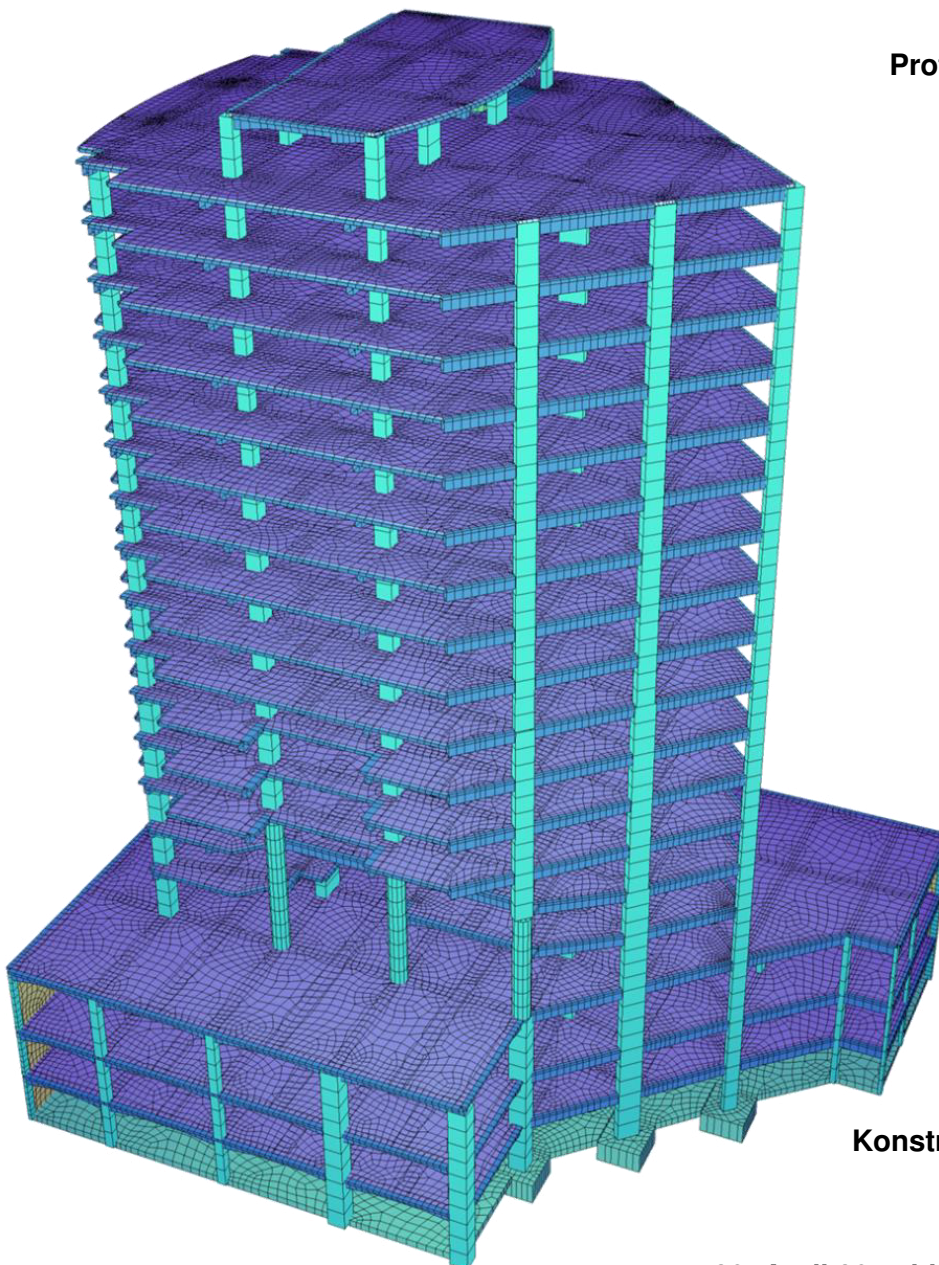


MASTERARBEIT

Erdbebentechnische Untersuchung eines 14-stöckigen Hochhauses in Quito, Ecuador, gemäß DIN EN 1998



Erstprüfer:
Prof. Dr.-Ing. U. Vismann
(FH Aachen)

Zweitprüfer:
Dipl.-Ing. A. Meurs
(MTM Ingenieure)

Verfasser:
Philipp Palm, B.Eng.

Matrikelnummer:
389 364

Semester:
WS 2015/2016

Fachbereich:
Bauingenieurwesen

Studienrichtung:
Konstruktiver Ingenieurbau

Bearbeitungszeitraum:
20. April 2015 bis 15. September 2015

Erdbebentechnische Untersuchung eines 14-stöckigen Hochhauses in Quito, Ecuador, gemäß DIN EN 1998

Nach einer Einführung in die seismologischen und geologischen Grundlagen erfolgt die Darstellung der fundamentalen Berechnungsmethoden einfacher Tragwerke unter Erdbeben am Beispiel eines 2-Massenschwingers. Nach Erläuterung der dynamischen systemspezifischen Werte wird die Ermittlung der Systemantwort zum einem mit Hilfe des „Antwortspektrenverfahrens“ zum anderen mit Hilfe der „direkten Zeitintegration“ dargestellt. Auf Basis dieser Grundlagen wird das Hochhaus mit einem realitätsnahen räumlichen FEM-Modell unter Anwendung des Antwortspektrenverfahrens berechnet und bemessen. Dafür wird das europäische Antwortspektrum dem ecuadorianischen angepasst. Da die Standsicherheit des Hochhauses gemäß DIN EN 1998 nicht gegeben ist, werden verschiedene Maßnahmen zur Änderung der Erdbebenbeanspruchung untersucht. Zunächst werden eine Reihe möglicher Ertüchtigungen und Systemänderungen untersucht. Weiterhin erfolgt die Betrachtung eines oben eingehängten Massependels sowie einer Basisisolierung des Gebäudes. In diesem Zusammenhang wird die direkte Zeitintegration mit künstlichen generierten spektrinkompatiblen Bodenbeschleunigungs-Zeit-Verläufen verwendet.

Earthquake resistant design of a 14 storey high-rise building in Quito, Ecuador, based on DIN EN 1998, Eurocode 8

After an introduction into the seismological and geological basics, the fundamental analysis of simple structures (2-mass-oscillator) under earthquake loading is investigated. After the explanation of the dynamic specific values the structural response is gained in two different ways – using the response spectrum method and the direct time integration method. In accordance with these basics the high-rise building is generated realistically as a spatial finite-element-method-model. This model is used for the complete analysis and design by means of the response spectrum method. In order to obtain location specific earthquake loading the response spectrum of Eurocode 8 is adjusted to the Ecuadorian spectrum in Quito. Because the structural stability of the building in situ is not given according to DIN EN 1998, different methods of downsizing the earthquake loading are examined. After presenting some typical structural solutions two particular methods for possible improvement are shown – installation of a mass pendulum at the upper floors and base isolation by spring / damper systems. In order to investigate the results of these two latter methods the direct time integration method is utilized taking artificially generated ground-acceleration-time-histories into account, which comply with the response-spectrum of DIN EN 1998.

Inhaltsverzeichnis

| | |
|---|-----|
| Begriffe | 13 |
| Einleitung | 15 |
| 1. Erdbeben | 17 |
| 1.1 Was sind Erdbeben und wie entstehen Sie? | 17 |
| 1.2 Erdbebenskalen | 21 |
| 1.3 Erdbebenausbreitung | 23 |
| 1.4 Aufzeichnung von Erdbeben | 26 |
| 1.5 Beschreibung der gegebenen Situation in Quito | 27 |
| 2. Erdbebenbeanspruchung | 33 |
| 2.1 Verifikation der Erkenntnisse zur Erdbebenbeanspruchung und Bemessung | 33 |
| 2.1.1 Herleitung der Eigenkreisfrequenzen, Eigenfrequenzen, Eigenperioden, Eigenformen und der Modalanteile am Beispiel eines 2-Massenschwingers | 34 |
| 2.1.2 Kontrolle der Handrechnung mit Sofistik | 46 |
| 2.1.3 Herleitung eines Antwortspektrums | 49 |
| 2.1.4 Grundsätzliche Methoden zur Ermittlung der Erdbebenbeanspruchung | 56 |
| 2.1.4.1 Berechnung der horizontalen Ersatzlasten aus dem bebenspezifischen Antwortspektrum (Loma-Prieta) | 56 |
| 2.1.4.2 Antwortspektrenverfahren mit angepasstem Spektrum nach Norm | 61 |
| 2.1.4.3 Direkte Zeitintegration | 65 |
| 2.1.5 Vergleich der Berechnungsmethoden | 67 |
| 2.2 Grundsätzliches zur Bemessung nach DIN EN 1998 im Erdbebenfall | 69 |
| 2.3 Vergleich der Beanspruchung in Deutschland und Ecuador | 83 |
| 2.4 Beispielberechnung und Bemessung an einem einfachen System | 94 |
| 2.4.1 Bemessung und Berechnung eines einfachen Systems im Grenzzustand der Tragfähigkeit im Erdbebenfall in Deutschland | 96 |
| 2.4.2 Bemessung und Berechnung eines einfachen Systems im Grenzzustand der Tragfähigkeit in der ständigen und vorüber- gehenden Bemessungssituation | 99 |
| 2.4.3 Bemessung und Berechnung eines einfachen Systems im Grenzzustand der Tragfähigkeit im Erdbebenfall in Ecuador | 102 |

| | | |
|-------------|---|------------|
| 2.4.4 | Vergleich der Bewehrungsmengen des einfachen Systems | 104 |
| 3. | Konkrete Gebäudeanalyse des Hochhauses in Quito | 106 |
| 3.1 | Grundlagen der Generierung | 107 |
| 3.2 | Festlegung der Materialien | 108 |
| 3.3 | Generierung des Gebäudes | 112 |
| 3.4 | Lastansätze | 126 |
| 3.5 | Berechnung des Gebäudes | 137 |
| 3.5.1 | Kontrolle der Modalanteile | 137 |
| 3.5.2 | Darstellung der maßgebenden Eigenformen | 139 |
| 3.5.3 | Berücksichtigung der Einflüsse nach Theorie 2. Ordnung | 141 |
| 3.5.4 | Darstellung der maßgebenden Ergebnisse | 147 |
| 3.5.5 | Darstellung der Stützenschnittgrößen im Erdgeschoss | 150 |
| 3.5.6 | Darstellung der Riegelschnittgrößen im Erdgeschoss | 169 |
| 3.5.7 | Darstellung der Wandschnittgrößen im Erdgeschoss | 179 |
| 3.5.8 | Darstellung der Deckenschnittgrößen im Erdgeschoss | 189 |
| 3.6 | Bemessung des Gebäudes | 190 |
| 3.6.1 | Stützenbemessung | 191 |
| 3.6.2 | Riegelbemessung | 194 |
| 3.6.3 | Wandbemessung | 198 |
| 3.6.4 | Deckenbemessung | 201 |
| 3.6.5 | Nachweis der globalen und örtlichen Duktilität „weak beams – strong columns“ | 209 |
| 3.6.6 | Nachweis der Gleichgewichtsbedingungen und Tragfähigkeit der Gründung | 214 |
| 3.6.7 | Tragfähigkeit horizontaler Scheiben | 214 |
| 3.6.8 | Bedingungen für seismische Fugen | 215 |
| 3.6.9 | Nachweis der besonderen Regeln für Betonbauteile | 216 |
| 3.6.9.1 | Kriterium der örtlichen Beanspruchbarkeit | 216 |
| 3.6.9.2 | Kapazitätsbemessungsregel | 216 |
| 3.6.9.3 | Kriterium der örtlichen Duktilität | 216 |
| 3.6.9.4 | Auslegung für DCM | 223 |
| 3.6.9.4.1 | Baustoffanforderungen | 223 |
| 3.6.9.4.2 | Geometrische Bedingungen | 224 |
| 3.6.9.4.2.1 | Balken | 224 |
| 3.6.9.4.2.2 | Stützen | 224 |
| 3.6.9.4.2.3 | Wände | 225 |
| 3.6.9.4.3 | Bemessungsschnittkräfte | 225 |
| 3.6.9.4.3.1 | Balken | 225 |
| 3.6.9.4.3.2 | Stützen | 228 |

| | | |
|------------------------------|--|------------|
| 3.6.9.4.3.3 | Große leicht bewehrte Wände | 229 |
| 3.6.9.4.4 | Nachweise und Konstruktionsregeln im GZT | 230 |
| 3.6.9.4.4.1 | Balken | 230 |
| 3.6.9.4.4.2 | Stützen | 234 |
| 3.6.9.4.4.3 | Große leicht bewehrte Wände | 238 |
| 3.6.9.5 | Vorschriften für Verankerungen und Stöße | 238 |
| 3.6.9.5.1 | Verankerung der Bewehrung | 238 |
| 3.6.9.5.1.1 | Stützen | 238 |
| 3.6.9.5.1.2 | Balken | 239 |
| 3.6.9.5.2 | Stöße von Bewehrungsstäben | 241 |
| 3.6.9.6 | Vorschriften für Beton-Deckenscheiben | 243 |
| 3.7 | Fazit der Bemessung | 243 |
| 4. | Maßnahmen zur Reduzierung der Erdbebenbelastung | 245 |
| 4.1 | Maßnahme 1: Ausbildung eines steifen Kastens im Untergeschoss | 246 |
| 4.2 | Maßnahme 2: Ausbildung eines „weichen“ Untergeschosses | 249 |
| 4.3 | Maßnahme 3: Ausbildung eines „weichen“ Untergeschosses ohne Treppenhauskern | 252 |
| 4.4 | Maßnahme 4: Grundrissänderung mit „weichen“ Untergeschossen | 255 |
| 4.5 | Maßnahme 5: Grundrissänderung mit „steifen“ Untergeschossen | 260 |
| 4.6 | Maßnahme 6: Grundrissänderung „Tube in Tube“ | 263 |
| 4.7 | Vergleich der verschiedenen Maßnahmen | 266 |
| 4.8 | Berechnungsmethode mit künstlichen Erdbebenverläufen und direkter Zeitintegration | 269 |
| 4.9 | Massenänderung durch ein schweres Pendel im obersten Geschoss | 279 |
| 4.10 | Basisisolierung des Gebäudes mit Federn | 287 |
| 4.11 | Vergleich der Berechnungsmethoden mit künstlich erzeugten Erdbebenverläufen | 294 |
| Resümee | | 302 |
| Abbildungsverzeichnis | | 305 |
| Literaturverzeichnis | | 314 |

Anlagenordner

- Anlage 1** Ausführungspläne
- Anlage 2** Auszug der ecuadorianischen Norm
- Anlage 3** Beschleunigungs-Zeit-Verläufe des Loma-Prieta Erdbebens
- Anlage 4** Berechnungsergebnisse zur Herleitung des Antwortspektrums
- Anlage 5** CD mit sämtlichen numerischen Rechenergebnissen der räumlichen Berechnung
- Anlage 6** Gesamte Auflistung der aufnehmbaren Momente für den Nachweis „weak beams – strong columns“

Resümee

Hauptthema dieser Arbeit ist die erdbebentechnische Untersuchung eines 14-stöckigen Hochhauses in Massivbauweise in Quito, Ecuador, unter Verwendung der Erdbebennorm DIN EN 1998.

Zunächst wird im **ersten** Teil der Arbeit eine Literaturlauswertung zum Thema Erdbeben vorgenommen. Dabei wird deutlich, dass ca. 90 % aller Erdbeben infolge der Plattentektonik der Lithosphäre entstehen. Die gegenseitige Verschiebung der Platten wird dabei solange reibungsbedingt verhindert bis sich genügend Energie aufgebaut hat, die sich dann schlagartig freisetzt. Hervorgehoben werden im Weiteren die Unterschiede zwischen Magnitude und Intensität. Bei der Magnitude wird die freigesetzte seismische Schwingungsenergie gemessen und mit einem Wert auf der nach oben offenen Richter-Skala beschrieben. Bei der Intensität erfolgt die Beschreibung der Beobachtungen des Ausmaßes der Zerstörung infolge eines Erdbebens. Dies geschieht klassifiziert in Skalen (z.B. modifizierte Mercalli-Skala). Die Ausbreitung von Erdbeben geschieht durch Raum- und Oberflächenwellen. Als gefährlichste Wellenart für Gebäude gilt die „Rayleigh-Welle“, welche sich an der Oberfläche auf und ab sowie hin und her bewegt. Die Auswirkung der Beschaffenheit des Untergrundes / Baugrundes auf die seismischen Wellen ist bemerkenswert. So können z.B. weiche Böden die Erdbebengefährdung für ansonsten „gutmütige“ Hochhäuser extrem steigern lassen.

Im **zweiten** Teil werden zunächst die Grundlagen durch die Berechnung und Beschreibung der spezifischen dynamischen Werte wie Eigenkreisfrequenzen, Eigenfrequenzen, Eigenperioden, Eigenformen und Modalanteile an einem 2-Massenschwinger erläutert. Es wird deutlich, dass eine Handrechnung nur für einfache Systeme mit vertretbarem Aufwand realisierbar ist. Durch die exemplarische Herleitung eines Antwortspektrums aus dem realen Loma-Prieta-Beben (Kalifornien) und dem Vergleich mit dem amerikanischen Normspektrum wird ersichtlich, dass das Normspektrum den größten Teil des hergeleiteten Spektrums abdeckt und lediglich die hohen Beschleunigungsspitzen über das geglättete Normspektrum ragen. Auf Grundlage des erzeugten Antwortspektrums wird zunächst die gängigste Berechnungsmethode im Erdbebenfall, das Antwortspektrenverfahren, vorgestellt. Bei diesem Verfahren geht die Zeitinformation verloren, sodass für die Überlagerung der Modalanteile eine statistische Überlagerungsregel gewählt werden muss. Dazu stehen verschiedene Überlagerungsregeln z.B. SRSS, CQC oder SUM zur Verfügung. Als weitere Berechnungsmethode wird die direkte Zeitintegration vorgestellt. Dieses Verfahren wird hauptsächlich bei physikalisch und geometrisch nichtlinearen Problemen angewandt und eignet sich, aufgrund des großen Aufwandes, nicht für die Berechnung herkömmlicher Systeme in der täglichen Bemessungspraxis. Der Vergleich der Beanspruchungen in Deutschland und Ecuador zeigt, dass die maximalen elastischen Antwortbeschleunigungen für das Hochhaus in Ecuador um den Faktor 11 höher sind als in Deutschland. Beim Vergleich der Grenzzustände der Tragfähigkeit (Erdbebenfall so-

wie ständige und vorübergehende Situation) in Deutschland fällt auf, dass die bemessungsrelevante Längsbewehrung der Stützen eindeutig aus dem Lastfall Erdbeben resultiert. Dies entspricht auch den Erfahrungen, dass in Schwach-bebengebieten wie Deutschland für die Stützen der Lastfall Erdbeben und für die Unterzüge die ständige und vorübergehende Bemessungssituation maßgebend wird. Die erforderliche Bewehrung infolge des ecuadorianischen Erdbebens ist aufgrund der viel höheren Antwortbeschleunigung deutlich größer.

Im **dritten** Teil wird die eigentliche Gebäudeanalyse des Hochhauses in Quito gemäß DIN EN 1998 durchgeführt. Dazu wird das Hochhaus räumlich modelliert, berechnet und bemessen. Die Berechnung der Erdbebenbelastung erfolgt mit dem Antwortspektrenverfahren, wobei das Antwortspektrum nach Eurocode 8 aufgrund der unterschiedlichen Form dem Spektrum nach ecuadorianischer Norm angepasst wird. Nach DIN EN 1998 wird das Hochhaus in die mittlere Duktilitätsklasse DCM mit einem Verhaltensbeiwert von $q = 2,76$ eingeordnet. Die Bemessung zeigt, dass das Hochhaus gemäß DIN EN 1998 nicht standsicher ist. Zum einen sind die Ausnutzungsgrade der erforderlichen Bewehrung zur vorhandenen Bewehrung deutlich größer als $\eta = 1$. Zum anderen wird ein Teil der geforderten bewehrungsunabhängigen konstruktiven erdbebenspezifischen Nachweise nicht erfüllt. Bei der gesamten Nachweisführung hat sich gezeigt, dass die DIN EN 1998 nicht praxisfreundlich und teilweise nicht eindeutig ist. Auch sollte überlegt werden, ob eine Einordnung des Gebäudes in die mittlere Duktilitätsklasse DCM nach Eurocode sinnvoll ist. Diese Einordnung hat zur Folge, dass eine Vielzahl von aufwändigen Nachweisen für fast jeden Knoten des Gebäudes geführt werden muss. Dies lässt den Aufwand extrem steigen lässt und praktisch nur noch eine softwaregestützte Berechnung zu. Bei der Ermittlung des Verhaltensbeiwertes von $q = 2,76$ nach DIN EN 1998 fällt der große Unterschied zum Verhaltensbeiwert von $q = 10$ nach ecuadorianischer Norm auf. Es stellt sich die Frage, warum sich die beiden Verhaltensbeiwerte um einen Faktor von ca. 4 unterscheiden, obwohl beiden Normen dasselbe Stahlbetonrahmensystem zugrunde gelegt ist. Eine mögliche Antwort wäre die unterschiedliche Auslegungsphilosophie in Schwachbebengebieten wie Deutschland einerseits und Starkbebengebieten wie Ecuador andererseits. In Deutschland wird man sicherlich auch beim Bemessungsbeben darauf achten, die Verformungen zu begrenzen. In Ecuador zählt dahingegen die reine Standsicherheit, also der Nichteinsturz der Primärstruktur. Der große Unterschied in den Verhaltensbeiwerten (2,76 vs. 10) ist auch der Hauptgrund für die bei weitem nicht gegebene Standsicherheit des Hochhauses nach DIN EN 1998. Die Untersuchung der örtlichen Duktilität an den Rahmenknoten hat gezeigt, dass durchaus größere Verhaltensbeiwerte als $q = 2,76$ möglich wären.

Im **vierten** und letzten Teil der Arbeit werden zunächst klassische statisch-konstruktive Maßnahmen für das Hochhaus untersucht. Es werden 6 verschiedene Maßnahmen vorgestellt, die das System entweder „weicher“ oder „steifer“ machen und

so die Erdbebenbelastung gegenüber dem Ursprungssystem anders verteilen, nach Möglichkeit insgesamt günstiger. Durch das „Weichermachen“ können aufgrund der höheren Grundperiode die Antwortbeschleunigung reduziert und damit die Schnittgrößen verringert werden. Die Verformung des Systems wird hingegen größer. Durch das „Steifermachen“ werden die Schnittgrößen in den Stützen und Unterzügen, je nach Art der Maßnahme, reduziert oder vergrößert. Prinzipiell gilt, dass steife Bauteile (z.B. Treppenhauskern) Lasten anziehen und damit weiche Bauteile (z.B. Stützen) entlasten. Des Weiteren wird in diesem Teil noch die Berechnungsmethode der direkten Zeitintegration unter Verwendung von künstlichen erzeugten spektralkonformen Bodenbeschleunigungs-Zeit-Verläufen an der Maßnahme 5 (steifes Untergeschoss + Grundrissänderung) vorgestellt. Durch die Anwendung der direkten Zeitintegration anstelle des Antwortspektrenverfahrens können die Schnittgrößen der Maßnahme 5 deutlich reduziert werden, weil hier der echte Zeitschrieb der Antworten ermittelt wird und keine Überlagerung der Extrema der Moden erfolgt. Anschließend werden auf Basis der Maßnahme 5 mit der direkten Zeitintegration zwei weitere Varianten zur Reduzierung der Erdbebenbelastung untersucht. Zum einen die Aufhängung einer schweren Pendelmass im obersten Geschoss und zum anderen die Basisisolierung. Bei der Maßnahme mit dem Pendel konnte zwar die allgemeine Wirkungsweise gezeigt werden, aber nur geringfügige Veränderungen der Schnittgrößen erzeugt werden. Bei der Methode der Basisisolierung hingegen, konnten die Schnittgrößen deutlich reduziert werden. Die beiden letzten Maßnahmen dienen zwar lediglich der qualitativen Verdeutlichung der Wirkungsweise, es zeigt sich aber wie wirkungsvoll eine Basisisolierung sein kann.

In den Bearbeitungswochen der Masterarbeit habe ich die Erdbebennorm DIN EN 1998 gut kennengelernt und neue Kenntnisse über das Thema Erdbeben bzw. über die Erdbebenbemessung erlangt. Außerdem konnte ich meine Kenntnisse im Bereich der Dynamik weiter vertiefen sowie meine Erfahrungen mit den Programmen der Sofistik AG durch die umfangreichen Berechnungen erweitern. Ein großer Dank gilt dem Büro MTM Ingenieure, in dem ich mit viel Unterstützung und Bereitstellung aller Arbeitsmaterialien dieses Thema ausarbeiten durfte.

Abschließend ist festzuhalten, dass die DIN EN 1998 nicht anwenderfreundlich ist und die Nachweise zum Teil nur mit erheblichem Aufwand geführt werden können. Sollte die zurzeit noch bauaufsichtlich eingeführte DIN 4149 in naher Zukunft durch die DIN EN 1998 ersetzt werden, müsste meiner Meinung nach die DIN EN 1998 nochmals überarbeitet werden.