

Simulation der gesellschaftlichen Folgen einer potenziellen nuklearen Katastrophe

Julian Reinhold, Rainer Schnell und Philip Höcker

Beitrag zur Veranstaltung »Analytische Perspektiven auf Transformationsprozesse: Muster und Mechanismen« der Sektion Modellbildung und Simulation

Einleitung

Angesichts der globalen Bemühungen zur Reduktion von Treibhausgasemissionen gewinnt die Diskussion um CO₂-neutrale Energiequellen zunehmend an Bedeutung. Auch in Deutschland wird in diesem Zusammenhang wieder über einen möglichen Wiedereinstieg in die Atomenergie debattiert (Kaiser 2025; Wilkens 2024; Lauter 2024; Nievelstein 2024). Dabei gerät leicht in den Hintergrund, dass nukleare Unfälle zu den schwerwiegendsten Krisenszenarien moderner Gesellschaften zählen. Die Reaktorkatastrophen von Tschernobyl (1986, Howard 2008) und Fukushima Daiichi (2011, Mizokami und Remppe 2021) gelten gemäß der International Nuclear Event Scale (INES, International Atomic Energy Agency und Nuclear Energy Agency 2013) als „katastrophale Unfälle“. Ihre Folgen reichten weit über die unmittelbaren physiologischen (Kamiya et al. 2015; World Health Organization 2013; Ochiai 2014) und psychologischen (Bromet 2012; Danzer und Danzer 2016; Fukasawa et al. 2020) Belastungen hinaus und umfassten tiefgreifende ökologische (International Atomic Energy Agency 2006), ökonomische (Samet und Seo 2016; Javid et al. 2025; Munro 2013) und gesellschaftliche (Longmuir und Agyapong 2021; Bier 2017) Veränderungen.

In Deutschland kam es zwar zu mehreren meldepflichtigen nuklearen Zwischenfällen¹, bislang jedoch nie zu einem Unfall, der langfristige Evakuierungen oder Umsiedlungen erforderlich gemacht hätte. Entsprechend existieren für den nationalen Kontext zwar Evakuierungspläne (Strahlenschutzkommission 2014, 2015), jedoch keine systematischen Analysen der sozialen und demografischen Auswirkungen einer großangelegten Evakuierung. Von besonderem Interesse sind die gesellschaftlichen Anpassungsprozesse, die nach einem solchen Ereignis zu erwarten wären. Mittels Mikrosimulationen sollen die Folgen eines hypothetischen nuklearen Katastrophenszenarios für die Gesellschaft in Deutschland untersucht werden. Der Fokus der Betrachtung liegt dabei auf der Modellierung der räumlichen Verteilung und Mobilität der Bevölkerung während einer Evakuierung sowie der Entwicklung der Erwerbstätigkeit und der langfristigen demografischen Veränderungen in den aufnehmenden Regionen.²

¹ So verzeichnete das Bundesamt für die Sicherheit der nuklearen Entsorgung (2025) für alle Kernkraftwerke in Deutschland zwischen 1,7 und 20,8 meldepflichtige Zwischenfälle pro Betriebsjahr. Der Mittelwert lag bei 8,5 Ereignissen pro Betriebsjahr.

² Der Beitrag in diesem Band stellt die deutschsprachige Fassung eines englischsprachigen Manuskripts dar, das auch medizinische Aspekte thematisiert (Reinhold et al. o. J.).

Mikrosimulationen und das Modell „MikroSim“

Die Verwendung von Mikrosimulationen hat in den Sozialwissenschaften und in der Politikberatung eine lange Tradition (O'Donoghue 2025, 2001; Li und O'Donoghue 2013). Bei einer Mikrosimulation handelt es sich um die computergestützte Simulation einer vorher spezifizierten Population auf Mikroebene (Li et al. 2014), beispielsweise aller Einwohner*innen eines Landes. Für die hier berichtete Simulation wird das Mikrosimulationsmodell MikroSim verwendet, welches von der Forschungsgruppe 2559 entwickelt und durch die Deutsche Forschungsgemeinschaft gefördert wird (Münnich et al. 2020; Münnich et al. 2021). Beim MikroSim-Modell handelt es sich um eine dynamische, zeitdiskrete Mikrosimulation der deutschen Bevölkerung. Diese Begriffe werden im Folgenden erläutert.

Zentral für die Fortschreibung einer Population mittels Mikrosimulation ist ein geeigneter Basisdatensatz, der die Bevölkerung zum Startdatum der Simulation gut abbildet. Hierbei kann es sich entweder um eine Zufallsstichprobe oder um eine Vollerhebung aus der Population handeln. Die Wahl bzw. die Konstruktion des Basisdatensatzes ist dabei häufig weder trivial noch einfach (O'Donoghue 2021). So wird ein Datensatz benötigt, der die zu simulierende Population adäquat beschreibt und gleichzeitig möglichst viele Merkmale der künftigen Simulationseinheiten umfasst.

Für das MikroSim-Modell wurde ein synthetischer Basisdatensatz erstellt, der mehr als 80 Millionen Zeilen umfasst, wobei jede Zeile eine Person in Deutschland repräsentiert. Dieser basiert auf einem Datensatz, der ursprünglich für Planungszwecke im Vorfeld der Volkszählung 2011 entwickelt wurde (Münnich et al. 2012). Die Grundlage dieses Kerndatensatzes bilden anonymisierte Register- und Zensusdaten, die um soziodemografische und sozioökonomische Merkmale auf Individual- und Haushaltsebene ergänzt wurden. Zudem wurden die Simulationseinheiten auf Kreisebene geografisch verortet und an regionale Referenzgrößen, hauptsächlich aus dem Zensus 2011, angepasst (Münnich et al. 2020).

In zeitdiskreten Mikrosimulationsmodellen wird simuliert, welche Individuen bestimmte Ereignisse in vorgegebenen Zeitintervallen erleben. Die Zustandsänderungen bzw. -übergänge erfolgen dabei einmal pro Zeitperiode. In MikroSim werden die Merkmale der simulierten Bevölkerung einmal pro simuliertem Jahr aktualisiert. Da es sich um stochastische Simulationen handelt, werden Eintrittswahrscheinlichkeiten für die Zustandsänderungen, die sogenannten Übergangswahrscheinlichkeiten, benötigt. Die meisten Übergangswahrscheinlichkeiten des MikroSim-Modells basieren auf statistischen Modellen wie binären oder multinomialen logistischen Regressionen, die im Vorhinein für die zu simulierenden Merkmale geschätzt wurden. Die meisten Schätzungen wurden anhand großer sozialwissenschaftlicher Panelstudien durchgeführt.

Das MikroSim-Modell ist in der Programmiersprache R (R Core Team 2025) implementiert und in zwölf Simulationsmodule unterteilt. Diese umfassen neben demografischen Prozessen auch Bildungs-, Arbeitsmarkt- und Partnerschaftsprozesse. Die Module stellen die technische Umsetzung der Übergangswahrscheinlichkeiten für die simulierten Personen dar. Die im Basisdatensatz enthaltenen Eigenschaften einer Person werden dabei als unabhängige Variablen in den zuvor geschätzten Modellen verwendet, um die Wahrscheinlichkeit von Statusänderungen vorherzusagen. Im Mortalitätsmodul wird beispielsweise die Wahrscheinlichkeit bestimmt, dass eine simulierte Person innerhalb eines Jahres stirbt. Während der Simulation durchläuft jede simulierte Person nacheinander jedes fachspezifische Modul.

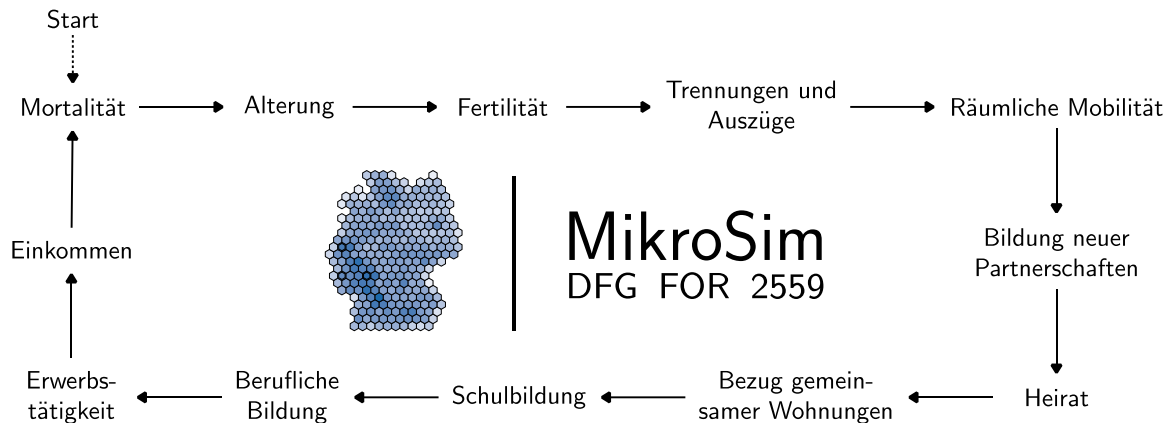


Abbildung 1: Reihenfolge der Module im MikroSim-Modell

Abbildung 1 zeigt die Reihenfolge der Module im MikroSim-Modell. In jedem Simulationszyklus durchlaufen alle Personen diese Module nacheinander, beginnend mit dem Mortalitätsmodul. Dies entspricht einer angenommenen plausiblen zeitlichen Abfolge demografischer, bildungsbezogener, beruflicher und partnerschaftlicher Ereignisse innerhalb eines Jahres. Durch diese Anordnung ist es möglich, mehrere Ereignisse pro Zeitintervall sowie zustandsabhängige Übergänge durch Übergangswahrscheinlichkeiten abzubilden. Die Simulation jeder Person mit allen relevanten Attributen ermöglicht zudem die Untersuchung hypothetischer Szenarien für Teilgruppen der Simulationseinheiten. So lassen sich Prozesse modellieren, bei denen Gruppen je nach zugewiesenen Eigenschaften unterschiedlich von Ereignissen betroffen sind. Unterschiedliche Verläufe können dabei durch die Anpassung von Parametern in den domänenspezifischen Simulationsmodulen abgebildet werden (Wolf 2001; Bélanger und Sabourin 2017).

Das Katastrophenszenario

Nach dem Reaktorunglück von Fukushima im Jahr 2011 beschloss die Bundesregierung unter Angela Merkel, ihre Energiepolitik grundlegend zu überdenken. Zunächst wurde ein Moratorium für die sieben ältesten Atomkraftwerke verhängt (Selje 2022). Die „Ethik-Kommission Sichere Energieversorgung“, die zur Bewertung der Risiken und ethischen Fragen der Kernenergie eingesetzt wurde, empfahl in ihrem Bericht (2011) ein Ende der Nutzung von Atomkraft innerhalb des nächsten Jahrzehnts. Im August 2011 trat das Gesetz zum Atomausstieg³ in Kraft, welches die schrittweise Abschaltung aller deutschen Kernkraftwerke regelte. Das letzte deutsche Atomkraftwerk wurde schließlich im April 2023 stillgelegt.

Die Simulation geht von einem Unfall im zweiten Block dieses Kernkraftwerks (Neckarwestheim, GKN II) aus. GKN II befindet sich im Norden Baden-Württembergs, 15 km südlich von Heilbronn (siehe Abbildung 2). Die beschriebene simulierte Katastrophe wird für das Jahr 2021 angesetzt: Zum einen war GKN II zu diesem Zeitpunkt noch in Betrieb und zum anderen waren die für die Simulation notwendigen amtlichen Daten zum Zeitpunkt der Durchführung erst für 2021 verfügbar. Es kann jedoch davon ausgegangen werden, dass die Schlussfolgerungen der Studie nicht von historischen Besonderheiten abhängen. Als Simulationshorizont dient das Jahr 2040, um die langfristigen gesellschaftlichen Folgen zu modellieren.

³ Dreizehntes Gesetz zur Änderung des Atomgesetzes vom 31. Juli 2011 (BGBl I S. 1704).

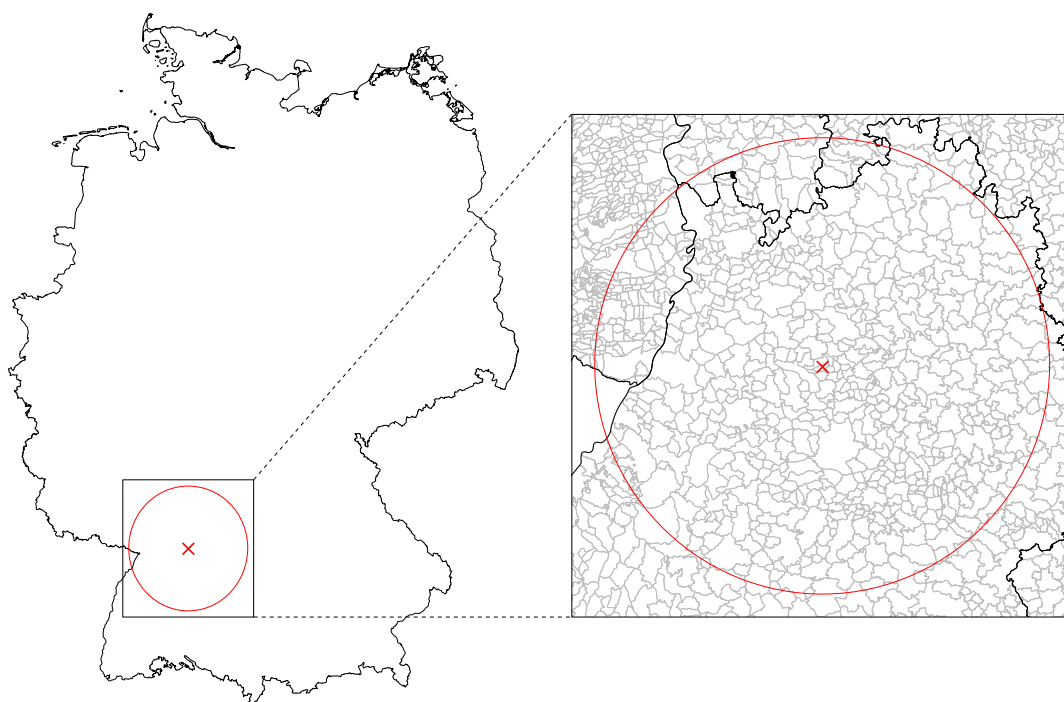


Abbildung 2: Standort des Kernkraftwerks Neckarwestheim 2 (rotes Kreuz) mit 100-km-Evakuierungszone (roter Kreis). In der vergrößerten Darstellung sind die Gemeindegrenzen als dünne graue Linien dargestellt

Das Unfallszenario orientiert sich an den Überlegungen von Oda Becker (2011), in denen eine Kernschmelze in Zusammenhang mit einem beschädigten Sicherheitsbehälter, einem sogenannten offenen Containment, postuliert wird. Auch wenn ein konservativer Freisetzungsanteil von 50 % leichter flüchtiger Nuklide (z. B. Jod, Cäsium) angenommen wird, werden in diesem Szenario große Mengen radioaktiver Stoffe freigesetzt.

Das Ausmaß und die Schwere der Auswirkungen eines Kernunfalls werden insbesondere von den Wetterbedingungen beeinflusst. Diese können die räumliche Verteilung erheblich verändern (Piguet et al. 2019). Eine detaillierte Modellierung atmosphärischer Dispersion von Radionukliden (Leelössy et al. 2018; Snoun et al. 2023) übersteigt jedoch den Rahmen der angestrebten Simulation, da ansonsten zahlreiche unterschiedliche Wetterszenarien berechnet werden müssten. Vereinfachend wird daher angenommen, dass sich infolge des Nuklearunfalls im Nahbereich eine näherungsweise radialsymmetrische Verteilung der Strahlungsbelastung um die Anlage ergibt, wobei die Dosisleistung mit zunehmender Entfernung vom Emissionsort abnimmt. Frühere Studien betrachteten in diesem Zusammenhang unterschiedliche Radien zwischen 7,5 und 215 km um den betroffenen Standort (Fekete 2022). Die hier beschriebene Simulation orientiert sich hingegen an den Rahmenempfehlungen der Strahlenschutzkommission (Strahlenschutzkommission 2015), welche anhand von Planungsgebieten zwischen 5 und 100 km vorzubereitende Maßnahmen zum Schutz der Bevölkerung definiert (Strahlenschutzkommission 2014). Dabei ist die sogenannte Fernzone mit einem Radius von 100 km um das Kernkraftwerk als äußeres Planungsgebiet festgelegt.⁴

⁴ Des Weiteren existiert für das gesamte Bundesgebiet ein Katalog vorbereitender Maßnahmen (Strahlenschutzkommission 2014, S. 5).

Kontamination und notwendige Evakuierung

Aufgrund der im vorherigen Abschnitt beschriebenen Schwere der Katastrophe kommt es zu einer langfristigen Kontamination der 100-km-Zone um das Kraftwerk. Diese Annahme basiert darauf, dass bei früheren Nuklearkatastrophen große Mengen des radioaktiven Elements Cäsium-137 freigesetzt wurden. Cäsium-137 ist eines der relevantesten radioaktiven Materialien, da es eine Halbwertszeit von etwa 30 Jahren hat und somit für den Großteil der langfristigen Strahlung verantwortlich ist (International Atomic Energy Agency 2006). Die Daten von Becker (2011) deuten darauf hin, dass die Bodenstrahlung auch nach 30 Jahren noch über dem Schwellenwert für eine langfristige Evakuierung liegen wird.⁵ Selbst wenn eine Dekontamination möglich ist, kann nicht davon ausgegangen werden, dass die Evakuierten zurückkehren (Rasmussen und Ewald 2022; Rasmussen und Wikström 2022). Eine Simulationsstudie zur Dekontamination nach der Katastrophe von Fukushima zeigt, dass in einem solchen Dekontaminations-szenario nur etwa 8 % der Evakuierten zurückkehren. Dies würde zu sehr hohen Kosten von 3,36 Millionen US-Dollar pro zurückkehrender Person führen (Nagamatsu et al. 2020).

Angesichts der Dimensionen des angenommenen Katastrophenszenarios ist eine Evakuierung des betroffenen Gebiets erforderlich. In Fukushima hat die Regierung einen Umkreis von 20 km um das Kraftwerk evakuiert. Die Anwohnenden in einem Radius von 20 bis 30 km wurden angewiesen, in ihren Häusern Schutz zu suchen (Oka 2022; Umweltministerium Japan 2019). Diese Entscheidungen basierten auf gemessenen Strahlungswerten. Werden Evakuierungsentscheidungen auf dieser Grundlage getroffen, überschreiten die Expositionen im hier beschriebenen Szenario den von der Strahlenschutzkommission und der Internationalen Atomenergie-Organisation empfohlenen Schwellenwert von 100 mSv pro Jahr (Strahlenschutzkommission 2015; International Atomic Energy Agency 2015a). Dies rechtfertigt eine vorsorgliche Evakuierung aller Personen in einem Umkreis von 100 km um das Kraftwerk (vgl. Kai et al. 2020). Abbildung 2 zeigt die 100-km-Evakuierungszone um das Kraftwerk.

Rahmenbedingungen der Evakuierung

Es wird daher davon ausgegangen, dass alle Personen innerhalb von sechs Stunden nach Eintritt des Unfalls evakuiert werden können. Die Evakuierungszeit richtet sich nach den Vorgaben der Strahlenschutzkommission (2015): Innerhalb eines Radius von 5 km muss die Evakuierung innerhalb von 6 Stunden erfolgen, innerhalb eines Radius von 20 km innerhalb von 24 Stunden. In der Simulation werden alle Personen innerhalb von sechs Stunden evakuiert. Die Annahme einer vollständigen Evakuierung innerhalb von sechs Stunden ist stark vereinfachend und in der Realität nicht plausibel. Bei dieser Annahme werden Herausforderungen wie Verkehrsstaus (Pel et al. 2012; Murray-Tuite und Wolshon 2013), Panik (Pecio 2025) sowie mangelnde Kooperationsbereitschaft zumindest in Teilen der Bevölkerung (Wu et al. 2020) ignoriert.

Wie in Abbildung 2 zu sehen ist, erstreckt sich die Evakuierungszone über Bundeslandgrenzen hinweg. Da der Katastrophenschutz in Deutschland föderal organisiert ist,⁶ erfordert das beschriebene Evakuierungsszenario eine Koordination zwischen den Bundesländern. Zudem ist eine Vielzahl an Gemeinden betroffen, auf deren Ebene die regionalen Katastrophenschutzbemühungen stattfinden würden. Auch dies trägt dazu bei, dass sich eine großangelegte Evakuierung langwierig gestalten würde.

⁵ Nicht berücksichtigt blieben dabei ökologische Prozesse, wie beispielsweise die sukzessive Migration von Cäsiumatomen in tiefere Bodenschichten (Isaksson und Raaf 2017). Diese Prozesse erfordern komplexere Modelle, die den Rahmen dieser Simulation sprengen würden.

⁶ Für den Katastrophenschutz ist der Bund nicht unmittelbar zuständig. Die Länder können allerdings im Katastrophenfall gemäß Artikel 35 des Grundgesetzes Unterstützung anfordern, beispielsweise in Form von Polizeikräften anderer Länder, dem Technischen Hilfswerk, der Bundespolizei oder sogar den Streitkräften.

Technische Implementierung des Szenarios

Die Simulation der Evakuierungsentscheidung erfolgt auf Kreisebene. Wie im vergrößerten Kartenausschnitt in Abbildung 2 zu sehen ist, liegen einige Gemeinden, und damit auch Kreise, nicht vollständig im Evakuierungsradius. Von den Kreisen, die teilweise außerhalb des Evakuierungsradius liegen, werden diejenigen, deren Fläche zu mehr als 50 % innerhalb des Evakuierungsradius liegt, zu den zu evakuierenden Kreisen gezählt. Kreise, deren Fläche zu 50 % oder weniger innerhalb des Evakuierungsradius liegt, gelten hingegen als nicht betroffen.

Nach Identifizierung der zu evakuierenden Kreise wird für jede Person ein Zielkreis für die Umsiedlung festgelegt. Die Daten zur Entfernung der ausgewählten Zielkreise basieren auf den Evakuierungsdistanzen, die nach dem Fukushima-Daiichi-Unglück erhoben wurden (Do 2019). Demnach beträgt die durchschnittliche Entfernung zum Zielort, an dem die Evakuierten am längsten verblieben, 132 km für Männer (SD: 105,3 km) und 155,5 km für Frauen (SD: 119,3 km). Innerhalb eines Jahres erreichen die meisten Menschen das Ziel mit der maximalen Migrationsentfernung und bleiben in der Regel dort (Do 2019). Xuan Bien Do berichtet, dass die Verteilung der betroffenen Menschen den Wanderungsgesetzen nach Ernst Georg Ravenstein (1885, 1889) folgt. Demnach wandern die meisten Menschen über kürzere Entfernungen und größere Orte ziehen mehr Menschen an als kleinere.

Die Evakuierung wird in der Simulation folgendermaßen modelliert: Zunächst wird für jeden betroffenen Haushalt die Migrationsentfernung aus einer Normalverteilung mit den oben genannten Parametern gezogen. Anschließend werden aus einer Entfernungsmatrix aller Kreise die zehn nächstgelegenen Kreise ermittelt, die nicht evakuierungsbetroffen sind. Unter Berücksichtigung der Tatsache, dass Haushalte bevorzugt in größere Kreise ziehen, wird der Zielkreis proportional zur Einwohnerzahl ausgewählt. Der Haushalt zieht dorthin um und verbleibt während der gesamten Simulation in diesem Kreis.

Auswirkungen auf die Beschäftigung und den Arbeitsmarkt

Der Fokus der Analyse liegt neben der Verteilung der Evakuierten und den daraus resultierenden gesellschaftlichen Folgen auf den Auswirkungen auf die Beschäftigung und den Arbeitsmarkt. Das Vorgehen erscheint in diesem Kontext als vergleichsweise trivial: Es wird unterstellt, dass alle Erwerbspersonen im Zuge der Katastrophe ihre gegenwärtige Anstellung verlieren werden. Aus pragmatischen Gründen sind Personen in Ausbildung von dieser Regelung ausgenommen. Es wird in vereinfachender Weise davon ausgegangen, dass alle Personen, die sich in einem Bildungsprozess befinden, diesen erfolgreich zu Ende führen können. Die vorliegende Analyse hat zum Ziel, die Zeitdauer bis zum Erreichen des Ausgangsniveaus der Erwerbsbeteiligung vor der Katastrophe zu ermitteln.

Simulationsergebnisse

Die Anzahl der Personen, die in den von der Strahlenschutzkommission definierten Planungsgebieten im Umkreis des Kraftwerks leben, ist in Tabelle 1 dargestellt. Im Rahmen des in der Simulation angenommenen Krisenszenarios wurde die Bevölkerung, die in einem Radius von 100 km um den Unglücksort lebt, evakuiert. Die Simulationsergebnisse zeigen, dass 8.475.509 Personen von der Evakuierung betroffen waren.

Tabelle 1: Anzahl der betroffenen Personen in den Planungsgebieten

Zone	Anzahl der Personen
5 km	358.084
20 km	587.272
50 km	4.000.578
100 km	8.475.509

Um die Zone um das Kraftwerk zu evakuieren, mussten mehr als 10 % der simulierten deutschen Bevölkerung (83,2 Millionen im Jahr 2021) umgesiedelt werden. Die evakuierte Bevölkerung wurde auf die nicht betroffenen Kreise verteilt. Abbildung 3 zeigt die Verteilung der evakuierten Personen über das Bundesgebiet ein Jahr nach der Katastrophe. Die Evakuierungszone ist in der Abbildung rot hervorgehoben. Die Zielkreise sind je nach Anzahl der aufgenommenen Geflüchteten grau eingefärbt.

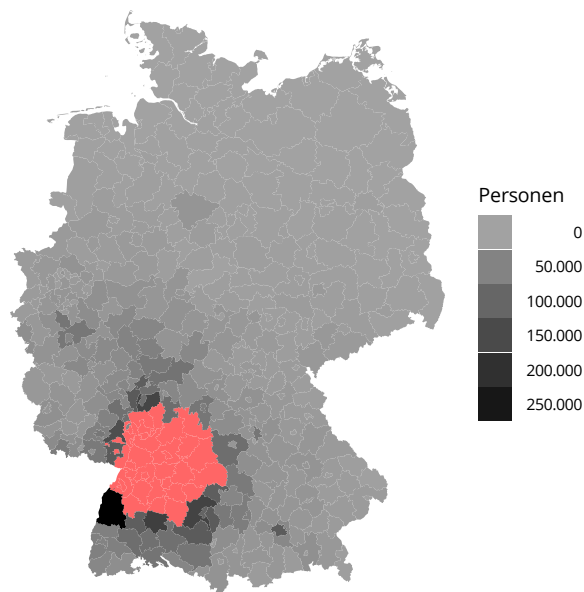


Abbildung 3: Räumliche Verteilung der Evakuierten nach der Umsiedlung. Die Evakuierungszone ist in Rot dargestellt

Es ist gut zu erkennen, dass das Umsiedlungsmuster der simulierten Personen den Gesetzen der Migration folgt. Die Personen ziehen nur so weit um, wie es notwendig ist. Zudem ziehen größere Kreise mehr Menschen an als kleinere. Angesichts des Wunsches nach möglichst kurzen Migrationsentfernungen müssen einige kleine Kreise in der Simulation eine beträchtliche Anzahl von Evakuierten aufnehmen. Weiter entfernte Kreise müssen dagegen nur wenige oder gar keine Evakuierte aufnehmen.

Abbildung 4 zeigt die Daten in einer anderen Darstellung, nämlich als Verhältnis der Einwohnerzahl vor und nach der Umsiedlung der Personen. Die betroffenen Gebiete der Evakuierungszone sind darin in Grau hervorgehoben. Der Standort des Atomkraftwerks ist in der Mitte der Evakuierungszone eingezeichnet. Die Symbole in der Karte zeigen für jeden Zielkreis, wie stark sich die Bevölkerung in den Kreisen durch die Aufnahme von Geflüchteten erhöht hat.

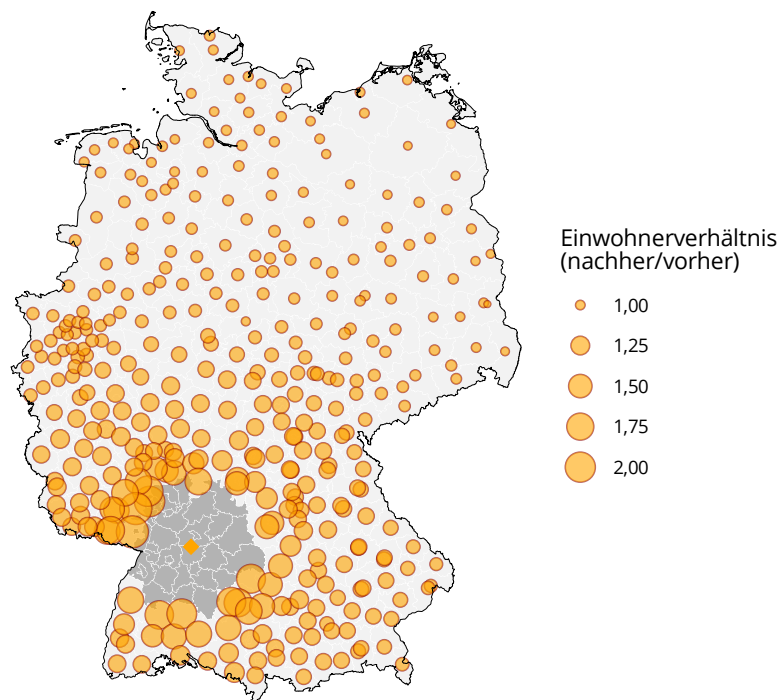


Abbildung 4: Relative Veränderung der Einwohnerzahl in den Zielgebieten

Die Umsiedlung eines großen Teils der Bevölkerung führt in einigen Kreisen zu einer Verdopplung der Einwohnerzahl. Gleichzeitig stehen kleinere Kreise vor der großen Herausforderung, eine große Anzahl von Menschen über einen längeren Zeitraum hinweg unterzubringen. Einige kleinere Kreise, die an die graue Evakuierungszone grenzen, werden sich fast verdoppeln. Wie Abbildung 4 ebenfalls zeigt, ziehen Evakuierte bevorzugt in nahegelegene Kreise. Kreise im Osten Deutschlands müssen dagegen keine oder nur sehr wenige Evakuierte aufnehmen.

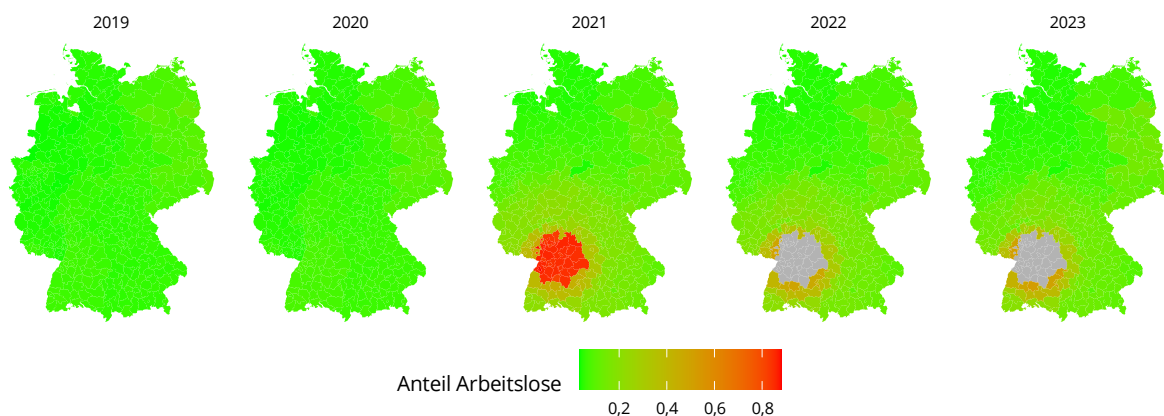


Abbildung 5: Veränderung des Anteils der erwerbslosen Personen im Simulationsverlauf

Diese räumlichen Verschiebungen der Bevölkerung wirken sich deutlich auf den Arbeitsmarkt aus. Im Szenario wurde angenommen, dass alle Personen ihren Arbeitsplatz verlieren. Diese Entwicklung lässt sich anhand von Abbildung 5 gut nachvollziehen, in der der Anteil der Arbeitslosen sowohl vor dem Katastrophenjahr als auch danach dargestellt ist. Es ist erkennbar, dass im Jahr 2021 alle Personen in den betroffenen Kreisen ihre Arbeit verlieren (rote Hervorhebung). Insgesamt verlieren 3.399.320 Per-

sonen ihren Arbeitsplatz. Infolge der Evakuierung werden die nun arbeitslosen Personen auf die nicht betroffenen Kreise verteilt, wodurch sich die Arbeitslosigkeit in den entsprechenden Kreisen erhöht.

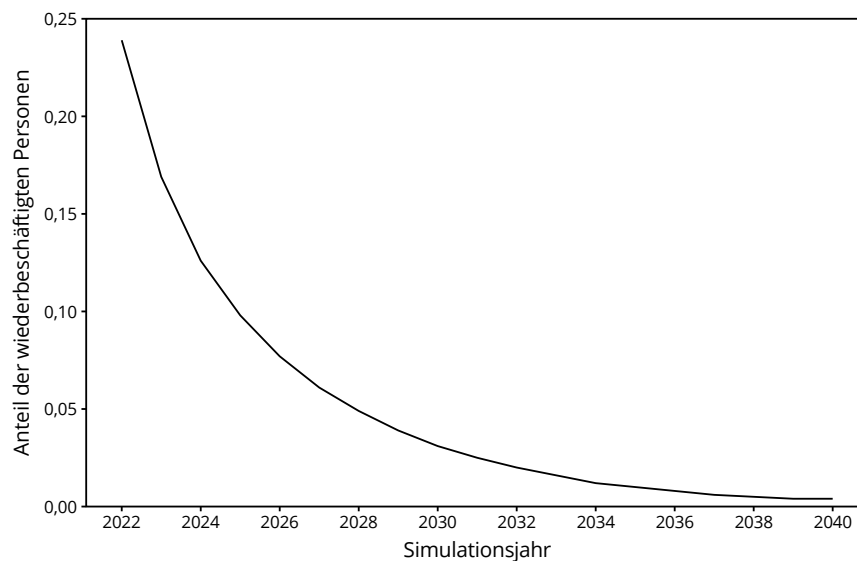


Abbildung 6: Anteil der Personen, die pro Jahr wieder in den Beruf zurückfinden

Abbildung 6 zeigt die Anteile der Personen pro Jahr, die nach der Katastrophe wieder eine Beschäftigung gefunden haben. Bereits ein Jahr nach der Katastrophe fanden 24 % der arbeitslosen, evakuierten Personen einen neuen Arbeitsplatz. Dieser hohe Wiedereingliederungsanteil kann in den folgenden Jahren allerdings nicht aufrechterhalten werden. Zwar sind die Raten in den direkten Folgejahren hoch, sie sinken dann jedoch kontinuierlich weiter ab. Gemäß den Resultaten der Simulation ist die Anzahl der Erwerbslosen zum Ende des Jahres 2040 auf 534.461 Personen gesunken. Dies bedeutet, dass im Simulationsverlauf ca. 84 % der evakuierten Personen eine Rückkehr in das Erwerbsleben verzeichnen konnten.

Diskussion und Schlussfolgerungen

In der Simulation waren mehr als 8,4 Millionen Menschen von der Katastrophe betroffen und mussten evakuiert werden. Daher würde sich die Bevölkerungszahl in einigen Kreisen verdoppeln. Dieser rasante Bevölkerungsanstieg würde alle Arten von Infrastruktur, einschließlich des Gesundheitssystems, stark belasten. Die Befriedigung grundlegender menschlicher Bedürfnisse hätte soziale und wirtschaftliche Folgen, die in diesem Ausmaß bisher unbekannt sind.

Hinsichtlich der Auswirkungen auf den Arbeitsmarkt lässt sich festhalten, dass sich die meisten Personen wieder in den Arbeitsmarkt eingliedern ließen, wenngleich bei etwa zwei Dritteln mehr als ein Jahr verstreichen würde.

Wie bei allen Simulationen hängen die Ergebnisse jedoch von den Annahmen des Modells und den gewählten Parametern ab. Jede Annahme und jeder Parameter kann hinterfragt werden. Diese Mikrosimulation veranschaulicht zwar die Evakuierung und Bevölkerungsverteilung in großem Maßstab unter extremen Katastrophenbedingungen, doch bleiben einige wichtige Aspekte unberücksichtigt. Das Modell geht implizit von einer radialen Ausbreitung des Fallouts um den Unfallort mit gleichmäßiger Exposition aus. Eine zu prädiktiven Zwecken durchgeführte Simulation müsste die realistische meteorologische Ausbreitung der Wolke (Rentai 2011), den Einfluss von Niederschlägen (Abdul Rashid et al.

2025) und die Inhalation von radioaktiven Partikeln in der Luft (Kaminski et al. 2024) berücksichtigen und könnte dann auch für eine genauere Vorhersage der gesundheitlichen Auswirkungen genutzt werden.

Das vorgestellte Modell berücksichtigt auch keine Gegenmaßnahmen wie Schutzmaßnahmen (Bedwell et al. 2025), mögliche Lebensmittelbeschränkungen (Skuterud et al. 1997) und die Durchführung von Dekontaminierungsmaßnahmen des Unfallorts und der betroffenen Gebiete (Liu et al. 2022).

Das Verhalten während der Evakuierung basiert auf der vollständigen Einhaltung der Vorschriften und berücksichtigt dabei nicht die Konsequenzen von Panik (Pecio 2025), unkooperativem Verhalten (Wu et al. 2020) oder (unzulässigen) Rückwanderungen (Hunter 2005; Bier 2017; Nagamatsu et al. 2020). Die Infrastrukturkapazität in den Aufnahmegebieten wird als unbegrenzt behandelt, anstatt die tatsächliche Überlastung von Krankenhäusern und Notunterkünften, Verkehrsstaus (Pel et al. 2012; Murray-Tuite und Wolshon 2013) und Ausfälle in der Lieferkette (Jia et al. 2025) widerzuspiegeln. Governance-Aspekte wie Entscheidungsverzögerungen (Hatanaka et al. 2014), Herausforderungen bei der zwischenstaatlichen Koordination und die Verteilung von Hilfsgütern wurden hier nicht berücksichtigt. Schließlich werden langfristige Wiederaufbauprozesse wie die Sanierung von Land, psychologische Auswirkungen auf die Gesundheit (Bromet et al. 2011; Oe et al. 2016) und sekundäre Bevölkerungsbewegungen nicht modelliert. Letzteres hätte mutmaßlich einen erheblichen Einfluss auf die Wiederaufnahme einer Erwerbstätigkeit.

Für diese Simulation wurde ein detailliertes Mikrosimulationsmodell der Bevölkerung verwendet, das viele Bereiche des Bevölkerungslebenszyklus umfasst. Ursprünglich konzentrierte sich das Modell auf Bevölkerungsprognosen, Bildung und Erwerbsbeteiligung. Unabhängig von den verwendeten Annahmen und Parametern ist das wichtigste Ergebnis höchstwahrscheinlich die scheinbar offensichtliche Schlussfolgerung, dass die sozialen und wirtschaftlichen Folgen einer großflächigen nuklearen Katastrophe in einem dicht besiedelten und wirtschaftlich aktiven Gebiet immens und schwer zu bewältigen gewesen wären. Wie Berichte aus anderen Ländern gezeigt haben, sind westliche Industriegesellschaften auf solche Katastrophen nicht vorbereitet. Die Nuklearkatastrophe von Fukushima Daiichi im Jahr 2011 in Japan hat große Lücken in den Notfallmaßnahmen des Landes offenbart, darunter schlechte Kommunikation, mangelnde Koordination zwischen den Behörden und einen Mangel an Schutzausrüstung und Überwachungsgeräten (International Atomic Energy Agency 2015b).

Literatur

- Abdul Rashid, Faisal Izwan, Mohd Idzat Idris, Irman Abdul Rahman und Muhammad Rawi Mohamed Zin. 2025. Meteorological Effects on Atmospheric Radioactive Particles: A Review of Recent Research. *Journal of Nuclear Science and Technology* 62:881–914.
- Becker, Oda. 2011. *Auswirkungen eines schweren Unfalls im Atomkraftwerk Neckarwestheim 1*. Hannover: Greenpeace.
- Bedwell, Peter, Jonathan Sherwood, H. McNamara, Joanne Brown, S. M. Haywood und S. Field. 2025. Recommendations on the Effectiveness of Sheltering as a Protective Action in the UK. *Journal of Radiological Protection* 45:031508.
- Bélanger, Alain, und Patrick Sabourin. 2017. *Microsimulation and Population Dynamics: An Introduction to Modgen 12*. Cham: Springer.
- Bier, Vicki Marion. 2017. Understanding and Mitigating the Impacts of Massive Relocations Due to Disasters. *Economics of Disasters and Climate Change* 1:179–202.
- Bromet, Evelyn J. 2012. Mental Health Consequences of the Chernobyl Disaster. *Journal of Radiological Protection* 32:N71–N75.

- Bromet, E. J., J. M. Havenaar und L. T. Guey. 2011. A 25 Year Retrospective Review of the Psychological Consequences of the Chernobyl Accident. *Clinical Oncology* 23:297–305.
- Bundesamt für die Sicherheit der nuklearen Entsorgung. 2025. Kernkraftwerke in Deutschland: Meldepflichtige Ereignisse seit Inbetriebnahme. <https://www.base.bund.de/de/nukleare-sicherheit/stoerfallmeldestelle/meldpflichtige-ereignisse/kernkraftwerke/kernkraftwerke.html> (Zugegriffen: 27. Feb. 2026).
- Danzer, Alexander M., und Natalia Danzer. 2016. The Long-Run Consequences of Chernobyl: Evidence on Subjective Well-Being, Mental Health and Welfare. *Journal of Public Economics* 135:47–60.
- Do, Xuan Bien. 2019. Fukushima Nuclear Disaster Displacement: How Far People Moved and Determinants of Evacuation Destinations. *International Journal of Disaster Risk Reduction* 33:235–252.
- Ethik-Kommission Sichere Energieversorgung. 2011. Deutschlands Energiewende: Ein Gemeinschaftswerk für die Zukunft. <https://www.bundesregierung.de/resource/blob/2065474/394384/35c612bcd5b2f54e68ba1a72acbcd6a/2011-07-28-abschlussbericht-ethikkommission-data.pdf> (Zugegriffen: 27. Feb. 2026).
- Fekete, Alexander. 2022. Phasing Out of Nuclear – Phasing Out of Risk? Spatial Assessment of Social Vulnerability and Exposure to Nuclear Power Plants in Germany. *Progress in Disaster Science* 15:100242.
- Fukasawa, Maiko, Norito Kawakami, Maki Umeda, Tsuyoshi Akiyama, Naoko Horikoshi, Seiji Yasumura, Hirooki Yabe, Yuriko Suzuki und Evelyn J. Bromet. 2020. Long-Lasting Effects of Distrust in Government and Science on Mental Health Eight Years After the Fukushima Nuclear Power Plant Disaster. *Social Science & Medicine* 258:113108.
- Hatanaka, Takashi, Sumito Yoshida, Mayo Ojino und Masami Ishii. 2014. The Communication of Information Such as Evacuation Orders at the Time of a Nuclear Power Station Accident—Recommendations for Responses by the National Government and Electric Power Utilities to the “Information Disaster”. *Japan Medical Association Journal* 57:293–319.
- Howard, John. 2008. Chernobyl Nuclear Disaster. In *Encyclopedia of Quantitative Risk Analysis and Assessment*, Vol. 1, Hrsg. Edward L. Melnick und Brian S. Everitt, 227–232. Chichester: Wiley.
- Hunter, Lori M. 2005. Migration and Environmental Hazards. *Population and Environment* 26:273–302.
- International Atomic Energy Agency. 2006. *Environmental Consequences of the Chernobyl Accident and their Remediation: Twenty Years of Experience*. Wien: International Atomic Energy Agency.
- International Atomic Energy Agency. 2015a. *Preparedness and Response for a Nuclear or Radiological Emergency: General Safety Requirements*. Wien: International Atomic Energy Agency.
- International Atomic Energy Agency. 2015b. *The Fukushima Daiichi Accident*. Wien: International Atomic Energy Agency.
- International Atomic Energy Agency, und Nuclear Energy Agency. 2013. *The International Nuclear Event Scale (INES): User's Manual*. Wien: International Atomic Energy Agency.
- Isaksson, Mats, und Christopher L. Raaf. 2017. *Environmental Radioactivity and Emergency Preparedness*. Boca Raton: CRC Press.
- Javid, Reza, Mats Isaksson, Robert Finck und Christopher L. Rääf. 2025. Economic Aspects of Evacuation and Resettlement After a Radioactive Fallout in Sweden. *Radiation Protection Dosimetry* 201:911–918.
- Jia, Fu, Xiaoyin Zheng und Lujie Chen. 2025. Disaster Management in Supply Chains: A Systematic Literature Review with Bibliometric and Content Analysis. *International Journal of Logistics Research and Applications* 28:2068–2097.
- Kai, M., T. Homma, J. Lochard, T. Schneider, J. F. Lecomte, A. Nisbet, S. Shinkarev, V. Averin und T. Lazo. 2020. ICRP Publication 146: Radiological Protection of People and the Environment in the Event of a Large Nuclear Accident. *Annals of the ICRP* 49:11–135.
- Kaiser, Tobias. 2025. Das Tabu bricht – wo die Atomkraft jenseits von Deutschland ihr Comeback erlebt. <https://www.welt.de/wirtschaft/article256320350/AKWs-Europa-hat-gemerkt-dass-es-sich-bei-der-Energiewende-selbst-belogen-hat.html> (Zugegriffen: 27. Feb. 2026).

- Kaminski, Michael D., Nico Daiyega und Matthew Magnuson. 2024. A Review of the Resuspension of Radioactively Contaminated Particles by Vehicle and Pedestrian Traffic—Current Theory, Practice, Gaps, and Needs. *Health Physics* 126:216–240.
- Kamiya, Kenji, Kotaro Ozasa, Suminori Akiba, Ohstura Niwa, Kazunori Kodama, Noboru Takamura, Elena K. Zaharieva, Yuko Kimura und Richard Wakeford. 2015. Long-Term Effects of Radiation Exposure on Health. *The Lancet* 386:469–478.
- Lauter, Rita. 2024. Atomkraft: IAEA-Chef fände deutsche Rückkehr zu Atomkraft „logisch“. <https://www.zeit.de/wirtschaft/2024-11/atomkraft-rueckkehr-deutschland-iaea-rafael-grossi-logisch> (Zugegriffen: 27. Feb. 2026).
- Leelőssy, Ádám, István Lagzi, Attila Kovács und Róbert Mészáros. 2018. A Review of Numerical Models to Predict the Atmospheric Dispersion of Radionuclides. *Journal of Environmental Radioactivity* 182:20–33.
- Li, Jinjing, Cathal O'Donoghue und Gijs Dekkers. 2014. Dynamic Models. In *Handbook of Microsimulation Modelling, Contributions to Economic Analysis*, Hrsg. Cathal O'Donoghue, 306–343. Bingley: Emerald.
- Li, Jinjing, und Cathal O'Donoghue. 2013. A Survey of Dynamic Microsimulation Models: Uses, Model Structure and Methodology. *International Journal of Microsimulation* 6:3–55.
- Liu, Shengyong, Yingyong He, Honghu Xie, Yongjun Ge, Yishan Lin, Zhitong Yao, Meiqing Jin, Jie Liu, Xinyang Chen, Yuhang Sun und Binhui Wang. 2022. A State-of-the-Art Review of Radioactive Decontamination Technologies: Facing the Upcoming Wave of Decommissioning and Dismantling of Nuclear Facilities. *Sustainability* 14:4021.
- Longmuir, Caley, und Vincent I. O. Agyapong. 2021. Social and Mental Health Impact of Nuclear Disaster in Survivors: A Narrative Review. *Behavioral Sciences* 11:113.
- Mizokami, Shinya, und Joy L. Rempe. 2021. The Events at Fukushima Daiichi. In *Encyclopedia of Nuclear Energy*, vol. 2, Hrsg. Ehud Greenspan, 53–66. Amsterdam: Elsevier.
- Münnich, Ralf, Rainer Schnell, Hanna Brenzel, Hanna Dieckmann, Sebastian Dräger, Jana Emmenegger, Philip Höcker, Johannes Kopp, Hariolf Merkle, Kristina M. Neufang, Monika Obersneider, Julian Reinhold, Jannik Schaller, Simon Schmaus und Petra Stein. 2021. A Population Based Regional Dynamic Microsimulation of Germany: The MikroSim Model. *methods, data, analyses* 15:241–264.
- Münnich, Ralf, Rainer Schnell, Johannes Kopp, Petra Stein, Markus Zwick, Sebastian Dräger, Hariolf Merkle, Monika Obersneider, Nico Richter und Simon Schmaus. 2020. Zur Entwicklung eines kleinräumigen und sektorenübergreifenden Mikrosimulationsmodells für Deutschland. In *Mikrosimulationen: Methodische Grundlagen und ausgewählte Anwendungen*, Hrsg. Marc Hannappel und Johannes Kopp, 109–138. Wiesbaden: Springer VS.
- Münnich, Ralf, Siegfried Gabler, Matthias Ganninger, Jan Pablo Burgard und Jan-Philipp Kolb. 2012. *Stichprobenoptimierung und Schätzung im Zensus 2011*. Wiesbaden: Statistisches Bundesamt.
- Munro, Alistair. 2013. The Economics of Nuclear Decontamination: Assessing Policy Options for the Management of Land Around Fukushima Dai-ichi. *Environmental Science & Policy* 33:63–75.
- Murray-Tuite, Pamela, und Brian Wolshon. 2013. Evacuation Transportation Modeling: An Overview of Research, Development, and Practice. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies* 27:25–45.
- Nagamatsu, Shingo, Adam Rose und Jonathan Eyer. 2020. Return Migration and Decontamination After the 2011 Fukushima Nuclear Power Plant Disaster. *Risk Analysis* 40:800–817.
- Nieselstein, Lars-Eric. 2024. Rückkehr zur Atomenergie in Deutschland? Neue Pläne für US-Atomkraftwerk sorgen für Aufsehen. <https://www.merkur.de/wirtschaft/rueckkehr-zur-atomenergie-in-deutschland-neue-plaene-fuer-us-atomkraftwerk-sorgen-fuer-aufsehen-zr-93324291.html> (Zugegriffen: 27. Feb. 2026).
- O'Donoghue, Cathal. 2001. Dynamic Microsimulation: A Methodological Survey. *Brazilian Electronic Journal of Economics* 4:77.
- O'Donoghue, Cathal. 2021. *Practical Microsimulation Modelling*. Oxford: Oxford University Press.
- O'Donoghue, Cathal. 2025. Dynamic Microsimulation Modelling: A Survey and Critical Assessment IV. *International Journal of Microsimulation* 18:56–83.
- Ochiai, Eiichiro. 2014. Data on Hiroshima and Nagasaki. In *Hiroshima to Fukushima: Biohazards of Radiation*, Hrsg. Eiichiro Ochiai, 143–153. Heidelberg: Springer.

- Oe, Misari, Senta Fujii, Masaharu Maeda, Masato Nagai, Mayumi Harigane, Itaru Miura, Hirooki Yabe, Tetsuya Ohira, Hideto Takahashi, Yuriko Suzuki, Seiji Yasumura und Masafumi Abe. 2016. Three-Year Trend Survey of Psychological Distress, Post-Traumatic Stress, and Problem Drinking Among Residents in the Evacuation Zone After the Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant Accident [The Fukushima Health Management Survey]. *Psychiatry and Clinical Neurosciences* 70:245–252.
- Oka, Yoshiaki. 2022. Risks and Benefits of Evacuation in TEPCO's Fukushima Daiichi Nuclear Power Station Accident. *Progress in Nuclear Energy* 148:104222.
- Pecio, Mariusz. 2025. Issues of Crowd Evacuation in Panic Conditions. *Urban Science* 9:258.
- Pel, Adam J., Michiel C. J. Bliemer und Serge P. Hoogendoorn. 2012. A Review on Travel Behaviour Modelling in Dynamic Traffic Simulation Models for Evacuations. *Transportation* 39:97–123.
- Piguet, Frédéric-Paul, Pierre Eckert, Claudio Knüsli, Bastien Deriaz, Walter Wildi und Gregory Giuliani. 2019. Modeling of a Major Accident in Five Nuclear Power Plants From 365 Meteorological Situations in Western Europe and Analysis of the Potential Impacts on Populations, Soils and Affected Countries. <https://archive-ouverte.unige.ch/unige:122532> (Zugegriffen: 27. Feb. 2026).
- R Core Team. 2025. R: A Language and Environment for Statistical Computing. <https://www.R-project.org/>
- Rasmussen, Joel, und Jens Ewald. 2022. The Relation Between Socioeconomic Status and Risk Attitudes: A Nuclear Accident Scenario in Sweden. *Economics of Disasters and Climate Change* 6:541–555.
- Rasmussen, Joel, und Petter B. Wikström. 2022. Returning Home after Decontamination? Applying the Protective Action Decision Model to a Nuclear Accident Scenario. *International Journal of Environmental Research and Public Health* 19:7481.
- Ravenstein, Ernst Georg. 1885. The Laws of Migration. *Journal of the Statistical Society of London* 48:167–227.
- Ravenstein, Ernst Georg. 1889. The Laws of Migration: Second Paper. *Journal of the Royal Statistical Society* 52:241–301.
- Reinhold, Julian, Philip Höcker und Rainer Schnell. o. J. Making a Case for Microsimulation in Disaster Research: Modeling the Aftermath of a Potential Nuclear Disaster. Eingereicht, unter Begutachtung.
- Rentai, Yao. 2011. Atmospheric Dispersion of Radioactive Material in Radiological Risk Assessment and Emergency Response. *Progress in Nuclear Science and Technology* 1:7–13.
- Samet, Jonathan M., und Joann Seo. 2016. The Financial Costs of the Chernobyl Nuclear Power Plant Disaster: A Review of the Literature. https://globalhealth.usc.edu/wp-content/uploads/2016/01/2016_chernobyl_costs_report.pdf (Zugegriffen: 27. Feb. 2026).
- Selje, Tom. 2022. Comparing the German Exit of Nuclear and Coal: Assessing Historical Pathways and Energy Phase-Out Dimensions. *Energy Research & Social Science* 94:102883.
- Skuterud, Lavrans, Per Strand und Brenda J. Howard. 1997. Part 3: Animals. In *Reclamation of Contaminated Urban and Rural Environments Following a Severe Nuclear Accident*, Hrsg. Per Strand, Lavrans Skuterud und Judith Melin, 52–87. Roskilde: Nordic Nuclear Safety Research.
- Snoun, Hosni, Moez Krichen und Hatem Chérif. 2023. A Comprehensive Review of Gaussian Atmospheric Dispersion Models: Current Usage and Future Perspectives. *Euro-Mediterranean Journal for Environmental Integration* 8:219–242.
- Strahlenschutzkommission. 2014. Planungsgebiete für den Notfallschutz in der Umgebung von Kernkraftwerken: Empfehlung der Strahlenschutzkommission. <https://www.nbn-resolving.de/urn:nbn:de:101:1-201403101200> (Zugegriffen: 27. Feb. 2026).
- Strahlenschutzkommission. 2015. Rahmenempfehlungen für den Katastrophenschutz in der Umgebung kerntechnischer Anlagen: Empfehlung der Strahlenschutzkommission. <https://www.nbn-resolving.de/urn:nbn:de:101:1-201512213337> (Zugegriffen: 27. Feb. 2026).
- Umweltministerium Japan. 2019. Responses Immediately after the Accident. <https://www.env.go.jp/en/chemi/rhm/basic-info/1st/06-02-01.html> (Zugegriffen: 27. Feb. 2026).
- Wilkens, Andreas. 2024. Von der Leyen: „Wir müssen Erneuerbare und Atomkraft nutzen“. <https://www.heise.de/news/von-der-Leyen-Wir-muessen-Erneuerbare-und-Atomkraft-nutzen-9852987.html> (Zugegriffen: 27. Feb. 2026).

- Wolf, Douglas A. 2001. The Role of Microsimulation in Longitudinal Data Analysis. *Canadian Studies in Population* 28:313.
- World Health Organization. 2013. *Health Risk Assessment from the Nuclear Accident After the 2011 Great East Japan Earthquake and Tsunami, Based on a Preliminary Dose Estimation*. Geneva: World Health Organization.
- Wu, Hao-Che, Shih-Kai Huang und Michael K. Lindell. 2020. Evacuation Planning. In *The Routledge Handbook of Urban Disaster Resilience: Integrating Mitigation, Preparedness, and Recovery Planning*, Hrsg. Michael K. Lindell, 206–222. New York: Routledge.