Stabilität von Netzwerken

Verkehrsingenieurtag 2010, Zürich

Institut für Verkehrsplanung und Transportsysteme (IVT)
ETH Zürich

05.März 2010

Institut für Verkehrsplanung und Transportsysteme
Institute for Transport Planning and Systems

Eidgenössische Technische Hochschule Zürich
Swiss Federal Institute of Technology Zurich

Gliederung der Präsentation

1. Einführung und Motivation

2. Methoden und Ziele

3. Beschreibung des Eisenbahnsystems

4. Störereignisse

5. Komplexe Netzwerke

6. Ergebnisse und Analyse-/Simulationstool
   (Analyse des Teilsystems Infrastruktur)

Ein kleiner Schalter führte zu grossen Verspätungen bei der S-Bahn

Ein Relais im Stellwerk des Bahnhofs Stadelhofen stieg gestern aus. Im S-Bahn-Netz kam es während Stunden zu Verspätungen.

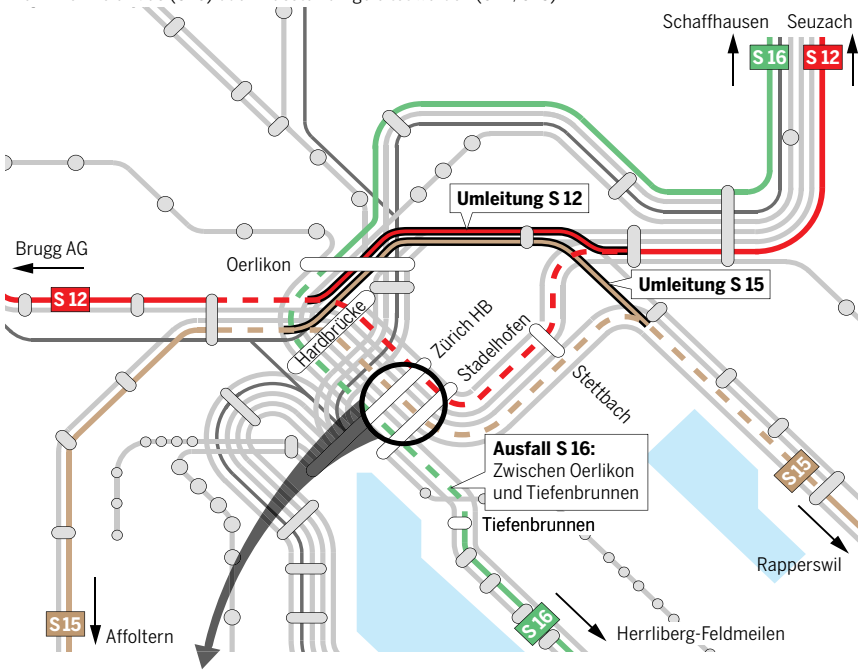
Von Ruedi Baumann

Zürich - Immer wieder Stadelhofen. Was auf dem Autobahnnetz der Gubristtunnel, ist auf dem Zürcher S-Bahn-Netz die Tunnelstrecke zwischen Hauptbahnhof und Bahnhof Stadelhofen. Gestern Morgen ist es zur mindestens zehnten grösseren Stellwerkstörung in den letzten sechs Jahren gekommen, die in den Medien Erwähnung fand. Die Ursache war so klein, wie die Folgen gross waren: Ein kleines Relais - also ein elektrischer Schalter - hatte um 8 Uhr seinen Dienst versagt.

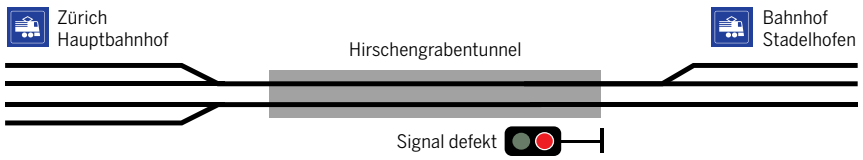
Das Ausfahrtsignal beim Bahnhof Stadelhofen auf dem linken Gleis Richtung HB stellte auf Rot, der zweispurige Hirschengrabentunnel war nur noch in eine Richtung befahrbar, die Störung breitete sich im S-Bahn-Netz innert Minuten wie beim Dominospiel aus. Direkt betroffen waren die S 12, die S 15 und die S 16 (siehe Grafik). Es kam zu Zugausfällen und Verspätungen bis zu 20 Minuten. Um 9.45 Uhr war die Störung behoben, um 10.45 Uhr waren wieder alle S-Bahnen im Takt. Zusätzlich - und unabhängig von der Stellwerkstörung - blieb kurz vor 9 Uhr beim Bahnhof Stettbach eine Lokomotive der S 12 stehen. Die nachfolgende S 5 wurde mit 40 Minuten Verspätung über Oerlikon umgeleitet.

Die S-Bahn-Störung vom Freitagmorgen

Drei Linien fielen aus (S 16) oder mussten umgeleitet werden (S 12, S 15)



Engpass HB–Stadelhofen



TA-Grafik mt

Das Stellwerk Stadelhofen, ein schwacher Punkt? SBB-Sprecher Daniele Pallecchi widerspricht energisch. Die Technik im Stellwerk Stadelhofen vom Typ Domino 67 sei weit verbreitet, gelte als sehr zuverlässig und werde von den SBB «mit schweizerischer Gründlichkeit» gewartet. Die Relais in Stadelhofen, welche Weichen und Signale steuern, funktionierten so gut wie in jedem anderen Bahnhof der Schweiz, sagt Pallecchi, «aber die Folgen sind grösser, weil Stadelhofen-HB das heikelste Nadelöhr im Zürcher S-Bahn-Netz ist».

Gemäss Berechnungen der SBB funktioniert auf 47 Millionen Relaisschaltungen beim Typ Domino 67 eine einzige nicht wie gewünscht. Pro Tag gibts im Schweizer Bahnnetz eine halbe Milliarde Schaltungen oder 6000 pro Sekunde. Allein für eine IC-Fahrt von Zürich nach Bern müssen 200 000 Schaltungen funktionieren.

Viertes Gleis wäre enorm teuer

Eine Entlastung des Engpasses Stadelhofen würde der Ausbau des Bahnhofs von drei auf vier Gleise über einen zweiten, einspurigen Riesbachtunnel bringen. Die Kosten wären aber enorm und das Bauvorhaben sehr komplex, wie der Regierungsrat kürzlich als Antwort auf ein Postulat ausführte: eine halbe Milliarde Franken sowie eine Planungs- und Bauzeit von zehn Jahren. Vordringlich sei das Projekt nicht, argumentiert die Regierung, weil mit der Eröffnung der Durchmesserlinie ab 2013 mehr Züge über Oerlikon geführt werden und Stadelhofen so entlastet wird.

Tagesanzeiger, 27.02.2010

1. Einführung und Motivation

Kritische Infrastrukturen

- Gesellschaft abhängig von Systemen der Nahrungs-, Wasser-, Energie- und Transportversorgung sowie der medizinischen Versorgung
- Grosses Gefahrenspektrum: Technische, soziale und Naturgefahren
- Kleine, lokal begrenzte Störereignisse → Fehlerkaskaden → Systemausfall

→ Schweizerische Strategie zum Schutze kritischer Infrastrukturen

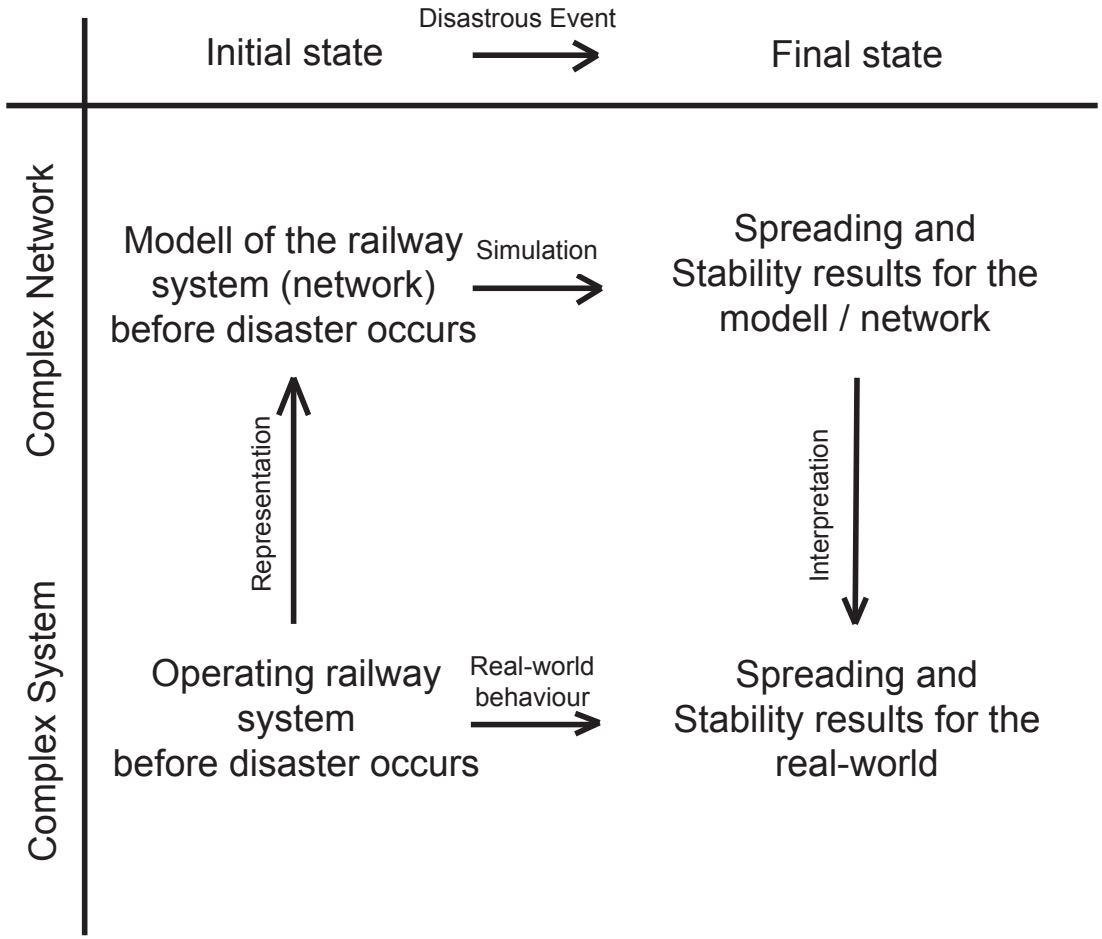
Eisenbahnverkehr

- Kritische Infrastruktur (Systemausfall beeinflusst Gesellschaft und Wirtschaft)
- Ersatz des Eisenbahnsystems extrem schwierig (z.B. in Metropolräumen)
- Zunehmende Grösse und Komplexität durch physisches und organisatorisches Verknüpfen von Systemen

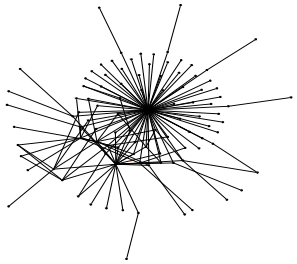
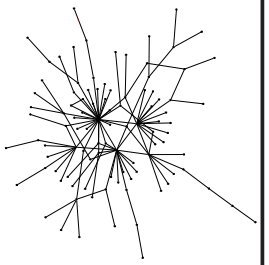
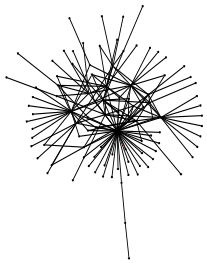
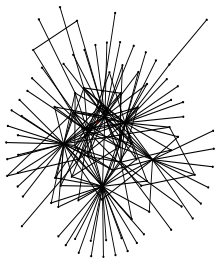
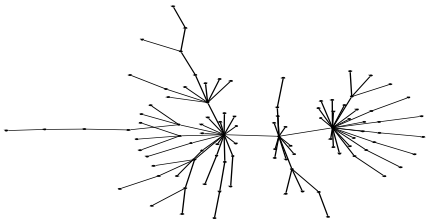
Allgemeine Ziele

- Analyse der Systemstabilität im Störungsfall (und der Stabilität der Teilsysteme)
- Identifizierung kritischer Netzelemente und Schnittstellen
- Vorhersage von Ausfallreihenfolge/Störungsausbreitungen → Stabilitätsverbesserungen
- Entwicklung und Verifizierung eines Simulations- und Analysetools für die Systemstabilität und Störungsausbreitung in Eisenbahnnetzen

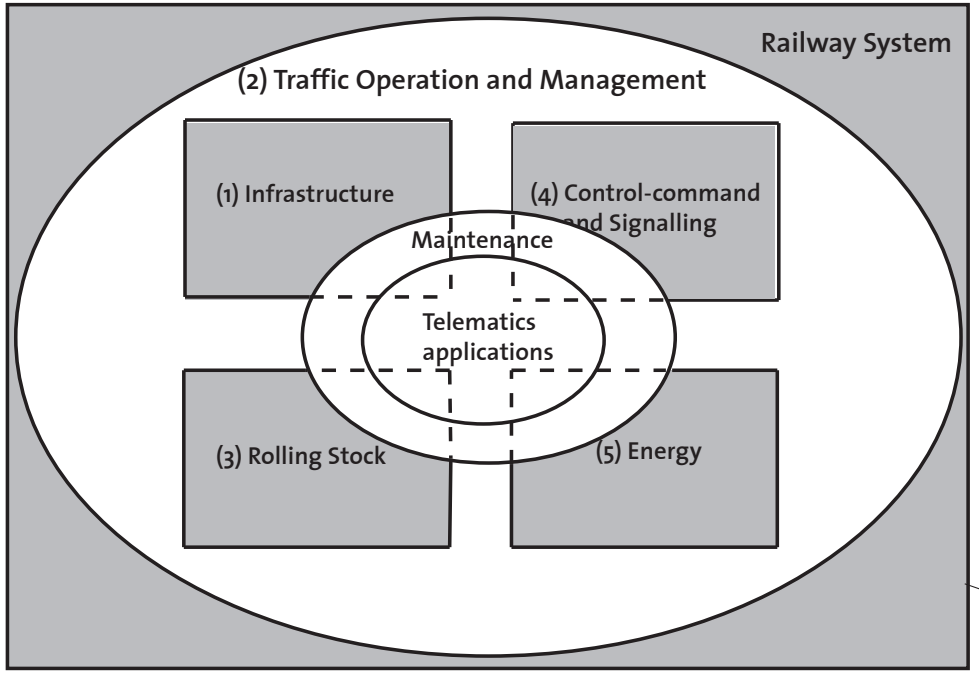
1. Einführung und Motivation – Herangehensweise



1. Einführung und Motivation – Herangehensweise

Discipline	Social Sciences	Informatics	Biology	Transportation	
Complex systems	Messenger networks	Router networks	Metabolic networks	Network of airports	Railways
Complex networks (Example)					?
Network type					?
Knowledge available	Robustness against random errors (failure of randomly chosen nodes or links) Highly sensitive for intentional attacks (removal of important nodes or links)				

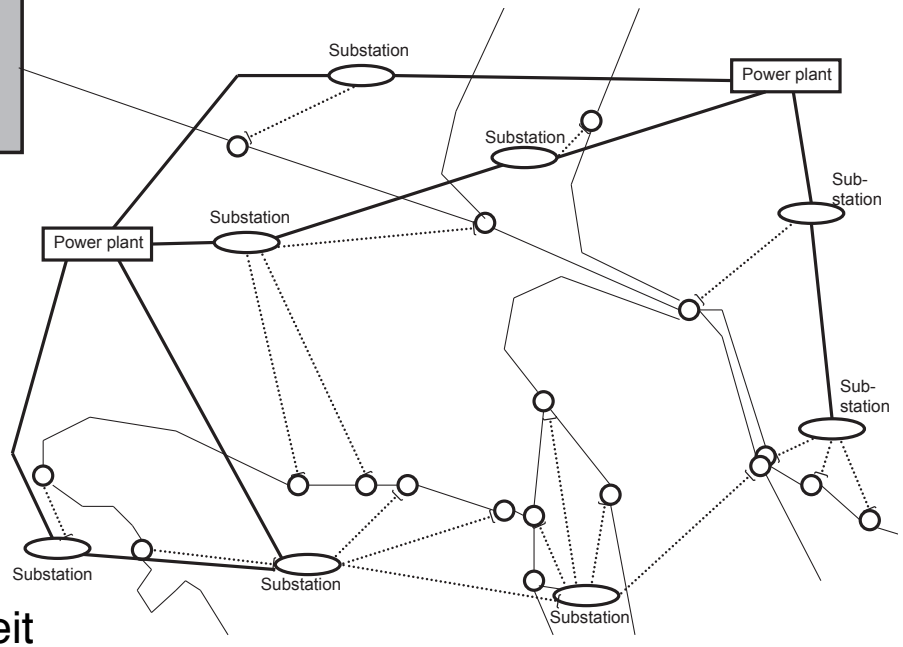
1. Einführung und Motivation – Herangehensweise



Europäische Norm [2008/57/EC]

→Eisenbahnsystem kann als komplexes Netzwerk modelliert werden

→Ausfallsicherheit und Störungsausbreitung mit Hilfe der Netzwerkanalyse untersucht (Skalenfreie Netzwerke)



Ausfallsicherheit der Teilsysteme und des Gesamtsystems

Identifizierung kritischer Komponenten und Schnittstellen

Vorschlag und Verifizierung von Massnahmen zur Steigerung der Ausfallsicherheit (Systemdesign,...)

1. Einführung und Motivation – Ausfallsicherheit

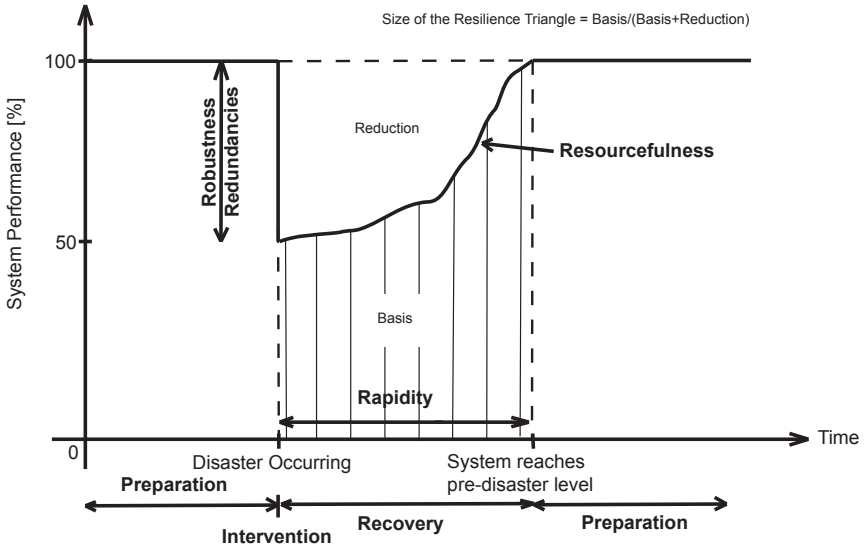
Aspekte der Ausfallsicherheit:

- **R**obustheit des Systems gegenüber Störereignissen
- **R**edundanzen im System
- **R**essourcenverfügbarkeit im Notfall (engl. „rapidity”)
- **R**essourceneffektivität: Umgang einer Gesellschaft mit Störungen (engl. „resourcefulness”)

Ausfallsicherheit gemessen als Funktionsfähigkeit eines Systems nach einem (grossen) Störereignis und der Zeit bis zur Wiederherstellung des Zustandes vor der Störung → „Resilience Triangle“ [Tierney et al., 2007]

Fokus: Technischer Aspekt

Physische Eigenschaften eines Systems Inkl. der Fähigkeit, Schäden und Verlust der Funktionsfähigkeit zu überstehen



2. Methoden und Ziele

Systembeschreibung und Systemverständnis → Modellierung

- Eisenbahnsystem und die Teilnetze
- Schnittstellen und Abgrenzungen

Informationssammlung → Literaturrecherche

- Abhängigkeiten zwischen den Teilsystemen
- Sammlung relevanter Störungen, die zu Zusammenbrüchen führen können
- Topologieanalyse: Kleine Welt- Eigenschaft
- Verifizierung der skalenfreien Verteilung der Knotengrade → SFN

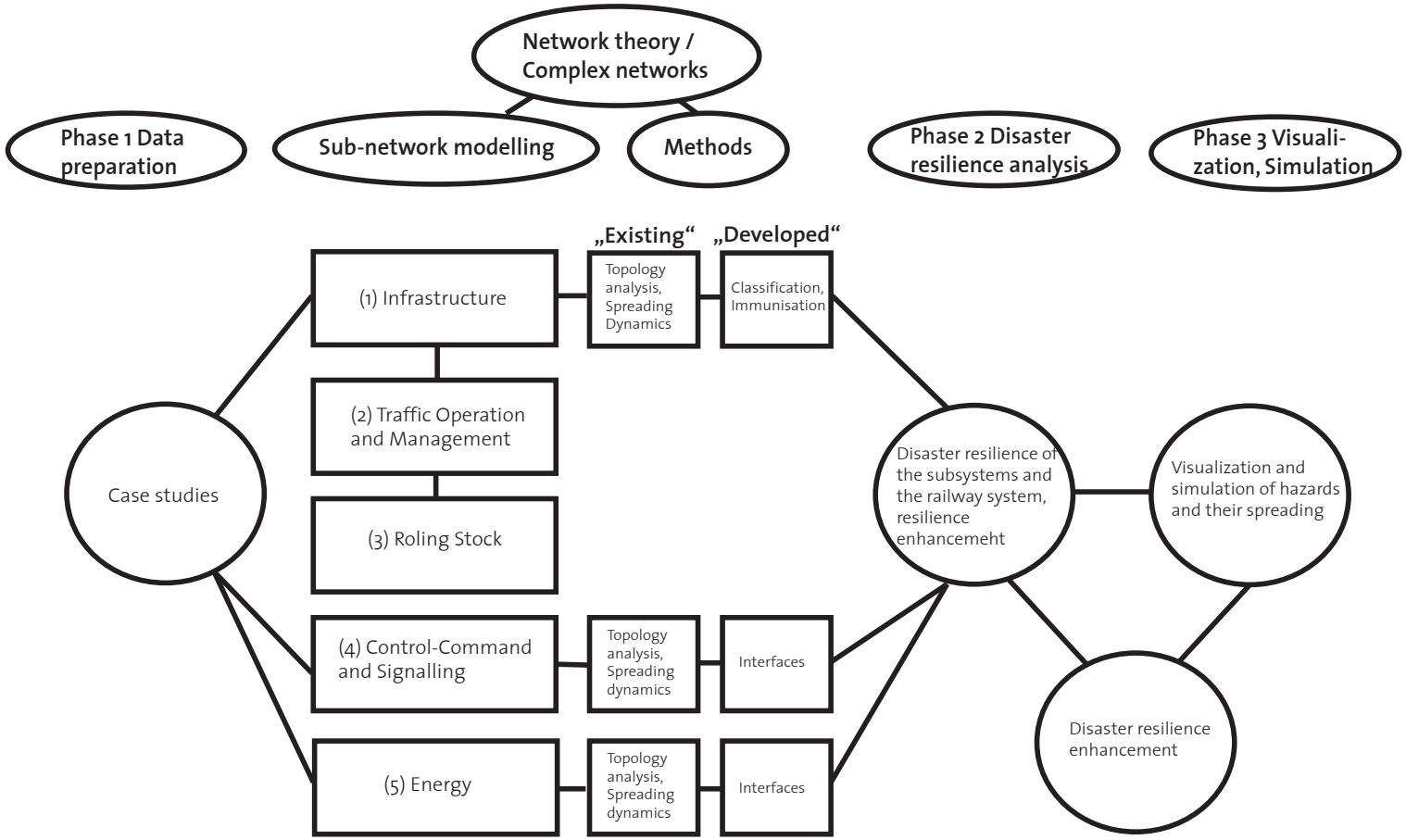
Entwicklung → Implementierung

- Simulations- und Analysetool zur Untersuchung der Ausfallsicherheit im Falle grosser Störereignisse und Störungsausbreitung

Analyse → Verifizierung und Erkenntnisse

- Analyse der Ausfallsicherheit und der „Resilience Triangle“ für Störereignisse
- Anwendung von Wiederherstellungs- und Schutzstrategien (SFN)
- Sammlung neuer Wiederherstellungs- und Schutzstrategien (Eisenbahn)
- Entwicklung von Massnahmen zur Steigerung der Ausfallsicherheit und Verifizierung anhand eines aufgetretenen Systemausfalls (Ausfall der Energieversorgung SBB im Jahr 2005)

2. Methoden und Ziele



Simulations- und Analysetool zur Systemstabilität (basierend auf “R”):

Phase 1 – Datenvorbereitung (Fallstudien, Vergleichstopologien, neue Netzwerke)
Phase 2 – Analyse der Ausfallsicherheit (Methoden)
Phase 3 – Visualisierung und Simulation

2. Methoden und Ziele - Vorgehen

Milestone 1: Preparation phase

Chapter 1

Introduction: Purpose and Goals, Methods

Chapter 2

Complex networks: network types, spreading processes, protection strategies

Chapter 3

System analysis: Subdivision of railway system and its subsystems

Chapter 4

Hazard analysis: Analysis of hazardous events in Swiss context

Milestone 2: Methods, Simulation tool

Chapter 5.2

Infrastructure: Modelling, Resilience analysis, spreading dynamics, resilience enhancements

Milestone 3: Subsystem modelling

Chapter 5.3

Traffic Operation and Management: Modelling, Disaster resilienc analysis

Chapter 5.4

Rolling Stock: Modelling, Disaster resilience analysis

Chapter 5.5

Command-control and Signalling: Modelling, Disaster resilience analysis

Chapter 5.6

Energy: Modelling, Disaster resilience analysis

Milestone 4: Integration

Chapter 6

Integration: Definition of interfaces, resilience analysis on system level

Chapter 7

Model verification: Real-world scenario, suggest resilience enhancements

Chapter 8

Conclusions: Summary, applicability, limitations, questions

2. Methoden und Ziele

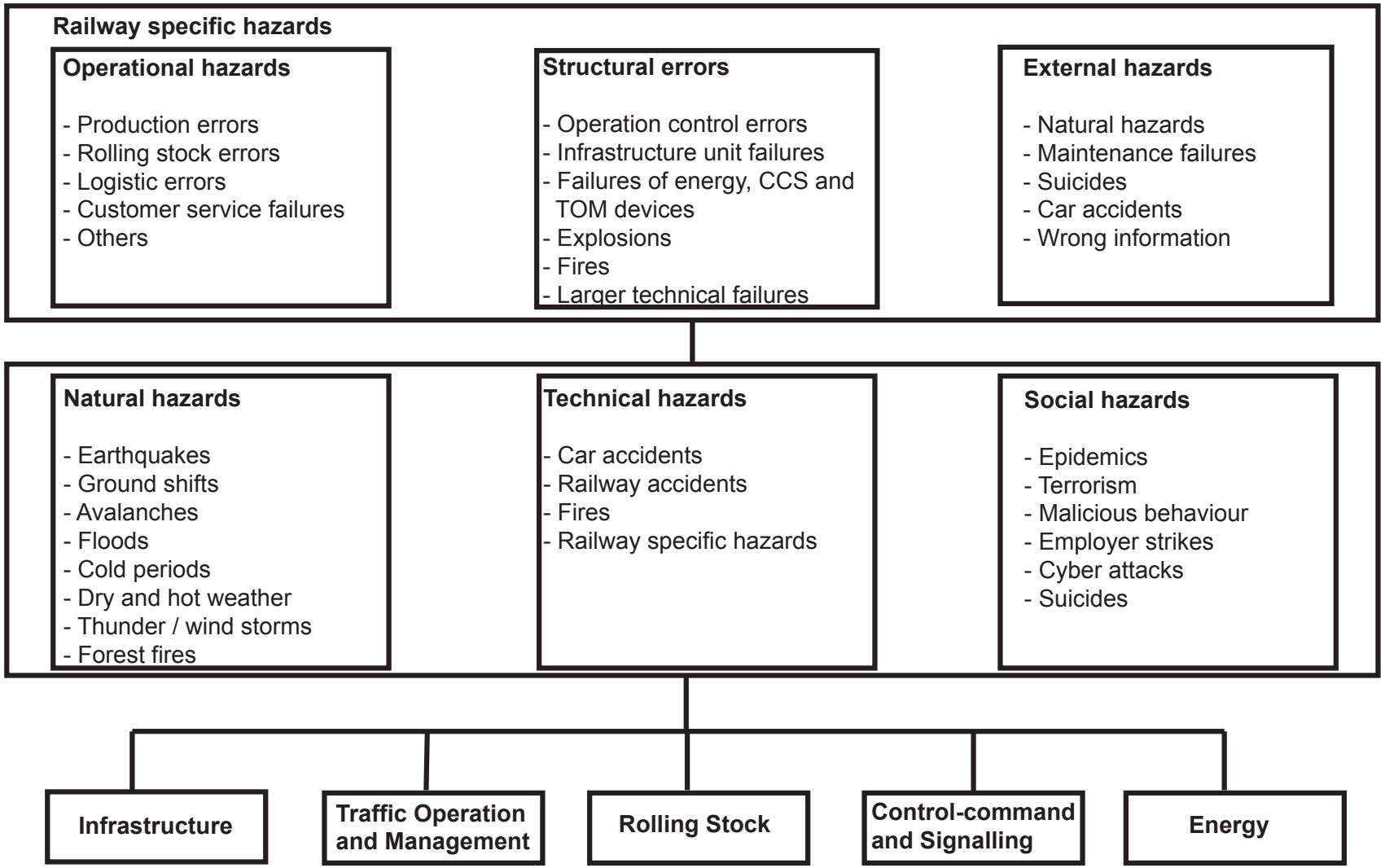
- **Modellbildung** des Eisenbahnsystems und der Teilsysteme
- **Recherche** relevanter Störereignisse für den Eisenbahnverkehr in CH
- **Bestimmung** des Netzwerktyps durch Topologieanalyse

  → Methoden und Wissen anderer Disziplinen können angewendet werden
- **Sammeln** von Methoden zur Analyse der Ausfallsicherheit von SFN
- **Formulierung** neuer Analyseverfahren für Eisenbahnnetze
- **Implementierung** eines Simulations – und Analysetools zur Ausfallsicherheit
- **Analyse** der Robustheit, Redundanz, Ressourcenverfügbarkeit und -effizienz
- **Identifizierung** kritischer Systemkomponenten und Schnittstellen
- **Eruierung** von Massnahmen zur Steigerung der Ausfallsicherheit (Teilsystemverknüpfungen, Teilsystemtopologien...)
- **Verifizierung** der Anwendbarkeit des Modells, Simulation eines realen Störfalles

3. Beschreibung des Eisenbahnsystems

Level 4 System	**Level 3 Subsystem**	**Level 2 Units**	**Level 1+ Macro parts**	**Level 1- Micro parts**
Collection of subsystems	Array of units	Functionally related collection of parts	Smallest system components	
Railway System	**Infrastructure**	Stations, track system	Switches, tracks, platforms, escape walkways, access for emergency	Screws, iron, glass, oscillators, track sleepers and bearers, rail fastening system
	Energy	Energy regions	Transformer stations, electricity supply	Power lines, Overhead lines, Conductor rails
	Control-command and Signalling	Control centres, Remote control centres	Signal boxes, automatic train control, section blocks, line clearance signals	Single commands, single information, hot axle boxes
	Rolling Stock	Trains, Vehicles, Traction units, Passenger carriages	Engine, Wheels, Displays	Screws, iron, glass and other materials
	Traffic Operation and Management	Computing centres, phone network, data network, operation control centres, staff, GPS, GSM-R, Tele-communication	Servers, PCs, Laptops, information about connections, train drivers, detection software	Software, cables, screws, single information, a phone call, single persons
	Maintenance	Construction areas, logistic centres for maintenance work and reserves	Staff, rolling stock for maintenance work, inspection procedures	Tools, single workers, detection software, vehicles
	Telematics Applications	Reservation systems, pay-ment systems, luggage mana-gement, management of connections, marshalling systems	Databases, Software, Data communication protocols, Users	Displays, computers, data of single applications

4. Störereignisse



4. Störereignisse

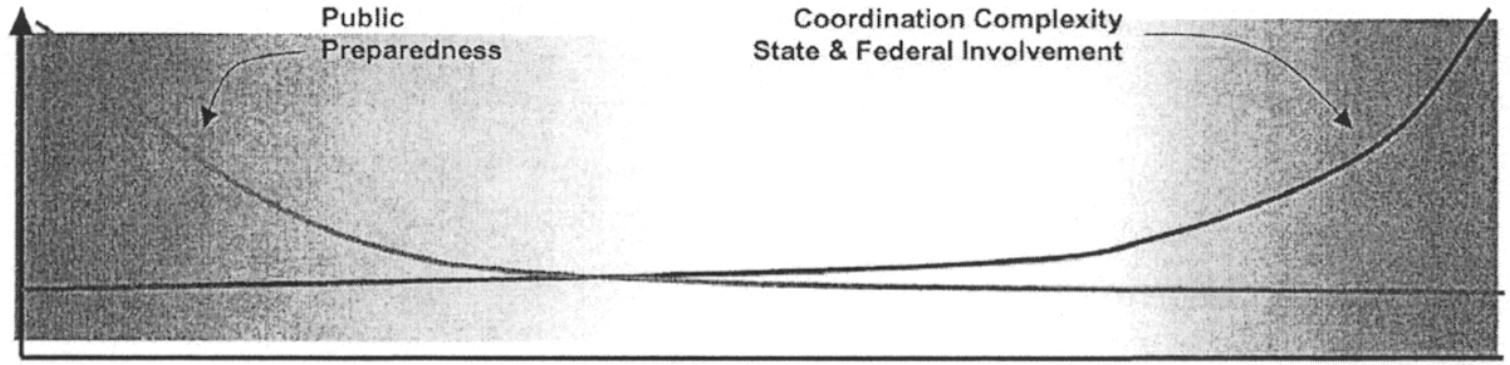
	EK 2	EK 3	EK 4	EK 5
Definition	Urban disaster	Regional disaster	Cantonal disaster	National disaster
Explanation	Average borough	Average city or agglomeration	Average canton	Switzerland
Typical number of inhabitants [people]	2’500	90’000	300’000	7’200’000
Area [km^2]	15	150	1’500	41’000
Budget [Mio. CHF/a]	15	500	2’000	175’000*
Physically damaged people (deaths, injuries)	> 100	> 1’000	> 10’000	> 100’000
Physically damaged people in long terms (deaths, injuries, infections)	> 10’000	> 50’000	> 100’000	> 1’000’000
Evacuations	> 1’000	> 10’000	> 100’000	> 1’000’000
People needing support	> 10’000	> 100’000	> 1’000’000	Impossible
Lost area [km^2]	> 5	> 50	> 500	> 5’000
Monetary loss [Mio. CHF per event]	> 250	> 2’500	> 20’000	> 100’000

Welches sind die Hauptgefahren für die Eisenbahnstabilität?

4. Störereignisse

Hazard	EK 2	EK 3	EK 4	EK 5
Earthquake	1601 Nidwalden 1946 Rawil	1356 Basel 1855 Vispertal	Possible	Possible
Ground shift	1806 Goldau 1881 Elm	Possible	Possible	Impossible
Flood	1999 Mittelland 2000 Ticino, Valais	1876 North CH 1968 Mittelland	1852 Mittelland 1910 North CH	1343 CH 1570 CH
Thunderstorm	1994 North CH	1986 West CH 1992 “Lea”	Possible	Impossible
Wind storm	1990 “Vivian” 1999 “Lothar”	Possible	Possible	Impossible
Avalanche	1951 Alps 1999 Valais	Possible	Possible	Impossible
Cold period	1985 CH 1994 Ticino	Possible	Possible	Possible
Hot and dry period	1996 Ticino	1991 Ticino 1997 South CH	1947 CH	1132 CH (Rhine drought)
Forest fire	Possible	Possible	Possible	Impossible
Meteorite	Possible	Possible	Possible	Possible
Railway accident	Possible (1998 Eschede)	Possible	Impossible	Impossible
Fire	Possible	Possible	Impossible	Impossible
Epidemic	1989 Influenza	Possible	1347 Pest 1919 Spanish influenza	Impossible

4. Störereignisse

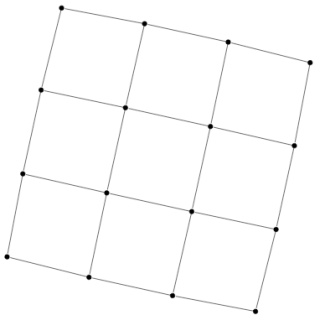
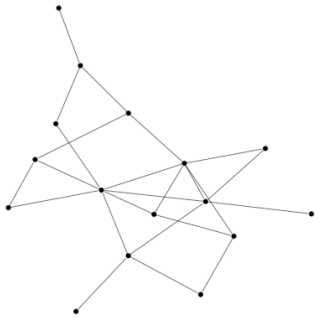
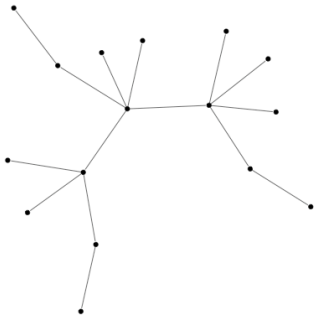


Classifications					NATIONAL →
				STATE →	
			REGIONAL →		
	LOCAL →				
EXAMPLES	• Minor Traffic Incidents • Traffic Crashes • Minor Load Spills • Vehicle Fires • Minor Train/Bus Accidents • Accidents w/ Injuries	• Train Derailment • Major Bus/Rail Transit Accidents • Major Truck Accidents • Multi-vehicle Crashes • Hazmat Spills • Some Casualties & Fatalities	•Train Crashes •Airplane Crashes •Hazmat Incidents •Multi-vehicle Accidents •Tunnel Fires •Major Casualties & Fatalities •Tornadoes	• Port/Airport Incidents • Large Building Fire or Explosion • Industrial Incidents • Major Tunnel or Bridge Closure	• Terrorist Attack/WMD • Floods, blizzards • Transportation Infrastructure Collapses • Extended power/water outage • Large Riots • Mass Casualties
EXPECTED EVENT DURATION	0-2 HOURS	2-24 HOURS	DAYS	DAYS	WEEKS

TRB, 2009

5. Komplexe Netzwerke – Netzwerktypen

Table 1 Summary of the network types and their main topological characteristics

Network type	**(2D) Lattice**	**Random Graph**	**Scale-Free Network**
Example (All graphs have 16 nodes)			
Connectedness	Connected	Not Connected	Connected
Average Path Length	High	Low	Low
Transitivity	High	Low	High
Node-degree distribution	Dirac-delta function	Exponentially- or Poisson distributed	Power-law
Error robustness	Medium	Medium	Very Robust
Attack robustness	Medium	Medium	Very Sensitive

5. Komplexe Netzwerke – Beispiele

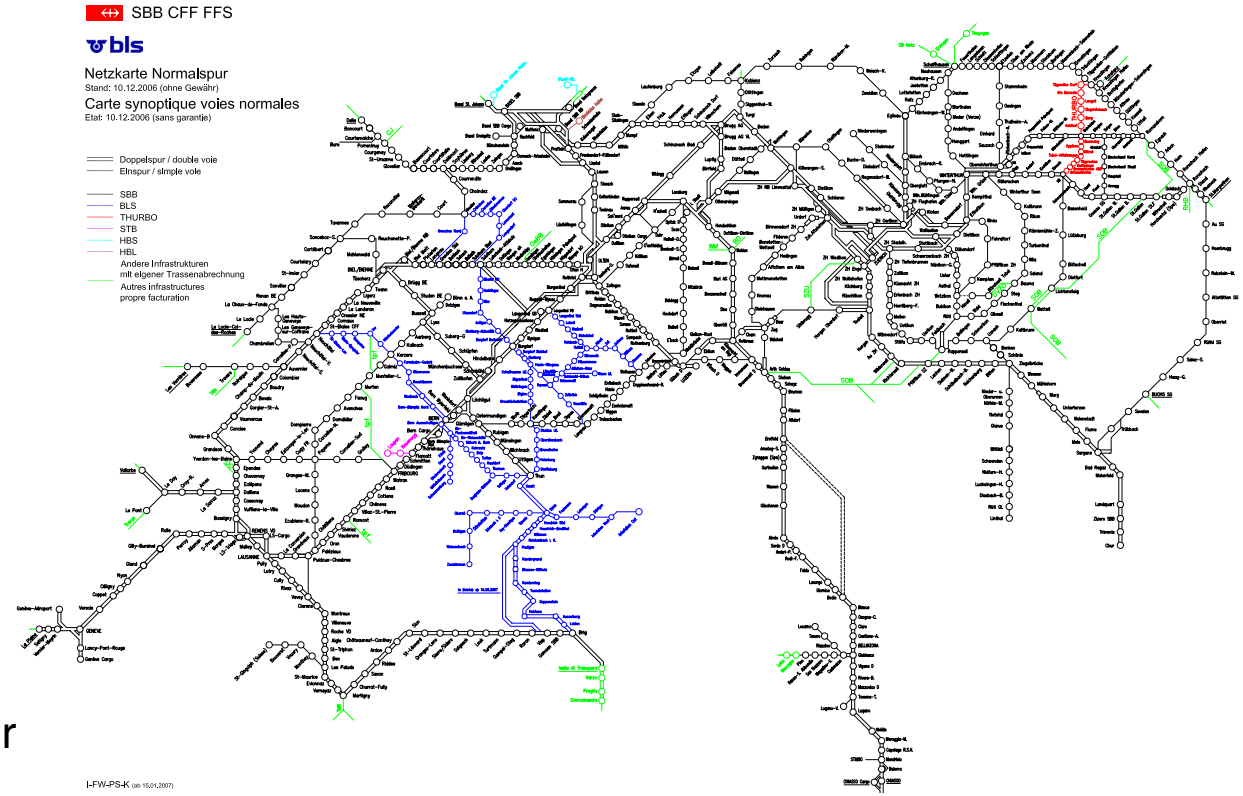
Discipline	Small-world network	Network type	Source
Sociology	Network of movie-actor collaborations	BSN	[Barabasi et al., 1999]
	Six Degrees of Separation	Small-world	[Milgram, 1967]
	Microsoft Instant Messenger network	BSN	[Leskovec et al., 2008]
	Telephone call graph	SFN	[Abello et al., 1998]
	Social network of Mormons in Utah	SSN	[Bernard et al., 1988]
Informatics	Topology of the World-Wide Web	SFN	[Broder et al., 2000]
	Internet backbone – Network of routers	SFN	[Faloutsos et al., 1999]
Biology	Web of human sexual contacts	SFN	[Liljeros et al.,2001]
	Neuronal network of worm C. Elengans	SSN	[Barabasi et al., 1999]
	Metabolic reaction networks	SFN	[Jeong et al., 2000]
Ecology	Food webs / Predator – prey interactions	SFN	[Montoya et al., 2000]
Transport	Network of world airports	SSN	[ACI, 1999]
Geography	Patterns of streams in Mississippi delta	Small-world	[Redner, 2002]
Literature	Network of citations of scientific papers	SFN	[Redner, 1998]
	Co-authorship networks of scientists	Small-world	[Newman, 2001]
	Synonyms (Merriam-Webster-Dictionary)	Small-world	[Albert et al., 2002]
Economics	Power grid of western US	SSN	[Amaral et al., 2000]

→ Interdisziplinäres Forschungsfeld mit starken Forschungsaktivitäten

6. Ergebnisse: Phase 1 – Vorbereitung

```
-----------------------------------------------------
The igraph package was initiated successfully!
Thank you for using this code!
-----------------------------------------------------

The code comprises three phases...

Phase 1: Data Preparation
Phase 2: Disaster Resilience Analysis Methods
Phase 3: Visualization and Simulation

-----------------------------------------------------
----------Phase 1: Data Preparation------------------
-----------------------------------------------------
Specify the data source....

1 - Create new network
2 - Use case study network
3 - Use general graph model
4 - Scan a file

ESC to stop
```

Daten zu Topologie, Kapazitäten, Flüssen und Gewichten



Fallstudien:

- Zürich VBZ Zone 10
- Zürich ZVV S-Bahn
- SBB / BLS (Normalspur)
- Deutschland: Fernverkehr

6. Ergebnisse: Phase 2 – Analyse der Ausfallsicherheit

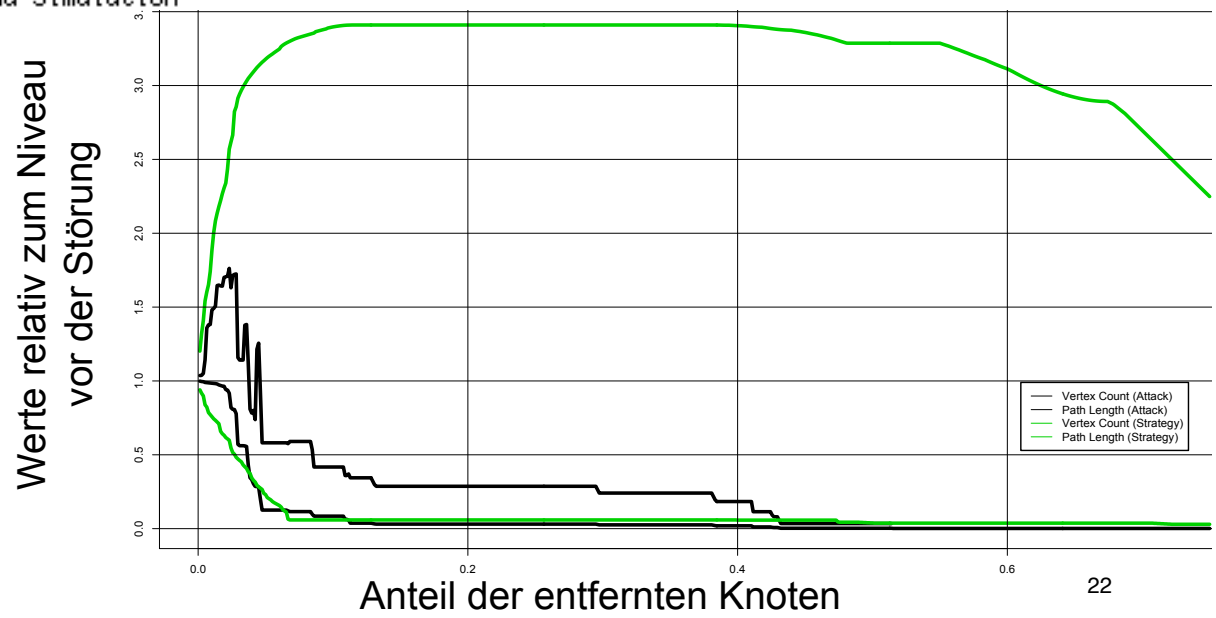
	Random	VBZ-Zone10	Random	ZVV-SBahn	Random	SBB	Random	DB Fern
Nodes	438		183		780		223	
Edges	559		197		892		278	
Connectivity	no	yes	no	yes	no	yes	no	yes
Distance	6.235	9.459	6.110	12.094	7.574	29.057	5.766	10.541
Clustering	0.001	0.055	0.012	0.030	0.003	0.131	0.004	0.081
Exponent	$\gamma = 3.734$ ✔		$\gamma = 3.172$ ✔		$\gamma = 4.264$(✔)		$\gamma = 3.526$ ✔	

→ Wissen über Ausbreitung von Störungen und Strategien zur Wiederherstellung und Schutz der Netzwerke (SFN) können angewendet werden

6. Ergebnisse: Phase 2 – Analyse der Ausfallsicherheit

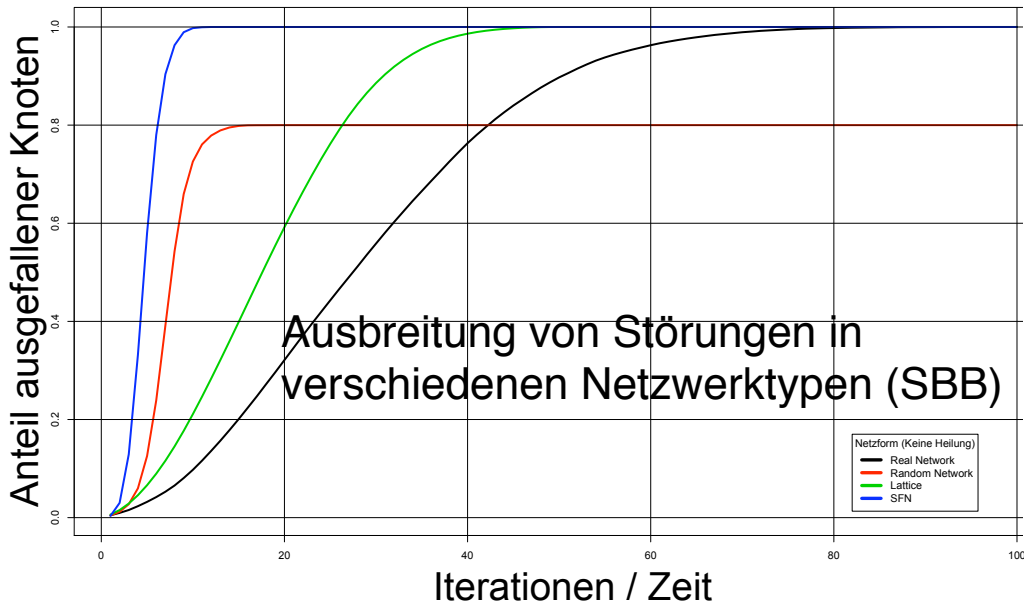
```
Make a choice...

1 - VBZ (Zone 10)
2 - ZVV (Zone 10)
3 - SBB/BLS (standard gauge)
4 - DB Fern
1: 2
-----------------------------------------------------
----------Phase 2: Stability Analysis Methods--------
-----------------------------------------------------
Specify task...

 1 - Basic topology analysis
 2 - Check small-world property and SFN
 3 - SI-Model:  Detailled topology analysis
 4 - SIS-Model: Disaster spreading analysis
 5 - SIR-Model: Immunization analysis

 9 - Skip to Phase 3: Visualization and Simulation

ESC - STOP
```

Gezielter Ausfall bestimmter Knoten



6. Ergebnisse: Phase 2 – Analyse der Ausfallsicherheit

```
 9 - Skip to Phase 3: Visualization and Simulation

ESC - STOP
-----------------------------------------------------
1: 3
Specify....

 1 - Importance of STATIONS
 2 - Importance of CONNECTIONS
 3 - Importance of CONNECTIONS using weights...
 4 - Successive failure of STATIONS
 5 - Successive failure of CONNECTIONS

1: 3
Specify failing network elements...

1 - Edges
2 - Nodes

1: 1
Dynamics of AVERAGE SHORTEST PATH LENGTH (failure of edges)?

0 - No....
1 - Yes....
```



Ausbreitung von Störungen in verschiedenen Netzwerktypen (SBB)

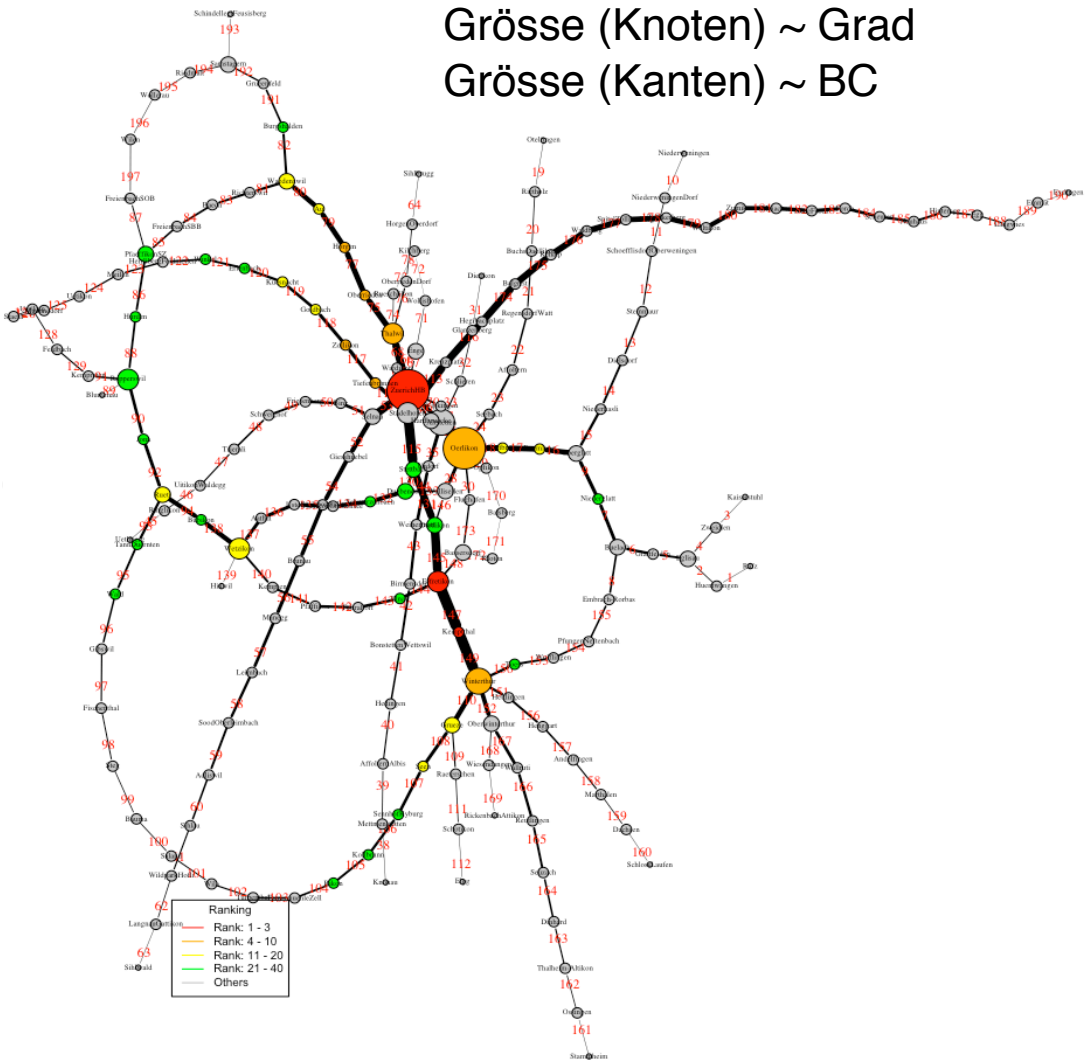
```
Show rankings?
0 - No....
1 - Yes....
1: 1
Specify maximal rank
Please enter a number less than 197
1: 5
-------------------------------------------------------------------
Weights = Number of lines along connection [in lines]
-------------------------------------------------------------------
1 :  Effretikon - Kemptthal ( 48509.04 )
2 :  Kemptthal - Winterthur ( 47199.4 )
3 :  Grueze - Winterthur ( 41032.16 )
4 :  Glattbrugg - Oerlikon ( 25195.2 )
5 :  Ruemlang - Glattbrugg ( 23067.52 )
-------------------------------------------------------------------
Weights = Distance between two stations [in km]
-------------------------------------------------------------------
1 :  Grueze - Winterthur ( 141996.0 )
2 :  Stadelhofen - Tiefenbrunnen ( 120950.9 )
3 :  Glattbrugg - Oerlikon ( 116596.4 )
4 :  Effretikon - Kemptthal ( 107593.2 )
5 :  Tiefenbrunnen - Zollikon ( 107294.7 )
-------------------------------------------------------------------
Weights = Travel times between two stations [in minutes]
-------------------------------------------------------------------
1 :  Grueze - Winterthur ( 179420 )
2 :  Effretikon - Kemptthal ( 138838 )
3 :  Kemptthal - Winterthur ( 133412 )
4 :  Stadelhofen - Tiefenbrunnen ( 111894 )
5 :  Glattbrugg - Oerlikon ( 108612 )
-------------------------------------------------------------------
Weights = Sum of all rankings
-------------------------------------------------------------------
1 :  Grueze - Winterthur ( 5 )
2 :  Effretikon - Kemptthal ( 7 )
3 :  Glattbrugg - Oerlikon ( 12 )
4 :  Kemptthal - Winterthur ( 12 )
5 :  Stadelhofen - Tiefenbrunnen ( 15 )
```

6. Ergebnisse: Phase 3 – Visualisierung und Simulation

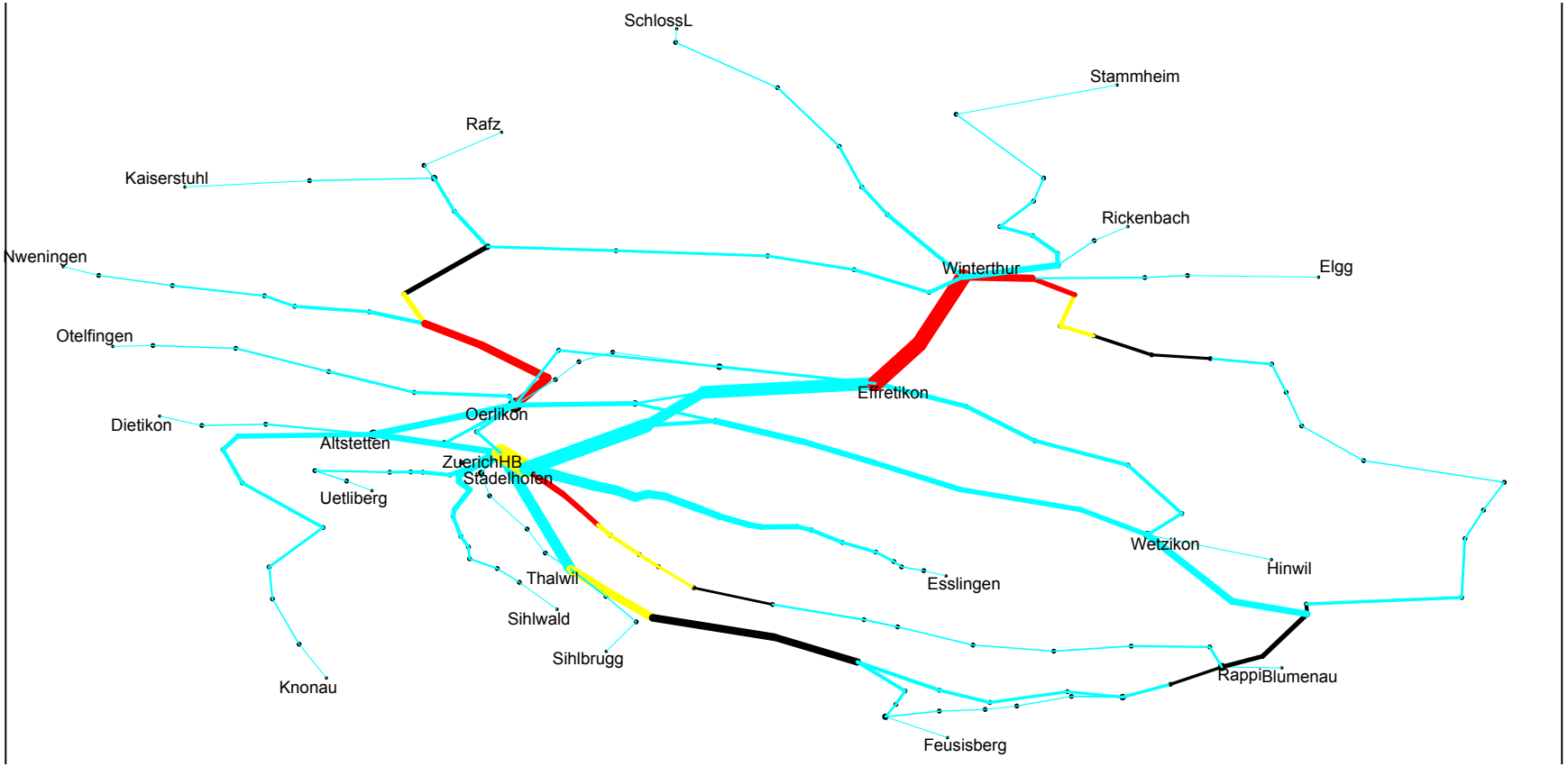
```
-----------------------------------------------------
----------Phase 3: Visualization and Simulation------
-----------------------------------------------------
Specify task?

1 - Visualizations
2 - Simulations

1: 1
Necessary calculations successfully done...
Specify type of plot?

1 - Simple plot without specificatons...
2 - Make specifications

1: 2
Specifications for the SIZE of the STATIONS

 1 - Equally sized nodes
 2 - Size depends on node degree
 3 - Size depends on betweenness centrality
```

ZVV (S-Bahn), Umwege

Grösse (Knoten) ~ Grad
Grösse (Kanten) ~ BC



6. Ergebnisse: Phase 3 – Visualisierung und Simulation



ZVV (S-Bahn), Umwege, [km]

Nächste Schritte

Erhöhung des Detaillierungsgrades (Betriebsprozesse)

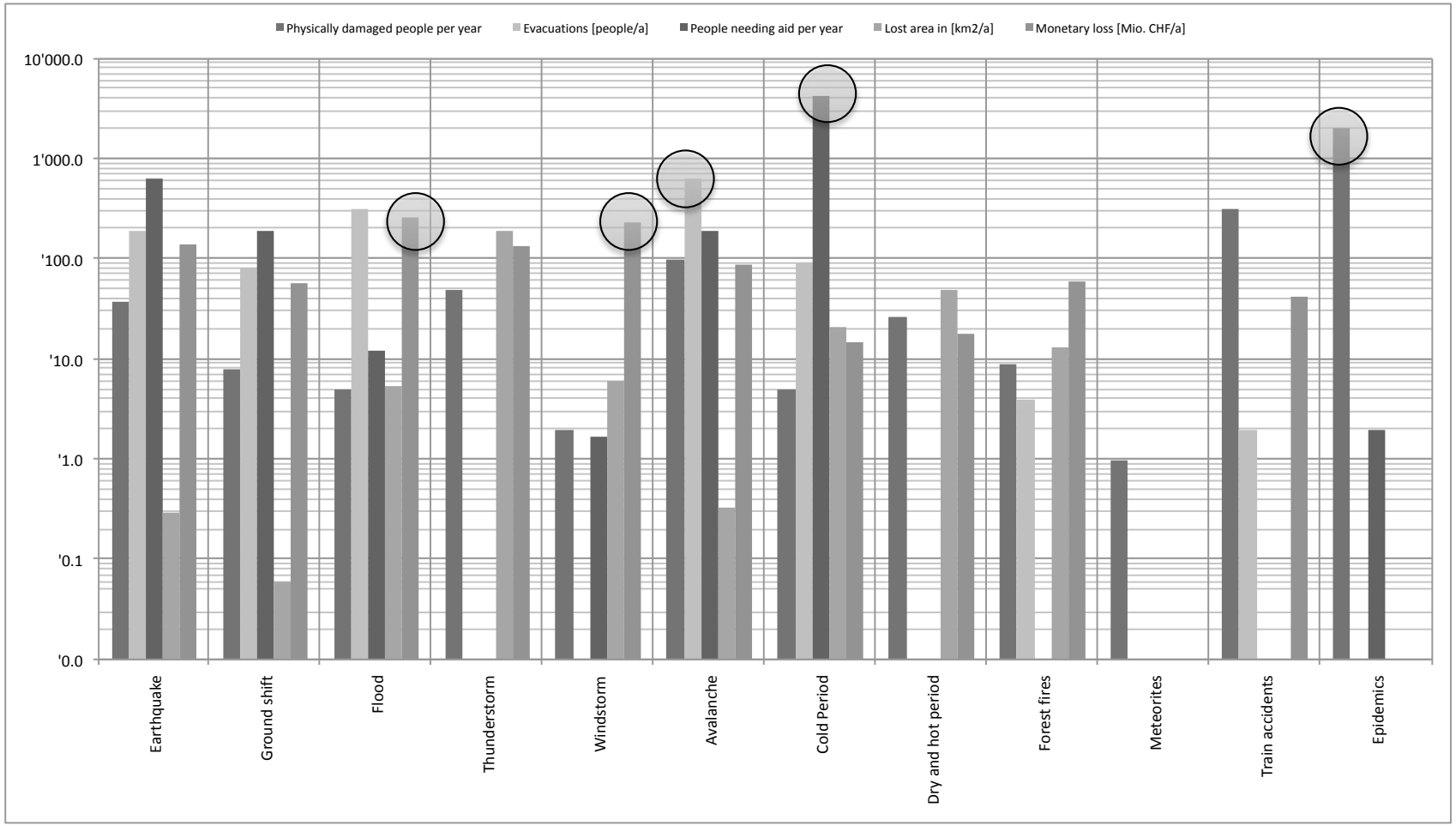
Abbildung der Verfügbarkeit und Effektivität von Ressourcen

Modellierung des Gesamtsystems

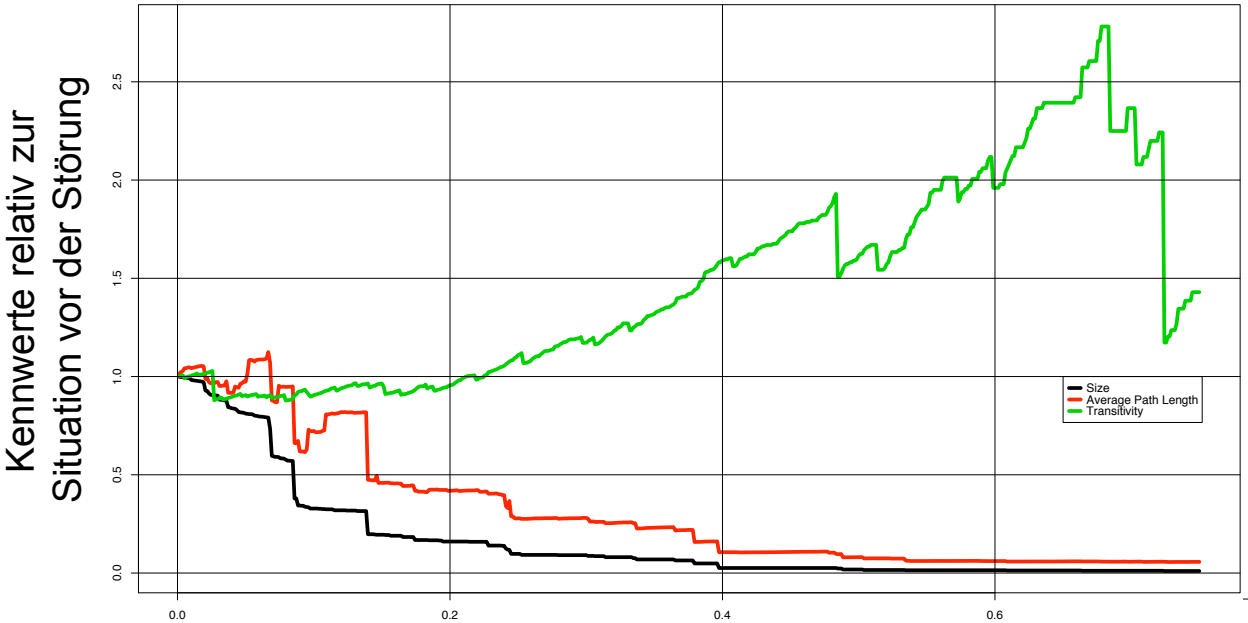
Abbildung von Störungspunkten und Auftrittswahrscheinlichkeiten von Störungen

Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit → Fragen ?

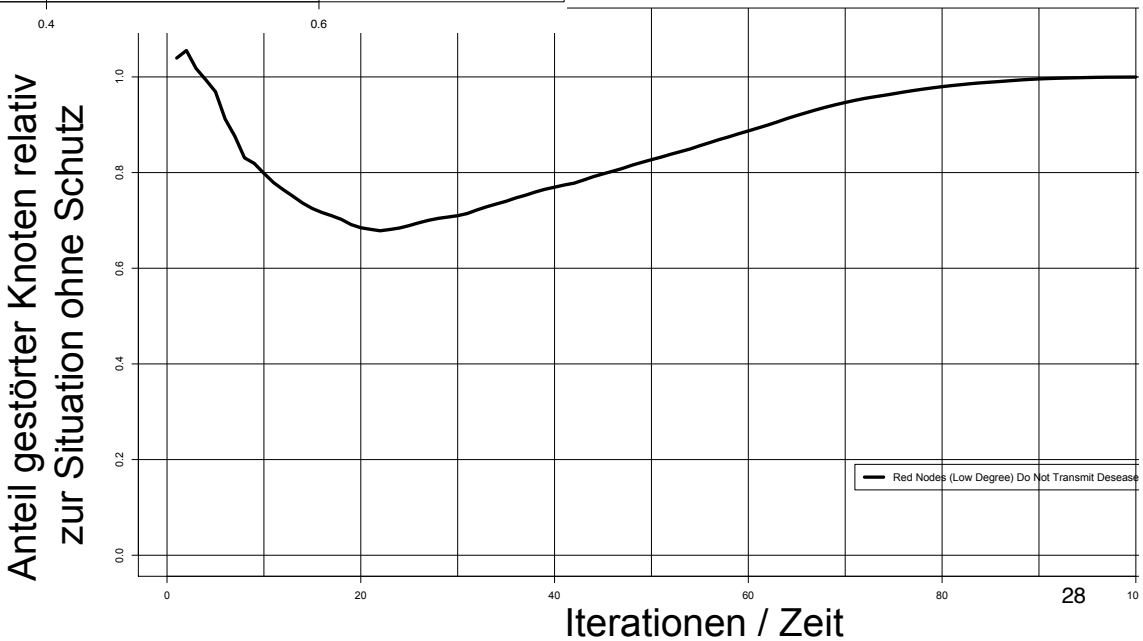
4. Störereignisse – Naturgefahren in der Schweiz



6. Ergebnisse: Phase 2 – Analyse der Ausfallsicherheit



Simulation zufälliger Störungen und deren Ausbreitung

Anteil gestörter Knoten

Schutz dreier Stationen