4. Modell und Analyse des Erdbebenrisikos eines ICT-Netzes in Interaktion mit Ausfällen des Stromnetzes

Für die Berücksichtigung möglicher Interaktion wurde die Abhängigkeit des bereits modellierten ICT-Netzes von der Stromversorgung über die örtliche Nähe zu einer Unterstation modelliert. Ein Beispiel wird in Abb.20 gezeigt. Würden die Netzserver (ICT-Knoten) nur von der externen Stromversorgung abhängen, dann wäre das Erdbebenrisiko des ICT-Netzes etwa 10% größer als im Falle der Unabhängigkeit (s. Abb.21). Eine Notstromversorgung kann diese Abhängigkeit deutlich reduzieren, auch wenn diese einer bedingten Ausfallwahrscheinlichkeit unterliegt.

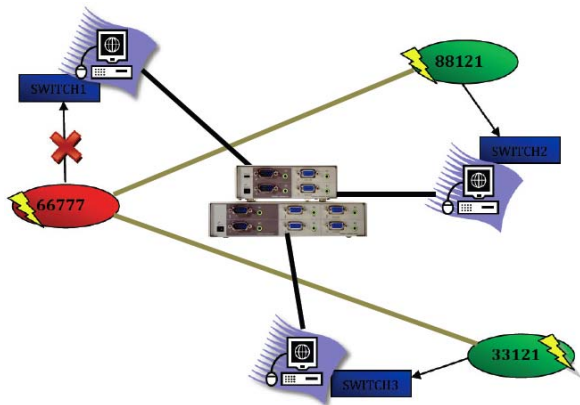


Abb.20: Stromnetz – ICT-Netz Beispiel mit Unterstationen 66777, 88121 und 33121; Station 66777 ist isoliert, der ICT-Knoten in dessen Nähe verliert die externe Stromversorgung

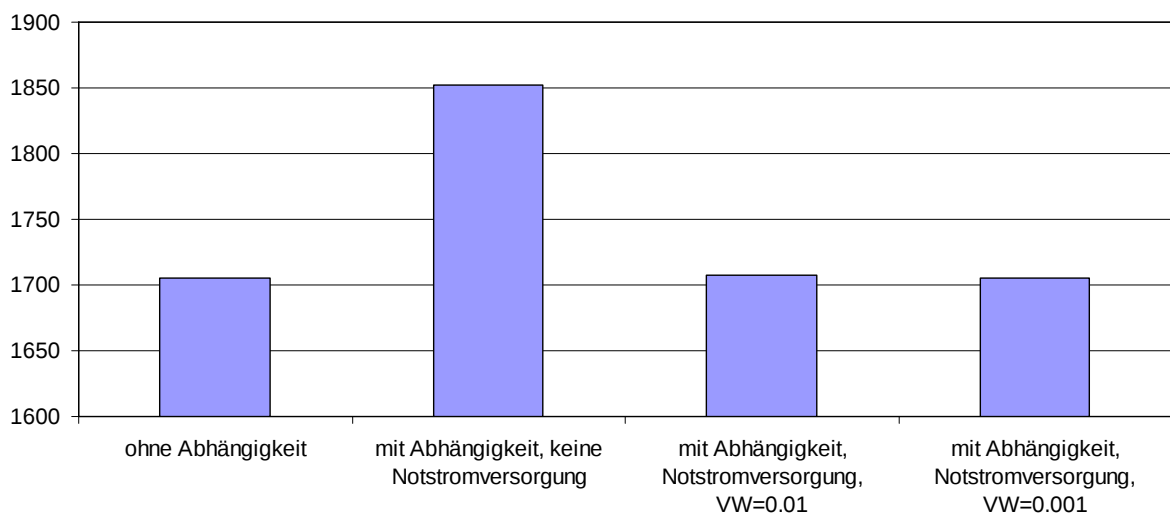


Abb.21: Summe ausgefallener und isolierter Knoten (Server) des ICT-Netzes (VW – Versagenswahrscheinlichkeit)

4.5. Analyse des Wintersturmrisikos für das Schweizer Übertragungsnetz

Das Sturmrisiko des Schweizer Übertragungsnetzes wurde wie das Erdbebenrisiko mittels der Simulation künstlicher Ereignisse geschätzt. Allerdings wurde nur ein Katalog von 1000x1Jahr generiert. Die Versagensfunktion wird wie oben beschrieben mit der kumulierten Funktion der Weibull Verteilung modelliert, die Potenz ist 2 (s. [41] und [60]), alternative wird auch die Potenz 3 betrachtet. Skaliert wurden die Funktionen so, dass der Erwartungswert der Anzahl der durch Wintersturm

ausgefallenen Übertragungsleitungen für das generierte Gefährdungsmodell bei 4 liegt. Diese Skalierung gilt auch nur für die gewählte Diskretisierung der Leitungen durch einzelne Punkte (Abstand etwa 1200m). Für die lokale Anpassung der Gefährdung wurden zwei Varianten gewählt. In der einen Variante wird von einer Einheitsverteilung ausgegangen, die in etwa der durchschnittlichen Verteilung der beobachteten Windstationen entspricht. In der anderen Variante wurde die lokale Anpassungsfunktion des Gefährdungsmodells verwendet, allerdings wurden Restriktionen bezüglich der Extrapolation vorgegeben. Beide Varianten der lokalen Anpassung führen zu ähnlichen Ergebnissen der Risikoschätzung (s. Abb.22).

Das Modell ist bezüglich der lokalen Anpassung der Sturmereignisse robust. Allerdings hat die Potenz der Versagensfunktionen einen erheblichen Einfluss auf die Risikoschätzung. Die Variante mit Potenz 2 scheint realistischer zu sein (s. [41] und [60]). Bemerkenswert ist die Häufigkeit der Leitungsausfälle pro Ereignis der Winterstürme im Vergleich mit der Häufigkeit durch Erdbebeneinwirkungen. Kleine Ereignisse mit wenigen Ausfällen werden eher durch Wintersturm verursacht, größere Ereignisse eher durch Erdbeben. Durch Winterstürme werden auch seltener Schienen der Unterwerke isoliert. Bei der Simulation von 1000x1 Wintersturmjahr wurden je nach Variante 10-22 Ereignisse mit einem und 9-25 Ereignisse mit zwei isolierten „Knoten“ erzeugt.

Die Schätzungen des Wintersturmriskos sind konservativ, da sich die empirische Basis für den angesetzten Erwartungswert der Anzahl ausgefallener Leitungen auf das ganze Jahr bezieht und nicht nur auf die Winterstursaison. Auch wurde der Leitungsausfall je Ereignis simultan simuliert, obwohl ein Wintersturm über Stunden bis Tage stattfindet.

Die Resultate wurden teilweise schon publiziert (s. Abschn. Kommunikation, [c]).

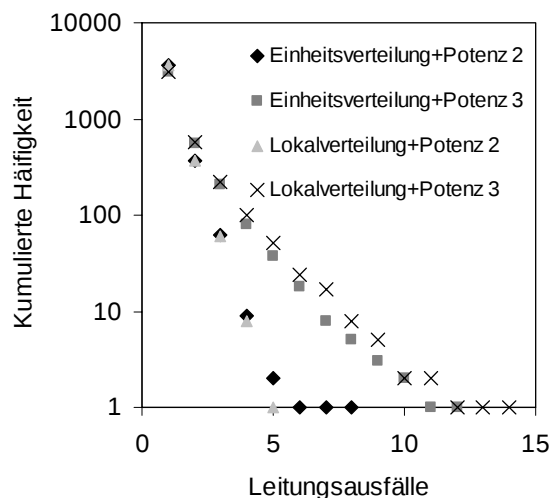


Abb.22: Wintersturmrisiko, kumulierte Häufigkeit als Ergebnis der Simulationen

5. Zusätzliche Untersuchungen und Entwicklungen

5.1. Theoretische Arbeiten zu Netzwerken

In Zusammenarbeit mit anderen Mitarbeitern des LSA 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 [35] mit dem Pearsons Korrelationskoeffizienten ρ_P quantifiziert. Da die Anwendbarkeit des

Korrelationskoeffizienten von Pearson begrenzt ist und mit Kendall-Gibsons τ_b (s.[23]) 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 Assoziationsmaßes im Falle gekappter Zufallsverteilung mit einem "heavy tail". Kendall-Gibbons ist das bessere Maß, da es von $h_{\max}$ weniger beeinflusst wird. Beispiele dafür sind in Abb.23 dargestellt.

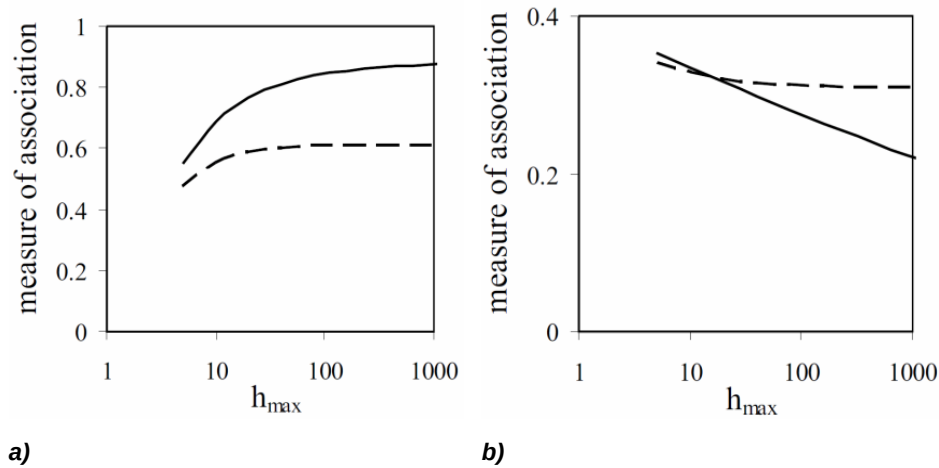


Abb.23: Einfluss von $h_{\max}$ auf Pearsons ρ_P (durchgehende Linie) und Kedall-Gibon's τ_b (unterbrochene Linie: a) Beispiel einer Zeta Verteilung, b) Beispiel einer generalisierten Zipf Verteilung

Außerdem wurde die Modellierung von Abhängigkeitsstrukturen in Netzwerken weiterentwickelt. Dafür wurden Copulas in die Netzwerktheorie eingeführt, die in der klassischen Statistik für bivariate, kontinuierliche Zufallsvariablen verwendet werden (s. [29]). Ein Beispiel für eine solche Abhängigkeitsstruktur wird in Abb.24 gezeigt. Die Achsen bezeichnen jeweils die Anzahl von Verbindungen pro Ende einer Verbindung.

Defizite in der Simulationstechnik für Netzwerke wurde durch die Herleitung eines probabilistischen Verfahrens beseitigt. Ein Vergleich zwischen einer klassischen Monte Carle Simulation einfacher, bivariater Verteilungen mit einem Netzwerk ist in Abb.25 zu sehen. Die Simulationen für die Netzwerke streuen stärker, da mehr Bedingungen eingehalten werden müssen als bei den einfachen, bivariaten Verteilungen. Die Übereinstimmung der im Durchschnitt simulierten Werte für $P(h,h')$ mit den ursprünglich festgelegten (Abb.25a) zeigt, dass die Methode funktioniert.

Diese Ergebnisse wurden ebenfalls schon publiziert (s. Abschn. Kommunikation, [b] und [f]).

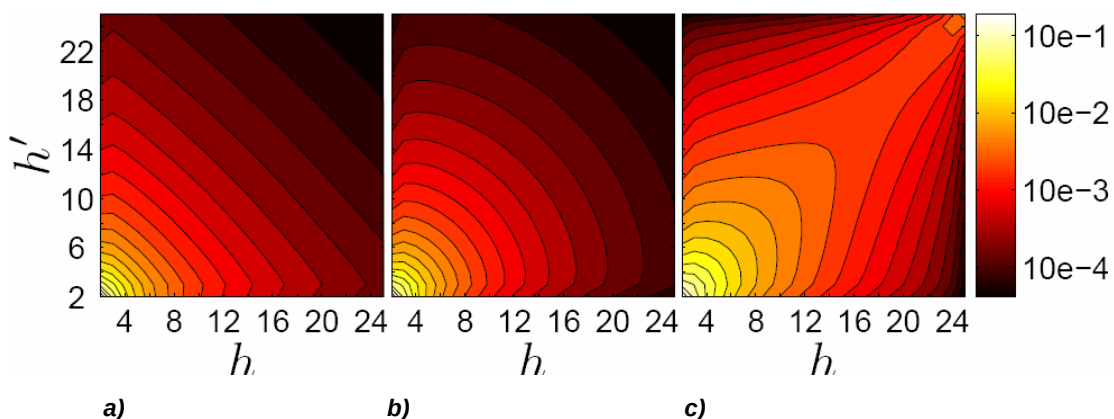


Abb.24: Beispiele für Copula generierte Wahrscheinlichkeitsmatrizen (aus: Anhang, Publikationen, [f])

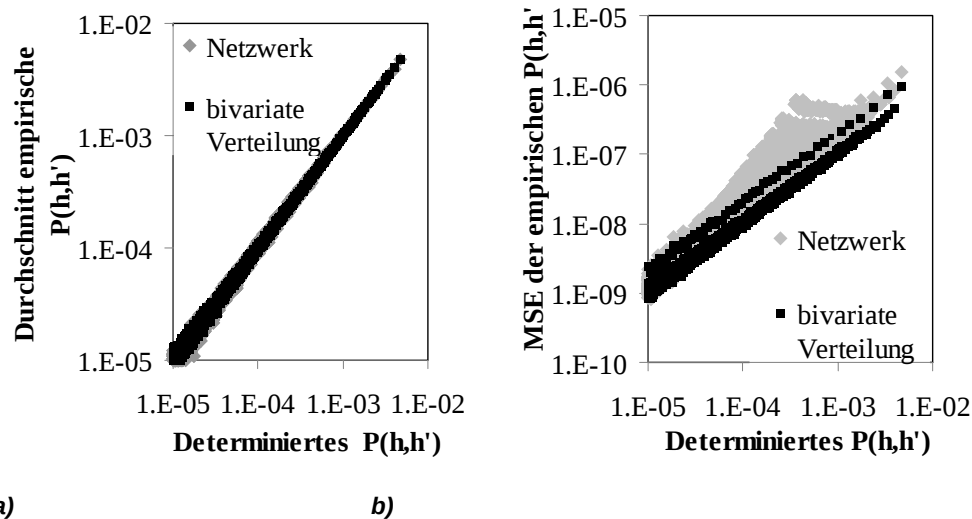


Abb.25: Vergleich der Simulation von Netzwerken und einfacher, bivariater, diskreter Verteilungen: a) determinierter Anteil und Durchschnitt der simulierten Anteile $P(h,h')$, b) „mean squared error“ (MSE) in Relation zum determinierten Anteil $P(h,h')$

5.2. Empfindlichkeit des Stromnetzes gegenüber zielgerichteten, menschlichen Einwirkungen

Zusätzlich zu den geplanten Arbeiten wurde eine hybride Methode zur Quantifizierung der Empfindlichkeit des Übertragungsnetzes gegenüber böswilliger Einwirkungen entwickelt. Ansätze aus der Graphentheorie wurden dabei ebenso verwendet wie die klassische Stromflussanalyse. In der Abb.26 ist das Schweizer Übertragungsnetz als Graphenmodell dargestellt. Es wurden 121 Einwirkungsszenarien durchgespielt und so die empfindlichsten Netzelemente identifiziert. Es wurden Untersuchungen für rein zufällige Attacks und zielgerichtete Attacks durchgeführt. Die Ergebnisse wurden teilweise schon publiziert (s. Abschn. Kommunikation, [e]).

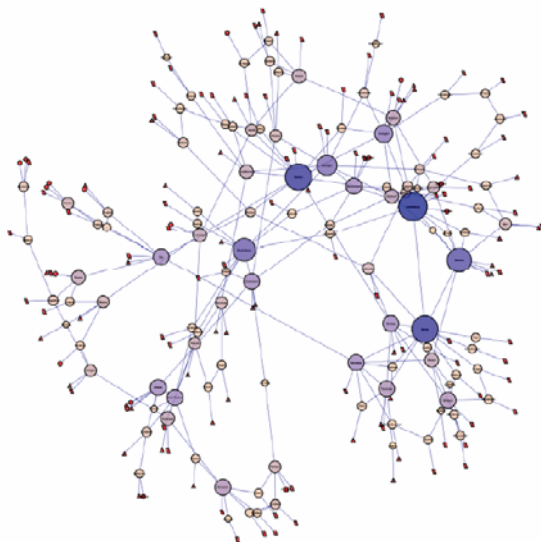


Abb.26: Das Schweizer Übertragungsnetz als Graph (aus: Anhang, Publikationen, [e])

Diskussion und Bewertung der Ergebnisse

Das Projektziel als solches, Strom- und ICT-Netze „...durchgängig mit probabilistischen Methoden umfassend zu analysieren...“, wurde voll erreicht. Es konnten Risikokurven des Übertragungsnetzes für die Gefährdung aus Erdbeben und Wintersturm geschätzt werden. Für ein ICT-Netz wurden Risikokurven für den Erdbebenfall unter Berücksichtigung der Netzentwicklung ermittelt. Dies schließt die Erfüllung der Meilensteine ein, so wie sie in der Tab.2 gelistet sind. Hinzu kommen Forschungsbeiträge im Rahmen des Projektes, die so nicht geplant waren.

Tab.2: Erfüllung der Meilensteine des Projektes

Nr.	Zwischenschritte bzw. Meilensteine	Erstellte Modelle, durchgeführte Analysen
1	Vorbereitungen	Erfüllt
2.1	Netzmodellierung Strom	- GIS-Modell - Stromflussmodell
2.2	Gefährdungsmodell Erdbeben	- Adaption eines vorhandenen, probabilistischen Modells
2.3	Schadensfunktionen Erdbeben	- theoretische Untersuchungen und Diskussionen - Recherche und Wahl publizierter, geeigneter Funktionen für das Stromnetz - Konstruktion plausibler Funktionen für ein ICT-Netz
3	Netzmodellierung ICT	- GIS-Modell - Netzwerkmodelle - nur für ein Datennetz realisiert
4.1	Gefährdungsmodell Sturm	- es waren keine adaptierbaren Modelle vorhanden - Entwicklung eines neuen, probabilistischen Ansatzes für Winterstürme in Europa - Erstellung eines konkreten Modells für die Schweiz
4.2	Schadensfunktionen Sturm	- theoretische Untersuchungen und Diskussionen - Recherche publizierter Funktionen - Formulierung einer geeigneten Funktion - Parameterschätzung für das Stromnetz anhand von Beobachtungen - keine Funktionen für ein ICT-Netz formuliert/gewählt, da keine Daten oder Publikationen vorhanden sind
4.3	Risikoanalyse Erdbeben für Strom und ICT getrennt	- Risikoanalyse für das Stromnetz-Erdbeben - Risikoanalyse für das Stromnetz-Wintersturm - Risikoanalyse für ein ICT-Netz-Erdbeben - keine Risikoanalyse für ein ICT-Netz-Wintersturm
5	Modellierung der gekoppelten Systeme Strom und ICT	- Recherche von Modellen zur Interaktion - Untersuchung und Diskussion von Möglichkeiten der Modellierung von Interaktionen - Entwicklung eines einfachen Modells zur Berücksichtigung von Interaktionen
6	Risikoanalyse Erdbeben und Sturm für die gekoppelten Netze	- Simulationen einiger Szenarien zur Beeinflussung eines ICT-Netzes durch Erdbebenausfälle des Stromübertragungsnetzes

Die durchgeführten Modellierungen und entwickelten Ansätze sind aus wissenschaftlicher Sicht ein Erfolg. Hervorgehoben werden hier

- die Modellierung des Erdbebenrisikos des Übertragungsnetzes, welche weit realistischer ist als die in jüngsten Publikationen (Dueñas-Osorio et al. 2009) bezüglich Gefährdungsmodellierung und der Netzreaktion einschließlich physikalischem Stromfluss, „hidden failures“ und Operatorfehler,

- die völlige Neuentwicklung eines probabilistischen Gefährdungsmodells für Winterstürme,
- dessen Anwendung in einer Modellierung des Wintersturmriskos des Übertragungsnetzes, für das bisher keine vergleichbare Modellierung publiziert wurde und
- die Berücksichtigung verschiedenster probabilistischer und statistischer Ansätze und Methoden in den Modellierungen.

Schlussfolgerungen

Praktische Interpretation der Ergebnisse

Die Risiko des Schweizer Übertragungsnetzes bezüglich Erdbeben und Sturm kann als gering eingestuft werden. Dabei ist der Verlauf der Risikokurven verschieden. Der Ausfall von Elementen des Übertragungsnetzes ist nicht selten, aber die Wahrscheinlichkeit, dass Elemente während eines Sturms in nennenswertem Umfang ausfallen, ist gering. Demgegenüber ist die Häufigkeit, dass überhaupt ein Netzelement infolge eines Erdbebens ausfällt, viel kleiner als im Falle des Wintersturms. Aber Ereignisse mit einer größeren Anzahl ausgefallener Elemente werden eher von einem Erdbeben verursacht als durch einen Wintersturm. Ein einzelnes Element fällt nach unserer konservativen Schätzung etwa alle 100 Jahre aus. Größere Ausfälle einschliesslich der Isolation eines Unterwerkes und den damit verbundenen Versorgungsausfällen sind etwa alle 500 Jahre zu erwarten. Die Stabilität des gesamten *ENTSO-E* Netzes ist höchstens alle paar tausend bis zehntausend Jahre gefährdet. Die Schätzung hierfür ist aufgrund der wenigen simulierten Ereignisse, bei denen die Instabilität auftrat, am unsichersten. Auch konnten nicht alle physikalischen Sachverhalte in unserem Stromflussmodell berücksichtigt werden. Die Differenzialgleichungen des Stromflusses wurden im *NEPLAN* Modell nur für die verschiedenen Netzzustände gelöst, nicht für die zeitlich Entwicklung von einem Zustand zum anderen. Die reale Häufigkeit von Instabilitäten für das gesamte *ENTSO-E* Netz liegt unter diesem Gesichtspunkt höher als die hier geschätzten, sofern alle anderen Modellteile realistisch sind. Diese Einschränkung ändert aber nichts an der Tatsache, dass die im vorliegenden Projekt durchgeführte Stromflussmodellierung realistischer ist als die in vorangegangenen Risikoanalysen (s. [11], [12], [13], [52], [53], [57]). Weiterhin ist festzustellen, dass die empfindlichsten Netzelemente bezüglich der Erdbebeneinwirkung die Transformatoren sind. Diese Aussagen stehen in keinem Widerspruch zu den Beobachtungen der letzten Jahrzehnte, auch sind die Schätzungen eher konservativ als zu optimistisch. Die Aussage bezüglich Wintersturms ist allerdings begrenzt durch die ausschließliche Berücksichtigung des Schweizer Teils des gesamten *ENTSO-E* Netzes. Ein Wintersturm betrifft in aller Regel weitere Teile des europäischen Übertragungsnetzes, Ausfälle in anderen Regionen wurden bei der Netzsimulation nicht berücksichtigt.

Eine einfache Übertragung der Ergebnisse auf andere Stromnetze wie Verteilernetze in der Schweiz ist nicht angeraten. Deren Elemente liegen geographisch viel dichter beieinander und haben voraussichtlich eine andere Empfindlichkeit gegenüber der Erdbeben- und Windeinwirkungen.

Eine Festlegung des akzeptablen Risikos für das Schweizer Übertragungsnetz war nicht Gegenstand des Projekts.

Empfehlungen für weitere Untersuchungen

Nach Abschluss des Projektes liegen folgende weitergehende Untersuchungen und Entwicklungen von Modellierungen nahe:

- Modellierung des Risikos von Verteilungsnetzen bezüglich großflächiger Naturkatastrophen,
- Modellierung des gesamten *ENTSO-E* Netzes bezüglich Wintersturm in Europa,
- Modellierung anderer Teile des *ENTSO-E* Netzes bezüglich Erdbeben,
- Datenerhebung zur besseren Parameterschätzung und Prüfung von Modellen (Ausfälle von Elementen infolge von Natureinwirkungen),
- Validierung der Versagensfunktionen (Empfindlichkeitsfunktionen),
- Weiterentwicklung des probabilistischen Wintersturmmodells für eine Anwendung auf ganz Europa,
- Modellierung/Einbeziehung weiterer Naturgefahren wie Gewitterstürme und Lawinen,
- Verbesserung des Stromflussmodells,
- Weitergehende Untersuchungen und Modellierungen von ICT-Netzen und
- Entwicklung von Modellen zur Berücksichtigung von Interaktionen.

Die ersten Punkte sind die klassische Ausdehnung von Modellierungen in kleinere und größere Maßstäbe bzw. eine Verlagerung des Untersuchungsgebietes auf andere Regionen. Für die Evaluierung der Sicherheit des europäischen Übertragungsnetzes wird hier die Modellierung des Wintersturmriskos empfohlen.

Die Modellierung von Interaktionen zwischen Infrastrukturnetzen erfordert aus unserer Sicht noch eine breite Grundlagenforschung.

Unabhängig von der Durchführung weiterer wissenschaftlicher Projekte liegen mit den Ergebnissen dieses Projekt sehr pragmatische Ansätze vor, mit denen Betreiber das Ausfallrisiko ihrer Stromnetze quantifizieren können. Wir hoffen sehr, dass unsere Methoden und Modelle praktische Anwendung finden.

Symbolverzeichnis

P	Wahrscheinlichkeit
$Y(t)$	Zufallsfeld mit Zufallsvariable Y und Koordinatenvektor t
$W(t)$	Gaussfeld (Zufallsfeld) mit Zufallsvariable Y und Koordinatenvektor t
$v(t)$	Abnahmefunktion
$\sigma(t)$	Anpassungsfunktion, hängt von Koordinaten t ab (Ort)
$\mu(t)$	Anpassungsfunktion, hängt von Koordinaten t ab (Ort)
X	Sturmmagnitude, Zufallsvariable
$Z(t)$	Feld zufälliger Maxima
I	makroseismische Intensität
I_0	Epizentralintensität
PGA	Spitzenbeobdenbeschleunigung (peak ground acceleration)
τ	Assoziationsmass für kontinuierliche Zufallsvariablen
τ_b	Assoziationsmass für diskrete Zufallsvariablen

Referenzen

- [1] ABB Communications, 2008. *Compact switchgear brings peace of mind in Mexican earthquake zone*.
<http://www.abb.com/cawp/seitp202/fbfb9610fdf33c22c12573b700535663.aspx>.
- [2] Anagnos, T., 1997. *Development of an electrical substation equipment performance database for evaluation of equipment fragilities*. Final report for PG&E and Peer, San Jose State University.
- [3] Bae, K., Thorp, J.S., 1999. A stochastic study of hidden failures in power system protection. *Decision support system* 24: 259-268.
- [4] Barben, R., 2010. *Vulnerability Assessment of Electric Power Supply under Extreme Weather Conditions*. Thesis, LASEN, EPFL.
- [5] Bastami, M., 2008. Seismic Assessment of Medium and High Voltage Power Substation Equipments. *In proceedings of 14WCEE*.
- [6] Bin, S., Koval, D., Shen, S., 1999. Modelling Extreme-Weather-Related Transmission Line Outage. *In: Proceedings of the 1999 IEEE Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering*.
- [7] Broström, A., 2007. *Ice Storm Modelling in Transmission System Reliability Calculations*. centiate thesis, Stockholm: Electric Power Systems.
- [8] Chen, J., Thorp, J.S., Dobson, I., 2005. Cascading dynamics and mitigation in power system disturbances via hidden failure model. *Electrical Power and Energy Systems* 27: 318-326.
- [9] Della-Marta, P., Mathis, H., Frei, C., Liniger, M., Kleinn, J., 2009. The return period of wind storms over Europe. *Int. J. Climatol.* 29: 437-459.
- [10] Dudenhoeffer, D., Hartley, S., Perman, M., 2006. *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.
- [11] Dueñas-Osorio, L., Craig, J.I. and Goodno, B.J., 2004. *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.
- [12] Dueñas-Osorio, L., Craig, J.I. and Goodno, B.J., 2007. Seismic response of critical interdependent networks. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics* 36:285-306.
- [13] Dueñas-Osorio, L., Srivishnu, M.V. 2009. Cascading failures in complex infrastructure systems. *Structural Safety* 31: 157-167.
- [14] Environmental News, 2007. *Japan, UN, to Probe Earthquake Damage at Nuclear Power Plant*. <http://www.ens-newswire.com/ens/jul2007/2007-07-24-01.asp>.
- [15] Fahrmaier, L., 2007. *Lebensdauer- und Ereignisanalyse, Vorlesungsskript SS07*. Institut für Statistik, Ludwig-Maxemilians-Universität München.
- [16] Federal Emergency Management Agency (FEMA), 1997. *HAZUS 97 technical manual*.
- [17] Giardini, D., Wiemer, S., Fäh, D., Deichmann, N., 2004. *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.
- [18] Grünthal, G. (ed.), 1998. *European Macroseismic Scale 1998*. Cahiers du Centre Européen de Géodynamique et de Séismologie, Volume 15, Luxembourg.
- [19] Housner, G.W., Jennings, P.C., 1972. The San Fernando California earthquake. *Earthquake engineering and structural dynamics* 1: 5-31.
- [20] Kabluchko, Z. 2009. Spectral representations of sum- and max-stable processes. *Extremes* 12:401-424.
- [21] Kabluchko, Z., Schlather, M., de Haan, L. 2009. Stationary max-stable fields associated to negative definite functions. *The Annals of Probability* 37: 2042-2065.
- [22] Keintzel, E., 2005. Über den Weg zur neuen deutschen Erd-bebennorm DIN 4149: 2005-04. *Bautechnik* 82: 475-485.
- [23] Kendall, M.G., Gibbons, J.D. 1990. *Rank Correlation Methods* (5th edition). Arnold: London.
- [24] Kessler, T., 2007. *Reliability Analysis of the Swiss High Voltage Transmission System*. Master Thesis, ETH Zürich.
- [25] LASEN (EPFL), 2008. Vulnerability of Electricity supply system under extreme weather conditions. Projekt der EPFL. 2006-2009. <http://lasen.epfl.ch/page39417.html>.

- [26] Lau, D.L., Tang, A., Pierre, J.-R., 1995. Performance of lifelines during the 1994 Northridge earthquake. *Can. J. Civ. Eng.* 22: 438-451.
- [27] Li, D., Hüsler, J., Raschke, M., 2010. The estimation of the generalized Pareto distribution by maximum likelihood and goodness of fit. *Communications in Statistic - Theory and Methods*. (im Druck)
- [28] Lund, L.V. (Ed.), 200. *ASCE: Lifeline performance, San Simeon Earthquake, December 22, 2003*. www.asce.org/pdf/sansimeon.pdf.
- [29] Mari, D., Kotz, S., 2001. *Correlation and dependence*. London: Imperial College Press.
- [30] MarketWatch, 2008. 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}>.
- [31] McKevitt, W.E., Timler, P.A.M., Lo, K.K., 1995. Nonstructural damage from the Northridge earthquake. *Can. J. Civ. Eng.* 22: 428-437.
- [32] MunichRe, 2001. Winterstürme in Europa (II).
- [33] Murphy, J.R., O'Brien, L. J., 1977. The correlation of peak ground acceleration amplitude with seismic intensity and other physical parameters, *Bulletin of the Seismological Society of America* 67: 877-915.
- [34] Nan, C., Kröger, W., und Probst, P., 2011. A New Modeling Approach for Solv-ing CI Interdependency Issues. *Proc. of ICASP 2011*, 1.-4. August, Schweiz, Zürich (Abstrakt akzeptiert, Beitrag eingereicht).
- [35] Newman, M. E. J., 2002. *Assortative Mixing in Networks*. *Phys. Rev. Lett.* 89: 208701-208704.
- [36] Newman, D.E., Nkei, B., Carreras, B.A., Dobson, I., Lynch, V.E., Gradney, P., 2005. Risk assessment in complex interacting infrastructure systems. *Thirty-eighth Hawaii International Conference on System Sciences*, Hawaii, January 2005.
- [37] Noson, L.L., Qamar, A., Thorsen, G.W., 1988. WASHINGTON STATE EARTHQUAKE HAZARDS. WASHINGTON DIVISION OF GEOLOGY AND EARTH RESOURCES, INFORMATION CIRCULAR 85, http://www.pnsn.org/INFO_GENERAL/NQT/welcome.html.
- [38] Oikawa, T., Fukushima, S., Takase, H., Uchiyama, T., Muramatsu, K., 2001. Seismic Reliability Evaluation of Electrical Power Transmission Systems and its Effect on Core Damage Frequency. *Transactions, SMiRT 16*.
- [39] Raschke, M., 2004. *Die Korrelation zwischen Erdbebenstärke und Bauwerksschaden und deren Anwendung in der Risikoanalyse*. Dissertation and der Bauhaus-Universität Weimar (2003) Shaker Verlag.
- [40] Raschke, M. 2006. Monetary earthquake risk - discussion of the modelling, the comparability and factors of influence. In: *Proceeding of the First European Conference on Earthquake Engineering and Seismology (1st ECEES)*, ID 455.
- [41] Reed, D., 2008. Electric utility distribution analysis for extreme winds. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics* 96: 123-140).
- [42] Reuters, 2008. No damage to power lines from Nevada earthquake. <http://www.reuters.com/article/topNews/idUSN2144046320080221>.
- [43] Risk Management Solutions (RMS), 2000. *Event report - Chi-Chi, Taiwan earthquake*. http://www.rms.com/publications/Taiwan_Event.pdf.
- [44] Rüttner, E., 1995. Earthquake Hazard Evaluation for Switzerland. *Geophysique*, Nr. 29, Schweizer Erdbebendienst.
- [45] Sägesser, R., Mayer-Rosa, D., 1978. Erdbebengefährdung der Schweiz. *Schweizer Bauzeitung*, Jahrgang 96, Heft 7, 107-123.
- [46] Schlather, M. 2002. Models for stationary max-stable random fields. *Extremes*, 5(1):33-44.
- [47] Schläpfer, M., Kessler, T., Kröger, W., 2008. Reliability Analysis of Electric Power Systems Using an Object-oriented Hybrid Modeling Approach, in *Proceedings of the 16th Power Systems Computation Conference*, 14-18 July 2008, Glasgow.
- [48] Schneider, K., Fellow, C.-C.L., Paul, J.-P., 2006. Assessment of interactions between power and telecommunications infrastructures. *IEEE TRANSACTIONS ON POWER SYSTEMS* 21: 1123 – 1130.
- [49] Schiesser, H., Waldvogel, A., Schmid, W., Willemse, S., 1997. *Klimatologie der Stürme und Sturmsysteme anhand von Radar- und Schadendaten - Schlussbericht NFP 31*. VdF, Zürich.
- [50] Schiff, A.J., Tang, A.K. (Ed.), 2000. Chi-Chi, Taiwan, earthquake of September 21, 1999 lifeline performance. *Technical council on lifeline earthquake engineering, Monograph No 18*.

- [51] Schwarz, G.E. 1978. Estimating the dimension of a model. *Annals of Statistics* 6: 461–464.
- [52] Shinozuka, M., Dong, X., Chen, T.C., Jin, X., 2007. Seismic performance of electric transmission network under component failure. *Earthquake Engng Struct. Dy.* 36: 227-244.
- [53] Shinozuka, M., Chang, S.E., Cheng, T.-C., Feng, M., O'Rourke, T.D., Saadegbvaziri, M.A., Dong, X., Jin, X., Wang, Y., Shi, P, 2004. *Resilience of integrated power and water systems*. mceer.buffalo.edu/publications/resaccom/04-SP01/06_shino.pdf.
- [54] Smith, R.L. 1990. *Max-stable process and spatial extremes*. <http://www.stat.unc.edu/postscript/rs/spatex.pdf>, unpublished.
- [55] Stephens, M.A. 1986. Tests based on EDF statistics. In : D'Agostino, R.B., Stephens, M.A: (ed.) *Goodness-of-fit-techniques*, Statistics: a Series of Textbooks and Monographs, Vol. 68, Marcel Dekker: Basel.
- [56] Straub, D., Kiureghian, A. D., 2008. Improved seismic fragility modeling from empirical data. *Structural Safety* 30: 320-336.
- [57] Vanzi, I. 1996. Seismic reliability of electric power networks: methodology and application. *Structural Safety* 18: 311-327.
- [58] VSE CH, 2007. *Statistik 2006 - Über die Verfügbarkeit der Elektrizitätsversorgung der Schweiz*.
- [59] Williams, J.C., 1988. A data-based method for assessing and reducing human error to improve operational performance. Human Factors and Power Plants, 1988., In: *Conference Record for 1988 IEEE Fourth Conference on*.
- [60] Winkler, J., Dueñas-Osorio, L., Stein, R., Subramanian, D., 2010. Performance assessment of topologically diverse power system subjected to hurricane events. *Reliability En-gineering and System Safety* 95: 323–336.

Anhang

Publikationen

Im Rahmen des Projektes wurden folgende Beiträge publiziert:

- [a] Bilis, E.I., Raschke, M., und Kröger, W., 2010. Seismic Response of the Swiss Transition Grid, *Proc. of ESREL 2010*, 5.-9. September, Griechenland, Rhodes.
- [b] Raschke, M., Schläpfer, M., and Nibali, R., 2010. Measuring degree-degree association in networks, *Phys. Rev. E* 82, 037102
- [c] Raschke, M., Bilis, E. and Kröger, W., 2011. Vulnerability of the Swiss Electric Power Transmission Grid against Natural Hazards. *Proc. of ICASP 2011*, 1.-4. August, Schweiz, Zürich (Abstrakt akzeptiert, Beitrag eingereicht)
- [d] Raschke, M., 2011. A model for the failure probability of components of electrical substations under seismic load. *Proc. of ICASP 2011*, 1.-4. August, Schweiz, Zürich (Abstrakt akzeptiert, Beitrag eingereicht)
- [e] Bilis, E.I. und Kröger, W., 2010. Performance of electric power systems under physical malicious attacks. *IEEE Systems Journal* (in Revision)
- [f] Raschke, M., Schläpfer, M., und Trantopoulos, K., 2010. Copula-based generation of degree-associated networks. *Phys. Rev. E* (eingereicht)

Im Rahmen des Projektes sind folgende Beiträge in Bearbeitung:

- Raschke, M., 2010. Stochastic model for the European winter storm hazard and risk and its application for Switzerland. *Natural Hazards and Earth System Sciences*

In Auswertung des Projektes sind folgende Beiträge geplant:

- Fachartikel für das SEV/VSE Bulletin (wurde angefragt)
- mindestens ein Beitrag über die Erdbebenrisikomodellierung des ICT-Netzes und ein Beitrag über die Risikomodellierung (Erdbeben, Sturm) für Übertragungsnetze in einem IEEE-Journal
- ein Beitrag zur Modellierung der Versagensfunktion von Netzelementen in einem Journal der Ingenieurwissenschaften und/oder angewandten Statistik.

Studentische Arbeiten

Im Sommersemester 2008 wurde im Rahmen des Projektes die Semesterarbeit „Vulnerability Assessment of an Electrical Substation“ von K. Miltiadis erstellt; der Projektleiter M. Raschke hat diese Arbeit betreut.

Zusammenarbeit und Kommunikation mit anderen Institutionen

Im Rahmen des Projektes kam es zu keiner formellen Zusammenarbeit mit anderen nationalen Institutionen oder Einrichtungen. Informell wurde mit folgenden Institutionen kooperiert/kommuniziert bzw. zusammengearbeitet:

- dem Schweizer Erdbebendienst (SED),
- dem meteorologischen Dienst der Schweiz (MeteoSchweiz),
- dem Bundesamt für Raumentwicklung (ARE), das GIS-Daten bereitstellte,
- mit Vertretern von swissgrid bezüglich der Snapshots,
- mit einem Vertreter des Bundesamtes für Umwelt (BAFU) bezüglich der Erdbebensicherheit des Übertragungsnetzes (Unterstationen) und

- mit Kollegen des LASEN bezüglich Modellierung des Stromnetzes und der Wetterereignisse.

Infolge eines Arbeitsbesuches von Prof. Krögers am Central Research Institute of Electric Power Industry (CRIEPI) in Japan wurden einige wichtige Publikationen und Informationen zugänglich.

Mit den Vertretern von ENTSO-E hatten die Projektbearbeiter ebenfalls in Kontakt. Sie zeigten sich sehr an Ergebnissen des Projektes interessiert, ebenso wie Prof. Schwarz von der Brandenburgischen Technischen Universität Cottbus (Deutschland).

Angehängte Artikel

Folgende publizierte oder eingereichte Artikel sind der internen Version des Berichts angehängt:

Bilis, E.I., Raschke, M., und Kröger, W., 2010. Seismic Response of the Swiss Transition Grid, *Proc. of ESREL 2010*, 5.-9. September, Griechenland, Rhodos.

Raschke, M., Bilis, E. and Kröger, W., 2011. Vulnerability of the Swiss Electric Power Transmission Grid against Natural Hazards. *Proc. of ICASP 2011*, 1.-4. August, Schweiz, Zürich (Abstrakt akzeptiert, Beitrag eingereicht)

Raschke, M., 2011. A model for the failure probability of components of electrical substations under seismic load. *Proc. of ICASP 2011*, 1.-4. August, Schweiz, Zürich (Abstrakt akzeptiert, Beitrag eingereicht)

Nan, C., Kröger, W., und Probst, P., 2011. A New Modeling Approach for Solving CI Interdependency Issues. *Proc. of ICASP 2011*, 1.-4. August, Schweiz, Zürich (Abstrakt akzeptiert, Beitrag eingereicht)

Bilis, E.I. und Kröger, W., 2010. Performance of electric power systems under physical malicious attacks. *IEEE Systems Journal* (in Revision)

Raschke, M., Schläpfer, M., and Nibali, R., 2010. Measuring degree-degree association in networks, *Phys. Rev. E* 82, 037102

Raschke, M., Schläpfer, M., und Nibali, R., 2010. Measuring degree-degree association in networks, *Phys. Rev. E* 82, 037102

Raschke, M., Schläpfer, M., und Trantopoulos, K., 2010. Copula-based generation of degree-associated networks. *Phys. Rev. E* (eingereicht)