

Auswirkungen von Korrosion auf die Fragilitätskurven von Bestandsgebäuden aus Stahlbeton

Julia Eberl^{1, (*)}, Alexander Stark¹

¹ Institut für Massivbau und Baustofftechnologie (Abteilung Massivbau), Karlsruher Institut für Technologie (KIT)

(*) Korrespondenzautorin: julia.eberl@kit.edu

KURZFASSUNG

Die Anwendung von Fragilitätsfunktionen stellt eine gängige Methode zur Abschätzung von Gebäudeschäden dar. Bei der Entwicklung von Fragilitätskurven ist die Berücksichtigung der spezifischen Merkmale des Gebäudes, das heißt der Ausgangsbedingungen sowie der Veränderungen während der Lebensdauer, von essentieller Bedeutung, um eine zuverlässige Schadensabschätzung zu gewährleisten. Die vorliegenden Untersuchungen zeigen, dass bestehende Gebäude aufgrund ihrer geringeren Materialfestigkeiten und Betondeckungen eine erhöhte Anfälligkeit für die Auswirkungen der Alterung aufweisen. In diesem Beitrag erfolgt eine Analyse der Auswirkungen von Korrosion auf die Fragilitätskurven bestehender Gebäude unter Zuhilfenahme des entwickelten multiskalaren Ansatzes. Bei der Betrachtung der Folgen von Korrosion werden drei Effekte berücksichtigt: Verringerung des Bewehrungsquerschnitts, Reduktion der Stahlduktilität und Verschlechterung des Betons. Die Analyse konzentriert sich auf ein Gebäude aus dem Jahr 1943, im Originalzustand, mit besonderem Augenmerk auf die ursprünglichen Material- und Bewehrungseigenschaften, und unter der Einwirkung eines Korrosionsangriffs nach 80 Jahren. Ein mäßiger Korrosionsangriff kann zu einer Reduktion der Gesamtschubkraft um 64 % und zu einer Steigerung der Fragilität um bis zu 33 % im Vergleich zu einem Neubau aus dem Jahr 2023 führen. Die Ergebnisse zeigen, dass die Anwendung von für Neubauten entwickelten Fragilitätskurven auf bestehende Bauwerke zu einer signifikanten Unterschätzung der Verletzbarkeit führt. Dies wird anhand einer prototypischen Anwendung veranschaulicht, die die altersbedingte Zunahme der Fragilität eines repräsentativen Straßenzugs visualisiert.

Schlagwörter: Fragilitätskurven, Bestandsgebäude, Korrosion, Alterung, Stahlbeton

1. EINFÜHRUNG

Erdbeben sind seltene, aber verheerende Naturereignisse mit hohem Schadenspotenzial. Das seismische Risiko ist eine Funktion der seismischen Gefährdung, der Exposition und der seismischen Vulnerabilität [1]. Im Verlauf der Lebensdauer eines Gebäudes können signifikante Veränderungen der Vulnerabilität auftreten. Verschiedene Alterungseffekte haben Veränderungen der Materialeigenschaften zur Folge, wobei die Korrosion als besonders kritisch zu betrachten ist [2–5]. Die Korrosion der Bewehrung resultiert in einer Verringerung der Bewehrungsquerschnitte, einer Reduktion der Stahlduktilität sowie Risiken in der Betondeckung.

Die Autoren haben einen multiskalaren Ansatz zur Bestimmung von Fragilitätskurven für fünf definierte Schadensgrade entwickelt [6]. Die Lage der Schadensgrade auf der numerisch berechneten Antwortkurve des Gebäudes wird durch die Anwendung verschiedener Kriterien bestimmt, die auf unterschiedlichen Skalen basieren. Diese Kriterien umfassen sowohl materialspezifische als auch globale Grenzwerte. Im Rahmen der Untersuchung der Auswirkungen der Korrosion erfolgt eine Berücksichtigung

der durch Korrosion bedingten Veränderungen sowohl in den Materialgesetzen als auch in den Schadenskriterien. Die ermittelten Fragilitätskurven für Neubauten in der Zukunft unter Korrosionseinwirkung weisen eine höhere Anfälligkeit auf [7].

Bei bestehenden Gebäuden spielt die Korrosion eine deutlich größere Rolle als bei Neubauten. Es zeigt sich, dass Materialeigenschaften sowie Bewehrungsmengen, welche der im Baujahr geltenden Norm entsprechen, signifikante Unterschiede aufweisen. Im Rahmen des vorliegenden Beitrags werden Analysen an Bestandsgebäuden aus dem Jahr 1943 im Ausgangszustand und unter Korrosionseinfluss durchgeführt. Anschließend wird ein Vergleich der Resultate der 80-jährigen Gebäude mit denen eines Neubaus aus dem Jahr 2023 vorgenommen. Die ermittelte zeitabhängige Änderung der Fragilität von Bestandsgebäuden unterschiedlichen Alters wird anhand eines Straßenzugs analysiert und visualisiert.

2. METHODIK

In diesem Beitrag wird die Ableitung von Fragilitätskurven unter Berücksichtigung von Korrosion auf Basis des in [6] dargestellten Ansatzes weiterentwickelt. Der Ansatz beinhaltet Kriterien für material-spezifische und globale Merkmale zur Erfassung verschiedener Schadensarten für fünf Schadensgrade von *Leicht* bis *Zerstörung*. Die Zuordnung dieser Schadenskriterien mit ihren definierten Grenzwerten zu den fünf Schadensgraden erfolgt über die Faktoren Häufigkeit und räumliche Verteilung. Durch die Schadenskriterien auf verschiedenen Ebenen können auch Schäden identifiziert werden, die nicht als Lastabfall in der Pushover-Kurve sichtbar sind. Diese Schäden werden in den abgeleiteten Schadensgrenzwerten berücksichtigt. Die erstellten Kurven und Schadensgrenzwerte stellen folglich die Basis für das weitere Verfahren zur Entwicklung von Fragilitätsfunktionen dar. Das in [6] untersuchte Gebäude dient als Referenzgebäude für die nachfolgend dargestellten Untersuchungen.

In [7] wurden bereits Neubauten unter Korrosionsangriff in der Zukunft untersucht. In diesem Beitrag liegt der Fokus auf Bestandsgebäuden, bei denen die Ausgangsmaterialien des Baujahrs sowie die zu dieser Zeit geltenden Normen berücksichtigt werden [8]. Es ergeben sich geringere Betondruck- und Stahlfestigkeiten sowie Unterschiede in Betondeckung und Verankerung. Beispielsweise führt eine geringere Betondeckung zu einer kürzeren Initiierungsphase, sodass bei gleichem Bauwerksalter die Korrosionswirkung stärker ausfällt. In Bezug auf die Korrosion werden in den Untersuchungen folgende Effekte berücksichtigt: (1) Verringerung des Querschnitts der Längs- und Querbewehrung, (2) Reduktion der Stahlduktilität bzw. Endverformung der Bewehrungsstäbe und (3) Verschlechterung der Betonfestigkeit bzw. Betondeckung. Die zugrundeliegenden Formeln und Ansätze sind in [7, 8] erläutert.

2.1 Eigenschaften des untersuchten Bestandsgebäudes

Hier wird ein Bestandsgebäude mit dem Baujahr 1943 nach 80 Jahren, also im Jahr 2023, untersucht (Abb. 1 (A)) [8]. Als Bemessungsgrundlage wird DIN 1045 in der Fassung von 1937 [9] verwendet. Für den Beton wird von einem hochwertigen Zement ausgegangen, sodass eine Würfeldruckfestigkeit nach 28 Tagen von mindestens 160 kg/cm^2 gefordert wird. Daher wird konservativ mit einer Betonfestigkeitsklasse C16/20 gerechnet (Tab. 1), wobei auch eine deutlich geringere Festigkeitsklasse denkbar wäre. Der Elastizitätsmodul des Betons ist zu 140.000 kg/cm^2 anzunehmen (Tab. 1). Die geforderte Betondeckung beträgt für Bauteile im Freien 2 cm (Tab. 1), in anderen Fällen ist sie geringer. [9]

Für die Bewehrung wird ein hochwertigerer Betonstahl angenommen, sodass dieser zum hochwertigen Zement passt. Dieser weist eine Mindeststreckgrenze von 3600 kg/cm^2 für Durchmesser bis 18 mm und 3500 kg/cm^2 für Durchmesser über 18 mm bis 30 mm auf. Damit ergibt sich konservativ eine Streckgrenze von 353 N/mm^2 (Tab. 1). Zugehörig beträgt die Bruchdehnung 20 % am langen und 24 % am kurzen Proportionalstab. Das Verhältnis der E-Moduln von Eisen und Beton beträgt 15 (Tab. 1). [9]

Tabelle 1. Eigenschaften des untersuchten Bestandsgebäudes von 1943

Eigenschaften des Gebäudes im Ausgangszustand	Wert
Betonfestigkeitsklasse	C16/20
E-Modul des Betons	140.000 kg/cm ²
Betondeckung	2 cm
Streckgrenze der Bewehrung	353 N/mm ²
Verhältnis E-Moduln von Bewehrung und Beton	15
Eigenschaften des Gebäudes nach 80 Jahren unter Korrosionseinfluss	Wert
Durchmesser Bewehrung	18,75; 10,75; 8,75 mm
Mittlere Reduktion der Duktilität	35,3 %
Reduzierte Betonfestigkeit	6,93 N/mm ²

Neben den Materialeigenschaften wird auch der Bewehrungsgrad an die geltende Norm angepasst. Die Momente durchlaufender Balken sind entsprechend der Norm nach den Regeln für frei drehbar gelagerte durchlaufende Träger zu ermitteln [9]. Bei der Ermittlung der Schnittgrößen am gelenkig gelagerten Durchlaufträger ergeben sich aus den Flächenlasten gemäß dem Referenzgebäude Momente von maximal 30 kNm. Mit den heutigen Berechnungsmethoden unter Berücksichtigung der angepassten Materialkennwerte ergibt sich eine sehr geringe erforderliche Bewehrung von 0,4 cm². Eine Mindestbewehrung wird nach DIN 1045-1937 nicht gefordert. Daher wird die Längsbewehrung in den Balken zu je 2 Stäbe mit 20 mm Durchmesser als obere und untere Bewehrung gewählt (Abb. 1 (C)). Unter Berücksichtigung der Vertikalbelastung gemäß dem Referenzmodell, die gegenüber den Lasten von 1943 als konservativ anzunehmen ist, resultiert eine maximale Querkraft im Balken von 43,16 kN. Hieraus ergibt sich bei einer Breite von 0,3 m und einem inneren Hebelarm von 0,414 m eine maximale Schubspannung von 0,35 N/mm². Diese Schubspannung ist kleiner als 0,4 N/mm², sodass nach DIN 1045-1937 keine Bügelbewehrung zur Aufnahme der Schubspannung gefordert ist. Jedoch ist das Zusammenwirken von Zug- und Druckgurt sicherzustellen. Es wird hier davon ausgegangen, dass lediglich eine geringe Anzahl an Bügeln eingebaut ist. Daher wird der Abstand der Bügel im Modell auf 500 mm gewählt (Abb. 1 (C)). Eine Erhöhung der Tragfähigkeit aufgrund der Umschnürungswirkung wird nicht angenommen, da diese bei rechteckigen Bügeln nicht zulässig ist.

Die Stützen erfüllen die Mindestquerschnittsabmessungen von 20 cm. Die zulässige Gesamtlast nach [9] wird in dieser Untersuchung mit der maximalen Normalkraft in den Stützen von 627 kN gleichgesetzt. Mit der Würfeldruckfestigkeit von 16 N/mm², der Querschnittsfläche des Betons von 0,09 m² und der Spannung im Stahl von 353 N/mm² ergibt sich eine erforderliche Bewehrungsmenge von 12,25 cm². Daher werden für die Stützen vier Stäbe mit einem Durchmesser von 20 mm gewählt, was einer Menge von 12,6 cm² entspricht (Abb. 1 (B)). Die Gleichung für den außermittigen Druck ergibt eine wesentlich geringere Bewehrungsmenge und ist daher nicht maßgebend. Der interpolierte Mindestbewehrungsgrad der Längsbewehrung beträgt 0,7 % bei einem Verhältnis $l/h = 2,5/0,3 = 8,3$. Der vorhandene Längsbewehrungsgrad im Ausgangszustand beträgt 1,4 %, sodass sowohl Mindest- als auch Maximalbewehrungsgrad eingehalten sind. Die Anforderungen an die Maximalabstände der Bügel in den Stützen ergeben bei einem Durchmesser der Längsbewehrung von 20 mm einen maximalen Bügelabstand von 240 mm (Abb. 1 (B)). Bei den Stützen darf ebenfalls keine Tragfähigkeitssteigerung durch die Umschnürungswirkung berücksichtigt werden.

Auf Basis dieser Eigenschaften erfolgt die Abschätzung der Auswirkungen der Korrosion. Die Initiierungszeit wird konservativ zu 12,6 Jahren wie beim Referenzgebäude angenommen, da keine genaueren Angaben vorliegen. Die Durchmesser 20 mm, 12 mm und 10 mm reduzieren sich auf 18,75 mm, 10,75 mm und 8,75 mm (Tab. 1). Zur Berücksichtigung des glatten Stahls wird im Materialgesetz nach Menegotto-Pinto [10, 11] der Parameter A2 auf 0,001 angepasst [12]. Die mittlere Reduktion der Duktilität ergibt sich bei einer mittleren Flächenreduktion von 18,44 % zu 35,30 % (Tab. 1). In der Folge reduzieren sich sowohl die maximale Stahldehnung als auch das Schadenskriterium für das Versagen

des Stahls. Die Betonfestigkeit reduziert sich von 16 N/mm^2 auf $6,93 \text{ N/mm}^2$ (Tab. 1) und das Dehnungskriterium für das Abplatzen der Betondeckung wird auf 0,0017 herabgesetzt. Die Betonzugfestigkeit wird sehr gering zu $1 \cdot 10^{-6} \text{ N/mm}^2$ gewählt.

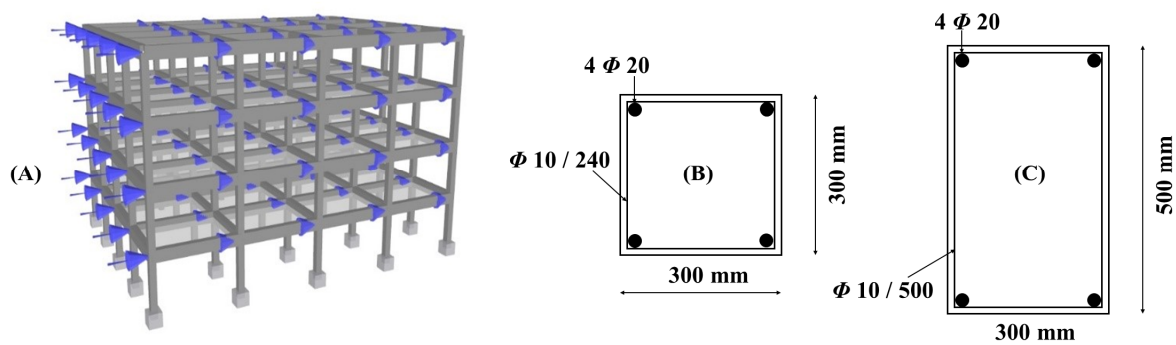


Abbildung 1. 3D-Modell (A), Querschnitt und Bewehrung der Stützen (B) und der Balken (C) des untersuchten Bestandsgebäudes von 1943

Die Modellierung der Stützen und Balken erfolgt in SeismoStruct [11] durch einen vereinfachten Ansatz unter Verwendung von infrmFBPH-Elementen (inelastic plastic-hinge force-based frame elements). Diese Elemente konzentrieren die Inelastizität an den beiden Enden des Elements innerhalb einer festen Länge des Elements. Die Balken werden von Stütze zu Stütze modelliert, was bedeutet, dass sowohl die obere als auch die untere Biegezugbewehrung durchgängig vorhanden sind. Diese Konfiguration schließt die Möglichkeit aus, die Bewehrung ausschließlich in der Zugzone anzuordnen und die fehlende Zugkraftdeckung zu berücksichtigen. Folglich bleibt die Bewehrungsanordnung und Konstruktionsweise gegenüber dem Referenzgebäude unverändert, um die Vergleichbarkeit der Ergebnisse zu gewährleisten.

2.2 Analyse des untersuchten Bestandsgebäudes

Das Gebäude aus dem Jahr 1943 mit den Materialeigenschaften und der Bewehrung nach DIN 1045-1937 [9] wird sowohl im Ausgangszustand als auch nach 80 Jahren unter Korrosionsangriff analysiert. Die numerische Analyse wird mit der Software SeismoStruct [11] ausgeführt. Pro Zeitpunkt werden jeweils vier Pushover-Analysen durchgeführt. Es werden die beiden Richtungen x und y unterschieden, wobei aufgrund der Symmetrie des Gebäudes kein Unterschied zwischen der positiven und der negativen Orientierung für x bzw. y besteht. Zudem werden zwei verschiedene Horizontallastverteilungen untersucht, eine gleichmäßige und eine modale Lastverteilung. Für die modale Verteilung wird vor der Pushover-Analyse eine Eigenwertanalyse durchgeführt, um die Lastverteilung für die Eigenform mit dem höchsten effektiven modalen Massenanteil für jede Richtung zu bestimmen. Für jeden Knoten werden spezifische horizontale Lasten als inkrementelle Lasten in der jeweiligen Richtung definiert (siehe Abb. 1 (A)). Die Analysen werden jeweils verschiebungsbasiert bis zu einer Verschiebung des Kontrollknotens von 0,25 m in 100 Schritten durchgeführt. Als Kontrollknoten wird der mittlere Knoten im obersten Stockwerk gewählt.

Zur Ermittlung der Schadensgrade auf den Pushover-Kurven werden die verschiedenen Schadenskriterien herangezogen, wobei sich das Kriterium mit der geringsten Verschiebung als maßgebend erweist [6]. Daraus werden anschließend die spektralen Verschiebungsgrenzwerte abgeleitet. Die Pushover-Kurven des mit SeismoStruct simulierten MDoF-Systems (multi-degree-of-freedom) werden in die Kurven des SDoF-Systems (single-degree-of-freedom) im Spektralbeschleunigungs-Spektralverschiebungs-Format transformiert und als Kapazitätskurven approximiert. Die Fragilitätsfunktionen werden mit dem Vulnerability modellers toolkit (VMTK) [13] unter Verwendung der erzielten Pushover-Kurven und der abgeleiteten Schadensgrenzwerte entwickelt. Als Beschleunigungszeitverläufe werden über 2700 Erdbebenzeitverläufe der Engineering Strong Motion Database (ESM) [14] für Europa verwendet.

Als traditionelles Intensitätsmaß wird hier die maximale Bodenbeschleunigung (PGA) gewählt. Weitere Informationen über das Verfahren zur Bestimmung der Schadensgrade und der Fragilitätskurven finden sich in [6, 8].

3. ERGEBNISSE UND DISKUSSION

3.1 Ergebnisse der Analyse des untersuchten Bestandsgebäudes

Im folgenden Abschnitt werden die Ergebnisse der Untersuchung des bestehenden Gebäudes von 1943 vorgestellt. Die Pushover-Kurven für die x -Richtung mit modaler Horizontallastverteilung sind repräsentativ in Abb. 2 dargestellt.

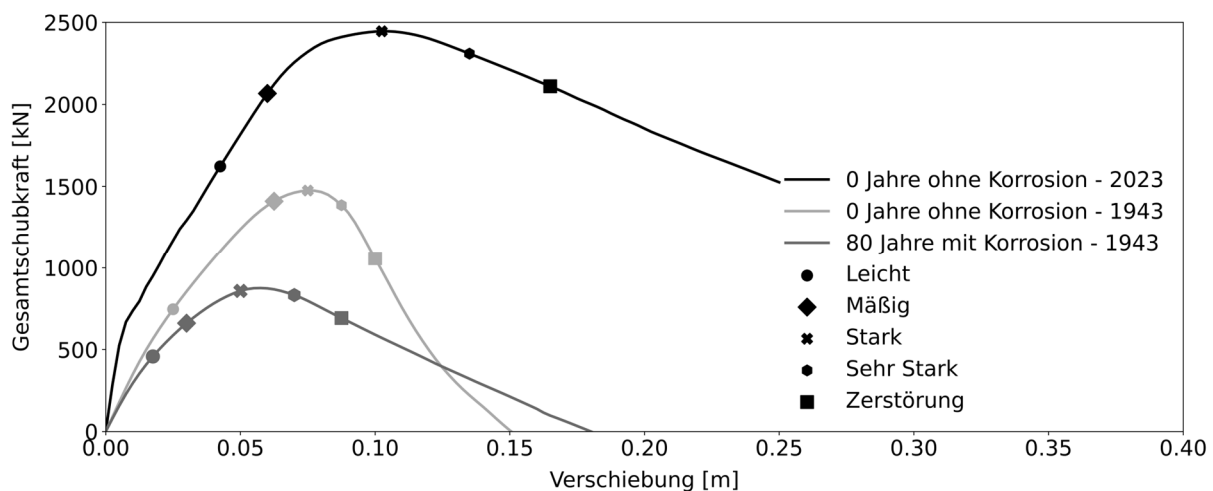


Abbildung 2. Pushover-Kurven für die x -Richtung mit der modalen Horizontallastverteilung und den zugehörigen Schadensgraden für das Bestandsgebäude von 1943 im Ausgangszustand und nach 80 Jahren sowie für das Referenzgebäude von 2023 im Ausgangszustand

Die Abnahme der Gesamtschubkraft für das untersuchte Gebäude zwischen 0 und 80 Jahren, also ohne und mit Korrosion, beträgt circa 41 % (1475 kN zu 875 kN). Im Vergleich zum Neubau aus dem Jahr 2023 zeigt sich unter Korrosionseinfluss nach 80 Jahren eine Reduktion der Gesamtschubkraft von 64 %. Werden die Schrittzahlen, bei denen das maßgebende Kriterium für jede Analyse überschritten wird, verglichen, so ist festzustellen, dass die Schadensgrade tendenziell bei geringeren Verschiebungen auftreten, wenn die Korrosion berücksichtigt wird. Dies zeigt, dass Korrosion das Gebäude anfälliger für Schäden macht. Es ist auch zu erkennen, dass sich die Form der Pushover-Kurven unter dem Einfluss der Korrosion in Richtung eines weniger steilen Lastabfalls verändert. Die maximale Verschiebung von 0,25 m kann nicht mehr aufgenommen werden. Diese Aussagen für die x -Richtung mit modaler Horizontallastverteilung gelten analog für die weiteren durchgeführten Analysen.

Abb. 3 zeigt die ermittelten Fragilitätskurven für das untersuchte Gebäude von 1943 im Ausgangszustand (0 Jahre ohne Korrosion - 1943) und nach 80 Jahren unter Korrosionseinfluss (80 Jahre mit Korrosion - 1943). Ergänzend sind zum Vergleich die Fragilitätskurven des Gebäudes aus dem Jahr 2023 im Ausgangszustand (0 Jahre ohne Korrosion - 2023) enthalten. Die zugehörigen Verteilungsparameter sind Tab. 2 zu entnehmen. Es ist zu erkennen, dass bei Berücksichtigung der Korrosion die Anfälligkeit für alle Schadensgrade ansteigt, wobei der Unterschied je nach Schadensgrad variiert. Bei einer Beschleunigung von 1,0 g steigt die Überschreitungswahrscheinlichkeit unter reinem Korrosionseinfluss je nach Schadensgrad von 5,8 % bis 24,5 %. Im Vergleich zum Referenzgebäude von 2023 im

Ausgangszustand erhöht sich die Anfälligkeit je nach Schadensgrad von 7,5 % bis 33 %, wobei die Differenz bei allen hohen Schadensgraden (ab *Stark*) über 30 % liegt.

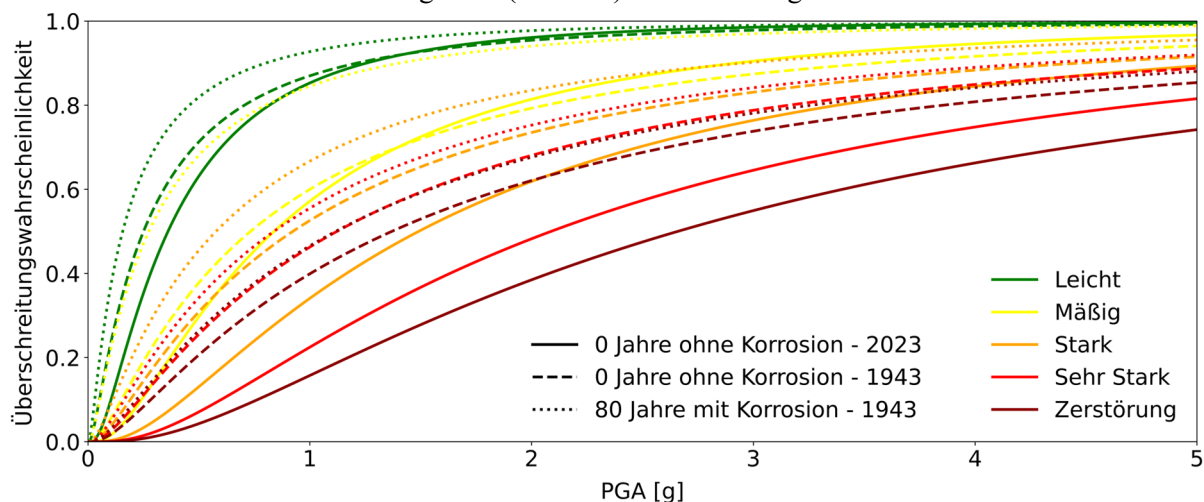


Abbildung 3. Fragilitätskurven für die fünf Schadensgrade des untersuchten Bestandsgebäudes von 1943 im Ausgangszustand und unter Berücksichtigung der Korrosion nach 80 Jahren sowie für das Referenzgebäude von 2023 im Ausgangszustand

Tabelle 2. Verteilungsparameter der logarithmischen Normalverteilungen der fünf Schadensgrade des untersuchten Bestandsgebäudes von 1943 im Ausgangszustand und unter Berücksichtigung der Korrosion nach 80 Jahren sowie für das Gebäude von 2023 im Ausgangszustand

Alter Gebäude ¹	Parameter [log g]	Schadensgrade				
		Leicht	Mäßig	Stark	Sehr Stark	Zerstörung
0 - 2023	Erwartungswert	-1,020	-0,175	0,399	0,736	0,978
	Standardabweichung			0,973		
0 - 1943	Erwartungswert	-1,384	-0,311	-0,079	0,116	0,315
	Standardabweichung			1,230		
80 - 1943	Erwartungswert	-1,855	-1,293	-0,549	-0,176	0,110
	Standardabweichung			1,274		

¹ Die erste Zahl beschreibt das Alter des Gebäudes, während die zweite Zahl für das Baujahr steht.

Die Verwendung von für Neubauten entwickelten Fragilitätskurven für bestehende Bauwerke führt zu einer deutlichen Unterschätzung der Verletzbarkeit. Dies lässt sich auf zwei Hauptfaktoren zurückführen. Erstens werden korrosionsbedingte Veränderungen in den Fragilitätskurven nicht berücksichtigt, was ein entscheidender Aspekt ist, da Korrosion die Tragfähigkeit eines Gebäudes erheblich beeinträchtigen kann. Zweitens variieren die Materialeigenschaften sowie Bewehrungsgehalt und -anordnung je nach im Baujahr gültiger Norm stark. Bei einem 80 Jahre alten Gebäude mit Baujahr 1943 kann dies zu einer Gesamtschubkraftreduktion von 64 % und einer Fragilitätssteigerung von bis zu 33 % gegenüber einem Neubau aus dem Jahr 2023 führen.

3.2 Visualisierung anhand eines Straßenzuges

Anhand eines repräsentativen Straßenzugs wird eine prototypische Anwendung der ermittelten Ergebnisse zur alterungsbedingten Zunahme der Fragilität grafisch dargestellt [8]. Dazu werden 50 Stahlbetongebäude unterschiedlichen Baujahres zu verschiedenen Zeitpunkten untersucht. Die Fragilität im Ausgangszustand ist abhängig vom Baujahr des Gebäudes und den damit verbundenen Materialeigenschaften. Die Zunahme der Fragilität infolge Korrosion ist wiederum abhängig vom untersuchten

Gebäude und dem Beobachtungszeitpunkt. Die Untersuchungen werden alle 10 Jahre im Zeitraum von 1940 bis 2020 durchgeführt, wobei die Werte aus vorangegangenen Untersuchungen verwendet und Zwischenwerte interpoliert werden. Die Gebäude basieren somit alle auf dem Referenzgebäude und den entsprechenden zeitlichen Veränderungen. Einige Mauerwerksgebäude (schraffiert) sind ebenfalls im Straßenzug enthalten, werden aber nicht untersucht. Jedes Gebäude erhält eine Hausnummer sowie ein Baujahr. Hinsichtlich der maximalen Bodenbeschleunigung wird ein PGA-Wert von 1,0 g als hoher Wert gewählt.

Auf Basis der Fragilitätskurven hat jedes Gebäude eine Wahrscheinlichkeitsverteilung für die verschiedenen Schadensgrade in Abhängigkeit von der Bodenbeschleunigung. Die Eintrittswahrscheinlichkeit für einen einzelnen Schadensgrad ergibt sich, indem die Überschreitungswahrscheinlichkeit für den nächsthöheren Schadensgrad subtrahiert wird. Diese Wahrscheinlichkeitsverteilung ändert sich im Laufe der Zeit unter Korrosionseinwirkung: die Eintrittswahrscheinlichkeit für *Kein Schaden* sowie den Schadensgrad *Leicht* wird geringer, während sie für die Schadensgrade *Mäßig* bis *Zerstörung* zunimmt. Um diese Wahrscheinlichkeitsverteilung auf den konkreten Straßenzug anzuwenden, wird die Anzahl der Gebäude pro Schadensgrad proportional zu der Höhe des entsprechenden Balkens der Eintrittswahrscheinlichkeit für das zugehörige Bau- und Beobachtungsjahr gewählt. Für jedes Baujahr wird die Verteilung der Schadensgrade in einem gegebenen Beobachtungsjahr in äquidistante Quantile unterteilt, wobei die Anzahl der Quantile der Anzahl der Gebäude mit dem jeweiligen Baujahr entspricht. Im Anschluss erfolgt eine zufällige Zuordnung der Gebäude aus dem jeweiligen Baujahr zu den Quantilen.

Abb. 4 zeigt den untersuchten Straßenzug bestehend aus der Hauptstraße sowie den Nebenstraßen 1 und 2. Die in der Abbildung verwendeten Farben entsprechen der in der Legende aufgeführten Farbzurordnung und noch nicht realisierte Gebäude sind weiß hinterlegt. In der rechten oberen Ecke sind das Beobachtungsjahr sowie die untersuchte Bodenbeschleunigung angegeben.

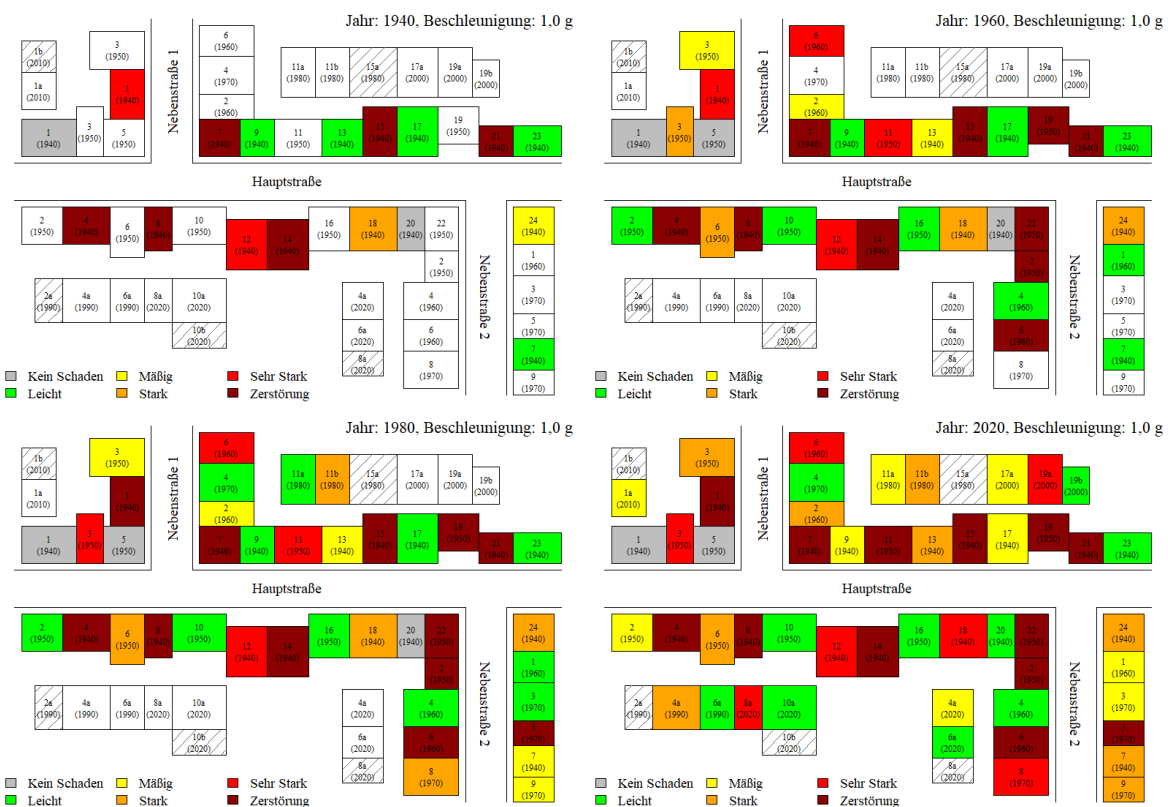


Abbildung 4. Straßenzug mit 50 Stahlbetongebäuden und fünf Mauerwerksgebäuden (schraffiert) zu den Beobachtungsjahren 1940, 1960, 1980 und 2020 und die zugehörigen Schadensgrade (PGA = 1,0 g)

Bereits im Beobachtungsjahr 1940 (Abb. 4 oben links) werden aufgrund der hohen Bodenbeschleunigung alle Schadensgrade erreicht. Im Beobachtungsjahr 1960 (Abb. 4 oben rechts) sind die Schadensgrade für die Gebäude aus dem Jahr 1940 gestiegen. Auch die Gebäude aus den Jahren 1950 und 1960 weisen unterschiedlich starke Schäden auf, wobei diese tendenziell geringer sind als bei den Gebäuden aus dem Jahr 1940. Von den insgesamt 33 Gebäuden weisen lediglich drei Gebäude *keinen Schaden* auf. Auch im Beobachtungsjahr 1980 (Abb. 4 unten links) ist eine Zunahme der Schadensgrade der bereits vorhandenen Gebäude zu verzeichnen und neue Gebäude weisen tendenziell geringere Schäden auf. Bis zum Beobachtungsjahr 2020 (Abb. 4 unten rechts) steigen die Schadensgrade weiter an und es sind alle Schadensgrade vertreten. Dabei weisen die älteren Gebäude tendenziell höhere Schadensgrade auf als die neueren Gebäude.

Die gleiche Analyse wurde auch für eine niedrige Spitzenbodenbeschleunigung von 0,1 g durchgeführt. Die Ergebnisse zeigen, dass im Jahr 1940 die meisten Gebäude *keinen Schaden* aufweisen, nur wenige weisen den Schadensgrad *Leicht* auf. Im Laufe der Zeit nimmt das Schadensausmaß jedoch zu, sodass im Jahr 2020 die Schadensgrade *Kein Schaden* bis *Stark* zu beobachten sind. Dies visualisiert, dass die Fragilität der Gebäude, vor allem der älteren Gebäude, im Laufe der Zeit zunimmt, jedoch bei dieser Bodenbewegung keine größeren Schäden zu erwarten sind.

4. DISKUSSION

Bei der Entwicklung von Fragilitätskurven für einen bestimmten Standort ist es von großer Bedeutung, die vorherrschenden Gebäudetypologien an diesem Ort zu berücksichtigen. In diesem Zusammenhang ist es unerlässlich, die Material- und Bewehrungseigenschaften in Abhängigkeit vom Baujahr und den geltenden Normen einzubeziehen. Darüber hinaus muss das Modell die Auswirkungen der Alterung beachten, um die Zuverlässigkeit der resultierenden Schadensabschätzung zu gewährleisten. In diesem Beitrag wird die Anwendbarkeit unseres multiskalaren Ansatzes zur Ableitung von Fragilitätskurven bei der Analyse bestehender Gebäude unter Einbeziehung von Alterungseffekten gezeigt. Im Falle des Gebäudes von 1943 wurden höherwertige Materialeigenschaften und ein moderater Korrosionsangriff angenommen. Folglich können die Auswirkungen der Korrosion und die damit einhergehende Zunahme der Fragilität signifikant stärker ausfallen. Aufgrund der Verwendung verschiedener Modellierungsansätze und der Berücksichtigung unterschiedlicher Korrosionseffekte ist ein direkter Vergleich der Ergebnisse aus der Literatur untereinander und mit den erzielten Ergebnissen nur bedingt möglich. Dennoch liegen die vorgestellten Ergebnisse im erwarteten Bereich gemäß der gesichteten Literatur [1, 2, 4, 5, 15, 16]. Die Berücksichtigung von Schäden sowie Alterungseffekten auf Material-, Querschnitts- und Bauwerksebene ist mittels des entwickelten Ansatzes möglich. Der entwickelte Ansatz berücksichtigt potenzielle Schadensmuster in umfassenderer Weise als bekannte Ansätze, die Verschiebungskriterien auf der Basis von Fließ- und Endverschiebungen der Bilinearisierung der Kraft-Verformungs-Kurve verwenden [13, 17]. Die Auswertung der verschiedenen Kriterien ermöglicht es, den Einfluss der Materialkombinationen abzubilden. Es wird ersichtlich, wann welches Kriterium überschritten wird und welches Material maßgebend ist. Auf diese Weise lassen sich Schwachstellen im System identifizieren. Die weitere Entwicklung der Fragilitätskurven kann mit beliebigen Methoden erfolgen, da die potenziellen Schadensmuster in den Verschiebungsgrenzwerten der Schadensgrade enthalten sind. Der Ansatz ist anwendbar für die Entwicklung von Fragilitätsfunktionen für einzelne Gebäude, allgemeine Gebäudeklassen, regionalspezifische Bauweisen, Material- und Systemeigenschaften, unterschiedliche Intensitätsmaße sowie sich über den Lebenszyklus des Gebäudes verändernde Eigenschaften.

Die hier vorgestellten Ergebnisse werden mit den Resultaten der durchgeführten Untersuchungen an Neubauten unter Korrosionseinfluss verglichen, die in [7] enthalten sind. Es zeigt sich, dass der reine Korrosionsangriff in Bezug auf den Gesamtschubkraftverlust bei älteren Bauwerken kritischer ist als bei modernen. Beispielsweise beträgt die korrosionsbedingte Abnahme der maximalen Gesamtschubkraft nach 80 Jahren 13 % für das Bauwerk aus dem Jahr 2023 und 28 % für das Bauwerk aus dem Jahr 1943.

Weiterhin ist die Qualität der Ausführung beim Bau der Gebäude zu berücksichtigen. In einigen Ländern kann die geringe Ausführungsqualität von Bauprojekten zu einer signifikanten Erhöhung der Fragilität führen. Daher könnte beispielsweise ein Faktor eingeführt werden, dessen Wert in Abhängigkeit von der Ausführungsqualität variiert. Der Faktor wird auf den Erwartungswert und die Standardabweichung angewendet. Infolgedessen würde sich bei Mängeln in der Ausführung die Kurve zu einer höheren Schadensanfälligkeit bei geringerer Beschleunigung verschieben. Alternativ dazu besteht die Möglichkeit, die minderwertige Ausführung bereits in der Modellbildung zu berücksichtigen. Dies kann beispielsweise durch das Fehlen einzelner Bewehrungsbügel oder eine niedrigere Betonfestigkeit erfolgen.

Weiterhin wurden Untersuchungen zur Vorschädigung durch vorangegangene Erdbeben durchgeführt. Die Anwendung einer Methode mit Be- und Entlastung zur Analyse der Vorschädigung resultiert in einer maximalen Erhöhung der Überschreitungswahrscheinlichkeit um bis zu 18 %, abhängig vom Ausmaß der Vorschädigung und dem Schadensgrad [8].

5. SCHLUSSFOLGERUNGEN

Der für die Ableitung von Fragilitätskurven entwickelte multiskalare Ansatz [6] kann verwendet werden, um die Auswirkungen der Korrosion als Alterungsaspekt zu berücksichtigen. Bei der Analyse bestehender Gebäude werden die Material- und Bewehrungseigenschaften entsprechend der im Baujahr geltenden Norm berücksichtigt.

Bei einem 80 Jahre alten, 1943 errichteten Gebäude kann ein Korrosionsangriff zu einer Verringerung der Gesamtschubkraft um 64 % und zu einer Erhöhung der Fragilität um bis zu 33 % im Vergleich zu einem Neubau aus dem Jahr 2023 führen. Eine weitere Erhöhung der Fragilität ist zu erwarten, wenn weitere Aspekte der Alterung wie beispielsweise die Vorschädigung mit der Korrosion kombiniert werden.

Wenn Fragilitätskurven, die für Neubauten entwickelt wurden, für bestehende Bauwerke verwendet werden, wird die Fragilität deutlich unterschätzt. Dies wird anhand eines repräsentativen Straßenzugs erläutert und visualisiert.

Visualisierungen, wie der Anwendungsprototyp anhand eines repräsentativen Straßenzugs, können in bestehende Expositionsmodelle integriert und automatisiert werden, um Abschätzungen über die Entwicklung der Fragilität zu erhalten. Für eine umfassende Analyse sind Informationen zu den Gebäudeeigenschaften, einschließlich des Baujahres, sowie zu den Fragilitätskurven und ihrer zeitlichen Veränderung erforderlich. Außerdem können Prognosen und Szenarien erstellt werden, die das Gebiet zu verschiedenen Zeitpunkten in der Zukunft untersuchen. Diese können Entscheidungen der lokalen Behörden unterstützen.

DANKSAGUNG

Die Grundlage für diese Arbeit wurde vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) im Rahmen des Projekts LOKI (FKZ: 03G0890E) gefördert. Die finanzielle Unterstützung wird von den Autoren sehr geschätzt.

LITERATUR

- [1] Silva V, Calderon A, Todorovic L, et al. (2022) Incorporating Future Earthquake Risk in Disaster Risk Management. In: Vacareanu R, Ionescu C, editors. *Progresses in European Earthquake Engineering and Seismology*, Cham: Springer International Publishing, p. 179–196. https://doi.org/10.1007/978-3-031-15104-0_11
- [2] Berto L, Vitaliani R, Saetta A, et al. (2009) Seismic assessment of existing RC structures affected by degradation phenomena. *Structural Safety* 31:284–297. <https://doi.org/10.1016/j.strusafe.2008.09.006>

- [3] Apostolopoulos CA & Papadakis VG (2008) Consequences of steel corrosion on the ductility properties of reinforcement bar. *Construction and Building Materials* 22:2316–2324. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2007.10.006>
- [4] Pitilakis KD, Karapetrou ST & Fotopoulou SD (2014) Consideration of aging and SSI effects on seismic vulnerability assessment of RC buildings. *Bulletin of Earthquake Engineering* 12:1755–1776. <https://doi.org/10.1007/s10518-013-9575-8>
- [5] Simioni P (2009) *Seismic Response of Reinforced Concrete Structures Affected by Reinforcement Corrosion*. Dissertation. University of Braunschweig and University of Florence.
- [6] Kohns J, Stempniewski L & Stark A (2022) Fragility Functions for Reinforced Concrete Structures Based on Multiscale Approach for Earthquake Damage Criteria. *Buildings* 12(8), 1253. <https://doi.org/10.3390/buildings12081253>
- [7] Kohns J, Stempniewski L & Stark A (2023) Berücksichtigung von Alterungseffekten bei der Entwicklung von Fragilitätskurven für Stahlbetongebäude. In: Wuttke F, Aji HDB, Özarmut A, editors. *Tagungsband der 18. D-A-CH-Tagung Erdbebeningenieurwesen und Baudynamik*, p. 93–100.
- [8] Eberl J. (2025) *Fragilitätsuntersuchungen und Schadensklassifikationen im Erdbebenfall auf Basis von luftgestützten Aufnahmen*. <https://doi.org/10.5445/KSP/1000176341>
- [9] Deutscher Ausschuss für Eisenbeton (1937) Bestimmungen des Deutschen Ausschusses für Eisenbeton 1932 - A. *Bestimmungen für Ausführung von Bauwerken aus Eisenbeton: DIN 1045 1937*.
- [10] Menegotto M & Pinto PE (1937) Method of analysis for cyclically loaded R.C. plane frames including changes in geometry and non-elastic behaviour of elements under combined normal force and bending. *Symposium on the Resistance and Ultimate Deformability of Structures Acted on by Well Defined Repeated Loads* 15–22. <https://doi.org/10.5169/SEALS-13741>
- [11] Seismosoft (2023) *SeismoStruct 2023* – A computer program for static and dynamic nonlinear analysis of framed structures. <https://seismosoft.com/products/seismostruct/>
- [12] Cosenza E, de Cicco F & Prota A. (2010) Discussion of “Nonlinear Uniaxial Material Model for Reinforcing Steel Bars” by Sashi K. Kunnath, YeongAe Heo, and Jon F. Mohle. *Journal of Structural Engineering* 136:917–918. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)ST.1943-541X.0000119](https://doi.org/10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0000119)
- [13] Martins L, Silva V, Crowley H, et al. (2021) Vulnerability modellers toolkit, an open-source platform for vulnerability analysis. *Bulletin of Earthquake Engineering* 19:5691–5709. <https://doi.org/10.1007/s10518-021-01187-w>
- [14] Luzi L, Puglia R, Russo E, et al. (2016) *Engineering Strong Motion Database (ESM)*, version 1.0 Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia, Observatories & Research Facilities for European Seismology. <https://doi.org/10.13127/ESM>
- [15] Celarec D, Vamvatsikos D & Dolšek M (2011) Simplified estimation of seismic risk for reinforced concrete buildings with consideration of corrosion over time. *Bulletin of Earthquake Engineering* 9:1137–1155. <https://doi.org/10.1007/s10518-010-9241-3>
- [16] Yalciner H, Sensoy S & Eren O (2012) Time-dependent seismic performance assessment of a single-degree-of-freedom frame subject to corrosion. *Engineering Failure Analysis* 19:109–122. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2011.09.010>
- [17] Crowley H, Dabbeek J, Despotaki V, et al. (2021) *European Seismic Risk Model (ESRM20)*: EFEHR Technical Report 002 V1.0.1, 84 pp <https://doi.org/10.7414/EUC-EFEHR-TR002-ESRM20>