

Diplomarbeit

Erdbebenschäden am Hochbaubestand – Erdbeben in Zagreb, Kroatien am 22. März 2020

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

Diploma Thesis

Earthquake damage to the building stock – The Earthquake in Zagreb, Croatia on the 22nd of March 2020

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

von

Marko Gregurić, BSc

Matr.Nr.: 01126909

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

Während sich die heutigen Bauvorschriften mit einer erdbebensicheren Bauweise auseinandersetzen und klare Vorgaben leisten, war diese Grundlage bei historischen Bauten überwiegend nicht gegeben. Ein großer Prozentsatz der Bauten, die vor den 1960er Jahren errichtet wurden, wurde ohne Berücksichtigung etwaiger seismischer Einwirkungen konstruiert. Solche Bauwerke zeigen bei mittleren und starken Erdbeben im Vergleich zu neueren Bauwerken eine deutlich höhere seismische Empfindlichkeit. Aufgrund der Seltenheit starker Erdbebenereignisse, vor allem in Gebieten moderater Seismizität, konnten die Schadensfolgen von Erdbeben an historischen Bauten bis dato nicht ausreichend detailliert untersucht und analysiert werden. Diese Arbeit befasst sich vertiefend mit dem Zagreber Erdbeben am 22. März 2020. Untersucht werden die Erdbebenschäden an historischen Mauerwerksbauten eines typischen Häuserblocks im Stadtzentrum von Zagreb, Kroatien. Das Ziel der Arbeit ist es, einen Überblick über kritische Gebäudestrukturen hinsichtlich seismischer Einwirkung zu geben.

In der Arbeit werden zunächst, um einen Rückblick über die seismischen Aktivitäten in dieser Region zu erhalten, die bedeutendsten historischen Erdbebenereignisse in Kroatien vorgestellt. In weiterer Folge werden die Normen aus der Bauzeit der betrachteten Bauten beleuchtet. Darüber hinaus wird die damalige Baukonstruktionsweise mitsamt verwendeter Materialien erörtert. Vor der Studie der Erdbebenschäden infolge des Zagreber Erdbebens wird die Herangehensweise der Erdbebenschadensbewertung sowie der Bestandsanalyse beschrieben.

Der Häuserblock mit den analysierten historischen Bauten in der Zagreber Innenstadt steht charakteristisch für die innerstädtische Bebauung und stellt die Basis für die Erstellung von Sanierungskonzepten für die Stadt Zagreb dar. Die innerstädtischen, historischen Mauerwerksbauten weisen mit der Baukonstruktionsweise aus der Österreichisch-Ungarischen Monarchie (\approx 1840–1920) identische Konstruktionsmerkmale auf. Aufgrund der guten Vergleichbarkeit der gemauerten Bauweisen liefert die Schadensanalyse grundlegende Daten, welche bedeutende Erkenntnisse über das Verhalten von historischen Mauerwerksbauten unter Erdbeben liefern sollen und neben dem Zagreber auch auf den Wiener Altbaubestand umgelegt werden können. Die charakteristische Bauweise der Gründerzeit ist durch massive Mauerwerkswände, große Geschosshöhen sowie vorwiegend Holzdecken mit Trakttiefen von bis zu 6,5 m gekennzeichnet. Aufbauend auf den umfangreich erhobenen Erdbebenschäden sowie Bestandsdaten (Pläne, Baubeschreibungen etc.) konnten kritische Gebäudestrukturen der gemauerten Bestandsbauten bestimmt und analysiert werden.

Abstract

While today's building codes address seismic design and provide clear guidance, with most historic buildings this was not the case. A large percentage of structures built prior to the 1960s was constructed without consideration of possible seismic effects. Such structures show significantly higher sensitivity to seismic actions during moderate and strong earthquakes compared to newer structures. Due to the rarity of strong earthquake events, especially in areas of moderate seismicity, the damage consequences of earthquakes on historic buildings could not be studied and analyzed in sufficient detail until now. This work deals in depth with the Zagreb earthquake on March 22, 2020, investigating earthquake damage to historic masonry buildings of a typical block of houses in the city center of Zagreb, Croatia. The aim of the work is to provide an overview of critical building structures due to seismic action.

To have an overview of seismic activities in this region, the paper first explores the most significant historical earthquake events in Croatia. Subsequently, the codes from the construction period of the considered structures are highlighted. In addition, the construction methods along with the materials used at that time are discussed. Before studying the earthquake damage due to the Zagreb earthquake the approach of the earthquake damage assessment as well as the as-built analysis is described.

The block of houses with the analyzed historic buildings in the city center of Zagreb characteristically represents the inner-city development and is used as the basis for the preparation of refurbishment concepts for the city of Zagreb. The inner-city historic masonry buildings have identical construction characteristics with the construction methods from the Austro-Hungarian Empire (\approx 1840-1920). Due to the good comparability of the masonry construction methods, the damage analysis provides fundamental data, which furthermore provides significant insights into the behavior of historic masonry buildings during earthquakes and can be applied to the Zagreb as to the Viennese historic building stock. The characteristic construction method of the Gründerzeit period is typified by massive masonry walls, large floor heights and predominantly wooden ceilings with tract depths of up to 6,5 meters. Based on the extensively surveyed earthquake damages as well as on inventory data (plans, building descriptions etc.) critical building structures of the masonry existing buildings could be determined and analyzed.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung und Problemstellung.....	6
1.1	Forschungsziel	9
1.2	Aufbau der Arbeit	9
2	Grundlagen.....	9
2.1	Geologie Kroatiens und des Raums Zagreb.....	9
2.2	Historische Erdbeben in Kroatien.....	10
2.3	Erdbeben in Zagreb.....	11
2.4	Das Erdbeben in Zagreb am 22. März 2020.....	16
2.4.1	Erdbebenschäden am Hochbaubestand im Raum Zagreb	19
3	Hochbaubestand Zagreb.....	23
3.1	Bautechnische Vorschriften in Kroatien (1880–1964).....	23
3.2	Vorschriften in Kroatien – Diskussion	25
3.3	Baukonstruktionsweise der Stadt Zagreb vor 1964.....	26
3.3.1	Fundamentkonstruktionen	26
3.3.2	Mauerwerkswände.....	29
3.3.3	Deckenkonstruktionen	30
3.3.4	Konstruktionsweise Treppenhaus.....	33
3.3.5	Dachkonstruktionen	34
3.4	Materialqualität des Zagreber Gründerzeitbestandes	37
3.4.1	Holz	37
3.4.2	Metallische Werkstoffe	38
3.4.3	Mauerwerk.....	39
	Natürliche Steine	39
	Künstliche Steine und Bindemittel.....	40
3.5	Vergleich zu Wien	44
4	Bewertungsgrundlagen für die begutachteten Erdbebenschäden – Zagreber Erdbeben 22. März 2020.....	45
4.1	Zagreber Bewertungsbogen zur Schadenserfassungen nach Erdbebenereignissen..	46
4.2	Zagreber Innenstadt – Häuserblock 19	53
4.3	Gebäudedaten des begutachteten Häuserblocks.....	54
4.3.1	Umbauten über die Jahrzehnte – Fallbeispiel	55
4.4	Erdbebenschäden am gemauerten Altbau	56
5	Schadensanalyse – Zagreber Erdbeben 22. März 2020.....	59
5.1	Tragende Mauerwerkswände (Längswände)	61
5.1.1	Schadensgradverteilung	61
5.1.2	Schadensbilder	61
5.2	Vertikal nichttragende Bauelemente (Querwände)	64
5.2.1	Schadensgradverteilung	64
5.2.2	Schadensbilder	65
5.3	Treppenhaus.....	66

5.3.1	Schadensgradverteilung	66
5.3.2	Schadensbilder.....	67
5.4	Decken.....	68
5.4.1	Schadensgradverteilung	69
5.4.2	Schadensbilder.....	69
5.5	Dachboden/Dach	70
5.5.1	Schadensgradverteilung	71
5.5.2	Schadensbilder.....	71
5.6	Nichttragende Elemente	72
5.6.1	Schadensgradverteilung	73
5.6.2	Schadensbilder.....	73
5.7	Diskussion.....	75
5.8	Diskussion – kritische Gebäudecharakteristika.....	77
5.8.1	Zustand des Mauerwerks	78
5.8.2	Mauerwerkswände.....	79
5.8.3	Dachboden.....	80
5.8.4	Decken.....	80
6	Zusammenfassung	81

1 Einleitung und Problemstellung

Kroatien wurde neben der COVID-19 Pandemie im Jahr 2020 ebenso durch verheerende Starkerdbebenereignisse getroffen. Das erste Starkerdbebenereignis trat in Zagreb am 22. März mit einer Magnitude von $M_w = 5,4$ [1] auf. Das zweite, noch stärker ausfallende, Starkerdbebenereignis folgte in Petrinja am 29. Dezember mit einer Magnitude von $M_w = 6,4$ [2]. Beide Erdbebenereignisse verursachten verheerende Schäden und hatten schwerwiegende soziale Auswirkungen. Zagreb ist mit einer Vielzahl an Verwaltungsgebäuden, mehr als 380 Kindergärten, Schulen und Universitäten die Hauptstadt Kroatiens. Die Stadt Zagreb hatte nach dem Zensus im Jahr 2021 769.944 Einwohner und 382.926 Wohneinheiten. Rund 25,8 % des Hochbaubestandes – Stand 2021 bzw. 97.579 Wohneinheiten stammen aus der Zeit vor 1964, wo bei der Planung und Errichtung von Gebäuden der Lastfall Erdbeben überwiegend nicht berücksichtigt wurde [3], [4].

Die Republik Kroatien liegt im nördlichen Teil des Mittelmeerraumes an der östlichen Küste des Adriatischen Meeres. Das Land befindet sich, tektonisch eingeordnet, überwiegend auf der Eurasischen Kontinentalplatte. Dieser an Plattengrenzen liegende Raum ist auf Grund einer konvergenten Bewegung der Afrikanischen Kontinentalplatte in Richtung der Eurasischen Platte ein seismisch aktives Gebiet, welches eine Zone erhöhter Erdbebengefährdung darstellt [5].

Erdbeben sind standortspezifisch seltene Ereignisse. Schwache Erdbeben mit einer Magnitude M_w der Moment-Magnituden-Skala von 2 oder weniger werden weltweit mehrere hundert Mal am Tag aufgezeichnet. Starkerdbebenereignisse mit einer Magnitude über 8 treten hingegen statistisch gesehen global einmal im Jahr auf [6]. Abhängig von Energie- bzw. Frequenzgehalt, der Amplitude sowie der Dauer haben Erdbeben sehr unterschiedliche soziale und ökonomische Auswirkungen. Während schwächere Erschütterungen teilweise völlig unbemerkt vorübergehen, können stärkere Erdbeben Personen ängstigen und Schäden an Gebäuden verursachen. Sehr starke Erdbeben hingegen können selbst Bauten mit erdbebengerechter Konstruktion beschädigen, gar zerstören, und Menschenleben fordern. Um die Erdbebenauswirkungen an der Erdoberfläche einheitlich zu kategorisieren wird die seismische Intensität von Erdbeben vorwiegend nach der Europäischen Makroseismischen Skala (EMS-98) beschrieben [7].

Der kroatische Akademiker Andrija Mohorovičić, der die erste seismologische Station in Kroatien im Jahr 1901 in Betrieb nahm, wies schon am Anfang des 20. Jahrhunderts in seinem Buch „Djelovanje potresa na zgrade“ – auf Deutsch: Erdbebeneinwirkungen auf Gebäude – auf die hohe Erdbebengefährdung im Land hin [8].

Das Erdbeben in Zagreb am 22. März 2020 zeigte gravierend, dass im Raum Zagreb ein nicht zu vernachlässigendes Erdbebenrisiko herrscht. Bei dem Ereignis wurde bei historischen, gemauerten Altbauten eine deutlich höhere seismische Verletzbarkeit als bei neueren, auf

Erdbeben ausgelegten Bauten aufgezeigt. Schäden wie starke Risse in Wänden, herabfallende Schornsteine oder Giebelwände sowie verheerende Folgeschäden konnten in ganz Zagreb dokumentiert werden. Das Stadtzentrum mit seinem historischen, gemauerten Altbestand zeigte die verheerendsten und häufigsten erdbebeninduzierten Schadensbilder [1].

Bis 1948 gab es in Kroatien keine erdbebenrelevanten Richtlinien oder Normen. Vor dieser Zeit wurden beim Gebäudebau keine planerischen und konstruktiven Maßnahmen berücksichtigt, um die Gebäude erdbebensicherer zu entwerfen. Aus diesem Grund sind vor allem gemauerte Altbauten anfällig gegenüber seismischen Einwirkungen. Im Jahr 1948 wurde in Kroatien eine technische Vorschrift veröffentlicht, welche erstmals eine erdbebensichere Auslegung von Gebäuden beinhaltete. Dieses Dokument stellte den ersten Schritt zu einer erdbebenrelevanten konstruktiven Auslegung von Hochbauten dar. Die erste tatsächlich bedeutende Richtlinie, welche sich intensiver mit der Thematik der Erdbebensicherheit von Gebäuden auseinandersetzt, wurde nach dem verheerenden Erdbeben in Skopje (Nordmazedonien) 1963 im Jahr 1964 veröffentlicht. Die Erdbebenintensität in Skopje konnte der Stufe 9 nach der EMS-Skala [7] zugeordnet werden [9], [10]. Bei diesem verheerenden seismischen Ereignis kamen mehr als 1.000 Menschen ums Leben, mehr als 4.000 wurden verletzt und über 200.000 Menschen wurden obdachlos [11].

Aufgrund der hohen seismischen Gefährdung Kroatiens ist das Wissen über das dynamische Tragverhalten von historischen Mauerwerksbauten von grundlegender Bedeutung. Um die Erdbebensicherheit sowie die seismische Verletzbarkeit von gemauerten Bestandsobjekten zu analysieren, wird in dieser Arbeit anhand einer ausführlichen Dokumentation eine umfassende Studie über die beobachteten Erdbebenschäden am Zagreber Hochbaubestand nach dem verheerenden Erdbeben am 22. März 2020 erarbeitet.

Abbildung 1 zeigt die Auswertung der Verteilung der Nutzbarkeit der einzelnen Objekte nach dem Erdbeben im Frühjahr 2020. Insgesamt wurden 26.349 Gebäude nach dem Beben überprüft. Auf Grund von starken Erdbebenschäden wurden 1.411 Gebäude als „nicht nutzbar“, 5.181 als „temporär nicht nutzbar“ und 19.757 als „nutzbar mit Anweisungen“ bzw. als „nutzbar“ eingestuft [12], [13]. Das bedeutet, dass etwa 5,4 % der untersuchten Gebäude durch das Erdbeben so stark beschädigt wurden, dass diese Objekte aus Sicherheitsgründen als nicht nutzbar/betretbar eingestuft werden mussten. Weiters wurden 19,7 % als temporär nicht nutzbar und 74,9 % als nutzbar klassifiziert. Zusammengefasst durften auf Grund der hohen Sicherheitsbedenken etwa ein Viertel der untersuchten Objekte (etwa 25,1 %) infolge des Erdbebens nicht oder temporär nicht betreten werden.

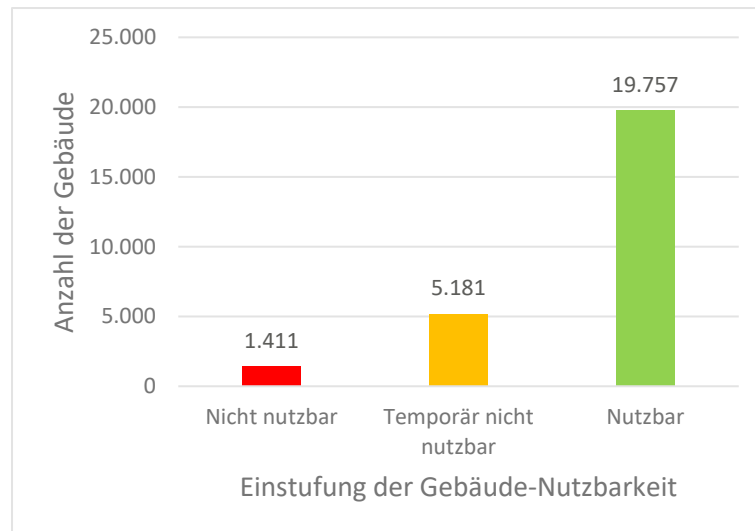


Abbildung 1: Verteilung der Gebäude-Nutzbarkeit nach dem Erdbeben in Zagreb im Frühjahr 2020 [13].
Abb.: Autor

Bei der Untersuchung der Nutzbarkeit der Gebäude in Zagreb wurden Gebäudedaten (Pläne, Baugenehmigungen, etc.) sowie die beobachteten Erdbebenschäden innerhalb der Objekte berücksichtigt. Zur Ausarbeitung dieser Arbeit wurden detaillierte Schadensdaten über die Erdbebenschäden am historischen Mauerwerksbestand herangezogen, die im Zuge von Begehungen der Objekte unmittelbar nach dem Erdbeben erfasst wurden. Der untersuchte Häuserblock umfasst 35 Mauerwerksbauten, welche überwiegend zu Wohnzwecken genutzt werden. In dieser Arbeit werden die Erdbebenschäden über charakteristische Strukturbereiche der historischen Bauten wiedergegeben sowie die Höhe des erlittenen Erdbebenschadens erfasst und bewertet. Aufbauend auf dieser Auswertung wird eine Studie der sich einstellenden Schadensverteilung über die unterschiedlichen Gebäudestrukturen ermöglicht.

Die Stadt Zagreb war von 1527 bis zum Zerfall im Jahr 1918 Teil der Habsburgermonarchie [14], [15]. Die gemauerten Altbauten, welche heutzutage immer noch in großer Anzahl vor allem im Stadttinneren zu finden sind, entstammen überwiegend der Epoche der Österreichisch-Ungarischen Monarchie (\approx 1870 bis 1920). Die Stadt und vor allem die gemauerte Baukonstruktionsweise orientierte sich an der damaligen Bauweise der Monarchie. Viele Baumeister und Arbeiter kamen aus Österreich, weswegen die Baukonstruktionsweise der gemauerten Altbauten in Zagreb mit der gründerzeitlichen Bauweise aus Wien als ident einzustufen ist [10], [16]. Somit können die gewonnen Erkenntnisse über die Erdbebenschäden am gründerzeitlichen Altbau in Zagreb auch zu einer erdbebentechnischen Bewertung der Wiener Gründerzeitbauten herangezogen werden.

1.1 Forschungsziel

Ziel dieser Arbeit ist eine umfassende Untersuchung und Kategorisierung der Erdbebenschäden am gemauerten Hochbaubestand in Zagreb nach dem verheerenden Erdbeben am 22. März 2020. Neben einer grundlegenden Bestandserfassung der konstruktiven Ausbildungen der Zagreber Hochbaukonstruktionen wird die Identifizierung kritischer Strukturbereiche des gemauerten Hochbaubestandes hinsichtlich seismischer Einwirkungen angestrebt. Durch eine detaillierte Analyse der Erdbebenschäden stellt diese Arbeit eine gute Basis für die Bewertung ebendieser kritischen Strukturbereiche im gründerzeitlichen Mauerwerksbau dar.

1.2 Aufbau der Arbeit

Um einen Überblick über die seismische Aktivität der Region Zagreb, Kroatien, zu erlangen, werden im zweiten Kapitel historische Erdbebenereignisse in Kroatien, speziell im Raum Zagreb, vorgestellt. Ebenso wird das Erdbeben am 22. März 2020 ausführlich wiedergegeben. Im dritten Kapitel wird die charakteristische Bauweise der gemauerten Altbauten der Stadt Zagreb aus der Österreichisch-Ungarischen Monarchie 1870–1918 beleuchtet. Darauffolgend wird in Kapitel 4 die angewandte Methodik der Nutzbarkeitsbewertung der Gebäude nach dem Erdbeben sowie der Schadensklassifizierung der erfassten Erdbebenschäden vorgestellt. Des Weiteren wird in diesem Kapitel der untersuchte Gebäudeblock im Stadtzentrum von Zagreb beschrieben. Die Erdbebenschäden am gründerzeitlichen Mauerwerksbestand des Häuserblockes werden in Kapitel 5 mit dem Ziel klassifiziert und analysiert, eine bautechnische Analyse der Konstruktion des gemauerten Altbaus im Sinne der Erdbebensicherheit aufzubereiten und zu diskutieren.

2 Grundlagen

2.1 Geologie Kroatiens und des Raums Zagreb

Die Republik Kroatien befindet sich im südlichen Teil Mitteleuropas sowie im nördlichen Teil des Mittelmeerraumes. Kroatien liegt dabei überwiegend auf der Eurasischen, zu kleinen Teilen auch auf der Adriatischen Platte. Auf Grund der konvergenten Bewegung Afrikas in Richtung der Eurasischen Platte ist der Teil des Mittelmeeres, in dem sich die Republik Kroatien befindet, tektonisch und seismisch aktiv. Auf der Basis von GPS-Messungen wird die Geschwindigkeit dieser Plattenbewegung auf 9 mm/Jahr geschätzt [17]. Seismo-tektonisch betrachtet ist das zentrale und östliche Mittelmeer das aktivste Gebiet in Europa. Ungefähr die Hälfte der konvergenten Bewegung Afrikas nach Norden, in Richtung der Eurasischen Platte, entfällt an die Subduktion entlang des hellenischen und kalabrischen Bogens. Der Rest der Bewegung wird auf den stabilen Teil der Adriatischen Platte im Ionischen und Adriatischen Meer übertragen [5]. In

Bezug auf die Eurasische Platte wird die übertragene konvergente Bewegung des stabilen Teiles der Adriatischen Mikroplatte mit genauen GPS-Messungen auf 0,5 bis 4,5 mm/Jahr geschätzt. Diese Plattenverschiebung führt am Rand der Adriatischen Mikroplatte und den umgebenden Gebirgszügen (den Alpen, Dinariden und Apenninen) zur lokalen Sammlung tektonischer Spannungen, deren Entladungen sich für die Erdbebenereignisse in dieser Region verantwortlich zeigen [17].

Die Bewegungen der Erdplatten gegeneinander erzeugen Spannungen in den Randbereichen der Platten. Wenn die Spannungen die Festigkeit des Gesteins übersteigen, sind Scherbrüchen die Folge. Die gesammelte elastische Energie wird in Form von Erschütterungen freigesetzt – ein Erdbeben entsteht [18]. Der Ort, an dem dieser Bruch entsteht, wird als Hypozentrum bzw. Erdbebenherd definiert. Die Projektion auf die Erdoberfläche direkt über dem Hypozentrum wird als Epizentrum bezeichnet. Die entstehende Erschütterung breitet sich konzentrisch vom Hypozentrum in Form von Wellen aus, welche vertikale und horizontale Bodenbewegungen verursachen [19], [20].

Die Stadt Zagreb befindet sich im südwestlichen Teil des Pannonischen Beckens, ungefähr 200 km nordöstlich des Randes der Adriatischen Mikroplatte. Die Stadt liegt am südöstlichen Hang des Medvednica Berges und der Fluss Sava fließt durch die Stadt. Nördlich der Sava liegt das alte Stadtzentrum, während sich südlich der Sava Stadtgebiete mit Gebäuden befinden, die überwiegend nach 1950 errichtet wurden [4]. Der Medvednica Gebirgszug, oft auch als Zagreber Berg bezeichnet, wurde durch tektonische Hebungen ab dem Ende des Neogens und Quartärs (vor 6 Millionen Jahren) bis heute gebildet. In diesem Gebirgszug befindet sich die Medvednica-Verwerfung, deren nördlicher Rand die wichtigste seismogene Quelle in diesem Gebiet darstellt. Dieses Verwerfungssystem erstreckt sich von der Sava im Westen bis zum Berg Gornja im Osten. Den historischen Erdbebenereignissen zufolge kann diese Verwerfungszone zu mäßigen bis hin zu starken Erdbeben im Raum Zagreb führen [18].

2.2 Historische Erdbeben in Kroatien

Die in der Republik Kroatien und ihrer Umgebung aufgetretenen und registrierten, teils historischen, Erdbeben sind gut dokumentiert in einer Datenbank des Seismologischen Instituts der Fakultät für Naturwissenschaften und Mathematik, dem kroatischen Erdbebenkatalog (Hrvatski katalog potresa), gesammelt [5]. Die erfassten Erdbebendaten im Erdbebenkatalog reichen bis ins Jahr 373. v. Chr. zurück. Das erste dokumentierte Erdbeben in Kroatien ereignete sich in der Nähe der Stadt Opuzen im südlichen Teil des Landes und ist mit dem Jahr 306 n. Chr. datiert [5].

Im kroatischen Erdbebenkatalog sind Daten zu mehr als 135.000 Erdbebenereignissen bis zum Jahr 2020 aufgezeichnet und archiviert. Jedes Jahr konnten in etwa 10.000 bis 12.000 Erdbeben

erfasst und in den Katalog aufgenommen werden. Bei etwas mehr als der Hälfte dieser Erdbeben liegt die Erdbebenquelle innerhalb der kroatischen Grenzen, was eine hohe seismische Aktivität in diesem Raum bestätigt [5]. In Tabelle 1 werden die Epizentren der 13 stärksten Erdbeben in Kroatien seit dem 17. Jahrhundert aufgelistet. Die angeführten Erdbeben hatten an ihrem Epizentrum zumindest eine Erdbebenintensität von $I_0 \geq \text{VIII}^\circ\text{MCS}$ (Mercalli-Cancani-Sieberg-Skala). Nach der MCS-Skala ist die Intensität der Erdbeben in zwölf Stufen gegliedert [19]. Die in der Tabelle 1 aufgelisteten Ereignisse, wie beispielsweise in Međimurje, zeigen, dass starke Erdbeben mit hohen Schäden auch in seismisch weniger aktiven Gebieten auftreten können.

Seit dem Anfang des 19. Jahrhunderts stellen sich mit dem Zagreber Erdbeben am 22. März 2020 vergleichbare Ereignisse in etwa alle drei Jahre ein. Es wurden in diesem Zeitraum mehr als 73 komparable Erdbeben aufgezeichnet. Im kroatischen Erdbebenkatalog sind insgesamt 110 Erdbeben mit einer Intensität $I_0 \geq \text{VII}^\circ\text{MCS}$ und einem Epizentrum innerhalb der heutigen kroatischen Grenzen zu finden.

Tabelle 1: Bedeutende historische Starkerdbebenereignisse der Intensität von $I_0 \geq \text{VIII}^\circ\text{MCS}$ im Epizentrum seit dem 17. Jahrhundert in Kroatien [10].

Datum	Ort	M_L	I_0 ($^\circ\text{MCS}$)
6. April 1667	Dubrovnik	6,9*	IX
30. März 1738	Međimurje	5,1	VIII
13. April 1850	Ston	6,4*	VIII-IX
1. März 1870	Klana	5,5*	VIII-IX
9. November 1880	Zagreb	6,2*	VIII
2. Juli 1898	Trilj	6,7*	IX
8. Oktober 1909	Pokuplje	5,8	VIII
12. März 1916	Vinodol	5,8	VIII
27. März 1938	Bilogora	5,6	VIII
29. Dezember 1942	Imotski	6,2	VIII-IX
7. und 11. Jänner 1962	Makarska	5,9 und 6,1	VIII und VIII-IX
13. April 1964	Dilj Gora	5,7	VIII
5. September 1996	Ston-Slano	6,0	VIII

* Historische Erdbeben – die Magnitude wurde aus der Intensität geschätzt [10]

2.3 Erdbeben in Zagreb

Der Zagreber Standort mit seiner Nähe zur Verwerfungszone Medvednica besitzt eine hohe seismische Aktivität und ist dementsprechend zahlreichen Erdbeben ausgesetzt. Das erste dokumentierte Erdbeben in Raum Zagreb zerstörte am 26. März 1502 einen Kirchturm. Weitere Daten sind über dieses Erdbebenereignis jedoch nicht bekannt. Erst mit dem Jahr 1872 begann

man mit einer genaueren Dokumentation der Erdbeben im Raum Zagreb. Diese wurden in einer deutschsprachigen Zeitschrift namens "Luna" erfasst [20].

In den letzten 150 Jahren wurde die Stadt Zagreb von mehreren verheerenden Erdbeben erschüttert. Das verheerendste und stärkste dieser Beben wurde am 9. November 1880 dokumentiert. Seit 1880 hatten mehrere starke Erdbeben ihr Epizentrum im Raum Zagreb:

- 20. Juni und 11. Oktober 1883 mit einer Intensität von VI °MCS im Epizentrum
- 17. Dezember 1901 mit einer Intensität von VII °MCS im Epizentrum
- 17. Dezember 1905 mit einer Intensität von VII bis VIII °MCS im Epizentrum
- 2. Januar 1906 mit einer Intensität von VII bis VIII °MCS im Epizentrum
- 3. September 1990 mit einer Intensität von VII °MCS im Epizentrum [20]

Im Nachfolgenden werden die bedeutendsten historischen Erdbeben in Zagreb sowie ihre Auswirkungen auf Gebäude und Mensch überblicksartig beleuchtet.

Das Erdbeben am 9. November 1880

Am 9. November 1880 um 6:34 Uhr ereignete sich ein Erdbeben mit dem Epizentrum am Berg Gornja, etwa 16 km nordöstlich von Zagreb. Die Stärke dieses Erdbebens wurde auf $M_L = 6,3$ mit einer Intensität von IX °MCS geschätzt. Die Stadt hatte damals 30.000 Einwohner, von denen zwei infolge des seismischen Ereignisses verstarben. Im Raum Zagreb gab es zu diesem Zeitpunkt etwa 3.800 Gebäude. Durch das Erdbeben wurde fast die Hälfte dieser Bauten beschädigt [21]. Im Jahr 1882 veröffentlichte Josip Torbar einen umfassenden Bericht [22] über dieses Ereignis. Seinen Schätzungen nach befand sich der Erdbebenherd in einer Tiefe von 10 bis 15 km. Mit modernen Untersuchungsmethoden konnten seine Schätzungen im Nachhinein bestätigt und auf eine Erdbebenherdtiefe von 12 bis 17 km geschätzt werden [22], [20].

Josip Torbar [22, p. 3] schreibt in seinem Bericht: „Als man nach dem Erdbeben durch die Stadt lief, war der Anblick schrecklich.“ Die Wände von Häusern, Kirchen und vielen anderen Gebäuden zeigten Risse. Der größte Teil der Schäden zeichnete sich durch die Zerstörung von gemauerten Schornsteinen aus. Überwiegend stürzten sie auf Dächer, in Dachböden oder auf die Straßen. Generell konnten Risse und Beschädigungen an unterschiedlichen Gebäudestrukturen beobachtet werden. Viele Feuermauern und Giebelwände wurden beschädigt oder vollkommen zerstört. An einigen Stellen waren die Straßen aufgrund herabgefallener Trümmer unpassierbar [22]. Nach Angaben von Torbar [22] zeigten alle Gebäude in Zagreb leichte bis sehr starke Erdbebenschäden auf. Abbildung 2 stellt das Ereignis unmittelbar während des Erdbebens dar, als die Einwohner der Stadt in Panik verfielen und herabfallenden Schornsteinen sowie weiteren Gebäudestrukturen ausweichen mussten.

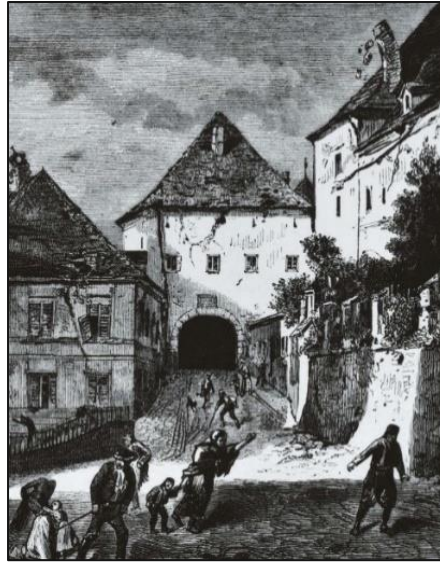


Abbildung 2: Eine Lithografie des Erdbebens im Jahr 1880 bei den bekannten „Kamenita vrata“ (Steintor).
Bild: *Museum der Stadt Zagreb*

Auch die Kathedrale in Zagreb zeigte schwere Schäden. Ein Teil des Daches stürzte ein und brach durch den Dachboden, wie in Abbildung 3 und Abbildung 4 ersichtlich ist. Viele Statuen und Säulen wurden stark beschädigt [22].



Abbildung 3: Durchbrochener Boden im Zagreber Dom nach dem Erdbeben im Jahr 1880. Foto: *Ivan Standl*



Abbildung 4: Erdbebenschäden im Zagreber Dom nach dem Erdbeben im Jahr 1880. Foto: *Ivan Standl*

Nach dem Erdbeben besichtigte Torbar einen Turm der Kathedrale und beschrieb die vorgefundenen Schäden. Diesen Turm teilte Torbar in insgesamt 20 gleichmäßige Teile bzw. Schichten, wobei Schäden an den obersten sieben Ebenen zu finden waren. Die Schäden traten beginnend bei der 14. Schicht, etwa 26,5 Meter über dem Boden, auf und wurden mit steigender Höhe gravierender. Die Steine des Turms hatten sich aus ihrer ursprünglichen Position verschoben. Josip Torbar konnte aus dieser Verschiebung der Steine des Stiegenturms die Richtung des Erdbebens in Nordosten/Südwesten ableiten [22].

Das Erdbeben vom 9. November 1880 ist eines der historisch prägendsten seismischen Ereignisse in Kroatien und wird als das „Große Zagreber Erdbeben“ bezeichnet. Wie nach dem Erdbeben am 22. März 2020 wurden in Folge dieses historischen Erdbebens eine Serie schwacher Nachbeben über den Zeitraum einiger Monate dokumentiert [23].

Erdbeben am 17. Dezember 1901

Das Erdbeben am 17. Dezember 1901 hatte im Epizentrum eine Magnitude von $M_L = 4,6$ sowie eine Intensität von VII °MCS. Das Epizentrum befand sich im damaligen Ort Šestine, dem heutigen Nordrand der Stadt Zagreb [5]. Das Erdbeben ereignete sich um 3:15 Uhr nachmittags und dauerte 4 Sekunden. Es verursachte keine großen Schäden. Einzelne Rauchfänge stürzten ein, Ornamente und Figuren fielen von den Dächern herab. Es wurden ebenso Beschädigungen und Risse in gemauerten Wänden, jedoch keine Einstürze, gemeldet [24].

Erdbeben am 17. Dezember 1905 und 2. Januar 1906

Die Erdbeben vom 17. Dezember 1905 und 2. Januar 1906 hatten im Epizentrum eine Intensität von VII bis VIII °MCS. Das erste Erdbeben hatte eine Magnitude von $M_L = 5,6$, das Zweite von $M_L = 6,1$. Bei beiden Beben lagen ihre Epizentren auf dem Medvednica Gebirgszug etwa 15–20 km nordöstlich von Zagreb, fast an identischer Stelle wie das Erdbeben von 1880 [5], [25].

Für das erste Beben am 17. Dezember 1905 wurde keine Schadensdokumentation vorgenommen, das nachfolgende Erdbeben vom 2. Januar 1906 führte jedoch zu erheblichen Erdbebenschäden, welche schriftlich festgehalten wurden. Erneut wurden überwiegend Schornsteine zerstört, Wandputze zeigten Risse und es konnten leichte bis starke Schäden an Gesimsen beobachtet werden. Ebenso führten herabfallende Rauchfänge zu Beschädigungen an den Dachkonstruktionen einiger Gebäude. Weiters sind in der Dokumentation Objekte aufgelistet, bei welchen an Feuermauern Schäden in Form von Rissen festgestellt werden konnten. Schon damals konnte aufgrund der Schadensverteilung unterschiedlicher Gebäude der Rückschluss gezogen werden, dass bestimmte Bauweisen anfälliger gegenüber seismischen Ereignissen waren als andere [26].

Erdbeben am 8. Oktober 1909

Am 8. Oktober 1909 ereignete sich ein weiteres starkes Erdbeben mit dem Epizentrum in Vukomeričke Gorice, ungefähr 30 km südlich von Zagreb. Dieses Erdbeben hatte eine Intensität von VIII bis IX °MCS [20].

Etwa 20 km südöstlich des Epizentrums, in Petrinja, wurden große Schäden an alten gemauerten Gebäuden dokumentiert. Fast alle Schornsteine wurden zerstört und beschädigten als Folge ihres Herabfallens zahlreiche Dachkonstruktionen. Außerdem wurden viele

Feuermauern beschädigt sowie gänzlich zerstört. An vielen Decken fiel der Putz herunter, fast keine Trennwand blieb unbeschädigt [27].

Erdbeben am 3. September 1990

Am 3. September 1990 ereignete sich das letzte Starkerdbebenereignis vor dem Erdbeben im Jahr 2020. Dieses Beben hatte eine lokale Magnitude von $M_L = 4,8$ und eine Intensität von VII °MCS. Das Epizentrum konnte ungefähr 14 km nordwestlich von Zagreb in der Ortschaft Kraljev Vrh festgestellt werden [28]. Dieses Erdbeben verursachte nur geringe Schäden [25].

Die Erdbebenereignisse zwischen den Jahren 1880 und 2020 fielen weniger stark aus und verursachten dabei deutlich geringere Erdbebenschäden als jene der beiden genannten Jahre. In 29 Jahren, von 1880 bis 1909, wurden im Raum Zagreb sieben Erdbeben mit einer Intensität von VI °MCS oder mehr erfasst. In den folgenden 71 Jahren, bis 1990, ereigneten sich weitere fünf vergleichbare Beben [5]. Es zeigt sich, dass starke Erdbeben in der Region Zagreb regelmäßig auftreten. Um in der Zukunft besser auf Erdbebenereignisse und deren Folgen vorbereitet zu sein, ist die Studie über historische Erdbebenereignisse für eine qualitative Bewertung der Erdbebengefährdung von grundlegender Bedeutung.

Wie der erste Professor für Geophysik an der Universität Zagreb, Dr. Stjepan Škreb, 1930 anlässlich des 50-jährigen Jubiläums des Großen Erdbebens von Zagreb sagte [29]:

“Kad znamo da je zagrebačko tlo takovo, onda nam valja pripaziti da građevine, što ih tu gradimo, budu ne samo statički, nego i dinamički valjano konstruirane, pa će nam zgrade stajati, da će se i 30 generacija iza nas moći diviti našem ukusu, ili neukusu. Ne leži težina problema o zagrebačkim potresima u tom da otkrijemo način, kako ćemo moći točno unaprijed proreći kada će biti potres, kako bi građani mogli pobjeći iz kuća, da prepuste kuće sudbini, a sebe spasu, već je težina problema u tom, da se dopuštaju samo takove gradnje, koje mogu bez opasnosti za stanovnike izdržati one sitne pomake, što ih kad i kad prouzrokuju zagrebački potresi.”

Auf Deutsch: „Wenn wir schon wissen, dass der Boden in Zagreb so ist, wie er ist, dann müssen wir aufpassen, dass die Gebäude, die wir bauen, nicht nur statisch, sondern auch dynamisch gut gestaltet sind, so dass sie stehen bleiben und dass man auch 30 Generationen nach uns unseren guten oder schlechten Geschmack bewundern kann. Die Schwierigkeit des Problems mit den Erdbeben in Zagreb liegt nicht darin, dass wir einen Weg finden müssen diese vorherzusagen, um den Einwohnern aus den Häusern das Weglaufen zu ermöglichen, die Häuser ihrem Schicksal zu überlassen und sich zu retten, sondern darin, nur solche Bauweisen zu erlauben, die ohne eine

Gefährdung der Einwohner den kleinen Bewegungen, die manchmal durch Erdbeben in Zagreb verursacht werden, widerstehen können.¹⁴

2.4 Das Erdbeben in Zagreb am 22. März 2020

Am 22. März 2020 um 6:24 Uhr wurde die Stadt Zagreb von einem Erdbeben der Stärke $M_w = 5,4$ erschüttert. Das Beben stellte mit einer Intensität von VII °EMS im Epizentrum das stärkste Erdbeben seit dem "Großen Zagreber Erdbeben" im Jahr 1880 dar [1]. Das Epizentrum lag in der Gegend von Markuševac und Čučerje, 7 km nördlich des Stadtzentrums von Zagreb. Der Erdbebenherd befand sich in einer Tiefe von 10 km, wodurch es als flaches Erdbeben eingestuft wird. Die Erdbebenerschütterungen waren in ganz Kroatien bis hin zu Nachbarländern, unter anderem auch in Wien, zu spüren.

Nach Schätzungen der kroatischen Regierung in Zusammenarbeit mit der Weltbank verursachte das Erdbeben in Zagreb Sachschäden in Höhe von 11,3 Milliarden Euro [30]. Neben den hohen ökonomischen Folgen verlor durch das Erdbeben ebenso ein 15-jähriges Mädchen ihr Leben. 27 weitere Personen wurden verletzt, zwölf davon schwer [31], [32]. Abbildung 5 zeigt die Verteilung der gemessenen Erdbebenintensitäten in Kroatien nach EMS-98 zufolge der Ereignisse am 22. März 2020.

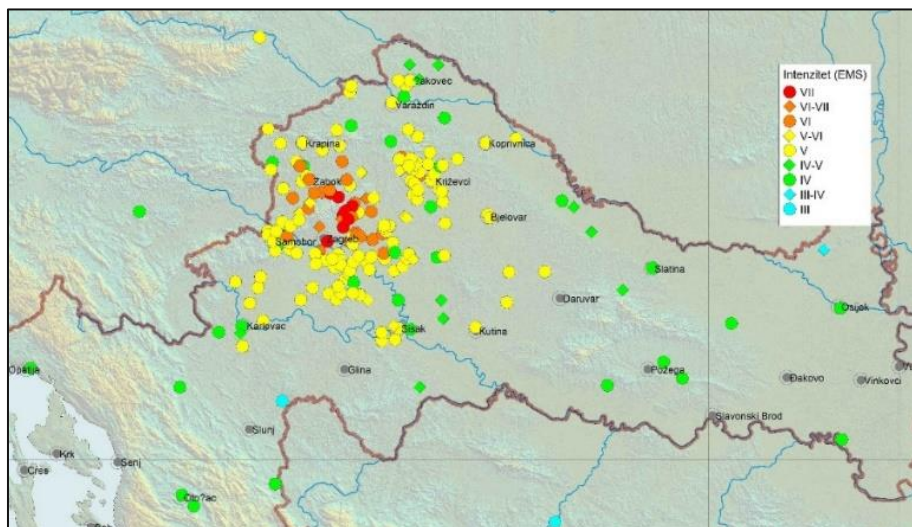


Abbildung 5: Verteilung der Erdbebenintensität nach EMS-98 der Erdbebenserie vom 22. März 2020 [32].

Um bessere Messungen zu ermöglichen, wurden vom seismologischen Dienst an der Geophysischen Abteilung der Fakultät für Naturwissenschaften mit Hilfe des Geophysisches Instituts Andrija Mohorovičić innerhalb weniger Tage nach Beginn dieser Erdbebenserie drei temporäre Stationen für die Messung seismischer Aktivitäten in der unmittelbaren Nähe des Epizentrums des Haupterdbebens errichtet. Mit Hilfe dieser Messungen konnten viele

¹ Übersetzung des Autors

Folgebeben, insbesondere die schwächeren Nachbeben, besser erfasst und folglich besser analysiert werden [5].

Es wurden nach dem Haupterdbeben am 22. März bis zum 1. Juni 2020 mehr als 1.650 schwächere Erdbeben erfasst. Dabei hatten 613 dieser Nachbeben eine lokale Magnitude M_L von mehr als 1,0. Die Epizentren der Folgeserie konzentrierten sich im nordöstlichen Teil von Zagreb mit Herdtiefen von vier bis zwölf Kilometer. 37 Minuten nach dem Haupterdbeben, um 7:01 Uhr, ereignete sich das stärkste Nachbeben mit einer Magnitude von $M_L = 4,9$ [5]. Die Häufigkeit der Erdbeben war nach anfänglich hoher Frequenz rückläufig. So stellten sich in der ersten Woche 404 Erdbeben ein, was etwa einem Viertel der registrierten Nachbeben der ersten zweieinhalb Monaten entspricht. Dies deutet auf eine Stabilisierung der seismische Störungszone im Laufe der Zeit hin. Die Dauer der Periode der nachfolgenden Erdbeben hängt im Wesentlichen davon ab, wie viel elastische Verformungsenergie in der Verwerfungszone vor dem Erdbeben akkumuliert wurde und wie viel dieser Energie nach dem Erdbeben noch vorhanden ist [5].

Eine grobe Schätzung der Wiederkehrwahrscheinlichkeit seismischer Ereignisse kann mit Hilfe des modifizierten Omori-Gesetzes ermittelt werden. Dabei erfolgt durch die Beobachtung der Nachbeben mit Hilfe des modifizierten geophysikalischen Gesetzes eine Abschätzung der Zeitspanne, nach der die Häufigkeit der Nachbeben auf die Häufigkeit der Erdbebenereignisse vor dem Hauptbeben zurückgeht [33], [5].

Nach den Daten des kroatischen Erdbebenkatalogs wurden in dieser Region in der Zeit zwischen 2009 und 2018 0,014 Erdbeben pro Tag mit einer Magnitude M_L größer als 1,5 beobachtet. Das bedeutet, dass im Durchschnitt alle 71 Tage ein solches Erdbeben beobachtet werden konnte. Aus den bis 10. Juli 2020 gesammelten Daten wurde abgeschätzt, dass das ursprüngliche Niveau der seismischen Aktivitäten in dieser Region von Kroatien innerhalb von zwei Jahren nach dem Haupterdbeben wieder erreicht werden sollte [5].

Der nördliche Rand der Medvednica-Störungszone war der Erdbebenherd sowohl für das Zagreber Starkerdbeben am 22. März 2020 als auch im Jahr 1880. Darüber hinaus war diese Zone in den letzten Jahrzehnten für zahlreiche weitere seismische Ereignisse unterschiedlicher Stärke verantwortlich. Da die Verwerfungszone ungefähr 20 km lang und 12 km tief ist, werden nur Erdbeben bis zu einer maximalen Magnitude von $M_L = 6,5$ erwartet. Um stärkere Erdbeben auszulösen, müsste die Störungszone größer sein [5].

Die Haupt- und Nachbeben im Jahr 2020 wurden von zwei Beschleunigungsschreibern aufgezeichnet. Die Standorte der Beschleunigungsschreiber sind in Abbildung 6 mit A und B gekennzeichnet, wobei der Erdbebenherd des Hauptbebens mit einem weißen Stern dargestellt ist. Die Standorte der Schreiber liegen in etwa 8,2 km (Ort A) bzw. 11,7 km (Ort B) vom Erdbebenherd des Hauptbebens entfernt.



Abbildung 6: Standorte der Beschleunigungsschreiber A, B und Lage des Erdbebenherdes (Sternsymbol weiß-rot) der Erdbebenserie am 22. März 2022 nach [23]. Karte: Google Maps

Die erfassten Erdbebenschriebe des Haupterdbebens an den Standorten A und B sind in Abbildung 7 dargestellt. Die Erdbebenschriebe in Grün stellen die vertikale Oberflächenbeschleunigung, in Rot die horizontale Oberflächenbeschleunigung in Richtung Nord-Süd und in Blau die horizontale Oberflächenbeschleunigung in Richtung Ost-West dar. Wie in Abbildung 7 zu sehen ist, wurde die maximale Oberflächenbeschleunigung von $a_{a,max} = 0,20$ g am Standort A während des Haupterdbebens ($M_L = 5,5$) gemessen und stellt die horizontale maximale Oberflächenbeschleunigung in Ost-West-Richtung dar. Am Standort B wurde die maximale horizontale Oberflächenbeschleunigung von $a_{b,max} = 0,22$ g erfasst und stellt die horizontale maximale Oberflächenbeschleunigung in Nord-Süd-Richtung dar. Das stärkste Nachbeben ($M_L = 4,9$) hatte eine horizontale Oberflächenbeschleunigung von $a_{a,max} = 0,04$ g am Standort A und eine horizontale Oberflächenbeschleunigung von $a_{b,max} = 0,07$ g am Standort B [34].

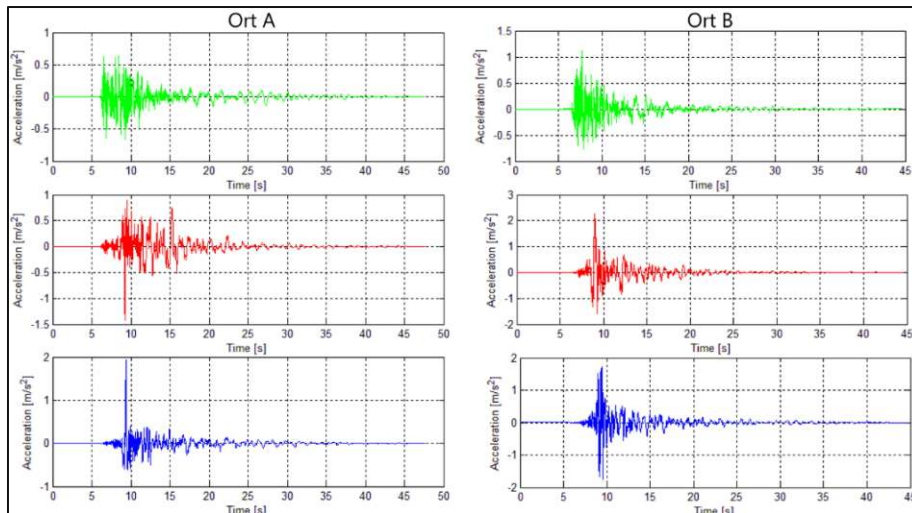


Abbildung 7: Erfasste Erdbebenschreibe des Haupterdbebens am 22. März 2022 (Standort A und B) [34].

Die Beschleunigungsspektren des Zagreber Erdbebens in den Richtungen Ost-West und Nord-Süd sind in Abbildung 8 wiedergegeben. Diese werden mit den Antwortspektren laut EC 8 mit einer Wiederkehrperiode von 475, 225 und 95 Jahre überlagert, ebenso wird das Bemessungsspektrum ENV-500 nach dem alten Kroatischen Seismischen Code dargestellt [1]. Es ist ersichtlich, dass das Beschleunigungsspektrum Ost-West phasenweise mit dem Bemessungsspektrum laut dem alten Kroatischen Seismischen Code überlagert werden kann, damit überschreitet es das Bemessungsspektrum mit einer Wiederkehrperiode von 475 nach EC 8.

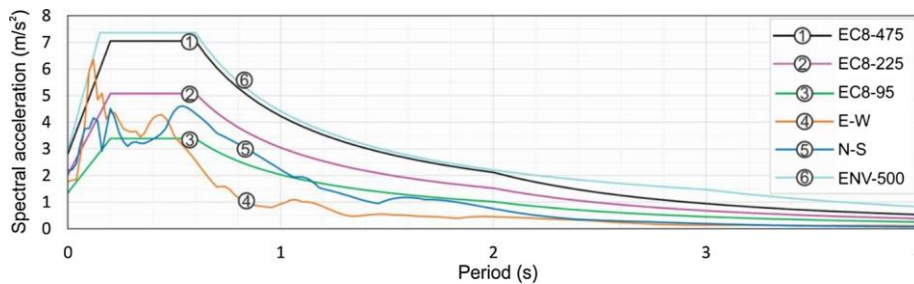


Abbildung 8: Gegenüberstellung der normativen Antwortspektren nach EC 8 (1, 2, 3) und dem Antwortspektrum ENV-500 (6) nach dem alten Kroatischen Seismischen Code mit den erfassten horizontalen Bodenspektren in Richtung Ost-West (4) und Nord-Süd (5) [1].

2.4.1 Erdbebenschäden am Hochbaubestand im Raum Zagreb

Das Erdbeben im Frühjahr 2020 verursachte in der Region Zagreb enorme Schäden in einem Ausmaß, das sich seit dem Starkerdbeben von 1880 nicht mehr eingestellt hatte.

Die verheerenden Erdbebenschäden konnten an Bauelementen und an den Folgeschäden bzw. Sekundärschäden durch das Herabfallen solcher Bauelemente beobachtet werden. Einerseits wurden bedeutende Strukturen der Gebäude, wie tragende Wände, Decken, Treppen usw., durch das Erdbeben beschädigt. Andererseits wurden beim Herabfallen unterschiedlicher Bauelemente,

wie Rauchfänge, Giebelmauern, etc., verheerende Folgeschäden verursacht. Diese Schäden konnten an unterschiedlichen Gebäudearten, darunter Wohnhäuser, Spitäler, Schulen, Sakralbauten und Andere, erfasst werden.

Öffentliche Gebäude

Öffentliche Gebäude stellen Objekte aus dem Gesundheits-, Schulungs-, Verwaltungssektor sowie Sakralbauten u.dgl. dar. Über 200 Gebäude aus dem Gesundheitssektor waren vom Erdbeben betroffen. Davon erlitten 4 % erhebliche und 19 % mäßige bis starke Schäden. Das Objekt mit dem größten Ausmaß an erlittenem Schaden aus dem Gesundheitssektor war die Klinik für Orthopädie Šalata. Dieses Gebäude wurde 1931 errichtet und hat einen rechteckigen Grundriss mit 60 m Länge und 17 m Tiefe. Die Kellerwände und Decken bestehen aus Stahlbeton, die Wände des Erdgeschosses und der Obergeschosse jedoch aus unbewehrtem Mauerwerk. Zwei Rauchfänge an der westlichen Seite des Gebäudes wurden zerstört sowie viele tragende und nicht tragende Wände leicht bis stark beschädigt. In den Querwänden konnten hierbei charakteristisch diagonale Schubrisse festgehalten werden [23]. Das Gebäude war aus Sicherheitsgründen nach dem Erdbeben am 22. März 2020 nicht benutzbar [35].

Zu den Sakralbauten, Verwaltungsgebäuden und anderen zählen über 360 Objekte in Zagreb. Von diesen wurden durch das Zagreber Erdbeben etwa 11 % stark und 32 % mäßig bis stark beschädigt [30]. Von 43 Sakralbauten in der Stadt Zagreb wurden 30 in Mitleidenschaft gezogen, unter anderem zeigte die als nationales Kulturgut gekennzeichnete Kathedrale von Zagreb hohe Beschädigungen auf. Die Spitze des südlichen Glockenturmes brach ab und beschädigte beim Absturz das Dach der Kathedrale. Nach einer näheren Begutachtung der Kathedrale konnten ebenso hohe Schäden am nördlichen Glockenturm festgestellt werden, weshalb dessen Spitze im Zuge der Aufräumarbeiten entfernt werden musste. Weiters wurden Teile der Balustrade, der Außenwände sowie des Gewölbes ramponiert [23].

Über 500 Ausbildungseinrichtungen (Schulen, Universitäten, etc.) waren vom Erdbeben betroffen. Etwa 2 % der Objekte erlitten erheblichen, rund 31 % der Objekte einen mäßigen bis starken Schaden. Die Juristische und die Medizinische Fakultät sowie die Kunstakademie wurden besonders stark in Mitleidenschaft gezogen. Sie zeigten die charakteristischen Schadensmechanismen gemauerter Altbauten [23].

Wohngebäude

Die meisten Schäden konnten an Zagreber Wohnbauten beobachtet werden, von denen etwa 4.600 der insgesamt 24.000 Wohnobjekte (19 %) mittelschwere bis schwere Schäden erlitten. Sehr starke Schäden wurden an 1.243 Wohngebäuden festgestellt (5 %) [36]. Der gemauerte

Altbestand mit überwiegend hölzernen Decken wies eine besonders hohe Empfindlichkeit gegenüber dem Erdbebenereignis auf [23].

Stahlbetonbauten und eingefasstes Mauerwerk

Im Allgemeinen bestätigten Stahlbetonbauten ihre hohe Widerstandsfähigkeit gegenüber dem Erdbeben. An manchen Gebäuden kam es zu Rissen und Abplatzungen des Betons in Anschlussbereichen von Stützen und Balken. Es konnten überwiegend Schäden an Stützen beobachtet werden, wo auf Grund der hohen Beanspruchung Risse, Abplatzungen bis hin zu lokalen Versagensmechanismen oder das Abscheren ganzer Stützen vorgefunden wurden. Diese können auf mangelnde Duktilität der Stützen oder auf ein Querkraftversagen zurückgeführt werden. Eine ausreichende Duktilität kann durch eine Begrenzung der Normalkraft in der Stütze bzw. durch eine Anordnung der Umschnürungsbügel erreicht werden. Ungenügende Verbügelungen und/oder schlechte Betonqualitäten führen zu mangelnder Querkrafttragfähigkeit der Stützen [37]. Ebenso konnten vermehrt Schäden in Anschlussbereichen von Treppen und Podesten erfasst werden. [12].

Bei eingefasstem Mauerwerk kam es vor allem zu Rissen im Mauerwerk selbst. Die charakteristischen Schadensbilder unter dem Erdbeben waren vor allem feine Risse im Putz, klaffende Diagonalarisse in Scheibenebene und die Beschädigung der Anschlussbereiche (Mauerwerk-Betonskelett) [38].

Gemauerter Altbaubestand

Der gemauerte Altbestand wies eine hohe seismische Verletzbarkeit auf und stellt in dieser Arbeit den Schwerpunkt der Untersuchung der Erdbebenschäden dar. Die betroffenen Bauelemente können in tragende und nichttragende Bauelemente unterteilt werden. Unter tragenden Bauelementen werden jene Bauelemente verstanden, die der vertikalen Lastabtragung, resultierend aus Eigengewicht und Nutzlasten, dienen (tragendes Mauerwerk, Decken etc.). Zu den nicht tragenden Bauelementen können jene Elemente gezählt werden, welche keine wesentliche vertikale Lastabtragung bewerkstelligen (Zwischenwände, Giebelwände, Rauchfänge etc.).

Von den nichttragenden Bauelementen wurden vor allem die gemauerten Rauchfänge beschädigt. Alte gemauerte Schornsteine stellen häufig über 5 m hohe, freistehende Bauelemente ohne jegliche Verankerung bzw. seitliche Abstützung dar. Sie sind nicht sehr widerstandsfähig gegenüber horizontalen Erdbebeneinwirkungen und reißen nach Überschreitung der Haftfestigkeit (Mörtelversagen der Lagerfuge) überwiegend über der Dachebene ab, was ein Kippen und Herabfallen des Bauelements zur Folge hat [10].

Weiters waren die Giebelwände und die Feuermauern stark beschädigt. Diese Strukturen werden aus der Ebene teilweise oder gar nicht gehalten, was die Anfälligkeit gegenüber

Erdbebenschäden und dem Umkippen dieser Wände aus der Wandebene deutlich erhöht. In einigen Schadensfällen löste sich die Feuermauer über mehrere Stockwerke und sogar über die gesamte Gebäudehöhe. Folgeschäden wurden vor allem durch herabfallende Bauelemente der Rauchfänge und Giebelwände verursacht. Dabei handelte es sich in der Regel um Schäden an der Dachhaut, der Dachkonstruktion und weiteren Folgeschäden durch das Herabfallen dieser Bauelemente auf die Nachbarbebauung u.dgl. [10].

Tragende Wände zeigten sowohl Schäden in Wandebene als auch aus der Wandebene. Dabei traten durch Scherspannung hervorgerufene diagonale Risse in der Wandebene auf, welche das charakteristische Schubversagen darstellen. Diese Risse stellen sich aufgrund der über die Jahrzehnte abmindernden Festigkeit des Mörtels (überwiegend Kalkmörtel) häufig in den Fugen ein. In stark beschädigten Gebäuden war weiters Versagen in Form eines Steinversagens aufzufinden. Risse an Tür- und Fensterstürzen stellten ebenfalls ein typisches Schadensbild dar. Hierbei konnten sowohl diagonale als auch vertikale Risse beobachtet werden. Ein hoher Schadensgrad wurde weiters in den Treppenhäusern inkl. einzelner Treppenstufen sowie bei Zwischenwänden, hierbei vor allem bei Querwänden, beobachtet [10].

Die Decken von gemauerten Altbauten sind überwiegend als Holzbalkendecken ausgeführt. Diese zeigten ihre typische flexible Strukturantwort, was zu Rissen am Deckenputz selbst und in den Anschlussbereichen zu den Wänden führte. In seltenen Fällen kam es zum Ausziehen eines Balkens aus seinem Auflager [10].

Zierelemente, Balustraden, Kuppeln etc. stellen sehr vulnerable Elemente dar und bergen durch ihre seismische Anfälligkeit, in weiterer Folge vor allem durch ein mögliches Herabfallen, eine große Gefahr [10].

Die sich eingestellten Erdbebenschäden am gemauerten Altbestand zeigen, dass der historische Mauerwerksbau eine empfindliche Bauweise gegenüber Erdbebeneinwirkungen darstellt. Wie in Kapitel 1 erwähnt, wurde über ein Viertel der Zagreber Wohnobjekte vor dem Jahr 1964 in gemauerter Bauweise errichtet und stellt auf Grund der hohen seismischen Anfälligkeit den Schwerpunkt dieser Arbeit dar.

3 Hochbaubestand Zagreb

In diesem Kapitel wird ein Überblick über die bautechnischen Vorschriften in Kroatien zwischen den Jahren 1880 und 1964 gegeben. Anschließend werden die charakteristischen Bauweisen der damaligen Zeit vorgestellt. Der Schwerpunkt dieser Arbeit liegt bei dem gründerzeitlichen Mauerwerksbestand in Zagreb aus der Epoche der österreichisch-ungarischen Monarchie. Schließlich werden die Materialeigenschaften von Ziegeln und Mörtel, den beiden dominierenden Materialien im Mauerwerksbau, detailliert wiedergegeben.

3.1 Bautechnische Vorschriften in Kroatien (1880–1964)

Je nach Errichtungsjahr der Gebäude variiert in Zagreb die Bauweise, vor allem in Bezug auf die Erdbebensicherheit. Im Gegensatz zu den österreichischen Gründerzeitbauten erfolgt in Zagreb keine Einteilung der historischen Mauerwerksbauten in Früh-, Hoch- und Spätgründerzeit. Der Zagreber Hochbaubestand lässt sich in vier große Gruppen bzw. Zeitperioden unterteilen. In jeder dieser Zeitperiode galten bestimmte Bauvorschriften, die sich in der jeweiligen Bauweise widerspiegeln. Die vier Zeitperioden können in die Zeit vor 1900, von 1900 bis 1948, von 1948 bis 1964 und von 1964 bis heute unterteilt werden [39]. Teilweise wird in der Literatur auch die Periode vor 1920 erwähnt, da ab 1920 allmählich Beton in der Baukonstruktionsweise vermehrt zum Einsatz kam [12].

Die Baukonstruktionen bis 1900 wurden zumeist nach den damals gültigen Vorschriften, wie der Bauordnung aus 1857, welche auf Faustformeln und Konstruktionsregeln basiert, gebaut [40], [39]. Einen großen Einfluss auf den damaligen Hochbaubestand hatte die Baupraxis der Österreichisch-Ungarischen Monarchie. Da die überwiegenden Gebiete der Österreichisch-Ungarischen Monarchie auf weniger seismisch aktiven Gebieten lagen, war das Risikobewusstsein gegenüber ebendiesen Einwirkungen nicht ausreichend ausgeprägt. Dies spiegelt sich vor allem in der Anfälligkeit der Bauwerke gegenüber seismischen Ereignissen wider.

In der Zeit von 1900 bis 1948 wurden die Planer und Baumeister aus Zagreb häufig an technischen Schulen und Universitäten ausgebildet, was der Weiterentwicklung der Bautätigkeiten und der Erdbebensicherheit zugutekam. Die Planung und der Bau erfolgten nach den damaligen Vorschriften, die trotz des schweren Erdbebens von 1880 eine nach wie vor mangelnde erdbebengerechte Auslegung aufwies. Auch in dieser Zeit hatten die Bauweisen aus der Österreichisch-Ungarischen Monarchie einen großen Einfluss auf den Hochbau in Zagreb und dem Rest des Landesinneren [39]. Österreich veröffentlichte zunächst im Jahr 1945 mit der ÖNORM B 4000-3 die erste Norm für erdbebensicheres Bauen [41]. Im Vergleich dazu führte Baden-Württemberg als erstes deutsches Bundesland erst im Jahr 1981 eine solche Norm

baurechtlich ein, nämlich die erste Fassung der DIN 4149 mit dem Titel „Bauen in deutschen Erdbebengebieten“ [42].

Österreich folgend wurde 1948 die technische Verordnung „Vorläufige technische Vorschriften für Gebäudebelastung“ (Amtsblatt der Föderativen Volksrepublik Jugoslawien 61/48) eingeführt. Sie bat einen rudimentären Leitfaden für die konstruktive, erdbebensichere Gestaltung und den Bau von Gebäuden. Diese Bauvorschrift war die erste bautechnische Vorschrift in der heutigen Republik Kroatien, die sich mit der erdbebensicheren Auslegung von Hochbauten befasste [43]. Bis 1964 wurde diese Norm allmählich implementiert, jedoch nur unzureichend befolgt. Viele Hochbauten aus der Zeit von 1948 bis 1964 sind aufgrund der mangelnden Einhaltung der vorgeschriebenen minimalen statischen Randbedingungen und Vorgaben nicht ordnungsgemäß geplant und stellen dadurch trotz gesetzlicher Regelung eine hohe Erdbebengefährdung dar. In dieser Vorschrift wurden für die Beurteilung der Standsicherheit unter Erdbebeneinwirkungen die nachfolgenden Parameter behandelt. Es wurde erstmals eine Erdbebenbelastung, dynamische Faktoren, Erdbebenzonen usw. definiert. Die anzusetzende Erdbebenkraft wurde je nach Erdbebenzone mit 1-2 % des Gebäudemasse festgelegt. Dabei unterschied sich diese anzusetzende Kraft in unterschiedlichen Ländern samt deren Normen, zum Beispiel wurde in einem slowenischen Verordnungsentwurf aus dem Jahr 1963 die Erdbebenkraft mit bis zu 10 % der Gebäudemasse definiert [43].

Ein Jahr nach dem verheerenden Erdbeben in Skopje 1963 wurde 1964 die „Verordnung über technische Übergangsbestimmungen für das Bauen in Erdbebengebieten“ (Amtsblatt der Sozialistischen Föderativen Republik Jugoslawien 39/64) veröffentlicht [9], [43]. Dies war die erste bindende erdbebenspezifische technische Vorschrift für den Bau von Hochbauten in Kroatien. Mitsamt dieser Verordnung wurde zum ersten Mal eine seismische Karte der Republik Jugoslawien mit einer Zonierung nach der MCS-Skala veröffentlicht [44]. Ebenso wurde zeitgleich die Berechnung der Erdbebeneinwirkungen nach [45] eingeführt.

Das verheerende Erdbeben in Skopje 1963 schärfte das Bewusstsein der Öffentlichkeit gegenüber Erdbeben und war der Hauptgrund für die Veröffentlichung dieser technischen Vorschrift. Mit den Anordnungen wurden die seismischen Sicherheitsbestimmungen bei der baulichen Gestaltung der Gebäude berücksichtigt. Dies spiegelt sich auch in der Schadensverteilung infolge des Zagreber Erdbebens im Frühjahr 2020 wider. Die nach 1964 errichteten Gebäude wiesen eine deutlich geringere Häufung von Erdbebenschäden als gemauerte Altbauten vor dieser Zeit auf [10].

Mit der Einführung der Verordnung über technische Übergangsbestimmungen für das Bauen in Erdbebengebieten wurde der Grundstein für eine erdbebengerechtere Planung und Ausführung von Hochbauten gelegt. Nach der Veröffentlichung der Vorschrift wurden die meisten Objekte entweder vollständig aus Stahlbeton, als eingefasstes Mauerwerk oder als Mischkonstruktion aus

Stahlbetonwänden, -Stützen, Mauerwerk und gelegentlich mit Stahlstützen errichtet. Kleinere mehrgeschossige Gebäude und die meisten Einfamilienhäuser wurden mit eingefasstem Mauerwerk und Stahlbetondecken errichtet. Trotz der eingeführten Vorschriften ist eine Vielzahl an Objekten aus dieser Zeit vorzufinden, die den eingeführten Regelwerken nicht entsprechen. In der Regel handelt es sich hierbei um gemauerte Wohnhäuser ohne nennenswerte horizontale Aussteifungselemente [10].

Heute werden in Kroatien die europaweiten Eurocodes, die erstmalig im Jahr 1984 veröffentlicht wurden, mit dem dazugehörigen nationalen Anhang als die aktuell geltenden und angewandten Regelwerke für das Bauwesen herangezogen [46]. Für die Bemessung und Konstruktion von Hoch- und Ingenieurbauten im Lastfall Erdbeben gilt der Eurocode 8 [47]. In Kroatien wurde der Eurocode 8 durch die „Technische Vorschrift für Baukonstruktionen“ Ausgabe NN 17/2017 erst sehr spät als verbindlich erklärt [48].

3.2 Vorschriften in Kroatien – Diskussion

Eine Schwierigkeit bezüglich der seismischen Anfälligkeit von Bestandsobjekten in Kroatien liegt vor allem darin, dass Umbauarbeiten oft ohne eine statische Berechnung und teilweise auch ohne Bewilligung durchgeführt werden. Umbauarbeiten, die Eingriffe in die tragende Struktur des Gebäudes beinhalten, müssen grundsätzlich genehmigt und ein Konstruktionsprojekt (Građevinski projekt konstrukcije) erstellt werden. Ein solches Projekt muss eine statische Berechnung des ganzen Gebäudes sowie die technischen Eigenschaften des Gebäudes vor dem Umbau enthalten. Nach der „Technischen Verordnung für Baukonstruktionen“ (auf Kroatisch: Tehnički propis za građevinske konstrukcije, NN 17/2017) muss ein Konstruktionsprojekt nicht erstellt werden, wenn der Planer nachweisen kann, dass die Änderung der technischen Eigenschaften des Konstruktionssystems (Masse, Massenmittelpunkt, Steifigkeitsmittelpunkt etc.) durch den Umbau weniger als 10 % betragen und somit vernachlässigbar erscheinen. Das bedeutet, dass beispielsweise Zwischenwände ohne detaillierte Berechnung durch Stahlträger oder Stahlbetonträger ersetzt werden können und der strukturelle Eingriff auf die Erdbebensicherheit nicht bewertet wird. Solche Umbauarbeiten werden beispielsweise für das Erzielen größerer Raumflächen durchgeführt [10]. Dies kann zu Diskontinuitäten in der vertikalen Verteilung der Gebäudesteifigkeit führen, was sich sowohl positiv, häufiger jedoch negativ auf die Standsicherheit im Erdbebenfall auswirken kann.

Solche „kleinen“ Baumaßnahmen werden dadurch der Baupolizei oftmals nicht gemeldet. Aus diesem Umstand folgt, dass „kleine“ Änderungen der tragenden Konstruktion innerhalb eines Objektes mehrfach aufzufinden sein können, statisch jedoch nicht berücksichtigt wurden. Bauliche Änderungen früherer Umbauten können dadurch in der Praxis oft nur schwer nachvollzogen werden.

3.3 Baukonstruktionsweise der Stadt Zagreb vor 1964

Der Schwerpunkt dieser Arbeit liegt bei den vor 1964 errichteten Baukonstruktionen. Die analysierten Gebäude stellen überwiegend die charakteristische gründerzeitliche Mauerwerksbebauung aus der Österreichisch-Ungarischen Monarchie dar. Abbildung 9 zeigt eine typische gründerzeitliche Fassadengestaltung eines Zagreber Gründerzeithauses.



Abbildung 9: Eine typische Fassadengestaltung eines gemauerten Altbaus in Zagreb. *Foto: Autor*

Der standardmäßig vier- bis sechsgeschossige gemauerte Altbaubestand ist durch hohe Raumhöhen von etwa 3,5 bis 4,5 m gekennzeichnet. Diese Altbauten sind überwiegend in geschlossener Bauweise in Häuserblöcken vorzufinden. Die Häuserblöcke in Zagreb stellen regelmäßige, quadratische Blöcke mit einer ungefähren Größe von 50 x 100 m² dar. Die Interaktionen zwischen den Gebäuden durch die vorwiegende geschlossene Bauweise erschwert eine realistische seismische Bewertung einzelner Bauten [23], [38].

Im Folgenden wird die Bauweise der gemauerten Altbauten in Zagreb erläutert und der gründerzeitlichen Bebauung aus Wien gegenübergestellt.

3.3.1 Fundamentkonstruktionen

Beim gemauerten Altbau wurden die Fundamente nach Bemessungsregeln dimensioniert, die auf Erfahrungswerten und der Art des Baugrundes beruhten. Dies hatte zur Folge, dass die Fundamente nach gegenwärtigen Bemessungsansätzen meist unterdimensioniert wurden. Dies führte vor allem zu ungleichmäßigen sowie oftmals großen Setzungen. Die Fundamente wurden zu großen Teilen aus denselben Materialien wie die Kellergeschosswände, überwiegend aus Ziegelstein und Mörtel, errichtet. Teilweise wurden auch Naturstein, Bruchstein und vereinzelt Stampfbeton herangezogen.

Die Fundamente sind in Form von Flachfundamenten (Streifenfundamenten) unter den lastabtragenden Längswänden und dem Treppenhaus angeordnet. Die Breite des Fundaments entspricht weitgehend der Breite der darüber liegenden Wand – in der Regel 0,75 m bis 0,90 m. In gewissen Fällen sind auch abgetreppte Ziegelfundamente zu finden, wobei dabei die Breite mit zunehmender Tiefe zunimmt [49].

Wenn die tragfähige Bodenschicht wirtschaftlich nicht erreichbar war, aber im Trockenen lag, wurden Pfeilerfundamente errichtet. Der Abstand zwischen den Pfeilern durfte nicht mehr als 4 m betragen. War die tragfähige Bodenschicht erst unterhalb des Grundwasserspiegels anzutreffen wurden Pfostenroste, Schwellroste oder auch Pfahlroste zur Lastabtragung herangezogen [50].

Bei einem einfachen Pfostenrost wurde das gemauerte Fundament auf 20 bis 30 cm breite und 8 bis 10 cm dicke Pfosten gesetzt. Bei einem doppelten Pfostenrost wurde das Fundament auf zwei Lagen von quer zueinander gesetzten Pfosten errichtet. Die zwei Lagen der Pfosten wurden mit Holznägeln verbunden [51].

Ein Schwellrost bestand aus Längs- und Querschwellen, die aufeinander auf dem Baugrund lagen. Auf die Schwellen wurde dann eine Lage Pfosten gelegt und letztlich die Fundamentmauer aufgemauert. Die Schwellen und Pfosten verband man wiederum mit Holznägeln miteinander [51].

Wenn der tragfähige Boden tiefer lag als mit einer Flachgründung wirtschaftlich erreichbar und zudem unter Wasser war, wurden Pfahlroste herangezogen. Die Pfähle wurden durch die nicht tragfähige Schicht bis zum tragfähigen Grund eingerammt. Auf die Pfahlköpfe wurden dann Quer- und Längsschwellen sowie eine Lage Pfosten befestigt. Schließlich wurde das Fundament auf der Holzkonstruktion errichtet [51].

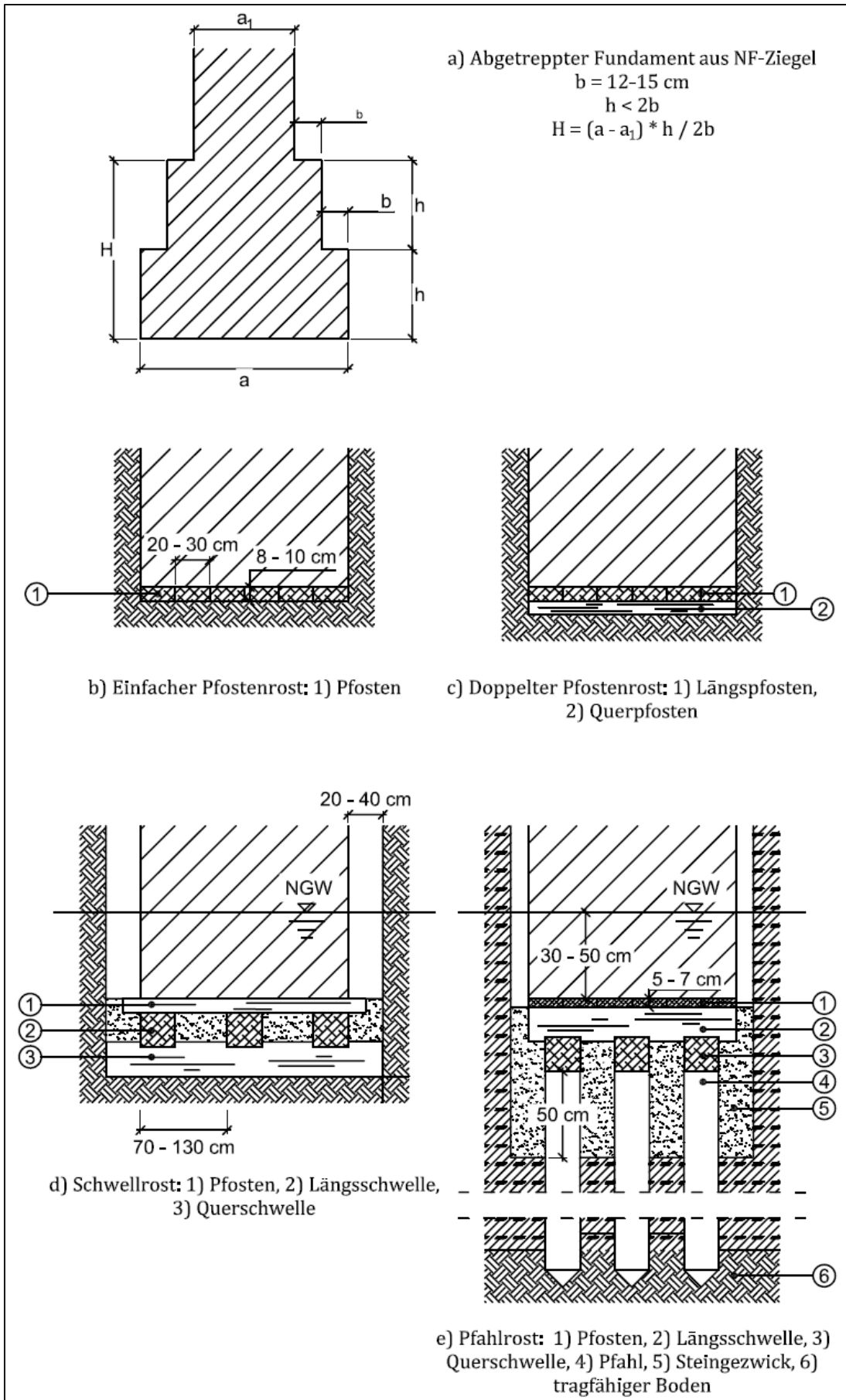


Abbildung 10: Fundamentarten im gemauerten Altbestand nach [50]. Abb.: Autor

3.3.2 Mauerwerkswände

Massiv gemauerte Wände stellen primär die tragenden Wandkonstruktionen des Altbaubestands dar. Die Längswände dienen der Abtragung vertikaler Lasten, während die Querwände (nichttragende Trennwände und Feuermauern) keine primäre vertikale Lastableitung besitzen. Die einzige Ausnahme sind Treppenhauswände, welche quer zu den Längswänden stehen und vertikale Lasten aus dem Treppenhaus abtragen.

Die typische Bauweise besteht überwiegend aus drei parallelen tragenden Längswänden mit einem maximalen Abstand bis zu etwa 6,50 m. Die Mittelmauer weist eine Mauerwerksstärke von 0,45 m bis zu 0,90 m und die Außenmauern von 0,30 m bis zu 0,90 m auf. Die umschließenden, äußeren Querwände stellen Feuermauern dar, die Wandstärken von 0,30 m bis zu 0,45 m aufweisen. Bis zum Dachboden hin erfolgt eine Abstufung der Mauerwerksstärke, wobei diese mit steigender Höhe in Regel um eine Ziegelbreite abgestuft wird. Die orthogonal zu den Längswänden stehenden, nichttragenden Trennwände weisen in der Regel eine Wandstärke von 0,15 m auf. Die Giebelwände, welche oft unverputzt aufzufinden sind, stellen üblicherweise 0,15 m Starke Mauerwerkswände dar [38]. Als Mauerwerksverband sind überwiegend der Block- und der Kreuzverband vorzufinden [52]. Abbildung 11 zeigt exemplarisch die weitgehend vorzufindenden Mauerwerksverbände im gemauerten Altbestand.

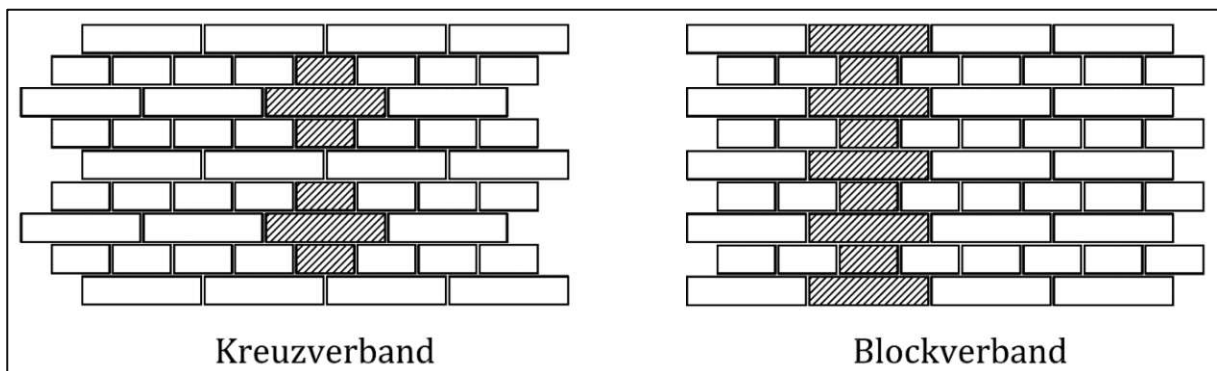


Abbildung 11: Typische Mauerwerksverbände nach [53]. Abb.: Autor

Mauerwerksöffnungen sind traditionell und am häufigsten in Form von Mauerwerksbögen ausgeführt. Zwei weitere Formen von Überlagern, die in der zweiten Hälfte des 19. Jahrhunderts und später verwendet wurden, sind Träger aus Eisen und Eisenbeton. Diese sind vorwiegend bei Spannweiten von mehr als 1,5 m vorzufinden [50].

Die Kamine in Altbauten sind als vertikale Schächte aus Mauerwerk vor allem in der Ebene der Mittelmauer ausgebildet. Rauchfänge über Dach weisen in der Regel keinen nennenswerten Widerstand gegenüber seismischem Einwirken auf. Sie sind oft nur in der Fußbodenebene des Dachgeschosses eingespannt und stellen freistehende, hohe Baukonstruktionen dar [54].

3.3.3 Deckenkonstruktionen

Beim Zagreber Altbau kamen in den oberirdischen Geschossen vor allem Holzbalkendecken zum Einsatz. Die zwei häufigsten Deckenarten in den Altbauten sind die Dippelbaumdecke und die Tramdecke, die auch als Tramtraversendecke, Tramdecke mit versenkter Sturzschalung und Fehltramdecke ausgeführt wurde. Holzdecken waren aus wirtschaftlichen und statischen Gründen (geringes Eigengewicht) eine attraktive Wahl. Massive Gewölbedecken und Platzdecken (Ziegelkappen zwischen Walzeisenträgern) wurden überwiegend im Kellergeschoss und in den Sanitäräumlichkeiten verwendet [38], [49].

Dippelbaumdecke

Die Dippelbaumdecke besteht aus nebeneinander liegenden Dippelbäumen. Diese Dippelbäume werden durch Zerschneiden und Halbieren ganzer Stämme gewonnen. Die Abmessungen der Dippelbäume sind durch die Maße der Stämme bedingt und betragen 25-30 cm in der Breite und 18 cm in der Höhe. Die Seitenflächen sind zur Gewährleistung des Fugenschlusses behauen, wobei die Oberseite des Balkens die ursprüngliche Rundung aufweist. Die Holzbalken werden durch Verdübelung quer zur Tragrichtung miteinander verbunden. Nach Fertigstellung wird die Oberseite 7 bis 8 cm hoch beschüttet und zum Dachboden hin mit Pflastersteinen abgedeckt, während die Unterseite mit Putz auf doppelter Berohrung feuerhemmend verkleidet wird [55]. Obwohl die Rasthölzer bei der Herstellung oft imprägniert wurden, stellen sich häufig Schadensfälle in den Auflagerbereichen ein, die durch Feuchtigkeit oder Insektenbefall hervorgerufen werden [50].

Diese Deckenart wurde bis 1830 generell als Trenndecke benutzt. Für die Schaffung durchgehender Lager mussten Mauerabsätze angeordnet werden, was zu Sprüngen in der Mauerwerksstärke führte – 15 cm in der Außenmauer und 30 cm in der Mittelmauer pro Geschoss. Dies und der hohe Holzbedarf führten dazu, dass ab Mitte des 19. Jahrhunderts die Dippelbaumdecken nur als Abschluss zum Dachraum benutzt wurden. Beispielsweise musste in Österreich ab der Einführung der Bauordnung von 1868 die Dippelbaumdecke aus Brandschutzgründen zwingend als Abschluss zum Dachraum herangezogen werden [50]. Eine schematische Darstellung der Dippelbaumdecke ist in Abbildung 12a zu sehen.

Tramdecke

Eine einfache Tramdecke besteht aus Holzbalken, die in einem Abstand von 75 bis 100 cm verlegt sind. Diese Art der Decke ist in Abbildung 12b schematisch dargestellt. Die Höhe der gehobelten Träme beträgt ungefähr 24 cm bei einer Spannweite bis zu 6,50 m. Um die Tramdecken vor einem nicht zulässigen, direkten Kontakt mit dem Mauerwerk im Auflagerbereich zu schützen, werden Rasthölzer aus harzreichem oder imprägniertem Holz verwendet. Die Öffnungen in der Wand, die

als Auflager für die Holzbalken fungieren, werden Tramkasteln genannt und dienen ebenso der Belüftung der Tramköpfe. Die Verankerung der Balken mit dem Mauerwerk erfolgte mit Schließen. Das Schließeseisen ist im Tram befestigt und der Schuber stellt die Verankerung mit mehreren Ziegellagen des Mauerwerks her. Schließen wurden in der Regel bei jedem dritten oder vierten Balken gesetzt [55], [52].

Auf den Trämen ist eine Sturzschalung verlegt, welche die Lasten zwischen den Deckenbalken übernimmt. Auf der Sturzschalung liegt eine etwa 8 cm dicke Beschüttung, in der die Unterkonstruktion des Blindbodens eingebunden ist. Auf der Unterseite der Träme wurde eine Stukkatorschalung befestigt, auf welcher die Berohrung sowie der Putz angebracht werden konnten [50].

Tramdecke mit abgesenkter Sturzschalung

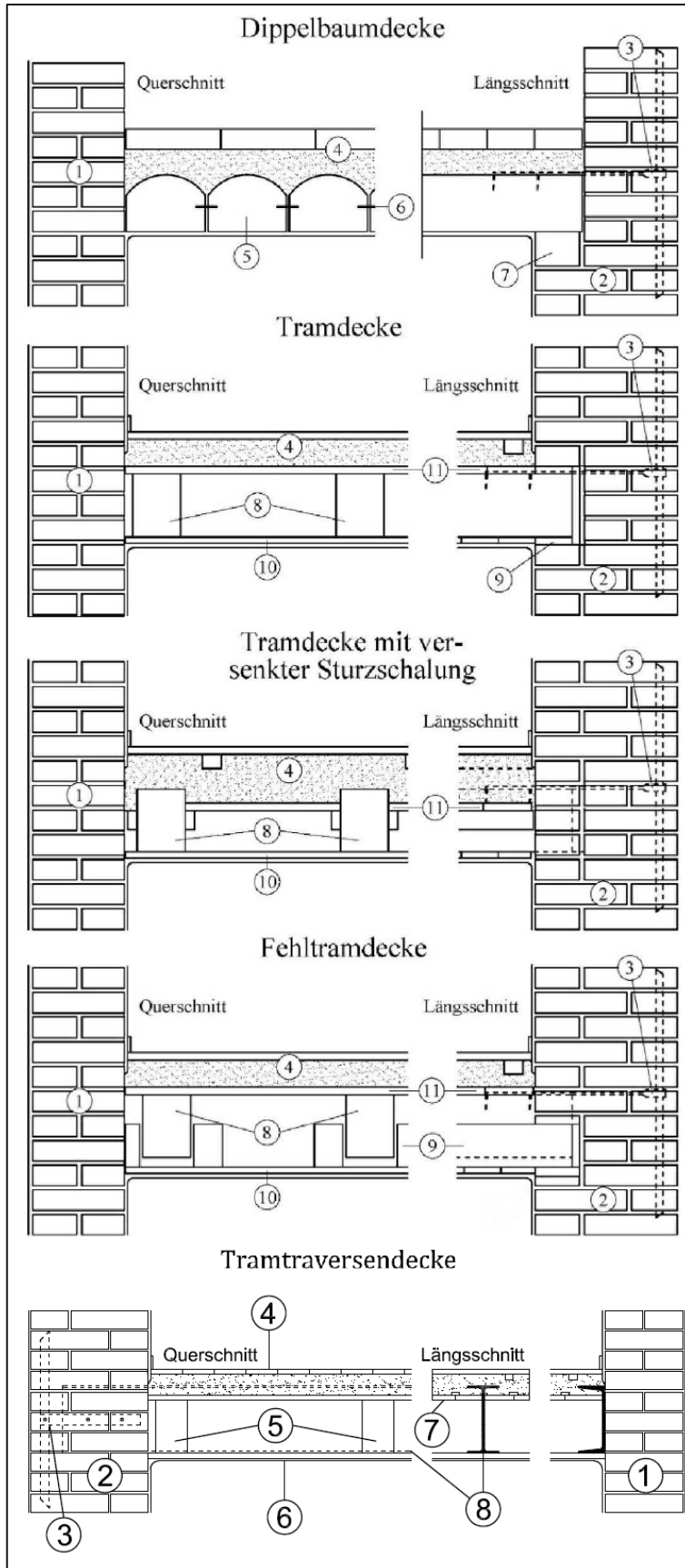
Bei dieser Deckenart ist die Sturzschalung auf Leisten an den Seiten der Trame befestigt (Abbildung 12c). Dadurch wird die Dicke der Beschüttung verringert, um eine größere Raumhöhe zu erzielen [50].

Fehltramdecke

Die Fehltramdecke wurde für Decken mit bedeutenden Untersichten herangezogen, wie beispielsweise Stuckdecken in Repräsentationsbauten. Der Unterschied zu einer einfachen Tramdecke liegt in einer Ebene zusätzlicher Träme, die seitlich versetzt zu den Primärträmen liegen und nur die Deckenuntersicht tragen. Diese Entkopplung der Sekundärkonstruktion von der tragenden Primärkonstruktion verhindert die Übertragung von Erschütterungen aus dem Fußboden auf die Deckenuntersicht [50]. Eine schematische Darstellung der Fehltramdecke ist in Abbildung 12d ersichtlich.

Tramtraversendecke

Die Tramtraversendecke ist eine Mischkonstruktion aus Stahl und Holz. Anstatt eines Holzbalkens dient ein Walzprofil (C- oder I-profil) als Primärträger zwischen den tragenden Wänden. Die Stahlprofil-Träger sind in der Regel in einem Abstand von 3 bis 4 m angeordnet. Die Holzbalken dienen als Sekundärträger und überbrücken die Entfernung zwischen den Stahlprofilen. Hierbei entspricht die Holzkonstruktion einer Tramdecke und stützt sich auf den Unterflanschen der Stahlprofile ab [50]. Eine schematische Darstellung solcher Decken ist der Abbildung 12e zu entnehmen.



- a) Dippelbaumdecke: 1) Quermauer; 2) Längsmauer; 3) Schließe; 4) Pflasterziegel und Beschüttung; 5) Dippelbaum; 6) Dübel; 7) Rastholz

- b) Tramdecke: 1) Quermauer; 2) Längsmauer; 3) Schließe; 4) Pflasterziegel und Blindboden; 8) Tram; 9) Auflager; 10) Stukkatorschalung; 11) Sturzschalung

- c) Tramdecke mit versenkter Sturzschalung: 1) Quermauer; 2) Längsmauer; 3) Schließe; 4) Pflasterziegel und Blindboden; 8) Tram; 10) Stukkatorschalung; 11) Sturzschalung

- d) Fehltramdecke: 1) Quermauer; 2) Längsmauer; 3) Schließe; 4) Pflasterziegel und Blindboden; 8) Tram; 9) Fehltram; 10) Stukkatorschalung; 11) Sturzschalung

- e) Tramtraversendecke: 1) Quermauer; 2) Längsmauer; 3) Schließe; 4) Pflasterziegel und Blindboden; 5) Tram; 6) Stukkatorschalung; 7) Sturzschalung; 8) Traverse

Abbildung 12 a-e: Ausführungsarten von Holzdecken im gemauerten Altbau nach [51]. Abb.: Amel Karić (a-d); Autor (e)

Gewölbedecken

In den Untergeschossen, Treppenhäusern, Nassräumen und Gängen sind hauptsächlich massive Gewölbedecken vorzufinden. Hierbei werden vor allem Tonnengewölbe und flache Ziegelgewölbe zwischen Walzeisenträger (Platzdecke) angetroffen. Diese sind für die oben genannten Bereiche gut geeignet, weil sie vor allem dicht und feuchtigkeitsbeständig sind. Die Form des Tonnengewölbes findet sich im Altbestand ebenso als Abschlussdecke des Kellergeschosses.

Tonnengewölbe wurden aus Normalformatziegel und Mörtel erstellt, wobei Kalk- oder Kalkzementmörtel überwiegend verwendet wurde. Um das Aufmauern des Gewölbes zu ermöglichen, waren Schalungen sowie Gerüste erforderlich [56]. Das Tonnengewölbe ist durch die Möglichkeit einer geringen Stichhöhe gekennzeichnet, was sich günstig auf die Raumausnutzung auswirkt. Aufgrund der schalenartigen Konstruktion treten in den Auflagerbereichen hohe Horizontalkräfte auf, die in das Mauerwerk eingeleitet werden müssen. Zu diesem Zweck werden Schließen verwendet, die die Zugkräfte aufnehmen und ein Ausweichen der Mauer verhindern. Die gebräuchlichsten Arten von Schließen waren die gerade Schließe, die schiefe Schließe und die Gabelschließe [50].

Die Platzdecke stützt sich auf Stahlträger im Abstand von etwa 2,5 m auf. Neben der hohen Tragfähigkeit und der Möglichkeit, größere Spannweiten zu überbrücken, ist der geringe Schalungsaufwand ein weiterer Vorteil dieser Decke. Ermöglicht wird der geringe Aufwand durch gleitende Schalungselemente, sogenannte „Rutschlehrbögen“. Diese sind am Ende des Stahlträgers aufgehängt und das Mauern der Kappe ist direkt darauf möglich. Aufgrund der geringen Abstände zwischen den Stahlträgern ist eine geringe Höhe des Gewölbes ausführbar. Wie bei einem Tonnengewölbe resultieren hier ebenso hohe Schubkräfte, die wiederum durch Schließen aufgenommen werden [50].

3.3.4 Konstruktionsweise Treppenhaus

Die Treppenhauswände bestehen aus Ziegelmauerwerk mit einer Mauerwerksstärke von 45 cm. In der Gründerzeit kamen vor allem zweiläufige Treppen mit Zwischenpodesten sowie Treppen mit halb gewendelmtem Zwischenteil zum Einsatz. Das Erdgeschoss hatte zumeist eine größere Raumhöhe als die anderen Geschosse und benötigte daher eine Vorlauftreppe. Für die Treppenstufen des gemauerten Altbaus wurden vor allem Natur- oder Kunststein verwendet [50], [49].

Die Treppenkonstruktionen können in drei konstruktive Varianten eingeordnet werden. Die konstruktiven Varianten lassen sich nach der Art des Auflagers der Stufe unterscheiden. Es wird unterschieden zwischen wandunterstützten Stufen, Kragstufen und traversenunterstützten Stufen (Abbildung 13).

Die wandunterstützten Stufen sind auf einer Seite in die äußere Treppenhauswand eingemauert und stützen sich auf der Innenseite auf einer gemauerten Wandkonstruktion ab. Diese Art der Konstruktion wurde im Keller- oder im Erdgeschoss verwendet. Kragstufen hingegen sind Stufen, die in die äußere Treppenhausmauer eingemauert sind und auf der inneren Seite kein Auflager besitzen. Traversenunterstützte Stufen sind auf der äußeren Seite in die Treppenhausmauer eingemauert und lagern auf der inneren Seite auf einem Walzprofil oder einem genieteten Querschnitt. Das Walzprofil ist wiederum auf den Podestträgern aufgelagert. Die Kragstufen und die traversenunterstützten Stufen kamen vorwiegend im Erdgeschoss und den Obergeschossen zum Einsatz [50].

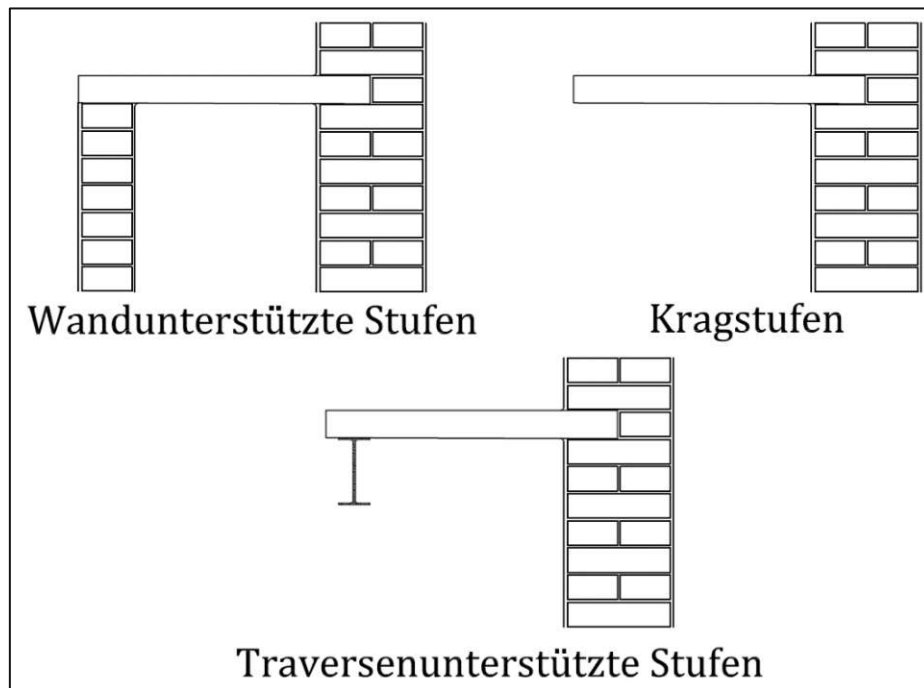


Abbildung 13: Schematische Darstellung der Konstruktionsausbildung der drei Treppentypen nach [50].

Abb.: Autor

3.3.5 Dachkonstruktionen

Vor 1948 wurden zahlreiche Arten von Holzdächern gebaut. Eine verbreitete Dachstuhlkonstruktion dieser Zeit war der doppelt stehende Pfettendachstuhl. Weitere ausgeführte Dachkonstruktionen waren das doppelte Hängewerk, Kehlbalkendach oder der liegende Dachstuhl [49].

Das doppelte Hängewerk und das Trapezhängewerk sind Typen des Pfettendachstuhls, während das Kehlbalkendach dem Sparrendach zugeordnet wird. Der Unterschied zwischen einem Pfetten- und Sparrendachstuhl liegt darin, dass beim Pfettendachstuhl die Sparren nur die Dachhaut tragen und die Pfetten die eigentlich tragende Funktion des Daches übernehmen. Bei einem Sparrendach werden die Lasten der gesamten Dachkonstruktion, einschließlich der Dachhaut, von den Sparren übernommen und ins Mauerwerk eingeleitet [57]. Außerdem muss

bei den Pfettendächern im Gegensatz zu den Sparrendächern nicht jedes Gespärre voll ausgebildet werden, was einen Vorteil darstellt. Nur jedes dritte bis fünfte Gespärre wird in einem Abstand von etwa 4,50 m ausgebaut. Zwischen diesen voll ausgebildeten Gespärren liegen die Leergespärre in einem Abstand von etwa 0,8 bis 1,0 m, welche die Dachlasten auf die Pfetten übertragen. Die Dachneigungen liegen zwischen 25° und 45° [50], [57].

Doppelt stehender Pfettendachstuhl

Der doppelt stehende Pfettendachstuhl ist die häufigste Dachkonstruktion der Gründerzeit [50]. Diese Art der Dachkonstruktion ist schematisch in Abbildung 14a wiedergegeben. Bei einem Pfettendach sind die Sparren frei liegend auf den Pfetten. Der doppelt stehenden Pfettendachstuhl wird mit Fuß-, First- und Mittelpfetten ausgeführt, wobei die Fußpfette gleichzeitig als Mauerbank dient. Auf diesen Pfetten stützen sich die Sparren in Abständen von 0,8 bis 1,2 m ab. Die Mittelpfetten liegen auf Stuhlsäulen, welche die Lasten in die Dachbodendecke einleiten. Da diese die Lasten meistens nicht aufnehmen können, muss sichergestellt werden, dass die Lasten über Stützen oder über Schwellen auf mehrere Balken übertragen werden [57].

Doppeltes Hängewerk

Das doppelte Hängewerk ist eine Variante des Pfettendachstuhls (Abbildung 14b). Diese Art von Dachkonstruktion wurde gewählt, wenn die Lasten von den Stuhlsäulen nicht in die Dachbodendecke eingeleitet werden konnten. Unterstützend wird ein Bundtram eingebaut, der auf den Längswänden aufgelagert ist – der Hängebalken. Die Stuhlsäulen werden auf diesem Bundtram gelagert und die Lasten dadurch direkt in die Längswände eingeleitet. Gleichzeitig sind Streben, welche die Stuhlsäule in ihrem oberen Teil halten und am unteren Ende am Bundtram aufhängen, parallel zu den Dachsparren angeordnet. Dies macht den Bundtram zu einem Zugelement [57].

Kehlbalkendächer

Kehlbalkendächer (Abbildung 14c) gehören zur Gruppe der Sparrendächer und wurden bei Spannweiten unter 12 m und Dachneigungen über 35° genutzt. Der Bundtram wird mit zwei Sparren zu einem Dreieck, dem Gebinde, verbunden und wirkt als Zugband. Eine Dachneigung unter 35° kann mit dieser Dachkonstruktion nicht ausgeführt werden, da der Horizontalschub im Auflagerbereich zu groß wäre. Um die Spannweite der Sparren zu verringern, werden sogenannte Kehlbalken benutzt. Dieser wird auf einer Höhe von mindestens 1,8 m von der Bundtramoberkante horizontal eingebaut und mit den Sparren verbunden. Auf diese Weise wird die Spannweite der Sparren in einem Verhältnis von 3:2 geteilt und gekürzt. Der Kehlbalken ist in der Regel kürzer als 4,0 m [57].

Liegender Dachstuhl

Der liegende Dachstuhl wurde benutzt, um stützenfreien Raum in dem Dachgeschoss zu schaffen. Dies ist in der schematischen Darstellung dieser Dachkonstruktion in Abbildung 14d ersichtlich. Weiter wurde durch diese Konstruktionsweise eine kleinere Belastung des Bundtrams gewährleistet. Dieses Dach besitzt eine Mittelfette sowie einen Brustriegel, der die Sparren miteinander verbindet. Der Name dieser Konstruktion kommt von den Stuhlsäulen, die nicht vertikal, sondern parallel (liegend) zu den Dachsparren verlaufen und den stützenfreien Raum ermöglichen. Somit hat das Dach ein schräg liegendes Gebinde, welches die Pfettenlasten übernimmt. Die Kopfbänder steifen das Dach in der Querrichtung aus.

Die Verbindungen der Dachkonstruktionen vor 1948 wurden meist als Zimmermannsverbindungen ausgeführt, die eine geringere Tragfähigkeiten als moderne Verbindungen aufweisen. Weitere problematische Punkte bei den Dachkonstruktionen sind die Verwitterung und andere Alterserscheinungen des Holzes, ebenso wie teilweise fehlende Windverbände. Die Scheibenwirkung der Dachschalung stellt das Aussteifungssystem des Daches dar [57].

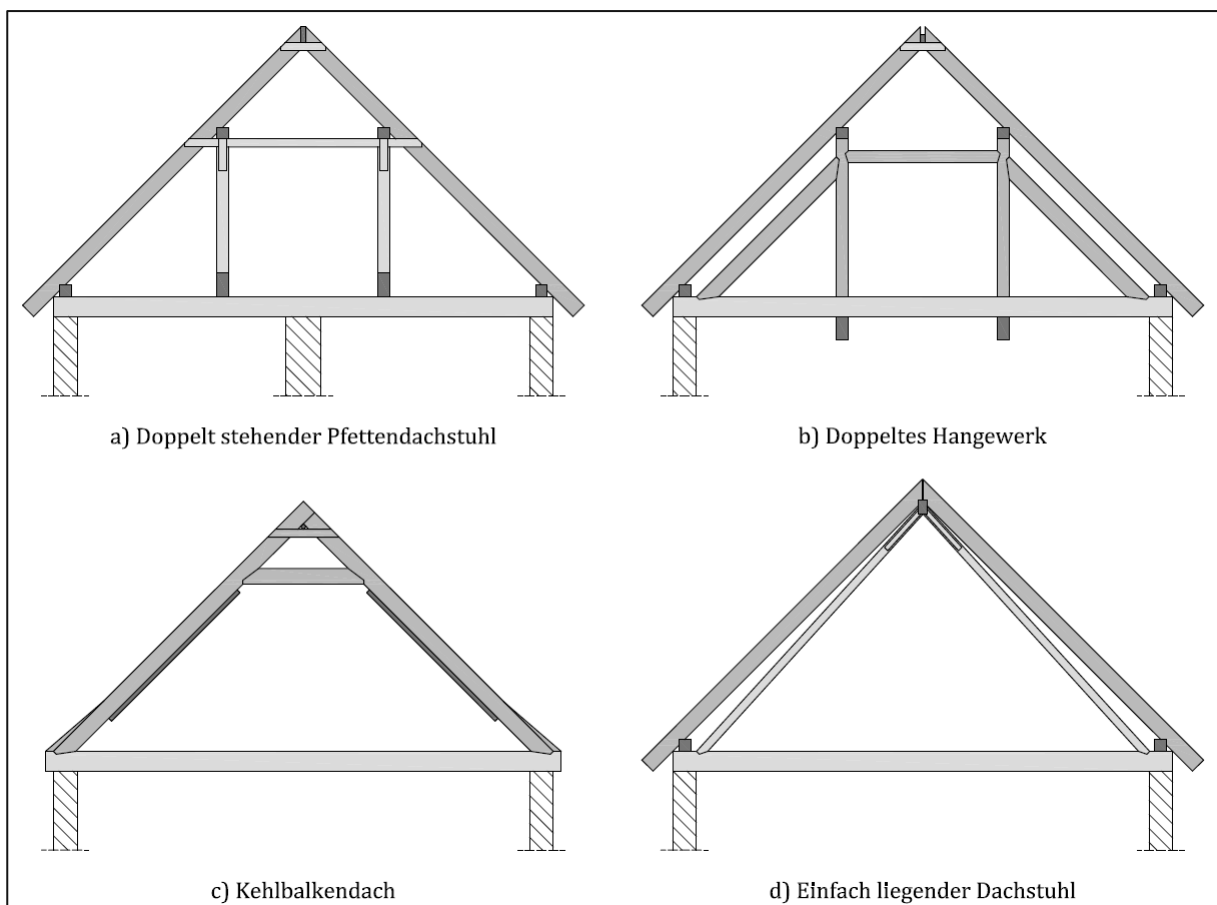


Abbildung 14: Schematische Darstellungen der Dachkonstruktionsarten nach [57]. *Abb.: Autor*

3.4 Materialqualität des Zagreber Gründerzeitbestandes

Bei der qualitativen Auswertung der Erdbebensicherheit von Gebäuden ist der Zustand des Gebäudebestandes samt der Materialqualität von großer Bedeutung. Beim Zagreber Altbestand können im Wesentlichen zwei Herausforderungen angemerkt werden. Einerseits gab es schon bei der Herstellung des Ziegels und Mörtels Variationen in der Qualität der Materialien, die jedoch den üblichen Merkmalen der damaligen Bauzeit entsprechen. Andererseits waren die verwendeten Materialien über die Jahrzehnte Witterungseinflüssen, unsachgemäßen Umbauarbeiten, Kriegseinflüssen u. dgl. ausgesetzt [50].

Die Grundmaterialien, die während der Gründerzeiten im Einsatz waren, sind vor allem:

- Künstliche Steine
- Natürliche Steine
- Mörtel
- Holz
- Metallische Werkstoffe

3.4.1 Holz

Holz wird seit Tausenden von Jahren als Baumaterial verwendet. Funde von Holzbauelementen reichen bis in die Steinzeit zurück [58]. Am Ende des 19. Jahrhunderts sowie am Anfang des 20. Jahrhunderts wurden beim gemauerten Altbestand hölzerne Bauelemente für die Regelgeschossdecken und Dachkonstruktion etc. benutzt. In Tabelle 2 werden typische Materialkennwerte von Holz aus der Gründerzeit dargestellt.

Tabelle 2: Materialkennwerte von Bauholz um 1900 aus den Normalien der ÖIAV [59]

Wert [N/mm ²]	Fichte	Tanne	Lärche	Kiefer	Eiche
$f_{Z\parallel}$	75	11-105	94-139	79	96
$f_{Z\perp}$	1-4	1-4	1-4	1,5-6	4,5-6
$f_{D\parallel}$	24,5	42,5	62,5	28	34
$f_{D\perp}$	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	35
f_{bz}	42	57	66	47	60
$f_{S\parallel}$	4	4-5	4-6	4,5	7,5
$f_{S\perp}$	26	37	24	21	35
$zul\sigma_Z$	8	8	8	8	10
$zul\sigma_D$	6	6	6	6	7
$zul\sigma_B$	8	8	8	8	10
$zul\tau_{\parallel}$	1	1	1	2	1,5
$zul\tau_{\perp}$	2	2	2	2	3

In Österreich und Kroatien müssen heutzutage die Materialkennwerte nach der EN 338:2016 in der aktuellen Fassung der österreichischen ÖNORM bzw. der kroatischen HRN herangezogen werden [60], [61]. In Kroatien sind drei der vier meist verwendeten Baumarten im Bauwesen Nadelhölzer, nämlich Tanne, Fichte und Kiefer. Aus diesem Grund werden als Beispiel die Materialkennwerte für das Nadelholz der Klasse C24 nach [60] und [61] in der Tabelle 3 angeführt. Neben diesen kam das Eichenholz häufig zum Einsatz [62].

Tabelle 3: Charakteristische Materialkennwerte für Nadelholz Klasse C24 nach der EN 338:2016 [60]

Biegung	$f_{m,k}$	24 N/mm ²
Zug	$f_{t,0,k}$	14 N/mm ²
Zug ⊥	$f_{t,90,k}$	0,4 N/mm ²
Druck	$f_{c,0,k}$	21 N/mm ²
Druck ⊥	$f_{c,90,k}$	5,3 N/mm ²

Laut [50] entsprechen die mechanischen Eigenschaften des Bauholzes nach alten Angaben (siehe Tabelle 2) weitgehend jenen heutiger Normen (siehe Tabelle 3). Die zulässigen Spannungen wurden in den alten Normen teilweise niedriger angesetzt [50].

3.4.2 Metallische Werkstoffe

Im gemauerten Altbestand wurden metallische Werkstoffe vor allem für Hilfskonstruktionen verwendet. Sie wurden in Form von Ankern, Klammern, oder den in Kapitel 3.3.3 erwähnten Schließen genutzt. Die zum Einsatz gekommenen metallischen Werkstoffen unterscheiden sich nach dem Kohlenstoffgehalt:

- Roheisen und Gusseisen – mehr als 2,3 % Kohlenstoffgehalt
- Stahl – 0,5 % bis 2,3 % Kohlenstoffgehalt
- Schmiedeeisen – weniger als 0,5 % Kohlenstoffgehalt

Schmiedeeisen wird, abhängig von dem Herstellungsprozess, weiter in Schweißisen und Flusseisen unterschieden. Schweißisen wurde mit dem Herd-, Frisch- oder Puddelprozess erzeugt und ist nicht völlig frei von Schlacke. Gegenüber Flusseisen verfügt Schweißisen über eine höhere Zähigkeit und leichtere Schmiedbarkeit. Flusseisen wurde mit dem Bessemer-, Thomas- oder Martin-Verfahren hergestellt und ist frei von Schlacke. Es zeichnet sich gegenüber Schweißisen durch eine höhere Festigkeit und Streckgrenze aus [51]. Tabelle 4 gibt die Materialkennwerte der metallischen Werkstoffe mitsamt zulässiger Spannungen wieder. In Tabelle 5 werden die zulässigen Spannungen aus den Normalien der ÖIAV [59] und der Berliner Bauordnung [63] übernommen.

Tabelle 4: Materialkennwerte für metallische Werkstoffe um 1900 [51]

	Gusseisen	Schmiedeeisen		Stahl	
		Schweiße.	Flusse.	Schweißst.	Flussst.
C_{geh} [%]	2,3-5,5	0,1-0,5	0,05-0,25	0,1-1,6	0,25-1,6
E [N/mm ²]	75-105 x 10 ³	200 x 10 ³	215 x 10 ³	210-220 x 10 ³	210-220 x 10 ³
f_y [N/mm ²]	k.A.	≥ 180	≥ 200	0,6 f_u	0,6 f_u
$f_{u }$ [N/mm ²]	700-850	330-400	340-440	350-700	450-1000
$f_{u,bz}$ [N/mm ²]	286	0,8 f_u	0,8 f_u	0,8 f_u	0,8 f_u

Tabelle 5: Zulässige Spannungen für metallische Werkstoffe [51]

[N/mm ²]	Gusseisen	Schmiedeeisen		Stahl
		Schweiße.	Flusse.	
Normalien des ÖIAV				
Zug	k.A.	100	100	120
Druck	k.A.	100	100	120
Biegung	k.A.	100	100	k.A.
Berliner Bauordnung				
Zug	25	k.A.	k.A.	120
Druck	50	75	75	120
Biegung	k.A.	75	75	k.A.
Schub	20	60	60	k.A.

3.4.3 Mauerwerk

Das Mauerwerk ist das dominierende Baumaterial des gemauerten Altbaus. Es besteht aus einzelnen natürlichen oder künstlichen Steinen mit oder ohne Bindemittel und wird sowohl als tragende als auch nichttragende Wandstruktur ausgeführt. In historischen Gebäuden wurden eine Vielzahl weiterer Bauteile aus Mauerwerk errichtet, unter anderem Rauchfänge, Türme, Giebelwände, Attikaausbildungen, dekorative Bauelemente usw. Im Folgenden werden die verwendeten Bausteine sowie das Bindemittel, der Mörtel, des damaligen Mauerwerks beschrieben.

Natürliche Steine

Der natürliche Stein ist ein Material, das seit Jahrtausenden zur Errichtung von Gebäuden genutzt wird. Im gemauerten Altbestand in Zagreb wurden Natursteine überwiegend für Natursteinstiegen, tragende Gewölbekonstruktionen sowie vereinzelt für Bögen verwendet und zur Errichtung der Kellergeschosswände herangezogen [49]. Als Naturstein kamen überwiegend Granit, Kalkstein und Sandstein zum Einsatz. Da die Materialkennwerte für Naturstein je nach

Gesteinsart und Abbauort stark schwanken können, stellt die nachfolgende Tabelle 6 nur einen groben Richtwert der Materialeigenschaften der damals verwendeten Natursteine dar [51].

Tabelle 6: Materialkennwerte für natürliche Steine [51]

Materialkennwert	Granit	Kalkstein	Sandstein
ρ [kg/dm ³]	2,6-2,65	1,70-2,85	2,00-2,65
f_d [N/mm ²] ¹⁾	155	110	80
$V(f_d)$ ²⁾	0,25	0,40	0,60
f_{bz} [N/mm ²] ¹⁾	15	12	5,80
$V(f_{bz})$ ²⁾	0,30	0,35	0,35
E [N/mm ²] ¹⁾	2,25-4,54	3,30-5,60	3,30-5,80

¹⁾ Mittelwert

²⁾ Variationskoeffizient (für f_d genähert)

Künstliche Steine und Bindemittel

Die beiden bedeutendsten Materialien im gemauerten Altbau stellen die künstlichen Steine (Nomenklatur der Gründerzeit) und das Bindemittel, also Ziegel und Mörtel, dar.

Um das Jahr 1900 waren primär zwei Gruppen von Bindemitteln vertreten. Im gründerzeitlichen Mauerwerk wurde überwiegend Kalkmörtel, welcher der Gruppe der Luftmörtel zugeordnet wird, als Bindemittel verwendet. Dabei wurde der Kalk direkt auf der Baustelle gelöscht und erhärtete nach Einbringung unter Luftzufuhr. Da die Mauerstärken bis zu 90 cm betragen, brauchte der Kalkmörtel im Inneren der Mauerwerkswand Jahre bis zur völligen Erhärtung. Dies konnte zu unterschiedlichen Setzungen oder durchfeuchteten Wänden führen. Weiters konnte ein zu frühes Auftragen der Wandputze im Nachhinein festgestellt werden, was aufgrund der noch laufenden Setzungen zu Rissen führte [56].

Als Bindemittel wurde neben dem Kalkmörtel auch hydraulischer Mörtel verwendet. Der hydraulische Mörtel wurde unter Verwendung von hydraulischen Kalken hergestellt. Diese sind wasserbeständig und ermöglichen ein Erhärten ebenso unter Wasser [50].

Ein Nachteil des häufig verwendeten Kalkmörtels bei den massiven Mauerwerkswänden war, dass sich beim Erhärten unter Luftzufuhr ein starkes Schwinden einstellte. Diese Problematik wurde durch das frühe Aufbringen von Außenputzen und der Hinterfüllung von Arbeitsgräben im Kellerbereich noch weiter verschärft [56]. In der nachfolgenden Tabelle 7 werden Mörtelfestigkeiten aus der damaligen Bauzeit sowie aus aktuellen Messversuchen wiedergegeben.

Tabelle 7: Charakteristische Materialkennwerte der damaligen Bindemittel [50]

Bezeichnung	Mischungsverhältnis	ρ [kg/m ³]	$f_m^{1)}$ [N/mm ²]	$f_m^{2)}$ [N/mm ²]
Kalksandmörtel	Kalkteig / Sand (RT): 1/6 bis 1/1	1650	0,5-2 MW \geq 1	4-5
Mörtel aus hydr. Kalk	Kalk / Sand (RT): 1/5 bis 1/1	k.A.	k.A.	3-5 (15)
Romazementmörtel	RZ / Sand (GT): 1/3	1700	k.A.	6-8
Portlandzementmörtel	PZ / Sand (GT): 1/3	1700	k.A.	12-16
Kalkzementmörtel	Zement / Kalkteig / Hydr.K. / Sand: 1-2/0- 2/0-2/6-10	k.A.	k.A.	8,5-29
1)	Aus aktuellen Messungen			
2)	Angaben aus der Bauzeit			
RT	Nach Raumteil			
GT	Nach Gewichtsteilen			

Zu den künstlichen Steinen aus der Österreichisch-Ungarischen Monarchie zählen gebrannter Ziegel aus Lehm oder Ton sowie Steine aus Mörtelmasse. Beim gemauerten Gründerzeitbau waren die künstlichen Steine aus Mörtelmassen für tragende Bauelemente von geringerer Bedeutung. Diese wurden zumeist aus Kalkmörtel hergestellt und zum Guss von Säulen, Kapitellen, Basen, Gesimsen und anderen Verzierungselementen verwendet [50].

Die tragenden Bauelemente der historischen Mauerwerksbauten wurden hauptsächlich aus gebranntem Vollziegel gefertigt. Ein in Kroatien oft eingesetztes Ziegelformat besitzt die Maße 29/14/6,5 cm. Dieses wurde im Jahr 1894 als Standardformat in Kroatien durch den Regierungsauftrag 51381 eingeführt [40]. Es entspricht dem Format, welches die österreichische Bauordnung aus dem Jahr 1883 bereits als das standardisierte Ziegelformat in Österreich implementierte [50]. Weiters ähneln diese Maße dem Wiener Format von Vollziegel mit den Seitenlängen 29,2/14,2/6,9 cm. Spezielle Ziegelformen, wie zum Beispiel 40 bis 80 cm lange Gesimseziegel, kamen ebenso zum Einsatz [51].

In der Tabelle 8 werden die mechanischen Eigenschaften aus der damaligen Bauzeit in Österreich angeführt. Die charakteristische Scherfestigkeit wurde mit 1,2 N/mm² angenommen [50].

Tabelle 8: Materialkennwerte für Ziegelsteine aus der damaligen Bauzeit [51]

Steinart	f_b [N/mm ²]	f_z [N/mm ²]
Ziegel, gewöhnlich	6-12	1
Ziegel, gut	14-25	2
Handschlagmauerziegel, gewöhnlich	15,8-26,3	2,5-5,0

Handschlagmauerziegel, Schwachbrand	15-20	
Handschlagmauerziegel, Mittelbrand	20-30	
Maschinenziegel, gewöhnlich	20,5-23	
Verblendziegel	18,3	
Wölbziegel	12,3	
Lochziegel, gewöhnlich	19,4	
Maschinlochziegel, 3 Löcher	15,0	
Poröse Vollziegel	15,0	
Poröse Wölbziegel	2,7	
Poröse Lochziegel	8,4	
Klinker	30-90	100

Die Standsicherheit des gemauerten Altbestandes von Zagreb hängt primär von der Erhaltung, vor allem aber auch von der noch vorhandenen Materialqualität des Objektes ab. Die generelle Instandhaltung der gemauerten Altbauten wurde mangelhaft bis unzureichend verfolgt. Auslaugung des Mörtels, Insektenbefall der hölzernen Konstruktionen und ähnliche Alterserscheinungen führen zu einer Abminderung der zu erwartenden Materialqualitäten der gründerzeitlichen Strukturbereiche, welche im schlimmsten Fall zu einem vollständigen Verlust des Zusammenwirkens einzelner Bauteile führen können.

Das Labor für Bauforschung der Fakultät für Bauwesen in Zagreb führte Materialuntersuchungen am Mauerwerk an mehreren gründerzeitlichen Mauerwerksgebäuden in der Stadt durch. Das Ziel dieser Untersuchungen war es, die Materialkennwerte des Altbaus zu überprüfen. Es wurden die Scherfestigkeit der Wände und die Druckfestigkeit des Ziegelsteines bestimmt. Für die Bestimmung der Scherfestigkeit wurden Versuche an 20 Gebäuden durchgeführt. Die Versuche wurden in Anlehnung an die amerikanische Norm ASTM CT1531-16 mit einer kleinen hydraulischen Presse vor Ort ausgeführt [64], [65]. Die Hälfte der Untersuchungen der Scherfestigkeit wurde vor, die andere Hälfte nach dem Erdbeben in Zagreb durchgeführt.

Bei der Untersuchung der Druckfestigkeit des Ziegels wurden die Proben an 14 Gebäuden entnommen. 13 von 14 Proben zur Untersuchung der Druckfestigkeit des Ziegels wurden vor dem Erdbeben und nur die letzte Probe nach dem Erdbeben am 22. März 2020 entnommen. Es wurden Druckfestigkeitsversuche nach der HR EN 772-1:2015 durchgeführt, die der ÖNORM EN 772-1:2015 entspricht [66], [67]. Abbildung 15 und Abbildung 16 stellen die Ergebnisse dieser Untersuchungen dar [10].

Die Durchschnittliche Scherfestigkeit des Mauerwerks der untersuchten Gebäude in Zagreb wurde mit 0,53 MPa und eine Standardabweichung von $\mp 0,12$ MPa bestimmt [10].

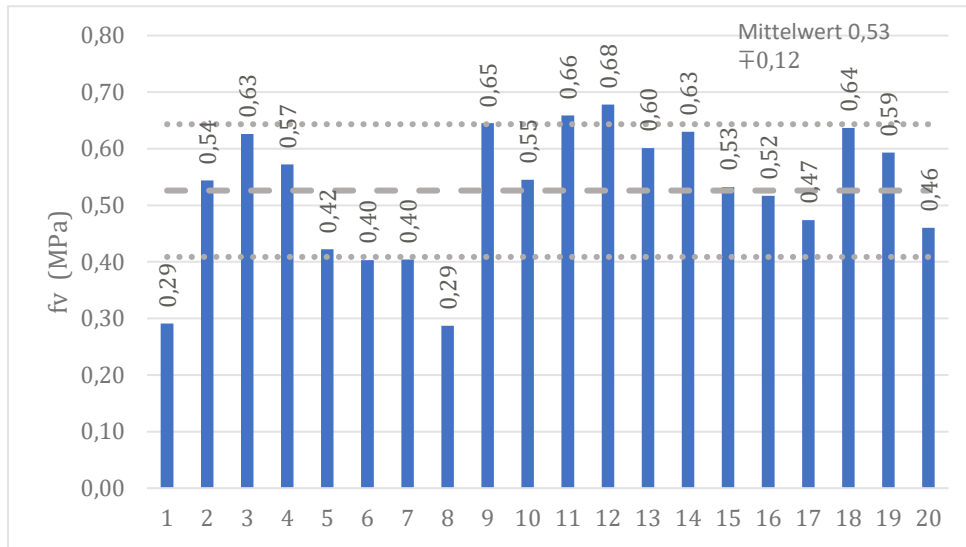


Abbildung 15: Scherfestigkeitswerte von Mauerwerkswänden aus Untersuchungen in 20 Zagreber Gründerzeitbauten nach [10]. Abb.: Autor

Infolge der Untersuchungen der Zagreber Fakultät für Bauwesen konnte der Mittelwert der Ziegelsteindruckfestigkeit mit 13,05 MPa und eine Standardabweichung von $\mp 3,53$ MPa bestimmt werden [10]. Zum Zeitpunkt der Errichtung der gemauerten Objekte wurde die Druckfestigkeit eines gewöhnlichen Ziegels mit 6 bis 12 MPa angenommen. Ein guter Ziegel hat lt. Untersuchung eine Druckfestigkeit von 14 bis 25 MPa. Die Scherfestigkeit des Ziegels wurde während der damaligen Bauzeit durchgehend mit 1,2 MPa angesetzt [68].

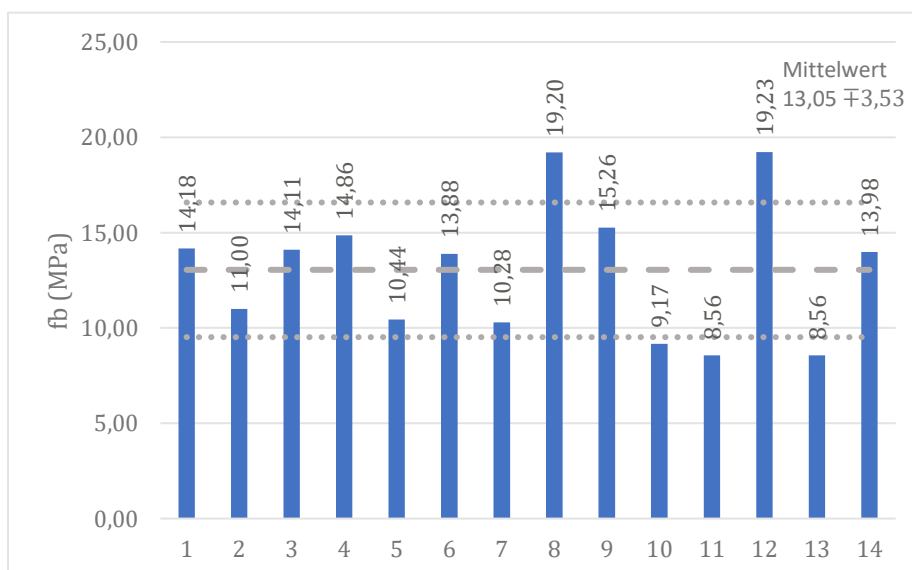


Abbildung 16: Ziegelsteindruckfestigkeiten aus Untersuchungen in 14 Zagreber Gründerzeitbauten nach [10]. Abb.: Autor

Die Versuchsreihe zeigt, dass deutliche Schwankungen der Druckfestigkeit der untersuchten Mauerwerke vorzufinden sind. Der höchste bestimmte Wert liegt bei 19,23 MPa, der niedrigste bei 8,56 MPa.

Die beobachtete Schwankungsbreite bestätigt, dass entweder sehr konservative Annahmen in den statischen Berechnungen auf der sicheren Seite liegend angesetzt oder kostenintensive Untersuchungen durchgeführt werden müssen. Bei Durchführung solcher Untersuchungen können Planer realistische Kennwerte bei der konstruktiven Ausbildung und Berechnung heranziehen, was einer möglichst realitätsnahen Bemessung entsprechen würde [64].

3.5 Vergleich zu Wien

Als Teil der Habsburgermonarchie (ab 1527) und später als Teil der Österreichisch-Ungarischen Monarchie (1867–1918) ist die Baukonstruktionsweise von Kroatien und der Stadt Zagreb stark durch die Bauweisen der Monarchien geprägt [69]. Dieser Einfluss ist noch heute in der städtebaulichen Architektur und der Bauweise der gemauerten innerstädtischen Wohngebäude in Zagreb sichtbar. Die damalige Mauerwerksbauweise ist vergleichbar bzw. ident mit der Wiener Bauweise aus der damaligen Gründerzeit (1840–1918), da viele Planer sowie Baumeister aus Österreich kamen oder dort ausgebildet wurden.

Ein bekanntes Beispiel ist der kroatische Architekt Leo Hönigsberg (Zagreb, 1861 – Zagreb, 1911). Er studierte auf der Technischen Hochschule in Wien (heute Technische Universität Wien) und entwarf bzw. baute über 100 Gebäude in Zagreb [70]. Einige dieser Bauten, beispielsweise die Gebäude 1, 19, 31, 32, 34 (vgl. Abbildung 17) des untersuchten Häuserblockes, werden dabei auch im Zuge dieser Arbeit analysiert werden [71]. Ein weiterer berühmter Architekt, der in Zagreb tätig war, ist Hermann Bolle (Köln, 1845 – Zagreb, 1926). Er studierte an der Wiener Kunstakademie Architektur und plante 150 Objekte in Kroatien. Nach dem Erdbeben im Jahr 1880 wurde er zum „Hauptrestaurateur von Sakralbauten“ der Stadt Zagreb ernannt und führte zeitgleich ebenso viele Restaurierungen von Profanbauten durch [72].

Die Bauordnungen der Stadt Zagreb wurden ebenso von den Wiener Bauordnungen und damaligen Richtlinien der Österreichisch-Ungarischen Monarchie beeinflusst. Dies zeigt sich vor allem an der konstruktiven Ausbildung der gemauerten Gründerzeithäuser. Auch das in Zagreb häufig verwendete Ziegelformat ist fast identisch mit dem Wiener Format, vgl. Kapitel 3.4.3.

Die materialtechnischen Untersuchungen aus Kapitel 3.4.3 zeigen, dass der durchschnittliche Zagreber Mauerstein, verglichen mit den damaligen Angaben der Festigkeitswerte [10], [51] in Österreich, immer noch als „gewöhnlich“ oder sogar „gut“ bezeichnet werden kann (siehe Tabelle 8). Diese Materialkennwerte in Zagreb und Österreich zeigen eine große Ähnlichkeit, was eine allgemeine Vergleichbarkeit des Hochbaubestandes aus Zagreb und Wien bekräftigt.

4 Bewertungsgrundlagen für die begutachteten Erdbebenschäden – Zagreber Erdbeben 22. März 2020

Für eine detaillierte Schadensanalyse wird ein innerstädtischer Gebäudeblock des Zagreber Hochbaubestands nach dem Erdbeben vom 22. März 2020 herangezogen. Der betrachtete Häuserblock, der in der Dokumentation als Häuserblock 19 bezeichnet wird, befindet sich im Stadtzentrum von Zagreb, zwischen folgenden vier Straßen: Frankopanska Straße, Dalmatinska Straße, Medulićeva Straße und Ilica. Der analysierte Häuserblock, schematisch in Abbildung 17 dargestellt, repräsentiert den Zagreber Hochbaubestand und stellt das Untersuchungsobjekt für eine vertiefende Erdbebenschadensanalyse dar. Auf dem ausgewählten Häuserblock liegt ebenso der Fokus unterschiedlicher aktueller Untersuchungen sowie Ertüchtigungsmaßnahmen von Seiten der Fakultät für Bauingenieurwesen und Architektur in Zagreb.



Abbildung 17: Häuserblock 19 mit der Auswertung der Nutzbarkeit der Gebäude nach dem Zagreber Bewertungsbogen. *Abb.: Autor*

Unmittelbar nach dem Erdbeben wurden die Erdbebenschäden am gemauerten Altbestand unter hohem personellem Aufwand erfasst und bewertet. Die Klassifizierung der Nutzbarkeit der Objekte (nicht nutzbar: rot, temporär nicht nutzbar: gelb, nutzbar: grün) erfolgte nach eindeutigen Regeln mit Hilfe des Zagreber Bewertungsbogen für Erdbebenschäden. Abbildung 17 stellt den analysierten Häuserblock sowie die Einstufung der Nutzbarkeit der Objekte nach dem Erdbeben dar. Die Herangehensweise der Schadensbewertung nach dem Zagreber Bewertungsbogen werden im Unterkapitel 4.1 vorgestellt. Anschließend wird in den Unterkapiteln 4.2 und 4.3 der untersuchte Gebäudeblock mit seinen Besonderheiten (Gebäudeausdehnung, Gebäudehöhen, etc.) zusammengefasst. Im Unterkapitel 4.4 wird die Unterteilung der Gebäude in bedeutende Bauelemente erläutert und die erfassten Schadensgradhöhen vorgestellt.

4.1 Zagreber Bewertungsbogen zur Schadenserfassungen nach Erdbebenereignissen

Die Schadensklassifizierung nach dem Erdbeben in Zagreb erfolgte mit Hilfe eines Bewertungsbogens. Der Kroatische Bewertungsbogen [73] wurde in Anlehnung an den italienischen AeDES Bewertungsbogens [74] entwickelt und an die kroatischen Rahmenbedingungen angepasst [10], [12]. Das Ziel des kroatischen als auch des AeDES Bewertungsbogens ist es, die Nutzbarkeit und die Standsicherheit von Gebäuden nach einem Erdbebenereignis schnell und aussagekräftig zu erfassen. Dies ist vor allem nach Starkerdbebenereignissen von großer Wichtigkeit. Es dient vor allem dazu, die Bevölkerung vor weiteren Bauteil- und Gebäudeeinstürzen zu schützen sowie eine Ersteinschätzung der Schäden vorzunehmen.

Der Kroatische Bewertungsbogen wurde in erster Linie für die Erfassung von Erdbebenschäden an Gebäuden aus Mauerwerk und Stahlbeton erstellt. Er kann ebenso für Stahl- oder Mischkonstruktionen herangezogen werden. Die Begutachtungen erfolgen in der Regel unmittelbar nach Erdbebenereignissen, daher müssen diese einfach, unkompliziert und vor allem zeitnah durchgeführt werden können. Die Gefahr möglicher Nachbeben erhöht in dieser Hinsicht den Zeitdruck. Abbildung 18 zeigt beispielhaft einen Ausschnitt des kroatischen Bewertungsbogens.

Der kroatische Bewertungsbogen umfasst elf Gruppen (A bis K) und ist wie folgt gegliedert:

- A. Begutachtungs- und Arbeitsgruppendaten
- B. Gebäudeidentifikation
- C. Gebäudebeschreibung
- D. Gefährdung durch äußere Einwirkungen
- E. Dachkonstruktion

- F. Konstruktionstyp
- G. Beschädigung der konstruktiven Elemente
- H. Beschädigung der nichtkonstruktiven Elemente
- I. Zusammenfassung und Nutzbarkeitsbenotung
- J. Vorschlag begrenzter oder umfassender vorübergehender Notmaßnahmen
- K. Andere Beobachtungen und Bemerkungen [12].

Die Bereiche A bis C des Bewertungsbogens erfassen Daten zur Position und Umgebung des Gebäudes inklusive der Geländemorphologie. Weiters werden allgemeine Daten wie die Bruttogeschossfläche (BGF), Anzahl der Geschosse, Baujahr, Nutzung usw. über das Gebäude dokumentiert. In Abschnitt D wird angegeben, ob und welche äußeren Gefährdungen für das Gebäude bestehen. In den Abschnitten E und F werden Daten zur Dachkonstruktion und Bauweise des Gebäudes mit besonderem Schwerpunkt auf Deckenkonstruktionen eingetragen. Ebenso wird die Grundrissform festgehalten.

Nach der Erfassung der Gebäudedaten in den Abschnitten A bis F erfolgt eine Klassifizierung der Erdbebenschäden. Dies erfolgt in den Abschnitten G und H sowohl für einzelne Strukturbereiche der tragenden Konstruktion als auch für spezifische nichttragende Elemente innerhalb eines Gebäudes. Die zu erfassenden Strukturbereiche sind in den Abschnitten G und H des Bewertungsbogens wie folgt unterteilt:

- Teil G: Beschädigung der konstruktiven Elemente
 - Vertikale Elemente
 - Deckenkonstruktionen
 - Treppenhaus
 - Dachstuhl
 - Eingefasste Konstruktion/Trennkonstruktion
 - Fundament.
- Teil H: Beschädigung der nichtkonstruktiven Elemente
 - Ablösung der Fassade, Verkleidung und abgehängter Decken
 - Herabfallen von Dachziegel und Rauchfang
 - Herunterfallen von Zierelementen und Attika
 - Abstürzen anderer Teile des Gebäudes Innen/Außen
 - Beschädigung des Wassernetzes, Kanalisation oder Heizung
 - Beschädigung des Strom- oder Gasnetzes [12].

Grad Zagreb Ured za upravljanje u hitnim situacijama

Obrazac za pregled građevina u hitnoj situaciji nakon potresa

Ocjena oštećenja i uporabivosti

A. Podaci o radnoj skupini

Građevinska četvrt: _____ Mjesni odbor: _____

Broj obraza: _____ Oznaka radne skupine: _____

Voditelj radne skupine: _____

B. Identifikacija građevine

Oznaka građevine: _____ GPS koordinate: _____

Adresa: Ulica/Avenija/Alaja/Prijava/Trg/Štule: _____ Brz: _____

Naziv građevine i/ili ime i građevni vlasnik: _____ Vlasništvo: Javno Privatno

Položaj: Samostojeća građevina Građevina anatar zida Građevina na krajnjoj zida Građevina na uglu

Morfologija terena: Ušlebna Blagi nagib Slabi nagib Ravnica

Preciznost pregleda: Pregled izvana Opcionalni pregled Srebrnatni pregled

Pregled uje izvan izvan izvan

Skica tlocrta građevine s položajem unutar bloka: _____

C. Opis građevine

Ukupan broj katova: _____ Broj podzemnih katova: _____ Srednja površina tlocrta: _____

Srednja visina kata: ≤ 2,5 2,5 - 3,5 3,5 - 5,0 > 5,0 Broj korisnika: _____

Izgradnja/rekonstrukcija: ≤ 1920 1921 - 1945 1946 - 1964 1965 - 1981 1982 - 1998 1999 - 2013 > 2013

Naučena: Saunbena Prolivna Gospodarska Jarna Ostalo: _____

Broj jedinica po namjeni: _____

Upotreba: > 55% 38 - 65% < 30% Izvan opsega U izgradnji Nedovršeno Napušteno

Stanje građevine prije potresa: redovito održavana nedovoljno održavana u vrlo lošem stanju oštećena

D. Opasnost od vanjskih utjecaja

1. Riske od otpadanja dijelova drugih konstrukcija: Nema Nema

2. Sljeganje tlovrsta: Nema Nema

3. Klizanje: Nema Nema

E. Krivulje

3-80% i više Težak/kra potresa Lagano/mali potresa

F. Pregled oštećenja i uporabivosti

Tip oštećenja	DIREKCIJA NEKORISNOŠĆI ELEMENTA					NEKORISNOŠĆI
	UDAR	RUŠENJE	OPADANJE	OPADANJE	OPADANJE	
1. Otkrovanje zidova, dijelova obloga i spojevnih strojeva	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
2. Otpadanje dijelova crijeva i dimnjaka	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
3. Otpadanje dijelova vijenca i parapeta	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
4. Otpadanje drugih konstrukcija ili vanjskih dijelova građevine	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
5. Oštećenje vodovodne mreže, lokalizacije ili sanitarne grube	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
6. Oštećenje električne ili plinske mreže	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

G. Pregled oštećenja i uporabivosti

Tip oštećenja	DIREKCIJA NEKORISNOŠĆI ELEMENTA					NEKORISNOŠĆI
	UDAR	RUŠENJE	OPADANJE	OPADANJE	OPADANJE	
1. Vertikalni oštećenja	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
2. Horizontalna oštećenja	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
3. Slabosti	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
4. Krivulje	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
5. Izgane/pogreške	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
6. Tlovrsta	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

H. Pregled oštećenja i uporabivosti

Tip oštećenja	DIREKCIJA NEKORISNOŠĆI ELEMENTA					NEKORISNOŠĆI
	UDAR	RUŠENJE	OPADANJE	OPADANJE	OPADANJE	
1. Otkrovanje zidova, dijelova obloga i spojevnih strojeva	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
2. Otpadanje dijelova crijeva i dimnjaka	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
3. Otpadanje dijelova vijenca i parapeta	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
4. Otpadanje drugih konstrukcija ili vanjskih dijelova građevine	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
5. Oštećenje vodovodne mreže, lokalizacije ili sanitarne grube	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
6. Oštećenje električne ili plinske mreže	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

I. Pregled oštećenja i uporabivosti

Tip oštećenja	DIREKCIJA NEKORISNOŠĆI ELEMENTA					NEKORISNOŠĆI
	UDAR	RUŠENJE	OPADANJE	OPADANJE	OPADANJE	
1. Otkrovanje zidova, dijelova obloga i spojevnih strojeva	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
2. Otpadanje dijelova crijeva i dimnjaka	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
3. Otpadanje dijelova vijenca i parapeta	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
4. Otpadanje drugih konstrukcija ili vanjskih dijelova građevine	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
5. Oštećenje vodovodne mreže, lokalizacije ili sanitarne grube	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
6. Oštećenje električne ili plinske mreže	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

J. Pregled oštećenja i uporabivosti

Pregled oštećenja i uporabivosti		DIREKCIJA NEKORISNOŠĆI ELEMENTA	
(a)	(b)	(a)	(b)
<input type="checkbox"/>	Uklanjanje oštećenja pomoću oštećenja zidova ili čeličnih postolja i gornjih konstrukcijskih elemenata	<input type="checkbox"/>	Uklanjanje oštećenja vanjskih i unutarnjih elemenata
<input type="checkbox"/>	Popravak i/ili oštećenja zidova i stropa	<input type="checkbox"/>	Popravak oštećenja
<input type="checkbox"/>	Popravak krovova	<input type="checkbox"/>	Zaključavanje otvora
<input type="checkbox"/>	Podizanje tlovrsta	<input type="checkbox"/>	Zaključavanje praznina građevine pomoću ograda
<input type="checkbox"/>	Podizanje tlovrsta	<input type="checkbox"/>	Montiranje zidova
<input type="checkbox"/>	Podizanje tlovrsta	<input type="checkbox"/>	Očistiti spojevnostni praznini
<input type="checkbox"/>	Uklanjanje zidova, obloga i spojevnih strojeva	<input type="checkbox"/>	Ostalo*
<input type="checkbox"/>	Uklanjanje elemenata krovne, dimnjaka, parapeta		
<input type="checkbox"/>	Uklanjanje elemenata fasadne vijenca, parapeta, stropa		

K. Pregled oštećenja i uporabivosti

Detaljni oštećenja i napomene:

Ratna: _____

Potpis voditelja radne skupine: _____

Abbildung 18: Der kroatische Bewertungsbogen von Gebäudeschäden infolge seismischer Ereignisse [73].

Bei der Bewertung der Erdbebenschäden werden der Grad der Schädigung und das räumliche Ausmaß des Schadens berücksichtigt. Die Schadensgradzuweisung erfolgt nach der Europäischen Makroseismischen Skala (EMS-98). Die EMS-Skala unterscheidet fünf Schadensgrade, vgl. Abbildung 19 bis 23.

Unter Erdbebenschäden mit Schadensgrad 1 nach EMS-98 fallen vernachlässigbare bis geringe Schäden, wie zum Beispiel vereinzelt Haarrisse, Putzablösungen sowie das Herunterfallen loser Ziegel aus oberen Bauwerksteilen [7]. Abbildung 19 zeigt die bildliche Darstellung des Schadensgrads 1 nach EMS-98.

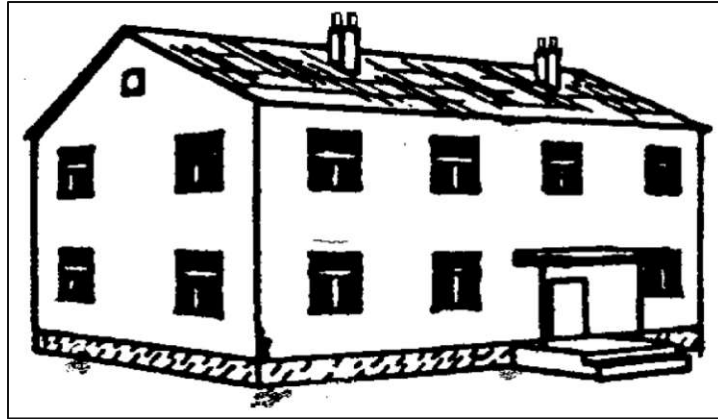


Abbildung 19: Schadensgrad 1 nach der EMS-98 [7].

Die in Abbildung 20 dargestellte Schäden entsprechen dem Schadensgrad 2 nach der EMS-98. Dieser Schadensgrad beschreibt moderate Schäden, die Risse in mehreren Wänden sowie größeren Putzablösungen bedeuten können. Dabei kann es bereits zum teilweisen Einsturz von Kaminen bzw. Rauchfängen kommen [7].



Abbildung 20: Schadensgrad 2 nach der EMS-98 [7].

Unter dem Schadensgrad 3 fallen breite, ausgedehnte Risse in den meisten Wänden, das Abfallen der Dacheindeckung sowie das Versagen von Kaminen und nicht tragenden Elementen. Dieser Schadensgrad beschreibt generell moderate Schäden an konstruktiven Elementen und schwere Schäden an nicht konstruktiven Elementen. Solche Erdbebenschäden sind schematisch in Abbildung 21 dargestellt [7].



Abbildung 21: Schadensgrad 3 nach der EMS-98 [7].

In Abbildung 22 werden Schäden wie das Versagen mehrerer Wände, das Herabfallen der Dacheindeckung oder das teilweise Versagen der Dach- sowie Deckenkonstruktion dargestellt. Diese Erdbebenschäden entsprechen dem Schadensgrades 4 nach der EMS-98, welcher sehr starke Erdbebenschäden definiert [7].



Abbildung 22: Schadensgrad 4 nach der EMS-98 [7].

Ein vollständiges oder fast vollständiges Versagen der Konstruktion eines Gebäudes wird mit dem Schadensgrad 5 beschrieben [7]. Eine schematische Darstellung solcher Schäden ist der Abbildung 23 zu entnehmen.



Abbildung 23: Schadensgrad 5 nach der EMS-98 [7].

Im kroatischen Bewertungsbogen folgt die Schadensklassifikation der Bauelemente nach der EMS-98 [7]. Die Schadensgrade sind wie folgt klassifiziert:

- Kein Schaden
- Unerheblicher Schaden – entspricht Schadensgrad 1 nach EMS-98
- Leichter bis mäßiger Schaden – entspricht Schadensgrad 2 und 3 nach EMS-98
- Starker bis sehr starker Schaden – entspricht Schadensgrad 4 und 5 nach EMS-98 [12].

Die räumliche Ausdehnung der Beschädigung nach dem kroatischen Bewertungsbogen bezieht sich auf die Ausbreitung der beschädigten Elemente im jeweiligen Objekt. Die Schadensausbreitung wird in drei Kategorien mit weniger als 35 %, 35 % bis 65 % und mehr als 65 % der begutachteten Elemente eingeteilt. Liegt an einem tragenden Bauteil kein Schaden einer Schadenskategorie vor, so wird nichts in den Bewertungsbogen eingetragen. Nach der Besichtigung und Bewertung aller Geschosse wird die Schadensausdehnung und der Schadensgrad in den Bewertungsbogen eingetragen. Bei nicht tragenden Bauteilen ist das Schadensausmaß nicht definiert [12].

Nach der Datenerfassung wird im Abschnitt I des Bewertungsbogens für jedes Gebäude eine „Gesamtnote“, die sogenannte Nutzbarkeitskategorie, vergeben. Auf Grundlage der gesammelten Daten müssen für jedes Gebäude Risikostufen angesetzt werden, wobei vier Kategorien bewertet werden: konstruktives Element, nichtkonstruktives Element, äußerer Einfluss und geotechnische Mängel. Anhand der Schätzung des Risikos wird die Nutzbarkeitskategorie festgelegt. Es ist ebenso vorgesehen ein Gebäude im Zweifelsfall vorübergehend als nicht nutzbar einzustufen, bis eine genauere Untersuchung des Gebäudes erfolgt ist. Die nachfolgende Tabelle 9 zeigt die abschließende Bewertungsmöglichkeiten der untersuchten Objekte nach dem kroatischen Bewertungsbogen [12]. Die genauen Kriterien für die abschließende Bewertung werden in [12] beschrieben.

Tabelle 9: Nutzbarkeitskategorien nach dem kroatischen Bewertungsbogen [12].

Zusammenfassung und Nutzbarkeitsbewertung				
Risikobewertung	Ursache	Hohes Risiko	Mäßiges Risiko oder mit Notfallmaßnahmen niedriges Risiko	Niedriges Risiko
	Konstruktives Element	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
	Nichtkonstruktives Element	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
	Äußerer Einfluss	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
	Geotechnischer Mangel	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Nutzbarkeit	<input type="checkbox"/> NICHT NUTZBAR auf Grund ÄUßERER EINFLÜSSE	<input type="checkbox"/> TEMPORÄR NICHT NUTZBAR, für DETAILUNTERSUCHUNG	<input type="checkbox"/> UNBESCHRÄNKT NUTZBARES Gebäude	
	<input type="checkbox"/> NICHT NUTZBAR auf Grund von SCHADEN	<input type="checkbox"/> TEMPORÄR NICHT NUTZBAR, aber mit Notfallmaßnahmen NUTZBAR	<input type="checkbox"/> NUTZBARES Gebäude, mit EMPFEHLUNG	
Anzahl der Personen, die evakuiert und unterbracht werden müssen:				

Letztlich können im Abschnitt I des Bewertungsbogens Vorschläge für notwendige oder empfehlenswerte Notmaßnahmen erfolgen, um die Sicherheit des Gebäudes und der Einwohner zu gewährleisten. Abschnitt J dient für weitere Anmerkungen, wie z.B. Vermerke zu den beobachteten Schäden im Dachstuhl, der Anzahl zerstörter Rauchfänge, usw. Die Methodik der Auswertung der Schäden in dieser Arbeit wird im Unterkapitel 4.4 vorgestellt.

4.2 Zagreber Innenstadt – Häuserblock 19

Der untersuchte Häuserblock (vgl. Abbildung 17) repräsentiert die typische Zagreber Gründerzeitbebauung. Beim Großteil der insgesamt 35 Objekte handelt es sich um gemauerte Wohnhäuser, die primär zu Wohnzwecken genutzt werden. Wie in Abbildung 17 ersichtlich ist, erhielten 13 der begutachteten Gebäude die Klassifizierung nutzbar, 15 wurden als temporär und sieben als nicht nutzbar eingestuft.

In einigen der Objekte auf den Straßen Ilica und Frankopanska befinden sich kleine Lokale oder Geschäfte im Erdgeschoss. Weiters liegen in der Straße Frankopanska zwei aneinander angrenzende öffentliche Objekte, das Designstudium (Objekt Nr. 8) und das Theater „Gavella“ (Objekt Nr. 7). Abbildung 24 zeigt je Straße ein charakteristischer Mauerwerksgebäude.



Frankopanska - Objekt 4



Dalmatinska - Objekt 17



Medulićeva - Objekt 23



Ilica - Objekt 34

Abbildung 24: Charakteristische Mauerwerksbauten im Häuserblock 19. *Fotos: Autor*

Das Errichtungsjahr sowie weitere Gebäudemerkmale der untersuchten Mauerwerksbauten im Häuserblock 19 konnten mit Hilfe von umfassenden Bestandsplänen, Baubewilligungen sowie weiteren Gebäudedaten festgehalten werden. Umbauten, Renovierungen und Erweiterungen im Laufe der Jahrzehnte konnten nicht immer eindeutig identifiziert werden.

4.3 Gebäudedaten des begutachteten Häuserblocks

Aus den Plänen sowie den erfassten Daten ist ersichtlich, dass alle Gebäude im Häuserblock 19 überwiegend vor 1918 errichtet wurden und einer typischen gründerzeitlichen Baukonstruktionsweise zugeordnet werden können. Erst im Jahr 1964 wurde in Kroatien die „Verordnung über technische Übergangsbestimmungen für das Bauen in Erdbebengebieten“ eingeführt, welche eine erdbebengerechte Planung der Gebäude verpflichtend einführte. Diese Verordnung stellt den Grundstein zur konstruktiven Auslegung von Hochbauten unter Berücksichtigung seismischer Einwirkungen dar und grenzt daher aus bautechnischer Sicht die Objekte vor und nach dem Jahr 1964 ab.

Die gemauerten Gebäude des betrachteten Häuserblockes haben eine durchschnittliche Bruttogeschossfläche von 313 m². Abbildung 25 zeigt die Verteilung der Bruttogeschossflächen (BGF) der untersuchten Gebäude. Dabei ist zu erkennen, dass kein Gebäude eine Fläche von weniger als 100 m² aufweist und dass überwiegend Objekte mit einer BGF zwischen 200 und 399 m² vorzufinden sind.

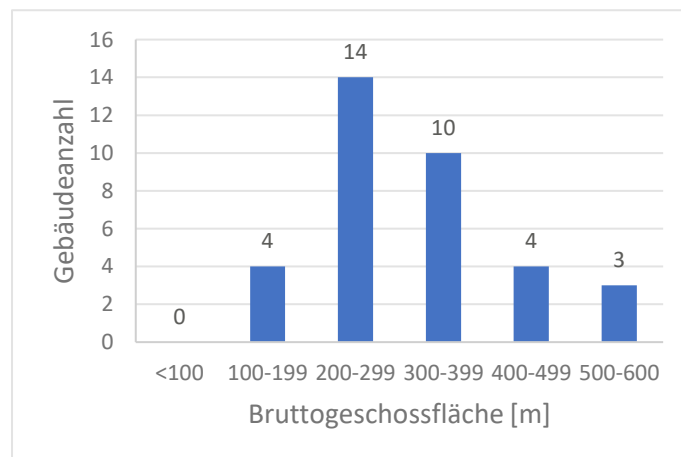


Abbildung 25: Bruttogeschossflächen der untersuchten Objekte in Häuserblock 19. *Abb.: Autor*

Die Geschosshöhe, die Anzahl der Geschosse und die Gesamthöhe des Gebäudes spielen eine wichtige Rolle in der Bewertung der Erdbebensicherheit von Mauerwerksbauten. Für die Höhe der Stockwerke sind im Bewertungsbogen folgende Kategorien festgelegt:

- < 2,5 m
- 2,5–3,49 m
- 3,5–5 m
- > 5 m.

Von den 35 begutachteten Objekten liegen alle Geschosshöhen in den Bereichen von 2,5 bis 3,5 m oder 3,5 bis 5 m. Die Mehrheit mit 29 Gebäuden (83 %) fällt dabei in die Kategorie mit 3,5 bis 5 m hohen Geschossen.



Abbildung 26: Objekt 20 mit drei Obergeschossen (links) und Objekt 13 mit vier Obergeschossen (rechts).
Fotos: Autor

Wie der Abbildung 27 zu entnehmen ist, besitzen 22 von 35 bzw. 63 % der begutachteten Gebäude drei Obergeschosse. Nur ein Gebäude besteht aus nur einem Obergeschoss, fünf Gebäude sind mit zwei und sieben Gebäude mit vier Obergeschossen ausgeführt.

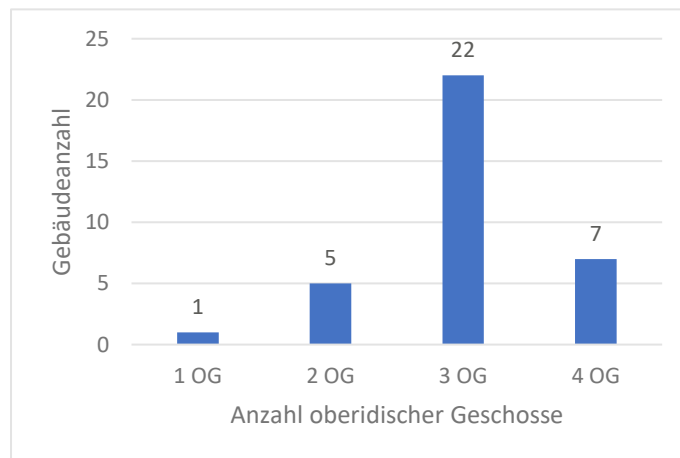


Abbildung 27: Gebäudeanzahl nach der Anzahl der oberirdischen Geschosse ohne Dachboden. Abb.: Autor

Zusammenfassend weist der betrachtete Häuserblock 35 gemauerte Gebäude auf, die überwiegend vor 1918 errichtet wurden und der charakteristischen gründerzeitlichen Baukonstruktionsweise folgen.

4.3.1 Umbauten über die Jahrzehnte – Fallbeispiel

Im Folgenden werden beispielhaft zwei begutachtete Gebäude vorgestellt, an denen über die Jahre Rekonstruktionsarbeiten durchgeführt wurden. Die im Jahre 1886 genehmigten und errichteten Objekte Nr. 24 und Nr. 25 wiesen bei der Errichtung einen symmetrischen Grundriss auf. Im Jahr

1957 wurde das Objekt Nr. 25 um ein Obergeschoss aufgestockt. Aus der Baugenehmigung geht weiters hervor, dass die beiden Gebäude jeweils einen Turm auf dem Dach hatten, welche jedoch zwischen den Jahren 1886 und 1957 entfernt wurden. Im EG und 1. OG ist die alten Fassadengestaltung noch immer ersichtlich (Abbildung 28). Die erdbebenrelevante Konstruktion wurde somit mehrmals maßgebend verändert, jedoch nicht zwingend in statischen Bemessungen berücksichtigt.



Abbildung 28: Objekt Nr. 24 (links) und 25 (rechts) in der Medulićeva Straße. Foto: Autor

4.4 Erdbebenschäden am gemauerten Altbau

Die Schadensklassifizierung wird in Anlehnung an die Daten aus der Bewertung der Nutzbarkeit durchgeführt. Die umfangreiche Dokumentation umfasst Unterlagen in Form von Erdbebenschadensbildern, schriftlichen Anmerkungen sowie den ausgewerteten Bewertungsbögen. Darüber hinaus wurden alle Objekte von außen besichtigt und dokumentiert. Die Analyse erfolgt für jedes Gebäude einzeln. Hierbei erfolgt die Bewertung der Schäden in Anlehnung an die EMS-98 [7], wobei die maximal erfassten Schadensgrade an einzelnen Bauelementen zur Schadensanalyse herangezogen werden. Die Schadensgradzuweisung erfolgt unter Berücksichtigung der EMS-98 nach Karic et al. [75]. Die Kriterien der Schadensgradzuweisung werden nachfolgend aufgelistet und samt charakteristischer Schadensbildern dargestellt.

- S0 – kein Schaden
- S1 – Leichter Schaden: Feinrisse
- S2 – Mäßige Schäden: Deutliche Risse im Putz, kleine Abplatzungen
- S3 – Beträchtliche bis starke Schäden: Starke Risse sowie Abplatzungen
- S4 – Sehr starke Schäden: Risse im Ziegel, zerstörtes Mauerwerk oder einzelne zerstörte Bauelemente

- S5 – komplette Zerstörung



Es wurden sechs strukturell bedeutende Gebäudebereiche definiert. Die Schäden werden für jede definierte Bauteilgruppe separat erfasst und nur der maximal beobachtete Schaden wird bewertet [75]. Die Schadensausdehnung wird daher in der Bewertung nicht berücksichtigt. Die definierten Gebäudebereiche, die bei der Bewertung untersucht wurden, sind nachfolgend angeführt:

- Tragende Mauerwerkswände (Längswände)
- Vertikal nichttragende Bauelemente (Querwände)
- Treppenhaus
- Decken
- Dachboden/Dach
- Nichttragende Elemente (z. B. Balustraden, Zierelemente etc.).

Beispielsweise wird das Bauelement Laufplatte/Podest der Bauteilgruppe „Treppenhaus“ zugeordnet. Werden Risse im Zentimeterbereich auf der Treppenaufplatte oder dem Podest erfasst und der Schadensstufe S3 zugeordnet und kein anderes Bauelement in der Bauteilgruppe-Treppenhaus eine höhere Schadensklassifizierung erhält, so wird die Bauteilgruppe-Treppenhaus mit der Schadensstufe 3 bewertet. Es wurde demnach nicht bewertet, ob eine oder eventuell mehrere Laufplatten betroffen waren, sondern nur die beobachtete Maximalschadenshöhe.

Festzuhalten ist weiters, dass in den unterirdischen Gebäudebereichen, sprich den Kellergeschossen, keine Erdbebenschäden beobachtet wurden, weswegen diese Bereiche keiner Bewertung unterzogen wurden.

Tabelle 10: Exemplarische Darstellung der Schadenstufen und Schadensbilder nach Karic et al. [75]. *Fotos: Mario Todorić*

	S0	S1	S2	S3	S4	S5					
Kein Schaden		Leichter Schaden - Feinrisse	Mäßige Schäden - Deutliche Risse im Putz, kleine Abplatzungen	Beträchtliche bis starke Schäden - Starke Risse sowie Abplatzungen	Sehr starke Schäden - Risse im Ziegel, zerstörtes Mauerwerk oder zerstört	Zerstörung					
Tragende Mauerwerkswände	Nicht beobachtet										
Querwände											
Decken											
Dach											Nicht beobachtet
Treppenhaus											
Nichttragende Elemente											
											
	Nicht beobachtet										

5 Schadensanalyse – Zagreber Erdbeben 22. März 2020

In diesem Kapitel wird eine statistische Auswertung der Erdbebenschäden an den maßgebenden Bauelementen der Altbauten vorgenommen. Die Analyse der Erdbebenschäden baut auf der vertiefenden seismischen Verletzbarkeitsanalyse gründerzeitlicher Bebauung [75] auf und erfolgt nach der im Unterkapitel 4.4 vorgestellten Bewertungsmethodik. Für jede definierte Bauteilgruppe wird die Häufigkeit des Auftretens der unterschiedlichen Schadensstufen in Anlehnung an die EMS-98 [7] über die definierten Bauteilgruppen aller betrachteten Gebäude abgeleitet. Weiters werden die vorkommenden Schadensmuster aufgezeigt und beschrieben. Anhand der statistischen Auswertung der Erdbebenschäden wird eine Identifizierung kritischer Strukturbereiche sowie eine Interpretation der Erdbebenschäden anhand der gewonnenen Resultate ermöglicht.

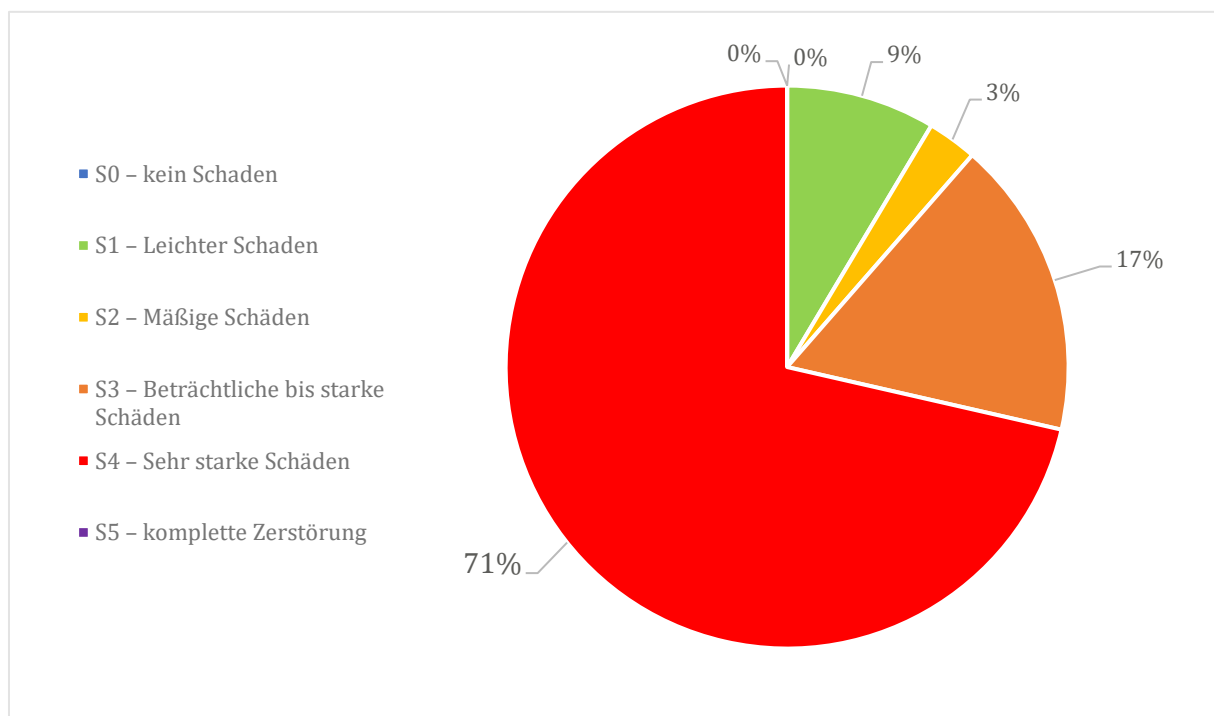


Abbildung 29: Verteilung der erfassten maximalen Erdbebenschäden am begutachteten gründerzeitlichen Altbaubestand nach dem Zagreber Erdbeben am 22. März 2020. *Abb.: Autor*

Abbildung 29 zeigt die Verteilung der erfassten maximalen Schadensgrade der einzelnen Gebäude des untersuchten Gebäudeblocks nach dem Erdbeben in Zagreb am 22. März 2020. Es ist ersichtlich, dass alle 35 Gebäude in gewissem Ausmaß Erdbebenschäden erlitten haben. Markant zeigt die Schadensverteilung dabei, dass 25 der 35 Mauerwerksbauten aufgrund ihrer Bewertung mit der Schadensstufe S4 (sehr starke Schäden) eingestuft werden mussten. Die Schadensstufe S5 (komplett zerstört) wurde nicht beobachtet. Obwohl alle Gebäude Schäden erlitten, wurde somit kein Gebäude in dem Ausmaß beschädigt, dass ein kompletter Gebäudeeinsturz (S5) die Folge war.

Abbildung 30 zeigt die Verteilung der Schäden über die einzelnen Gebäudebereiche bzw. Bauelemente. Die zwei niedrigsten Schadensstufen S0 (keine Schäden) und S1 (leichte Schäden) sind über alle untersuchten Strukturbereiche relativ gleichmäßig verteilt. Bei den Schadensstufen S2, S3 und S4 ist ersichtlich, dass bestimmte Gebäudebereiche eine deutlich höhere und andere eine niedrigeren Schadensanfälligkeit aufweisen. Die Bauelemente im Dachboden zeigen die höchste anteilige Schadensgradverteilung sehr starker Schäden S4. 20 der 35 Objekte wiesen Schäden der Schadensgradstufe S4 im Bereich des Dachraumes auf. Erwähnt sei dabei jedoch, dass fast ausschließlich nicht primär tragende Bauelemente, wie Giebelmauern, Schornsteine etc. beschädigt wurden.

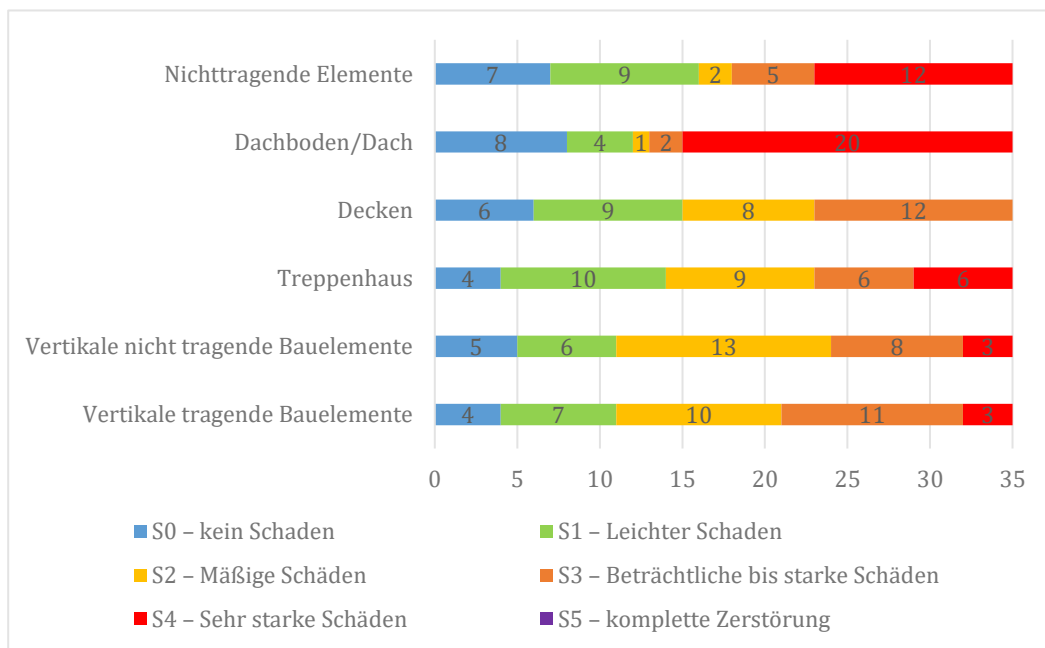


Abbildung 30: Anteilige Schadensgradverteilung über den einzelnen Gebäudebereichen der untersuchten Gründerzeithäuser. *Abb.: Autor*

Die definierte Gruppe der nichttragenden Elemente zeigt die zweithöchste anteilige Verteilung sehr starker Schäden (S4) auf. In die Kategorie der nichttragenden Elemente fallen ausschließlich nichttragende Elemente, wie Fensterscheiben, Zierelemente etc. Zwölf der 35 Objekte haben Schäden des Grades S4 an nichttragenden Elementen und fünf des Schadensgrades S3 erlitten. Von den tragenden Bauelementen erlitt das Treppenhaus die höchste anteilige Schadenshöhe (S4). Jeweils sechs Objekte hatten starke (S3) und sehr starke Schäden (S4) erlitten. Die hölzernen Deckenkonstruktionen zeigten als einziges tragendes Bauelement keine sehr starken Schäden (S4) auf, was auf eine ausreichende Flexibilität dieser Bauelemente gegenüber seismischen Einwirkungen schließen lässt. Die tragenden und nichttragenden vertikalen Mauerwerkswände zeigten eine durchaus ähnliche Verteilung der Schadensgradhöhe über den begutachteten Objekten. Es konnte eine leichte Erhöhung in der Schadensgradverteilung starker Schäden (S3)

bei den tragenden im Vergleich zu den nichttragenden Mauerwerkswänden beobachtet werden. Umgekehrt verhält es sich bezüglich des mäßigen Schadensgrades (S2).

5.1 Tragende Mauerwerkswände (Längswände)

Da die tragenden Wandstrukturen die primäre lastabtragende Funktion im gemauerten Altbau innehaben, tragen sie einen erheblichen Anteil zur Erdbebensicherheit der Gebäude bei. Aus diesem Grund ist eine grundlegende Kenntnis über die seismische Verletzbarkeit der tragenden Wände von höchstem Interesse.

5.1.1 Schadensgradverteilung

Abbildung 31 zeigt die erfasste anteilige Schadensverteilung infolge des Erdbebens am 22. März 2020 an den tragenden Mauerwerkswänden. Von den 35 begutachteten Objekten erlitten die vertikalen tragenden Bauelemente von vier Objekten keinen Schaden (S0). Bei sieben Objekten wurden leichte Schäden (S1), bei zehn mäßige Schäden (S2), bei elf starke (S3) und bei drei Objekten sehr starke Schäden (S4) festgestellt. Kein Objekt wies die Schadensgradhöhe 5 (komplette Zerstörung) auf. Prozentuell gesehen, wurden nur 11 % der Gebäude von Erdbebenschäden verschont, während mit etwa 31 % der maßgebliche Anteil der Gebäude Schäden der Schadensgradstufe S3 aufwies.

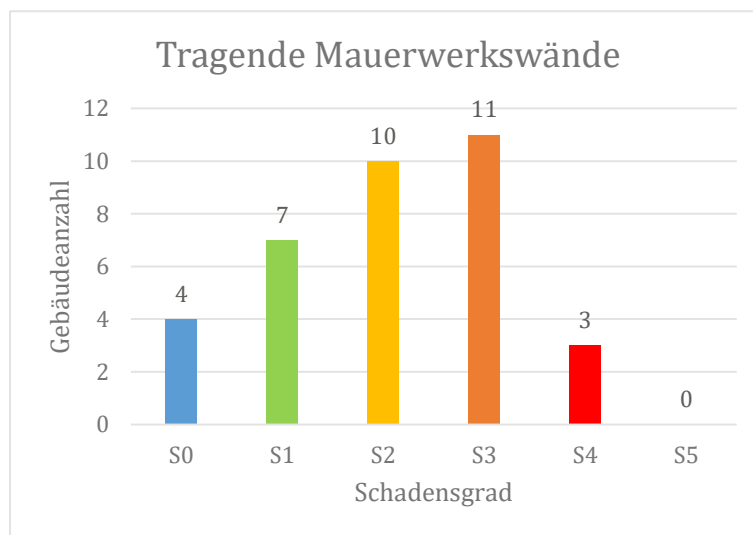


Abbildung 31: Verteilung der Schadensgradhöhe (S0–S5) über der tragenden Mauerwerksstruktur der begutachteten Gründerzeithäuser. *Abb.: Autor*

5.1.2 Schadensbilder

Die Schadensgrade S1 und S2 wiesen überwiegend leichte Oberflächenschäden an Putzen auf. Diese Schäden sind für die tragende Konstruktion nicht von großer Bedeutung, dürfen dennoch nicht vernachlässigt werden. Sie konnten bei etwa 49 % der Objekte festgestellt werden. Stärkere

Schäden der Schadensgrade S3 und S4, welche für die tragende Konstruktion von signifikanter Bedeutung sind, machen 40 % der anteiligen Schadensverteilung der begutachteten Häuser aus. Sehr starke Schäden zeichnen sich durch den Verlust der Verbindung zwischen einzelnen Ziegelsteinen (Verbundversagen) bis zum Bruch einzelner Ziegelsteine (Materialversagen) aus. Bei solchen Schäden kann das Mauerwerk seine tragende Funktion nicht mehr vollständig erfüllen, wodurch eine hohe Sach- und Personengefährdung entstehen kann.

Bei den vertikal tragenden Bauelementen konnten mehrere charakteristische Schadensstellen bzw. anfällige Strukturbereiche identifiziert werden. Die Erdbebenschäden konzentrierten sich vor allem auf Anschlüsse zu Decken, Querwänden und Feuermauern. Bei den Verbindungsstellen der Längswände an die Decke kam es überwiegend zu horizontalen Rissen (Abbildung 32b). An Anschlussstellen der Längs- und Querwände oder Feuermauern konnten wiederum vertikale Risse erfasst werden, die sich entlang der Anschlussbereiche/Stoßstellen erstreckten. Solche Schadensmuster sind in der Abbildung 32b und c exemplarisch wiedergegeben. Diese strukturellen Anschlussbereiche (Wand-Wand, Wand-Decke), welche vor allem durch eine hohe Differenz der Steifigkeiten gekennzeichnet sind, stellen sich als empfindliche Bereiche heraus. Auf Grund dieser unterschiedlichen Steifigkeiten der angeschlossenen Bauelemente zeigen sie im Erdbebenfall Unterschiede im Strukturverhalten und führen zu höheren Beanspruchungen in diesen Bereichen [10].

In den Wänden selbst konnten vereinzelt diagonale Schubrisse bestimmt werden. Diese Schubrisse entstehen, wenn durch die erdbebenbedingte Beanspruchung die Schub- oder Zugfestigkeit in der Wandebene überschritten wird. Weiters konnten Risse bzw. Beschädigungen infolge von Biegebeanspruchung aus der Wandebene beobachtet werden. Letztlich konnten vermehrt kreuzförmige Risse an Parapeten und Stürzen im tragenden Mauerwerk festgehalten werden, vgl. Abbildung 32d.

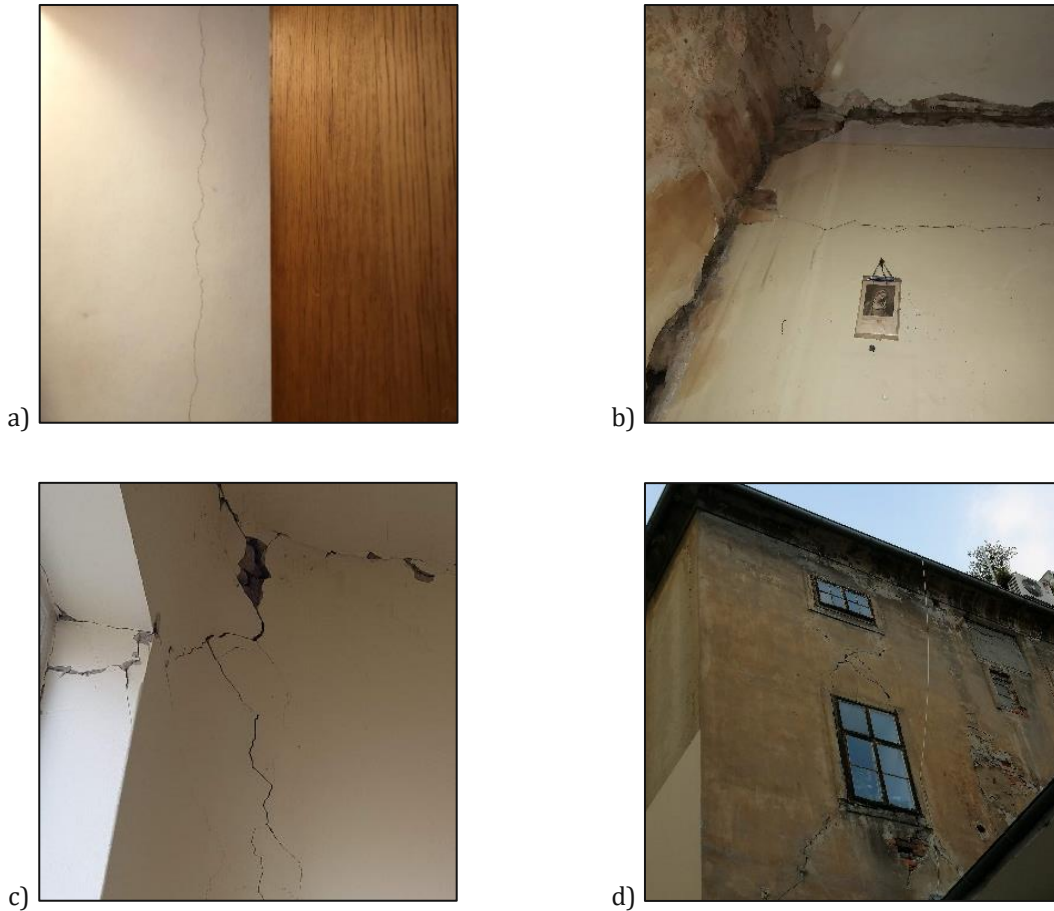


Abbildung 32: Exemplarische Schadensbilder an der tragenden Mauerwerksstruktur mit a) Objekt 11 – vertikaler Riss in der Längswand (S1); b) Objekt 35 – beschädigte Anschlussbereiche (S4); c) Objekt 9 - beschädigte Anschlussbereiche (S3) und d) Objekt 29 – kreuzförmige Risse an Sturz und Parapet (S4). *Fotos: Mario Todorčić.*

Ebenso stellen Mauerwerksöffnungen empfindliche Strukturbereiche im tragenden Mauerwerk dar. Die Durchbrüche stören den Kräftefluss, da dieser an Durchbrüchen umgelenkt werden muss. Dadurch entstehen Spannungskonzentrationen in den geschwächten Strukturbereichen. Weiters stellen die Parapetausbildungen relativ schlanke Mauerwerksbereiche (aus der Wandebene) und somit deutliche Strukturschwächungen dar, welche die hervorgerufenen Kräfte nur in eingeschränktem Maße übertragen können [38]. Bei den Parapeten, Fensterstürzen und Türstürzen konnten zwei typische Schadensbilder beobachtet werden, die in den nachfolgenden Abbildungen illustriert werden. Dabei handelt es sich zum einen um Schadensmuster mit diagonal gekreuzter Rissausbildung (Abbildung 33a) und zum anderen um Schadensmuster mit nach außen schräger oder vertikaler Rissausbildung (Abbildung 33b). Beide Schadensmuster weisen auf eine Überschreitung der Schub- und Zugfestigkeiten im Mauerwerk hin. Vertikale Risse an Stürzen deuten auf eine Beanspruchung aus der Bogenwirkung und der damit verbundenen Überschreitung der Zugfestigkeit hin [12].

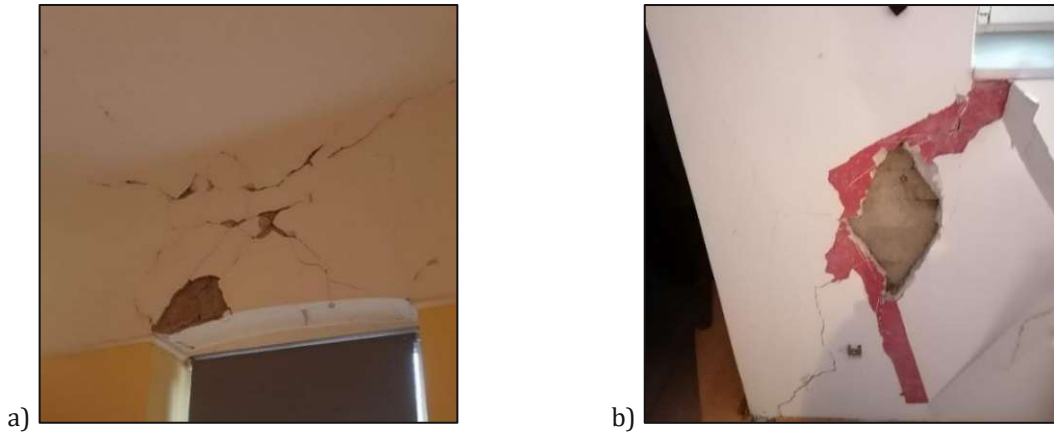


Abbildung 33: Exemplarische Schadensbilder an der tragenden Mauerwerksstruktur mit a) Objekt 23 – kreuzförmige Risse am Fenstersturz (S3) und b) Objekt 26 – Rissausbildung am Parapet (S3).

Fotos: Mario Todorčić.

5.2 Vertikal nichttragende Bauelemente (Querwände)

Als nichttragende Bauelemente werden alle Wände des Gebäudes, die keine primäre vertikal tragende Wirkung haben, betrachtet. Zur Analyse der nichttragenden Bauelemente werden Zwischenwände und Feuermauern herangezogen. Obwohl diese keine primäre lastabtragende Funktion in vertikaler Richtung besitzen, sind sie für die Aussteifung des Gebäudes gegenüber horizontalen Einwirkungen von essenzieller Bedeutung. In [76] konnte festgehalten werden, wie der Abbau von Trennwänden zu einer Minderung der globalen Steifigkeit des gemauerten Altbaus von $\approx 57\%$ geführt hat, die durch umfangreiche messtechnische Untersuchungen im Bestand aufgezeigt werden konnten. Dies bekräftigt die Wichtigkeit der nichttragenden Mauerwerkswände im Erdbebenfall.

5.2.1 Schadensgradverteilung

Aus Abbildung 34 ist ersichtlich, dass von den 35 Objekten fünf Objekte keine Schäden (S0) an den Querwänden erlitten haben. Sechs Objekte erlitten leichte Schäden (S1) an diesen Wänden, 13 Objekte mäßige Schäden (S2). In acht Objekten konnten beträchtliche bis starke (S3) und in drei Objekten sehr starke Schäden (S4) vorgefunden werden. Das bedeutet, dass nach dem Erdbeben in Zagreb 14 % der Querwände keinen Schaden erlitten hatten, während Schäden der Stufe S2 in dieser Gruppe an Bauelementen mit 37 % am häufigsten auftraten.

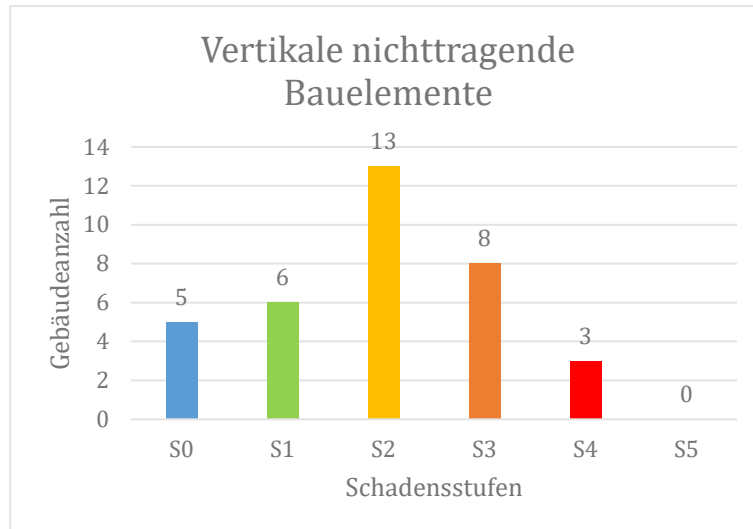


Abbildung 34: Verteilung der Schadensgradhöhe (S0–S5) über der nichttragenden Mauerwerksstruktur der begutachteten Gründerzeithäuser. *Abb.: Autor*

5.2.2 Schadensbilder

Die Erdbebenschadensbilder bei vertikal nichttragenden Mauerwerkswänden konzentrieren sich Großteils bei Anschlussbereichen (Wand-Wand, Decke-Wand) sowie Mauerwerksschwächungen (Türöffnungen etc.). Diese treten durch Überschreitung der aufnehmbaren Zug- sowie Schubspannungen des Mauerwerks auf. Es konnten auch vereinzelt Schubrisse in Wandebene erfasst werden.

Abbildung 35a zeigt exemplarisch eine Rissausbildung über dem Türsturz einer Trennwand. Abbildung 35b zeigt stärkere Risse im Anschlussbereich zur Decke sowie leichte Schubrisse. Abbildung 35c und d zeigen Schubrisse [1]. Der Schadensmechanismus ist durch Überschreitung der Zug- und Schubfestigkeiten im Mauerwerk gekennzeichnet [12].



Abbildung 35: Exemplarische Schadensbilder an nichttragender Mauerwerksstruktur mit a) Objekt 1 – Horizontale Risse am Türsturz (S2); b) Objekt 9 – Diagonale Schubrisse sowie Risse im Anschlussbereich der Decke (S2) und (S3); c) Objekt 22 – Diagonale Schubrisse im Mauerwerk (S3) und d) Objekt 32 – Risse im Mauerwerk und an den Anschlussbereichen (S3). *Fotos: Mario Todorčić.*

5.3 Treppenhaus

Das Treppenhaus stellt einen wichtigen Gebäudebereich eines historischen Mauerwerkbaus sowie den einzigen Fluchtweg aus dem Gebäude dar. Aus diesem Grund ist die Kenntnis über die seismische Empfindlichkeit gründerzeitlicher Treppenhäuser von grundlegender Bedeutung.

5.3.1 Schadensgradverteilung

Abbildung 36 zeigt die anteilige Schadensgradverteilung an den begutachteten Treppenhäusern. Bei vier Objekten haben die Treppenhäuser keinen Schaden (S0) erlitten. Bei zehn Treppenhäusern konnten leichte (S1) und bei neun mäßige Schäden (S2) erfasst werden. Sechs Treppenhäuser haben starke (S3) und weitere sechs sehr starke Schäden (S4) erlitten. Das bedeutet, dass bei 11 % der Objekte keine Schäden am Treppenhaus festgestellt wurden. Schäden des Grades (S1) wurden bei etwa 29 % und mäßige Schäden (S2) bei etwa 26 % der Treppenhäuser dokumentiert. Beträchtliche bis starke (S3) und sehr starke Schäden (S4) konnten

jeweils in 17 % der Objekte erfasst werden. Die Erdbebenschäden über den Treppenhäusern des begutachteten Häuserblocks zeigen im Gegensatz zu den anderen tragenden Gebäudebereichen eine hohe Schadensdichte auf.

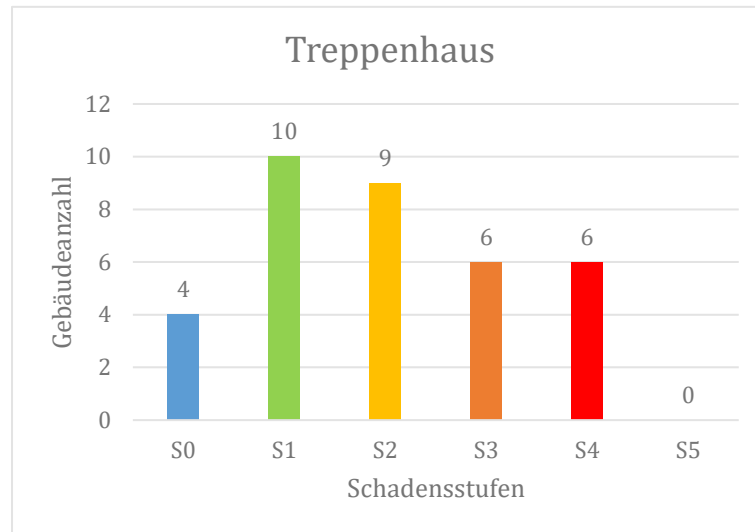


Abbildung 36: Verteilung der Schadensgradhöhe (S0–S5) über den Treppenhäusern der begutachteten Gründerzeithäuser. *Abb.: Autor*

5.3.2 Schadensbilder

Die Treppenhäuser bestehen aus mehreren konstruktiven Elementen, wie den tragenden Treppenhauswänden, den oftmals massiven Podesten, den Treppenhausdecken und der Treppenkonstruktion. Alle drei in Kapitel 3.3.4 vorgestellten Konstruktionsvarianten von Treppen, wie die wandunterstützten Stufen, die Kragstufen und die traversenunterstützten Stufen, konnten im untersuchten Häuserblock vorgefunden werden.

An den Treppenstufen waren bei allen drei Konstruktionsvarianten Risse im Fugenbereich der Stufen vorzufinden. Aufgrund ihrer mangelnden oder auch nicht vorhandenen kraftschlüssigen Verbindung können sich die einzelnen Stufen im Erdbebenfall unabhängig voneinander bewegen. Es konnten ebenso Risse in den einzelnen Treppenstufen beobachtet werden, die auf ein lokales Materialversagen hindeuten und in weiterer Folge ein Gesamtversagen der Treppenkonstruktion auslösen können. Ein solches Schadensbild kann der Abbildung 37d entnommen werden. Weiters konnten im Treppenhausmauerwerk Schubrisse beobachtet werden, vgl. Abbildung 37a und d. Beschädigungen in Form von Rissen konnten außerdem im Auflagerbereich der Stufen und Podeste sowie in den Anschlussbereichen derer als auch von Treppenhauswänden und Decken erfasst werden. Die Treppenstufen zeigten ebenso eine hohe seismische Anfälligkeit.

Vergleichbar mit den tragenden sowie nicht tragenden Mauerwerkswänden zeigen Strukturschwächungen durch Mauerwerksöffnungen (Fenster- und Türöffnungen) eine hohe Anfälligkeit gegenüber seismischer Beanspruchung. Der Kräftefluss in der Wandebene wird

unterbrochen bzw. umgelenkt und führt im Erdbebenfall zur konzentrierten Beanspruchung. In Bereichen von Öffnungen waren die höchsten Schäden vorzufinden, was in der Regel auch den maximal erfassten Schadensgrad des Treppenhauses in der Auswertung bestimmte, vgl. Abbildung 37c.



Abbildung 37: Exemplarische Schadensbilder an der Treppenhausstruktur mit a) Objekt 11 – Schubrisse im tragenden Mauerwerk (S1); b) Objekt 35 – Risse Auflagerbereich Treppenkonstruktion (S2); c) Objekt 29 – kreuzförmige Risse im Fenstersturz, Risse im Anschlussbereich Treppenhauswand und Podest (S3) und (S3) und Risse und Abplatzungen an der Unterseite der Laufplatte (S3) und d) Objekt 19 – Zerstörte Kragstufe (S4), Risse im Mauerwerk (S3). Fotos: Mario Todoric.

Das Treppenhaus zeigte in der Schadensverteilung die höchste seismische Anfälligkeit der gründerzeitlichen Gebäudebereiche für sehr starke Schäden. Die Beobachtungen legen daher nahe, dass die Treppenhäuser in der Standsicherheitsbewertung nicht vernachlässigt werden dürfen. Das Treppenhaus muss auch im Evakuierungsfall (Fluchtweg) seine Funktion erfüllen können.

5.4 Decken

Anhand der beobachteten Erdbebenschäden an den hölzernen Deckenkonstruktionen (vorwiegend Tramdecken) konnte das Tragverhalten der Deckenkonstruktionen analysiert werden.

5.4.1 Schadensgradverteilung

An den hölzernen Deckenkonstruktionen konnten keine sehr starken Schäden (S4) festgestellt werden. In sechs der untersuchten Objekte wurden keine Schäden (S0) und in neun weiteren nur leichte Schäden der Kategorie S1 beobachtet. In acht Objekten wurden an den Decken mäßige Schäden der Kategorie S2 und in zwölf Objekten starke Schäden der Kategorie S3 verzeichnet. Der Anteil schadensfreien Decken in den begutachteten Objekten beträgt $\approx 17\%$. Ungefähr ein Drittel der Objekte mit $\approx 34\%$ erlitt Schäden der Stufe S3. Sehr starke Erdbebenschäden der Kategorie S4 konnten bei den flexiblen gründerzeitlichen Holzdecken nicht festgestellt werden.

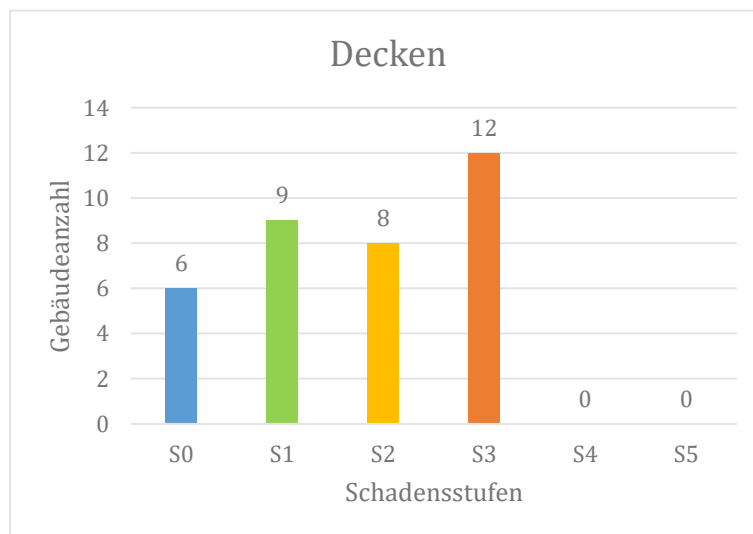


Abbildung 38: Verteilung der Schadensgradhöhe (S0–S5) über den hölzernen Deckenkonstruktionen der begutachteten Gründerzeithäuser. *Abb.: Autor*

5.4.2 Schadensbilder

Die Decken wiesen vor allem Schäden an den Anschlussbereichen zu den Mauerwerkswänden und an den Deckenuntersichten auf. Exemplarisch werden die typische Erdbebenschadensbilder an den Deckenkonstruktionen in Abbildung 39 wiedergegeben.

Die vorherrschenden Schäden waren vor allem Risse sowie ein Abplatzen und das Herabfallen des Putzes der Deckenuntersicht. Die sich einstellenden Risse verliefen meist parallel zu den Holzbalken. Die unterschiedliche Beanspruchung und damit einhergehenden unterschiedlichen Verformungen der einzelnen Balken führten zu diesen charakteristischen Schäden entlang der Balken [75]. Dies wiederum hatte zur Folge, dass sich die Putze teilweise auch ganz von den Putzträgern lösten (vgl. Abbildung 39c und d). Diese Schäden vermögen Einwohner zu verschrecken und bei Herabfallen auch zu verletzen. Sie bringen den Decken unter Anbetracht der hohen Wahrnehmbarkeit im konkreten Fall jedoch ungerechtfertigt einen Status statischer Unsicherheit ein, da keine schwerwiegenden strukturellen Schäden (S4) infolge des Erdbebens in Zagreb beobachtet werden konnten.



Abbildung 39: Exemplarische Schadensbilder an den hölzernen Deckenkonstruktionen mit a) Objekt 1 – Risse im Anschlussbereich Decke-Wand (S1); b) Objekt 1 – Feinrisse an der Decke (S1), Risse im Anschlussbereich Decke-Wand (S2); c) Objekt 32 - Putzabplatzungen an der Deckenunterseite (S3) und d) Objekt 22 – Putzabplatzungen an der Decke (S3). *Fotos: Mario Todorić.*

Dennoch muss dieser Umstand kritisch diskutiert werden, da eine mangelhafte Verankerung der Holzbalken in den Auflagerbereichen anhand der gutdokumentierten Erdbebenschäden aufgezeigt werden konnte. Dies stellt durch die mögliche vollständige Entkoppelung der Balken von Auflagerbereichen eine nicht zu unterschätzende Gefahr dar [38]. Ein Versagen der gesamten Deckenkonstruktion könnte bei vollständigem Ausziehen einzelner Balken nicht ausgeschlossen werden.

5.5 Dachboden/Dach

Wie bei den Erdbebenschäden an den hölzernen Deckensystemen konnten auch in der Bauteilkategorie "Dachboden/Dach" bedeutende Erkenntnisse über das Erdbebentragverhalten nichttragender Bauelemente im Dachbereich gewonnen werden. Diese werden im Nachfolgenden vorgestellt.

5.5.1 Schadensgradverteilung

Die Schadensgradverteilung der untersuchten Erdbebenschäden im Dachboden ist in Abbildung 40 wiedergegeben. In acht Dachboden/Dächern wurden keine Schäden (S0) festgestellt. Vier Objekte zeigten leichte Schäden (S1), einem Objekt konnte die Schadensgradhöhe S2 und zwei Objekten der Schadensgrad S3 zugewiesen werden. Der Anteil unbeschädigter Dachböden (S0) lag somit bei etwa 23 %, während sehr starke Schäden (S4) an 20 von 35 und somit markanten 57 % der untersuchten Objekte festgestellt wurden.

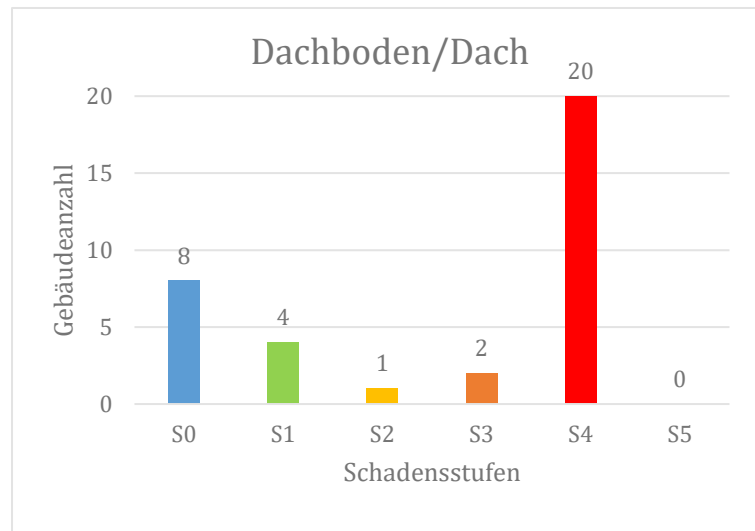


Abbildung 40: Verteilung der Schadensgradhöhe (S0–S5) über den Dachböden der begutachteten Gründerzeithäuser. *Abb.: Autor*

Die Gegenüberstellung der einzelnen Schadensverteilungen (vgl. Abbildung 30) über den definierten Gebäudebereichen zeigt, dass der Dachboden mit seinen überwiegend nichttragenden Bauelementen den anfälligsten Gebäudebereich gegenüber seismischen Einwirkungen darstellt.

5.5.2 Schadensbilder

Die verheerendsten Erdbebenschäden wurden durch zerstörte Giebelwände sowie herabfallende Rauchfänge verzeichnet. Manche Giebelwände wurden dabei vollständig zerstört und stürzten ab. Typische Schadensbilder im Dachboden sind in Abbildung 41a und b wiedergegeben. Im Zuge der Abstürze von massiven nichttragenden Bauelemente kam es vorwiegend an den Dachkonstruktionen und an den Nachbargebäuden zu schwerwiegenden Folgeschäden.

Die Rauchfänge stellen die empfindlichsten Bauelemente im Dachboden sowie jene Elemente mit der höchsten anteiligen Schadensverteilung sehr starker Schäden (S4) dar. An 18 der 20 Objekte mit sehr starken Schäden wurden die Schornsteine komplett zerstört. Insgesamt wurden Rauchfänge nur bei zwei Häusern nicht beschädigt. Dies entspricht 6 % der Objekte mit unbeschädigten und 51 % mit zerstörten Schornsteinen.



Abbildung 41: Exemplarische Schadensbilder im Gebäudebereich Dachboden/Dach mit a) Objekt 23 – Erdbebenschäden und Folgeschaden am benachbarten Objekt 22 durch das teilweise Herabfallen der Giebelwand und der Rauchfänge (S4); b) Objekt 6 – zerstörte Giebelwand (S4); c) Objekt 18 – Folgeschäden an der Dachkonstruktion (S4) und d) Objekt 29 – Erdbebenschäden an Rauchfängen (S4). *Fotos: Mario Todoric*

Die Kategorie Dachboden/Dach ist augenscheinlich ein nicht erdbebenresistenter Gebäudebereich des Zagreber Altbaus und stellt eine hohe Personen- und Sachgefährdung im Erdbebenfall dar. Die Giebelwände und die Rauchfänge der untersuchten Objekte müssen als nicht erdbebensicher eingestuft werden und zeigten mit einer geringen Standsicherheit gegenüber horizontalen Einwirkungen eine hohe seismische Verletzbarkeit auf. Diese hohe Anfälligkeit ist die Folge sowohl fehlender Verankerungen bzw. Verbindungen zu tragenden Bauelementen als auch einer nicht für horizontal wirkende Kräfte ausgelegten Konstruktionsweise.

5.6 Nichttragende Elemente

Zur Gruppe der nichttragenden Elemente werden massive dekorative Elemente, Türme, Attikaausbildungen, Balkone, Zierelemente sowie weitere nichttragende Elemente gezählt. Diese Elemente zeigten unterschiedliche Schadensmuster und werden im Nachfolgenden näher beschrieben.

5.6.1 Schadensgradverteilung

Das Abbildung 42 zeigt die erfasste anteilige Schadensgradverteilung am definierten Gebäudebereich „Nichttragende Elemente“. Nach dem Zagreber Erdbeben vom 22. März 2020 wurden an sieben Objekten keine Schäden (S0) an Elementen der Gruppe „Nichttragende Elemente“ festgestellt. Leichte Schäden (S1) konnten an neun Objekten dokumentiert werden. Mäßige (S2) und starke Schäden (S3) traten an zwei Objekten und an fünf Objekten auf. Sehr starke Schäden (S4) wurden an zwölf der 35 Objekte festgestellt. So erlitten 20 % der Gebäude keine Schäden in diesem Bereich, während sehr starke Schäden (S4) die höchste anteilige Schadenhöhe mit 34 % darstellten.

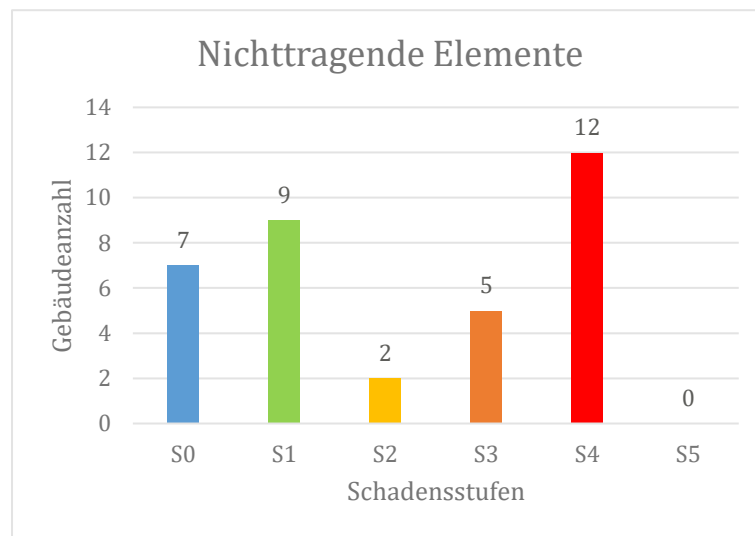


Abbildung 42: Verteilung der Schadensgradhöhe (S0–S5) an nichttragenden Elementen der begutachteten Gründerzeithäuser. *Abb.: Autor*

5.6.2 Schadensbilder

Die meisten starken Schäden von dieser Gruppe an Elementen wurden durch ein Herabstürzen aus großer Höhe verursacht. Rauchfänge, Giebelwände sowie schwere Zierelemente stellen die Elemente dar, welche aufgrund ihrer Masse die größten Folgeschäden durch ihr Herabfallen verursachten. Dabei wurden unter anderem Schäden an Nachbarbebauungen induziert. Bei sechs der zwölf mit sehr starken Schäden (S4) bewerteten Objekte wurde der Schaden durch Einstürze von Elementen an benachbarten Bauten verursacht.

Außenwände, oftmals in Form unverputzter Giebelwände, waren über die Jahre einem großen Witterungseinfluss ausgesetzt. Daraus folgte über die Jahrzehnte eine markante Abnahme der Materialqualitäten, was wiederum die Einsturzgefahr im Erdbebenfall erhöhte. Weiters stellen beschädigte oder verwitterte Zierelemente/Fassadenverzierungen im Allgemeinen sehr empfindliche Strukturbereiche des Altbestandes gegenüber seismischen Einwirkungen dar.

In Abbildung 43a ist eine beschädigte Fassade sowie ein teilweise beschädigtes Gesims eines Gebäudes wiedergegeben. Abbildung 43b zeigt eine zerstörte Attikaausbildung. Aufgrund der seismischen Beanspruchung kam es zum Aufklappen der Lagerfuge [75]. Ebenso zeigt die Abbildung 43c den hohen Schadensgrad eines massiven dekorativen Turms, der im Zuge der Sanierungsmaßnahmen entfernt werden musste (vgl. Abbildung 43d).



Abbildung 43: Exemplarische Schadensbilder weiterer nichttragender Elemente mit a) Objekt 4 – Beschädigte Fassade und Gesimse (S4); b) Objekt 32 – Aufklappen der Attikaausbildung (S4); c) Objekt 1 – Starke Risse im Auflager des Turmes (S4) und d) Objekt 1 – Turm nach Sanierungsmaßnahme. Fotos: Mario Todorčić (a-c), Autor (d)

Im Allgemeinen ist zu beobachten, dass die Schäden im Dachboden entweder sehr gering oder sehr hoch ausfielen. Schäden der Stufe 2 sind nur vereinzelt aufzufinden. Die hohen Schäden lassen auf strukturelle Ähnlichkeiten von Schornsteinen oder Giebelwänden auf der einen Seite schließen, wie beispielsweise eine fehlende Verankerung mit dem Gebäude oder generell eine seismisch anfällige Konstruktionsweise. Auf der anderen Seite finden sich gegenteilig dazu ebenso gut verankerte und nicht erdbebenanfällig konstruierte nichttragende Elemente, welche den horizontalen Einwirkungen standhielten, wie beispielsweise Giebelmauern in benachbarten Dachböden etc.

Anhand der Auswertung der anteiligen Schadensverteilung ist ersichtlich, dass nichttragende Elemente, wie dekorative Türme, Attika etc., hochempfindliche Elemente darstellen können. Außerdem zeigen die schweren Schäden an und durch nichttragende Elemente eine hohe Personen- und Sachgefährdung. Das Herabfallen von Rauchfängen oder Fassadenteilen auf öffentliche Verkehrsflächen kann zu schweren Personenverletzungen und im schlimmsten Fall zu Verlust von Menschenleben führen. Wie eingangs bereits erläutert, ereignete sich das verheerende Erdbeben in Zagreb im Frühjahr 2020 am Beginn der COVID-19-Pandemie und an einem frühen Sonntagmorgen, so dass sich glücklicherweise beinahe keine Menschen auf den Straßen sowie in öffentlichen Gebäuden aufhielten, wodurch höherer Personenschaden ausblieb.

5.7 Diskussion

Die Schadensgradverteilung der ausgewerteten Erdbebenschäden über den einzelnen Gebäudebereichen kann Abbildung 44 entnommen werden. Die Auswertung der Erdbebenschäden an den 35 begutachteten gemauerten Altbauten in Zagreb wird im Folgenden zusammenfassend diskutiert.

Zum einen wird deutlich, dass die nichttragenden Elemente im Dachboden bzw. über dem Dachniveau die erdbebenempfindlichsten Strukturen darstellen, diese wiesen den höchsten anteiligen Prozentsatz sehr starker Schäden (S4) auf. Die Schäden waren durch Verbundversagen, gerissene Ziegelsteine sowie durch teilweise bis komplett zerstörte Bauelemente gekennzeichnet. Durch die statistische Auswertung der Erdbebenschadensdaten wurde festgestellt, dass bei etwa 57% der Objekte die Rauchfänge oder freistehenden Giebelwänden sehr starke Schäden durch das Erdbeben erlitten. Weiters zeigten dekorative Elemente, wie Attikaausbildungen, Gesimse, Türme etc., eine hohe Schadensdichte sehr starker Schäden S4 mit etwa 34 % der untersuchten Objekte auf. Dies lässt auf eine nicht sonderlich erdbebenresistente Bauweise sowie eine mangelnde Instandhaltung über den vergangenen Jahrzehnten schließen. In Folge der hohen Anfälligkeit wurden durch das Herabfallen der massiv gemauerten Bauelemente hoher Schaden an der Dachhaut sowie an benachbarten Gebäuden verursacht. Ein Durchbrechen der Dachbodendecke wurde bei den begutachteten Häusern nicht beobachtet, die tragenden Dachkonstruktionen wurden in der Regel überwiegend durch Folgeschäden beschädigt.

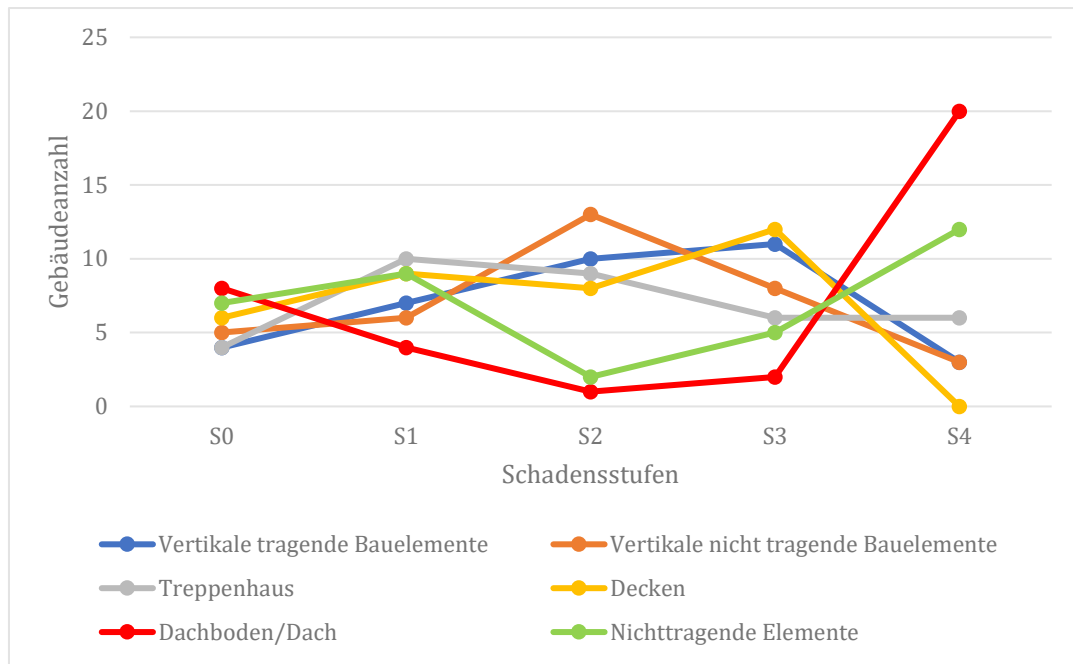


Abbildung 44: Anteilige Schadensgradverteilung über den einzelnen Gebäudebereichen [75]. *Abb.: Autor*

Die grundsätzliche Anfälligkeit nichttragender Elemente gegenüber seismischen Einwirkungen kann kostengünstig durch eine vorausschauende und qualitativ hochwertige Instandhaltung verhindert werden. Dies bedarf einer Planung, welche sich mit dem aktuellen Zustand der Bauteile auseinandersetzt und notwendige Schritte zu einer erdbebenresistenten Ertüchtigung einleitet.

Eine weitere Erkenntnis wird daraus gewonnen, dass das Zagreber Erdbeben keine sehr schweren Schäden an den hölzernen Deckensystemen verursachte. Die eingetretenen Deckenschäden lassen auf eine flexible Tragwerksantwort unter den auftretenden Einwirkungen schließen. Diesem Umstand geschuldet wird andererseits keine hinsichtlich der Erdbebensicherheit günstige Scheibenwirkung bzw. der Aktivierung einer schachtelartigen Konstruktion hervorgerufen. Trotz ihrer schubweichen Tragwerksantworten haben die Deckensysteme das Erdbeben am 22. März gut überstanden [10].

Die Abbildung 44 zeigt eine moderate Schadensgradverteilung über den Treppenhäusern, den tragenden sowie den nichttragenden Wänden. Die Erdbebenschäden konzentrieren sich vor allem in Anschlussbereichen sowie in Bereichen von Mauerwerksschwächungen, wie Tür- oder Fensteröffnungen. Vereinzelt konnten auch Schubrisse und Risse durch hohe Biegebeanspruchung aus der Wandebene festgestellt werden. Das Treppenhaus weist einen markant hohen Schadensgrad (S4) auf. Mit Ausnahme der Schäden an Stufen und Podesten folgen die Schadensmuster in den tragenden und nichttragenden Mauerwerkswänden einem ähnlichen Trend.

5.8 Diskussion – kritische Gebäudecharakteristika

Um qualitative Sanierungs- und Ertüchtigungsmaßnahmen setzen zu können, ist das Wissen über das dynamische Tragwerksverhalten von grundlegender Bedeutung. Der gemauerte Altbau fordert aufgrund seiner charakteristischen Bauweise eine hochkomplexe Betrachtungsweise im Lastfall Erdbeben. Nicht eingefasstes und unbewehrtes Mauerwerk ist für Objekte mit mehreren Obergeschossen in Bezug auf die Stand- sowie Erdbebensicherheit kritisch zu bewerten [38].

Die Grundriss- sowie Aufrissgestaltung der gemauerten Altbauten stellt einen wichtigen Aspekt dar. Ebenso sind sprunghafte Steifigkeitsänderungen lastabtragender Bauelemente als kritisch einzustufen. Zur damaligen Bauzeit wurde der Lastfall Erdbeben in der konstruktiven Auslegung nicht berücksichtigt, was mangelhafte, nicht erdbebengerechte Ausführungsformen zur Folge hatte. Ebenso wurden über die Jahrzehnte unzählige Umbauarbeiten ohne statische Berechnung durchgeführt. Solche Umbauarbeiten betreffen häufig das Entfernen von nichttragenden Zwischenwänden, Erweiterungen von Wanddurchbrüchen usw. Im Zuge dessen wurden an belebten Straßen die Erdgeschosse oftmals aufgelöst, um genügend Platz für Geschäfte und Lokale zu schaffen. In den überwiegenden Fällen ermöglichen die Umbaumaßnahmen die vertikale Lastableitung. Auf der anderen Seite leisten die überwiegend unsachgemäßen Maßnahmen, wie beispielsweise das Einziehen eines Stahlträgers, jedoch keinen wesentlichen Beitrag zur horizontalen Lastabtragung und stellen im Lastfall Erdbeben eine Strukturschwächung dar. Die getätigten Umbauten mit deutlicher Abminderung der Schubflächen über die Jahrzehnte stellen somit überwiegend eine wesentliche Schwächung der Standsicherheit dar [10].

Exemplarisch wird ein solcher Umbau an dem Objekt 29 aufgezeigt. Abbildung 45 zeigt den Grundriss des Gebäudes aus dem Jahr 1866. Die rot markierten Wände wurden im Zuge von Umbauarbeiten im Jahre 1960 entfernt und durch einfache Träger ersetzt. Dies führte zu einer Änderung der horizontalen Steifigkeit. Solche unsachgemäßen Umbauarbeiten können einen negativen Einfluss auf des lokalen Tragwerksverhaltens unter seismischer Beanspruchung hervorrufen. Ebenso zeigten die hohen Erdbebenschäden an den tragenden Wänden, den Treppenhaus und dem Dachboden des Objektes 29, dass ein möglicher negativer Einfluss auf das Tragverhalten durch die durchgeführten Umbaumaßnahmen resultierte.

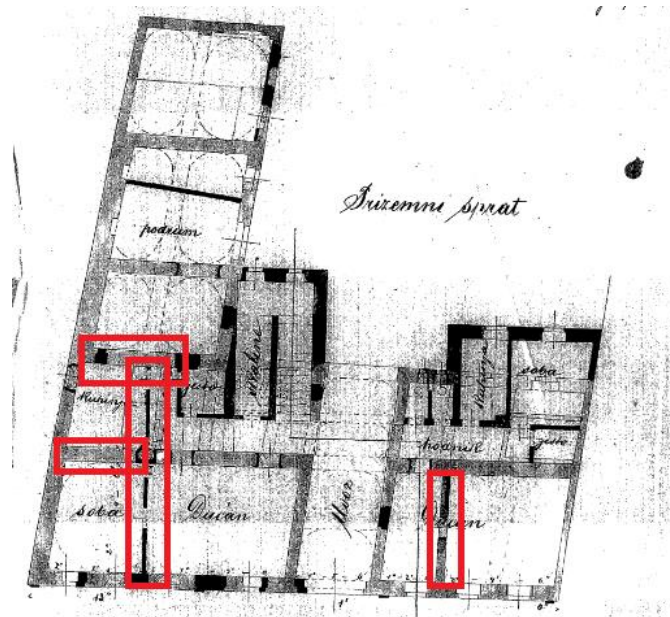


Abbildung 45: Fallbeispiel – unsachgemäße Umbauarbeiten am Objekt 29.

Zusammenfassend stellt der niedrige Anteil an Scherflächen (Schubwänden), der durch unsachgemäße Umbauarbeiten über den Jahrzehnten noch einmal deutlich reduziert wurde, einen kritischen Punkt in der Gebäudestruktur dar. Der Anteil der Scherfläche pro Geschoss hat einen großen Einfluss auf die Abtragung von den erdbebeninduzierten Kräften. Bei neueren Gebäuden mit drei bis sechs Obergeschossen beträgt der Anteil der Scherflächen in der Regel etwa 6 % bis 10 % der Geschossfläche, bei Kellergeschossen sogar etwas mehr. Die gründerzeitlichen Altbauten weisen in Gebäudequerrichtung eine Scherfläche von unter 3 % und durch unsachgemäße Umbauarbeiten oft noch weniger auf [10]. Dies führt dazu, dass die horizontalen Kräfte die vorhandenen Schubwände sehr stark beanspruchen und es zu Überschreitungen der Schubfestigkeiten, in weiterer Folge zu lokalen Materialversagen, kommen kann.

5.8.1 Zustand des Mauerwerks

Die beiden wesentlichen Faktoren hinsichtlich Qualität eines historischen Mauerwerks stellen die Komponenten Ziegel und Mörtel dar [38]. Die Qualität des Ziegels wird lt. Untersuchungen in Zagreber Altbauten meist als ausreichend eingestuft. Der Mörtel definiert mit seiner über die Jahre abgeminderten Qualität hingegen den kritischen Bestandteil des Mauerwerks. Die abmindernde Qualität äußert sich in einer reduzierten Haft- und in weiterer Folge in mangelnder Scherfestigkeit der einzelnen Schubwände. Im Falle eines Erdbebens führen diese über die Jahre abgeminderten Materialeigenschaften zu einer früheren Beschädigung der Wände und zur Bildung von Rissen [10]. So wird die Erdbebensicherheit des gemauerten Altbaus maßgeblich durch den Mauerwerkszustand und die Anordnung sowie Anzahl durchgehender Wände

beeinflusst. Vor allem stellen die Verzahnung bzw. der Mauerwerksverbund der Anschlussbereiche einen wichtigen Bereich dar [75].

5.8.2 Mauerwerkswände

Die Anzahl sowie die regelmäßige Anordnung von aussteifenden Wänden stellt einen wichtigen Punkt in der Erdbebenthematik des gemauerten Altbaubestands dar. Nach der aktuell gültigen kroatischen Norm HRN EN 1996-3:2012 beträgt der maximale Abstand zwischen zwei aussteifenden, unbewehrten Mauerwerkswänden im Neubau 7 Meter. In einigen beschädigten Gründerzeithäusern konnten größere Abstände der nichttragenden Zwischenwände vorgefunden werden [38]. Diese Gegebenheiten führen zu einer deutlichen Reduktion der horizontalen Tragfähigkeit. Ebenso erhöht die teilweise geringe Verzahnung bzw. Rückverankerung der Längswände mit den Zwischenwänden die Gefahr des out-of-plane Versagen ebendieser.

Einen weiteren wichtigen Aspekt stellt die geringe Normalbelastung der nichttragenden Wände (nur Wandeigengewicht) dar, die einen direkten Einfluss auf die mögliche Übertragung von Schubkräften besitzt. Wie im Kapitel 3.3.2 vorgestellt, wurden bei tragenden Mauerwerkswänden mit mehreren Obergeschossen die Mauerwerksstärken schrittweise zum Dachboden abgestuft. Mit der Abstufung der Mauerwerksstärken folgt ebenso die Reduzierung der Schubwiderstände. Aufgrund der geringeren Mauerwerksstärken besitzen die Wände in den oberen Geschossen weniger Auflast und gleichzeitig weniger Schubfläche. Im Falle eines Erdbebens macht sich die kleinere Auflast sowie Wandfläche zeitgleich mit einer höheren Beanspruchung bemerkbar, besonders im Falle ansonsten gleichbleibender Gebäudeparameter. Aus diesem Gründen sind die Wände sowie die Stürze in oberen Geschossen anfälliger Strukturen, was auch durch die Zunahme der Erdbebenschäden in höheren Geschossen veranschaulicht wurde [10]. Weiters stellen die gemauerten Längswände regelmäßig durchlöchernde Mauerwerkswände dar. Die regelmäßigen Wandstörungen führen dazu, dass diese Wände mehreren durch Riegeln miteinander verbundenen Mauerwerkspfählen entsprechen und damit eine deutliche Schwächung des horizontalen Wandwiderstandes im Vergleich zu durchgängigen Mauern einhergeht [10].

Eine mögliche Lösung zur Erhöhung der Erdbebensicherheit der vertikalen tragenden und nichttragenden Wände sowie des Treppenhauses wäre eine bessere Verzahnung der orthogonalen Wände. Dies kann durch Verankerungen der Anschlussbereiche sowie in den Ecken der Wände erreicht werden [77]. Außerdem kann eine bessere Interaktion der Wände durch den Einbau von schubstärkeren Decken, wie Ortbetonverbunddecken [78], erreicht werden. Als Alternative stellt der Einbau von Schubrahmen oder Schubwänden eine Möglichkeit zur Steigerung der Steifigkeit und Standsicherheit dar. Durch die vorgestellten Maßnahmen könnte eine höhere Erdbebensicherheit erreicht werden.

5.8.3 Dachboden

Der höchste Anteil sehr starker Schäden konnte den Elementen über dem Dachbodenniveau zugeschrieben werden. Die Rauchfänge sowie Giebelwände wurden aus Ziegelsteinen und Mörtel errichtet und stellen überwiegend unverputzte Bauelemente dar. Dadurch waren sie den Witterungseinflüssen über einen großen Zeitraum direkt ausgesetzt, was eine Verwitterung des Materials mitsamt Qualitätsverlust zur Folge hat. Außerdem besitzen sowohl die Rauchfänge als auch die Giebelwände keine nennenswerte horizontale Rückverankerungen. Diese Bauweise ist nicht erdbebengerecht konzipiert und führt dazu, dass die Rauchfänge hohe, massive freistehende Bauelemente über dem Dach darstellen. Aufgrund der charakteristischen Schwingungsverstärkungen im Dachboden kommt es zu hohen dynamischen Beanspruchungen im und über dem Dachboden [75]. Es konnten drei unterschiedliche typische Schadensstellen bei Schornsteinen identifiziert werden. Die Schadensmechanismen konzentrieren sich vor allem auf Bereiche der Reinigungsöffnungen, in Ebene der Dachhaut und über der Dachhaut. In der Dachebene kommt es vermehrt zu Beschädigungen auf Grund der Wechselwirkung der Schwingungsantworten zwischen der Dachhaut und den Rauchfängen [38].

Ebenso wie Schornsteine zeigen Giebelwände oftmals keine nennenswerte Rückverankerung und stellen freistehende schlanke Mauerwerkswände dar. Der Anschluss an die Dachkonstruktion stellt in der Regel eine einfache Anlehnung oder eine teilweise Einmauerung der First- und Mittelpfette des Dachstuhls in die Giebelwände dar. Einem solchen Anschluss kann nur ein geringes elastisches Halten der Giebelwand aus der Ebene zugeschrieben werden [54].

5.8.4 Decken

Im gründerzeitlichen Altbaubestand überwiegen hölzerne Deckenkonstruktionen in den oberirdischen Geschossen. Der Einfluss der flexiblen Deckensysteme auf die Gebäudestabilität stellt einen noch zu erforschenden Bereich dar. Die hölzernen Tramdecken stellen unidirektionale Systeme dar, bei denen die einzelnen Träme in die lastableitenden Längswände eingemauert sind. Eine kraftschlüssige Verbindung erfolgt lediglich über die eingesetzten Schließen, die traditionell in jeden dritten oder vierten Balken gesetzt wurden. In einigen Fällen konnte auch das komplette Fehlen von Schließen festgestellt werden. Diese Verbindung der Holzbalken mit dem Mauerwerk stellt sich, selbst wenn vorhanden, häufig als unzureichend heraus, was deutlich anhand der Erdbebenschäden an den Anschlussbereichen bestätigt werden konnte. Auf Grund dieser unzureichenden Kopplung zwischen den Wänden und der Decke sowie der Schubweichheit der Decke wird die Wahrscheinlichkeit des Versagens der Wände aus der Ebene erhöht [75].

Bei den untersuchten Gebäuden konnte ein teilweises Herausziehen einzelner Balken aus ihren Auflagern festgestellt werden, jedoch kam es zu keiner vollständigen Entkopplung. Der

überwiegende Schäden an den hölzernen Deckensystem konzentrierte sich vor allem an den Deckenuntersichten in Form von Rissen und Abplatzungen des Deckenputzes. Strukturelle Schäden konnten nicht erfasst werden. Aufgrund der flexiblen Tragwerksantworten führten die unterschiedlichen Schwingungsantworten der einzelnen Holzbalken zu Putzschäden. Die beobachteten Strukturantworten beeinträchtigen zwar grundsätzlich nicht die Tragfähigkeit der Decke, können durch herabfallende Putze jedoch durchaus eine Personengefährdung darstellen [10].

6 Zusammenfassung

Erdbeben definieren außergewöhnliche Ereignisse und stellen die Standsicherheit eines jeden Gebäudes auf die Probe. Dabei können seismische Einwirkungen Schäden bis zur vollständigen Zerstörung hervorrufen. Besonders anfällig sind hierbei Gebäude, welche in einer Zeit ohne erdbebentechnische Richtlinien und Normen errichtet wurden. Von diesen kann im Falle eines Bebens besonders hohe Personen- und Sachgefährdung ausgehen.

In dieser Arbeit wird eine seismische Bestandsanalyse nach dem schweren Erdbeben vom 22. März 2020 in Zagreb, Kroatien vorgestellt. Der historische Altbestand, vor allem in der Innenstadt Zagrebs, wies mit Abstand die höchste Schadensdichte nach dem Erdbebenereignis auf und stellt den Schwerpunkt der Erdbebenschadensanalyse dieser Arbeit dar. Die detaillierte Auswertung der Erdbebenschäden erfolgte an einem innerstädtischen Häuserblock mit 35 Gründerzeithäusern. In einer groß angelegten Dokumentation wurde unter anderem an diesem Gebäudeblock kurz nach dem Ereignis eine detaillierte Begutachtung und Schadensklassifizierung vorgenommen.

Die charakteristische gründerzeitliche Bauweise ist durch massiv gemauerte Längswände, schlanke nichttragende Zwischenwände sowie vorwiegend hölzerne Deckenkonstruktionen gekennzeichnet. Der gemauerte Altbestand aus Zagreb stammt aus der Epoche der Österreichisch-Ungarischen Monarchie und ist aufgrund der gemeinsamen Geschichte mit der Wiener Gründerzeitbebauung vergleichbar. Aufgrund der identischen Bauweise stellen die gewonnenen Erkenntnisse dieser Arbeit ebenso einen bedeutenden Mehrwert für die gründerzeitliche Bebauung der Stadt Wien dar. Die Analyse der Erbebenschäden hat gezeigt, dass unterschiedliche Tragwerksantworten sowie Schadensgrade einzelner Gebäudebereich bzw. Bauelemente zu erwarten sind. Besonders stark waren die Schäden an Bauelementen über Dachbodenniveau. Dies liegt vor allem an der Konstruktionsweise der gemauerten Rauchfänge, Giebelwände, dekorativen Bauelemente etc., wobei fehlende Verankerungen bzw. Verbindungen sowie ein langjähriger Witterungseinfluss eine große Rolle spielen. Die tragenden und nichttragenden Mauerwerkswänden zeigten eine moderate Schadensverteilung, wobei die

kritischen Gebäudebereiche vor allem bei den Anschlussbereichen (Wand-Wand/-Decke) sowie Mauerwerksöffnungen liegen. Weiters zeigte die Schadensanalyse, dass die häufig ausgeführten Holzdecken keine strukturellen Schäden erfuhren, jedoch ihre flexible sowie unzureichende Verankerung mit den Mauerwerkswänden bestätigt werden konnte.

Literaturverzeichnis

- [1] J. Atalić, M. Uroš, M. Šavor Novak, M. Demšić und M. Nastev, „The Mw 5.4 Zagreb (Croatia) earthquake of March 22, 2020: impacts and response,“ *Bulletin of Earthquake Engineering*, Bd. 19, pp. 3461-3489, 2021.
- [2] S. Markušić, D. Stanko, D. Penava, I. Ivančić, O. Bjelotomić Oršulić, T. Korbar und V. Sarhosis, „Destructive M6.2 Petrinja Earthquake (Croatia) in 2020-Preliminary Multidisciplinary Research,“ MDPI, Basel, 2021.
- [3] Kroatisches Staatliches Institut für Statistik, „Popis stanovništva 2021 - Volkszählung 2021,“ 2021. [Online]. Available: <https://popis2021.hr/index.html>. [Zugriff am 08 25 2022].
- [4] Vlada Republike Hrvatske [Regierung der Republik Kroatien], *Procjena rizika od katastrofa za Republiku Hrvatsku [Schätzung des Katastrophenrisikos für Republik Kroatien]*, Zagreb: Vlada Republike Hrvatske [Regierung der Republik Kroatien], 2019.
- [5] I. Dasović, D. Herak, M. Herak, H. Latečki, M. Mustać und B. Tomljenović, „O potresima u Hrvatskoj [Über Erdbeben in Kroatien],“ *Vijesti Hrvatskoga geološkog društva*, Bd. XLVIII, Nr. 57/1, pp. 4-26, Juni 2020.
- [6] Incorporated Research Institutions for Seismology, „How Often Do Earthquakes Occur?,“ Incorporated Research Institutions for Seismology, [Online]. Available: https://www.iris.edu/hq/inclass/fact-sheet/how_often_do_earthquakes_occur. [Zugriff am 07 Januar 2022].
- [7] Grünthal, G. (ed.), Musson, R. M. W., Schwarz, J., Stucchi, M. (assoc. ed.) (1998): European Macroseismic Scale 1998 (EMS-98). Cahiers du Centre Européen de Géodynamique et de Séismologie, Vol. 15, Centre Européen de Géodynamique et de Séismologie, Luxembourg, 99 p. <https://doi.org/10.2312/ems-98.full.en>
- [8] Hrvatska enciklopedija, „Mohorovičić Andrija,“ Leksikografski zavod Miroslav Krleža, 2021. [Online]. Available: <http://www.enciklopedija.hr/Natuknica.aspx?ID=41535>. [Zugriff am 07 Januar 2022].
- [9] ZAMG - Zentralanstalt für Meteorologie und Geophysik, „Vor 50 Jahren: Das Skopje-Erdbeben in Mazedonien,“ ZAMG, 06 07 2013. [Online]. Available: <https://www.zamg.ac.at/cms/de/geophysik/news/vor-50-jahren-das-skopje-erdbeben-in-mazedonien>. [Zugriff am 29 01 2022].
- [10] Universität Zagreb - Fakultät für Bauingenieurwesen, Potresno inženjerstvo - Obnova zidanih zgrada, Zagreb: Universität Zagreb - Fakultät für Bauingenieurwesen, 2021.
- [11] C. Sinadinovski und K. McCue, „50 YEARS SINCE THE SKOPJE 1963 EARTHQUAKE – IMPLICATIONS FOR AUSTRALIAN BUILDING STANDARDS,“ Australian Earthquake Engineering Society, Hobart, Tasmania, 2013.
- [12] M. Uroš, M. Šavor Novak, J. Atalić, Z. Sigmund, M. Baniček, M. Demšić und S. Hak, „Post-earthquake damage assessment of buildings – procedure for conducting building inspections,“ *GRAĐEVINAR*, Bd. 72, Nr. (2020) 12, pp. 1089-1115, 2021.
- [13] Stadt Zagreb; Hrvatski centar za potresno inženjerstvo; Ured za upravljanje u hitnim situacijama, „Grad Zagreb,“ 03 2021. [Online]. Available: <https://www.zagreb.hr/UserDocsImages/gu%20za%20strategijsko%20planiranje/sek>

- tor%20za%20strategijske%20informacije%20i%20istra%C5%BEivanja/Potres%20Zagreb%202020.pdf. [Zugriff am 22 10 2021].
- [14] Lexikografisches Institut Miroslav Krleža, „croatia.eu - land und leute,“ [Online]. Available: <https://croatia.eu/index.php?view=article&id=21&lang=3>. [Zugriff am 08 Januar 2022].
- [15] Österreichische Mediathek, „Der erste Weltkrieg,“ Technisches Museum mit Österreichischer Mediathek, 2022. [Online]. Available: <https://www.mediathek.at/der-erste-weltkrieg/der-erste-weltkrieg-ausgabe-6/der-zerfall-der-habsburgermonarchie/der-zerfall-der-monarchie/>. [Zugriff am 08 Januar 2022].
- [16] G. Achs, *Erdbebengefährdung von Gründerzeithäusern*, Wien, 2011.
- [17] J. Weber, M. Vrabec, P. Pavlovčić-Prešeren, T. Dixon, Y. Jian und B. Stopar, „GPS-derived motion of the Adriatic microplate from Istria Peninsula and Po Plain,“ *Tectonophysics*, Nr. 483, pp. 214-222, 2009.
- [18] D. Herak, M. Herak und B. Tomljenović, „Seismicity and earthquake focal mechanisms in North-Western Croatia,“ *Tectonophysics*, Bd. 465, Nr. 1-4, pp. 212-220, 2009.
- [19] U.S. Geological Survey, „The severity of an Earthquake,“ 05 November 2021. [Online]. Available: <https://pubs.usgs.gov/gip/earthq4/severitygip.html>. [Zugriff am 08 26 2022].
- [20] V. Simović, „Potresi na zagrebačkom području [Erdbeben im Raum Zagreb],“ *Journal of the Croatian Association of Civil Engineers*, Bd. 52, Nr. 11, pp. 637-345, 2000.
- [21] D. Tesketar, D. Vadjla, K. Gobo und K. Fio Firi, „Veliki potres u Zagrebu 1880. godine,“ *Vijesti Hrvatskog Geološkog Društva*, Nr. 57/1, pp. 48-50, 2020.
- [22] J. Torbar, „Izvjješće o zagrebačkom potresu 9. studenog 1880. [Bericht über den Zagreber Erdbeben am 9. November 1880],“ *Jugoslavische Akademie der Wissenschaften und Künste, Zagreb*, 1882.
- [23] M. Šavor Novak, M. Uroš, J. Atalić, M. Herak, M. Demšič, M. Baniček, D. Lazarević, N. Bijelić, M. Crnogorac und M. Todorčić, „Potres u Zagrebu od 22. ožujka 2020. - preliminarni izvještaj o seizmološkim istraživanjima i oštećenjima zgrada [Erdbeben in Zagreb am 22. März 2020 - vorläufiger Bericht],“ *Građevinar*, Bd. 72, Nr. 10, pp. 843-867, 2020.
- [24] „Erdbeben in Agram,“ *Agramer Lloyd*, p. 1, 20 01 1901.
- [25] V. Kuk, E. Prelogović, I. Sović, K. Kuk und K. Šariri, „Seizmološke i seismotektonske značajke šireg zagrebačkog područja [Seismologische und seismotektonische Eigenschaften der weiteren Umgebung von Zagreb],“ *Građevinar*, Bd. 52, Nr. 11, pp. 647-653, 2000.
- [26] „Potres u Zagrebu,“ *Virovitičan*, pp. 1-2, 14 01 1906.
- [27] „Vrlo jak potres u Petrinji,“ *Banovac*, p. 1, 09 10 1909.
- [28] S. Markušić, D. Herak, I. Sović und M. Herak, „Seismicity of Croatia in the period 1990-1992,“ *Geofizika*, Bd. 10, pp. 19-34, 1993.
- [29] S. Škreb, „50 obljetnica velikog zagrebačkog potresa (9. XI 1880.) [50. Jubiläum des großen Zagreber Erdbeben (9. XI 1880.)],“ *Priroda*, Nr. 9-10, pp. 235-239, 1930.
- [30] Die Regierung der Republik Kroatien, „Croatia Earthquake Rapid Damage and Needs Assessment,“ 2020. [Online]. Available: <https://documents1.worldbank.org/curated/en/311901608097332728/pdf/Croatia-Earthquake-Rapid-Damage-and-Needs-Assessment-2020.pdf>. [Zugriff am 16 10 2021].
- [31] S. A., „Index.hr,“ *Index.hr*, 23 03 2020. [Online]. Available: <https://www.index.hr/vijesti/clanak/tinejdzerica-stradala-u-potresu-i-dalje-je-kriticno-u-potresu-ozlijedjeno-27-ljudi/2167911.aspx>. [Zugriff am 16 10 2021].
- [32] Geofizički odsjek - Prirodoslovno matematički fakultet Zagreb, „Prirodoslovno matematički fakultet Zagreb,“ 2020. [Online]. [Zugriff am 7. Mai 2021].

- [33] Bundesverband Geothermie, „Omoris-Gesetz,“ [Online]. Available: <https://www.geothermie.de/bibliothek/lexikon-der-geothermie/o/omoris-gesetz.html>. [Zugriff am 02 07 2022].
- [34] S. Prevolnik, S. Markušić und I. Ivančić, „Croatian Conference on Earthquake Engineering,“ 22-24 03 2021. [Online]. Available: https://www.bib.irb.hr/1119523/download/1119523.CroCEE-Extended_abstract_Prevolnik_et_al.pdf. [Zugriff am 08 09 2021].
- [35] KBC Zagreb [Klinisches Krankenhauszentrum Zagreb], „Klinika za ortopediju [Klinik für Orthopädie],“ 2022. [Online]. Available: <https://www.kbc-zagreb.hr/klinika-za-ortopediju.aspx>. [Zugriff am 05 Juli 2022].
- [36] Welt Bank, „Potres u Hrvatskoj 2020. - brza procjena oštećenja i potreba,“ *Građevinar*, pp. 967-972, 2020.
- [37] H. Werkle und F. Zahn, „Bauwerksschäden infolge des Erdbebens in Yogyakarta, Java, am 27. Mai 2006,“ *Bautechnik*, Bd. 11, Nr. 85, pp. 740-747, 2008.
- [38] Fakultät für Bauwesen Zagreb, Potresno inženjerstvo - Obnova zidanih zgrada, Drückerei Zelina, 2021.
- [39] M. Crnogorac, „Izvorni i stečeni nedostaci konstrukcija zgrada,“ in *Potresno inženjerstvo - Obnova zidanih zgrada*, Zagreb, Fakultät für Bauingenieurwesen Zagreb, 2021, pp. 219-243.
- [40] D. Kahle, »Građevinski propisi, razdoblje od 1850. do 1918. godine, utemeljiteljsko razdoblje, Zagreb [Building Code, period between 1850 and 1918, Gründerzeit, Zagreb],« *Prostor*, svez. 2, br. 28, pp. 203-214, 2005.
- [41] W. A. Lenhardt, „Entwicklung der Erdbebennorm,“ Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik, [Online]. Available: <https://www.zamg.ac.at/cms/de/geophysik/erdbeben/erdbeben-in-oesterreich/entwicklung-der-erdbebennorm>. [Zugriff am 03 03 2022].
- [42] Wirtschaftsministerium Baden-Württemberg, „Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft Baden-Württemberg,“ 2008. [Online]. Available: https://um.baden-wuerttemberg.de/fileadmin/redaktion/m-um/intern/Dateien/Dokumente/2_Presse_und_Service/Publikationen/Umwelt/Erdbeb_ensicher_Bauen.pdf. [Zugriff am 10 09 2021].
- [43] M. Zamolo, „Propisi i novi zakonski okvir za obnovu,“ in *Potresno inženjerstvo - Obnova zidanih zgrada*, Zagreb, Fakultät für Bauingenieurwesen Zagreb, 2021, pp. 125-147.
- [44] D. Kahle, „Građevni i urbanistički propisi u Hrvatskoj od 1956. do 1971. godine,“ *Časopis za suvremenu povijest*, Bd. 53, Nr. 3, 2021.
- [45] Sozialistische Föderative Republik Jugoslawien, *Pravilnik o privremenim tehničkim propisima za građenje u seizmičkim područjima (Verordnung über technische Übergangsbestimmungen für das Bauen in Erdbebengebieten)*, Beograd: Sozialistische Föderative Republik Jugoslawien, 1964.
- [46] Europäische Kommission - Joint Research Centre, „About the Eurocodes - Time Line,“ [Online]. Available: <https://eurocodes.jrc.ec.europa.eu/showpage.php?id=12>. [Zugriff am 04 03 2022].
- [47] Austrian Standards, „Stand der Implementierung von Eurocodes in Austria,“ 03 2016. [Online]. Available: https://www.austrian-standards.at/dokumente/Themengebiete/Bau%20%26%20Immobilien/Stand_Implementierung_Eurocodes_Austria_2016-03.pdf. [Zugriff am 04 03 2022].
- [48] Ministerium für Bau und Raumplanung, „Tehnički propis za građevinske konstrukcije - Technische Vorschrift für Baukonstruktionen,“ 2017. [Online]. Available: https://narodne-novine.nn.hr/clanci/sluzbeni/2017_02_17_403.html. [Zugriff am 04 03 2022].

- [49] L. Dobrović, Graditelji i izgradnja Zagreba u doba historijskih stilova : sabrani članci i rasprave - Bauherren und der Bau von Zagreb im Zeitalter der historischen Stile: Gesammelte Artikel und Diskussionen, Zagreb: Gesellschaft kroatischer Kunsthistoriker, 1983.
- [50] A. Kolbitsch, Erhaltung und Erneuerung von Hochbauten, Wien: TU Verlag, 2019.
- [51] A. Kolbitsch, Altbaukonstruktionen - Charakteristika, Rechenwerte, Sanierungsansätze, Wien: Springer-Verlag Wien New York, 1989.
- [52] C. Riccabona, Baukonstruktionslehre: Rohbauarbeiten, Wien: Manz Verlag, 2004.
- [53] F. Titscher, Die Baukunde, Wien: Titscher, 1918.
- [54] M. Crnogorac, M. Todorić, M. Uroš und J. Atalić, „Fakultät für Bauwesen Zagreb,“ März 2020. [Online]. Available: https://www.grad.unizg.hr/_download/repository/UPPO_Prirucnik_GF_HKIG.pdf. [Zugriff am 10 09 2021].
- [55] A. Pech, A. Kolbitsch und F. Zach, Decken, Wien: Birkhäuser Verlag GmbH, Basel, 2021.
- [56] G. Giebeler und R. Fisch, Atlas Sanierung: Instandhaltung, Umbau, Ergänzung, Basel - Boston - Berlin: Birkhäuser Verlag AG, 2008.
- [57] A. Pech und K. Hollinsky, Dachstühle, Wien, Österreich: Birkhäuser Verlag GmbH, Basel, 2017.
- [58] Baunetz Wissen, „Baunetz Wissen - Geschichte des Holzbaus,“ [Online]. Available: <https://www.baunetzwissen.de/holz/fachwissen/einfuehrung/geschichte-des-holzbaus-6640622>. [Zugriff am 23 03 2022].
- [59] Österreichischer Ingenieur- und Architektenverein, Normalien des ÖIAV: Bestimmungen für die Belastung von Baukonstruktionen und Beanspruchung von Baumaterialien, Wien, 1902.
- [60] ÖNORM EN 338:2016 - *Bauholz für tragende Zwecke - Festigkeitsklassen*, Wien: Österreichisches Normungsinstitut, 2016.
- [61] HRN EN 338:2016 - *Konstruktivsko drvo - Razredi čvrstoće*, Zagreb: Hrvatski zavod za norme, 2016.
- [62] V. Rajčić und A. Bjelanović, „Razredba drvene građe - Bauholzklassifizierung (in Kroatisch),“ *Građevinar*, Bd. 10, Nr. 57, pp. 779-784, 2005.
- [63] E. Wasmuth, Bau-Polizei-Ordnung für den Stadtkreis Berlin, Berlin, 1887.
- [64] J. Krolo, D. Damjanović, I. Duvnjaki, M. Frančić Smrkić, M. Bartolac und J. Koščak, „Methods for determining mechanical properties of walls,“ *Građevinar*, Nr. 2, pp. 127-140, 2021.
- [65] ASTM International, Standard Test Methods for In Situ Measurements of Masonry Mortar Joint Shear Strength Index, 2016.
- [66] ÖNORM EN 772-1:2015, Wien: Österreichisches Normungsinstitut, 2015.
- [67] HRN EN 772-1:2015 - *Methods of test for masonry units - Part 1: Determination of compressive strength*, Zagreb: Hrvatski zavod za norme, 2015.
- [68] H. Daub, Hochbaukunde, Leipzig und Wien: F. Deuticke, 1905.
- [69] Deutsche-Schutzgebiete, „Königreich Kroatien und Slawonien,“ [Online]. Available: <https://deutsche-schutzgebiete.de/wordpress/projekte/oesterreich-ungarn/ungarn/kroatien/>. [Zugriff am 03 04 2022].
- [70] Židovski biografski leksikon, „Hönigberg, Lavoslav,“ [Online]. Available: <https://zbl.lzmk.hr/?p=454>. [Zugriff am 03 04 2022].
- [71] Institut za povijest umjetnosti - Institut für Kunstgeschichte, „Program cjelovite obnove jezgre grada Zagreba - Blok 19,“ [Online]. Available:

https://www.ipu.hr/content/knjige/Zagreb_Blok-19_Konzervatorski-model-obnove_IPU_2021_ISBN_9789537875954.pdf. [Zugriff am 03 04 2022].

- [72] D. Damjanović, „Herman Bollé i obnova građevina zagrebačkog Stolnog kaptola nakon potresa 1880. godine,“ *Radovi Instituta za povijest umjetnosti*, pp. 131-148, 2010.
- [73] J. Atalić, J. Krolo, D. Damjanović, M. Uroš, Z. Sigmund, M. Šavor Novak, S. Hak, L. Korlaet, J. Koščak, I. Duvnjak, M. Bartolac, M. Serdar, I. Dokoza, F. Prekupec, J. Oreb und B. Mušterić, „Studija za saniranje posljedica potresa, I-VII Faza,“ Fakultät für Bauingenieurwesen Zagreb, 2013-2019.
- [74] C. Baggio, A. Bernardini, R. Colozza, L. Corazza, M. Della Bella, G. Di Pasquale, M. Dolce, A. Goretti, A. Martinelli, G. Orsini, F. Papa und G. Zuccaro, „Fiel Manual for post-earthquake damage and safety assessment and short term countermeasures (AeDES),“ Office for Official Publications of the European Communities, Luxembourg, 2007.
- [75] A. Karić, J. Atalić, A. Kolbitsch und , „Seismic vulnerability of historic brick masonry buildings,“ *Bulletin of Earthquake Engineering*, Nr. 20, pp. 4117-4145, 2022.
- [76] G. Achs und C. Adam, „Assesment of the global dynamic behavior of a historic residential brick-masonry building in Vienna,“ in *Seismic system identification for life-time-prediction (SEISMID)*, 2012.
- [77] Fakultät für Bauingenieurwesen Zagreb, „Urgentni program potresne obnove (Dringendes Erdbeben-Wiederaufbauprogramm),“ Universität für Bauingenieurwesen Zagreb, Zagreb, 2020.