

Erfahrungsbasierte Bewertungskonzepte und Risikoanalysen – Erdbeben DIMEBRA-EB

Schlussbericht zum IGF-Forschungsvorhaben 17013 BR/1

Bearbeiter: Dr.-Ing. J. Schwarz (Projektleitung)
Dipl.-Ing. M. Leipold
Dipl.-Ing. T. Langhammer

Gefördert durch:



Bundesministerium
für Wirtschaft
und Technologie

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages



ALLIANZ
INDUSTRIE
FORSCHUNG



Bundesverband
Leichtbeton e.V.



EDAC

Earthquake Damage Analysis Center
Bauhaus-Universität Weimar

Schlussbericht

zu dem IGF-Vorhaben

**Digitales Mauerwerk:
Erfahrungsbasierte Bewertungskonzepte und Risikoanalysen –Erdbeben
DIMEBRA-EB**

der Forschungsstelle

Zentrum für die Ingenieuranalyse von Erdbebenschäden (EDAC)
Institut für konstruktiven Ingenieurbau, Professur Stahlbau
Bauhaus-Universität Weimar

Das IGF-Vorhaben 17013 BR/1 der Forschungsvereinigung Leichtbeton e.V. - FOV wurde über die



im Rahmen des Programms zur Förderung der Industriellen Gemeinschaftsforschung (IGF) vom



Bundesministerium
für Wirtschaft
und Energie

aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert.

Weimar, 29.06.2015

Dr.-Ing. Jochen Schwarz

Ort, Datum

Name und Unterschrift des/der Projektleiter(s)
an der/den Forschungsstelle(n)

AIF-Forschungsvorhaben Nr.: 17013 BR/1

Digitales Mauerwerk:

Erfahrungsbasierte Bewertungskonzepte und Risikoanalysen – Erdbeben DIMEBRA

durchgeführt am:

Zentrum für die Ingenieuranalyse von Erdbebenschäden
(Earthquake Damage Analysis Center, EDAC)
Bauhaus-Universität Weimar

Projektleiter: Dr.-Ing. Jochen Schwarz

	Seite
1 Zusammenfassung	6
2 Ergebnisse der Untersuchungen	8
2.1 Verifizierung Materialkennwerte (AP 1)	8
2.2 Repräsentative Bestandsgebäude (AP 2)	14
2.3 Analytische Untersuchungen (AP 3).....	22
2.4 DIMEBRA – Datenbasis (AP 4)	31
2.5 DIMEBRA – Berechnungshilfsmittel (AP 5).....	33
3 Ergebnisse der Untersuchungen und ihre normentaugliche Aufbereitung	36
3.1 Einordnung	36
3.2 Konstruktive Parameter für Einfache Mauerwerksbauten	36
3.2.1 Einordnung der Gebäude nach Schadensgrad und Untergrundklasse	36
3.2.2 Einordnung der Gebäude nach Schadensgrad und Schubwandfläche	37
3.2.3 Einordnung der Gebäude nach Schadensgrad und Schubwandfläche, Exzentrizität und Standortbedingungen.....	38
3.3 DIMEBRA-Client-Tool.....	38
3.4 Rechnerische Nachweise	42
3.5 Zusammenfassende Übersicht.....	44
4 Ergebnistransfer in die Wirtschaft	45
4.1 Umfang der bearbeiteten KMU-spezifischen Gebäude	45
4.2 Übernahme von aktuell projektierten Gebäuden	47
4.3 Newsletter.....	48
4.4 Vorträge und Publikationen	49
4.5 Gremien- und Normungstätigkeit.....	49
4.5.1 Teilnahme an der Projektgruppe Erdbeben der DGfM	49
4.5.2 DIN - Normungsausschuss (NA) 005-51-06 AA "Erdbeben; Sonderfragen"	50
4.6 Ziegelbauten	51
4.7 Erfahrungswerte von aktuellen Erdbeben (Nieder-Beerbach)	53
4.8 Weiterführung	54
4.9 Lehre	54
5 Nutzen und wirtschaftliche Bedeutung der Ergebnisse: Bauten und Bautätigkeit in deutschen Erdbebengebieten.....	55
6 Stand der Europäischen und Nationalen Baunormung	58
7 Literatur	61

Anlage A	66
Anlage A1:	Verwendete Materialparameter für die Gebäudesimulationen.....66
Anlage A2:	Konstruktive und Gebäudeparameter (zur Kennzeichnung der Qualität „einfacher Mauerwerksgebäude“) und beobachtete Schadensgrade 69
Anlage A2.1:	Aufgenommene konstruktive und Gebäudeparameter im DIMEBRA-Client-Tool70
Anlage A2.2:	Einordnung der Gebäude nach der Schubwandfläche und dem beobachteten Schadensgrad71
Anlage A3:	Schadensklassifikation bzw. zugrunde liegende Indikatoren78

1 Zusammenfassung

Diskussionen um die Nachweisführung bei Mauerwerksbauten haben in den letzten Jahren wesentlich die Normungsarbeit bestimmt; letztlich aber auch als Folge der Einführung europäischer Baubestimmungen dazu geführt, dass seitens der Mauerwerksindustrie verschiedene Untersuchungslinien initiiert wurden, um herkömmliches Mauerwerk unter den gestiegenen Anforderungen nachweisen zu können. Im Fokus standen vornehmlich Untersuchungen zur Charakteristik von einzelnen Wandelementen aus Mauerwerk unter zyklischer Beanspruchung. Diese experimentellen Laboruntersuchungen haben bis dato nicht den gewünschten Erfolg gebracht, den Widerspruch zwischen den Ergebnissen aus Berechnungen und dem tatsächlich beobachteten Verhalten des gesamten Bauwerks unter Erdbebeneinwirkungen plausibel zu beantworten.

In Zusammenarbeit mit der Forschungsvereinigung Leichtbeton e.V. sind auf der Basis der Schadensdaten des Albstadt-Erdbebens 1978 und der Aufnahme aktueller Bestandsdaten methodische Grundlagen für eine verhaltens- und erfahrungsbasierte Bewertung von typischen Mauerwerksbauten unter seismischer Einwirkung entwickelt worden. Verhaltens- und Schadensmechanismen, wie sie beispielsweise durch etwa 2200 Datensätze der vom Albstadt-Beben 1978 betroffenen Gebäude dokumentiert sind, werden mittels empirisch und analytisch untersucht; am Maßstab ihrer Reproduktionsfähigkeit kann die Leistungsfähigkeit der eingesetzten (norm-orientierten) Nachweismethoden gespiegelt werden.

DIMEBRA knüpft an Vorarbeiten an, die die Typisierung des Bauwerksbestandes nach Bauweise und Alter im direkten Einflussbereich und zum Zeitpunkt des Albstadt-Erdbebens zum Ziel hatten. Der Fokus liegt auf den in Bimsstein- bzw. Liapor-Mauerwerk errichteten Gebäuden, die aufgrund ihrer Steindruckfestigkeitsklasse normenseitig einschränkend behandelt werden; in Gänze aber die normativen Schutzziele (mit einem ausreichenden Sicherheitsabstand der Einwirkungen auch ohne gesonderte Erdbebenvorkehrungen) zu gewährleisten vermochten. Im Rahmen der fortführenden Untersuchungen wurden Gebäudepläne recherchiert, gesichert und in berechnungstaugliche CAD-Files überführt. Informationen zu den Baumaterialien und konstruktiven Merkmalen (z.B. Deckentypen, Wandflächen- und Öffnungsanteile) wurden in eine Datenbank integriert und mit der Schadensbeobachtung korreliert. geklärt werden. Bindeglied bildet die Einführung von Schadensgraden gemäß der EMS-98; ihre Definition bildet auch die Voraussetzung, um die Ergebnisse der Analysen mit dem beobachteten Verhalten abgleichen und Erfahrungswerte von anderen (und auch von künftigen) Ereignissen konsistent übernehmen zu können.

Aus den etwa 2200 Datensätzen werden zwei Gruppen betroffener Gebäude ausgewählt. Kriterien sind der aufgetretene Schaden („Negativliste“) bzw. der nach technischem Verständnis zu erwartende Schaden („Positivliste“). Motiviert ist diese Einteilung durch die Erwartung, dass konstruktive Gebäudemerkmale, welche die Verletzbarkeit gegenüber Erdbeben signifikant beeinflussen, im direkten Vergleich deutlicher hervortreten.

Die Ergebnisse der umfangreichen Parameterevaluierungen und Sensitivitäts- bzw. Varianzanalysen ermöglichen es, die Bewertungsmethoden und die zugrunde liegenden Kriterien am tatsächlichen Bauwerksverhalten zu kalibrieren bzw. ihre Neufestlegung zu begründen. Mit der Etablierung einer Datenbank von Bestandsgebäuden und Modellobjekten (*Digital Masonry*) werden Grundlagen bereitgestellt, um Mauerwerksbauten in deutschen und europäischen Erdbebengebieten katalogartig zu erfassen und mittels vereinheitlichter Bewertungskriterien einer vereinfachten und zudem in mehreren Ebenen angelegten Nachweisführung zu unterziehen.

Die Ziele des Forschungsvorhabens wurden in vollem Umfang erreicht.

2 Ergebnisse der Untersuchungen

2.1 Verifizierung Materialkennwerte (AP 1)

Ursprüngliches Ziel dieses Arbeitspaketes war es, Kenntnis über die Materialeigenschaften des historischen Leichtbetonbaustoffs zu erlangen, wie sie zum Zeitpunkt des betrachteten Erdbebens 1978 bei der betroffenen Bebauung vorlagen. Da es praktisch nicht durchführbar ist, konkrete Werte direkt an den betroffenen Gebäuden zu ermitteln, war es der Ansatz, ausreichend genaue Materialkennwerte aus sekundären, möglichst aus den Bauunterlagen ersichtlichen, Informationen abzuleiten und für die Untersuchung zu verwenden. Eine Illustration des Ansatzes zeigt Abb. 1.

Anhand der Entwicklungsschritte in der historischen Leichtbetonsteinherstellung sollte beispielsweise auf Mauerwerkskenngrößen entsprechend dem Herstellungszeitpunkt der Einzelgebäude geschlossen werden. Dieser Ansatz war nicht zielführend, da signifikante Unterschiede in der Druckfestigkeit der Leichtbetonsteine als maßgebliche Kenngröße, nur mit dem Wechsel des Bindemittels von Kalk auf Zement begründet werden können. Dieser Wechsel ging etwa im Zeitraum von 1910 bis 1920 von statten. Die Auswertung der Archivrecherche ergab, dass von 541 Gebäuden nur 48 vor 1910 erbaut wurden und von diesen 48 Gebäuden wiederum in 42 Gebäuden Leichtbetonsteine in Form von Fachwerkausfachungen verbaut wurden. Somit sind 6 von 329, also 2% zu 98% der für die Untersuchung geeigneten Gebäude durch dieses Kriterium zu unterscheiden. Dieser Ansatz ist aus dem Grund für die Zwecke des Projektes untauglich.

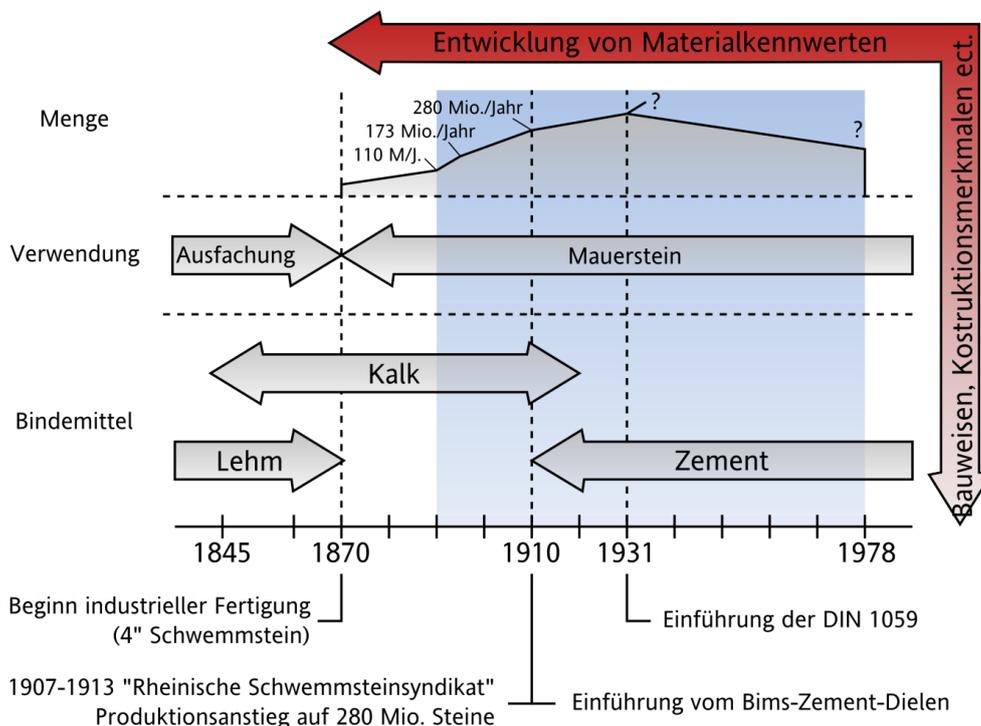
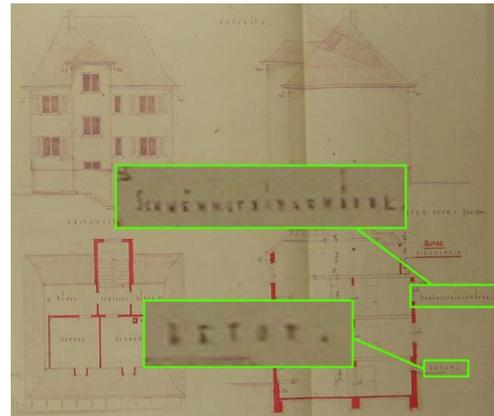


Abb. 1: Schema zur Entwicklung von Leichtbetonsteinen und deren Verwendung im zeitlichen Kontext. Der blau hinterlegte Bereich stellt den Zeitraum dar, in dem die untersuchten Gebäude erbaut wurden.

7. Fundamente (Gründungsart und Baustoff)	Streifenfundamente
8. Außenwände (Baustoff) Untergeschoß Erdgeschoß Obergeschoß	Beton u. Hbl. Hbl. 25 Hbl. 25
9. Trennwände (Baustoff) Untergeschoß Erdgeschoß Obergeschoß Dachgeschoß	Bimsstein " "
10. Decken (Baustoff) über Untergeschoß über Erdgeschoß über Obergeschossen	Massiv-Decke Holzbalkendecke
11. Dach (Konstruktion und Baustoff)	Satteldach Pfettendach



(a)

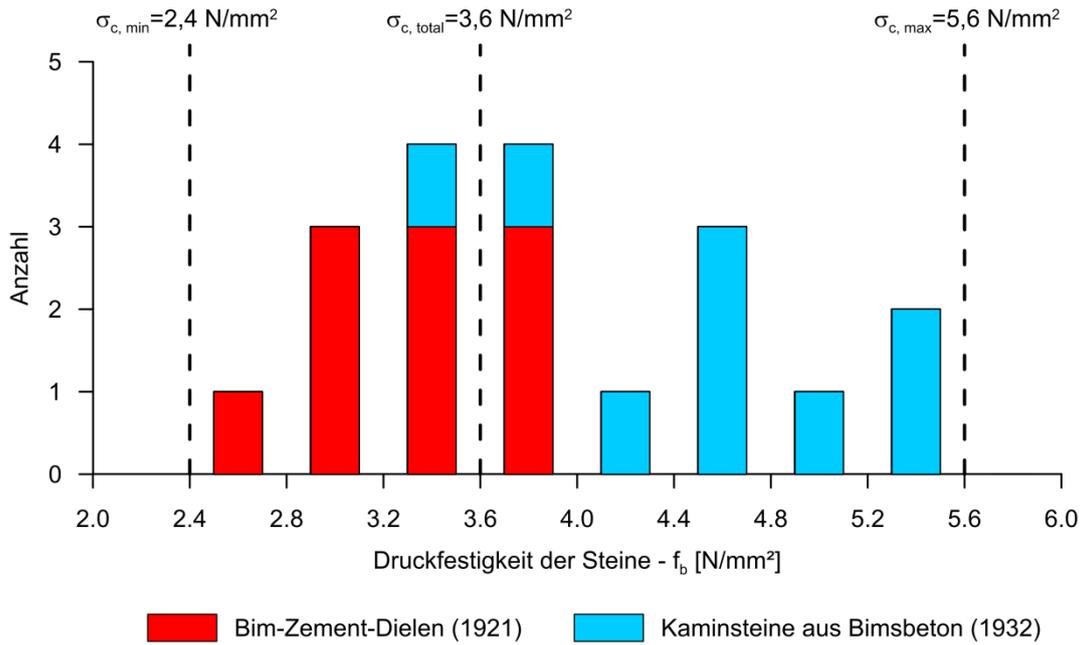
(b)

Abb. 2: Unterlagen zu den Gebäuden, die Angaben zu den verwendeten Materialien enthalten. Die Daten sind gelegentlich geschossweise und nach Innen- und Außenwänden getrennt erhoben (a), jedoch in der Mehrzahl der Fälle lediglich in den Genehmigungsplänen vermerkt (b)

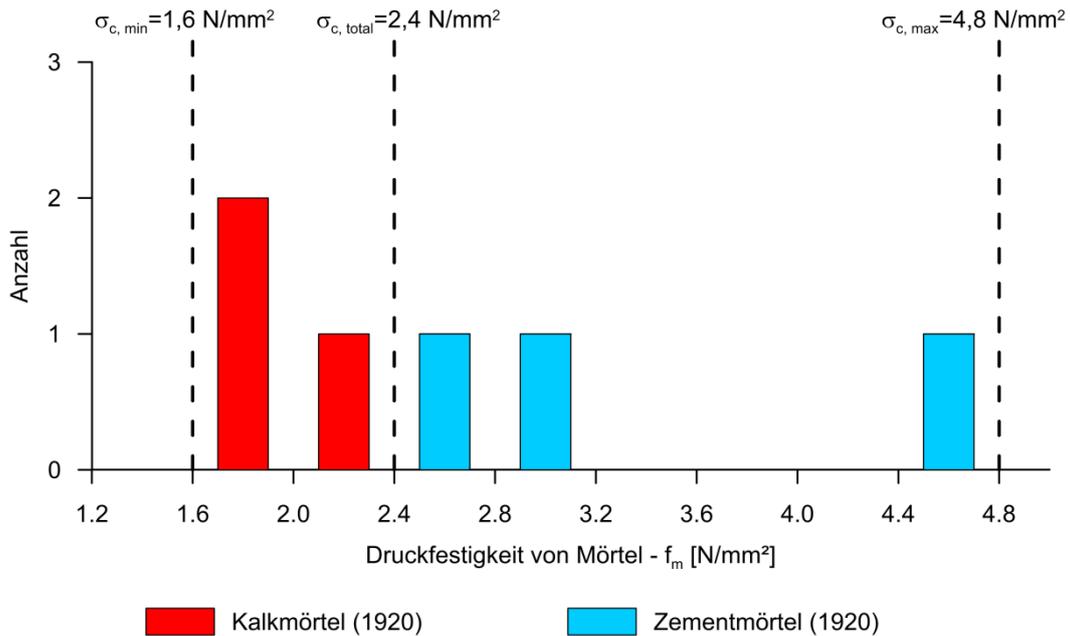
Andere Kriterien erwiesen sich ebenso als nicht geeignet, um auf Materialkenngrößen zu schließen. Die Vertriebswege der im historischen Kontext vielen kleineren Hersteller von Leichtbetonbaustoffen zur Ableitung von Materialeigenschaften heranzuziehen führte nicht zum Erfolg, da der Ort der Steinherstellung nicht mit den untersuchten Gebäuden in Zusammenhang gebracht werden konnte. Schon vor mehr als 100 Jahren wurden Leichtbetonprodukte sehr weit von Produktionsort entfernt verkauft und verbaut. Beispielsweise wurden schon 1921 in London mehrere Hotels und ein Opernhaus mit Rheinischen Leichtbetonprodukten errichtet (Hansen, 1921). Ferner ist zu sehen, dass mit der Einführung der DIN 1059 im Jahre 1931 Festigkeitsklassen definiert wurden, die in vergleichbarer Form auch heute noch gebräuchlich sind.

Die für die Untersuchung der Gebäude wichtige Größe der Steifigkeit konnte in der Zeit, in der die Mehrzahl der betrachteten Gebäude errichtet worden sind, schon relativ genau im Produktionsprozess eingestellt werden. Aufgrund dieser Sachlage ist es völlig unmöglich sinnvolle Materialkennwerte aus den Bauunterlagen ersichtlichen Informationen abzuleiten. Einen wesentlichen Einflussfaktor der Nachweisverfahren von Mauerwerksbauten gegen Erdbebeneinwirkungen stellt die Festigkeit des Mauerwerkstoffs dar (vgl. u.a. Tabelle 5). Für die analytischen Untersuchungen ist die Festigkeit der Wände festzulegen bzw. vorzugeben. Da im Rahmen der Recherche einige Versuche an historischen Leichtbetonsteinen und Mörtel gefunden werden konnten, war es möglich, einen Bereich an wahrscheinlichen Festigkeiten für die verwendeten Leichtbetonbaustoffe einzugrenzen.

Abb. 3 gibt als Ergebnis der Erhebung eine Zusammenstellung der Druckfestigkeitswerte für Leichtbetonsteine und typische Mörtelfestigkeiten aus der Zeit bis in die 1930er Jahre. Wie einleitend angedeutet, besteht somit die Möglichkeit die analytischen Untersuchungen an den Gebäuden unter Variation der Festigkeit mehrfach durchzuführen. Auf diese Weise ist es im Weiteren möglich, den Einfluss der Wandfestigkeit auf die Gebäudeverletzbarkeit zu quantifizieren und hinsichtlich der weiteren einflussnehmenden Größen im Bewertungsprozess einzuordnen.



(a)



(b)

Abb. 3: Festigkeitswerte von zementgebundenen Leichtbetonsteinen (a) und Maurermörtel (b), ermittelt aus Laborversuchen im Zeitraum bis 1936. (Gary, 1907); (Scharroo, 1920); (Grün, 1929); (Hermann, 1929); (Michailow, 1930); (Hart, 1936); (Breitbach, 2012)

Mit dem Ziel, einen vereinfachten Nachweis zu entwickeln, besteht somit das Potential, dass sich die Festigkeit der Wandmaterialien als weniger kritisch als bisher angenommen darstellt. Die mechanischen Eigenschaften von Mörtel und Mauerstein bestimmen die Kennwerte der daraus errichteten Wand.

Für die analytischen Untersuchungen wurden die Wandeigenschaften, die gleichzeitig die Eingangsgrößen der Gebäudeberechnungen sind, nach den Vorgaben der gültigen Norm (DIN EN 1996-1, 2013) bestimmt. Das Modell berücksichtigt zahlreiche Parameter, welche die Eigenheiten der jeweiligen Wände erfassen soll. Zu nennen sind hier beispielsweise das Material der Mauersteine, deren Rohdichte und Lochbild, die Art des Mauerwerksverbandes und die Art und Dicke der Vermörtelung.

Die konkreten Werte dieser Parameter wurden ermittelt entsprechend der Angaben in (DIN EN 1996-1, 2013); (DIN EN 1996-3, 2010); (DIN EN 1996-3/NA, 2012) und (Pech & Kolbitsch, 2005). Aus den ersten Ergebnissen der analytischen Untersuchungen ergab sich die Situation, dass die berechneten Ergebnisse sich in der Art des prognostizierten Schadensmechanismus von den dokumentierten Schäden durchweg unterschieden. Die Simulationen ergaben, dass das Druckversagen in den Mauerwerksscheiben die dominierende Versagensform sei, beobachtet wurde jedoch hauptsächlich Schubversagen. Die Berechnung der Wandeigenschaften wurde aus diesem Anlass mit veränderten Werten der Modellparameter wiederholt. Angepasst wurden 3 Werte. Die Mörteldruckfestigkeit f_m wurde von 10 N/mm² auf 3,4 N/mm² gesenkt. Das entspricht dem Mittelwert der Versuchsergebnisse für Zementmörtel (s. Abb. 3b).

Hierbei handelt es sich jedoch nur um 3 Versuchsergebnisse, weswegen zuvor die Auswertung von 187 Versuchen, publiziert in (Kirtschig, 1975), berücksichtigt wurde. Die dort ausschließlich benannte Schwankungsbreite von 0,36 N/mm² bis 19,5 N/mm² führte zur Wahl der etwa mittleren Mörteldruckfestigkeit f_m von 10,0 N/mm². Ferner wurde der Wert für die Haftschiebungsfestigkeit f_{vko} von 0,15 N/mm² auf 0,116 N/mm² gesenkt.

Der erste Wert ist der Mittelwert zwischen 0,1 und 0,2 N/mm² welche beide laut (DIN EN 1996-1, 2013) für die gegebene Situation hätten Anwendung finden können.

Der zweite Wert ist das Ergebnis der linearen Interpolation der in Tabelle NA. 11 des nationalen Anhangs (DIN EN 1996-3/NA, 2012) gegebenen Werte unter Berücksichtigung der neu festgelegten Druckfestigkeit f_m des Mörtels. Schließlich wurde der Grenzwert f_{vlt} für die charakteristische Schubfestigkeit f_{vk} vom Mauerwerk von 0,045 der Druckfestigkeit der Mauersteine f_b auf 0,065 angehoben. Dies entspricht dem Wert für knirsch gestoßenen Stirnflächen der Mauersteine im ersten Fall und vollständig vermörtelten Stoßfugen im zweiten Fall; der Unterschied ist für die untersuchten Einzelgebäude nicht ermittelbar.

Alle Werte für diese drei Parameter sind plausibel und anwendbar. Dieser Umstand wurde im projektbegleiteten Ausschuss diskutiert; es wurde entschieden, dass beide Varianten für die Simulation verwendet werden sollen. Auf diese Weise kann, analog zur Variation der Materialfestigkeiten, der Einfluss der Parameterwahl in der Berechnung der Wandfestigkeiten auf die Gebäudeverletzbarkeit dargestellt werden. Die Simulationen mit den ursprünglichen, das Druckversagen prognostizierende, Materialkennwerten werden mit dem Zusatz MAT-I geführt und die Variante mit den angepassten Kennwerten als MAT-II.

Eine auch im Antrag formulierte Herausforderung stellt die Übertragbarkeit der an der historischen Bebauung erzielten Untersuchungsergebnisse, die teilweise vor dem Krieg errichtet wurden, auf heutige Verhältnisse dar. Einen Beitrag diese Übertragbarkeit bei der normentauglichen Umsetzung zu erleichtern, führte zum Beschluss die Verletzbarkeitsberechnungen nicht nur mit Kennwerten historischer Leichtbetonbaustoffe durchzuführen, sondern zusätzlich mit Materialkennwerten, wie sie gegenwärtig gefertigte Leitbetonbaustoffe haben.

Berücksichtigt wurden die Steindruckfestigkeitsklassen 2, 4 und 6 (MW-2; -4, -6) nach (DIN EN 1996-1, 2013). Der zusätzliche Aufwand ist minimal, da die Berechnungsdaten mittels Datenbank verwaltet werden und die Vorteile der dadurch zwangsläufig streng strukturierten Arbeitsweise voll zu tragen kommen.

Die Variation der Wandfestigkeiten erfolgte ausschließlich für die Wände aus Leichtbetonbaustoffen (LB). Hierfür wurden die ermittelten Druckfestigkeitswerte historischer Leichtbetonsteine (s. Abb. 3) zwischen dem minimalen und maximalen Wert bei 2,6 N/mm² beginnend in 8 Schritten zu je 0,4 N/mm² verändert. Die so generierten Stichproben sind mit LB-1 bis LB-8 gekennzeichnet (s. Tabelle 1). Die untersuchten Gebäude sind nicht ausschließlich aus Leichtbetonbaustoffen (LB) errichtet. Sehr häufig besteht das Untergeschoss aus so genanntem Stampfbeton (SB) oder Zwischenwände sind beispielsweise aus Vollziegeln (VZ) oder Hochlochziegeln (Hlz) errichtet.

Die Materialkennwerte dieser Wände wurden entsprechend historischer Bautabellen (Bargmann, 2001) oder Laborversuchen (Sulze & Freyburg) ermittelt und in den Simulationsreihen nicht variiert. Die Berechnungsvorschrift zur Ermittlung der Wandeigenschaften ist in der (DIN EN 1996-1, 2013) Abschnitt 3.6 gegeben. Die notwendigen Parameter und die für die Simulation verwendeten Material-, Wandkenngrößen sind in Tabelle 1 aufgelistet.

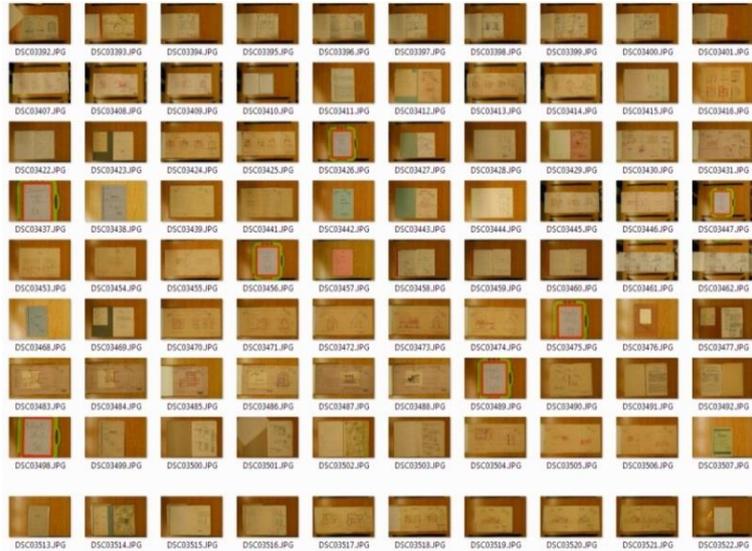
Die Konstanten α , β und K (s. Tabelle 1) sind ermittelt für die Verwendung von Normalmörtel und Steinen der Steingruppe-I nach (DIN EN 1996-1, 2013). Die Querdehnzahl η wurde für Mauerwerk pauschal mit 0.25 festgelegt. Die Wichte γ für das historische Leichtbetonmauerwerk liegt laut (Bargmann, 2001) zwischen 8 bis 13 kN/m³ und wurde mit 11 kN/m³ berücksichtigt. Die Eigenschaften der Wände MW-2, MW-4 und MW-6 wurden ermittelt unter der Voraussetzung, dass Kalkzementmörtel der Mörtelgruppe IIa mit einer Druckfestigkeit von 5 N/mm² in Form von Dünnbettmörtel verwendet ist. Die Modellparameter ergeben sich entsprechend (DIN EN 1996-1, 2013), eine Variante MAT-I entfällt. Nach (Pech & Kolbitsch, 2005) kann so errichtetes Mauerwerk als typisch für heutige Bebauung angesehen werden.

Tabelle 1: Material- und Modellkennwerte zur Berechnung der Wandeigenschaften nach (DIN EN 1996-1, 2013).

	LB-1	LB-2	LB-3	LB-4	LB-5	LB-6	LB-7	LB-8	MW-2	MW-4	MW-6	SB	VZ	Hlz
MAT-I														
f_k [N/mm ²]	2,26	2,48	2,69	2,90	3,10	3,29	3,48	3,67	–	–	–	16,0	6,07	3,07
f_b [N/mm ²]	2,6	3,0	3,4	3,8	4,2	4,6	5,0	5,4	–	–	–	20,0	11,5	4,3
f_m [N/mm ²]	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0	–	–	–	20,0	10,0	10,0
f_{vko} [N/mm ²]	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	–	–	–	0,2	0,2	0,2
α [-]	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	–	–	–	0,7	0,7	0,7
β [-]	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	–	–	–	0,3	0,3	0,3
K [-]	0,55	0,55	0,55	0,55	0,55	0,55	0,55	0,55	–	–	–	0,8	0,55	0,55
η [-]	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	–	–	–	0,2	0,25	0,25
γ [kN/m ³]	11	11	11	11	11	11	11	11	–	–	–	25	15	15
MAT-II														
f_k [N/mm ²]	1,63	1,79	1,95	2,10	2,24	2,38	2,52	2,65	1,63	2,95	4,16	16,0	6,07	4,43
f_b [N/mm ²]	2,6	3,0	3,4	3,8	4,2	4,6	5,0	5,4	7,5	5,0	2,5	20,0	11,5	4,3
f_m [N/mm ²]	3,4	3,4	3,4	3,4	3,4	3,4	3,4	3,4	–	–	–	20,0	10,0	10,0
f_{vko} [N/mm ²]	0,116	0,116	0,116	0,116	0,116	0,116	0,116	0,116	0,22	0,22	0,22	0,2	0,2	0,2
α [-]	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,85	0,85	0,85	0,7	0,7	0,7
β [-]	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	–	–	–	0,3	0,3	0,3
K [-]	0,55	0,55	0,55	0,55	0,55	0,55	0,55	0,55	0,75	0,75	0,75	0,8	0,55	0,8
η [-]	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,2	0,25	0,2
γ [kN/m ³]	11	11	11	11	11	11	11	11	4	6	10	25	15	15

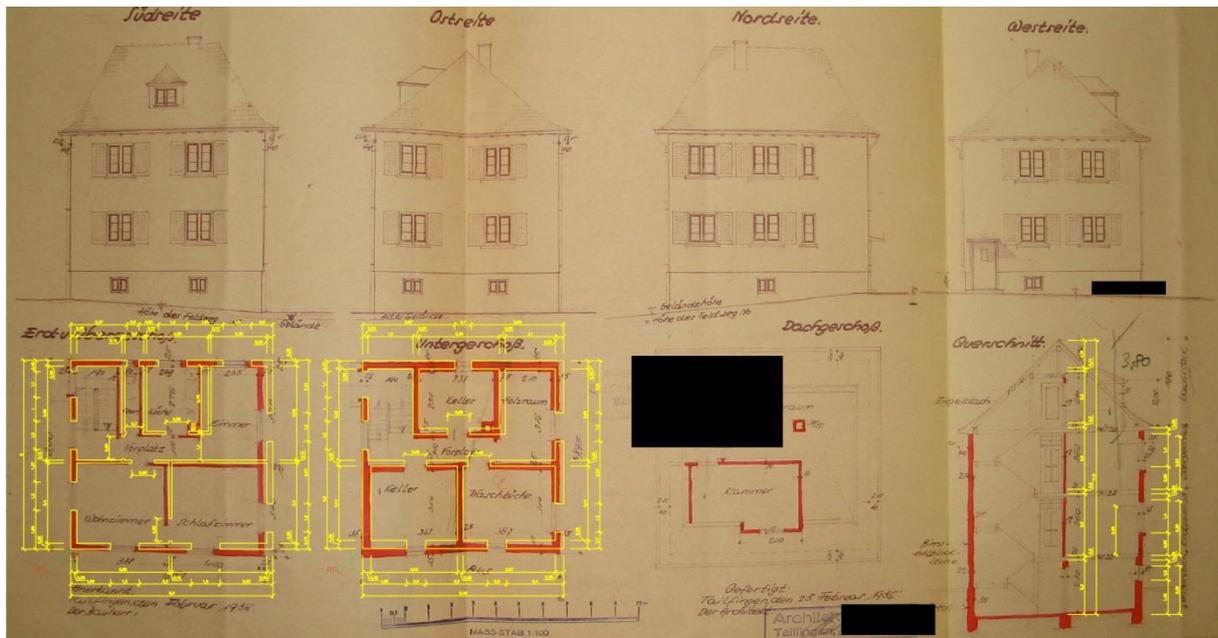
2.2 Repräsentative Bestandsgebäude (AP 2)

Ziel dieses Arbeitspaketes war es, zu ermitteln, welche und in welchem Umfang konstruktive Merkmale bei den vom Erdbeben 1978 betroffenen Gebäuden im Untersuchungsgebiet Albstadt/Tailfingen vorzufinden waren. Durch Vorleistungen war bereits die Zuordnung von Bildansichten, Bauweise, Untergrundklasse und des 1978 entstandenen Schadensgrades zu ca. 2200 vom Beben betroffenen Gebäuden bekannt (s.a. Tabelle 2), (Schwarz u. a., 2005), (Abrahamczyk u. a., 2005) und (Hiller, 1985). Bei der Rekonstruktion der Schadenssituation konnte u.a. auf die Schadensaufnahme des Bauamtes Tailfingen (Bauamt Tailfingen, 1978) und eine Fotodokumentation der Bauwerksschäden der Landesstelle (Landesstelle für Bautechnik Baden – Württemberg, 1978) zurückgegriffen werden.



(a)

(b)



(c)

Abb. 4: Aufbau zur Sicherung der Gebäudepläne im Bauamt Albstadt (a), Aufnahmeserien der Pläne (b) und Digitalisierung der Grundrisse und Gebäudeschnitte im Aufriss (c).

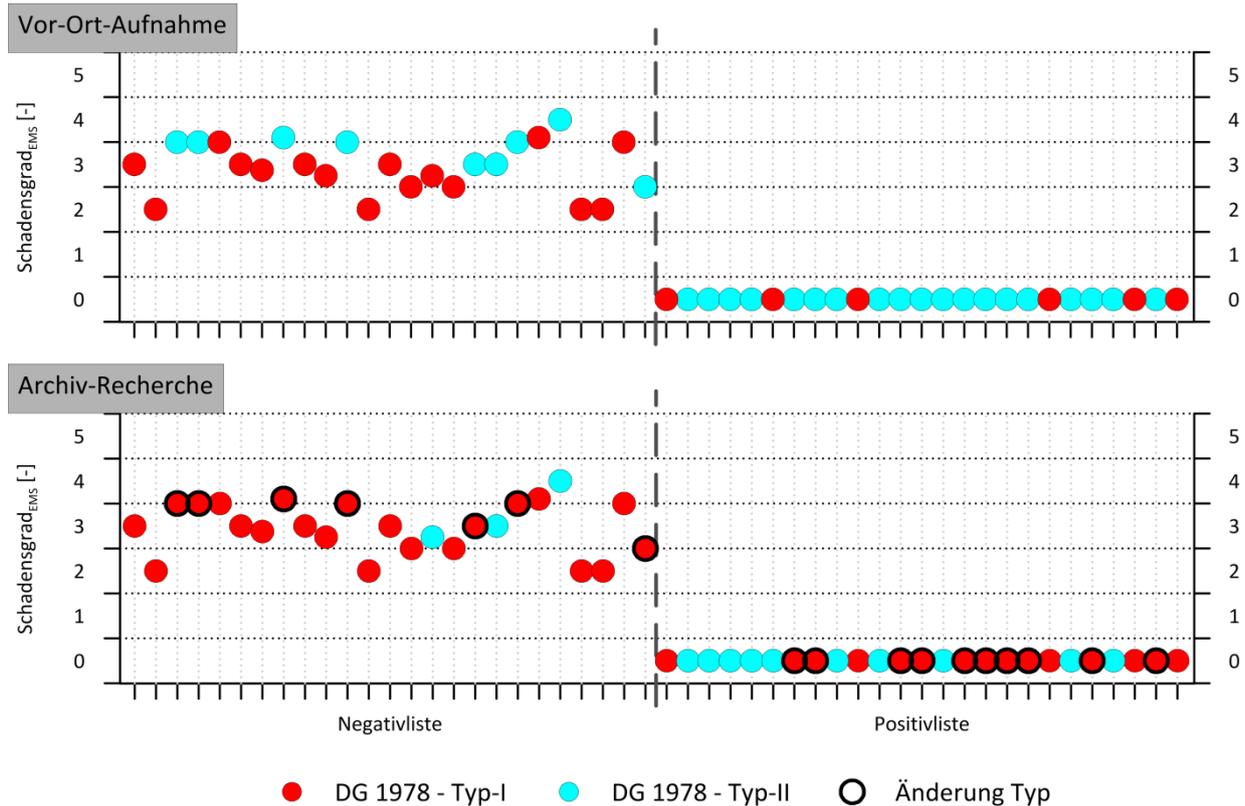


Abb. 5: Veränderung der Typzuordnung nach Einsichtnahme in die Gebäudeunterlagen.

Die Schadensbilder der am meisten betroffenen Bauwerke waren in der Regel durch starke Rissbildungen zwischen den Öffnungen (Diagonalrisse) sowie in vielen Fällen durch das Herauskippen unverankerter Giebelwände gekennzeichnet. Zur Sicherung geschädigter Gebäude wurden diagonale Holzabstreber an den Außenseiten verankert, wobei insbesondere zwei- bis dreistöckige Mauerwerksbauten bzw. Wohngebäude bestehend aus Mauerwerk im Erdgeschoss und Fachwerk in den Obergeschossen betroffen waren (vgl. Beinersdorf u. a., 2009).

Zur Reinterpretation der Schütterwirkungen wurden die allgemeinen Schadensangaben in ein Schema von Schadensgraden gemäß der Europäischen Makroseismischen Skala EMS-98 (Grünthal et al.) überführt (vgl. Tabelle 4). Gebäude mit Schadensgraden D1 und D2 werden in der Projektbearbeitung nicht weiter differenziert. Da aber die Angaben zu den Bauwerksschäden nicht immer eindeutig mit den Deskriptoren der EMS-98 korrespondieren, wurde entschieden, den Bauwerksschaden im Sinne eines oberen Schadensgrades festzulegen (vgl. Schwarz u. a., 2005).

Im Ergebnis ist jedes Gebäude über den Schadensgrad (Di) in seiner charakteristischen Schädigung durch das Erdbeben vom 3. September 1978 beschrieben. Es zeigt sich, dass sich die Schäden auf die Schadensgrade D1 bis D3 konzentrieren, nur in einem Fall wurde der Schadensgrad D4 erreicht.

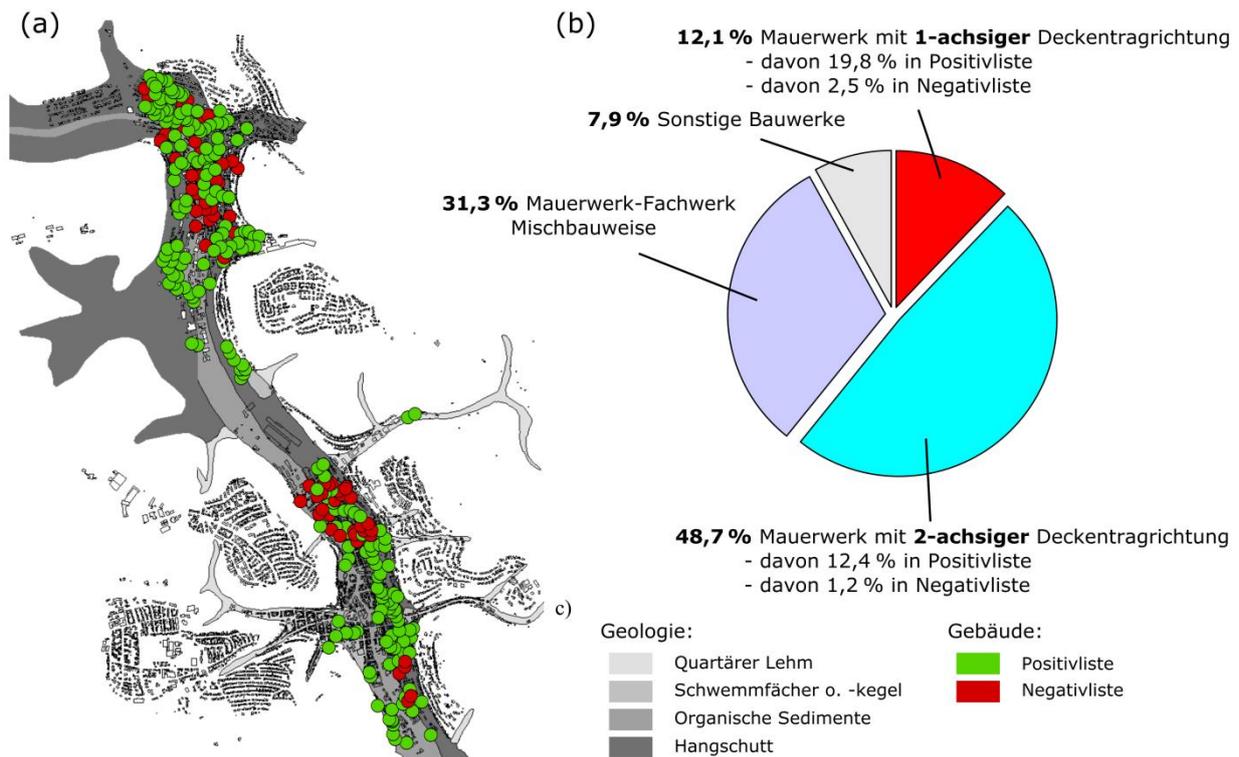


Abb. 6: Geologische Untergrundsituation für Albstadt nach (Hiller, 1985) mit Lage der Gebäude der Positiv- bzw. Negativliste (a) und Aufschlüsselung der 541 im Archiv eingesehenen Gebäude nach Bauweise (b).

Zu betonen ist, dass diese Typisierung allein auf der visuellen Einschätzung beruhte und eine Einordnung entsprechend der Bauweise war, konstruktive Details konnten durch die äußerliche Begutachtung nicht ermittelt werden. Wie zu erwarten ergaben sich Veränderungen in der Einordnung nach Einsichtnahme der Bauunterlagen (vgl. Abb. 5).

Im Rahmen dieses Arbeitspaketes wurden deshalb einfache Gebäudepläne, wie sie im Zuge einer Baugenehmigung notwendig sind, im Archiv des Bauamtes Albstadt recherchiert und fotografisch gesichert (s. Abb. 4). Zur Begrenzung des Aufwandes und Gewährleistung der Aussagefähigkeit der nachfolgenden analytischer Untersuchungen wurde entschieden, den Gebäudebestand so zu sortieren, dass vorrangig Gebäude untersucht werden, die verletzbarkeitsrelevante konstruktive Merkmale aufweisen. Es wird zwischen einer *Negativliste* und *Positivliste* unterschieden.

Die *Negativliste* umfasst Gebäude, bei denen 1978 die größten Schädigungen (Schadensgrad 3 nach EMS-98) aufgetreten sind. In der *Negativliste* werden für die analytische Gebäudeauswertung alle Mauerwerksgebäude mit Schadensnachweisen aufgelistet, deren Schaden über leichte Schädigungen an Schornstein oder Dachhaut hinausgeht. Diese Schädigung konnte anhand der nach dem Beben erstellten Schadensprotokolle nachvollzogen werden und waren aus Voruntersuchungen bekannt (Schwarz u. a., 2005).

Anders verhält es sich mit Gebäuden der *Positivliste*. Diese weisen eine besonders große Diskrepanz zwischen Schadensprognose nach klassischen Ansätzen und dem beobachtetem Verhalten auf.

In der Positivliste werden die Gebäude gleicher Bauart an Standorten vergleichbarer Untergrundbedingungen zusammengefasst, welche nach dem Erdbeben keinen oder nur nicht-strukturellen Schaden aufwiesen. Die Gebäude stehen für herkömmliche Mauerwerksbauten, die trotz ungünstiger Einwirkungs- und Tragwerkseigenschaften offensichtlich Merkmale einer ausreichenden Erdbebenwiderstandsfähigkeit besitzen. Ungünstig sind im Hinblick auf die Einwirkungsseite insbesondere geologische Untergrundbedingungen, die eine lokale Erhöhung der Schütterwirkungen gegenüber anderen Standorten erwarten lassen (Amstein u. a., 2005, Schwarz & Meidow, 2008).

Dazu gehören die geologischen Formationen in den hangseitigen Talsohlgebieten bzw. in den flachsedimentären Bachlaufgebieten. Betroffen sind demzufolge die Ortszentren und die dort vorherrschende ältere bzw. historische Bebauung. Die Verknüpfung der Einzelgebäude mit den Untergrundklassen war aufgrund von Voruntersuchungen zur Geologie in Albstadt bekannt (Hiller, 1985). Ungünstige Standortbedingungen im Hinblick auf Erdbebeneinwirkungen sind solche auf besonders *weichem* Untergrund. Entsprechend der (DIN EN 1998-1, 2010) sind das die Klassen C und B bzw. C-R und B-R nach (DIN EN 1998-1/NA, 2011). Die Lage der Gebäude der Positiv- und Negativliste ist in Abb. 6a dargestellt.

Beide Listen bildeten die Grundlage für die zielgerichtete Daten- und Archivrecherche, die in der 5. KW 2013 (28.1.-1.2.2013) im Bauamt Albstadt mit 2 Mitarbeitern und einer wissenschaftlichen Hilfskraft des EDAC erfolgreich durchgeführt wurde. Das gesetzte Ziel war es, Pläne von mindestens 200 betroffenen Gebäuden zu sichern. Letztlich konnten aufgrund des reibungslosen Ablaufes und der sehr guten Unterstützung durch die Mitarbeiter des Bauamtes Albstadt von 541 Gebäuden Bauunterlagen für das Projekt gesichert werden.

Des Weiteren kam es durch die detaillierte geschossweisen Aufarbeitung der Archivgrundrisse zu einer Verfeinerung der Einordnung der Gebäude und ihrer Verletzbarkeit gegenüber der vor-Ort Begehung beginnend in 2003 für das Testgebiet Albstadt (Tailfingen und Onstmettingen), insbesondere mit dem Fokus auf den alten Mauerwerksbauten gemäß dem Projektschwerpunkt. In Abb. 5 wird diese Neugruppierung verdeutlicht an der teilweisen Änderung des Deckentyps für die betrachteten Gebäude in beiden Listen (sowohl der Positiv- als auch der Negativliste). Der Deckentyp ist mutmaßlich mitverantwortlich für das Verhalten des Gebäudes unter seismischen Einwirkungen und dem zu erwartenden Schadensausmaß und damit das maßgebende Kriterium neben dem Wandbaustoff für die Einteilung des Tragwerkes in die Verletzbarkeitsklasse gemäß EMS-98.

Im Folgenden wurden die Gebäude bzgl. ihrer Materialeigenschaften, ihres Schadensbildes infolge des Erdbebens von 1978, sowie ihrer Standortbedingungen (Geologie, Baugrund) in verschiedenen Bauwerksgruppen sortiert, mittels CAD digitalisiert und für analytische Untersuchungen vorbereitet, sowie zusätzlich für die Parameterermittlung aufgearbeitet. Im Zuge der Aufarbeitung wurde ersichtlich, dass nur 541 für die Untersuchung geeignete Gebäude zur Verfügung standen. Nicht geeignete Gebäude sind für die weiterführenden Untersuchungen vor allem solche, die einen signifikant hohen Anteil an Tragelementen z.B. aus Stahlbeton haben und somit nicht mehr als Mauerwerksgebäude angesehen werden können. Ein weiterer Grund dafür dass Gebäudepläne ungeeignet sind, ist der Tatsache geschuldet, dass viele Pläne für Umbauten am bestehenden Gebäude angefertigt wurden und deshalb nur teilweise bemaßt sind.

Einen Überblick der aufgenommenen Gebäude aus dem Archiv mit der Verteilung der unterschiedlichen Bauweisen auf die Geschosse, sowie die absoluten Anteile der Gebäude über

die Anzahl der Geschosse mit der Abgrenzung der Errichtung der Gebäude jeweils vor 1950 sowie nach 1950, zeigt Tabelle 2. Das Baujahr 1950 ist dabei als Indikator des Siedlungsbauens direkt vor und während des 2. Weltkrieges, sowie dem modernen Wohnungsbau nach dem Kriegsende mit den neuen Facetten eines modernen Wohnungsbauens mit neuen Baustoffen und weniger kompakten Grundrisslösungen gegenüber dem Wohnquartier- und Siedlungsbau in der 1. Hälfte des 20. Jahrhunderts anzusehen. Grau unterlegt fokussiert die Bauweise Bims- und Leichtbeton, welche primär auf Grundlage ihrer zu erwartenden hohen Verletzbarkeit infolge der Materialeigenschaften vermehrt zu höheren Schadensmechanismen bei Erdbebeneinwirkungen neigen sollte als Bauwerke mit höherfestigen Mauerwerksbaustoffen oder Fachwerk- bzw. Stahlbetonbauten. Ersichtlich ist weiterhin, dass bei diesen Bauweisen das unterste Geschoss aus Stampfbeton gebaut wurde, welches als typischer Baustoff für das Untergeschoss im Wohnungsbau Anfang und Mitte des 20. Jhd. in ländlichen und kleinstädtischen Siedlungsgebieten galt.

Tabelle 3 präzisiert den Anteil für die Gebäude, welche analytisch untersucht und bewertet wurden. Hier fokussiert mit der Unterscheidung der Gebäude mit oder ohne Unterkellerung. Schwerpunkt liegt auf der Bauweise Bimsstein / Leichtbeton, mit der untersten Etage aus Stampfbeton. Basierend auf den Gebäudeplänen der Archivrecherche erfolgte für die Gruppe der Leichtbetongebäude eine tabellarische Aufarbeitung der verschiedenen Merkmale in Grundriss und Aufriss, die für die einzelnen Geschosse in beiden Hauptrichtungen unterschieden werden können.

Nach der Einteilung der Bestandsgebäude in die Materialklassen erfolgte die Anwendung eines empirischen Tools zur Berechnung bauweisenspezifischer Konstruktionsmerkmale (bezeichnet als vorläufige Gebäude- und Parameter-Informationsliste vGPIL, siehe auch AP5). Zunächst wurde ein Eingabe-Template erarbeitet, das es ermöglicht, schnell und effizient aus den archivierten Gebäudeplänen die relevanten Geometrieparameter von Gebäuden (auch mit aufgelösten Grundrissen) aufzulisten. (Dabei ist es bearbeitungstechnisch unerheblich, ob die Pläne digital oder in Papierformat vorliegen.)

Mit Hilfe des Templates werden basierend auf den Eingabedaten für die einzelnen Gebäude unterschiedliche Parameter geschoss- und richtungsabhängig berechnet und aufgelistet. Vorrangig wird die Gebäudekenngroße berechnet, welche normtechnisch für den vereinfachten Nachweis gefordert wird, d.h., die Schubwandfläche bezogen auf die Gebäude-Grundrissfläche.

Des Weiteren werden Kenngrößen aufgelistet, welche aus Sicht der Bearbeiter geeignet wären, einen signifikanten Einfluss auf das Gebäudeverhalten bzw. die Verletzbarkeit unter horizontalen Erdbebeneinwirkungen zu nehmen. In Abhängigkeit von der Anzahl der Geschosse und der (normativ geforderten Betrachtung der) Richtungsabhängigkeit konnten bis zu maximal 174 verschiedene Parameter für jedes Gebäude ermittelt und in die Datenbank eingearbeitet werden.

Tabelle 2: Anteil [Geb./%] der Bestandsgebäude im Hinblick auf die Bauweise in den einzelnen Geschossen (529 Gebäude ausgewertet, von den 541 Gebäuden der Archivrecherche, davon 295 vor 1950 und 234 nach 1950 errichtet).

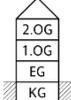
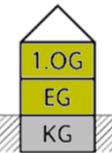
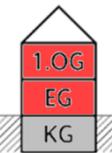
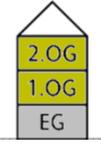
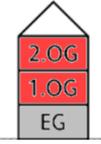
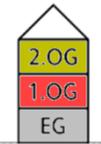
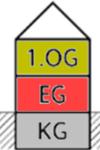
Voll-Geschosse Anzahl der Gebäude	Schema	Geschoss	Stampfbeton	Bruchstein	Bims/Leichtbeton	Holz-fachwerk	Ziegel	Stahlbeton
Wohnungsbau bis 1950								
1 149		EG	0 0 %	0 0 %	101 68 %	42 28 %	6 4 %	0 0 %
		KG/(EG)	101 68 %	0 0 %	15 10 %	18 12 %	2 1 %	13 9 %
2 127		1.OG	1 1 %	2 2 %	73 57 %	38 30 %	12 9 %	1 1 %
		EG	4 3 %	2 2 %	75 59 %	30 24 %	15 12 %	1 1 %
		KG/(EG)	114 90 %	5 4 %	0 0 %	1 1 %	1 1 %	6 5 %
3 19		2.OG	0 0 %	0 0 %	7 37 %	6 32 %	5 26 %	1 5 %
		1.OG	0 0 %	0 0 %	7 37 %	5 26 %	6 32 %	1 5 %
		EG	3 16 %	0 0 %	4 21 %	4 21 %	7 37 %	1 5 %
		KG/(EG)	15 79 %	0 0 %	0 0 %	0 0 %	0 0 %	4 21 %
Wohnungsbau nach 1950								
1 130		EG	0 0 %	0 0 %	78 60 %	20 15 %	30 23 %	2 2 %
		KG/(EG)	47 36 %	1 1 %	14 11 %	7 5 %	3 2 %	58 45 %
2 91		1.OG	0 0 %	0 0 %	52 57 %	21 23 %	18 20 %	0 0 %
		EG	0 0 %	0 0 %	54 59 %	19 21 %	17 15 %	1 1 %
		KG/(EG)	63 31 %	0 0 %	0 0 %	0 0 %	0 0 %	28 69 %
3 13		2.OG	0 0 %	0 0 %	4 31 %	0 0 %	4 30 %	5 38 %
		1.OG	0 0 %	0 0 %	4 31 %	0 0 %	4 30 %	5 38 %
		EG	0 0 %	0 0 %	4 31 %	0 0 %	4 30 %	5 38 %
		KG/(EG)	3 23 %	0 0 %	0 0 %	0 0 %	0 0 %	10 77 %

Tabelle 3: Zusammensetzung der numerisch ausgewerteten Bestandsgebäude im Hinblick auf die Bauweise in den einzelnen Geschossen (gesamt: 39 Gebäude)

Materialverteilung über die Geschosse: 2 –geschossige Bauweise (gesamt: 19 Geb.)					
					
6 [0]	1 [0]	6 [1]	0 [1]	2	2
Materialverteilung über die Geschosse: 3 –geschossige Bauweise (gesamt: 18 Geb.)					
					
8 [0]	0 [0]	10 [0]	0 [0]	0	0
Materialverteilung über die Geschosse: 4 –geschossige Bauweise und Ziegelmischbauweise (gesamt: 2 Geb.)					
					
0 [0]	0 [1]	0 [0]	1 [0]	0 [0]	0
	Stampfbeton [Stahlbeton]		Leichtbeton		Ziegelmauerwerk

Erläuterung:

6 [1] Anzahl (6) in Stampfbeton [Anzahl (1) in Stahlbeton]

Als wesentlich zeitaufwendiger erwies sich die Transformation der fotografisch gesicherten Bestandsunterlagen in ein CAD-Format und damit in berechnungstaugliche Eingabe-Files. Es wurde folgender Bearbeitungsablauf gewählt:

- Die Grundrisse werden auf Grundlage der Archivunterlagen für alle Geschosse referenziert (erforderlich aufgrund der fehlenden Maßstabstreue) und in den Maßen abgegriffen und digitalisiert (s.a. Abb. 4c).
- Aus diesen Grundrissen werden für den Import in die Rechenprogramme (hier: 3Muri, AmQuake und BLM) konsistente Grundrisse abgeleitet und die zugehörigen Eingabedateien erzeugt.
- Zusätzlich werden für die Modellerstellung die Maße im Aufriss sowie die Deckenspannrichtungen und die Wandmaterialien ermittelt und dokumentiert.



Abb. 7: Aufbereitetes CAD - Gebäude für die weitere analytische Bewertung: Ansicht Gebäude (a); Aufriss Gebäude (b), Grundriss KG (c), Grundrisse EG und OG (d), Schadensbild in x-Ebene (e) sowie Schadensbild in x-y-Ebene (f)

Im Zuge der digitalen Aufbereitung können die fehlenden Maße oft jedoch nicht in allen Fällen rekonstruiert werden. Die digitale Aufbereitung der Pläne mittels CAD erwies sich als sehr arbeitsintensiv und zeitaufwendig. Neben der Bildbearbeitung und Digitalisierung selbst, müssen für die verwendeten Simulationsprogramme jeweils verschiedenartige Eingabedateien für Wände, Decken und ggf. Lasten erstellt, gesichert und für Eingabeformate der Rechen-Programme transformiert werden, um hier im Vergleich Rückschlüsse auf die Indikatoren der Schädigung (Konstruktion, Material, Standort etc.) ziehen zu können.

Insgesamt konnten 112 Mauerwerksgebäude in CAD aufbereitet werden. Sie stehen damit als *Digital Masonry* zur Verfügung (siehe Abb. 7; Schwarz u.a., 2009).

2.3 Analytische Untersuchungen (AP 3)

Das im Projektantrag formulierte und auch erreichte Ziel der analytischen Untersuchungen ist es, mittels Simulation die Gebäudeschädigung zu bestimmen und somit Vergleichswerte zu den beobachteten Schäden bereitzustellen. Die Bearbeitung dieses Arbeitspaketes ist direkt abhängig von den in AP 1 (Verifizierung Materialkennwerte) erzielten Ergebnissen und dem Bearbeitungsstand der in AP 2 (Repräsentative Bestandsgebäude) aufbereiteten Gebäude. Die in AP 1 getroffene Entscheidung die Simulation unter der der Variationen der Materialkennwerte durchzuführen, um deren Einfluss auf die Gebäudeverletzbarkeit darzustellen, hat dazu geführt, dass der Arbeitsumfang erheblich angewachsen ist. Zur Kompensation konnte die Datenbearbeitung und Auswertung teilweise automatisiert werden. Die Arbeiten dazu können dem AP 4 zugerechnet werden. Durch die gesteigerte Effizienz bot es sich an neben den Materialeigenschaften, auch die Lastsituation im Gebäude als Einflussgröße auf die die Simulationsergebnisse, in die analytischen Untersuchungen einzubeziehen.

Die Eigenlasten der Decken wurden aus Angaben in den Archivunterlagen ermittelt (vgl. Abb. 9). Die Mehrzahl der untersuchten Gebäude besitzen Stahlbetonplattendecken und Holzbalkendecken, deren Geometrie und Aufbau entsprechend der Konstruktionspläne abgeschätzt und die Lasten entsprechend ermittelt wurden. Waren Sonderbauformen, wie z.B. Hourdis-Decke, Remy-Platten-Decke oder Eisenbeton-Hohlstegdecke-Decke, vorhanden, wurden die Lasten entsprechend der Angaben in (Welz u. a., 2005) bestimmt.

In diesem Zusammenhang wird auf die in AP 1 erzielten Ergebnisse zurückgegriffen, um die dazu benötigten Berechnungsmodelle zu erstellen. Wie im Zwischenbericht 2012 erläutert, war es nicht möglich, für die Gebäude individuelle Materialeigenschaften zu begründen. Jedoch war es möglich, Streubreiten (von-bis-Bereiche) für wahrscheinliche Eigenschaften zu ermitteln.

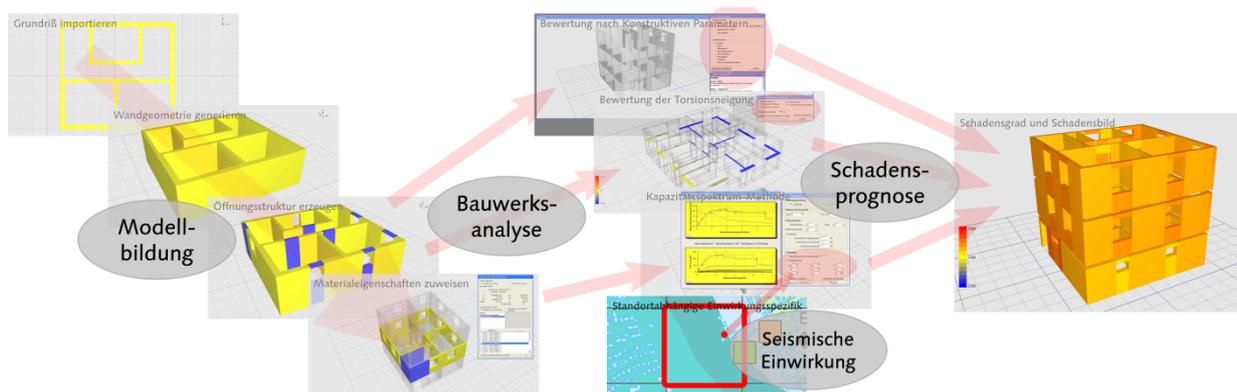
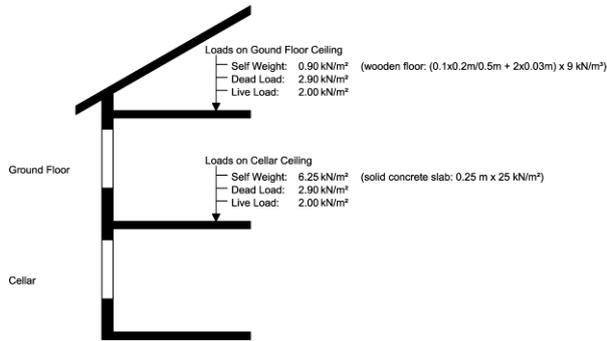


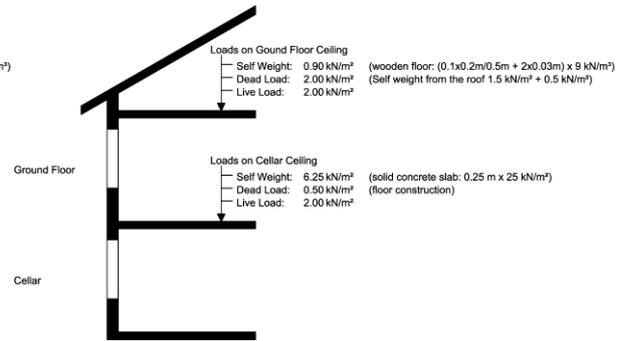
Abb. 8: Darstellung der Schritte, um die analytischen Untersuchungen im Rahmen des AP 3 durchzuführen. Die Modellbildung knüpft direkt an die in AP 2 durchgeführte Gebäudeaufbereitung mittels CAD an.

Load Scheme: LS-A



(a)

Load Scheme: LS-B



(b)

Abb. 9: Schematische Darstellung der in den analytischen Untersuchungen berücksichtigten charakteristischen Deckenlasten. Die Eigenlasten der Decken wurden aus Angaben in den Archivunterlagen ermittelt. In den analytischen Untersuchungen wird zwischen Lastschema LS-A (a) und LS-B (b) unterschieden.

Die ursprüngliche Überlegung war es, realistische Materialkennwerte für jedes Gebäude zur Verfügung zu stellen, um so die Wirksamkeit der konstruktiven Gebäudemerkmale unbeeinflusst vom verwendeten Material untersuchen zu können. Da aufgrund des Projektverlaufs diese Option entfiel, wurde in Abstimmung mit dem PbA (s. Ergebnisvermerk vom 25.9.2013) beschlossen, Simulationen über den gesamten Parameterbereich durchzuführen (8 Samples je Gebäude). Im Vergleich zur Aufbereitung der Archivpläne und der Modellerstellung ist die wiederholte Berechnung des Gebäudes mit veränderten Materialkennwerten relativ einfach durchzuführen. Die dadurch erhöhte Datenmenge aus den Berechnungen zu beherrschen, hilft die Datenbank nebst Client-Tool.

Der Nutzen dieser Maßnahme erklärt sich mit der zentralen Motivation dieses Projektes. Diese beruht auf der begründeten Vermutung, dass die Materialeigenschaften verglichen mit konstruktiven Merkmalen eines Gebäudes in ihrer Wirksamkeit hinsichtlich des Erdbebenwiderstandes überschätzt werden, und dass diesem Umstand auch in den vereinfachten Nachweisen der Baunormen Rechnung getragen werden sollte. In der damit gegebenen Situation ist es durch die Variation der Materialkennwerte möglich, ihren Einfluss auf die Verletzbarkeit der Gebäude aufzuzeigen und hinsichtlich des Einflusses der konstruktiven Gebäudemerkmale einzuordnen. Da es nicht möglich ist, die Untersuchungen zum Einfluss des Materials isoliert durchzuführen, bietet die vergleichende Betrachtung auf der Modellierungsebene zum Einfluss von Material und anderen Gebäudemerkmale einen indirekten Bewertungsmaßstab. Zur Verdeutlichung zeigt Abb. 10 beispielhaft die horizontale Kraft-Verformungs-Beziehung sowie die Schadensgrade nach EMS-98 für ein Gebäude als Ausgangspunkt für die Verletzbarkeitsermittlung. Für die 8 Samples ergeben sich für jeweils die Hauptachsen des Gebäudes 32 Simulationen (Richtungen: -X,-Y,+X,+Y).

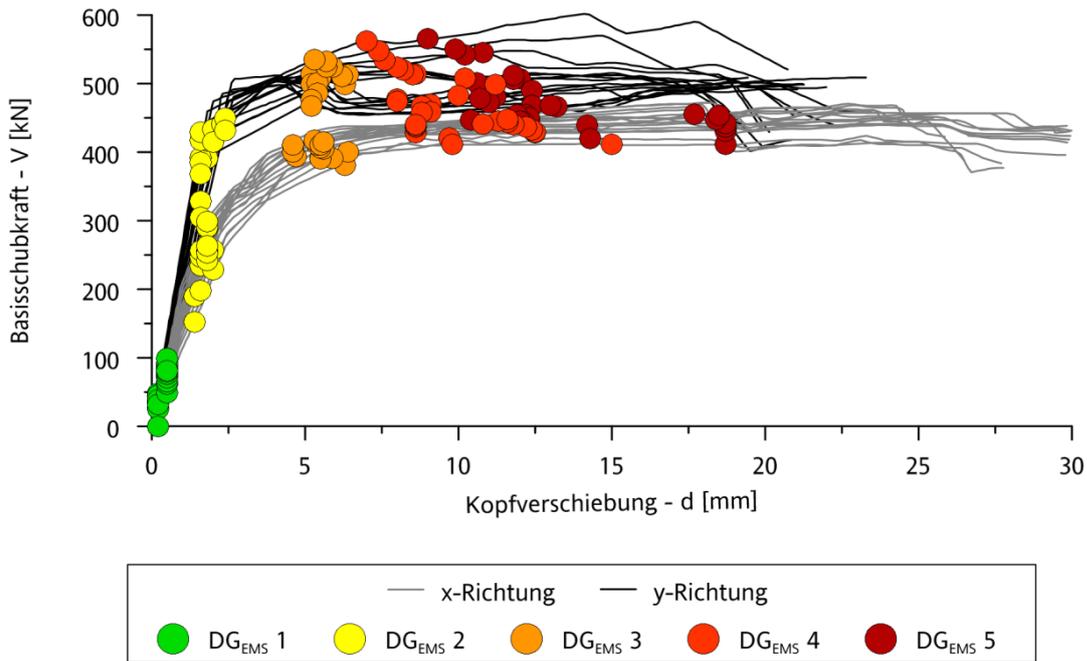


Abb. 10: Berechnete Kapazitätskurven infolge der Materialannahmen nach Tabelle 1

Tabelle 4: Kriterien zur Harmonisierung der Schadens Erfassung der verwendeten Simulationsprogramme in Form von Schadensgraden nach EMS (Grünthal u. a.).

	3Muri	AmQuake	BLM
DG _{EMS} 1 	1. Wand im Gebäude zeigt Schädigung infolge Biegung oder Schub	1. Wand im Gebäude zeigt nichtlineares Verhalten infolge Biegung oder Schub	1. Wand im Gebäude hat Risse
DG _{EMS} 2 	Mindestens 40 % der Wände eines Geschosses zeigen Schädigung infolge Biegung oder Schub	5,0 % relative Geschossverschiebung (in Anlehnung an DIN EN 1998-1, 2010; Abs. 4.4.3.2)	1. Wand im Gebäude zeigt plastisches Verhalten
DG _{EMS} 3 	Mindestens 80 % der Wände eines Geschosses zeigen Schädigung infolge Biegung oder Schub	7,5 % relative Geschossverschiebung (in Anlehnung an DIN EN 1998-1, 2010; Abs. 4.4.3.2)	Maximale Gebäudekapazität ist erreicht
DG _{EMS} 4 	1. Wand im Gebäude versagt infolge Biegung, Schub, Druck oder Zug	1. Wand im Gebäude versagt infolge Schub	1. Wand im Gebäude versagt
DG _{EMS} 5 	Mindesten 3 Wände versagen	Abfall der Gebäudekapazität auf unter 65 % des maximalen Wertes	Abfall der Gebäudekapazität auf unter 65 % des maximalen Wertes

Aus den Analyseergebnissen ist zu schlussfolgern, dass die Belastungsrichtung im Gebäude einen größeren Einfluss hat als die Materialfestigkeit. Die orangen Punkte (Schadensgrad DG 3) zeigen den vom Normungsstandpunkt aus relevanten Schaden: Diese liegen zwischen den grauen und schwarzen Kurven weiter auseinander (Bauwerksrichtung) als innerhalb der jeweiligen Belastungsrichtung (Variation der Festigkeiten).

Die bewilligte Zuwendung für diesen AP wurde eingesetzt, um die in AP 2 erstellten Gebäudepläne und Eingabedateien für die verwendeten Programme 3Muri, AmQuake und BLM in Berechnungsmodelle zu überführen und die Simulation für die genannten Samples durchzuführen. Nachfolgend wird die Verletzbarkeit (Schaden infolge Grundbeschleunigung bzw. Erdbebenstärke) für alle Samples berechnet. Entsprechend der im PbA getroffenen Vereinbarung (s. Ergebnisvermerk vom 25.9.2013) wird dieser Zusammenhang nicht nur für die Schadensgrade nach EMS-98 ermittelt, sondern auch für das erstmalige Auftreten von signifikanten Versagensmechanismen in den Einzelwänden untersucht. Diese Doppelstrategie trägt den Praxisanforderungen Rechnung, da die in den Normen geforderte Nachweise auf die Einhaltung von verhaltensbasierten Grenzzustände zielen.

Dieses Arbeitspaket umfasst die analytischen Untersuchungen zur Ermittlung der individuellen Gebäudeverletzbarkeit sowohl der vom Beben betroffenen Bebauung als auch von Gebäuden, die heutige Ausführungsmerkmale auf sich vereinen. Die mit der Analyse der historischen und der gegenwärtigen Bebauung verfolgten Ziele unterscheiden sich innerhalb der Gesamtstrategie und bedingen verschiedener Informationen aus den Arbeitspaketen.

Die Besonderheit der Herangehensweise beruht auf der Verfügbarkeit von Schadensinformationen eines ausreichend großen Gebäudebestandes, der einem für das Gebiet nach Norm repräsentativen Bemessungsbeben ausgesetzt war (Standardereignis für Erdbebenzone 3). Durch AP 1 und AP 2 wird sichergestellt, dass zudem Gebäudedaten zu konstruktiven Details und Baumaterialien einfließen.

Das Ziel der analytischen Untersuchungen am historischen Gebäudebestand erklärt sich aus dem gravierenden Widerspruch heraus, den Gebäudesimulationen im direkten Vergleich mit den tatsächlichen Beobachtungen liefern. Wobei der Unterschied zu sowohl pessimistischen als auch optimistischen Folgerungen für eine Gebäudebewertung führen kann. Eigene Voruntersuchungen und aktuelle Publikationen untermauern die Annahme, dass die weitest gehende Konzentration auf die Beschreibung der Trageigenschaften des Mauerwerks in Form von Einzelwänden ursächlich dafür ist. Gegenstand aktueller Forschung auf diesem Gebiet ist es, die Randbedingungen der im Gebäude befindlichen Wände zu untersuchen, zu beschreiben und in die Gebäudesimulation einfließen zu lassen. Besonders hervorzuheben sind hierbei die Bemühungen, die den Tragwiderstand steigernde Koppelwirkung zwischen Mauerwerkswänden zu beschreiben, die sich entsprechend der Eigenschaften der Geschossdecken und Öffnungen im Mauerwerk einstellt.

Die gewonnenen und noch zu gewinnenden Erkenntnisse werden langfristig helfen, das Verhalten von Gebäude als Ganzes wirklichkeitsnäher modellieren und simulieren zu können. Unsicher ist hingegen, inwieweit die damit einhergehende Steigerung des Aufwandes für den planenden Ingenieur – und damit der Anstieg der Kosten dieser Bauweise – den Anforderungen der allgemeinen Baupraxis genügen bzw. eine akzeptable Vorgehensweise darstellen.

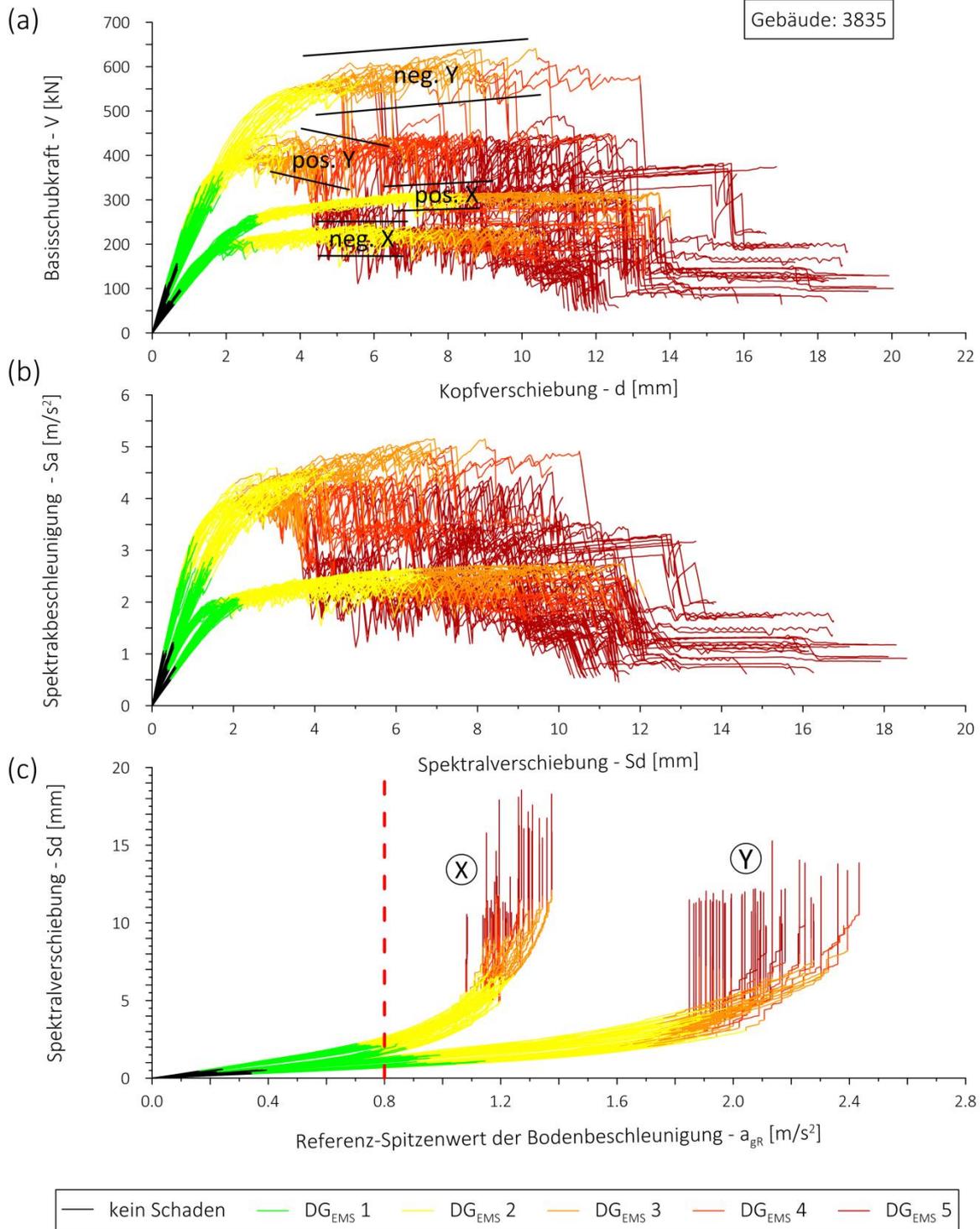


Abb. 11: Berechnungen für das Gebäude mit ID 3835 für unterschiedlichen Lastansätze und Materialannahmen; Kennzeichnung der Gebäudeschädigung nach EMS-Schadensgraden (DG_{EMS}) in unterschiedlichen Darstellungsformaten: Kapazitätskurven (a), Kapazitätsspektren (b) sowie beschleunigungsabhängige Schadenprogression (c)

Hinweis: Mit dem Referenz-Spitzenwert der Bodenbeschleunigung (Fels) $a_{gR} = 0.8 \text{ m/s}^2$ wird auf die Bemessungsbeschleunigung der Zone 3 nach DIN 4149 bzw. DIN EN 1998-1/NA Bezug genommen. Beim Gebäude (ID 3835) wird der Schadensgrad DG_{EMS} 1 bis DG_{EMS} 2 erreicht

Der hier verfolgte Ansatz ist es, die gegenwärtig verfügbaren Simulationswerkzeuge am beobachteten Verhalten zu kalibrieren. Dies betrifft nicht nur den vom Beben betroffenen Gebäudebestand, sondern separat auch Bauwerkstypen, die (noch zu identifizierende) verletzbarkeitsrelevante konstruktive Gebäudemerkmale aufweisen. Zur Identifizierung und Quantifizierung dieser konstruktiven Gebäudemerkmale bedarf es der analytischen Untersuchungen am Gebäudebestand.

Die analytische Untersuchung selbst bildet dabei das Koppelglied, um mit Simulationsmodellen den direkten Zusammenhang zwischen der normengemäßen Beschreibung der Erdbebenintensität und der quantitativen Beschreibung des Bauwerksschadens – die Gebäudeverletzbarkeit – herzustellen. Abb. 10 und Abb. 11 zeigen die prinzipielle Vorgehensweise und Darstellungsmöglichkeiten der Berechnungsergebnisse. Kernpunkt bildet die *Push-Over* Analyse, welche eine statisch nichtlineare Berechnung und die Modal-Analyse zusammenführt, um ein gebäudespezifisches Kapazitätsspektrum zu bestimmen. Das Kapazitätsspektrum als kompakte Beschreibung der Gebäudereaktion unter dem Einfluss eines Erdbebens (oder dynamischen Einwirkungen allgemein) erlaubt es, die erwartete Schädigung infolge eines Erdbebens zu bestimmen. Diese Methode ist im allgemeinen Hochbau für Stahl- und Stahlbeton-konstruktionen etabliert und findet auch zunehmend Akzeptanz für die Anwendung bei Mauerwerksbauten (Berset u.a., 2009).

Derzeit verfügbare Bewertungs- bzw. Analyse-Programme zeigen im Hinblick auf die *Push-Over* Analyse Defizite, die im Mauerwerksbau charakteristischen Mischbauweisen angemessen zu erfassen, was zu erheblich streuenden Ergebnissen und damit hohen Unsicherheiten in der Bewertung führt.

Ausnahme stellt hierbei das Programm 3MURI dar, welches eine gewisse Funktionalität implementiert, um Mischbauweisen differenziert modellieren zu können. Entsprechende Beachtung fand dieses Programm bei der D-A-CH Tagung 2009 – Mauerwerk und Erdbeben – in Zürich, was die generelle Akzeptanz des Problems und der Lösungsmöglichkeit durch die Fachwelt bestätigt (Lagomarsino & Cattari, 2009). Die gegebene Funktionalität und die weitgehende Akzeptanz sind die Kriterien, weshalb dieses Programm in Ergänzung zum Bewertungs-Tool BLM für die analytischen Untersuchungen herangezogen werden soll.

Die Quantifizierung der Verletzbarkeit des Gebäudebestandes bildet die Basis der in AP 5 vorgesehenen Untersuchungen, mit dem Ziel der Identifikation und Quantifizierung der verletzbarkeitsrelevanten konstruktiven Gebäudemerkmale.

Die Informationen aus AP 1 (Verifizierung von Materialkennwerten) sollen dabei helfen, diese Gebäudemerkmale isoliert vom materialspezifischen Einfluss der Mauerwerkswände zu betrachten. Eine wesentliche Frage, deren Beantwortung durch die Ergebnisse dieses Arbeitspaketes zufriedenstellend erfolgen soll, beschäftigt sich mit der Übertragbarkeit der am historischen Gebäudebestand gewonnenen Erkenntnisse auf heutige Gebäude. Die heutige Bauweise unterscheidet sich von jener, die beim Beben 1978 vorherrschte, nicht nur in den Materialeigenschaften von Stein und Mörtel; auch die Wanddicken, Öffnungsstruktur und Deckenausbildung haben sich verändert. Während die Entwicklung der Materialfestigkeiten und Deckenkonstruktionen im Sinne des Erdbebenwiderstandes einen positiven Beitrag vermuten lassen, ist der Einfluss der zumeist geringeren Wanddicken und größeren Öffnungen in den Wänden zu klären.

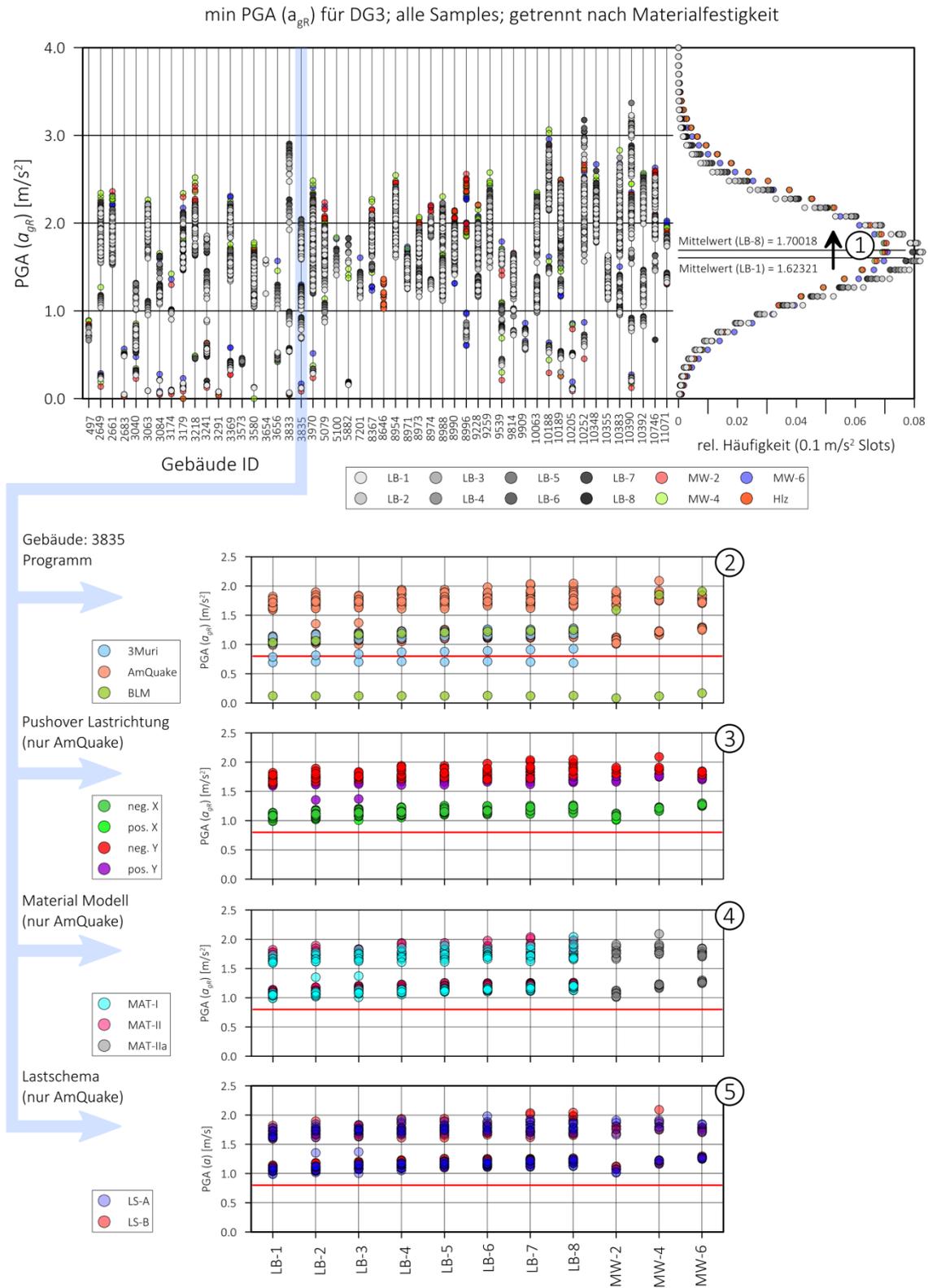


Abb. 12: Auswertung der den Schadensgrad DG_{EMS} 3 verursachenden Beschleunigungen in Abhängigkeit von Modellbildung und Lastansatz

In welchem Maß und Umfang dies von Bedeutung für die Verletzbarkeit aktueller Bebauung gegenüber Erdbebeneinwirkungen ist, soll durch die analytischen Untersuchungen nach dem oben beschriebenen Verfahren (vgl. Abb. 10 und Abb. 11) geklärt werden. Bindeglied bildet hier die Einführung von Schadensgraden gemäß der EMS-98 (vgl. Tabelle 4).

Die Beschreibung der Schadensgrade DG_{EMS} 1 bis DG_{EMS} 5 bildet wiederum die Voraussetzung, um die Ergebnisse der Analysen mit dem beobachteten Verhalten abgleichen zu können. Die Einheitlichkeit und weitgehend eindeutige Definition der Schadensgrade erlaubt zudem die konsistente Übernahme der Erfahrungswerte von anderen (und auch von künftigen) Ereignissen.

Die für die Bewertung im Sinne einer Baunorm notwendige Genauigkeit kann auf diesem Wege erreicht werden, wenn die Kalibrierung der Simulationsmodelle am Verhalten der historischen Bebauung, d. h. anhand quantifizierbarer Entsprechungen der verletzbarkeitswirksamen konstruktiven Details erfolgt. Somit ist es möglich, die Kalibrierung der Modelle entsprechend der heutigen Baugegebenheiten vorzunehmen, um die Gebäudeverletzbarkeit Die

Abb. 12 gibt eine Zusammenschau aller simulierten Varianten und zeigt im Grunde in der Verteilung der Ergebnisse für alle Gebäude, wie der enorme zeitliche und Kapazitätsaufwand letztlich in einer Grafik zusammengefasst werden kann. Aufgelistet sind alle numerisch untersuchten Gebäude nach ihrer Gebäude-Identifikationsnummer (ID).

Für jedes Gebäude wurden Variantenuntersuchungen und Simulationen mit unterschiedlichen Programmen und Materialannahmen (LB-1 bis LB-8, MW-2 bis MW-6) durchgeführt, die sich bereits anhand der Kurven in Abb. 11 nachvollziehen lassen. Für ein Gebäude (ID 3835) werden die im Einzelnen in weiteren Grafiken nochmals aufgeschlüsselt, wobei dadurch auch die Einflussfaktoren deutlich herausgearbeitet werden können.

Die Grafiken in Abb. 12 sind wie folgt zu erläutern bzw. zu interpretieren:

- ① Für die Gesamtheit aller untersuchten Varianten ergibt sich eine Verteilung der für den **Schadensgrad DG_{EMS} 3** erforderlichen Bodenbeschleunigungen, um diesen Schadensgrad an den untersuchten Mauerwerksgebäuden zu generieren. Der Mittelwert liegt dabei je nach Materialfestigkeit zwischen 1,6 und 1,7 m/s^2 . Für die Gesamtheit der untersuchten Objekte zeigt sich, dass mit der Veränderung der Materialannahmen auch die schadensrelevante Beschleunigung höher ist. Die Gesamtheit dieser Untersuchung kann für die einzelnen Gebäude im Detail nachvollzogen werden (siehe 4.2).
- ② Die Ergebnisse für die einzelnen Varianten in Abhängigkeit von den Programmen verdeutlichen eine große Streubreite, wobei grundsätzlich die Verantwortung der Materialkennwerte geringeren Einfluss haben als die in den Programmen selbst implementierten Berechnungsmodelle.
- ③ Berechnungen mit dem Programm AmQuake zeigen für das Gebäude mit der ID 3835 in den jeweiligen Gebäuderichtungen größere Unterschiede; diese dominieren gegenüber dem Einfluss der Materialfestigkeiten. Verglichen werden die für den Schadensgrad DG_{EMS} 3 erforderlichen Beschleunigungen mit der Beschleunigung der Zone 3 nach DIN 4149. Der dort zugeordnete Bemessungswert der Grundbeschleunigung von 0,8 m/s^2 für Fels wird durch alle Varianten überboten. Das heißt, die Gebäude sind alle in der Lage, diese Bemessungsbeschleunigung mit einem Schadensgrad DG_{EMS} 3 und weniger, d. h. unter Einhaltung der Schutzziele der Norm, zu überstehen.

④ Dargestellt wird der Einfluss der Materialannahmen auf die Berechnungsergebnisse ebenfalls für das Programm AmQuake. Hier lässt sich zeigen, dass die Variationen in den Materialannahmen einen erheblichen Einfluss haben. Es gilt auch hier, dass in allen Varianten die für den Schadensgrad erforderlichen Beschleunigungen größer sind als der durch die Norm zugrunde gelegte Beschleunigungswert von $0,8 \text{ m/s}^2$ für die höchste Zone 3.

⑤ Unterschieden wird zwischen dem Lastschema der Deckenlasten, die ebenfalls einen Unterschied erkennen lassen, wobei sich die Annahmen für die Materialfestigkeiten erneut weniger signifikant niederschlagen. Auch hier gilt in allen Fällen, dass die Beschleunigungen grundsätzlich mit einem Faktor bis 2 größer als die Normbeschleunigung sein müssten, um den bewertungsrelevanten Schadensgrad 3 zu bedingen.

Analoge Ergebnisse für **Schadensgrad $DG_{EMS} 4$** können in Abb. A3-1 vorgelegt werden.

Insofern ist allein durch diese Gesamtdarstellung bereits zu begründen, dass die untersuchten Gebäude in Albstadt, die nicht nach Erdbebenvorkehrung ausgelegt wurden, aufgrund der analytischen Untersuchungen eine Widerstandsfähigkeit besitzen, die einen rechnerischen Erdbebennachweis gestatten.

Dies ist eine Besonderheit angesichts der Situation, dass die Überprüfung ihrer Schubwandflächenanteile (als Kriterium für die Zulässigkeit der Einordnung als „einfaches Mauerwerk“) für die Bewertung zu priorisieren sein sollte.

Dies hat strategische Konsequenzen dahingehend, dass die gegenwärtig verwendeten Angaben zum „einfachen Mauerwerk“ derzeit für die Gebäudeauslegung keine Erleichterung (bzw. ökonomisch quantifizierbaren Vorteil) bedingen. In diesem Zusammenhang ist auch auf die Auswertung zu den konstruktiven Parametern zu verweisen. Sie zeigen in ihrer Gesamtheit, dass keines der Gebäude im Grunde genommen die Forderung der Schubflächenanteile für „einfaches Mauerwerk“ erfüllt, ungeachtet der Tatsache, dass diese Gebäude beim Albstadt-Beben nicht versagt haben.

Dies ist als eines der essentiellen Ergebnisse des Vorhabens zu werten. Die Ergebnisse lassen eine Minimierung der Schubwandflächen zu und begründen, dass rechnerische Nachweise auch für höhere Beschleunigungswerte geführt werden können, ohne dass ein Bauwerksversagen auftritt (vgl. auch 3.4).

2.4 DIMEBRA – Datenbasis (AP 4)

Das Arbeitspaket beinhaltet den Aufbau einer Infrastruktur zur systematischen Erfassung, Zusammenführung, Bereitstellung und Auswertung von Gebäude-, Versuchs- und Analyse- daten. Grundüberlegungen zur modularen Struktur eines Systems zur verhaltensgestützten Bewertung von Mauerwerksbauten werden aus Vorarbeiten und hier insbesondere aus dem vom Erdbebenzentrum entwickelten Software-Tools (BLM) zur Bewertung von Lehm- und Mauerwerksbauten abgeleitet (s. Abb. 8).

Für das Projekt sollte die Funktionalität von BLM genutzt werden, um die Datenbasis an betroffenen Gebäuden konsistent zu erfassen und für die systematische Untersuchung aufzu- bereiten. BLM zeichnet sich dadurch aus, dass die Beschreibung der Schädigung durch klar definierte Schadensgrade erfolgt und für die einzelnen Schädigungspunkte eine Visualisie- rung des Schadensbildes am Gebäudemodell erfolgt.

Somit ist es möglich, die bei einem Erdbeben geschädigten Bauwerksbereiche inkl. der Rissbilder aufzunehmen und somit den Vergleich zwischen Analyse und Beobachtung in einer digitalen Form vorzunehmen. Die Visualisierung des Schadensbildes ermöglicht es auch, Schwachpunkte im Gebäudeentwurf zu lokalisieren.

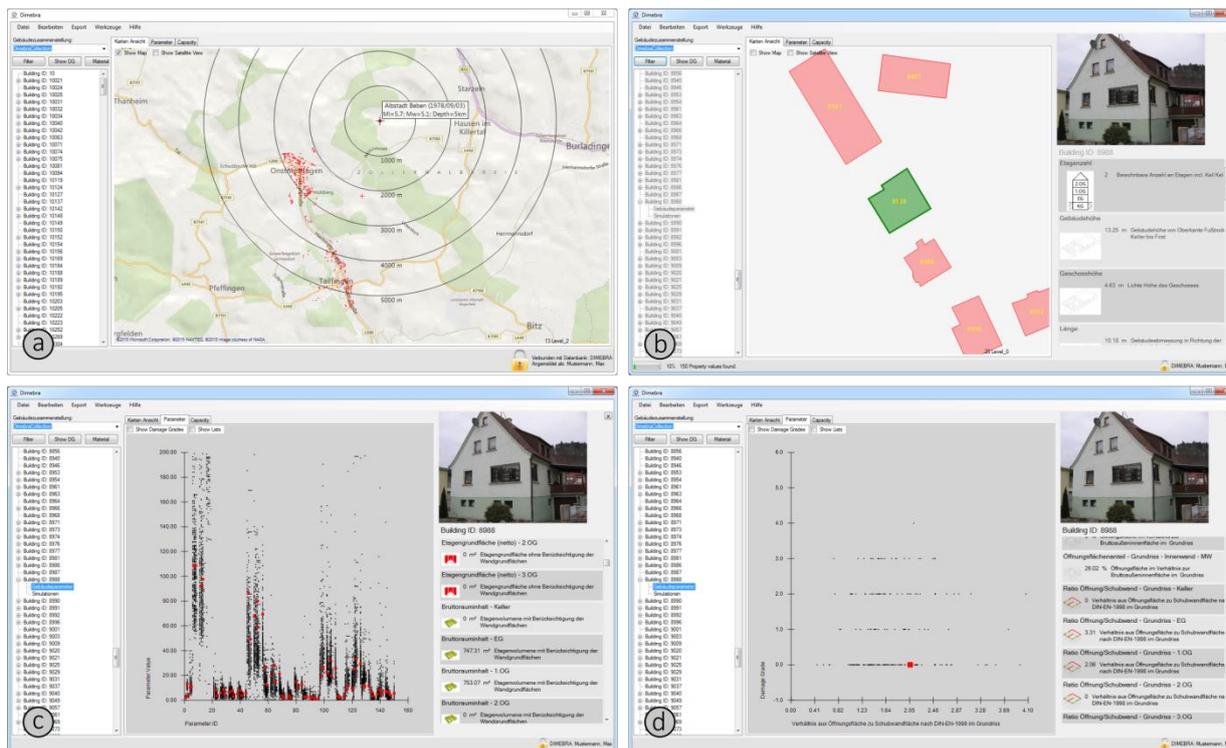


Abb. 13: Graphische Benutzeroberfläche des DIMEBRA-Clients zur Darstellung des DIMEBRA-Datenbank Inhaltes, (a) und (b) Geoinformationen der Gebäude, (c) Konstruktionsparameter des Einzelgebäudes relativ zu allen Gebäuden, (d) Einzelner Konstruktionsparameter relativ zu den Schadensinformationen

Wesentliche Neuerungen, die in diesem Arbeitspaket für das “Digitale Mauerwerk: Erfahrungsbasierte Bewertungskonzepte und Risikoanalysen (DIMEBRA)” umgesetzt werden sollen, sind (vgl. auch Abb. 13):

- Umbau dahingehend, dass die Erfassung der Besonderheiten von konstruktiven Gebäudeparametern der Bestandsgebäude möglich ist;
- Implementierung von Datenbank-Konnektivität, mit dem Ziel der Datenzusammenführung und Datenvorhaltung zur systematischen Bauwerksbestandsuntersuchung hinsichtlich des Einflusses von konstruktiven Gebäudemerkmalen;
- Entwicklung und Einbau von Schnittstellen, um Analyseergebnisse aus Simulationen aufzunehmen und bereitzustellen.
- Implementierung von Algorithmen zur systematischen Suche und Quantifizierung der die Erbebenverletzbarkeit maßgeblich beeinflussenden konstruktiven Bauwerksmerkmale.

Zusammengefasst beinhaltet diese Erweiterung von BLM die Umsetzung der Methodik zur verhaltensbasierten Bewertung von typischen Mauerwerksbauten. Die grundlegenden Bearbeitungsschritte von Modellbildung, Bauwerksanalyse und Schadensprognose werden durch Abb. 13 bzw. Abb. 16 (ausgehend von Abb. 8) im vorgesehenen Fluss der Daten bzw. Informationsebenen veranschaulicht.

Das Arbeitspaket AP 4 schließt ein, den repräsentativen vom Erdbeben 1978 betroffenen Gebäudebestand datentechnisch zu erfassen und für analytische Untersuchungen bzw. Nachweisverfahren zugänglich zu machen. Dies mit dem Ziel, vorhandene und von der Fachwelt akzeptierte Analyse-Programme an der Schadensentwicklung infolge realer Erdbebenereignisse zu kalibrieren, d. h. einen Skalierungsmaßstab hinsichtlich der Schädigung für analytische Untersuchungen bzw. Nachweise zu begründen und zu quantifizieren.

Die Auslegung der Datenbank-Struktur wird in der Art sein, dass eine ausreichende Flexibilität gewährleistet ist, um die Datenbasis stets erweitern (z. B. Bauweisen, Material, Erdbebengebieten) und anpassen (z. B. Analysemethoden) zu können. Die daraus resultierende modulartige softwaretechnische Umsetzung mit klaren Schnittstellen entsprechend der Arbeitspakete gewährleistet, dass die Projekt-Ressourcen effizient und kontinuierlich eingesetzt werden.

2.5 DIMEBRA – Berechnungshilfsmittel (AP 5)

Grundlegende Überlegungen zur Annäherung an die Qualität des Erdbebenverhaltens werden von Schwarz et al. (2009) zur Diskussion gestellt. Im Beitrag wird systematisch die für die Erdbebenwiderstandsfähigkeit relevante Wandgeometrie ausgewertet. Beispielsweise wurden Schubwände in Gebäuden identifiziert und deren Beiträge am Tragwiderstand des Gebäudes in den beiden Haupttragrichtungen (hier: längs/quer bzw. x/y) für jedes Geschoss separat aufsummiert. Als quantifizierbarer Indikator dient die Summe der Schnittflächen dieser Wände im Grundriss bezogen auf die Bruttogeschossfläche, welcher mit dem Schadensgrad in Korrelation gebracht werden kann. Aus der Reinterpretation der Gebäudesituation im Erdbebengebiet Albstadt kann gefolgert werden, dass ein Großteil der untersuchten Gebäude einen Schubflächenanteil im Bereich der Grenzwerte nach DIN 4149:2005 bzw. darunter besitzt. In keinem Fall ist jedoch ein kritischer Schadensgrad (größer $DG_{EMS} 3$ nach EMS-98) aufgetreten.

Im Projekt wird (vertiefend in AP 6) auf die Kenngröße der normativ geforderten Schubwandfläche je Gebäudegeschossfläche zurückgegriffen. Die weiteren Parameter stehen fortführend über auf die Projektstudie hinaus für eine Klassifizierung des jeweils betrachteten Gebäudes in Form eines objektspezifischen Gebädefaktors zur Verfügung. Mit Hilfe dieses Faktors wäre es möglich, basierend auf bereits durchgeführte analytische Berechnungsergebnisse ähnlicher Mauerwerksstrukturen vergleichend mit Hilfe der Datenbank einen rechnerischen Erdbebennachweis durchzuführen.

Im Rahmen dieses Arbeitspaketes werden in analoger Weise weitere Gebäudedaten erhoben. Insbesondere von Gebäuden, die trotz ungünstiger Standortparameter bzw. Untergrundbedingungen nahezu unbeschädigt blieben, um hier im Vergleich Rückschlüsse auf die Indikatoren der Schädigung (Konstruktion, Material, Standort, etc.) ziehen zu können.

Erzielte Ergebnisse sind die Aufschlüsselung von 267 Gebäuden entsprechend der Gebäudetypologie, Deckenkonstruktionen, verwendeten Materialien in den Geschossen und Ermittlung der Werte der folgenden Parametergruppen:

- Einfache Geometriemerkmale (Wanddicken, -längen und -höhen);
- Schubwandflächen in den Grundrissen der einzelnen Geschosse;
- Grundriss- und Aufriss-Struktur (für beide Haupttragrichtungen);
- Relationen zwischen Längen (Schlankheit), Flächen (Wandanteil mit/ohne Öffnungsanteil bzw. Öffnungsanteil in Grund- und Aufriss für beide Haupttragrichtungen und die Kubatur.

Insgesamt wurde für 267 Gebäude ein Parameterpool von bis max. 174 unterschiedlichen Merkmalen herausgearbeitet. In der Anlage A2 sind die ermittelten Gebäudeparameter aufgelistet, welche sich dann weiter in die Geschoss- und Richtungsabhängigkeit verfeinert.

Die Erfassung der bauweisenspezifischen Konstruktionsmerkmale (in Form einer vorläufigen Gebäude- und Parameter-Informationsliste vGPIL) bildet ein zeiteffiziente Vorstufe für die Einordnung der Erfahrungswerte (aus dem beobachteten Erdbebenverhalten) und ihre Verallgemeinerung in Regeln für „einfache Mauerwerksgebäude“.

Die konstruktiven Gebäudeparameter wurden ebenfalls hinsichtlich ihrer Sensitivität und deren Korrelation gegenüber den aufgetretenen Schadensgraden untersucht. Ermittelt wurde der Sensitivitätsindex 1. Ordnung nach Saltelli u.a. (2008). Dieser Parameter stellt eine Kenngröße dar, die den globalen Einfluss einer Eingangsgröße auf eine Ausgangsgröße quantifiziert.

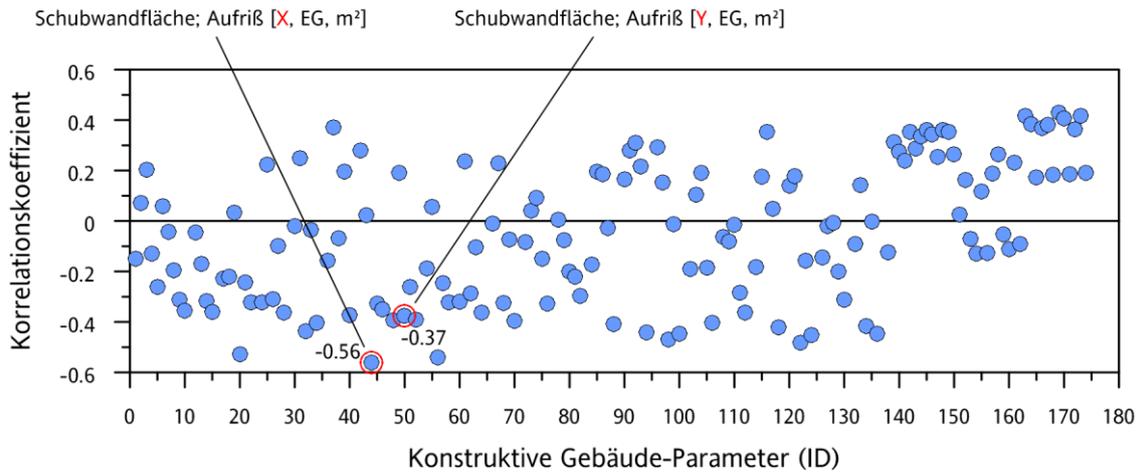
Abb. 14 zeigt die ermittelten Werte für die untersuchten Gebäude, wobei die konstruktiven Gebäudeparameter die Eingangsgröße darstellen und der beobachtete Schadensgrad die Ausgangsgröße. Die intendierte Anwendung dieser Methode ist die Modellbewertung, dabei ist es elementar, dass man in der Lage ist, alle Modelleingangsgrößen zu variieren.

Bei den hier untersuchten Gebäuden sind die Werte der Eingangsgrößen fest durch die Realität gegeben. Zusätzlich ist nicht sicher, dass die erhobenen Parameter die alleinigen, die die Schädigung beeinflussenden sind. Dessen bewusst wurden beide Kennwerte ermittelt (s. Abb. 14(a) und 14(b)).

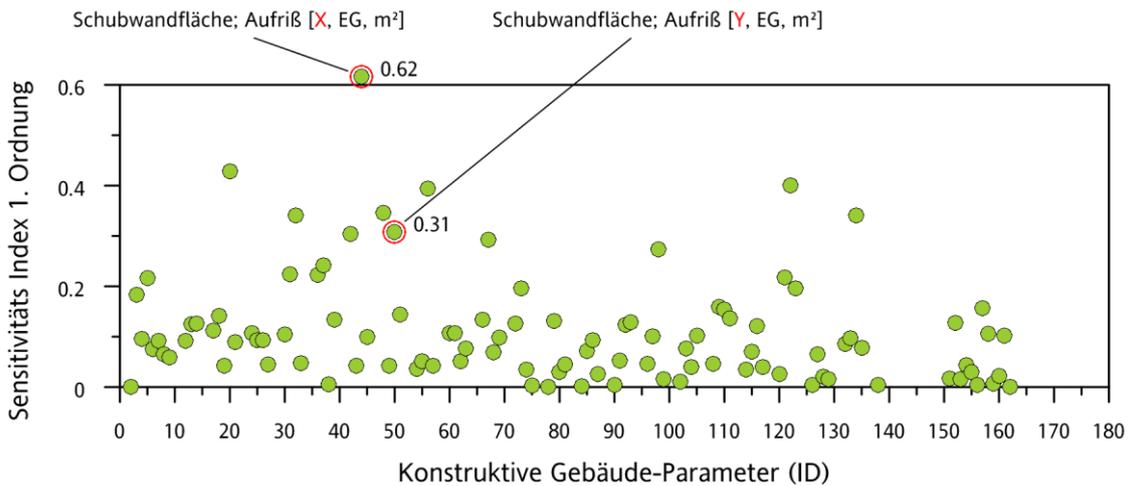
Abb. 14(a) zeigt die berechneten Korrelationskoeffizienten, der betragsmäßig größte Einfluss auf den Schaden hat; demnach die Schubwandfläche in Aufriss und EG in Richtung der lokalen Gebäudeachse X. Der Wert in die andere Gebäuderichtung Y ist geringer.

Die Tendenz, dass bei größerer Wandfläche die Schadens erwartung sinkt, ist schlüssig. Zu erwarten wäre allerdings auch, dass die Werte in X und Y Richtung sich weniger unterscheiden. Dass dies nicht der Fall ist, kann mehrere Gründe haben. Einerseits kann die Zahl der ausgewerteten Gebäude zu gering sein und die Parameter gleichen sich im Wert mit steigender Zahl berücksichtigter Gebäude an. Wahrscheinlicher ist jedoch, dass andere Gebäudeparameter in Wechselwirkung mit dem untersuchten Parameter stehen. Das hat zur Folge, dass der Ursache-Wirkungs-Zusammenhang nicht linear ist und eine lineare Korrelation nicht zutreffende Ergebnisse liefern muss.

Das gilt analog für die Sensitivität (Abb. 14(b)). Im Zusammenhang mit der Projektbearbeitung war zu schlussfolgern, dass diese Verfahren im Weiteren für die gegebene Problemstellung keine Anwendung finden. (Insofern trägt die Wiedergabe der Ergebnisse ausschließlich informativen Charakter.)



(a) Linearere Korrelationskoeffizienten der konstruktiven Gebäudeparameter bezogen auf den Schadensgrad



(b) Sensitivität Index 1. Ordnung aller Parameter Gebäudeparameter hinsichtlich des aufgetretenen Schadensgrades.

Abb. 14: Anwendung von Sensitivitätsmethoden zu Klärung der Korrelation zwischen den konstruktiven Gebäudeparametern und der aufgetretenen Schadensgrade auf der Basis von 267 ausgewerteten Gebäuden

Hinweis: Auffällig ist zu unterstellende Sensitivität zwischen Reaktion und Schubwandfläche

3 Ergebnisse der Untersuchungen und ihre normentaugliche Aufbereitung

3.1 Einordnung

Ziel ist die Beschreibung der verletzbarkeitsrelevanten konstruktiven Details und deren Wirksamkeit entsprechend der Gebäudekonfiguration, mit Hinblick auf eine Ergänzung zur Normenreihe DIN EN 1998 in Form eines Nationalen Anhang mit dem Thema „Erfahrungs- und Verhaltensbasierte Bemessungskonzepte“.

Die herausgearbeiteten konstruktiven Details werden entsprechend ihres Einflusses auf die Schadensanfälligkeit eines Gebäudes zusammengefasst und aufbereitet (3.2). Wenn ein rechnerischer Nachweis entsprechend der Gebäudeklasse erforderlich ist, weil die Kriterien für konstruktive Mindeststandards nicht erfüllt sind, wird überprüft, in welcher Form die Wirksamkeit der konstruktiven Details erfasst werden kann und durch welche methodische Vorgehensweise die Diskrepanz in der Aussage zwischen Berechnungsmodellen einerseits und dem realen beobachteten Bauwerksverhalten kompensiert werden kann. Gesucht werden Ansatzpunkte, offensichtliche Defizite im gegenwärtigen Nachweisverfahren zu identifizieren und auch auf Grundlage der Erfahrungswerte begründen zu können.

Die ingenieurtechnisch anspruchsvollen Untersuchungen sollen konkret und in ingenieurmäßige Vereinfachung zusammengefasst werden. Orientiert wird dabei an den „Regeln für Einfaches Mauerwerk“, die in der Norm in Tabellen mit allgemein-konstruktiven baustein-spezifischen Mindestanforderungen ihren Niederschlag gefunden haben und sich u. a. in der zulässigen Geschoßzahl widerspiegeln (vgl. Tabelle 5).

3.2 Konstruktive Parameter für Einfache Mauerwerksbauten

3.2.1 Einordnung der Gebäude nach Schadensgrad und Untergrundklasse

Aus der Parameteranalyse von den 245 Gebäuden der Positiv- und Negativliste sind zunächst folgende Feststellungen abzuleiten:

- Parameter der Schubwandflächenanteile werden für jedes Geschoss und separiert nach x- und y-Richtung ermittelt.
- Alle Gebäude befinden sich in Albstadt (Onstmettingen und Tailfingen), d.h. in der Erdbebenzone 3.
- Alle Gebäude befinden sich in der Untergrundklasse B-R (Bodenfaktor $S = 1.25$) oder C-R ($S = 1.5$)
- Alle Gebäude können der Tabellenspalte $a_{gr} \cdot k \cdot \gamma$ ($\gamma = 1,0$ oder $1,2$) $\geq 0,9$, d.h. Mindestschubwandfläche von 4% (1-Geschoss je Richtung und Geschoss bzw. 8 % (2-Geschosse) zugeordnet werden.
- alle Gebäude der Parameterstudie sind ältere Gebäude aus Bimsstein, Schwemmstein oder Leichtbeton mit Kellergeschossen aus Stampfbeton oder vereinzelt Stahlbeton.

3.2.2 Einordnung der Gebäude nach Schadensgrad und Schubwandfläche

Grundsätzlich besteht die Frage, wie Differenzen in der tatsächlichen und simulierten Schädigung systematisch dargestellt und zur Weiterbearbeitung aufbereitet werden können. Zu unterscheiden ist hierbei zwischen der Situation am historischen Gebäudebestand und den Gebäuden, wie sie heute üblicherweise gebaut werden und nachgewiesen werden müssen (vgl. auch 5.2). Hervorzuheben ist, dass konstruktive Details, die das Erdbebenverhalten der älteren Bebauung maßgeblich beeinflusst haben, durch die Gegenüberstellung von Beobachtung und Simulation belegt werden können. Zunächst wird überprüft, wie sich an der Gesamtschau der Gebäude und des beobachteten Verhaltens die Regeln für „einfaches Mauerwerk“ (am Maßstab „Anteil der Schubwandfläche“) darstellen.

Ergebnisse (I):

- (1) Sind die untersten Geschosse aus Stahlbeton- oder Stampfbetonbauweise errichtet, können diese von der Anzahl der Vollgeschosse abgezogen werden, auch wenn das Geschoss kein reines Kellergeschoss, sondern beispielsweise ein Erdgeschoss ist.
- (2) Nahezu alle Gebäude, insbesondere der 2-geschossigen Bauweise, halten die normativen Grenzwerte der DIN 4149 bzw. des NA für den vereinfachten Nachweis nicht ein. Dies gilt sowohl für die Gebäude mit Schädigung (*Negativliste*) als auch ohne Schädigung (*Positivliste*). [Hinweis: In der Positivliste werden Gebäude mit hoher Verletzbarkeit (Schwemmstein- oder Bimssteinmauerwerk, ohne Schädigung nach dem Erdbeben 1978, auf dem ungünstigsten anzutreffenden Bodenverhältnissen nach der DIN und Bodeneinstufung (Schwemmflächengebiete, Junge Talfüllungen und Flussablagerungen: einzustufen als Felshorizont mit geringmächtigen Sedimentablagerungen (B-R) und (C-R)) zusammengefasst.]
- (3) Unterstellt man als maßgebliches Schadenskriterium bzw. Nachweisziel die Vermeidung von Schäden an Leib und Leben, darf als Ziel-Schadensgrad $DG_{EMS} 3$ bzw. $DG_{EMS} 4$ angesetzt werden: Beim Erdbeben 1978 haben bis auf 1 Gebäude (nördliches Stadtgebiet von Albstadt-Tailfingen) alle Gebäude dieses Schutzziel eingehalten (Gebäude zwischen Schadensgrad 3 und 4 sollten dabei ggf. nochmals im Detail geprüft werden).
- (4) Schwemmstein- und Bimssteinmauerwerk kann gemäß Norm nicht in die Steifigkeitsklasse 4 eingestuft werden und könnte somit keinem vereinfachten Nachweis unterzogen werden. Die Auswertungen zeigen, dass trotz der allgemein nicht eingehaltenen Mindestschubwandflächen für die geringste Steifigkeitsklassen alle Gebäude (mit einer Ausnahme) das Schutzziel der Normung erfüllen.
- (5) Die Grenzkriterien der Normungstabelle [NA.12; vgl. Tabelle 5] können somit grundsätzlich als **konservative Vorgaben** angesehen werden.
- (6) Es ist zu prüfen, ob aufgrund der Beobachtungen und Erfahrungswerte für das Normbeben Albstadt 1978 und die untersuchte Bauweise stellvertretend für die Leichtbetonbauweise der vereinfachte Nachweis gemäß dem Unterpunkt 2 ohne die Klausel der Einhaltung der kumulativen Mindestschubwandfläche zzgl. der notwendigen Mauerbereiche mit Einbezug der SFK 4 durchgeführt werden kann (vgl. Vorschlag gemäß Tabelle 5).

Tabelle 5: Angepasste Tabelle NA.12 der (DIN EN 1998-1/NA, 201h1). Mindestanforderungen an die auf die Geschossgrundfläche bezogene Querschnittsfläche von Schubwänden

Anzahl der Vollgeschosse	$a_{gR} \cdot S \cdot \gamma_I \leq 0,6 \cdot k^a \cdot k_r^c$				$a_{gR} \cdot S \cdot \gamma_I \leq 0,9 \cdot k^a \cdot k_r^c$				$a_{gR} \cdot S \cdot \gamma_I \leq 1,2 \cdot k^a \cdot k_r^c$			
	Steindruckfestigkeitsklasse nach DIN 1053-1 ^b											
	2	4	6	≥12	2	4	6	≥12	2	4	6	≥12
1		0,02	0,02	0,02		0,03	0,025	0,02		0,04	0,03	0,02
2	vNz	0,035	0,03	0,02	vNz	0,055	0,045	0,03	vNz	0,08	0,05	0,04
3		0,065	0,04	0,03		0,08	0,065	0,05	KvNz			
4	KvNz			KvNz								

KvNz: Kein vereinfachter Nachweis zulässig

vNz: Vereinfachter Nachweis zulässig. Die Verwendung der Steinfestigkeitsklasse 2 für Außenwände ist zulässig, wenn in jeder Richtung wenigstens 50 % der erforderlichen Wandquerschnittsfläche der Schubwände aus Mauerwerk der Festigkeitsklasse 4 oder höher bestehen. Die Gesamtquerschnittsfläche der Schubwände muss dann die in Tabelle NA.12 für die Steinfestigkeitsklasse 4 geltenden Werte einhalten.

a, b, c: Entsprechend DIN-EN-1998-1/NA; Tabelle NA.12

3.2.3 Einordnung der Gebäude nach Schadensgrad und Schubwandfläche, Exzentrizität und Standortbedingungen

Gemäß der schematischen Abfolge von Abb. 15 werden verschiedene Kriterien (Entwurfs- und Konstruktionskenngößen) bzw. Parameter zur Einordnung der beim Albstadt-Erdbeben 1978 beobachteten Schäden herangezogen.

Die Gebäudetypisierung bezieht sich auf den durch die Archivrecherche qualifizierten Stand (vgl. Abb. 5). Wie in 3.2.2(2) bereits festgestellt lassen sich keine durch einseitige Parameter-Fixierung konstruierbare Zusammenhänge herstellen. – Zusätzlich wurde deshalb auch die Torsionsanfälligkeit durch Bestimmung der Exzentrizitäten in den beiden Gebäudeachsen einbezogen. Die Grafiken in Anhang A geben eine geschossweise Betrachtung, wobei in jedem Fall das Unter- und dann das Obergeschoss einen Einfluss erwarten lassen.

3.3 DIMEBRA-Client-Tool

Im Rahmen der Projektbearbeitung wurde entschieden, die Ergebnisse der systematischen Gebäudeaufnahme (AP 2) und breit angelegten analytischen Auswertungen (AP 3) in eine Datenbankstruktur einzubinden, und der Konzeption bereits die Optionen der Weiterführung, Pflege und längerfristigen Datenerweiterung aufzunehmen, ebenso aber auch die Transformation in ein Berechnungs-Tool, das auf Basis der Erfahrungswerte (Schadensfälle) eine Einordnung der zu planenden Gebäude (auch anderer Hauptbaustoffe und Systeme z.B. in Form von Ausfachungen) ermöglicht die Bewertung der Konstruktiven Parameter „einfacher Mauerwerksgebäude“ mit verschiedenen Ansätzen der analytischen Bewertung für unterschiedliche Einwirkungs- und Standortvorgaben verbindet und somit über alle Eigenschaften und Optionen eines geodatenbasierten Planungs- und Bewertungsinstrumentariums verfügt.

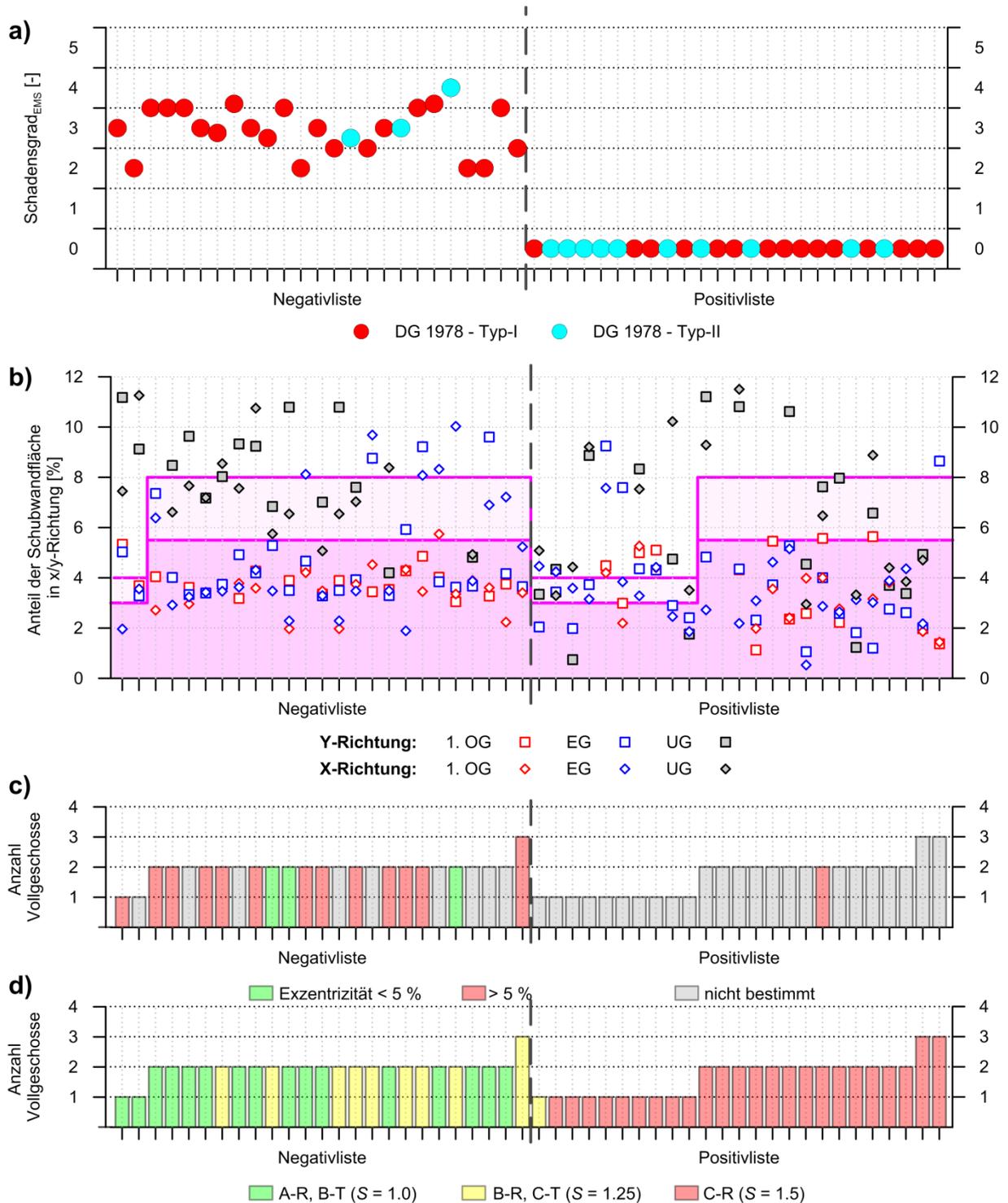


Abb. 15: Unterscheidung der Gebäude der Positiv -und Negativliste nach (a) Deckentypen (Typ I Holzbalkendecke und Typ II Stahlbetondecke), (b) Schubwandflächen im Gebäude für alle Etagen inklusive der Grenzkriterien nach (DIN EN 1998-1/NA, 2011), (c) die Exzentrizität des Gebäudes und (d) die Untergrundsituation jedes Gebäudes in der Klassifikation nach (DIN EN 1998-1/NA, 2011).

Rein konzeptionell kann dabei auf die Funktionalität von BLM orientiert werden, um die Datenbasis an betroffenen Gebäuden konsistent zu erfassen und für die systematische Untersuchung aufzubereiten. BLM zeichnet sich dadurch aus, dass die Beschreibung der Schädigung durch klar definierte Schadensgrade erfolgt und für die einzelnen Schädigungspunkte eine Visualisierung des Schadensbildes am Gebäudemodell erfolgt.

Somit ist es möglich, die bei einem Erdbeben geschädigten Bauwerksbereiche (inkl. der Rissbilder) aufzunehmen und somit den Vergleich zwischen Analyse und Beobachtung in einer digitalen Form vorzunehmen. Die Visualisierung des Schadensbildes ermöglicht es auch, Schwachpunkte im Gebäudeentwurf zu lokalisieren.

Wesentliche Neuerungen, die im Rahmen der Arbeitspakets “Digitale Mauerwerk: Erfahrungsbasierte Bewertungskonzepte und Risikoanalysen (DIMEBRA)” erreicht wurden, lassen sich anhand von Abb. 13 und Abb. 16 nachvollziehen:

- Erfassung der Besonderheiten von konstruktiven Gebäudeparametern der Bestandsgebäude.
- Implementierung bzw. Herstellung von Datenbank-Konnektivität mit dem Ziel der Datenzusammenführung und Daten-Kompatibilität mit dem Ziel des Vergleichs insbesondere der mit unterschiedlichen Software-Lösungen berechneten Gebäude-Kapazitäten und charakteristischen Schädigungsgrade (siehe Abb. 16).
- Entwicklung und Einbau von Schnittstellen zur Übernahme der Analyse- und Simulationsergebnisse.
- Implementierung von Algorithmen zur systematischen Suche und Quantifizierung der die Erdbebenverletzbarkeit maßgeblich beeinflussenden konstruktiven Bauwerksmerkmale.

Die grundlegenden Bearbeitungsschritte von Modellbildung, Bauwerksanalyse und Schadensprognose werden durch Abb. 15 im vorgesehenen Fluss der Daten bzw. Informationsebenen veranschaulicht. Mit dem DIMEBRA-Client-Tool steht zur Darstellung der DIMEBRA-Datenbank interaktiv gestaltete Eingabe- und Abfragemöglichkeiten (mit dem bisherigen Bearbeitungsstand) zur Verfügung und stellen somit eine wesentliche Erweiterung dar.

Abb. 13 vermittelt einen Eindruck von Graphischer Benutzeroberfläche des DIMEBRA-Clients zur Darstellung der DIMEBRA-Datenbank. Die *Screen-shots* zeigen:

- Geoinformationen der Gebäude (a,b);
- Konstruktionsparameter des Einzelgebäudes relativ zu allen Gebäuden (c);
- Einzelner Konstruktionsparameter relativ zu den Schadensinformationen (d);
- Kapazitätskurven und-spektrien (inklusive der qualitativen Schadensprognose) des untersuchten bzw. ausgewählten Gebäudes bzw. Schadensinformationen bei vorgegebene Einwirkungen (e);
- Import-Funktionalität für alle drei (bis dato implementierten und) zur Anwendung gekommenen Simulationsprogramme incl. Schadens-Mapping (f),
- Dämpfungsberechnung über den gesamten Verformungsbereich (g) und
- Verletzbarkeitsberechnung für alle 6 möglichen Untergrundklassen entsprechend der (DIN EN 1998-1/NA, 2011) (h).

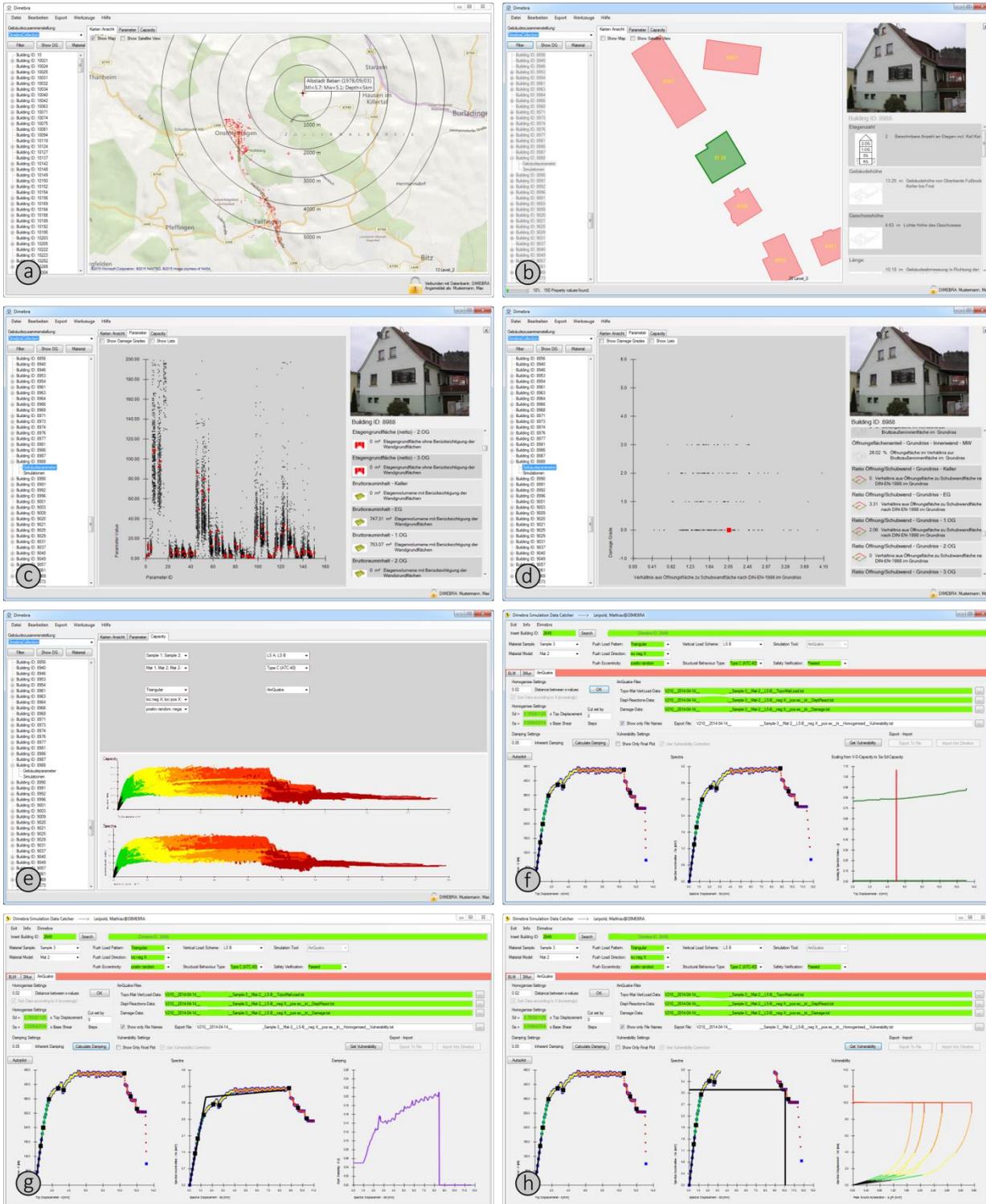
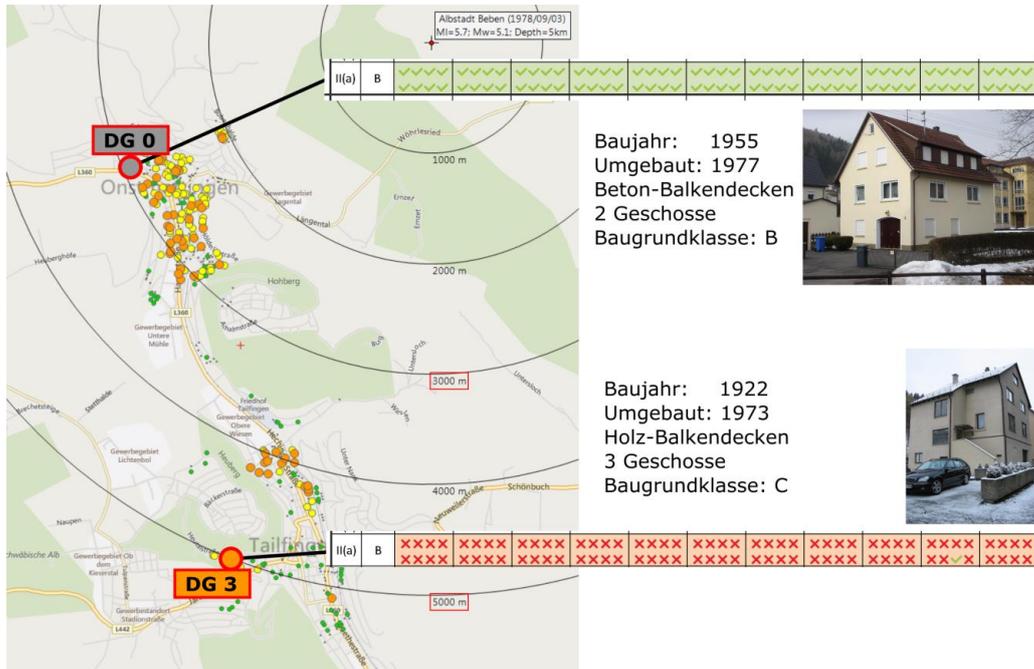


Abb. 16: Graphische Benutzeroberfläche des DIMEBRA-Clients zur Darstellung des DIMEBRA-Datenbank und des interaktiv gestalteten Inhalts bzw. Angebots: (a) und (b) Geoinformationen der Gebäude, (c) Konstruktionsparameter des Einzelgebäudes relativ zu allen Gebäuden, (d) Einzelner Konstruktionsparameter relativ zu den Schadensinformationen, (e) Kapazitätskurven und Kapazitätsspektren mitsamt der Schadensinformationen der gewählten Gebäudes, (f) Importfunktionalität für alle drei zur Anwendung gekommenen Simulationsprogramme incl. Schadens-Mapping, (g) Dämpfungsberechnung über den gesamten Verformungsbereich und (h) Verletzbarkeitsberechnung für alle 6 möglichen Untergrundklassen entsprechend der (DIN EN 1998-1/NA, 2011)

3.4 Rechnerische Nachweise

Als letzte Betrachtungsebene kommen rechnerische Nachweise zur Anwendung. Abb. 17 veranschaulicht die im Vorhaben nur exemplarisch begonnenen Untersuchungen für jeweils zwei Objekte der Positive- bzw. Negativlisten. Die Symbole „X“ bzw. „✓“ stehen für den Erfolg („Nachweis nicht erfüllt“; „Nachweis erfüllt“).



(a)

ID	Liste	Vereinfachter Nachweis DIN EN 1998-1/NA:2011-1			Mat	LS	LB-1	LB-2	LB-3	LB-4	LB-5	LB-6	LB-7	LB-8	MW-2	MW-4	MW-6						
		Zone 1	Zone 2	Zone 3																			
2683	negativ	X (X)	X (X)	X (X)	I	A	X	X	X	X	X	X	X	X	X	-	-	-					
							X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	-	-	-	
							X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
							X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
3040	negativ	X (X)	X (X)	X (X)	I	A	X	X	X	X	X	X	X	X	X	-	-	-					
							X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	-	-	-	
							X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
							X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
10252	positiv	✓ (✓)	X (X)	X (X)	I	A	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	-	-	-					
							✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	-	-	-	
							✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
							✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
10383	positiv	X (X)	X (X)	X (X)	I	A	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	-	-	-					
							✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	-	-	-	
							✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
							✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓

+X	+X	-X	-X
exc.pos	exc.neg	exc.pos	exc.neg
+Y	+Y	-Y	-Y
exc.pos	exc.neg	exc.pos	exc.neg

✓	✓	✓	✓
X	X	X	X
X	X	X	X

Nachweis erfüllt
Nachweis nicht erfüllt

(b)

Abb. 17: Beispiele für den rechnerischen Nachweis und Illustration der eingeführten Varianten

Insgesamt werden alle Varianten (vgl. Abb. 12)

- unter Einführung der unterschiedlichen Materialnahmen (vgl. Abb. 3, Tabelle 1),
- unter Ansatz von zwei Modellen für Deckenlasten (vgl. Abb. 9) und
- in vier Lastrichtungen (+, - jeweils für x- und y Richtung)

ausgewertet.

Das Schema in Abb. 17(b) verdeutlicht den Umfang der analytischen Untersuchungen; in jedem „Kästchen“ werden jeweils 8 Teilberechnungen vorgestellt. Sie beziehen sich auf Lastansatz in x- und y-Richtung.

In den Spalten „Vereinfachter Nachweis DIN-EN 1998-1 NA“ wird vermerkt, inwieweit für die Zonen 1 bis 3 mit den Schubflächenanteilen und konstruktiven Parametern der Nachweis für „einfaches Mauerwerk“ erfüllt werden kann. Wie sich am Beispiel von ID 1052 zeigen lässt, gelingen diese nur für die Zone 1 und nicht für die Zone 2. Im Gegensatz dazu stehen die analytischen Untersuchungen, die für alle Varianten und Materialannahmen die Gewährleistung der rechnerischen Nachweisführung anzeigen.

In dieser Form wurde mit der Gebäudeauswertung begonnen, so dass ein qualifiziertes Bild über den Vergleich zwischen vereinfachtem und rechnerischem Nachweis erst bei Vervollständigung bzw. Erweiterung der Untersuchungen (zumindest auf die in CAD-Files umgesetzten Gebäude) zeichnen lässt. Berechnungen beziehen sich hier auf das Programm AmQuake.

Ergebnisse (II):

- (7) Während sich in einigen Beispielen der rechnerische Nachweis (problemlos) führen lässt, versagen „vereinfachte Nachweise“.
- (8) Es gibt Fälle, da zeigen beide Nachweise gleiche Tendenzen; es gibt aber auch Fälle (Gebäude), bei denen in Abhängigkeit von den Berechnungsansätzen Nachweis partiell erfüllt werden bzw. nicht erbracht werden können (vgl. Abb. 17(b)).
- (9) In den untersuchten Varianten bestätigt sich tendenziell, das Gebäude mit höheren Schadensgraden auch Probleme in der Nachweisführung aufweisen. So ist das Gebäude der „*Negativliste*“ mit Schadensgrad $DG_{EMS} 3$ in allen Varianten nicht als „erdbebensicher“ nachweisbar; das Gebäude der „*Positivliste*“ würde im Falle des „vereinfachten Nachweises (in einem Beispiel) in keiner Zone bzw. nur in Zone 1 (anderes Beispiel der Abb. 17 (b) den Anforderungen genügen.
- (10) Daraus leiten sich neue Strategien im Hinblick auf die Gestaltung der Normung ab. Es sollte möglich und zielführend sein, die Vereinfachung der Nachweiskriterien über einen hybriden Ansatz ausgehend von den rechnerischen Variantenuntersuchungen und in Spiegelung der empirischen Datenlage weiter zu qualifizieren.

3.5 Zusammenfassende Übersicht

Tabelle 6: Übersicht zu den wichtigsten Ergebnissen des Vorhabens; gestaffelt nach Arbeitspaketen

AP 1 Verifizierung Materialkennwerte
<ul style="list-style-type: none"> ○ Festlegung von Streubereichen der Materialkennwerte und Umsetzung im Rahmen von Sensitivitätsstudien
AP 2 Bestandsgebäude
<ul style="list-style-type: none"> ○ Archivierung und Datensicherung von 602 Gebäuden der Positiv- und Negativliste, mit Herausarbeitung der Materialkennwerte über die Geschosse und Filterung geeigneter Gebäude für die Datenbankeinarbeitung (541 Gebäude) ○ Aufbereitung von 112 Gebäuden mittels CAD in folgende Weise: <ul style="list-style-type: none"> – Grundrisse für alle Geschosse werden auf Grundlage der Archivunterlagen digitalisiert; – aus diesen Grundrissen werden für den Import in 3Muri, AmQuake und BLM konsistente Grundrisse abgeleitet und die zugehörigen Eingabedateien erzeugt, – zusätzlich werden für die für Modellerstellung nötigen Maße im Aufriss, ebenso die jeweilige Deckenspannrichtung und die Wandmaterialien ermittelt und dokumentiert.
AP 3 Analytische Untersuchungen
<ul style="list-style-type: none"> ○ Modelle (<i>digital masonry</i>) bzw. Verletzbarkeitskurven infolge der Simulationen (3Muri, AmQuake, BLM); grafische Aufbereitung der Schadensmechanismen; ○ Dokumentation von Bauwerkskonfigurationen, die zu erheblichen Problemen bei der Simulation selbst führten (je nach verwendetem Programm) oder deren Simulationsergebnisse Potential zu gravierender Fehlinterpretation besitzt
AP 4 DIMEBRA – Datenbasis
<ul style="list-style-type: none"> ○ Entwicklung und Umsetzung einer einsatz- und funktionsfähigen Server-Client-Struktur (Benutzerkontrolle, SSH-Verbindung, Update-Funktionalität, GIS-Implementation)
AP 5 Berechnungshilfsmittel DIMEBRA
<ul style="list-style-type: none"> ○ Parameter- und Sensitivitätsstudien, ○ Einarbeitung einer vorläufige Gebäude- und Parameter-Informationsliste vGPIL in der Datenbank ○ Aufschlüsselung von 267 Gebäuden entsprechend der Gebäudetypologie, Deckenkonstruktionen, verwendeten Materialien in den Geschossen und Ermittlung der Werte unterschiedlicher, für die Ableitung „einfacher Regeln“ überprüfter Parametergruppen: <ul style="list-style-type: none"> – Einfache Geometriemerkmale (Wanddicken, -längen und -höhen); – Schubwandflächen in den Grundrissen der einzelnen Geschosse; – Grundriss- und Aufriss-Struktur (für beide Haupttragrichtungen); – Relationen zwischen Längen (Schlantheit), Flächen (Wandanteil mit/ohne Öffnungsanteil bzw. Öffnungsanteil in Grund- und Aufriss(für beide Haupttragrichtungen) und Kubatur.
AP 6 Normentaugliche Aufbereitung
<ul style="list-style-type: none"> ○ Erweiterung des Untersuchungsgegenstandes auf aktuelle Bauweisen (ausgeführte Objekte und entsprechende Grundriss-Lösungen), die durch Beteiligung der Industriepartner zugeliefert und in die Datenbank aufgenommen werden; ○ Gewährleistung der Umsetzbarkeit der Ergebnisse (als „Musterlösung“); ○ Vorschlag für die vereinfachte Nachweisführung für bis dato ausgeklammerte Leichtbetonsteine (siehe grün markierte Felder in Tabelle 5).

4 Ergebnistransfer in die Wirtschaft

4.1 Umfang der bearbeiteten KMU-spezifischen Gebäude

Abb. 18 vermittelt einen Eindruck von der Anzahl der bearbeiteten Gebäude, wobei zwischen der Erstellung der Modelle (tauglich für die unterschiedlichen Programme) und der Berechnung dieser Modelle mit den konkreten Programmen unterschieden wird. Über die Bearbeitung wurde in den *Newslettern* (s. a. 5.3) regelmäßig informiert. Insofern spiegelt die Entwicklung der Bearbeitungsstände die auch mit den *Newslettern* übermittelten Informationen.

Abb. 19 zeigt (gegenüber der ursprünglichen Zielgröße von 200 Gebäuden) den wesentlich größeren Umfang der Bestandsbauten, deren Bauunterlagen im Rahmen der Archivrecherche gesichert werden konnten, bzw. die Größenordnung der Objekte, von denen mittels der vorläufigen Gebäude- und Parameter-Informationsliste (vGPIL) die konstruktiven Parameter aufbereitet werden konnten. Ebenso dargestellt wird die Anzahl der Gebäude, für die die aus den Archivdaten ermittelten Grundrisse bereits in CAD-Files Daten vorliegen (Abb. 19).

Folgende Feststellungen sind zu treffen:

- Insgesamt konnten 50 Gebäude in die nichtlineare Gebäudeanalyse überführt werden. Diese wurden mit unterschiedlichen Materialannahmen berechnet, so dass die Anzahl der Berechnungsvarianten aus den unterschiedlichen Programmsimulationen und dabei unterstellten Materialkenngrößen unterscheiden. Die Variation der Berechnung spiegelt sich u.a. in den Streubreiten der ermittelten Kapazitätskurven (diese zeigen zudem in den beiden Gebäudeachsen x und y unterschiedliche Tendenzen).
- Es wurden mehr Gebäudegruppen detailliert und in entsprechende Grundrisse überführt, als berechnet werden konnten. Der Kapazitätsaufwand zur Erweiterung der Datenbasis ist erheblich und konnte im Rahmen des Vorhabens nicht geleistet werden. Es ist jedoch dringend zu empfehlen, diese Untersuchung in eine Folgephase mit aufzunehmen.
- Ebenso wird deutlich die Diskrepanz zwischen den konstruktiv ausgewerteten Parametern und den digitalisierten Gebäudegrundrissen. Auch hier wäre es erforderlich, die Anzahl der digitalisierten Gebäude und damit letztlich auch die Anzahl der analytisch untersuchten Objekte wesentlich zu erhöhen und somit die Datenbank auf eine erheblich breitere Grundlage zu stellen.
- Der untersuchte Gebäudeumfang geht weit über die geplanten Untersuchungen hinaus. Die Umsetzung konnte nur dadurch erreicht werden, dass über den genehmigten Bearbeitungszeitraum (bis 31.12.2014) hinaus in weiteren 6 Monaten entsprechende Untersuchungen getätigt wurden (angedeutet durch Stand „AS“= Abschlussbericht).
- Es darf konstatiert, dass das ursprünglich vorgesehene Bearbeitungszeitraum im Umfang von 36 Monaten angesichts der zu erwartenden Datenmenge durchaus gerechtfertigt war und nun in einem für das Vorhaben durch den Antragsteller eingebrachten Mehraufwand geleistet wurde.

Hinzukommen die - für die Bauweise und den aktuellen Nachfragetyp - als repräsentativ zu betrachteten (20) Gebäude, die ebenfalls in den konstruktiven Parametern (nach der vGPIL) ausgewertet wurden (siehe 4.2).

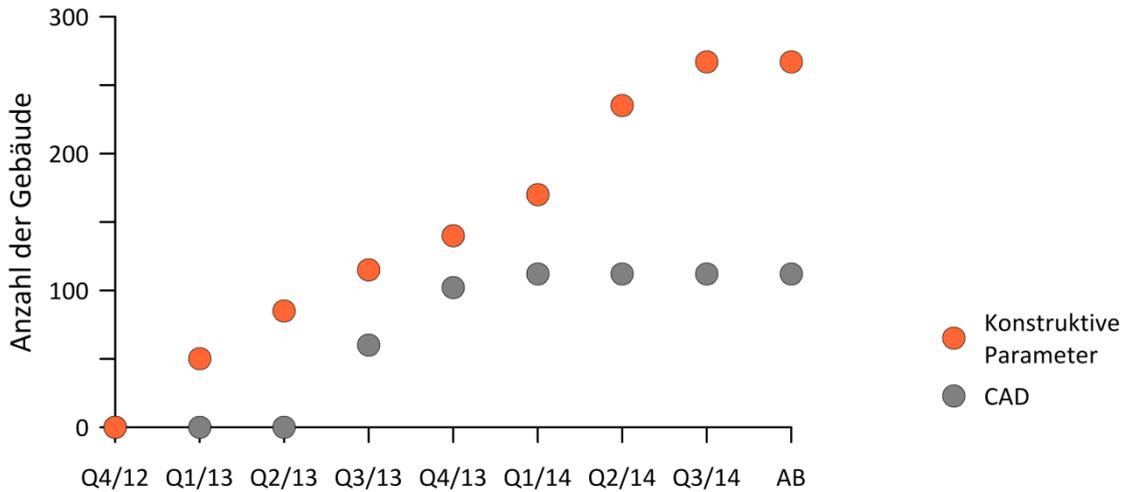


Abb. 18: Projektfortschritt: Ermittlung der konstruktiven Parameter und der CAD-Aufbereitung

Erläuterung: Bsp. Q4/12 ... Newsletter 4. Quartal 2012; AB ... Abschlussbericht

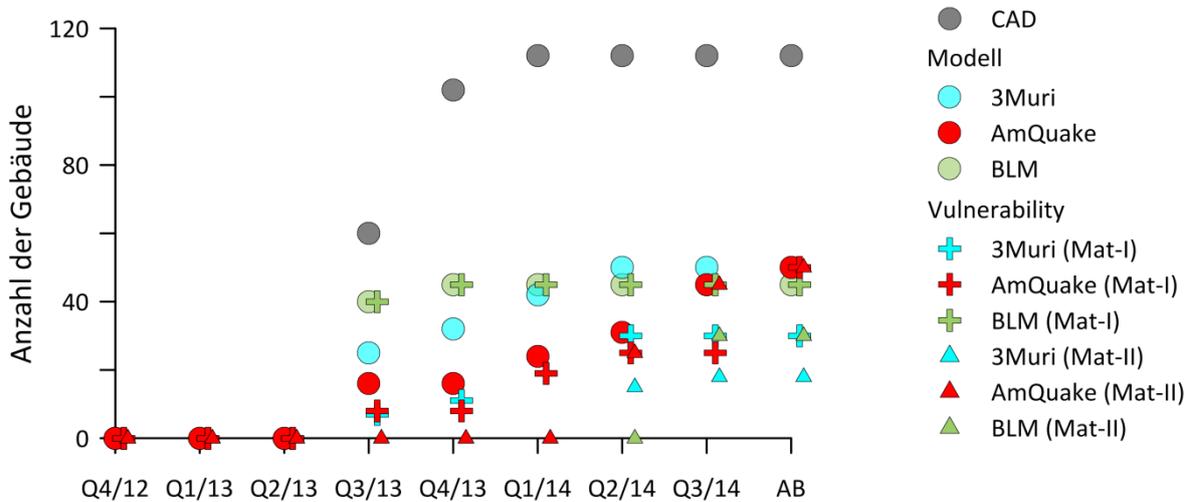


Abb. 19: Projektfortschritt: Gebäudemodellierung, -simulation und Verletzbarkeitsermittlung

4.2 Übernahme von aktuell projektierten Gebäuden

Der Übertragung der Auswertungen des Albstadt-Erdbebens auf die heutige Bebauung stehen die weitere Verschlankung und die Erweiterung des Raum- und Öffnungsangebots der derzeit favorisierten baulichen Lösungen einschränkend gegenüber. Die Ansatzpunkte einer Extrapolation werden dabei gelegentlich übersehen. Um diesen Gesichtspunkten zu begegnen und den Ergebnistransfer in die Wirtschaft zu beschleunigen bzw. längerfristig zu etablieren, wurde eine Erweiterung der DIMEBRA –Datenbank auf aktuelle Bestandsbauten angeregt.

Durch den Verband Leichtbeton e.V. erfolgte eine Zuarbeit von modernen Grundriss-Lösungen (zwecks Aufnahme in die Datenbank und für den Vergleich mit dem vom Erdbeben 1978 betroffenen älteren Gebäudebestand). Insgesamt wurden in einer ersten Tranche 20 Objekte unterschiedlicher Erdbeben-Exposition (Zone) vorgelegt. Die vom KMU übergebenen Pläne moderner Gebäude werden in analoger Weise gemäß AP 3 und AP4 (mit vGPIL) hinsichtlich der konstruktiven und Gebäudeparameter ausgewertet (vgl. Abb. 19).

Die Schubwandflächenanteile ermöglichen eine Einordnung bzw. die Übertragung der am historischen Gebäudebestand gewonnenen Ergebnisse auf heutige Gebäude zu belegen. Anzumerken ist, dass sich die Gebäude in unterschiedlichen Erdbebenzonen befinden. Eingetragen werden für die Zonen 1 und 2 die je nach Anzahl der Vollgeschosse geforderten Schubwandanteile für „einfaches Mauerwerk“. Die schwarz gestrichelte Linie deutet die Absenkung an, die mit den Ergebnissen der Auswertung 3.2.2 (1) begründet werden kann.

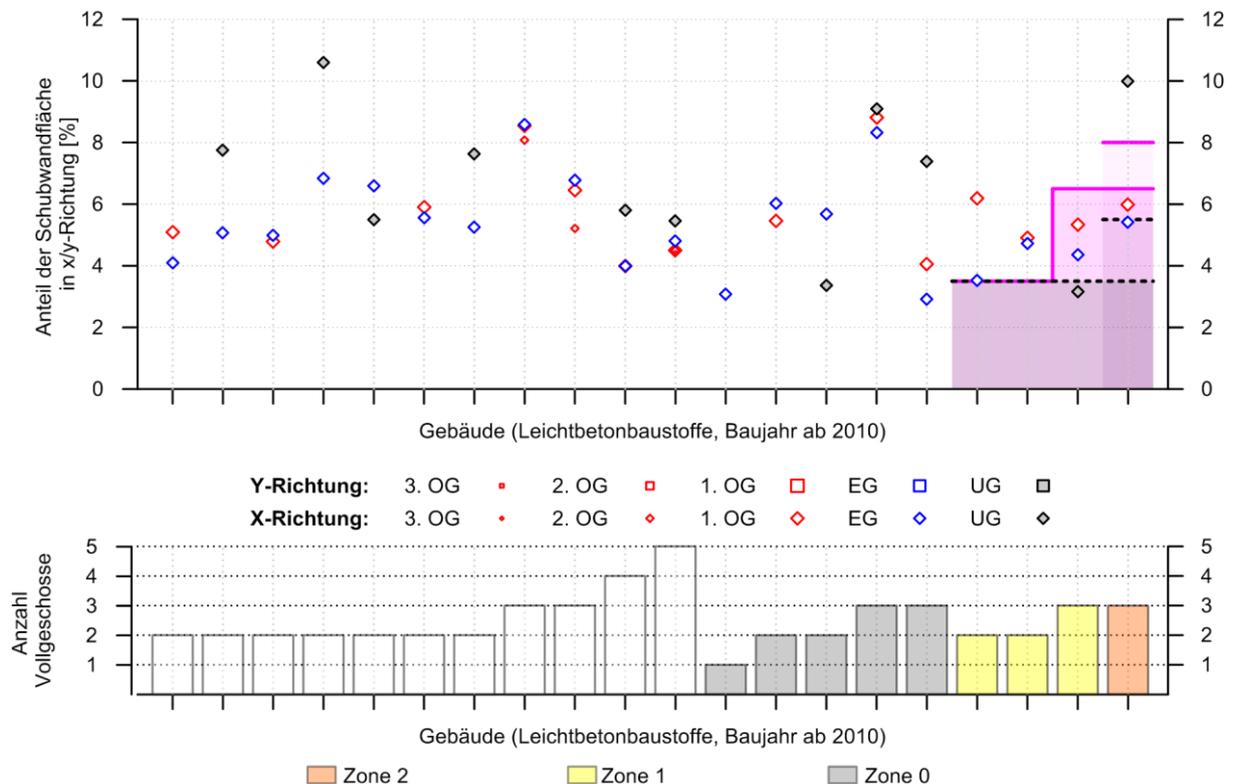


Abb. 19: Auswertung der Schubwandflächenanteile von Gebäuden aus Leichtbetonbaustoffen, die nach 2010 in deutschen Erdbebengebieten geplant wurden

4.3 Newsletter

Um den Informationsaustausch zwischen der durchführenden Forschungsstelle und den Projektpartnern zu gewährleisten, wurden jeweils quartalsweise Kurzberichte in Form von *Newslettern* erstellt, die einerseits den erreichten Projektfortschritt und die Umsetzung der Arbeitspakete dokumentieren, andererseits aber auch die Erweiterung der Datenbank (*Digital Masonry*) verdeutlichen. Dies betrifft:

- die Auswertung der Gebäude im Hinblick auf die konstruktiven Parameter (zur Ableitung vereinfachter Regeln), s.a. Abb. 18;
- die Aufbereitung der Grundrisse für alle Geschosse und ihre Bereitstellung in CAD-Eingabe-Files (s.a. Abb. 18) und letztlich
- die Berechnung der Gebäude mit unterschiedlichen Software-Lösungen (s.a. Abb.).

Dabei ist zu berücksichtigen, dass die Analyse mit unterschiedlichen Materialannahmen erfolgte bzw. wiederholt wurde.

Die *Newsletter* haben wesentlich dazu beigetragen, dass die zunächst halbjährlichen Treffen des projektbegleitenden Ausschusses (PbA) in größeren Zeitabständen durchgeführt werden konnten, ohne dabei seine Funktion und Mitwirkungsmöglichkeit einzuschränken.

Im *Newsletter* wurde insbesondere über die Realisierung der normtaugliche Umsetzung (AP 6) und unter „Sonstige Aktivitäten“ im Wesentlichen über die Transfermaßnahmen informiert; so z.B. im *Newsletter* 2014-Q3 u.a. über Auswertung des mehrtätigen Vor-Ort Einsatzes zur Dokumentation an Schäden an Mauerwerksgebäuden infolge des Erdbebens vom 17.05.2014 in der Region Mühlthal/ Darmstadt und über die Publikation der Schadensaufnahme, Interpretation, Verletzbarkeitsbewertung und intensitätsbezogenen Szenarien zur Prognose der Schütterwirkungen in der „Bautechnik“ (s.a. 5.7).

4.4 Vorträge und Publikationen

Durch projektbegleitende Veröffentlichungen und die Präsentation von Zwischenergebnissen auf nationalen sowie internationalen Tagungen wurde die Fachwelt – und somit die potentiellen Nutzer – sowie das zuständige Normungsgremium über die Validität der Ergebnisse, der daraus abgeleiteten Schlüsse und deren Konsequenzen für Nachweisführung informiert.

4.5 Gremien- und Normungstätigkeit

4.5.1 Teilnahme an der Projektgruppe Erdbeben der DGfM

Ergebnisse und die weitere Profilierung des Themas wurden in der Schlussphase auch in mehreren Beratungen der Projektgruppe „Erdbeben“ der Deutschen Gesellschaft für Mauerwerks- und Wohnungsbau e.V. (DGfM) vorgestellt und jeweils durch Präsentationen (Impuls-Vorträge) eingeführt:

- Beratung 16.07.2014 und Vortrag Schwarz, J.:
Welche Sicherheit müssen Gebäude unter Erdbebenbeanspruchung heute und in Zukunft bieten?
- Beratung 27.01.2015 und Vortrag Schwarz, J.:
Seismische Einwirkungen für die neue Generation von Erdbebenbaunormen: Stand, Forschungsarbeiten, Fragestellungen und baupraktische Konsequenzen, Handlungsbedarf

Im Ergebnis wurden Schwerpunkte für die weitere Bearbeitung und Antragstellung im Rahmen der DGfM beraten und vorgelegt.

Für die Weiterführung des Vorhabens wurden zwei konsekutiv anzugehende Studien empfohlen (quasi als Zusatz bzw. „+“ zu den durchgeführten Untersuchungen:

- DIMEBRA +: Pilotstudie Verhaltensbasierter Nachweismethoden
- DIMEBRA ++: Modellstudie Quantifizierung (risikoorientierter) Reserven

Anzumerken ist dabei, dass diese Studien mit hoher Relevanz für den weiteren Transfer der Forschungsergebnisse durch den Vortrag (und die nachfolgende Publikation) des Projektleiters mit Schwerpunkt auf die Rolle verhaltensbasierter Bemessungskonzepte für die Baunormung im Rahmen des international ausgerichteten

- DGEB-Workshop „European Harmonization of Seismic Hazard Zoning Maps“ am 27.5.2014 in Frankfurt/M.; Vortrag Schwarz, J.:
Building code related description of seismic action for German earthquake regions

begründet wurden.

4.5.2 DIN - Normungsausschuss (NA) 005-51-06 AA "Erdbeben; Sonderfragen"

Die direkte Einbindung des Projektleiters (als stellvertretender Obmann) in das für Erdbebenfragen zuständige Normungsgremium im DIN - NA 005-51-06 AA "Erdbeben; Sonderfragen" - hat sich als *wirksamste Form* für den Ergebnistransfer in die Wirtschaft bestätigt:

Mit dem Hintergrund und Gewicht der Projektbearbeitung ist es gelungen, den Arbeitskreis „Verhaltensbasierte Bemessungskonzepte“ zu etablieren. (Die Kompetenz der Mitglieder des Arbeitsgremiums - insbesondere aus den in Erdbebengebieten tätigen Ingenieurbüros - und ihre langjährigen praktischen Erfahrungen stehen letztlich auch für den Ergebnistransfer in die Wirtschaft.)

Aufgabe dieses Gremiums (innerhalb des für die Erdbebennormung zuständigen DIN-Ausschusses) ist es, die Vorschläge zur Einführung von Erfahrungswerten (instrumentell, experimentell, beobachtet) und neuartiger, vornehmlich verhaltensorientierter Nachweisverfahren für die in deutschen Erdbebengebieten verbreiteten Bauweisen (in einer normtauglichen Form) vorzubereiten.

Der Arbeitskreis wird im DIN als Gremien mit eigener Dokumentation und Schriftenvermerk eingeführt. Er sieht seine Aufgabenstellung und Verantwortung darin, Grundlagenuntersuchungen zu koordinieren und zu kanalisieren, um letztlich über die für deutsche Erdbebengebiete maßgeblichen Verhaltenszustände und die bauweisenspezifischen Nachweis- bzw. Akzeptanzkriterien bis hin zur Festlegung risikobasierter Einwirkungen und damit auch über die Größe der für die Zonen zulässigen Bemessungswerte entscheiden zu können.

Mit den im Arbeitskreis mitwirkenden national themenführenden Experten ist ein Forschungsverbund herstellbar, um beginnend mit der Vorlage harmonisierter Gefährdungskarten eine neue Generation von Erdbebenbaunormen vorzubereiten, in deren Mittelpunkt das mit den Nachweiszielen konsistente Verhalten der durch die Teile (und den Geltungsbereich) des EC 8 erfassten Bauwerke steht, Ergebnisse zeitnah vorzulegen und diese gegenüber den politisch Verantwortlichen und wirtschaftlich Betroffenen mit Nachdruck informativ und auch konzeptionell umsetzen zu können.

Zu den inhaltlichen Schwerpunkten des Arbeitskreises „Verhaltensbasierte Bemessungskonzepte“ gehört auch die normtaugliche Einordnung der Arbeiten an der neuen Gefährdungskarte und den normungsrelevanten Kenngrößen. In diesem Kontext ist es erstmals möglich, die durch Industrie-Forschungsvorhaben bereitgestellten Erkenntnisse direkt in die normungsnahen Fachdiskussion einzubringen. Dies ist nicht zuletzt den umfänglichen Arbeiten an der Auswertung Erfahrungswerte aus dem Albstadt-Erdbeben 1978 zu verdanken.

Wie aktuell durch Fehling und Brenker (2014) hervorgehoben, kann in der Praxis der Erdbebennachweis mit (zu) einfachen statischen Modellen nicht erfolgreich geführt werden. Einen anerkannten Ausweg bieten Erfahrungswerte aus Erdbebenschäden, um an bestimmten Gebäudetypen vereinfachte Betrachtungsweisen abzuleiten. Der Beitrag spiegelt in seiner Einschätzung den nicht zuletzt durch die Arbeiten am Projekt erreichten Status der Transfer-tauglichkeit in die baupraktische Anwendung.

4.6 Ziegelbauten

Bei den in verschiedenen Vorstudien und anderen Projekten in ihren Erfolgsaussichten bestätigten Auswertungen des Albstadt-Erdbebens wurde auf die Besonderheiten „moderner“ Mauerwerksgebäude (mit aufgelösten Grundrissen und erheblichem Öffnungsanteil), die lokal vorherrschende Bauweise und die fehlende Präsenz anderer Steinsorten ebenso auf den fehlenden Bewertungsmaßstab von seismisch beanspruchten Gebäuden oder gar Schadenbeobachtungen bei der heutigen Bebauung hingewiesen.

Wie bereits die Tabellen 2 und 3 (s.a. Schwarz u. a., 2013) bestätigen, waren vom Erdbeben 1978 auch Gebäude anderer Bauweisen betroffen und könnten somit in DIMEBRA aufgenommen werden bzw. von den Ergebnissen profitieren.

Dies betrifft beispielsweise die Ziegelbauten und auch Gebäude in anderer Ausführung.

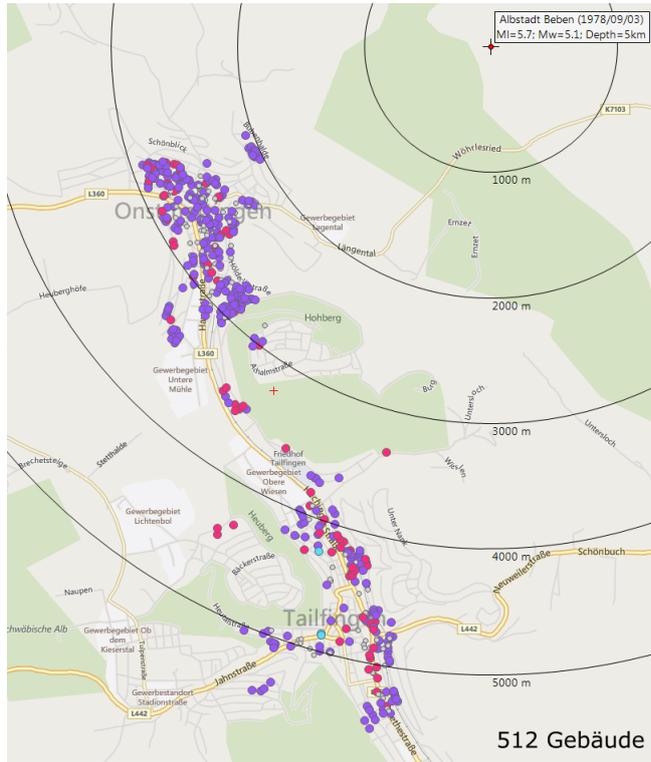
Die Bearbeiter haben sich in Ergänzung zu den auf die Leichtbetonbauweise ausgerichteten Untersuchungen auch diesem Bestand und der Datenlage zu den Ziegelbauten gewidmet.

Folgende Schlussfolgerungen sind mit Blick auf Abb. 20 zu treffen:

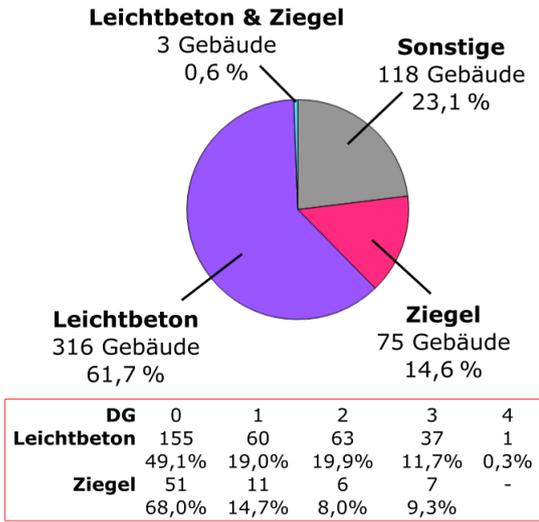
- In den durch die Archivrecherche gesicherten Bauwerksgrundrissen stehen (eher zufällig) auch 75 Gebäude in Ziegelmauerwerk zur Verfügung; sonstige Bauweisen sind noch mit ca. 120 Objekten vertreten.
- Diese Objekte sind in ihren Koordinaten, Untergrundsituation und damit möglichen Einwirkungsbedingungen sowie durch die Qualität der Schädigung nach dem Erdbeben 1978 bekannt (vgl. Abb. 20(b)).
- Die Auswertung der konstruktiven Parameter wurde mittels „vGPIL“ begonnen bzw. wäre problemlos bis hin zur Überführung in eine CAD-Datei möglich.
- Der Bereich der aufgetretenen Schadensgrade lässt analytische Untersuchungen und damit den Test der eingesetzten (bzw. verfügbaren) Rechenhilfsmittel (Methoden, Modelle und Software-Lösungen) problemlos zu.

Insofern läge es nahe, das Vorhaben auf andere Steinbauweisen zu erweitern und hier auch eine vergleichende Betrachtung vorzunehmen. Dies gilt auch im Hinblick auf die Schädigungsmuster und ihre Prognose durch die aktuell am Markt bestimmenden Angebote.

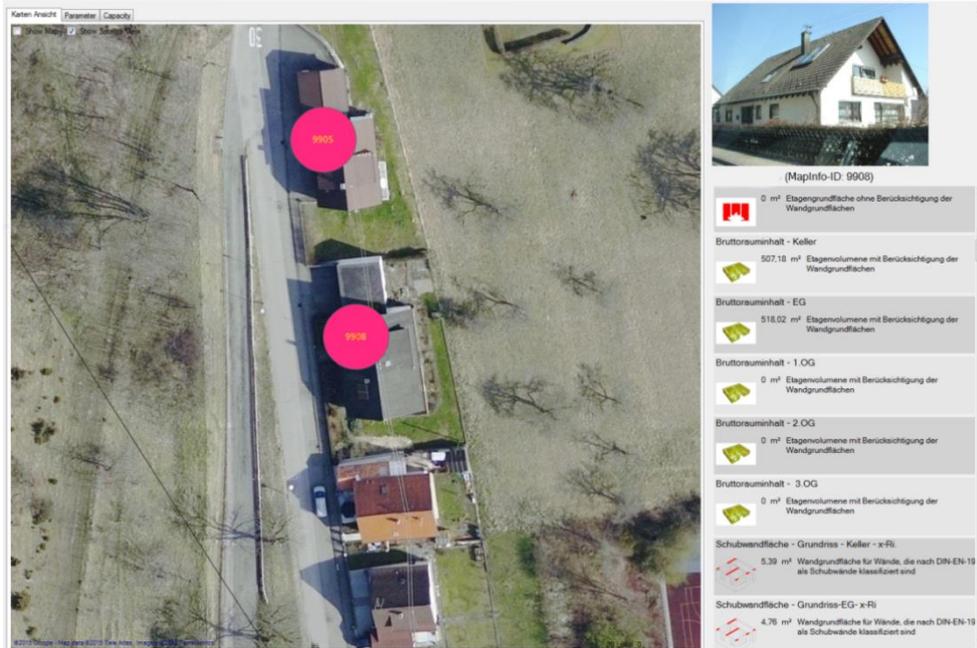
Weiterhin bleibt anzumerken, dass die Ziegelbauten eher zufällig in die Datenbank eingebunden wurden, und somit auch die Schadens-Statistik in Abb. 20 keinen verallgemeinerungsfähigen Aufschluss über eine höhere oder geringere Verletzbarkeit, der Steinbauweisen (z.B. Leichtbeton vs. Ziegel) geben kann. Hier fehlt rein empirisch nach dem Konzept der EMS-98 die Gesamtschau aller Bauweisen bzw. eine systematisch angelegte Untersuchungsreihe unter Vorgabe von Streubereichen der Materialkenngrößen (vgl. Abbildungen 9 bis 11).



Material der Tragwände im Gebäude:



(a)



(b)

Abb. 20: Übersicht zu den in der Datenbank erfassten Gebäuden nach Steinbauweise (a) und Beispielobjekte in Ziegelmauerwerk mit den in DIMBRA angebotenen Optionen der Parameterabfrage

4.7 Erfahrungswerte von aktuellen Erdbeben (Nieder-Beerbach)

Wie im Antrag formuliert, sollte das Vorhaben dazu beitragen, Voraussetzungen zu verankern, wann und in welcher Form verhaltensbasierte Bemessungskonzepte angewendet und Ergebnisse aus experimentellen und instrumentellen Untersuchungen aufgenommen werden können. Dabei wurden beobachtete Schäden infolge aktueller Erdbeben eingeschlossen.

Das Erdbeben vom 17.05.2015 in Südhessen war mit einer Lokalmagnitude $M_L=4.2$ das schwerste Ereignis auf dem Gebiet der Bundesrepublik im Jahr 2014. Die Schütterwirkungen des Erdbebens konnten in weiten Teilen von Südhessens aber auch in Baden-Württemberg bis Stuttgart wahrgenommen werden. Obwohl es sich um ein vergleichsweise schwaches Beben handelt, gab es eine bemerkenswerte Schadenskonzentration im Ortsteil Nieder-Beerbach der Gemeinde Mühlthal. Dieses Beben verursachte rund 150 Gebäudeschäden hauptsächlich im Ortsteil Nieder-Beerbach. Mitarbeiter des Zentrums für die Ingenieuranalyse von Erdbebenschäden (EDAC) der Bauhaus-Universität Weimar dokumentierten die äußeren sichtbaren Schäden an ca. 120 Gebäuden in Nieder-Beerbach und Umgebung.

Das Schadensgebiet Nieder-Beerbach liegt gemäß der Fassung der deutschen Erdbebennorm DIN 4149 (2005) bzw. DIN EN 1998-1/NA im Bereich der Erdbebenzone 1. Das Beben selbst stellt für die Region hinsichtlich seiner Stärke keine Überraschung dar. Die bemerkenswerte Schadenskonzentration in Nieder-Beerbach kann nach gegenwärtigem Kenntnisstand durch die Lage des Epizentrums (in unmittelbarer Nähe) und das Verstärkungspotential des lokalen Untergrundes erklärt werden.

Es konnte anhand der Erdbeben-Normentwicklung gezeigt werden, dass für die Bebauung im betroffenen Gebiet (mit Ausnahme von nach 1982 errichteten Gebäuden) bei der statischen Auslegung keine Nachweise im Sinne einer erdbebengerechten Auslegung geführt wurden.

Die Auswertung erfolgte u.a. in Zusammenarbeit mit dem Hessischen Landesamt für Umwelt und Geologie (HLUG). Die Schadensstatistik mit den nach EMS-98 zugeordneten Schadensgraden kann Tabelle 7 entnommen werden. Es handelt sich um ein schwaches Beben, dessen Standortintensität in Nieder-Beerbach zwischen $I(EMS) = VI$ und VII einzuordnen ist. Dies wird durch die auf einer Wiederkehrperiode von 475 Jahren basierenden Gefährdungskarte der Deutschen Erdbebennorm abgedeckt. Das Beben kann somit als typisches Ereignis der Zone 1 betrachtet wird. Die Gebäude ständen somit in Wiederholung der im Vorhaben gewählten Vorgehensweise als „Erfahrungswerte“ (einer anderen Erdbebenregion) für die Einführung verhaltensbasierte Bemessungskonzepte zur Verfügung.

Tabelle 7: Anzahl der geschädigten Wohngebäude in Abhängigkeit von der Verletzbarkeitsklasse (nach Schwarz *et al.*; 2015)

Schadensgrad	Verletzbarkeitsklasse			Gesamt
	A-B	B	C	
DG 0	ca. 330 (nicht weitergehend untersucht)			
DG _{EMS} 1	1	95	37	133
DG _{EMS} 2	1	18	2	21

Die Bearbeiter haben somit maßgeblich zur Sicherung der Erfahrungswerte beigetragen.

Wesentliche Zielstellungen (wie z.B. auch die Identifizierung der Unterschiede von früheren Bauweisen zu heutigen) gehen mit den durchgeführten Untersuchungen konform.

Dabei sollen vornehmlich auch Bauwerke überprüft werden, die bei Beben nicht beschädigt wurden. Daraus könnten Erfahrungswerte zu konstruktiven Mindestanforderungen abgeleitet werden und am Entwurf geklärt werden, warum diese nicht beschädigt wurden.

4.8 Weiterführung

Die Entwicklung eines auf die Anforderungen des Projektträgers zugeschnittenen Berechnungshilfsmittels (AP 5: Berechnungshilfsmittel) sollte als Schwerpunkt einer Fortsetzungsphase aufgenommen werden. Dabei sollten auch die digitalisierten Bestandsgebäude in die DIMEBRA-Datenbank implementiert, die noch ausstehenden Gebäude untersucht und nicht zuletzt aktuell ausgeführte Objekte (nach Erhebungen des Projektträgers) sowie Erfahrungswerte aus aktuellen Erdbeben (u.a. Waldkirch 2004, Nieder-Beerbach 2014) integriert werden (s. auch 4.7).

Zu empfehlen sind:

- die weitere Auswertung der verfügbaren Bestandsdaten,
- die Auswertung der Sicherheitsabstände im Hinblick auf die numerischen Nachweise und das Erreichen der Schutzziele der Norm im Sinne eines risikobasierten Ansatzes,
- die Untersuchung aktueller Erdbeben und den Grad der Betroffenheit von Mauerwerksbauten zur Spiegelung ihres Verhaltens an weiteren Bodenbewegungen und nicht zuletzt

die Implementierung von ausgeführten Gebäuden in seismisch untersuchten exponierten Erdbebengebieten, um im Laufe eines Erdbebens ihre Kenngrößen als Erfahrungswerte berücksichtigen zu können.

4.9 Lehre

Die Einbindung des Vorhabens in den Studiengang "*Natural Hazards and Risks in Structural Engineering* (NHRE) wurde über die gesamte Projektlaufzeit durch Studienarbeiten und *Special Projects* gewährleistet.

In der Endphase des Vorhabens wurde zur Bewältigung der technischen Anforderungen (Aufbereitung der Bestandsunterlagen) entschieden, hier neue Lehr- und Trainingsformate zu erproben. So wurde im Rahmen der Bearbeitung konkreter Projekte (in Gruppen zu je 3 Studenten) jeweils ein typisches Mauerwerksgebäude aus dem Datenbestand des Testgebietes vorgegeben, das digital aufzuarbeiten und mit dem Mauerwerksprogramm 3MURI zu analysieren war.

Obwohl die Ergebnisse erst nach Überarbeitung in den Datenbestand der Datenbank (AP5) aufgenommen werden konnten, steht diese Form der Unterstützung auch in etwaigen Folgeuntersuchungen zur Verfügung.

5 Nutzen und wirtschaftliche Bedeutung der Ergebnisse: Bauten und Bautätigkeit in deutschen Erdbebengebieten

Wie bereits im Antrag hervorgehoben, besteht - nicht zuletzt aufgrund der verschiedenen Anforderungen der einzelnen Bundesländer aber insbesondere auch aufgrund der unklaren Wechselspiels zwischen bisherigen Norm (DIN 4149) und der Einführung des Eurocodes 8 (EN 1998-1) - bei den Planern eine gewisse Verunsicherung zur Anwendung der sich am Markt befindlichen Baustoffen. Im Bereich der Erdbebentauglichkeit von Leichtbetonbaustoffen kommt es beim Bundesverband Leichtbeton immer wieder bundesweit zu Anfragen und der damit verbundenen Anwendung der Leichtbetonprodukte. Die kleinen und mittelständischen Unternehmen der Leichtbetonindustrie müssen hier sehr viel Aufklärungsarbeit für die Anwendung ihrer Produkte leisten.

Die Folgen dieser Verunsicherung sind in wirtschaftlicher Hinsicht vielschichtiger Natur und können in seriöser Weise nicht ausreichend verlässlich quantifiziert werden. So ist beispielsweise nicht zu ermitteln, in welchem Umfang infolge von Unsicherheiten in der Nachweisführung gegen Erdbeben auf alternative Bauweisen ausgewichen wurde und wird. Die unter Umständen dadurch individuell anfallenden Mehraufwendungen (z.B. durch Material oder Wärmeschutz) sind nicht pauschal zu beziffern. Ebenso wenig ist der tatsächliche Aufwand ermittelbar, der gegenwärtig für Mauerwerksbauten zu leisten ist, um die Erdbebensicherheit nachzuweisen.

Die generelle wirtschaftliche Bedeutung eines vereinfachten jedoch sicheren Nachweisverfahrens für Mauerwerksbauten bzw. Klassen von Mauerwerksbauten kann mit der Anzahl der jährlichen Wohnungsneubauten in deutschen Erdbebengebieten angedeutet werden. Alleine in den zwei am stärksten betroffenen Bundesländern Baden-Württemberg und Nordrhein-Westfalen werden jährlich etwa 20200 neue Wohnhäuser in Erdbebenzonen gebaut, deren Sicherheit nachgewiesen werden muss. Auf das gesamte Bundesgebiet bezogen erhöht sich die Zahl noch, wobei konventionelle Mauerwerksbauten etwa 80 % am Gesamtvolumen der Wohnungsneubauten ausmachen.

Angaben zu statistischen Daten über Bevölkerung und Bebauung werden durch das statistische Bundesamt und die statistischen Landesämter bereitgestellt. Die aktuellsten Daten stehen mit dem Zensus 2011 zur Verfügung (Statistische Ämter des Bundes und der Länder, 2013). Tabelle zeigt die verfügbaren statistischen Daten für die Bundesländer die ausgewiesene Erdbebenzonen besitzen.

Die verfügbaren statistischen Daten enthalten nicht nur Angaben zur Bevölkerung, sondern auch Angaben zur Bebauung. Dies sind Informationen zu Baujahr, zur Anzahl der Wohngebäude und zum Teil zur Anzahl der Geschosse. Die Information zur Anzahl der Geschosse wurde im neuen Zensus 2011 nicht abgefragt und sind nur in den vorhergehenden statistischen Datensätzen von Thüringen und Sachsen enthalten.

Tabelle 8: Gebäudebestand auf Basis des Zensus 2011 (2013) mit Betrachtung des Zeitraumes vor und nach Einführung der Normen DIN 4149-1 (1981) bzw. StaBa 208/88 (1988, 1989)

Zone 3 der DIN EN 1998-1/NA (2011)

Bundesland	Vor der Einführung			Nach der Einführung		
	Anzahl	Anteil in [%]	Anteil je Bundesland in [%]	Anzahl	Anteil in [%]	Anteil je Bundesland in [%]
Baden-Württemberg	126944	40.8	65.4	67078	43.3	34.6
Nordrhein-Westfalen	184446	59.2	67.8	87752	56.7	32.2
Gesamt	311390	100.0	66.8	154830	100.0	33.2

Zone 2 der DIN EN 1998-1/NA (2011)

Bundesland	Vor der Einführung			Nach der Einführung		
	Anzahl	Anteil in [%]	Anteil je Bundesland in [%]	Anzahl	Anteil in [%]	Anteil je Bundesland in [%]
Baden-Württemberg	348465	44.5	62.3	210500	51.1	37.7
Bayern	12022	1.5	68.2	5595	1.4	31.8
Nordrhein-Westfalen	393356	50.3	67.7	187757	45.6	32.3
Sachsen	9304	1.2	77.1	2757	0.7	22.9
Thüringen	19481	2.5	78.0	5484	1.3	22.0
Gesamt	782628	100.0	65.5	412093	100.0	34.5

Zone 1 der DIN EN 1998-1/NA (2011)

Bundesland	Vor der Einführung			Nach der Einführung		
	Anzahl	Anteil in [%]	Anteil je Bundesland in [%]	Anzahl	Anteil in [%]	Anteil je Bundesland in [%]
Baden-Württemberg	776475	34.0	66.0	399587	36.6	34.0
Bayern	105984	4.6	59.5	72133	6.6	40.5
Hessen	241720	10.6	70.5	101216	9.3	29.5
Nordrhein-Westfalen	593258	26.0	67.5	286065	26.2	32.5
Rheinland-Pfalz	352093	15.4	66.9	174462	16.0	33.1
Sachsen	143804	6.3	78.2	40083	3.7	21.8
Sachsen-Anhalt	9551	0.4	84.3	1785	0.2	15.7
Thüringen	59618	2.6	79.7	15152	1.4	20.3
Gesamt	2282503	100.0	67.7	1090483	100.0	32.3

In Tabelle wird untersucht, welcher Gebäudebestand in den Bundesländern vor Einführung einer Erdbebennorm in den jeweiligen Territorien der Bundesländer mit ausgewiesener Erdbebenzone aktuell vorhanden ist. Die Untersuchung des Gebäudebestandes für die Zonen der DIN EN 1998-1/NA (2011) ergibt, dass ca. 70% der Bebauung vor der Einführung der Norm , d.h. ohne Berücksichtigung errichtet wurden (Beinersdorf, 2015).

Die Daten zu Deutschland entsprechen dem des Zensus 2011 (Statistische Ämter des Bundes und der Länder, 2013). Die Anzahl der Gebäude verdeutlicht die Relevanz der Erdbebenproblematik auch im Hinblick die Notwendigkeit geeigneter Hilfsmittel, um für erhöhte seismische Einwirkungen eine Kontrolle der Erdbebensicherheit vornehmen zu können.

Die Verfügbarkeit eines weniger aufwendigeren Nachweisverfahrens hätte zur Folge, dass sich der finanzielle Aufwand für die Projektierung auf Seiten der Planungsbüros verringerte. Daraus resultierten weiterhin positive Effekte im Sinne der Stärkung der Wettbewerbsfähigkeit für die Bauweise Mauerwerk für die Verwendung in deutschen Erdbebengebieten und somit auch für die KMU, die den Baustoff dafür herstellen.

Auch wenn sich das Vorhaben zunächst auf Leichtbeton konzentriert, gewährleisten der methodische Ansatz und die formellen Schritte der Datenaufbereitung die Allgemeingültigkeit der Vorgehensweise und damit auch die Übertragbarkeit auf bzw. Übernahmefähigkeit durch andere Mauerwerks-Wandbaustoffe (vgl. 4.6).

Wie in einem aktuellen Beitrag zum Thema *Bemessung von Mauerwerk bei Erdbebeanspruchung* Fehling und Brenker (2014) herausstellen, wird die Erdbebenzonenkarte derzeit überarbeitet. Dazu sind mit Unterstützung des Deutschen Instituts für Bautechnik (DIBt) am Geoforschungszentrum Potsdam (GFZ) und am *Earthquake Damage Analysis Center* der Bauhaus-Universität Weimar (BUW) Forschungsprojekte initiiert worden, um mit für Deutschland spezifischeren Ansätzen das Erdbebenrisiko neu und möglichst treffsicher zu bewerten.

Der Beitrag kann aufgrund der zutreffenden Situationsbeschreibung weiter zitiert werden: „Wegen der zu erwartenden Vergrößerung der anzusetzenden Bodenbeschleunigungen im Erdbebenfall wird dies zu weiterem Forschungs- und Klärungsbedarf führen, wie zukünftig die Nachweise für Erdbebeneinwirkungen zu gestalten sein werden. Es ist zu erwarten, dass eine weitere Verschärfung auf der Einwirkungsseite nicht ausgeschlossen werden kann und sich auch für Bestandsbauten, besonders bei Schulen und Krankenhäusern, aber auch bei sensibler Industrie-Infrastruktur auswirken wird. Als Antwort für Mauerwerksbauten wird die Anwendung erfahrungsbasierter Nachweiskonzepte und Entwicklung vereinfachter Regeln als Ersatz für einen rechnerischen Nachweis gesehen

Um auf einfache Weise einen Ausweg zu finden, ist es denkbar, auf der Basis von Erfahrungswerten aus Erdbebenschäden an bestimmten vereinfachte Betrachtungsweisen abzuleiten. Von Beinersdorf u.a. (2009) sind dazu umfangreiche Arbeiten unternommen worden, die z. B. auf der Auswertung des Albstadt-Erdbebens basieren. Hier können sicherlich durch weitere Forschungsarbeiten vereinfachte Regeln abgeleitet werden, die abhängig vom Gebäudetypus hilfreich sein könnten und die in DIN 4149 und Eurocode 8 bereits verankerten vereinfachten Regeln ... ergänzen oder ablösen könnten.“

In diesem Kontext besteht für KMU nun der Vorteil, über eine entsprechend aufbereitete Datenbank von Erfahrungswerten zu verfügen zu können. Die ist ein Wettbewerbsvorteil auch im Hinblick auf die marktfreundliche Implementierung Geografischer Informationssysteme zur Weiterführung des Vorhabens in Richtung der Entwicklung einer Planungshilfe im nationalen aber auch im internationalen Kontext.

6 Stand der Europäischen und Nationalen Baunormung

Im Rahmen der Projektbearbeitung wurde auch das Vorhaben mit den Ergebnissen des Projekt *Seismic Hazard Harmonization in Europe* SHARE (<http://www.share-eu.org>) konfrontiert. Es gehört zu den derzeit wohl bedeutendsten internationalen Forschungsinitiativen, um die seismischen Gefährdungsanalysen länderübergreifend zu harmonisieren und „pan-europäische“ Gefährdungsmodelle zu etablieren.

Die Ergebnisse des Projektes zeigen insbesondere für mitteleuropäische bzw. deutsche Erdbebengebiete bereits bei geringen bzw. moderaten Wiederkehrperioden hohe Beschleunigungen. Die Einfärbung der publizierten Karten deuten beispielsweise für das Gebiet der Schwäbischen Alb Beschleunigungen (PGA) im Bereich von 0.2 bis 0.3 g ($T_R = 475$ a) bzw. 0.7 g ($T_R = 4975$ a) an.

Es ist vorgesehen, in einem Internet-Portal den Zugriff auf Ergebnisse (Beschleunigungen, Spektren unterschiedlicher Fraktile und Wiederkehrperiode) im Raster von 10 x 10 km² zuzulassen. SHARE eröffnet offensichtlich im Hinblick auf die öffentliche Zugänglichkeit und den Interpretationsspielraum eine neue Qualität; und im Hinblick auf die Größe der zu erwartenden Spektren auch eine bisher nicht vorstellbare Dimension der Einwirkungen insbesondere für die moderat bis geringseismischen Gebiete nördlich der Alpen in Süd- und Südwestdeutschland.

Aufgrund der erkennbaren Effekte für die Auslegung und Bewertung der Erdbebensicherheit allgemeiner Hochbauten hat eine Informationsveranstaltung zu SHARE im Rahmen des CEN TC 250 und der der Sitzung des SC 8 am 29.11.2013 bereits Reaktionen des Normungsgremiums hervorgebracht.

Der NA 005-51-06 AA "Erdbeben; Sonderfragen" hat sich bei seiner Sitzung am 30. Januar 2014 in Frankfurt/Main mit dem Thema der Überarbeitung der Erdbebenzonenkarte zu DIN EN 19981-1 /NA befasst. Dabei wurden aktuelle nationale Forschungsvorhaben und europäische Projekte bzw. Initiativen zur Einschätzung und Harmonisierung der Erdbebengefährdung vorgestellt und mögliche Konsequenzen im Verantwortungsbereich des NA 005-51-06 AA "Erdbeben; Sonderfragen" diskutiert.

Aus Sicht des Normungsgremiums müssen die bisherigen Ergebnisse für deutsche Erdbebengebiete durch weitere wissenschaftliche Untersuchungen, wie die beiden angesprochenen Forschungsprojekte, ergänzt werden, bevor Empfehlungen für die praktische Anwendung bzw. den Eingang in die Normung gegeben werden können.

Vom Normungsgremium NA 005-51-06 AA "Erdbeben; Sonderfragen" wurde eine Stellungnahme verabschiedet, in der hervorgehoben wird, dass erst im Ergebnis der dazu erforderlichen prä-normativer Grundlagenuntersuchungen über die Einführung der für die deutschen Erdbebengebiete zulässigen Bemessungswerte entschieden werden kann.

Hervorgehoben wird, dass nach Spiegelung der Anforderungen und zur Verfügung stehenden Basisinformationen u.a. folgende Teilaspekte zu gestalten:

- Vergleich der analytischen Ergebnisse mit vorliegenden Beobachtungen;
- Bereitstellung von Grundlagen für den Entscheid über die Größe der Bemessungsgrößen im Hinblick auf die Einhaltung der Schutzziele

Ein wesentlicher Beitrag besteht im Hinblick auf die Mauerwerksbauten in der Anwendung erfahrungsbasierter Nachweiskonzepte und Entwicklung vereinfachter Regeln als Ersatz für einen rechnerischen Nachweis.

Die Entwicklung der Zonenkarten für deutsche Erdbebengebiete lässt sich bei Beinersdorf (2015) in den unterschiedlichen Phasen der Baunormung nachvollziehen. (Aufbereitet wird auch die GSHAP-Gefährdungskarte, auf die auch im Wesentlichen die Arbeiten von Grünthal u.a. (1998) für die D-A-CH-Staaten aufbauen, vgl. Abb. 22(b)).

Aus aktuellem Anlass werden die Ergebnisse des SHARE-Projektes aufgenommen. Aus den im Internet abrufbaren Angaben im vorgegebenen Raster werden die Beschleunigungen für die Wiederkehrperiode von 475 Jahren aufbereitet.

Abb. 21 vermittelt einen Eindruck von dramatischen Veränderungen im Beschleunigungs-niveau nach den SHARE-Ergebnissen im Vergleich zur Zonenkarte der DIN 4149 bzw. DIN EN 1998-1/NA; 2011-1. Zudem zeigt Abb. 22(c) die flächige Verteilung der Zonen 1* bis 3*, würde man den Fels-Beschleunigungen von SHARE folgen und das bisherige Klassifikations-schema der Bemessungsbeschleunigungen zugrunde legen. Setzt man für die Beschleunigung die Grenzen der derzeitigen Baunormung (0.4, 0.6 und 0.8 m/s²), folgt aus Abb. 22(c) quasi eine Karte der „DIN-Zonen“:

Die Zone 0 würde nun weit in den nördlichen Teil reichen; weite Bereiche der Bundesrepublik wären der Zone 3 zuzuordnen. In der Größenordnung der Einwirkungserhöhung wäre ein Bauen mit unbewehrtem Mauerwerk nicht mehr zulässig

Dies veranschaulicht sehr eindrücklich die Konsequenzen, die sich aus den aktuellen Forschungsarbeiten zur Neufassung der Erdbebengefährdung und ihrer Begleitung durch den Arbeitskreis „Verhaltensbasierter Bemessungskonzepte ableiten lassen. Sie verdeutlichen auch die akute Notwendigkeit für die Mauerwerksindustrie auf zunehmende Bemessungs-Beschleunigungswerte zu reagieren. Dies ist nur auf erfahrungsbasierter Grundlage möglich, wobei im Rahmen der Normung entsprechende Möglichkeiten zu schaffen sind, um diese auch in die Nachweisführung einbringen zu können

Dies ist mit dem Vorhaben in vollem Umfang gelungen. Erforderlich sind jedoch weitergehende Untersuchungen, um von den vorliegenden Ergebnissen weiteren Nutzen zu ziehen.

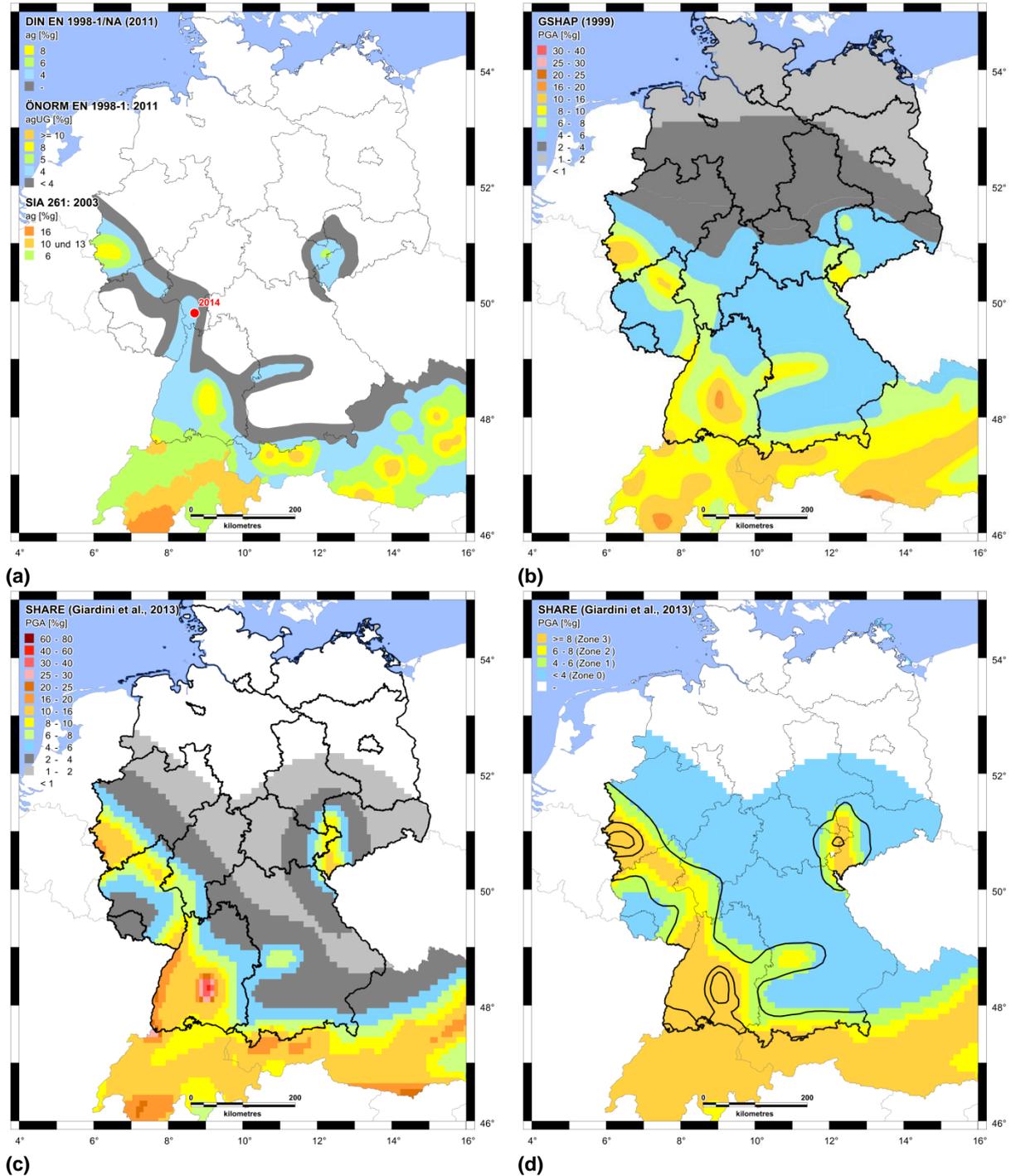


Abb. 22: Veränderungen im Beschleunigungsniveau nach den SHARE-Ergebnissen (c) im Vergleich zur Zonenkarte der DIN 4149 bzw. DIN EN 1998-1/NA;2011-1(a) sowie GSHAP-Karte für die D-A-CH-Staaten (b)

Hinweise:

In die Zonenkarte der DIN 4149 ist auch das Epizentrum des Bebens vom 17.05.2014 (bei Nieder-Beerbach) eingetragen. Zudem zeigt (d) die flächige Verteilung der Zonen 1* bis 3*, würde man den Fels-Beschleunigungen von SHARE folgen und das bisherige Klassifikationsschema zugrunde legen.

7 Literatur

- Abrahamczyk, L. ; Langhammer, T. ; Schwarz, J.: Erdbebengebiete der Bundesrepublik Deutschland – Eine statistische Auswertung. In: *Bautechnik* Bd. 82 (2005), Nr. 8, S. 500–507
- Amstein, S. ; Lang, D. H. ; Schwarz, J.: Schütterwirkung historischer Erdbeben und aktuelle Anwendungsgebiete für das Erdbebeningenieurwesen. In: , *Bautechnik*. Bd. 9 (2005), Nr. 82, S. 641–656
- Bargmann, H.: *Historische Bautabellen: Normen und Konstruktionshinweise 1870 bis 1960*. 3. Aufl. Hamburg : Werner Verlag, 2001 — ISBN 3-8041-4445-4
- Bauamt Tailfingen: Schadensdokumentation Albstadt – Tailfingen, 1978
- Beinersdorf, S.: Anwendung der Intensität im Erdbebeningenieurwesen: Zum Verhalten von Bauwerken in deutschen Erdbebengebieten. *PhD-Thesis (submitted)*. Weimar, Bauhaus-Universität Weimar, 2015.
- Beinersdorf, S. ; Schwarz, J. ; Langhammer, T.: Auswertung der Schäden des Albstadt-Bebens vom 3. September 1978: Empirische Bewertung der Verletzbarkeit von Mauerwerksbauten. In: *D-A-CH Tagung 2009: Erdbeben und Mauerwerk, 10.-11. September 2009, Schweizer Gesellschaft für Erdbebeningenieurwesen und Baudynamik SGEB (Ed.), Zürich, Schweiz, 2009*
- Berset, Th., Vital, A. & Räss, R.: Software Für Die Push-Over Analyse Von Mauerwerksgebäuden. In: *D-A-CH Tagung 2009: Erdbeben Und Mauerwerk, 10.-11. September 2009, Schweizer Gesellschaft Für Erdbebeningenieurwesen Und Baudynamik SGEB (Ed.), Zürich, Schweiz.*
- Beyer, K., Abo El Ezz, A. & Dazio, A.: Experimentelle und numerische Untersuchungen an Mauerwerksriegeln. In: *D-A-CH Tagung 2009: Erdbeben und Mauerwerk, 10.-11. September 2009, Schweizer Gesellschaft für Erdbebeningenieurwesen und Baudynamik SGEB (Ed.), Zürich, Schweiz.*
- Breitbach, H.: *Entstehung, Produktion und technischen Eigenschaften von Bimsbaustoffen*. Andernach : Trasswerke Meurin, 2012
- DIN EN 1998-1/NA: Nationaler Anhang – National festgelegte Parameter – Eurocode 8: Auslegung von Bauwerken gegen Erdbeben – Teil 1: Grundlagen, Erdbebeneinwirkungen und Regeln für Hochbau, Normenausschuss Bauwesen (NABau) im DIN (2011)
- Eurocode 6: Bemessung und Konstruktion von Mauerwerksbauten – Teil 3: Vereinfachte Berechnungsmethoden für unbewehrte Mauerwerksbauten; Deutsche Fassung EN 1996-3:2006 + AC:2009. In: *DIN EN 1996-3 (Hrsg.)* , Normenausschuss Bauwesen (NABau) im DIN (2010)
- Eurocode 6: Bemessung und Konstruktion von Mauerwerksbauten – Teil 1-1: Allgemeine Regeln für bewehrtes und unbewehrtes Mauerwerk; Deutsche Fassung EN 1996-1-1:2005+A1:2012. In: *DIN EN 1996-1 (Hrsg.)* , Normenausschuss Bauwesen (NABau) im DIN (2013)

- Eurocode 8: Auslegung von Bauwerken gegen Erdbeben – Teil 1: Grundlagen, Erdbebenwirkungen und Regeln für Hochbauten; Deutsche Fassung EN 1998-1:2004 + AC:2009. In: DIN EN 1998-1 (Hrsg.) , Normenausschuss Bauwesen (NABau) im DIN (2010)
- Fehling, E., Brenker, E.: Bemessung von Mauerwerk bei Erdbebenbeanspruchung. Mauerwerk 18 (2014), Heft 6, 342-356.
- Fehling, E. & Stürz, J.: ESECMaSE – Ergebnisse des Europäischen Forschungsvorhabens zum Tragverhalten von Mauerwerk unter Erdbebeneinwirkung. In: D-A-CH Tagung 2009: Erdbeben Und Mauerwerk, 10.-11. September 2009, Schweizer Gesellschaft Für Erdbebeningenieurwesen Und Baudynamik SGEB (Ed.), Zürich, Schweiz.
- Gary, A.: *Prüfungs-Ergebnisse von Bims-Zement-Dielen* (Druckfestigkeitsprüfung Nr. 7801 - Auftrag 37821). Groß-Lichterfelde : Materialprüfungsanstalt der Königlichen Technischen Hochschule, 1907
- Grün, R.: Normenbimssand. In: *Vulkanische Baustoffe*. Bd. 12 (1929), Nr. 11/12, S. 265–270
- Grünthal, G. ; Musson, R.M.W. ; Schwarz, J. ; Stucchi, M.: *European Macroseismic Scale 1998* — ISBN ISBN No2-87977-008-4
- Hansen, F.: Rheinische Bim-Zement-Dielen. In: , *Vulkanische Baustoffe*. Bd. 4 (1921), Nr. 11, S. 199–211
- Hart, H. Materialtechnische Mitteilungen über jahrzehntealte Bimsbeton-Kaminsteine und Fabrikschornsteine aus Bimsbaustoffen. In: , *Betonstein-Zeitung*. (1936), Nr. 9/10, S. 1–19
- Hermann, Th.: Festigkeitsberechnungen des Mauerwerks von mehrgeschossigen Gebäuden aus Schwennsteinen und Zementschwemmsteinen. In: , *Vulkanische Baustoffe*. Bd. 12 (1929), Nr. 7, S. 157–159
- Hiller, D.: *Makroseismische Wirkungen des Albstadt-Bebens vom 3. September 1978 in Baden-Württemberg*, 1985
- Kirtschig, K.: *Zur Tragfähigkeit von Mauerwerk bei mittiger Druckbeanspruchung* : Institut für Baustoffkunde und Materialprüfwesen der Technischen Universität Hannover, 1975
- Landesstelle für Bautechnik Baden – Württemberg: Fotodokumentation Schäden Albstadt – Tailfingen (1978)
- Lang, K. (2002): Seismic vulnerability of existing buildings. Ikb-Bericht Nr. 274, Institut Für Baustatik Und Konstruktion, Vdf Hochschulverlag, ETH Zürich.
- Lagomarsino, S. & Cattari, S: Non Linear Seismic Analysis Of Masonry Buildings By The Equivalent Frame Model. In: D-A-CH Tagung 2009: Erdbeben Und Mauerwerk, 10.-11. September 2009, Schweizer Gesellschaft Für Erdbebeningenieurwesen Und Baudynamik SGEB (Ed.), Zürich, Schweiz.
- Michailow: Über Eigenschaften russischen Bimses. In: *Vulkanische Baustoffe*. Bd. 13 (1930), Nr. 7, S. 129–134

- Meyer, U., Roßbach, M., Schermer, D.: EU-Forschungsprojekt ESECMaSE –Teilprojekt Optimierung Von Hochlochziegeln Für Aussteifungswände. *Mauerwerk* 10 (2006) 5, 203-207.
- Nationaler Anhang – National festgelegte Parameter – Eurocode 6: Bemessung und Konstruktion von Mauerwerksbauten – Teil 3: Vereinfachte Berechnungsmethoden für unbewehrte Mauerwerksbauten. In: DIN EN 1996-3/NA (Hrsg.) , Normenausschuss Bauwesen (NABau) im DIN (2012)
- Pech, A., Kolbitsch, A.: *Baukonstruktionen: Wände*. Bd. 4 : Springer, 2005 — ISBN 3-211-21498-4
- Saltelli, A., Ratto, M., Andres, T., Campolongo, F., Cariboni, J., Gatelli, D., Saisana, M., Tarantola, S.: *Global Sensitivity Analysis: The Primer*, John Wiley and Sons, Ltd, 2008.
- Scharroo, P.W.: Muschelkalktraßmehl. In: , *Zeitschrift des Vereins zur Wahrung der wirtschaftlichen Interessen der Rheinischen Bimsindustrie e.V.* Bd. 3 (1920), Nr. 11/12, S. 78–80
- Schwarz, J., Kaufmann, Ch., Langhammer, T., Swain, T.M., Khakimov, Sh.: Evaluation and strengthening of public buildings after the Kamashi (Uzbekistan) earthquakes in 2000 and 2001. *Lehm 2004 - 4th International Conference on building with earth*, Dachverband Lehm, 234-247.
- Schwarz, J., Langhammer, T., Kaufmann, Ch.: Quantifizierung der Schadenspotentiale infolge Erdbeben - Teil 1: Rekonstruktion des Bebens auf der Schwäbischen Alb vom 03. September 1978. In: , *Bautechnik*. Bd. 5 (2005), Nr. 82, S. 520–532
- Schwarz, J., Abrahamczyk, L., Amstein, S., Kaufmann, Ch., Langhammer, T.: Das Waldkirch-Erdbeben (Baden-Württemberg) Vom 5. Dezember 2004. *Bautechnik* 83 (2006) 3, 202-208.
- Schwarz, J., Lang, D. H., Abrahamczyk, L. ; Geenen, E. M. ; Bikçe, M. ; Kaçın, S. ; Genes, M. C. ; Mazmanoglu, C. ; Gülkan, P. ; u. a.: Seismic risk assessment and mitigation in the Antakya–Maras region on the basis of microzonation, vulnerability and preparedness studies (SERAMAR). In: *International Disaster Reduction Conference, Davos, Switzerland, 2006*
- Schwarz, J.: Modellierung Und Wirklichkeit Im Erdbebeningenieurwesen - Zur Bedeutung Verhaltens- und Erfahrungsgestützter Nachweismethoden. In *Festschrift Anlässlich des 80. Geburtstages von Prof. Erhard Hampe (1928-1998) - Spuren Und Erinnerungen*, Schriftenreihe IKI, Heft 13, S. 159-184.
- Schwarz, J., Beinersdorf, S., Swain, Th., Langhammer, T., Leipold, M.; Kaufmann, Ch. & Wenk, Th.: Realistic Vulnerability And Displacement Functions For Masonry Structures Derived From Damaging Earthquakes In Central Europe. *Proc. WCEE 2008*, Paper 05-04-0060.
- Schwarz, J., Meidow, H.: Bemerkungen zu ausgewählten Arbeiten von Ludwig Ahorner. In: *Bauingenieur*. (2008), Nr. 83
- Schwarz, J.: Erdbeben In Deutschland – Eine Annäherung aus Ingenieursicht. SV Sparkassenversicherung. *Geschäftsbericht 2008*. *Fachaufsatz In: Erde Und Erdbebenrisiken*, S. 18-23.

- Schwarz, J., Leipold, M., Kaufmann, Ch. & Tulaganov, B.: Zur Wirklichkeitsnähe analytischer Schadensprognosen: Auswertung der Schäden des Albstadt-Erdbebens vom 3. September 1978. In: D-A-CH Tagung 2009: Erdbeben und Mauerwerk, 10.-11. September 2009, Schweizer Gesellschaft für Erdbebeningenieurwesen und Baudynamik SGEB (Ed.), Zürich, Schweiz.
- Schwarz, J., Beinersdorf, S., Langhammer, T., Leipold, M.: Verhalten von Mauerwerksbauten unter Erdbebeneinwirkung: Auswertung der Schäden des Albstadt-Erdbebens vom 3. September 1978. *Mauerwerk* 14 (2010) 3, S. 126-135.
- Schwarz, J., Beinersdorf, S., Langhammer, T., Leipold, M., Kaufmann, Ch.: Vulnerability functions for masonry structures derived from recent earthquakes in Germany. Proceedings of 14th ECEE, August 30 - September 03, 2010, Ohrid, Macedonia, Paper 606.
- Schwarz, J., Langhammer, T. Leipold, M.: Konstruktive Kriterien für vereinfachte Nachweise von Mauerwerksbauten in Erdbebengebieten am Maßstab empirischer Schadensdaten. 13. D-A-CH Tagung für Erdbebeningenieurwesen und Baudynamik (D-A-CH 2013) C. Adam, R. Heuer, W. Lenhardt & C. Schranz (Hrsg.) 29.-30. August 2013, Wien, Beitrag 371.
- Schwarz, J., Building code related description of seismic action for German earthquake regions. DGEB-Workshop: Results of the European Project SHARE: Seismic Harmonization in Europe, Frankfurt/M. 2014, DGEB-Publikation No. 16, 69-86.
- Schwarz, J., DIMEBRA: Digitales Mauerwerk - Erfahrungsbasierte Bewertungs-konzepte und Risikoanalysen. In: *Mauerwerk-Kalender 2015*. Bemessung, Bauen im Bestand. April 2015. Forschungsvorhaben (Hrsg. Jäger, W.), Verlag Ernst & Sohn, Wiley, ISBN: 978-3-433-03106-3
- Schwarz, J., Maiwald, H., Leipold, M., Langhammer, T.; Kracht, M.; Müller, B.: Das Erdbeben vom 17.05.2014 in Südhessen – Ingenieuranalyse der Erdbebenschäden. Bericht Bautechnik. (erscheint Heft 9/2015).
- StBa 208/88: Bauwerke unter Erdbebeneinwirkung. Vorschrift der Staatlichen Bauaufsicht Nr. 208/88 Bauinformation 12/8, 1988.
- StBa 208/88: Bauwerke unter Erdbebeneinwirkung: 1. Änderung u. Ergänzung. Vorschrift der Staatlichen Bauaufsicht Nr. 208/88 Bauinformation 13/5, 1989.
- Statistische Ämter des Bundes und der Länder (2013): ZENSUS2011 - Ergebnisse des Zensus 2011 [Internet].
- Stürz, J. & Fehling, E (2009): Zum Einfluss Der Umlagerung Von Vertikalkräften In Wohngebäuden Auf Den Erdbebenwiderstand. In: D-A-CH Tagung 2009: Erdbeben Und Mauerwerk, 10.-11. September 2009, Schweizer Gesellschaft Für Erdbebeningenieurwesen Und Baudynamik SGEB (Ed.), Zürich, Schweiz.
- Sulze, M.; Freyburg, A.: *Prüfung von Mauerziegeln* (Nr. B 27.13.016.01).
- Welz, R.; Schmiedel, R. ; Raddatz, H.: *Baukunde für Laien: Grundlagen des Bauens. Rohbauarbeiten* : Welz, Reinhard, Vermittlervlag Mannheim, 2005 — ISBN 978-3938622667.

3muri (2009): Non-Linear Seismic Analysis of Masonry Structures S.T.A.Data (s.a. Galasco, A.; Lagomarsino, S., Penna, A. And S. Resemini, 13th WCEE, Vancouver, 2004 Paper 843.

Zwischenberichte zum Vorhaben

ZBP 2012

Schwarz, J.: Digitales Mauerwerk: Erfahrungsbasierte Bewertungskonzepte und Risikoanalysen – Erdbeben DIMEBRA. *Zwischenbericht 2012* zum AIF-Vorhaben 17013 BR. Zentrum für die Ingenieuranalyse von Erdbebenschäden (EDAC), Bauhaus-Universität Weimar/Institut für Konstruktiven Ingenieurbau (17.04.2013).

ZBP 2013

Schwarz, J.: Digitales Mauerwerk: Erfahrungsbasierte Bewertungskonzepte und Risikoanalysen – Erdbeben DIMEBRA. *Zwischenbericht 2013* zum AIF-Vorhaben 17013 BR. Zentrum für die Ingenieuranalyse von Erdbebenschäden (EDAC), Bauhaus-Universität Weimar/Institut für Konstruktiven Ingenieurbau (27.02.2014).

Anlage A

Anlage A1: Verwendete Materialparameter für die Gebäudesimulationen

Tabelle A1-1: Kennwerte für **3Muri** aller in der Untersuchung vorkommenden Wandmaterialien. Berechnet wurden diese entsprechend der Materialeigenschaften (s. Tabelle 1) unter Verwendung der in der (DIN EN 1996-1, 2013) gegebenen Modelle.

	LB-1	LB-2	LB-3	LB-4	LB-5	LB-6	LB-7	LB-8	MW-2	MW-4	MW-6	SB	VZ	Hlz
MAT-I														
E [N/mm ²]	2249	2463	2668	2866	3056	3241	3421	3595	–	–	–	14000	5798	3009
G [N/mm ²]	900	985	1067	1146	1223	1296	1368	1438	–	–	–	5833	2319	1204
f_m [N/mm ²]	2,26	2,48	2,69	2,90	3,10	3,29	3,48	3,67	–	–	–	16,0	6,07	3,05
τ [N/mm ²]	0,126	0,144	0,162	0,180	0,198	0,216	0,234	0,252	–	–	–	0,90	0,518	0,194
γ [kN/m ³]	11	11	11	11	11	11	11	11	–	–	–	25	15	15
MAT-II(a)														
E [N/mm ²]	1640	1797	1948	2093	2234	2370	2502	2632	1641	2913	4056	14000	5798	4310
G [N/mm ²]	656	719	779	837	893	948	1001	1053	657	1165	1622	5833	2319	1796
f_m [N/mm ²]	1,63	1,79	1,95	2,10	2,24	2,38	2,52	2,65	1,63	2,95	4,16	16,0	6,07	4,43
f_{vk0} [N/mm ²]				0,116					0,22	0,22	0,22	0,2	0,2	0,2
f_{vt} [N/mm ²]	0,182	0,208	0,234	0,260	0,286	0,312	0,338	0,364	0,163	0,325	0,488	1,3	0,748	0,280
γ [kN/m ³]				11					4	6	10	25	15	15

Tabelle A1-2: Kennwerte für **BLM** aller in der Untersuchung vorkommenden Wandmaterialien. Berechnet wurden diese entsprechend der Materialeigenschaften (s. Tabelle 1) unter Verwendung der in der (DIN EN 1996-1, 2013) gegebenen Modelle.

	LB-1	LB-2	LB-3	LB-4	LB-5	LB-6	LB-7	LB-8	MW-2	MW-4	MW-6	SB	VZ	Hlz
MAT-I														
E [N/mm ²]	2249	2463	2668	2866	3056	3241	3421	3595	–	–	–	14000	5798	3009
G_m [N/mm ²]	900	985	1067	1146	1223	1296	1368	1438	–	–	–	5833	2319	1204
f_{mx} [N/mm ²]	2,26	2,48	2,69	2,90	3,10	3,29	3,48	3,67	–	–	–	16,0	6,07	3,05
f_{my} [N/mm ²]	0,126	0,144	0,162	0,180	0,198	0,216	0,234	0,252	–	–	–	0,90	0,518	0,194
γ [kN/m ³]	11	11	11	11	11	11	11	11	–	–	–	25	15	15
MAT-II(a)														
E [N/mm ²]	1640	1797	1948	2093	2234	2370	2502	2632	1641	2913	4056	14000	5798	4310
G_m [N/mm ²]	656	719	779	837	893	948	1001	1053	657	1165	1622	5833	2319	1796
f_{mx} [N/mm ²]	1,63	1,79	1,95	2,10	2,24	2,38	2,52	2,65	1,634	2,946	4,158	16,0	6,07	4,43
f_{my} [N/mm ²]									0,654	1,178	1,663			
γ [kN/m ³]				11					4	6	10	25	15	15

Tabelle A1-3: Kennwerte für **AmQuake** aller in der Untersuchung vorkommenden Wandmaterialien. Berechnet wurden diese entsprechend der Materialeigenschaften (s. Tabelle 1) unter Verwendung der in der (DIN EN 1996-1, 2013) gegebenen Modelle.

	LB-1	LB-2	LB-3	LB-4	LB-5	LB-6	LB-7	LB-8	MW-2	MW-4	MW-6	SB	VZ	Hlz
MAT-I														
f_k [MPa]	2,26	2,48	2,69	2,90	3,10	3,29	3,48	3,67	–	–	–	16,0	6,07	3,05
f_{vko} [MPa]				0,15					–	–	–	0,2	0,2	0,2
f_{vlt} [N/mm ²]	0,126	0,144	0,162	0,180	0,198	0,216	0,234	0,252	–	–	–	0,9	0,518	0,194
ρ_n [-]				0,75					–	–	–		0,75	
ρ_t [-]				1,0					–	–	–		1,0	
ε_{mu} [-]				-0,004					–	–	–		-0,004	
ε_{mu} [-]				-0,002					–	–	–		-0,002	
f_{hk} [MPa]	0,90	0,99	1,08	1,16	1,24	1,32	1,39	1,47	–	–	–	6,40	2,43	1,22
E [N/mm ²]	2249	2463	2668	2866	3056	3241	3421	3395	–	–	–	14000	5798	3009
G [N/mm ²]	900	985	1067	1146	1223	1296	1368	1438	–	–	–	5833	2319	1204
γ [kg/m ³]				1100					–	–	–	2500	1500	1500
γ_M [-]				2,2					–	–	–		2,2	
<i>Ratio r</i>				0,5					–	–	–		0,5	
f_k/f_{mean} [-]	0,806	0,774	0,747	0,724	0,704	0,685	0,669	0,654	–	–	–	0,800	0,527	0,708
φ_{fvk} [-]				0,4					–	–	–		0,4	
φ_{fvlt} [-]				0,0					–	–	–		0,0	
MAT-II(a)														
f_k [MPa]	1,63	1,79	1,95	2,10	2,24	2,38	2,52	2,65	1,63	2,95	4,16	16,0	6,07	4,43
f_{vko} [MPa]				0,116					0,22	0,22	0,22	0,2	0,2	0,2
f_{vlt} [N/mm ²]	0,182	0,208	0,234	0,260	0,286	0,312	0,338	0,364	0,163	0,325	0,488	1,3	0,748	0,280
ρ_n [-]								0,75						
ρ_t [-]								1,0						
ε_{mu} [-]								-0,004						
ε_{mu} [-]								-0,002						
f_{hk} [MPa]	0,65	0,72	0,78	0,84	0,90	0,95	1,01	1,06	0,65	1,18	1,66	6,40	2,43	1,77
E [N/mm ²]	1640	1797	1948	2093	2234	2370	2502	2632	1641	2913	4056	14000	5798	4310
G [N/mm ²]	656	719	779	837	893	948	1001	1053	657	1165	1622	5833	2319	1796
γ [kg/m ³]				1100					400	600	1000	2500	1500	1500
γ_M [-]								2,2						
<i>Ratio r</i>								0,5						
f_k/f_{mean} [-]	0,583	0,560	0,541	0,524	0,509	0,496	0,484	0,474	0,654	0,589	0,554	0,800	0,527	1,031
φ_{fvk} [-]								0,4						
φ_{fvlt} [-]								0,0						

Anlage A2: Konstruktive und Gebäudeparameter (zur Kennzeichnung der Qualität „einfacher Mauerwerksgebäude“) und beobachtete Schadensgrade

ID	0					
Adresse	0					
Etagenanzahl (incl KG) Haupthaus	3					
Etagenanzahl (incl KG) Anbau	2					
Höhe OK Fundament - First	8,01					
	KG	EG	1.OG	2.OG	3.OG	DG
Länge	0	11,37	11,37	6,24	0	0
Breite	0	9,49	9,49	9,49	0	0
Wanddicke außen	0	0,365	0,365	0,365	0	0
Wanddicke innen längs	0	0,24	0,24	0	0	0
Wanddicke innen quer	0	0,24	0,24	0	0	0
Anzahl Innenwände längs	0	1	0,9	0	0	0
Anzahl Innenwände quer	0	1,5	0,6	0	0	0
Anteil nicht anzustzender Schubwandteile bei A14>0,12 längs	0	0	0	0	0	0
Anteil nicht anzustzender Schubwandteile bei A15>0,12 quer	0	0	0	0	0	0
Anzahl Wandkreuzungen innen	0	2	0	0	0	0
Geschosshöhe	0	2,63	2,63	2,75	0	0
Deckendicke	0	0,2	0,2	0,2	0	0
Fensterhöhe min	0	0,89	1,26	2,12	0	0
Fensterbreite min	0	1,01	1,01	1,01	0	0
Anzahl längs	0	0	3	2	0	0
Anzahl quer	0	3	0,6	0	0	0
Fensterhöhe middle	0	1,26	0,89	2,12	0	0
Fensterbreite middle	0	1,01	1,63	2,01	0	0
Anzahl längs	0	2,5	1	1	0	0
Anzahl quer	0	0	1	0	0	0
Fensterhöhe max	0	2,16	2,19	0,8	0	0
Fensterbreite max	0	1,62	1,01	1,5	0	0
Anzahl längs	0	1	0	0	0	0
Anzahl quer	0	1	1	2	0	0
Türhöhe außen	0	2,16	2,19	2,19	0	0
Türbreite außen	0	1,26	1,01	1,01	0	0
Anzahl längs	0	1	0	0	0	0
Anzahl quer	0	0	2,6	1	0	0
Türhöhe innen	0	2,16	2,16	0	0	0
Türbreite innen	0	1,01	1,01	0	0	0
Anzahl längs	0	1	1	0	0	0
Anzahl quer	0	2	1	0	0	0
Summe Wandabschnitte <0,75m Außenwand längs	0	0,4	0	0	0	0
Summe Wandabschnitte <0,75m Außenwand quer	0	0,6	0	0	0	0
Summe Wandabschnitte <0,75m Innenwand längs	0	0	0	0	0	0
Summe Wandabschnitte <0,75m Innenwand quer	0	0	0	0	0	0
Summe Wandabschnitte <1,00m Außenwand längs	0	0,4	0	0	0	0
Summe Wandabschnitte <1,00m Außenwand quer	0	0,6	0,99	0	0	0
Summe Wandabschnitte <1,00m Innenwand längs	0	0	0	0	0	0
Summe Wandabschnitte <1,00m Innenwand quer	0	0	0,8	0	0	0

Abb. A2-1: Auszug aus dem Eingabe-Template für die vorläufige Gebäude- und Parameter-Informationsliste (vGPIL)

	Etagenzahl			Gebäudehöhe	Geschosshöhe		Gebäudeabmessungen						Etagergrundfläche					
	OK-Fußboden	bewohnbar	Keller		Keller	Ø EG+OG	Länge	Breite	Keller (brutto)	EG (brutto)	1.OG (EG) (brutto)	2.OG (brutto)	3.OG (brutto)	Keller (netto)	EG (netto)	1.OG (EG) (netto)	2.OG (netto)	3.OG (netto)
	incl. Keller	[m]	[m]	[m]	[m]	[m]	[m]	[m²]	[m²]	[m²]	[m²]	[m²]	[m²]	[m²]	[m²]	[m²]	[m²]	[m²]
Haupthaus	3,00	0,00	0,00	4,01	9,66	9,49	0,00	107,90	107,90	59,22	0,00	0,00	92,38	95,71	51,20	0,00		
Anbau	2,00				8,18	4,51	0,00	66,74	15,81	0,00	0,00	0,00	61,05	13,89	0,00	0,00		
Gesamthaus	3,00	0,00	0,00	4,01	9,66	14,00	0,00	174,64	123,71	59,22	0,00	0,00	153,79	111,34	51,20	0,00		

Abb. A2-2: Auszug aus der Berechnung für die vorläufige Gebäude- und Parameter-Informationsliste (vGPIL)

Anlage A2.1: Aufgenommene konstruktive und Gebäudeparameter im DIMEBRA-Client-Tool

Tabelle A2-1: Aufgenommene konstruktive und Gebäudeparameter im DIMEBRA-Client-Tool

Parameter	Einheit	Beschreibung
Etagenzahl	-	Bewohnbare Anzahl an Etagen incl. Keller
Gebäudehöhe	m	Gebäudehöhe von Oberkante Fußboden Keller bis First
Geschosshöhe	m	Lichte Höhe des Geschosses
Länge	m	Gebäudeabmessung in Richtung der lokalen Achse X
Breite	m	Gebäudeabmessung in Richtung der lokalen Achse Y
Etagengrundfläche (brutto)	m ²	Etagengrundfläche einschließlich der Wandgrundflächen
Bruttorauminhalt	m ²	Etagenvolumen mit Berücksichtigung der Wandgrundflächen
Schubwandfläche - Grundriss	m ²	Wandgrundfläche für Wände, die nach DIN-EN-1998 als Schubwände klassifiziert sind
Schubwandflächenanteil - Grundriss	%	Fläche von Schubwänden nach DIN-EN-1998 im Verhältnis zur Bruttogeschossgrundfläche
Schubwandfläche - Aufriss	m ²	Wandfläche im Aufriss für Wände, die nach DIN-EN-1998 als Schubwände klassifiziert sind
Schubwandvolumen	m ³	Volumen der Wände, die nach DIN-EN-1998 als Schubwände klassifiziert sind
Schubwandvolumenanteil	%	Volumen von Schubwänden nach DIN-EN-1998 im Verhältnis zur Bruttogeschossvolumen
Wandflächenanteil - Grundriss	%	Wandgrundfläche (ohne Öffnungsfläche) im Verhältnis zur Bruttogeschossgrundfläche
Öffnungsfläche - Grundriss - Außenwand	m ²	Öffnungslängen Außenwand
Öffnungsfläche - Grundriss - Innenwand	m ²	Öffnungslängen Innenwand
Öffnungsflächenanteil - Grundriss - Außenwand	%	Öffnungsfläche im Verhältnis zur Bruttoaußenwandfläche im Grundriss
Öffnungsflächenanteil - Grundriss - Innenwand	%	Öffnungsfläche im Verhältnis zur Bruttoaußeninnenfläche im Grundriss
Ratio Öffnung/Schubwand - Grundriss		Verhältnis aus Öffnungsfläche zu Schubwandfläche nach DIN-EN-1998 im Grundriss
Öffnungsflächenanteil - Aufriss - Außenwände	%	Öffnungsfläche im Verhältnis zur Wandfläche im Aufriss - Außenwände
Öffnungsfläche - Aufriss	m ²	Öffnungsfläche Aufriss Gesamtgebäude
Öffnungsflächenanteil - Aufriss	%	Öffnungsfläche im Verhältnis zur Wandfläche im Aufriss - Gesamtgebäude
Ratio Öffnung/Schubwand - Aufriss		Verhältnis aus Öffnungsfläche zu Schubwandfläche nach DIN-EN-1998 im Aufriss
Öffnungsvolumen	m ³	Öffnungsvolumen
Ratio Öffnung/Schubwand - Kubatur		Verhältnis von Öffnungsvolumen zu Schubwandvolumen

Anlage A2.2: Einordnung der Gebäude nach der Schubwandfläche und dem beobachteten Schadensgrad

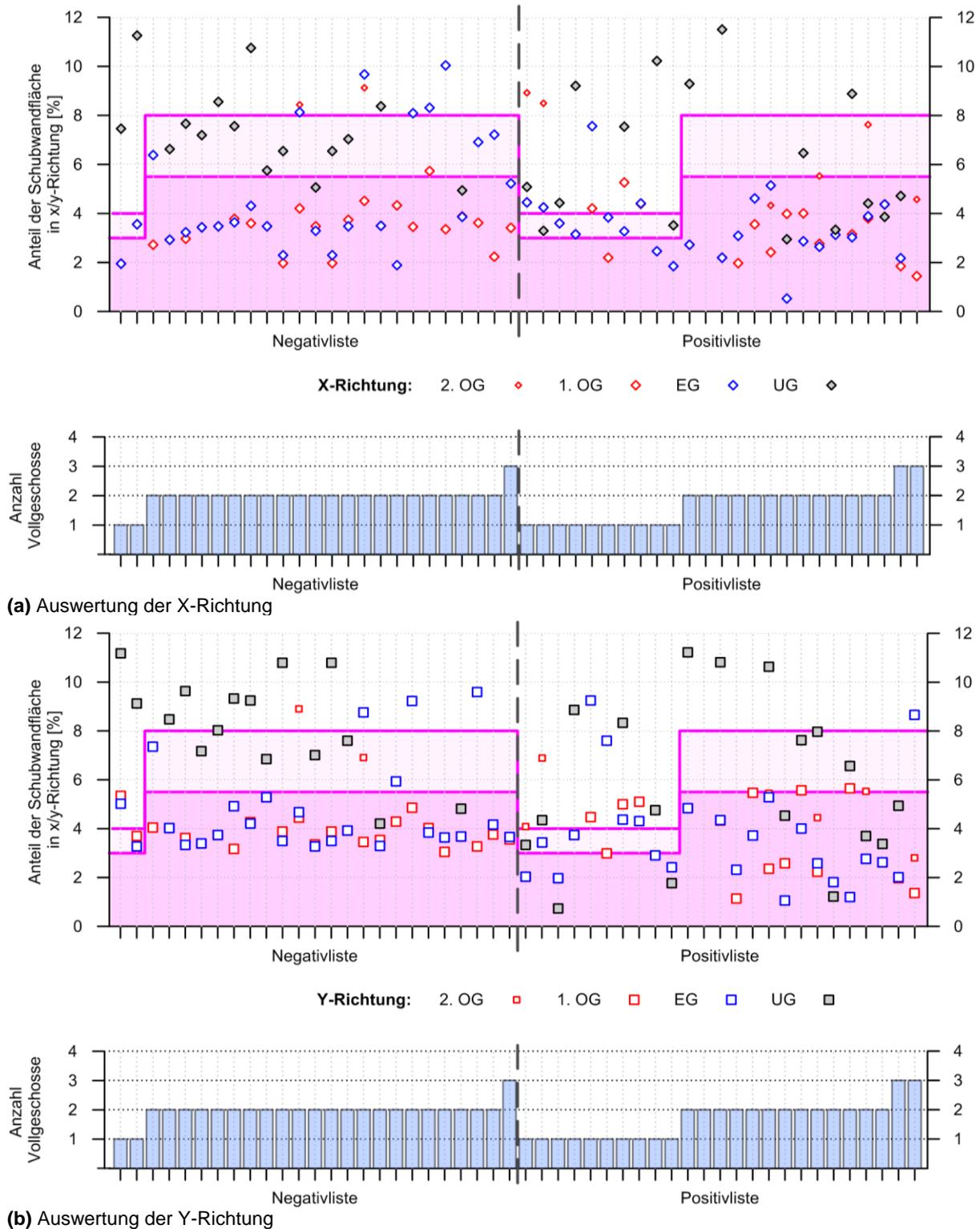


Abb. A2-3: Auswertung der Schubwandanteile und Anzahl der Vollgeschosse

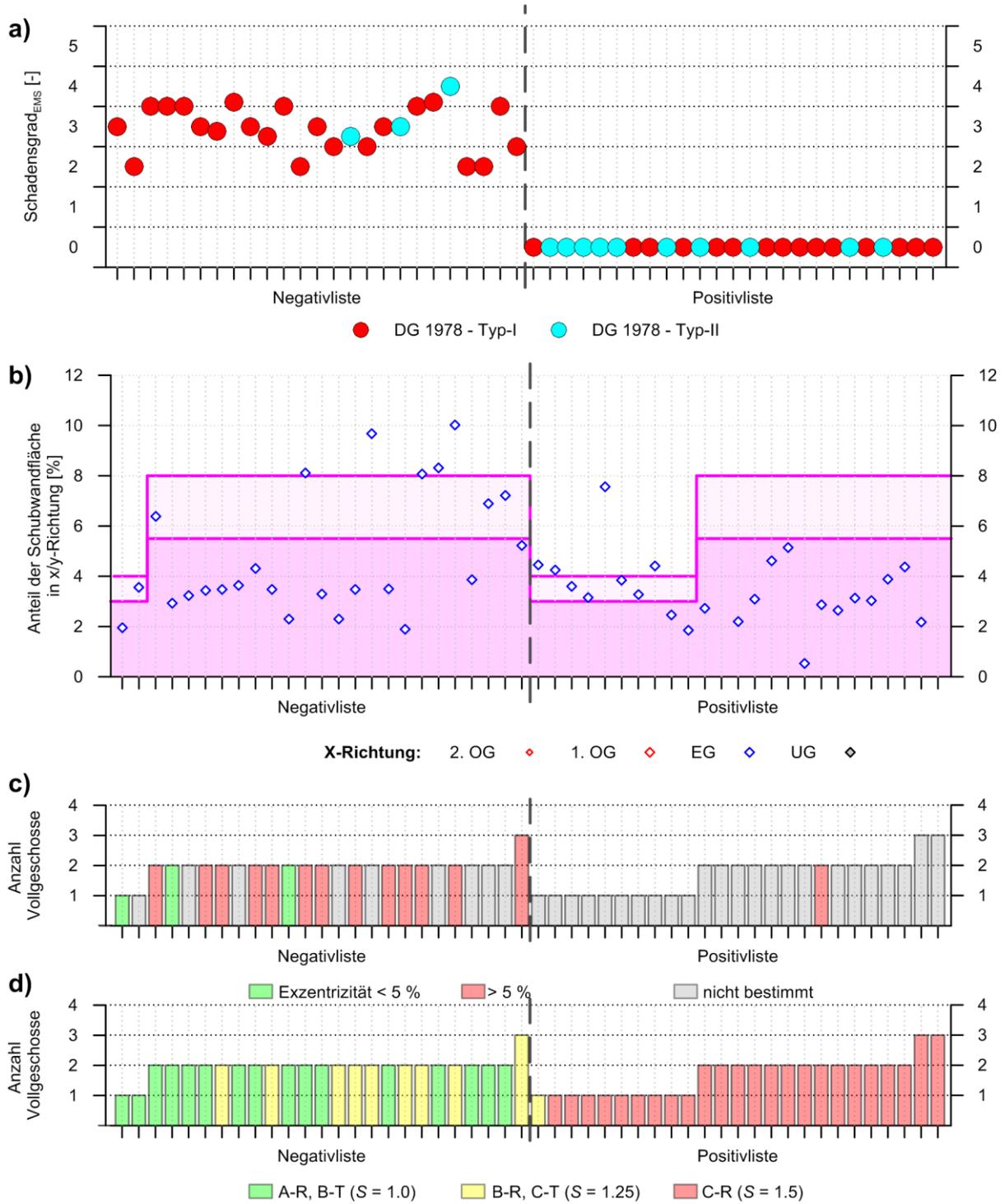


Abb. A2-4: Auswertung der Schubwandanteile im EG und für die X-Richtung

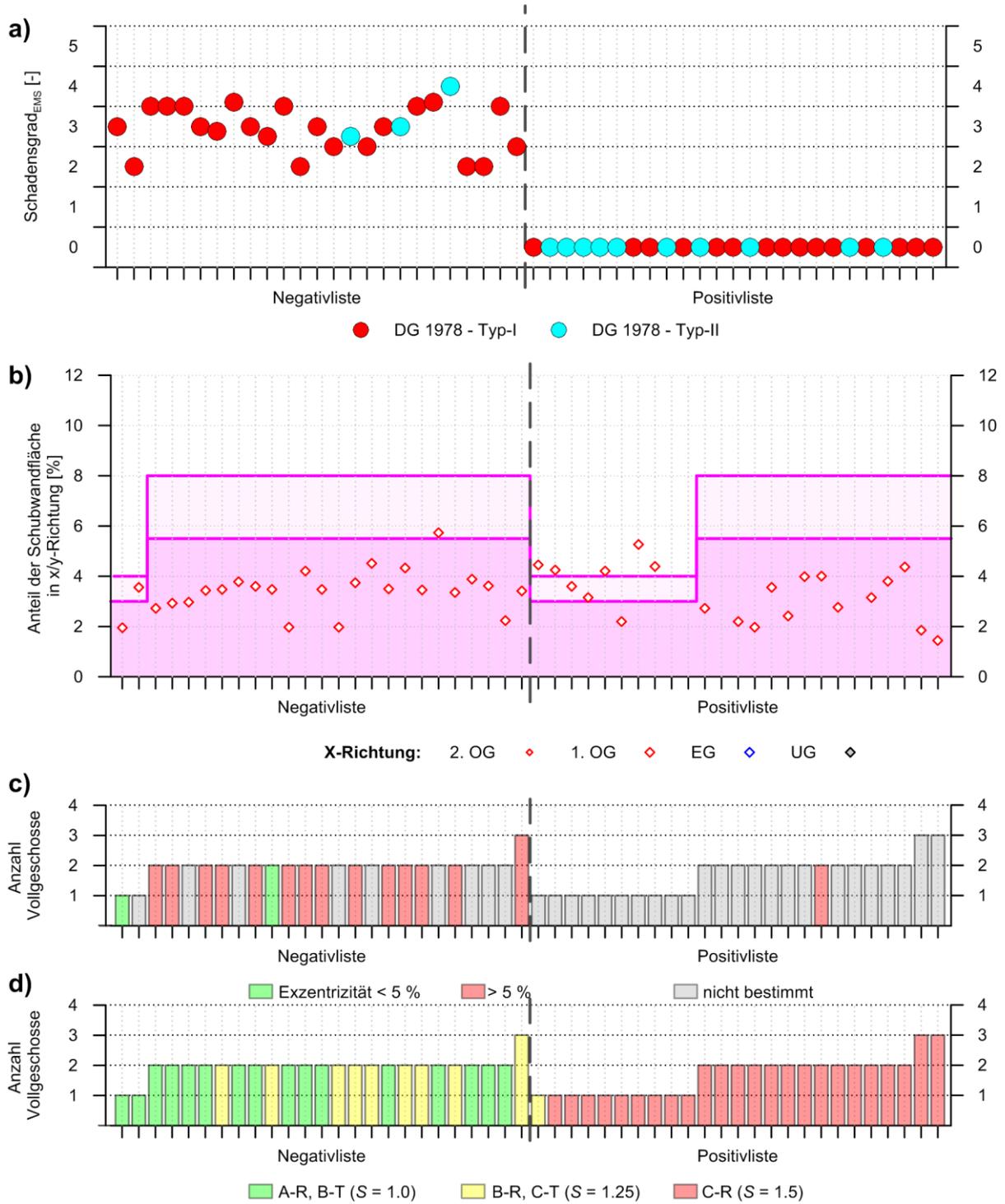


Abb. A2-5: Auswertung der Schubwandanteile im 1. OG und für die X-Richtung

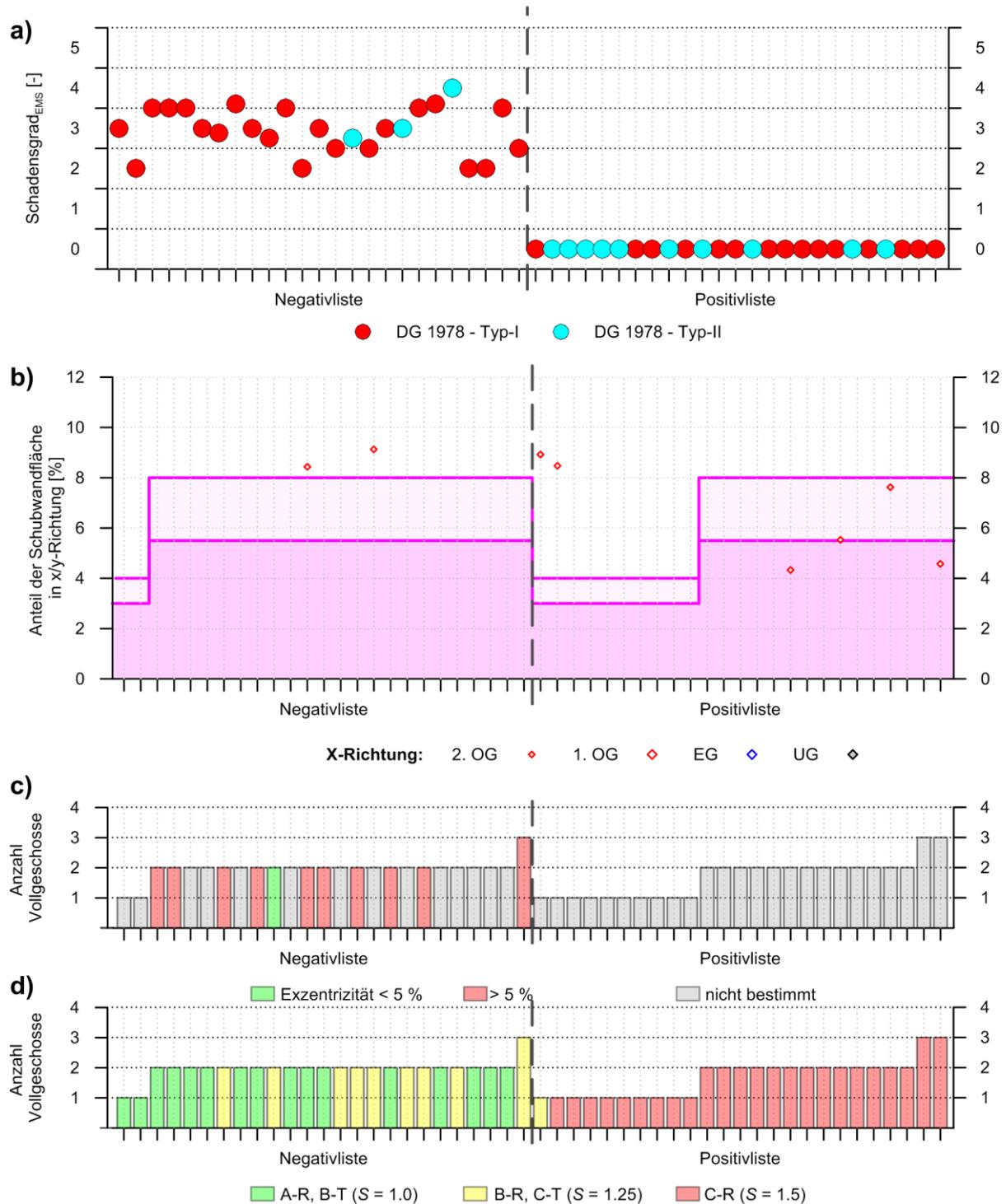


Abb. A2-6: Auswertung der Schubwandanteile im 2. OG und für die X-Richtung

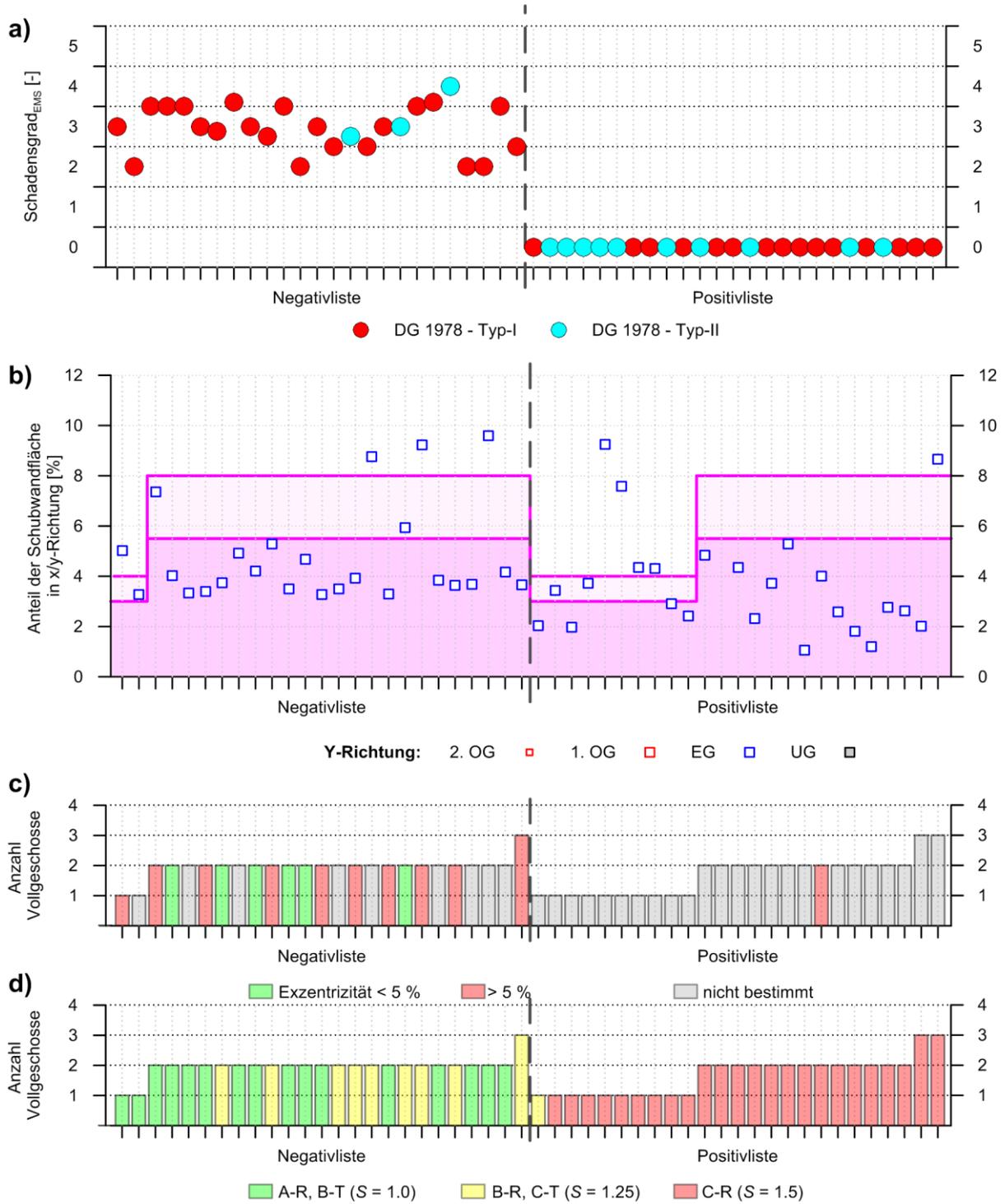


Abb. A2-7: Auswertung der Schubwandanteile im EG und für die Y-Richtung

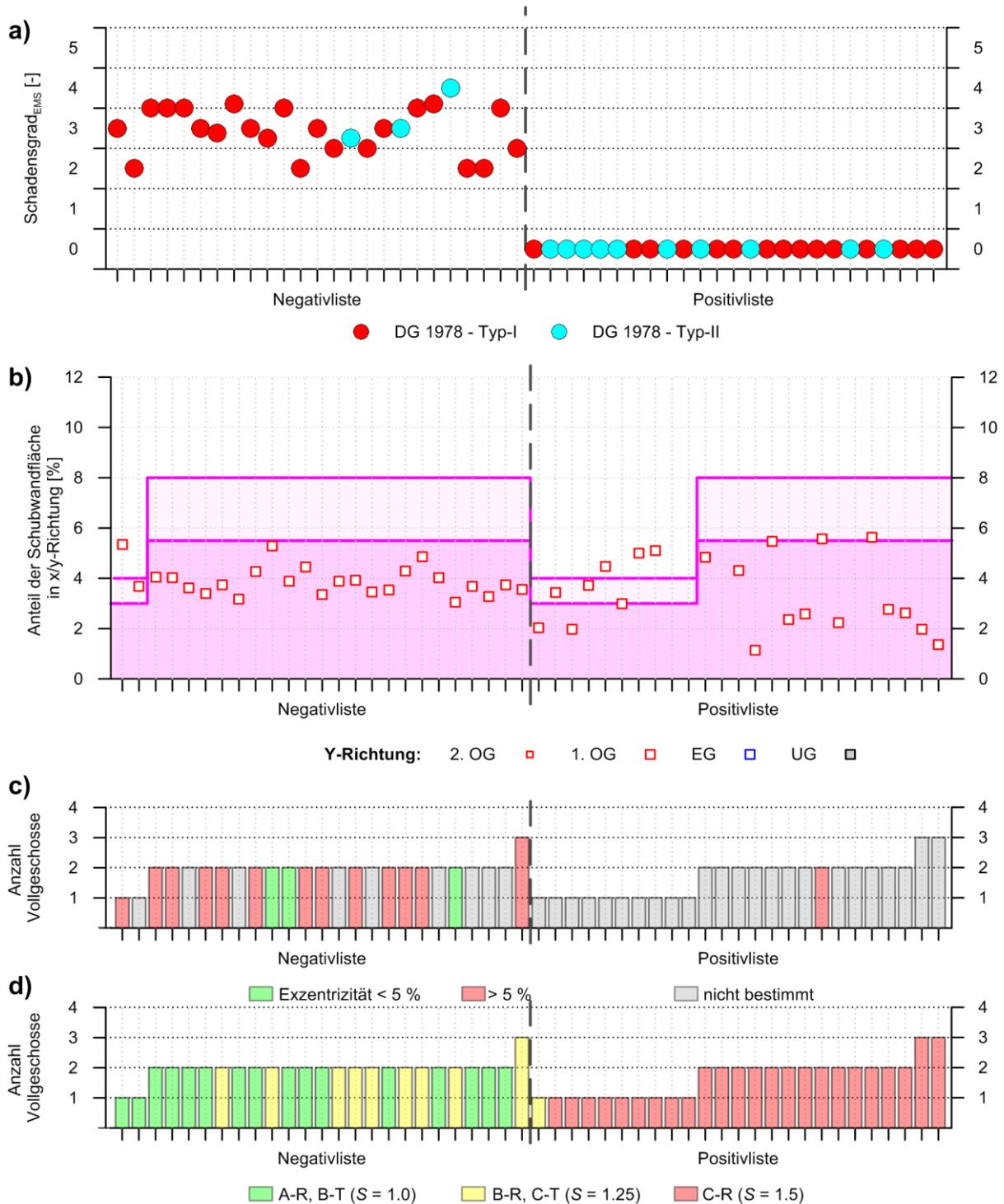


Abb. A2-8: Auswertung der Schubwandanteile im 1.OG und für die Y-Richtung

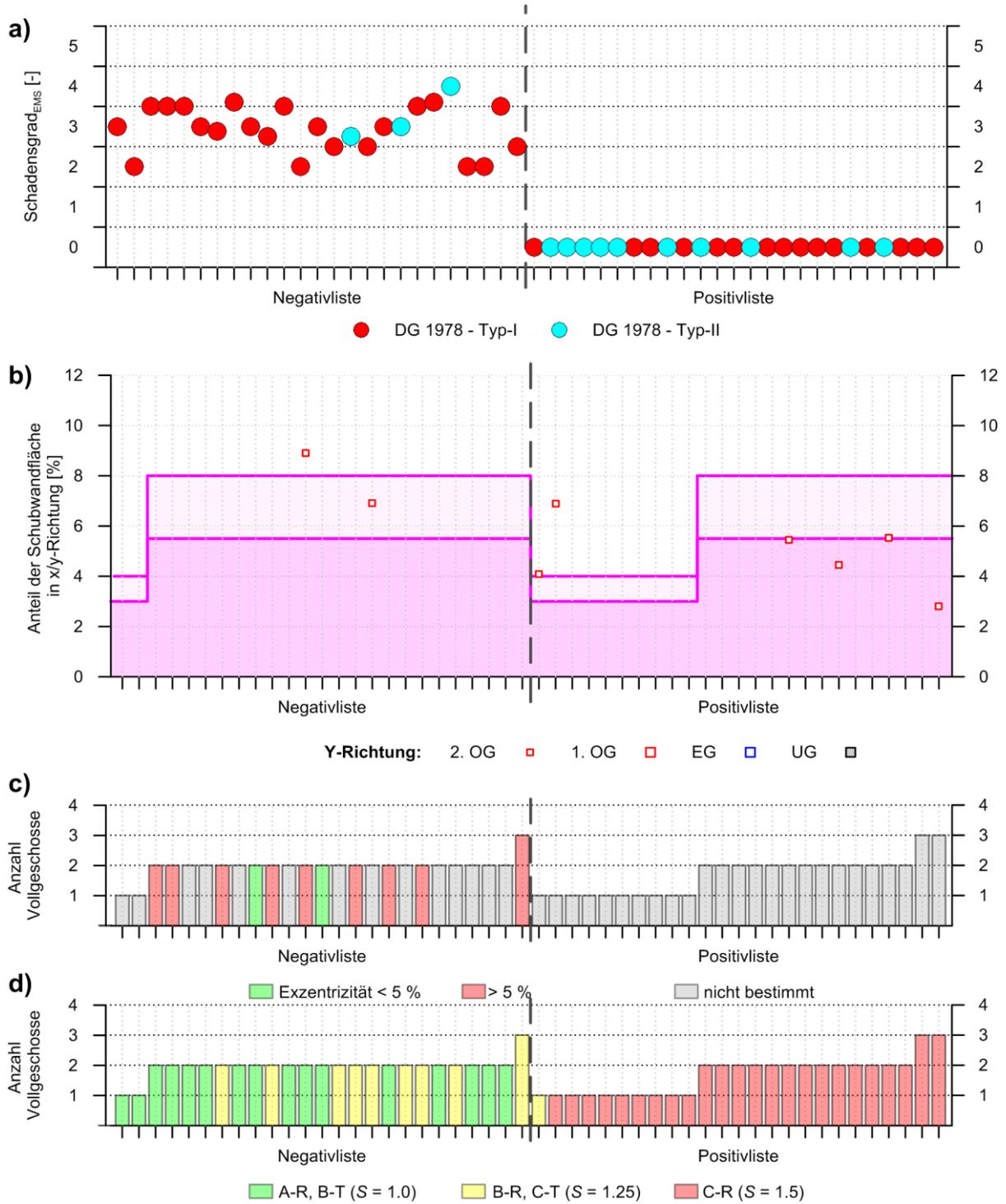


Abb. A2-9: Auswertung der Schubwandanteile im 2.OG und für die Y-Richtung

Anlage A3: Schadensklassifikation bzw. zugrunde liegende Indikatoren

Tabelle A3-1: Erfassbare und mit dem jeweiligen Datensatz zur Simulation verknüpfte Schadensinformation. Im Gegensatz zu den in beschriebenen Schadensgraden, die Bereiche der Gebäudekapazität markieren, stellen diese Informationen Schadensereignisse dar, die bei der Simulation erfasst werden sofern diese auftreten.

3Muri	
Shear_Damage	Die erste Wand im Gebäude verhält sich plastisch infolge von Schubbeanspruchung.
Bending_Damage	Die erste Wand im Gebäude verhält sich plastisch infolge von Biegebeanspruchung.
Shear_Failure	Die erste Wand im Gebäude versagt infolge von Schubbeanspruchung.
Bending_Failure	Die erste Wand im Gebäude versagt infolge von Biegebeanspruchung.
Compression_Failure	Die erste Wand im Gebäude versagt infolge von Druckbeanspruchung.
Tension_Failure	Die erste Wand im Gebäude versagt infolge von Zugbeanspruchung.
Failure_During_Elastic_Phase	Die erste Wand im Gebäude versagt aufgrund mangelnder Stabilität infolge von Druckbeanspruchung (Knicken, Beulen).
AmQuake	
MV_Plastic_Behaviour_in_Flexure_and_Shear	Die erste Wand im Gebäude zeigt plastisches Verhalten sowohl infolge von Schub als auch von Biegebeanspruchung.
M_Plastic_Behaviour_in_Flexure	Die erste Wand im Gebäude zeigt plastisches Verhalten infolge von Biegebeanspruchung.
V_Plastic_Behaviour_in_Shear	Die erste Wand im Gebäude zeigt plastisches Verhalten infolge von Schubbeanspruchung.
FD_Full_Flexural_Failure	Die erste Wand im Gebäude versagt infolge von Biegebeanspruchung.
SD_Full_Shear_Failure	Die erste Wand im Gebäude versagt infolge von Schubbeanspruchung.
Dls_Target_DIN_EN_1998_1_4_3_2	Die relative Geschossverschiebung hat 5,0 % überschritten (in Anlehnung an DIN EN 1998-1, 2010; Abs. 4.4.3.2 als Kriterium zur Schadensbegrenzung).
Uls_Target_DIN_EN_1998	Die relative Geschossverschiebung hat 7,5 % überschritten (in Anlehnung an DIN EN 1998-1, 2010; Abs. 4.4.3.2 als Kriterium zur Einsturzsicherung)
BLM	
First_Wall_with_Cracks	Die erste Wand im Gebäude zeigt Risse. Das Schadensereignis ist Indikator für den beginnenden Schadensgrad 1 (DG 1 _{EMS-98})
First_Wall_Blend_into_Plastic_Range	Die erste Wand im Gebäude verhält sich nicht mehr elastisch. Das Schadensereignis ist Indikator für den beginnenden Schadensgrad 2 (DG 2 _{EMS-98})
Peak_Capacity_of_the_building	Der maximale horizontale Widerstand des Gebäudes ist erreicht. Das Schadensereignis ist Indikator für den beginnenden Schadensgrad 3 (DG 3 _{EMS-98})
First_Wall_Failure	Die erste Wand im Gebäude versagt. Das Schadensereignis ist Indikator für den beginnenden Schadensgrad 4 (DG 4 _{EMS-98})
Capacity_Decrease_of_the_building_to_65pc	Abfall der Gebäudekapazität auf unter 65 % des Wertes des maximalen horizontalen Widerstandes. Das Schadensereignis ist Indikator für den beginnenden Schadensgrad 5 (DG 5 _{EMS-98})

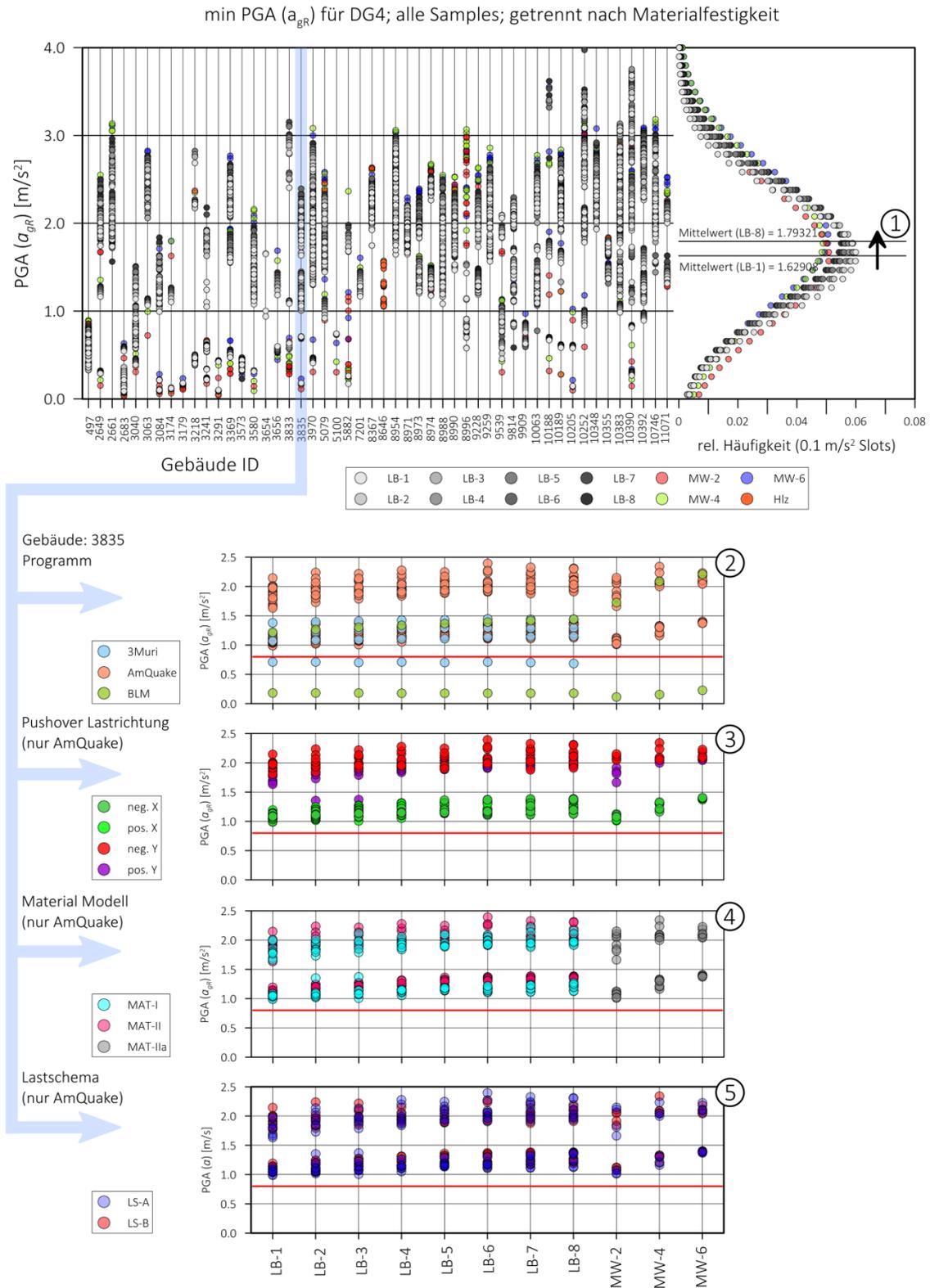


Abb. A3-1: Auswertung der den Schadensgrad DG_{EMs} 4 verursachenden Beschleunigungen in Abhängigkeit von Modellbildung und Lastansatz