Hochschule für Technik Stuttgart

Eine Auseinandersetzung mit der offiziellen Erklärung des Kollapses von World Trade Center 7 am 11. September 2001

Bachelor-Thesis
zur Erlangung des akademischen Grades
Bachelor of Engineering
im
Bauingenieurwesen

Vorgelegt von
Tim Schall
Matr.Nr.: 247342

Bei
Prof. Dr.-Ing. Hans-Peter Günther
Prof. Dr.-Ing. Roland Fink

Eingereicht am 21.06.2019

Abstract

World Trade Center 7 war eines von sieben Gebäuden des World Trade Center Komplexes. Nachdem World Trade Center 1 und 2, die beiden Zwillingstürme, am Vormittag des 11. Septembers 2001 von zwei Flugzeugen getroffen wurden und kurze Zeit später einstürzten, kollabierte am Nachmittag desselben Tages auch World Trade Center 7. Dieses Gebäude wurde nicht von einem Flugzeug getroffen.

Im Zuge der Aufarbeitung der Geschehnisse an diesem Tag wurde unter anderem auch zum Kollaps von World Trade Center 7 ein Untersuchungsbericht verfasst. Das National Institute of Standard and Technology, welches den Bericht verfasste, kam schlussendlich zu dem Ergebnis, dass gewöhnliche Bürobrände zum Einsturz des Gebäudes geführt hatten.

Eine wachsende Zahl an Menschen, darunter die Organisation Architects and Engineers for 9/11 Truth, halten die offizielle Erklärung zum Kollaps von World Trade Center 7 für nicht plausibel. Unter anderem deshalb, da Beobachtungen zeigen, dass der Kollaps symmetrisch und für 2,25 s mit der Beschleunigung des freien Falls erfolgte. Von der Universität Fairbanks in Alaska wurde 2015 eine Untersuchung gestartet, welche die Angaben des offiziellen Untersuchungsberichtes überprüft und die Bedingungen untersucht, die zum Kollaps des Gebäudes führten. Den Zwischenergebnissen der Untersuchung zufolge können gewöhnliche Bürobrände nicht zum Einsturz von World Trade Center 7 geführt haben.

Beide Untersuchungen werden in dieser Bachelor Thesis ausführlich dargelegt. Um die Untersuchungen beider Seiten näher zu beleuchten, wurden in dieser Bachelor Thesis außerdem statische Berechnungen einer kritischen Verbindung im Tragwerk angestellt. Ergebnis dieser Berechnungen ist, dass die Verbindung durch Abscheren der Schrauben versagt. Da die vertikale Lagerung des Konsolauflagers aber nach wie vor vorhanden ist und der Träger darauf gehalten werden kann, scheint dies nicht die Ursache des Kollapses zu sein.

Die offizielle Erklärung enthält also Ungereimtheiten, welche aus wissenschaftlicher und fachlicher Sicht des Bauingenieurwesens gerade in Anbetracht der Reichweite dieses Ereignisses zwingend geklärt werden sollten.

Inhaltsverzeichnis

Abstract I

Inhaltsverzeichnis III

Abkürzungsverzeichnis VI

Einheiten VII

Einleitung VIII

Hauptteil 1

1 Der 11. September 2001 – Ein Überblick 1

1.1 Der World Trade Center Komplex 1

1.2 Die vier Flugzeuge 2

1.3 Chronologische Zusammenfassung der Ereignisse 4

1.4 Auswirkungen auf nationaler und internationaler Ebene 5

2 Das World Trade Center Gebäude 7 8

2.1 Lage und Funktion des Gebäudes 8

2.2 Baukonstruktion des Gebäudes 10

2.2.1 Das Tragwerk 10

2.2.2 Brandschutzmaßnahmen 17

3 Untersuchungsbericht des National Institute of Standards and Technology 19

3.1 Über das National Institute of Standards and Technology 19

3.2 Zielsetzung des Berichts 20

3.3 Inhalt des Berichts 21

3.3.1 Schäden durch die Einstürze von WTC 1 und WTC 2 21

3.3.2 Entstandene Brände und deren Verlauf 24

3.3.3 Verhalten des Tragwerks unter der Temperaturbelastung 28

3.3.4 Lokales und globales Versagen des Tragwerks 30

3.3.5 Weitere mögliche Einsturzursachen 34

3.4 Ergebnis ... 37
4 Bericht zur unabhängigen Studie der Universität Fairbanks in Alaska ... 39
4.1 Über AE9/11Truth und Leroy Hulsey ... 39
4.2 Zielsetzung der Studie ... 40
4.3 Inhalt des Progress Reports ... 40
4.4 Ergebnis ... 45
5 Eigene Ansätze und Berechnungen ... 46
5.1 Vorhandene Daten und Informationen ... 46
5.2 Entwicklung des Ausschnittmodells ... 47
5.3 Erstellen der Lastfälle ... 55
5.3.1 Eigenlast ... 55
5.3.2 Nutzlasten ... 58
5.3.3 Windlasten ... 60
5.3.4 Schneelasten ... 60
5.3.5 Temperaturlast ... 60
5.4 Ermittlung der Schnittgrößen am Auflager von A2001 an Stütze 79 ... 63
5.5 Bemessung der Verbindung von A2001 zu Stütze 79 ... 64
5.5.1 Nachweis der Schraubverbindungen ... 66
5.5.2 Nachweis der Schweißverbindungen ... 74
5.6 Schlussfolgerung der Bemessung ... 79
5.7 Kritik an der offiziellen Erklärung ... 80
5.7.1 Freier Fall während des Kollapses ... 80
5.7.2 Temperaturdehnung laut Popular Mechanics ... 82
5.7.3 FEMA BPS Appendix C ... 84
5.7.4 Die NIST Simulation zum Kollaps von WTC 7 ... 85
6 Vergleich der beiden Untersuchungen in Verbindung mit eigenen Erkenntnissen ... 88

6.1 Entstehung der Brände und deren Verlauf 88
6.2 Lokales Versagen des Tragwerks 88
6.3 Globales Versagen des Tragwerks 89
6.4 Fazit des Vergleichs 90
7 Ausblick 91
7.1.1 Abschluss der UAF Studie 91
7.1.2 Thermite Paper 92
7.1.3 Freier Fall beim Kollaps von WTC 7 94
Schluss VII
Literaturverzeichnis VIII
Erklärung gemäß §27 (1) SPO-Teil A (2016) XI

Abkürzungsverzeichnis

AA11	American Airlines Flug 11 (flog in den Nordturm)
AA77	American Airlines Flug 77 (flog in das Pentagon)
AE9/11Truth	Architects and Engineers for 9/11 Truth
AIA	American Institute of Architects
BPS	Building Performance Study
DHS	Department of Homeland Security
FEMA	Federal Emergency Management Agency
MTA	Metropolitan Transportation Authority
NCSTAR	National Construction Safety Team Act Report
NIST	National Institute of Standards and Technology
NYCBC	New York City Building Code
PANYNJ	Port Authority of New York and New Jersey
PAPD	Port Authority Police Department
PATH	Port Authority Trans Hudson
PM	Popular Mechanics (amerikanische Fachzeitung für Wissenschaft und Technik)
SFRM	Sprayed Fire-Resistive Material
SWC	Seated Web Clip (Verbindungstyp)
UA175	United Airlines Flug 175 (flog in den Südturm)
UA93	United Airlines Flug 93 (stürzte in Shanksville ab)
UAF	University of Alaska Fairbanks
WTC 1 ff	World Trade Center, nachfolgend Gebäudenummer

Einheiten

in	Inch (Zoll); 1 in = 2,54 cm
ft	Feet (Fuß); 1 ft = 12 in = 30,48 cm
lb	Pound (Pfund); 1 lb = 0,4536 kg
ksi	Kilopound per square inch (Kilopfund pro Quadratzoll); 1ksi = 6,895 N/mm^2
°F	Grad Fahrenheit; Umrechnung: y [°F] = (x [°C] * 1,8 [°F/°C]) + 32 °F

Einleitung

Bereits vor über 17 Jahren ereigneten sich in New York die schwersten Terroranschläge in der Geschichte. Darauf folgten groß angelegte militärische Operationen, mehrere Kriege mit hunderttausenden von Toten und viele neue Gesetze, die die Bekämpfung des Terrorismus verbessern sollten.
Diese Ereignisse haben unsere alltägliche und nicht alltägliche Welt stark verändert und rücken beständig in die Vergangenheit und damit in die Geschichtsbücher.
Die offizielle Untersuchung und Erklärung der Ereignisse am 11. September 2001 lassen aber offene Fragen zurück, welche von offizieller Seite nicht beantwortet werden wollen oder können. Hierbei handelt es sich nicht um kleine Feinheiten, sondern um grundlegende Ungereimtheiten, welche die gesamten Folgen dieses Tages in Frage stellen würden.
Diese Bachelor Thesis beschäftigt sich mit den Ursachen des Kollapses von World Trade Center 7 (WTC 7). WTC 7 ist eines der sieben Gebäude des World Trade Center Komplexes und fiel neben den Zwillingstürmen ebenfalls den Terroranschlägen am 11. September 2001 zum Opfer. Diese nicht allzu bekannte Tatsache ist es wert, näher untersucht zu werden. Das Besondere am Kollaps von WTC 7 ist, dass dieses Gebäude nicht von einem Flugzeug getroffen wurde und laut offizieller Erklärung gewöhnliche Bürobrände zum Einsturz führten.
Nach einer Vorstellung der Ereignisse am 11. September 2001 und des Gebäudes WTC 7 wird auf die offizielle Untersuchung durch das National Institute of Standards and Technology (NIST) eingegangen. Im Anschluss wird eine unabhängige Untersuchung der Universität Fairbanks in Alaska (UAF) zu WTC 7 vorgestellt und mit der NIST Untersuchung verglichen. Zusätzlich werden im Rahmen der Bachelor Thesis Berechnungen mit dem Stabwerksprogramm RSTAB durchgeführt. Diese dienen der Überprüfung der Angaben beider Untersuchungen.
Ziel ist es außerdem, die bestehenden Ungereimtheiten weiter bekannt zu machen und deren Diskussion und Klärung voranzubringen.

Hauptteil

1 Der 11. September 2001 – Ein Überblick

1.1 Der World Trade Center Komplex

Der World Trade Center Komplex befand sich am südwestlichen Ende des New Yorker Stadtteils Manhattan. Zwischen Vesey Street im Norden und Liberty Street im Süden sowie West Street im Westen und Church Street im Osten begrenzt, lag das 16 ha große Gelände, in nachfolgender Abbildung blau hervorgehoben.

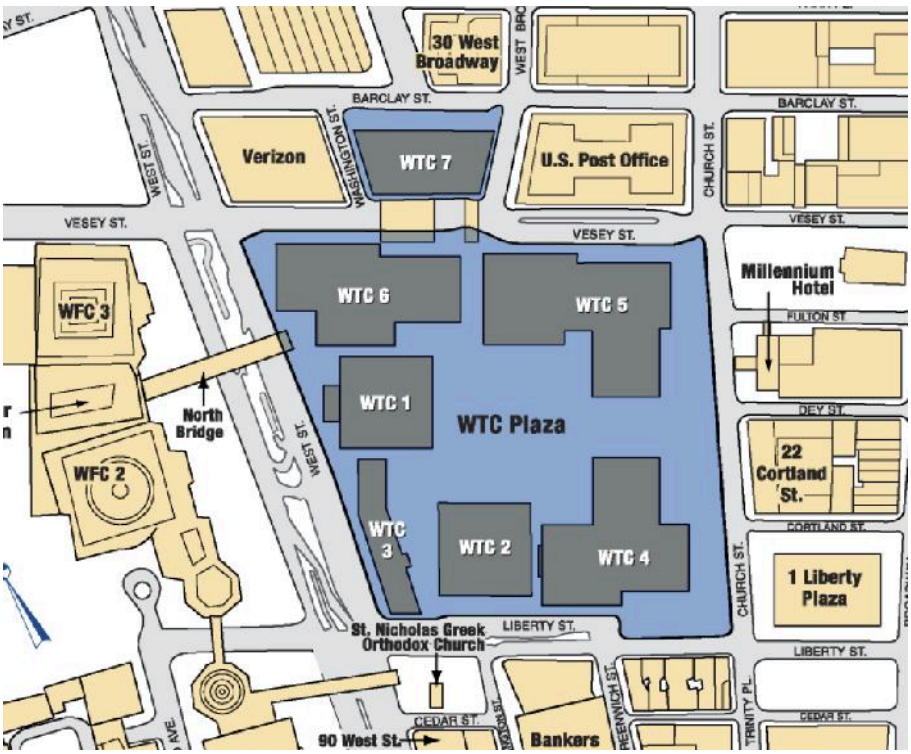


Abbildung 1: Übersichtsplan des WTC Geländes, FEMA BPS, Seite 1-3, Fig. 1-1

Augenmerk des World Trade Centers waren die beiden 110 Stockwerke umfassenden Hochhäuser WTC 1, auch als North Tower (Nordturm) und WTC 2, auch als South Tower (Südturm) bezeichnet. Die sog. Twin Towers (Zwillingstürme) prägten die Skyline Manhattans nachhaltig. Aber auch die weiteren Gebäude, WTC 3, ein 22-stöckiges Hotel der Marriott Corporation, WTC 4 und WTC 5, zwei 9-stöckige Bürogebäude, WTC 6, ein 8-stöckiges

Bürogebäude und WTC 7, ein 47-stöckiges Bürogebäude, gehörten zu diesem Gebäudekomplex.
Im August 1966 begannen die Arbeiten an diesem enormen Bauprojekt mit den Gründungsarbeiten der beiden Zwillingstürme. Die ersten Mieter in WTC 1 konnten im Dezember 1970 einziehen, WTC 2 war ab Januar 1972 bezugsbereit. WTC 3 bis 6 wurden in den 70er und 80er Jahren errichtet. Das jüngste Gebäude war WTC 7, welches als einziges Gebäude nördlich der Vesey Street ab 1985 erbaut wurde.
Betrieben wurde dieser riesige Gebäudekomplex von der New York Port Authority, heute Port Authority of New York and New Jersey (PANYNJ). Unter den Büroflächen in den Türmen befand sich die zur damaligen Zeit größte Shopping Mall der Welt, die Bahnstationen der Port Authority Trans Hudson (PATH) und der Metropolitan Transportation Authority (MTA) sowie mehrere Ladezonen und Technikgeschosse. Aufgrund der Größe dieses Komplexes gab es unter anderem eine eigene Polizei, das Port Authority Police Department (PAPD).

1.2 Die vier Flugzeuge

American Airlines Flug 11 (AA11) startete um 7:59 Uhr vormittags in Boston vom Logan International Airport. Die Boeing 767 war mit 92 Passagieren an Bord auf dem Weg nach Los Angeles (FEMA, 2002; History.com Editors, 2011).

Abbildung 2: American Airlines Flug 11

Um 8:14 Uhr vormittags startete United Airlines Flug 175 ebenfalls in Boston. Auch diese Boeing 767 war auf dem Weg nach Los Angeles, mit 65 Passagieren an Bord (FEMA, 2002; History.com Editors, 2011).

Abbildung 3: United Airlines Flug 175

American Airlines Flug 77 startete in Washington vom Dulles International Airport um 8:20 Uhr vormittags. Mit 64 Passagieren an Bord war dieser Flug ebenfalls auf dem Weg nach Los Angeles (FEMA, 2002; History.com Editors, 2011).

Abbildung 4: American Airlines Flug 77

Um 8:41 Uhr vormittags startete United Airlines Flug 93 vom Newark International Airport bei New York City. 44 Passagiere waren in dieser Boeing 757 auf dem Weg nach San Francisco (FEMA, 2002; History.com Editors, 2011).

Abbildung 5: United Airlines Flug 93

1.3 Chronologische Zusammenfassung der Ereignisse

Die Uhrzeitangaben entsprechen der Ortszeit von New York (Aktuelle Differenz UTC = -4 Stunden, aktuelle Differenz MESZ = -6 Stunden).

7:59 Uhr: Flug AA11 startet in Boston mit Ziel Los Angeles.

8:14 Uhr: Flug UA175 startet von Boston aus nach Los Angeles.

8:19 Uhr: Flugbegleiterinnen von AA11 informieren das Bodenpersonal über die Entführung ihrer Maschine.

8:20 Uhr: Flug AA77 startet vom Dulles International Airport nach Los Angeles.

8:41 Uhr: Flug UA93 startet vom Newark International Airport nach San Francisco.

8:46 Uhr: Noch bevor irgendwelche militärischen Gegenmaßnahmen eingeleitet werden konnten, schlägt AA11 zwischen dem 94. und 98. Stockwerk in den Nordturm (WTC 1) ein. Die großen Mengen Kerosin in den Tragflächen von AA11 verteilen sich beim Einschlag schlagartig über die betroffenen Stockwerke und entzünden die gesamten Büroflächen dieser Stockwerke.
Schätzungen der Port Authority zufolge befanden sich an diesem Morgen rund 58 000 Personen im World Trade Center Komplex[1].
Unmittelbar nach dem Einschlag von AA11 machen sich die ersten Einsatzkräfte des New York Police Department (NYPD) und des Fire Department New York (FDNY) auf den Weg zum World Trade Center.
Die vor Ort befindlichen Einsatzkräfte des Port Authority Police Department (PAPD) beginnen sofort mit der Evakuierung des Gebäudes.

9:02 Uhr: Es wird auch die Evakuierung des Südturms (WTC 2) angeordnet.

9:03 Uhr: Nur eine Minute später schlägt UA175 im Südturm (WTC 2) zwischen dem 78. und 84. Stockwerk ein.
Auch hier verteilt sich das Kerosin aus UA175 schlagartig über die Stockwerke des Einschlags und löst großflächige Brände aus.

---

[1]Mit den rund 58 000 Personen wurden auch Reisende der PATH und MTA in den unterirdischen Haltestellen sowie alle anderen Personen in den (Unter-)Geschossen des Gebäudekomplexes berücksichtigt.

9:08 Uhr: Es werden alle Abflüge in den USA mit dem Ziel New York gecancelt. Der komplette Luftraum über der Stadt wird für Passagierflüge gesperrt.

9:37 Uhr: AA77 schlägt in die Fassade des äußersten Ringes des Pentagons ein. Zum ersten Mal in der Geschichte werden alle Flüge in den USA zum Landen aufgefordert.

9:59 Uhr: 56 Minuten nachdem der Südturm (WTC 2) getroffen wurde, stürzt dieser in sich zusammen.

10:07 Uhr: Nach einer vermutlichen gewalttätigen Auseinandersetzung zwischen Passagieren des Fluges UA93 und ihren Entführern, stürzt UA93 nördlich von Shanksville, Pennsylvania auf einem Feld ab.

10:29 Uhr: Der Nordturm (WTC 1) kollabiert, eine Stunde und 43 Minuten nachdem er von Flug AA11 getroffen wurde.

17:20 Uhr: WTC 7 stürzt ein. Das Gebäude war schon am Morgen evakuiert worden.

An diesem Tag starben fast 3000 Menschen. Ein Großteil davon Personen aus allen betroffenen Gebäuden, 157 Passagiere und Crew Mitglieder aus den vier Flugzeugen, sowie 343 Feuerwehrleute und 71 Polizisten (FEMA, 2002; Aust & Schnibben, 2002; History.com Editors, 2011).

1.4 Auswirkungen auf nationaler und internationaler Ebene

USA Patriot Act

Der USA Patriot Act ist ein Gesetz, welches am 26.10.2001 in den USA verabschiedet wurde. Die ausgeschriebene Bedeutung lautet: *Uniting and Strengthening America by Providing Appropriate Tools Required to Intercept and Obstruct Terrorism Act of 2001*. Dieses Gesetz ermöglicht den exekutiven Behörden zusätzliche weitreichende Befugnisse. So wurden Maßnahmen zur Observierung terrorverdächtiger Personen vereinfacht bzw. erweitert, Strafen für Terroristen und deren Unterstützer erhöht und der Informationsaustausch zwischen den Behörden vereinfacht. Ursprünglich waren einige der Befugnisse bis 2005 zeitlich begrenzt gültig, wurden dann aber im März 2006 von Präsident Bush

durch den *USA Patriot Improvement and Reauthorization Act* verlängert (History.com Editors, 2017).

Department of Homeland Security

Das Department of Homeland Security (DHS) wurde offiziell im November 2002 mit dem *Homeland Security Act* ins Leben gerufen. Davor bestand bereits das Office of Homeland Security, welches am 22. September 2001 in Folge der Terroranschläge im Weißen Haus errichtet wurde. Diese Behörde ist ein Zusammenschluss von insgesamt 22 Behörden (DHS, 2015a). Unter anderem sind die U.S. Customs and Border Protection, die Federal Emergency Management Agency (FEMA) und der U.S. Secret Service vertreten. (DHS, 2015b). Fünf Missionen des DHS werden auf der Webseite aufgelistet: „1. Prevent terrorism and enhancing security; 2. Secure and manage our borders; 3. Enforce and administer our immigration laws; 4. Safeguard and secure cyberspace; 5. Ensure resilience to disasters;" (DHS, 2016).

War on Terror

In den Tagen unmittelbar nach dem 11. September 2001 machte Präsident George W. Bush mehrere Male deutlich, dass sich jede Nation entscheiden müsse, auf welcher Seite sie stehe. Entweder man unterstützt die USA gegen den Terrorismus, oder man ist auf der Seite des Terrorismus und damit ein Feind der USA. Damit startete George W. Bush die sog. militärische Kampagne *War on Terror* (History.com Editors, 2019).

Zum ersten Mal in der Geschichte wurde am 4. Oktober 2001 aufgrund der Terroranschläge am 11. September 2001 der NATO-Bündnisfall ausgerufen (bpb, 2013).

Operation Enduring Freedom

Diese militärische Operation war die erste Antwort der USA auf die Terroranschläge. Am 7. Oktober 2001 begannen Luftangriffe der amerikanischen und britischen Luftwaffe auf Afghanistan. Ziel der Angriffe waren Trainingscamps der Taliban und von Al Qaida. In den folgenden Tagen begann auch der Einmarsch von Bodentruppen in Afghanistan. Großbritannien, die Türkei, Deutschland, Italien, die Niederlande, Frankreich und Polen sagten für die

kommenden Wochen zu, Truppen nach Afghanistan zu schicken (History.com Editors, 2019).

Operation Iraqi Freedom (Irakkrieg)

Aufgrund der Informationen, dass der Irak Massenvernichtungswaffen besäße, was sich im Nachhinein als falsch herausstellte, begann am 19. März 2003 der Angriff und Einmarsch amerikanischer Truppen und deren Verbündeten im Irak. Diese als Iraqi Freedom bezeichnete militärische Operation wurde ohne UN-Mandat durchgeführt (bpb, 2013; History.com Editors, 2019).

2 Das World Trade Center Gebäude 7

2.1 Lage und Funktion des Gebäudes

WTC 7 war das nördlichste der World Trade Center Gebäude (siehe Abb. 1). Zwischen Vesey Street im Süden und Barclay Street im Norden, West Broadway im Westen und Washington Street im Osten gelegen, befand sich das 47-stöckige Hochhaus, das einen trapezförmigen Grundriss hatte. Auf der Nordseite ca. 100 m und auf der Südseite ca. 75 m lang mit einer Breite von ca. 44 m und einer Gesamthöhe von ca. 186 m. Es wurde auf eine bestehende Umspannstation, der Consolidated Edison Substation (Con Edison Substation), aufgesetzt (NIST, 2008a, S. 1 ff).

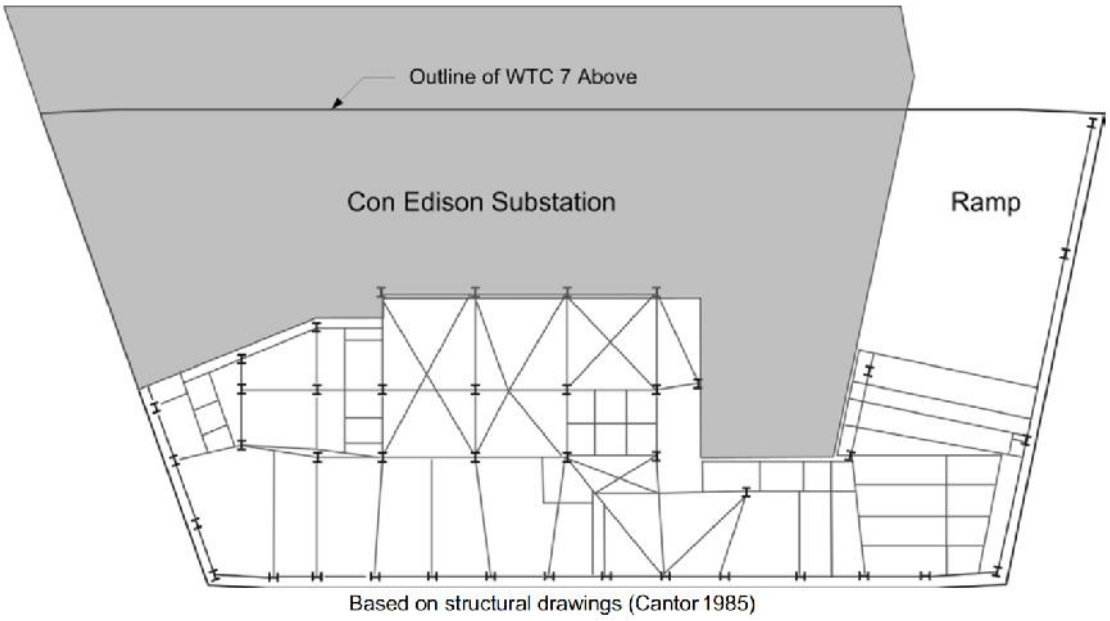


Abbildung 6: Con Edison Substation, 1st Floor Floorplan, NCSTAR 1-9, Seite 16

Die Con Edison Substation war für die Stromversorgung von Lower Manhattan und damit auch für den World Trade Center Komplex zuständig. Sie wurde bereits 1967 und somit vor WTC 7 erbaut (NIST, 2008b, S. 633 f).
Die Zufahrtsrampe im östlichen Teil von WTC 7 führte in die Untergeschosse des gesamten World Trade Center Komplexes und wurde für alle sieben Gebäude genutzt (FEMA, 2002, S. 5-2 f).

Über die Vesey Street gab es zwei Verbindungen von WTC 7 zum WTC Plaza. Eine 37 m breite Plaza Brücke und eine glasumschlossene, 6,7 m breite Fußgängerbrücke. Beide führten in das 3. Stockwerk von WTC 7 (NIST, 2008a, S. 2).

WTC 7 wurde als reines Bürogebäude genutzt. Die Fläche eines jeden Geschosses belief sich auf rund 200 000 m^2. Folgende Tabelle ist eine Auflistung der größeren Mieter in den einzelnen Stockwerken.

Floor	**Tenant**
46-47	Mechanical Floors
28-45	Salomon Smith Barney (SSB)
26-27	Standard Chartered Bank
25	Internal Revenue Service (IRS) Department of Defense (DOD) Central Intelligence Agency (CIA)
24	Internal Revenue Service (IRS)
23	Office of Emergency Management (OEM)
22	Federal Home Loan Bank of New York
21	First State Management Group
19-21	ITT Hartford Insurance Group
19	National Association of Insurance Commissioners (NAIC) Securities Valuation Office
18	Equal Employment Opportunity Commission (EEOC)
14-17	Vacant
13	Provident Financial Management
11-13	Securities and Exchange Commission
9-10	U.S. Secret Service
7-8	American Express Bank International
7	OEM generators and daytanks
6	Switchgear, storage
5	Switchgear, generators, transformers
4	Upper level of 3rd floor lobby, switchgear

3	Lobby, SSB Conference Center, rentable space, management offices
2	Open to 1st floor lobby, transformer vault upper level, upper level switchgear
1	Lobby, loading docks, existing Con Ed transformer vaults, fuel storage, lower level switchgear

Tabelle 1: Darstellung der Mieter in WTC 7, nach FEMA BPS, Seite 5-2, Table 5-1

2.2 Baukonstruktion des Gebäudes

2.2.1 Das Tragwerk

Da Manhattan von den beiden Flüssen Hudson River und East River umgeben ist, liegt der Grundwasserspiegel sehr hoch. Die Gründungsmaßnahmen für die Con Edison Substation und WTC 7 wurden mithilfe von Senkkästen (*Caissons*) durchgeführt (FEMA, 2002, S. 1-2 f, 5-3).
Bereits beim Bau der zweistöckigen Con Edison Substation 1967 wurde an eine Aufstockung für ein Bürogebäude gedacht. Daher wurden bei der Gründung zusätzliche Senkkästen erstellt und weitere Stützen eingebaut. Da die Höhe und Grundfläche von WTC 7 aber die früheren Überlegungen übertraf, waren weitere Gründungsmaßnahmen notwendig (FEMA, 2002, S. 5-3).
In der folgenden Abbildung sind Ansichten aller vier Seiten zu sehen, welche das Stahltragwerk als systematische Darstellung zeigen.

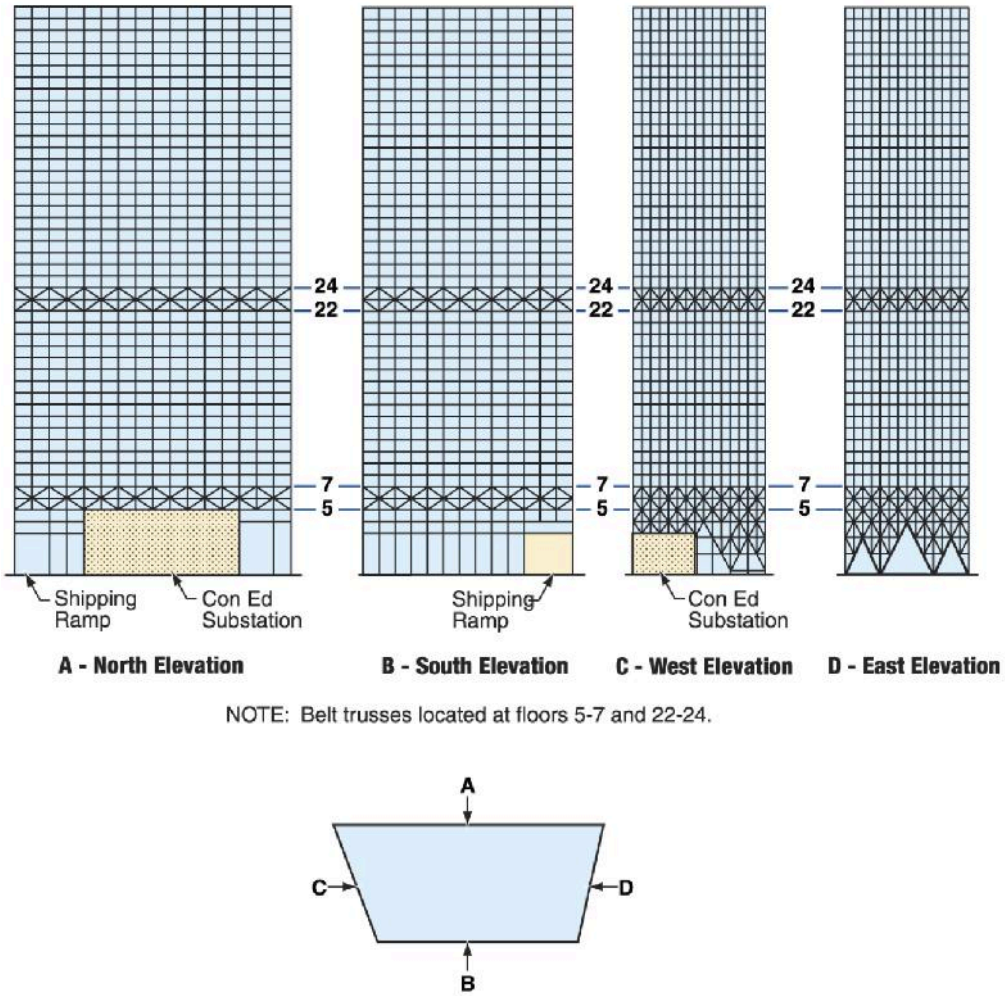


Abbildung 7: WTC 7 Außenansichten, Ausschnitt aus FEMA BPS Seite 5-5, Fig. 5-3

Das Tragwerk ist als *gravity frame* (Schwerkrafttragwerk) ausgebildet. Die Deckenträger und Hauptträger spannen gelenkig vom Kern des Gebäudes zu den außenliegenden Stützen. Im Gebäudeinneren gab es 24 Stützen, wobei 21 dieser Stützen den rechteckigen Gebäudekern formten, der leicht nach Westen versetzt war. Die 3 weiteren Stützen trugen die großen Deckenbereiche östlich des Kerns. 58 außenliegende Stützen befanden sich unmittelbar hinter der Fassade (NIST, 2008a, S. 5). Dieser Aufbau des Tragwerks, die Stützen nach innen in den Kern und nach außen an die Fassade zu ziehen, ermöglichte es, große stützenfreie Flächen in den Geschossen zu realisieren. Die gesamte Infrastruktur des Gebäudes wird hierbei im Gebäudekern untergebracht. Für die Vermietung von Büroflächen in einem Ort wie New York, wo Fläche Mangelware ist, ist dieses Konzept sehr attraktiv. So wurden auch schon die beiden Zwillingstürme WTC 1 und WTC 2 nach diesem Konzept erbaut.

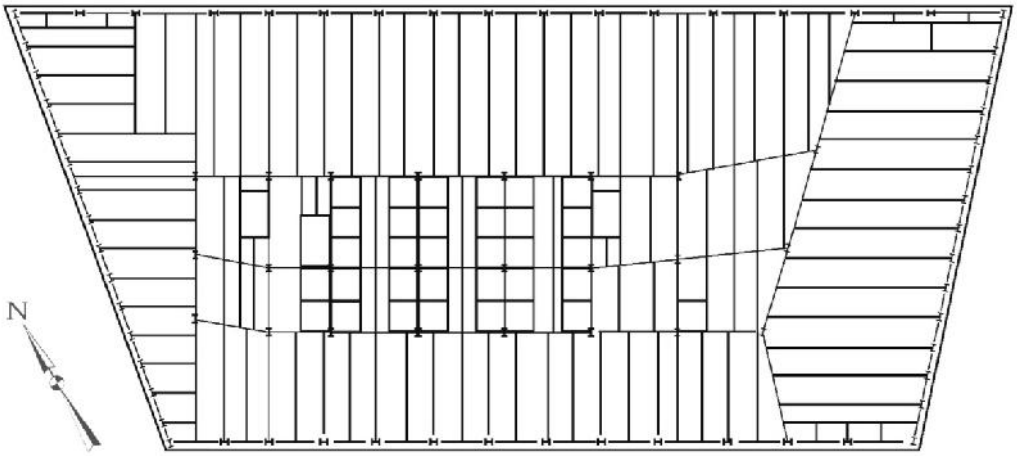


Abbildung 8: Typical Floor Framing Plan, bearbeitet, FEMA BPS, Seite 5-4, Fig. 5-2

Diese außenliegenden Stützen waren steif miteinander verbunden, als sog. *moment frame*. Damit konnten Schubkräfte z.B. aus Windlasten aufgenommen werden. Zusätzlich befanden sich zwischen dem 5. und 7. Stockwerk sowie zwischen dem 22. und 24. Stockwerk sog. *belt trusses* (Fachwerkgürtel), welche ebenfalls die horizontalen Lasten verteilen konnten.
In den untersten 7 Stockwerken sind weitere Bereiche sowohl zwischen den außenliegenden Stützen (siehe Abbildung 7 Seite 11) als auch im Kern (siehe Abbildung 8) mit Fachwerkträgern versehen.

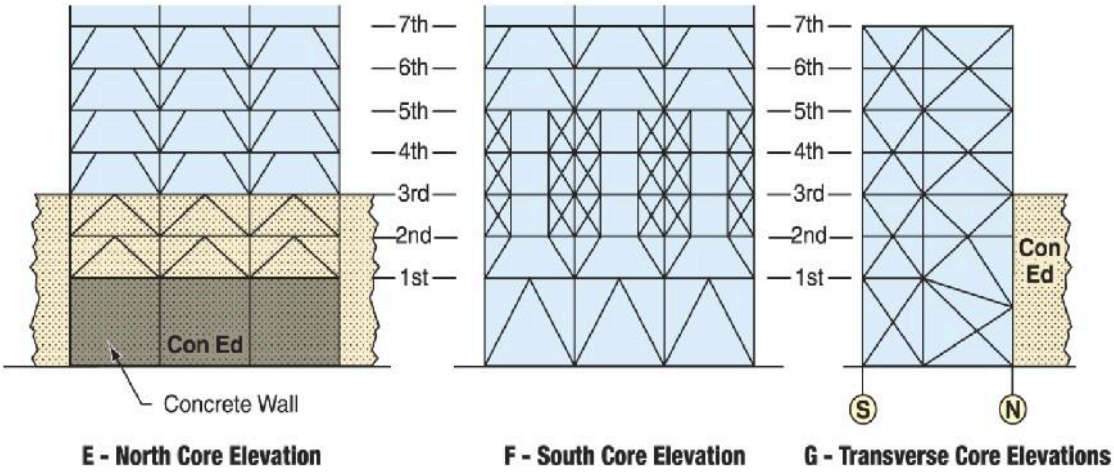


Abbildung 9: Elevation of Core Area, Ausschnitt aus FEMA BPS, Seite 5-5, Fig. 5-3

Diese Fachwerkträger waren notwendig, da der gewählte Grundriss nicht optimal auf die vorhandenen Stützen und Teile der Con Edison Substation passten. Die Lasten mussten also von den oberen Stockwerken auf die Umspannstation und

die Stützen umgeleitet und in die Fundamente eingeleitet werden (NIST, 2008a, S. 5). Die maßgeblichsten Fachwerkträger im Inneren sind auf folgender Abbildung zu sehen.

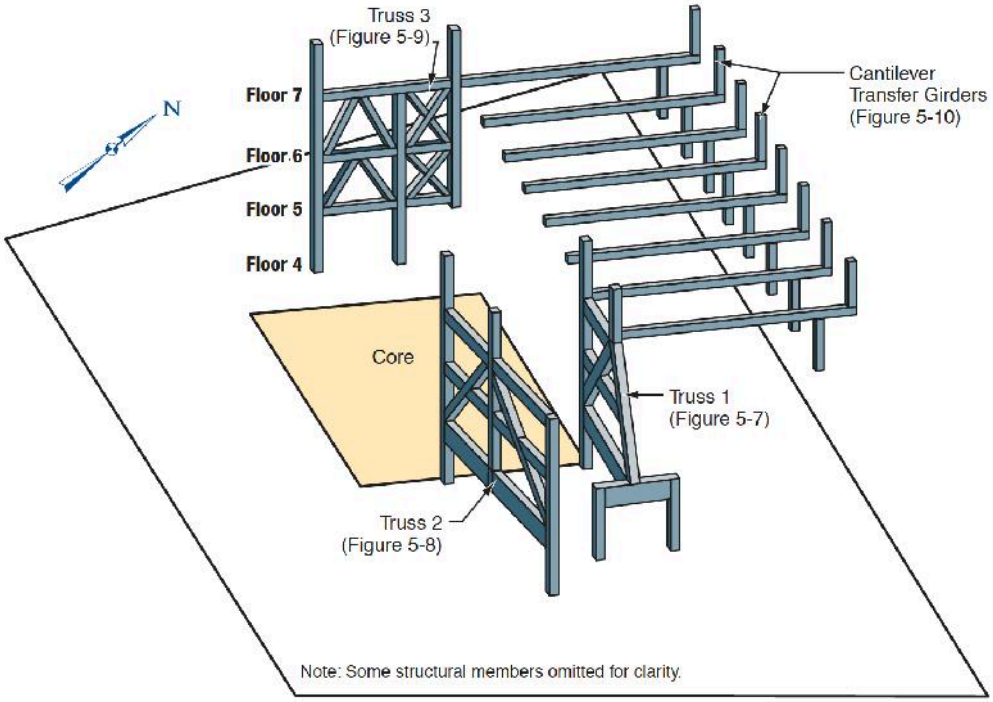


Abbildung 10: Transfer Trusses, FEMA BPS, Seite 5-6, Fig. 5-5

Dabei handelt es sich um Truss 1, Truss 2 und Truss 3 sowie um 8 auskragende Träger auf der nördlichen Gebäudeseite.
Im 5. Stockwerk wurden in die 14 in (ca. 36 cm) dicke Stahlbetondecke zusätzlich T-Profile eingebracht (FEMA, 2002, S. 5-4). Folgende Abbildung zeigt den sog. *diaphragm plan* des 5. Stockwerks.

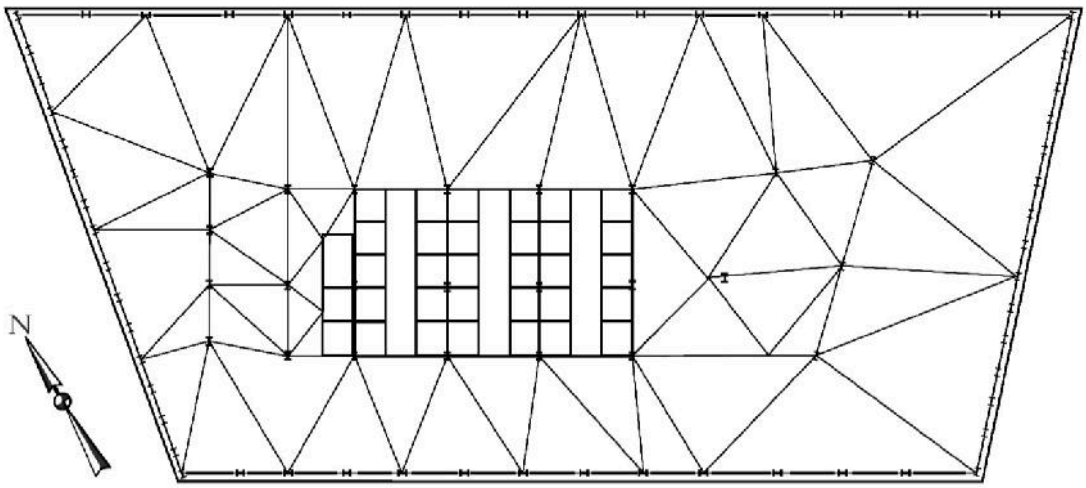


Abbildung 11: 5th floor diaphragm plan, bearbeitet, FEMA BPS, Seite 5-6, Fig. 5-4

Die Stahlbetondecke im ersten Stock war ebenfalls 14 in (ca. 36 cm) dick. Fast alle anderen Decken waren Stahlbetonverbunddecken bestehend aus einem 3 in (ca. 7,6 cm) tiefen Trapezblech und einer variierenden Betondicke. In den Stockwerken 2, 3, 4 und 6 betrug die Gesamtdicke der Decke 6 in (ca. 15 cm). Im siebten Stockwerk bestand die nördliche Hälfte aus einer 8 in (ca. 20 cm) Stahlbetonverbunddecke und die südliche Hälfte der Decke aus einer 8 in (ca. 20 cm) Stahlbetondecke. Die übrigen Stockwerke 8 bis 47 hatten eine 5,5 in (ca. 14 cm) Stahlbetonverbunddecke (NIST, 2008a, S. 6 f).

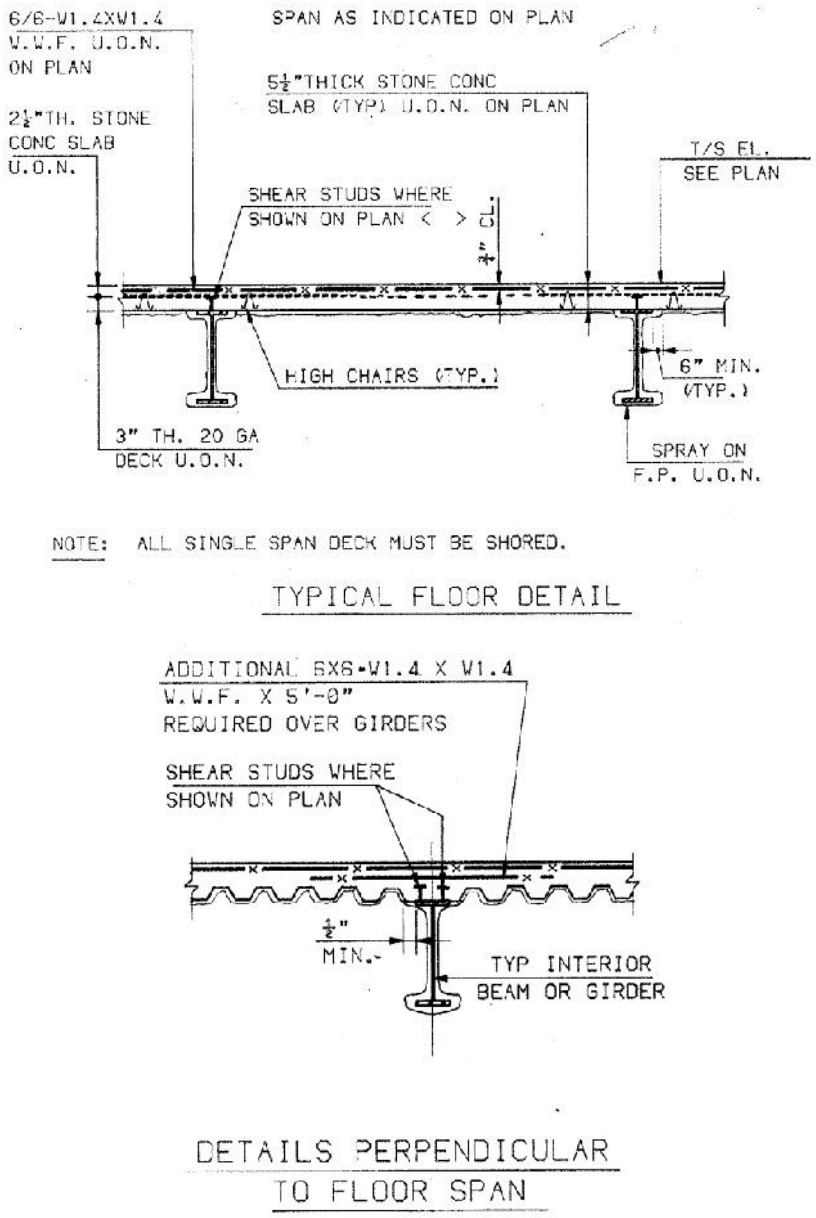
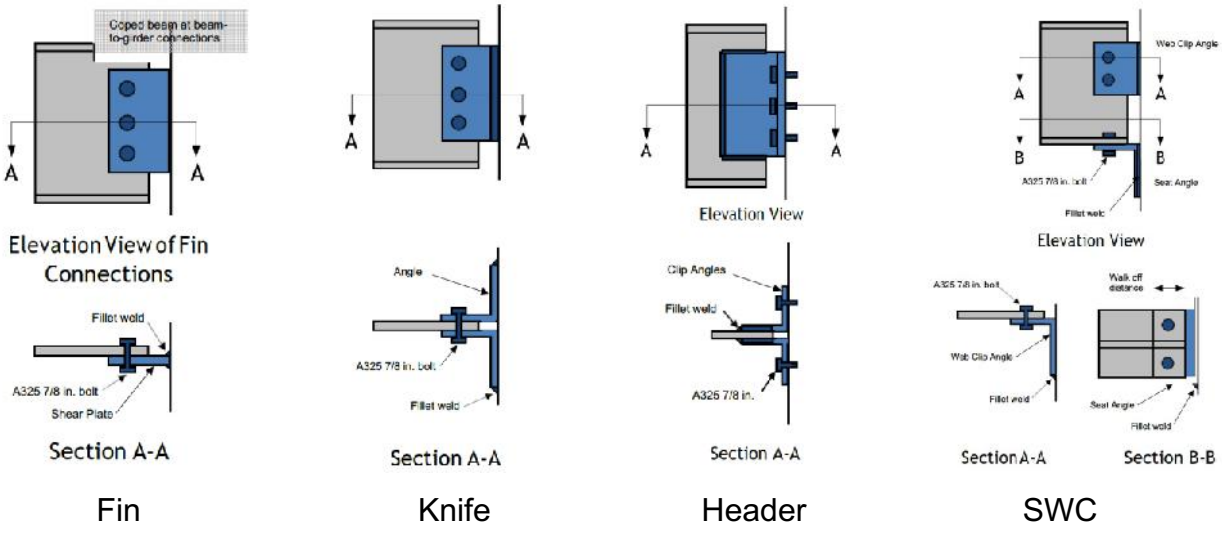


Abbildung 12: Regeldetail der Verbindung von Stahlbetonverbunddecke mit Deckenträgern, Ausschnitt aus Plan: Typical Superstructure Sections & Details #2

Die Bewehrung der Decken war standardmäßig eine Lage Betonstahlmatte (vgl. Angabe im Plan: W.W.F. U.O.N., steht für: Welded Wire Frame upon otherwise noted).
Die Decken lagen auf Doppel-T-Profil Deckenträgern auf die *shear studs* (Kopfbolzen) aufgeschweißt waren. Damit wurde der Verbund zwischen Decke und Träger sichergestellt, um Schubkräfte weiterleiten zu können. Die Deckenträger schlossen gelenkig an Doppel-T-Profil Hauptträger an, welche selbst keine *shear studs* besaßen. Die gelenkigen Anschlüsse wurden mit *fin, knife, header* und *SWC* (*Seated Web Clip*) *connections* ausgeführt (NIST, 2008a, S. 7). Folgende Abbildungen zeigt die vier Verbindungstypen.



Fin Knife Header SWC

Abbildung 13: Fin Knife Header und SWC Connections, NCSTAR 1-9, Seite 477 ff, Fig. 11-10,11,12,13

Aufgrund der Ausführung als gelenkiger Anschluss wurden über diese Verbindungen hauptsächlich Querkräfte infolge Eigenlasten, bzw. Nutzlasten übertragen.
Die Hauptträger waren wiederum mit gelenkigen Anschlüssen an die innenliegenden und außenliegenden Stützen angeschlossen. Dabei wurden *seated connections*, eine Art Konsolauflager mit einem angeschweißten Winkel, verwendet. Eine mögliche Ausführungsvariante war die SWC Connection. Diese und folgende Variante wurden vor allem an den innenliegenden Stützen verwendet. Folgende Abbildung zeigt eine Konsolverbindung mit jeweils einem Winkel ober- und unterhalb des anschließenden Trägers.

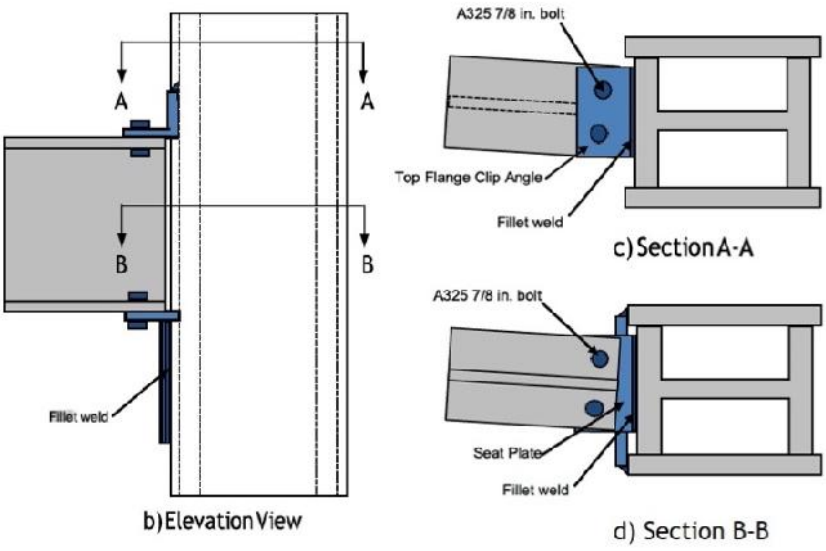


Abbildung 14: Seated Connection, NCSTAR 1-9, Seite 483, Fig. 11-15

Im Unterschied zu den Verbindungen an den innenliegenden Stützen mussten die Träger an den außenliegenden Stützen aufgrund deren Orientierung am Steg bzw. zwischen den beiden Flanschen befestigt werden. Eine solche Verbindung ist in folgender Abbildung zu sehen.

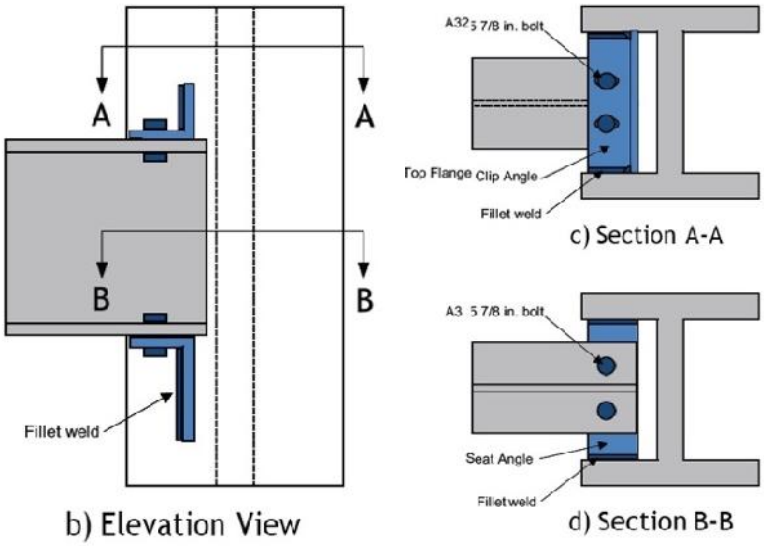


Abbildung 15: Seated Connection exterior Column, NCSTAR 1-9, Seite 481, Fig. 11-14

Die Stützen selbst wurden am Stoß über angeschweißte Bleche verschraubt.

Abbildung 16: Stoßverbindung einer Fassadenstütze, Screenshot aus YouTube Video, https://www.youtube.com/watch?v=Q6MPNsInmiY, Minute 5:18

Die äußeren Stützen waren biegesteif über sog. *moment connections* miteinander verschweißt (NIST, 2008a, S. 7).

2.2.2 Brandschutzmaßnahmen

WTC 7 verfügte sowohl über passive als auch über aktive Brandschutzmaßnahmen.
Der passive Brandschutz wurde durch Beschichtungen auf den Stahlbauteilen sichergestellt. Die Träger an den Deckenunterseiten, die Trapezbleche der Decke und die Stützen wurden mit aufgesprühtem Brandschutzmaterial (*sprayed fire-resistive material, SFRM*) geschützt. Dabei handelte es sich um das Material Monokote MK-5, ein anorganisches Gemisch auf Gipsbasis mit Vermiculit, einem Silicat mit sehr geringer Wärmeleitfähigkeit von 0,046 bis 0,07W/m*K und einer hohen Schmelztemperatur (Pfundstein, et al., 2007). Gemäß den damals gültigen New York City Building Codes (NYCBC) war für große Stützen eine 22 mm Beschichtung, für kleinere Stützen eine 48 mm Beschichtung gefordert. Die Träger bekamen eine 13 mm Beschichtung und die Trapezbleche eine 10 mm

Beschichtung. Untersuchungen zufolge wurden diese Werte eingehalten (NIST, 2008b, S. 45). Damit waren die Anforderungen für ein Type 1B Gebäude, ein Hochhaus (*high-rise*) ohne Sprinkleranlage, erfüllt. Da WTC 7 aber über eine Sprinkleranlage verfügte, war WTC 7 brandschutztechnisch besser ausgestattet als erforderlich, da es sich eigentlich um ein Type 1C Gebäude, ein Hochhaus mit Sprinkleranlage, handelte (NIST, 2008a, S. 7).

Die Sprinkleranlage und Standrohre wurden über zwei verschiedene Quellen gespeist. Die unteren 20 Stockwerke erhielten ihr Wasser ausschließlich von der Hauptleitung der Wasserversorgung in der Straße. Für die Stockwerke 21 bis 47 wurde das Wasser in zwei großen Behältern im 47. Stockwerk bereitgestellt (NIST, 2008a, S. 7). Die Behälter hatten ein maximales Fassungsvermögen von je 70 m^3. Die Sprinkleranlage verfügte über eine Kontrolle der Fließgeschwindigkeit, worüber Alarm ausgelöst werden konnte (NIST, 2008b, S. 67, 73).

Die Rauchmelder und manuell bedienbaren Brandmelder aktivierten bei Auslösen einen Alarm im Brandgeschoss sowie im Geschoss darüber. Außerdem wurde die genaue Position des ausgelösten Melders an die *fire command station* (FCS, Brandmeldezentrale) im 3. Stockwerk weitergegeben sowie ein Alarm an das FDNY gesendet (NIST, 2008a, S. 7). In allen Geschossen waren zusätzlich Lautsprecher verbaut, welche über die FCS verwendet werden konnten. Visuelle Signale wurden in öffentlichen Bereichen des Gebäudes in Form von *strobes* (Stroboskop-Lichter) integriert (NIST, 2008b, S. 66).

Um eine Rauchausbreitung so gering wie möglich zu halten, waren u.a. im gesamten Gebäude Schotts in den Kanälen der Lüftungsanlage verbaut. Um den vorhandenen Rauch aus dem Gebäude zu bekommen, besaß WTC 7 auch eine Entrauchungsanlage (NIST, 2008a, S. 7). Bei Aktivierung eines Melders wurden die Lüftungsanlage im entsprechenden Stockwerk ausgeschaltet, die Entrauchungsöffnungen geöffnet und die Ventilatoren der Entrauchungsanlage gestartet (NIST, 2008b, S. 67).

Die Aufzüge verfügten über eine dynamische Brandfallsteuerung. Das bedeutet, dass alle Aufzüge mit einem Haltepunkt im Stockwerk, in dem Alarm ausgelöst wurde, ohne weiteren Halt bis auf das unterste Geschoss fahren. Falls der Alarm in eben diesem Geschoss ausgelöst wird, hält der Aufzug im Alternativgeschoss, zwei Stockwerke weiter oben (NIST, 2008b, S. 67).

3 Untersuchungsbericht des National Institute of Standards and Technology

3.1 Über das National Institute of Standards and Technology

Das National Institute of Standards and Technology (NIST) wurde im Jahre 1901 gegründet. Ziel war es, Messstandards in den Vereinigten Staaten von Amerika (USA) zu verbessern, um mit der Konkurrenz im industriellen Bereich mithalten zu können. Das Vereinigte Königreich und Deutschland sowie andere Länder waren damals in diesem Bereich deutlich besser aufgestellt als die USA.
Über die Jahrzehnte wurde in unterschiedlichsten Zweigen der Industrie, Technologie und Wissenschaft verbessert, geforscht und standardisiert.
NIST ist Teil des Department of Commerce und arbeitet mit verschiedenen anderen Regierungsbehörden sowie Firmen aus dem privaten Sektor und Universitäten zusammen.
Als eigene Mission sieht NIST die Förderung der Innovation in den USA und die Verbesserung der Wettbewerbsfähigkeit der Industrie. Dies soll durch verbesserte Messtechnik, Standards und Technologien ermöglicht werden.
Die eigenen Kernwerte sieht NIST in Beharrlichkeit, Integrität, Inklusivität und Exzellenz.
Speziell im Bereich von Bauwerken und Konstruktionen befasst sich die Behörde zum Beispiel mit dem Thema Sicherheit. Dabei kann es um das Verhalten von Gebäuden bei einem Hurrikan gehen oder um die Simulation einer Brandausbreitung in einem Gebäude, um nur zwei Beispiele zu nennen. Meist liegen den Untersuchungen reale Unfälle oder Katastrophen zugrunde, um diese in Zukunft möglichst zu verhindern, beziehungsweise die Bevölkerung bestmöglich davor zu schützen. (NIST, 2017)

Im Oktober 2002 wurde in den USA die Verordnung *National Construction Safety Team Act* (kurz NCSTA) verabschiedet. Damit wurde NIST dazu berechtigt, sogenannte *National Construction Safety Teams* zu erstellen, welche Einstürze oder Teileinstürze von Bauwerken untersuchen (U.S. Government, 2002).

Die Aufgaben der Teams sind unter anderem, mögliche technische Ursachen für das Eintreten des Ereignisses herauszufinden und zu untersuchen, mögliche Schwachstellen der Normen und Richtlinien zu finden und Verbesserungen vorzuschlagen, die notwendigen Grundlagen für solche Änderungen zu schaffen und als Orientierung für zukünftige Untersuchungen alle vorhandenen Informationen und Erkenntnisse aufzunehmen (NIST, 2012).
Nach abgeschlossener Untersuchung haben die Teams einen Bericht bzw. mehrere Berichte zu veröffentlichen, die alle Untersuchungen und Erkenntnisse enthalten (U.S. Government, 2002). Diese Berichte werden *National Construction Safety Team Act Reports* oder kurz NCSTAR's genannt.
Die Berichte zum Kollaps des WTC 7 am 11. September 2001, welche nachfolgend betrachtet werden, wurden in den NCSTAR 1A, NCSTAR 1-9 und NCSTAR 1-9A behandelt.
NCSTAR 1A entspricht einer Zusammenfassung des Vorgehens und der Ergebnisse. Hier sind zusätzlich noch Empfehlungen für Verbesserungen und Anpassungen von Normen, Evakuierungsplänen und Ähnlichem enthalten.
NCSTAR 1-9 und NCSTAR 1-9A beinhalten die detaillierte Dokumentation des Vorgehens, Berechnungen und Simulationen, wobei es sich bei NCSTAR 1-9A um einen Zusatz zu NCSTAR 1-9 handelt, welcher eine detaillierte Beschreibung der Modellierung und Analyse mit dem Finite Elemente Programm LS-DYNA enthält.

3.2 Zielsetzung des Berichts

Aus den im vorigen Abschnitt genannten Aufgaben der National Construction Safety Teams ergibt sich die Zielsetzung des Berichts zu WTC 7.

Des weiteren steht zu Beginn des Berichts NCSTAR 1A eine Widmung (*Dedication*), in welcher eine wichtige Frage gestellt wird: „How can we reduce our vulnerability to such attacks, and how can we increase our preparedness and safety while still ensuring the functionality of the places we work and live?" (NIST, 2008a, S. xiii). Nach einem tragischen Ereignis wird auf wissenschaftlich technische Weise versucht, die Ursachen so präzise wie möglich zu erforschen, um mit dem erlangten Wissen weiteren Katastrophen vorzubeugen. So heißt es

weiter: „In this spirit, this report is dedicated to those […] who will carry it forward to improve the safety of buildings.” (NIST, 2008a, S. xiii). Der Bericht dient also als Grundlage und die Ergebnisse müssen in die Praxis übersetzt werden.
Zur Gewinnung dieser Erkenntnis war es daher notwendig, den Auslöser und den genauen Ablauf des Kollapses herauszufinden.

3.3 Inhalt des Berichts

3.3.1 Schäden durch die Einstürze von WTC 1 und WTC 2

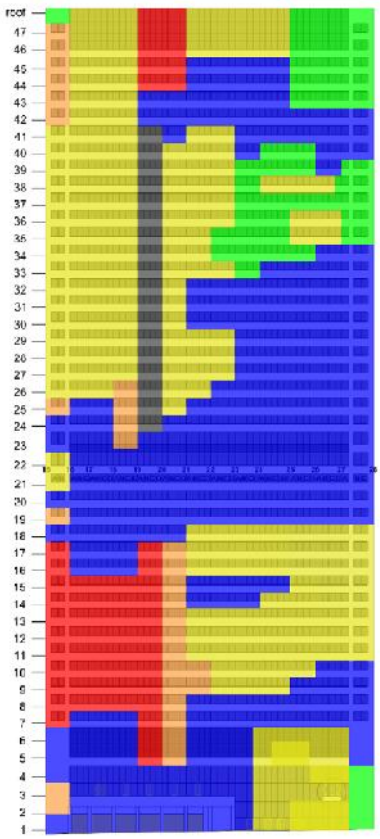
Mit dem Einsturz von WTC 2 am 11.09.2001 um 9:58:59 Uhr vormittags entstanden an WTC 7 nur geringfügige Schäden. Aufgrund der starken Staubentwicklung und benachbarter Gebäude war ein uneingeschränkter Blick auf die Fassade von WTC 7 nur schwer möglich (NIST, 2008b, S. 118). Einige wenige Foto- und Videoaufnahmen nach dem Einsturz von WTC 2 und vor dem Einsturz von WTC 1 zeigten aber nur einige zerbrochene Fensterscheiben am WTC 7.

Abbildung 17: Fotoaufnahme von WTC 7 Südseite (links) nach Einsturz von WTC 2, CBS News Archives

Die Entfernung von WTC 7 zu WTC 2 betrug rund 210 m, außerdem befand sich zwischen beiden Gebäuden das WTC 1. Daher konnte das WTC 7 kaum von großen Trümmerteilen erreicht werden (NIST, 2008b, S. 125).
Der Einsturz von WTC 2 hatte also keine Auswirkungen auf das Tragwerk des WTC 7.
Um 10.28.22 Uhr vormittags stürzte WTC 1 auf fast dieselbe Weise wie WTC 2 ein. Aufgrund der unmittelbaren Nähe zu WTC 7 führten herumfliegende Trümmerteile in diesem Fall zu Schäden an der Südfassade bzw. der südwestlichen Ecke von WTC 7 (NIST, 2008b, S. 130ff). Auch in diesem Fall war der Großteil der Fassade von WTC 7 durch Staubwolken verdeckt. Es gab wieder nur wenige Foto- und Videoaufnahmen, auf denen Teile der Fassade sichtbar waren.

Abbildung 18: Aufnahme nach Einsturz von WTC 1 zeigt Schäden an Fassade von WTC 7, NYPD

NIST hatte die aufwändige Arbeit, aus allen verfügbaren visuellen Beweisen den Zustand der Fassade von WTC 7 zu ermitteln. Ergebnis der Untersuchung war folgende Abbildung:

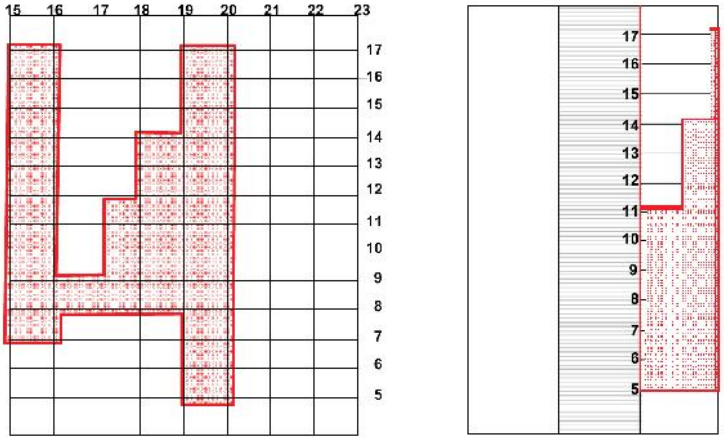


- Grün: Keine Sichtbaren Schäden
- Gelb: Fensterglas zerbrochen
- Orange: Granitverkleindung und darunterliegender Träger beschädigt
- Rot: Schaden an außenliegendem Tragwerk
- Grau: Möglicher Schaden am Tragwerk
- Blau: Nicht sichtbar

Abbildung 19: Darstellung der Schäden an Südseite von WTC 7, NIST NCSTAR 1-9, Seite 173, Fig. 5-83

In den folgenden Bereichen trug WTC 7 Schäden an Fassade, äußeren Stützen und Deckenbereichen davon (NIST, 2008b, S. 182):

- Zwischen dem 15. und 17. Stockwerk, ein kleiner Teil der Geschossbreite
- Zwischen dem 12. und 14. Stockwerk, die Hälfte der Deckentiefe
- Zwischen dem 7. und 11. Stockwerk, die volle Geschossbreite bis zum Gebäudekern
- Zwischen dem 5. und 6. Stockwerk, die volle Geschossbreite bis zum Gebäudekern zwischen den Stützen 19 und 20
- Stockwerk 6 und Stockwerk 10 bis 17, ein kleiner Teil der Geschossbreite
- Zwischen 8. und 9. Stockwerk, die volle Geschossbreite bis zum Gebäudekern



Südansicht von WTC 7 Schnitt durch WTC 7

- rot: Schäden am Tragwerk
- grau: Gebäudekern
- Vertikale Nummerierung: Geschosszahl
- Horizontale Nummerierung: Bezeichnung der Stützen

Abbildung 20: Darstellung der Beschädigten Bereiche des Tragwerks, NIST NCSTAR 1-9, Seite 183, Fig. 5-92 und Fig. 5-93

Die Schäden am Tragwerk von WTC 7 beschränkten sich also auf den Bereich zwischen dem 5. und 17. Stockwerk des 47 Stockwerke hohen Gebäudes. Die Schäden an der Verkleidung der Fassade und an den Fenstern umfassten einen größeren Bereich der Südfassade und der südwestlichen Ecke.
An den Ost-, West-, und Nordfassaden von WTC 7 konnten keine Schäden des Tragwerkes ausgemacht werden. Hier beschränkten sich die Schäden auf Fenster und die Fassadenverkleidung an den Ost- und Westfassaden.

Die ermittelten Schäden am Tragwerk wurden von NIST in die Computersimulation übernommen. Zunächst wurde das Modell nur mit der Eigenlast beaufschlagt. Ergebnis dieser Simulation war, dass sich die Lasten verlagern und über benachbarte, unversehrte Träger und Stützen abgetragen werden können. Das Gebäude blieb also auch mit den Schäden durch Trümmerteile von WTC 1 stabil (NIST, 2008b, S. 569 f).

3.3.2 Entstandene Brände und deren Verlauf

Auch hier war die genaue Bestimmung der Brände schwer möglich, da sie sich überwiegend unbemerkt hinter Fassade, Fenstern, Staub- und Rauchwolken ausbreiten konnten. Laut NIST waren die vorhandenen Foto- und

Videoaufnahmen aber ausreichend, um die Brandentstehung und Ausbreitung nachvollziehen zu können (NIST, 2008a, S. 18).
Die ersten Brände entstanden vermutlich aufgrund brennender Trümmerteile aus dem Einsturz von WTC 1 um 10:28:22 Uhr vormittags. NIST nennt auch elektrische Kurzschlüsse durchtrennter Kabel als weitere mögliche Ursache der Brände in WTC 7. Vermutet wird, dass die ersten Brände am beschädigten südwestlichen Gebäudeteil entstanden und sich von dort ausbreiteten. Bei den verschiedenen Bränden in mindestens zehn Stockwerken handelte es sich um unabhängig voneinander entstandene Brände. Diese breiteten sich auch jeweils nur auf dem eigenen Stockwerk aus und schlugen nicht auf darüber- oder darunterliegende Stockwerke über (NIST, 2008a, S. 18 f).
Im Gegensatz zu WTC 1 und WTC 2 gab es in WTC 7 keine zusätzliche Brandlast durch Kerosin der Flugzeuge. Hier breiteten sich die Brände also nicht schlagartig über weite Teile eines Geschosses aus (NIST, 2008a, S. 18).
In den Geschossen, in denen sich die sehr offen gestalteten Großraumbüros befanden, breiteten sich die einzelnen Brandherde vermutlich über angrenzende Brandlasten durch Feuerüberschlag und Wärmestrahlung aus. Mit zunehmender Größe des Brandes entzündeten sich wahrscheinlich dann auch die Rauchgase, was zu einer stärkeren Brandausbreitung führte. Bei den Stockwerken 7 bis 9 handelte es sich um solche offen gestalteten Büroflächen.

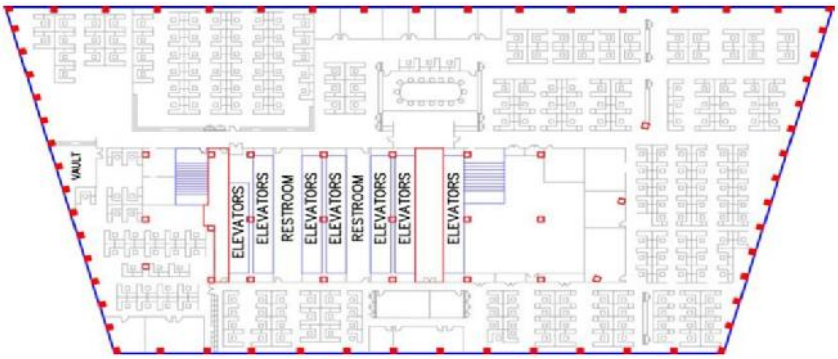


Abbildung 21: Typisches Geschoss mit offenen Arbeitsplätzen, NIST NCSTAR 1A, Seite 10, Fig. 1-8

In den Geschossen, die hauptsächlich aus Einzelbüros bestanden, konnten sich die Brände nur von Raum zu Raum ausbreiten. Wahrscheinlich ist hierbei, dass sich im Raum, in dem sich der Brandherd befand, die Temperatur so weit erhöhte, bis sich schlagartig alle im Raum befindlichen Brandlasten nach dem Prinzip des sog. Flash-Over selbstentzündeten.

Nach dem Versagen der abgehängten Decke konnte sich der Brand dann in weitere Räume ausbreiten. Die Stockwerke 11 bis 13 waren in dieser Form ausgestattet (NIST, 2008a, S. 9 ff).

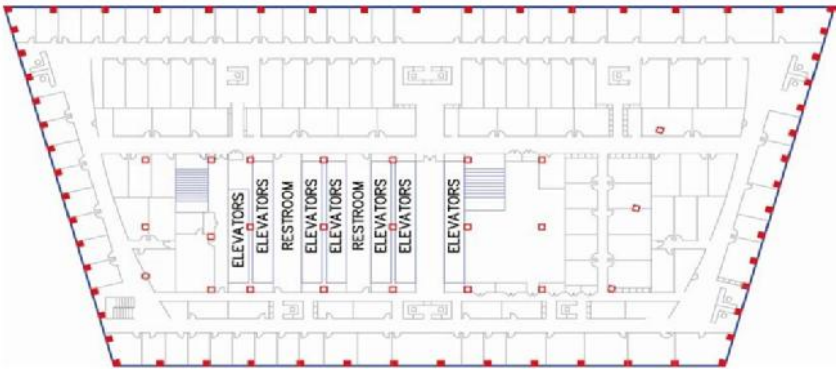


Abbildung 22: Typisches Geschoss mit Einzelbüros, NIST NCSTAR 1A, Seite 10, Fig. 1-9

Da die Wasserversorgung für die Sprinkleranlage in den Stockwerken 21 bis 47 durch Wassertanks auf dem Dach des Gebäudes sichergestellt wurde, konnten Brände in diesen Stockwerken durch die Sprinkleranlage gelöscht werden. Das untermauert NIST auch damit, dass nach 13:00 Uhr keine Flammen mehr in diesen Stockwerken sichtbar waren. Die Sprinkleranlage der unteren 20 Stockwerke wurde durch die Wasserversorgung in der Straße gespeist. In Folge der Einstürze von WTC 1 und WTC 2 wurde die Wasserversorgung in diesem Bereich der Stadt unterbrochen. Daher konnten sich die Brände in den unteren 20 Stockwerken ungehindert ausbreiten. Zwischen 14:00 Uhr und dem Einsturz von WTC 7 um 17:20:52 Uhr waren Brände in den Stockwerken 7 bis 13, mit Ausnahme des 10. Stockwerks, sichtbar. Im 14. Stockwerk war vor dem Einsturz von WTC 7 ein kleiner Brandherd für kurze Zeit sichtbar. Diese Brände in den Stockwerken 7 bis 9 und 11 bis 13 waren laut NIST die einzigen Brände, die zur Schwächung des Tragwerks führen konnten. Daher wurden auch nur diese Stockwerke in den Simulationen von NIST behandelt (NIST, 2008a, S. 19).
Mit der Aussage: „[...] the Investigation Team realized that the absolute timing of the simulations might not align exactly with the timing of the fires on September 11, 2001." (NIST, 2008a, S. 32) räumt NIST ein, die Brände nicht passend genug simuliert zu haben. Außerdem erwähnt NIST auch, dass die Dauer der Brände überschätzt wurde: „The simulations of the Floor 12 fires (and thus the derivative Floor 11 and 13 fires) may have overestimated the duration of the fires […]" (NIST, 2008a, S. 52).

Mit dem Software Programm Fire Dynamics Simulator (FDS) wurden die Gastemperaturen in Deckennähe separat für jedes Stockwerk simuliert, da nicht davon ausgegangen wurde, dass sich die Brände über die Stockwerke hinaus ausgebreitet hatten. Die Simulationen für die Stockwerke 7, 8 und 12 wurden einzeln mithilfe der visuellen Beweise erstellt. Da sich die Brände der einzelnen Stockwerke ähnelten, wurde für den 9. Stock die Simulation des 8. Stockwerkes leicht verändert übernommen. Dasselbe gilt für die Stockwerke 11 und 13, die nach der Simulation von Stockwerk 12 nur leicht abgeändert übernommen wurden (NIST, 2008a, S. 32). Nachfolgend sind Ausschnitte der Simulation des 12. Stockwerkes zu sehen.

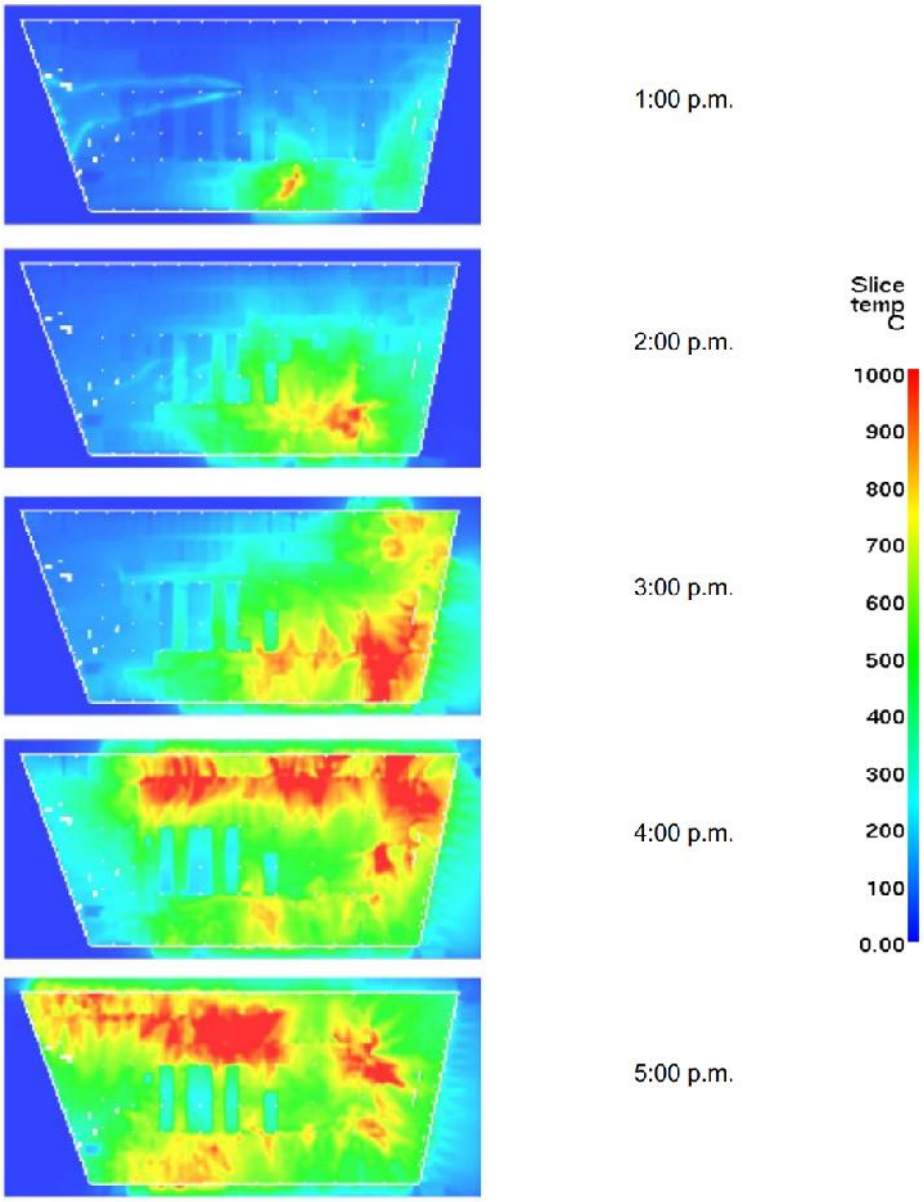


Abbildung 23: Simulierte Brandtemperaturen im 12. Stockwerk, NIST NCSTAR 1A, Seite 34, Fig. 3-6

3.3.3 Verhalten des Tragwerks unter der Temperaturbelastung

Das Software Programm Fire Structure Interface (FSI) wurde dann verwendet, um das Tragwerk mit den Temperaturen aus FDS zu beaufschlagen. Insgesamt wurden drei Szenarien simuliert. Für Fall A wurden die Temperaturen aus FDS unverändert übernommen. Für Fall B wurden die Temperaturen um 10% erhöht und für Fall C wurden die Temperaturen um 10% gesenkt (NIST, 2008a, S. 32). Folgende Abbildung zeigt die Temperaturen des Stahlskeletts vom 13. Stockwerk zu unterschiedlichen Zeitpunkten.

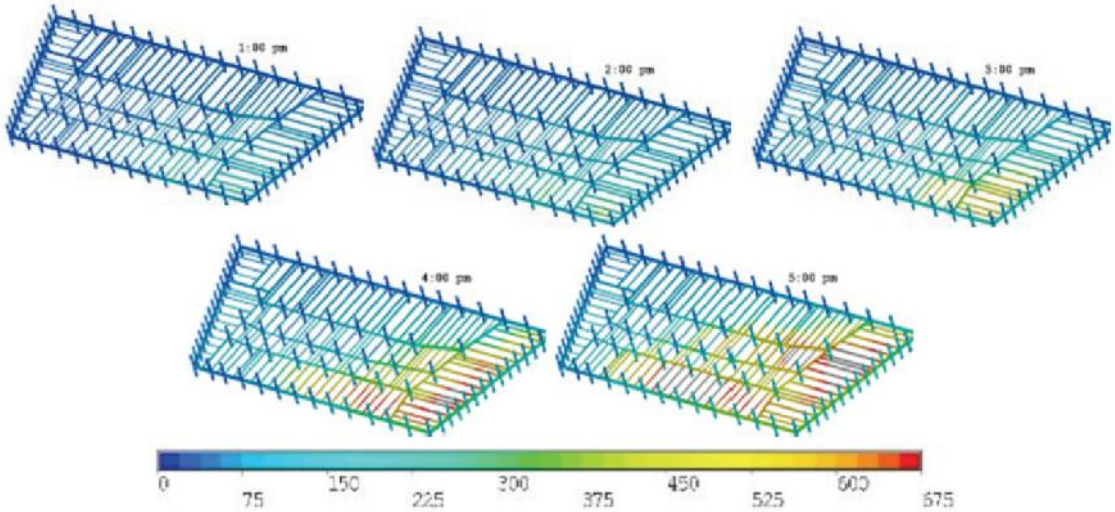


Abbildung 24: FSI Simulation der Trägertemperaturen im 13. Stockwerk, NIST NCSTAR 1A, Seite 35, Fig.3-7

Um das Verhalten des Tragwerks zu simulieren, wurden im Anschluss die Daten aus den FDS und FSI Simulationen für das Finite Elemente Programm ANSYS übernommen. In diesem Programm konnten die temperaturabhängigen Materialeigenschaften der Stützen, Träger und Verbindungsmittel entsprechend angegeben werden. Zunächst wurden drei verschiedene Szenarien mit den drei Temperaturfällen A, B und C aus FSI untersucht. Da sich die Ergebnisse der Simulationen nur in der Dauer bis zum Versagen unterschieden, wurde nur der Fall B (10% höhere Temperaturen als die ursprünglichen Temperaturen aus FDS) weiterverfolgt, um Computerrechenzeit zu sparen (NIST, 2008a, S. 36).
Ergebnis der Simulation war, dass nach einer Zeit von 3,5 h und 4,0 h große Teile der Träger und Verbindungen im östlichen Teil des 13. Stockwerks starke Schäden davongetragen hatten.

Viele Verbindungen waren komplett oder zwischen 75-99% beschädigt. Nahezu alle Träger waren entweder geknickt oder hatten kein tragendes Auflager mehr. Das Stahlskelett hatte laut NIST Temperaturen von circa 400°C oder weniger. Die Schäden wurden somit auf die thermische Ausdehnung der Bauteile zurückgeführt (NIST, 2008a, S. 36).

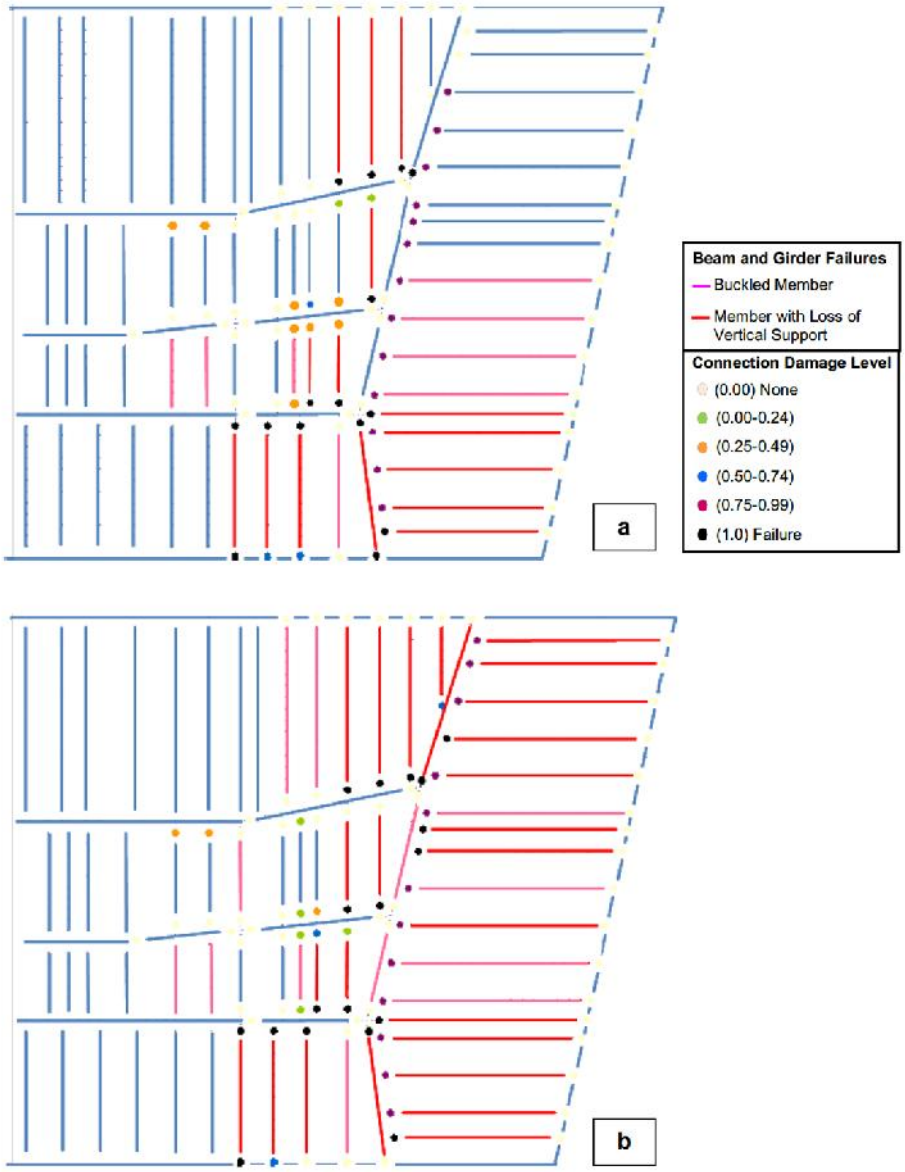


Abbildung 25: Darstellung der Schäden am Tragwerk nach ANSYS Simulation, NIST NCSTAR 1A, Seite 37, Fig. 3-9

Die Temperaturen der innenliegenden Stützen 79, 80 und 81 betrugen im gesamten Gebäude an keiner Stelle mehr als 200°C. Die außenliegenden Stützen hatten in den Stockwerken 12 und 13 maximale Temperaturen von 300°C, in allen anderen Stockwerken maximal 150°C (NIST, 2008a, S. 53).

Um eine Bauteiltemperatur zu erreichen, welche die Festigkeit der Stahlstütze erheblich verringert hätte, hätte die Dauer der Brände 6h bei Gastemperaturen von rund 1100°C liegen müssen (NIST, 2008b, S. 330). Dies ist mit den vorhandenen Brandlasten und beobachteten Zeiten nicht realistisch. Daher wurde die Möglichkeit verworfen, dass der Verlust der Tragfähigkeit dieser Stützen zum Versagen der Konstruktion hätte führen können (NIST, 2008a, S. 53).
Die Temperaturen der Decken in den Stockwerken 7, 12 und 13 erhöhten sich auf bis zu 900°C. Über die Dicke der Decke fiel die Temperatur deutlich ab, sodass Teile der Träger an der Deckenunterseite Temperaturen von 600°C in den Stockwerken 8, 12, 13 und 14 bzw. Temperaturen von 400°C in den Stockwerken 9 und 10 erreichten (NIST, 2008a, S. 53).

3.3.4 Lokales und globales Versagen des Tragwerks

Mit dem Finite Elemente Programm LS-DYNA wurden vier verschiedene Szenarien für den Kollaps simuliert.
Die erste Simulation enthielt sowohl die Temperaturen als auch die Schäden am Tragwerk aus der ANSYS Simulation.
Die zweite Simulation wurde mit denselben Parametern durchgeführt, nur die Temperaturen wurden verringert angesetzt.
In der dritten Simulation wurden die Schäden am Tragwerk nicht berücksichtigt, um herauszufinden, in wie fern diese am Kollaps beteiligt waren.
Für die vierte Simulation wurden keine Schäden und keine erhöhten Temperaturen angesetzt. Es wurde lediglich ein Teil der Stütze 79 zwischen den Stockwerken 11 und 13 entfernt, mit dem Ziel, das Verhalten eines klassisch progressiven Kollapses[2] zu simulieren, unabhängig von dessen Ursache (NIST, 2008a, S. 38 f).

Nach den Ergebnissen aus der ANSYS Simulation begann das lokale Versagen des Tragwerks vermutlich in der nordöstlichen Ecke des Gebäudes zwischen dem

[2] Progressiver Kollaps: Einsturz eines Gebäudes, beginnend mit dem Versagen eines Elements im Tragwerk, was eine Kettenreaktion auslöst.

12. und 13. Stockwerk. In der folgenden Abbildung ist dieser nordöstliche Ausschnitt des *floor framing plans* des 13. Stockwerkes zu sehen. Die wesentlichen Träger und Stützen wurden farblich hervorgehoben.

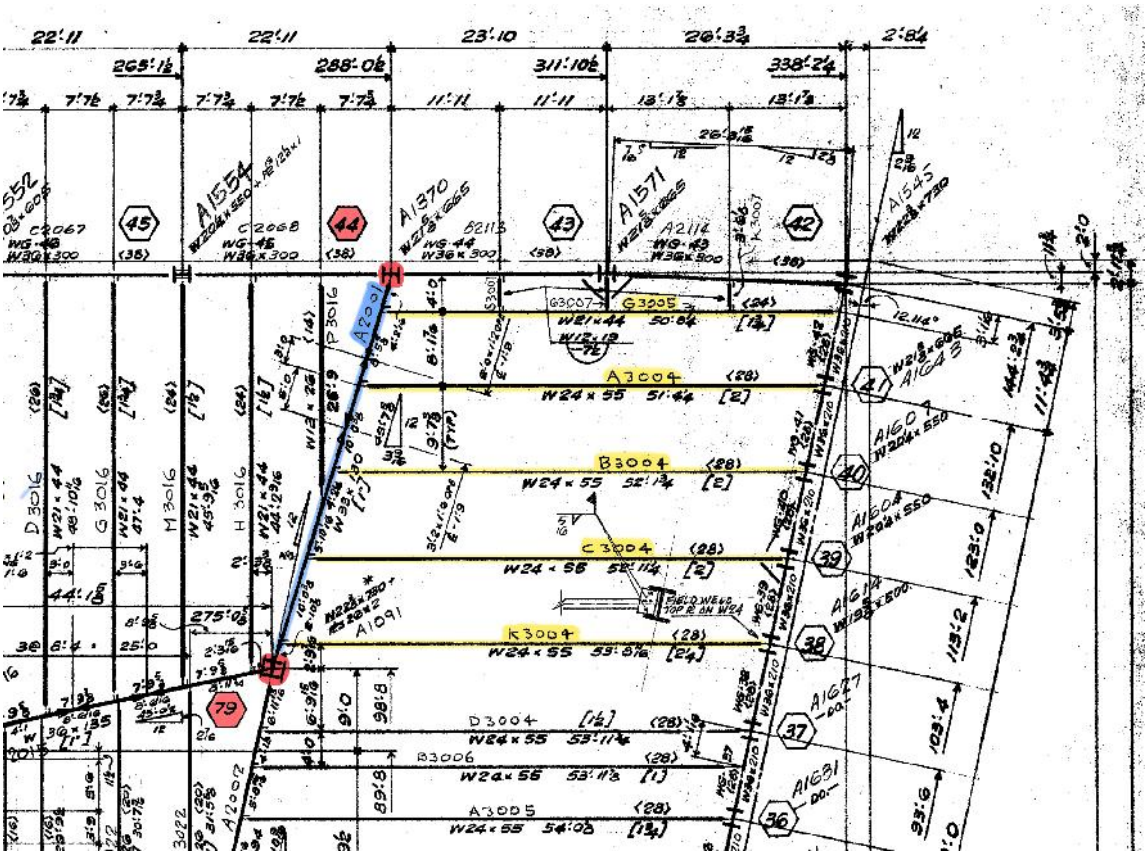


Abbildung 26: Nordöstliche Ecke des Floor Framing Plans des 12. Stockwerks, bearbeitet, Ausschnitt aus Plan: 12th and 13th Floor Framing Plan, bearbeitet

Der Hauptträger A2001 (blau) spannte zwischen Stütze 79 und Stütze 44 (rot). An diesen waren die Deckenträger A3004, B3004, C3004, G3004 und K3004 (gelb) angeschlossen. Aufgrund der Bauteiltemperaturen von 400°C und weniger geht NIST davon aus, dass sich diese Deckenträger thermisch ausdehnten und Spannungen auf den Hauptträger A2001 ausübten. Dieser konnte die zusätzliche horizontale Last nicht mehr über seine Konsolauflager an den Stützen 79 und 44 weitergeben, da die temperaturgeschwächten Verbindungen versagten. Deshalb wurde der Hauptträger A2001 von seinen beiden Auflagern geschoben und stürzte auf die Decke zwischen dem 11. und 12. Stockwerk. Die herabfallenden Träger lösten eine Kettenreaktion aus, bei der die Deckenbereiche in der nordöstlichen Gebäudeecke zwischen dem 5. und 14. Stockwerk komplett versagten. Vermutlich stoppte die Kettenreaktion im 5. Stockwerk wegen der massiveren Ausführung der Decke in diesem Geschoss.

Daraufhin war die Stütze 79 über die gesamte Länge der 9 Stockwerke nicht mehr ausreichend seitlich gestützt, was dazu führte, dass sie ausknickte (NIST, 2008a, S. 22).

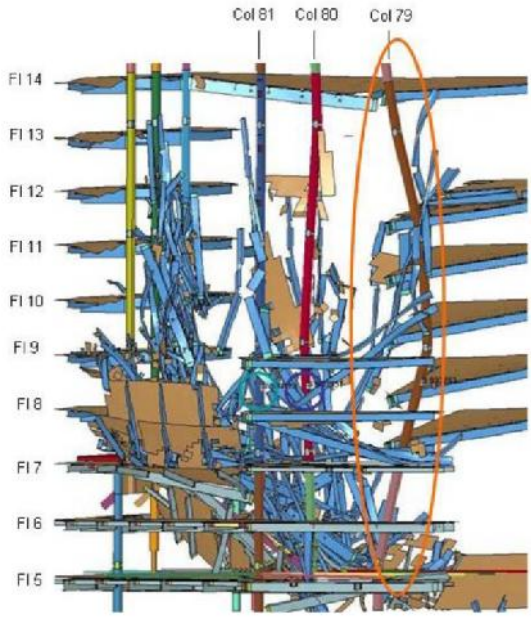


Abbildung 27: Stütze 79 knickt aus, Simulation, NIST NCSTAR 1A, Seite 22, Fig. 2-2

Das löste eine weitere Kettenreaktion aus, bei der die übrigen Träger, welche an Stütze 79 anschlossen, herabstürzten. Die Stützen 80 und 81 verloren deshalb auch ihre hauptsächliche horizontale Unterstützung, woraufhin auch diese beiden Stützen zwischen dem 5. und 14. Stockwerk ausknickten (NIST, 2008a, S. 22).

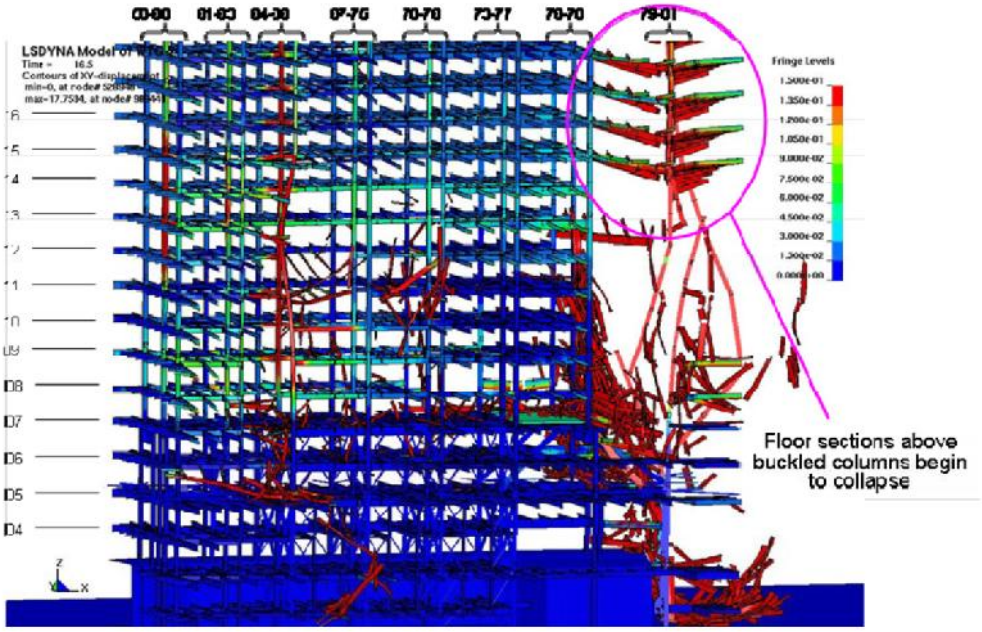


Abbildung 28: Stützen 80 und 81 knicken aus, LS-DYNA Simulation, NIST NCSTAR 1A, Seite 40, Fig. 3-10

Der gesamte östliche Gebäudeteil bis zum Kern war laut NIST nur noch eine leere Hülle. Dann breitete sich das Versagen nach Westen aus. Die nächsten Stützen, die versagten, waren die Stützen 76, 77 und 78. Es folgte das Versagen der drei nächsten Stützen und so weiter. Der gesamte Gebäudekern stürze in einer Ost-West Reihenfolge in sich zusammen (NIST, 2008a, S. 22f).

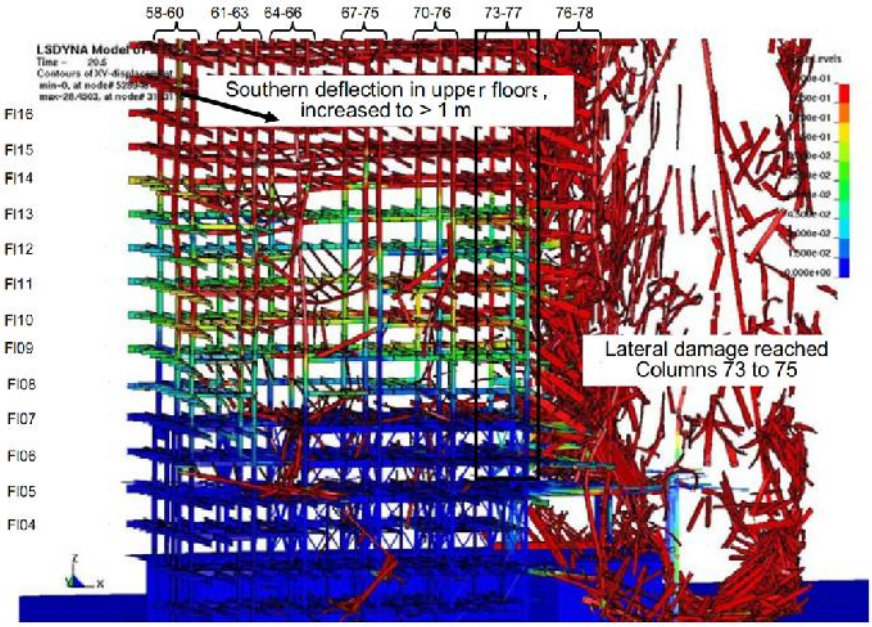


Abbildung 29: Stützen 73, 74 und 75 knicken aus, LS-DYNA Simulation, NIST NCSTAR 1A, Seite 41, Fig. 3-12

Bis zu diesem Zeitpunkt war vom Kollaps des Gebäudeinneren nichts erkennbar. Nur der Einsturz des östlichen Penthouse ließ vermuten, dass die darunterliegende Unterstützung nicht mehr vorhanden war.

Abbildung 30: Einsturz des östlichen Penthouses, CBS News Archive, Screenshots aus Video, ca. 2s Einsturzdauer

Die Gebäudehülle, die ohne inneren Kern versuchte, die Lasten umzulagern, begann kurz darauf zwischen dem 7. und 14. Stockwerk einzuknicken. Sie stürzte daraufhin in einer Einheit zu Boden (NIST, 2008a, S. 23).

Laut NIST befand sich die Gebäudehülle während des Einsturzes für 2,25 s im freien Fall (NIST, 2008a, S. 45).
Ergebnis der vier Simulationen mit LS-DYNA war, dass das erste Szenario den tatsächlich beobachteten Vorgängen am besten ähnelt (NIST, 2008a, S. 39). Das zweite Szenario führte nicht zu einem Kollaps des Gebäudes. Mit dem dritten Szenario fand NIST heraus, dass es auch ohne die Schäden am Tragwerk zu einem Kollaps gekommen wäre. Der genaue Vorgang des Kollapses wich aber vom ersten Szenario ab. Das Ergebnis des vierten Szenarios war mit dem des ersten zu vergleichen. Damit bestätigte sich die Annahme eines progressiven Kollapses (NIST, 2008a, S. 42).

3.3.5 Weitere mögliche Einsturzursachen

Eine mögliche Ursache war der Einsatz von Sprengstoff. Dafür stellte NIST zwei Szenarien auf. Im ersten war genug Zeit für alle Vorbereitungen eingeplant, sodass die geringste Menge an Sprengstoff hätte verwendet werden können. Im zweiten Szenario wurde davon ausgegangen, dass die Sprengladungen in kürzester Zeit angebracht wurden, was rund 7 bis 8h vor Einsturz entsprach. Verwendet wurde das Software Programm SHAMRC, mit dem unter anderem Detonationen und die Ausbreitung des Druckes simuliert werden können. Mit den Werten des entstehenden Druckes können dann Angaben darüber gemacht werden, welche Fenster infolge der Detonation zerstört wurden (NIST, 2008a, S. 26).
Es wurde speziell die Möglichkeit von Sprengladungen an einer einzigen Stelle, an Stütze 79, untersucht. Dass mehrere Sprengladungen an verschiedenen Stellen im Gebäude angebracht wurden, hielt NIST für nicht machbar, da dies zu auffällig gewesen wäre (NIST, 2008a, S. 27). Das Ergebnis aus SHAMRC für jeweils eine 2 lb (0,907 kg) und eine 9 lb (4,082 kg) Sprengladung des Sprengstoffes RDX ist in folgender Abbildung zu sehen.

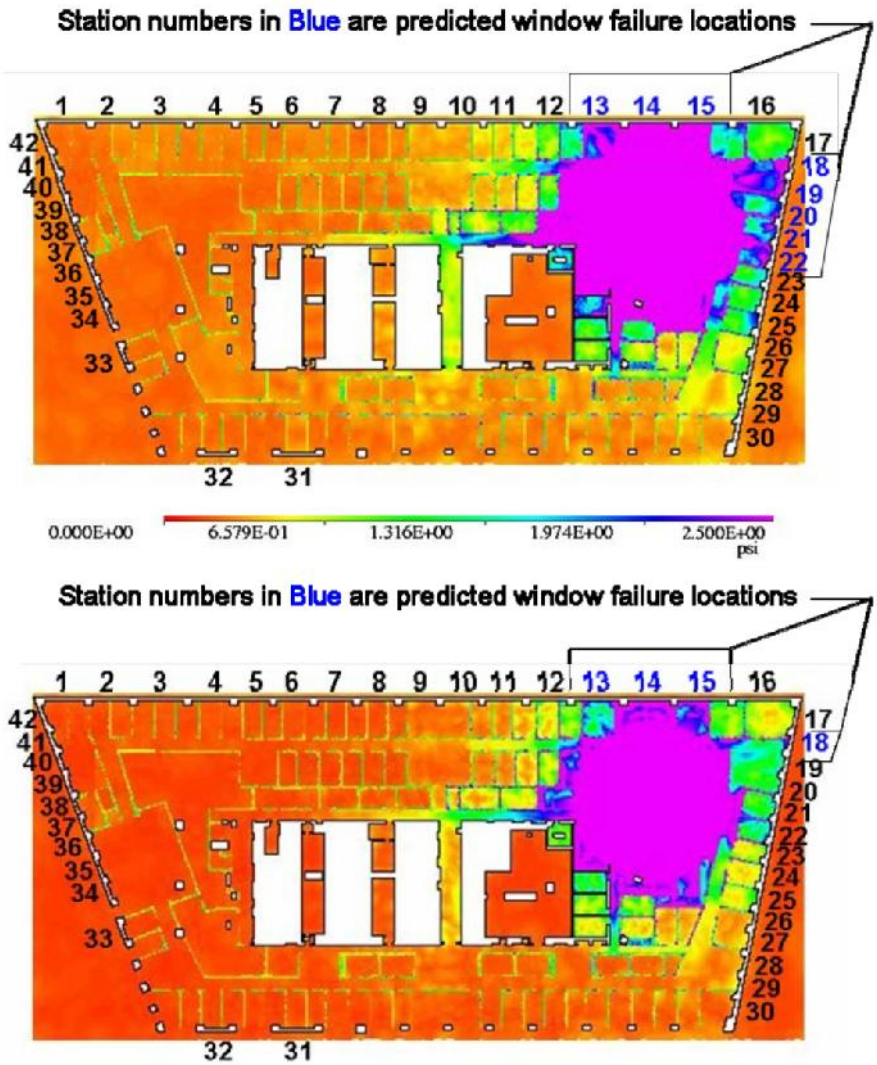


Abbildung 31: Simulierte Druckausbreitung und zerstörte Fenster, oben 9lb Sprengladung, unten 2lb Sprengladung, SHAMRC Simulation, NIST NCSTAR 1A, Seite 27, Fig. 3-1

Daraus folgt, dass mehrere Fenster in der nordwestlichen Gebäudeecke zerstört worden wären, was nicht durch die vorhandenen visuellen Beweise bestätigt werden kann (NIST, 2008a, S. 27).

Mit dem Software Programm NLAWS wurde die Ausbreitung eines Knalls einer solchen Detonation untersucht. Wenn WTC 7 nicht von anderen Bauwerken umgeben wäre, hätte man den Knall in einem Kilometer Entfernung mit einer Lautstärke von 130 bis 140dB gehört. Zwischen den anderen hohen Gebäuden und in den Häuserschluchten hätte sich dieser Knall durch Reflexion zusätzlich verstärkt. Da keine Videoaufnahmen zu diesem Zeitpunkt einen solchen Knall aufgezeichnet hatten, schloss NIST, dass dieses Szenario nicht zum Einsturz von WTC 7 geführt haben kann (NIST, 2008a, S. 28).

Als weitere Möglichkeit untersuchte NIST einen Dieselbrand im Technikgeschoss, dem 5. Stockwerk. Auf diesem und anderen Stockwerken befanden sich große Notstromaggregate, Dieselpumpen und Förderleitungen, wie in folgender Abbildung zu sehen ist (NIST, 2008a, S. 11).

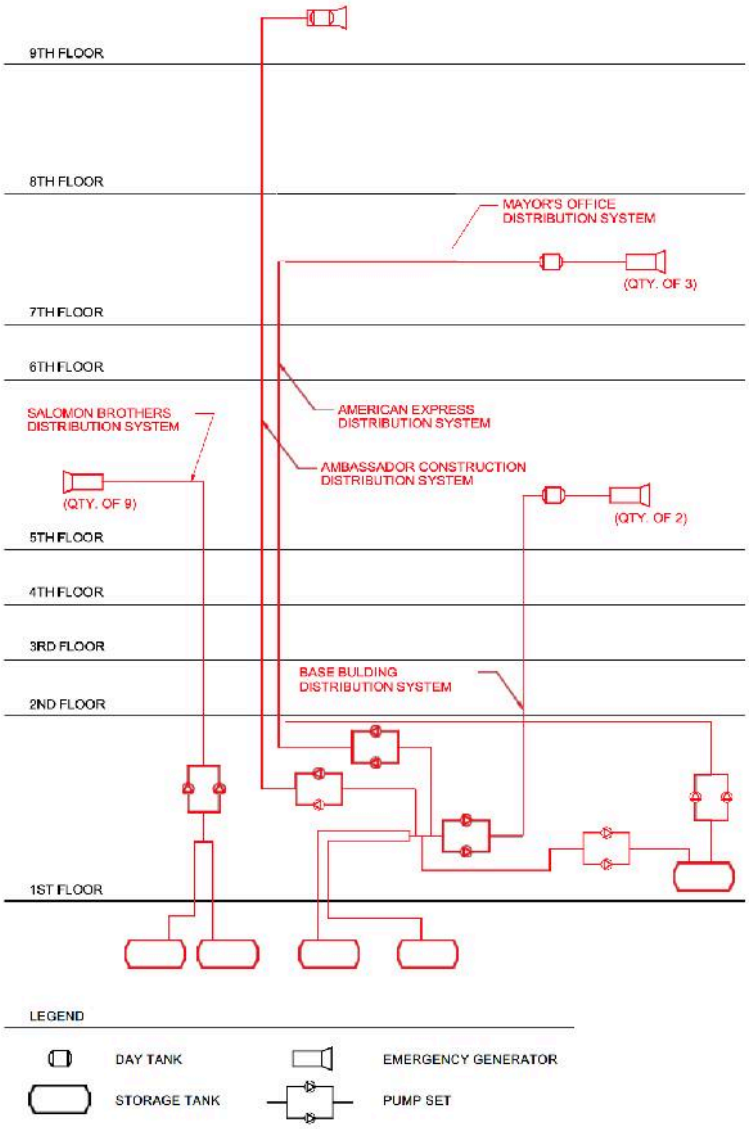


Abbildung 32: Darstellung der Dieseltanks, Pumpen, Generatoren und Förderleitungen in WTC 7, NIST NCSTAR 1A, Seite 12, Fig. 1-10

Bei Beschädigung dieser Förderleitungen durch Trümmerteile vom Einsturz von WTC 1 hätten große Mengen an Diesel in diesem Stockwerk auslaufen und Feuer fangen können. NIST liefert aber mehrere Gründe, warum auch diese Möglichkeit unwahrscheinlich scheint. Durch die entstehende Hitze wären aller Wahrscheinlichkeit nach die Förderpumpen ausgefallen und es wäre kein weiterer Diesel mehr zur Verfügung gestanden.

Auch wären die Temperaturen zu niedrig gewesen, um dem Tragwerk signifikanten Schaden zufügen zu können. Außerdem hätte dieser Brand erhebliche Mengen an dichtem dunklem Rauch entwickelt, welcher durch die Entlüftungsauslässe im Technikgeschoss entwichen wäre. Dieser wurde nicht beobachtet. Daher geht NIST davon aus, dass Dieselbrände keinen Beitrag am Kollaps des WTC 7 geleistet haben (NIST, 2008b, S. 355)

Auch Brände in der Con Edison Substation wurden untersucht. Ein Brandmelder schlug ab dem Zeitpunkt des Einsturzes von WTC 1 Alarm. Es konnte aber kein Rauch beobachtet werden. Erst während der Aufräumarbeiten wurden an den Generatoren der Con Edison Substation Spuren starker Temperatureinwirkung entdeckt. Im Nachhinein konnte aber nicht geklärt werden, ob diese Schäden durch elektrische Überhitzung, durch einen tatsächlichen Brand oder erst durch Brände unter dem Schutt nach dem Einsturz von WTC 7 entstanden waren. NIST schloss, dass auch Brände in der Con Edison Substation keine Rolle beim Einsturz des WTC 7 gespielt haben (NIST, 2008b, S. 357 f).

3.4 Ergebnis

Die Ergebnisse der NCSTAR Berichte von NIST lassen sich wie folgt zusammenfassen:

- Der Einsturz von WTC 2 hatte keine Schäden am Tragwerk des WTC 7 zur Folge. Der Einsturz löste auch keine Brände in WTC 7 aus.
- Durch Trümmerteile des Einsturzes von WTC 1 wurden außenliegende Stützen und Teile der Decke am westlichen Teil der Südfassade und an der südwestlichen Ecke zwischen dem 5. und 17. Stockwerk von WTC 7 zerstört. Es brachen Brände auf mindestens 10 Stockwerken zwischen dem 7. und 30. Stockwerk in WTC 7 aus.
- Die Brände oberhalb des 20. Stockwerks wurden vermutlich mit der über das Dach gespeisten Sprinkleranlage gelöscht. In den unteren Stockwerken konnten sich die Brände ungehindert ausbreiten und erreichten zwischen 15:00 und 16:00 Uhr die nordwestliche Gebäudeecke.

- Durch Simulationen, Berechnungen und der Information über angeblich erhöhte Brandlast in den Stockwerken 12 und 13 kommt NIST zu der Annahme, dass das auslösende Ereignis des Kollapses im 13. Stockwerk stattfand. Es wird angenommen, dass es aufgrund thermischer Ausdehnung von Trägern in der Decke des 13. Stockwerks zum örtlichen Versagen dieser Decke, unmittelbar bei Stütze 79, kam. Dies führte zum Versagen von insgesamt 9 darunterliegenden Decken. Daraufhin knickte die nicht mehr länger unterstützte Stütze 79 aus.
- Darauf folgte das weitere Versagen von Deckenteilen im östlichen Gebäudeteil, woraufhin die Stützen 80 und 81 ebenfalls ausknickten.
- Anschließend setzte sich das Versagen westlich durch das Gebäude fort, wobei die Stützen im Gebäudekern nacheinander ausknickten.
- Die außenliegenden Stützen mitsamt der Fassade, welche die restlichen Lasten nicht mehr tragen konnten, versagten gleichzeitig zwischen dem 7. und 14. Stockwerk. Die Gebäudehülle fällt als Einheit zu Boden.
- Folgende alternativ mögliche Versagensursachen wurden von NIST nach systematischer Untersuchung ausgeschlossen:
    - Dieselbrände im 5. Stockwerk (Technikgeschoss) des WTC 7
    - Der Einsatz von Sprengstoff (eine einzelne lokale Sprengladung)
    - Brände in der Con Edison Substation.

4 Bericht zur unabhängigen Studie der Universität Fairbanks in Alaska

4.1 Über AE9/11Truth und Leroy Hulsey

AE9/11Truth steht für Architects and Engineers for 9/11 Truth (Architekten und Ingenieure für die Wahrheit am 11. September). Dies ist der Name einer non-profit-Organisation, welche 2006 von Richard Gage gegründet wurde. Richard Gage ist Architekt und Mitglied des American Institute of Architects (AIA). Er besitzt langjährige Bauerfahrung, unter anderem auch im Stahlskelettbau. Als Gründer und Präsident von AE9/11Truth ist er inzwischen schon viele Jahre in Vollzeitarbeit damit beschäftigt, die Ziele seiner Organisation voranzubringen (AE9/11Truth, 2017a).

Die 3145 Architekten und Ingenieure und 22 846 Bürger (Stand: 20.06.2019) weltweit, welche die Petition von AE9/11Truth unterschrieben haben, fordern eine neue Untersuchung der Zerstörung aller drei World Trade Center Gebäude am 11. September 2001 (AE9/11Truth, 2019). Im Gegensatz zu anderen Gruppen und Einzelpersonen, welche alternative Theorien zu den Einsturzursachen der drei WTC Gebäude und Hintergründe der Anschläge publizieren, bleibt AE9/11Truth auf der wissenschaftlichen Seite mit belegbaren Beweisen. Außerdem werden keine Vermutungen darüber angestellt, welche Personen aus welchen Gründen für diese Tat verantwortlich sein könnten.

Hauptaufgabe der Organisation ist es, Informationen zu sammeln und diese in der Öffentlichkeit zu verbreiten. Es werden Forschungen und Aktionen finanziell unterstützt und beworben (AE9/11Truth, 2017b).

Das wohl größte von AE9/11Truth unterstützte Vorhaben ist die unabhängige Studie der Universität Fairbanks in Alaska (UAF) zu den Ursachen des Einsturzes von WTC 7 am 11. September 2001. Diese Studie wird von Prof. Dr. Leroy J. Hulsey geleitet und gemeinsam mit Dr. Feng Xiao und Zhili Quan durchgeführt (UAF INE, kein Datum). Leroy Hulsey ist Bauingenieur, *forensic engineer* (forensischer Ingenieur), besitzt ein Ph.D. in *structural engineering* (Doktortitel in

Baustatik) und ist Professor an der Universität Fairbanks in Alaska (CEM, kein Datum).

4.2 Zielsetzung der Studie

Die grundlegende Frage als Anlass für die Studie war: „Did fire cause this building [WTC 7] to collapse?“ (Hulsey, Xiao, & Quan, 2017). Damit wird auf das offizielle Ergebnis der NIST Untersuchung Bezug genommen, bei dem gewöhnliche Brände als Ursache für den Einsturz von WTC 7 genannt werden. Eine wachsende Anzahl an Personen, führend darunter AE9/11Truth, widersprechen diesem Ergebnis von NIST. Aus diesem Grund startete im Mai 2015 die „A Structural Reevaluation of the Collapse of World Trade Center 7” genannte Studie an der UAF.
Ziel ist es, die tatsächliche Einsturzursache herauszufinden und andere, nicht mögliche Ursachen auszuschließen.
Ursprünglich war ein Zeitraum von zwei Jahren für die Studie eingeplant worden. Tatsächlich aber wurde im September 2017 nur ein Progress Report (Fortschrittsbericht) veröffentlicht und in einer Präsentation durch Leroy Hulsey vorgestellt. In diesem Kapitel wird daher nur auf diesen Progress Report Bezug genommen. Die Studie dauert bis zum heutigen Tage (Stand 06.2019) an und soll den neusten Informationen zufolge im Juli 2019 abgeschlossen sein.

4.3 Inhalt des Progress Reports

Zur Qualitätssicherung der Ergebnisse werden alle Modelle und Berechnungen von Feng Xiao und Zhili Quan mit jeweils unterschiedlicher Software durchgeführt. Verwendet werden hierfür die beiden Programme ABAQUS und SAP2000. Weitere verwendete Software sind AutoCAD, zur Erstellung eines virtuellen Modells von WTC 7 und SOLIDWORKS, zur Simulation der Wärmeleitung der Bauteile (Hulsey, Xiao, & Quan, 2017).

Das dreiköpfige Team machte sich im ersten Schritt daran, die von NIST erstellten Modelle nachzubauen und auf ihre Richtigkeit zu überprüfen. Dabei wurden die folgenden Randbedingungen von NIST übernommen:

- Deckenträger erreichten Temperaturen von 600°C.
- Hauptträger erreichten Temperaturen von 500°C.
- Stützen erreichten Temperaturen von 300°C.
- Die Hauptträger besaßen keine shear studs (Kopfbolzen).
- Die shear studs an den Deckenträgern K3004, C3004, B3004, A3004 und G3005 haben versagt.
- Die Schraubverbindungen an beiden Enden von Hauptträger A2001 haben versagt (A2001 liegt auf den Konsolauflagern auf).
- Die Flächenlast der Geschosse wurde mit 88 lbs/ft^2 (4,213 kN/m^2) angesetzt
- Die außenliegenden Träger wurden in alle Richtungen gelagert.

(Hulsey, Xiao, & Quan, 2017)

An den Modelldaten nach NIST wurden aber noch Änderungen vorgenommen. Es wurden sog. *side plates* (seitlich angeschweißter Flachstahl) an Stütze 79 befestigt, wie es in den Konstruktionsplänen dargestellt ist. Durch das beidseitige Anbringen des Flachstahls verbessert sich das Flächenträgheitsmoment des Querschnitts in der schwachen Achse. Auch die Steifigkeit der Stütze erhöht sich.

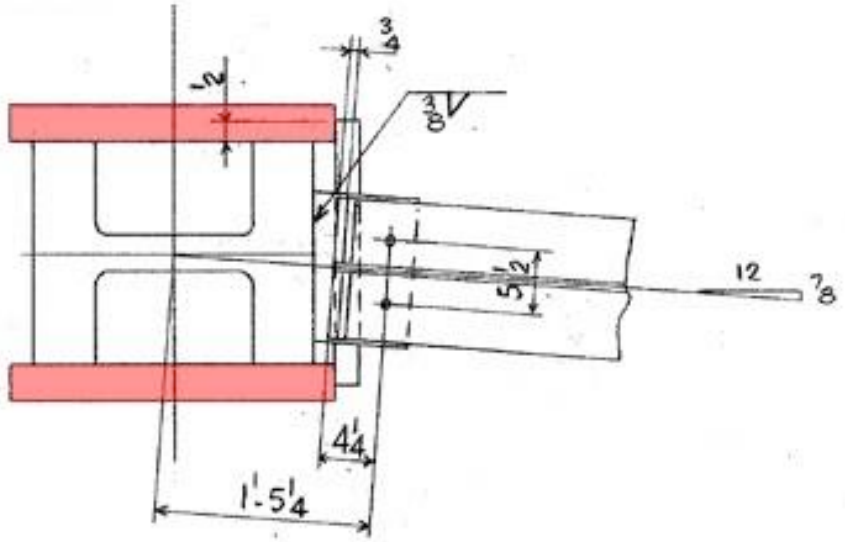


Abbildung 33: Querschnitt durch Stütze 79, side plates farblich hervorgehoben, Frankel Steel Limited Plan 9114

Dieser Flachstahl wurde laut Hulsey bei den Simulationen von NIST außer Acht gelassen. Ebenso wie zwei sog. *partial height web stiffener* (Stirnplatte über den halben Querschnitt) am Hauptträger A2001 auf der Seite zu Stütze 79. Diese Stirnplatte stützt den schlanken Steg des Hauptträgers und erhöht die Torsionssteifigkeit des Querschnitts.

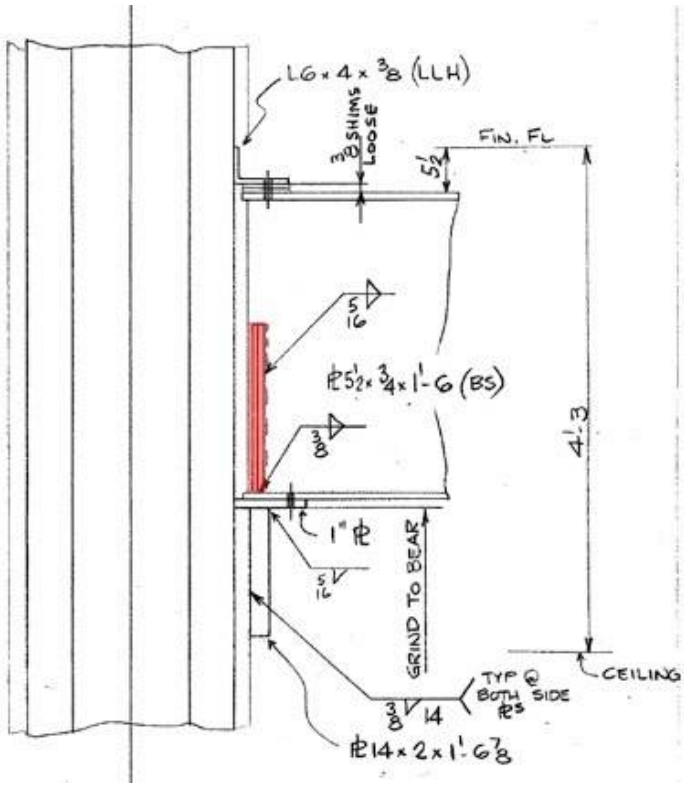


Abbildung 34: Anschlussdetail von A2001 an Stütze 79, partial height web stiffener farblich hervorgehoben, Frankel Steel Limited Plan 9114

Unter zusätzlicher Berücksichtigung dieser Bauteile wurde dann das Verhalten des Tragwerks simuliert. Die Temperaturen wurden von den FSI Simulationen aus NIST NCSTAR 1-9 übernommen.

Das Ergebnis der Simulation zeigt, dass sich der Hauptträger A2001 aufgrund von Temperaturdehnung horizontal in Richtung Stütze 79 ausdehnt und durch Temperaturdehnung der Deckenträger horizontal nach Westen hin verschiebt. Dabei wird A2001 aber nicht ausreichend horizontal vom Konsolauflager geschoben, um die vertikale Unterstützung zu verlieren[3], da A2001 mit den Flanschen am Flachstahl der Stütze 79 gehalten wird.

[3] Ein Versagen der vertikalen Lagerung an einem Konsolauflager wurde von NIST angenommen, wenn sich der Träger um mehr als die Hälfte der Auflagerbreite zur Seite hin verschoben hat (NIST, 2008b, S. 527).

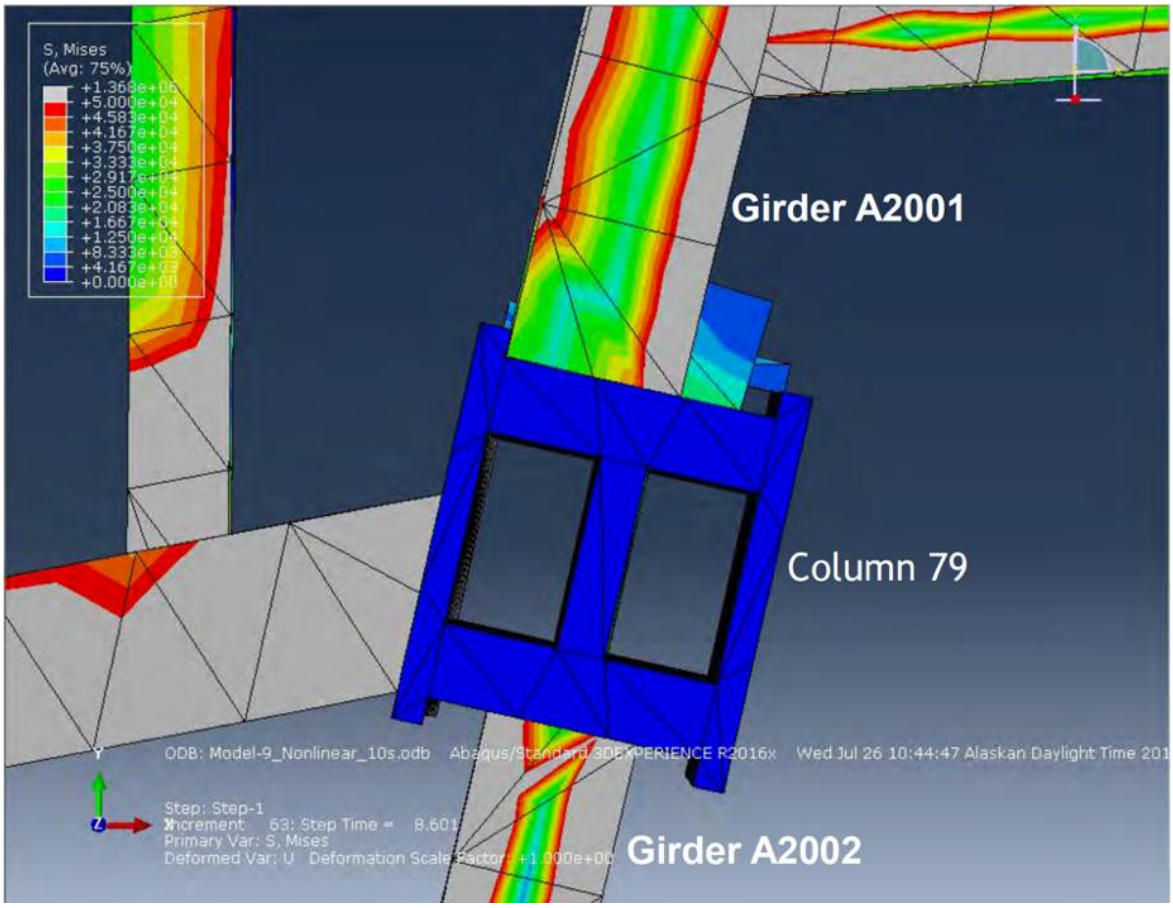


Abbildung 35: Ergebnis der Simulation mit ABAQUS unter Temperatureinfluss nach Angaben von NIST mit side plates, UAF Progress Report

Um entsprechende Bedingungen zu schaffen, dass der Hauptträger A2001 von seinem Auflager an Stütze 79 geschoben werden würde, musste der Flachstahl entfernt und der Wärmedehnungskoeffizient um 40% erhöht werden. Die Erhöhung des Wärmedehnungskoeffizienten war notwendig, um genug Verschiebung zu erzielen, ansonsten wäre A2001 trotzdem nicht vom Auflager geschoben worden. Dazu trägt auch die Stirnplatte an A2001 bei, welche im Bereich des Konsolauflagers für eine erhöhte Steifigkeit sorgt, wodurch sich der Träger auf der Konsole halten kann (Hulsey, Xiao, & Quan, 2017).

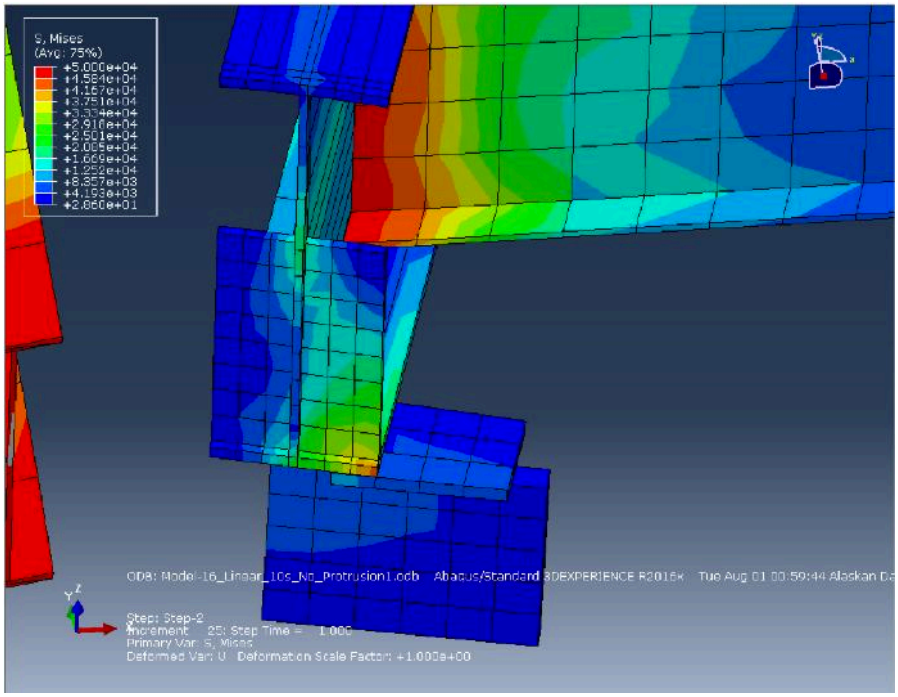


Abbildung 36: Ergebnis der Simulation mit ABAQUS ohne side plate und mit partial height web stiffener, UAF Progress Report

Für den Fall, dass A2001 tatsächlich von seinem Auflager geschoben wird und auf die darunterliegende Decke fällt, wurden die auftretenden Kräfte unter Berücksichtigung der Steifigkeiten der Bauteile berechnet. Ergebnis dieser Berechnung war, dass die entstehende Kraft nicht ausreicht, um das darunterliegende Tragwerk der Decke ebenfalls zum Einsturz bringen zu können und damit eine Kettenreaktion auszulösen (Hulsey, Xiao, & Quan, 2017).

Außerdem kritisiert Hulsey, dass im Modell von NIST zur Berechnung der Verschiebungen an Stütze 79 die äußeren Stützen an der Fassade unverschieblich fixiert wurden. Damit führt die komplette Ausdehnung der Träger unweigerlich zu einer Verschiebung weg von der Fassade nach Westen. Laut Hulsey dehnt sich eine erhitzte Struktur aber immer relativ vom steifsten Punkt der Struktur aus, was im Falle des WTC 7 Modells das Gebäudeinnere ist. Somit ergibt sich in der UAF Analyse eine Verschiebung nach Osten bzw. hin zur Fassade, genau entgegengesetzt zu der von NIST angegebenen Verschiebung. Zudem sind die Werte von NIST mit 5,5 in bzw. 6 in nach Korrektur deutlich höher als die Werte der UAF Study mit 1,92 in (SAP Modell) bzw. 1,85 in (ABAQUS Modell) (Hulsey, Xiao, & Quan, 2017).

4.4 Ergebnis

Das maßgebliche Ergebnis der Studie zum Zeitpunkt des Fortschrittberichts im September 2017 ist, dass Feuer nicht zum Einsturz von WTC 7 geführt haben kann. Aufgrund des angeschweißten Flachstahls an Stütze 79 und der Stirnplatte an A2001 kommt es nicht zum lokalen Versagen des Tragwerks an Stütze 79 im 13. Stockwerk.
Weitere Simulationen haben gezeigt, dass ein potentielles lokales Versagen im 13. Stockwerk nicht zum Versagen der darunterliegenden Decke geführt hätte. Somit wäre es auch nicht zu einem progressiven Kollaps von WTC 7 gekommen (Hulsey, Xiao, & Quan, 2017).

Die Ergebnisse der UAF Studie stehen damit grundlegend im Widerspruch zu den Ergebnissen der NIST Untersuchung.

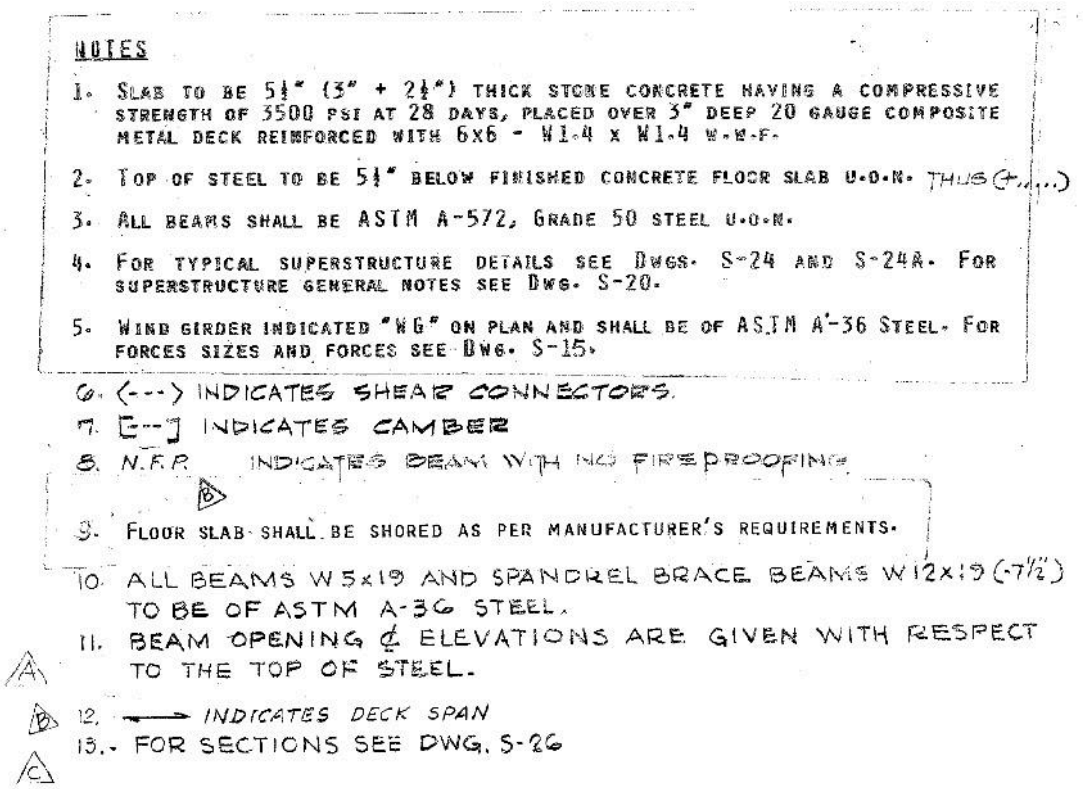
5 Eigene Ansätze und Berechnungen

5.1 Vorhandene Daten und Informationen

Als Grundlage der eigenen Ansätze dienten die originalen Konstruktionszeichnungen von WTC 7. Diese waren 2011 durch zwei Freedom of Information Acts (FOIA) von NIST herausgegeben worden.
Unter einem FOIA versteht man das Recht der amerikanischen Bürger, Informationen aller amerikanischer Bundesbehörden erhalten zu können. Einerseits müssen die Behörden von sich aus gewisse Informationen online zur Verfügung stellen, andererseits müssen auf Anfrage Informationen bereitgestellt werden. Werden Informationen durch einen FOIA gefordert, muss die Bundesbehörde diese Informationen herausgeben, außer diese fallen unter eine von 9 Ausnahmen. Dabei handelt es sich um geheime Informationen, welche unter anderem private Informationen, Informationen zur nationalen Sicherheit oder interne bundesbehördliche Informationen betreffen (U.S. Department of Justice, kein Datum).
Ronald H. Brookman, ein kalifornischer Bauingenieur, Statiker und Mitglied bei AE9/11Truth, erhielt aufgrund zwei gestellter FOIAs 2011 Konstruktionszeichnungen und Berechnungen der am Bau von WTC 7 beteiligten Firmen. Kopien der Anträge bzw. Bestätigungen der Anträge befinden sich im Anhang.
Als Grundlage der UAF Studie können diese insgesamt 2628 Dateien auf der Webseite der WTC 7 Evaluation (http://www.wtc7evaluation.org) heruntergeladen werden.

Die Konstruktionszeichnungen enthalten Pläne des gesamten Stahltragwerks sowie Anschlussdetails, Schnitte und Informationen zu Querschnitten und Materialgüte. Die Floor Framing Pläne, wie z.B. in Abbildung 26 zu sehen, enthalten bereits den Großteil dieser Angaben. Es können Spannweiten und Abstände abgelesen werden sowie die Querschnitte der Träger. Auf diesen Plänen befindet sich auch eine Notiz (siehe Abbildung 37), welche unter anderem

Angaben zur Dicke der Stahlbetonverbunddecke (vgl. Punkt 1) und zur Materialgüte des Baustahls (vgl. Punkte 3, 5 und 10) enthält.



NOTES

1. SLAB TO BE 5½" (3" + 2½") THICK STONE CONCRETE HAVING A COMPRESSIVE STRENGTH OF 3500 PSI AT 28 DAYS, PLACED OVER 3" DEEP 20 GAUGE COMPOSITE METAL DECK REINFORCED WITH 6x6 - W1.4 x W1.4 W.W.F.
2. TOP OF STEEL TO BE 5½" BELOW FINISHED CONCRETE FLOOR SLAB U.O.N. THUS (+...)
3. ALL BEAMS SHALL BE ASTM A-572, GRADE 50 STEEL U.O.N.
4. FOR TYPICAL SUPERSTRUCTURE DETAILS SEE DWGS. S-24 AND S-24A. FOR SUPERSTRUCTURE GENERAL NOTES SEE DWG. S-20.
5. WIND GIRDER INDICATED "WG" ON PLAN AND SHALL BE OF ASTM A-36 STEEL. FOR FORCES SIZES AND FORCES SEE DWG. S-15.
6. (---) INDICATES SHEAR CONNECTORS.
7. [--] INDICATES CAMBER
8. N.F.P. INDICATES BEAM WITH NO FIREPROOFING
9. FLOOR SLAB SHALL BE SHORED AS PER MANUFACTURER'S REQUIREMENTS.
10. ALL BEAMS W5x19 AND SPANDREL BRACE BEAMS W12x19 (-7½") TO BE OF ASTM A-36 STEEL.
11. BEAM OPENING ℄ ELEVATIONS ARE GIVEN WITH RESPECT TO THE TOP OF STEEL.
12. ⟶ INDICATES DECK SPAN
13. FOR SECTIONS SEE DWG. S-26

Abbildung 37: Notiz auf Floorframing Plan, Ausschnitt aus Plan, Typical Floor Framing Plan 8th to 20th & 24th 45th

Für weitere Informationen über die Bauteile existieren sog. *Column Schedules* und *Wind Girder Schedules*, Tabellen mit detaillierten Informationen zu Querschnitt und Materialgüte der Stützen, bzw. Träger an der Fassade im jeweiligen Stockwerk.
Zusätzlich sind auch Regeldetails zu verschiedensten Bauteilen vorhanden.

5.2 Entwicklung des Ausschnittmodells

Da den Untersuchungen von NIST zufolge der Kollaps von WTC 7 in der nordöstlichen Ecke des 13. Stockwerks begann, liegt der Fokus dieser Bemessung ebenfalls auf diesem Gebäudeteil.

Die hierfür verwendete Software ist das Stabwerkprogramm RSTAB der Firma Dlubal. Es wurden mehrere Ausschnittmodelle erstellt und entsprechende Belastungen aufgebracht.

Es sei zu Beginn erwähnt, dass es sich im Folgenden nur um ein Modell handelt, welches mit Ungenauigkeiten und Unschärfen behaftet ist. Es wurde durch Optimierungen des Modells versucht, die Schnittgrößen möglichst passend zu ermitteln.

Die erste Aufgabe war es, die richtigen Querschnitte der Träger zu erstellen. Da es sich um ein amerikanisches Gebäude handelt, sind alle Werte in imperialen Einheiten angegeben und die Bauteile nach amerikanischen Standards bezeichnet. Die hierzulande als Doppel-T-Träger bezeichneten Profile werden im Amerikanischen als W-Beam bezeichnet. Diese fallen unter die amerikanische Norm ASTM. In dieser Norm sind auch die Materialgüten enthalten. Den Notizen auf den Floor Framing Plänen (siehe Abbildung 37, Seite 47) zufolge gibt es Träger in zwei verschiedenen Qualitäten. Nach Punkt 3 der Notiz sind alle Träger aus ASTM A-572 Grade 50 Steel. Ausgenommen davon sind nach Punkt 5 und 10 alle Wind Girder, also die Träger an der Fassade, und zwei recht kleine Profile W 5x19 und W 12x19. Diese bestehen aus ASTM A-36 Steel. Für die Stützen sind auf den Column Schedule Plänen ähnliche Angaben gemacht.

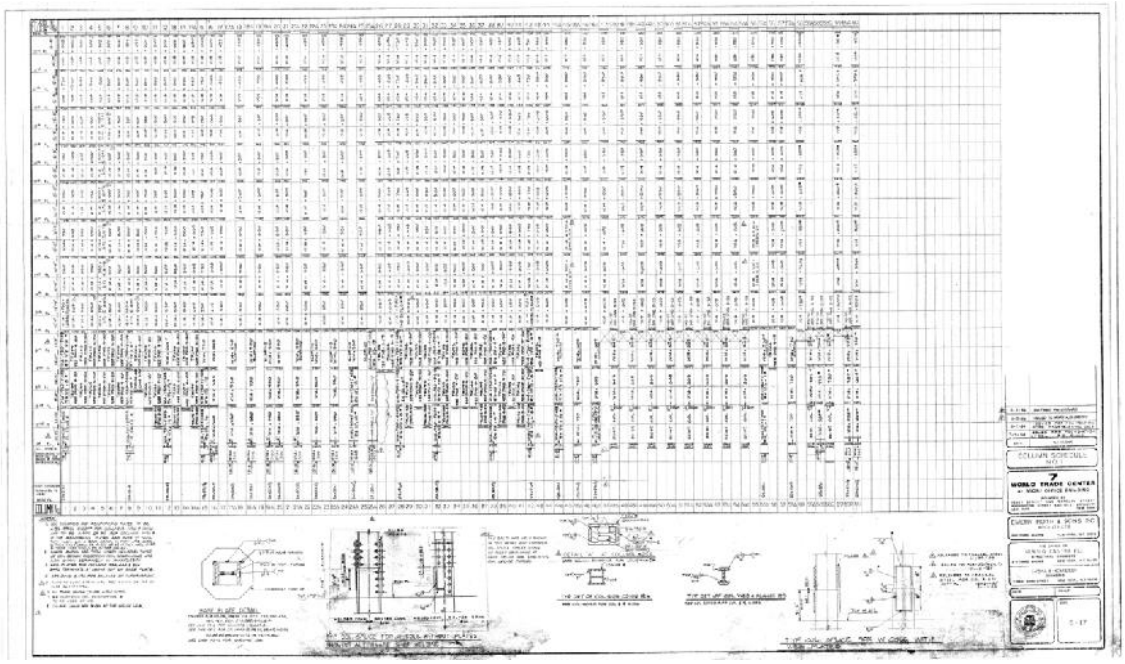


Abbildung 38: Column Schedule Plan #1

Die Stützen bestehen grundsätzlich aus ASTM A-36 Steel. Mit einem Stern markierte Stützen besitzen eine Güte von ASTM A-572 Grade 50 Steel. Auf diesen Column Schedule Plänen lassen sich auch die Querschnitte der Stützen in den einzelnen Geschossen ablesen. Wenn zusätzlich angeschweißter Flachstahl an der Stütze angebracht werden soll, ist auch dies mit den entsprechenden Stärken des Flachstahls für die einzelnen Geschosse angegeben.
Um die exakte Stelle der Stütze zu finden, an welcher sich der Querschnitt ändert, waren die Tabellen der Column Schedule Pläne nicht hilfreich. Für jede Stütze wurden zusätzlich auch Detailzeichnungen angefertigt, welche jeweils einen Stützenabschnitt zeigen, wie er auf die Baustelle geliefert wird und montiert werden soll.

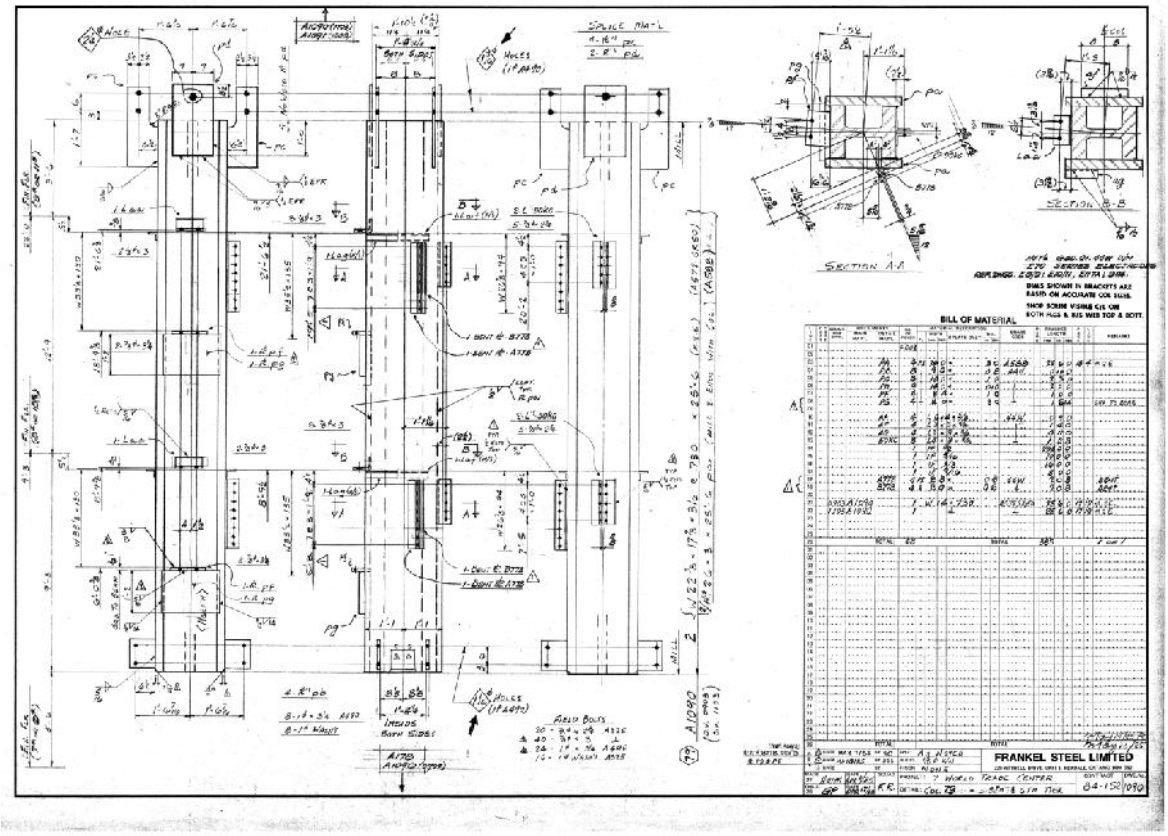


Abbildung 39: Column 79 5th & 6th Tier Plan, Frankel Steel Limited

Aus diesen Plänen lässt sich erkennen, dass ein Stützenabschnitt jeweils im unteren Drittel eines Geschosses beginnt, über das gesamte nächste Geschoss läuft und im unteren Drittel des übernächsten Geschosses endet. Auf diesem Ende wird dann wieder der nächste Stützenabschnitt befestigt. Ein Abschnitt läuft also um eine Drittel Geschosshöhe versetzt über die Länge von zwei Geschossen.

Die ersten Modelle bestanden aus jeweils einem Träger, um ein Gefühl für das Verhalten unter Eigengewicht bzw. Temperaturbelastung zu bekommen. Folgende Abbildung zeigt das Ergebnis des Hauptträgers A2001, ein W 33x130 Profil, unter Eigengewicht.

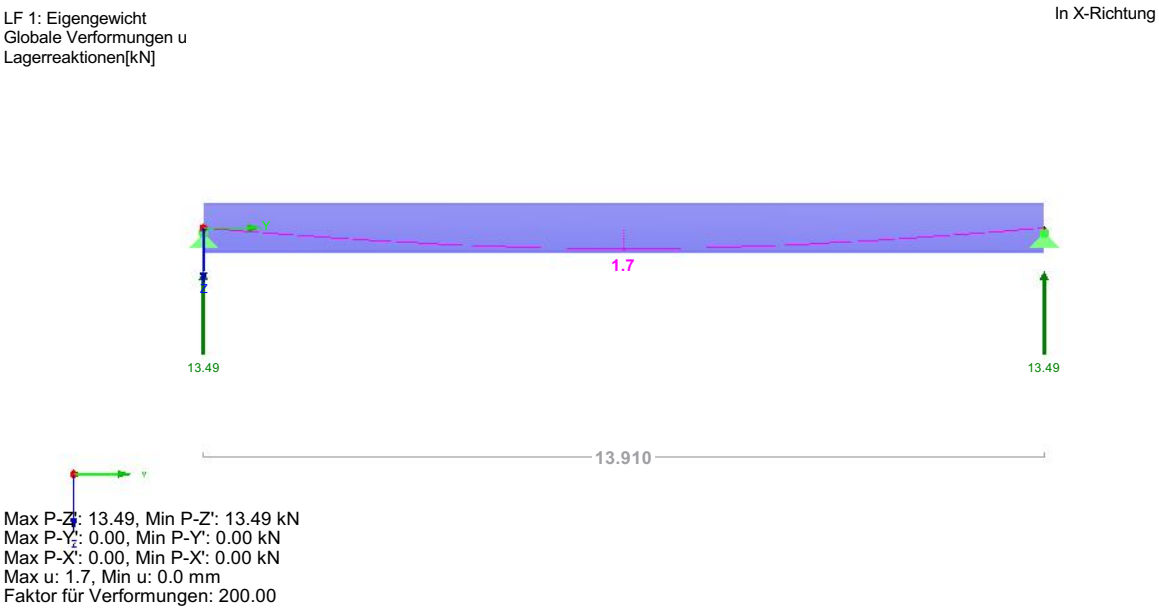


Abbildung 40: Hauptträger A2001 unter Eigengewicht, RSTAB

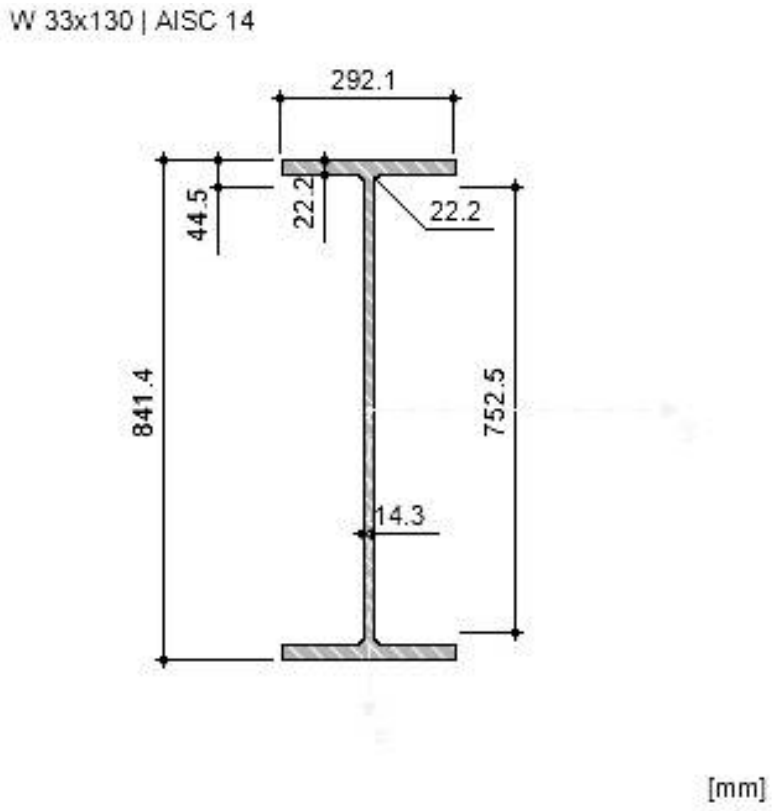


Abbildung 41: W 33x130 Profil, RSTAB

Für das nächste Modell wurden an den Hauptträger A2001 die Deckenträger A3004, B3004, C3004 und K3004, jeweils W 24x55 Profile und der Deckenträger G3005, ein W 21x44 Profil, angeschlossen.

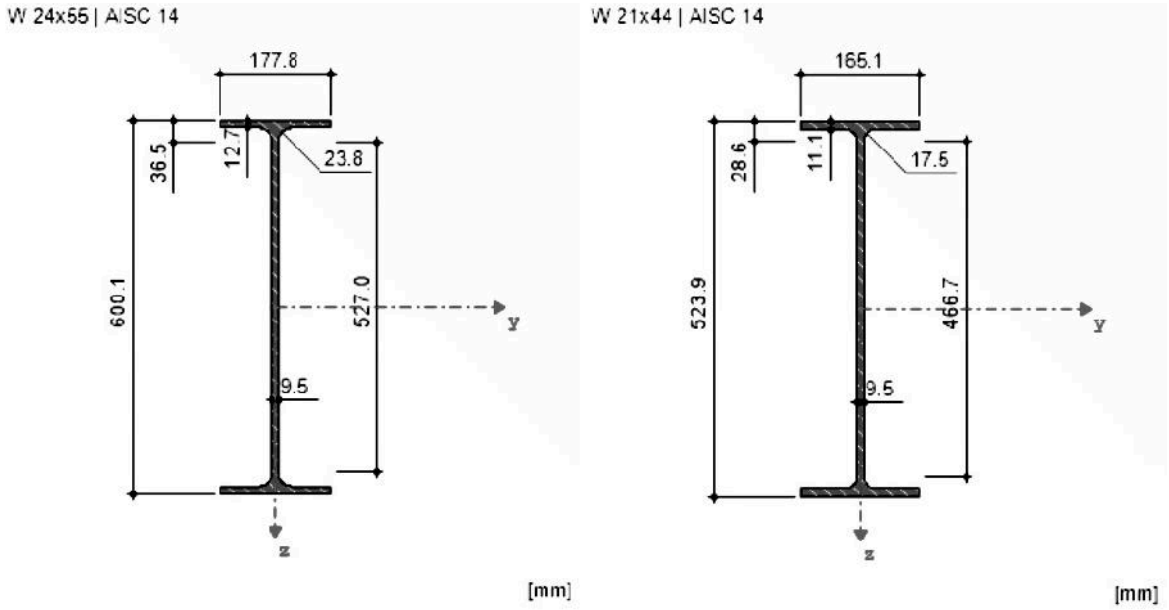


Abbildung 42: W 24x55 und W 21x44 Profil, RSTAB

Gelagert wurden die Deckenträger auf der rechten Seite verschieblich in x-Richtung, da die Deckenträger an diesem Punkten an die Fassadenstützen anschließen, welche sich in x-Richtung verformen können. Sowohl der Anschluss an A2001 als auch der Anschluss an die Fassadenstützen erfolgte gelenkig in y- und z-Richtung. Dies kann aus den angegebenen Verbindungstypen in den Plänen geschlossen werden (vgl. Abbildung 13, Seite 15).
Die Durchbiegung von A2001 wurde erkennbar größer, da durch das Anschließen der Deckenträger nun einzelne Punktlasten auf den Hauptträger einwirkten.

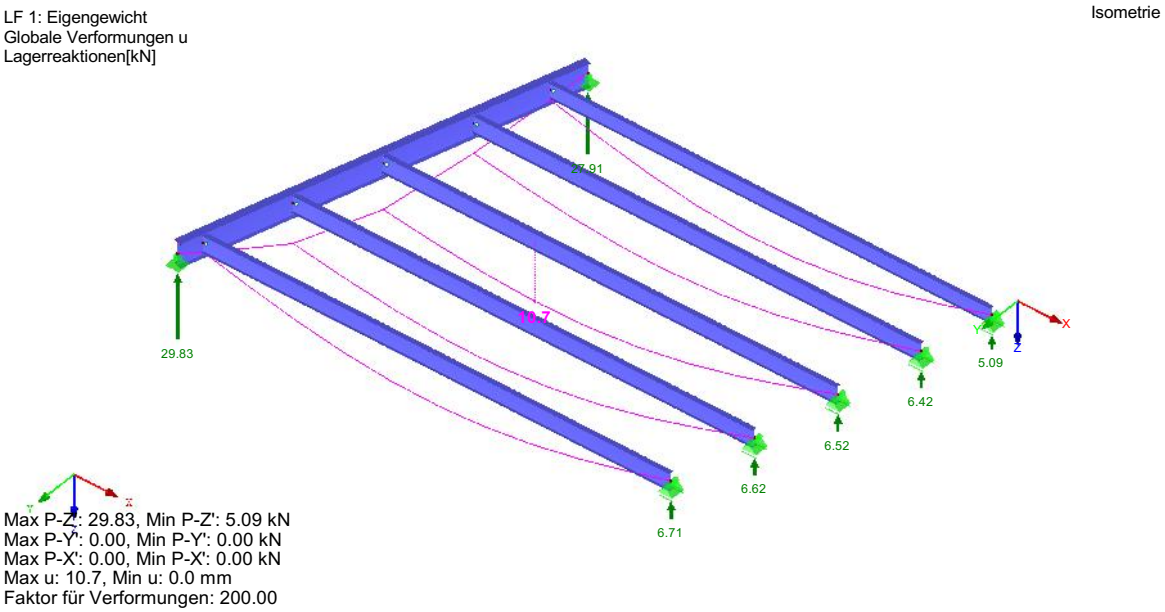


Abbildung 43: Hauptträger und angeschlossene Deckenträger unter Eigengewicht, RSTAB

Die Durchbiegung der Deckenträger selbst ist auch höher, da diese ein kleineres Profil haben und zudem mit einer durchschnittlichen Länge von 15,90 m länger als der Hauptträger sind.

Um das ebene Modell der nordöstlichen Gebäudeecke abzuschließen, kamen im nächsten Schritt die Fassadenträger, die sog. *wind girder* hinzu.

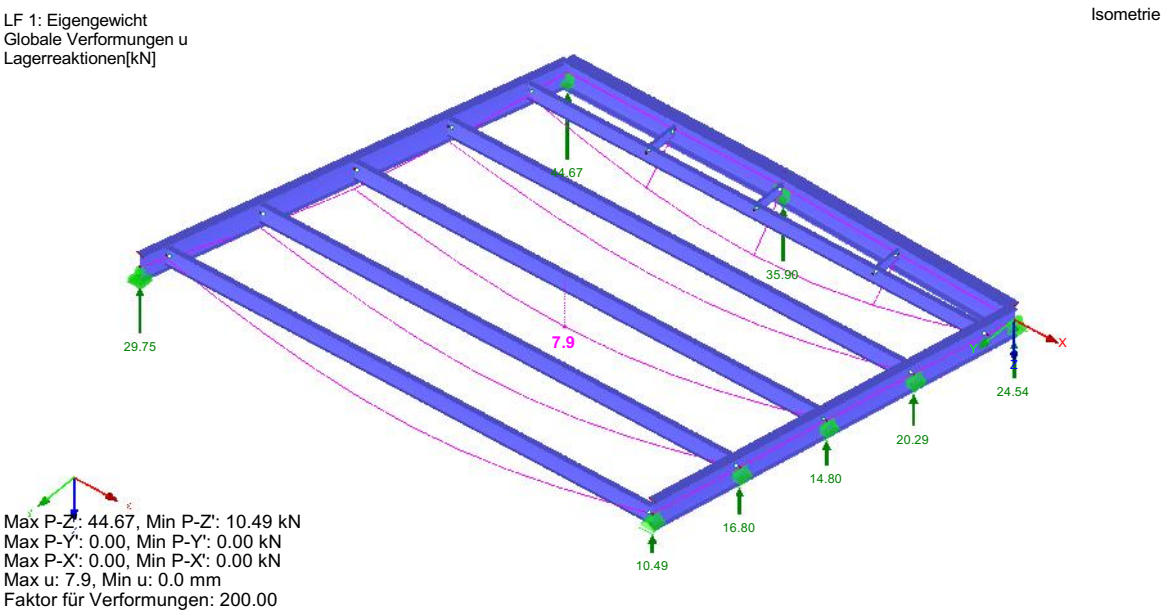


Abbildung 44:Ebenes Modell der nordöstlichen Gebäudeecke, RSTAB

Aus den Konstruktionsplänen der Fassadenstützen ergeben sich biegesteife Verbindungen zwischen den Wind Girdern und den Stützen. Außerdem wurden drei W 12x19 Profile zwischen G3005 und Wind Girder eingefügt. Die hauptsächliche Veränderung zu den Ergebnissen des vorigen Modells ist daher eine geringere Durchbiegung des Deckenträger G3005.

Um den Einfluss der weiteren Bauteile um Stütze 79 im Modell aufnehmen zu können, wurde das Modell um weitere Stützen, Haupt- und Deckenträger in Richtung Gebäudekern und in Richtung Süden und Westen erweitert.

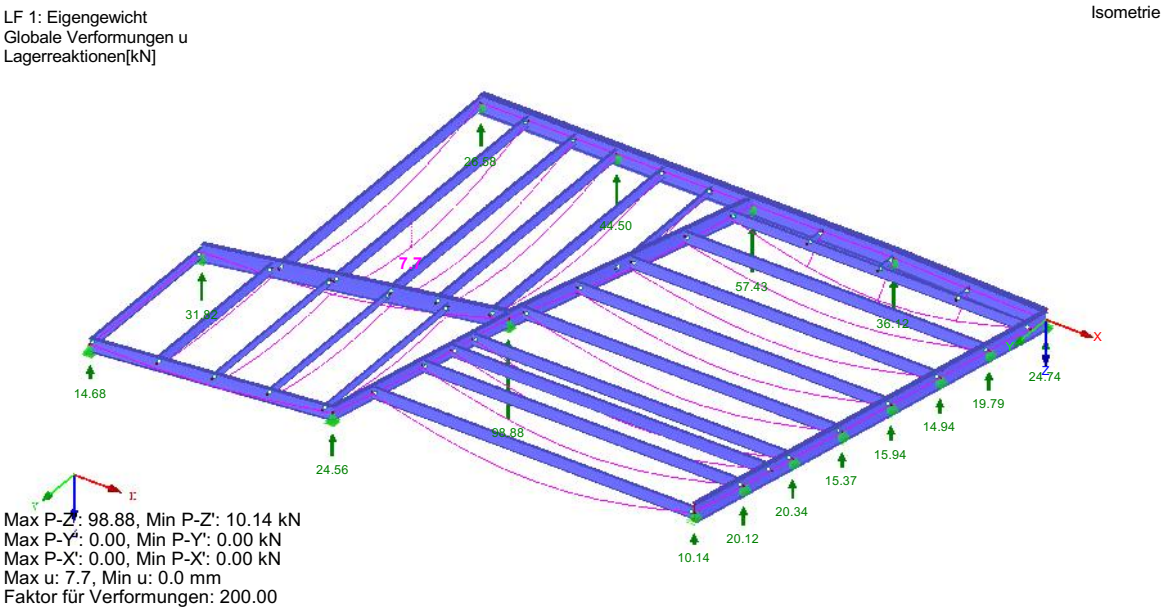


Abbildung 45: Erweitertes ebenes Modell der nordöstlichen Gebäudeecke, RSTAB

Da ein ebenes Modell die Arbeit durch Auflager und Ersatzsteifigkeiten erschwert, wurde das ebene Modell der erweiterten nordöstlichen Gebäudeecke im nächsten Schritt über mehrere Geschosse fortgeführt.

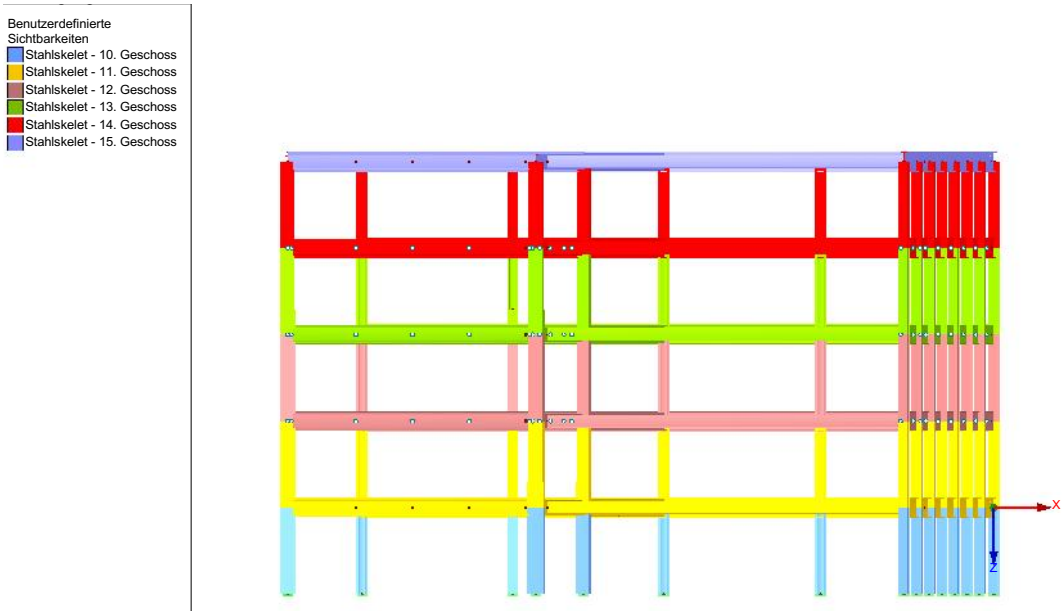


Abbildung 46: Mehrstöckiges Modell der nordöstlichen Gebäudeecke über die Stockwerke 11 bis 15, RSTAB

Das Modell wurde vom 10. bis zum 15. Stockwerk erstellt, wie in Abbildung 46 zu sehen ist. Als ein Geschoss werden dabei das Deckentragwerk und die Stützen darüber bis zur nächsten Decke bezeichnet.
So ergeben sich direkt die Einflüsse aus den Stützen, sowohl im Gebäudeinneren als auch an der Fassade. Die Steifigkeit des gesamten Modells verändert sich ebenfalls durch die Verbindung mehrerer Geschosse. In den Verformungen des Tragwerks sind deutliche Unterschiede zum ebenen Modell zu erkennen.
Um an den aufgeschnittenen Innenseiten des Modells den Einfluss der übrigen Träger des Geschosses zu berücksichtigen, wurden im letzten Schritt kurze Träger mit Endauflager überall dort angefügt, wo Decken- oder Hauptträger anschließen. Dadurch veränderte sich hauptsächlich die horizontale Steifigkeit des Modells.

Bei der Erweiterung des Modells über mehrere Geschosse wurde zudem beachtet, dass sich manche Querschnitte, hauptsächlich die Querschnitte der Stützen, über die Geschosse ändern. Folgende Abbildung zeigt die verschiedenen Querschnitte der Bauteile in unterschiedlichen Farben.

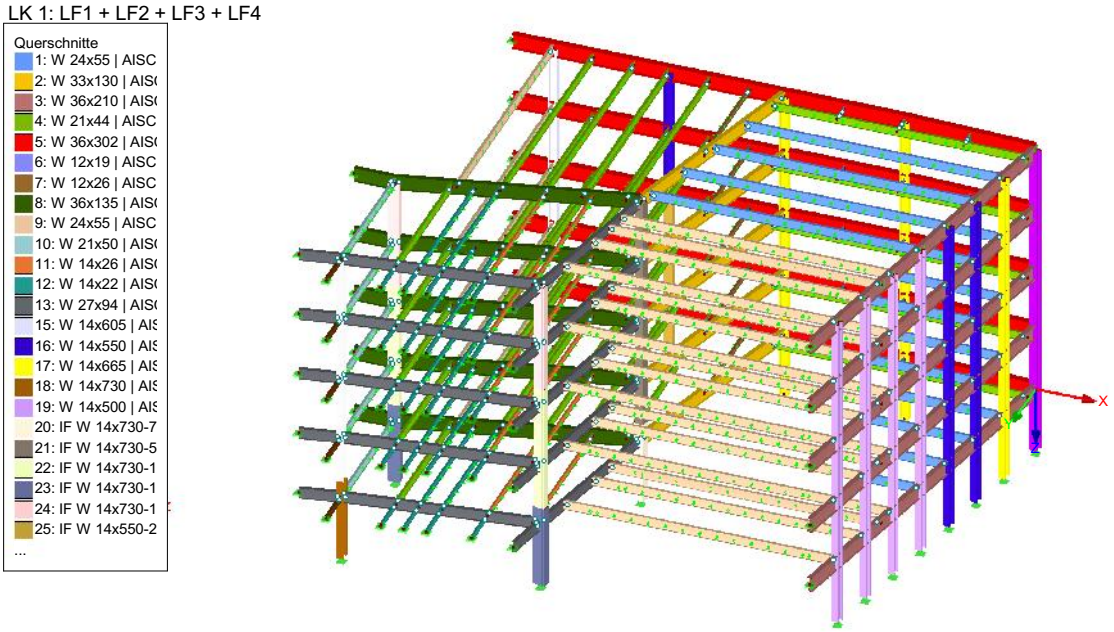


Abbildung 47: Ansicht des Modells mit farblicher Hervorhebung der unterschiedlichen Querschnitte, RSTAB

Um zu berücksichtigen, dass die Deckenträger durch die Stahlbetonverbunddecke über ihre Länge in lokaler y- und z-Richtung gehalten werden, wurde für die Deckenträger eine Stabbettung in y- und z-Richtung von 400 kN/cm^2 eingestellt. Dies half auch dabei, zu große Verformungen der Träger durch die außergewöhnliche Temperaturbelastung in den Griff zu bekommen. Ohne die Stabbettung kam es bei der Berechnung des Modells regelmäßig zu Fehlermeldungen, dass einzelne Träger in y- bzw. z-Richtung ausknicken würden und die Berechnung wurde abgebrochen.

5.3 Erstellen der Lastfälle

5.3.1 Eigenlast

Da die exakten Angaben zu Querschnitt und Material der einzelnen Bauteile aus den Konstruktionsplänen direkt in RSTAB ausgewählt werden konnten, errechnete sich das Programm selbst das Eigengewicht des Stahlskeletts.
Die zusätzliche Belastung aus dem Eigengewicht der Stahlbetonverbunddecke wurde nach folgender Berechnung angesetzt.

3 in (7,62 cm) tiefes Trapezblech, A36 Steel, Dicke t des Blechs nicht bekannt, ca. 0,2 – 0,8 cm.

Dichte des Stahls: ρ = 7,8 t/m^3

$\Rightarrow$ Für t = 0,2 cm: 7 800 kg/m^3 * 0,002 m = 15,6 kg/m^2

15,6 kg/m^2 * 9,81 N/kg * 0,001 kN/N = 0,153 kN/m^2

Für t = 0,8 cm: 7 800 kg/m^3 * 0,008 m = 62,4 kg/m^2

62,4 kg/m^2 * 9,81 N/kg * 0,001 kN/N = 0,612 kN/m^2

2,5 in (6,35 cm) Beton

Beton aus den gefüllten Sicken entspricht 1,5 in (3,81 cm), somit ergibt sich die Gesamtdicke des Betons zu 4 in (10,16 cm). Das abzuziehende Volumen der Bewehrung wird vernachlässigt.

Dichte des Betons: ρ = 2,4 t/m^3

$\Rightarrow$ 2 400 kg/m^3 * 0,1016 cm = 243,84 kg/m^2

243,84 kg/m^2 * 9,81N/kg * 0,001 kN/N = 2,392 kN/m^2

Bewehrung entspricht einer Betonstahlmatte 6/6 W1.4x1.4.

Das Gewicht der Betonstahlmatte beträgt 1,025 kg/m^2.

$\Rightarrow$ 1,025 kg/m^2 * 9,81 N/kg * 0,001 kN/N = 0,01 kN/m^2

Somit ergibt sich eine Gesamtlast der Stahlbetonverbunddecke, unter Annahme eines dickeren Trapezblechs, von:

(0,612 + 2,392 + 0,01) kN/m^2 = 3,014 kN/m^2

Zur Vereinfachung wurde angenommen, dass die gesamte Last der Stahlbetonverbunddecke in die Deckenträger eingeleitet wird. So kann die Flächenlast anteilig auf die einzelnen Träger verteilt und als Streckenlast über die Länge der Deckenträger in RSTAB eingegeben werden. Eine schematische Darstellung der Verteilung der Lasten auf die Deckenträger ist in folgender Abbildung zu sehen.

Ein Träger erhält jeweils die Last der halben Strecke bis zum nächsten Träger und das auf beiden Seiten. Die Darstellung wurde maßstäblich in AutoCAD erstellt.

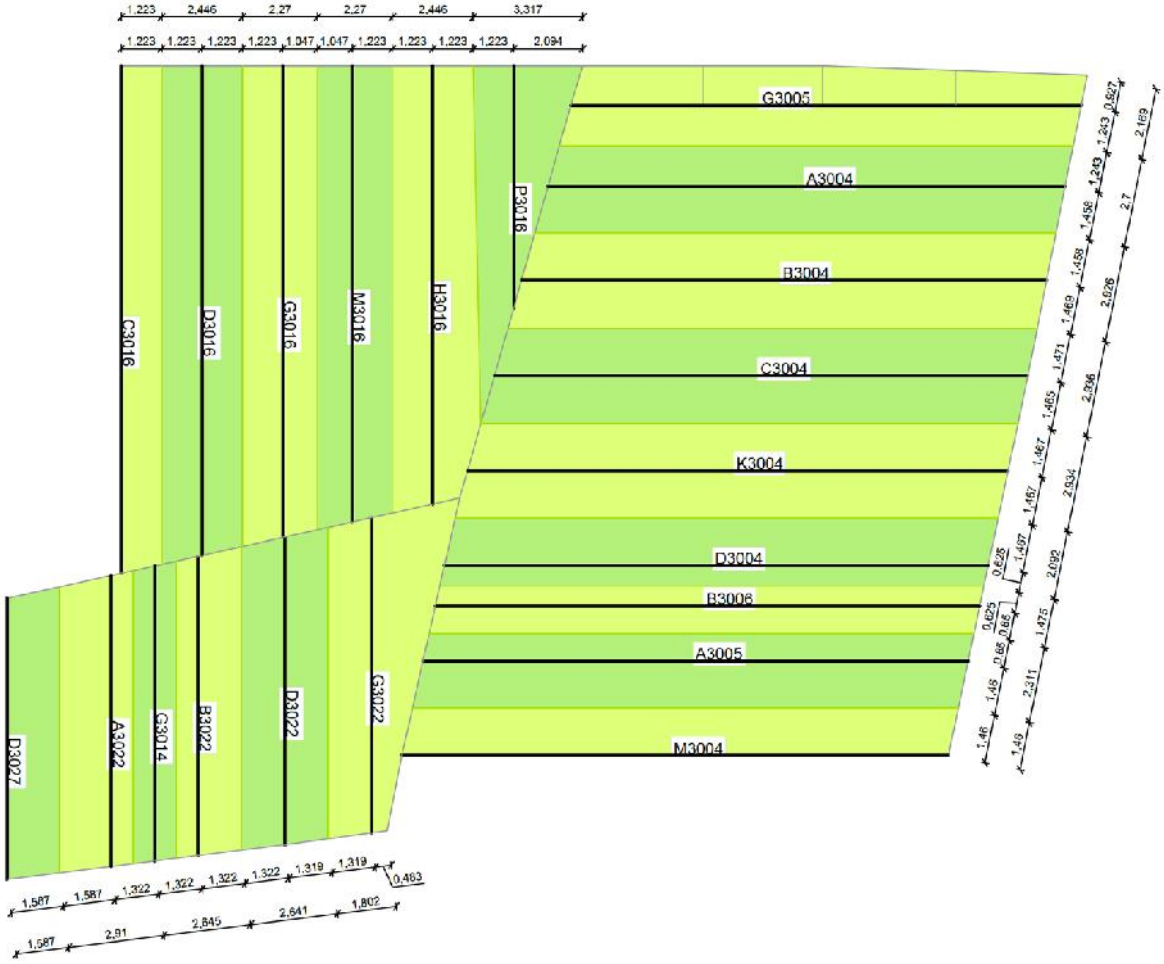


Abbildung 48: Schematische Darstellung der Einzugsfläche der Deckenträger, AutoCAD

Die größte Ungenauigkeit dieser Vereinfachung liegt bei den beiden Trägern P3016 und G3022.

Für die Deckenträger D3027, C3016 und M3004 wurde die innere Einzugsfläche verdoppelt, um zu berücksichtigen, dass weitere Lasten der Decke außerhalb des Modells auf diese Träger wirken.

Folgende Tabelle zeigt die Ermittlung der jeweiligen Streckenlasten, welche dann in RSTAB eingegeben wurden.

Deckenträger	Länge	Einzugsfläche	Eigenlast STBV Decke		
		A	q_k	Resultierende Kraft	Streckenlast
	m	m^2	kN/m^2	kN	kN/m
P3016	7,330	17,94	3,014	54,071	7,377
H3016	13,265	33,435	3,014	100,773	7,597
M3016	13,809	31,302	3,014	94,344	6,832
G3016	14,275	32,678	3,014	98,491	6,900
D3016	14,819	36,247	3,014	109,248	7,372
C3016	15,363	37,246	3,014	112,259	7,307
G3005	15,450	36,159	3,014	108,983	7,054
A3004	15,650	41,484	3,014	125,033	7,989
B3004	15,894	45,648	3,014	137,583	8,656
C3004	16,135	46,434	3,014	139,952	8,674
K3004	16,362	46,941	3,014	141,480	8,647
D3004	16,458	33,68	3,014	101,512	6,168
B3006	16,475	23,79	3,014	71,703	4,352
A3005	16,501	37,327	3,014	112,504	6,818
M3004	16,542	47,256	3,014	142,430	8,610
G3022	9,598	27,52	3,014	82,945	8,642
D3022	9,338	24,361	3,014	73,424	7,863
B3022	9,078	17,877	3,014	53,881	5,935
G3014	8,948	11,789	3,014	35,532	3,971
A3022	8,818	19,536	3,014	58,882	6,677
D3027	8,506	27,024	3,014	81,450	9,576

Tabelle 2: Berechnung der Streckenlasten durch Eigengewicht der STBV Decke auf die Deckenträger

Die Einzugsflächen wurden aus der AutoCAD Zeichnung herausgemessen.

5.3.2 Nutzlasten

Für die Nutzlast kann nach EN 1991-1-1/NA für Büroflächen der Kategorie B1 eine Flächenlast von q_k= 2,0 kN/m^2 angenommen werden (Albert, 2016, S. 3-19). Da WTC 7 am 11. September 2001 bereits am Vormittag geräumt wurde und somit davon ausgegangen werden kann, dass sich keine Personen mehr im Gebäude befanden, wird eine verringerte Nutzlast für das Modell von q_k= 1,33 kN/m^2 angesetzt.

Die Nutzlast wird ebenfalls wie die Eigenlast der Stahlbetonverbunddecke über die Einzugsfläche der Träger zu Streckenlasten umgewandelt und auf die Deckenträger gebracht (siehe Abbildung 48).

Deckenträger	Länge	Einzugsfläche	Nutzlast Bürofläche				
		A	q_k	α_A	q'_k	Resultierende Kraft	Streckenlast
	m	m^2	kN/m^2	≤1,0	kN/m^2	kN	kN/m
P3016	7,330	17,94	1,330	1,0574	1,330	23,860	3,255
H3016	13,265	33,435	1,330	0,7991	1,063	35,534	2,679
M3016	13,809	31,302	1,330	0,8195	1,090	34,116	2,471
G3016	14,275	32,678	1,330	0,8060	1,072	35,031	2,454
D3016	14,819	36,247	1,330	0,7759	1,032	37,404	2,524
C3016	15,363	37,246	1,330	0,7685	1,022	38,069	2,478
G3005	15,450	36,159	1,330	0,7766	1,033	37,346	2,417
A3004	15,650	41,484	1,330	0,7411	0,986	40,887	2,613
B3004	15,894	45,648	1,330	0,7191	0,956	43,656	2,747
C3004	16,135	46,434	1,330	0,7154	0,951	44,179	2,738
K3004	16,362	46,941	1,330	0,7130	0,948	44,516	2,721
D3004	16,458	33,68	1,330	0,7969	1,060	35,697	2,169
B3006	16,475	23,79	1,330	0,9203	1,224	29,120	1,768
A3005	16,501	37,327	1,330	0,7679	1,021	38,122	2,310
M3004	16,542	47,256	1,330	0,7116	0,946	44,725	2,704
G3022	9,598	27,52	1,330	0,8634	1,148	31,601	3,292
D3022	9,338	24,361	1,330	0,9105	1,211	29,500	3,159
B3022	9,078	17,877	1,330	1,0594	1,330	23,776	2,619
G3014	8,948	11,789	1,330	1,3482	1,330	15,679	1,752
A3022	8,818	19,536	1,330	1,0119	1,330	25,983	2,947
D3027	8,506	27,024	1,330	0,8700	1,157	31,271	3,676

Tabelle 3: Berechnung der Streckenlasten durch Nutzlast auf die Deckenträger

Wird die Nutzlast in die Deckenträger weitergeleitet, kann diese mit einem Abminderungsfaktor $\alpha_A = 0{,}5 + 10/A \leq 1{,}0$ verringert werden (Albert, 2016, S. 3-19 f).

Als zusätzliche Last auf die Stützen muss auch das Gewicht der oberen Stockwerke berücksichtigt werden. Hierfür wurde eine Lastkombination aus dem Eigengewicht der Träger, dem Eigengewicht der Stahlbetonverbunddecke und der Nutzlast erstellt. Alle Einwirkungen erhielten den Faktor 1,0. Die aus dieser Lastkombination resultierenden Auflagerkräfte entsprechen der Last der fünf ganzen Stockwerke des Ausschnittmodells. Über dem Ausschnittmodell befinden sich weitere 33 Stockwerke. Wenn eine gleichbleibende Last der Stockwerke angenommen wird, würde die Last von 33 / 5 = 6,6 Ausschnittmodellen zusätzlich auf den Stützen ruhen.

Um zu berücksichtigen, dass sich die Bauteilquerschnitte über die Stockwerke verjüngen und die obersten Stockwerke einen kleineren Grundriss besitzen, wird ein Faktor von 5,5 angenommen.
Die 5,5-fachen Auflagerkräfte werden im Ausschnittmodell oben auf die Stützen aufgesetzt.

5.3.3 Windlasten

Windlasten sind in diesem Bemessungsfall nicht maßgebend und werden vernachlässigt. Berichten zufolge und den Fotoaufnahmen nach zu urteilen war am 11. September 2001 schönes Wetter in New York. Es gab nur vereinzelte Wolken und keine starken Winde (Weather Underground, kein Datum).

5.3.4 Schneelasten

Da es am 11. September 2001 keinen Schnee in New York gab, werden Schneelasten für diese Bemessung vernachlässigt (Weather Underground, kein Datum).

5.3.5 Temperaturlast

Die Temperaturbelastung wurde aus den Ergebnissen der FSI Simulationen des NIST Berichts NCSTAR 1-9 herausgearbeitet. Verwendet wurden hierfür die Ergebnisse für den Fall A (vgl. Kapitel 3.3.3 Seite 28). Die Temperaturen wurden als Zwischenwert der beiden abgebildeten Zeitpunkte 5:00pm und 5:30pm ausgelesen. Die Uhrzeit 5:15pm kommt dem Zeitpunkt des Kollapses um 5:20pm ausreichend nahe.
Da die Ergebnisse der FSI Simulation ausschließlich in Form Abbildungen in NCSTAR 1-9 vorhanden sind, konnten die Temperaturen nur bedingt übernommen werden.

Es ist daher wichtig zu erwähnen, dass sich die gesamte Bemessung der Verbindung auf die Richtigkeit der Temperaturbelastung stützt. Die gering aufgelösten, perspektivischen Abbildungen aus dem NIST Bericht sorgen für große Ungenauigkeiten. Diese Abbildungen sind die einzige Quelle der von NIST simulierten Temperaturen, welche der Öffentlichkeit zur Verfügung stehen. Genauere Angaben von Werten sind nicht veröffentlicht worden.

Die Abbildungen von NIST wurden mit Hilfe der Bildbearbeitungssoftware GIMP von der Perspektivischen Ansicht in eine Draufsicht verzerrt. So war es möglich, die Temperaturverläufe auf den Trägern in besserer Relation zur Trägerlänge sehen zu können.
Über die Farbe der Träger und der angegebenen Temperaturskala wurden die Temperaturen der Träger so gut wie möglich bestimmt. Das Ergebnis der Temperaturermittlung ist in folgender Abbildung zu sehen.

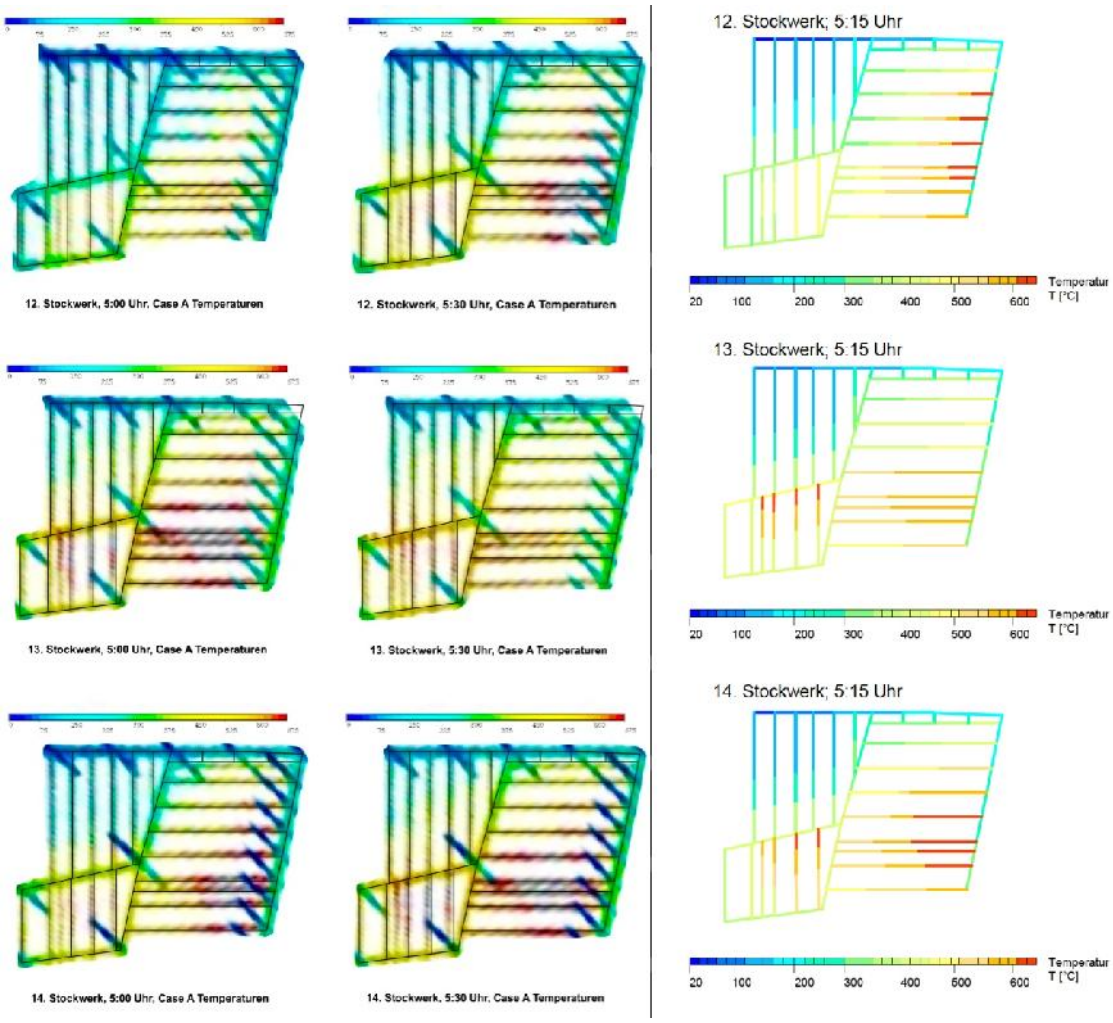


Abbildung 49: links: Abbildungen der Temperaturbelastungen von NIST, bearbeitet mit GIMP, rechts: Schematische Darstellung der Temperaturbelastungen auf die Träger, AutoCAD

Den Angaben von NIST zufolge befanden sich Brände in den Stockwerken 7 bis 9 und 11 bis 14. Im 14. Stockwerk wurde nur ein kleiner Brandherd auf der nördlichen Gebäudeseite gesehen (NIST, 2008b, S. 243). Dieser Brand wurde somit nicht im Modell berücksichtigt.

Temperaturveränderungen über den Querschnitt wurden von NIST nicht in der FSI Simulation berücksichtigt. NIST schließt aus Untersuchungen, dass keine großen Temperaturunterschiede in den Trägern herrschten und folgert deshalb daraus: „[...] a uniform temperature was determined to be a reasonable approximation for the temperature profile in the beam and girder sections“ (Es wurde festgestellt, dass eine gleichmäßige Temperatur eine vernünftige Annahme für die Temperaturlast der Decken- und Hauptträger ist.) (NIST, 2008b, S. 392).
Um trotzdem den Einfluss von ungleichmäßiger Erwärmung des Querschnitts mit in die Berechnung einfließen zu lassen, wurde für den Großteil der Träger ein ΔT von 80°C gewählt. Alle Träger mit geringen Temperaturen von 100°C oder weniger bekamen entsprechend niedrigere Werte für ΔT bzw. keine ΔT Belastung. Die Stützen erhielten aufgrund ihrer senkrechten Ausrichtung keine ΔT Belastung über den Querschnitt.

Um den Einfluss von schwankenden Temperaturbelastungen auf die Schnittgrößen feststellen zu können, wurden die Temperaturbelastungen um die Faktoren 1,10 und 0,80 erhöht bzw. verringert. Dies ähnelt den Fällen B und C aus den FSI Simulationen von NIST. Bei NIST wurde aber in den erneuten Simulationen mitberücksichtigt, dass sich ein stärkerer bzw. schwächerer Brand anders verhält. Beim Multiplizieren derselben Temperaturbelastung mit einem Faktor wird vorweggenommen, dass sich der Brand gleich verhält und ausbreitet. Daher lassen sich diese beiden Herangehensweisen nur bedingt vergleichen.
Der Faktor 1,10 wurde gewählt, da die Belastungen unter Faktor 1,20, wie er Fall B des NIST Berichts entsprechen würde, das RSTAB Modell an seine Grenzen bringt. Wie beim Erstellen der Stabbettung erwähnt, bricht RSTAB die Berechnung ab, wenn Träger unter ihrer Belastung ausknicken würden.
Um ein Gefühl für den Einfluss der Temperaturbelastungen zu bekommen, sind die beiden Faktoren 1,10 und 0,8 ausreichend.

5.4 Ermittlung der Schnittgrößen am Auflager von A2001 an Stütze 79

Im Folgenden liegt die Konzentration auf der Verbindung von Hauptträger A2001 zu Stütze 79, welche sich im 13. Stockwerk befindet. Einerseits, da NIST den Auslöser des progressiven Kollapses an dieser Verbindung sieht und andererseits, da den Schnittgrößen des Modells zufolge an dieser Verbindung tatsächlich eine der höchsten Belastungen herrscht. Dies liegt unter anderem an der unsymmetrischen Anordnung der Träger in der nordöstlichen Gebäudeecke. An den Hauptträger A2001 schließen nur einseitig Deckenträger an, was zu einer stärkeren Verformung führt. Außerdem sind hier die größten Spannweiten der Träger anzutreffen.

Nachdem die gesamten Belastungen bestimmt und in das Modell eingegeben wurden, konnte die Berechnung durchgeführt werden. Dafür wurde eine Lastkombination erstellt, welche alle Lästfälle enthält. Für diesen außergewöhnlichen Fall wurden alle Lastfälle mit dem Faktor 1,0 versehen. Die Berechnung erfolgte nach Theorie II. Ordnung.
Daraufhin konnten die Schnittgrößen an der Verbindung von A2001 zu Stütze 79 ausgelesen werden. Zum Vergleich wurden in der letzten Zeile der Tabelle die Schnittgrößen für die Lastkombination ohne Temperaturbelastung durch Brand angegeben.

	N [kN]	V_y [kN]	V_z [kN]	M_T [kNm]	M_y [kNm]	M_z [kNm]
0,8-fache Temp.	-551,92	-373,54	-32,96	-0,19	-0,01	0,00
1,0-fache Temp.	**-680,15**	**-456,74**	**-17,30**	**-0,05**	**0,00**	**0,00**
1,1-fache Temp.	-742,77	-495,73	-9,51	0,01	0,00	0,00
ohne Brand	0,40	0,00	96,75	-0,73	0,00	0,00

Tabelle 4: Schnittgrößen der Verbindung A2001 zu Stütze 79, RSTAB

Die Verringerung der Querkraft V_z bei Temperaturbelastung lässt sich möglicherweise dadurch erklären, dass sich die Stütze in ihrer Länge ausdehnt und damit V_z entgegenwirkt.

5.5 Bemessung der Verbindung von A2001 zu Stütze 79

Es folgt die Bemessung der Verbindung von Hauptträger A2001 zu Stütze 79 im 13. Stockwerk. Bei dieser Verbindung handelt es sich um eine sog. *seated connection*, eine Art Konsolauflager. Die Detailzeichnungen der Verbindung sind in den folgenden zwei Abbildungen zu sehen.

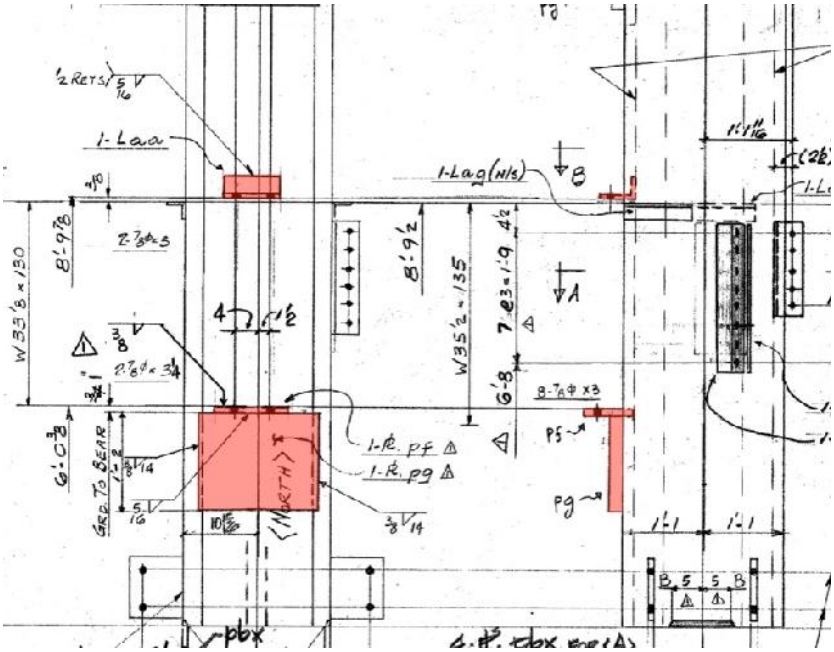


Abbildung 50: Konsolauflager von A2001 an Stütze 79, farblich markiert, Ausschnitt aus Plan Column 79 7th, 8th & 9th Tier, Frankel Steel Limited

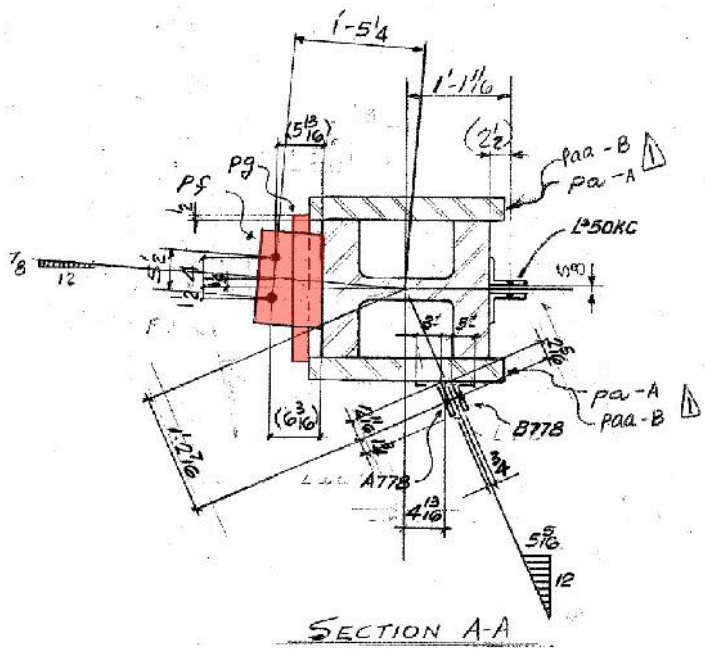


Abbildung 51: Konsolauflager von A2001 an Stütze 79, farblich markiert, Ausschnitt aus Plan Column 79 7th, 8th & 9th Tier, Frankel Steel Limited

Aus diesen Plänen wurde für eine einfachere Handhabung eine Zeichnung in AutoCAD erstellt.

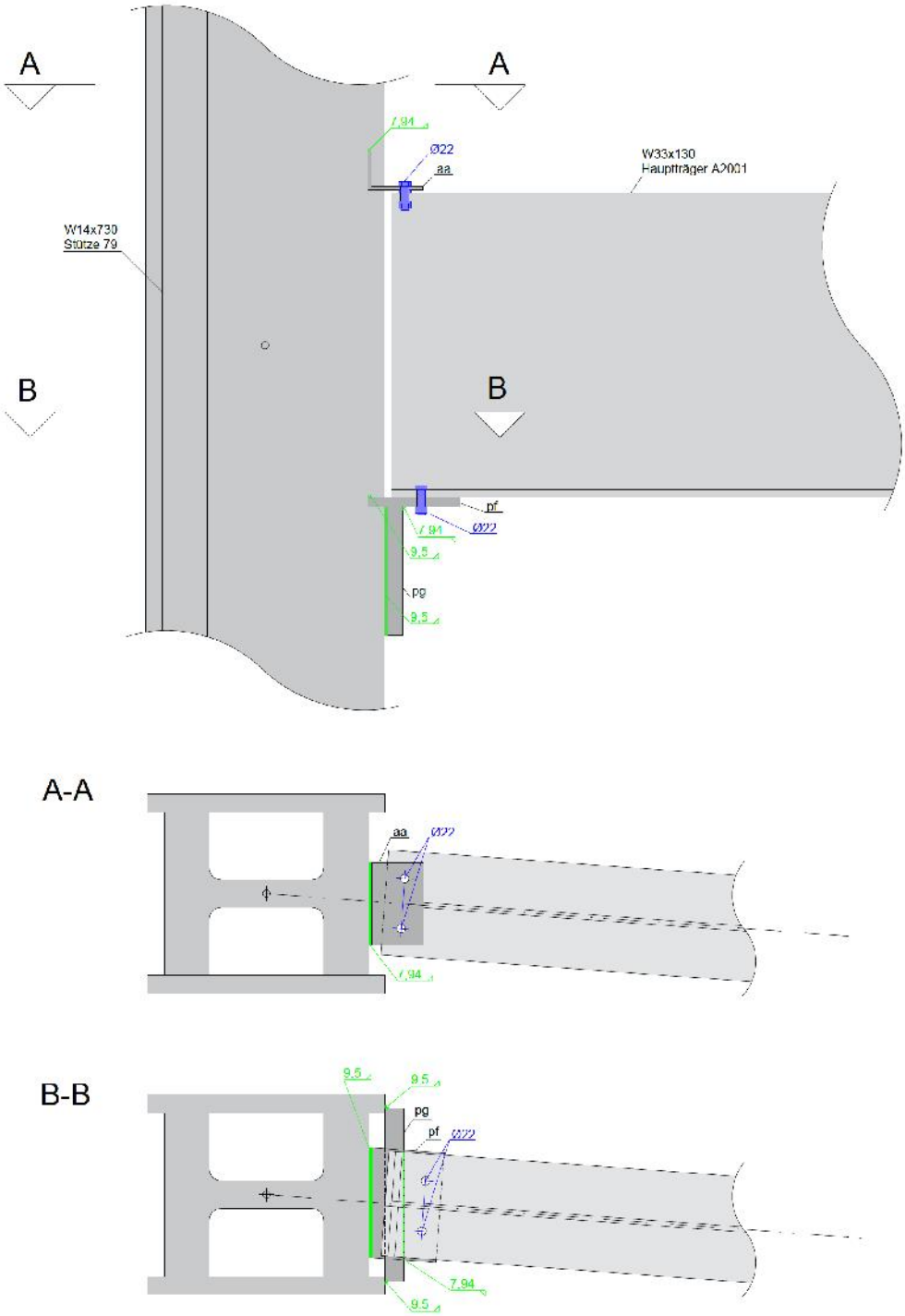


Abbildung 52: Darstellung der Verbindung A2001 zu Stütze 79, AutoCAD

Das Konsolauflager besteht aus einem 2 in (5,08 cm) dicken Flachstahl (als „pg“ bezeichnet“), welcher über seine Länge von 1 ft 2 in (35,56 cm) an den *side plates* angeschweißt ist. Darauf liegt ein als „pf“ bezeichneter Flachstahl mit einer Dicke

von 1 in (2,54 cm) auf, welcher sowohl am Flachstahl „pg“ als auch am Flansch der Stütze verschweißt ist. In diesem Flachstahl befinden sich außerdem zwei Schraubenlöcher zur Befestigung des Hauptträgers A2001, welcher durch den unteren Flansch verschraubt auf der Konsole gehalten wird.
Der obere Flansch des Trägers wird zusätzlich als Lagesicherung durch einen Winkel gehalten. Der als „L aa“ bezeichnete Winkel hat eine Dicke von 3/8 in (0,95 cm) und ist über seine Länge von 9 in (22,86 cm) am Flansch der Stütze angeschweißt. Die Verbindung von Träger zu Winkel wird auch hier durch zwei Schrauben sichergestellt. Alle vier Schrauben dieser Verbindung sind ASTM A325 Schrauben mit einem Durchmesser von 7/8 in (22 mm).
Die Verbindung ist somit hauptsächlich in der Lage, vertikale Lasten abzutragen. Horizontale Lasten sind nur bedingt durch die Verschraubungen aufnehmbar.

5.5.1 Nachweis der Schraubverbindungen

Einwirkungen
Auf die Schraubverbindungen wirken im außergewöhnlichen Lastfall die Normalkraft von N_A = -680,15 kN (Druck) und die Querkraft in y-Richtung von $V_{y,A}$ = -456,74 kN sowie die Querkraft in z-Richtung von $V_{z,A}$ = 17,30 kN.

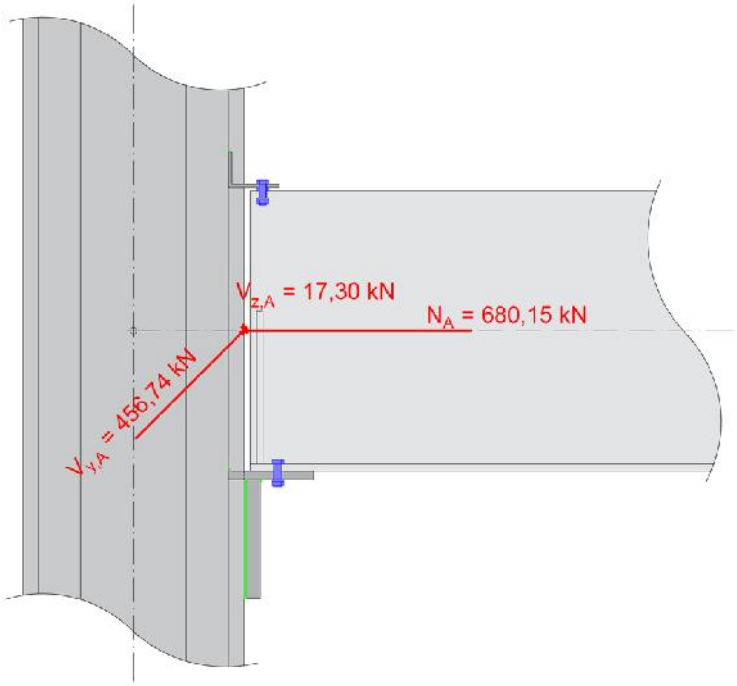


Abbildung 53: Darstellung der Verbindung mit Schnittgrößen, AutoCAD

Die ermittelten Schnittgrößen greifen direkt am Ende des Trägers an der Stütze an. Für die Bemessung der Schraubverbindung müssen die Schnittgrößen im Schraubenschwerpunkt S_S ermittelt werden. Es wurde angenommen, dass jeweils die Hälfte der Normalkraft N und die Hälfte der Querkraft V_y auf die Schraubverbindung einwirkt. Die Ermittlung der resultierenden Kräfte wurde in AutoCAD zeichnerisch durchgeführt.

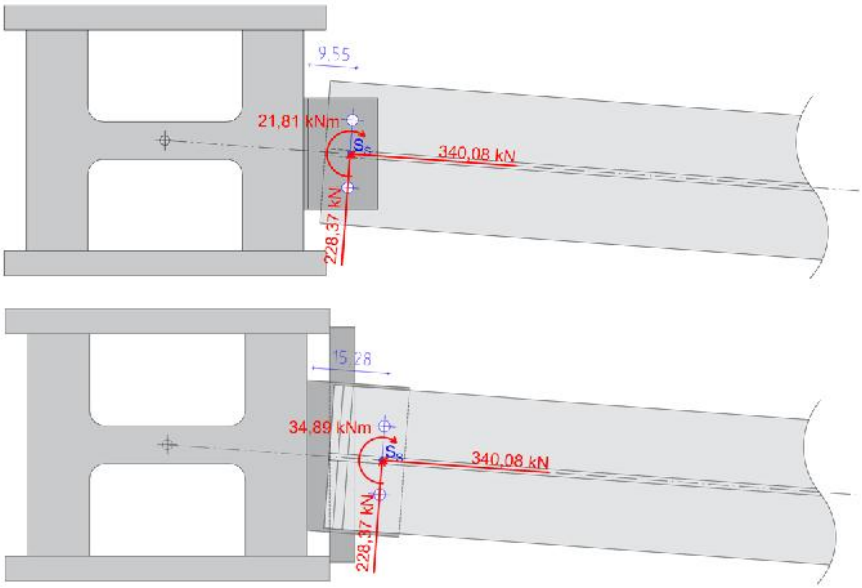


Abbildung 54: Schnittgrößen im Schraubenschwerpunkt S_S, oben Träger-Winkel unten Träger-Konsole, AutoCAD

Durch Verschieben der Querkraft V_y ergibt sich ein Moment, welches zusätzlich als Belastung auf die Schrauben berücksichtigt werden muss (die geringe Verschiebung in z-Richtung wird vernachlässigt).

Für den geschraubten Anschluss am Winkel:

$$M_{Winkel,A} = 228{,}37 \text{ kN} * 0{,}0955 \text{ m} = 21{,}81 \text{ kNm}$$

Für den geschraubten Anschluss am Konsolauflager:

$$M_{Konsole,A} = 228{,}37 \text{ kN} * 0{,}1528 \text{ m} = 34{,}89 \text{ kNm}$$

Um diese Momente als Kräfte auf die Schrauben umzuwandeln, wird das polare Flächenträgheitsmoment I_P der Schraubengruppen benötigt.

Dafür wird die Exzentrizität der Schraubenlöcher in lokaler x- und y-Richtung vom Schraubenschwerpunkt benötigt. Diese ist sowohl für den oberen als auch für den unteren geschraubten Anschluss gleich.

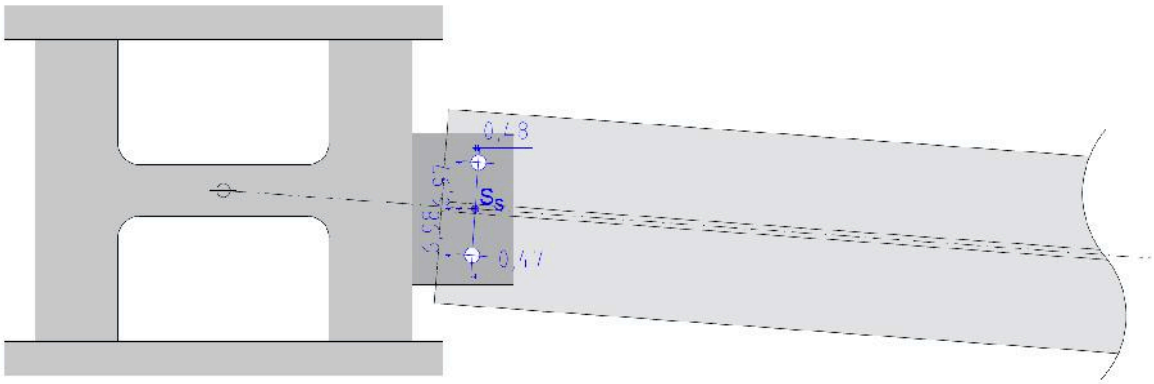


Abbildung 55: Abstand der Schraubenlöcher zum Schraubenschwerpunkt, AutoCAD

$I_P = \Sigma\, x_i^2 + \Sigma\, z_i^2 = (0{,}47^2 + 0{,}48^2) + (6{,}98^2 + 6{,}97^2) = 97{,}75\ cm^2$

Damit lassen sich die zusätzlichen Kräfte $F_{M,x,i}$ und $F_{M,y,i}$ auf die Schrauben berechnen.

Mit: $F_{M,x,i} = \left(\frac{M}{I_P}\right) * y_i$

$F_{M,y,i} = \left(\frac{M}{I_P}\right) * x_i$

Für den geschraubten Anschluss am Winkel:

$F_{M,x,1} = \left(\frac{21{,}81*100}{97{,}75}\right) * 6{,}97 = 155{,}51\ kN$

$F_{M,z,1} = \left(\frac{21{,}81*100}{97{,}75}\right) * 0{,}48 = 10{,}71\ kN$

$F_{M,x,2} = \left(\frac{21{,}81*100}{97{,}75}\right) * 6{,}98 = 155{,}74\ kN$

$F_{M,z,2} = \left(\frac{21{,}81*100}{97{,}75}\right) * 0{,}47 = 10{,}49\ kN$

Für den geschraubten Anschluss am Konsolauflager:

$F_{M,x,1} = \left(\frac{34{,}89*100}{97{,}75}\right) * 6{,}97 = 248{,}78\ kN$

$F_{M,z,1} = \left(\frac{34{,}89*100}{97{,}75}\right) * 0{,}48 = 17{,}13\ kN$

$F_{M,x,2} = \left(\frac{34{,}89*100}{97{,}75}\right) * 6{,}98 = 249{,}14\ kN$

$F_{M,z,2} = \left(\frac{34{,}89*100}{97{,}75}\right) * 0{,}47 = 16{,}78\ kN$

Die aus den einzelnen Kräften von V_y, N und M resultierende Kraft je Schraube ist in folgender Abbildung zu sehen und beträgt für den Anschluss am Winkel rund 348 kN und für den Anschluss am Konsolauflager rund 439 kN.

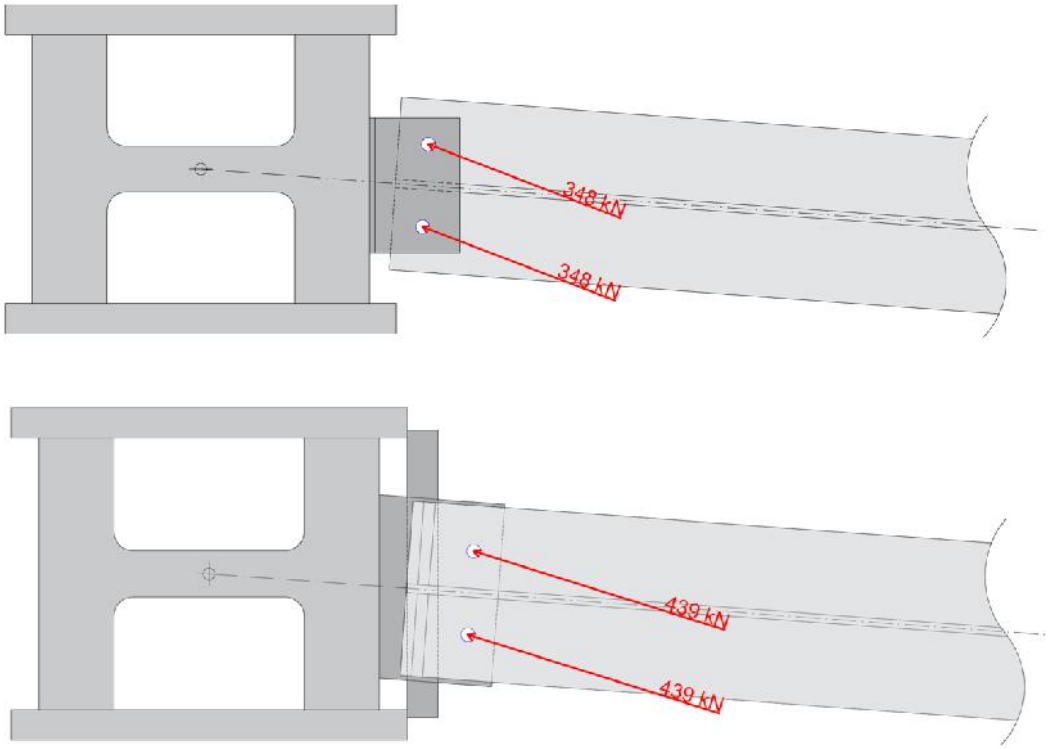


Abbildung 56: Resultierende Kraft je Schraube, oben Träger-Winkel unten Träger-Konsole, AutoCAD

Widerstand

Zuerst wurden das vorhandene Lochbild der Verbindung ausgewertet. Der Lochdurchmesser für die Schrauben mit einem Durchmesser von 22 mm beträgt d_0 = 24 mm.

Die Schraubenabstände stellten sich wie folgt dar (Bezeichnungen für Normalkraftbeanspruchung gewählt):

Konsolauflager:

e_1 = 4,55 cm ≈ 1,9d_0

e_2 = 8,17 cm ≈ 3,4d_0

p_2 = 13,98 cm ≈ 5,83d_0

Unterer Trägerflansch:

e_1 = 10,71 cm ≈ 4,46d_0

e_2 = 7,61 cm ≈ 3,17d_0

p_2 = 13,98 cm ≈ 5,83d_0

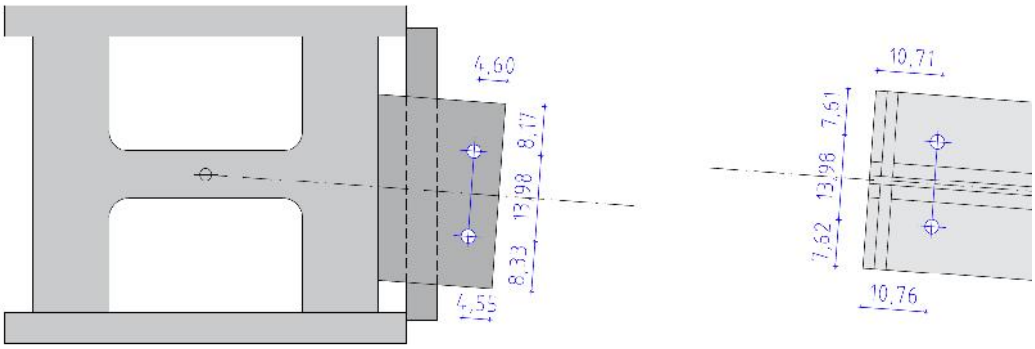


Abbildung 57: Lochbild des Konsolauflagers und des unteren Trägerflansches, AutoCAD

Winkel:

e_1 = 5,24 cm ≈ 2,18d_0

e_2 = 4,43 cm ≈ 1,85d_0

p_2 = 13,98 cm ≈ 5,83d_0

Oberer Trägerflansch:

e_1 = 5,06 cm ≈ 2,11d_0

e_2 = 7,61 cm ≈ 3,17d_0

p_2 = 13,98 cm ≈ 5,83d_0

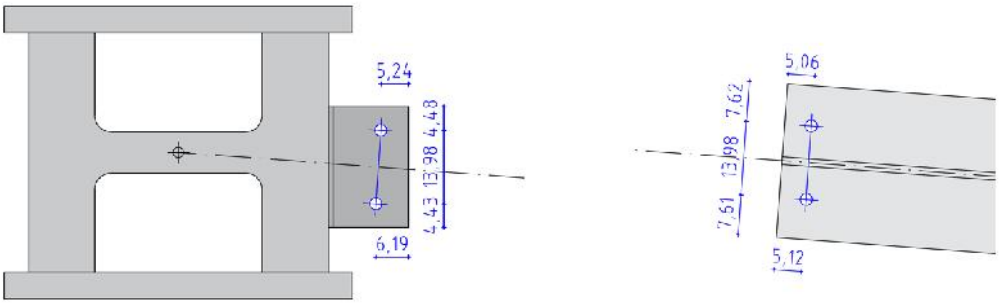


Abbildung 58: Lochbild des Winkels und des oberen Trägerflansches, AutoCAD

Zum Vergleich, die Mindestwerte für Rand- und Lochabstände nach DIN EN 1993-1-8 von $e_1 \geq 1{,}2\ d_0$, $e_2 \geq 1{,}2\ d_0$ und $p_2 \geq 2{,}4\ d_0$ wären in diesem Fall erfüllt.

Abscheren

Alle verwendeten Schrauben sind ASTM A325 Schauben. Die Streckgrenze von 92 ksi entspricht 634 N/mm^2 und die Zugfestigkeit von 120 ksi entspricht 827 N/mm^2 (portlandbolt.com, kein Datum). Damit ist diese Schraube mit der Schraube der Festigkeitsklasse 8.8 zu vergleichen. Diese besitzt nach DIN EN 1993-1-8 die mechanischen Kennwerte f_{yb} = 640 N/mm^2 und f_{ub} = 800 N/mm^2.
Beim Versagen Abscheren im Schaft für den außergewöhnlichen Lastfall ergibt sich also:

$$F_{v,Rd,A} = \frac{A*f_{ub}}{\sqrt{3}} = \frac{380\ mm^2*827\ {}^{N}/_{mm^2}}{\sqrt{3}} = 181\ 438\ N = 181{,}44\ kN$$

mit:

$A = \frac{\pi*d^2}{4} = \frac{\pi*(22\ mm)^2}{4} = 380\ mm^2$

d = 22 mm; Schraubendurchmesser im Schaft

$\gamma_{M,A}$ = 1,0

Für Abscheren im Gewinde ergibt sich:

$$F_{v,Rd,A} = \frac{A_S*f_{ub}}{\sqrt{3}} = \frac{303\ mm^2*827\ {}^{N}/_{mm^2}}{\sqrt{3}} = 144\ 673\ N = 144{,}67\ kN$$

mit:

A_S = 303 mm^2; Nennspannungsquerschnitt M22 Schraube aus DIN EN ISO 898-1

$\gamma_{M,A}$ = 1,0

Da den Plänen nicht zu entnehmen ist, ob sich die Scherfuge im Gewinde oder im Schaft der Schraube befindet, wird der kritischere Wert mit $F_{v,Rd,a}$ = 144,67 kN für Scherfuge im Gewinde gewählt.
Da die tatsächliche Festigkeit der Bauteile die Normfestigkeit übertrifft, kann für den außergewöhnlichen Lastfall eine erhöhte Festigkeit von 130 % angesetzt werden. Die herrschenden Temperaturen aufgrund der Brände verringern die Bauteilfestigkeiten wiederum. Für eine Temperatur der Verbindungsmittel von rund 400 °C ergibt sich ein Abminderungsfaktor von $k_{b,\theta}$ = 0,775 nach DIN EN 1993-1-2.

Somit: $F_{v,Rd,A}$ = 144,67 kN * 1,30 * 0,775 = 145,76 kN.

Ergebnis

Für die Verbindung Träger-Winkel ergeben sich einwirkende Kräfte von 348 kN je Schraube. Also:

$$\frac{348\ \mathrm{kN}}{145{,}76\ \mathrm{kN}} = 2{,}39 > 1{,}0$$

Für die Verbindung Träger-Konsole ergeben sich einwirkende Kräfte von 439 kN je Schraube. Also:

$$\frac{439\ \mathrm{kN}}{145{,}76\ \mathrm{kN}} = 3{,}01 > 1{,}0$$

Beide Ergebnisse zeigen deutlich, dass die einwirkenden Kräfte nicht von den Schrauben aufgenommen und übertragen werden können. Unter diesen Umständen versagt diese Verbindung durch Abscheren der Schrauben.

Lochleibung

Prinzipiell ist das Versagen der Lochleibung ein Problem bei Zugbelastung der Schraubverbindung. Bei der hier vorherrschenden Druckbelastung der Schraubverbindung ist das Lochleibungsversagen weniger kritisch.
Die Lochleibungsfestigkeit berechnet sich wie folgt:

$F_{b,Rd,A} = k_1 * \alpha_1 * f_u * d * t$

mit:

$\gamma_{M,A} = 1{,}0$

Aufgrund der Bauteildicke wird hier nur die Lochleibungsfestigkeit des Winkels unter der Querkraft bemessen. Dieser hat mit t = 0,95 cm die geringste Dicke.

$F_{b,Rd,A} = 2{,}5 * 0{,}622 * 44{,}8\ \frac{\mathrm{kN}}{\mathrm{cm}^2} * 2{,}2\ \mathrm{cm} * 0{,}95\ \mathrm{cm} = 145{,}6\ \mathrm{kN}$

mit:

$$k_1 = \min \begin{cases} 2{,}8 * \frac{e_2}{d_0} = 2{,}8 * \frac{5{,}24\ \text{cm}}{2{,}40\ \text{cm}} = 6{,}11 \\ 1{,}4 * \frac{p_2}{d_0};\ p_2\ \text{nicht vorhanden} \\ 2{,}5 \end{cases} \quad ; k_1 = 2{,}5$$

$$\alpha_1 = \min \begin{cases} \frac{f_{ub}}{f_u} = \frac{827}{448} = 1{,}846 \\ 1{,}0 \\ \frac{e_1}{3d_0} = \frac{4{,}48\ cm}{3 * 2{,}4\ cm} = 0{,}622 \end{cases} \quad ; \alpha_1 = 0{,}622$$

Zusätzlich wird eine Erhöhung der Festigkeit um 130 % beachtet, da die tatsächliche Festigkeit die Normfestigkeit überschreitet. Eine Abminderung der Festigkeit aufgrund des Temperatureinflusses wird nicht vorgenommen, da nach DIN EN 1993-1-2 bis 400°C hier keine Verminderung der Festigkeit auftritt.
Somit ergibt sich die Lochleibungsfestigkeit des Winkels zu:
$F_{b,Rd,A}$ = 1,3 * 145,6 kN = 189,28 kN

Ergebnis
Für den Winkel ergibt sich mit der einwirkenden Querkraft von 227,78 kN[4]:
$\frac{227{,}78\ \text{kN}}{189{,}28\ \text{kN}}$ = 1,20 ≥ 1,0

Der Winkel würde unter diesen Umständen aufgrund mangelnder Lochleibungsfestigkeit versagen.

Bauteilversagen

Da die Verbindung hauptsächlich auf Druck belastet wird und bereits bei der Scherfestigkeit der Schrauben und bei der Lochleibungsfestigkeit ihre Schwachstellen zeigt, wird die Verbindung nicht auf Bauteilversagen bemessen.

[4] Senkrechte Komponente der einwirkenden 228,37 kN, vgl. Abbildung 54

5.5.2 Nachweis der Schweißverbindungen

Die Ergebnisse der Bemessung der Schraubverbindungen lassen schließen, dass die Verbindung dort ihre Schwachstelle besitzt. Die Bemessung der Schweißnähte ist daher nicht in vollem Umfang notwendig.

Anschlussnaht Winkel

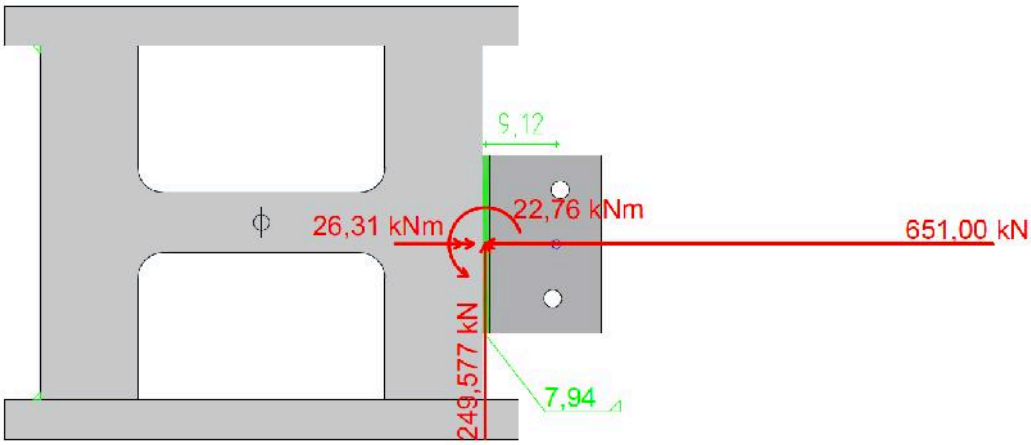


Abbildung 59: Schnittgrößen an der Schweißverbindung am Winkel, AutoCAD

Einwirkung

Die Schweißnaht besitzt eine Fläche von:

A_w = 22,86 * 0,794 = 18,15 cm^2.

Die resultierenden Kräfte aus den Schrauben greifen im Schwerpunkt der Schraubenlöcher im Winkel AA an. Die Querkraft in y-Richtung beträgt 249,577 kN, die Normalkraft beträgt. 651,10 kN. Beim Verschieben der Querkraft in den Schweißnahtschwerpunkt entstehen zwei Momente, welche berücksichtigt werden müssen (hier wurde die Verschiebung in z-Richtung berücksichtigt).

M_{xy} = 249,577 kN * 0,0912 m = 22,76 kNm

M_z = 249,577 kN * 0,1054 m = 26,31 kNm

Da der Winkel AA mit seiner gesamten Fläche den Flansch der Stütze berührt, wird davon ausgegangen, dass die Normalkraft über die gesamte Bauteilfläche abgetragen wird und somit nicht zu Spannungen in der Schweißnaht führt. Die Normalkraft N = 651,10 kN wird daher für diese Bemessung nicht weiter berücksichtigt.

Es ergeben sich also folgende Schweißnahtspannungen:

Aus V_y = 249,577 kN: $\tau_{\parallel} = \frac{249{,}577\ \mathrm{kN}}{18{,}15\ \mathrm{cm}^2} = 13{,}75\ \frac{\mathrm{kN}}{\mathrm{cm}^2}$

Aus M_{xy} = 22,76 kNm: $\sigma_{\perp} = \frac{22{,}76\ \mathrm{kNm}}{69{,}15\ \mathrm{cm}^3} = 0{,}329\ \frac{\mathrm{kN}}{\mathrm{cm}^2}$

mit: $W_{w,1} = \frac{0{,}794 * 22{,}86^3}{12} * \frac{1}{11{,}43} = 69{,}15\ \mathrm{cm}^3$

Schweißnahtdicke a_w = 0,794 cm (5/16 in)

Schweißnahtlänge l_w = 22,86 cm

Aus M_z = 26,31 kNm: $\tau_{\perp} = \frac{26{,}31\ \mathrm{kNm}}{69{,}15\ \mathrm{cm}^3} = 0{,}380\ \frac{\mathrm{kN}}{\mathrm{cm}^2}$

Daraus resultiert eine einwirkende Schweißnahtspannung von:

$$\sigma_{w,Ed,A} = \sqrt{\sigma_{\perp}^2 + \tau_{\perp}{}^2 + \tau_{\parallel}^2} = \sqrt{0{,}329^2 + 0{,}380^2 + 13{,}75^2} = 13{,}76\ \frac{\mathrm{kN}}{\mathrm{cm}^2}$$

Widerstand

Der Schweißnahtwiderstand $\sigma_{W,R}$ ergibt sich aus der Zugfestigkeit des Blechs und dem Korrelationsbeiwert β_W, welcher abhängig von der Stahlfestigkeit ist. Bei dem verwendeten Winkel handelt es sich um einen Bauteil aus 44W Stahl, eine kanadische Bezeichnung. Dieser hat eine Zugfestigkeit von 65 bis 85 ksi. Es wird der untere Wert gewählt, welcher 448 N/mm² beträgt. Da der Korrelationsbeiwert nur für europäische Stahlsorten gilt, wird er durch Interpolation bestimmt. Der Stahl 44W liegt mit der Zugfestigkeit zwischen den Stählen S275 und S355, welche die Korrelationsbeiwerte von 0,85 bzw. 0,9 haben. Also ergibt sich:

$$\beta_w = \left(\frac{0{,}9 - 0{,}85}{490 - 430} * (448 - 430)\right) + 0{,}85 = 0{,}865$$

Auch für die Schweißnähte kann eine tatsächliche Festigkeit von 130 % der Normfestigkeit angenommen werden. Ebenfalls muss die Abminderung der Festigkeit durch Temperaturerhöhung der Bauteile berücksichtigt werden. Der Abminderungsfaktor beträgt $k_{W,\theta}$ = 0,775 nach DIN EN 1993-1-2 für eine Temperatur von 400°C.

Somit beträgt der Schweißnahtwiderstand:

$\sigma_{w,Rd,A} = \frac{44{,}8\frac{kN}{cm^2} * 0{,}876}{0{,}865 * \sqrt{3}} = 26{,}19\ \frac{kN}{cm^2}$

mit: $\gamma_{M,A} = 1{,}0$

Ergebnis

Es ergibt sich also mit der einwirkenden Schweißnahtspannung:

$\frac{\sigma_{w,Ed,A}}{\sigma_{w,Rd,A}} = \frac{13{,}754}{29{,}90} = 0{,}460 \leq 1{,}0$

Die Schweißnaht wird zu 46 % ausgenutzt und hält somit der Belastung stand.

Anschlussnaht Konsolauflager

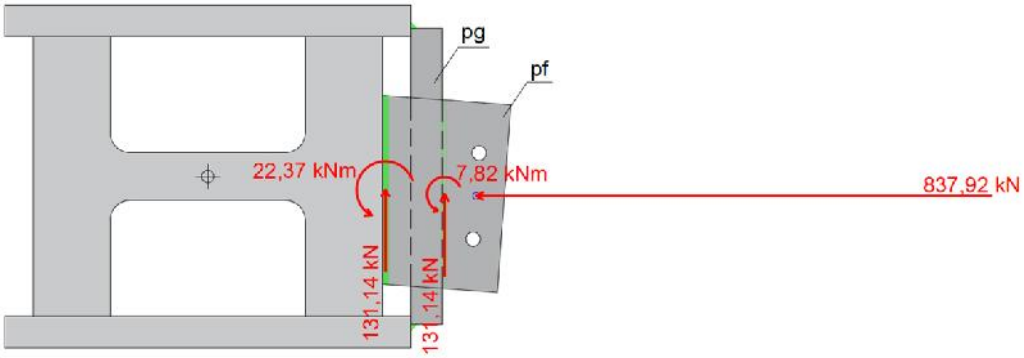


Abbildung 60: Schnittgrößen an der Schweißverbindung am Konsolauflager, AutoCAD

Einwirkung

Die beiden Schweißnähte besitzen eine Fläche von:

$A_{w,1} = 30{,}56 * 0{,}794 = 24{,}26\ cm^2$

und $A_{w,2} = 30{,}56 * 0{,}953 = 29{,}12\ cm^2$

Die resultierenden Kräfte aus den Schrauben greifen im Schwerpunkt der Schraubenlöcher im Flachstahl pf an. Die Querkraft in y-Richtung wird hälftig mit je 131,14 kN auf die beiden Schweißnähte verteilt. Beim Verschieben der halbierten Kraft in den jeweiligen Schweißnahtschwerpunkt entsteht ein Moment, welches ebenfalls berücksichtigt werden muss (die geringe Verschiebung in z-Richtung wurde vernachlässigt).

$M_1 = 131{,}14\ kN * 0{,}0516\ m = 7{,}82\ kNm$

$M_2 = 131{,}14\ kN * 0{,}1477\ m = 22{,}37\ kNm$

Es wird angenommen, dass die Querkraft V_z ausschließlich über das Konsolauflager abgetragen wird. V_z wird nur über die Auflagefläche des Trägers auf dem Flachstahl pf übertragen. Die Kraft sitzt somit im Schwerpunkt dieser Auflagefläche. Der Schwerpunkt befindet sich 2,5 cm vor der vorderen Schweißnaht (Schweißnaht Nummer 1). Die hintere Schweißnaht (Schweißnaht Nummer 2) ist von der vorderen 9,2 cm entfernt. Um die aus V_z resultierenden Kräfte auf die Schweißnähte zu erhalten, wurde ein einfaches statisches System in RSTAB erstellt.

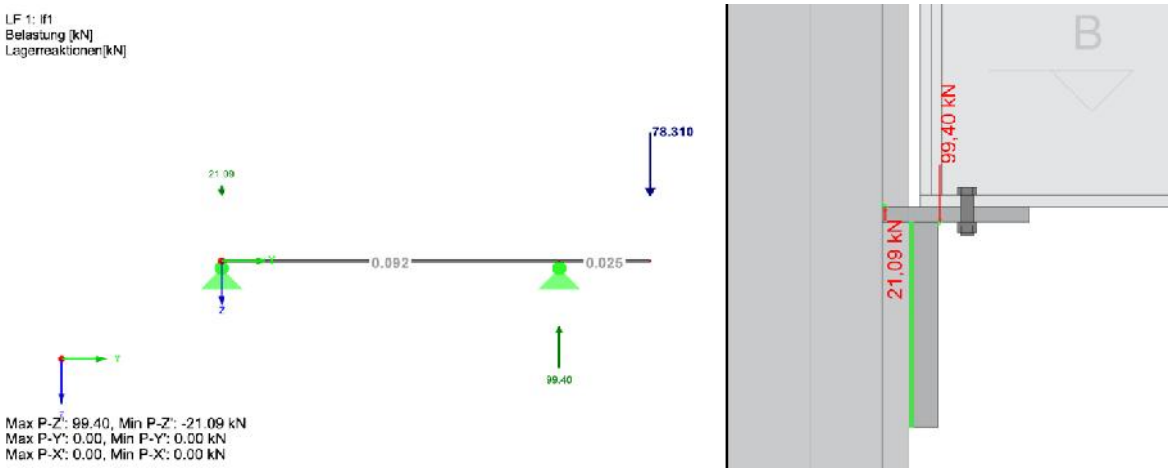


Abbildung 61: Links: Einfaches statisches Modell zur Ermittlung der Querkräfte in z-Richtung in den Schweißnähten, RSTAB, rechts: Darstellung der Kräfte an den Schweißnähten, AutoCAD

Die negativen Auflagerkräfte entsprechen den einwirkenden Kräften im Schwerpunkt der jeweiligen Schweißnaht.

Die Spannungen in Schweißnaht 1 stellen sich wie folgt dar:

Aus V_z = 99,40 kN: $\tau_\perp = \frac{99{,}40\ \mathrm{kN}}{24{,}26\ \mathrm{cm}^2} = 4{,}10\ \frac{\mathrm{kN}}{\mathrm{cm}^2}$

Aus V_y = 131 kN: $\tau_\parallel = \frac{131{,}14\ \mathrm{kN}}{24{,}26\ \mathrm{cm}^2} = 5{,}41\ \frac{\mathrm{kN}}{\mathrm{cm}^2}$

Aus M_1 = 7,82 kNm: $\tau_\perp = \frac{782\ \mathrm{kNcm}}{123{,}59\ \mathrm{cm}^3} = 6{,}33\ \frac{\mathrm{kN}}{\mathrm{cm}^2}$

mit: $W_{w,1} = \frac{0{,}794 * 30{,}56^3}{12} * \frac{1}{15{,}28} = 123{,}59\ \mathrm{cm}^3$

Schweißnahtdicke a_w = 0,794 cm (5/16 in)

Schweißnahtlänge l_w = 30,56 cm

Daraus resultiert eine einwirkende Schweißnahtspannung von:

$$\sigma_{w,Ed,A,1} = \sqrt{4{,}10^2 + 5{,}41^2 + 6{,}33^2} = 9{,}28\ \frac{\mathrm{kN}}{\mathrm{cm}^2}$$

Die Spannungen in Schweißnaht 2 stellen sich wie folgt dar:

Aus V_z = 21,09 kN: $\tau_\perp = \frac{21{,}09\ \mathrm{kN}}{29{,}12\ \mathrm{cm}^2} = 0{,}72\ \frac{\mathrm{kN}}{\mathrm{cm}^2}$

Aus V_y = 131 kN: $\tau_\parallel = \frac{131{,}14\ \mathrm{kN}}{29{,}12\ \mathrm{cm}^2} = 4{,}50\ \frac{\mathrm{kN}}{\mathrm{cm}^2}$

Aus M_2 = 22,37 kNm: $\tau_\perp = \frac{2237\ \mathrm{kNcm}}{148{,}34\ \mathrm{cm}^3} = 15{,}08\ \frac{\mathrm{kN}}{\mathrm{cm}^2}$

mit: $W_{w,2} = \frac{0{,}953 * 30{,}56^3}{12} * \frac{1}{15{,}28} = 148{,}34\ \mathrm{cm}^3$

Schweißnahtdicke a_w = 0,953 cm (3/8 in)

Schweißnahtlänge l_w = 30,56 cm

Daraus resultiert eine einwirkende Schweißnahtspannung von:

$$\sigma_{w,Ed,A,2} = \sqrt{0{,}72^2 + 4{,}50^2 + 15{,}08^2} = 15{,}75\ \frac{\mathrm{kN}}{\mathrm{cm}^2}$$

Widerstand

Der Flachstahl des Konsolauflagers besteht ebenfalls aus 44W Stahl, somit ergeben sich dieselbe Zugfestigkeit sowie der Korrelationsbeiwert wie in der vorherigen Bemessung.

Der Schweißnahtwiderstand beträgt:

$$\sigma_{w,Rd,A} = \frac{44{,}8\frac{\mathrm{kN}}{\mathrm{cm}^2} * 0{,}876}{0{,}865 * \sqrt{3}} = 26{,}19\ \frac{\mathrm{kN}}{\mathrm{cm}^2}$$

mit: $\gamma_{M,A}$ = 1,0

Ergebnis

Für Schweißnaht 1 ergebt sich mit der einwirkenden Schweißnahtspannung:

$$\frac{\sigma_{w,Ed,A,1}}{\sigma_{w,Rd,A}} = \frac{9{,}28}{29{,}90} = 0{,}310 \leq 1{,}0$$

Für Schweißnaht 2 ergebt sich mit der einwirkenden Schweißnahtspannung:

$$\frac{\sigma_{w,Ed,A,2}}{\sigma_{w,Rd,A}} = \frac{15{,}75}{29{,}90} = 0{,}527 \leq 1{,}0$$

Die beiden Schweißnähte der Konsolverbindung sind also ohne Berücksichtigung der Normalkraft nur zu 31,0 % bzw. 52,7 % ausgelastet.

5.6 Schlussfolgerung der Bemessung

Sowohl die Scherfestigkeit der Schrauben als auch die Lochleibungsfestigkeit sind bei dieser außergewöhnlichen Belastung deutlich überschritten. Im direkten Vergleich der Festigkeiten ist zu erkennen, dass die Scherfestigkeit mit $F_{v,Rd,A}$ = 145,76 kN vor der Lochleibungsfestigkeit mit $F_{b,Rd,A}$ = 189,28 kN erreicht wird.

Da die Schraubverbindung offensichtlich deutlich vorher versagt, sind die Schweißverbindungen mit ihrer erheblich höheren Festigkeit nicht maßgeblich. Die Bemessung der Schweißnähte am Winkel bzw. der direkten Schweißnähte am Konsolauflager haben gezeigt, dass diese trotz außergewöhnlicher Belastung nicht ausgelastet sind.
Aus diesem Grund wurden auch die beiden weiteren Schweißnähte, welche den Flachstahl pg an den *side plates* halten, nicht bemessen. Auch unter diesen außergewöhnlichen Umständen eines Brandes sind die geschweißten Verbindungen nicht überlastet.

Es lässt sich somit aus der Bemessung schließen, dass die Verbindung des Hauptträgers A2001 an der Stütze 79 im 13. Stockwerk von WTC 7 aller Wahrscheinlichkeit nach durch Abscheren der Schrauben versagte.
Wichtig hierbei ist, dass diese Verbindung deshalb nicht zwingend ihre Tragfähigkeit verliert. Die Funktion des Konsolauflagers bleibt vorerst trotz horizontal verschieblichem Träger bestehen. Aus dem Versagen der Schraubverbindung kann also nicht grundsätzlich auf ein lokales Versagen des Tragwerks geschlossen werden.
Von der Geometrie der Verbindung und den einwirkenden Kräften wäre es wahrscheinlich, dass sich der Träger A2001 horizontal zur Stütze 79 hin und global gesehen nach Westen (bzw. siehe Abbildung 62 nach „oben“) verschiebt. Dabei würde der Träger an der *side plate* der Stütze 79 hängenbleiben.

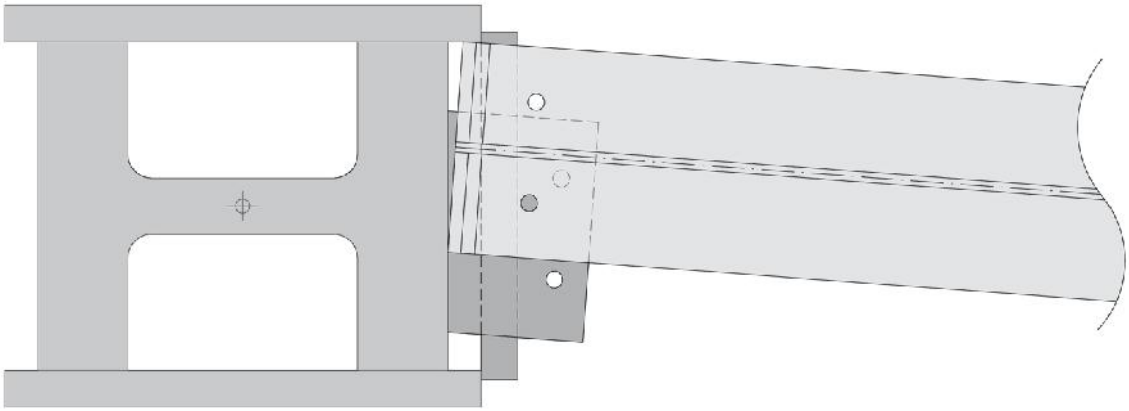


Abbildung 62: Mögliche horizontale Verschiebung des Trägers A2001 auf dem Konsolauflager an Stütze 79, AutoCAD

Der Abbildung ist zu entnehmen, dass sich auch bei maximaler Verschiebung des Trägers dessen Schwerachse weiterhin auf dem Konsolauflager befindet. Der Träger würde daher nicht vom Auflager fallen.

5.7 Kritik an der offiziellen Erklärung

5.7.1 Freier Fall während des Kollapses

NIST gibt an, dass über den beobachtbaren Zeitraum die Oberkante von WTC 7 mit 40 % der Erdbeschleunigung zu Boden fällt (NIST, 2008b, S. 601). Eine Aussage über eine durchschnittliche Beschleunigung ist nicht aussagekräftig. Mit dem Vergleich dieser durchschnittlichen Beschleunigung und der Erdbeschleunigung werden die einzelnen momentanen Beschleunigungswerte ignoriert.
In folgender Abbildung ist ein Diagramm zu sehen, in dem die Messpunkte an der Oberkante der Nordfassade in Geschwindigkeit über die Zeit abgetragen sind.

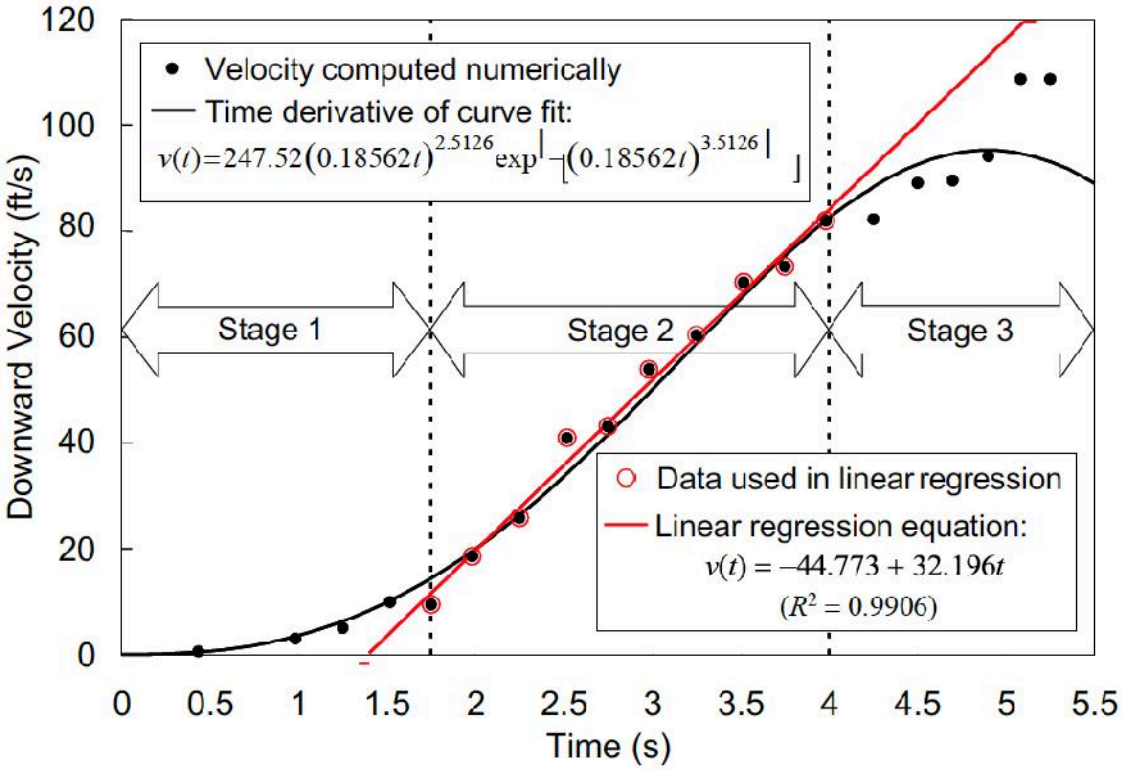


Abbildung 63: Diagramm der Geschwindigkeit über die Zeit mit Messpunkten der Oberkante der Nordfassade, NIST NCSTAR 1-9, Seite 603, Abb. 12-77

In der sog. Stage 2 zeigt die rote Linie die Ausgleichsgerade der einzelnen Messpunkte in diesem Intervall. Die Steigung der Geraden entspricht der Beschleunigung der Oberkante der Fassade. Aus der angegebenen Funktionsgleichung v(t) kann die Steigung mit 32,196 abgelesen werden. Die Erdbeschleunigung beträgt 32,174 ft/s^2 (9,81 m/s^2). Somit entspricht die Beschleunigung der Oberkante der Nordfassade im Intervall Stage 2 der Erdbeschleunigung. Dies ist eine wichtige Erkenntnis, da ein Gebäude nicht von selbst dazu imstande ist. Wenn ein Objekt mit Erdbeschleunigung zu Boden fällt, bedeutet das, dass kein anderer Widerstand auf dieses Objekt einwirkt, da sich sonst die Beschleunigung verringern würde. Für WTC 7 würde das bedeuten, dass in diesem Zeitraum keinerlei Widerstand der unteren Stockwerke vorhanden war. Die Stützen hätten alle im selben Moment über eine Länge von ca. 8 Stockwerken versagen müssen und nicht im Weg der oberen Stockwerke liegen dürfen.

Für den Zeitraum von 2,25 s freiem Fall gibt NIST keine Erklärung ab. Dieses Intervall des freien Falls ist außerdem nicht im NIST Modell des Kollapses von WTC 7 enthalten.

5.7.2 Temperaturdehnung laut Popular Mechanics

Popular Mechanics (PM), eine amerikanische Fachzeitung für Naturwissenschaften und Technik, veröffentlichte 2006 ein Buch mit dem Titel „Debunking 9/11, Myths Why conspiracy theories can't stand up to the facts" (Widerlegen von 9/11 Mythen, warum Verschwörungstheorien den Fakten nicht gewachsen sind). 2011 wurde dann eine erweiterte Ausgabe dieses Buches veröffentlicht, welche zusätzlich Kapitel zu WTC 7 enthält. Ziel des Buches und Einstellung von PM sind bereits dem Titel zu entnehmen. Bereits zu Beginn des Buches wird der Standpunkt mit den Worten „As with so many conspiracy claims, the whole elaborate fantasy becomes practically laughable on close examination." (Wie mit so vielen Behauptungen über Verschwörungen wird die gut durchdachte Phantasie bei genauerer Untersuchung einfach lachhaft.) (Popular Mechanics, 2011, p. xii) deutlich. Damit ist es nicht verwunderlich, dass kaum auf sachliche Argumente von AE9/11Truth eingegangen wird.
Zu erwähnen ist eine Passage, in welcher es um die Einsturzursache, Temperaturdehnung der Stahlträger, geht. PM macht Angaben von Werten, die im Folgenden nachvollzogen werden.
Es ist die Rede vom Wärmedehnungskoeffizient der Stahlträger.
„The heat caused 30-foot steel beams that supported the floors in the northeast corner to expand—0.0000065 inches per inch of the original length for each degree Fahrenheit, a process known as `thermal expansion´." (Popular Mechanics, 2011, p. 70). Also ein Wärmedehnungskoeffizient von α_T = 0,0000065 $\frac{in}{in \times °F}$.
Weiter heißt es: „At that coefficient of expansion, a 50-foot steel beam increases in length by .39 inches—more than one-third of an inch—for every increase of 100 degrees Fahrenheit." (Popular Mechanics, 2011, p. 70).

Für einen 50 Fuß Stahlträger würde somit also $\Delta l_{50\ ft,\ T} = 0.39\ \frac{in}{100°F} = 0{,}0039\ \frac{in}{°F}$ gelten. Genauer für die Deckenträger in der nordöstlichen Gebäudeecke behauptet PM:

„Based on the temperatures inside WTC 7, key floor beams increased in length by more than 4.25 inches in the northeast section of the building." (Popular Mechanics, 2011, p. 70). Also $\Delta l_{ges,\ 52\ ft} > 4{,}25$inch für einen 52 ft Stahlträger, nach NIST NCSTAR 1-9 Seite 343, Abb. 8-16.

Die Längenänderung pro Grad Fahrenheit von $\Delta l_{50\ ft,\ T} = 0{,}0039\ \frac{in}{°F}$ auf einen 52 Fuß Stahlträger hochgerechnet ergibt: $\Delta l_{52\ ft,\ T} = \frac{0{,}0039\ \frac{in}{°F}}{50\ ft} \times 52\ ft = 0{,}004056\ \frac{in}{°F}$.

Wenn von einer gesamt Längenänderung von $\Delta l_{ges,\ 52\ ft} = 4{,}25$ in ausgegangen wird, ergibt sich eine Bauteiltemperatur von:

$\frac{4{,}25in}{0{,}004056\frac{in}{°F}} = 1047{,}83°F$, bzw. 564,35°C.

Popular Mechanics gibt im Absatz davor an, dass die Temperaturen der Brandherde in WTC 7 hauptsächlich bei 299°C, also deutlich unter den berechneten 564,35°C und nur in ein paar Fällen bei 593°C lagen (Popular Mechanics, 2011, p. 69).

Wichtig ist, dass PM hier von Temperaturen der Brandherde spricht. Deshalb muss beachtet werden, dass mit einer intakten Brandschutzbeschichtung - „Unlike in Towers 1 and 2, the majority of the building's [WTC 7] fireproofing was still intact when the burn began." (Popular Mechanics, 2011, p. 69) - davon auszugehen ist, dass die Bauteiltemperatur deutlich unter der Brandtemperatur gehalten wird.

Eine ausreichende Erwärmung der Stahlträger im nordöstlichen Gebäudeteil auf die berechnete Temperatur von 564,35°C ist unter diesen Umständen nicht sehr plausibel.

Die Quelle dieser Angaben ist nicht eindeutig festzustellen. Den von NIST durchgeführten Untersuchungen zufolge waren die Temperaturen aber in manchen Bereichen deutlich höher (vgl. Kapitel 3.3.3 Seite 28).

Daher stellt sich die Frage, warum Popular Mechanics in einem Buch, mit dem Ziel der Widerlegung von Kritik an der offiziellen Erklärung Angaben macht, welche nicht mit der offiziellen Untersuchung von NIST übereinstimmen.

5.7.3 FEMA BPS Appendix C

Der Bericht *Building Performance Study* (BPS) von FEMA wurde bereits 2002 veröffentlicht. Darin wurden die Ursachen der Einstürze aller drei WTC Gebäude untersucht. Zum Zeitpunkt der NIST Untersuchung lagen die Ergebnisse des FEMA Berichts somit bereits vor.
Im sog. Appendix C mit dem Titel „Limited Metallurgical Examination“ geht es um die metallurgische Untersuchung zweier Träger aus den Trümmern der WTC Gebäude. Der als Sample 1 bezeichnete Träger scheint von WTC 7 zu stammen, Sample 2 stammt entweder von WTC 1 oder WTC 2.

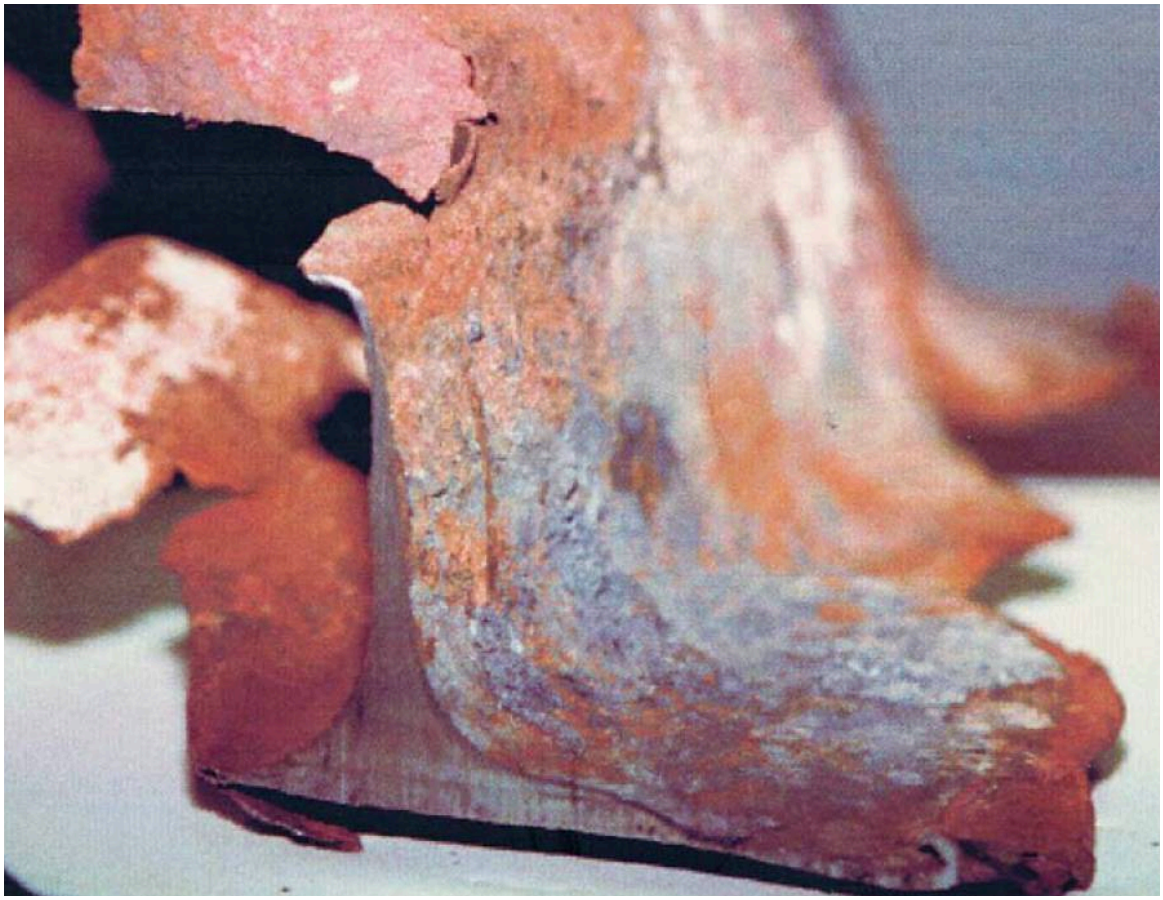


Abbildung 64: Nahaufnahme des erodierten Trägers, FEMA BPS, Seite C-2, Abb. C-2

Beide Träger weisen ungewöhnliche Erosionen auf. Die vorhandenen Strukturen deuten auf starke Hochtemperaturkorrosion, Oxidation und Sulfidation sowie intergranularer Schmelze hin. Aufgrund dieser Vorkommnisse mussten die Träger somit Temperaturen von rund 1000 °C erreicht haben.

FEMA bezeichnet die Heftigkeit der Korrosion und Erosion als untypisch und stellt fest, dass keine eindeutige Erklärung für das Vorkommen des Schwefels gefunden wurde (FEMA, 2002, S. C-1 bis C-13).
NIST bezieht sich in verschiedenen Teilen des Berichts auf den FEMA Bericht, geht aber in keiner Weise auf diese metallurgischen Untersuchungen ein. Dies ist überraschend, da die Ursache dieser Beobachtungen offensichtlich noch nicht geklärt war.

5.7.4 Die NIST Simulation zum Kollaps von WTC 7

Die LS-DYNA Simulationen zeigen den globalen Kollaps des Tragwerks von WTC 7. Das erste der vier Modelle beschreibt laut NIST am besten den tatsächlichen Kollaps (vgl. Kapitel 3.3.4 Seite 30). Folgende Abbildung zeigt einen Ausschnitt der Simulation des Kollapses.

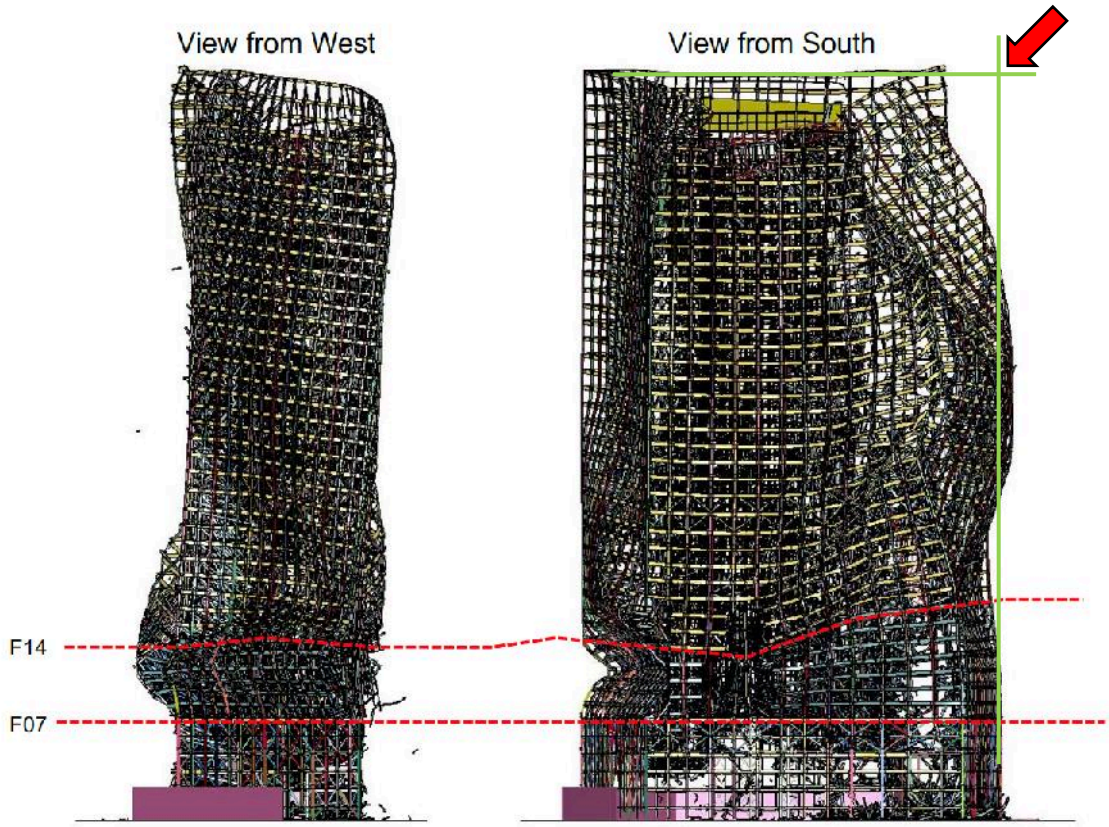


Abbildung 65: LS-DYNA Simulation des Kollapses mit Schäden an Tragwerk und Temperaturbelastung, NIST NCSTAR 1-9, Seite 588, Abb. 12-62, Markierungen hinzugefügt

Die vorhandenen Bilder und Videos dieser Simulation enden alle zu einem sehr frühen Zeitpunkt des Kollapses, nicht viel später als in Abbildung 65 zu sehen. Es ist daher nicht klar, wie der Kollaps der NIST Simulation weiter verläuft oder ob dieser überhaupt simuliert wurde. Im Angesicht der Tragweite dieses Ereignisses und dem vorhandenen Klärungsbedarf über die tatsächlichen Geschehnisse ist diese unvollständige Simulation nicht nachvollziehbar.
Darüber hinaus sind die starken Verformungen der Fassadenträger und -stützen in der NIST Simulation kaum vereinbar mit den vorhandenen Videoaufnahmen des Kollapses.

Abbildung 66: Kollaps von WTC 7 mit Sicht auf die Nordfassade, YouTube Video, Sekunde 17 bis 23, Markierung hinzugefügt, https://www.youtube.com/watch?v=Mamvq7LWqRU

Die in Abbildung 66 markierte nordöstliche Gebäudeecke ist in den Videoaufnahmen gut sichtbar und im Verhältnis zur Gebäudeoberkante kaum verschoben. Die Markierung in Abbildung 65 zeigt, wo diese nordöstliche Gebäudeecke ungefähr hätte liegen müssen. In der Simulation von NIST ist aber der gesamte obere westliche Fassadenteil in das Gebäude eingeklappt. Die nordöstliche Gebäudeecke ist hier somit nicht mehr zu sehen. Auch die gesamte nordöstliche Gebäudekante unterhalb der Ecke ist in den Videoaufnahmen kaum

verformt und bleibt gerade. In der Simulation von NIST ist die Gebäudekante stark nach außen gewölbt.

Die Fassadenverkleidung von WTC 7 bestand hauptsächlich aus Granit und Glas (FEMA, 2002, S. 5-12). Diese spröden Materialien können nicht viel Zugkräfte und Biegung aufnehmen. Wenn sich also die tragende Unterkonstruktion der Fassadenelemente, die Fassadenträger und -stützen, verformt oder wenn sich einzelne Stützen und Träger ungleichmäßig zueinander bewegen, würden aller Wahrscheinlichkeit nach die Fassadenteile versagen. Bei den starken Verformungen aus der NIST Simulation würde dies zu einem deutlich sichtbaren Abfallen großer Teile der Fassadenverkleidung führen. Dies wurde nicht beobachtet. Bis auf wenige Fenster blieb die Fassade während des Kollapses intakt.

Die LS-DYNA Simulation von NIST stimmt somit nicht mit dem tatsächlich beobachteten Kollaps überein.

6 Vergleich der beiden Untersuchungen in Verbindung mit eigenen Erkenntnissen

6.1 Entstehung der Brände und deren Verlauf

Wie in Kapitel 3.3.2 beschrieben, entwickelte NIST auf der Grundlage der vorhandenen visuellen Beweise ein Temperaturmodell mit der Software FDS. Die Entstehung der Brände wird auf die Trümmerteile von WTC 1 zurückgeführt. Dabei wird davon ausgegangen, dass die Trümmer teilweise selbst brannten oder Schäden an elektrischen Leitungen in WTC 7 verursachten, welche dann die Brände verursachten.
Diese Ermittlungen wurden von Hulsey in der UAF Studie nicht überprüft, sondern unverändert als Grundlagen übernommen.
Auch die Berechnungen dieser Arbeit stützten sich auf die ermittelten Temperaturen von NIST.

Somit gibt es in diesem Teil der Untersuchung keine unterschiedlichen Ergebnisse, welche die Validität der Temperaturwerte bestätigen, bzw. in Frage stellen könnten.

6.2 Lokales Versagen des Tragwerks

Den NIST Untersuchungen zufolge führten die Temperaturen der Brände zur thermischen Ausdehnung der Stahlträger. Besonders davon betroffen war offensichtlich der nordöstliche Gebäudeteil in den Stockwerken 12 und 13. Hier führte die Ausdehnung der Deckenträger zum vollkommenen Versagen der Verbindung von Hauptträger A2001 zur Stütze 79 im 13. Stockwerk. Im Gegensatz dazu kommt es in der UAF Untersuchung nicht zu einem Versagen dieser Verbindung. Hulsey zufolge bewirkten dies unter anderem zwei Bauteile. So lautet das Ergebnis der UAF Untersuchung für das lokale Versagen, dass mit den vorhandenen *side plates* an Stütze 79 sowie der halbhohen Stirnplatte an Träger

A2001, die Verbindung trotz versagender Schrauben immer noch ausreichend vertikale Unterstützung bietet.
Aus den Berechnungen dieser Thesis lässt sich schließen, dass die Verbindung von A2001 zu Stütze 79 sehr wahrscheinlich ihre horizontale Tragfähigkeit verloren hat. Die vertikale Tragfähigkeit der Verbindung besteht aber nach wie vor. Den gegebenen Geometrien der Bauteile nach ist es durchaus möglich, dass der Träger A2001 sich horizontal verschiebt, aber an der *side plate* von Stütze 79 gehalten wird. Dass die halbhohe Stirnplatte an A2001 dabei für zusätzliche Steifigkeit sorgt, ist durchaus plausibel.

Es gibt also einen starken Widerspruch zwischen den beiden Untersuchungen in Bezug auf das Verhalten der Verbindung von Träger A2001 zu Stütze 79.

6.3 Globales Versagen des Tragwerks

Den NIST Bericht zufolge führte das Versagen der Verbindung von Träger A2001 zu Stütze 79 zum Einsturz mehrerer Deckenbereiche im nordöstlichen Gebäudeteil von WTC 7. Die daraufhin nicht mehr ausreichend gehaltene Stütze 79 knickt dann aus und lässt weitere Teile der inneren Gebäudestruktur einstürzen. Dies breitete sich NIST zufolge erst von Norden nach Süden und dann von Osten nach Westen im Gebäudeinneren aus, bis nur noch die Gebäudehülle stand, welche daraufhin in sich zusammenbrach.
Den bisherigen Ergebnissen der UAF Untersuchung nach ist das von NIST genannte Versagen nicht die Ursache des Kollapses und somit auch der Hergang des globalen Kollapses nicht zutreffend. Eine genaue Untersuchung des globalen Kollapses durch die UAF ist noch nicht abgeschlossen und steht diesem Vergleich daher nicht zur Verfügung.
Die Berechnungen für diese Thesis umfassten nicht das Verhalten des Tragwerks bei lokalem oder globalem Versagen, was somit keinen Vergleich dieses Punktes zulässt.

6.4 Fazit des Vergleichs

Die beiden Berichte von NIST und UAF zum Kollaps des WTC 7 kommen zu sehr unterschiedlichen Ergebnissen. Dies darf bei einer wissenschaftlichen Untersuchung nicht der Fall sein und impliziert, dass mindestens eine der beiden Untersuchungen nicht zutreffend ist.

7 Ausblick

Das im Rahmen dieser Bachelor Thesis erstellte Modell stellt nur einen Ausschnitt des Gebäudes dar. Zudem handelt es sich dabei um ein Stabwerkmodell. Für weiterführende und genauere Ergebnisse muss das gesamte Tragwerk des Gebäudes modelliert werden, um den Einfluss aller Bauteile entsprechend berücksichtigen zu können. Um das Verhalten der Stahlbetonverbunddecke richtig einbeziehen zu können, wäre die Modellierung eines Finite Elemente Modells sinnvoll.
Für die Bemessung konnten aufgrund der Differenzen zwischen amerikanischen Normen und europäischen Normen nicht immer die tatsächlichen Bauteil- und Materialeigenschaften verwendet werden. Es wurden teilweise Kennwerte ähnlicher europäischer Bauteile und Materialien verwendet. Um hier eine höhere Genauigkeit zu erzielen ist es nötig, für alle Bauteile und Materialien die richtigen Kennwerte zur Verfügung zu haben und für die Berechnung zu verwenden.

Da sich die gesamten Berechnungen auf die unzureichend genauen Temperaturangaben von NIST stützen, liegt hier die größte Ungenauigkeit. Um hierfür aussagekräftigere Ergebnisse zu erlangen ist es sinnvoll, die Temperaturen durch die Brände unabhängig von den Ergebnissen von NIST erneut zu ermitteln. Außerdem wäre es hilfreich, wenn NIST die Modelldaten zu den eigenen Temperatursimulationen veröffentlichen würde. Eine wissenschaftliche Studie zeichnet sich vor allem dadurch aus, dass ihre Inhalte und Einflussgrößen nachvollziehbar und überprüfbar sind.

7.1.1 Abschluss der UAF Studie

Nach aktuellem Stand (Mai 2019) soll die Studie im Juli 2019 abgeschlossen sein und veröffentlicht werden. Dann werden auch die ausführlichen Simulationen zum progressiven Kollaps fertiggestellt sein. Es wird eine Untersuchung enthalten sein, bei der das Verhalten des Tragwerks untersucht wird, wenn unterschiedliche

Stützen aus dem Modell entfernt werden. Auch die Träger an der Fassade werden genauer untersucht werden. Außerdem wird die Möglichkeit eines Versagens in den unteren Geschossen untersucht.
Der progressive Kollaps wird so simuliert werden, um dem tatsächlichen Kollaps so nahe wie möglich zu kommen. Das daraus folgende Ergebnis wird dann zeigen, welche Verhältnisse in der Ausgangssituation die Grundlage für den beobachteten Kollaps darstellten (Hulsey, Xiao, & Quan, 2017).

7.1.2 Thermite Paper

Einige Wissenschaftler, an erstere Stelle sei Niels H. Harrit genannt, untersuchten insgesamt vier Staubproben der Einstürze aller drei WTC Gebäude. Die Ergebnisse sind in dem Bericht „Active Thermitic Material Discovered in Dust from the 9/11 World Trade Center Catastrophe" im Open Chemical Physics Journal 2009 veröffentlicht worden. Der Bericht ist im Internet frei abrufbar und kann bei Eingabe des genannten Titels gefunden werden.
In diesem Bericht wird dargelegt, dass in allen vier Proben unter anderem sog. *red/grey chips* (rot/graue Chips) gefunden wurden.

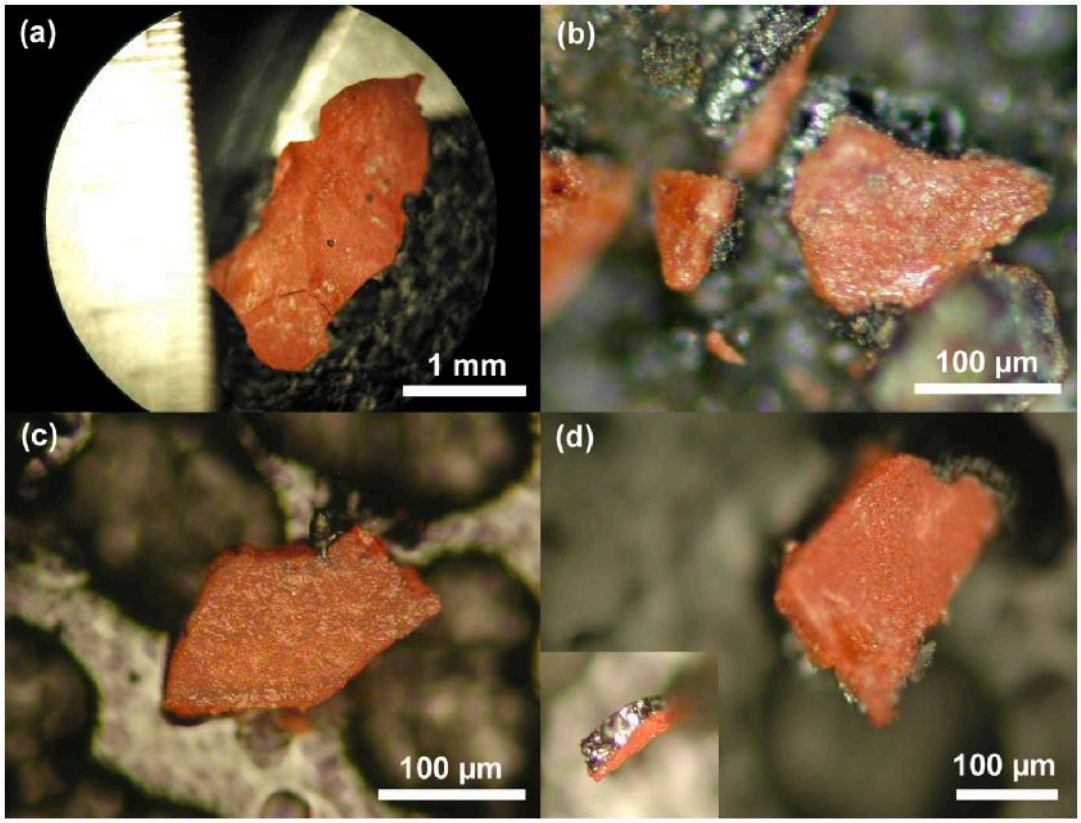


Abbildung 67: Mikroskopische Fotografien der red/grey chips aller vier Staubproben, Harrit, et al., Seite 10

Untersuchungen ergaben, dass es sich bei der roten Schicht der Chips um unreagiertes thermitisches Material handelt, ein hochenergetisches Material. Da das vorgefundene Eisenoxid und Aluminium in deutlich feinerer Form als bei gewöhnlichem Thermit vorlagen, wird hier von Nano-Thermit gesprochen (Harrit, et al., 2009). Thermit ist ein Gemisch aus Eisenoxid (Fe_2O_3) und elementarem Aluminium (Al). Wenn dieses Gemisch der Aktivierungsenergie ausgesetzt ist, startet eine stark exotherme Redoxreaktion, bei der das Eisenoxid reduziert und das Aluminium oxidiert werden.

$$Fe_2O_3 + 2\ Al \rightarrow 2\ Fe + Al_2O_3$$

Diese Reaktion läuft ohne zusätzlichen Sauerstoff ab, da der im Eisenoxid vorhandene Sauerstoff für die Reaktion ausreicht. Die Reaktion kann somit auch beispielsweise unter Sand oder unter Wasser ablaufen und ist deshalb schwer zu löschen. Da Temperaturen von bis zu 2500 °C entstehen, verflüssigen sich die Reaktionsprodukte (Wikipedia, 2019).

Es wurden außerdem in allen Staubproben feine Eisenkügelchen gefunden, sog. *iron spheres*.

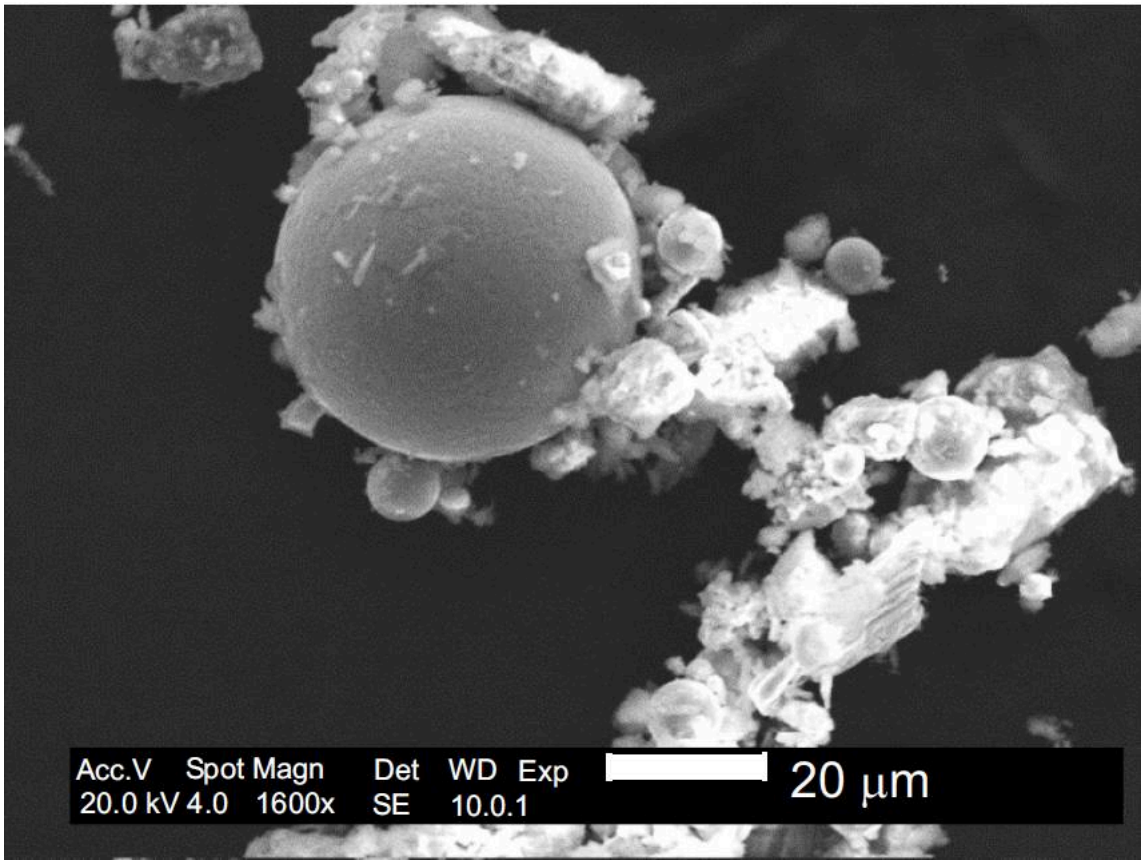


Abbildung 68: Eisenkügelchen (iron sphere) aus dem WTC Staub, Thermite Paper, Seite 24, Abb. 27

Für die Entstehung dieser kleinen Eisenkügelchen bedürfte es einer Temperatur von 1400 °C, um das Eisen zum Schmelzen zu bringen. Ansonsten wäre die Formung solcher runden Kügelchen nicht möglich (Harrit, et al., 2009, S. 21).
Bei der Erhitzung der *red/grey chips* in einem *Differential Scanning Calorimeter* (Dynamischer Differenzkalorimeter) wurde festgestellt, dass sich während des Erhitzens diese Eisenkügelchen gebildet haben mussten, da diese vorher nicht vorhanden waren (Harrit, et al., 2009, S. 19). Auch der Test mit herkömmlichem Thermit zeigte, dass sich während der Reaktion kleine Kügelchen aus elementarem Eisen gebildet hatten (Harrit, et al., 2009, S. 23).
Diese Rückstände sollte bei einem gewöhnlichen Gebäudeeinsturz nicht vorhanden sein und werden auch nicht im Zuge eines gewöhnlichen Brandes von Kohlenwasserstoffverbindungen oder eines Einsturzes gebildet.
NIST hat sich trotz dieser äußerst wichtigen Informationen dieses Berichtes nicht dazu geäußert.

7.1.3 Freier Fall beim Kollaps von WTC 7

David Chandler, ein ehemaliger amerikanischer Physiklehrer und Unterstützer von AE9/11Truth, schrieb unter anderem einen Bericht zum freien Fall von WTC 7. In dem Bericht mit dem Titel „Free Fall and Building 7 on 9/11“ beschreibt Chandler, dass nach eigenen Messungen WTC 7 für rund 2,5 s mit voller Erdbeschleunigung zu Boden fällt. Die daraus folgende Konsequenz ist, dass in dieser Zeit dem fallenden Gebäude kein Widerstand geboten wurde. Dies würde bedeuten, dass die gesamte untere Struktur im selben Augenblick ihre Tragkraft verlor und dem oberen Gebäudeteil nicht mehr im Weg stand (Chandler, 2014).
Im ursprünglichen Bericht von NIST war von einer geringeren Beschleunigung als der der Erdbeschleunigung die Rede. Nachdem Chandler und weitere Personen NIST auf den freien Fall von WTC 7 ansprachen, räumte NIST im endgültigen Bericht NCSTAR 1A ein, dass es einen Zeitraum von 2,25 s gab, in dem WTC 7 im freien Fall einstürzte. Eine Erklärung des freien Falls gibt NIST nicht ab (Chandler, 2014).
Außerdem kritisiert Chandler die Art der Zeitmessung von NIST, da die Uhr bereits vor sichtbarem Beginn des Einsturzes zu zählen beginnt (Chandler, 2014).

Schluss

Das Ergebnis der Untersuchungen von NIST ist, dass WTC 7 aufgrund gewöhnlicher Bürobrände einstürzte. Die Brandtemperaturen führten zur thermischen Ausdehnung des Stahltragwerks, welches an Stütze 79 im 13. Stockwerk von WTC 7 versagt haben soll. Aus diesem lokalen Kollaps entstand durch eine Aneinanderkettung von Versagensereignissen der globale Kollaps des Gebäudes.

Die Untersuchung der UAF dagegen liefert das Ergebnis, dass gewöhnliche Brände nicht Ursache des Einsturzes gewesen sein konnten. Das Tragwerk hätte den Temperaturbelastungen standhalten müssen. Mögliche lokale Versagen hätten nicht zu einem globalen Kollaps geführt.

Die Berechnungen im Rahmen dieser Bachelor Thesis legen den Schluss nahe, dass die Verbindung des Hauptträgers A2001 an Stütze 79 durch Abscheren der Schrauben versagte. Die Scherfestigkeit dieser Schraubverbindung, welche hauptsächlich der Lagesicherung diente, wurde durch die außergewöhnliche Belastung aus starker Druckkraft und Querkraft in y-Richtung deutlich überschritten. Das Versagen der Schraubverbindung hat allerdings nicht grundsätzlich das Versagen der gesamten Verbindung zur Folge. Das Konsolauflager bietet auch ohne horizontale Lagerung genügend Widerstand in vertikaler Richtung. Aufgrund der *side plate* an Stütze 79 ist es möglich, dass der Träger trotz horizontaler Verschiebung auf dem Auflager bleibt.

Das Hinterfragen der offiziellen Erklärung ist somit nicht nur nach gängigem naturwissenschaftlichem Vorgehen, sondern auch in Anbetracht der vorliegenden Erkenntnisse berechtigt. Es ist daher eine erneute Aufarbeitung der Geschehnisse am 11. September 2001 notwendig. Dies sollte in Zusammenarbeit mit unabhängigen Institutionen erfolgen und der Öffentlichkeit transparent dargelegt werden.

Literaturverzeichnis

AE9/11Truth. (2017a). *ae911truth*. Abgerufen am 04. Mai 2019 von https://www.ae911truth.org/who-we-are

AE9/11Truth. (2017b). *ae911truth*. Abgerufen am 04. Mai 2019 von https://www.ae911truth.org/mission

AE9/11Truth. (Mai 2019). *ae911truth*. Abgerufen am 04. Mai 2019 von https://www.ae911truth.org

Albert, A. (2016). *Bautabellen für Ingenieure 22. Auflage.* Köln: Bundesanzeiger Verlag GmbH.

Aust, S., & Schnibben, C. (2002). *11. September - Geschichte eines Terrorangriffs.* Stuttgart, München/Hamburg: Deutsche Verlags-Anstalt/Spiegel Buchverlag.

bpb. (11. September 2013). *bpb.de*. Abgerufen am 26. April 2019 von Bundeszentrale für politische Bildung: https://www.bpb.de/politik/hintergrund-aktuell/168712/9-11-und-die-politischen-folgen-11-09-2013

CEM. (kein Datum). *cem.uaf.edu*. Abgerufen am 04. Mai 2019 von College of Engineering and Mines: http://cem.uaf.edu/cee/people/leroy-hulsey.aspx

Chandler, D. (16. April 2014). Abgerufen am 24. März 2019 von ae911truth.org: https://www.ae911truth.org/evidence/technical-articles/articles-by-ae911truth/101-free-fall-and-building-7-on-9-11

DHS. (24. September 2015a). *dhs.gov*. Abgerufen am 03. April 2019 von Department of Homeland Security: https://www.dhs.gov/creation-department-homeland-security

DHS. (15. September 2015b). *dhs.gov*. Abgerufen am 03. April 2019 von Department of Homeland Security: https://www.dhs.gov/who-joined-dhs

DHS. (11. Mai 2016). *dhs.gov*. Abgerufen am 03. April 2019 von Department of Homeland Security: https://www.dhs.gov/our-mission

DIN Deutsches Institut für Normung e. V. (Dezember 2010). DIN EN 1993-1-2. *Eurocode 3: Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten - Teil 1.2: Allgemeine Regeln - Tragwerksbemessung für den Brandfall; Deutsche Fassung EN 1993-1-2:2005 + AC:2009*. Berlin, Deutschland: Beuth Verlag.

FEMA. (2002). *World Trade Center Building Performance Study.* Washington DC; New York: U.S. Government Printing Office.

Fouad, N. A., Schwedler, A., & Merkewitsch, T. (2017). *Brandschutz-Bemessung auf einen Blick nach Eurocodes und DIN 4102.* Berlin: Beuth Verlag.

Griffin, D. R., & Woodworth, E. (2018). *9/11 Unmasked - An international review panel investigation.* Northampton: Olive Branch Press.

Harrit, N. H., Farrer, J., Jones, S. E., Ryan, K. R., Legge, F. M., Farnsworth, D., . . . Larsen, B. R. (2009). Active Thermitic Material Discovered in Dust from the 9/11 World Trade Center Catastrophe. *The Open Chemical Physics Journal*, S. 7 - 31.

Hass, R., Meyer-Ottens, C., & Richter, E. (1994). *Stahlbau Brandschutz Handbuch.* Berlin: Ernst & Sohn Verlag.

History.com Editors. (21. Juni 2011). *history.com*. Abgerufen am 15. April 2019 von HISTORY: https://www.history.com/topics/21st-century/9-11-timeline

History.com Editors. (19. Dezember 2017). *history.com*. Abgerufen am 15. April 2019 von HISTORY: https://www.history.com/topics/21st-century/patriot-act

History.com Editors. (01. Februar 2019). *history.com*. Abgerufen am 17. April 2019 von HISTORY: https://www.history.com/topics/21st-century/war-on-terror-timeline

Hulsey, L. J., Xiao, F., & Quan, Z. (2017). *A Structural Reevaluation of the Collapse of World Trade Center 7 - Progress Report.*

NIST. (2008a). *NCSTAR 1A - Final Report on the Collapse of World Trade Center Building 7.* Washington: U.S. Government Printing Office.

NIST. (2008b). *NCSTAR 1-9 - Structural Fire Response and Probable Collapse Sequence of World Trade Center Building 7, Volume 1 an 2.* Washington: U.S. Government Printing Office.

NIST. (2008c). *NCSTAR 1-9A - Global Structural Analysis of the Response of World Trade Center Building 7 to Fires and Debris Impact Damage.* Washington: U.S. Government Printing Office.

NIST. (November 2012). Abgerufen am 03. April 2019 von https://www.nist.gov/director/nists-responsibilities-under-national-construction-safety-team-act

NIST. (14. März 2017). *nist.gov*. Abgerufen am 02. April 2019 von https://www.nist.gov/news-events/news/2017/03/federal-program-reduce-windstorm-impacts-requests-comments-new-strategic

Pfundstein, M., Gellert, R., Spitzner, M. H., Sprengard, C., Albrecht, W., & Rudophi, A. (2007). *Dämmstoffe - Grundlagen Materialien Anwendung.* München: Institut für internationale Architekturdokumentation GmbH & Co. KG.

Popular Mechanics. (2011). *Debunking 9/11 myths - Why conspiracy theories can't stand up to the facts.* New York: Hearst Books.

portlandbolt.com. (kein Datum). *portlandbolt*. Abgerufen am 17. Juni 2019 von https://www.portlandbolt.com/technical/specifications/astm-a325/

U.S. Department of Justice. (kein Datum). *foia.gov*. Abgerufen am 19. April 2019 von https://www.foia.gov/about.html

U.S. Government. (01. Oktober 2002). Public Law 107-231. *National Construction Safety Team Act*. Vereinigte Staaten von Amerika: U.S. Government Printing Office.

UAF INE. (kein Datum). *UAF Institute of Northern Engineering*. Abgerufen am 04. Mai 2019 von http://ine.uaf.edu/wtc7

Weather Underground. (kein Datum). Abgerufen am 10. Mai 2019 von Wunderground.com: https://www.wunderground.com/history/daily/us/ny/new-york-city/KLGA/date/2001-9-11

Wikipedia. (08. Mai 2019). *Wikipedia*. Abgerufen am 19. Juni 2019 von https://de.wikipedia.org/wiki/Thermitreaktion

Erklärung gemäß §27 (1) SPO-Teil A (2016)

Hiermit erkläre ich, dass ich die vorliegende Bachelorarbeit selbstständig verfasst habe.
Außer den genannten Quellen und Hilfsmitteln habe ich keine weiteren Hilfsmittel in Anspruch genommen.

Datum: ……

Unterschrift: ……