

Diplomarbeit

# Evaluierung von seismischen Schnellbewertungs- methoden für historische Mauerwerksbauten

ausgeführt zum Zwecke der Erlangung des akademischen Grads  
Diplom-Ingenieur  
eingereicht an der TU Wien, Fakultät für Bau- und Umweltingenieurwesen

---

Diploma Thesis

# Evaluation of RVS-methods for historic masonry buildings

Submitted in satisfaction of the requirements for the degree of  
Diplom-Ingenieur  
of the TU Wien, Faculty of Civil and Environmental Engineering

von

**Christoph Unterweger, BSc**

Matr.Nr.: 01616031

Betreuung: Univ.-Prof. i.R. Dipl.-Ing. Dr.techn. **Andreas Kolbitsch**  
Dipl.-Ing. **Amel Karic**, BSc  
Institut für Hoch- und Industriebau  
Forschungsbereich Hochbau und Gebäudeerhaltung  
Technische Universität Wien,  
Karlsplatz 13/210-02, 1040 Wien, Österreich

Wien, im November 2022

---

# Kurzfassung

Die Wiener Gründerzeithäuser erfreuen sich noch heute großer Beliebtheit und sind mit ihren eindrucksvollen Fassaden aus Wien und vielen weiteren mitteleuropäischen Städten nicht mehr wegzudenken. Das Erdbeben am 22. März 2020 in Zagreb zeigte trotz seiner moderaten Stärke mit  $M_w$  5,4, auf zerstörerische Art und Weise, die hohe seismische Vulnerabilität dieser historischen Bauwerke. Die Zagreber Gründerzeitbebauung aus der Epoche der Österreichisch-Ungarischen Monarchie ( $\approx$  1840–1918) war mit Abstand am stärksten von diesem Erdbebenereignis betroffen. Durch die damaligen Bauordnungen und der einheitlichen sowie charakteristischen Baukonstruktionsweise stellen die Zagreber und Wiener Gründerzeitbauten vergleichbare Baukonstruktionen dar.

Aufgrund der hohen seismischen Verwundbarkeit stellt die Bewertung der Erdbebensicherheit solcher Bestandsbauwerke einen essenziellen Bestandteil in der seismischen Risikoeinschätzung dar. Zur schnellen und kostengünstigen Beurteilung der Schadensanfälligkeit eines großen Gebäudebestandes im Erdbebenfall wurden in den letzten Jahrzehnten verschiedenste Schnellbewertungsmethoden entwickelt. Die spezifische Baukonstruktionsweise und die daraus resultierende hohe Verwundbarkeit der gründerzeitlich errichteten Gebäude im Erdbebenfall fordern eine detaillierte Evaluierung und Gegenüberstellung der Schnellbewertungsmethoden. Die vorliegende Arbeit befasst sich insbesondere mit der seismischen Bewertungsmethode für Gründerzeithäuser nach *Achs* [1] und der normativ verankerten Rapid Visual Screening (RVS) Methode der *FEMA P-154:2015* [28], die als Grundlage für viele internationale Verfahren diente. Mit diesen Schnellbewertungsmethoden wurde ein ausgewählter Altbestand in Zagreb, der repräsentativ für die Zagreber Gründerzeithäuser ist, im Hinblick auf die seismische Vulnerabilität beurteilt. In weiterer Folge wurden die Ergebnisse miteinander verglichen und den gut dokumentierten Schäden infolge des verheerenden Erdbebens am 22. März 2020 gegenübergestellt. Die Vergleichsgrundlage dafür bildet die Schadensklassifikation der EMS-98 [32].

Im Zuge einer statistischen Auswertung konnte festgestellt werden, dass die seismischen Bewertungsmethode nach *Achs* [1] die tatsächlich festgestellten Erdbebenschäden in vielen Fällen realistisch abschätzen konnte. Die *FEMA P-154* [28] liefert hingegen konservative – auf der sicheren Seite liegende – Ergebnisse, die den Erdbebenwiderstand der untersuchten Gründerzeithäuser größtenteils unterschätzte.

# Abstract

The Viennese historic brick masonry buildings (Gründerzeithäuser) are still very popular today and it is impossible to imagine Vienna and many other Central European cities without their impressive facades. The earthquake in Zagreb on March 22, 2020, despite its moderate magnitude of  $M_w$  5,4, demonstrated in a destructive way the high seismic vulnerability of these historic buildings. Zagreb's historic brick masonry buildings from the era of the Austro-Hungarian Empire ( $\approx$  1840-1918) were by far the most affected by this earthquake. Due to the building regulations of that time and the uniform as well as characteristic construction method, the historic brick masonry buildings in Zagreb and Vienna represent comparable building constructions.

Due to the high seismic vulnerability, the assessment of the seismic safety of such existing buildings is an essential part of the seismic risk evaluation. For a fast and cost-efficient assessment of the damage susceptibility of a large building stock in case of an earthquake, various Rapid Visual Screening (RVS) methods have been developed in the last decades. The specific construction method and the resulting high vulnerability of the historic brick masonry buildings in the event of an earthquake call for a detailed evaluation and comparison of the RVS methods. The present work deals in particular with the RVS method for historic brick masonry buildings according to *Achs* [1] and the RVS method of *FEMA P 154:2015* [28], which is anchored in standards and served as a basis for many international procedures. Using these RVS methods, a selected old building stock in Zagreb, representative of Zagreb's historic brick masonry buildings, was assessed in terms of seismic vulnerability. Subsequently, the results were compared and contrasted with the well-documented damage caused by the devastating earthquake on March 22, 2020. The basis for comparison is the classification of damage according to EMS-98 [32].

In the course of a statistical evaluation, it was found that the seismic RVS method according to *Achs* [1] was able to realistically estimate the actual earthquake damage observed in many cases. FEMA P-154 [28] on the other hand, yielded conservative results – on the safe side – which largely underestimated the earthquake resistance of the examined historic brick masonry buildings.

# Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung.....	6
1.1	Motivation.....	6
1.2	Gliederung der Arbeit.....	7
2	Erdbebeneinwirkung .....	8
2.1	Begriffe zur Beschreibung eines Erdbebens .....	8
2.1.1	Hypozentrum und Epizentrum.....	8
2.1.2	Magnitude.....	9
2.1.3	Intensität.....	9
2.2	Erdbebenrisiko und Erdbebengefährdung.....	10
2.3	Seismische Verletzbarkeit von Bauwerken nach der EMS-98 [32].....	13
2.4	Erdbebenschäden an Mauerwerksbauten .....	14
2.4.1	Versagensformen in der Wandebene .....	14
2.4.2	Versagensformen aus der Wandebene.....	16
2.4.3	Interaktion Wand-Decke und Wand-Wand.....	17
2.4.4	Schadenklassifizierung der EMS-98 [32].....	18
3	Gründerzeithäuser .....	19
3.1	Historischer Hintergrund.....	19
3.1.1	Bautätigkeit in Wien .....	20
3.1.2	Bautätigkeit in Zagreb.....	20
3.2	Baustoffe.....	22
3.2.1	Ziegel .....	22
3.2.2	Mörtel .....	22
3.2.3	Holz .....	22
3.2.4	Eisen.....	23
3.2.5	Naturstein.....	23
3.3	Charakteristische Bauweise.....	23
3.3.1	Mauerwerk und Fundierung .....	25
3.3.2	Deckenkonstruktionen.....	28
3.3.3	Dachkonstruktionen.....	31
3.4	Erdbebenproblematik bei Gründerzeithäusern.....	32

4	Das Zagreb Erdbeben am 22. März 2020 .....	34
4.1	Der Ballungsraum Zagreb .....	34
4.1.1	Seismizität .....	36
4.2	Das Erdbeben .....	37
4.3	Betroffene Gebäude .....	39
4.4	Aufgetretene Schäden .....	40
4.4.1	Strukturelle Schäden .....	42
4.4.2	Nicht strukturelle Schäden .....	43
4.4.3	Klassifizierung der Erdbebenschäden .....	45
5	Zustandsbeurteilung .....	47
5.1	Normen und Richtlinien .....	47
5.1.1	Europäische Union - Eurocode 8 .....	47
5.1.2	USA – FEMA P-154 .....	48
5.1.3	Schweiz – SIA 269/8 .....	48
5.2	Nationale und internationale Methoden .....	49
5.2.1	Methode nach <i>Meskouris</i> [51] .....	49
5.2.2	Methode nach <i>Rusnov</i> [61] .....	50
5.3	Schnellbewertung nach <i>Achs</i> [1] .....	50
5.3.1	Grundlegende Parameter .....	51
5.3.2	Gefährungsklassen .....	56
5.4	RVS gemäß <i>FEMA P 154</i> [28] .....	59
5.4.1	Grundlegende Parameter .....	60
5.4.2	Ergebnis .....	62
6	Anwendung auf den Zagreber Gründerzeitbestand .....	63
6.1	Gebäudewahl .....	63
6.2	Bewertung und Beurteilung .....	66
6.3	Auswertung und Ergebnisse .....	66
6.3.1	Methode nach <i>Achs</i> [1] .....	66
6.3.2	<i>FEMA P-154</i> [28] .....	73
6.4	Vergleich mit Erdbebenschäden .....	77
6.4.1	Auswertung der Bewertungsergebnisse .....	80
6.4.2	Zusammenfassung der Ergebnisse .....	82
7	Schlussfolgerung und Ausblick .....	83
	Literaturverzeichnis .....	85

# 1 Einleitung

## 1.1 Motivation

Historische Mauerwerksbauten mit ihrer imposanten Fassadengestaltung prägen auch heute noch das Stadtbild vieler mitteleuropäischer Städte. Insbesondere die Bundeshauptstadt Wien, weist einen prozentuell sehr hohen Anteil an Altbauten auf [45], die in der Epoche der Gründerzeit ( $\approx 1840$ – $1918$ ) infolge eines exponentiellen Bevölkerungswachstums, ausgelöst durch die Industrialisierung, errichtet wurden. Aufgrund ihres eindrucksvollen Erscheinungsbildes und der großzügigen Raumhöhen erfreuen sich die Gründerzeithäuser noch immer größter Beliebtheit. Diese Bauwerke weisen allerdings in ihrer Konstruktionsweise einige Schwächen auf, die vor allem auf mangelnde Kenntnis des bautechnischen und baulastdynamischen Verhaltens aus dieser Zeit zurückzuführen ist, wodurch eine Beurteilung dieser Gebäude im Hinblick auf die Erdbebengefährdung unumgänglich ist.

Erdbeben sind Naturkatastrophen und können verheerende Auswirkungen auf Menschen und Gebäude haben. In Wien bzw. in der gesamten Europäischen Union erfolgt die Auslegung und Bewertung von historischen Mauerwerksbauten gegenüber seismischen Einwirkungen mit der EN 1998 (EC 8) und den zugehörigen nationalen Anwendungsdokumenten. Die normativ verankerten Nachweismethoden stellen vereinfachte und auf der sicheren Seite liegende – konservative – Rechenmodelle dar, die das spezifische dynamische Tragverhalten der gründerzeitlichen Mauerwerksbauten für eine adäquate seismische Risikobewertung nur unzureichend wiedergeben [40]. Das liegt unter anderem daran, dass der Einfluss des Erhaltungszustandes dieser historischen Bestandsbauten auf die Festigkeiten und Steifigkeiten der gründerzeitlichen Baukonstruktionen, sowie die Interaktion der verschiedenen Bauteile miteinander im Erdbebenfall nur sehr schwer vorhergesagt und abgeschätzt werden können [3]. Daher wurde in den letzten Jahrzehnten vermehrt das Augenmerk auf die Entwicklung von seismischen Schnellbewertungsmethoden zur Beurteilung der Schadensanfälligkeit von Bestandsbauten gerichtet [3]. Die Gebäudebewertung basiert dabei in den meisten Fällen auf der Auswertung von Bestandplänen und visueller Begutachtungen. Somit kann im Zuge eines Erdbebenmanagementprogramms ein großer Gebäudebestand kostengünstig in kurzer Zeit erfasst und beurteilt werden. Diese Arbeit befasst sich dabei insbesondere mit der Rapid Visual Screening (RVS) Methode der *FEMA P-154* [28], die als wichtige Grundlage für die Ableitung von vielen nationalen sowie internationalen seismischen Bewertungsmethoden diente, und der seismischen Schnellbewertungsmethode nach *Achs* [1], die speziell für die Anwendung auf Wiener Gründerzeithäuser entwickelt wurde.

Obwohl der Großraum Wien zu den Regionen mit geringer bis moderater Seismizität zu zählen ist [23], hat der Wiener Altbestand bereits zahlreiche Erdbeben erlebt. Die Erdbebenereignisse konnten größtenteils schadlos überstanden werden, weshalb keine Erkenntnisse über das tatsächliche seismische Tragverhalten der Gründerzeithäuser gewonnen werden konnten. Das letzte größere Erdbeben in Wien war das Seeenstein Erdbeben (1972), wobei hauptsächlich Schäden an nichttragenden Elementen verzeichnet wurden [26].

Das Erdbeben am 22. März 2020 in Zagreb hatte mit einer Momenten-Magnitude von  $M_w = 5,4$  eine mäßige bzw. moderate Stärke und verursachte trotzdem schwere Gebäudeschäden, insbesondere in der historischen Innenstadt [5]. Am stärksten betroffen waren dabei die alten Wohngebäude aus der Österreichisch-Ungarischen Monarchie, die in der Epoche der Gründerzeit errichtet wurden [5] und in vielen Punkten mit den Wiener Gründerzeithäusern vergleichbar sind. Die Stadt Zagreb stand zum Zeitpunkt der Errichtung dieser Gebäude als Teil der „k.u.k. Doppelmonarchie“ unter österreichischer Verwaltung und die für die Gründerzeit charakteristische Baukonstruktionsweise wurde maßgebend durch die damals gültige Bauordnung bestimmt. Die Zagreber Bauordnung basierte dabei größtenteils auf der Wiener Bauordnung [38] und so wird eine außerordentliche Vergleichbarkeit zu den Gründerzeithäusern in Wien erreicht.

Die verheerenden Schäden, die durch das Erdbeben am gemauerten Altbestand verursacht wurden, zeigten deutlich die seismischen Schwachstellen dieser historischen Bauwerke auf und es konnten anhand der Analyse der Erdbebenschäden wesentliche Erkenntnisse über die seismische Verletzbarkeit von Gründerzeithäusern gewonnen werden, u. a. in *Karic et al.* [39] und *Karic et al.* [41].

## 1.2 Gliederung der Arbeit

Die vorliegende Arbeit zielt darauf ab, die seismische Bewertungsmethode nach *Achs* [1], die speziell für gründerzeitlich errichtete Gebäude entwickelt wurde, sowie die in der amerikanischen Norm verankerte zweistufige RVS-Methode der FEMA P-154:2015 [28] auf einen ausgewählten Altbestand in Zagreb anzuwenden. In weiterer Folge sollen diese Ergebnisse analysiert und mit den Erdbebenschäden, die an den Gründerzeithäusern nach dem  $M_w$  5,4 Erdbeben am 22. März 2020 in Zagreb festgestellt wurden, verglichen werden. So sollen mögliche Mängel aufgezeigt und ein Anstoß zur Überarbeitung dieser seismischen Schnellbewertungsmethoden gegeben werden. Darüber hinaus kann aus den Erdbebenschäden auf die seismische Vulnerabilität von Gründerzeithäusern geschlossen werden. Dafür ist diese Arbeit wie folgt gegliedert:

- Im Kapitel 2 werden zunächst wesentliche Begriffe zur Beschreibung eines Erdbebens erläutert, sowie die Auswirkungen auf Mauerwerksbauten behandelt.
- Das Kapitel 3 widmet sich den Gründerzeithäusern in Zagreb und Wien. Dabei wird insbesondere auf die charakteristische Bauweise dieser Epoche sowie die daraus resultierenden Probleme im Erdbebenfall eingegangen.
- Im Kapitel 4 wird das Augenmerk auf das Erdbeben vom 22. März 2020 und die Auswirkung auf den Zagreber Altbestand gerichtet.
- Das Kapitel 5 soll einen Einblick in nationale und internationale seismische Bewertungsmethoden zur Klassifizierung von Bestandgebäuden geben, sowie die beiden Schnellbewertungsmethoden nach *Achs* [1] und gemäß *FEMA P-154:2015* [28] ausführlich beschreiben.
- Darauf aufbauend wird im Kapitel 6 die seismische Vulnerabilität von 30 Gründerzeithäusern eines ausgewählten Häuserblocks in Zagreb mit den Bewertungsmethoden nach *Achs* [1] und gemäß *FEMA P-154:2015* [28] beurteilt. Diese Ergebnisse werden miteinander verglichen und den tatsächlich beobachteten Erdbebenschäden gegenübergestellt.
- Die Arbeit schließt mit der Schlussfolgerung im Kapitel 7 ab.



## 2 Erdbebeneinwirkung

Als Erdbeben werden messbare Erschütterungen der Erdoberfläche bezeichnet, die meist infolge eines schlagartigen Spannungsabbaus in der Erdkruste entstehen (so genannte tektonische Beben). Erdbeben wirken als außergewöhnliche Belastung auf Bauwerke und können katastrophale Folgen für Mensch, Bauwerk und Natur haben.

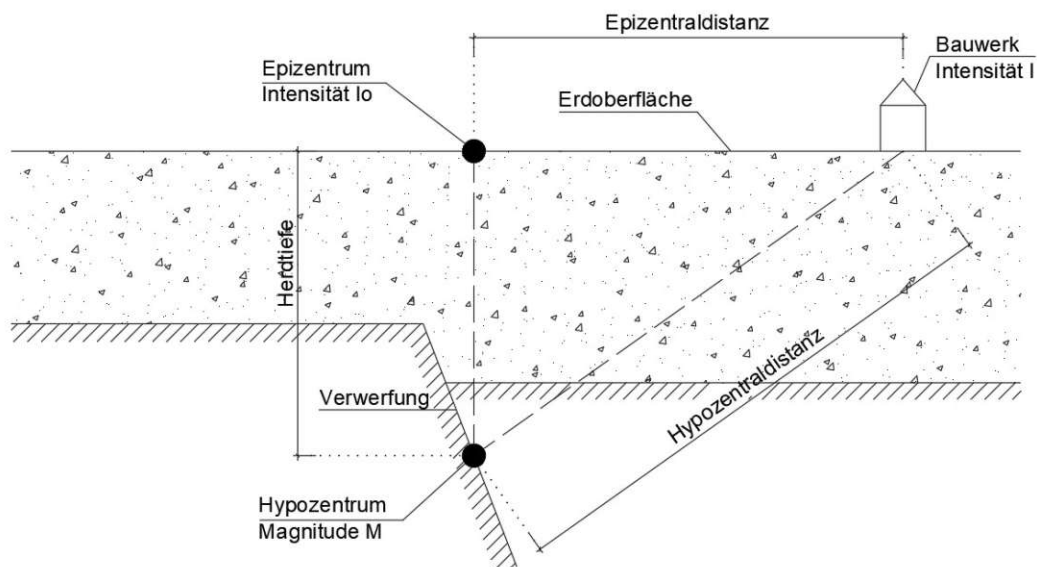
Im nachfolgenden Kapitel werden einige wichtige Begriffe zur Beschreibung eines Erdbebenherdes, sowie der Unterschied zwischen dem Erdbebenrisiko und der Erdbebengefährdung erklärt. Zudem werden die Auswirkungen von Erdbeben auf Mauerwerksbauten ausführlich erläutert.

### 2.1 Begriffe zur Beschreibung eines Erdbebens

#### 2.1.1 Hypozentrum und Epizentrum

Das Hypozentrum im Erdinneren – auch Erdbebenherd genannt – ist der Ursprung des Erdbebens und wird mittels instrumenteller Aufzeichnungen ermittelt. Theoretisch wird das Hypozentrum als punktförmige Quelle angesehen, in Wirklichkeit handelt es sich dabei aber immer um eine Fläche, die sich über mehrere hundert Quadratkilometer erstrecken kann [61].

Das Epizentrum ist jener Ort an der Erdoberfläche, der sich senkrecht über dem Hypozentrum befindet, siehe **Abb. 1**. Hier werden bei starken Erdbeben zumeist die größten Schäden verzeichnet [10].



**Abb. 1:** Schematische Darstellung eines Herdgebietes nach *Bachmann* [10].



Als Hypozentraldistanz bzw. Epizentraldistanz wird der Abstand eines Beobachtungspunktes (z.B. Bauwerk) zum Hypozentrum bzw. Epizentrum bezeichnet. Grundsätzlich nimmt die Intensität vom Epizentrum aus gesehen mit zunehmender Herdentfernung ab [61].

Die Herdtiefe beschreibt den vertikalen Abstand der Herdfläche zur Oberfläche. Erdbeben im Alpenraum zählen zu den oberflächennahen Beben, da hier Herdtiefen von maximal 15 bis 20 km zu erwarten sind [61].

## 2.1.2 Magnitude

Die Stärke eines Erdbebens kann mit der nach oben offenen Magnituden-Skala (Richter-Skala) beschrieben werden. Die Magnitude  $M$  ist ein logarithmisches Maß für die im Hypozentrum (Erdbebenherd) freigesetzte Energie und wird mit der maximalen Bodenbewegung berechnet. Der Zuwachs um eine Magnitudenstufe entspricht dabei einer Erhöhung der Energie um den Faktor 31,6 [61].

## 2.1.3 Intensität

Neben der Magnituden-Skala kann ein Erdbeben auch mit einer Intensitäts-Skala charakterisiert werden. Die Intensität  $I$  stellt dabei ein Maß für die Zerstörungskraft und Wahrnehmbarkeit eines Erdbebens dar [10]. Um ein Beben systematisch klassifizieren zu können sind Beschreibungen der Auswirkungen und Schäden notwendig.

Die Intensität ist grundsätzlich von mehreren Faktoren abhängig z.B. Magnitude, Herdtiefe und Herdentfernung vom Standort. Zudem beeinflussen lokale Gegebenheiten (z.B. Baugrund, Frequenzgehalt am Standort; etc.) die Auswirkungen eines Erdbebens maßgeblich.

Derzeit sind unterschiedliche Skalen zur Charakterisierung der Intensität eines Erdbebens gebräuchlich, z.B. die MM-Skala (Modified Mercalli-Scale, basiert auf der MSK-Skala bzw. Medwedew-Sponheuer-Karnik-Skala) in den USA, die JMA (Japan Meteorological Agency) in Japan und die EMS-98 Skala (European Macroseismic Scale) in Europa. Die Skalen sind meist auf eine typische Bauweise in einem Land kalibriert [61].

Die EMS-98 nach Grünthal [32] löste nach langer Zeit die in Europa gebräuchliche MSK-64 Skala ab und unterscheidet 12 Intensitätsstufen, die basierend auf den Auswirkungen auf alltägliche Gegenstände beschrieben werden. Die wesentlichen „Sensoren“ sind dabei Personen, Objekte und das Gebäude selbst. In der folgenden **Tab. 1** ist eine stark vereinfachte und verallgemeinerte Version der EM-Skala dargestellt. Die Originalversion berücksichtigt zusätzlich die sich unterscheidende Widerstandsfähigkeit von Gebäudetypen in Form von sechs Vulnerabilitätsklassen (A bis F), siehe Kapitel 2.3 auf Seite 13. Zudem definiert die EMS-98 fünf Schadensklassen für Mauerwerks- und Stahlbetonbauten, siehe Kapitel 2.4.4 auf Seite 18.

Tab. 1: Definition der Intensitätsgrade nach EMS-98 [32].

Intensitätsgrade		Beschreibung der Erschütterungseffekte
I	<b>Nicht spürbar</b>	Wird nicht wahrgenommen.
II	<b>Kaum spürbar</b>	Wird nur in einzelnen Fällen von ruhenden Personen in Innenräumen wahrgenommen.
III	<b>Schwach</b>	Wird von wenigen Personen in Innenräumen wahrgenommen. Ruhende Personen spüren ein Schwanken oder leichtes Zittern.
IV	<b>Weitgehend beobachtet</b>	Wird von vielen Personen in Innenräumen wahrgenommen, nur von wenigen im Freien. Fenster, Türen und Geschirr wackeln.
V	<b>Stark</b>	Wird von den meisten Personen in Innenräumen und von einigen im Freien wahrgenommen. Gebäude schwanken in allen Bereichen. Kleine Gegenstände werden verschoben.
VI	<b>Leicht schädigend</b>	Einige Gegenstände fallen herunter. Viele Gebäude erleiden leichte nicht-strukturelle Schäden (z.B. Haarrisse, Herabfallen von kleinen Putzstücken).
VII	<b>Schädigend</b>	Möbel werden verschoben und Gegenstände fallen aus den Regalen. Viele gewöhnlich gut gebaute Gebäude erleiden <i>mäßige</i> Schäden. Ältere Gebäude können <i>beträchtliche bis starke</i> Schäden erleiden.
VIII	<b>Stark schädigend</b>	Viele Gebäude weisen große Risse in Wänden auf. Einige gewöhnlich gut gebaute Gebäude weisen <i>sehr starke</i> Schäden auf. Ältere Konstruktionen können einstürzen.
IX	<b>Zerstörend</b>	Viele schwache Konstruktionen stürzen ein. Selbst gewöhnlich gut gebaute Gebäude weisen <i>sehr starke</i> Schäden auf: Wände versagen und teilweise strukturelles Versagen tritt auf.
X	<b>Sehr zerstörend</b>	Viele gewöhnlich gut gebaute Gebäude stürzen ein.
XI	<b>Verwüstend</b>	Die meisten gewöhnlich gut gebauten Gebäude stürzen ein, sogar einige erdbebensichere Gebäude werden zerstört.
XII	<b>Sehr verwüstend</b>	Nahezu alle Gebäude werden zerstört.

## 2.2 Erdbebenrisiko und Erdbebengefährdung

Das Erdbebenrisiko berücksichtigt einerseits die Erdbebengefährdung einer Region und andererseits die Folgewirkungen des Erdbebens. Das Schadenspotential beinhaltet die Bevölkerungs- und Vermögenswertkonzentration, die Erdbebengefährdung wiederum beschreibt die Wahrscheinlichkeit, mit welcher innerhalb eines definierten Zeitraums eine bestimmte Bodenbeschleunigung überschritten werden könnte. Rein mathematisch gesehen, kann das Erdbebenrisiko als Produkt aus erwartetem Verlust und Erdbebengefährdung definiert werden [72].

Zur Darstellung der Erdbebengefährdung einer bestimmten Region werden Erdbebengefährdungskarten erstellt (sogenannte Makrozonierung). Im Normenwerk werden die Regionen in Abhängigkeit von der zu erwartenden horizontalen Bodenbeschleunigung in so genannte Erd-

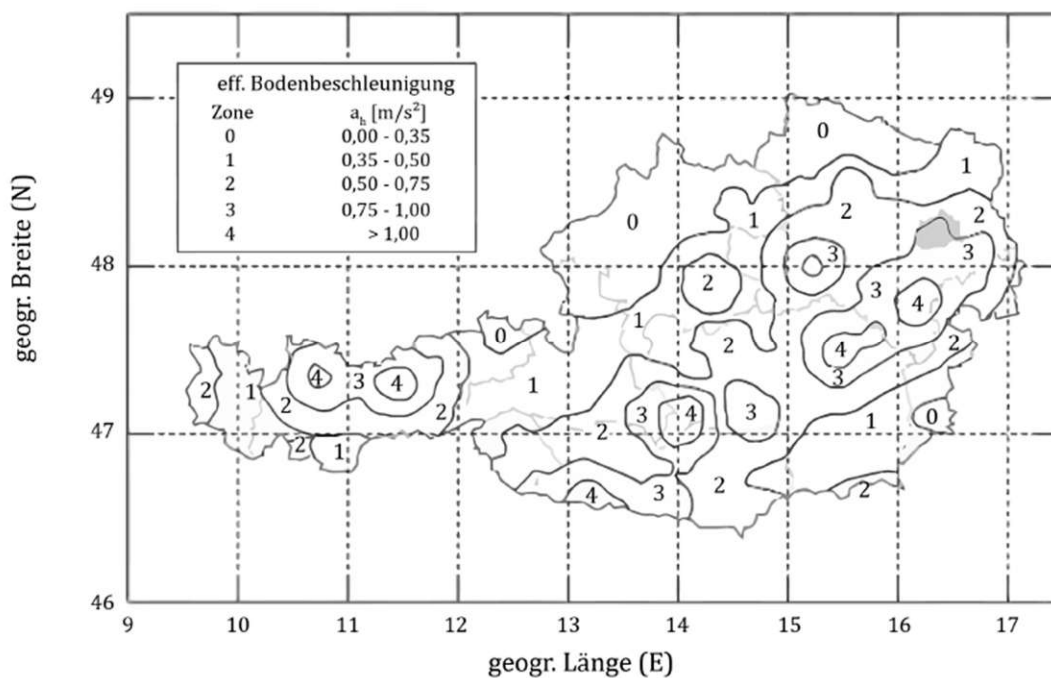
bebenzonen unterteilt. Die Zoneneinteilung basiert dabei auf der Auswertung aller geschichtlich bekannten Erdbebenereignisse hinsichtlich ihrer Wirkung. Aus diesem Grund ist die Abgrenzung der Zonen sehr ungenau und wird mit fortschreitendem Wissensstand adaptiert [61].

Die folgende **Abb. 2** zeigt die Erdbebenzonenkarte von Österreich, wie sie in der zurzeit gültigen Erdbeben-Norm (ÖNORM B 1998-1:2017 [7]) abgebildet ist. Den jeweiligen Erdbebenzonen wird dabei direkt der Referenz-Spitzenwert der Bodenbeschleunigung  $a_{gR}$  [m/s<sup>2</sup>] für die Baugrundklasse A zugeordnet. Die Bodenbeschleunigungen stellen dabei Maximalwerte mit einer Überschreitungswahrscheinlichkeit von 10 % in 50 Jahren dar. Das entspricht einer Wiederkehrperiode von 475 Jahren.

Wien wird beispielsweise in zwei Zonen unterteilt:

- Nordöstlich der Donau (Zone 2:  $a_{gR} = 0,70$  m/s<sup>2</sup>)
- Südwestlich der Donau (Zone 3:  $a_{gR} = 0,80$  m/s<sup>2</sup>).

Für das nur ca. 270 km entfernte Zagreb wird in der kroatischen Erdbebennorm (HRN EN 1998-1:2011 [18]) zum Vergleich ein Referenz-Spitzenwert der Bodenbeschleunigung  $a_{gR}$  in der Höhe von 2,3 bis 2,6 m/s<sup>2</sup> erwartet. Somit wird von einer fast drei Mal so hohen horizontalen Erdbebenbeschleunigung ausgegangen wie in Wien.



**Abb. 2:** Erdbebenzonen in Österreich gemäß ÖNORM B 1998-1:2017 [7] aus Rodler [60].

Neben der bereits erwähnten Makrozonierung spielen die unmittelbaren Untergrundverhältnisse eine entscheidende Rolle bei der Berücksichtigung von möglichen Erdbebenerschütterungen. Diese Mikrozonierung ist flächendeckend nicht bekannt und muss für jede Situation gesondert betrachtet werden. Besonders wassergesättigte, leicht verdichtbare Böden mit schlechten Drainagebedingungen müssen auf die Gefahr der Bodenverflüssigung, die im Zuge eines Erdbebens auftreten kann, untersucht werden. Zusätzlich können sich auch Hanglagen und Gleithänge negativ auf die Folgen eines Erdbebens auswirken [61].

Die ÖNORM EN 1998-1:2013 [6] definiert die in der nachfolgenden **Tab. 2** ersichtlichen Baugrundklassen A, B, C, D, E, S<sub>1</sub> und S<sub>2</sub>. Die Unterteilung erfolgt dabei anhand der durchschnittli-

chen Schwerwellengeschwindigkeit  $v_{s,30}$  des Untergrunds. Sowohl in Wien als auch in Zagreb ist in den meisten Fällen mit den Baugrundklassen B, C und D zu rechnen.

**Tab. 2:** Baugrundklassen gemäß ÖNORM EN 1998-1:2013 [6].

Baugrund-klasse	Beschreibung des stratigraphischen Profils	Durchschnittliche Scherwellengeschwindigkeit $v_{s,30}$
A	Fels oder andere felsähnliche geologische Formation, mit höchstens 5 m weicherem Material an der Oberfläche	> 800 m/s
B	Ablagerungen von sehr dichtem Sand, Kies oder sehr steifem Ton, mit einer Dicke von mindestens einigen zehn Metern, gekennzeichnet durch einen allmählichen Anstieg der mechanischen Eigenschaften mit der Tiefe	360 – 800 m/s
C	Tiefe Ablagerungen von dichtem oder mittel-dichtem Sand, Kies oder steifem Ton, mit Dicken von einigen zehn bis mehreren hundert Metern	180 – 360 m/s
D	Ablagerungen von lockerem bis mitteldichtem kohäsionslosem Boden (mit oder ohne einige weiche kohäsive Schichten), oder von vorwiegend weichem bis steifem kohäsivem Boden	< 180 m/s
E	Ein Bodenprofil, bestehend aus einer Oberflächen-Alluvialschicht mit $v_s$ -Werten nach C oder D und veränderlicher Dicke zwischen etwa 5 m und 20 m über steiferem Bodenmaterial mit $v_s > 800$ m/s	-
S1	Ablagerungen, bestehend aus (oder enthaltend) eine(r) mindestens 10 m dicke(n) Schicht weicher Tone oder Schluffe mit hohem Plastizitätsindex ( $PI > 40$ ) und hohem Wassergehalt	< 100 m/s (indikativ)
S2	Ablagerungen von verflüssigbaren Böden, empfindlichen Tonen oder jedes andere Bodenprofil, das nicht in den Klassen A bis E oder S1 enthalten ist	-

## 2.3 Seismische Verletzbarkeit von Bauwerken nach der EMS-98 [32]

Die Europäische Makroseismische Skala (EMS-98 [32]) ordnet den unterschiedlichen Bauwerkstypen sechs Vulnerabilitätsklassen (A bis F) zu, die die Schadensanfälligkeit der einzelnen Gebäudetypen im Erdbebenfall beschreiben sollen. Die folgende **Abb. 3** nach *Grünthal* [33] vergleicht die seismische Schadensanfälligkeit der einzelnen Bauwerkstypen zueinander. Die im Rahmen dieser Arbeit untersuchten Gründerzeithäuser zählen beispielsweise zu den „unbewehrten Mauerwerksbauten aus gefertigten Steinen“ und können, in Abhängigkeit vom jeweiligen Erhaltungszustand, den Verletzbarkeitsklassen A oder B zugeordnet werden. Diese Gebäude sind somit als „sehr“ anfällig gegenüber seismischen Einwirkungen einzustufen.

Bauwerkstyp		Vulnerabilitätsklasse					
		A	B	C	D	E	F
MAUERWERKSBAUTEN	Bruchstein, Feldstein	○					
	Adobe (ungebrannte Lehmziegel)	○	—				
	einfache behauene Natursteine	○					
	massive behauene Natursteine			○	—		
	unbewehrt, aus gefertigten Steinen	○					
	unbewehrt, mit Stahlbetondecken			○	—		
	bewehrt oder eingefasst				○	—	
STAHLBETONBAUTEN	Rahmensystem ohne erdbebengerechte Ausführung (EGA)			○	—		
	Rahmensystem mit moderater EGA				○	—	
	Rahmensystem mit guter EGA					○	—
	Wandsystem ohne EGA			○	—		
	Wandsystem mit moderater EGA				○	—	
	Wandsystem mit guter EGA					○	—
Stahlbauten					○	—	
Holzbauten				○	—		

○ wahrscheinlichste Vulnerabilitätsklasse; — wahrscheinlicher Bereich;  
 ..... weniger wahrscheinlicher Bereich und Ausnahmefälle

**Abb. 3:** Vulnerabilitätsklassen nach *Grünthal* [33].

## 2.4 Erdbebenschäden an Mauerwerksbauten

Grundsätzlich erfolgt die Lastabtragung bei Mauerwerksbauten unter seismischer Beanspruchung über die Mauerwerkswände. Dabei werden die gemauerten Wände im Lastfall Erdbeben zusätzlich zu den vertikal wirkenden Lasten durch Horizontalkräfte beansprucht und weisen dabei ein sehr komplexes Verhalten auf, das sich zurzeit mit Rechenmodellen nur schwer nachbilden lässt [50]. Die Mauerwerkswände werden als Wandscheiben aktiviert und die Lastabtragung erfolgt in erster Linie in der Wandebene (in-plane). Die Versagensformen senkrecht zur Wandebene (out-of-plane), sowie lokale Versagensmechanismen stellen allerdings ebenso erdbebenrelevante Aspekte der Gebäudesicherheit dar und sollten nicht vernachlässigt werden. Darüber hinaus sind die Interaktionen zwischen einzelnen Wandscheiben und zwischen Wänden und Geschoßdecken wesentliche Aspekte des Tragverhaltens [50].

Im folgenden Kapitel werden zunächst die unterschiedlichen Versagensformen von Mauerwerkswänden unter seismischer Beanspruchung erläutert. Da der Nachweis der Standsicherheit über die Betrachtung einzelner Wandelemente erfolgt, werden insbesondere die Versagensmechanismen einzelner Wandscheiben betrachtet. Abschließend wird die Schadensklassifizierung nach der EMS-98 [32] beschrieben. Die Problemstellungen, die bei den in dieser Arbeit untersuchten, gemauerten Gründerzeithäusern im Erdbebenfall beobachtet werden konnten, werden in Kapitel 3.4 erläutert.

### 2.4.1 Versagensformen in der Wandebene

Welche Versagensform sich unter seismischer Belastung im Mauerwerk einstellt ist unter anderem von den Verhältnissen zwischen Höhe und Länge sowie der Horizontal- und Vertikallasten der Mauerwerkswände abhängig. Darüber hinaus beeinflussen Faktoren wie die Einwirkungsdauer, Frequenz oder Amplitude der dynamischen Erdbebenbelastung das Versagensbild. Prinzipiell basieren die möglichen Versagensszenarien auf dem Druck-, Zug- oder Schubversagen des Steines, des Mörtels und/oder der Kontaktfläche. Das Gesamtversagen der Wandscheibe unter Erdbebenbelastung bildet allerdings meist eine Kombination aus den unten beschriebenen Versagensformen – eine eindeutige Trennung ist in der Realität nicht zu erkennen [50].

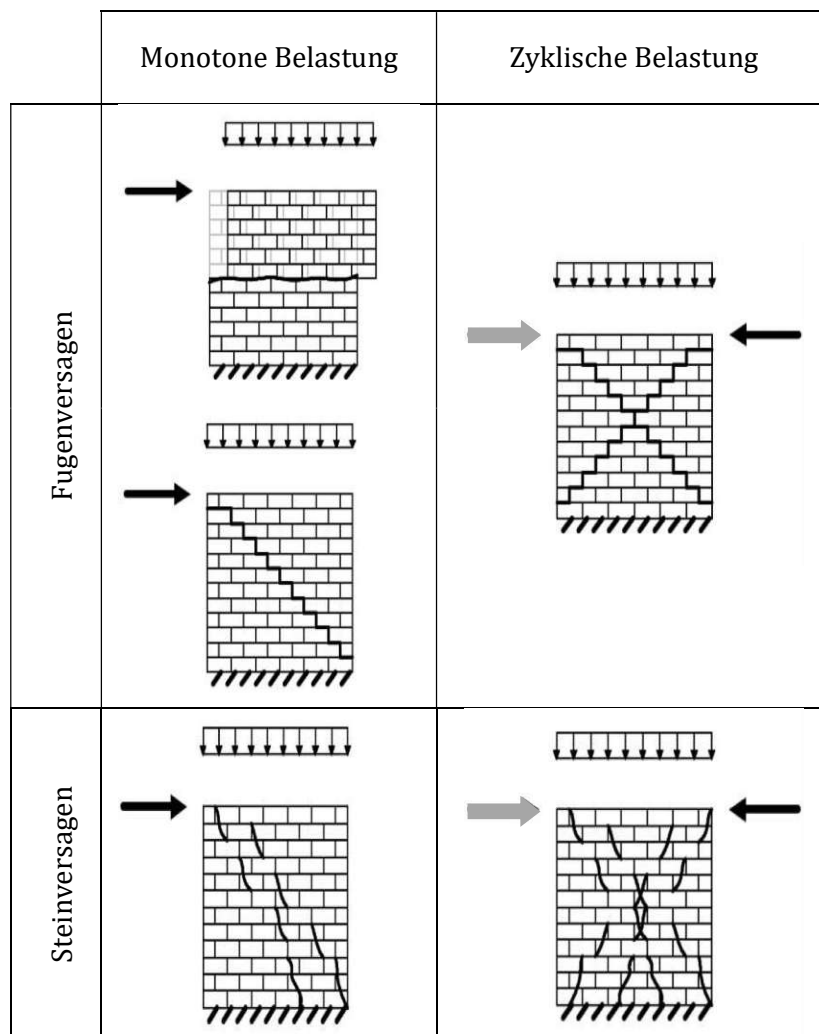
#### Schubversagen:

Bei geringen Auflasten bleiben die Mauersteine meist unversehrt und es tritt Fugenversagen ein. Dabei bildet sich entweder ein treppenförmiger Riss entlang der Lager- und Stoßfugen oder der Rissverlauf beschränkt sich auf eine einzelne Lagerfuge, siehe **Abb. 4** (Fugenversagen) [50]. Vor allem bei nicht tragenden Mauerwerkswänden mit einem schwachen Mörtelverbund, wie es bei Gründerzeithäusern (siehe Kapitel 3) vermehrt der Fall ist, ist diese Versagensform sehr wahrscheinlich.

Bei höheren Vertikallasten erhöht sich die Mörtelschubfestigkeit, wodurch ein Steinversagen resultiert, siehe **Abb. 4** (Steinversagen). Verantwortlich dafür ist die sich unter Schub einstellende Verdrehung des Steins, die in weiterer Folge Zugkräfte im Mauerstein hervorruft. Im Vergleich zum Fugenversagen ist diese Versagensform eher spröde und bewirkt eine höhere Steifigkeitsabnahme [50].

Die Erdbebenbelastung stellt für gewöhnlich eine alternierende bzw. zyklische Belastung dar, welche die in der **Abb. 4** ersichtlichen Kreuzrisse bewirkt. In der Realität treten diese meist als Kombination von Fugen- und Steinzugversagen auf.





**Abb. 4:** Schubversagen inkl. Rissverläufe nach *Meskouris et al.* [50].

### Biegeversagen:

Ein weiteres Versagensszenario einzelner Wandscheiben ist das Biegeversagen, das vor allem bei schlanken Mauerwerksscheiben auftreten kann. In der folgenden **Abb. 5** ist gut ersichtlich, dass die Eckbereiche des Mauerwerks vor allem auf Zug und Druck beansprucht werden. Als Schadensbild zeigt sich entweder eine klaffende Fuge im Zuge der Überschreitung der Haftzugfestigkeit des Mörtels (Biegezugversagen) oder ein Steinversagen durch Überschreitung der Mauersteindruckfestigkeit (Biegedruckversagen) [50].

Eine zyklische Belastung aufgrund eines Erdbebens führt in den Eckbereichen zu einem Wechsel von Klaffungen, verursacht durch alternierende Druck- und Zugbeanspruchungen. Die dabei auftretenden Verformungen sind, verglichen mit der aufnehmbaren Last, groß [50].



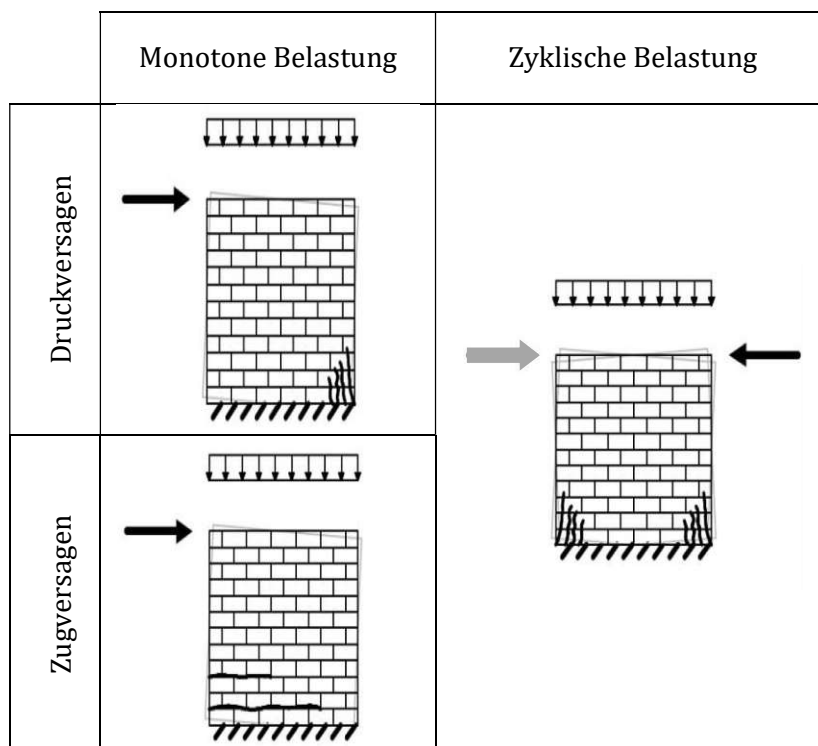


Abb. 5: Biegeversagen inkl. Rissverläufe nach *Meskouris et al.* [50].

## 2.4.2 Versagensformen aus der Wandebene

Vergangene Schadensanalysen von Erdbeben in Europa haben gezeigt, dass das Versagen von gemauerten Wänden aus der Ebene im Gegensatz zum Schub- und Biegeversagen in der Wandebene oftmals zu verheerenderen Schäden führte. Insbesondere Wände mit geringen Vertikallasten, wie z.B. nichttragende, gemauerte Wände oder Giebelwände, sind für diese Versagensform sehr anfällig [50].

Bei einer Beanspruchung senkrecht zur Wandebene können entweder Plattenbiegerisse auf der gezogenen Wandseite oder Plattenschubrisse auftreten [61]. Auf jeden Fall ist die Interaktion zwischen Wand und Decke bzw. Wand und aussteifender Querwand entscheidend. Besteht eine ausreichende Fixierung der Decken und Querwände an das Mauerwerk, reicht allerdings der Biege widerstand der Wand nicht aus, kann diese aus der Ebene knicken. Dieses Versagen ist häufig bei sehr schlanken Wänden zu beobachten [50]. Sind die Anschlüsse der Decken und Querwände unzureichend, können lokale Versagensmechanismen, wie beispielsweise Kippen aus der Ebene, eintreten.

Diese Versagensformen von Mauerwerk sind rechnerisch nur sehr schwer nachzuweisen und werden in den zurzeit gültigen Normenwerken nicht oder nur untergeordnet angeführt. Da hauptsächlich sehr schlanke Wände für ein Knicken aus der Ebene gefährdet sind, werden zwecks einfacher Anwendbarkeit im Eurocode 8 (ÖNORM EN 1998-1:2013 [6]) lediglich eine Begrenzung der Schlankheit bzw. eine Mindestwandstärke empfohlen [50]. Insbesondere bei Gründerzeithäusern sind sehr häufig diese lokalen Versagensmechanismen zu beobachten, siehe Kapitel 3.4.

### 2.4.3 Interaktion Wand-Decke und Wand-Wand






Einen wesentlichen Einfluss auf das globale Tragverhalten des Gebäudes haben unter anderem die Interaktionen zwischen Wand und Decke, sowie zwischen zwei orthogonal aufeinander stehenden Wänden. Schubsteife Deckenkonstruktionen wie beispielsweise Stahlbetondecken ermöglichen eine steifigkeitsproportionale Querverteilung der Erdbebenbelastung. Die zwischen den Decken eingespannten Mauerwerkswände erfahren allerdings bei horizontalen Belastungen geschoßweise Wandrotationen, wobei die Einspannwirkung bei langen Wänden schwächer ausgeprägt ist als bei kurzen Wänden [50]. Grundsätzlich kann durch schubsteife Deckenkonstruktionen eine deutliche Gebädestabilisierung erreicht werden, die in weiterer Folge zu geringeren Gesamtverformungen unter seismischen Belastungen führen können [42]. Hölzerne Deckensysteme, wie Tramdecken, Dippelbaumdecken etc., stellen hingegen, schubweiche Deckenkonstruktionen dar.

Eine kraftschlüssige Verbindung zwischen zwei orthogonal zueinander gemauerten Wänden kann beispielsweise über einen Verbandsanschluss oder Stumpfstoßanschluss erzielt werden. Durch diesen Anschluss der Querwände kann eine Tragfähigkeitssteigerung erreicht werden. Zudem können so die Längswände in gewisser Art und Weise gehalten und ein Kippen aus der Ebene kann dadurch bis zu einem bestimmten Grad behindert werden [42]. Insbesondere in höheren Geschoßen ist eine wirksame Mauerwerksverzahnung der Anschlussbereiche von aussteifenden Zwischenwänden von größter Bedeutung, wie in einer kürzlich veröffentlichten Arbeit von *Karic et al.* [41] festgestellt werden konnte.

## 2.4.4 Schadenklassifizierung der EMS-98 [32]

Zur Erdbebenschadensklassifizierung an Mauerwerks- und Stahlbetonkonstruktionen definiert die EMS-98 [32] fünf Schadensgrade und unterscheidet dabei zwischen strukturellen und nicht-strukturellen Schäden. Für eine ausführliche Wiedergabe der Klassifizierung nach EMS-98 [32] sind in **Tab. 3** nach *Grünthal* [33] sowohl Schadensbeschreibungen als auch Schadensbilder gegeben.

**Tab. 3:** Definition der fünf Schadensgrade für Mauerwerksbauten nach *Grünthal* [33].

	Schadensklassifikation	Beschreibung
1		<p><b>Geringfügig bis leicht</b>  <i>Kein struktureller Schaden, leichter nicht-struktureller Schaden</i></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Haarrisse</li> <li>- Putzablösungen</li> <li>- Herabfallen loser Steine aus oberen Bauwerksteilen (in geringem Ausmaß)</li> </ul>
2		<p><b>Mäßig</b>  <i>leichter struktureller Schaden, mäßiger nicht-struktureller Schaden</i></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Risse in einigen Wänden</li> <li>- Große Putzablösungen</li> <li>- Teilweiser Einsturz von Kaminen</li> </ul>
3		<p><b>Beträchtlich bis stark</b>  <i>mäßiger struktureller Schaden, starker nicht-struktureller Schaden</i></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Große Risse in den meisten Wänden</li> <li>- Herabfallen von Dachziegeln</li> <li>- Einsturz von Kaminen</li> <li>- Einsturz nicht-struktureller Elemente (z.B. Zwischenwände, Giebelwände)</li> </ul>
4		<p><b>Sehr stark</b>  <i>starker struktureller Schaden, sehr starker nicht-struktureller Schaden</i></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Einsturz von einigen Wänden</li> <li>- Teilweise Versagen der Dachkonstruktion</li> <li>- Teilweise Versagen der Deckenkonstruktionen</li> </ul>
5		<p><b>Zerstörung</b>  <i>sehr starker struktureller Schaden</i></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Totaler oder annähernd totaler Kollaps</li> </ul>

## 3 Gründerzeithäuser

Als Gründerzeithäuser werden jene gemauerten Wohnbauten bezeichnet, die in der Epoche der Österreichisch-Ungarischen Monarchie ( $\approx 1840$ –1918) erbaut wurden. Diese Zeit ist gekennzeichnet durch fortschreitende Industrialisierung, einem exponentiellen Bevölkerungswachstum in den Städten und eine damit verbundene starke Bautätigkeit. Auch heute leben allein in Wien noch rund 713.000 Menschen in gründerzeitlich errichteten Gebäuden, das entspricht 38 % der Wiener Bevölkerung (Stand 1. Jänner 2017) [48]. Zudem zählt die Statistik Austria im Jahr 2021, dass rund 28 % der Hauptwohnsitzwohnungen (ca. 260.000 Wohneinheiten) in Wien vor 1918 erbaut wurden, wovon die überwiegende Mehrheit in die Epoche der Gründerzeit fällt [67].

Besonders in Wien, aber auch in anderen Städten Mitteleuropas, die Teil der „k.u.k. Doppelmonarchie“ waren, wird das heutige Stadtbild durch die zum Teil imposante Fassadengestaltung dieser Gebäude geprägt. Die im Zuge dieser Arbeit untersuchten Gebäude aus Zagreb stammen alle aus der Gründerzeit und durch ihre einheitliche und identische Baukonstruktionsweise wird eine außerordentliche Vergleichbarkeit erreicht.

Im folgenden Kapitel wird zunächst die historische Entwicklung von Wien als Hauptstadt der Österreichisch-Ungarischen Monarchie und der wesentlich kleineren Stadt Zagreb in der Gründerzeit beschrieben und inwiefern der Einfluss Wiens die Bautätigkeit in Zagreb prägte. Des Weiteren werden die verwendeten Baustoffe und die charakteristische Bauweise von gründerzeitlich errichteten Wohnbauten beschrieben. Abschließend wird die Problematik, die im Lastfall Erdbeben bei Gründerzeithäusern anzutreffen ist, erläutert.

### 3.1 Historischer Hintergrund

Die Epoche der Gründerzeit ( $\approx 1840$ –1918) bezeichnet eine Phase in der Geschichte der Österreichisch-Ungarischen Monarchie, die durch die breite Industrialisierung und starken wirtschaftlichen Aufschwung geprägt war. Insbesondere die Errichtung des Eisenbahnsystems mit den Eisenbahnlinien und Bahnhöfen Mitte des 19. Jahrhunderts fungierte als Symbol der Modernisierung und hatte erheblichen Einfluss auf die Entwicklung der Strukturen der Österreichisch-Ungarischen Städte [47]. Der damit einhergehende enorme Bevölkerungswachstum in den Städten bezweckte, dass in kurzer Zeit viel Wohnraum geschaffen werden musste. Diese intensive Bauphase führte dazu, dass standardisierte Bauweisen entwickelt und in Form von Bauordnungen und Bestimmungen festgehalten wurden [44].

Die Gründerzeit kann grundsätzlich in drei Zeitabschnitte, die jeweils von unterschiedlichen Bautätigkeiten geprägt waren, unterteilt werden:

- Frühgründerzeit (1840–1870)
- Hochgründerzeit (1870–1890)
- Spätgründerzeit (1890–1918).

### 3.1.1 Bautätigkeit in Wien

Wie bereits erwähnt, ist die bauliche Entwicklung auf die hohe Bevölkerungszunahme zurückzuführen. Die Stadt Wien zählte im Jahr 1840 noch ca. 440.000 Einwohner und verdoppelte die Bevölkerungszahl bis zum Ende der Frühgründerzeit (1870) auf ca. 840.000 Einwohner, ehe um die Jahrhundertwende eine Einwohnerzahl von 1.650.000 erreicht wurde. Im Jahr 1918 zählte Wien mit ca. 2.240.000 Einwohnern zu den größten Städten der Welt. Der exponentielle Bevölkerungswachstum resultierte nicht nur aus einem Geburtenüberschuss, sondern auch aus der hohen Zuwanderung von Arbeitskräften hauptsächlich aus dem Westen der Monarchie (Böhmen, Mähren und Schlesien) [11].

Im Allgemeinen kann in der Gründerzeit zwischen kommunaler, privater und öffentlicher Bautätigkeit differenziert werden. Von Wien ausgehend wurde zu Beginn der Gründerzeit mit der Errichtung des Eisenbahnsystems begonnen, wobei sich die Bahnhöfe zunächst meist außerhalb der Stadtbefestigungsmauer befanden. Der Kaiser Franz-Josefs Bahnhof (1872) war lange die einzige Station, die in die inneren Bezirke Wiens vordrang [47]. Der Ausbau der Eisenbahn hatte einen wesentlichen Einfluss auf die weitere Stadtentwicklung und so entstanden mit den Eisenbahnlinien neue Stadtviertel und Straßenzüge. Mit dem Abriss der alten Stadtmauer und der Errichtung der Wiener Ringstraße im Jahr 1857 konnten die Vororte eingegliedert werden und es wurde mit der Errichtung von Monumentalbauten des Hofes begonnen [1].

Zu Beginn war die Gründerzeit besonders von der öffentlichen Bautätigkeit geprägt, doch auch der Wohnbau wurde vermehrt durch private Investoren stark gefördert und die Errichtung von Wohnhäusern wurde vorangetrieben. Aufgrund der gestiegenen Grundstückspreise in den inneren Bezirken siedelten sich zur Hochgründerzeit die Industriegebiete am Stadtrand an. Im Umland dieser Gebiete wurden vermehrt auch Werkswohnungen errichtet. Die Spätgründerzeit war durch einen weiteren Anstieg der Einwohnerzahl geprägt und es kam zum Höhepunkt der Bautätigkeit. Vor allem in den inneren Bezirken wurden Gebäude umgebaut und aufgestockt [1].

Insgesamt wurden in Wien während der Gründerzeit ca. 450.000 Wohnungen geschaffen, wovon ein Großteil als Kleinstwohnungen ausgeführt wurde. Die erstmals im Jahr 1829 eingeführte und in den darauffolgenden Jahren mehrmals adaptierte Wiener Bauordnung hatte dabei einen wesentlichen Einfluss auf deren bauliche Gestaltung und Konstruktionsweise. Die Bauordnung von 1883 war bis weit ins 20. Jahrhundert gültig und regelte somit den Neu-, Zu- und Umbau von einem wesentlichen Teil der Gründerzeithäuser [1].

### 3.1.2 Bautätigkeit in Zagreb

Der Hintergrund der baulichen Entwicklung in der Gründerzeit in Zagreb war Thema zahlreicher Untersuchungen, unter anderem von *Bedenko* [13], *Bjažić Klarin* [15], *Damjanović* [22], *Lovra* [46] und *Lovra et al.* [47]. *Kahle* [38] stellte die historische Entwicklung der Bauvorschriften von Zagreb in der Epoche der Gründerzeit zwischen 1850 und 1918 ausführlich dar. Nachfolgend werden die wichtigsten Erkenntnisse der genannten Publikationen auf das Wesentlichste zusammengefasst.

Wie auch in Wien ist die bauliche Tätigkeit in Zagreb auf einen Bevölkerungswachstum hauptsächlich im Zeitraum von 1850 bis 1918 zurückzuführen, der allerdings in einem viel kleinerem Ausmaß voranschritt als in der Hauptstadt der Monarchie Wien. Als Teil der Österreichisch-Ungarischen Monarchie wurde Zagreb zunächst absolutistisch von Wien aus regiert, ehe der

Ausgleich im Jahr 1867 Kroatien unter ungarische Verwaltung, mit Sitz in der Hauptstadt Budapest, stellte.

Der Zusammenschluss der einst mittelalterlichen Siedlungen Zagrebs zu einer Stadt im Jahr 1850 war der Beginn des wirtschaftlichen Aufschwungs. Mit ca. 15.000 Einwohner war die veraltete Stadt Zagreb die Hauptstadt des Königreichs Kroatien und Slawonien und entwickelte sich bis zum Ende des 19. Jahrhunderts zu einer modernen Stadt mit knapp 80.000 Einwohner [13].

Die Anfänge der Stadtentwicklung waren allerdings noch recht schleppend. Erst mit der Errichtung der ersten Eisenbahnlinie im Jahr 1862, die Zagreb mit Wien und Triest verband, und dem ungarischen Ausgleich 1867 begann die Stadt viel stärker zu wachsen [22]. Insbesondere der Bau der Eisenbahn hatte einen entscheidenden Einfluss auf die Stadtplanung, wie *Lovra et al.* [47] in ihren Untersuchungen darlegen. Die Eisenbahnlinien wurden weit entfernt vom bestehenden Stadtkörper auf Feldern errichtet und orientierten sich an den horizontal verlaufenden Straßenzügen. So folgte auch die städtische Entwicklung der Gründerzeit zwischen der Altstadt und der Eisenbahn der Horizontalität, die bis heute deutlich sichtbar ist.

Aufgrund der politischen Situation wurden im Jahr 1857 der Stadt Zagreb die Bauvorschriften in Form einer *Bauordnung* durch das Österreichische Kaiserreich vorgeschrieben. Die Zagreber Bauordnung basierte in den wesentlichen Punkten auf der Wiener Bauordnung und reglementierte einerseits die Qualität der Gebäude und andererseits die Entwicklung der Stadt. So wurden beispielsweise der Mauerwerksbau und sanitäre Standards vorgeschrieben. Die Bauordnung lieferte auch den Anstoß zur Erstellung eines ersten Regulierungsplans, der die städtischen Strukturen vorgeben sollte [38].

So wurde 1865 der erste Regulierungsplan für die Stadt erlassen, der den Stadtplan von Wien als Vorbild hatte und als notwendige Erweiterung zur Bauordnung zu sehen war [22]. Das markanteste Merkmal war die Vorgabe einer geschlossenen Bauweise mit zusammenhängenden Gebäuden, die rechteckige Blöcke bilden sollten. Im Zentrum der Planung lag das Gebiet zwischen der Altstadt und der Bahnlinie, die heute „Donji Grad“ (auf Deutsch: „Untere Stadt“) genannt wird. Aufgrund der topografischen Gegebenheiten entwickelte sich so, anders als beim Vorbild Wien, ein neues Stadtzentrum neben dem historischen Stadtkern [13].

Während einer Zeit des Wachstums wurde Zagreb 1880 von einem verheerenden Erdbeben heimgesucht, woraufhin der Großteil der Gebäude abgerissen werden musste. Dieses Ereignis wurde zum Anlass genommen den zweiten Regulierungsplan zu erstellen, der 1888 in Kraft getreten ist. Inspiriert von der Wiener Ringstraße wollte man zwischen den bereits bestehenden Plätzen am Rande der Innenstadt eine Verbindung schaffen. Ein U-förmiger Gürtel aus Gärten und Parks um das Zentrum der „Unteren Stadt“, das so genannte „Grüne Hufeisen“, entstand. Ähnlich wie in Wien wurde im Nahbereich des Hufeisens eine Vielzahl an öffentlichen und repräsentativen Bauten errichtet [13].

Sowohl die Bauordnung von 1857 samt ihrer Ergänzungen als auch der Regulierungsplan von 1888 blieben noch längere Zeit nach dem Ende des Ersten Weltkriegs in Kraft und prägten das Stadtbild Zagrebs. Der Einfluss Wiens auf die architektonische Gestaltung der Stadt reichte aber weit über Regulierungen und Vorschriften hinaus. Da Kroatien bis 1919 über keine technische Hochschule verfügte, studierten die meisten Zagreber Architekten und Ingenieure in Wien oder wurden von berühmten Wiener Bauherren ausgebildet. Auch nach dem Ausgleich wurde Zagreb nur in geringem Maße von Budapest beeinflusst, da nur wenige die ungarische Sprache beherrschten. Erst gegen Ende des 19. Jahrhunderts begann der Einfluss Budapests zu wachsen und es wurden ausgehend von ungarischen Institutionen mehrere öffentliche Gebäude errichtet [22].



## 3.2 Baustoffe

Im Hochbau der Gründerzeit wurden vorwiegend die Baustoffe Ziegel, Mörtel, Holz, Eisen und Naturstein eingesetzt, deren Verwendung durch die Bauordnung reglementiert wurde. Ziegel und Mörtel sind die Hauptbestandteile des Mauerwerks, also der vertikalen Erschließungselemente, Holz und Eisen wurden größtenteils zur Errichtung der Decken- und Dachkonstruktionen verwendet. Natursteine wurde vorwiegend zur Fassadenverzierung und Errichtung von Treppen und Gewölbekonstruktionen eingesetzt. Wie bereits im vorherigen Kapitel ausführlich beschrieben, basierten die Bauvorschriften in Zagreb auf der Wiener Bauordnung und somit kann davon ausgegangen werden, dass die Baukonstruktionsweise sowie die verwendeten Baustoffe dem der damaligen Monarchie entsprachen.

### 3.2.1 Ziegel

Vollziegel wurden hauptsächlich zur Herstellung von Mauerwerkswänden verwendet, wobei diese zunächst handgefertigt und später maschinell mit Strangpressen hergestellt wurden. Die Ziegeldimensionen konnten in Abhängigkeit vom Ziegelhersteller variieren [1], wobei die Wiener Bauordnung bereits 1859 den Normalformatziegel (NF-Ziegel) mit 29/14/6,5 cm (L/B/H) festlegte [44]. In der Zagreber Bauordnung wurden 1894 ebenfalls die Abmessungen des *Altösterreichischen Formats* des NF-Ziegels vorgeschrieben [38].

Grundsätzlich konnten durch die industrielle Fertigung weitaus genauere und gleichmäßigere Ziegel hergestellt werden, was einerseits die Streuung der Materialkennwerte reduzierte, und andererseits konnten so höhere mechanische Eigenschaften erzielt werden [44].

### 3.2.2 Mörtel

Mörtel ist ein wesentlicher Bestandteil des Mauerwerks und verbindet die einzelnen Ziegelsteine kraftschlüssig miteinander. Abhängig von der Rezeptur besteht der Mörtel zu unterschiedlichen Teilen aus Gesteinskörnung, Wasser und Bindemittel (meist Kalk und/oder Zement). Die Wiener Bauordnung legte bereits 1883 die Verwendung von Kalkmörtel fest, wobei Kalk als Bindemittel schon 1859 beschrieben wurde. *Achs* [1] erläutert, dass zur Errichtung von Gründerzeithäusern hauptsächlich Kalkmörtel bzw. Kalkzementmörtel im Gründungsbereich verwendet wurde. Höherwertiger Mörtel wie Zementmörtel wurde nur für hochbelastetes Mauerwerk eingesetzt. Grundsätzlich liegen die Materialkennwerte von historischem Mörtel sehr weit unter den Kennwerten der heute verwendeten Mörteln. Das bestätigen auch die Untersuchungen von *Karic et al.* [43] an 125 gründerzeitlichen Objekten in Wien mit insgesamt über 1.000 Prüfstellen.

### 3.2.3 Holz

Bei Gründerzeithäusern sind Holzkonstruktionen meist in den Decken und Dachstühlen zu finden. Zahlreiche Untersuchungen zeigen, dass das verarbeitete Bauholz nahezu dieselben Materialfestigkeiten aufweist wie heute verwendete Hölzer. Somit kann bei der Nachbemessung der Bestandskonstruktion wie bei neu errichteten Bauteilen vorgegangen werden, zu beachten sind allerdings die alten zum Teil zimmermannsmäßigen Verbindungen, deren Konstruktion meist auf Erfahrungswerten beruhte und nur schwer nachzurechnen sind. Zusätzlich ist der Baustoff Holz sehr anfällig für Feuchteschäden bzw. Schäden, die auf das Eindringen von Feuchtigkeit in



die Konstruktion zurückzuführen sind [44]. Die Holzdeckenkonstruktionen der Gründerzeit werden im Kapitel 3.3.2 ab Seite 28 beschrieben, die Dachstuhlkonstruktionen sind in Kapitel 3.3.3 zu finden.

### 3.2.4 Eisen

Im gründerzeitlichen Wohnbau wurde Eisen hauptsächlich für Hilfskonstruktionen wie z.B. Schließen, Klammern und Anker verwendet. Im Zuge der fortschreitenden Industrialisierung wurden vermehrt Walzträger (Traversen) eingesetzt, die unter anderem in massiven Deckenkonstruktionen wie beispielsweise Tramtraversendecken und flache Ziegelgewölbedecken, aber auch als Überlager bei Türen und Festern zu finden sind. Untersuchungen an Bestandsobjekten zeigten, dass an eisernen Bauteilen lediglich oberflächliche Korrosionserscheinungen zu finden waren, größere Schäden konnten meist nicht beobachtet werden [44].

### 3.2.5 Naturstein

Naturstein fand in der Gründerzeit meist als nicht tragende Sekundärkonstruktion in Form von Zierelementen in der Gesimse- und Fassadengestaltung Verwendung. Diese Bauteile tragen neben dem Eigengewicht keine zusätzlichen Lasten ab. Aufgrund brandschutztechnischer Anforderungen wurden auch Treppenkonstruktionen meist aus freikragenden Natursteinstufen errichtet, wobei deren Bemessung hauptsächlich auf Erfahrungswerten basierte. Zudem sind Natursteinelemente auch bei flachen Gewölbedecken zu finden. Die hauptsächlich verwendeten Steinarten waren Granit, Kalkstein und Sandstein, wobei die Anwendungsart meist von deren Härtegrad abhängte [44].

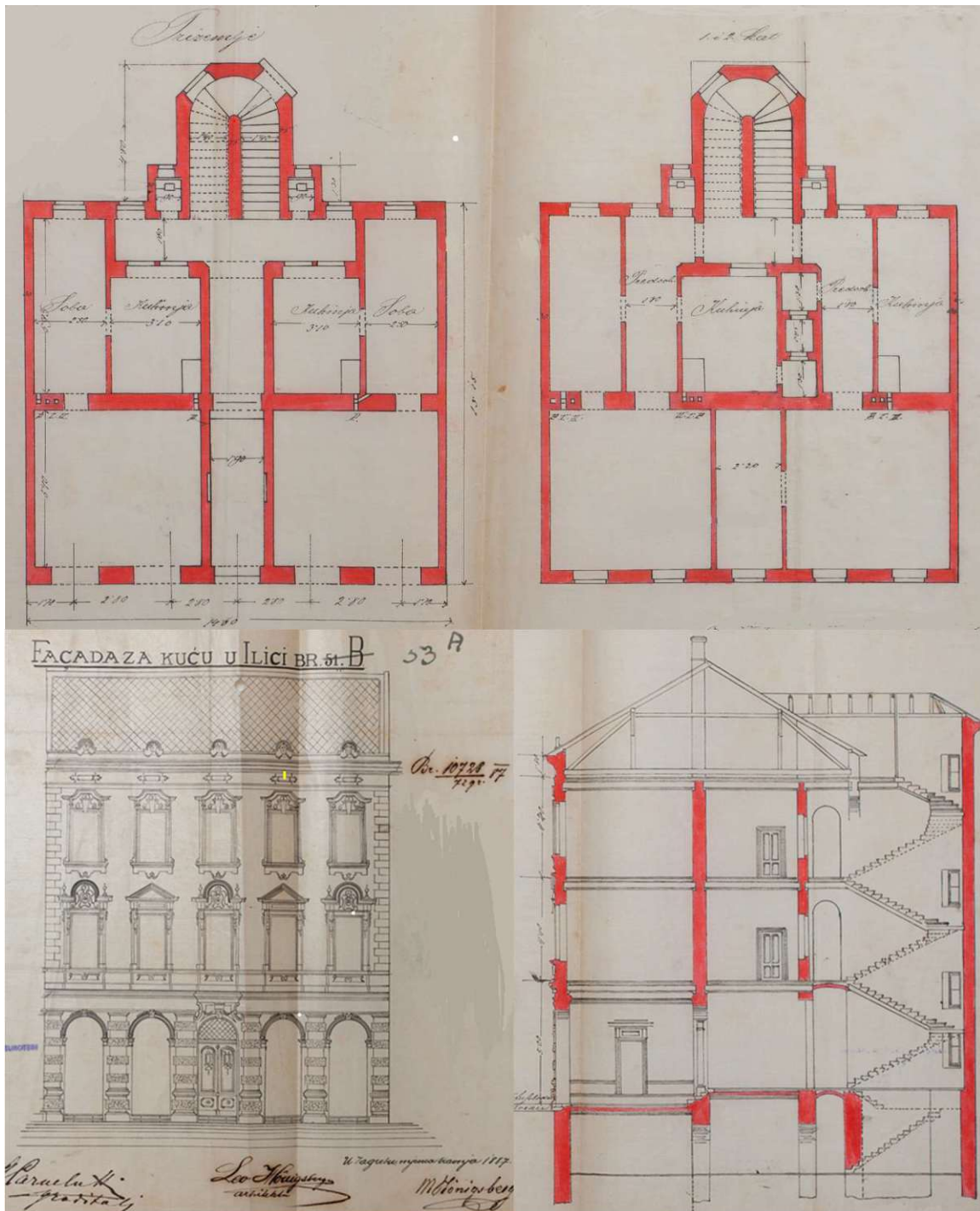
## 3.3 Charakteristische Bauweise

Die für die Gründerzeit charakteristische Baukonstruktionsweise wurde einerseits durch tradierte Handwerksregeln und andererseits durch die zu dieser Zeit gültigen Bauordnungen definiert [44]. Die Bauvorschriften, sowohl in Wien als auch in Zagreb, regelten unter anderem die verwendeten Materialien, die Mauerstärken der tragenden und nichttragenden Wände, die Deckenkonstruktionen sowie die Grund- und Aufriss-Gestaltung (Gebäudebreite, -tiefe und -höhe).

Das typische Gründerzeithaus besteht aus drei bis sechs Geschoßen und ist unter anderem durch seine, im Vergleich zur heutigen Bauweise sehr großen Raumhöhen von 3,50 bis 4,50 m, gekennzeichnet. Die vertikalen Erschließungselemente setzen sich dabei aus den lastabtragenden Längswänden, bestehend aus bis zu 90 cm (105 cm) starkem Vollziegelmauerwerk, und den 15 cm (30 cm) starken, nichttragenden Zwischenwänden, die bis in das Dachgeschoß durchgemauert wurden, zusammen. Die oberirdischen Geschoßdecken wurden meist aus einachsigen gespannten hölzernen Deckenkonstruktionen wie z.B. Holztramdecken und Dippelbaumdecken errichtet, im Kellergeschoß kamen vorwiegend massive Gewölbedecken zum Einsatz.

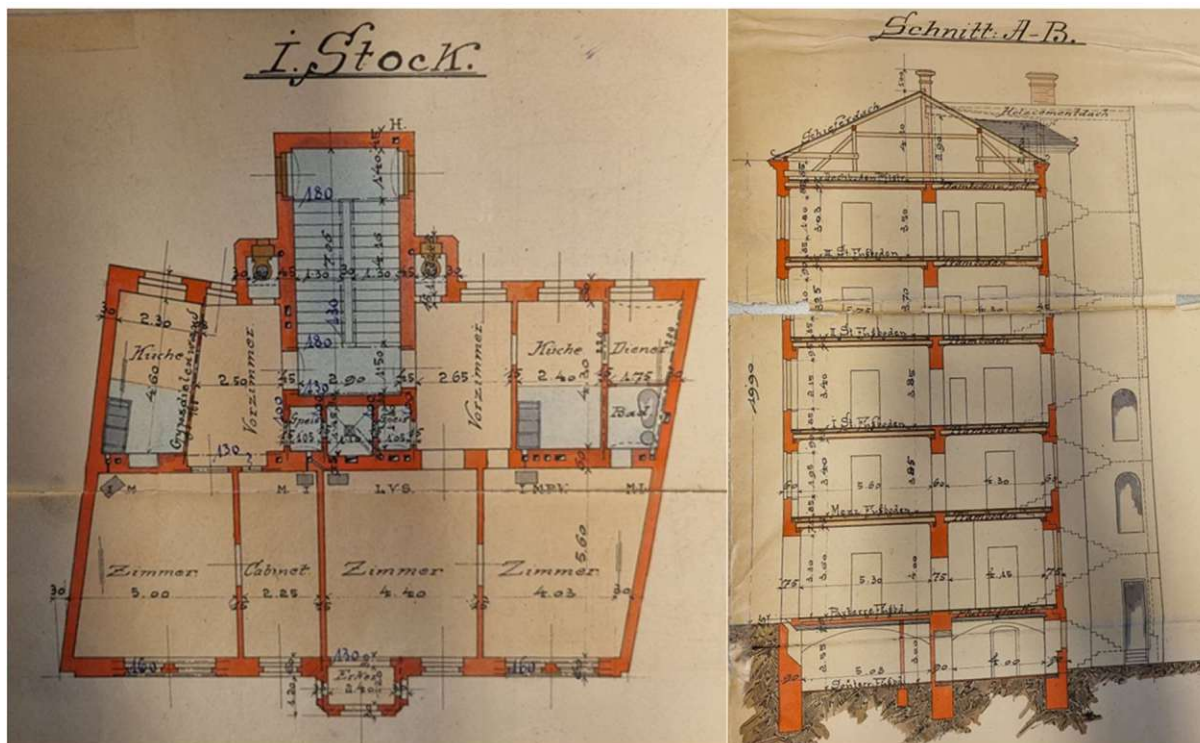
Im Allgemeinen beinhalten die Pläne der Gründerzeithäuser die Grundrisse aller Geschoße, ein oder zwei Schnitte (meist durch das Treppenhaus) und die Ansicht der Straßenfront im Maßstab 1:100 oder 1:50. Aus den handgezeichneten Plänen sind neben Angaben zu den Raumhöhen, Wandstärken oder Trakttiefen auch die Konstruktion der verwendeten Decken und des Dachstuhls ersichtlich.

Die nachfolgende Abbildung (**Abb. 6**) stellt die Pläne eines typischen Gründerzeithauses in Zagreb dar. Das im Jahr 1887 errichtete Gebäude befindet sich im Stadtzentrum von Zagreb und ist Teil des Häuserblocks, der im Zuge dieser Arbeit untersucht wurde. Die Pläne zeigen die für die damalige Zeit charakteristische Bauweise, wobei die aufwändig gestaltete Fassadenkonstruktion, die heute immer noch besteht, besonders auffällt. Das Gebäude befindet sich an der sehr belebten Einkaufsstraße „Ilica“ und das Erdgeschoß wurde für Geschäftszwecke umgebaut, wobei dafür keine Wände entfernt werden mussten. In den übrigen Geschoßen befinden sich auch heute noch Wohneinheiten.



**Abb. 6:** Typisches Zagreber Gründerzeithaus des Architekten Leo Hönlberg (Ilica 53A, Baujahr 1887)  
(Bildquelle: HCPI-Datenbank [35])

Im Vergleich dazu sind in **Abb. 7** der Grundriss des ersten Obergeschoßes und der Gebäudeschnitt eines Wiener Gründerzeithauses dargestellt. Das Gebäude wurde im Jahr 1899 errichtet und zeigt sowohl im Grundriss als auch im Schnitt eine große Ähnlichkeit zu dem in **Abb. 6** dargestellten Zagreber Altbestand. Insbesondere die hofseitige Situierung des Treppenhauses, sowie die Dimensionierung der maßgebenden Bauwerkselemente, wie beispielsweise die gemauerten Längswände, sind in den abgebildeten Plänen nahezu ident. Im folgenden Abschnitt werden die typischen Baukonstruktionsweisen der Gründerzeithäuser erläutert, die sowohl in Wien als auch in Zagreb zum Einsatz kamen und in vielen Bestandsobjekten heute noch angetroffen werden.



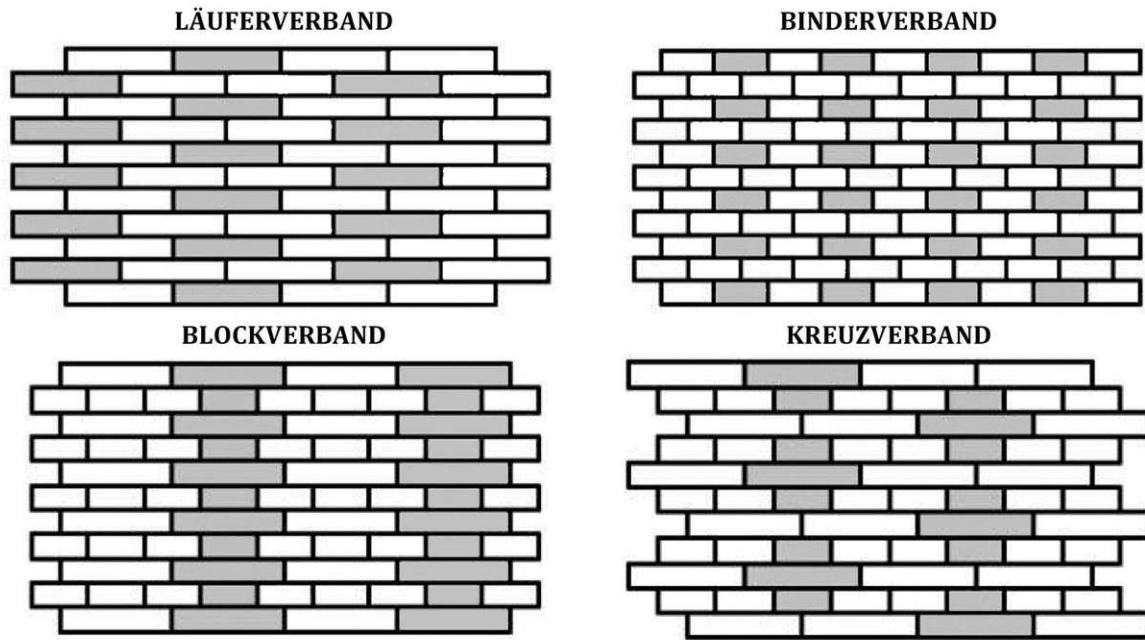
**Abb. 7:** Wiener Gründerzeithaus aus dem Jahr 1899 (Bildquelle: Autor)

### 3.3.1 Mauerwerk und Fundierung

Bei Wohnbauten der Gründerzeit wurden die Wände hauptsächlich aus unbewehrtem Ziegelmauerwerk hergestellt. Dieses besteht sowohl in Wien als auch in Zagreb aus Vollziegeln des „Altösterreichischen Formats“ (29/14/6,5 cm), die im Verband verlegt wurden, und aus Kalk-(Zement)-Mörtel, der den kraftschlüssigen Verbund in der Stoß- und Lagerfuge herstellt.

Neben den Materialkennwerten der verwendeten Ziegel und des verwendeten Mörtels beeinflusst die Art der Verlegung, auch „Verband“ genannt, maßgebend die Festigkeitseigenschaften des Verbundwerkstoffs Mauerwerk [12]. Die in der Gründerzeit gebräuchlichsten Verbände sind der Läuferverband, Binderverband, Blockverband und Kreuzverband, siehe **Abb. 8** nach Balak [12]. Welcher Verband letztendlich verbaut wurde ist allerdings in Bestandsplänen nicht ersichtlich.





**Abb. 8:** Mauerwerksverbände nach *Balak* [12].

Bei der Errichtung des Mauerwerks wurden für gewöhnlich die Lagerfugen mit 12 mm und die Quer- bzw. Langfugen mit 10 mm hergestellt. Somit ergeben sich die folgenden Mauerstärken, wobei üblicherweise auf 5 cm gerundete Werte angegeben wurden [12].

$\frac{1}{2}$	Ziegel = 14 cm	(15 cm)
1	Ziegel = 29 cm	(30 cm)
$1 \frac{1}{2}$	Ziegel = 44 cm	(45 cm)
2	Ziegel = 59 cm	(60 cm)
$2 \frac{1}{2}$	Ziegel = 74 cm	(75 cm)
3	Ziegel = 89 cm	(90 cm) etc.

In der Gründerzeit wurde das Mauerwerk nicht dimensioniert, die Bemessung erfolgte viel mehr nach tradierten Handwerksregeln. Die Wiener Bauordnung aus dem Jahr 1859 legte erstmals die Mindeststärke der unterschiedlichen tragenden Wandarten in Abhängigkeit von den verwendeten Deckenkonstruktionen fest, siehe **Abb. 9** nach *Kolbitsch* [45]. Die Trakttiefe wurde dabei mit 6,50 m limitiert. Nicht tragende Innenwände wurden in der Bauordnung mit einer Mindeststärke von 15 cm festgelegt. Die Bauordnung in Zagreb von 1892 schrieb ähnliche Regelungen für die Wandstärken vor, wobei nur die Stärke der Hauptmauer definiert wurde. Diese sollte gemäß *Kahle* [38] im letzten Geschoß mindestens 45 cm betragen und in jedem niedrigeren Geschoß um je 15 cm zunehmen, was den Angaben aus **Abb. 9** bei der Verwendung von Doppelbaumdecken entspricht.

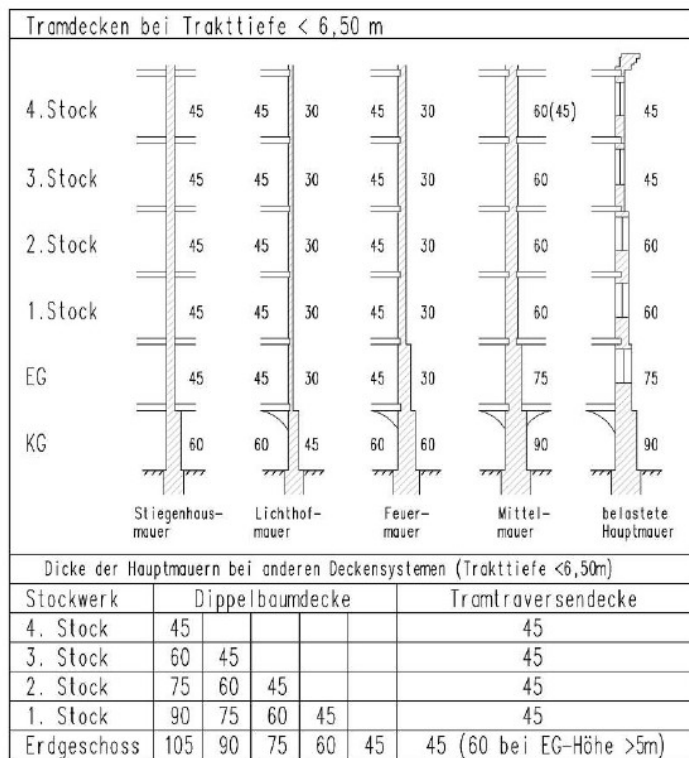


Abb. 9: Mauerstärken lt. Wiener Bauordnung von 1859 und ff nach Kolbitsch [44].

In der Früh- und Hochgründerzeit wurde gemäß Balak [12] aus zum Teil wirtschaftlichen Überlegungen Bruchsteine in das Kellermauerwerk eingebracht. Die Steinverwendung ging allerdings in der Spätgründerzeit stark zurück und es wurde hauptsächlich Ziegelmauerwerk eingesetzt.

Auch die Dimensionierung der Fundamente wurde in der Gründerzeit nach tradierten Bemessungsregeln in Abhängigkeit von der anstehenden Bodenart vorgenommen [44]. Im Wohnbau wurden auf tragfähigem Untergrund meist Streifenfundamente hergestellt, wobei die Einbindetiefe des Kellermauerwerks von der Geschoßanzahl und der Mauerwerks- bzw. Fundamentstärke abhängt. Zudem ging aus dem Forschungsprojekt SEISMID hervor, dass sich die Einbindetiefe innerhalb eines Gebäudes stark unterscheiden kann, und das Fundament meist aus den gleichen Materialien hergestellt wurde wie das Kellermauerwerk selbst. Weiters wurde festgestellt, dass die Fundierungstiefe bei Gründerzeithäusern im Allgemeinen sehr gering ist [1].

### 3.3.2 Deckenkonstruktionen

Aufgrund geringer Baukosten wurde in der Gründerzeit für Geschosswischendecken meist hölzerne Deckenkonstruktionen verwendet. Damit konnten die üblichen Spannweiten im Wohnbau von 4 bis 6 m ohne Probleme überspannt werden.

Typische Holzdeckenkonstruktionen der Gründerzeit sind in *Kolbitsch* [44] ausführlich beschrieben und in **Abb. 10** nach *Kolbitsch* [44] ersichtlich:

- Dippelbaumdecke
- Einfache Tramdecke
- Tramdecke mit abgesenkter Sturzschalung
- Tramdecke mit Fachausfüllung (Einschubdecke)
- Fehltramdecke
- Tramtraversendecke.

#### Dippelbaumdecke:

Die Dippelbaumdecke stellt den ältesten Deckentyp dar und besteht aus unmittelbar nebeneinander verlegten Balken, die mit Eichenholzdübel kraftschlüssig miteinander verbunden wurden. Die Balken bestehen aus ganzen Stämmen, deren Oberseite rund belassen wurde. Aufgrund des hohen Materialverbrauchs wurden Dippelbaumdecken aus brandschutztechnischen Gründen meist nur als oberste Geschosdecke bzw. als Abschluss zum Dachraum eingesetzt. Ein weiterer Nachteil war die Notwendigkeit eines durchgehenden Auflagerbereichs, dies setzt eine Verbreiterung der tragenden Wand um ca. 15 cm in jedem Geschos voraus [44].

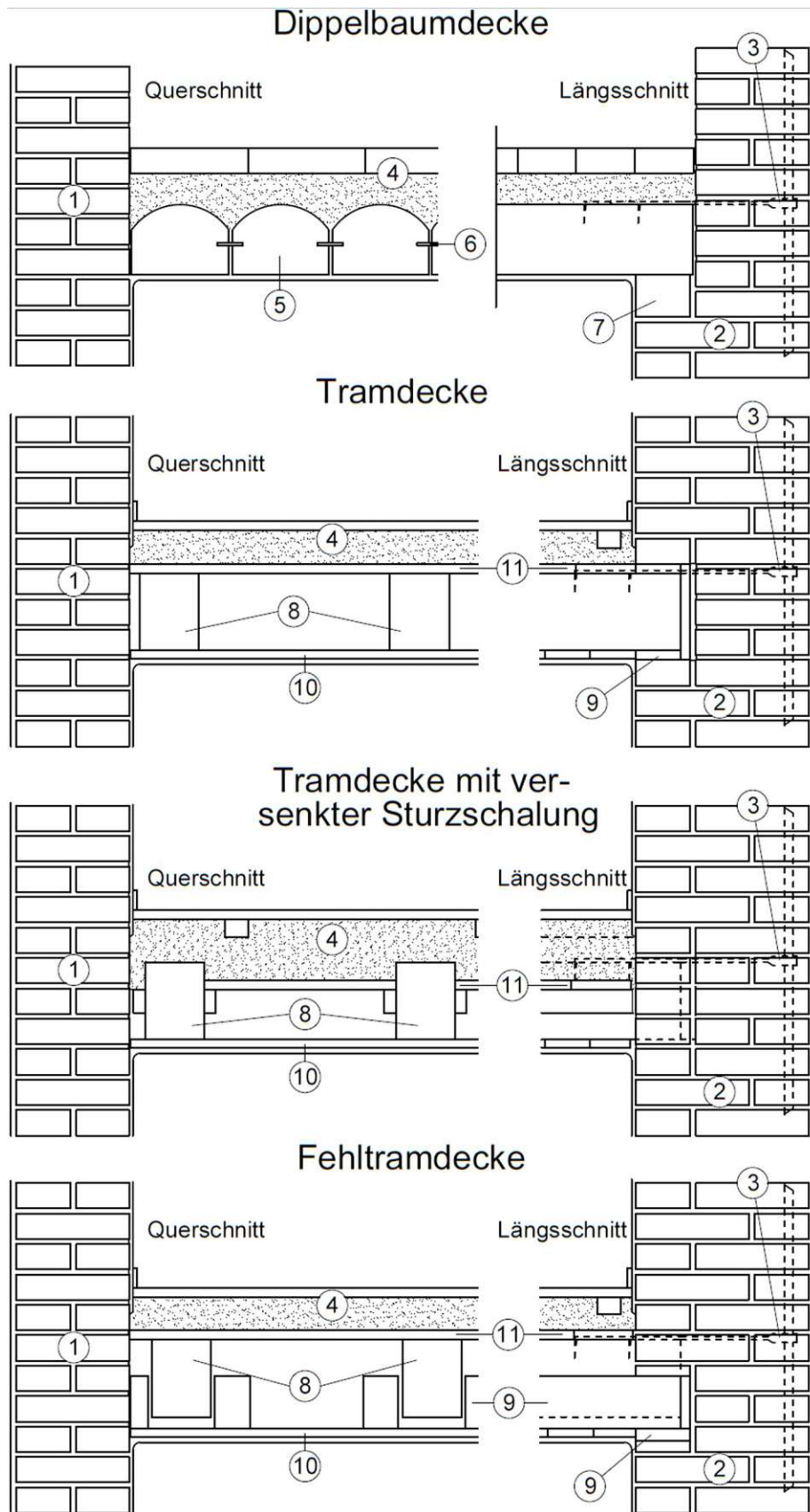
#### Tramdecke:

Die Tramdecke ist die am häufigsten eingesetzte Deckenkonstruktion der Gründerzeit, die aus max. 24 (26) cm hohen Balken, im Abstand von 0,75 bis 1,00 m verlegt, hergestellt wurde. Direkt darüber befindet sich die Sturzschalung, die die Lasten auf die Träme darunter überträgt. Um den direkten Kontakt der fäulnisempfindlichen Tramköpfe mit dem Mauerwerk zu verhindern, mussten Auflager aus imprägniertem oder harzreichem Holz und hirnholzseitig ein so genanntes „Tramkasterl“ hergestellt werden. Es war wichtig, dass die Balkenenden gut von Luft umströmt werden konnten [44].

Zur Reduktion der hohen Deckenstärke von 30 bis 45 cm wurden verschiedene Varianten der einfachen Tramdecke entwickelt. Beispiele dafür sind Tramdecken mit abgesenkter Sturzschalung (siehe **Abb. 10** nach *Kolbitsch* [44]) oder Einschubdecken (Tramdecken mit Fachausfüllung).

Eine Sonderform der Tramdecke ist die Fehltramdecke, die hauptsächlich zum Schutz einer aufwändig gestalteten Deckenuntersicht verwendet wurden. Dabei wird die Primärkonstruktion zur Abtragung der Nutzlasten verwendet und konstruktiv von der Sekundärkonstruktion, bestehend aus „Fehlträmen“ und der Deckenuntersicht, getrennt [44].

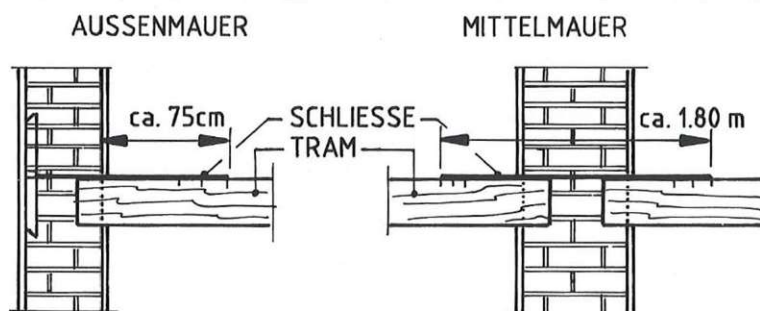
Den Übergang zu den Massivdeckenkonstruktionen bildet die Tramtraversendecke, die hauptsächlich bei Prunkbauten, entlang der Ringstraße in Wien eingesetzt wurde. Das primäre Tragsystem besteht dabei aus Walzeisenträger, wodurch größere Spannweiten überbrückt werden können als mit reinen Holzdecken.



**Abb. 10:** Hölzerne Deckenkonstruktionen der Gründerzeit nach *Kolbitsch* [44] aus *Karic* [42]. 1. Feuermauer/Zwischenwand, 2. Außenwand, 3. Eisenschließe, 4. Fußbodenaufbau, 5. Dippelbäume, 6. Dippel (Dübel), 7. hölzerne Rastschließe, 8. Balken (Tram), 9. hölzernes Tramkasterl, 10. Stukturenschalung, 11. Sturzschalung.



Ein wichtiges Konstruktionselement bei hölzernen Deckensystemen der Gründerzeit waren Verschließungen. *Achs* [1] stellte im Zuge seiner Untersuchungen fest, dass bei den oben angeführten Holzdecken üblicherweise Verschließungen aus Eisenprofilen zwischen den Holzbalken und den tragenden Außen- und Mittelmauern hergestellt wurden, siehe **Abb. 11** nach *Kolbitsch* [44]. Bei gutem Zustand der Schließen können Zug-, Druck- und Schubkräfte übertragen und unter Erdbebenbelastung lokale und globale Versagensmechanismen, wie in Kapitel 2.4.2 auf Seite 16 beschrieben, vermieden werden.



**Abb. 11:** Verschließungen bei hölzernen Deckenkonstruktionen (Schnitt durch die Außen- und Mittelmauer) nach *Kolbitsch* [44].

Des Weiteren musste beachtet werden, dass die Kaminzüge meist in den Mittelmauern situiert waren. Diese durften allerdings keine vertikalen Lasten abtragen, weshalb die Kräfte der Deckenkonstruktion im Bereich der Kamingruppen umgelagert werden mussten. Bei der Verwendung von Tramdecken erfolgt das mit Querbalken.

Für die Kellerdecken, Decken im Treppenbereich und in seltenen Fällen auch die Decken im Erdgeschoß wurden statt den relativ schadensanfälligen und feuchtigkeitsempfindlichen Holzdecken vermehrt massive Deckenkonstruktionen verwendet. Die Zagreber Bauordnung schrieb bei Kellerdecken sogar ausdrücklich die Verwendung von Massivdecken vor [38]. Dabei wurden z.B. „einfache“ *Gewölbedecken* (meist Tonnengewölbe) eingesetzt. Eine in der Gründerzeit sehr oft verwendete Deckenform war die *flache Ziegelgewölbedecke*, auch „preußische Kappendecke“ oder „Platzdecke“ genannt. Hier spannen sich flache Ziegelgewölbe zwischen ca. 1,5 m entfernten Walzeisenträgern. Aufgrund der flachen Gewölbeausführung entstehen hohe Horizontalkräfte in den Auflagern der Gewölbe, weshalb Schließen aus Eisen zur Lagesicherung der Traversen eingesetzt wurden, [44]. Die typische Konstruktion einer flachen Ziegelgewölbedecke zeigt **Abb. 12** nach *Kolbitsch* [44]. Um 1900 wurden einige Patentdecken entwickelt, die im Vergleich zu den Gewölbedecken den Vorteil der ebenen Untersicht haben [44]. Diese Deckenarten werden allerdings im Zuge dieser Arbeit nicht weiter behandelt.

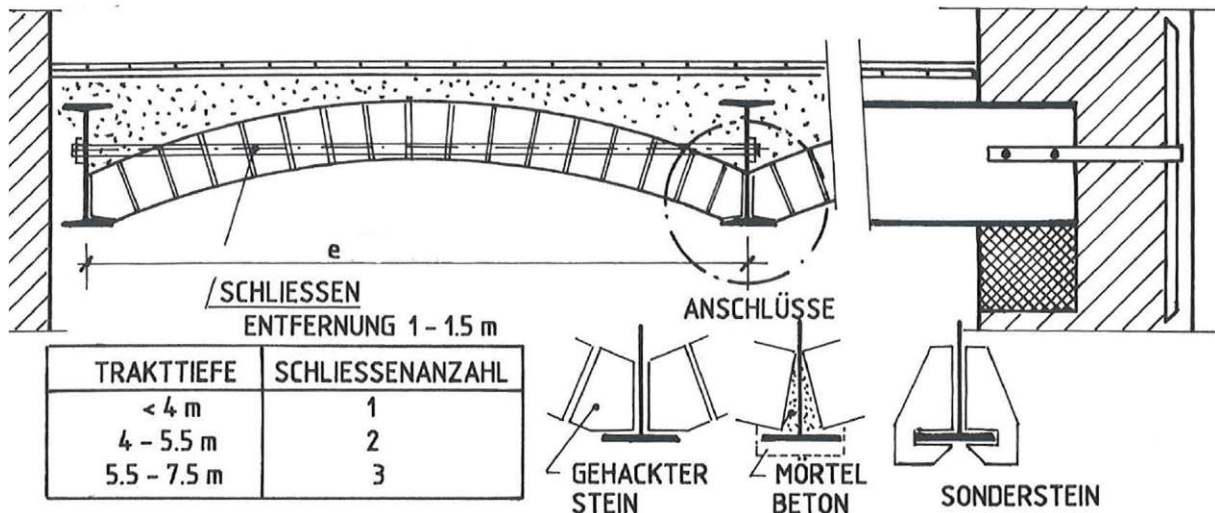


Abb. 12: Darstellung einer flachen Ziegelgewölbedecke nach Kolbitsch [44].

### 3.3.3 Dachkonstruktionen

Im Wohnbau der Gründerzeit wurden hauptsächlich hölzerne Dachkonstruktionen verwendet, weshalb sich das nachfolgende Kapitel auf Konstruktionen aus Holz konzentriert. Die Bemessung dieser erfolgte meist nach Handwerksregeln. Eiserne Dachtragwerke wurden meist bei Industriebauten und Repräsentationsbauten eingesetzt [44].

Ein in der Gründerzeit sehr gebräuchliches Dachtragwerk stellt der doppelt stehende Pfettendachstuhl (auch „Wiener Dachstuhl“ genannt) dar, der bei den üblichen Spannweiten bis 12,00 m optimal dimensioniert werden konnte. Die Gespärreabstände betragen üblicherweise 3,50 bis 5,00 m [45].

Die folgende Abb. 13 nach Kolbitsch [44] zeigt den „Wiener Dachstuhl“ des 19. Jahrhunderts. Der Vorteil dieser Konstruktion liegt darin, dass die oberste Geschoßdecke von Vertikallasten freigehalten wird. Dieses Dachsystem wird auch Sprengwerk genannt, wobei das statische System als zweiteilig angesehen werden kann [58].

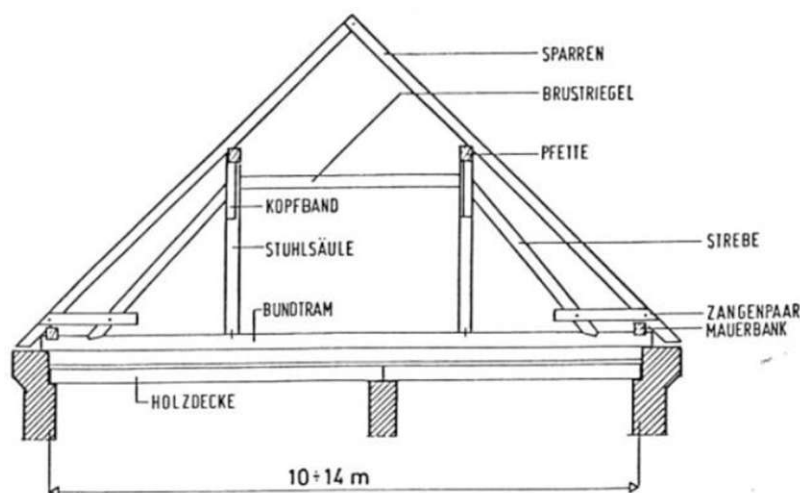
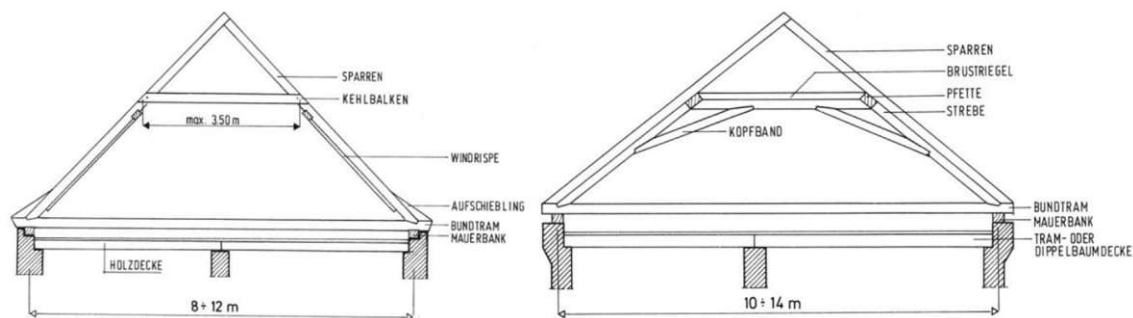


Abb. 13: Der „Wiener Dachstuhl“ nach Kolbitsch [45].

Daneben wurden auch häufig Kehlbalkendächer und liegende Dachstühle ausgeführt, siehe **Abb. 14** nach *Kolbitsch* [44]. Als Sonderform des Sparrendachs hat das Kehlbalkendach den Vorteil gegenüber dem „Wiener Dachstuhl“, dass der Dachraum frei von Stützen und Streben bleibt und so gegebenenfalls mit kleinen Umbauarbeiten nutzbar gemacht werden kann. Mussten größere Traktweiten überspannt werden, konnte durch den Einsatz eines liegenden Stuhls die Spannweite vergrößert werden [58].



**Abb. 14:** Das Kehlbalkendach (links) und ein Dachtragwerk mit liegendem Stuhl (rechts) nach *Kolbitsch* [45].

Traditionell wurde die Dachflächen in der Gründerzeit ungedämmt ausgeführt, wobei die Dachhaut lediglich vor direktem Niederschlag geschützt hat und nicht dicht sein musste. Die geringen Feuchtigkeitsmengen, die in den Dachraum eingedrungen sind, konnten durch die offene Bauweise leicht abtrocknen. Die Dachdeckung besteht meist aus Dachziegeln, die auf einer Holzlattung befestigt wurden [59].

### 3.4 Erdbebenproblematik bei Gründerzeithäusern

Die Gründerzeithäuser werden in Abhängigkeit vom Erhaltungszustand der seismischen Verletzbarkeitsklasse A oder B gemäß EMS-98 [32] zugeordnet, siehe Kapitel 2.3. Das ist auf viele verschiedenen Faktoren zurückzuführen. Insbesondere sind vertikale Unregelmäßigkeiten, schubweiche Holzdeckensysteme, schlechte Qualität der Baumaterialien sowie unprofessionelle Umbaumaßnahmen zu nennen. Darüber hinaus standen zum Zeitpunkt der Errichtung dieser Gebäude keine seismischen Normen oder Konzepte zur Verfügung. Aus diesen Bauwerkseigenschaften können ein Großteil der Schäden des Erdbebens in Zagreb am 22. März 2020 abgeleitet werden, wie *Atalic et al.* [5] in einer ausführlichen Schadenserhebung bestätigt.

Die unregelmäßige Steifigkeitsverteilung im Aufriss ist in den meisten Fällen das Resultat von Umbauarbeiten, bei denen Zwischenwände abgebrochen und durch Stützen oder Stahlrahmen ersetzt werden, die lediglich zur sicheren Ableitung von Vertikallasten in darunter liegende Bauteile konzipiert wurden. Durch nachträgliche Nutzungsänderungen, vor allem im Erdgeschoß, wird so die vorhandene Tragstruktur im Erdbebenfall massiv geschwächt. Grundsätzlich können diese Tragwerksschwächungen über die gesamte Gebäudehöhe auftreten [1].

Eine weitere Schwachstelle der Gründerzeithäuser bilden die schubweichen Holzdeckenkonstruktionen in Form von Tramdecken, die meist in den oberirdischen Geschoßen zu finden sind. Grundsätzlich wird davon ausgegangen, dass im Erdbebenfall keine ausreichende Scheibenwirkung durch diese Deckensysteme erreicht werden kann und somit die Querwände überwiegend über die Eckverbände der Längswände sowie den raummittigen Ankern [42] zur Lastabtragung aktiviert werden können [40]. Dieser Umstand führt vor allem an den Anschlussbereichen

Wand-Wand und Wand-Decke verstärkt zu Erdbebenschäden, die ebenso eindrucksvoll infolge des Zagreber Erdbebens beobachtet werden konnten [41].

Aufgrund des Alters der Tragstruktur von Gründerzeithäuser können vermehrt Gebäudeschäden, die aus Witterungseinflüssen, unsachgemäßen Umbauarbeiten oder Kriegsereignissen resultieren, beobachtet werden. Insbesondere abgemorschte Holzträme oder eine fehlende Verbindung der Querwände mit den Längswänden stellen lokale Schwachstellen dar, die im Erdbebenfall zu verheerenden Schäden infolge von lokalen Versagensmechanismen führen können. Der Zustand der Schließen bzw. der Holzbalkenköpfe ist dabei nur mit erhöhtem Aufwand festzustellen, aber auch andere lokale Schwachstellen im Mauerwerk sind visuell nicht erkennbar. Mögliche lokale Versagensmechanismen an historischen Mauerwerksbauten werden in den Untersuchungen von *D'Ayala und Speranza* [24], [25] beschrieben. Zudem kann infolge von Wassereintritt in das Mauerwerk, vor allem im Bereich des Kellergeschoßes, die Tragfähigkeit des Mörtels und in weiterer Folge des Mauerwerkgefüges erheblich vermindert werden [1].

Besonders gefährdet sind im Erdbebenfall die nichttragenden Bauelemente wie beispielsweise Gesimse, Skulpturen, Brüstungen, Schornsteine aber auch die sehr schlanken Querwände und Giebelwände. Diese Elemente sind nur unzureichend gegen Horizontalkräfte gesichert und können somit bereits unter geringen seismischen Lasten versagen. Die Verzierungs-elemente stellen dabei, aufgrund ihrer meist straßennahen Situierung, eine erhöhte Gefährdung für die Öffentlichkeit dar [1].

Zudem zeigt eine ausführliche Untersuchung zu den Erdbebenschäden in Zagreb von *Karic et al.* [39], dass auch die Ausbildung des Kellergeschoßes einen großen Einfluss auf die seismische Vulnerabilität des Gebäudes hat. Dabei konnte festgestellt werden, dass insbesondere Gründerzeithäuser, deren Grundrisse nur teilweise unterkellert sind, deutlich größere Schäden in allen Strukturbereichen zu verzeichnen hatten als jene Objekte, die vollständig unterkellert sind [39], [41]. Darüber hinaus konnte eine Zunahme der Gebäudeschäden mit der Höhe der Gründerzeithäuser beobachtet werden [39], wobei ein verstärktes out-of-plane Versagen der tragenden Längswände und nichttragenden Zwischenwände sowie deren Anschlussbereiche in den oberen Geschoßen erfasst werden konnte [41]. Diese Erkenntnis ist insofern problematisch, da bei der Nachweisführung lediglich die hochbelasteten Mauerwerkswände im Erdgeschoß untersucht und die gefährdeten Wände in den oberen Geschoßen meist nicht berücksichtigt werden.

## 4 Das Zagreb Erdbeben am 22. März 2020

Das Erdbeben in Zagreb am 22. März 2020 war das stärkste Erdbeben in dieser Region seit dem Jahr 1880 und hatte trotz der moderaten Stärke erhebliche soziale und wirtschaftliche Auswirkungen. Neben zahlreichen verletzten Personen, von denen 26 ins Krankenhaus eingeliefert werden mussten, war auch ein Todesopfer zu vermelden. Zusätzlich verursachte das Beben große Schäden an der Bebauung, insbesondere in der historischen Innenstadt. Am meisten betroffen waren Gründerzeithäuser aus der Epoche der Österreichisch-Ungarischen Monarchie [5]. Im folgenden Abschnitt wird einerseits die Region Zagreb beschrieben und andererseits das Erdbeben vom 22. März 2020, sowie die verursachten Gebäudeschäden erläutert.

### 4.1 Der Ballungsraum Zagreb

Zagreb ist als Hauptstadt Kroatiens einerseits das Verwaltungszentrum der Republik und andererseits auch als regionales und kulturelles Zentrum von großer nationaler und internationaler Bedeutung (siehe **Abb. 15**). Der Ballungsraum Zagreb beherbergt wichtige Kultur-, Kunst-, Bildungs- und Gesundheitseinrichtungen, Industrieanlagen sowie ein bedeutsames Kulturerbe. Als Wirtschafts- und Finanzzentrum auf nationaler Ebene ist zudem rund ein Drittel des gesamten kroatischen Bruttoinlandsprodukts in der Stadt Zagreb konzentriert. Neben einer großen Anzahl staatlicher Verwaltungsbehörden, die ihren Sitz meist im historischen Zentrum haben, bildet Zagreb einen wichtigen Knotenpunkt für den Straßen-, Schienen- und Luftverkehr [63].

Auf einer Fläche von ca. 640 km<sup>2</sup> leben in Zagreb in etwa 820.000 Einwohner (rund 20 % der Bevölkerung in Kroatien). Die **Abb. 16** zeigt den Großraum Zagreb, wobei der am dichtesten besiedelte Bezirk „Donji Grad“ (auf Deutsch: „Untere Stadt“) mit ca. 12.300 Einwohner pro km<sup>2</sup> gelb markiert wurde. Einen Großteil der Bebauung in diesem Stadtteil bilden Gründerzeithäuser (siehe Kapitel 3), die im Zuge des Wiederaufbaus nach dem verheerenden Erdbeben im Jahr 1880 meist in Reihen oder Blöcken errichtet wurden. Zusätzlich befinden sich in diesem Gebiet die meisten historischen Kulturgüter [5].

*Atalić et al.* [4] klassifizieren im Zuge ihrer Studie zur Bewertung des Erdbebenrisikos den Gebäudebestand in Zagreb, in Hinblick auf ihr strukturelles System, in insgesamt 14 Gebäudetypen, inklusive drei Gebäudehöhen. Sie zeigen auf, dass vor allem in den inneren Bezirken die erdbebengefährdeten Gründerzeithäuser immer noch einen beachtlichen Anteil der Bausubstanz bilden.



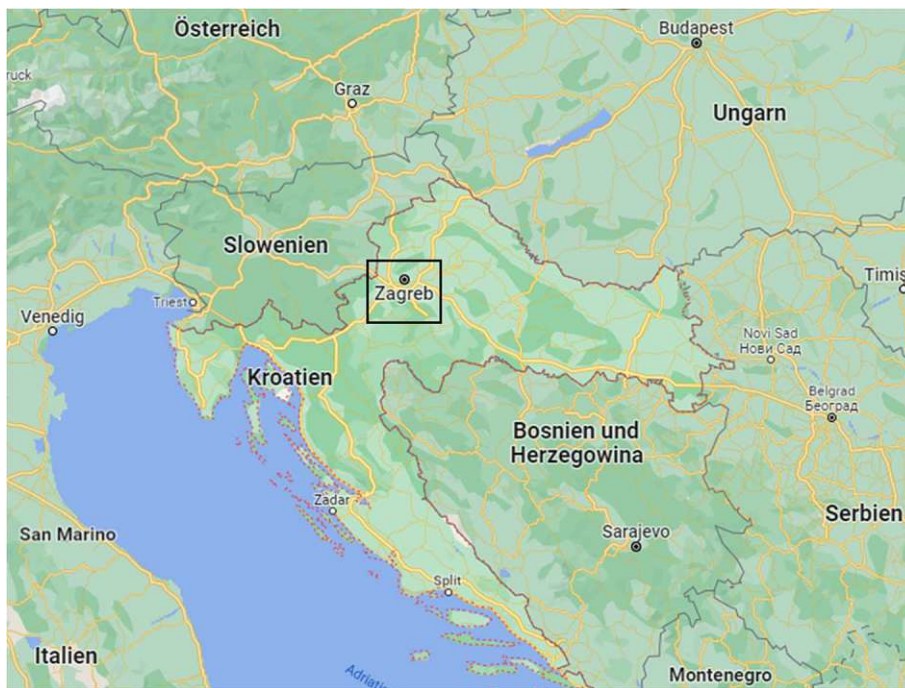


Abb. 15: Standort der Region Zagreb (Kartendaten © 2022 Google, GeoBasis-DE/BKG (©2009), Inst. Geogr. Nacional [31]).

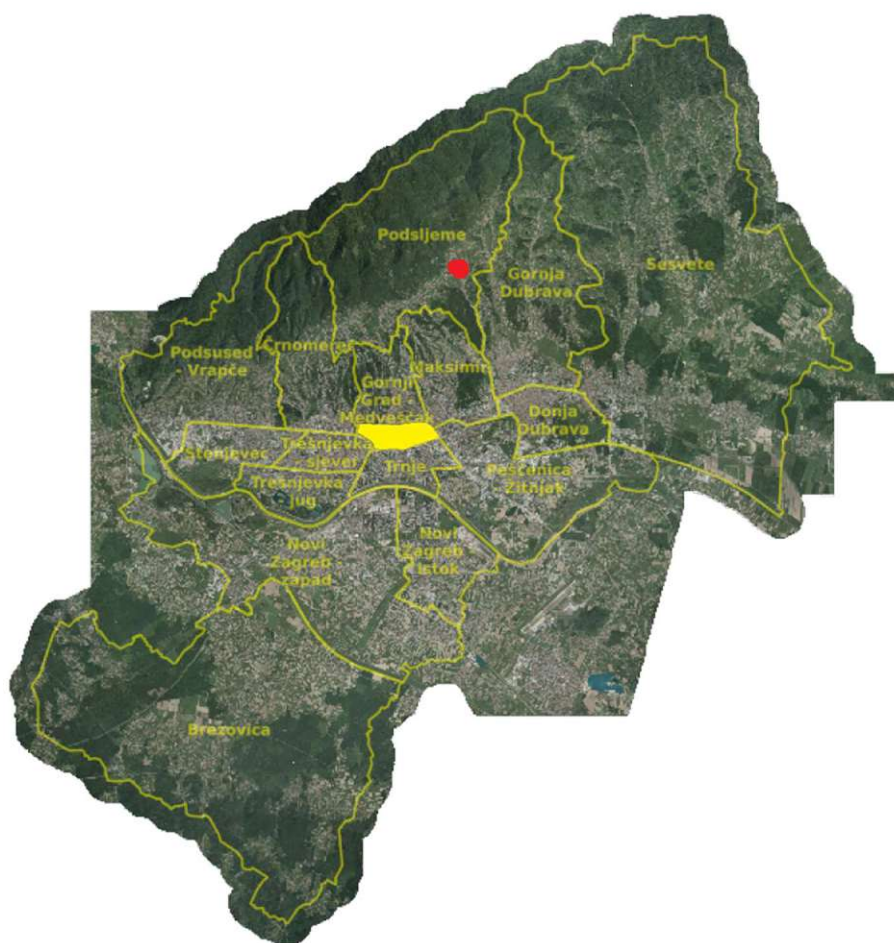


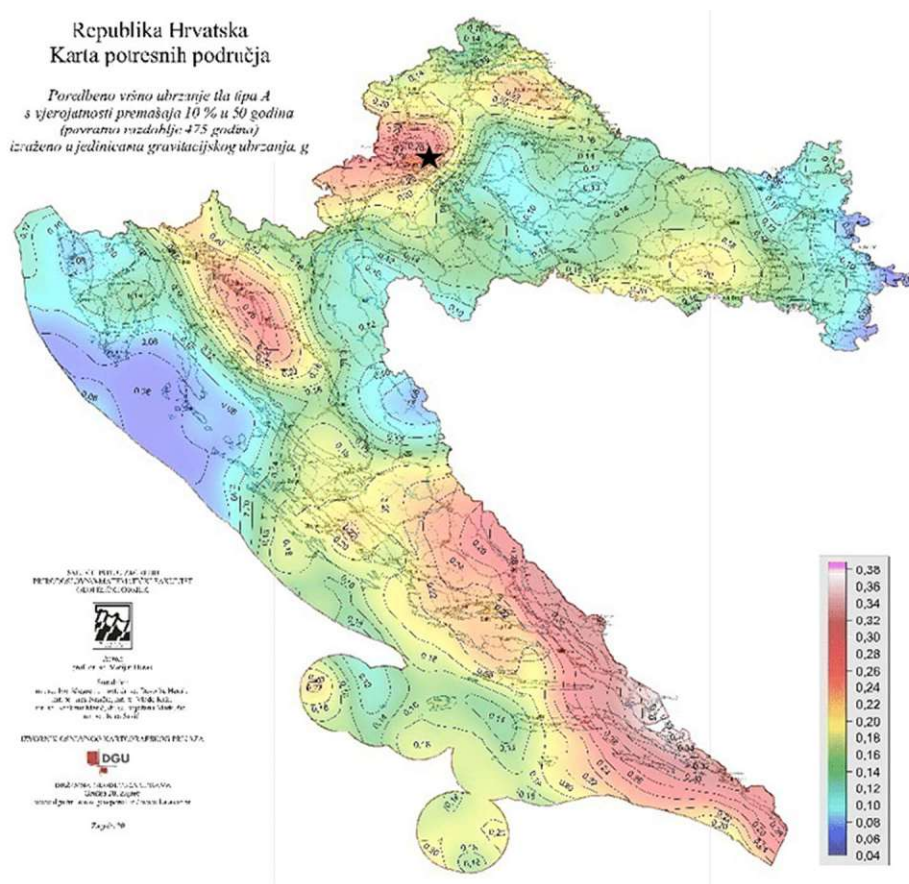
Abb. 16: Großraum Zagreb und das rot markierte Epizentrum des  $M_w$  5,4 Erdbebens am 22. März 2020 (Kartendaten: ZG Geoportal [73]).

### 4.1.1 Seismizität

Der Großraum Zagreb liegt in der tektonischen Region des südwestlichen pannonischen Beckens, das einerseits von den Dinariden im Südwesten und andererseits von den Alpen im Nordwesten begrenzt wird. Die seismische Aktivität in diesem Gebiet beruht auf der Interaktion zwischen der adriatischen und europäischen Platte, die zu Spannungsakkumulationen und -freisetzungen innerhalb der seismischen Zonen führen. Die Erdbeben im Nahbereich von Zagreb sind hauptsächlich auf die nahe gelegene, SW-NO verlaufende Žumberak-Medvednica-Kalnik-Störungszone zurückzuführen [49].

So wurde Zagreb im Laufe der Zeit von einigen schweren Erdbeben erschüttert, wobei erst Ende des 19. Jahrhunderts mit der systematischen Datenerfassung begonnen wurde. Im Jahr 1880 ereignete sich das stärkste Erdbeben der jüngeren Geschichte Zagrebs mit dem Epizentrum im Medvednica-Gebirge. Das Erdbeben wurde auf eine Magnitude von 6,3 geschätzt und zerstörte einen erheblichen Teil der Stadt Zagreb. Seitdem wurden immer wieder starke Erdbeben mit einer Magnitude größer 4,0 registriert, doch das Erdbeben vom 22. März 2020 war mit einer Magnitude von 5,5 das stärkste seit dem Jahr 1880.

Wie bereits in Kapitel 2.2 ab Seite 10 beschrieben, wird die seismische Gefährdung der Republik Kroatien durch die derzeit gültige Erdbebengefährdungskarten, die in der kroatischen Erdbebennorm (HRN EN 1998-1:2011 [18]) angegeben wird, definiert (siehe **Abb. 17**). Im Großraum Zagreb können demnach bei einer Wiederkehrperiode von 475 Jahren Spitzenbodenbeschleunigungen (PGA) von 0,2 g bis 0,28 g bzw. 2,00 bis 2,75 m/s<sup>2</sup> erreicht werden.



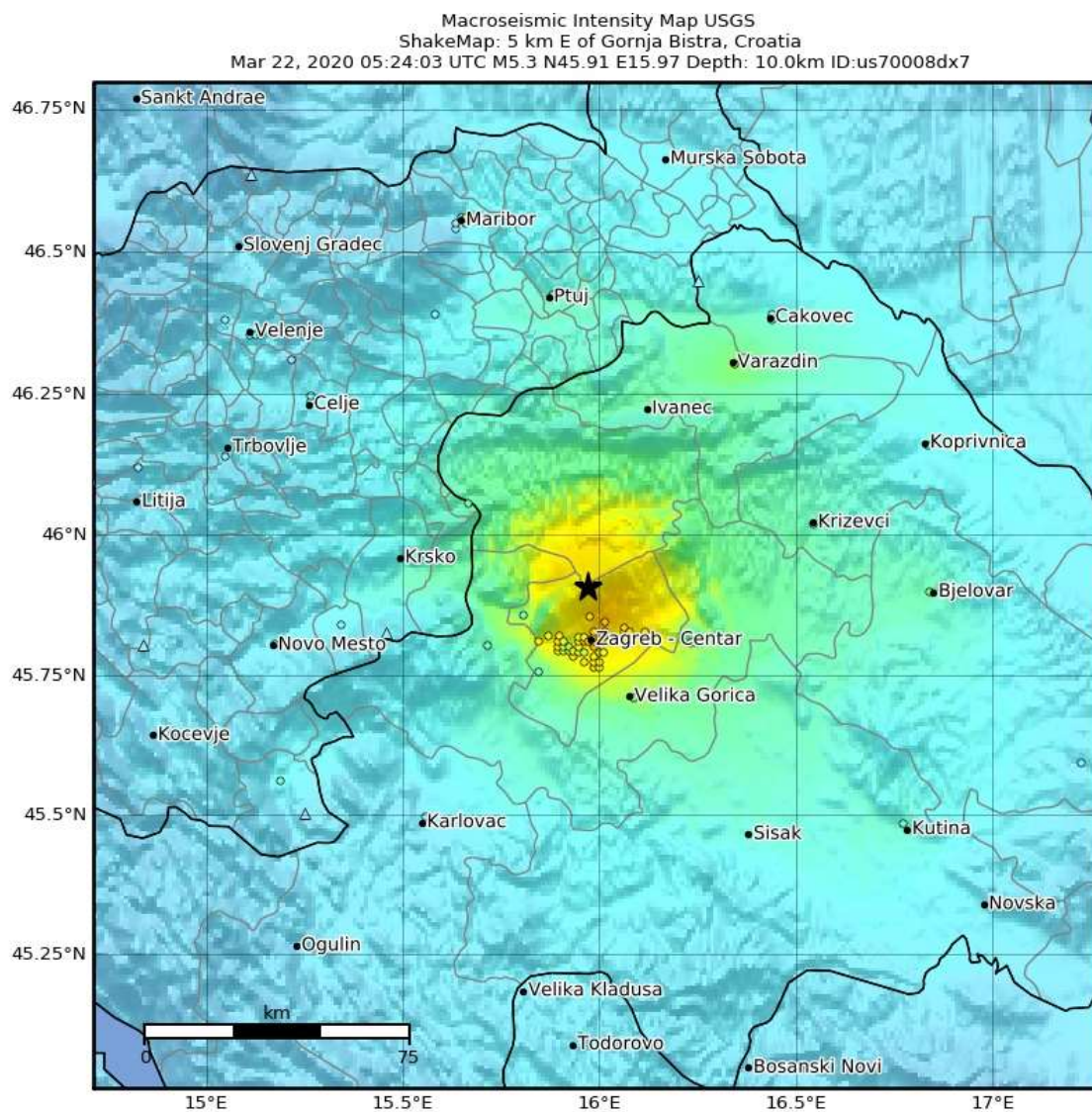
**Abb. 17:** Erdbebengefährdungskarte von Zagreb gemäß HRN EN 1998-1:2011 [18] nach *Herak et al.* [36]. Zagreb wurde mit einem schwarzen Stern markiert.



## 4.2 Das Erdbeben

Am 22. März 2020 um 06:24 Ortszeit (05:24 UTC) wurde Zagreb vom stärksten Erdbeben seit 1880 erschüttert. Das Epizentrum befand sich rund 7 km nördlich des Stadtzentrums von Zagreb mit einer Herdtiefe von etwa 10 km unter dem kleinen Gebirgszug Medvednica (siehe **Abb. 18**). Die Magnitude des Hauptbebens betrug  $M_L = 5,5$  auf der Richterskala (Momenten-Magnitude  $M_W = 5,4$ ) und die wahrgenommene Epizentralintensität wurde auf VII (EMS-Skala) bzw. auf VII-VIII (MSK-Skala) geschätzt. Das Erdbeben war in ganz Kroatien und weit über 1000 km vom Epizentrum entfernt spürbar [49].

Die folgende **Abb. 18** zeigt die Intensitätskarte des Hauptbebens gemäß den von USGS (Earthquake Hazards Program) [70] erhobenen Daten.



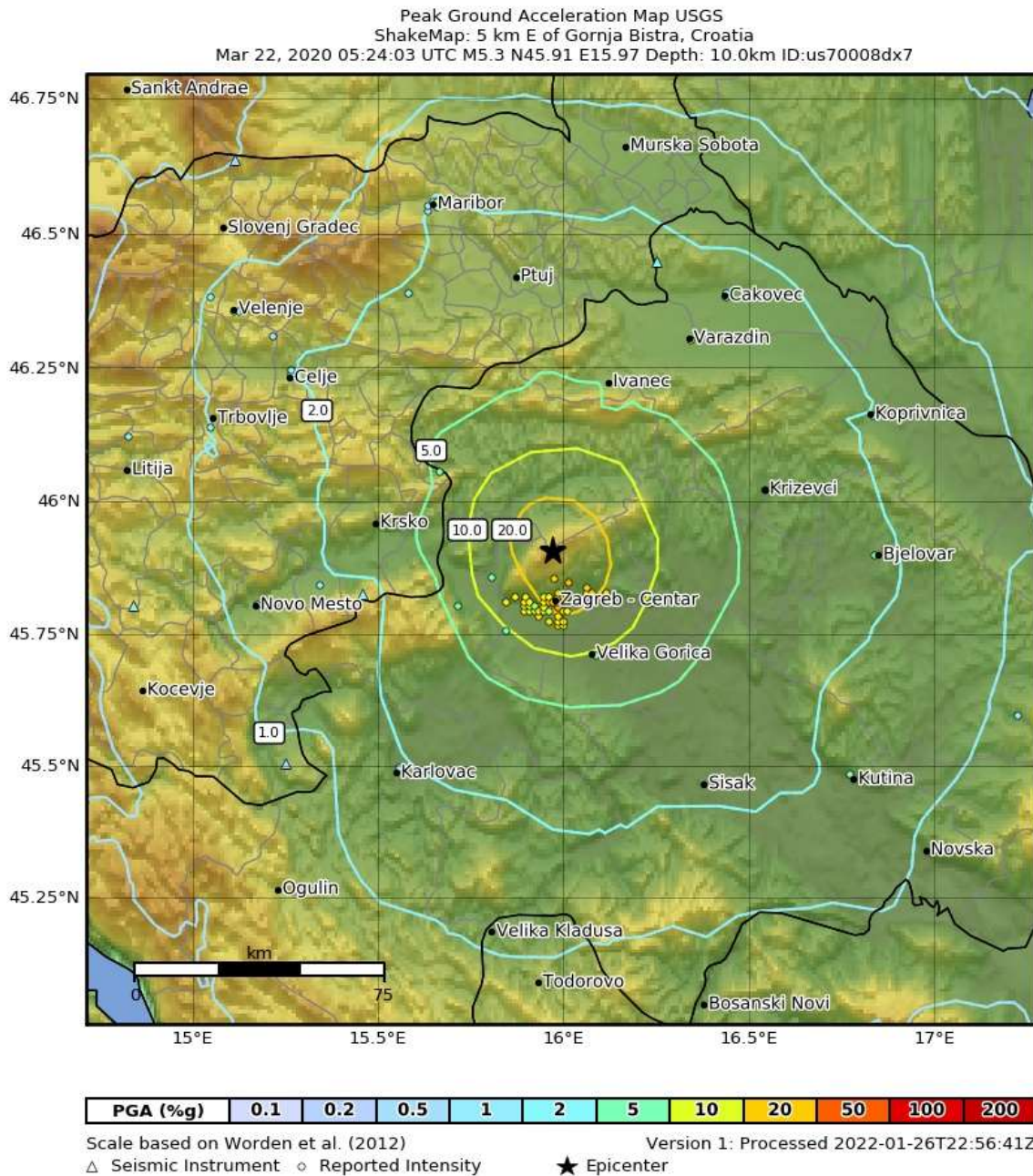
SHAKING	Not felt	Weak	Light	Moderate	Strong	Very strong	Severe	Violent	Extreme
DAMAGE	None	None	None	Very light	Light	Moderate	Moderate/heavy	Heavy	Very heavy
PGA(%g)	<0.0464	0.297	2.76	6.2	11.5	21.5	40.1	74.7	>139
PGV(cm/s)	<0.0215	0.135	1.41	4.65	9.64	20	41.4	85.8	>178
INTENSITY	I	II-III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X+

Scale based on Worden et al. (2012) Version 1: Processed 2022-01-26T22:56:41Z  
 △ Seismic Instrument ○ Reported Intensity ★ Epicenter

**Abb. 18:** Intensitätskarte gemäß USGS [70].

Unmittelbar nach dem Hauptereignis wurde die Nachbebensequenz eingeleitet und es wurden in einer Zeitspanne von 45 Tagen mehr als 1.400 Erdbeben aufgezeichnet [63]. Um 07:01 Ortszeit ereignete sich das zweite starke Beben mit einer Stärke von  $M_L = 4,9$  und um 07:41 Ortszeit wurde ein weiteres Nachbeben der Stärke  $M_L = 3,7$  registriert [49].

Schon kurz nach dem Erdbeben schätzten *Markušić et al.* [49] im Stadtzentrum Zagrebs die Spitzenbodenbeschleunigung PGA auf etwa 0,22 g bis 0,3 g bzw. 2,15 bis 2,9  $m/s^2$ , wobei lokale Standorteffekte bereits berücksichtigt wurden. Die USGS-Erschütterungskarte (**Abb. 19**) zeigt ähnliche Werte, wobei hier die topografische Neigung als Maß für die Standorteffekte herangezogen wurde [5].



**Abb. 19:** Erschütterungskarte: Spitzenbodenbeschleunigung bzw. PGA [% von g], gemäß USGS [71].



### 4.3 Betroffene Gebäude

Das  $M$  5,5 Erdbeben am 22. März 2020 war das stärkste Erdbeben in Zagreb seit ca. 140 Jahren. Im internationalen Vergleich hatte das Erdbeben eine mäßige bzw. moderate Stärke, verursachte trotzdem erhebliche soziale und wirtschaftliche Schäden, wie unter anderen *Atalić et al.* [5] in einer Schadenserhebung feststellen. Neben einer Reihe von öffentlichen Gebäuden, wie zum Beispiel Krankenhäuser, Schulen, Kindergärten, Museen und Parlamentsgebäude, hatte das Erdbeben auch erhebliche Auswirkungen auf die historischen, denkmalgeschützten Gebäude der Altstadt. Am stärksten vom Erdbeben betroffen waren allerdings Wohngebäude, im speziellen die alten Gründerzeithäuser aus der Österreichisch-Ungarischen Monarchie im historischen Stadtzentrum. Es wurden alle Mängel in der Konstruktion der Wohngebäude in der Zagreber Innenstadt, die Ende des 19. Jahrhunderts errichtet wurden, aufgezeigt. So erlitten die Gründerzeithäuser in Zagreb in etwa zwei Drittel des wirtschaftlichen Gesamtschadens [5]. Im Gegensatz dazu haben vor allem Bauwerke aus Stahlbeton und modernere Gebäude (nach 1964 errichtet), die unter Berücksichtigung von seismischen Belastungen entworfen wurden, nur geringe Schäden (insbesondere an nicht tragenden Strukturen wie Kaminen) zu verzeichnen.

Die Problematik und das Gefahrenpotential der Gründerzeithäuser im Bezug zur Erdbebenbelastung wurden bereits ausführlich im Kapitel 3.4 beschrieben. Zudem befindet sich der Großteil der Gebäude in Zagreb in mangelhaftem Zustand und oft wurden illegal, ohne erforderlicher Baugenehmigung, Anpassungen an der Gebäudestruktur vorgenommen [63]. Neben den genannten Problempunkten haben *Atalić et al.* [5] herausgefunden, dass der dominante Periodenbereich des Beschleunigungsspektrums des Erdbebens mit dem Resonanzbereich (zwischen 0,1 und 0,5 s) von 9 untersuchten Gründerzeithäusern in Zagreb übereinstimmt. Das Resonanzpotential trägt direkt zur Erhöhung der Zerstörungskraft des Erdbebens bei.

Das Ausmaß der Schäden ist auf der „Damage Proxy Map“ (DPM) sichtbar (**Abb. 20**), die vom Advanced Rapid Imaging and Analysis (ARIA)-Team des Jet Propulsion Laboratory (JPL) der NASA und des California Institute of Technology (Caltech), beide in Pasadena, Kalifornien, erstellt wurde. Die Karte basiert auf SAR-Bildern (Synthetic Aperture Radar) des Copernicus Sentinel-1 Satelliten, der von der Europäischen Weltraumorganisation (ESA) betrieben wird. Dabei wurden Aufnahmen nach dem Erdbeben am 23. März 2020 mit den seit Januar 2020 aufgenommenen Bildern verglichen. Die roten Pixel (Pixelgröße ca. 30 m) stellen dabei potenzielle Schadensbereiche, die sich aus der Veränderung der Bodenoberfläche im beobachteten Zeitraum ergeben. Die Farbveränderungen von gelb nach rot zeigen zunehmend signifikante Oberflächenveränderungen an. Mit Hilfe dieser Karte können beschädigte Gebiete leicht identifiziert werden, es ist allerdings zu beachten, dass partielle strukturelle Schäden möglicherweise nicht erkannt werden. Vor allem im Bereich der Innenstadt Zagrebs und in der Nähe des Epizentrums sind vermehrt rote Flächen zu erkennen. Die vollständige Karte wird vom NASA Disaster Mapping Portal zur Verfügung gestellt und ist online unter [53] verfügbar.

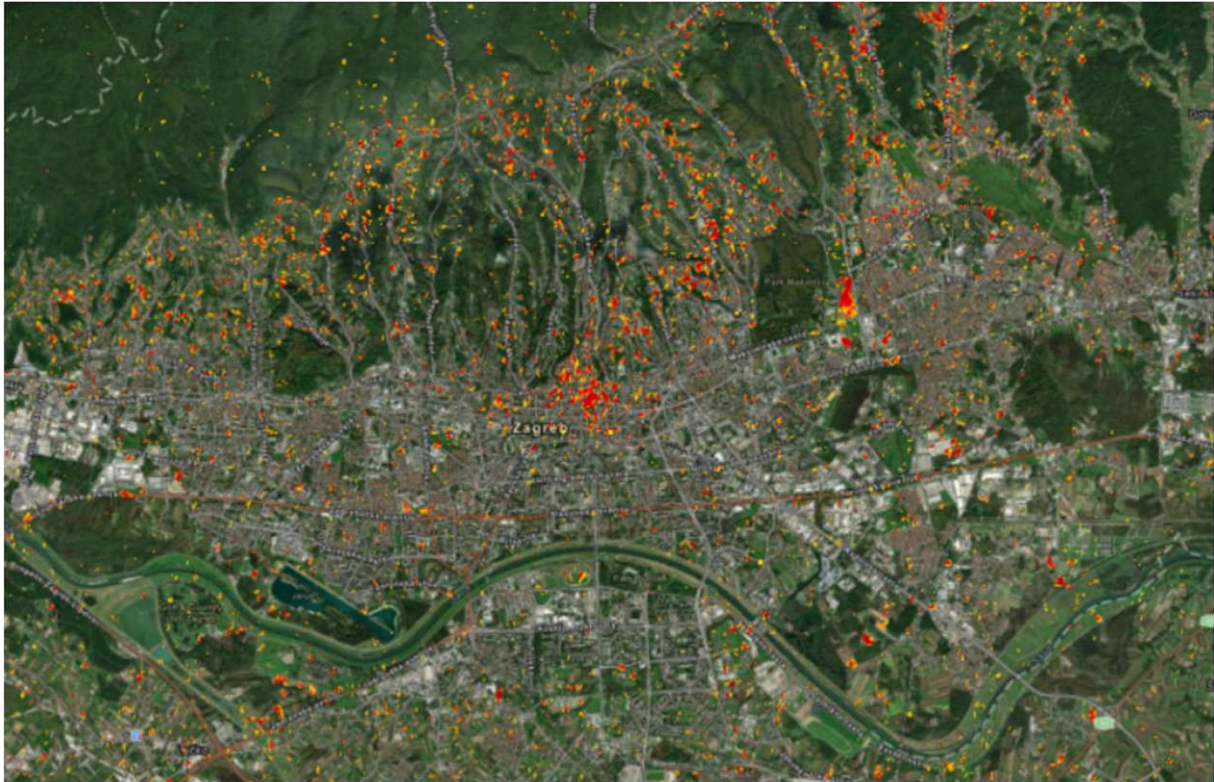


Abb. 20: Damage Proxy Map (DPM) erstellt vom ARIA-Team der NASA JPL/Caltech [53].

## 4.4 Aufgetretene Schäden

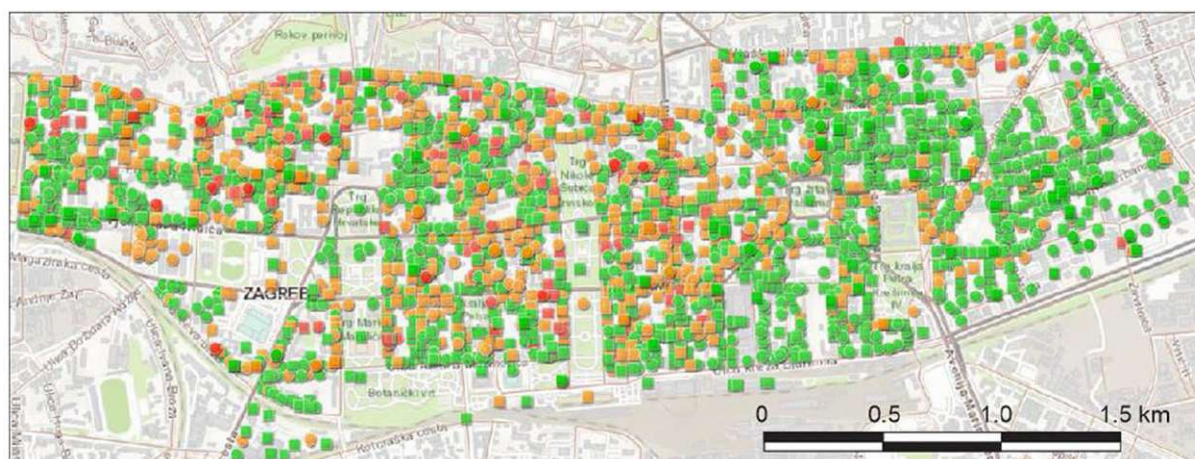
Die Damage Proxy Map (DPM) aus **Abb. 20** ist lediglich als Orientierungshilfe vorgesehen und dient vor allem zur Abschätzung der potenziell beschädigten Gebiete. Nach einem Erdbeben wie jenes am 22. März 2020 muss allerdings eine genaue Schadenserhebung stattfinden. Den Ablauf der Inspektion und Bewertung der vom Erdbeben betroffenen Gebäude, sowie die aufgetretenen Schäden wurden unter anderem von *Atalić et al.* [5], *Šavor Novak et al.* [63] und *Uroš et al.* [69] ausführlich beschrieben. In weiterer Folge wurden die Gebäudeschäden von *Karic et al.* [39] und *Karic et al.* [41] genauestens analysiert.

Die Durchführung der Inspektionen wurde vom Ministerium für Bauwesen und Raumordnung (Ministry of Construction and Physical Planning) koordiniert, wie *Atalić et al.* [5] berichtet. Die Inspektionen erfolgten rein visuell, wobei ältere Gebäude detaillierter betrachtet wurden. Im ersten Schritt war das Ziel dringende Maßnahmen zu ermitteln, um die Gefahr von herabfallenden Trümmern zu reduzieren, auch unter Berücksichtigung möglicher stärkerer Nachbeben.

In der Arbeit von *Uroš et al.* [69] wird die Vorgehensweise zur Durchführung der Gebäudeinspektionen nach dem Erdbeben am 22. März 2020 beschrieben. Die Grundlage für die Gebäudebewertung bildet dabei die Schadensklassifikation gemäß EMS-98 nach *Grünthal* [32] siehe Kapitel 2.4.4. Basierend auf den fünf Schadensklassen der EMS-98 [32] werden die besichtigten Objekte im Hinblick auf ihre weitere Nutzbarkeit in drei Klassen unterteilt:

- Grün (nutzbar): Keine strukturellen Schäden wurden festgestellt. Entspricht der Schadensklasse 1 gemäß EMS-98 [32].
- Gelb (vorübergehend nicht nutzbar): Mögliche strukturelle Schäden wurden festgestellt. Entspricht den Schadensklassen 2 und 3 gemäß EMS-98 [32].
- Rot (nicht nutzbar): Strukturelle Schäden wurden festgestellt. Entspricht den Schadensklassen 4 und 5 gemäß EMS-98 [32].

Die Inspektionen der Gebäudeschäden dauerte über drei Monate und wurden am 30. Juni 2020 beendet. Insgesamt wurden 26.197 Gebäude in Zagreb beschädigt (Angaben aus *Markušić et al.* [49]), wobei 75 % der Gebäude als nutzbar, 20 % als vorübergehend nicht nutzbar und 5 % als nicht nutzbar gekennzeichnet wurden [5]. Die Ergebnisse der Erhebung und Beurteilung (inkl. Fotodokumentation) wurden in einer gut dokumentierten Datenbank [35] gespeichert. Die nachfolgenden Schadensbilder und die Schadenklassifikationen basieren auf den darin enthaltenen Daten und Bildern. Die **Abb. 21** aus *Atalić et al.* [5] zeigt den Bezirk Donji Grad, der neben der historischen Altstadt am stärksten betroffen war.



**Abb. 21:** Gebäudenutzbarkeit in „Donji Grad“ (auf Deutsch: „Untere Stadt“): grün: nutzbar, gelb: vorübergehend nicht nutzbar, rot: nicht nutzbar aus *Atalić et al.* [5].

Im Rahmen der ausführlichen Schadenserhebung ist festgestellt worden, dass das Versagen von Schornsteinen, Giebelwänden sowie Schäden an den Dachkonstruktionen zu den häufigsten Erdbebenschäden zu zählen sind. Darüber hinaus kam es in manchen Fällen zu einer Trennung der Giebelwand über die gesamte Gebäudehöhe und zu einem teilweisen Einsturz der Fassade. Im Inneren der historischen Gebäude wurden meist Schäden an den tragenden Wänden und nichttragenden, aussteifenden Trennwänden sowie an deren Kontaktstellen festgestellt. Schäden an den hölzernen Deckenkonstruktionen wurden hingegen nur selten verzeichnet [5].

Im folgenden Abschnitt werden kurz die am häufigsten dokumentierten Schäden an gründerzeitlichen Wohnbauten in Folge des Erdbebens am 22. März 2020 beschrieben. In Anlehnung an die Schadensklassifikation der EMS-98 [32] werden zunächst die strukturellen Schäden und in weiterer Folge die Schäden an nichttragenden Bauteilen erläutert.



### 4.4.1 Strukturelle Schäden

#### Schäden an tragenden Mauerwerkswänden

Bei tragenden Mauerwerkswänden wurden vermehrt Schäden in Form von Diagonallissen bzw. treppenförmigen Rissen infolge einer Überschreitung der Scherfestigkeit in der Ebene, sowie Risse, die durch Biegung aus der Ebene hervorgerufen wurden, beobachtet [41]. Gründe dafür liegen meist in der unzureichenden Qualität des Mörtels sowie an den mangelhaften Anschlüssen der Holzdeckenkonstruktionen mit den Wänden [5].

Die Erdbebenschäden konzentrierten sich weitgehend in den Anschlussbereichen Wand-Wand und Wand-Decke, sowie in Bereichen globaler Steifigkeitsänderungen (Anschluss Hauptgebäude und Treppenhaus) [41]. Neben den Anschlussbereichen der Treppenhäuser wurden zudem die auskragenden Treppenkonstruktionen beschädigt. Darüber hinaus wurden Diagonallisse in den Sturz- und Gewölbeprofilen von Mauerwerksöffnungen beobachtet, die auf eine Überschreitung der Scherfestigkeit zurückzuführen sind [5]. **Abb. 22** zeigt zwei typische Beispiele für Erdbebenschäden an tragenden Längswänden.



**Abb. 22:** Erdbebenschäden an tragenden Mauerwerkswänden (Bildquelle: HCPI-Datenbank [35]).

#### Schäden an Deckenkonstruktionen

Das Schadensbild an den hölzernen Deckenkonstruktionen ist größtenteils durch Deckenrisse, die parallel zu den Holzbalken verlaufen und aus der Biegebeanspruchung der Balken resultieren, charakterisiert (**Abb. 23** links). Darüber hinaus konnten Putzschäden in den Wandanschlussbereichen beobachtet werden. Strukturelle Schäden konnten im Zuge der visuellen Schädenserhebung nicht festgestellt werden (**Abb. 23** rechts) [5], [41].



**Abb. 23:** Erdbebenschäden an Deckenkonstruktionen (Bildquelle: HCPI-Datenbank [35]).



## 4.4.2 Nicht strukturelle Schäden

### Schäden an Schornsteinen

Die gemauerten Schornsteine zählen zu den anfälligsten nichttragenden Bauteilen und verursachen den Großteil der Schäden an Dächern und Dachböden [5]. Zudem stellten die herabfallenden Bruchstücke eine erhebliche Personengefährdung dar. In Folge der seismischen Belastungen versagten die Schornsteine meist durch Umkippen direkt über der Dachebene (**Abb. 24** links), selten konnte eine Verdrehung oder ein Versatz dieser Elemente festgestellt werden (**Abb. 24** rechts) [41]. Das liegt vor allem daran, dass diese Bauteile meist bis über die Dachebene hinaus freistehend ausgeführt wurden. Zudem beeinflussen sich die schubweichen Dachkonstruktionen und die Schornsteine durch ihre unterschiedlichen dynamischen Strukturantworten negativ im Erdbebenfall.



**Abb. 24:** Erdbebenschäden an gemauerten Schornsteinen (Bildquelle: HCPI-Datenbank [35]).

### Schäden an Giebelwänden

Eine hohe Schadensanfälligkeit wurde auch bei gemauerten Giebelwänden beobachtet. Insbesondere bei Gebäuden, die höher als die Nachbarbebauung ausgeführt wurden, konnte ein teilweiser oder vollständiger Einsturz der Giebelwände im Dachgeschoß festgestellt werden (siehe **Abb. 25**). Das ist größtenteils auf die schlanke Mauerwerkskonstruktion von 15 cm und auf eine unzureichende Rückverankerung mit der Dachkonstruktion zurückzuführen [5], [41].

Darüber hinaus konnte bei schlechtem Anschluss der Feuermauer/Giebelwand mit den lastabtragenden orthogonalen Längswänden eine Ablösung der Wände über einige Stockwerke hinweg identifiziert werden. Als charakteristisches Versagensbild sind vertikale Risse in der Feuermauer oder in den Längswänden zu nennen [5].



**Abb. 25:** Erdbebenschäden an Giebelwänden (Bildquelle: HCPI-Datenbank [35]).

### Schäden an nichttragenden gemauerten Wänden

Bei nichttragenden, meist nur 15 cm starken, gemauerten Wänden konnten vor allem in den Anschlussbereichen zu den tragenden Längswänden vermehrt Schäden beobachtet werden (**Abb. 26** links). Das ist hauptsächlich auf die Verzahnung dieser Mauerwerkswände zurückzuführen und zeigt, dass die nichttragenden Querwände die Längswände halten und ein mögliches Versagen dieser Wände aus der Ebene behindert. Darüber hinaus konnten vereinzelt Schubrisse festgestellt werden. Analog zu den tragenden Längswänden, schwächen Mauerwerksöffnungen in Querwänden die Wandscheibe und es konnten Spannungskonzentrationen beobachtet werden, die diagonale Risse in den Ecken der Öffnungen verursachten (**Abb. 26** rechts) [5], [41].



**Abb. 26:** Erdbebenschäden an nichttragenden Wänden (Bildquelle: HCPI-Datenbank [35]).

### Schäden an dekorativen Elementen

Die aufwändige Fassadengestaltung mit dekorativen Bauelementen, wie Skulpturen, Gesimse- und Attikaausbildungen, Brüstungen sowie Ecktürmen, ist ein markantes Merkmal der Gründerzeithäuser der Österreichisch-Ungarischen Monarchie. Insbesondere die massiven dekorativen Elemente, die nicht ausreichend gegen seismische Einwirkungen verankert wurden, erlitten erhebliche Schäden (**Abb. 27**) [63], [41].



**Abb. 27:** Erdbebenschäden an dekorativen Elementen (Bildquelle: HCPI-Datenbank [35]).





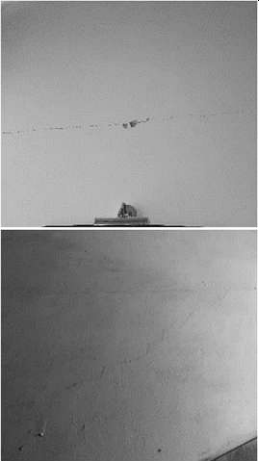
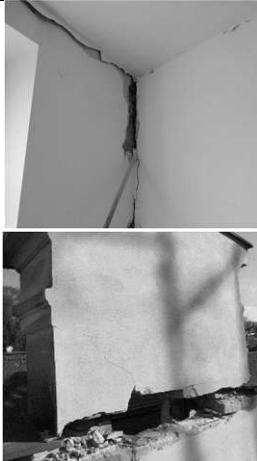


Eine umfangreiche Wiedergabe der Erdbebenschäden am Zagreber Gründerzeitbestand kann unter anderem den Arbeiten von *Atalić et al.* [5], *Šavor Novak et al.* [63], *Uroš et al.* [69], *Karic et al.* [39] und *Karic et al.* [41] entnommen werden.

### 4.4.3 Klassifizierung der Erdbebenschäden

Im Rahmen dieser Arbeit werden auf Basis der erfassten Schäden eines Häuserblocks in Zagreb die einzelnen Objekte in Schadensklassen gemäß EMS-98 [32] kategorisiert. Dafür werden in der nachfolgenden **Tab. 4.** die charakteristischen Schäden der einzelnen Schadensklassen beschrieben und Beispiele für strukturelle und nicht-strukturelle Schäden, die in Folge des Erdbebens in Zagreb am 22. März 2020 erfasst wurden, dargestellt. Dabei ist ersichtlich, dass beim Zagreber Erdbeben mit einer Momenten-Magnitude  $M_w = 5,4$  die Schadensklasse 5, die einem Totalversagen des Gebäudes entspricht, keinem der untersuchten Objekte zugewiesen werden konnte.

Dieser Abschnitt soll einen groben Überblick über die aufgetretenen Schäden des untersuchten Gebäudebestands geben. Die Schadensklassifikation der einzelnen untersuchten Gebäude ist in Kapitel 6.4 gegeben. Die Schadensgrade werden in weiterer Folge mit den Ergebnissen von zwei ausgewählten seismischen Bewertungsmethoden verglichen.

**Tab. 4:** Definition der fünf Schadensgrade gemäß EMS-98 [32] inkl. Beispielbilder für strukturelle und nicht-strukturelle Schäden infolge des Zagreb Erdbebens am 22. März 2020. (Bildquelle: HCPI-Datenbank [35]).

Schadensklassen gemäß EMS-98 [32]					
	1	2	3	4	5
	<b>Leicht</b> Feine Risse (Haar- risse), Putzablösun- gen	<b>Mäßig</b> Risse in Wänden, große Putzablösun- gen, teilweiser Ein- sturz von Kaminen	<b>Stark</b> gr. Risse in Wänden, Herabfallen von Dachziegeln, Ein- sturz von Kaminen, Zwischenwänden und Giebelwänden	<b>Sehr stark</b> Versagen von Wän- den, teilweise Ver- sagen der Dach- und Deckenkonstruktio- nen	<b>Zerstörung</b>
	-	leicht	mäßig	stark	
<b>struktureller Schaden</b>					
<b>nicht-struktureller Schaden</b>					
	leicht	mäßig	stark	sehr stark	<b>Nicht erfasst</b>



## 5 Zustandsbeurteilung

Wie bereits ausführlich in vorherigen Kapiteln beschrieben, wurden bei der Errichtung der Gebäude in der Epoche der Österreichisch-Ungarischen Monarchie Erdbebenlasten nicht berücksichtigt. Das ist unter anderem auch der Grund, weshalb die Gründerzeithäuser in Zagreb durch das Erdbeben am 22. März 2020 zum Teil sehr schwere Schäden erlitten haben. Erst nach dem Zweiten Weltkrieg wurden die ersten Erdbebennormen eingeführt, wobei zunächst nur vereinfachte Methoden zum Einsatz kamen, die verglichen mit heute nur geringe Erdbebenkräften ansetzten. Mit zunehmender Forschungstätigkeit stieg das Verständnis für das Tragverhalten von Bauwerken unter Erdbebenbelastung und so wurden zu Beginn des 21. Jahrhunderts in Europa die jeweiligen nationalen Vorschriften komplett, von der zurzeit gültigen Normenreihe EN 1998 (EC 8) mit den zugehörigen nationalen Anwendungsdokumenten, abgelöst (2009 in Österreich und 2013 in Kroatien) [49]. Im folgenden Abschnitt werden kurz unterschiedliche Normen und Richtlinien zur Beurteilung der Erdbebengefährdung von Bauwerken beschrieben, sowie nationale und internationale seismische Schnellbewertungsmethoden zur Klassifizierung von Bestandgebäuden dargestellt. Abschließend werden die beiden seismischen Schnellbewertungsmethoden nach *Achs* [1] und gemäß *FEMA P-154:2015* [28] ausführlich erläutert, und in weiterer Folge am gemauerten Altbestand eines Häuserblocks in Zagreb angewandt.

### 5.1 Normen und Richtlinien

Nach heutigem Standard wird die seismische Beurteilung von Gebäuden in unterschiedlichen Normen und Richtlinien geregelt. Sie behandeln einerseits die Auslegung und Dimensionierung von Neubauten in Erbebengebieten, und enthalten andererseits Kriterien zur Erfassung der seismischen Vulnerabilität von Bestandsobjekten. Diese Baunormen behandeln dabei oft unterschiedliche Gebäudetypen, weshalb die speziellen Merkmale der Gründerzeithäuser oft nicht ausreichend berücksichtigt werden können. Der folgende Abschnitt behandelt die wesentlichen nationalen und internationalen Normen zur seismischen Bewertung von Bestandsgebäuden.

#### 5.1.1 Europäische Union - Eurocode 8

In der Europäischen Union regelt die Eurocode-Reihe, bestehend aus insgesamt 10 Europäischen Normen (EN 1990 – EN 1999), die Planung von Bauwerken des Hoch- und Tiefbaus. Sie wurde vom Europäischen Komitee für Normung CEN in Auftrag gegeben und veröffentlicht.

Dabei sind für die Bemessung und Bewertung von Mauerwerksbauten gegenüber seismischen Einwirkungen in Wien bzw. in Zagreb die aktuell gültige EN 1998-1 (ÖNORM EN 1998-1:2013 [6] bzw. HRN EN 1998-1:2011 [18]) und EN 1998-3 (ÖNORM EN 1998-3:2013 [8] bzw. HRN EN 1998-3:2011 [20]) von entscheidender Bedeutung. Nationale Erläuterungen und Festlegungen sind in den jeweiligen dazugehörigen Nationalen Fassungen (ÖNORM B 1998-

1:2017 [7] und ÖNORM B 1998-3:2018 [9] bzw. HRN EN 1998-1:2011/NA:2011 [19] und HRN EN 1998-3:2011/NA:2011 [21]) geregelt.

In der EN 1998-1 werden dabei grundlegende Informationen über die Auslegung von Hochbauten im Erdbebengebiet, sowie die Darstellung der Erdbebeneinwirkung erläutert. Die EN 1998-3 liefert Kriterien zur Erfassung der seismischen Vulnerabilität von Bestandsobjekten. Da bestehende Bauwerke möglicherweise versteckte Mängel aufweisen können und deren Konstruktionsweise nicht mit modernen Standards vergleichbar ist, definiert die ÖNORM EN 1998-3:2013 [8] drei Kenntnisstände. Diese basieren auf der Vollständigkeit und Zuverlässigkeit der verfügbaren Informationen, beispielsweise zur Geometrie des Gebäudes oder zum Zustand der Materialien:

KL1: Beschränkter Kenntnisstand

KL2: Normaler Kenntnisstand

KL3: Vollständiger Kenntnisstand.

Abhängig vom festgelegten Kenntnisstand werden einerseits unterschiedliche Sicherheitsbewerte benötigt und andererseits Berechnungsverfahren vorgeschrieben. Die normativen Nachweismethoden sind unter anderem das vereinfachte, lineare Antwortspektrumsverfahren (Ersatzkraftverfahren) und die nichtlineare, statische Pushover-Methode [8]. Es ist zu beachten, dass diese scheinbar genauen und sehr konservativen Erdbebennachweise das reale Tragverhalten aufgrund der Komplexität der dynamischen Tragwerksantworten von Gründerzeithäusern nur bedingt nachbilden können [42].

### 5.1.2 USA – FEMA P-154

Die FEMA P-154:2015 mit dem Titel *Rapid Visual Screening of Buildings for Potential Seismic Hazards: A Handbook* [28], die erstmals im Jahr 1988 von der Federal Emergency Management Agency (FEMA) veröffentlicht wurde, beschreibt eine schnelle und kostengünstige Bewertungsmethode der Erdbebensicherheit von Bestandsgebäuden. Auch die dritte Auflage dieser Richtlinie aus dem Jahr 2015 wird von einem unterstützenden Dokument (FEMA P-155:2016 [29]) begleitet, das unter anderem die technischen Grundlagen dieser Methode beschreibt.

Im Zuge einer zweistufigen Beurteilung wird mittels Datenblättern eine Bauwerkspunktzahl ermittelt, mit der die Versagenswahrscheinlichkeit des Gebäudes abgeschätzt werden kann. Zudem wird eine Software zur Verfügung gestellt, die es ermöglicht die Bewertung digital durchzuführen. Die Rapid Visual Screening (RVS) Methode der *FEMA P-154* [28] dient als wichtige Grundlage zur Gebäudebewertung in vielen hoch seismischen Ländern und wird im Zuge dieser Arbeit in Kapitel 5.4 ausführlich beschrieben.

### 5.1.3 Schweiz – SIA 269/8

Die Schweizer Norm SIA 269/8 (2017) *Erhaltung von Tragwerken – Erdbeben* [65] und die ergänzende Verfahrens- und Anwendungshilfe gemäß dem *Bundesamt für Umwelt BAFU* [16] schlagen eine mehrstufige, selektive Bewertungsmethode zur Erfassung des Erdbebenrisikos großer Gebäudebestände vor. Das Verfahren besteht aus drei Stufen: Eingrenzung, Bewertung und Überprüfung. Den einzelnen Stufen liegt ein risikobasierter Ansatz zugrunde, was bedeutet, dass sowohl die Versagenswahrscheinlichkeit als auch die Konsequenzen eines Gebäudeversa-



gens berücksichtigt werden. Zu Beginn wird der Gebäudebestand eingegrenzt und jene Objekte mit dem potenziell größten Risiko werden auf Basis weniger Informationen, wie beispielsweise Gebäudewert und Erdbebenzone, identifiziert. In der zweiten Stufe erfolgt die Risikobewertung mithilfe eines Erhebungsblattes und Risikokennzahlen. Abschließend werden die priorisierten Gebäude auf Basis der SIA 269/8 [65] ausführlich überprüft [16].

## 5.2 Nationale und internationale Methoden

In den letzten Jahrzehnten wurden verschiedene Schnellbewertungsmethoden zur Beurteilung und Klassifizierung von Bestandsgebäuden entwickelt. Die Gebäudebewertung auf Basis visueller Begutachtungen hat dabei einen besonderen Stellenwert, da mit dem sogenannten Rapid Visual Screening Verfahren (RVS) in kurzer Zeit ein großer Gebäudebestand erfasst und klassifiziert werden kann. Die Arbeiten von *Calvi et al.* [17], *Moufid Kassem et al.* [52] sowie *Bektaş und Kegyres-Brassai* [14] geben einen guten Überblick über die gebräuchlichsten Bewertungsmethoden.

In Japan (JBDPA [37]) beruht die Beurteilung von Gebäuden beispielsweise auf einem seismischen Index. Dieser Index ist von der Steifigkeit bzw. Duktilität des Tragwerks, der Regelmäßigkeit im Grundriss und im Aufriss sowie von einem Zeitfaktor abhängig und beschreibt den Erdbebenwiderstand eines einzelnen Geschoßes.

Eine wichtige Grundlage für viele internationale Beurteilungsverfahren bildet das in den USA entwickelte RVS-Verfahren der *FEMA P-154* [28]. Die NRCC (National Research Council of Canada [55]) veröffentlichte beispielsweise im Jahr 1993 eine Methode, die überwiegend auf der *FEMA P-154* [28] basiert. Dabei wurde ein *Seismic Priority Index (SPI)* eingeführt, der sich aus der Summe des *Structural Index (SI)* und *Nonstructural Index (NSI)* zusammensetzt.

In Europa wurden Anwendungsformen der amerikanischen RVS-Methode vor allem in hoch seismischen Ländern wie Griechenland oder Türkei entwickelt. Das griechische Beurteilungsverfahren wurde von der OASP (Earthquake Planning and Protection Organization [57]) im Jahr 2000 eingeführt. Diese Methode berücksichtigt auch das strukturelle System sowie die Eigenschaften der verwendeten Baustoffe.

Im deutschsprachigen Raum sind neben der Schnellbewertungsmethode nach *Achs* [1], vor allem die Verfahren nach *Meskouris et al.* [51] und *Sadegh-Azar* [62], sowie die für Gründerzeithäuser spezialisierte Vorgehensweise nach *Rusnov* [61] hervorzuheben, die im folgenden Abschnitt kurz beschrieben werden.

### 5.2.1 Methode nach *Meskouris* [51]

Die Bewertungsmethode zur Bestimmung der seismischen Vulnerabilität von Bestandsgebäuden nach *Meskouris et al.* [51] besteht aus den Untersuchungsstufen I bis III, wobei die dritte Stufe eine *funktionsorientierte nichtlineare seismische Bauwerksanalyse* [62] darstellt und deshalb nicht zur Gruppe der Schnellbewertungsmethoden zu zählen ist. Grundlage des Beurteilungsverfahrens bildet ein von *Sadegh-Azar* [62] entwickeltes Softwaremodul (EQ-FAST), welches den gesamten Datenerfassungsprozess unterstützt. Darüber hinaus können damit direkt an Ort und Stelle Messungen durchgeführt und die Ergebnisse der Untersuchungsstufen I und II ausgewertet werden.

Die erste Stufe der Bauwerksbewertung besteht aus einer visuellen Bauwerksinspektion (RVS) und eignet sich am besten zur Beurteilung eines großen Gebäudebestands (ca. 30 bis 60 Minuten pro Gebäude). Dabei werden eine definierte Anzahl an Gebäudeparameter sowie die Seismische Zone und Bodenbeschaffenheit ermittelt. Die Software berechnet daraus eine Bauwerkspunktzahl  $S_c$  (Structural Score), die direkt Aufschluss über die Versagenswahrscheinlichkeit des Bauwerks im Erdbebenfall gibt. Darüber hinaus wird ein Schädigungsgrad oder „Damage Ratio“ ( $DR$ ) definiert. Dieser Schädigungsgrad beschreibt das Verhältnis aus Sanierungskosten und Bauwerkswert [62].

Zusätzlich zu den erhobenen Daten der Untersuchungsstufe I werden in der zweiten Stufe einige Vorortmessungen durchgeführt. Darüber hinaus werden einige „Statements“ oder auch Schwachstellen des Bauwerks untersucht und bewertet. Dafür werden beispielsweise einige geometrische Dimensionen benötigt. Da manche dieser erforderlichen Werte nur aufwändig ermittelt werden können (z.B. horizontaler Querschnitt aller Schubwände einer Richtung), benötigt diese Analyse in etwa sechs Stunden [62].

Wie bereits erwähnt, stellt die Untersuchungsstufe III eine nichtlineare Tragwerksanalyse dar und ist deswegen viel zeitintensiver – allerdings nur scheinbar genauer [42] – als die beiden Stufen davor [62].

### 5.2.2 Methode nach *Rusnov* [61]

Die Arbeit von *Rusnov* [61] behandelt die Analyse von erdbebengefährdeten Bauwerken und legt den Schwerpunkt auf historische Wiener Gründerzeithäuser. Dabei wurde ein mehrseitiges Formular zur visuellen seismischen Beurteilung von Gebäuden vorgeschlagen, das auf einem Punktesystem beruht. Die verschiedenen Bauwerkparameter berücksichtigen dabei einerseits wichtige geometrische Eigenschaften wie z.B. die Steifigkeitsverteilung im Grund- und Aufriss und andererseits technische Gebäudemerkmale wie beispielsweise die Decken- und Wandkonstruktion oder Fundierung. Die Gewichtung der verschiedenen Parameter basiert allerdings zum Teil auf subjektiven Erfahrungswerten, die nicht mit weiteren Untersuchungen oder Versuchen untermauert werden [61].

Auf Basis der Gesamtpunkteanzahl aus den Bewertungsformularen, der Erdbebenzone und der Bedeutungskategorie kann somit die seismische Gefährdung des Bestandsgebäudes ermittelt werden [61]. Es ist allerdings ungewiss, ob dieses seismische Beurteilungsverfahren praxistauglich ist und plausible Ergebnisse liefert, da im Zuge der Arbeit von *Rusnov* [61] diese Methode nicht an bestehenden Gebäuden angewandt und getestet wurde.

## 5.3 Schnellbewertung nach *Achs* [1]

Da die in Kapitel 5.1 und 5.2 vorgestellten nationalen und internationalen Bewertungsmethoden meist auf verschiedene Bauwerkstypen angewandt werden können, berücksichtigen diese nicht ausreichend die spezifischen Eigenschaften der Gründerzeithäuser. Aus diesem Grund entwickelte *Achs* [1] eine speziell angepasste Methode zur Klassifizierung und Bewertung von historischen Mauerwerksbauten aus der Epoche der Österreichisch-Ungarischen Monarchie.

### 5.3.1 Grundlegende Parameter

Die Beurteilungsmethodik basiert dabei, in Anlehnung an die mittlerweile überarbeiteten SIA Merkblätter (*SIA 2018: Überprüfung von bestehenden Gebäuden bezüglich Erdbeben* [64]) aus dem Jahr 2004, auf zwei Parametertypen:

- *Schadensrelevante Parameter*: Teilschadensparameter – Schadensrelevanz *SR*
- *Gebäuderelevante Parameter*: Teilbauwerksparameter – Bauwerksparameter *BP*.

Die Schadensrelevanz *SR* einerseits dient zur Beurteilung der sozialen und ökonomischen Auswirkungen möglicher Schäden im Erdbebenfall, und der Bauwerksparameter *BP* andererseits soll den Gebäudezustand im Hinblick auf den Erdbebenwiderstand zum Zeitpunkt der Bewertung beschreiben. In der Arbeit von *Achs* [1] werden dabei insgesamt fünf Teilschadensparameter (*S01* bis *S05*) und neun Teilbauwerksparameter (*G01* bis *G09*) definiert. Im Zuge der Bewertung werden den einzelnen Teilparametern Punkte zugewiesen. Die Schadensrelevanz *SR* bzw. der Bauwerksparameter *BP* ergeben sich dann durch Aufsummieren der jeweiligen Teilparameter. Das Risiko des untersuchten Bauwerks steigt dabei mit der Anzahl der vergebenen Punkte.

In der **Tab. 5** nach *Achs und Adam* [2] sind die einzelnen schadensrelevanten Parameter zur Ermittlung der Schadensrelevanz *SR* beschrieben. Den größten Einfluss hat dabei die Personenanzahl im betrachteten Gebäude, die prinzipiell keine obere Schranke aufweist und direkt als Bewertungsparameter herangezogen wird. Darüber hinaus werden die Bedeutungskategorie des Bauwerks (gemäß ÖNORM EN 1998-1:2005), der Gebäudewert, bedeutende Sachgüter und die Auswirkungen von Gebäudeschäden auf die unmittelbare Umgebung mit Teilschadensparametern berücksichtigt.

**Tab. 5:** Teilschadensparameter der Schadensrelevanz *SR* nach *Achs und Adam* [2].

Parameter	Beschreibung	Bandbreite
<i>S01</i> Gefährdete Personen	Anzahl der gefährdeten Personen innerhalb des untersuchten Gebäudes	Personenanzahl
<i>S02</i> Bedeutungskategorie	Bedeutungskategorie des untersuchten Objekt gemäß ÖNORM EN 1998-1:2005	1,0 bis 50,0
<i>S03</i> Gebäudewert	Abschätzung des Gebäudewerts über die Wohnnutzfläche <i>WNF</i> und den Kaufpreis unter Berücksichtigung der Restnutzungsdauer <i>RND</i>	$\frac{\text{Kaufpreis} \times \sum_{i=EG}^{n,OG} WNF_i}{100,000} \times \frac{RND}{25}$
<i>S04</i> Gefährdete Sachgüter	Berücksichtigung von Objekten mit besonderer Bedeutung (Archive, Bibliotheken, Museen, kulturelle und religiöse Stätten, etc.)	1,0 bis 10,0
<i>S05</i> Umgebungswirkung	Bewertung der durch einen Gebäudekollaps auftretenden Gefährdung von Personen und Infrastruktur außerhalb des Objekts	1,0 bis 10,0
<b>Schadensrelevanz <i>SR</i></b>		$SR = \sum_{i=01}^{05} S_i$

Die **Tab. 6** nach *Achs und Adam* [2] gibt einen guten Überblick über die einzelnen gebäuderelevanten Parameter mit den jeweiligen minimalen und maximalen Punkten. Die Regelmäßigkeit des Aufrisses stellt sich dabei als die maßgebende Gebäudeeigenschaft heraus, die den Bauwerksparemeter *BP* am meisten beeinflusst. *Achs* [1] konnte mit aufwändigen Versuchen an Wiener Gründerzeithäuser die Wichtigkeit der Zwischenwände im Erdbebenfall bestätigen. Zudem wurde im Rahmen des Forschungsprojekts *SEISMID* [66] das unterschiedliche Schwingungsverhalten der verschiedenen Gebäudeteile bei unregelmäßigen Grundrissen nachgewiesen. Die Regelmäßigkeit des Grundrisses hat allerdings in der Bewertung nach *Achs* [1] nur einen geringen Einfluss auf den Erdbebenwiderstand des Gebäudes, siehe Tabelle 2.13 in *Achs* [1].

**Tab. 6:** Teilbauwerksparemeter des Bauwerksparemters *BP* nach *Achs und Adam* [2].

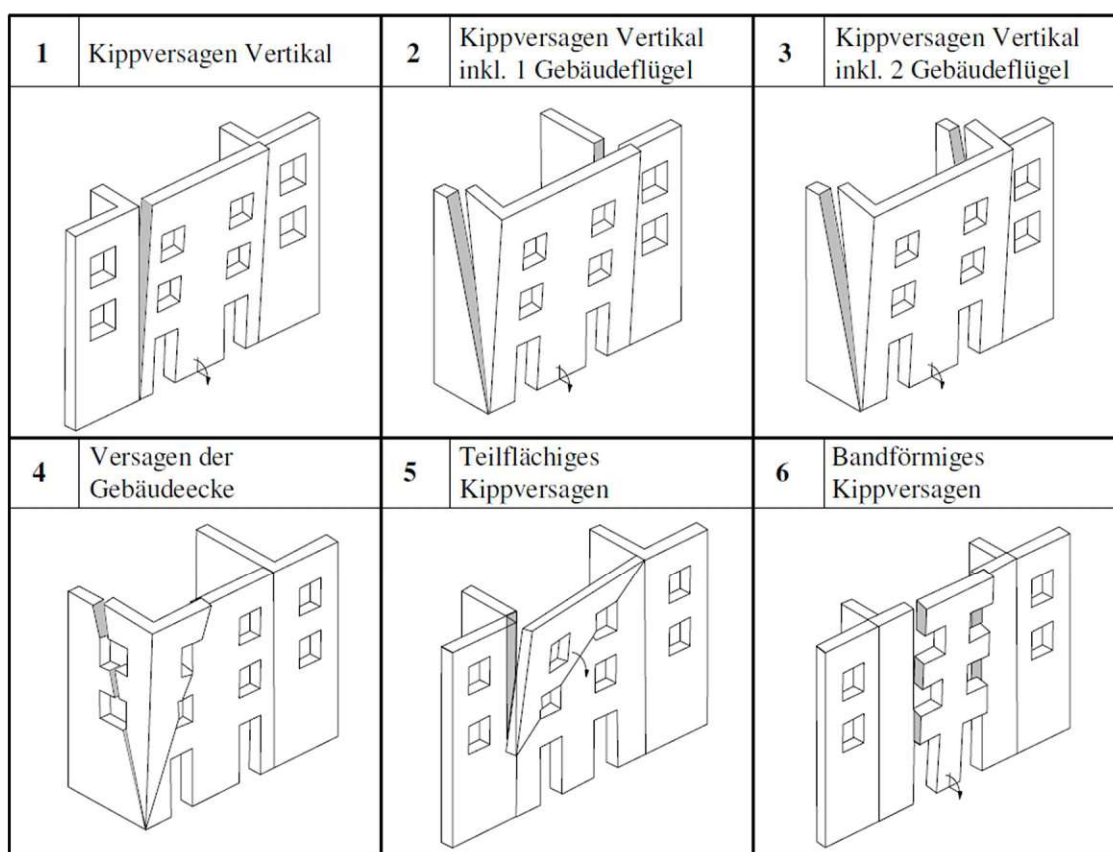
Parameter	Beschreibung	Bandbreite
<i>G01</i> Erdbebenzone	Ermittlung der Erdbebenzone gemäß ÖNORM B 1998-1:2006	1,0 bis 1,5
<i>G02</i> Regelmäßigkeit im Grundriss	Bewertung der Grundrissform hinsichtlich deren Regelmäßigkeit und des Verhältnisses der Abmessungen (L/B)	1,0 bis 10,0
<i>G03</i> Vertikale Regelmäßigkeit	Vertikale Verteilung der Steifigkeit, v.a. bezüglich weicher Geschoße (nachträgliche Umbauten)	1,0 bis 100,0
<i>G04</i> Aussteifung	Verschließungen, Gewölbedecken (falls identifizierbar)	1,0 bis 25,0
<i>G05</i> Lokale Versagensmechanismen	Bestimmung von Lastfaktoren für mögliche lokale Versagensformen (z.B. Versagen einer Gebäudeecke)	1,0 bis 20,0
<i>G06</i> Sekundärstrukturen	Anzahl und Exposition von Kaminen, ausgeprägten Fassadenelementen, Skulpturen	0,0 bis 20,0
<i>G07</i> Baugrund	Lokale Baugrundverhältnisse gemäß ÖNORM EN 1998-1:2005	1,0 bis 10,0
<i>G08</i> Fundierung	Flach-, Tieffundierung, Pfahlfundierung (Holzpfähle)	1,0 bis 10,0
<i>G09</i> Erhaltungszustand	Dachstuhl, Gesimse, Oberste Geschoßdecke, Stiegenhaus, Kellergeschoß, Haustechnik	0,0 bis 30,0
<b>Bauwerksparemeter <i>BP</i></b>		$BP = \sum_{i=01}^{09} G_i$

In Gründerzeithäusern wurden in oberirdischen Geschoßen meist schubweiche Deckenkonstruktionen wie Tramdecken oder Dippelbaumdecken verbaut, siehe Kapitel 3.3.2. ab Seite 28. Üblicherweise wurden dabei Verschließungen aus Eisenprofilen zwischen den Holzbalken und den tragenden Mauerwerkswänden hergestellt, die den Erdbebenwiderstand des Gebäudes maßgebend erhöhen können. Im Zuge einer visuellen Begutachtung ist allerdings das Vorhandensein von Schließen oder der Zustand dieser Elemente nur schwer feststellbar. Wesentlich einfacher identifizierbar sind massive Ziegelgewölbedecken im Erdgeschoß, die ebenfalls die globale Steifigkeit des Gebäudes erhöhen können. Das Vorhandensein bzw. der Zustand der Verschließungen und Gewölbedecken über dem Erdgeschoß werden bei der Bewertung zu einem Teilbauwerksparemeter zusammengefasst, siehe dazu Tabelle 2.18 in *Achs* [1].

Wie bereits in vorherigen Kapiteln beschrieben, beeinflusst auch der Erhaltungszustand bestimmter Bauteile wesentlich die seismische Vulnerabilität des Gesamtbauwerks. Im Zuge der Bewertung sollen vor allem der Dachstuhl inkl. Gesimse, die oberste Geschoßdecke, das Treppenhaus, die Haustechnik sowie die tragenden Elemente in den Regelgeschossen, im Erdgeschoß und Kellergeschoß auf mögliche Schäden oder Wassereintritt untersucht und beurteilt werden. Zusätzlich werden die Schäden zueinander unterschiedlich gewichtet, siehe dazu Tabelle 2.25 in *Achs* [1].

Ein besonderes Merkmal der Gründerzeithäuser sind die meist aufwändig hergestellten Fassaden und Gesimse. Die einzelnen Fassadenelemente sowie Schornsteine, Brüstungen und Skulpturen zählen zu den nichttragenden Bauelementen und sind im Erdbebenfall besonders gefährdet. Im Zuge der Bewertung wird neben der Anzahl dieser Sekundärstrukturen auch das Gefahrenpotential im Versagensfall beurteilt, siehe dazu Tabelle 2.21 in *Achs* [1].

Ein weiterer Strukturparameter berücksichtigt die lokalen Versagensmechanismen, die vorrangig an historischen Mauerwerksbauten nach Erdbebenereignissen beobachtet wurden. Gründe dafür sind meist lokale Schwachstellen und innere Gebäudeschäden. Die Grundlage für diesen Strukturparameter bilden die Arbeiten von *D'Ayala und Speranza* [24], [25], die insgesamt neun verschiedene Versagensmechanismen identifizieren und mit einem Lastfaktor beschreiben. Die **Abb. 28** aus *Achs* [1] zeigt die lokalen Versagensformen, die im Zuge der Gebäudewertung berücksichtigt werden. Die Ermittlung der Lastfaktoren und in weiterer Folge des Teilbauwerksparmeters kann aus Tabelle 2.19 und 2.20 in *Achs* [1] entnommen werden.



**Abb. 28:** Berücksichtigte lokale Versagensmechanismen nach *D'Ayala und Speranza* [24], [25] und nach *Achs* [1].



Vergleichsweise wenig Einfluss auf das Gesamtergebnis haben unter anderem die Seismizität des Standorts (Erdbebenzonen gemäß ÖNORM B 1998-1:2006), die Untergrundeigenschaften (Baugrundklassen gemäß ÖNORM EN 1998-1:2005) oder die Art der Fundierung, sofern keine außergewöhnlichen Standortbedingung, wie rutschgefährdete Hänge, vorherrschen. Bei der Art der Fundierung wird zwischen Flach- und Pfahlfundierungen unterschieden, wobei in den meisten Fällen die genaue Fundamentausbildung nur mit erhöhtem Aufwand mit Probeschürfen ermittelt werden kann.

Für die Anwendung der Schnellbewertung auf einen großen Gebäudebestand wurde ein standardisiertes Datenblatt erstellt, das den Anwender bei der visuellen Begutachtung unterstützt. Das Datenblatt ist in **Abb. 29** nach *Achs* [1] dargestellt.

Protokoll Gebäudeaufnahme		Bearb.:		
		Datum:		lfd.Nr.
		Uhrzeit:		
Adresse:	Straße / Nr.	<input type="text"/>		
	PLZ	<input type="text"/>		
Fotonummer:	von:	<input type="text"/>	bis:	<input type="text"/> 01)
Gebäudenutzung:	Wohnnutzung	Geschäftslokal	% W	% G
	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/> 02)
GPS-Koordinaten:	<input type="text"/>			
Errichtungsjahr:	<input type="text"/> 03)			
Konstruktionsart:	Mauerwerk	<input type="text"/>		
	Stahlbeton	<input type="text"/>		
	Stahl-Skelett	<input type="text"/>		
	Sonstige:	<input type="text"/>		
Personen	Anzahl der Wohneinheiten	<input type="text"/> 05)		
	Mitarbeiter Lokale/Geschäfte	<input type="text"/> 06)		
Typologie Grundriss	Eckgebäude	<input type="text"/> 07)		
	Angrenzende Gebäude	rechts	<input type="text"/> 08)	
		links	<input type="text"/> 09)	
	Rechteckiger Grundriss	<input type="text"/> 10)		
	Abstand z u Straßenverkehrsflächen	<input type="text"/> 11)		
Typologie Aufriss	Anzahl der Geschoße inkl. EG	<input type="text"/> 12)		
	Gebäudehöhe	<input type="text"/> 13)		
	Geschäftslokal(e) im EG	<input type="text"/> 14)		
	Ausgebautes Dachgeschoß	<input type="text"/> 15)		
	Weiches Geschoß	<input type="text"/> 16)		
Fassade (strassenseitig)	Anzahl der Fenster und Türen	<input type="text"/> 17)		
	Fassadenbreite	<input type="text"/> 18)		
	Fassadengestaltung	keine	<input type="text"/> 19)	
		schlicht	<input type="text"/>	
ausgeprägt		<input type="text"/>		
detailliert		<input type="text"/>		
Sekundärstrukturen	Kamine (über Dach)	<input type="text"/> <input type="text"/> <input type="text"/> <input type="text"/> 20)		
		keine < 3 3-6 > 6		
	Ausgeprägte Fassadenelemente	<input type="text"/> <input type="text"/> <input type="text"/> <input type="text"/> 21)		
Skulpturen / Statuen	keine < 3 3-6 > 6	<input type="text"/> <input type="text"/> <input type="text"/> <input type="text"/> 22)		
		keine vereinzelt ausgeprägt		
	Erhaltungszustand	23) Risse in Fassade	<input type="text"/>	<input type="text"/>
24) Durchfeuchtung / Ausblühung		<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>
25) Schäden Dachkonstruktion		<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>
Besonderheiten	26)	<input type="text"/>		
Unregelmäßigkeiten				

Abb. 29: Standardisiertes Datenblatt zur großflächigen Anwendung der Bewertung nach Achs [1].

### 5.3.2 Gefährdungsklassen

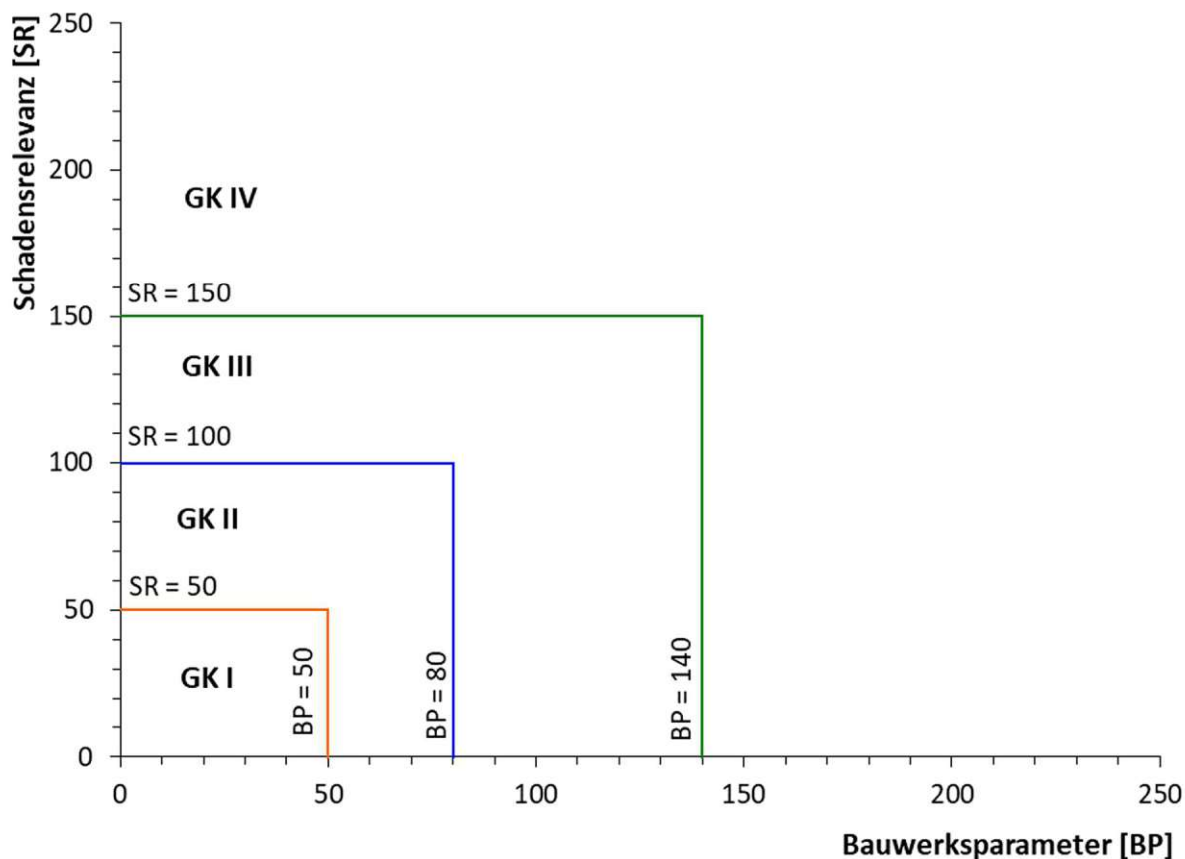
Nach der visuellen Begutachtung können die betrachteten Objekte auf Basis einer Kombination aus der Schadensrelevanz  $SR$  und dem Bauwerksparameter  $BP$  in vier Risikoklassen oder Gefährdungsklassen (GK I bis GK IV) eingestuft werden. Die definierten Grenzkriterien für die einzelnen Gefährdungsklassen werden in **Tab. 7** aus *Achs* [1] dargestellt. Der Bauwerksparameter ist dabei in erster Linie von der vertikalen Regelmäßigkeit abhängig, die Schadensrelevanz wird hauptsächlich von der Anzahl der gefährdeten Personen bestimmt.

**Tab. 7:** Übersicht der Gefährdungsklassen nach *Achs* [1].

	Gefährdungsklassen			
	GK I	GK II	GK III	GK IV
Beschreibung	Geringe Gefährdung	Geringe bis mittlere Gefährdung	Mittlere bis hohe Gefährdung	Sehr hohe Gefährdung
Parameter $G03$ (Vertikale Regelmäßigkeit)	< 20,0	20,0	50,0	100,0
$\Sigma$ ( $G01, G02, G04$ bis $G09$ ) (sonstiger Gebäudezustand)	< 30,0	> 30,0	> 30,0	> 40,0
Parameter $S01$ (Gefährdete Personen)	< 45,0	> 45,0	> 90,0	> 140,0
$\Sigma$ ( $S02$ bis $S05$ ) (sonstige Schadensrelevanz)	$\leq 5,0$	> 5,0	> 5,0	> 5,0
Klassifizierungsbedingung	$BP < 50$ und $SR < 50$	$80 > BP \geq 50$ und $SR < 100$ Oder $100 > SR \geq 50$ Und $BP < 80$	$140 > BP \geq 80$ und $SR < 150$ Oder $150 > SR \geq 100$ Und $BP < 140$	$BP \geq 140$ oder $SR \geq 150$

Gemäß **Tab. 7** wird demnach das seismische Risiko eines betrachteten Gebäudes mit der Gefährdungsklasse I als gering eingestuft, ein Objekt in der Gefährdungsklasse IV andererseits ist im Erdbebenfall mit sehr hohem Risiko verbunden. Zusätzlich zu den Gefährdungsklassen werden von *Achs* [1] Bauwerksklassen über die Bauwerksparameter  $BP$  und Schadensklassen über die Schadensrelevanz  $SR$  definiert. Die in **Tab. 7** dargestellten Grenzen bleiben dabei unverändert.

Die **Abb. 30** nach *Achs* [1] zeigt ein Diagramm mit den unterschiedlichen Gefährdungsklassen der Gebäudebewertung.



**Abb. 30:** Abgrenzung der Gefährdungsklassen in Abhängigkeit vom Bauwerksparameter  $BP$  und der Schadensrelevanz  $SR$  nach *Achs* [1].

Um aus der ermittelten Gefährdungsklasse auf potenzielle Gebäudeschäden im Erdbebenfall schließen zu können, wurde eine Korrelation zwischen dem Gebäudezustand und Schäden aus vergangenen Erdbeben ermittelt. In der Arbeit von *Achs* [1] werden dafür die detaillierten Schadensaufnahmen des verheerenden  $M_w$  6,3 Erdbebens von L'Aquila (Italien) aus dem Jahr 2009 herangezogen. Auch hier wird die vertikale Regelmäßigkeit als maßgebende Struktureigenschaft in Hinblick auf die eingetretenen Gebäudeschäden identifiziert. Auf Basis der Schadensklassifikation der EMS-98 [32] (siehe dazu auch **Tab. 3** auf Seite 18) wurden den einzelnen Bauwerksklassen, die ausschließlich den Gebäudezustand beschreiben, jeweils eine Schadensklasse zugewiesen, siehe **Tab. 8** nach *Achs* [1].

Für eine eindeutige Trennung der einzelnen Schadenklassen wurde in weiterer Folge die Grenzlinie zwischen den Bauwerksklassen II und III verschoben, siehe **Tab. 9**. Es muss dem Anwender allerdings klar sein, dass eine konkrete Abgrenzung sowohl zwischen den Schadenklassen 3 und 4 als auch den Bauwerksklassen II und III nur bedingt möglich ist.

**Tab. 8:** Korrelation der Gebäudebewertung mit den Schadensklassen der EMS-98 [32] nach *Achs* [1].

Gefährdungs- klasse	Bauwerksparameter inkl. Beschreibung	Schadensklasse nach EMS-98 [32]
I	$BP < 50$ Hohe vertikale Regelmäßigkeit Sehr guter Gebäudezustand	2 mäßig
II	$BP \geq 50$ Geringe vertikale Unregelmäßigkeit Guter Gebäudezustand	2 bis 3 mäßig bis stark
III	$BP \geq 80$ Mäßige vertikale Unregelmäßigkeit (nachträgliche Schwächung der Steifigkeit) Mäßiger Gebäudezustand	3 bis 4 stark bis sehr stark
IV	$BP \geq 140$ Hohe vertikale Unregelmäßigkeit (weiches Geschoß) Schlechter Gebäudezustand	4 bis 5 sehr stark bis Zerstörung

**Tab. 9:** Korrelation der Bauwerksklassen mit den Schadensklassen der EMS-98 [32] nach *Achs* [1].

Bauwerksparameter inkl. Beschreibung	Schadensklasse nach EMS-98 [32]
$BP < 50$ Hohe vertikale Regelmäßigkeit Sehr guter Gebäudezustand	2 mäßig
$BP \geq 50$ Geringe vertikale Unregelmäßigkeit Guter Gebäudezustand	3 stark
$BP \geq 100$ Mäßige vertikale Unregelmäßigkeit (nachträgliche Schwächung der Steifigkeit) Mäßiger Gebäudezustand	4 sehr stark
$BP \geq 140$ Hohe vertikale Unregelmäßigkeit (weiches Geschoß) Schlechter Gebäudezustand	5 Zerstörung



## 5.4 RVS gemäß FEMA P 154 [28]

Das in der FEMA P-154:2015 [28] vorgestellte RVS-Verfahren wurde entwickelt um das seismische Risiko eines großen Gebäudebestandes auf schnelle und kostengünstige Art und Weise zu bewerten und potenziell erdbebengefährdete Gebäude zu identifizieren. Die ausschließlich visuelle Bewertung soll mit geringem Aufwand und minimalem Zugang zu den zu untersuchenden Objekten erfolgen können. So kann diese effektive Methode als ersten Schritt in einem umfassenden Erdbebenmanagementprogramm eingesetzt werden, womit festgestellt werden kann, welche Gebäude eine detailliertere Untersuchung erfordern. Darüber hinaus enthält die FEMA P-154 [28] wichtige Informationen zur Planung und Verwaltung eines RVS-Programms. Dieses seit 1988 bestehende Verfahren wurde schon in vielen Großversuchen erprobt und stellt daher eine wichtige Grundlage zur Gebäudebewertung in vielen hoch seismischen Ländern dar.

Im Rahmen der zweistufigen, visuellen Begutachtung soll für jedes Gebäude ein vorgefertigter Datenerfassungsbogen ausgefüllt werden, der es erlaubt den Gebäudezustand ohne statische Berechnungen an Ort und Stelle zu ermitteln. Abhängig vom jeweiligen Gebäudetyp, von der Erdbebengefährdung des Standorts sowie von verschiedenen Bauwerkseigenschaften wird eine Bauwerkspunktzahl berechnet, die direkt auf die Versagenswahrscheinlichkeit des Gebäudes im Erdbebenfall schließen lässt.

Die erste Seite des Erhebungsformulars stellt die erste Stufe (Level 1) der Gebäudebewertung dar und nimmt in etwa 15 bis 30 Minuten pro Objekt in Anspruch. Das detailliertere Datenerfassungsblatt auf der zweiten Seite bildet die zweite Stufe (Level 2) der Bewertung und erfordert ein umfangreicheres Fachwissen des Anwenders. In beiden Stufen wird eine Punktzahl des Gebäudes ermittelt.

Die FEMA P-154 [28] definiert insgesamt fünf verschiedene Erdbebenzonen (Region of Seismicity), wobei für jedes dieser Gebiete ein eigenes RVS-Datenerhebungsformular entwickelt wurde. Der Anhang der FEMA P-154 enthält dafür eine detaillierte Karte Amerikas und weist den einzelnen Verwaltungsbezirken eine der fünf seismischen Zonen (*Low, Moderate, Moderately High, High, und Very High*) zu. Die Einteilung in die seismischen Regionen basiert dabei auf der spektralen Beschleunigungsantwort (siehe Tabelle 2-2 der FEMA P-154:2015 [28]). Die FEMA P-154 stellt nur seismische Karten für Amerika zur Verfügung, daher ist eine Anwendung auf Gebäude außerhalb der USA mit erhöhtem Aufwand verbunden, siehe Kapitel 6.3.2 ab Seite 73. Sowohl die Erdbebenzonenkarte Amerikas als auch die Datenerfassungsbögen der zweistufigen Gebäudebewertung für die jeweiligen Erdbebenzonen finden sich in der FEMA P-154:2015 [28] wieder.

Da die Auswirkungen eines Erdbebens sehr stark von der Baugrundklasse des Standorts abhängen, definiert die FEMA P-154 [28], abhängig von der durchschnittlichen Scherwellengeschwindigkeit  $v_{s,30}$ , insgesamt sechs verschiedene Baugrundklassen. Die Einteilung der Bodenarten ist dabei vergleichbar mit den Baugrundklassen im Eurocode 8 (ÖNORM EN 1998-1:2013 [6]), siehe **Tab. 10**. Die in Amerika am häufigsten anzutreffenden Bodentypen sind die Baugrundklassen C und D (gemäß FEMA P-154 [28]). Aus diesem Grund werden diese Bodentypen als Basis für die Bewertung herangezogen, wobei es Zuschläge bzw. Abschläge für bessere bzw. schlechtere Baugrundklassen gibt.

**Tab. 10:** Gegenüberstellung der Baugrundklassen gemäß FEMA 154-P:2015 [28] und gemäß ÖNORM EN 1998-1:2013 [6]. Die Zuteilung erfolgt auf Basis der durchschnittlichen Scherwellengeschwindigkeit  $v_{s,30}$ .

Baugrundklasse gemäß FEMA 154-P:2015 [28]	Bezeichnung gemäß FEMA 154-P:2015 [28]	Durchschnittliche Scherwellengeschwindigkeit $v_{s,30}$	Baugrundklasse gemäß ÖNORM EN 1998-1:2013 [6]
A	Harter Fels	> 1500 m/s	-
B	Fels	800 – 1500 m/s	A
C	Sehr dichter Boden oder weicher Fels	360 – 800 m/s	B
D	Steifer Boden	180 – 360 m/s	C
E	Weicher Lehmboden	< 180 m/s	D
F	Schlechter Boden (z.B. verflüssigbarer Boden)	-	E

### 5.4.1 Grundlegende Parameter

Im Rahmen der Gebäudebewertung ist der erste Schritt, festzustellen, in welcher Erdbebenzone sich das zu untersuchende Objekt befindet, damit der passende Bewertungsbogen gewählt werden kann. Der Datenerfassungsbogen enthält ausreichend Platz zur Dokumentation aller Informationen, die während der visuellen Begutachtung erfasst werden und für die Bewertung des Gebäudes erforderlich sind. Das Bewertungsschema kann grundsätzlich für eine große Anzahl an unterschiedlichen Bauwerkstypen verwendet werden, wobei die im Zuge dieser Arbeit untersuchten historischen Gründerzeithäuser der Kategorie „Unreinforced masonry bearing-wall buildings - URM“ (Gebäude aus unbewehrtem Mauerwerk) zuzuordnen sind.

Die folgende **Tab. 11** zeigt einen Ausschnitt der ersten Seite des Bewertungsbogens für die Erdbebenzone „Very High“, wobei nur die für Gründerzeithäuser relevante Spalte gezeigt wird. Es wird in Abhängigkeit von der jeweiligen seismischen Vulnerabilität jedem Gebäudetyp ein „Basic Score“ zugeordnet, der die Bewertungsgrundlage darstellt. Basierend auf den während der Erhebung gesammelten Informationen, werden in weiterer Folge dem Basiswert Punkte abgezogen oder aufsummiert.

**Tab. 11:** Ausschnitt des RVS Level 1 Datenblatts für eine seismische Region der Stufe „VERY HIGH“ nach FEMA P-154 [28].

<b>BASIC SCORE, MODIFIERS, AND FINAL LEVEL 1 SCORE, <math>S_{L1}</math></b>	
FEMA BUILDING TYPE	URM
Basic Score	0,9
Severe Vertical Irregularity, $V_{L1}$	-0,6
Moderate Vertical Irregularity, $V_{L1}$	-0,3
Plan Irregularity, $P_{L1}$	-0,3
Pre-Code	0,0
Post-Benchmark	NA
Soil Type A or B	0,1
Soil Type E (1-3 stories)	0,0
Soil Type E (> 3 stories)	0,0
Minimum Score, $S_{MIN}$	0,2
<b>FINAL LEVEL 1 SCORE, <math>S_{L1} \geq S_{MIN}</math>:</b>	

Die maßgebenden Parameter der Level 1 RVS-Methode sind einerseits die vertikale Unregelmäßigkeit ( $V_{L1}$ ) und andererseits die Unregelmäßigkeit im Grundriss ( $P_{L1}$ ). Da die vertikale Unregelmäßigkeit eines Gebäudes den größten Einfluss auf den Erdbebenwiderstand hat, unterscheidet die FEMA P-154 [28] hier zusätzlich zwischen mäßiger und schwerer Unregelmäßigkeit, was sich in der Bewertung auf die Punktzahl auswirkt. Die in der FEMA P-154 beschriebenen vertikalen Unregelmäßigkeiten sind beispielsweise weiche Geschoße (schwer), nicht übereinander angeordnete tragende Wände (schwer) oder aufgeteilte Geschoße mit „Split Levels“ (mäßig). Als Unregelmäßigkeit im Grundriss werden jene Grundrissformen bezeichnet, die im Erdbebenfall anfällig gegenüber Torsion sind. Dazu zählen insbesondere Steifigkeits-Exzentrizitäten, unregelmäßige Grundrissformen (z.B. L-, T-, C-förmig) oder nicht-parallele Grundrisse mit Wandebenen, die nicht senkrecht zueinander stehen.

Zusätzlich wird von der FEMA P-154 ein Minimalwert ( $S_{MIN}$ ) für das Endergebnis definiert. So soll verhindert werden, dass bei einer kombinierten Wirkung von mehreren Faktoren das Gebäude mit einer endgültigen Punktzahl von Null oder einer negativen Zahl bewertet wird, was bedeuten würde, dass das Objekt im Erdbebenfall zu mehr als 100 % zerstört wird. Diese Mindestpunktzahl berücksichtigt die ungünstigste Kombination aus Bodenart, vertikale und planmäßige Unregelmäßigkeiten sowie Gebäudealter [28].

Die zweite Stufe der Gebäudebewertung (Level 2) ist detaillierter und es werden mehr Bedingungen erfasst als bei der ersten Beurteilungsstufe. Die Level 2 RVS-Methode basiert dabei auf dem Ergebnis der ersten Stufe und berücksichtigt zusätzlich das Vorhandensein von erdbebengefährdeten Giebelwänden und ein potenzielles „Pounding“ bei zwei benachbarten Gebäuden. Darüber hinaus werden die verschiedenen vertikalen Unregelmäßigkeiten und Unregelmäßigkeiten im Grundriss genauer behandelt. Das Endergebnis der zweiten Stufe wird gleich wie in der Level 1 Bewertung durch Aufsummieren der Modifikationsparameter und dem Basiswert ermittelt.

Sowohl in der ersten als auch in der zweiten Stufe der Datenerhebung werden zusätzlich Informationen über potenziell gefährdete, nicht tragende Bauteile wie Kamine, Brüstungen etc. gesammelt. Diese Bauteile beeinflussen allerdings nicht das Endergebnis der Gebäudebewertung.

## 5.4.2 Ergebnis

Basierend auf den Informationen der Datenerhebung wird eine Punktzahl ermittelt, die grundsätzlich Aufschluss über die Versagenswahrscheinlichkeit des Gebäudes im Erdbebenfall gibt. Die FEMA P-154:2015 [28] bezieht sich dabei auf das so genannte *Risk-targeted Maximum Considered Earthquake*  $MCE_R$  (auf Deutsch: risikobezogenes maximal berücksichtigtes Erdbeben) mit einer Wiederkehrperiode von 2.475 Jahren (Überschreitungswahrscheinlichkeit von 2 % in 50 Jahren), wobei nur zwei Drittel der Werte für die Bodenbeschleunigung herangezogen werden.

Je höher die ermittelte Punktzahl ist, desto widerstandsfähiger ist das betrachtete Gebäude gegenüber Erdbebenlasten. Ein Endergebnis von 3 bedeutet beispielsweise, dass das Objekt mit einer Wahrscheinlichkeit von 1 zu  $10^3$  bzw. 1 zu 1.000 bei  $MCE$ -Bodenbewegungen einstürzt. Die Schwierigkeit bei RVS-Methoden ist immer, einen akzeptablen Grenzwert festzulegen. Die FEMA P-154 schlägt dafür ein Endergebnis von 2 vor, also eine Versagenswahrscheinlichkeit von 1 zu  $10^2$  bzw. 1 zu 100. Bei Betrachtung der Datenerfassungsbögen ist zu erkennen, dass dieser Wert bei Gebäuden der Kategorie „URM“, zu der auch die Gründerzeithäuser zu zählen sind, nur in der Erdbebenzone „LOW“ erreicht werden kann.

Auf Basis der ermittelten RVS-Punktzahl, kann direkt das Schadenspotential des untersuchten Gebäudes im Falle eines  $MCE_R$  abgeschätzt werden, siehe **Tab. 12**. Die Grundlage für die Schadensklassifikation bildet dabei die EMS-98 [32].

**Tab. 12:** Schadenspotential basierend auf der RVS-Punktzahl nach *Nanda und Majhi* [54].

RVS-Punktzahl	Schadenspotential (Schadensklassen gemäß EMS-98 [32])
$S < 0,3$	Hohe Wahrscheinlichkeit eines Schadens der Stufe 5 sehr hohe Wahrscheinlichkeit eines Schadens der Stufe 4
$0,3 < S < 0,7$	Hohe Wahrscheinlichkeit eines Schadens der Stufe 4 sehr hohe Wahrscheinlichkeit eines Schadens der Stufe 3
$0,7 < S < 2,0$	Hohe Wahrscheinlichkeit eines Schadens der Stufe 3 sehr hohe Wahrscheinlichkeit eines Schadens der Stufe 2
$2,0 < S < 2,5$	Hohe Wahrscheinlichkeit eines Schadens der Stufe 2 sehr hohe Wahrscheinlichkeit eines Schadens der Stufe 1
$S > 2,5$	Wahrscheinlichkeit eines Schadens der Stufe 1



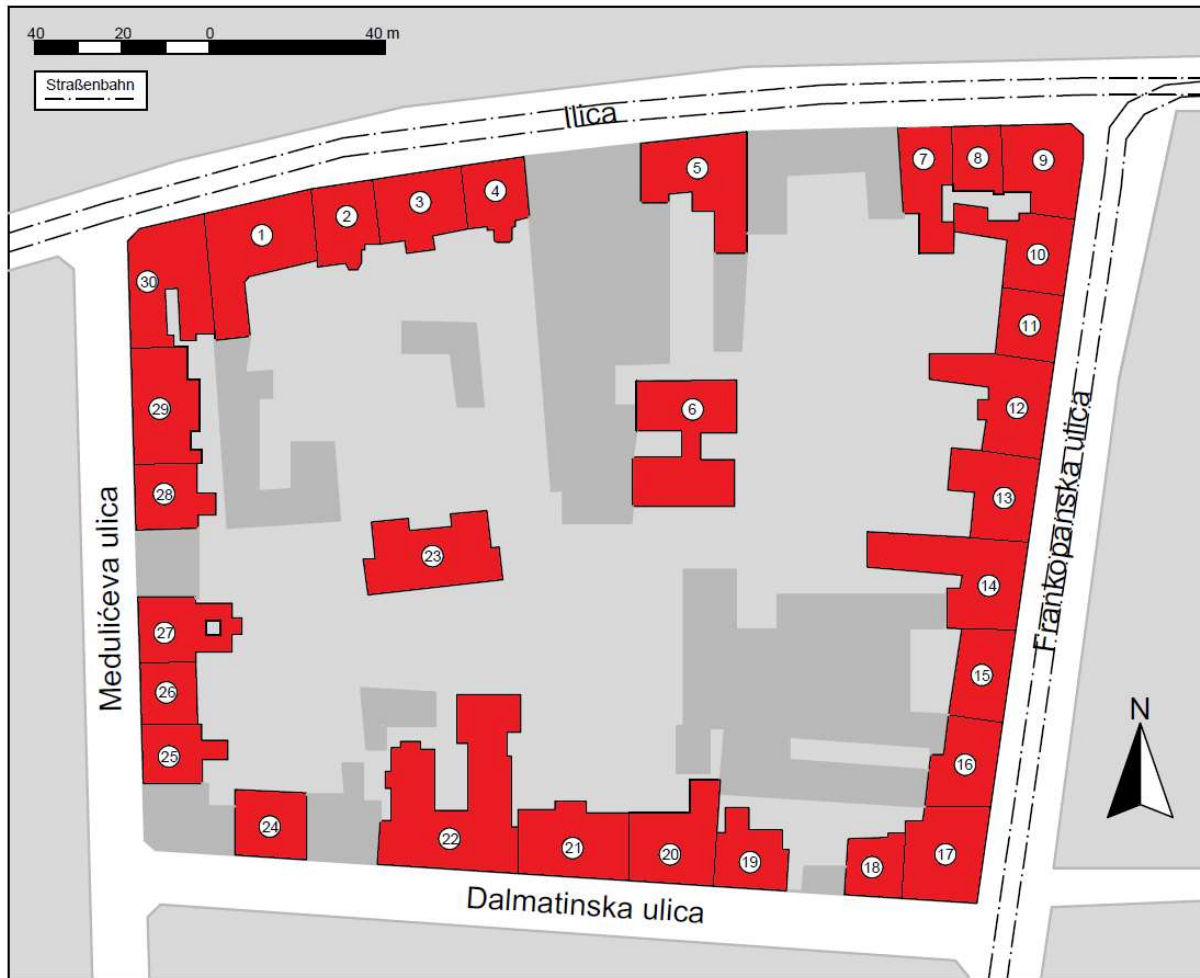
## 6 Anwendung auf den Zagreber Gründerzeitbestand

Im Zuge dieser Arbeit wurde ein Häuserblock in der Zagreber Altstadt ausgewählt, der aufgrund des Erdbebens am 22. März 2020 erhebliche Schäden zu verzeichnen hatte und den Bestand der historischen Gebäude aus der Epoche der Österreichisch-Ungarischen Monarchie repräsentiert. Im ersten Schritt wird die seismische Schadensanfälligkeit dieser Zagreber Gründerzeithäuser sowohl auf der Grundlage der Schnellbewertungsmethode nach *Achs* [1] als auch auf Basis des RVS-Verfahrens der international oft angewandten FEMA P-154:2015 [28] beurteilt. Dafür werden hauptsächlich historische und aktuelle Planunterlagen sowie Naturaufnahmen verwendet. Abschließend werden die Ergebnisse der Schnellbewertungsmethoden miteinander verglichen, analysiert und den beobachteten Schäden gegenübergestellt.

### 6.1 Gebäudewahl

Insgesamt wurden 30 Gebäude eines Häuserblocks ausgewählt, die sich in der historischen Altstadt (Bezirk „Donji Grad“) befinden und größtenteils vor 1918 errichtet wurden. Es wurden sowohl freistehende Objekte als auch Gebäude an der Straßenfront untersucht, siehe **Abb. 31**. Die Gebäude dieses Wohnblocks sind repräsentativ für die Zagreber Gründerzeithäuser und sind in ihrer Bauweise ident mit den Wiener Gründerzeithäusern dieser Epoche, siehe Kapitel 3.

In **Tab. 13** sind die gewählten Objekte aufgelistet, wobei für die Beurteilung der seismischen Schadensanfälligkeit ein hohes Maß an Informationen erforderlich ist. Die Konstruktionen haben zwei bis vier Geschoße, der Großteil davon ist zumindest teilweise unterkellert. Darüber hinaus besitzen die Gebäude zum Teil große strukturelle Unregelmäßigkeiten sowohl im Grund- als auch im Aufriss, was die Schadensanfälligkeit im Erdbebenfall maßgeblich erhöhen kann.



**Abb. 31:** Untersuchter Häuserblock: die ausgewählten Gebäude sind rot gekennzeichnet (Objekt-Nr. gemäß Tab. 13).

**Tab. 13:** Auswahl der Gebäude.

<b>Objekt Nr.</b>	<b>Baujahr</b>	<b>Geschoß- anzahl*</b>
Objekt 1	1926	3
Objekt 2	1887	3
Objekt 3	1887	3
Objekt 4	1887	3
Objekt 5	1866	3
Objekt 6	1912	4
Objekt 7	1899	3
Objekt 8	1894	4
Objekt 9	1894	4
Objekt 10	1893	3
Objekt 11	1891	3
Objekt 12	1887	3
Objekt 13	1889	3
Objekt 14	1932	3
Objekt 15	1916	3
Objekt 16	1886	3
Objekt 17	1909	3
Objekt 18	1909	4
Objekt 19	1911	4
Objekt 20	1892	3
Objekt 21	1889	2
Objekt 22	1926	4
Objekt 23	1917	3
Objekt 24	1922	3
Objekt 25	1886	3
Objekt 26	1886	2
Objekt 27	1897	3
Objekt 28	1889	2
Objekt 29	1898	3
Objekt 30	1898	3

\*Exklusive Kellergeschoß

## 6.2 Bewertung und Beurteilung

Die ausgewählten Gebäude wurden anhand von umfangreichen Gebäudedaten, historischen und alten Bauplänen und Naturaufnahmen bewertet und beurteilt. Grundsätzlich werden seismische Schnellbewertungsmethoden dazu verwendet, um vor einem Erdbeben potenziell gefährdete Gebäude zu identifizieren und gegebenenfalls Sanierungs- oder Verstärkungsmaßnahmen anzuordnen. Im Zuge dieser Arbeit erfolgt die Beurteilung der Objekte erst nach dem Erdbeben. Aus diesem Grund können beispielsweise Parameter, die den Erhaltungszustand eines Gebäudes vor einem Erdbeben beschreiben sollen, wie das bei der Methode nach *Achs* [1] der Fall ist, nur abgeschätzt werden. Generell wurde so vorgegangen, dass einzelne Kennwerte, die nicht eindeutig identifiziert werden konnten, auf der sicheren Seite liegend angenommen wurden.

## 6.3 Auswertung und Ergebnisse

### 6.3.1 Methode nach *Achs* [1]

Bei der seismischen Bewertungsmethode von Gründerzeithäusern nach *Achs* [1] können manche Parameter mit einer rein visuellen Begutachtung nicht ausreichend ermittelt werden. Darüber hinaus konnten im Rahmen dieser Arbeit die Bewertungsparameter nur aus Plänen und Naturaufnahmen beurteilt werden. Im folgenden Abschnitt werden zunächst, die im Zuge der Gebäudewertung getroffenen Annahmen kurz zusammengefasst, sowie die Vorgehensweise bei der Beurteilung der Objekte erläutert. Darauf aufbauend werden die Ergebnisse der untersuchten Objekte ausführlich beschrieben.

#### Schadensrelevanz *SR* – Teilschadensparameter:

- Bei der Ermittlung der *gefährdeten Personen (S01)* wird die Anwohnerzahl gemäß *Achs* [1] mit der Anzahl der Wohnungen mit zwei multipliziert angenommen, wobei hier die Wohnungsanzahl aus den Planunterlagen abgeschätzt wurde. Des Weiteren wird bei Geschäftseinheiten im Erdgeschoß oder anderen Gebäudenutzungen die Personenanzahl basierend auf der Größe, sowie der Nutzung individuell festgelegt.
- *Bedeutungskategorie (S02)* und *Gefährdete Sachgüter (S04)*: Ein Großteil der untersuchten Gebäude wird hauptsächlich für Wohnzwecke genutzt und kann daher der Bedeutungskategorie II (gemäß ÖNORM EN 1998-1:2005) zugeordnet werden. Auch aus diesem Grund kann bei diesen Objekten eine geringe Gefährdung für Sachgüter angenommen werden. Lediglich die Objekte Nr. 14 (Tourismusschule) und Nr. 15 (Theater) können mit der Bedeutungskategorie III bewertet werden, wobei die Tourismusschule (Nr. 14) eine mittlere Gefährdung und das Theater (Nr. 15) eine hohe Gefährdung für Sachgüter darstellen, siehe dazu Tabelle 2.2 und 2.5 in *Achs* [1].
- Der *Gebäudewert (S03)* wird auf Basis der Wohnnutzfläche *WNF* [m<sup>2</sup>], dem Kaufpreis [€/m<sup>2</sup>] und der Restnutzungsdauer *RND* ermittelt. Der Kaufpreis wird mit 27.144,43 kn/m<sup>2</sup> [56] bzw. 3.603,83 €/m<sup>2</sup> (Wechselkurs: 1 kn = 0,13 €, Stand 31.10.2022) für eine Eigentumswohnung im Stadtkern abgeschätzt. Zum Vergleich dazu, stellt *Achs* [1] in seiner Arbeit die Immobilienpreise von Bestandswohnungen in Wien aus dem Jahr 2009 zur Verfügung. Die Preise für eine Altbauwohnung belaufen sich dabei in Abhängigkeit von der Lage lediglich bei rund 1200 bis 3200 €/m<sup>2</sup>. Da die momentanen Immobilienpreise in Zagreb auf einem ähnlichen Niveau wie in Wien im Jahr 2009 liegen muss dieser Parameter nicht weiter angepasst werden. Die immense Wertsteigerung am Immo-



bilienmarkt in den letzten Jahren, bewirkt im Zuge der Gebäudebeurteilung allerdings eine Zunahme dieses Bewertungsparameters. Die Restnutzungsdauer *RND* ist einerseits vom Baujahr des Gebäudes und andererseits vom Ausstattungsgrad der Wohneinheiten abhängig, siehe dazu Tabelle 2.4 in *Achs* [1]. Das Baujahr kann dabei aus den zur Verfügung gestellten Planunterlagen abgelesen werden, die Ausstattung der Wohneinheiten wurde auf den Bauplänen basierend abgeschätzt.

- *Umgebungswirkung (S05)*: Die freistehenden Objekte innerhalb des Gebäudeblocks (Nr. 6 und Nr. 23) weisen prinzipiell nur eine geringe Gefährdung für die Umgebung auf, da bei einem Teil- bzw. Totalkollaps dieser Gebäude keine Passanten gefährdet werden, siehe **Abb. 31**. Das öffentliche Verkehrsnetz zählt zu den wichtigen Infrastruktureinrichtungen und aus diesem Grund werden jenen Objekten, die sich im Nahbereich der Straßenbahnlinien befinden, eine hohe Gefährdung für die Umgebung zugewiesen. Die übrigen Gebäude an der Straßenfront gefährden hingegen Passanten durch beispielsweise herabfallenden Fassadenteilen, siehe Tabelle 2.6 in *Achs* [1].

### Bauwerksparameter *BP* – Teilbauwerksparameter:

Die untersuchten Gebäude befinden sich alle im selben Häuserblock (siehe **Abb. 31**), daher werden die nachfolgenden Parameter *G01* (Erdbebenzone), *G07* (Baugrund) und *G08* (Fundierung) für alle Objekte gleich beurteilt.

- Basierend auf der kroatischen Erdbebennorm (HRN EN 1998-1:2011 [18]) kann die *Erdbebenzone (G01)*, in der sich die betrachteten Gebäude befinden, festgestellt werden. Mit einem Referenz-Spitzenwert der Bodenbeschleunigung  $a_{gR}$  in Höhe von  $2,55 \text{ m/s}^2$  liegt dieser Wert allerdings außerhalb der von *Achs* [1] zur Verfügung gestellten Bewertungstabelle. Aus diesem Grund ist auf eine Punktzahl von 10,0 extrapoliert worden, wobei *Achs* [1] diesem Parameter mit einer maximalen Punktzahl von 1,5 jedoch relativ wenig Gewichtung zuschreibt.
- In der Altstadt Zagrebs sind vor allem die Baugrundklassen B1 und C (gemäß ÖNORM EN 1998-1:2013 [6]) dominierend, wie *Markušić et al.* [49] in ihrer Arbeit beschreiben. Daher wird bei der Gebäudebewertung auf der sicheren Seite liegend für alle untersuchten Objekte die Baugrundklasse C gewählt und der Parameter *G07* mit einer Punktzahl von 5,0 bewertet.
- Wie bereits in früheren Kapiteln beschrieben, kann die exakte Fundamentausbildung nur unter erhöhtem Aufwand an Ort und Stelle mit Probeschürfen festgestellt werden, da die historischen Planunterlagen diesbezüglich nur wenige Angaben zur Verfügung stellen. Somit wurde die *Fundierung (G08)* auf der sicheren Seite liegend als „nicht feststellbar“ beurteilt. Die Bewertung von *Achs* [1] berücksichtigt neben der Fundierungsart auch, ob sich das Gebäude in Regionen historischer Gewässer befindet und daher mit schwankenden Grundwasserspiegeln zu rechnen ist. Das ist im betrachteten Häuserblock nicht der Fall, siehe [27].
- Die *Grundrissform (G02)* wird basierend auf den zur Verfügung stehenden Bauplänen beurteilt. Dabei wird einerseits die Regelmäßigkeit des Gebäudegrundrisses und andererseits das Verhältnis der Länge *L* zur Breite *B* des Grundrisses in der Bewertung berücksichtigt, siehe Tabelle 2.13 und 2.14 in *Achs* [1].
- Die *Vertikale Regelmäßigkeit (G03)* ist der maßgebende Parameter der Gebäudebeurteilung und wird auf Basis der historischen Baupläne, der Gebäudenutzung und Fotos bewertet. Im Zuge der visuellen Begutachtung konnten allerdings nicht alle Wohneinheiten von

innen untersucht werden, weshalb eine gewisse Unsicherheit bestehen bleibt. Das Objekt Nr. 16 wurde dabei als einziges Gebäude mit einer Punktzahl von 50,0 bewertet, da aus den Bildaufnahmen ersichtlich ist, dass aufgrund der Nutzungsänderung im Erdgeschoß sämtlich Zwischenwände entfernt wurden. Die schubsteifen Elemente blieben allerdings erhalten und wurden nicht durch Stützen oder Pfeiler ersetzt.

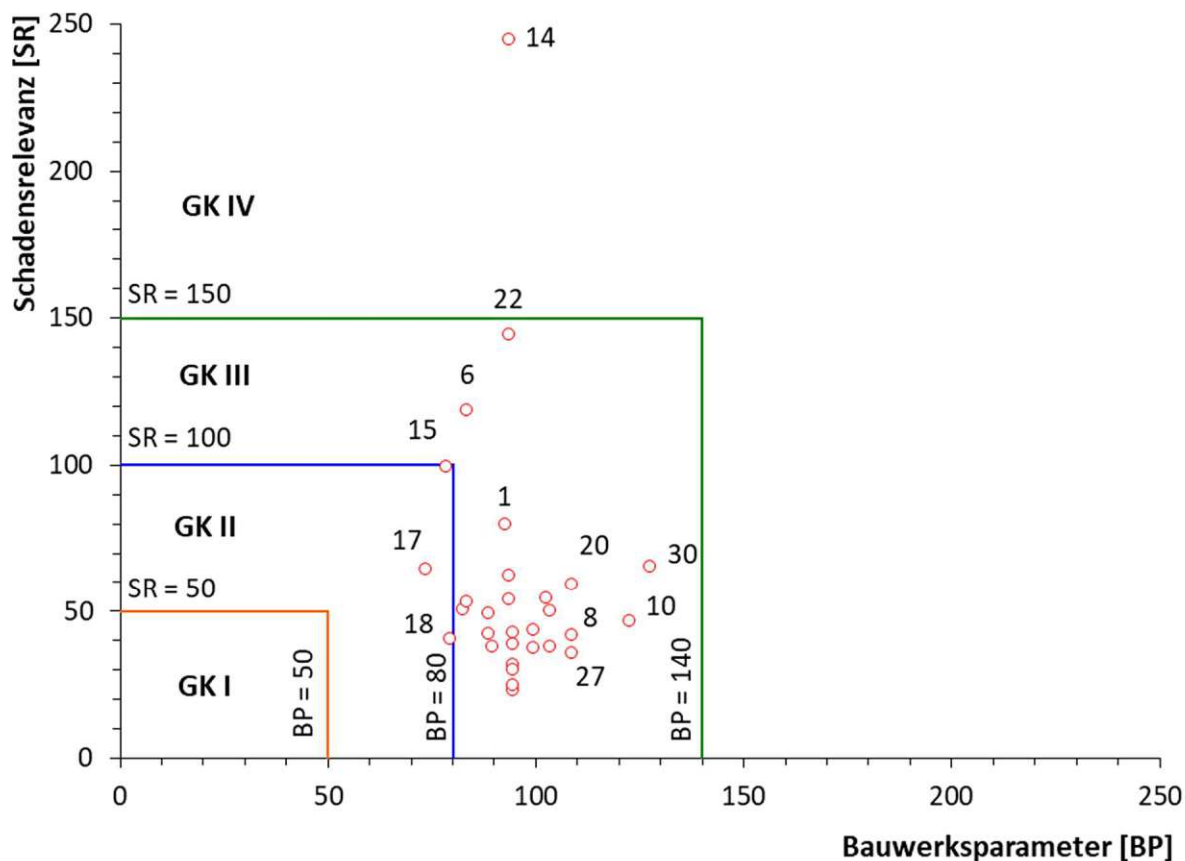
- Die Bewertung der aussteifenden Elemente (*G04*), wie beispielsweise die Schließen zwischen den Holzbalkendecken und den tragenden Längswänden, ist im Zuge einer visuellen Gebäudebegutachtung nicht oder nur unter erhöhtem Aufwand möglich. Aus diesem Grund wurden im Rahmen dieser Arbeit die Verschließungen auf der sicheren Seite liegend als „nicht feststellbar“ bewertet. Das Vorhandensein der massiven Gewölbedecken im Erdgeschoß war hingegen wesentlich einfacher, unter Zuhilfenahme der Baupläne und Naturaufnahmen, identifizierbar.
- Der Teilbauwerksparameter zur Berücksichtigung der *lokalen Versagensmechanismen (G05)* basiert auf den Arbeiten von *D’Ayala und Speranza* [24], [25]. Dabei werden sechs Lastfaktoren, die jeweils einen Versagensmechanismus beschreiben, ermittelt und der höchste dieser Faktoren wird für die Beurteilung herangezogen, siehe Tabelle 2.20 in *Achs* [1]. Die erforderlichen geometrischen Gebäudeparameter konnten basierend auf den Planunterlagen ermittelt werden.
- Die Bewertung der nichttragenden *Sekundärstrukturen (G06)* erfolgt ausschließlich über Naturaufnahmen und Satellitenbilder (z.B. Google Maps [31]). Dabei konnte einerseits die Anzahl der Schornsteine, Fassadenelemente und Skulpturen ermittelt und andererseits die Situierung dieser Elemente im Hinblick auf das Gefahrenpotential im Versagensfall, beurteilt werden.
- Auch der *Erhaltungszustand (G09)* der Gründerzeithäuser ist im Rahmen dieser Arbeit nicht ausreichend genau feststellbar. Grundsätzlich sind die Gebäude in Zagreb in einem schlechteren Zustand als vergleichbare Objekte in Wien. Basierend auf den Ergebnissen der großflächigen Anwendung der seismischen Bewertungsmethode nach *Achs* [1] auf 375 Gründerzeithäuser, wurden die Parameter der untersuchten Gebäude geschätzt, wobei jene Objekte an den Einkaufsstraßen und entlang der Straßenbahnlinien (siehe **Abb. 31**) besser bewertet werden als die restlichen Objekte.

Die Ergebnisse der einzelnen Teilschadens- und Teilbauwerksparameter der Gebäudebeurteilung werden in **Tab. 14** dargestellt. Die Summe der Teilschadensparameter ergibt demnach die Schadensrelevanz *SR* und die Summe der Teilbauwerksparameter den Bauwerksparameter *BP*. Grundsätzlich wurde für die Gebäudebewertung das Datenerhebungsformular aus **Abb. 29** verwendet. Die Auswertung der Bewertungsmethode sowie die Auswertung der einzelnen *SR*- und *BP*-Parameter erfolgte mit dem Berechnungs-Tool von *Achs* [1].

Tab. 14: Ergebnisse der einzelnen Parameter der untersuchten Gebäude.

Objekt Nr. (gemäß Tab. 13)	S01	S02	S03	S04	S05	SR	G01	G02	G03	G04	G05	G06	G07	G08	G09	BP
	Gefährdete Personen	Bedeutungskategorie	Gebäudewert	Gefährdete Sachgüter	Umgebungswirkung	Schadensrelevanz	Erdbebenzone	Grundriss	Vertikale Regelmäßigkeit	Aussteifungen	Lokale Versagensmech.	Sekundärstrukturen	Baugrund	Fundierung	Erhaltungszustand	Bauwerkparameter
1	24	2	42,8	1	10	79,8	10	5	20	5	10	20	5	2,5	15	92,5
2	12	2	13,1	1	10	38,1	10	5	1	25	20	20	5	2,5	15	103,5
3	14	2	16,7	1	10	43,7	10	1	1	25	20	20	5	2,5	15	99,5
4	12	2	12,5	1	10	37,5	10	1	1	25	20	20	5	2,5	15	99,5
5	22	2	15,6	1	10	50,6	10	5	20	5	10	10	5	2,5	15	82,5
6	54	2	60,8	1	1	118,8	10	5	1	25	10	10	5	2,5	15	83,5
7	16	2	13,3	1	10	42,3	10	5	1	25	20	5	5	2,5	15	88,5
8	12	2	16,9	1	10	41,9	10	1	20	25	20	10	5	2,5	15	108,5
9	22	2	27,4	1	10	62,4	10	5	1	25	10	20	5	2,5	15	93,5
10	16	2	17,6	1	10	46,6	10	5	20	25	20	20	5	2,5	15	122,5
11	12	2	13,2	1	10	38,2	10	1	1	25	20	10	5	2,5	15	89,5
12	18	2	23,6	1	10	54,6	10	5	20	5	20	20	5	2,5	15	102,5
13	18	2	22,3	1	10	53,3	10	5	1	25	10	10	5	2,5	15	83,5
14	150	10	69,8	5	10	244,8	10	5	1	25	20	10	5	2,5	15	93,5
15	50	10	19,5	10	10	99,5	10	1	20	5	10	10	5	2,5	15	78,5
16	20	2	17,0	1	10	50,0	10	1	50	5	10	5	5	2,5	15	103,5
17	24	2	27,7	1	10	64,7	10	1	20	5	10	5	5	2,5	15	73,5
18	16	2	16,7	1	5	40,7	10	1	1	25	10	5	5	2,5	20	79,5
19	16	2	25,2	1	5	49,2	10	5	1	25	10	10	5	2,5	20	88,5
20	20	2	31,2	1	5	59,2	10	5	1	25	20	20	5	2,5	20	108,5
21	8	2	16,0	1	5	32,0	10	1	1	25	10	20	5	2,5	20	94,5
22	48	2	88,3	1	5	144,3	10	5	1	25	5	20	5	2,5	20	93,5
23	24	2	26,0	1	1	54,0	10	5	1	25	20	5	5	2,5	20	93,5
24	12	2	18,8	1	5	38,8	10	1	1	25	20	10	5	2,5	20	94,5
25	10	2	12,3	1	5	30,3	10	1	1	25	20	10	5	2,5	20	94,5
26	8	2	7,3	1	5	23,3	10	1	1	25	20	10	5	2,5	20	94,5
27	12	2	15,8	1	5	35,8	10	5	1	25	20	20	5	2,5	20	108,5
28	8	2	8,8	1	5	24,8	10	1	1	25	20	10	5	2,5	20	94,5
29	12	2	22,9	1	5	42,9	10	1	1	25	10	20	5	2,5	20	94,5
30	26	2	26,5	1	10	65,5	10	5	20	25	20	20	5	2,5	20	127,5

Werden die einzelnen Ergebnisse der Gebäudebeurteilung **Tab. 14** in das Diagramm aus **Abb. 30** eingetragen, ist auf den ersten Blick sofort zu erkennen, welcher Gefährdungsklasse die Objekte zugeordnet werden können, siehe **Abb. 32**. In dieser Darstellung bildet der Bauwerksparmeter *BP* den x-Wert und die Schadensrelevanz *SR* den y-Wert. Aus Platzgründen werden im Diagramm nicht alle Objektnumerierungen angezeigt.



**Abb. 32:** Kategorisierung der untersuchten Gebäude (Beschriftung nach der Objektnumerierung aus **Tab. 13**).

Die Ergebnisse der Gebäudebewertung in **Abb. 32** zeigen, dass der Großteil des untersuchten Gebäudebestands in die Gefährdungsklasse III kategorisiert werden und somit eine mittlere bis hohe seismische Gefährdung aufweisen. Es ist auch zu beobachten, dass keines der bewerteten Objekte der Gefährdungsklasse I zugeordnet werden kann. Das ist hauptsächlich auf den Bauwerksparmeter zurückzuführen, der bei nahezu allen Objekten eine verhältnismäßig hohe Punktzahl ergibt.

Darüber hinaus werden drei Gebäude (Nr. 15, 17 und 18) in die Gefährdungsklasse II kategorisiert. Diese Objekte liegen allerdings entweder mit der Schadensrelevanz *SR* (Nr. 15) oder dem Bauwerksparmeter *BP* (Nr. 17 und 18) sehr knapp an der Grenze zur Gefährdungsklasse III.

Der Kategorie IV kann lediglich ein Objekt (Nr. 14) zugeordnet werden. Das ist allein auf die hohe Anzahl der gefährdeten Personen aufgrund der Nutzung (Tourismusschlule), also der Schadensrelevanz *SR*, zurückzuführen. Zudem wurden bei zwei weiteren Objekten (Nr. 6 und Nr. 22) die Schadensrelevanz *SR* mit einer Gesamtpunktzahl größer 100,0 bewertet. Das ist ins-

besondere auf die große Wohnnutzfläche, die in einem hohen Gebäudewert ( $S04$ ) resultiert, sowie die hohe Anzahl der gefährdeten Personen ( $S01$ ) zurückzuführen.

Werden zusätzlich die Teilbauwerksparemeter aus **Tab. 14** analysiert, kann eine relativ hohe vertikale Regelmäßigkeit bei den einzelnen Objekten beobachtet werden. Das hängt hauptsächlich damit zusammen, dass die Geschäftslokale im Erdgeschoß der einzelnen Gebäude eine geringe Grundfläche aufweisen und nur wenige Raum-Zusammenlegungen durch Entfernen der Zwischenwände erfolgt sind. Dieser Parameter ist allerdings mit gewissen Unsicherheiten verbunden, da nicht alle Räume und Wohneinheiten begutachtet werden konnten und somit weitere vertikale Unregelmäßigkeiten durch z.B. illegale Umbauten nicht ausgeschlossen werden können. Das führt in weiterer Folge dazu, dass kein Objekt aufgrund des Bauwerksparemeters  $BP$  in die Gefährdungsklasse IV kategorisiert wird.

Wie bereits zu Beginn dieses Kapitels beschrieben und in **Tab. 14** ersichtlich, ist das Objekt Nr. 16 das einzige Gebäude, bei dem der Teilbauwerksparemeter der vertikalen Regelmäßigkeit  $G03$  mit einer Punktzahl von 50,0 bewertet wurde. Da allerdings bei diesem Objekt die restlichen Teilbauwerksparemeter mit vergleichsweise wenigen Punkten beurteilt wurden, gleichen diese das Endergebnis des Bauwerksparemeters  $BP$  wieder aus. Aus den Ergebnissen kann abgeleitet werden, dass im Zuge der Gebäudebewertung nach *Achs* [1] hauptsächlich Objekte mit einer sehr hohen vertikalen Unregelmäßigkeit ( $G03 = 100,0$ ) der Bauwerkssklasse IV zugeordnet werden können. In vielen Fällen gleichen einander die übrigen Teilbauwerksparemeter gegenseitig aus, weshalb die Objekte nicht der höchsten Gefährdungsklasse kategorisiert werden können.

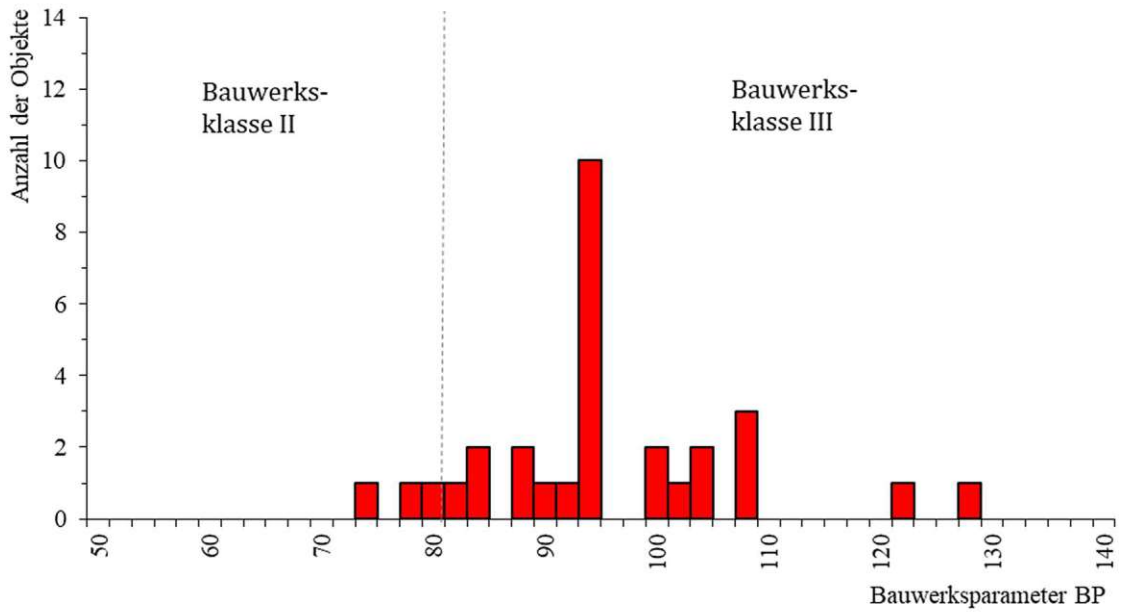
Im Rahmen dieser Arbeit werden die Ergebnisse der seismischen Schnellbewertungsmethode nach *Achs* [1] mit den tatsächlich festgestellten Schäden am untersuchten Häuserblock in Zagreb in Folge des Erdbebens am 22. März 2020 verglichen. Für diese Analyse ist allerdings nur der Bauwerksparemeter  $BP$  von Interesse und die Schadensrelevanz  $SR$  spielt lediglich eine untergeordnete Rolle. Aus diesem Grund wird in weiterer Folge lediglich die Auswertung der Bauwerksparemeter  $BP$  und die daraus abgeleiteten Bauwerkssklassen bzw. Schadensklassen nach EMS-98 [32] infolge der Korrelation nach *Achs* [1] beschrieben.

Die folgende **Abb. 33** zeigt eine Einteilung der untersuchten Gründerzeithäuser in Zagreb nach den von *Achs* [1] definierten Bauwerkssklassen in Abhängigkeit von den jeweiligen Bauwerksparemetern  $BP$  nach **Tab. 8**. Analog dazu ist in **Abb. 34** die Kategorisierung des bewerteten Gebäudebestands in Schadensklassen gemäß EMS-98 [32] nach **Tab. 9** gegeben. Grundsätzlich können alle bewerteten Objekte den Bauwerkssklassen II oder III bzw. den Schadensklassen 3 oder 4 nach EMS-98 [32] zugeordnet werden, weshalb in den beiden Auswertungen auch nur diese Bereiche dargestellt werden.

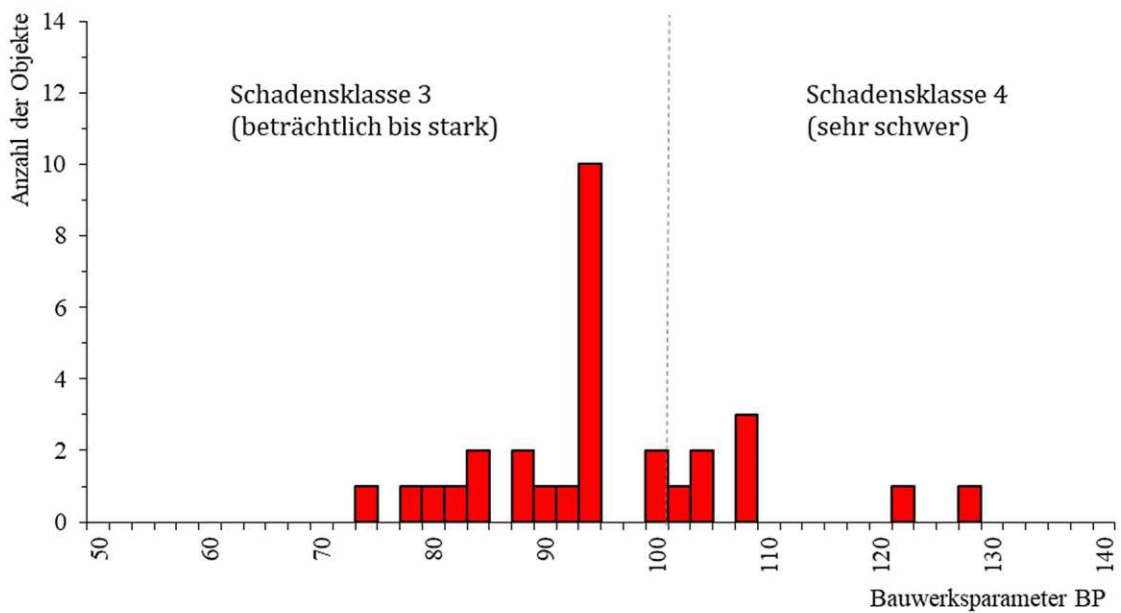
Wie bereits in Kapitel 5.3.2 beschrieben, beruht die Korrelation des Bauwerksparemeters  $BP$  mit der Schadensklassifikation der EMS-98 [32] auf der Schadensauswertung eines  $M_w$  6,3 Erdbebens (L'Aquila, Italien, 2009). Entsprechend dieser Korrelation zeigt die **Abb. 34** die Verteilung der ermittelten Schadensklassen, die bei einem Erdbeben der Stärke  $M_w$  6,3 eintreten würden.

Im Rahmen dieser Arbeit wird kein Gebäude der Bauwerkssklasse IV bzw. der Schadensklasse 5 nach EMS-98 [32] zugeordnet. Somit kann im betrachteten Häuserblock kein Objekt identifiziert werden, das im Falle eines Erdbebens mit der Magnitude  $M_w$  6,3 mit sehr hoher Wahrscheinlichkeit zerstört werden würde.





**Abb. 33:** Kategorisierung der untersuchten Gebäude nach Bauwerksklassen.



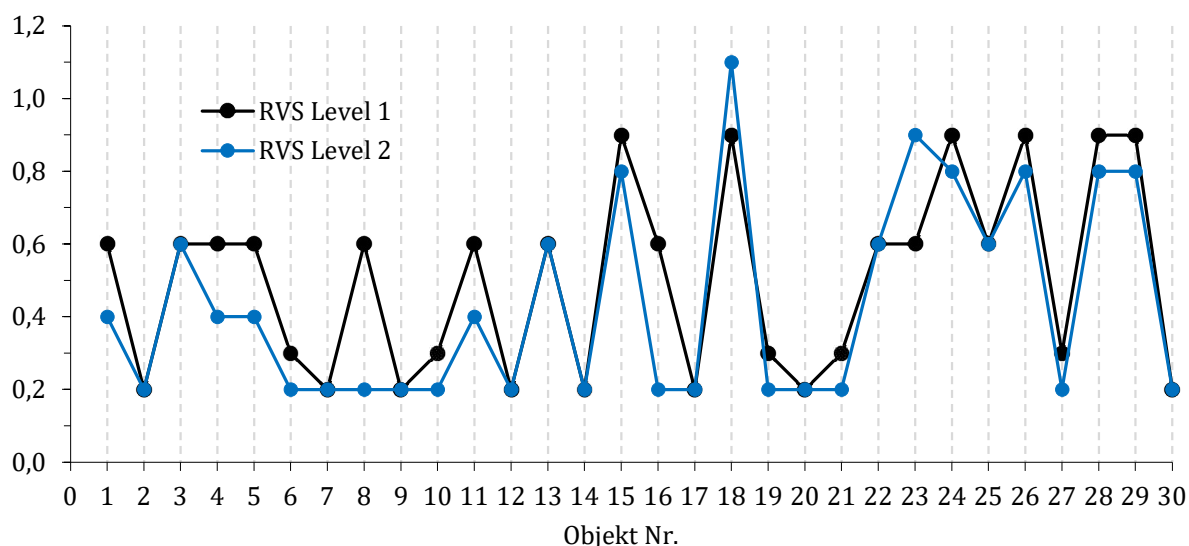
**Abb. 34:** Kategorisierung der untersuchten Gebäude nach Schadensklassen gemäß EMS-98 [32].

### 6.3.2 FEMA P-154 [28]

Bei der Anwendung der visuellen Schnellbewertungsmethode der FEMA P-154:2015 [28] auf Gründerzeithäuser in Zagreb müssen einige Annahmen getroffen werden. Das betrifft einerseits die Klassifizierung der seismischen Region und andererseits die Beurteilung der Baugrundklasse. Die Bewertungsparameter beschreiben die Regelmäßigkeit im Grundriss, sowie die vertikalen Unregelmäßigkeiten und können größtenteils ohne Problem aus den zur Verfügung stehenden Planunterlagen und Naturaufnahmen abgeleitet werden. Das Vorhandensein von Giebelwänden kann ebenfalls aus den Bauplänen abgelesen werden.

- *Seismische Zone:* Den Erdbebengefährdungskarten (**Abb. 17**) der kroatischen Erdbebennorm (HRN EN 1998-1:2011 [18]) kann entnommen werden, dass für den untersuchten Standort eine Spitzenbodenbeschleunigung (PGA) von ca. 0,26 g bzw. 2,55 m/s<sup>2</sup> gilt. Um den betrachteten Häuserblock einer der fünf Erdbebenzonen gemäß FEMA P-154:2015 [28] zuordnen zu können, wurde die PGA-Weltkarte [30] mit der seismischen Karte der FEMA verglichen. Auf diese Weise konnte festgestellt werden, dass der Großraum Zagrebs der stärksten Erdbebenzone „Very High“ zugeordnet werden kann.
- *Bodentyp:* Für den untersuchten Standort kann die Baugrundklassen C (gemäß ÖNORM EN 1998-1:2013 [6]) angenommen werden, siehe Kapitel 6.3.1. In der **Tab. 10** ist ersichtlich, dass diese Baugrundklasse dem Bodentyp D gemäß FEMA P-154:2015 [28] entspricht.

Die Ergebnisse der Level 1 und Level 2 RVS-Methode gemäß FEMA P-154 [28] der untersuchten Gebäude ist in der **Tab. 15** ersichtlich. Zudem sind die Bewertungen der einzelnen Parameter angeführt. Für eine bessere Analyse der RVS-Methode werden auch die Endergebnisse der Gebäudebewertung angegeben, wenn der Minimalwert (Minimum Score  $S_{MIN}$ ) von 0,2 nicht berücksichtigt wird. Die grafische Darstellung der jeweils ermittelten Punktzahlen ist in **Abb. 35** gegeben.



**Abb. 35:** Grafische Darstellung der Ergebnisse der RVS Level 1 (schwarz) und Level 2 (blau) Methode für den untersuchten Häuserblock (Objekt-Nr. gemäß **Tab. 13**)

Tab. 15: Ergebnisse der RVS Level 1 und Level 2 Methode für den untersuchten Häuserblock.

Objekt Nr. (gemäß Tab. 13)	Level 1					Level 2					
	S	Vertical Irregularity 1	Plan Irregularity 1	Final Level 1 Score	Final Level 1 Score*	S	Vertical Irregularity 2	Plan Irregularity 2	Modification Score	Final Level 2 Score	Final Level 2 Score*
	$S_{L1}$	$V_{L1}$	$P_{L1}$	$S_{L1}$	$S_{L1}^*$	$S_{L2}$	$V_{L2}$	$P_{L2}$	M	$S_{L2}$	$S_{L2}^*$
1	0,9	0	-0,3	0,6	0,6	0,9	0	-0,4	-0,1	0,4	0,4
2	0,9	-0,6	-0,3	0,2	0	0,9	-0,4	-0,2	-0,1	0,2	0,2
3	0,9	0	-0,3	0,6	0,6	0,9	0	-0,2	-0,1	0,6	0,6
4	0,9	0	-0,3	0,6	0,6	0,9	0	-0,4	-0,1	0,4	0,4
5	0,9	0	-0,3	0,6	0,6	0,9	0	-0,4	-0,1	0,4	0,4
6	0,9	-0,3	-0,3	0,3	0,3	0,9	-0,4	-0,2	-0,1	0,2	0,2
7	0,9	-0,6	-0,3	0,2	0	0,9	-0,4	-0,7	-0,1	0,2	-0,3
8	0,9	0	-0,3	0,6	0,6	0,9	0	-0,7	-0,1	0,2	0,1
9	0,9	-0,6	-0,3	0,2	0	0,9	-0,9	-0,7	-0,1	0,2	-0,8
10	0,9	-0,3	-0,3	0,3	0,3	0,9	-0,4	-0,2	-0,1	0,2	0,2
11	0,9	-0,3	0	0,6	0,6	0,9	-0,4	0,0	-0,1	0,4	0,4
12	0,9	-0,6	-0,3	0,2	0	0,9	-0,4	-0,4	-0,1	0,2	0
13	0,9	0	-0,3	0,6	0,6	0,9	0,0	-0,2	-0,1	0,6	0,6
14	0,9	-0,6	-0,3	0,2	0	0,9	-0,4	-0,2	-0,1	0,2	0,2
15	0,9	0	0	0,9	0,9	0,9	0,0	0,0	-0,1	0,8	0,8
16	0,9	0	-0,3	0,6	0,6	0,9	0,0	-0,7	-0,1	0,2	0,1
17	0,9	-0,6	-0,3	0,2	0	0,9	-0,7	-0,2	-0,1	0,2	-0,1
18	0,9	0	0	0,9	0,9	0,9	0,0	0,0	0,2	1,1	1,1
19	0,9	-0,6	0	0,3	0,3	0,9	-0,7	0,0	-0,1	0,2	0,1
20	0,9	-0,6	-0,3	0,2	0	0,9	-0,9	-0,2	-0,1	0,2	-0,3
21	0,9	-0,6	0	0,3	0,3	0,9	-0,7	0,0	-0,1	0,2	0,1
22	0,9	0	-0,3	0,6	0,6	0,9	0,0	-0,2	-0,1	0,6	0,6
23	0,9	0	-0,3	0,6	0,6	0,9	0,0	-0,2	0,2	0,9	0,9
24	0,9	0	0	0,9	0,9	0,9	0,0	0,0	-0,1	0,8	0,8
25	0,9	0	-0,3	0,6	0,6	0,9	0,0	-0,2	-0,1	0,6	0,6
26	0,9	0	0	0,9	0,9	0,9	0,0	0,0	-0,1	0,8	0,8
27	0,9	-0,6	0	0,3	0,3	0,9	-0,9	0,0	-0,1	0,2	-0,1
28	0,9	0	0	0,9	0,9	0,9	0,0	0,0	-0,1	0,8	0,8
29	0,9	0	0	0,9	0,9	0,9	0,0	0,0	-0,1	0,8	0,8
30	0,9	-0,6	-0,3	0,2	0	0,9	-0,7	-0,4	-0,1	0,2	-0,3

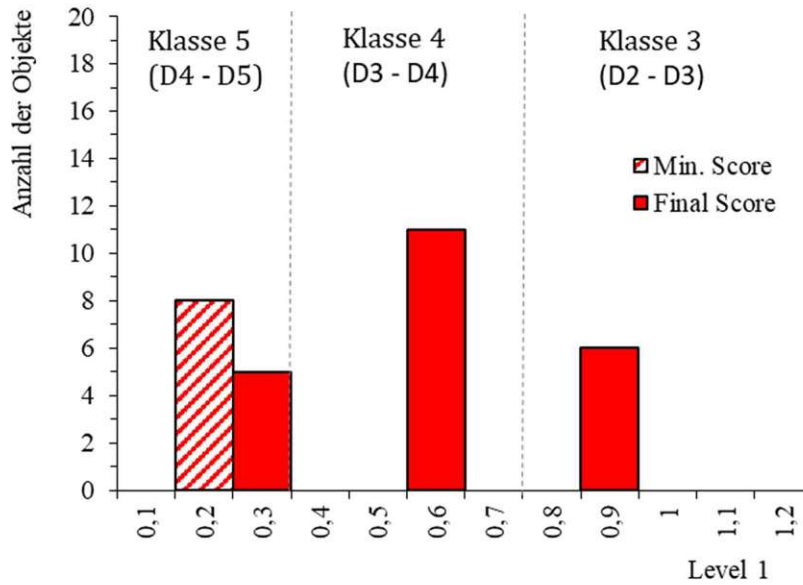
\*Minimum Score von 0,2 nicht berücksichtigt

Die folgende **Abb. 36** zeigt eine Einteilung, der im Rahmen dieser Arbeit bewerteten Objekte, nach der ermittelten Punktzahl aus der RVS-Level 1 Methode der FEMA P-154 [28] in die einzelnen Schadenspotentialklassen gemäß **Tab. 12**. Analog dazu ist in **Abb. 37** die Kategorisierung der Ergebnisse der RVS-Level 2 Methode gegeben. Dabei wird der Gebäudebestand, der im Zuge der Beurteilung mit der Mindestpunktzahl  $S_{\text{MIN}}$  von 0,2 bewertet werden musste, strichliert dargestellt. Grundsätzlich können alle bewerteten Gebäude den Schadenspotentialklassen 3, 4 oder 5 zugeordnet werden und werden daher im Erdbebenfall mit sehr hoher Wahrscheinlichkeit mindestens Schäden der Klasse 2 gemäß EMS-98 [32] aufweisen, siehe Erläuterungen in **Tab. 12**. In beiden Auswertungen werden zudem nur die relevanten Bereiche der Gebäudekategorisierung angezeigt.

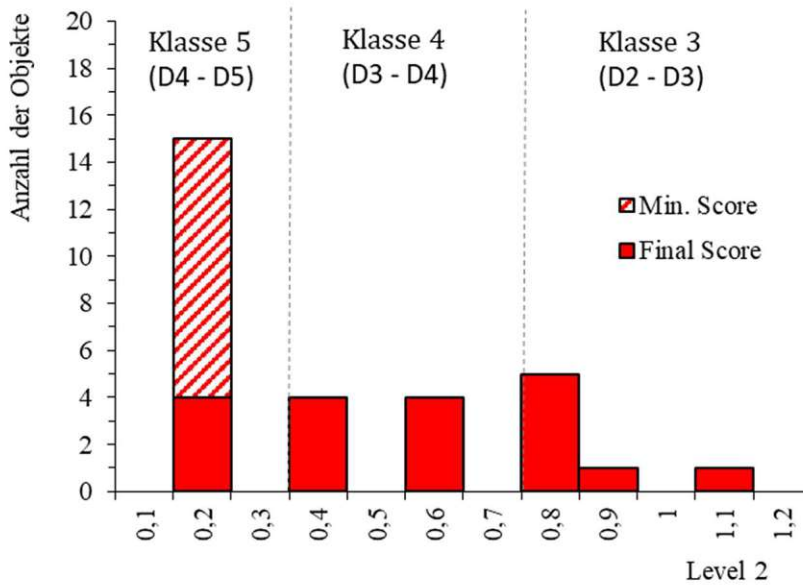
Die Ergebnisse der Level 1 und Level 2 Gebäudebewertung in **Abb. 36** und **Abb. 37** zeigen, dass bei beiden Auswertungen in etwa die Hälfte der beurteilten Objekte der Klasse 5 zugeordnet werden können und davon ein Großteil mit der Mindestpunktzahl  $S_{\text{MIN}}$  bewertet wird. Das bedeutet, dass diese Gebäude im Falle eines  $MCE_R$  mit sehr hoher Wahrscheinlichkeit Schäden der Klasse 4 und mit hoher Wahrscheinlichkeit Schäden der Klasse 5 gemäß EMS-98 [32] verzeichnen werden müssen. Es ist auch zu beobachten, dass ein großer Teil der bewerteten Objekte im Zuge der detaillierteren visuellen Begutachtung der RVS Level 2 Methode schlechter beurteilt werden, als mit der RVS Level 1 Methode. Nur wenige Objekte (Nr. 18 und Nr. 23) werden besser bewertet. Das hat hauptsächlich damit zu tun, dass die Gebäude genauer beurteilt werden und für Gründerzeithäuser spezifische Eigenschaften wie das Vorhandensein von Giebelwänden, die einen negativen Einfluss auf die seismische Verletzbarkeit der untersuchten Objekte haben, berücksichtigt werden.

Ein weiterer Grund für das schlechte Abschneiden der Objekte ist, dass bereits der Ausgangspunkt der Berechnung mit 0,9 als „Basic Score“ in der seismischen Region „Very High“ für gemauerte Bauwerke (URM) vergleichsweise gering ist. Werden die Bewertungsbögen der Level 1 und Level 2 RVS-Methoden analysiert, wird ersichtlich, dass die maximal zu erreichende Punktzahl der RVS Level 2 Methode bei 1,1 liegt und somit immer noch sehr niedrig ist.

Insgesamt können mit der RVS Level 2 Methode sieben Objekte (Nr. 15, 18, 23, 24, 26, 28 und 29) der Klasse 3 zugeordnet werden. Das liegt vor allem an der hohen vertikalen Regelmäßigkeit sowie der Regelmäßigkeit im Grundriss dieser Gebäude. Somit werden diese Objekte in Hinblick auf den Erdbebenwiderstand besser klassifiziert.



**Abb. 36:** Kategorisierung der untersuchten Gebäude gemäß RVS-Level 1 Bewertung nach Schadenspotentialklassen gemäß **Tab. 12**.

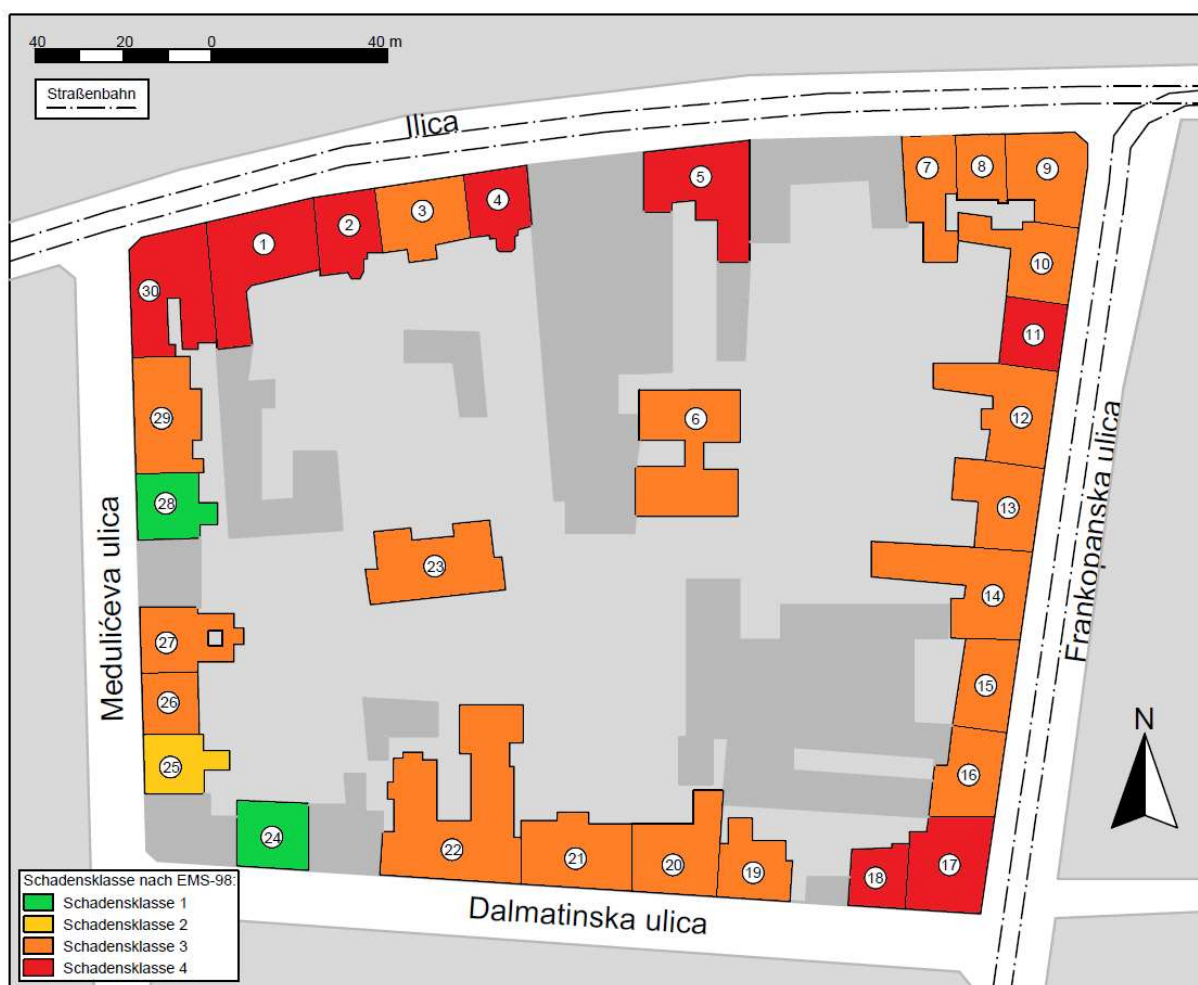


**Abb. 37:** Kategorisierung der untersuchten Gebäude gemäß RVS-Level 2 Bewertung nach Schadenspotentialklassen gemäß **Tab. 12**.



## 6.4 Vergleich mit Erdbebenschäden

Im folgenden Abschnitt werden zunächst die dokumentierten Erdbebenschäden am untersuchten Gebäudebestand in Zagreb wiedergegeben, bevor diese mit den Ergebnissen der Schnellbewertungsmethoden gegenübergestellt werden. Die **Abb. 38** zeigt basierend auf der **Tab. 4** die Schadensklassifikation gemäß EMS-98 [32] der einzelnen Objekte, wobei jeweils der maximal beobachtete Schaden den Schadensgrad definiert.



**Abb. 38:** Schadensklassifikation gemäß EMS-98 [32] des untersuchten Häuserblocks gemäß EMS-98 [32] (Objekt-Nr. gemäß **Tab. 13**).

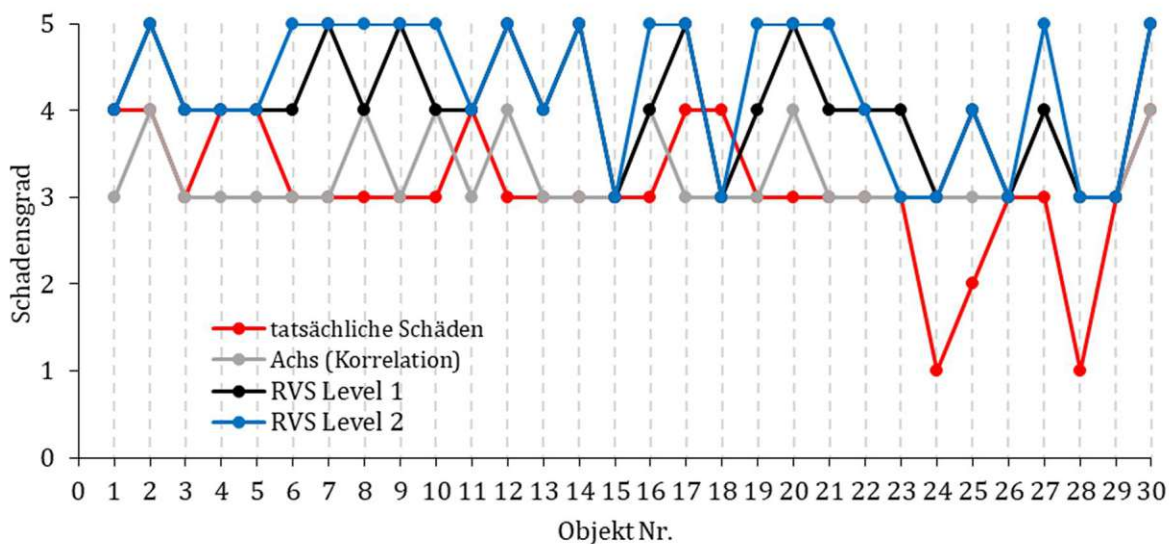
Um die seismische Bewertungsmethode von Gründerzeithäusern nach *Achs* [1] und die zweistufige RVS-Methode der FEMA P-154 [28] miteinander und in weiterer Folge mit den tatsächlich dokumentierten Erdbebenschäden am Zagreber Gebäudebestand vergleichen zu können, muss zunächst eine Vergleichsgrundlage gewählt werden. Insbesondere eignet sich dafür die Schadensklassifikation der EMS-98 [32].

Die Grundlage für die Auswertung der Bewertungsergebnisse bildet die folgende **Tab. 16**. Diese basiert einerseits auf der Korrelation der Bauwerksklassen nach *Achs* [1] mit den Schadensklassen der EMS-98 [32] (**Tab. 9**) und der Abschätzung des Schadenspotentials aus der ermittelten RVS-Punktzahl gemäß FEMA P-154 [28] (**Tab. 12**).

**Tab. 16:** Korrelation der Ergebnisse nach *Achs* [1] und nach FEMA P-154:2015 [28] mit den Schadensklassen der EMS-98 [32].

Bauwerksparemeter <i>BP</i> nach <i>Achs</i> [1]	RVS-Punktzahl gemäß FEMA P-154:2015 [28]	Schadensklassen gemäß EMS-98 [32]
-	$S > 2,5$	1 - Leicht
$BP < 50$	$2,0 < S \leq 2,5$	2 - Mäßig
$BP \geq 50$	$0,7 < S \leq 2,0$	3 - Stark
$BP \geq 100$	$0,3 < S \leq 0,7$	4 - Sehr stark
$BP \geq 140$	$S \leq 0,3$	5 - Zerstörung

Auf Basis der **Tab. 16** und den Ergebnissen der Schnellbewertungsmethoden werden die jeweiligen Schadensgrade der untersuchten Gründerzeithäuser abgeschätzt und in **Tab. 17** wiedergegeben. Die **Abb. 39** zeigt eine grafische Darstellung der ermittelten und beobachteten Schadensklassen gemäß EMS-98 [32] des betrachteten Häuserblocks in Zagreb.



**Abb. 39:** Grafische Darstellung der beobachteten und ermittelten Schadensgrade gemäß EMS 98 [32] für den untersuchten Häuserblock (Objekt-Nr. gemäß **Tab. 13**).

**Tab. 17:** Gegenüberstellung der beobachteten und ermittelten Schadensgrade gemäß EMS 98 [32] (Objekt-Nr. gemäß **Tab. 13**).

Objekt Nr.	Beobachtete Schäden	Achs [1]	FEMA P-154 [28]	
			RVS Level 1	RVS Level 2
1	4	3	4	4
2	4	4	5	5
3	3	3	4	4
4	4	3	4	4
5	4	3	4	4
6	3	3	4	5
7	3	3	5	5
8	3	4	4	5
9	3	3	5	5
10	3	4	4	5
11	4	3	4	4
12	3	4	5	5
13	3	3	4	4
14	3	3	5	5
15	3	3	3	3
16	3	4	4	5
17	4	3	5	5
18	4	3	3	3
19	3	3	4	5
20	3	4	5	5
21	3	3	4	5
22	3	3	4	4
23	3	3	4	3
24	1	3	3	3
25	2	3	4	4
26	3	3	3	3
27	3	4	4	5
28	1	3	3	3
29	3	3	3	3
30	4	4	5	5

In **Abb. 39** ist ersichtlich, dass ein Großteil der untersuchten Gebäude den Schadensklassen 3 oder 4 gemäß EMS-98 [32] zugeordnet werden können und somit starke bis sehr starke Erdbeschäden zu verzeichnen hatten. Lediglich drei Objekte (Nr. 24, 25 und 28) werden mit einem niedrigeren Schadensgrad kategorisiert und wurden im Hinblick auf ihre seismische Widerstandsfähigkeit von allen Bewertungsmethoden falsch eingeschätzt. Bei Objekt Nr. 24 und Nr. 28 ist die zugeordnete Schadensklasse 1 gemäß EMS-98 [32] insofern nachvollziehbar, als bei diesen Gebäuden ein Dachgeschoßausbau stattgefunden hat und im Zuge dessen seismische Kompensationsmaßnahmen, wie beispielsweise die Ertüchtigung der Geschoßdecken mit einer Stahlbetonschicht, getroffen wurden. Diese Aspekte werden im Rahmen der Gebäudebeurteilung von den verwendeten Bewertungsmethoden nicht berücksichtigt. Bei dem anderen Objekt (Nr. 25) besteht die Möglichkeit, dass im Zuge der Schadenserhebung nicht alle Schäden erfasst

werden konnten, weshalb auch bei diesem Gebäude nur vergleichsweise geringe Schäden (Schadensklasse 2 gemäß EMS-98 [32]) dokumentiert wurden.

Werden die Ergebnisse der Schnellbewertungsmethode der FEMA P-154 [28] mit den tatsächlich beobachteten Erdbebenschäden verglichen, kann festgestellt werden, dass in den meisten Fällen die Widerstandsfähigkeit der Gründerzeithäuser im Erdbebenfall, sowohl von der Level 1 als auch der Level 2 Methode, unterbewertet wurde. So wurden beispielsweise 15 der 30 Objekte der höchsten Schadensklasse 5 zugeordnet. Das ist hauptsächlich darauf zurückzuführen, dass die FEMA P-154 [28] bei der RVS-Methode auf den Bodenbeschleunigungen eines Erdbebens der Stärke  $MCE_R$  mit einer Wiederkehrperiode von 2475 Jahren basiert. Diese Werte liegen einerseits über den gemessenen Bodenbeschleunigungen des Erdbebens am 22. März 2020 in Zagreb und andererseits auch über den Bemessungsgrößen aus dem Eurocode 8 (HRN EN 1998-1:2011 [18]) für den untersuchten Standort, die auf einer Wiederkehrperiode von 475 Jahren basieren.

Die Ergebnisse der **Abb. 39** zeigen auch, dass die Bewertungsmethode von *Achs* [1] die seismische Widerstandsfähigkeit der untersuchten Gebäude in vielen Fällen (15 von 30 Objekten) realistischer eingestuft hat. Dabei werden alle bewerteten Objekte mit der Schadensklasse 3 oder 4 gemäß EMS-98 [32] kategorisiert. Darüber hinaus betont *Achs* [1] in seiner Arbeit, dass eine klare Trennung zwischen den ermittelten Schadensklassen 3 und 4 nur bedingt möglich ist. Die Identifikation jener Gebäude, die im Erdbebenfall mit sehr hoher Wahrscheinlichkeit zerstört werden, ist dabei von größerer Bedeutung. Daraus kann abgeleitet werden, dass die von *Achs* [1] gewählte Korrelation zwischen dem Gebäudezustand und den Schäden zufolge dem Erdbeben in L'Aquila (Italien) aus dem Jahr 2009 zielführend war.

### 6.4.1 Auswertung der Bewertungsergebnisse

Für eine bessere Veranschaulichung der Ergebnisse aus **Abb. 39** und **Tab. 17** wird in Anlehnung an *Harirchian et al.* [34] eine statistische Auswertung der Bewertungsmethoden basierend auf einem Ähnlichkeitssystem durchgeführt. Dafür werden vier Ähnlichkeitsmaße definiert, die wie folgt lauten:

**Ähnlichkeitsmaß 1 (M1):** Beschreibt die Anzahl der Gebäude deren ermittelter Schadensgrad mit dem beobachteten Schadensgrad übereinstimmt.

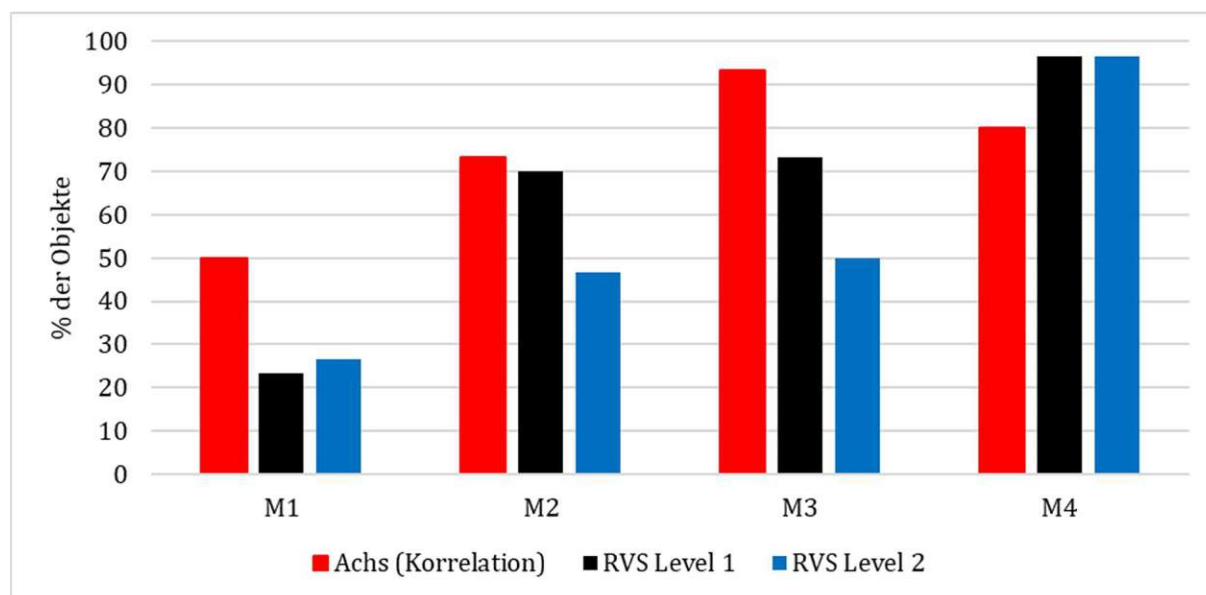
**Ähnlichkeitsmaß 2 (M2):** Beschreibt die Anzahl der Gebäude deren ermittelter Schadensgrad mit dem beobachteten Schadensgrad übereinstimmt + die Anzahl der Gebäude mit einem um einen Grad stärkeren Schaden.

**Ähnlichkeitsmaß 3 (M3):** Beschreibt die Anzahl der Gebäude deren ermittelter Schadensgrad mit dem beobachteten Schadensgrad übereinstimmt + die Anzahl der Gebäude mit einem um einen Grad stärkeren und um einen Grad leichteren Schaden.

**Ähnlichkeitsmaß 4 (M5):** Beschreibt die Anzahl der Gebäude deren ermittelter Schadensgrad mit dem beobachteten Schadensgrad übereinstimmt + die Anzahl der Gebäude mit stärkeren Schäden.

Grundsätzlich ist es nicht ratsam, die verschiedenen Bewertungsmethoden allein basierend auf dem Ähnlichkeitsmaß 1 zu vergleichen, da bei der Schadenserhebung nach einem Erdbeben die Schadensklassen nicht immer eindeutig zugeordnet werden können. Die Ähnlichkeitsmaße 2 und 3 beschreiben die Genauigkeit der jeweiligen Methoden im Bezug zum beobachteten Schaden. Das Ähnlichkeitsmaß 4 hingegen zeigt, welche Methode im Rahmen eines Erdbebenmanagementprogramms die Sicherheit in den Vordergrund stellt [34].

Die Ergebnisse der vier Ähnlichkeitsmaße ist in **Abb. 40** dargestellt und stellt die Bewertungsmethode nach *Achs* [1] den RVS Level 1 und Level 2 Methoden gemäß FEMA P-154 [28] gegenüber.



**Abb. 40:** Verteilung der Objekte für jedes Ähnlichkeitsmaß (M1 bis M4) nach *Harirchian et al.* [34].

Wie bereits in einem früheren Abschnitt beschrieben, schätzt die Bewertungsmethode nach *Achs* [1] den festgestellten Schaden bei 50 % der Gebäude richtig, die FEMA P-154 [28] Level 1 und Level 2 Methoden hingegen, klassifizieren nur in etwa ein Viertel der bewerteten Objekte korrekt. Das ist hauptsächlich darauf zurückzuführen, dass die FEMA P-154 [28] dem Großteil der Gebäude einen höheren Schadensgrad zuordnet, wie in **Abb. 40** beobachtet werden kann.

Zudem liegen bei der Bewertung nach *Achs* [1] die Ähnlichkeitsmaße 2 und 3 mit weniger als 10 % sehr nahe beieinander, woraus geschlossen werden kann, dass ein großer Teil der Gebäude, die dem Ähnlichkeitsmaß 3 auch dem Ähnlichkeitsmaß 2 zugeordnet werden. Darauf aufbauend zeigt auch das Ähnlichkeitsmaße 3, dass die Methode nach *Achs* [1] die Schäden wesentlich besser abschätzen konnte als die RVS-Methoden der FEMA P-154 [28].

Das Ähnlichkeitsmaß 4 zeigt darüber hinaus, dass die FEMA P-154 [28] nur sehr wenigen Objekten einen geringeren Schadensgrad zugeordnet hat, als tatsächlich dokumentiert wurde. Das bedeutet, dass diese Methode sehr konservative Ergebnisse liefert und die Erdbebenwiderstandsfähigkeit prinzipiell unterschätzt. Es zeigt aber auch, dass die Schnellbewertungsmethode nach *Achs* [1] bei 20 % der untersuchten Objekte die seismische Vulnerabilität der Gebäude zu niedrig klassifiziert.



## 6.4.2 Zusammenfassung der Ergebnisse

Die Schadensauswertung nach dem verheerenden  $M_w$  5,4 Erdbeben am 22. März 2020 in Zagreb zeigt, dass ein Großteil der untersuchten Gründerzeithäuser starke bis sehr starke Schäden zu verzeichnen hatten, siehe **Abb. 38**. Das ist prinzipiell auf die in Kapitel 3.4 dargestellten Schwachstellen von gründerzeitlich errichteten Gebäuden im Hinblick auf den Erdbebenwiderstand zurückzuführen. Zudem kann beobachtet werden, dass seismische Kompensationsmaßnahmen, die meist infolge eines Dachgeschoßausbaus getroffen werden, vor allem die strukturellen Erdbebenschäden erheblich minimieren können. An solchen Objekten (Nr. 24 und 28) konnten lediglich geringfügige bis leichte Schäden in Form von Haarrissen oder kleinen Putzablösungen beobachtet werden, die allerdings die weitere Nutzbarkeit dieser Objekte nicht beeinträchtigte.

Basierend auf der Schadensklassifikation der EMS-98 [32] wurden die Ergebnisse der seismischen Bewertungsmethode von Gründerzeithäusern nach *Achs* [1] und die zweistufige RVS-Methode der FEMA P-154 [28] mit den tatsächlich festgestellten Erdbebenschäden am untersuchten Häuserblock (30 Objekte) in Zagreb verglichen. Zur besseren Interpretation der Ergebnisse wurden vier Ähnlichkeitsmaße (M1 bis M4) definiert, die eine statistische Auswertung ermöglichen. Dabei ordnet die Schnellbewertungsmethode nach *Achs* [1] allen Objekten die Schadensklasse 3 oder 4 nach EMS-98 [32] zu und konnte die Hälfte der Gebäude mit dem richtigen Schadensgrad kategorisieren. Die FEMA P-154 [28] Level 1 und Level 2 Methoden hingegen unterschätzen in den meisten Fällen die seismische Widerstandsfähigkeit der Gründerzeithäuser in Zagreb und ordnet 15 von 30 Objekten der höchsten Schadensklasse 5 zu, was einem Totalkollaps des Gebäudes entspricht. Insbesondere liegt das daran, dass die Bewertungsmethode der FEMA P-154 [28] auf wesentlich höheren Bodenbeschleunigungen basiert als am 22. März 2020 in Zagreb gemessen wurden. Darüber hinaus kann die FEMA P-154 zur Bewertung einer großen Anzahl an unterschiedlichen Bauwerkstypen verwendet werden, wodurch die spezifischen Eigenschaften der Gründerzeithäuser nicht ausreichend berücksichtigt werden können.

Abschließend kann zusammengefasst werden, dass mit der seismischen Bewertungsmethode nach *Achs* [1] die Erdbebenschäden wesentlich genauer abgeschätzt werden konnten als mit der RVS-Methode der FEMA P-154 [28]. Zudem liefert die FEMA P-154 speziell für gründerzeitliche Mauerwerksbauten sehr konservative Ergebnisse und ist somit als Basis für mögliche seismische Ertüchtigungsmaßnahmen aus wirtschaftlicher Sicht nicht geeignet.

## 7 Schlussfolgerung und Ausblick

Die historischen Wohnbauten in der Zagreber Innenstadt sind in ihrer einheitlichen Bauweise ident zu den Gründerzeithäuser in Wien. Die charakteristische Baukonstruktionsweise der gründerzeitlichen Mauerwerksbauten wurde durch tradierte Handwerksregeln und durch die zu dieser Zeit gültigen Bauordnungen definiert [44]. Das verheerende Erdbeben am 22. März 2020 in Zagreb mit einer Momenten-Magnitude von  $M_w = 5,4$  verursachte immense soziale und ökonomische Schäden, insbesondere in der historischen Innenstadt. Vor allem wurde die hohe seismische Empfindlichkeit des Altbestands aus der Epoche der Gründerzeit ( $\approx 1840$ – $1918$ ) aufgezeigt. Im internationalen Vergleich hatte das Erdbeben eine mäßige bzw. moderate Stärke, trotzdem konnten zum Teil sehr schwere Schäden an den Gründerzeithäusern registriert werden, was die hohe seismische Verwundbarkeit dieser Bauwerke bestätigte. Die Schadenserhebung nach dem Erdbeben hat gezeigt, dass zerstörte Schornsteine, Giebelwände und Dachkonstruktionen zu den häufigsten Schäden zu zählen sind. Darüber hinaus konnten verstärkt Schäden am tragenden Mauerwerk und den nichttragenden, aussteifenden Mauerwerkswänden sowie an den Anschlussstellen Wand-Wand und Wand-Decke beobachtet werden [5], [41].

Im Rahmen dieser Arbeit wurden zunächst die Erdbebenschäden an einem ausgewählten Häuserblock mit insgesamt 30 Gebäuden, die größtenteils vor 1918 errichtet wurden und den Zagreber Gründerzeithausbestand repräsentieren sollen, erfasst und ausgewertet. Dabei konnte gezeigt werden, dass ein Großteil der untersuchten Gebäude starke bis sehr starke Erdbebenschäden zu verzeichnen hatten und den Schadensklassen 3 oder 4 gemäß EMS-98 [32] zugeordnet werden können. Darüber hinaus kann beobachtet werden, dass keinem der betrachteten Gründerzeithäuser die höchste Schadensklasse 5, die einem Kollaps des Gebäudes entspricht, zugewiesen werden konnte. Seismische Kompensationsmaßnahmen infolge eines Dachgeschoßausbaus stellen sich als wirksame Maßnahme zur Reduktion von Erdbebenschäden heraus und bestätigen Untersuchungen von *Karic et al.* [42].

Die Grundlage für die Evaluierung der seismischen Gebäudebeurteilung von Gründerzeithäusern nach *Achs* [1] und der Schnellbewertungsmethode gemäß FEMA P-154 [28] bildet die Schadensklassifikation der EMS-98 [32]. So können die Ergebnisse der Bewertungsmethoden direkt mit den tatsächlich erfassten Erdbebenschäden am Zagreber Altbestand verglichen werden. Dabei konnte festgestellt werden, dass die zweistufige RVS-Methode der FEMA P-154 [28], die als Grundlage für viele internationale Bewertungsmethoden dient, die Erdbebenwiderstandsfähigkeit der untersuchten Objekte in den meisten Fällen unterschätzt und auf der sicheren Seite liegend sehr konservative Ergebnisse liefert. Daraus kann abgeleitet werden, dass die FEMA P-154 mehr Sicherheitsfaktoren berücksichtigt als nötig. Das ist unter anderem darauf zurückzuführen, dass die FEMA P-154 auf viele verschiedenen Gebäudetypen in unterschiedlichen Erdbebenzonen angewendet werden kann und somit ist es nicht immer möglich die spezifischen Eigenschaften der einzelnen Gebäudetypen ausreichend genau zu berücksichtigen. Diese Unsicherheiten werden durch zusätzliche Sicherheitsfaktoren ausgeglichen. Daher wäre die FEMA P-154 als Basis für Risikobewertungen mit dem Ziel, seismische Ertüchtigungsmaßnahmen zielführend zu planen, ungeeignet. In zukünftigen Untersuchungen sollte unbedingt überprüft werden, ob die

Bewertung von Gründerzeithäusern, die sich in einer anderen seismischen Zone befinden wie beispielsweise Wien, mit dieser Methode realistischere Ergebnisse liefert.

Die Bewertungsmethode nach *Achs* [1] schätzt hingegen die Verletzbarkeit der untersuchten Objekte in vielen Fällen realistischer ein und stellt eine gute Methode zur seismischen Gebäudebeurteilung dar. Das war insofern zu erwarten, da die Methode nach *Achs* [1] speziell für Gründerzeithäuser entwickelt wurde. Zudem zeigt die Auswertung, dass die Anwendung außerhalb Wiens ohne Anpassungen möglich ist und vielversprechende Ergebnisse liefert. Angesichts neuer Erkenntnisse über die Vulnerabilität von Gründerzeithäusern, die aus der Schadensauswertung nach dem Erdbeben am 22. März 2020 in Zagreb resultieren, und den Ergebnissen der erstmaligen Anwendung dieser Methode auf einen Gebäudebestand zu dem gut dokumentierte Erdbebenschäden vorhanden sind, besteht dennoch Optimierungspotential. Eine ausführliche Analyse der Erdbebenschäden in Zagreb von *Karic et al.* [39] hat gezeigt, dass insbesondere die Ausbildung des Kellergeschoßes einen immensen Einfluss auf den Erdbebenwiderstand des Bauwerks hat. Eine teilweise Unterkellerung des Gebäudes bewirkt eine signifikante Erhöhung der seismischen Vulnerabilität im Vergleich zu vollständig unterkellerten Objekten. Zudem konnte beobachtet werden, dass zum einen die Schadensverteilung mit der Gebäudehöhe der Gründerzeithäuser zunimmt und zum anderen Giebelwände von Gebäuden die höher Schadensgrade zu erwarten sind. Diese Aspekte bleiben von *Achs* [1], aber auch von der FEMA P-154 [28], zur Gänze unbeachtet.

Des Weiteren basiert die Formel des Teilschadensparameters *S03* zur Berücksichtigung des Gebäudewerts auf einem strittigen Ansatz, da insbesondere im innerstädtischen Bereich, in denen zumeist eine hohe Dichte an Gründerzeithäusern vorzufinden ist, der Gebäudewert zu einem signifikanten Anteil durch den Grundstückspreis bestimmt wird. Treffender wäre der zu erwartende Wertverlust der Immobilie durch einen Totalkollaps bzw. die Errichtungskosten eines gleichwertigen Gebäudes, was prinzipiell von der Lage der Immobilie unabhängig ist. Darüber hinaus kann davon ausgegangen werden, dass auch in den nächsten Jahren inflationsbedingt die Immobilienpreise weiter steigen werden, was zu einer Erhöhung der Gewichtung dieses Parameters führen würde.

Der untersuchte Häuserblock befindet sich in derselben Erdbebenzone und es wird von ähnlichen Bodenverhältnissen ausgegangen. Um den Einfluss unterschiedlicher Untergrundverhältnisse sowie unterschiedlicher seismischer Zonen auf die zu erreichende Bewertung nach *Achs* [1] aufzuzeigen, könnten in künftigen Studien unterschiedliche stratigraphische Bodenprofile ausgewertet werden. Darüber hinaus wurden im Rahmen dieser Arbeit lediglich 30 Objekte bewertet. Um aussagekräftigere Ergebnisse liefern zu können, wäre die Beurteilung eines größeren Gebäudebestands und der Vergleich mit den jeweiligen Erdbebenschäden wünschenswert.

Zudem könnte eine Parameterstudie mit den Ergebnissen der einzelnen Parameter der Bewertungsmethode nach *Achs* [1] aus dieser Arbeit und jenen Resultaten aus der großflächigen Anwendung von *Achs* [1] auf insgesamt 375 Gründerzeithäuser in Wien, weitere Erkenntnisse über die Gewichtung und den Einfluss der verschiedenen Teilparameter liefern.

## Literaturverzeichnis

- [1] Achs G.: *Erdbebengefährdung von Gründerzeithäusern: Beurteilung, Klassifizierung und experimentelle Untersuchungen [Dissertation]*. Technische Universität Wien, Wien, 2011
- [2] Achs G. und Adam C.: *Seismische Beurteilung von Wiener Gründerzeithäusern*. Könke C. (Hrsg.) 12. D-A-CH Tagung – Erdbeben und Baudynamik: S. 311-322, Hannover, Deutschland, 2011
- [3] Achs G. und Adam C.: *Schnellbewertung der seismischen Schadensanfälligkeit von Wiener Gründerzeithäusern*. Adam C., Heuer R., Lenhardt W. und Schranz C. (Hrsg.) 13. D-A-CH Tagung für Erdbebeningenieurwesen und Baudynamik (D-A-CH 2013): Beitragsnr. 538, Wien, 2013
- [4] Atalić J., Šavor Novak M., Uroš M.: *Updated risk assessment of natural disasters in Republic of Croatia – seismic risk assessment*. Faculty of Civil Engineering in Zusammenarbeit mit Ministry of Construction and Physical Planning und National Protection and Rescue Directorate, 2018
- [5] Atalic J., Urus M., Savor Novak M., Demsic M., Nastev M.: *The MW5.4 Zagreb (Croatia) earthquake of March 22, 2020: impacts and response*. Bulletin of Earthquake Engineering 19: S.3461-3489. <https://doi.org/10.1007/s10518-021-01117-w>, 2021
- [6] Austrian Standards Institute (Österreichisches Normungsinstitut) (Hrsg.): *Eurocode 8: Auslegung von Bauwerken gegen Erdbeben - Teil 1: Grundlagen, Erdbebeneinwirkungen und Regeln für Hochbauten*. Wien, 2013
- [7] Austrian Standards Institute (Österreichisches Normungsinstitut) (Hrsg.): *Eurocode 8: Auslegung von Bauwerken gegen Erdbeben - Teil 1: Grundlagen, Erdbebeneinwirkungen und Regeln für Hochbauten - Nationale Festlegungen zu ÖNORM EN 1998-1 und nationale Erläuterungen*. Wien, 2017
- [8] Austrian Standards Institute (Österreichisches Normungsinstitut) (Hrsg.): *Eurocode 8: Auslegung von Bauwerken gegen Erdbeben - Teil 3: Beurteilung und Ertüchtigung von Gebäuden*. Wien, 2013
- [9] Austrian Standards Institute (Österreichisches Normungsinstitut) (Hrsg.): *Eurocode 8: Auslegung von Bauwerken gegen Erdbeben - Teil 3: Beurteilung und Ertüchtigung von Gebäuden - Nationale Festlegungen zu ÖNORM EN 1998-3 und nationale Erläuterungen*. Wien, 2018
- [10] Bachmann H.: *Erdbebensicherung von Bauwerken, 2. Auflage*. Springer Basel AG, 2002
- [11] Balak, M.: *Bauwerksanalyse und Bewertung von Trockenlegungsmaßnahmen, dargestellt am Beispiel von Gründerzeithäusern [Dissertation]*. Technische Universität Wien, Wien, 1990
- [12] Balak M., Pech A.: *Mauerwerkstrockenlegung – Von den Grundlagen zur praktischen Anwendung – Altbausanierung: Sonderband, 2. Auflage*, Springer Verlag, Wien, 2008
- [13] Bedenko V.: *Die Gestaltung einer Hauptstadt: Zagreb von den Anfängen bis zur Gründerzeit*. Werk, Bauen + Wohnen 88 (9): S.16-23, <https://doi.org/10.5169/seals-65802>, 2001

- [14] Bektaş N., Kegyes-Brassai O.: *Conventional RVS Methods for Seismic Risk Assessment for Estimating the Current Situation of Existing Buildings: A State-of-the-Art Review*. Sustainability 2022, 14, 2583, <https://doi.org/10.3390/su14052583>, 2022
- [15] Bjažić Klarin T.: *The Exchange of Urban Planning Theory and Practice Along the Austro-Hungarian Periphery*. In E. Gantner, H. Hein-Kircher, O. Hochadel (Hrsg.), *Interurban Knowledge Exchange in Southern and Eastern Europe, 1870–1950* (Kapitel 4), Routledge, London, 2021
- [16] Bundesamt für Umwelt BAFU (Hrsg.): *Erdbebenrisiko großer Gebäudebestände - Stufenweises Verfahren zur Identifizierung von kritischen Gebäuden*. Bern, Schweiz, 2020
- [17] Calvi G.M., Pinho R., Magenes G., Bommer J.J., Restrepo-Vélez L.F., Crowley H.: *Development of seismic vulnerability assessment methodologies over the past 30 years*. ISET Journal of Earthquake Technology 43 (3): S.75-104, 2006
- [18] Croatian Standards Institute (Hrsg.): *HRN EN 1998-1:2011. Design of Structures for Earthquake Resistance. Part 1: General Rules, Seismic Actions and Rules for Buildings*. Zagreb, Croatia, 2011
- [19] Croatian Standards Institute (Hrsg.): *HRN EN 1998-1:2011/NA:2011. Design of Structures for Earthquake Resistance. Part 1: General Rules, Seismic Actions and Rules for Buildings - National Annex*. Zagreb, Croatia, 2011
- [20] Croatian Standards Institute (Hrsg.): *HRN EN 1998-3:2011. Design of Structures for Earthquake Resistance. Part 3: Assessment and retrofitting of buildings*. Zagreb, Croatia, 2011
- [21] Croatian Standards Institute (Hrsg.): *HRN EN 1998-3:2011/NA:2011. Design of Structures for Earthquake Resistance. Part 3: Assessment and retrofitting of buildings - National Annex*. Zagreb, Croatia, 2011
- [22] Damjanović D.: *In the Shadow of Budapest (and Vienna) – Architecture and Urban Development of Zagreb in the Late Nineteenth and Early Twentieth Centuries*. Zeitschrift für Ostmitteleuropa-Forschung 67 (4): S.522-551, <https://doi.org/10.25627/201867410474>, 2018
- [23] Danciu L., Nandan S., Reyes C., et al.: *The 2020 update of the European Seismic Hazard Model – ESHM20: Model Overview*. EFEHR Technical Report 001, v1.0.0 <https://doi.org/10.12686/a15>, 2021
- [24] D’Ayala D., Speranza E.: *An integrated procedure for the assessment of seismic vulnerability of historic buildings*. In: ICE (Institution of Civil Engineers), *Proceedings of the 12th European Conference on Earthquake Engineering* (Paper Reference 561). England, London, 9-13 September 2002
- [25] D’Ayala D., Speranza E.: *Definition of Collapse Mechanisms and Seismic Vulnerability of Historic Masonry Buildings*. Earthquake Spectra 19 (3): S.479-509, 2003
- [26] Duma G.: *Seismische Mikrozonierung des Stadtgebietes von Wien*. Projekt des Bundesministeriums für Wissenschaft und Forschung und der Stadt Wien, Endbericht, Wien, 1988
- [27] EuroNatur: *Sava River Restoration - from Brežice to Rugvica*, Stiftung Europäisches Naturerbe, EuroNatur, Radolfzell, Deutschland, 2021
- [28] FEMA P-154: *Rapid Visual Screening of Buildings for Potential Seismic Hazards: A Handbook. Third Edition*. Applied Technology Council for the Federal Emergency Management Agency, FEMA, Washington, D.C., USA, 2015
- [29] FEMA P-155: *Rapid Visual Screening of Buildings for Potential Seismic Hazards: Supporting Documentation. Third Edition*. Applied Technology Council for the Federal Emergency Management Agency, FEMA, Washington, D.C., USA, 2016
- [30] GEM Foundation - OpenQuake Map Viewer [Online]: *Global Seismic Hazard Map*. Verfügbar: <https://maps.openquake.org/map/global-seismic-hazard-map/> [Zugriff am 15.10.2022]



- [31] Google Maps für Chrome [Online]: *Karte von Kroatien*. Kartendaten © 2022 Google, GeoBasis-DE/BKG (©2009), Inst. Geogr. Nacional, Verfügbar: <https://www.google.at/maps/place/Kroatien/@44.7243958,15.1846468,7z/data=!4m5!3m4!1s0x133441080add95ed:0xa0f3c024e1661b7f!8m2!3d45.1!4d15.2000001?hl=de> [Zugriff am 12.11.2022]
- [32] Grünthal G., Musson R. M. W., Schwartz J., Stucky M.: *European Macroseismic Scale 1998 (EMS-98)*. European Seismological Commission: Working Group Macroseismic Scales, Luxembourg, 1998
- [33] Grünthal G.: *Kernteil der Europäischen Makroseismischen Skala (EMS-98) in deutscher Übersetzung*. Deutsches GeoForschungsZentrum GFZ, <https://doi.org/10.2312/ems-98.core.de>, 2020
- [34] Harirchian E., Lahmer T., Buddhiraju S., Mohammad K., Mosavi A.: *Earthquake Safety Assessment of Buildings through Rapid Visual Screening*. Buildings 2020, 10, 51; doi:10.3390/buildings10030051, 2020
- [35] HCPI Datenbank: *GIS-gestützte Datenbank zur Gebäudenutzbarkeit*. Croatian Center for Earthquake Engineering, Faculty of Civil Engineering, University of Zagreb and the Zagreb City (auf Kroatisch) [Zugriff am 20.01.2022]
- [36] Herak M., Allegretti I., Herak D., Ivančić I., Kuk V., Marić K., Markušić S., Sović I.: Republic of Croatia, Seismic hazard map. <http://seizkarta.gfz.hr>, 2011
- [37] JBDPA (Hrsg.): *Seismic Evaluation and Retrofit*, Japan Building Disaster Prevention Association, Tokyo, Japan, 2001
- [38] Kahle D.: *Bauvorschriften für die Stadt Zagreb im Zeitraum zwischen 1850 und 1918*. Prostor 12 (2): S.203-214, 2004
- [39] Karic A., Atalic J., Kolbitsch A.: *Seismic Vulnerability of Historic Brick Masonry Buildings in Vienna*. Bulletin of Earthquake Engineering 20: S.4117–4145, <https://doi.org/10.1007/s10518-022-01367-2>, 2022a
- [40] Karic A., Kolbitsch A.: *Gründerzeitliche Mauerwerksbauten unter Erdbebeneinwirkung – Tragverhalten im Widerspruch zur aktuell angewandten Nachbemessung*. Mauerwerk 24 (3): S.137-147, <https://doi.org/10.1002/dama.202000009>, 2020
- [41] Karic A., Atalic J., Rudisch A., Kolbitsch A.: *Gründerzeitliche Mauerwerksbauten unter Erdbeben – Wechselwirkung zwischen tragender Gebäudestruktur und nichttragenden Bauelementen*. Veröffentlichung bevorstehend
- [42] Karic A., Rudisch A., Kolbitsch A.: *Verhalten von historischen Mauerwerksbauten unter Erdbebenbeanspruchung - Einfluss schubstarrer Decken auf die Erdbebensicherheit*. Der Bauingenieur Ausgabe 10: S.2-9, <https://doi.org/10.37544/0005-6650-2019-10-15>, 2019
- [43] Karic A., Sonnek R., Deix K., Kolbitsch A.: *Nachbemessungsstrategie für gemauerte, gründerzeitliche Schubwände*. Veröffentlichung bevorstehend
- [44] Kolbitsch A.: *Altbaukonstruktionen: Charakteristika Rechenwerte Sanierungsansätze*. Springer Verlag, Wien, 1989
- [45] Kolbitsch A.: *E+E - Erhaltung und Erneuerung von Hochbauten*, Skriptum WS 2021/22, Technische Universität Wien, Wien, 2021
- [46] Lovra E.: *Urban Tissue Typology and Urban Typology (1868-1918) - Special Cases: Zagreb and Rijeka*. Prostor 24(52):S.202-215, Faculty of Architecture University of Zagreb, 2016
- [47] Lovra E., Šćitaroci M. O., Šćitaroci B. B. O.: *Transformations of Urban Structures - Effects of Railway Construction on the Urban Tissue in the Cities of Austro-Hungarian Empire (1867-1918)*. Prostor 24(52):S.188-201, Faculty of Architecture University of Zagreb, 2016
- [48] Magistrat der Stadt Wien, MA 21 – Stadtteilplanung und Flächennutzung: *Masterplan Gründerzeit - Handlungsempfehlungen zur qualitätsorientierten Weiterentwicklung der gründerzeitlichen Bestandsstadt*, Wien, 2018

- [49] Markušić S., Stanko D., Korbar T., Belić N., Penava D., Kordić B.: *The Zagreb (Croatia) M5.5 Earthquake on 22 March 2020*. Geosciences 10 (7), 252, <https://doi.org/10.3390/geosciences10070252>, 2020
- [50] Meskouris K., Hinze K., Butenweg C., Mistler M.: *Bauwerke und Erdbeben: Grundlagen - Bauwerke - Beispiele, 3. Auflage*. Vieweg+Teuber, 2011.
- [51] Meskouris K., Sadegh-Azar H., Bérézowsky, H., Dümling, R.: *Schnellbewertung der Erdbebengefährdung von Gebäuden*. Der Bauingenieur 7 (8): S. 370 - 376, 2001
- [52] Moufid Kassem M., Mohamed Nazri F., Noroozinejad Farsangi E.: *The seismic vulnerability assessment methodologies: A state-of-the-art review*. Ain Shams Engineering Journal 11 (4): S.849-864, <https://doi.org/10.1016/j.asej.2020.04.001>, 2020
- [53] NASA Earth Science - Disasters Program - NASA Disasters Mapping Portal [Online]: *ARIA Damage Proxy Map (Copernicus Sentinel-1) on 3/23/2020 for the Croatia Earthquake*. Verfügbar: [https://maps.disasters.nasa.gov/ags04/rest/services/croatia\\_earthquake\\_202003/aria\\_dpm\\_sentinel1\\_20200323/ImageServer](https://maps.disasters.nasa.gov/ags04/rest/services/croatia_earthquake_202003/aria_dpm_sentinel1_20200323/ImageServer) [Zugriff am 15.10.2022]
- [54] Nanda R.P., Majhi D.R.: *Rapid seismic vulnerability assessment of building stocks for developing countries*. KSCE J. Civ. Eng (18): S.2218-2226, 2014
- [55] NRCC (Hrsg.): *Manual for Screening of Buildings for Seismic Investigation*. Institute for Research in Construction, National Research Council of Canada, Ottawa, Canada, 1993
- [56] Numbeo [Online]: *Immobilienpreise in Zagreb*. Verfügbar: <https://de.numbeo.com/immobilienpreise/stadt/Zagreb> [Zugriff am 31.10.2022]
- [57] OASP (Hrsg.): *Provisions for Pre-Earthquake Vulnerability Assessment of Public Buildings (Part A)*. Greek Earthquake Planning and Protection Organization, Athen, Griechenland.
- [58] Pech A., Hollinsky K.: *Dachstühle - Baukonstruktionen: Band 7*, Springer Verlag, Wien, 2005
- [59] Pech A., Hollinsky K., Zach F.: *Steildach - Baukonstruktionen: Band 8*, Birkhäuser Verlag, Basel, 2015
- [60] Rodler F.-A.: *Bestimmung von Erdbebenparametern aus makroseismischen Daten von Österreich* [Diplomarbeit]. Universität Wien, 2012
- [61] Rusnov B.: *Analyse von erdbebengefährdeten Bauwerken mit dem Schwerpunkt auf alten und historischen Gebäuden* [Dissertation]. Technische Universität Wien., Wien, 2006
- [62] Sadegh-Azar H.: *Schnellbewertung der Erdbebengefährdung von Gebäuden* [Dissertation]. RWTH Aachen, Aachen, 2002
- [63] Šavor Novak M., Uroš M., Atalić J., Herak M., Demšić M., Baniček M., Lazarević D., Bijelić N., Crnogorac M., Todorović M.: *Zagreb earthquake of 22 March 2020 - preliminary report on seismologic aspects and damage to buildings*. Građevinar 72 (2020) 10: S. 843 - 867, <https://doi.org/10.14256/JCE.2966.2020>, 2020
- [64] Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein (Hrsg.): *SIA 2018. Überprüfung bestehender Gebäude bezüglich Erdbeben*. Zürich, Schweiz, 2004
- [65] Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein (Hrsg.): *SIA 269/8. Erhaltung von Tragwerken - Erdbeben*. Zürich, Schweiz, 2017
- [66] SEISMID: *Seismic System Identification*. [www.seismid.com](http://www.seismid.com), Wien, 2011
- [67] Statistik Austria: *Wohnen - Zahlen, Daten und Indikatoren der Wohnstatistik*, Wien, 2022
- [68] Titscher F.: *Die Baukunde - mit besonderer Berücksichtigung des Hochbaues und der einschlägigen Baugewerbe, Lehr-, Hilfs- und Nachschlagebuch und Konstruktionsbehelf für Baukundige, Studierende, Gebäudeverwalter, usw. 127 Plantafeln zum I. und II. Band*. 3. Auflage, Waldheim-Eberle Verlag, A.-G, Wien, 1918

- [69] Uroš M., Šavor Novak M., Atalić J., Sigmund Z., Baniček M., Demšić M., Hak S.: *Post-earthquake damage assessment of buildings – procedure for conducting building inspections*. *Građevinar* 72 (2020) 12: S. 1089 - 1115, <https://doi.org/10.14256/JCE.2969.2020>, 2020
- [70] USGS – Earthquake Hazards Program [Online]: *M 5.3 - 5 km E of Gornja Bistra, Croatia - Did You Feel It?*. Verfügbar: <https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/eventpage/us70008dx7/shakemap/intensity> [Zugriff am 14.10.2022]
- [71] USGS – Earthquake Hazards Program [Online]: *M 5.3 - 5 km E of Gornja Bistra, Croatia – Shake Map*. Verfügbar: <https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/eventpage/us70008dx7/shakemap/pga> [Zugriff am 14.10.2022]
- [72] Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik (ZAMG) [Online]: *Erdbebenrisiko*. Verfügbar: <https://www.zamg.ac.at/cms/de/geophysik/lexikon/erdbebenrisiko> [Zugriff am 19.09.2022]
- [73] ZG Geoportal [Online]: *Geoportal of the Zagreb Spatial Data Infrastructure*. City Office for Economy, Environmental Sustainability and Strategic Planning Sector for Strategic Information and Research, Verfügbar: <https://geoportal.zagreb.hr/karta?tk=1> [Zugriff am 12.11.2022]