

Grafische Ermittlung des Todesfallrisikos für bestehende Gebäude in der Schweiz

Conference Paper**Author(s):**

Arslantürkoglu, Safak ; Stojadinovic, Bozidar 

Publication date:

2023

Permanent link:

<https://doi.org/10.3929/ethz-b-000645455>

Rights / license:

In Copyright - Non-Commercial Use Permitted

Originally published in:

DGEB-Publikation 19

GRAFISCHE ERMITTLUNG DES TODESFALLRISIKOS FÜR BESTEHENDE GEBÄUDE IN DER SCHWEIZ

Safak Arslantürkoglu¹, Bozidar Stojadinovic²

¹ Departement Bau, Umwelt und Geomatik, ETH Zürich, Zürich, safak@ibk.baug.ethz.ch

² Departement Bau, Umwelt und Geomatik, ETH Zürich, Zürich, stojadinovic@ibk.baug.ethz.ch

KURZFASSUNG

Die Erdbebenüberprüfung bestehender Gebäude erfolgt in der Schweiz gemäß SIA 269/8. Der im Schwerpunkt liegende Erfüllungsfaktor gibt an, inwieweit ein bestehendes Gebäude die Anforderungen der Neubau-Normen erfüllt. Mit einer Risikokurve wird jedem Erfüllungsfaktor ein Personenrisikofaktor (UCR_{SIA}) zugeordnet, welcher das jährliche Todesfallrisiko eines Individuums infolge eines Erdbebens darstellt. Trotz ihrer praktischen Natur wirft diese hergeleitete Beziehung die Frage auf, ob und in welchem Umfang der Erfüllungsfaktor in der Lage ist, das Todesfallrisiko abzuschätzen.

Die leistungsorientierte Methode (PBEE) des Pacific Earthquake Engineering Research Center (PEER) bietet ein zuverlässiges Verfahren zur Ermittlung des Erdbebenrisikos in Form der Überschreitungsrates einer Entscheidungsvariable. Diese Methode wird jedoch vorwiegend in der Forschung angewendet, da sie fundierte Kenntnisse der Wahrscheinlichkeitstheorie fordert und die numerische Lösung eines Mehrfachintegrals benötigt.

Diese Arbeit präsentiert eine praktische Alternative zur SIA 269/8 bezogen auf die geschlossene Lösung der PEER PBEE Methode ohne die numerische Integration [1]. Im Gegensatz zum Personenrisikofaktor, wird die jährliche Überschreitungsrates der Todesopfer als Risikomaß ausgewählt, und die Personenbelegung direkt mitberücksichtigt. Dank der grafischen Darstellung der probabilistischen Modelle werden die Beiträge der einzelnen Risikokomponenten transparent abgebildet.

Für ein bestehendes Mauerwerksgebäude wurde das seismische Risiko in Form der jährlichen Überschreitungsrates der Todesopfer und des Personenrisikofaktors berechnet. Das präsentierte Framework überschätzte die jährliche Überschreitungsrates der Todesopfer gegenüber der numerischen Integration nur geringfügig. Zudem wurde der Personenrisikofaktor über numerische Integration (UCR_{num}) für die Validierung der SIA 269/8 Methode ermittelt. Ein Vergleich der Risikofaktoren UCR_{num} und UCR_{SIA} hat gezeigt, dass die SIA 269/8 das Personenrisiko um einen Faktor von sechs unterschätzte.

Schlagwörter: Erdbebenrisiko, Unbewehrtes Mauerwerk, Bestehende Gebäude, SIA 269/8

1. EINFÜHRUNG

In der Schweiz haben Erdbeben das größte Naturgefahrenpotenzial katastrophale Auswirkungen zu verursachen [2, 3]. Für die seismische Überprüfung bestehender Gebäude bietet die SIA 269/8 [9] ein risikobasiertes Verfahren über den Erfüllungsfaktor an. Der Erfüllungsfaktor ist definiert als Verhältnis zwischen der Kapazität eines bestehenden Bauwerks und der Normforderung für ein identisches neues

Bauwerk. Mittels einer Risikokurve ordnet die SIA 269/8 jedem Erfüllungsfaktor einen Personenrisikofaktor (UCR_{SIA}) zu, welcher das jährliche Todesfallrisiko eines Individuums infolge eines Erdbebens repräsentiert. Für Gebäude mit einem Erfüllungsfaktor kleiner als 0,25 geht die SIA 269/8 von einem Personenrisikofaktor größer als 10^{-5} aus und diktiert Maßnahmen um jeden Preis, um ein gewisses Mindestziel der Lebenssicherheit zu gewährleisten. Ein Erfüllungsfaktor größer als 1,00 bedeutet die Einhaltung der Neubau-Normen, für welche ein Risikofaktor von 10^{-6} angenommen wird. Die Erfüllungsfaktoren bestehender Gebäude liegen oft zwischen 0,25 und 1,00, was weitere Kosten-Nutzen-Abwägungen erfordert, ob und in welchem Umfang Maßnahmen fällig sind, die ebenfalls in der SIA 269/8 aufgeführt sind.

Die praktische Natur der Risikokurve zielt zwar die Abgrenzung des Individual- und Kollektivrisikos ohne den Einsatz expliziter probabilistischen Ansätze ab, jedoch wirft ihre Einfachheit Fragen hinsichtlich ihrer Fähigkeit der Risikoermittlung auf. Zum Beispiel, ein modernes Gebäude an einem Standort mit hoher Seismizität, das denselben Erfüllungsfaktor aufweist wie ein anfälligeres Gebäude an einem Standort mit geringer Seismizität, würde aus Sicht der SIA 269/8 ein gleiches Personenrisiko darstellen, da die Kapazität und die Anforderung in einer einzigen Größe, dem Erfüllungsfaktor, zusammengefasst wird. Das tatsächliche Personenrisiko kann dennoch aufgrund seines mehrkomponentigen Aufbaus sehr unterschiedlich sein.

Eine Methode zur Ermittlung der wirtschaftlichen und sozialen Folgen von Erdbeben ist die leistungsbasierte Methode des Pacific Earthquake Engineering Research Center (PEER PBEE) [8, 4, 7] zur Quantifizierung der Sicherheit von Ingenieurbauwerken anhand von Entscheidungsvariablen. Das dabei im Zentrum stehende PEER PBEE Integral ermöglicht es dem Analysten zwar die Risikoermittlung in kleinere Teile zu zerlegen, seine Lösung ist allerdings eher komplex, und seine Anwendung ist weitgehend auf die Forschung beschränkt.

2. FRAMEWORK ZUR ERMITTLUNG DES TODESFALLRISIKOS

Für die Ermittlung des seismischen Todesfallrisikos wird in dieser Arbeit ein auf PEER PBEE Methode basierendes grafisches Framework in geschlossener Form vorgeschlagen, ohne dass eine numerische Lösung des PEER PBEE Integrals erforderlich ist. Im Gegensatz zum Personenrisikofaktor aus der SIA 269/8, wird die jährliche Überschreitungsrates der Todesopfer als Entscheidungsvariable implementiert, welche die Personenbelegung direkt berücksichtigt. Vor dem Eingehen in die Details des Frameworks wird der interessierte Leser auf den Hauptartikel [1] verwiesen, in dem eine ausführlichere Erklärung und Hintergrundinformationen zum Framework bereitgestellt sind.

Für die bedingte Abhängigkeit der gewählten Entscheidungsvariable vom Intensitätsmaß (IM) werden drei probabilistische Modelle erstellt: seismische Anforderungs- (probabilistic seismic demand: PSDM), Schadens- (probabilistic damage: PDM) und Verlustmodelle (probabilistic loss: PLM). Das Framework beginnt mit der Definition von PSDM, indem das Gebäudeverhalten in Form eines Bedarfsparameters (engineering demand parameter: EDP) mit der durch die IM dargestellten seismischen Gefährdung in Beziehung gesetzt wird. Der nächste Schritt ist die Erstellung eines PDM durch die Verknüpfung von EDPs mit Schadensmaßen (damage measure: DM), wobei letztere den physischen Zustand des Bauwerks beschreiben. Anschließend wird das Schadensmodell durch Entscheidungsvariablen (decision variable: DV) definiert, die mit den Schadensmaßen verknüpft sind. Unter der Annahme der Lognormalität probabilistischer Modelle und ihrer konstanten bedingten Streuung, wird die Beziehung zwischen der Medianvariablen X (bezeichnet als \hat{X}) und der abhängigen Variable des probabilistischen Modells über Regressionmodelle mit jeweils zwei Koeffizienten und einer Standardabweichung σ erstellt (Tabelle 1).

Tabelle 1. Modelle der Risikokomponenten.

Modell	Geschlossene Form	Dispersion
Seism. Gefährdung	$v_{im} = k_0(IM)^{-k}$	Mean
PSDM	$\ln(\overline{EDP}) = A + B \cdot \ln(IM)$	σ_{PSDM}

PDM	$\ln(\overline{DM}) = C + D \cdot \ln(EDP)$	σ_{PDM}
PLM	$\ln(\overline{DV}) = E + F \cdot \ln(DM)$	σ_{PLM}

Zunächst wird in Abbildung 1 eine allgemeine Anwendung des grafischen Frameworks vorgestellt. Nach der Erstellung der probabilistischen Modelle wird jedes Model in einem Vier-Wege-Plot [6] dargestellt. Für die abgebildete Medianbeziehung kann der Benutzer die Modelle im Uhrzeigersinn verfolgen. Dafür wird ein vertikaler Pfeil ausgehend vom PSDM im rechten oberen Fenster gezeichnet, der das PDM im rechten unteren Bereich schneidet. Dieser wird von einem horizontalen Pfeil gefolgt, bis zum Schnittpunkt mit dem PLM im linken unteren Bereich. Schließlich wird die Beziehung zwischen der Entscheidungsvariable und dem Intensitätsmaß im linken oberen Bereich aus dem Schnittpunkt des letzten Pfeils mit der DV-IM-Kurve abgeleitet.

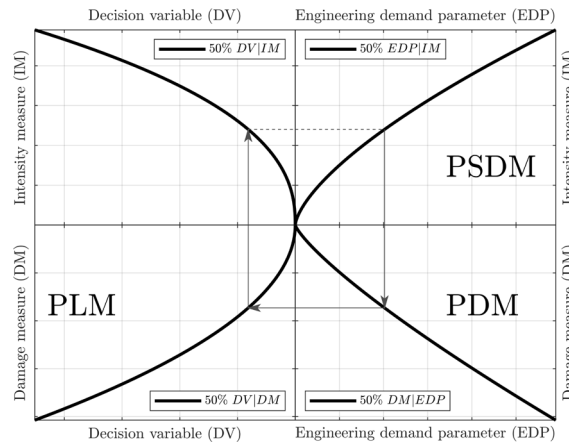


Abbildung 1. Allgemeine grafische Darstellung des Frameworks [1].

Da der Quadrant im linken oberen Bereich die bedingte Abhängigkeit zwischen der DV und IM beschreibt, ist ein weiterer Schritt erforderlich, um die unabhängige Überschreitungsrate der Entscheidungsvariable (v_{DV}) zu erstellen. Zu diesem Zweck wird die geschlossene Form in der Gleichung (1) [5] mit den Regressionskoeffizienten und den Parametern der seismischen Gefährdungskurve k_0 and k eingesetzt.

$$v_{DV} = k_0 \cdot \left[\frac{1}{A} \cdot \left(\frac{1}{C} \cdot \left(\frac{DV}{E} \right)^{\frac{1}{F}} \right)^{\frac{1}{D}} \right]^{\frac{k}{B}} \cdot \exp \left(\frac{k^2}{2 \cdot B^2 \cdot D^2 \cdot F^2} (D^2 \cdot F^2 \cdot \sigma_{PSDM}^2 + F^2 \cdot \sigma_{PDM}^2 + \sigma_{PLM}^2) \right) \quad (1)$$

3. FALLSTUDIENGEBÄUDE

Ein 4-stöckiges Wohngebäude aus unbewehrtem Mauerwerk wird für die Demonstration des Frameworks ausgewählt. Im Folgenden werden die probabilistischen Modelle vorgestellt.

3.1. Seismisches Gefährdungsmodell

Für den gewählten Gebäudestandort (Basel) wird die seismische Gefährdungskurve aus SUIhaz2015 [11] entnommen und so interpoliert, dass sie die spektrale Beschleunigung bei der Gebäudeperiode $T_l = 0,243$ repräsentiert. Die für die geschlossene Lösung benötigte Annäherung der seismischen Gefährdungskurve wird gezielt nicht mit globalen Formparametern k_0 und k , sondern mit einem Vektor

von den Parametern durchgeführt, was die Genauigkeit dank der hohen Auflösung der Annäherung deutlich erhöhte (Abbildung 2).

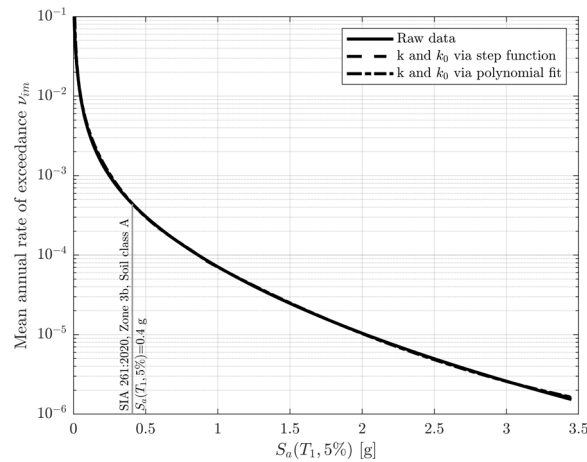


Abbildung 2. Seismische Gefährdungskurve für Basel (Lat: 47.57, Lon: 7.60) [1].

3.2. Probabilistisches Anforderungsmodell

Für das PSDM werden die maximale Stockwerkschiefstellung θ_{max} und die spektrale Beschleunigung $S_a(T_1, 5\%)$ als EDP bzw. IM definiert. Das Bedarfsmodell wird mittels inkrementeller dynamischer Analyse (IDA, [10]) mit der Tremuri-Software erstellt. Für die IDA werden insgesamt 492 nichtlineare dynamische Analysen mit $N_{GM} = 41$ Beschleunigungszeitverläufen durchgeführt, die jeweils $N_{RPR} = 12$ -fach über den Hunt & Fill-Algorithmus skaliert werden, um eine hohe Auflösung der IDA-Kurve zu erreichen (Abbildung 3, Abbildung 4). Um die Gültigkeit der rechnerisch günstigeren Pushoverbasierten (SPO) Nachfragemodelle zu testen und die Auswirkung von epistemischen Unsicherheiten zu untersuchen, werden weitere PSDM erstellt, wobei N_{LHS} (Latin Hypercube Sampling) die Anzahl der Gebäuderealisationen mit variierenden Material-, Modellierungs- und Versagensparametern darstellt und auf 500 gesetzt wird. Verschiedene Kombinationen solcher Betrachtungen ergeben jeweils vier Routen, die sowohl in geschlossener Form (C) als auch durch numerische Integrationen (N) gelöst werden, wobei die numerischen Integrationen als Benchmark dienen, um die Genauigkeit des vorgeschlagenen Frameworks zu bewerten (Tabelle 2). Für die IDA-basierten Routen C3 und N3 betragen die Regressionskoeffizienten $A = -5,17$, $B = 1,20$ und die Modellstreuung $\sigma_{PSDM} = 0,55$, wobei letztere aus den Residuen des PSDM abgeleitet ist.

Tabelle 2. Übersicht der Routen für die Anwendung des Frameworks [1].

Route	Lösungsstrategie	Anzahl der Analysen	PSDM Streuung
C1	Geschlossene Lösung	1 · SPO	Epistemisch: - Aleatorisch: SPO2IDA
C2	Geschlossene Lösung	N_{LHS} · SPO	Epistemic: LHS (SPO) Aleatorisch: SPO2IDA
C3	Geschlossene Lösung	N_{GM} · N_{RPR} dynamisch	Epistemisch: - Aleatorisch: IDA
C4	Geschlossene Lösung	N_{LHS} · SPO N_{GM} · N_{RPR} dynamisch	Epistemisch: LHS (SPO) Aleatorisch: IDA
N1	Numerische Integration	1 · SPO	Epistemisch: None Aleatorisch: SPO2IDA
N2	Numerische Integration	N_{LHS} · SPO	Epistemisch: LHS (SPO) Aleatorisch: SPO2IDA
N3	Numerische Integration	N_{GM} · N_{RPR} dynamisch	Epistemisch: None Aleatorisch: IDA

N4	Numerische Integration	$N_{LHS} \cdot SPO$ $N_{GM} \cdot N_{RPR}$ dynamisch	Epistemisch: LHS (SPO) Aleatorisch: IDA
----	------------------------	---	--

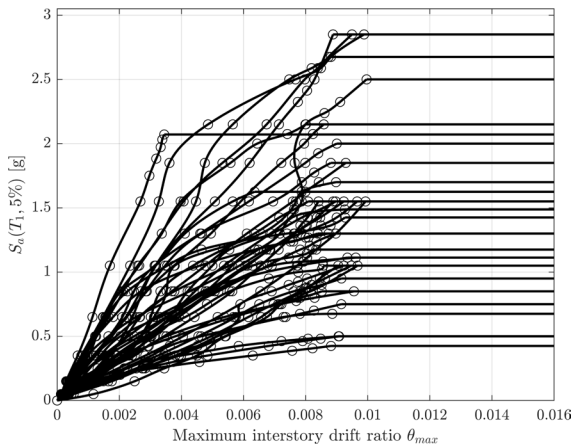


Abbildung 3. IDA Kurven (C3) [1].

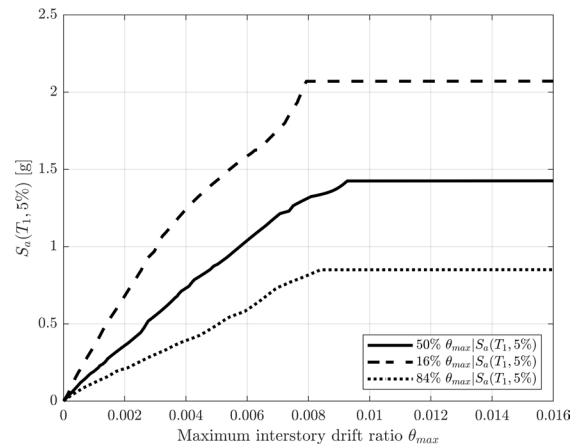


Abbildung 4. IDA Fraktile (C3) [1].

3.3. Probabilistisches Schadensmodell

Probabilistische Schadensmodelle (PDM) sagen die komplementäre kumulative Verteilung eines Schadensmaßes (DM) voraus, bedingt auf einen technischen Bedarfsparameter (EDP). In dieser Studie ist das gewählte DM die Sterblichkeitsrate, definiert als das Verhältnis zwischen der Anzahl der Todesopfer und der Personenbelegung eines Gebäudes zum Zeitpunkt des Erdbebens. Die mittleren Sterblichkeitsraten in Verbindung mit den Schadenszuständen Beinahe-Einsturz ($DM_{50\%}^{NC}$) und Einsturz ($DM_{50\%}^C$) werden auf 0,02 bzw. 0,10 festgelegt. Nach der Nachbearbeitung der IDA-Ergebnisse werden die mit dem Einsturz verbundenen EDPs aus dem scheinbaren Beginn der Flatline für jede IDA-Kurve ermittelt. Für EDPs, die zu einem kollapsnahen Schadenszustand führen, werden zwei Kandidaten bewertet: Der EDP bei 20 % der elastischen Steigung der IDA-Kurve und einer Stockwerkschieflstellung, die 3/4 der maximalen Stockwerkschieflstellung beim Einsturz entspricht. Der erste dieser beiden Werte wird als die mit dem Beinahe-Einsturz verbundene EDP definiert (Abbildung 5). Für die Medianbeziehung ergab eine lineare Regression mit den 41 EDP-Paaren die Koeffizienten $C = 20,13$ und $D = 4,79$. Für die Modellstreuung wird die untere Grenze der Todesrate bei Einsturz auf 0,06 gesetzt und als 16%-Fraktilwert ($DM_{16\%}^C$) definiert, und die Modellstreuung wird aus dem Abstand zwischen 16%- und 50%-Fraktilen bei Einsturz berechnet. Das resultierende PDM mit der zugehörigen Modellstreuung ($\sigma_{PDM} = 0,51$) ist in Abbildung 6 dargestellt.

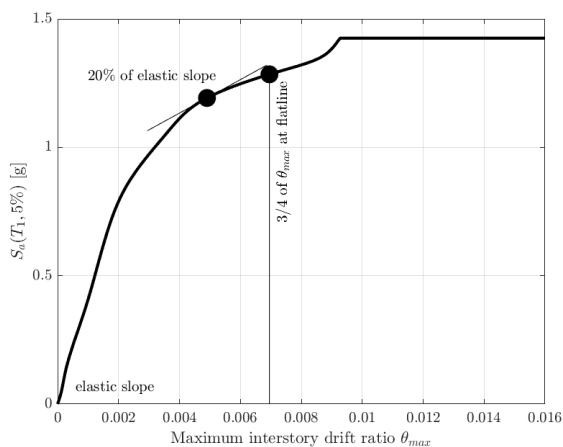


Abbildung 5. Definition des Schadenszustands Beinahe-Einsturz [1].

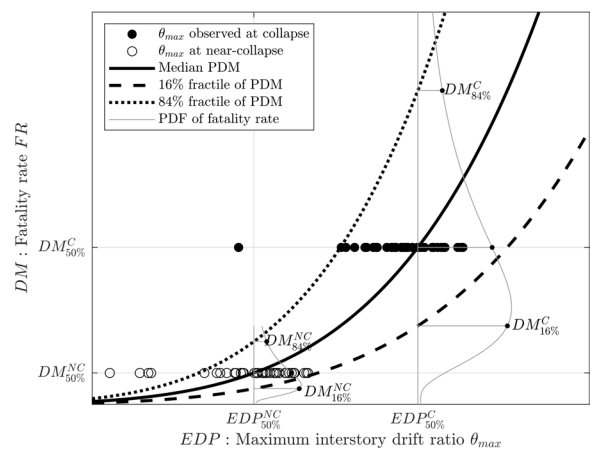


Abbildung 6. Probabilistisches Schadensmodell mit DM und EDP [1].

3.4. Probabilistisches Verlustmodell

Ein probabilistisches Verlustmodell (PLM) befasst sich mit den Folgen eines Erdbebens, indem die Schadensmaße (DM) mit den Entscheidungsvariablen (DV) verknüpft werden, wobei letztere in dieser Studie als die Anzahl der Todesopfer (n_{fatal}) definiert sind. Die Anzahl der Todesopfer ist das Produkt aus der Sterblichkeitsrate und der Personenbelegung (n_{pop}) zum Zeitpunkt des Erdbebens. Für die Kompatibilität mit den Schweizer Normen wird n_{pop} durch das in der SIA 269/8 vorgesehene Belegungsmodell definiert. Zu diesem Zweck wird n_{pop} als das Produkt aus der in Personen angegebenen Belegungsrate (OR) und der Anzahl Belegungseinheiten (n_{unit}), die bei Wohngebäuden Räume sind, berechnet. Da die Grundrissdokumente verfügbar sind, wird die Anzahl der Zimmer deterministisch behandelt ($n_{unit} = 68$). Die Fluktuation der Personenbelegung wird durch die Belegungsrate modelliert, die die Streuung des PDM (σ_{PLM}) darstellt. Auf diese Weise werden die in der SIA 269/8 angegebene untere und obere Grenze der Wohnbelegungsrate (0,2 und 0,6) als die Fraktile 16% und 84% interpretiert, und die PLM-Streuung ist definiert als der halbe Abstand zwischen den 84%- und 16%-Fraktile der Belegungsrate im logarithmischen Raum. Die entsprechenden Parameter des PDM werden mit $E = 3,16$, $F = 1,00$ und $\sigma_{PLM} = 0,55$ bestimmt (Abbildung 7).

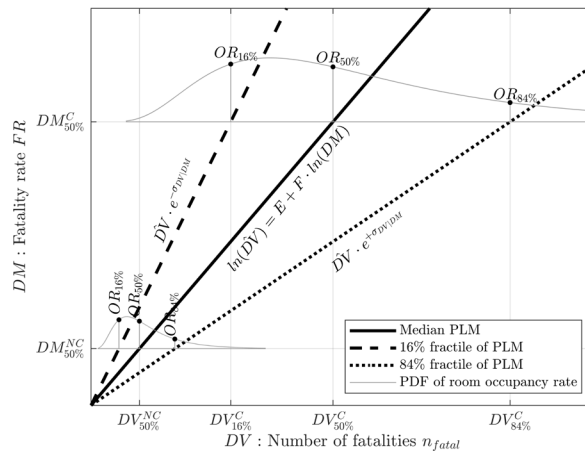


Abbildung 7. Probabilistisches Verlustmodell mit DV und DM [1].

4. RESULTATE

Sobald die probabilistischen Anforderungs-, Schadens- und Verlustmodelle definiert sind, kann die bedingte Abhängigkeit der Entscheidungsvariable auf das Intensitätsmaß durch die Kombination von PSDM, PDM und PLM grafisch ermittelt werden (Abbildung 8). Für das Fallstudiengebäude wird der Median der spektralen Beschleunigung, der mit der Anzahl der Todesopfer von mehr als eins verbunden ist, zu 1,17 g und 1,29 g für SPO- und IDA-basiertes PSDM ermittelt (Route C2 bzw. C3).

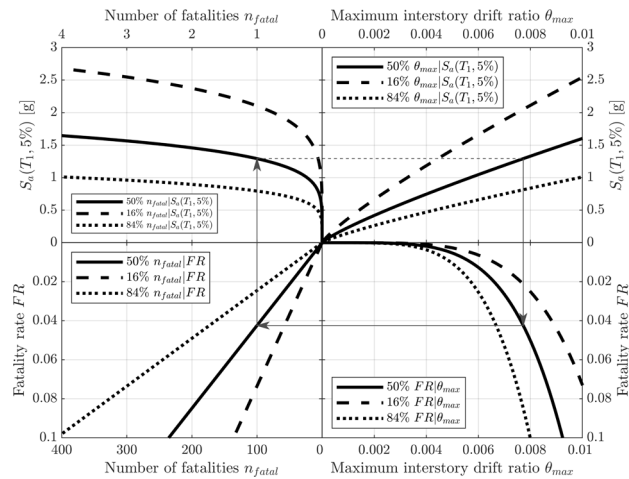


Abbildung 8. Grafische Darstellung des Frameworks (Route C3) [1].

Die Verlustkurve, die die mittlere jährliche Rate der Überschreitung von Todesopfern darstellt, wird mit der Gleichung (1) ermittelt. Einer der entscheidenden Aspekte der Ergebnisse ist die Genauigkeit der Verlustkurven, die mit verschiedenen Routen ermittelt sind (Tabelle 2). Zu diesem Zweck sind die Verlustkurven, die mit „exakten“ numerischen (N-Routen) und geschlossenen Lösungen (C-Routen) gelöst wurden, in Tabelle 3 und Abbildung 9 dargestellt.

Tabelle 3. Jährliche mittlere Überschreitungsrates der Todesopfer ($v_{n_{fatal}}$).

Route	$v_{n_{fatal} \geq 1}$ (Verhältnis zum Referenzwert von Route N3)
C1/N1	C1: $6,68 \cdot 10^{-5}$ (105%), N1: $6,03 \cdot 10^{-5}$ (95%)
C2/N2	C2: $6,84 \cdot 10^{-5}$ (108%), N2: $6,14 \cdot 10^{-5}$ (97%)
C3/N3	C3: $8,65 \cdot 10^{-5}$ (136%), N3: $6,36 \cdot 10^{-5}$ (100%)
C4/N4	C4: $9,23 \cdot 10^{-5}$ (145%), N4: $6,62 \cdot 10^{-5}$ (104%)

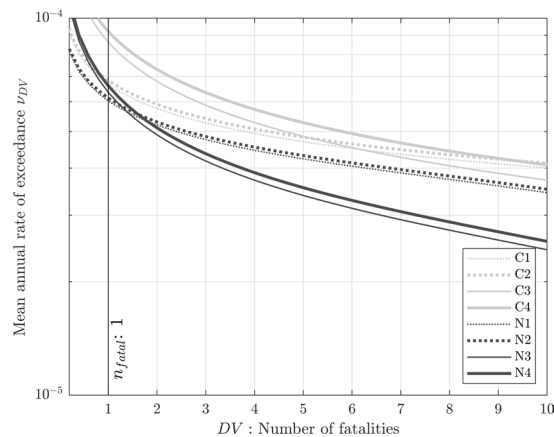


Abbildung 9. Verlustkurven nach acht Routen gem. Tabelle 2 [1].

Anhand der Ergebnisse lässt sich für das Fallstudiengebäude Folgendes feststellen:

- Die epistemische Unsicherheit trägt nicht signifikant zum seismischen Todesfallrisiko bei (Interdifferenz zwischen C1-C2, C3-C4, N1-N2 und N3-N4).
- Das IDA-basierte Todesfallrisiko in geschlossener Form (C3, C4) ist etwa 40% höher als das Todesfallrisiko durch die numerische Integration (N3, N4).

- Die Abweichung zwischen der geschlossenen Form (C1, C2) und der numerischen Integration (N1, N2) der SPO-basierten Routen beträgt nur 10%, wobei die geschlossenen Lösungen etwas konservativer sind.
- Vergleicht man die Lösungen in geschlossener Form, so sind die SPO-basierten Verlustkurven (C1, C2) etwa 30 % weniger konservativ als die IDA-basierten Verlustkurven (C3, C4).
- Im Vergleich zu den IDA-basierten Verlustkurven der numerischen Integration (N3, N4) sind die SPO-basierten Verlustkurven (N1, N2) weniger konservativ.
- Die mittlere jährliche Überschreitungsrate von einem Todesopfer liegt für jede der acht Routen in der gleichen Größenordnung.

Im Gegensatz zum Endprodukt des hier vorgestellten Frameworks, verwendet die SIA 269/8 das Personenrisiko UCR_{SIA} als Risikomaß. Um die Fähigkeit des Erfüllungsfaktors zur Schätzung des Personenrisikos für das Fallstudiengebäude zu bewerten, wird ein Vergleich zwischen UCR_{SIA} und dem numerisch abgeleiteten Einheitsrisiko UCR_{num} unter Verwendung von Gleichung (2) vorgenommen. Dafür werden die zuvor definierten Todesraten, die mit den Schadenszuständen "Beinahe-Einsturz" und "Einsturz" assoziiert sind, den EDPs aus der Route N3 zugeordnet. Die Integration über den gesamten Bereich der IM lieferte einen Personenrisikofaktor von $UCR_{num} = 6,44 \cdot 10^{-6}$. Für das Fallstudiengebäude sind die auf der N2-Methode basierenden Erfüllungsfaktoren höher als 1,0 (die kraft- und verformungs-basierte Faktoren sind 1,15 bzw. 3,05), was auf eine Einhaltung der Neubau-Normen hinweist. Dementsprechend beträgt das Personenrisiko (UCR_{SIA}) für ein normgerechtes Gebäude 10^{-6} , während das numerisch abgeleitete Personenrisiko (UCR_{num}) für das Fallstudiengebäude sechsmal höher ist.

$$UCR_{num} = \int_{dm^{nc}}^{dm^c} \int_{edp} \int_{im} |dG_{DM|EDP}(DM|EDP)| |dG_{EDP|IM}(EDP|IM)| |dv(IM)| \quad (2)$$

5. SCHLUSSFOLGERUNGEN

Als Alternative zur SIA 269/8 wurde in dieser Arbeit ein grafisches Framework für die auf Todesopfer basierende seismische Risikoermittlung bestehender Gebäude auf der Grundlage der PEER-PBEE-Methode in geschlossener Form vorgestellt. Unter den Annahmen der Lognormalität der probabilistischen Modelle und deren konstanten bedingten Streuung (Homoskedastizität), werden die Unsicherheiten der probabilistischen Bedarfs-, Schadens- und Verlustmodelle in der Entscheidungsvariable, der Anzahl der Todesopfer (n_{fatal}), widerspiegelt. Die hier vorgestellte Fallstudie stellte heraus, dass der Erfüllungsfaktor nicht in der Lage ist, das Personenrisiko präzise abzuschätzen: Es zeigte sich, dass UCR_{SIA} den numerisch berechneten Personenrisikofaktor UCR_{num} mindestens um den Faktor sechs unterschätzt. Im Gegensatz zum verschmolzenen Ansatz des Erfüllungsfaktors in der SIA 269/8 trennt die transparente grafische Darstellung des vorgeschlagenen Frameworks die Komponenten des seismischen Todesfallrisikos und zeigt deutlich, wie stark sich jede einzelne auf das seismische Risiko auswirkt. Dank seiner Flexibilität, Transparenz und Benutzerfreundlichkeit bietet das Framework ein besseres Verständnis des seismischen Todesfallrisikos und hat das Potenzial, eine breite Akzeptanz bei praktizierenden Ingenieuren zu erreichen.

LITERATUR

- [1] Arslantürkoglu, S., Stojadinovic, B. (2023) Seismic fatality risk evaluation framework for existing buildings in Switzerland. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 21, 1229-1271.
- [2] Bachmann, H. (2002) Erdbebengerechter Entwurf von Hochbauten – Grundsätze für Ingenieure, Architekten, Bauherren und Behörden. Bern.
- [3] Federal office for civil protection (2020) National risk analysis report. Bern.
- [4] Günay, M. S., Mosalam, K. M. (2013) PEER performance-based earthquake engineering methodology, revisited. *Journal of Earthquake Engineering*, 39, 683-703.

- [5] Mackie, K. R., Stojadinovic, B. (2008) Integrated Probabilistic Performance-Based Evaluation of Benchmark Reinforced Concrete Bridges.
- [6] Mackie, K. R., Stojadinovic, B. (2006) Fourway: Graphical tool for performance-based earthquake engineering. *Journal of Structural Engineering*, 132, 1274-1283.
- [7] Moehle, J. P., Deierlein, G. G. (2004) A framework methodology for performance-based earthquake engineering. *13th World Conference Earthquake Engineering*, Vancouver.
- [8] Porter, K. A. (2003) An overview of PEER's performance-based earthquake engineering methodology. *9th International Conference on Applications of Statistics and Probability in Civil Engineering*. San Francisco.
- [9] SIA (2017) SIA 269/8:2017 Erhaltung von Tragwerken – Erdbeben. Zürich.
- [10] Vamvatsikos, D., Cornell, C. A. (2002) Incremental dynamic analysis. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 31, 491-514.
- [11] Wiemer, S., Danciu, L., Edwards, S., et al (2016) Seismic hazard model 2015 for Switzerland (SUIhaz2015). Swiss Seismological Service. ETH Zurich.