

BRG REPORT

Factsheet Fukushima und die Grenzen der Risikoanalyse

Zürich, März 2012

Risk and Resilience Research Group
Center for Security Studies (CSS), ETH Zürich

Im Auftrag des Bundesamts für Bevölkerungsschutz (BABS)

Autor: Jonas Hagmann

© 2012 Center for Security Studies (CSS), ETH Zürich

Kontakt:

Center for Security Studies

Haldeneggsteig 4

ETH Zürich

CH-8092 Zürich

Schweiz

Tel.: +41-44-632 40 25

crn@sipo.gess.ethz.ch

www.css.ethz.ch

Auftraggeber: Bundesamt für Bevölkerungsschutz (BABS)

Projektaufsicht BABS: Stefan Brem, Chef Risikogrundlagen und Forschungscoordination

Auftragnehmerin: Center for Security Studies (CSS) der ETH Zürich

Projektleitung ETH-CSS: Myriam Dunn Cavelty, Head New Risks Research Unit

Die in dieser Studie wiedergegebenen Auffassungen stellen ausschliesslich die Ansichten der betreffenden Autorinnen und Autoren dar.

INHALTSVERZEICHNIS

1.	EINLEITUNG	4
2.	DIE KATASTROPHE VON FUKUSHIMA.....	5
3.	FUKUSHIMA UND DIE GRENZEN DER RISIKOANALYSE	7
4.	RISIKOANALYSE ALS ZWECK, METHODE UND DENKRAHMEN	8
5.	AUSSAGEKRAFT EINER RISIKOANALYSE	12
6.	AUSSAGEREICHWEITE EINER RISIKOANALYSE	14
7.	SCHLUSSWORT: RISIKOANALYSE ALS RISIKO	16
8.	BIBLIOGRAPHIE	19

1 EINLEITUNG

In tragischer Art und Weise steht die Katastrophe von Fukushima sinnbildlich für die Grenzen im Umgang mit natürlichen und technischen Risiken. Bemerkenswerterweise beschränkt sich die Aufarbeitung der Katastrophe heute jedoch weitgehend auf Fehler und Verantwortungen in ihrer praktischen Handhabung. So wurden zum Beispiel staatliche Regulierungen hinterfragt, technische Schutzmassnahmen überarbeitet und Katastrophenmanagementprozesse optimiert. Die eigentlichen Grenzen der Risikoanalyse selber hingegen wurden in diesem Prozess bis anhin nur ungenügend diskutiert. Was können Risikoanalysen erfassen und was nicht, wie vertrauenswürdig können sie sein, und was für Aussagen über die Zukunft können aus ihnen hergeleitet werden? Dieses Factsheet thematisiert die Grenzen der Risikoanalyse. Anhand verschiedener Beispiele aus dem Bereich Kernenergie untersucht es, wie die Definition von Risiken, die Methodologie ihrer Erfassung sowie die Interpretation von Resultaten in der probabilistischen Risikoanalyse an Grenzen stossen, respektive Grenzen auch selber festlegen. Im Anschluss an diese kritische Diskussion der Risikoanalyse schliesst das Factsheet auf die Nützlichkeit und Notwendigkeit eines differenzierten und informierten Diskurses über die Aussagekraft und Grenzen der Risikoanalyse.

2 DIE KATASTROPHE VON FUKUSHIMA

Seit dem 11. März 2011 ist Fukushima als Inbegriff für eine komplexe natürliche, technische und menschliche Katastrophe in den globalen Wortschatz eingegangen. Der Ablauf der Katastrophe ist heute allseits bekannt: Ein Seebeben der Stärke 9 erschütterte die japanischen Inseln und entfesselte einen tödlichen Tsunami. Rund 25'000 Menschen verloren ihr Leben in den teils bis zu 38 Meter hohen Wellen, als diese 40 Minuten nach dem Beben auf die japanische Küste prallten. Zusätzlich zu diesen katastrophalen menschlichen Verlusten richtete der Tsunami massive materielle Schäden an. Abertausende Häuser, Fahrzeuge und Schiffe wurden zerstört, und zentrale Infrastrukturen wurden weitgehend ausserstand gesetzt.

Von den Naturgewalten getroffen wurden dabei auch japanische Kernkraftwerke. In elf Kernkraftwerken leitete das Erdbeben eine automatische Notabschaltung ein, in verschiedenen Anlagen beeinträchtigte es die externen Stromzuleitungen. Im speziellen Fall der Anlage Fukushima-Daiichi mussten gar interne Notstromgeneratoren die fortwährende Abschaltung und Kühlung der Kernelemente übernehmen. Als die dem Erdbeben folgenden Wellen auf die Anlage trafen, wurden jedoch auch diese Notstromsysteme zerstört, wodurch die Kühlung der Kernelemente gänzlich ausfiel. In drei von sechs Reaktoren der Anlage Fukushima-Daiichi erfolgte somit eine partielle Kernschmelze, die erst nach mehreren Tagen wieder behelfsmässig kontrolliert werden konnte. Feuer und Hydrogenexplosionen beschädigten derweil auch die Reaktorgebäudehüllen. Die offengelegten Kernelemente und die zerstörten Wasserleitungen kontaminierten das Kraftwerk. Über Luft und Wasser

gelangte schliesslich auch radioaktives Material in die Umwelt¹, und im Umkreis von 30km musste die Bevölkerung evakuiert werden.

Der nationale Wiederaufbau der von der Katastrophe zerstörten japanischen Regionen und Präfekturen, aber auch die Reparatur- und Aufräumarbeiten in und um die Anlage Fukushima-Daiichi selber werden noch lange andauern. Im Juni 2011 konnte das Kernkraftwerk erstmals wieder betreten werden, die Dekontaminierung der verstrahlten Umgebung konnte aber erst im Dezember 2011 von der japanischen Armee in Angriff genommen werden. Ebenfalls Mitte Dezember konnten die Reaktoren wieder in einen Zustand kontrollierter niederschwelliger Kettenreaktionen überführt werden.² Das Ausmass der Verstrahlung wird heute von nationalen und internationalen Behörden weiter untersucht. Ob Strahlentote zu beklagen sind, ist soweit noch unklar, massive Langzeitauswirkungen für Anwohner und Umwelt aber werden erwartet.³ Auch bleibt die flexible 20–30km Sperr- und Evakuierungszone rund um Fukushima-Daiichi heute weiter bestehen. Weltweit führte der Nuklearunfall von Fukushima zu kritischen Auseinandersetzungen mit den Gefahren und Risiken der Nuklearenergie. Im Sommer 2011 beschlossen sowohl die Schweizer als auch die Deutsche Regierung den Ausstieg aus der Kernenergie.⁴

1 Zu unterschiedlichen Messungen der radioaktiven Verstrahlung siehe Brumfield 2011.

2 Ein Zustand der als *cold shutdown* umschrieben wird. Für den Hergang und die Entwicklung der Katastrophe vgl. Government of Japan 2011 und Yoshioka 2011.

3 Die International Commission on Radiological Protection zum Beispiel rechnet zurzeit mit 3'000 zusätzlichen Krebserkrankungen in der Bevölkerung, andere Experten mit bis zu 200'000. Siehe Busby 2011 für erwartete Langzeitschäden, und NZZ 2011a für die Kontroverse um Strahlentote.

4 Wobei der Ständerat Ende August 2011 etwas differenzierter nur das Verbot von neuen Kraftwerken «der heutigen Generation» beschloss, siehe NZZ 2011b. Für die deutsche

Bild 1: Zerstörung des Tsunamis in der Region Miyagi, 12. März 2011



Quelle: Keystone und DRS4 2011

Bild 2: Zerstörung am Reaktor 3 des Kernkraftwerks Fukushima-Daiichi, 15. März 2011



Quelle: TEPCO und DRS4 2011

Atomausstiegdebatte siehe Deutscher Bundestag 2011.

3 FUKUSHIMA UND DIE GRENZEN DER RISIKOANALYSE

Das Erdbeben vom 11. März 2011 als solches war ein aussergewöhnliches Ereignis – noch nie wurde ein derart starkes Beben zuvor in Japan gemessen. Dennoch stellen Erdbeben und von Seebeben ausgelöste Tsunamis in Japan keine Seltenheit dar, weshalb Berechnungen solcher Naturgewalten seit langem fester Bestandteil grösserer japanischer Infrastrukturprojekte sind. Angesichts dieser Erfahrungswerte stellte sich die Frage, wieso den massiven menschlichen Verlusten und materiellen Schäden nicht besser vorgebeugt wurde. War die Erdbeben- und Tsunamirisikoanalyse der Anlage Fukushima-Daiichi ungenügend? Tatsächlich war die für diese Anlage erstellte Risikoanalyse von Tsunamis dürrftig, veraltet und ungeprüft: In einem Memorandum von nur einer Seite folgerte der Betreiber des Kernkraftwerkes, dass das Risiko eines Tsunamis handhabbar sei – eine Analyse die, im Jahr 2001 zuhänden der Behörden freiwillig zusammengestellt, weder mit aktuelleren Daten und Forschungsergebnissen je ergänzt noch von den Behörden je kontrolliert wurde.⁵ So gesehen scheint die Tatsache, dass die Anlage Fukushima-Daiichi für Erdstösse der Stärke 8.6 und Wellen von 5.7m Höhe ausgelegt war, am 11. März 2011 jedoch einem Beben der Stärke 9 und Wellen von 14m Höhe nicht standhalten konnte, einen klaren Fall einer fehlerhaften Risikoanalyse darzustellen.⁶

Doch so unbestreitbar diese Schlussfolgerung auch erscheint, sie erkennt und problematisiert die eigentliche Aussagekraft und Aussage Reichweite von Risikoanalysen nur ungenügend. Tatsächlich vermögen es Risikoanalysen nicht, den genauen Umfang einer Gefährdung zu einem bestimmten Zeitpunkt vorauszusagen. Risikoanalysen versuchen anhand ausgewählter Methoden die Ungewissheit über mögliche Gefährdun-

gen zu rationalisieren, womit ebendiese handhabbar gemacht werden sollen. Risikoanalysen vermitteln also primär Erwartungswerte: Sie formulieren Erwartungen über Schadensausmasse und Eintrittswahrscheinlichkeiten, anhand deren Sicherheitssysteme konzipiert oder überarbeitet werden können – so zum Beispiel wenn in einer Kernkraftanlage die Höhe von Schutzwällen oder die Anordnung von Notstromaggregaten bestimmt werden. Doch Risikoanalysen machen bloss probabilistische Aussagen über erwartete Schäden. Sie sagen zukünftige Ereignisse nicht konkret voraus, und somit können sie keine Standards definieren, die absolute Sicherheit garantieren könnten.

So verstanden greifen rein betriebliche Aufarbeitungen der Katastrophe von Fukushima zu kurz. Umfassende Analysen von Fehlern in den gesetzlichen Regulierungen, bei den praktischen Schutzmassnahmen und im operativen Katastrophenmanagement sind zwar nützlich, um aus dem japanischen Nuklearunfall praktische Schlüsse ziehen zu können.⁷ Doch die Katastrophe von Fukushima stellt auch eine grössere Frage nach dem Nutzen und den Grenzen von Risikoanalysen überhaupt. Was sagen probabilistische Risikoanalysen tatsächlich über bestimmte Gefährdungen aus, und wie verlässlich sind solche Aussagen? Statt Fehler und Verantwortungen in der praktischen Handhabung der Katastrophe von Fukushima zu detaillieren, testet dieser Bericht anhand von verschiedenen Beispielen aus der kernkraftbezogenen Risikoanalyse die Aussagefähigkeit von Risikoanalysen. Um die Grenzen der Risikoanalyse auszuloten, diskutiert dieses Factsheet die Risikoanalyse erstens als Methode und Denkraum, untersucht es zweitens die Aussagekraft der Risikoanalyse und hinterfragt es drittens ihre Aussage Reichweite.

⁵ New York Times 2011, Oregon 2011.

⁶ Wobei festzuhalten ist, dass die Anlage dem Erdbeben besser als erwartet trotzen konnte. Massgeblich für die Katastrophe war der auf das Beben folgende Tsunami.

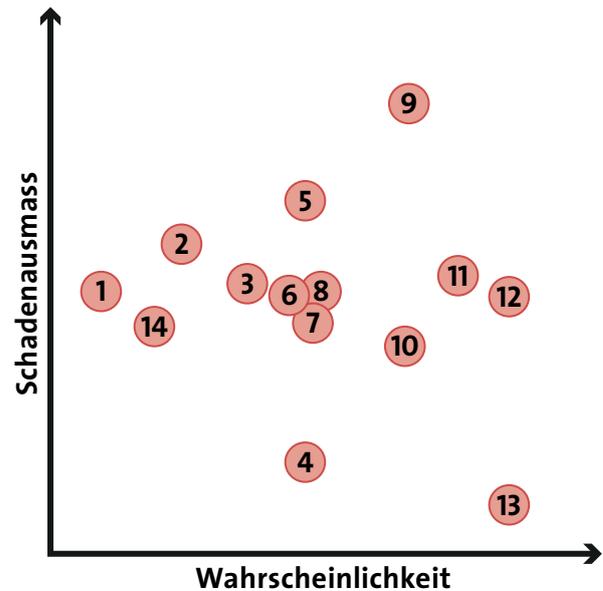
⁷ Insbesondere Government of Japan 2011 und Eidgenössisches Nuklearsicherheitsinspektorat 2011a. Siehe aber auch Bruijne, Koppelman und Ryan 2011.

4 RISIKOANALYSE ALS ZWECK, METHODE UND DENKRAHMEN

Risikoanalysen in verschiedenen Formen datieren bis in das 16. Jahrhundert zurück – ihnen allen gemein ist ein Fokus auf mögliche zukünftige Ereignisse. Verschiedene Ansätze legen dabei unterschiedliche Forschungsperspektiven vor. Während sozial- und kulturwissenschaftliche Theorien sich der Frage widmen, wie diese Ungewissheit gesellschaftlich und politisch verarbeitet wird, zielen technische und ökonomische Ansätze direkter auf ihre probabilistische Quantifizierung.⁸ In vielen öffentlichen und privaten Bereichen dominiert heute diese letztere Art der Risikoanalyse. Risikoanalysen dieser Art verfolgen das Ziel, Herausforderungen aller Art⁹ zu identifizieren, zu bewerten und zu systematisieren. Indem sie eine integrale Übersicht über zukünftige Herausforderungen generieren, schaffen Risikoanalysen somit eine Grundlage für die optimale Zuteilung begrenzter Ressourcen für die Handhabung von Risiken. Risikoanalysen leiten Risikopolitiken also nicht nur an, sie machen das Handeln unter Ungewissheit auch überhaupt erst möglich.¹⁰

Illustration 3: Risikomatrix des Vereinigten Königreichs

Quelle: UK 2008



- 1 Grosse Verkehrsunfälle
- 2 Grosse Industrieunfälle
- 3 Anschläge auf Infrastrukturen
- 4 Tierseuchen
- 5 Überflutungen (Küstengebiete)
- 6 Überschwemmungen (im Landesinneren)
- 7 Nicht-konventionelle Anschläge
- 8 Nicht-pandemische Krankheiten
- 9 Pandemien
- 10 Schwere Unwetter
- 11 Anschläge auf belebte Orte
- 12 Anschläge auf Transportmittel
- 13 Cyber-Attacks auf vertrauliche Daten
- 14 Cyber-Attacks auf Infrastrukturanlagen

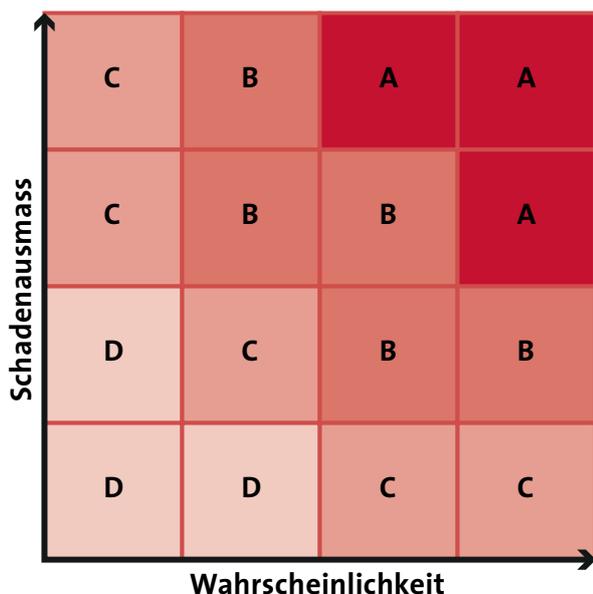
8 Für eine Übersicht der diversen Ansätze siehe Lund Peterson 2011.

9 Also sowohl politische, wirtschaftliche, gesellschaftliche als auch natürliche Risiken.

10 Hagmann und Dunn 2011.

Illustration 4: Priorisierung der Risiken, wobei A der höchsten Priorität entspricht

Quelle: Habegger 2011



Gemäss dem dominierenden technisch-ökonomischen Ansatz werden Risiken heute weitgehend mit der Formel «Risiko = Eintrittswahrscheinlichkeit x Schadensausmass» erfasst. Diese einfache Formel erlaubt es, zweidimensionale Risikomatrizen zu erstellen. Anhand solcher Matrizen wiederum werden Risiken miteinander vergleichbar gemacht, Toleranzbereiche festgelegt, und Prioritäten für die aktive Risikominderung definiert (siehe Illustrationen 3 und 4).¹¹ Risikoanalyse gemäss dieser Methode stellt also einen scheinbar einfachen Zugang zur Systematisierung von Ungewissheiten dar, und einen praktisch nützlichen Zugang zugleich, der die Handhabung von Risiken auf relativ klare Art und Weise anzuleiten vermag.

Tatsächlich ist dieser Zugang zu Risiken aber weder einfach zu berechnen, noch ist er in seiner Formulierung überhaupt unbestritten. Wie nachfolgend im Detail besprochen, erlaubt es die Datenlage nämlich oft nicht, wirklich verlässliche empirische Fundamente für die so formulierte Risikoanalyse zu legen. Mehr noch, schon in den 1980er Jahren wurde die Konstruktion dieser Formel grundlegend debattiert. Risikoanalysten wie Kaplan und Garrick zum Beispiel sprachen sich dabei kategorisch gegen eine probabilistische Analyse aus. Demnach sollte ein Risiko vielmehr als Quotient von Gefährdung und Sicherungsmassnahmen erfasst werden, das Element der Wahrscheinlichkeit also gänzlich aus der Formel gestrichen werden.¹² Andere Spezialisten wie Kaspersen et al. akzeptierten das probabilistische Element, sprachen sich aber gegen die Definition von Risiken als Multiplikation von Wahrscheinlichkeit und Schaden aus. Statt Risiken derart zu berechnen, wurde hier empfohlen die Beziehung zwischen diesen beiden Elementen unbestimmt zu formulieren, und Risiken allgemein eher nach Schadensausmass alleine zu sortieren (zum Vergleich dieser drei Risikoformeln siehe Übersichtstabelle 5).¹³

¹¹ Zur Methodik von Risikomatrizen vgl. Alexander und Marshall 2006, Chapman 2006, Habegger 2011, zur Festlegung von Toleranzbereichen auch Hagmann i.E.

¹² Kaplan und Garrick 1981: 12.

¹³ Kaspersen et al. 1988.

Tabelle 5: Variationen von rationalistischen Risikoansätzen

Variable 1	Beziehung zw. Variablen	Variable 2	Bemerkung
Risiko = Eintrittswahrscheinlichkeit	mal	Schadensausmass	Klassische/populäre Risikoanalyse
Risiko = Gefährdung	durch	Schutzmassnahme	Kein Wahrscheinlichkeitselement
Risiko = Eintrittswahrscheinlichkeit	und	Schadensausmass	Beziehung zw. Variablen unbestimmt

Diese Diskussion illustriert, wie schon die Konstruktion der Risikoformel verschiedene analytische Blickrichtungen eröffnen oder verschliessen kann. Wenn Risiken heute also oft durch die Gleichung «Risiko = Eintrittswahrscheinlichkeit x Schadensausmass» erfasst werden, so stellt diese etablierte Methode in sich selber eine spezifische, ja geradezu normative, Sichtweise auf die Thematik dar. Ihr ist die Vorstellung eigen, dass Risiken anhand eines Wahrscheinlichkeitselementes erfasst, und als Multiplikation von Wahrscheinlichkeit und Schaden definiert werden sollen. Damit avanciert diese Methode einerseits eine Sichtweise, wonach die Variable Wahrscheinlichkeit der Gesamtbeurteilung von Risiken immer vermindern angerechnet werden soll¹⁴ – eine noch so katastrophale Gefährdung wird als kleines Risiko abgebildet, wenn ihre Eintrittswahrscheinlichkeit klein ist. Andererseits suggeriert dieselbe Methode, dass verschiedene Risiken anhand der Produkte derselben beiden Variablen verglichen werden können und sollen. Wenig wahrscheinliche, jedoch katastrophale Gefährdungen – sogenannte black swans – werden mit sehr wahrscheinlichen aber wenig schädigenden Gefährdungen gleichgesetzt (vgl. die Risikokategorie C in Illustration 4).¹⁵

Als Denkraum für das risikobezogene Handeln birgt diese Sichtweise sowohl Vor- als auch Nachteile: Die klassische Risikoanalyse hat den Vorteil, dass sie auch die Eintrittshäufigkeit von Gefährdungen in die Untersuchung miteinkalkuliert – eine Sichtweise, die sowohl ein differenzierteres Bild einer Lage erstellt (Tsunamis sind möglich, aber sie werden nicht tagtäglich entfesselt) als auch wirtschaftliche Kostenbegrenzungen im Umgang mit Unsicherheiten ermöglicht (Gefährdungen können eintreffen, sie müssen aber nicht). Sie hat aber auch den Nachteil, dass 1) die Miteinberechnung von Wahrscheinlichkeiten die Risikobewertung abschwächt, und dass 2) die Gleichsetzung von nicht-gleichen Risiken zu wenig differenzierten Politikinterventionen verleitet. Die Katastrophe von Fukushima verweist auf die erste dieser beiden Problematiken, also eine Situation in welcher das Risiko einer katastrophalen Gefährdung aufgrund einer sehr tief eingeschätzten Eintrittswahrscheinlichkeit dennoch eingegangen wurde. Der Nuklearunfall von Savannah River aus dem Jahr 1988 steht als Beispiel für die zweite dieser beiden Problematiken. Während der Untersuchung dieses US-amerikanischen Nuklearunfalles berichteten Ingenieure, dass die Risikoanalytik ihre technischen Vorbereitungen gegenüber kleinen jedoch wahrscheinlichen Gefährdungen kritisch benachteiligt hätte. So wurde das Risiko eines grossen Kühlrohrbruches (wenig wahrscheinliche, doch grosse Ge-

¹⁴ Per Definition ist Wahrscheinlichkeit immer <1, somit wirkt die analytische Hebelwirkung vermindern.

¹⁵ Zu dieser Problematik der Gleichsetzung des Nicht-Gleichen auch schon Kaplan und Garrick 1981.

fährdung) mit demjenigen eines Ermüdungsbruches einer kleinen Nebenleitung (wahrscheinliche, doch kleine Gefährdung) als Produktberechnung gleichgesetzt. Dabei wurde bei dieser Gleichsetzung verkannt, dass Nebenleitungen aber zahlreicher und schwieriger zu kontrollieren waren, weshalb die technische Vorbeugung zwischen diesen Risikotypen schliesslich ungenügend differenzierte.¹⁶

Wie diese Diskussion illustriert, stellen Risikoformeln also schon in sich selber einen spezifischen Denkrahmen dar. Wie Risiken genau definiert, erfasst und systematisiert werden, beeinflusst sowohl das weitere Verständnis als auch die weitere Handhabung von Risiken. Scheinbar offensichtlich – aber dennoch oft vergessen – macht es einen Unterschied, ob Risiken über Wahrscheinlichkeiten definiert werden oder nicht, oder ob Risiken als mathematisches Produkt von Wahrscheinlichkeit und Schaden, oder nach Schaden allein klassiert werden. Risikoanalysen bestärken und begrenzen sich also selber auf der konzeptionellen Ebene¹⁷: Die Definition von Risiko als Multiplikation von Wahrscheinlichkeit und Schaden zum Beispiel erlaubt zwar umfassende Verortungen und Vergleiche von Gefährdungen, womit das Handeln unter Ungewissheit angeleitet und überhaupt auch erst ermöglicht wird. Gleichzeitig richtet dieselbe Definition den Blickwinkel aber auch in eine ganz bestimmte Richtung aus, und verschliesst dabei ebendiesen vor anderen Perspektiven – Risikoanalyse sieht, was sie sehen will, und ignoriert, was sie nicht sehen kann: Indem Risiken als Multiplikationen definiert werden, grenzt die klassische Risikoanalyse eine weiterführende Differenzierung und Diskussion

um die Handhabung von seltenen katastrophalen Gefährdungen einerseits, und häufigen, doch wenig schädigenden Herausforderungen andererseits, aus.

¹⁶ Fitzgerald 1989.

¹⁷ Zu diesen sogenannten konstitutiven oder hegemonischen Effekten von definierten Konzepten und Denkmodellen vgl. Krause 1991, Barnett und Duvall 2005.

5 AUSSAGEKRAFT EINER RISIKOANALYSE

Wie Risikoanalysen konzipiert sind, stellt in sich selber eine grundlegende Begrenzung ihrer Aussagemöglichkeiten dar.¹⁸ Ist ein Analysemodell erst einmal gewählt, sind weitere Grenzen der Risikoanalyse zu betrachten. Gemäss einer klassischen Konzeptuntersuchung werden diese weiteren Grenzen hier als innere und äussere Validität definiert.¹⁹ Die innere Validität der Risikoanalyse untersucht, wie vertrauenswürdig die Daten sind, auf welchen sich Risiko-beurteilungen stützen (innere Aussagekraft). Die äussere Validität der Risikoanalyse hinterfragt die Generalisierbarkeit der Schlüsse, die aus der Untersuchung gezogen werden (äussere Aussagereichweite).

Wie werden die Daten einer Risikoanalyse erfasst – wie wird die Formel «Risiko = Eintrittswahrscheinlichkeit x Schadensausmass» praktisch substantiiert? Zur Erfassung von Wahrscheinlichkeiten und Schäden werden in der Risikoanalyse weitgehend Erfahrungswerte herbeigezogen. Daten zu historischen Erdbeben und Tsunamis zum Beispiel liefern die Grundlage zur Berechnung ihrer Wahrscheinlichkeit. In der Praxis erweist sich diese Datensammlung jedoch oft als schwierig. Oft sind Angaben zu bestimmten Gefährdungen nur ungenügend vorhanden, oder aber ihre Gültigkeit ist umstritten.²⁰ So basiert zum Beispiel die japanische Tsunamiforschung auf relativ wenigen Fällen.²¹ Aber auch die methodologische Ermittlung von Wahrscheinlichkeiten kann sich als schwierig erweisen. Im Fall der aktuellen deutschen Nuklearenergie-debatte errechnete die gemeinnützige Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit²² – basierend auf

hypothetischen Entscheidungsbäumen, Annahmen zu möglichen Störungen, Daten über gemeldete Störungen etc. – die Wahrscheinlichkeit eines Reaktorunfalls auf 4 : 1'000'000 pro Reaktorjahr, also einem Unfall pro Kernkraftwerk alle 250'000 Jahre. Alternative Berechnungen hingegen zählen zwei grosse Nuklearunfälle (Tschernobyl und Fukushima), und schliessen damit aus den weltweit 442 existierenden Reaktoren und den von ihnen akkumulierten Betriebsjahren auf eine Unfallwahrscheinlichkeit von 1,5 : 10'000, respektive einem Unfall alle 6'667 Jahre.²³ Dieses Beispiel aus der deutschen Debatte zeigt, wie Wahrscheinlichkeiten mangels gesicherter Daten zum Teil aus höchst selektiven, wenn nicht gar subjektiven Experteneinschätzungen resultieren – ein Umstand, welcher die Grenzen der inneren Validität einer Risikoanalyse deutlich zutage treten lässt.

Ähnlich schwierig wie die Festlegung der Eintrittswahrscheinlichkeit ist die Definition von Schadensausmassen. Einerseits sind auch hier vertrauenswürdige Daten oft Mangelware. Die tatsächlichen Ausmasse der wenigen bekannten historischen Tsunamis, die Japan betreffen, sind nicht immer gut dokumentiert.²⁴ Andererseits gestaltet sich auch die Aggregation unterschiedlicher Schadensarten als komplex. Es stellt nicht nur eine methodologische und ethische Herausforderung dar, menschliche Verluste zusammen mit materiellen Schäden zu einem Gesamtschadensausmass zu berechnen. Oft auch werden Berechnungen von Schäden selektiv vorgenommen. Um beispielsweise das Risiko eines Reaktorunfalls zu bestimmen, werden zumeist nur mög-

18 Adcock und Collier 2001.

19 Zur inneren und äusseren Validitätsanalyse von Konzepten Trochim 2001, Adcock und Collier 2001.

20 Taleb 2007.

21 Ho Chi et al 2005, Yanagisawa et al. 2007.

22 Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit 2003.

23 Kauermann und Küchenhoff 2011.

24 Noch heute wird zum Beispiel das Ausmass der von einem Tsunami verursachten lokalen Überflutung mässig präzise anhand gebrochener Bäume eruiert. Siehe dazu Geist und Parsons 2006, Yanagisawa et al 2007.

liche Schäden innerhalb der technischen Anlagen gewertet. Die Risikoanalyse von Fukushima-Daiichi eruierte das Risiko von Erdbeben und Tsunamis, doch nicht den Einfluss eines Reaktorunfalls auf weitere Faktoren wie das japanische Gesundheitswesen, die Fischereiindustrie, die Tourismusbranche oder gar die globale Energiepolitik.²⁵

Nicht untypisch für Infrastrukturprojekte stellen Risikoanalysen oft die inneren, technischen Teile einer Gefährdung besonders detailliert dar, während der weitere externe Kontext vernachlässigt wird.²⁶ Dass eine solche Neigung zur Binnenansicht in der Risikoanalyse zu kurz greift, zeigt die Aufarbeitung des US-amerikanischen Nuklearunfalls von Three Miles Island aus dem Jahr 1979. Obwohl es auch bei diesem Unfall keine Strahlentote zu beklagen gab, führte der Zwischenfall weltweit zu strikteren Regulationen für den Nuklearstrombereich, zu reduzierten Kernkraftwerksleistungen, einer Delegitimierung von Nuklearstrom und grossem öffentlichen Widerstand gegenüber neuen Kernkraftwerken.²⁷ So wurde nicht zuletzt auch das Schweizer Kernkraftwerk Gösgen wegen dem Unfall von Three Miles Island erst verzögert in das nationale Stromnetz integriert.

Wie diese Diskussion zeigt, ist die innere Validität einer Risikoanalyse also durchaus schwierig herzustellen. Erweist sich die zugrundeliegende Datenlage als mangelhaft, so stellt sie eine gewichtige Grenze für die Aussagekraft der resultierenden Risikoanalyse dar. Im Fall der Katastrophe von Fukushima war dieser Aussagekraft sicherlich nicht förderlich, dass die vom Betreiber erstellte Risikoanalyse seit rund zehn Jahren nicht mehr aufdatiert wurde. Die hier angeführten Beispiele aus der kernkraftbezogenen Risikoanalyse zeigen aber auch, dass es nebst diesem speziellen Umstand auch prinzipiell sehr schwierig ist, sichere Daten für eine vertrauenswürdige Risikoanalyse zur Verfügung zu haben. Somit stellt die Datenlage eine wichtige und nicht zu unterschätzende innere Begrenzung der Risikoanalyse dar. Bezeichnend diesbezüglich ist der Umstand, dass Versicherungen sich heute noch immer weigern, Schäden von Kernkraftwerken in unbegrenzter Höhe zu decken. Gemäss der Versicherungsbranche gibt es zu wenige Schadensfälle, als das ein solches Risiko modellierbar, und somit Prämien berechenbar wären.²⁸

25 Türschmann und Wielenberg 2011. Im Fall von Fukushima fehlte somit eine sogenannte Probabilistische Sicherheitsanalyse der Stufe 3 (PSA 3). Im Gegensatz zu PSA der Stufen 1 und 2 analysiert diese nicht nur die innere Systemsicherheit von Kernkraftwerken und die Möglichkeit einer Freisetzung von Radioaktivität, sondern berechnet auch die weitere Schädigung von Mensch und Umwelt. Für die PSA Modelle vgl. NZZ 2009.

26 Bruijne, Koppenjan und Ryan 2011: 5. Ein Blick in die kernkraftwerksbezogene Risikoforschung bestätigt diese Tendenz umgehend. Siehe zum Beispiel die aktuelle Ausgabe von *Nuclear Engineering and Design* 2011, mit Artikeln zu Risiken von Stahl-Beton Verstrebungen, Druckventilen, Leitungsrohren und Ventilationssystemen in Kernkraftwerken. Zur Binnenneigung der technischen Risikoanalytik siehe auch schon Cornell 1968, Kennedy und Ravindra 1984 oder Kazarians, Siu und Apostolakis 1985.

27 Kaspersen et al. 1988: 179.

28 Kauermann und Küchenhoff 2011.

6 AUSSAGEREICHWEITE EINER RISIKOANALYSE

Letztlich sind Risikoanalysen auch in ihrer Interpretation, also ihrer eigentlichen Aussagereichweite, begrenzt. Insbesondere in Bezug auf Zukunftsaussagen, Einzelfallaussagen und Sicherheitsaussagen ist die Risikoanalyse limitiert. So sind *Zukunftsaussagen* nur begrenzt möglich, weil die Risikomethodik sich (notwendigerweise) empirisch auf die Vergangenheit beschränkt. Wenn eine Eintrittswahrscheinlichkeit aus vergangenen Ereignissen abgeleitet wird, so leitet diese aber zur Projektion von Regelmässigkeiten in die Zukunft an.²⁹ Diese implizite Konzeption, dass vergangene Regelmässigkeiten einer transhistorischen Konstante entsprechen und deshalb in die Zukunft extrapoliert werden können, ist eine schwierig überprüfbar Annahme. Diese kann sich als problematisch erweisen, wenn die Risikoanalyse allzu eng als Vorhersage verstanden wird und Gefährdungen betrifft, die ihre Verhaltensmuster verändern können. War Terrorismus zum Beispiel schon in der Vergangenheit ein Risiko, so muss es also nicht unbedingt in Zukunft ein solches bleiben. Sogar Erdbeben sind schwierig als Konstanten zu erfassen, verändern sich doch die ihnen zugrundeliegenden tektonischen Dynamiken.

Auch *Einzelfallaussagen* sind aufgrund von Risikoanalysen nur begrenzt möglich. Untersuchungen, wonach im Allgemeinen pro Kernkraftwerk alle 250'000 Jahre mit einem grossen Unfall zu rechnen sei, erlauben kaum eine Aussage über das Unfallrisiko einer einzelnen, bestimmten Anlage. So unterstreicht auch die wissenschaftliche Risikoforschung, wie Kernkraftwerke individuell von Standort zu Standort unterschiedlichen Risiken ausgesetzt sind. Geographische Lage, Tektonik, Untergrund, Bauart, Betriebsart, Wetterverhältnisse, Flusswasserstände

oder Meeresströmungen sind Faktoren, die für jede einzelne Installation eine andere Risikokonfiguration generieren, und damit auch für jede Anlage eine individuelle Risikobewertung notwendig machen. Vertrauenswürdige Daten für jede einzelne Anlage zu finden, erweist sich aber wiederum als äusserst schwierig und anspruchsvoll.³⁰ Wenn also ohne eine solche Datensammlung von einer (zum Teil generischen) Gesamtheit auf den Einzelfall geschlossen wird, so kann sich dies als schwerer logischer Fehler erweisen.

Sicherheitsaussagen schliesslich stellen die wohl wichtigsten Limitierungen von Risikoanalysen dar, beanspruchen sie doch oft die Fähigkeit, Aussagen über die Grenzen der Wahrscheinlichkeitsfunktion hinaus machen zu können. Sicherheit ist tatsächlich kein Zustand, der aus einer Risikoanalyse in absoluter Form abgeleitet werden könnte. Wenn die Wahrscheinlichkeit eines Nuklearstörfalls zum Beispiel wie oft genannt auf 10^{-6} , also auf einen Unfall pro 1'000'000 Jahre beziffert wird, so führt diese Zahl zu einer sehr tiefen gesamthaften Risikokalkulation. Doch so tief diese auch beziffert wird, das Risiko als solches bleibt bestehen – die Kernkraft ist nicht sicher in einem absoluten Sinn. Gleichzeitig ist auch die Möglichkeit von zeitbezogenen Sicherheitsaussagen eng begrenzt. Auch wenn ein Ausdruck wie 1 : 1'000'000 Jahre einen enorm weiten Zeitraum suggeriert, sagt dieser Quotient nicht, dass ein Unfall zu keinem Zeitpunkt in diesem Zeitintervall unmöglich wäre.³¹ Die Zahl 10^{-6} besagt also nicht, dass ein Kernkraftwerk zu einem spezifischen Zeitpunkt sicher ist.³²

²⁹ Knight 1921: 225.

³⁰ Annaka et al. 2007, Greivening 2006.

³¹ Bechmann 2011.

³² Kauermann und Küchenhoff 2011, zu der zeitlichen Aussageweite von Wahrscheinlichkeiten auch Kaplan und Garrick 1981: 12.

In der Praxis werden diese Grenzen der Aussage-reichweite von Risikoanalysen oft stark gedehnt, und nicht selten werden sie in unzulässiger Weise überschritten. Das soll heissen, dass die Ausdeutung von Risikoanalysen des Öfteren unterschiedlicher (auch medialen) Interessengruppen zum Opfer fällt.³³ Beispielsweise präsentieren Wissenschaftler Risikoanalysen als wahrhafter und aufschlussreicher als sie tatsächlich sind. Auch wenn diese Praxis weitum kritisiert wird³⁴ – Kraft der Autorität der Wissenschaft, aber nicht selten auch dank der Präzision suggerierenden Wirkung quantitativer Analysen, werden von Seite der Akademie immer wieder Zukunfts-, Einzelfall- und Sicherheitsaussagen formuliert, die so nicht gemacht werden können.³⁵ So verteidigte zum Beispiel die Japan Society of Civil Engineers 2011 die bestehenden Risikoanalysevorgaben für Kernkraftwerke noch im Nachgang der Katastrophe von Fukushima als «objektiv und wissenschaftlich, basierend auf unverfälschtem Expertenwissen», um diese somit als gesicherter und wahrhafter darzustellen als sie eigentlich waren.³⁶

Aber auch Wirtschaft und Politik versuchen immer wieder, Risikoanalysen über ihren Geltungsbereich hinweg zu verwenden. Industrienahen Exponenten zum Beispiel ziehen nicht selten technische, systeminterne Untersuchungen herbei, um auf ein kleines Risiko der Nuklearkraft im Allgemeinen zu schliessen.³⁷ So wird die grössere Herausforderung

technisch «kleingearbeitet», mit der Genauigkeit der Binnenanalyse wird vom Ausschluss weiterer möglicher Implikationen – wie den Einfluss eines Unfalles auf die Gesellschaft, Wirtschaft oder Umwelt – abgelenkt.³⁸ In der Politik schliesslich bestehen ähnliche Bemühungen, das Risiko eines Kernkraftwerkunfalls rhetorisch zu entschärfen, oder zumindest aus einer Gesellschaft weg zu projizieren. So verglich ein Mitglied der türkischen Regierung die Katastrophe von Fukushima mit der Explosion einer Propangasflasche, oder definierte der bayrische Ministerpräsident und frühere Bundesminister für Atomfragen Franz Joseph Strauss die Katastrophe von Tschernobyl als «sozialistischen Reaktorunfall».³⁹

33 Bruijne, Koppenjan und Ryan 2011, für den Einfluss der Kernkraftindustrie schon Cornell 1968.

34 Hayek 1989 [1974] und Feyerabend 1981 insbesondere, auch Kaplan und Garrick 1981: 11, Molak 2011: 3.

35 Als Beispiel siehe Sjöberg 2000 und sein Konzept des *real risks*.

36 Oregon 2011.

37 Kadritzke 2011.

38 Auch werden Risikoanalysen im Nuklearbereich gemeinhin als «probabilistische Sicherheitsanalysen» genannt – ein Ausdruck, der als ein rhetorischer Kniff verstanden werden kann, betont er doch den in der Öffentlichkeit gemeinhin als absolut verstandenen Begriff der Sicherheit.

39 Kadritzke 2011. Kadritzke erklärt den Gasflaschenvergleich mit dem Bemühen der türkischen Regierung, das politische Investitionsklima für den Bau eines Reaktors des Typs Fukushima zu pflegen. Strauss' Äusserung ist im Kontext des Ost-West Gegensatzes zu verstehen.

7 SCHLUSSWORT: RISIKOANALYSE ALS RISIKO

Risikoanalysen stehen exemplarisch für die Ambition, Ungewissheiten über die Zukunft handhabbar zu machen. Anhand ausgewählter Methoden versuchen sie, Risikopotentiale systematisch zu erfassen, zu kalkulieren und zu systematisieren. Damit stehen Risikoanalysen für den Versuch, ein grundlegendes epistemologisches Problem, nämlich die Unbestimmtheit der Zukunft, zu rationalisieren. Verfeinerungen und Erweiterungen von Datensätzen sind zwar Möglichkeiten, um die Vertrauenswürdigkeit von Risikoanalysen zu stärken. Dennoch bleiben Risiken aber etwas, das nur begrenzt fassbar gemacht werden kann. Auch wenn sie kalkuliert ist, die Ungewissheit bleibt bestehen. Auch wenn diese Tatsache an sich bekannt ist, werden Risikoanalysen verschiedentlich miss- oder überinterpretiert.

Die hier geführte Diskussion hat gezeigt, dass Risikoanalysen in verschiedenen Dimensionen an Grenzen stossen, respektive Grenzen sogar selber festlegen (siehe dazu auch Tabelle 6). So lenkt bereits die Definition von Risiken die analytische Untersuchung in eine bestimmte Richtung. Dies führt zur Benachteiligung von alternativen Sichtweisen, indem sie ausgewählte Aspekte in den Untersuchungsrahmen internalisiert und andere externalisiert. Auch stösst die Erfassung von Risiken an Grenzen, wenn die Methode der Datenerhebung und Konstruktion ihrer Variablen genauer untersucht wird. Schliesslich ist die Risikoanalyse dadurch limitiert, als dass sie nur begrenzte Aussagen zur Zukunft, zu Einzelfällen, oder zur Sicherheit eines Untersuchungsobjektes geben kann. Dies sind drei grundlegende Grenzen der Risikoanalyse, die in eher konventionellen Aufarbeitungen von Katastrophen – wie zum Beispiel derjenigen von Fukushima – oft nur ungenügend betrachtet

werden.⁴⁰ Wenn solche Katastrophen aber nur auf praktische Fehler und Verantwortlichkeiten untersucht werden, so besteht die Gefahr, dass die Grenzen der Risikoanalyse nicht erfasst und verstanden werden, und der Risikoanalyse somit mehr Gültigkeit zugesprochen wird, als es angebracht ist.

Die Erfassung von Risiken sei Kunst und Wissenschaft in einem, schreibt der Risikoforscher North nach seiner gründlichen Infragestellung dieses Ansatzes. Er folgert daraus die Notwendigkeit eines «demütigen und realistischen Umgangs mit Risikoanalysen».⁴¹ Wie ein solcher Umgang in der Praxis genau auszu- sehen hat, ist jedoch schwierig festzulegen. Sinnvoll scheint es, die jeweilige Konzeption eines Risikos und seine Erfassung, sowie die aus der Untersuchung abgeleiteten Schlüsse vorsichtig zu debattieren, und verabsolutierende Schlussfolgerungen zu vermeiden.⁴² Eine informierte und differenzierte Offenhaltung der Risikodebatte scheint also angezeigt.⁴³ In einer solchen Debatte geht es sowohl um eine Klarstellung der eigentlichen Risikomethoden und eine kritische Überprüfung ihrer Aussagen, als auch – im Falle von katastrophalen Risiken insbesondere – um eine differenzierte Unterscheidung von Risikoverteilungen. Denn gerade grosse Infrastrukturprojekte stellen Risiken dar, die unterschiedliche Nutzen und Schaden mit sich bringen.⁴⁴ Beispielsweise bergen Kernkraftwerke Risiken mit einer Vielzahl von wirtschaftlichen, politischen, ökologischen und gesundheitlichen Vor- und Nachteilen, aber auch Risiken, die von vielen Menschen oft nur sehr begrenzt freiwillig

⁴⁰ Mohrbach 2011.

⁴¹ North 1995, gleichermassen Molak 2011: 1.

⁴² Bruijne, Koppenjan und Ryan 2011: 7.

⁴³ Zur Offenhaltung von Sicherheitsdebatten auch Waever 1995.

⁴⁴ Gusterson 2004.

Tabelle 6: Grenzen der Risikoanalyse

Aussagerichtung	Aussagekraft	Aussagereichweite
Definition von Risiken	Datenlage	Generalisierbarkeit
Was kann eine spezifische Risikomethode erkennen, was ignoriert sie?	Wie vertrauenswürdig ist die empirische Grundlage einer Risikoanalyse?	Welche Schlüsse können aus einer Risikoanalyse gezogen werden?
Grenze und Gefahr der konzeptionellen Selbstbegrenzung (und –blendung) einer Untersuchung.	Grenze und Gefahr der inneren Validität/ Vertrauenswürdigkeit einer Risikoanalyse.	Grenze und Gefahr von Aussagen, die basierend auf der gewählten Methode so nicht gemacht werden können.

eingegangen werden. Nicht zuletzt deswegen müssten das Ausmass und die Verteilung des Risikos Kernkraft klar anerkannt und differenziert erklärt werden, um über das Eingehen respektive die Beibehaltung eines solchen Risikos zu entscheiden.

In der Schweiz bestehen heute Bemühungen, in differenzierter Art und Weise mit diesen Grenzen der Risikoanalyse umzugehen. So ziehen beispielsweise das Projekt *Risiken Schweiz* oder der sich in Ausarbeitung befindende Leitfaden zum Schutz Kritischer Infrastrukturen auch Aversionsfaktoren mit in die Berechnung von Risiken mit ein, und untersuchen sie wie sich einzelne Risiken auch auf grössere natürliche und soziale Systeme auswirken können. Dennoch besteht in der Schweiz aber Verbesserungspotential bezüglich eines kritischen Risikodiskurses. So erweisen sich verschiedene Deklarationen im Umfeld der aktuellen Kernkraftdebatte als eher suggestiv und einer differenzierten Debatte wenig dienlich – so zum Beispiel, wenn kernkraftbezogene Risikoanalysen als «Sicherheitsanalysen» präsentiert werden, obwohl sie ja Gefahr ausdrücken und diese auch gar nicht negieren⁴⁵, wenn fortwährende Verstärkungen von Kernkraftwerken als «Sicherheitsprozess» erklärt werden, obwohl es sich hierbei um eine kontinuierli-

che Bearbeitung eines Risikos handelt⁴⁶, oder wenn eine Anlage in verabsolutierender Form ganz einfach als vor Naturgefahren geschützt deklariert wird, obwohl sich solche Risiken per Definition ja eigentlich nie gänzlich ausschliessen lassen.⁴⁷ Auch sollten die umfassenden technischen Risikoanalysen der Kernkraftwerke selber nicht über den Umstand hinwegtäuschen, dass diese weitgehend systemintern definiert sind. Als Grundlage für die Risikodiskussion stellen diese keine umfassenden Darstellungen all derjenigen wirtschaftlichen, gesellschaftlichen, ökologischen, politischen und diplomatischen, nationalen, transnationalen und globalen Schäden zur Verfügung, die ein Kernkraftunfall in der Schweiz verursachen könnten.

Es liegt in der Konzipierung der Risikoanalyse selber begründet, dass Risikopolitiken grundlegend zu debattieren sind. Denn Risikoanalysen sind in ihrer analytischen Ausrichtung, in ihrer empirischen Erfassung und ihren praktischen Aussagen durchaus begrenzt. So verstanden, sollte die Katastrophe von Fukushima nicht nur zu einer weiteren Überprüfung von Richtlinien und Sicherheitsmassnahmen führen. Im Idealfall könnte die Katastrophe auch zu einem

⁴⁵ Bechmann 2011.

⁴⁶ Eidgenössisches Nuklearsicherheitsinspektorat 2011b.

⁴⁷ Siehe zum Beispiel Kernkraftwerk Gösgen 2010: 24.

kritischen Nachdenken, einem differenzierteren Bewusstsein, und einem besser informierten Umgang mit den grundsätzlichen Grenzen der Risikoanalyse bewegen. Ziel einer solchen Auseinandersetzung ist es, die Möglichkeiten und Grenzen einer Risikoanalyse besser verstehen zu lernen, und nicht vergessen zu lassen, dass eine Risikoanalyse immer nur einen Versuch darstellt, die ungewisse Zukunft anhand einer ausgewählten Vorgehensweise zu systematisieren. Indem Methode, Annahmen sowie Schwachstellen des Vorgehens und Unsicherheiten bei der Interpretation der Resultate transparent offengelegt werden, könnte und sollte heute einem solchen Dialog verstärkt zugearbeitet werden.

8 BIBLIOGRAPHIE

- Adcock, Robert und David Collier (2001). Measurement validity: A shared standard for qualitative and quantitative research. In: American Political Science Review 95 (3): 529–546.
- Alexander, Corinne und Maria I. Marshall (2006). The risk matrix: Illustrating the importance of risk management strategies. In: Journal of Extension, 44(2). URL <http://www.joe.org/joe/2006april/tt1.shtml>.
- Annaka, Tadashi et al. (2007). Logic-tree approach for probabilistic tsunami hazard analysis and its applications to the Japanese coasts. In: Pure and Applied Geophysics 164: 577–592.
- Barnett, Michael und Raymond Duvall (2005). Power in international relations. In: International Organization 59(Winter 2005): 39–75.
- Bechmann, Gotthard (2011). Tschernobyl und die Risikokultur: Die Formel des Todes. In: Der Spiegel, 26. April 2011. URL <http://www.spiegel.de/kultur/gesellschaft/o,1518,758978,00.html>.
- Bruijine, Malene, Joop Koppenjan und Neal Ryan (2010). Coping with unknown unknowns and perverting effects: An introduction to the crisis of risks management in public infrastructure management. Bern: International Research Society for Public Management.
- Deutscher Bundestag (2011). Anlagenspezifische Sicherheitsüberprüfung deutscher Kernkraftwerke unter Berücksichtigung der Ereignisse in Fukushima-I (Japan). URL http://www.rskonline.de/downloads/rsk_sn_sicherheitsueberpruefung_20110516_hp.pdf.
- Brumfield, Geoff (2011). Fukushima nuclear plant released far more radiation than government said. In: Scientific American, 25. Oktober 2011. URL <http://www.scientificamerican.com/article.cfm?id=fukushima-nuclear-planet-released-more-radiation-government-said&page=2>.
- Busby, Chris (2011). Nuclear physicist: Fukushima disaster health risk grossly underestimated and far worse than Chernobyl. URL <http://www.examiner.com/civil-rights-in-jersey-city/physicist-fukushima-risk-grossly-underestimated-and-far-worse-than-chernobyl>.
- Chapman, Robert J. (2006). Simple tools and techniques for enterprise risk management. Chichester: John Wiley and Sons.
- Cornell, Allin C. (1968). Engineering seismic risk analysis. In: Bulletin of the Seismological Society of America 58(5): 1583–1606.
- Eidgenössisches Nuklearsicherheitsinspektorat (2011a). Analyse Fukushima 11032011: Vertiefende Analyse des Unfalls in Fukushima am 11. März 2011 unter besonderer Berücksichtigung der menschlichen und organisatorischen Faktoren. URL http://static.ensi.ch/1314626452/ensi_analyse_290811_web.pdf.
- Eidgenössisches Nuklearsicherheitsinspektorat (2011b). Sicherheit ist kein Zustand, Sicherheit ist ein Prozess. URL <http://www.ensi.ch/de/2011/07/05/sicherheit-ist-kein-zustand-sicherheit-ist-ein-prozess>.
- Feyerabend, Paul (1981). How to defend society against science. In: Hacking, Ian (Hrsg.), Scientific Revolutions. Oxford, Oxford University Press: 156–167.

- Fitzgerald, Karen (1989). Nuclear weapons reactors: Too hot to handle? In: IEEE Spectrum June 1989: 37–41.
- Geist, Eric und Tom Parsons (2006). Probabilistic analysis of tsunami hazards. In: Natural Hazards 37: 277–314.
- Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (2003). Zur Sicherheit des Betriebs der Kernkraftwerke in Deutschland. URL <http://www.grs.de/sites/default/files/pdf/GRS-S-46.pdf>.
- Government of Japan (2011). Report of the Japanese Government to the IAEA Ministerial Conference on Nuclear Safety: The accident at TEPCO's Fukushima nuclear power stations. Tokyo: Nuclear Emergency Response Headquarters.
- Greiving, Stefan, Fleischhauer, Mark und Johannes Lückenkötter (2006). A methodology for an integrated risk assessment of spatially relevant hazards. In: Journal of Environmental Planning and Management 49(1): 1–19.
- Gusterson, Hugh (2004). People of the bomb: Portraits of America's nuclear complex. Minneapolis, University of Minnesota Press.
- Habegger, Beat (2011). Bewertung von Risiken. Zürich: Center for Security Studies (CSS), ETH Zürich.
- Hagmann, Jonas (2011). Risikominderung: Konzept der Risikovorbeugung. Zürich: Center for Security Studies (CSS), ETH Zürich.
- Hagmann, Jonas und Myriam Dunn (2011). Risk registers: Security scientism and the projection of ministerial danger knowledge. Konferenzpapier, King's College London, ESRC Contemporary Biopolitical Security Seminar, 21 Februar 2011.
- Hayek, Friedrich August (1989 [1974]). The pretence of knowledge: Nobel memorial lecture, December 11, 1974. In: The American Economic Review 79(6): 3–7.
- Ho Choi et al. (2005). Estimates of tsunami risk zones on the coasts adjacent to the East (Japan) Sea based on the synthetic catalogue. In: Natural Hazards 36: 355–381.
- Kadritzke, Ulf (2011). Vorwärts und stets vergessen: Die unbelehrbare Wissensgesellschaft nach Fukushima und Finanzkrise. In: Le Monde Diplomatique Nr. 9494, 13. Mai 2011. URL <http://www.monde-diplomatique.de/pm/2011/2005/2013.mondeText.artikel,a0012.idx,2015>.
- Kaplan, Stanley und John B. Garrick (1981). On the quantitative definition of risk. In: Risk Analysis 1(1): 11–27.
- Kasperson, Roger E. et al. (1988). The social amplification of risk: A conceptual framework. In: Risk Analysis 8(2): 177–187.
- Kauermann, Göran und Helmut Küchenhoff (2011). Nach Fukushima stellt sich die Risikofrage neu. In: FAZ, 30. März 2011. URL <http://www.faz.net/artikel/C32436/reaktorsicherheit-nach-fukushima-stellt-sich-die-risikofrage-neu-30332029.html>.
- Kazarians, Mardiros, Nathan Siu und George Apostolakis (1985). Fire risk analysis for nuclear power plants: Methodological developments and applications. In: Risk Analysis 5(1): 33–51.
- Kennedy, R.P. und M.K. Ravindra (1984). Seismic fragilities for nuclear power plant risk studies. In: Nuclear Engineering and Design 79: 47–68.
- Knight, Frank (1921). Risk, uncertainty and profit. Boston: Houghton Mifflin.

- Krause, Keith (1991). Military statecraft: Power and influence in Soviet and American arms transfer relationships. In: *International Studies Quarterly* 35(3): 313–336.
- Lund Peterson, Karen (2011). Risk analysis – A field within security studies. In: *European Journal of International Relations*. Pre-published 23 August 2011 as DOI 10.1177/1354066111409770.
- Kernkraftwerk Gösgen (2010). Technik und Betrieb. URL http://www.kkg.ch/upload/cms/user/KKG_Broschre_D_2010.pdf.
- Mohrbach, Ludger (2011). Unterschiede im gestaffelten Sicherheitskonzept: Vergleich Fukushima Daiichi mit deutschen Anlagen. In: *Internationale Zeitschrift für Kernenergie* 56(4/5): Sonderdruck.
- Molak, Vlasta (2011). The concept of risk. URL <http://www.gaiafoundation.net/FRARM%20Conclusion.pdf>.
- Neue Zürcher Zeitung (2009). Ja, Kernkraftwerke bergen Risiken. 10. November 2009. URL http://www.nzz.ch/nachrichten/blogs/nzzvotum/nzzvotum_akw_schweiz_energie/ja_kernkraftwerke_bergen_risiken_1.2216243.html.
- Neue Zürcher Zeitung (2011a). Noda macht Gesten zur Einheit. 31. August 2011, Seite 5.
- Neue Zürcher Zeitung (2011b). Atomkraft bleibt eine Option: Ständeratskommission will keine neuen Kraftwerke. 30. August 2011. URL http://www.nzz.ch/nachrichten/politik/schweiz/schweiz_atomkraft_option_staenderat_kommission_1.12240919.html.
- New York Times (2011). Japanese rules for nuclear plants relied on old science. 26 March 2011. URL <http://www.nytimes.com/2011/03/27/world/asia/27nuke.html?pagewanted=all>.
- North, D.W. (1995). Limitations, definitions, principles and methods of risk analysis. In: *Rev Sci Tech* 14(4): 913–923.
- Nuclear Engineering and Design* (2011), 241(8): 2629–3374. URL <http://www.sciencedirect.com/science/journal/00295493/241/8>.
- Oregon (2011). One-page Fukushima tsunami plan ruled out disaster. In: Oregon, 27 May 2011. URL http://www.oregonlive.com/today/index.ssf/2011/05/one-page_fukushima_tsunami_plan_ruled_out_disaster.html.
- Sjöberg, Lennart (2000). Factors in risk perception. In: *Risk Analysis* 20(1): 1–11.
- Taleb, Nassim Nicholas (2007). *The black swan: The impact of the highly improbable*. London, Random House.
- Trochim, William (2001). *The research methods knowledge base*. Cincinnati: Atomicdog publishers.
- Türschmann, Michael und Andreas Wielenberg (2011). Was ist eigentlich ein Restrisiko? In: *FAZ*, 28. April 2011. URL <http://www.faz.net/artikel/C30950/kernkraftwerke-was-ist-eigentlich-ein-restrisiko-30335354.html>.
- Waever, Ole (1995). *Securitization and de-securitization*. In: Ronnie Lipschutz (Hrsg.), *On security*. New York: Columbia University Press: 46–86.
- Yanagisawa, Ken et al. (2007). Tsunami assessment for risk management at nuclear power facilities in Japan. In: *Pure and Applied Geophysics* 164(565–576).
- Yoshioka, Ritsuo (2011). Fukushima accident report. URL www.shippai.org/images/html/news559/FukushimaReport-4.pdf.